Sustainable Urban & Regional Development Studies Quarterly

Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 202-221
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

Research Trends in the Application of Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization in Residential Complex Design, with an Emphasis on Energy Consumption, Thermal Comfort, and Carbon Emissions

Amir Hossein Shirdel*
Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ARTICLEINFO

Research Paper

Article history:
Received: 15 August 2026
Accepted: 03 November 2026
Published online: 05 November 2026

Keywords: *Artificial intelligence, multi-objective optimization, evolutionary algorithms, residential complexes, thermal comfort, energy consumption, carbon emissions.*

https://www.srds.ir/?adsc=4192

Abstract

Background and Objective: The residential sector is one of the key areas for intervention to achieve urban sustainability due to its continuous energy consumption, extensive reliance on heating and cooling systems, and substantial contribution to carbon emissions. However, reducing energy consumption in residential complexes often conflicts with objectives such as ensuring residents' thermal comfort, lowering costs, managing energy loads, and reducing carbon emissions. Therefore, conventional design and decision-making approaches based on trial and error are inadequate for addressing the complexities of sustainable housing design, as they cannot simultaneously account for multiple variables and the nonlinear relationships among them.

Methodology: This study aims to map the knowledge structure, conceptual evolution, thematic clusters, and research gaps in this field. A bibliometric and scientometric approach was adopted. Data were retrieved from the Web of Science (WoS) and Lens databases. Following the screening and removal of duplicate and irrelevant documents, 167 English-language research and review articles published between 2021 and 2026 were included in the analysis. Data analysis was conducted using VOSviewer and Bibliometrix and involved examining co-authorship networks, keyword co-occurrence, temporal trends in publication output and citations, source analysis, Bradford's law, Lotka's law, multiple correspondence analysis, and other bibliometric techniques.

Results and findings: The findings indicate that energy efficiency and energy consumption remain at the conceptual core of the literature; however, research has rapidly moved toward integrating artificial intelligence, machine learning, evolutionary algorithms, energy management, renewable energy, and multi-objective optimization. As the most prominent emerging topic, multi-objective optimization provides a framework for balancing energy consumption, carbon emissions, thermal comfort, and grid performance. Nevertheless, limited field validation, insufficient attention to actual occupant behavior and building life-cycle carbon emissions, fragmented scientific collaboration networks, and limited model interpretability constitute the major research gaps in this field. Therefore, the future development of this research domain lies in the development of transparent, data-driven, and context-sensitive decision-support platforms capable of simultaneously optimizing environmental objectives and residential quality in the design of residential complexes.

Citation. Shirdel, A. H. (2026). Research Trends in the Application of Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization in Residential Complex Design, with an Emphasis on Energy Consumption, Thermal Comfort, and Carbon Emissions. ***Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)***, 7(4), 202–221.
https://www.srds.ir/article_256328.html?lang=en

© The Author(s). Publisher: ***Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association.***

Corresponding author: Email: am.shirdel@mail.sbu.ac.ir

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 202-221
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The residential sector plays a critical role in achieving urban sustainability due to its substantial energy consumption, dependence on heating and cooling systems, and contribution to carbon emissions throughout building operation and the life cycle of construction materials. Designing sustainable residential complexes requires balancing multiple, often conflicting objectives, including reducing energy consumption, improving thermal comfort, minimizing carbon emissions, controlling costs, and managing energy demand. Conventional design approaches based on trial and error are often inadequate for addressing these complex interactions because they cannot efficiently evaluate numerous design variables and their nonlinear relationships.

Recent advances in artificial intelligence (AI), machine learning, and evolutionary algorithms have created new opportunities for data-driven building performance prediction and multi-objective design optimization. These approaches can support the evaluation of alternative design scenarios and identify trade-offs among competing performance criteria. Nevertheless, the growing body of research remains conceptually and methodologically diverse, and the relationships between established research themes, emerging computational methods, and practical architectural applications require further clarification.

Against this background, this study investigates the temporal evolution, intellectual structure, thematic clusters, and methodological gaps in global research on AI- and evolutionary algorithm-based multi-objective optimization for residential building design. Particular attention is given to the integration of energy efficiency, thermal comfort, carbon reduction, and intelligent energy management. By mapping the development and interconnections of research themes, the study seeks to identify emerging priorities and establish a knowledge-based foundation for future research and the development of reliable, context-sensitive decision-support systems for sustainable residential design.

Methodology

This study employed a bibliometric and scientometric approach to examine the structure and evolution of scientific knowledge concerning AI-based and evolutionary multi-objective optimization in residential building design. Publications were retrieved from the Web of Science (WoS) and Lens databases through searches conducted on August 9, 2026. The search strategy covered titles, abstracts, and keywords using combinations of terms related to residential buildings, artificial intelligence, machine learning, evolutionary algorithms, multi-objective optimization, energy consumption, thermal comfort, and carbon emissions.

The dataset was restricted to English-language research and review articles published between 2021 and 2026. Following the removal of duplicate and irrelevant records, 167 publications were retained for analysis. The data were analyzed using VOSviewer and Bibliometrix in R to investigate the intellectual, conceptual, and collaborative structures of the research field.

The analytical procedures included co-authorship network analysis, keyword co-occurrence mapping, temporal analysis of publication output and citations, examination of source productivity and influence, Bradford's law of scattering, Lotka's law of author productivity, thematic mapping, multiple correspondence analysis (MCA), and hierarchical clustering of keyword co-occurrences. These complementary techniques were used to identify influential research contributors and publication sources, characterize the relationships among major research themes, and trace the emergence of new topics over time.

The methodological framework enabled an integrated assessment of the field's development, moving beyond publication counts to examine conceptual transitions, thematic maturity, scientific collaboration patterns, and gaps between computational advances and their practical application in sustainable residential design.

Results and Discussion

The findings reveal that energy efficiency and energy consumption remain the central concepts in the research field, while the literature has progressively expanded toward artificial intelligence, machine learning, evolutionary algorithms, renewable energy, smart grids, and multi-objective optimization. The keyword co-occurrence analysis identified 11 thematic clusters, encompassing intelligent building modeling, energy management, residential building performance, thermal comfort, carbon reduction, predictive control, demand response, building retrofitting, low-carbon technologies, and performance simulation. These clusters demonstrate the increasingly interdisciplinary nature of research at the intersection of

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 202-221
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

architecture, energy engineering, and computational science.

Temporal analysis indicates a shift from an initial emphasis on energy efficiency and consumption toward integrated energy management and renewable energy systems, followed by the growing prominence of AI-assisted multi-objective optimization. The increasing significance of multi-objective optimization reflects a methodological transition from single-objective energy reduction toward the simultaneous consideration of energy performance, thermal comfort, carbon emissions, costs, and grid-related objectives. Thematic mapping further identifies energy efficiency, residential buildings, thermal comfort, and sustainability as foundational themes, while energy management, load scheduling, and smart grids function as important drivers of research development.

The analysis also reveals limitations in the maturity and practical integration of computational methods. Specialized approaches, including reinforcement learning, model predictive control, and artificial neural networks, have developed within distinct research areas but remain insufficiently integrated into architectural design workflows. Scientific collaboration networks are relatively fragmented, with knowledge production concentrated among a limited number of recurring contributors.

Four major research gaps emerge: insufficient field validation using real building-operation data; inadequate representation of actual occupant behavior; limited integration of embodied carbon and whole-life-cycle environmental impacts; and insufficient consideration of climatic, economic, cultural, and physical context. Limited model interpretability further constrains practical adoption. Collectively, these findings suggest that future progress depends not merely on developing more sophisticated algorithms, but on integrating computational methods with empirical evidence, transparent decision-making, and context-sensitive design requirements.

Conclusion

This study provides a bibliometric and scientometric overview of the development, intellectual structure, thematic organization, and methodological gaps in research on AI- and evolutionary algorithm-based multi-objective optimization for sustainable residential building design. The findings demonstrate that the field has evolved from a predominantly energy-efficiency-oriented perspective toward a more integrated framework in which energy consumption, thermal comfort, carbon emissions, renewable energy, and intelligent energy management are increasingly interconnected.

Multi-objective optimization represents a particularly important direction in this transition because it enables the systematic evaluation of competing design objectives rather than prioritizing energy reduction in isolation. Nevertheless, the practical contribution of these computational approaches remains constrained by limited empirical validation, simplified representations of occupant behavior, insufficient consideration of whole-life-cycle carbon emissions, fragmented scientific collaboration, and limited model interpretability. Differences in climatic, economic, and cultural conditions also challenge the transferability of optimization results across residential contexts.

Future research should prioritize hybrid frameworks that combine machine learning, evolutionary algorithms, and computational building simulations, supported by monitored operational data and systematic field validation. Incorporating occupant behavior, life-cycle environmental impacts, investment and operating costs, indoor environmental quality, and contextual constraints into optimization objectives could improve the practical relevance of design recommendations. In addition, transparent reporting, sensitivity and uncertainty analysis, standardized datasets, and stronger interdisciplinary collaboration are essential for improving reproducibility and reliability.

Ultimately, the principal challenge is bridging the gap between computational innovation and architectural practice. Developing interpretable, data-driven, and context-sensitive decision-support platforms could help architects, engineers, and policymakers evaluate design alternatives more effectively and advance residential complexes that reconcile environmental performance with occupants' thermal comfort and quality of living.

Declarations

Funding: There is no funding support.

Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

1.Abdelhady, M. I. M. (2021). Numerical simulation for the geometrical courtyard parameters affecting the indoor natural

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 202-221
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

ventilation, case study in Sur, Oman. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, *13*(3), 1-15.https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/20043

2.Akyüz, M. K. (2025). Enviroeconomic optimization of insulation thickness for building exterior walls through thermoeconomic and life cycle assessment analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, *65*, 105606. 10.1016/j.csite.2024.105606

3.Al-Tamimi, N. (2021). Cost benefit analysis of applying thermal insulation alternatives to Saudi residential buildings. *JES. Journal of Engineering Sciences*, *49*(2), 156-177. 10.21608/JESAUN.2021.50485.1021

4.Asadpour, F., Shirdel, A. H., & Naghipour, P. (2024). Evaluation of perceptual indicators of physical environment affecting the inducement of citizen's sense of place in urban neighborhoods. *Energy and Buildings*, *325*, 114992. 10.1016/j.enbuild.2024.114992

5.Asadpour, F., Shirdel, A. H., Naghipour, P., & Naghipour, A. (2026). Bioclimatic Patterns and Socio-Behavioral Drivers Effective in Mitigating Thermal Hazards in Dense Urban Fabrics. *Geography and Human Relationships*, e252356. (In Persian) 10.22034/gahr.2026.600007.2839

6.Chou, J. S., & Nguyen, H. M. (2024). Simulating long-term energy consumption prediction in campus buildings through enhanced data augmentation and metaheuristic-optimized artificial intelligence. *Energy and Buildings*, *312*, 114191. 10.1016/j.enbuild.2024.114191

7.Dasi, H., Ying, Z., & Ashab, M. F. B. (2024). Proposing hybrid prediction approaches with the integration of machine learning models and metaheuristic algorithms to forecast the cooling and heating load of buildings. *Energy*, *291*, 130297.10.1016/j.energy.2024.130297

8.Fellah, M., Ouhaibi, S., Belouaggadia, N., Mansouri, K., & Sebaibi, N. (2024). Enhancing building energy efficiency across diverse climatic zones in marocco through optimized eco-friendly insulation thickness with air gap. *Energy Reports*, *12*, 1551-1565. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.040

9.Gu, Y., Deng, L., Qin, X., Zhou, X., Shi, X., & Jin, X. (2026). Performance analysis and optimization of the buoyancy-driven ventilation in the courtyard building. *Frontiers of Architectural Research*. 10.1016/j.foar.2026.04.006

10.Haseeb, Q. S., Yunus, S. M., Shoshan, A. A. A., & Aziz, A. I. (2023). A study of the optimal form and orientation for more energy efficiency to mass model multi-storey buildings of Kirkuk city, Iraq. *Alexandria Engineering Journal*, *71*, 731-741. 10.1016/j.aej.2023.03.020

11.Li, C., Pan, Y., Liu, Z., Liang, Y., Yuan, X., Huang, Z., & Zhou, N. (2024). Optimal design of building envelope towards life cycle performance: Impact of considering dynamic grid emission factors. *Energy and Buildings*, *323*, 114770. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114770

12.Lotfi, Y., & Hassan, M. (2024). Optimizing energy efficiency and thermal comfort of green envelope applications in hot arid climate. *Discover Applied Sciences*, *6*(2), 66. 10.1007/s42452-024-05698-4

13.Mahdinejad, J. D., & Shirdel, A. H. (2024). Analysis And Ranking of Factors Affecting The Design of Sustainable Housing in the Cold and Dry Climate of Sabzevar Based on Energy Consumption Optimization. (In Persian) 10.25524/jsae.2024.1126030

14.Mohajeri, M., Moafi, M., & Shirdel, A. H.(2026). Investigating the Role of Natural Light in Achieving Sustainable Architecture with Focusing on Sustainability and Energy Efficiency. https://elitesjournal.com/fa/page.php?rid=1206

15.Olfat, M., Asadpour, F., & Shirdel, A. H. (2025). Scientometric Analysis of Research Trends in Smart and Sustainable Architecture in Educational Environments: With an Emphasis on Green Schools and Campuses. *Scientometrics Research Journal*.(In Persian) 10.22070/rsci.2025.20848.1844

16.Olfat, M., Shirdel, A. H., Asadpour, F., & Haghnia, S. (2026). Futures-Oriented Directions in Sustainable Design for Senior Housing: A Scientometric Analysis of Research on Energy Load Reduction and Occupant Comfort (1980–2025). *Journal of Cross-Cultural Gerontology*, *41*(4), 53. 10.1007/s10823-026-09600-0

17.Qahfarokhi, F. M., & Fanni, Z. (2026). Evaluation of effects of ecological parks on the urban environment (Case Study: Shahmanzar Hafeshjan Shahrekord). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *7*(3), 215-229.(In Persian) https://www.srds.ir/article_243837_en.html

18.Rahaee, O., Salehi, S. S., & Shirdel, A. (2024). Improving the quality of natural ventilation in Masjedsoleiman's Schools' classrooms based on the openings' position and the outdoor shading blades with CFD Method. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, *12*(1), 129-150. (In Persian) 10.22061/jsaud.2024.10110.2179

19.Rahaei, O., Omidi, M., & Shirdel, A. H. (2025). Examining Investigating the Effect of the Central Courtyard Structure on the Natural

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies (JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 202-221
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

Ventilation of Traditional Houses in Yazd; Case Study: Lariha and Golshan Houses. Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU), 16(1), 37-50. (In Persian) https://doi.org/10.30475/isau.2025.441169.2126

20.Rahaei, O., Shirdel, A. H., Asadpour, F., & Omidi, M. (2026). Explaining the Pattern of Natural Ventilation in Central Courtyards of Traditional Houses Based on Orientation. *Sustainable Cities and Society: Advances*, 100025. 10.1016/j.scsadv.2026.100025

21.Rouhi, S., & Mahdinejad, J. (2025). Investigating the efficiency of indigenous passive cooling systems in traditional Iranian houses: Quantitative and qualitative analysis in hot and dry climates. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *6*(2), 1-22.(In Persian) https://www.srds.ir/article_211227_en.html

22.Shirdel, A. H. (2025). Bibliometric Analysis of the Global Sustainable Buildings Trend (2020–2025): Focusing on Integrating Smart Technologies in Energy Management, Improving Quality of Life, and Reducing Environmental Impacts. *Journal of Environmental Science Studies*, *10*(3), 10660-10675. (In Persian) 10.22034/jess.2025.544659.2400

23.Shirdel, A. H., & Asadpour, F. (2026). Residents' Perception and Experience of Sustainable Design Components Influencing Energy Consumption Optimization in Residential Complexes (Case Study: Sabzevar City). *Geography and Human Relationships*, e247262.(In Persian) 10.22034/gahr.2026.591404.2809

24.Shirdel, A. H., Moafi, G. M., & Mohajeri, M. (2026). Investigating the Role of Natural Light in Achieving Sustainable Architecture with Focusing on Sustainability and Energy Efficiency. https://elitesjournal.com/fa/page.php?rid=1206

25.Shirdel, A. H., Olfat, M., Asadpour, F., & Heidari, M. S. (2026). Integrating Vernacular Patterns and Modern Passive Design Strategies for Energy Optimization in Iran's Hot-Arid Climate (Case Study: Qom City). *International Journal of Urban Management and Energy Sustainability*, *7*(2), 205-226. 10.22034/ijumes.2026.2069856.1326

26.Shirdel, A., & Mahdi Nejad, J. (2025). Explaining the principles of smart housing architecture with the aim of reducing the efficiency of non-renewable energy in order to preserve the environment. *Architectural Technologies Studies*, *4*(4), 7-22.(In Persian) https://arch.fatemiyehshiraz.ac.ir/article_725541_en.html

27.Sun, H., Bensalem, R., Dik, A., Tao, Z., Wang, Z., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2025). The impact of courtyard roof shape on adjacent building natural ventilation and passive cooling. *Journal of Building Engineering*, *111*, 113331. 10.1016/j.jobe.2025.113331

28.Usman, M., & Frey, G. (2021). Multi-objective techno-economic optimization of design parameters for residential buildings in different climate zones. *Sustainability*, *14*(1), 65. https://doi.org/10.3390/su14010065

29.Wang, R., Lu, S., & Li, Q. (2019). Multi-criteria comprehensive study on predictive algorithm of hourly heating energy consumption for residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, *49*, 101623. 10.1016/j.scs.2019.101623

30.Xie, Y., & Sun, X. (2025). Smart implementation and expectations for sustainable buildings: A scientometric analysis. *Buildings*, *15*(14), 2436. 10.3390/buildings15142436

31.Yu, H., Zhong, F., Du, Y., Xie, X. E., Wang, Y., Zhang, X., & Huang, S. (2023). Short-term cooling and heating loads forecasting of building district energy system based on data-driven models. *Energy and Buildings*, *298*, 113513. 10.1016/j.enbuild.2023.113513

32.Zhang, L., Cao, M., Li, N., Luo, L., Chen, Y., & Li, Z. (2025). Machine learning prediction of heating and cooling loads based on Athenian residential buildings' simulation dataset. *Energy and Buildings*, *342*, 115808. 10.1016/j.enbuild.2025.115808

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

https://www.srds.ir/article_256328.html?lang=fa

دوره هفتم، شماره چهارم، پیاپی (۲۶)، زمستان ۱۴۰۵

صص ۲۲۱-۲۰۲

تحلیل روندهای پژوهشی به‌کارگیری هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی چندهدفه طراحی مجتمع‌های مسکونی با تأکید بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن

امیرحسین شیردل*: گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۲

چکیده

زمینه و هدف: بخش مسکن به دلیل مصرف مستمر انرژی، وابستگی گسترده به سامانه‌های گرمایش و سرمایش و سهم قابل‌توجه در انتشار کربن، یکی از مهم‌ترین عرصه‌های مداخله برای تحقق پایداری شهری به شمار می‌رود. بااین‌حال، کاهش مصرف انرژی در مجتمع‌های مسکونی، در بسیاری از موارد با اهدافی نظیر تأمین آسایش حرارتی ساکنان، کاهش هزینه‌ها، مدیریت بار و کاهش انتشار کربن در تعارض قرار می‌گیرد. ازاین‌رو، روش‌های متعارف طراحی و تصمیم‌گیری مبتنی بر آزمون‌وخطا، به دلیل ناتوانی در تحلیل هم‌زمان متغیرهای متعدد و روابط غیرخطی میان آن‌ها، پاسخ‌گوی پیچیدگی‌های طراحی مسکن پایدار نیستند.

روش شناسی: پژوهش حاضر با هدف ترسیم ساختار دانش، روند تحول مفهومی، خوشه‌های موضوعی و شکاف‌های پژوهشی در این حوزه انجام شده است. روش تحقیق از نوع کتاب‌سنجی و تحلیل علم‌سنجی است. داده‌ها از پایگاه‌های WoS و Lens استخراج و پس از پالایش اسناد تکراری و نامرتبط، ۱۶۷ مقاله پژوهشی و مروری انگلیسی‌زبان منتشرشده در بازه ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۶ مبنای تحلیل قرار گرفت. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای VOSviewer و Bibliometrix انجام شد و شامل بررسی شبکه هم‌نویسندگی، هم‌رخدادی واژگان، روند زمانی تولیدات و استنادات، تحلیل منابع، قانون برادفورد، قانون لوتکا، تحلیل تناظر چندگانه و غیره است.

یافته‌ها و نتایج: یافته‌ها نشان داد که بهره‌وری انرژی و مصرف انرژی همچنان هسته مفهومی ادبیات را تشکیل می‌دهند، اما پژوهش‌ها به‌سرعت به سمت تلفیق هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های تکاملی، مدیریت انرژی، انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی چندهدفه حرکت کرده‌اند. بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان مهم‌ترین موضوع نوظهور، چارچوبی برای ایجاد تعادل میان انرژی، کربن، آسایش و عملکرد شبکه فراهم می‌سازد. بااین‌حال، محدودیت اعتبارسنجی‌های میدانی، توجه ناکافی به رفتار واقعی ساکنان و انتشار کربن در چرخه حیات ساختمان، پراکندگی شبکه‌های همکاری علمی و ضعف تفسیرپذیری مدل‌ها از مهم‌ترین شکاف‌های حوزه است. بنابراین آینده این قلمرو در توسعه پلتفرم‌های تصمیم‌یار شفاف، داده‌محور و زمینه‌مند نهفته است که بتوانند اهداف زیست‌محیطی و کیفیت سکونت را به‌صورت هم‌زمان در طراحی مجتمع‌های مسکونی بهینه سازند.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های تکاملی، مجتمع‌های مسکونی، آسایش حرارتی، مصرف انرژی، انتشار کربن.

* **مسئول مکاتبات:** Email: am.shirdel@mail.sbu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: شیردل، امیرحسین. (۱۴۰۵). تحلیل روندهای پژوهشی به‌کارگیری هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی چندهدفه طراحی مجتمع‌های مسکونی با تأکید بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن. ***فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای***، ۷(۴)، ۲۰۲-۲۲۱.

این مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution(CC BY) توزیع شده است.

OPEN ACCESS

مقدمه و بیان مسأله

بخش ساختمان، به‌ویژه ساختمان‌های مسکونی، در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مداخله برای کاهش مصرف انرژی و کنترل انتشار کربن تبدیل شده است(Shirdel,2025; Li et al.,2024)، زیرا این بخش هم در مرحله بهره‌برداری و هم در چرخه عمر مصالح و ساخت‌وساز، سهم قابل‌توجهی در مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها دارد(Rahaei et al.,2026; Olfat et al.,2025) . گزارش‌های بین‌المللی در حوزه انرژی و اقلیم بارها تأکید کرده‌اند که محیط ساخته‌شده یکی از کانون‌های اصلی مصرف انرژی نهایی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس جهانی است(Xie & Sun,2025; Shirdel & Mahdi Nejad ,2025) و در میان اجزای آن، واحدها و مجتمع‌های مسکونی به دلیل گستردگی، تداوم بهره‌برداری، و وابستگی مستقیم به سامانه‌های گرمایش، سرمایش و تهویه، نقشی تعیین‌کننده در الگوی مصرف انرژی شهری ایفا می‌کنند(Haseeb et al.,2023; Rahaee et al.,2024). در بسیاری از شهرها، رشد سریع جمعیت، افزایش تراکم سکونت و گسترش مجتمع‌های مسکونی چندواحدی موجب شده است که عملکرد انرژی این ساختمان‌ها نه‌تنها بر مصرف خانوارها، بلکه بر تاب‌آوری شبکه انرژی، آلودگی هوا و ردپای کربن شهری نیز اثر مستقیم داشته باشد(Mahdinejad & Shirdel,2024; Shirdel & Asadpour,2026; Shirdel et al.,2026) . از این منظر، طراحی مجتمع‌های مسکونی دیگر صرفاً یک مسئله کالبدی یا زیبایی‌شناختی نیست، بلکه به موضوعی میان‌رشته‌ای در پیوند با پایداری، سیاست‌گذاری انرژی، سلامت محیط داخلی و عدالت اقلیمی و اجتماعی بدل شده است(Mohajeri et al.,2026; Asadpour et al.,2024; Fellah et al.,2024; Usman & Frey,2021)..

در ادبیات پژوهش، بارها نشان داده شده است که بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها بدون توجه به آسایش حرارتی کاربران، رویکردی ناقص و بعضاً ناکارآمد خواهد بود (Shirdel et al.,2026; Rahaei et al.,2025; Asadpour et al.,2026; Olfat et al.,2026; Rouhi & Mahdinejad.,2025; Qahfarokhi & Fanni.,2026). بسیاری از راهبردهایی که مصرف انرژی را کاهش می‌دهند، مانند افزایش عایق‌کاری(Akyüz,2025; Al-Tamimi,2021)، شکل سقف(Sun et al.,2025)، کاهش سطح بازشوها، کنترل نفوذ هوا یا تغییر در نسبت‌های هندسی و جهت‌گیری ساختمان (Abdelhady,2021) ممکن است در برخی شرایط به کاهش کیفیت محیط حرارتی داخلی یا افزایش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی منجر شوند (Gu et al.,2026). از سوی دیگر، راهکارهایی که صرفاً بر ارتقای آسایش حرارتی متمرکزند، در صورتی که بدون ملاحظه مصرف انرژی و انتشار کربن اتخاذ شوند، می‌توانند منجر به افزایش بار سرمایشی یا گرمایشی و در نتیجه تشدید اثرات زیست‌محیطی شوند(Yu et al.,2023; Dasi et al.,2024). این تعارض میان اهداف طراحی، یعنی مصرف انرژی کمتر، آسایش حرارتی بالاتر و کربن پایین‌تر، یکی از پیچیده‌ترین مسائل در طراحی معماری و مهندسی ساختمان محسوب می‌شود. به همین دلیل، رویکردهای سنتی مبتنی بر آزمون و خطا یا تصمیم‌گیری شهودی، برای حل چنین مسئله‌ای که دارای متغیرهای متعدد، روابط غیرخطی و اهداف متعارض است، کارایی محدودی دارند.

ظهور هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های تکاملی، افق جدیدی را برای حل مسائل پیچیده چندهدفه در طراحی ساختمان گشوده است (Wang et al., 2019; Zhang et al., 2025).این ابزارها امکان مدل‌سازی روابط پیچیده میان پارامترهای طراحی و شاخص‌های عملکردی مانند مصرف انرژی، دمای داخلی، آسایش حرارتی و انتشار کربن را فراهم می‌کنند و می‌توانند در کنار شبیه‌سازی‌های انرژی، به یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه کمک کنند (Lotfi & Hassan, 2024). الگوریتم‌های تکاملی، به‌ویژه در مواجهه با اهداف متضاد، توانسته‌اند مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را ارائه دهند و به طراح اجازه دهند میان گزینه‌های مختلف، بسته به اولویت‌های پروژه تصمیم‌گیری کند (Chou & Nguyen, 2024). از این رو، ترکیب هوش مصنوعی با بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی مجتمع‌های مسکونی، نه‌تنها یک گرایش فناورانه، بلکه ضرورتی روش‌شناختی برای پاسخ‌گویی به چالش‌های انرژی و اقلیم در معماری معاصر به شمار می‌رود.

با وجود گسترش مطالعات مرتبط با هوش مصنوعی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در معماری و مهندسی ساختمان، برای تبیین جایگاه پژوهش حاضر، لازم است میان مطالعاتی که عملکرد فنی این روش‌ها را در مسائل مشخص طراحی و انرژی بررسی می‌کنند و مطالعاتی که ساختار و روند تحول دانش این حوزه را تحلیل می‌کنند، تمایز قائل شد .در این میان، مقایسه نظام‌مند مطالعات مروری و کتاب‌سنجی پیشین می‌تواند مشخص کند که آیا پژوهش‌های موجود، پیوند میان تحول زمانی دانش، ساختار فکری و خوشه‌های موضوعی پژوهش‌ها را با اهداف چندگانه طراحی مجتمع‌های مسکونی، شامل مصرف انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن، به‌طور هم‌زمان بررسی کرده‌اند یا خیر .ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی علم‌سنجی این حوزه با تمرکز بر ارتباط میان هوش مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی و بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی مجتمع‌های مسکونی و نیز شناسایی شکاف‌های پژوهشی و روش‌شناختی مرتبط با این اهداف تعریف می‌شود.

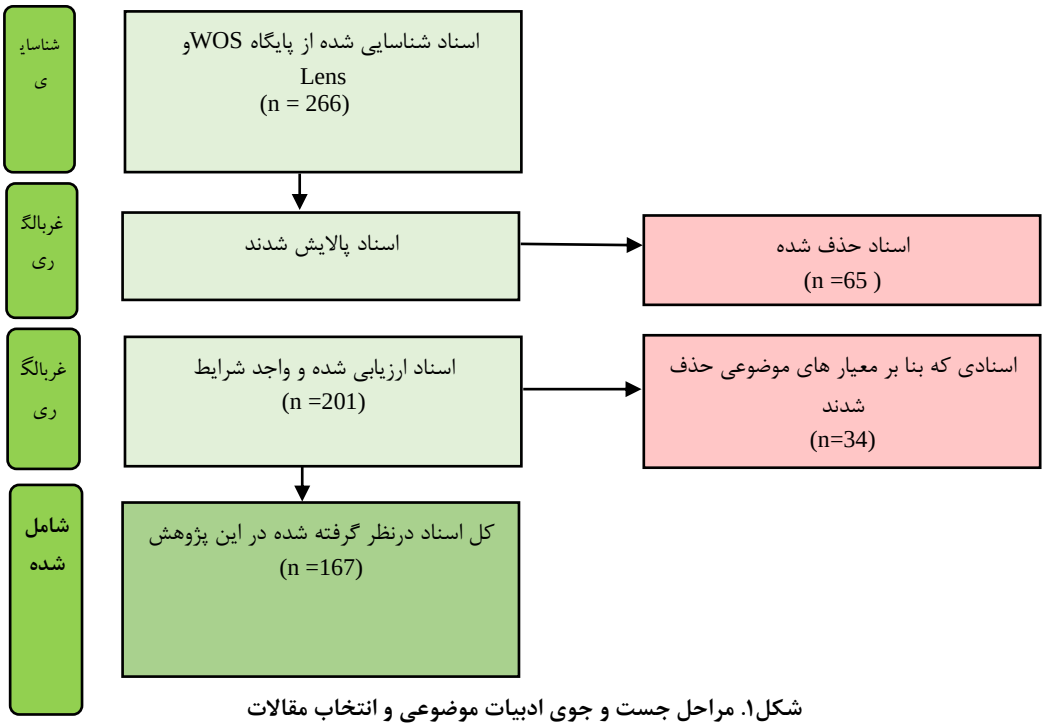
با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به دو سؤال اصلی است :۱ .روند تکامل زمانی، ساختار فکری و خوشه‌های علمی پژوهش‌های جهانی در حوزه به‌کارگیری هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی چندهدفه طراحی مجتمع‌های مسکونی با تأکید بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن چگونه بوده است؟ ۲ .مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی و روش‌شناختی در تلفیق این ابزارها با اهداف مرتبط با انرژی، آسایش حرارتی و کاهش انتشار کربن کدام‌اند؟ پاسخ به این دو سؤال، مبنای تحلیل علم‌سنجی حاضر را برای ترسیم نقشه دانش در این حوزه شکل می‌دهد.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف تحلیل کتاب‌سنجی ساختار دانش، قلمروهای موضوعی و روند تحول مفهومی در حوزه «بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی در طراحی مجتمع‌های مسکونی جهت کاهش مصرف انرژی، بهبود آسایش حرارتی و کاهش انتشار کربن» انجام شده است. بدین‌منظور، آثار علمی منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۶ گردآوری و مورد بررسی قرار گرفت تا روند تحول مفهومی و موضوعی این حوزه، الگوهای تولید دانش و جابه‌جایی کانون‌های پژوهشی آن در طول زمان تحلیل شود. پس از گردآوری و پالایش داده‌ها، تحلیل کتاب‌سنجی با هدف شناسایی مفاهیم پرتکرار، نویسندگان اثرگذار، الگوهای هم‌نویسندگی، منابع و نشریات هسته، روندهای زمانی واژگان کلیدی و خوشه‌های موضوعی اصلی در این قلمرو پژوهشی انجام گرفت. این تحلیل‌ها امکان بررسی ابعاد مختلف تحول دانش در حوزه بهینه‌سازی هوشمند و چندهدفه مسکن را فراهم ساخت و از یک‌سو ساختار تولید و انتشار دانش علمی و از سوی دیگر سازمان‌یافتگی مفهومی و پیوندهای میان مضامین تثبیت‌شده و موضوعات نوظهور مرتبط با آسایش حرارتی و کاهش انتشار کربن در معماری را آشکار نمود. بدین ترتیب، نقشه‌ای از ساختار علمی این حوزه ترسیم شد که می‌تواند به درک بهتر مسیرهای پژوهشی آینده و شکاف‌های دانشی موجود کمک کند.

در این پژوهش، از پایگاه‌های داده Web of Science (WoS)و Lens به عنوان منابع اصلی استخراج داده‌های استنادی استفاده شد. این پایگاه‌ها به دلیل پوشش گسترده نشریات معتبر و قابلیت ارائه داده‌های استاندارد استنادی، از مهم‌ترین منابع برای تحلیل ساختار دانش و ترسیم نقشه‌های علمی محسوب می‌شوند. برای تحلیل و بازنمایی ساختار دانش نیز از نرم‌افزارهای VOSviewer و کتاب‌سنجی R (نسخه Bibliometrix) استفاده گردید.

جست‌وجوی اسناد علمی بر اساس عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها در تاریخ ۹ آگست ۲۰۲۶ انجام گرفت. در این مطالعه، تنها مستندات انگلیسی‌زبان شامل مقالات پژوهشی و مقالات مروری مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام فرآیند جست‌وجو و اعمال مراحل پالایش شامل حذف اسناد تکراری و موارد نامرتبط با موضوع پژوهش، در مجموع ۱۶۷ اثر علمی به عنوان مبنای تحلیل‌های کتاب‌سنجی انتخاب شد (شکل۱). راهبرد جست‌وجوی پژوهش نیز بر اساس مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های محوری مرتبط با موضوع پژوهش تدوین گردید تا پوشش مناسبی از مطالعات مرتبط با موضوع فراهم شود که در ادامه آورده شده است.



شکل۱. مراحل جست و جوی ادبیات موضوعی و انتخاب مقالات

Figure 1. Stages of the Literature Search and Article Selection Process

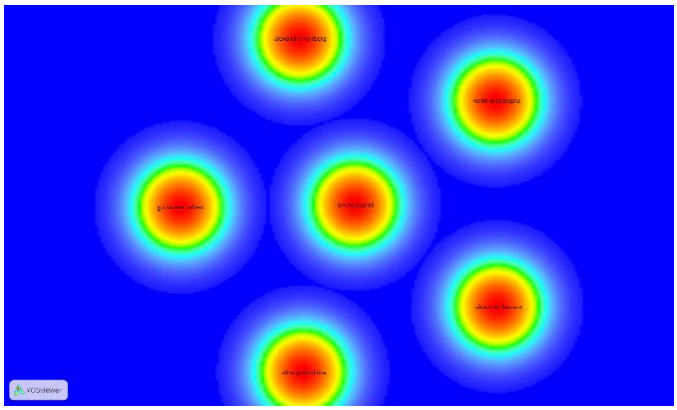
نتایج

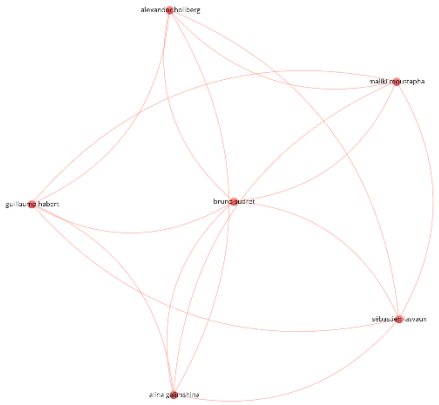
تحلیل شبکه همکاری‌های علمی در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی:

در تحلیل هم‌نویسندگی، ساختار همکاری علمی بر اساس مجموعه‌ای شامل ۱۶۷ مقاله علمی انگلیسی‌زبان منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۶ بررسی شد که پس از حذف موارد تکراری و منابع نامرتبط از پایگاه‌های Web of Science و Lensانتخاب شده‌اند.ضمنا برای ورود هر نویسنده از روش شمارش کامل در نظر گرفته شد. در این تحلیل، نقشه هم‌نویسندگی نشان می‌دهد(شکل۲) که شبکه همکاری علمی در این حوزه بسیار محدود، فشرده و مبتنی بر چند هسته پژوهشی کوچک است. در نقشه هم‌نویسندگی، تنها چند نویسنده در مرکز شبکه قرار گرفته‌اند و پیوندهای میان آن‌ها نسبتاً پررنگ است، با این حال، شبکه از نظر گستردگی و تنوع بازیگران، توسعه‌یافته و چندلایه نیست. چنین الگویی معمولاً بیانگر آن است که تولید دانش در این حوزه هنوز در مرحله‌ای قرار دارد که چند پژوهشگر کلیدی مسیر اصلی انتشار و همکاری را هدایت می‌کنند و هنوز یک جامعه علمی گسترده و به‌هم‌پیوسته در آن شکل نگرفته است. در این میان، برونو سودره موقعیت مرکزی‌تری نسبت به سایرین دارد و به‌نظر می‌رسد نقش محوری‌تری در اتصال برخی گره‌ها ایفا می‌کند. حضور او در مرکز شبکه و ارتباطش با چند نویسنده دیگر نشان می‌دهد که بخشی از جریان تولید دانش حول محور او سازمان یافته است. در کنار او، الکساندر هولبرگ، مالیکی موستاپا، سباستین لاوسو و آلینا گالیمشینا نیز در شبکه حضور دارند، اما ساختار کلی نشان می‌دهد که تعاملات میان آن‌ها بیشتر در قالب همکاری‌های محدود و نه شبکه‌ای گسترده و متراکم شکل گرفته است. از این رو، می‌توان گفت که الگوی هم‌نویسندگی در این حوزه هنوز به مرحله بلوغ کامل نرسیده و نیازمند گسترش همکاری‌های بین‌مؤسسه‌ای و بین‌المللی است.

در نقشه تراکمی(شکل۳) نیز همین وضعیت با وضوح بیشتری دیده می‌شود. رنگ‌های گرم‌تر در اطراف نام نویسندگان، نشان‌دهنده تراکم بیشتر فعالیت و تمرکز بیشتر تولید علمی است، اما فاصله نسبتاً زیاد میان خوشه‌ها و نبود پیوندهای

گسترده‌تر، بیانگر آن است که این حوزه بیش از آنکه به صورت یک شبکه یکپارچه عمل کند، از چند قطب مستقل یا نیمه‌مستقل تشکیل شده است. این وضعیت از منظر علم‌سنجی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که دانش تولیدشده در این قلمرو هنوز به اندازه کافی در میان گروه‌های پژوهشی مختلف توزیع نشده و تعامل نظام‌مند میان نویسندگان، دست‌کم در داده‌های استخراج‌شده، محدود باقی مانده است. چنین الگویی معمولاً در حوزه‌های نوظهور یا میان‌رشته‌ای دیده می‌شود، حوزه‌هایی که در آن‌ها پژوهش‌ها در آغاز به‌صورت پراکنده و پروژه‌محور شکل می‌گیرند و سپس به‌تدریج به سمت شبکه‌های همکاری گسترده‌تر حرکت می‌کنند. بنابراین، این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان نشانه‌ای از مرحله‌ی رشد اولیه تا میانی این حوزه تفسیر شوند، مرحله‌ای که در آن هنوز ظرفیت بالایی برای ایجاد همکاری‌های جدید، پیوند میان گروه‌های پژوهشی و شکل‌گیری دستورکارهای مشترک وجود دارد.





شکل۲. شبکه هم‌تألیفی نویسندگان در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی(راست)

Figure 2. Co-authorship Network of Authors in the Field of Performance Optimization of Residential Complexes (Right)

شکل۳. نقشه تراکمی هم‌تألیفی نویسندگان در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی(چپ)

Figure 3. Density Map of Author Co-authorship in the Field of Performance Optimization of Residential Complexes (Left)

تحلیل هم‌واژگانی و خوشه‌بندی موضوعی:

ترسیم شبکه هم‌رخدادی واژگان(شکل۴) و تحلیل جبهه‌های پژوهش نشان می‌دهد که ادبیات این حوزه از حالت تک‌بعدی خارج شده و حول یک ساختار چندلایه و متقاطع سازمان‌یافته است. واژگان کلیدی استخراج‌شده در ۱۱ خوشه طبقه‌بندی شده‌اند که بررسی پیوندهای میان آن‌ها، نقشه‌ی راه گذار از معماری سنتی به معماری محاسباتی پایدار را تبیین می‌کند، این خوشه‌ها توسط نویسنده نامگذاری شده است.

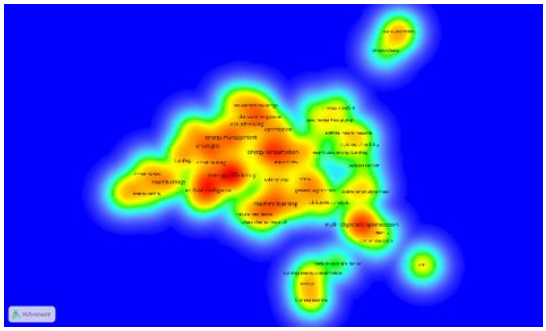
در هسته مرکزی این شبکه، خوشه مربوط به کارایی انرژی و مدیریت مصرف به عنوان پایدارترین و پرتراکم‌ترین بخش دانش عمل می‌کند. پیوند عمیق این هسته با مفاهیمی نظیر ساختمان‌های مسکونی و مدیریت تقاضا، نشان‌دهنده آن است که دغدغه اصلی پژوهش‌ها همچنان بر موازنه میان عرضه و تقاضای انرژی در مقیاس خرد متمرکز است. با این حال، دستاورد تحلیل خوشه‌بندی زمانی آشکار می‌شود که ارتباط گسست‌ناپذیر این هسته با دو بال اصلی یعنی یادگیری ماشین و بهینه‌سازی چندهدفه مورد دقت قرار گیرد.

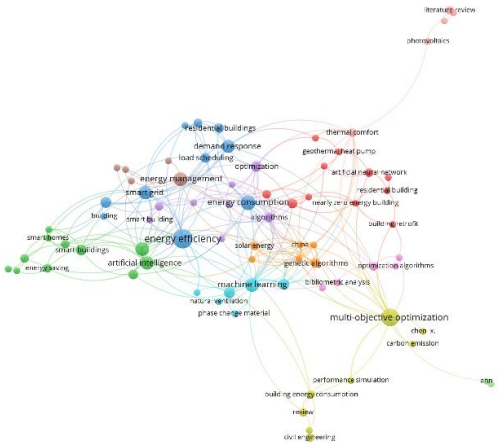
خوشه‌های مرتبط با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین (خوشه‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۱) نشان‌دهنده ورود پارادایم «طراحی داده‌محور» به حوزه مسکن هستند. حضور پررنگ واژگانی چون شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN)، یادگیری تقویت‌پذیر و منطق فازی در مجاورت مفاهیمی مانند مدل‌سازی پیش‌بین و آسایش حرارتی، گویای این واقعیت است که هوش مصنوعی در این حوزه از یک ابزار پسینی برای تحلیل، به یک موتور پیشینی برای تصمیم‌سازی تبدیل شده

است. نوآوری پنهان در این پیوندها، تمایل پژوهشگران به استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای پیش‌بینی دقیق رفتار حرارتی ساختمان و رفتار ساکنان است که نتیجه آن، کاهش خطای مدل‌سازی در پروژه‌های صفرانرژی (NZEB) است.

از سوی دیگر، ظهور قدرتمند خوشه بهینه‌سازی چندهدفه (خوشه ۴) و اتصال مستقیم آن به شاخص‌های انتشار کربن، نقطه عطف و دستاورد اصلی تحلیل فعلی است. این الگو نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، جبهه پژوهش از بهینه‌سازی تک‌معیاره (صرفاً انرژی) به سمت حل تضادهای پیچیده میان «هزینه-انرژی-کربن-آسایش» تغییر جهت داده است. پیوند این خوشه با الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی عملکرد، حاکی از آن است که محققان به دنبال یافتن جبهه پرتو در طراحی مجتمع‌های مسکونی هستند، جایی که کاهش انتشار کربن نه به عنوان یک پیامد جانبی، بلکه به عنوان یک هدف طراحی در کنار آسایش حرارتی ساکنان قرار می‌گیرد.

تحلیل نمای تراکمی(شکل۵) نیز عمق تثبیت این دانش را تأیید می‌کند. تراکم بالای رنگ‌های گرم در فضای میان‌خوشه‌ای «هوش مصنوعی» و «بهینه‌سازی»، نشان از شکل‌گیری یک قلمرو دانش جدید دارد که می‌توان آن را «بهینه‌سازی کربن‌محور هوشمند» نامید. نواحی پیرامونی شبکه، مانند فتوولتائیک‌ها یا مواد تغییر فاز دهنده(PCM) ، اگرچه تراکم کمتری دارند، اما به عنوان بازوهای تکنولوژیک در خدمت اهداف اصلی (کاهش مصرف و کربن) عمل می‌کنند. این تحلیل ساختارمند اثبات می‌کند که نوآوری در این مقاله، پاسخی مستقیم به خلاء موجود در نقشه دانش است، یعنی تجمیع توانمندی‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی متغیرها و قدرت الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف متضاد (انرژی، کربن و آسایش). این رویکرد یکپارچه، فراتر از مطالعات کلاسیک، مسیری عملیاتی برای دستیابی به مجتمع‌های مسکونی با کربن حداقلی و کیفیت زیستی حداکثری ارائه می‌دهد.





شکل۴: شبکه هم رخدادی واژگان در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی(راست)

Figure 4. Keyword Co-occurrence Network in the Field of Performance Optimization of Residential Complexes (Right)

شکل۵: نقشه تراکمی هم رخدادی واژگان در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی(چپ)

Figure 5. Density Map of Keyword Co-occurrence in the Field of Performance Optimization of Residential Complexes (Left)

در ادامه، جهت برقراری پیوند میان تحلیل‌های ارائه شده، خلاصه‌ای ساختاریافته از خوشه‌های موضوعی تدوین شده است(جدول۱):

جدول ۱- تحلیل موضوعی و خوشه‌بندی کلمات کلیدی استخراج شده از شبکه هم رخدادی واژگان

Table 1. Thematic Analysis and Clustering of Keywords Extracted from the Keyword Co-occurrence Network

شماره خوشه	عنوان خوشه	کلیدواژه‌های اصلی	محور مفهومی اصلی
۱	هوش مصنوعی و مدل‌سازی هوشمند در ساختمان	هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، شبکه عصبی مصنوعی، یادگیری عمیق، مدل پیش‌بینی، مدل مبتنی بر داده	این خوشه بر کاربرد روش‌های هوشمند در مدل‌سازی، پیش‌بینی و تحلیل عملکرد ساختمان تمرکز دارد و بیانگر گذار تصمیم‌سازی در طراحی و بهره‌برداری، از الگوهای سنتی به رویکردهای داده‌محور است.
۲	مدیریت انرژی در ساختمان‌های هوشمند	مدیریت انرژی، ساختمان‌های هوشمند، سامانه مدیریت ساختمان، مصرف انرژی، مصرف برق، پیش‌بینی بار الکتریکی	این خوشه بر راهبردهای کنترل، پایش و مدیریت مصرف انرژی در ساختمان‌های هوشمند متمرکز است و نشان‌دهنده تمرکز بخش چشمگیری از ادبیات بر بهینه‌سازی الگوهای مصرف در مرحله بهره‌برداری است.
۳	کارایی انرژی و عملکرد ساختمان‌های مسکونی	بهره‌وری انرژی، ساختمان‌های مسکونی، عملکرد ساختمان، عملکرد انرژی ساختمان، پوسته ساختمان، صرفه‌جویی در انرژی	این خوشه هسته عملکردی شبکه را می‌سازد و به ارزیابی و ارتقای کارایی انرژی در ساختمان‌های مسکونی می‌پردازد، پیوند میان ویژگی‌های کالبدی ساختمان و پیامدهای مصرف انرژی در آن برجسته است.
۴	بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی ساختمان	بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تکاملی،بهینه‌سازی چند هدفه،تصمیم‌گیری چند معیاره.	این خوشه بیانگر گذار ادبیات از تحلیل تک‌معیاره به حل هم‌زمان اهداف متعارض است و بر به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی برای ایجاد توازن میان انرژی، آسایش، هزینه و کربن تمرکز دارد.
۵	آسایش حرارتی و کیفیت محیط داخلی	آسایش حرارتی، کیفیت محیط داخلی، آسایش ساکنان، عملکرد حرارتی، آسایش تطبیقی	این خوشه بر ابعاد انسانی عملکرد ساختمان تمرکز دارد و نشان می‌دهد که ارزیابی طراحی، فراتر از کاهش مصرف انرژی، کیفیت محیطی و رضایت حرارتی ساکنان را نیز به عنوان معیارهای کلیدی لحاظ می‌کند.
۶	کنترل پیش‌بین و یادگیری تقویتی	کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، یادگیری تقویتی، کنترل هوشمند، خودکارسازی، کنترل لحظه‌ای.	این خوشه بر توسعه کنترل‌گرهای هوشمند برای تنظیم لحظه‌ای عملکرد ساختمان متمرکز است و اهمیت فناوری‌های تطبیقی و خودیادگیر را در بهینه‌سازی بهره‌برداری تبیین می‌کند.
۷	کربن، پایداری محیطی و کاهش انتشار	انتشار کربن، کاهش انتشار کربن، پایداری، ارزیابی چرخه عمر، اثرات زیست‌محیطی	این خوشه بازتاب‌دهنده چرخش ادبیات از صرف کاهش انرژی به سوی کاهش اثرات زیست‌محیطی است و تأکید دارد که ارزیابی ساختمان باید با شاخص‌های کربنی و پایداری محیطی نیز انجام شود.
۸	پاسخگویی بار و یکپارچه‌سازی با شبکه هوشمند	پاسخ‌گویی بار، شبکه هوشمند برق، مدیریت بار، اوج بار، انعطاف‌پذیری	این خوشه پیوند ساختمان با زیرساخت انرژی را تبیین کرده و بر ظرفیت ساختمان‌های هوشمند در مدیریت بار، انعطاف‌پذیری و تعامل با شبکه‌های هوشمند متمرکز است.
۹	باززنده‌سازی و بهسازی انرژی ساختمان	بهسازی ساختمان، بهسازی ساختمان‌های موجود، نوسازی، ساختمان‌های موجود، بهسازی انرژی ساختمان	این خوشه بر مداخلات بهینه‌ساز در ساختمان‌های موجود متمرکز است و نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها معطوف به ارتقای عملکرد انرژی و زیست‌محیطی موجودی ساختمانی است، نه صرفاً طراحی پروژه‌های جدید.
۱۰	فناوری‌های مکمل انرژی و سامانه‌های کم‌کربن	فتوولتائیک، انرژی‌های تجدیدپذیر، ماده تغییر فازدهنده، سامانه گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC)، فناوری‌های کم‌کربن	این خوشه فناوری‌ها و سامانه‌های پشتیبان در تحقق اهداف انرژی و کربن را در بر می‌گیرد و نشان می‌دهد که نوآوری فناورانه در این ادبیات عمدتاً در پیوند با بهینه‌سازی عملکردی معنا می‌یابد.
۱۱	شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد و تصمیم‌سازی طراحی	شبیه‌سازی، شبیه‌سازی عملکرد ساختمان، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تحلیل سناریو، متغیرهای طراحی	این خوشه بر ابزارهای تحلیلی و شبیه‌سازی‌محور برای ارزیابی سناریوهای طراحی استوار است و نقش واسطه میان داده، مدل و تصمیم طراحی را در فرایند بهینه‌سازی ساختمان برجسته می‌کند.

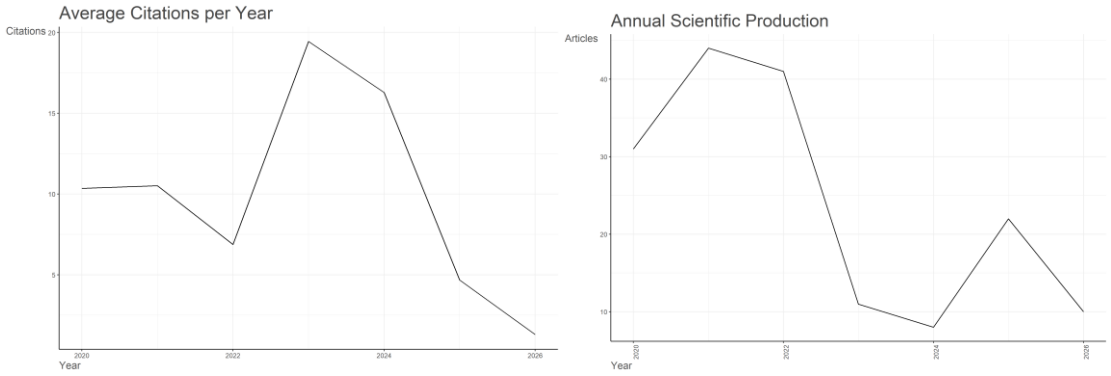
تحلیل روند زمانی تولیدات علمی و استنادهای پژوهشی در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی:

تحلیل هم‌زمان دو نمودار «تولید علمی سالانه» و «میانگین استنادات سالانه»(شکل۶و۷) نشان می‌دهد که این حوزه در بازه مورد بررسی، از مرحله‌ی شکل‌گیری و گسترش اولیه به مرحله‌ی تثبیت نسبی و سپس به دوره‌ی گزینش‌گری استنادی وارد شده است. در نمودار تولید علمی، روند از سطحی نسبتاً قابل‌توجه در سال ۲۰۲۰ آغاز می‌شود و در سال ۲۰۲۱ به اوج می‌رسد، این افزایش، بیانگر شتاب‌گیری ورود پژوهشگران به موضوع و گسترش توجه علمی به آن در آغاز چرخه‌ی رشد است. با وجود تداوم سطح بالای تولید در ۲۰۲۲، افت شدید در ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که

این حوزه از فاز «انباشت کمّی» به سمت «غربالگری موضوعی» حرکت کرده است، یعنی انتشارها از نظر تعداد کاهش یافته‌اند، اما این کاهش لزوماً نشانه‌ی افول نیست، بلکه می‌تواند بازتاب اشباع شدن برخی زیرموضوعات و تمرکز پژوهش‌ها بر مسائل بنیادی‌تر، دقیق‌تر و از نظر روش‌شناختی پیچیده‌تر باشد. سپس در ۲۰۲۵ یک بازگشت نسبی در تولید مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد حوزه هنوز ظرفیت احیا و بازترکیب موضوعی دارد، هرچند سطح ۲۰۲۶ با توجه به محدود بودن بازه‌ی زمانی، بیشتر باید به‌عنوان داده‌ای ناپایدار و ناتمام تفسیر شود.

در مقابل، نمودار میانگین استنادات سالانه الگوی متفاوت اما مکملی را آشکار می‌کند. در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ میانگین استنادها در سطحی نسبتاً متوسط و نزدیک به هم قرار دارد، اما در ۲۰۲۳ جهشی چشمگیر رخ می‌دهد و سپس در ۲۰۲۴ نیز این سطح بالا تا حدی حفظ می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که در میانه‌ی دوره، آثار منتشرشده از نظر اثرگذاری علمی به بلوغ رسیده‌اند و چند مقاله‌ی کلیدی توانسته‌اند وزن استنادی حوزه را به‌طور محسوسی افزایش دهند. به بیان دیگر، افزایش استنادات در ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ صرفاً تابع تعداد مقالات نیست، بلکه حاکی از ظهور مطالعات مرجع‌ساز، مدل‌های روش‌مندتر و آثار دارای ارزش ارجاعی بالا است. افت استنادات در ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶ نیز باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا برای آثار جدید، هنوز زمان کافی برای انباشت استناد فراهم نشده است، بنابراین این کاهش بیش از آنکه نشانه‌ی افت کیفیت باشد، بازتاب «تأخیر استنادی» در ادبیات علمی است.

دستاورد اصلی این تحلیل در آن است که نشان می‌دهد پویایی این حوزه را نمی‌توان صرفاً با شمارش مقالات سنجید. هم‌پوشانی دو نمودار، یک شکاف معنادار میان «تولید کمّی» و «اثرگذاری کیفی» را آشکار می‌کند: بیشترین تعداد انتشار الزاماً در سال‌های بیشترین استناد رخ نداده است، بلکه اثرگذاری علمی در دوره‌ای متمرکز شده که حوزه از مرحله‌ی پراکندگی اولیه عبور کرده و به سمت بلوغ مفهومی و روش‌شناختی حرکت کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که جریان پژوهش در موضوع بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر هوش مصنوعی، نه یک رشد خطی، بلکه یک مسیر نوسانی با اوج‌گیری اثرگذاری در میانه‌ی دوره و سپس بازتنظیم موضوعی در سال‌های پایانی بوده است. از این منظر، نوآوری تحلیل حاضر در آن است که فراتر از گزارش ساده‌ی روندها، رابطه‌ی میان حجم تولید و کیفیت اثرگذاری را روشن می‌کند و نشان می‌دهد که هسته‌ی دانشی این حوزه در حال گذار از «گسترش سریع» به «تثبیت انتخابی» است، گذاری که دقیقاً با ماهیت مسئله‌محور و چندهدفه‌ی پژوهش‌های مرتبط با انرژی، آسایش حرارتی و کاهش کربن هم‌خوانی دارد.



شکل۶: روند تغییرات زمانی تولیدات علمی **شکل۷:تحلیل میانگین استنادات دریافتی به ازای هر مقاله در سال**

Figure 6. Temporal Trends in Scientific Publications **Figure 7. Analysis of the Average Number of Citations Received per Article by Year**

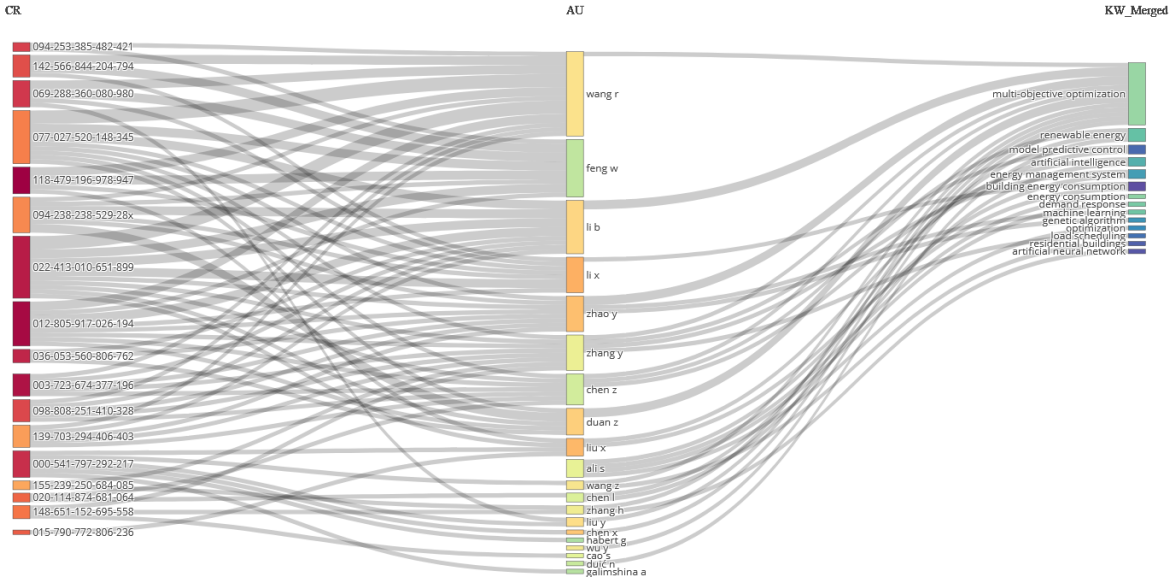
تحلیل ساختاری پیوندهای سه‌گانه میان منابع، نویسندگان و کلمات کلیدی:

در نمودار سه‌میدانی، الگوی ارتباطی میان مدارک مرجع، نویسندگان و کلیدواژه‌ها نشان می‌دهد(شکل۸) که ساختار دانش این حوزه نه به‌صورت پراکنده، بلکه در قالب چند هسته‌ی هم‌پوشان و به‌هم‌پیوسته سازمان یافته است. در بخش

چپ، ارجاعات پرتکرار عمدتاً حول چند کد مرجع متمرکز شده‌اند و این تمرکز بیانگر آن است که بدنه‌ی نظری حوزه بر مجموعه‌ای محدود اما اثرگذار از آثار بنیان‌گذار استوار است، آثاری که نقش مرجعیت مفهومی را در شکل‌دهی به مسیرهای بعدی پژوهش بر عهده داشته‌اند. این الگو از آن جهت مهم است که نشان می‌دهد ادبیات موضوع هنوز در مرحله‌ای قرار دارد که اتکای آن به چند متن کلیدی، جهت‌گیری کلی پژوهش‌ها را تعیین می‌کند و بنابراین انسجام نظری حوزه از مسیر همین هسته‌های مرجع شکل گرفته است.

در میانه‌ی نمودار، شبکه نویسندگان نشان می‌دهد که تولید دانش در این قلمرو توسط چند نویسنده‌ی محوری هدایت می‌شود و نام‌هایی مانندr wang ، feng w، li b، li x، zhao y وzhang y در جایگاه‌های رابط و پراتصال قرار دارند. برجستگی این نویسندگان صرفاً به معنای تعداد آثار بیشتر نیست، بلکه نشان می‌دهد که آن‌ها در پیوند دادن زیرموضوع‌ها و انتقال مفاهیم از سطح نظری به سطح کاربردی نقش میانجی داشته‌اند. به بیان دقیق‌تر، ساختار نویسندگی در این حوزه از نوعی تمرکز نسبی برخوردار است، یعنی به‌جای پراکندگی کامل، چند هسته‌ی پژوهشی توانسته‌اند مسیر توسعه‌ی موضوع را سامان دهند. این تمرکز، برای تحلیل علم‌سنجی یک یافته‌ی مهم است، زیرا نشان می‌دهد حوزه در حال عبور از مرحله‌ی ظهور اولیه و ورود به مرحله‌ی تثبیت تولیدکنندگان دانش است.

بخش راست نمودار، یعنی خوشه‌ی کلیدواژه‌ها، مهم‌ترین لایه‌ی تحلیلی را آشکار می‌کند. در این بخش، بهینه‌سازی چندهدفه با فاصله‌ی معنی‌دار نسبت به سایر کلیدواژه‌ها در موقعیت مرکزی و غالب قرار گرفته و همین امر نشان می‌دهد که هسته‌ی مفهومی حوزه بر حل هم‌زمان چند هدف متعارض بنا شده است. حضور هم‌زمان انرژی‌های تجدیدپذیر، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، هوش مصنوعی، سامانه مدیریت انرژی، مصرف انرژی ساختمان، مصرف انرژی، پاسخ‌گویی بار، یادگیری ماشین، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، زمان‌بندی بار، ساختمان‌های مسکونی، شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان می‌دهد که جریان غالب پژوهش از سطح توصیف عملکرد ساختمان فراتر رفته و به سمت طراحی سامانه‌های تصمیم‌یار، کنترل هوشمند و بهینه‌سازی عملکرد در مقیاس ساختمان و شبکه حرکت کرده است. این هم‌نشینی واژگانی به‌روشنی بیان می‌کند که مسئله‌ی محوری دیگر تنها کاهش انرژی نیست، بلکه هم‌زمان‌سازی انرژی، کنترل، پاسخ‌گویی و پایداری در چارچوبی یکپارچه است.



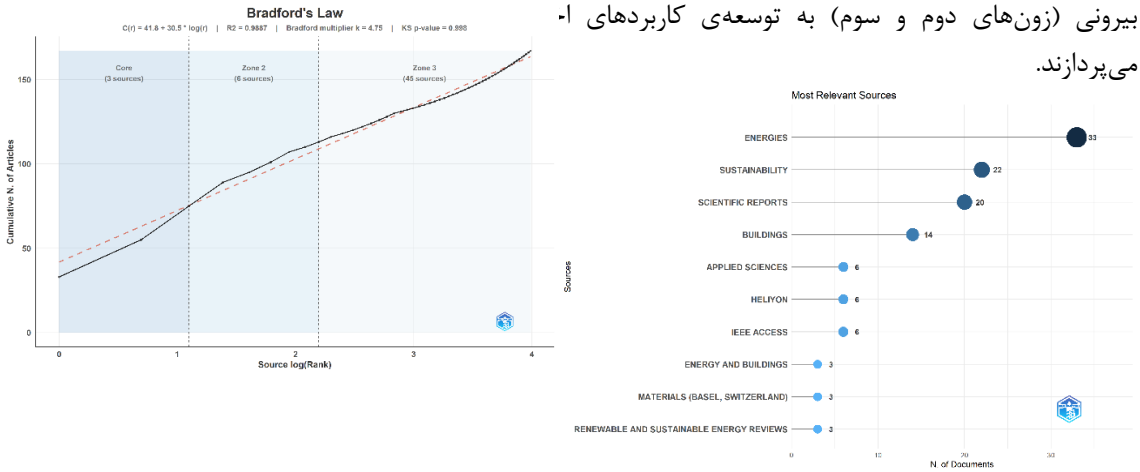
شکل۸: نمودار سه‌فیلدی جهت تحلیل روابط متقابل میان مراجع استنادی (چپ)، نویسندگان شاخص (وسط) و کلمات کلیدی محوری (راست)

Figure 8. Three-Field Plot for Analyzing the Interrelationships among Cited References (Left), Prominent Authors (Center), and Core Keywords (Right)

تحلیل ساختار توزیع مجلات و اعتبارسنجی منابع بر اساس قانون برادفورد:

تحلیل توزیع و تمرکز منابع علمی در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی، ساختار منسجم و جهت‌گیری استراتژیک پژوهش‌ها را در این قلمرو آشکار می‌سازد. نمودار «مهم‌ترین منابع» (شکل۹) نشان‌دهنده یک گرایش غالب به‌سوی مجلات میان‌رشته‌ای و پیشرو در حوزه‌های انرژی و پایداری است، به‌طوری‌که مجلاتی نظیرEnergies ، Sustainabilityو Scientific Reports در صدر قرار دارند. این الگو بیانگر آن است که مسئله‌ی «بهینه‌سازی انرژی ساختمان» دیگر محدود به دانش معماری یا مهندسی عمران نیست، بلکه به یک بستر همگرای علمی تبدیل شده است که در آن فناوری‌های دیجیتال، هوش مصنوعی و رویکردهای تکاملی، نقشی محوری در تعریف استانداردهای نوین زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. تسلط این مجلات بر خروجی‌های علمی حوزه، گواهی بر این مدعاست که پژوهش‌های فعلی از فاز مطالعات موردی محدود خارج شده و به سمت ارائه‌ی راهکارهای سیستمی و قابل‌تعمیم در مقیاس‌های کلان حرکت کرده‌اند.

در تبیین این ساختار، به‌کارگیری «قانون برادفورد»(شکل۱۰) نشان می‌دهد که دانش تولیدشده در این حوزه، از الگوی توزیع بسیار منظم و پیش‌بینی‌پذیری پیروی می‌کند (R^2=0.9887). تفکیک منابع به سه زون «هسته مرکزی»، «زون دوم» و «زون سوم»، گویای آن است که بخش قابل‌توجهی از ادبیات مرجع و هسته‌ی دانشی پژوهش، تنها در سه منبع کلیدی متمرکز شده است. وجود ۳ منبع در زون هسته، ۶ منبع در زون دوم و ۴۵ منبع در زون سوم، نشان‌دهنده آن است که پژوهشگران این حوزه برای دستیابی به مبانی تئوریک و روش‌های پیشرفته‌ی بهینه‌سازی، به‌طور هوشمندانه‌ای بر یک پیکره‌ی دانش متراکم و تخصصی تمرکز کرده‌اند. این تمرکز انتشاراتی نه تنها مانع از پراکندگی بی‌هدف مطالعات می‌شود، بلکه مسیر دستیابی به «بلوغ دانشی» را برای این رشته هموارتر می‌سازد. بنابراین، آنچه از تحلیل هم‌زمان این دو نمودار حاصل می‌شود، شناسایی یک اکوسیستم پژوهشی است که در آن جریان‌های اصلی (هسته‌ی مرکزی) وظیفه‌ی تبیین نظریات پایه و الگوریتم‌های مرجع را بر عهده دارند و لایه‌های بیرونی (زون‌های دوم و سوم) به توسعه‌ی کاربردهای ا- می‌پردازند.



شکل۹: توزیع فراوانی فراگیرترین نشریات و مخازن علمی(راست)

Figure 9: Frequency Distribution of the Most Prolific Journals and Scientific Repositories (Right)

شکل۱۰: منحنی انباشت مقالات و خوشه‌بندی نشریات بر اساس قانون پراکندگی برادفورد(چپ)

Figure 10: Article Accumulation Curve and Clustering of Journals Based on Bradford's Law of Scattering (Left)

پویایی زمانی تولیدات منابع و تفسیر الگوی تمرکز علمی در حوزه بهینه‌سازی عملکردی مجتمع‌های مسکونی:

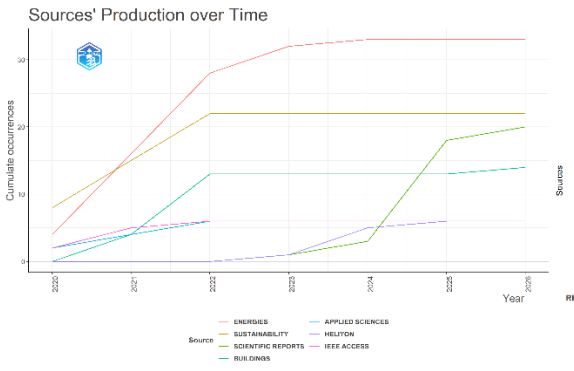
تحلیل هم‌زمان روند تولید منابع و شاخص اثرگذاری محلی نشان می‌دهد که ساختار انتشاراتی این حوزه صرفاً تابع حجم تولید نیست، یعنی منابع پرتولید لزوماً بیشترین نفوذ استنادی را ندارند. نمودار پویایی تولید(شکل۱۱) بیانگر آن است که Energies از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ رشد سریعی داشته و با حدود ۲۸ مقاله، به مهم‌ترین بستر انتشار آثار حوزه تبدیل شده است، سپس رشد آن تا حدود ۳۳ مقاله تثبیت شده است. Sustainability نیز با روندی مشابه، از

حدود ۸ مقاله در سال ۲۰۲۰ به حدود ۲۲ مقاله در سال ۲۰۲۲ رسیده و پس از آن رشد محدودی داشته است. بنابراین، این دو مجله را می‌توان حاملان موج نخست توسعه ادبیات دانست، دوره‌ای که تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر پایداری، مصرف انرژی و تعریف ابعاد مسئله در مقیاس ساختمان و مسکن بوده است.

در مقابلScientific Reports در سال‌های پایانی رشد چشمگیری را نشان می‌دهد و از حدود سه مقاله در سال ۲۰۲۳ به نزدیک ۲۰ مقاله در سال ۲۰۲۶ رسیده است. این الگو از انتقال تدریجی جریان انتشار به سمت مجلات میان‌رشته‌ای‌تر و پژوهش‌هایی با تأکید بر روش‌های هوشمند، مدل‌سازی پیشرفته و قابلیت تعمیم بیشتر حکایت دارد. مجلاتی نظیرBuildings ، Applied Sciencesو IEEE Access نیز اگرچه سهم تولیدی کمتری دارند، حضور پایدار آن‌ها نشان‌دهنده تقویت پیوند میان حوزه ساختمان، علوم داده، کنترل هوشمند و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. رشد تدریجی Heliyon نیز مؤید گسترش مسیرهای انتشار در بسترهای دسترسی آزاد و میان‌رشته‌ای است.

با این حال، رتبه‌بندی منابع بر پایه شاخص اچ تصویری متفاوت ارائه می‌کند.(شکل۱۲). Energies با شاخص اچ ۱۹، نه‌تنها پرتولیدترین، بلکه اثرگذارترین منبع در مجموعه مورد بررسی است و جایگاه آن را به‌عنوان هسته تثبیت‌شده ادبیات تأیید می‌کند. Sustainabilityبا شاخص اچ ۱۳ و Buildings با شاخص اچ ۱۰ نیز نقش مهمی در شکل‌دهی به گفتمان علمی حوزه دارند. در مقابل، Scientific Reportsبا وجود رشد سریع تولید، شاخص اچ ۸ دارد، وضعیتی که باید با توجه به تأخیر طبیعی دریافت استناد برای آثار جدیدتر تفسیر شود، نه به‌عنوان نشانه‌ای از اثرگذاری کمتر. به همین ترتیب، شاخص اچ ۶ برای Applied Sciences و IEEE Access بیانگر نفوذی متوسط اما معنادار در امتداد پژوهش‌های کاربردی، هوش مصنوعی و سامانه‌های انرژی است.

یافته‌ها وجود دو لایه در معماری منابع را آشکار می‌سازد: منابع تثبیت‌شده و اثرگذار، مانند Energies، Sustainability و Buildings، و منابع نوظهور با رشد تولید شتابان، به‌ویژه Scientific Reports. این تحول نشان می‌دهد که حوزه از مطالعات عمومی انرژی و پایداری به سمت پژوهش‌های تخصصی‌تر مبتنی بر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی چندهدفه حرکت کرده است. بااین‌حال، از آنجا که داده‌های سال ۲۰۲۶ کامل نیست و اثرگذاری استنادی منابع جدید با تأخیر ظاهر می‌شود، ارزیابی نهایی جایگاه آن‌ها نیازمند رصد داده‌های سال‌های آینده خواهد بود.



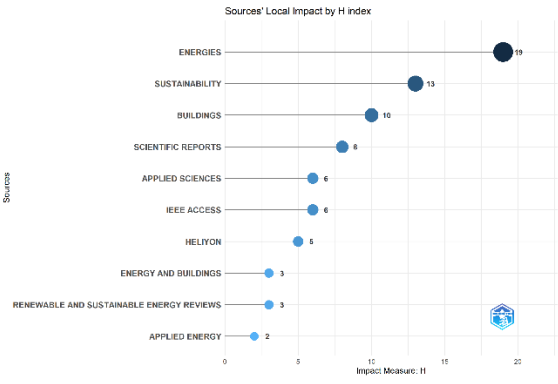


Figure 11: Temporal Dynamics of Source Production شکل۱۱: نمودار پویایی تولیدات منابع در طول زمان

Figure 12: Local Impact of Sources Based on the H-index. شکل۱۲: نمودار میزان اثرگذاری محلی منابع بر اساس شاخص(H-index)

تحلیل ساختار بهره‌وری نویسندگان و اعتبارسنجی الگوی تولید علمی (قانون لوتکا):

تحلیل هم‌زمان دو نمودار «تولید نویسندگان در طول زمان» و «قانون لوتکا» نشان می‌دهد(شکل۱۳ و ۱۴)، که ساختار نویسندگی در این حوزه از الگوی پراکنده و تک‌نویسنده‌محور پیروی نمی‌کند، بلکه بر پایه‌ی یک هسته‌ی کوچک از نویسندگان پرتکرار و یک بدنه‌ی بسیار بزرگ از مشارکت‌های تک‌مقاله‌ای شکل گرفته است. در نمودار پویایی تولید، نویسندگانی مانند Li X و Wang R از ابتدای دوره حضور فعال‌تری دارند و عملاً نقش نویسندگان پیشگام را ایفا می‌کنند، در مقابل، در سال‌های میانی و به‌ویژه از ۲۰۲۴ به بعد، نویسندگانی مانند Zhao Y، Liu Y، Li B، Duan Z و Liu X وارد فاز اثرگذاری و تداوم تولید می‌شوند. این جابه‌جایی زمانی مهم است، زیرا نشان می‌دهد که حوزه از مرحله‌ی شکل‌گیری اولیه و تثبیت مفهومی، به مرحله‌ی گسترش شبکه‌ی مشارکت و تنوع‌بخشی به مسیرهای پژوهش وارد شده است. هم‌زمانی اندازه‌ی حباب‌ها با میزان استناد سالانه نیز بیانگر آن است که نویسندگان پرتولید الزاماً همیشه بیشترین شتاب اثرگذاری را ندارند، اما در مجموع، خوشه‌ای از نویسندگان کلیدی توانسته‌اند هم تولید را حفظ کنند و هم جریان استنادی حوزه را هدایت نمایند.

نتایج قانون لوتکا این برداشت را به‌صورت کمی و بسیار قوی تأیید می‌کند. مقدار برآوردشده‌ی $\beta = 3.76$ و $R^2 =$ 0.9997 نشان می‌دهد که توزیع بهره‌وری نویسندگان با تمرکز بسیار بالا و انحرافی شدید از یکنواختی مواجه است، یعنی سهم عمده‌ی ادبیات توسط تعداد اندکی نویسنده تولید شده و بخش اعظم نویسندگان تنها یک مقاله منتشر کرده‌اند. این الگو، که با p-valueهای گزارش‌شده نیز از نظر برازش قابل‌قبول است، نشان‌دهنده‌ی آن است که این حوزه هنوز در مرحله‌ی تثبیت یک «هسته‌ی مولد» قرار دارد و از نظر بلوغ علمی، به‌جای توده‌ی وسیع نویسندگان تکرارشونده، بر چند بازیگر اصلی استوار است. از منظر تحلیلی، این یافته نشان می‌دهد که دانش این حوزه هنوز به‌طور کامل همگانی نشده و تولید دانش در آن به‌شدت وابسته به گروه‌های محدود پژوهشی است.در نتیجه، مسیر رشد آینده احتمالاً از طریق گسترش شبکه‌ی همکاری میان همین هسته‌ی مرکزی و نویسندگان نوظهور رقم خواهد خورد.

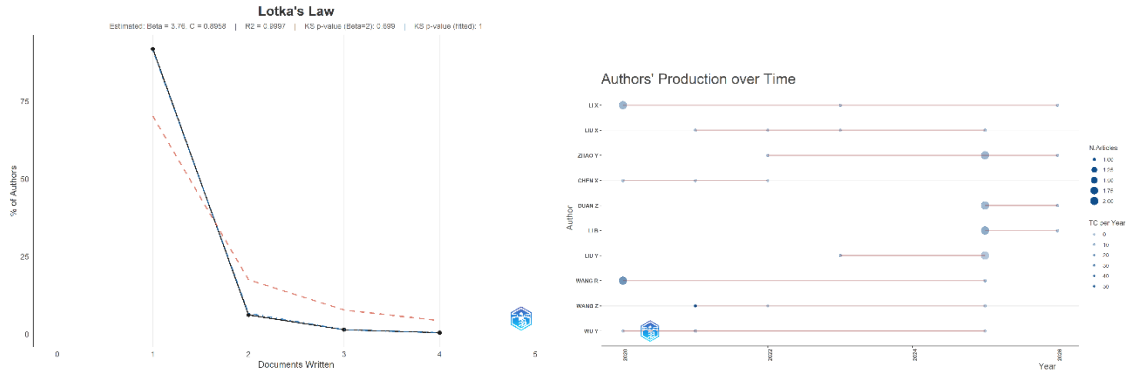


Figure 13: Temporal Dynamics of Authors' Scientific Output **شکل۱۳: نمودار پویایی تولیدات نویسندگان در طول زمان**

Figure 14: Frequency Distribution of Authors Based on Lotka's Law. **شکل۱۴: نمودار توزیع فراوانی نویسندگان بر اساس قانون لوتکا**

تحلیل روند مضامین نوظهور و پویایی واژگان کلیدی در بستر زمان:

نمودارهای «فراوانی واژگان در طول زمان» و «روند موضوعات» نشان می‌دهند(تصویر۱۵ و ۱۶)، که ادبیات پژوهش در زمینه‌ی بهینه‌سازی انرژی ساختمان از مفاهیم عمومی و توصیفی به سمت چارچوب‌های محاسباتی، هوشمند و چندهدفه حرکت کرده است. در نمودار فراوانی تجمعی، بهره‌وری انرژی در تمام دوره‌ی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ پرتکرارترین واژه باقی مانده و از حدود ۴ به ۱۶ مورد رسیده است. تداوم رشد این واژه نشان می‌دهد که بهره‌وری انرژی همچنان مسئله‌ی مرکزی و هدف پایه در این حوزه است، بااین‌حال، کاهش شیب رشد آن پس از سال ۲۰۲۲ بیانگر آن است که

مفهوم بهره‌وری انرژی به‌تدریج از یک موضوع مستقل به یک هدف درون چارچوب‌های پیچیده‌تر تصمیم‌گیری تبدیل شده است.

در مقابل، بهینه‌سازی چندهدفه از سال ۲۰۲۱ وارد ادبیات شده، تا سال ۲۰۲۲ به حدود ۵ مورد رسیده و پس از یک دوره‌ی ثبات، از سال ۲۰۲۴ رشد بسیار سریعی نشان داده است، به‌گونه‌ای که تعداد تجمعی آن در سال ۲۰۲۶ به حدود ۱۳ مورد می‌رسد. این شتاب، در مقایسه با روند نسبتاً تثبیت‌شده‌ی بهره‌وری انرژی، مهم‌ترین نشانه‌ی تغییر جهت روش‌شناختی حوزه است. بر این اساس، پژوهش‌ها دیگر کاهش مصرف انرژی را به‌عنوان تنها معیار ارزیابی در نظر نمی‌گیرند، بلکه به دنبال ایجاد تعادل میان اهدافی مانند آسایش حرارتی، مصرف انرژی، انتشار کربن، هزینه و عملکرد شبکه هستند. ازاین‌رو، بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به‌عنوان موضوعی نوظهور اما راهبردی و پیشران در نسل جدید مطالعات طراحی و مدیریت انرژی ساختمان شناسایی کرد.

روند مصرف انرژی نیز از سال ۲۰۲۰ حضور پررنگی داشته و تا سال ۲۰۲۱ به حدود ۵ مورد رسیده است، سپس رشد آن با شیبی ملایم ادامه یافته و در سال ۲۰۲۶ به حدود ۹ مورد رسیده است. این الگو نشان می‌دهد که مصرف انرژی همچنان یکی از متغیرهای اصلی سنجش عملکرد ساختمان است، اما اهمیت آن در سال‌های اخیر در ارتباط نزدیک‌تر با مدیریت انرژی و راهکارهای هوشمند تعریف شده است. در همین راستا، مدیریت انرژی از حدود ۳ مورد در سال ۲۰۲۰ به ۸ مورد در سال ۲۰۲۶ افزایش یافته و پاسخ‌گویی به تقاضا نیز از سال ۲۰۲۱ به بعد رشد تدریجی داشته است. هم‌زمانی این روندها نشان می‌دهد که تمرکز ادبیات از ارزیابی منفعل مصرف انرژی به سمت مدیریت فعال بار، پاسخ‌گویی تقاضا و هماهنگ‌سازی مصرف ساختمان با شرایط شبکه در حال تغییر است.

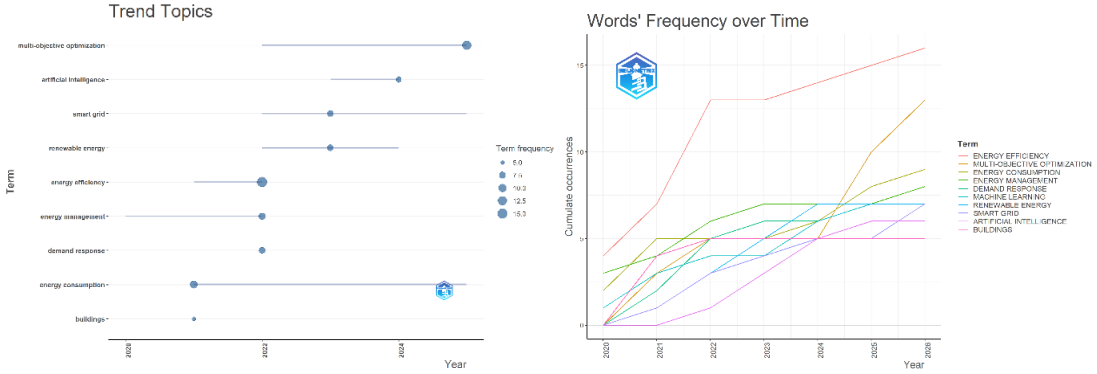
واژگان مرتبط با فناوری‌های هوشمند نیز مسیر رشد قابل‌توجهی دارند. یادگیری ماشین از یک مورد در سال ۲۰۲۰ به حدود ۷ مورد در سال ۲۰۲۶ رسیده و هوش مصنوعی، که در آغاز دوره تقریباً غایب بوده، از سال ۲۰۲۲ به بعد به‌صورت پیوسته افزایش یافته و در سال ۲۰۲۵ به حدود ۶ مورد رسیده است. این روند تأیید می‌کند که هوش مصنوعی ابتدا به‌عنوان یک ابزار نوظهور وارد ادبیات شده و سپس به‌تدریج به یکی از اجزای اصلی مدل‌سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد ساختمان تبدیل شده است. بااین‌حال، مقایسه‌ی فراوانی «هوش مصنوعی» و «یادگیری ماشین» با «بهینه‌سازی چندهدفه» نشان می‌دهد که در این پیکره، فناوری هوشمند هنوز بیش از آنکه یک هدف مستقل باشد، در نقش ابزار پشتیبان برای حل مسائل چندمعیاره به کار گرفته می‌شود.

رشد انرژی تجدیدپذیر از حدود یک مورد در سال ۲۰۲۰ به ۷ مورد در سال ۲۰۲۶، و افزایش شبکه هوشمند از صفر به حدود ۷ مورد، بیانگر گسترش تدریجی مقیاس تحلیل از ساختمان منفرد به سامانه‌ی انرژی و شبکه است. این تحول نشان می‌دهد که مجتمع‌های مسکونی در ادبیات جدید، صرفاً به‌عنوان مصرف‌کننده‌ی انرژی بررسی نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان اجزای فعال شبکه، تولیدکننده‌ی بالقوه‌ی انرژی و بسترهای قابل‌کنترل برای ادغام منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شوند. در مقابل، واژه‌ی ساختمان‌ها در سال‌های ابتدایی رشد داشته اما پس از سال ۲۰۲۲ تقریباً ثابت مانده است، بنابراین، نقش آن بیشتر به‌عنوان چارچوب زمینه‌ای و مقیاس مطالعه است، نه موضوعی که به‌تنهایی مسیر تحول پژوهش را تعیین کند.

نمودار روند موضوعات، این تحول را از منظر زمانی دقیق‌تر آشکار می‌کند. موضوع بهره‌وری انرژی عمدتاً در فاصله‌ی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ فعال بوده و مدیریت انرژی و انرژی تجدیدپذیر نیز در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ نقش پررنگ‌تری داشته‌اند. این موضوعات را می‌توان نماینده‌ی مرحله‌ی نخست ادبیات دانست، مرحله‌ای که در آن مسئله‌ی اصلی، شناسایی ظرفیت‌های کاهش مصرف و بهبود عملکرد انرژی ساختمان بوده است. مصرف انرژی دامنه‌ی زمانی گسترده‌تری، تقریباً از ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵، دارد و از تداوم اهمیت این مفهوم در تمام مراحل توسعه‌ی حوزه حکایت می‌کند. در مقابل، هوش مصنوعی عمدتاً در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ برجسته شده، درحالی‌که بهینه‌سازی چندهدفه طولانی‌ترین و متأخرترین روند را نشان می‌دهد و تا سال ۲۰۲۵ ادامه یافته است. قرار گرفتن بیشترین حباب این موضوع در انتهای دوره، همراه با گستره‌ی زمانی نسبتاً طولانی آن، نشان می‌دهد که بهینه‌سازی چندهدفه صرفاً یک

کلیدواژه‌ی مقطعی نیست، بلکه در حال تبدیل شدن به چارچوب غالب برای سازمان‌دهی پژوهش‌های جدید است. همچنین، تداوم موضوع شبکه هوشمند در فاصله‌ی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ نشان‌دهنده‌ی تقویت پیوند میان طراحی ساختمان، مدیریت بار، انرژی تجدیدپذیر و زیرساخت‌های شبکه‌ای است.

در مجموع، این دو نمودار یک مسیر تحول سه‌مرحله‌ای را آشکار می‌کنند: نخست، تمرکز بر بهره‌وری و مصرف انرژی، دوم، توسعه‌ی مدیریت انرژی، انرژی تجدیدپذیر و شبکه‌ی هوشمند، و سوم، غلبه‌ی رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی و بهینه‌سازی چندهدفه. دستاورد اصلی تحلیل آن است که نشان می‌دهد نوآوری حوزه صرفاً در افزایش استفاده از الگوریتم‌های هوشمند خلاصه نمی‌شود، بلکه در بازتعریف مسئله‌ی طراحی به‌عنوان یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری چندمعیاره و پویا شکل گرفته است. بر این اساس، مسیر آینده‌ی پژوهش می‌تواند بر توسعه‌ی مدل‌هایی متمرکز شود که به‌صورت هم‌زمان و قابل‌تفسیر، مصرف انرژی، آسایش حرارتی، انتشار کربن، انرژی تجدیدپذیر و پاسخ‌گویی به شبکه را در مقیاس مجتمع‌های مسکونی بهینه کنند.



شکل۱۵: مودار فراوانی واژگان کلیدی در طول زمان

Figure 15: Temporal Frequency of Keywords

شکل۱۶: نمودار مضامین گرایشی

Figure 16: Thematic Trend Topics

تحلیل توزیع واژگان در جدول زیر(جدول۲)، نشان‌دهنده یک ساختار سلسله‌مراتبی در ادبیات پژوهش است.

جدول۲- تحلیل توزیع فراوانی و پویایی زمانی واژگان کلیدی گرایشی(Trend Topics)

Table 2. Frequency Distribution and Temporal Dynamics of Trending Keywords (Trend Topics)

Term	Frequency	Year (Q1)	Year (Median)	Year (Q3)
energy consumption	9	2021	2021	2025
buildings	15	2021	2021	2021
energy efficiency	16	2021	2022	2022
energy management	8	2020	2022	2022
demand response	7	2022	2022	2022
renewable energy	7	2022	2023	2024
smart grid	7	2022	2023	2025
artificial intelligence	6	2023	2024	2024
multi-objective optimization	13	2022	2025	2025

تحلیل ساختار راهبردی و بلوغ مضامین پژوهش (نمودار راهبردی):

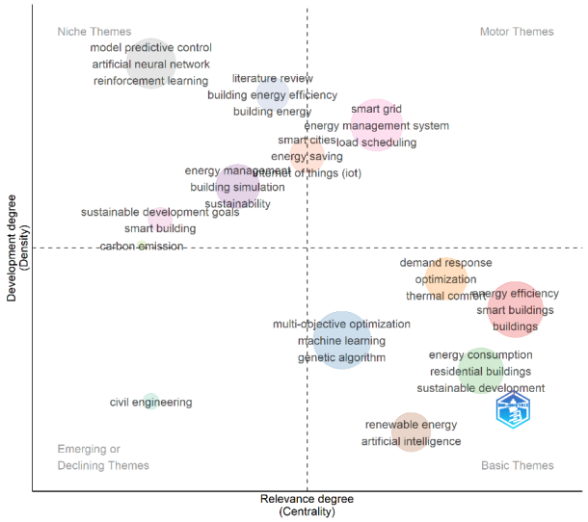
تحلیل نقشه استراتژیک (Thematic Map) حوزه مورد مطالعه(شکل۱۷)، ساختار دانشی پژوهش را در چهار ربع متمایز بر اساس دو شاخص «مرکزیت» (میزان پیوند با سایر حوزه‌ها) و «تراکم» (میزان توسعه‌یافتگی داخلی) تبیین می‌کند. در ربع موضوعات اساسی (Basic Themes)، خوشه‌هایی نظیر «بهره‌وری انرژی»، «آسایش حرارتی»، «ساختمان‌های مسکونی» و «توسعه پایدار» قرار دارند. بالا بودن مرکزیت و پایین بودن نسبی تراکم در این بخش نشان

می‌دهد که این مفاهیم، ستون‌های اصلی و زیربنایی ادبیات پژوهش هستند که ارتباط گسترده‌ای با سایر بخش‌ها دارند، اما از منظر تئوریک به بلوغ و تثبیت رسیده‌اند. حضور «هوش مصنوعی» و «انرژی‌های تجدیدپذیر» در مرز این ربع با موضوعات نوظهور، گویای آن است که این فناوری‌ها به بخش جدایی‌ناپذیر و ضروری مطالعات پایه تبدیل شده‌اند.

در مقابل، ربع موضوعات پیشران (Motor Themes) شامل خوشه‌هایی مانند «سیستم‌های مدیریت انرژی»، «زمان‌بندی بار» و «شبکه هوشمند» است. این موضوعات به‌دلیل دارا بودن هم‌زمان مرکزیت و تراکم بالا، موتور محرک پژوهش‌های فعلی محسوب می‌شوند و علاوه بر داشتن چارچوب نظری قوی، نقش پیونددهنده میان حوزه‌های مختلف هوش مصنوعی و مهندسی انرژی را ایفا می‌کنند. نکته حائز اهمیت در این بخش، انتقال تدریجی مفاهیم از ربع پایه به ربع پیشران است که نشان‌دهنده ارتقای سطح تحلیل از ساختمان‌های منفرد به سیستم‌های مدیریت هوشمند در مقیاس شهری و شبکه است.

ربع موضوعات تخصصی (Niche Themes) میزبان خوشه‌های پیشرفته‌ای همچون «یادگیری تقویتی»، «کنترل پیش‌بین مدل (MPC)» و «شبکه‌های عصبی مصنوعی» است. تراکم بسیار بالا در کنار مرکزیت پایین در این بخش، نشان‌دهنده توسعه عمیق و تخصصی این روش‌های محاسباتی در شاخه‌های خاصی از علم داده و کنترل است که هنوز به‌طور کامل با جریان اصلی طراحی معماری و مسکن ادغام نشده‌اند. این شکاف مرکزیت، یک فرصت پژوهشی راهبردی را آشکار می‌سازد: «کاربست مستقیم روش‌های یادگیری تقویتی و کنترل پیش‌بین در فرآیندهای بهینه‌سازی طراحی معماری» که می‌تواند نوآوری‌های آتی را رقم بزند.

قرارگیری خوشه «بهینه‌سازی چندهدفه»، «یادگیری ماشین» و «الگوریتم ژنتیک» در مرز میان موضوعات اساسی و نوظهور، دستاورد کلیدی این تحلیل را برجسته می‌کند. این خوشه با دارا بودن اندازه بزرگ (تعداد فراوانی بالا) و قرارگیری در موقعیت میانی، نشان‌دهنده گذار پارادایمیک حوزه از رویکردهای سنتی به سمت مدل‌های تصمیم‌یار هوشمند است. برخلاف موضوعات تخصصی، این روش‌ها به‌سرعت در حال کسب مرکزیت هستند تا به هسته سخت پژوهش‌های آینده تبدیل شوند. مجموع این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوآوری در این حوزه دیگر صرفاً در ابداع الگوریتم‌های جدید نیست، بلکه در «تلفیق هوشمندانه روش‌های تخصصی با نیازهای اساسی» برای رسیدن به اهداف متناقض کاهش کربن، ارتقای آسایش و مدیریت بهینه بار در مجتمع‌های مسکونی نهفته است.



شکل۱۷: نقشه مضمونی و موقعیت راهبردی خوشه‌های واژگانی

Figure 17: Thematic Map and Strategic Positioning of Keyword Clusters

تحلیل پویایی رشد و چرخه حیات تولیدات علمی: گذار از دوره اکتشاف به بلوغ موضوعی

تحلیل هم‌زمان منحنی رشد تجمعی و چرخه عمر انتشار نشان می‌دهد(تصویر۱۸ و ۱۹)، که حوزه‌ی مورد مطالعه، پس از یک دوره‌ی رشد سریع، به مرحله‌ی تثبیت و اشباع نسبی رسیده است. تعداد انتشارات سالانه از حدود ۳۱ مقاله در سال ۲۰۲۰ به اوج تقریباً ۴۴ مقاله در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته و سپس روندی کاهشی را تجربه کرده است، به‌گونه‌ای که تولید سالانه در سال‌های بعد به حدود ۴۱، ۱۱، ۸، ۲۲ و ۱۰ مقاله رسیده است. بنابراین، نقطه‌ی اوج چرخه‌ی انتشار در حدود سال ۲۰۲۲/۲۰۲۱ قرار دارد و پس از آن، با وجود برخی نوسان‌ها، شتاب تولید علمی کاهش یافته است. مقدار $R^2=0.617$ نشان می‌دهد که مدل چرخه عمر توانسته بخش قابل‌توجهی از تغییرات انتشار را توضیح دهد، اما برازش آن کامل نیست، ازاین‌رو، نوسان‌های سالانه احتمالاً تحت تأثیر عوامل بیرونی مانند تغییرات موضوعی، سیاست‌های انتشار، وقفه‌های نمایه‌سازی و محدودیت زمانی داده‌ها قرار داشته‌اند. منحنی رشد تجمعی نیز نشان می‌دهد که بخش عمده‌ی تولید علمی در سال‌های ابتدایی دوره شکل گرفته است. بر اساس منحنی، حدود ۵۰ درصد تولید تجمعی در حوالی سال ۲۰۲۱، حدود ۹۰ درصد در حدود سال ۲۰۲۴ و نزدیک به ۹۹ درصد در حوالی سال ۲۰۲۷ تحقق می‌یابد. پس از این مرحله، منحنی تقریباً افقی می‌شود و تعداد انتشارات تجمعی در حدود ۱۹۰ مقاله تثبیت می‌گردد. این الگو بیانگر آن است که حوزه در فاصله‌ی کوتاهی از مرحله‌ی ظهور به مرحله‌ی انباشت سریع دانش رسیده و اکنون در آستانه‌ی بلوغ یا اشباع انتشاراتی قرار دارد. به بیان دیگر، افزایش تعداد مقالات دیگر شاخص اصلی تحول حوزه نیست و اهمیت پژوهش‌ها به‌تدریج از «رشد کمی» به سمت «تخصصی‌شدن، اثرگذاری و ادغام روش‌ها» منتقل می‌شود.

تفاوت میان اوج انتشار سالانه و شکل منحنی تجمعی نیز از نظر تحلیلی اهمیت دارد. اگرچه بیشترین تولید در ابتدای دوره رخ داده است، بخش قابل‌توجهی از دانش موضوعی در سال‌های پس از اوج نیز انباشته شده و تا رسیدن به آستانه‌ی ۹۰ درصد ادامه یافته است. این امر نشان می‌دهد که کاهش تولید سالانه الزاماً به معنای افول علمی حوزه نیست، بلکه می‌تواند نشانه‌ی عبور از مرحله‌ی گسترش اولیه و ورود به مرحله‌ی غربالگری و تعمیق کیفی باشد. در چنین مرحله‌ای، پژوهش‌ها معمولاً از معرفی کلی مسئله به سمت مقایسه‌ی الگوریتم‌ها، اعتبارسنجی مدل‌ها، تحلیل عدم‌قطعیت و کاربردهای واقعی حرکت می‌کنند. یافته‌های دو نمودار حاکی از آن است که ادبیات پژوهشی این حوزه در فاصله‌ی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ وارد مرحله‌ی رشد انفجاری شده، در سال‌های پس از آن با نوسان و کاهش تولید مواجه گردیده و از حدود سال ۲۰۲۴ به بعد به سمت تثبیت ساختاری پیش رفته است. دستاورد اصلی این تحلیل آن است که حوزه را نه در وضعیت افول، بلکه در مرحله‌ی گذار از توسعه‌ی کمی به بلوغ مفهومی و روش‌شناختی معرفی می‌کند. در این مرحله، نوآوری آینده احتمالاً نه از افزایش تعداد مطالعات، بلکه از تلفیق دقیق‌تر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی با اهداف هم‌زمان کاهش مصرف انرژی، ارتقای آسایش حرارتی و کاهش انتشار کربن حاصل خواهد شد.

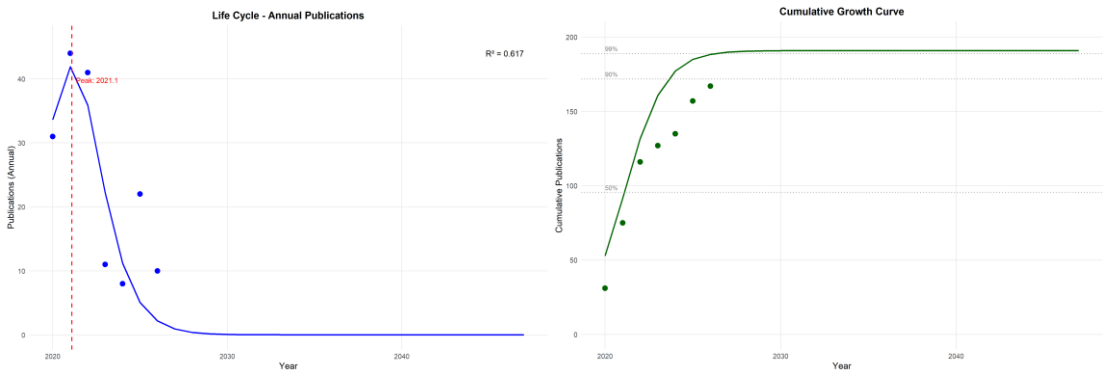


Figure 18: Cumulative Growth Curve of Scientific Publications شکل۱۸: منحنی رشد تجمعی تولیدات علمی

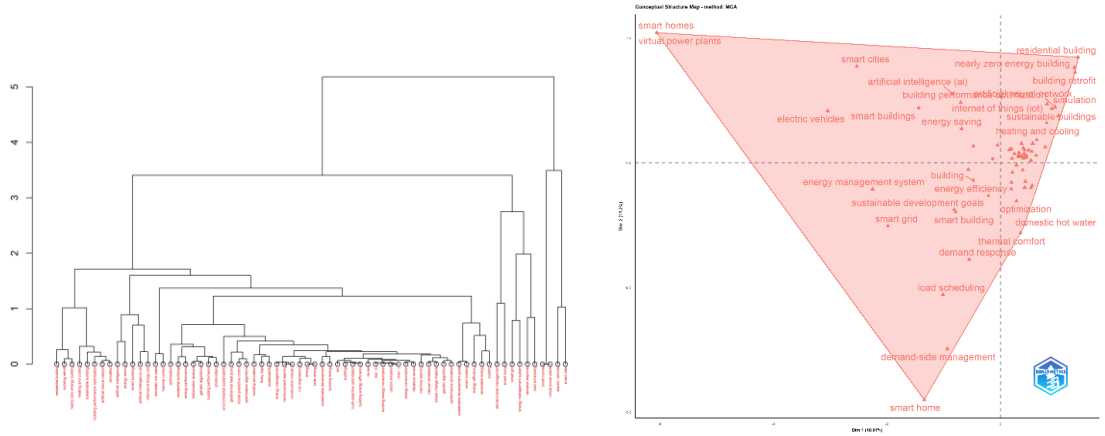
Figure 19: Life Cycle of Annual Scientific Output شکل۱۹: نمودار چرخه حیات تولیدات سالانه

تحلیل ساختار مفهومی و هم‌آیندی واژگان: گذار از بهره‌وری انرژی به بهینه‌سازی هوشمند و یکپارچه‌سازی ساختمان با شبکه انرژی

تحلیل ساختار مفهومی حوزه پژوهش از طریق نقشه‌ی تحلیل تناظر چندگانه (MCA) و نمودار درختی (Dendrogram)، حاکی از شکل‌گیری یک نظام دانشی یکپارچه است که حول سه قطب اصلی عملیاتی انتظام یافته است. در نقشه‌ی فاکتوریال، تمرکز شدید مفاهیم در مرکز نمودار نشان‌دهنده شکل‌گیری یک «هسته‌ی مفهومی پایدار» است که پیوند میان ابزارهای محاسباتی (نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های ژنتیک) و اهداف عملکردی (بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و کاهش انتشار کربن) را تثبیت کرده است. قرارگیری مفاهیمی همچون «بهینه‌سازی عملکرد ساختمان» و «اینترنت اشیا» در نزدیکی مرکز ثقل نمودار، نشان می‌دهد که این متغیرها به‌عنوان واسط‌های کلیدی، شکاف میان طراحی معماری و مدیریت هوشمند انرژی را پر کرده‌اند.

تحلیل سلسله‌مراتب در نمودار درختی، ابعاد این ساختار را با دقت بیشتری ترسیم می‌کند. شاخه‌ی نخست و گسترده‌ترین بخش دانش، بر «طراحی و بازسازی پایدار» تمرکز دارد که مفاهیمی همچون ساختمان‌های مسکونی، نوسازی و ساختمان‌های با مصرف انرژی نزدیک به صفر (nZEB) را شامل می‌شود. این بخش نشان‌دهنده کالبد پژوهش و بستر اصلی مسئله است. شاخه‌ی دوم، «موتور محاسباتی و مدیریتی» حوزه را نمایندگی می‌کند که در آن بهینه‌سازی چندهدفه، یادگیری ماشین و پاسخ‌گویی تقاضا در هم تنیده شده‌اند. پیوند نزدیک میان «آسایش حرارتی» و «مدل‌های بهینه‌سازی» در این شاخه، نوآوری کلیدی حوزه را برجسته می‌سازد، بدین معنا که هدف از به‌کارگیری هوش مصنوعی در مسکن، دیگر صرفاً کاهش کمّی مصرف نیست، بلکه ایجاد تعادل پویا میان کیفیت سکونت و پایداری زیست‌محیطی است.

شاخه‌ی سوم و متمایز در نمودار درختی که در فواصل دورتری از هسته مرکزی نقشه‌ی فاکتوریال (نظیر واژگان خانه‌های هوشمند و نیروگاه‌های مجازی) قرار گرفته، نشان‌دهنده «افق‌های نوظهور و مقیاس‌های کلان» است. حضور مفاهیمی همچون شهرهای هوشمند، خودروهای الکتریکی و مدیریت سمت تقاضا در لبه‌های بیرونی نقشه، بیانگر گذار پارادایمیک از «ساختمان به‌عنوان یک واحد مستقل» به «ساختمان به‌عنوان گره‌ای فعال در شبکه انرژی» است. این گسست نسبی از مرکز نقشه، مرزهای دانش فعلی را نشان می‌دهد و دلالت بر آن دارد که ادغام تمام‌عیار مجتمع‌های مسکونی در پلتفرم‌های شهر هوشمند، علی‌رغم جذابیت تئوریک، هنوز در مراحل اولیه توسعه مفهومی قرار دارد.



شکل۲۰: نقشه ساختار مفهومی بر اساس روشMCA
Figure 20: Conceptual Structure Map Based on Multiple Correspondence Analysis (MCA)

شکل۲۱: نمودار درختی هم‌آیندی واژگان.
Figure 21: Word Co-occurrence Dendrogram.

دستاورد نهایی این تحلیل تلفیقی، اثبات این واقعیت است که حوزه پژوهش از مطالعات پراکنده به سمت یک «اکوسیستم بهینه‌سازی هوشمند» حرکت کرده است. در این اکوسیستم، معماری (مسکن مسکونی)، مهندسی انرژی (کاهش کربن و بهره‌وری) و علوم کامپیوتر (الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین) به چنان همگرایی بالایی رسیده‌اند که تفکیک آن‌ها از یکدیگر در فرآیند طراحی غیرممکن شده است. این یافته برای معماران و سیاست‌گذاران بدین

معناست که طراحی مجتمع‌های مسکونی آینده باید بر پایه‌ی پلتفرم‌های تصمیم‌یار هوشمندی استوار باشد که قادر به تحلیل هم‌زمان رفتار ساکنان، عملکرد حرارتی کالبد و تعاملات شبکه‌ای انرژی باشند.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی روند تکامل زمانی، ساختار فکری و خوشه‌های علمی مطالعات جهانی درباره کاربرد هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی در طراحی مسکن پایدار، و نیز شناسایی شکاف‌های روش‌شناختی در تلفیق این ابزارها با اهداف انرژی و آسایش می‌پردازد. با وجود گسترش چشمگیر مدل‌های محاسباتی و بهینه‌سازی در دو دهه اخیر، هنوز شناختی منسجم از سازمان‌یافتن این دانش، گذار آن از مطالعات تک‌معیاره به چارچوب‌های چندهدفه و فاصله میان توسعه روش‌های هوشمند و کاربرد عملی آن‌ها در طراحی معماری وجود ندارد. ازاین‌رو در سه بعد تکامل زمانی، ساختار فکری و شکاف‌های روش‌شناختی تحلیل شد تا تصویری یکپارچه از وضعیت این حوزه ارائه شود.

بعد نخست تکامل زمانی: تحلیل روند واژگان و تولید علمی نشان داد که ادبیات این حوزه در سال‌های ابتدایی عمدتاً بر بهره‌وری، مصرف و مدیریت انرژی متمرکز بوده است. در مرحله میانی، مفاهیمی چون انرژی تجدیدپذیر، شبکه هوشمند و پاسخ‌گویی تقاضا مطرح شدند و مسئله از مقیاس ساختمان به تعامل آن با زیرساخت انرژی گسترش یافت. این تحول بیانگر آن است که عملکرد انرژی مجتمع‌های مسکونی تنها به ویژگی‌های کالبدی وابسته نیست، بلکه از برهم‌کنش هندسه و جهت‌گیری بنا، پوسته، تأسیسات، منابع تجدیدپذیر، الگوی مصرف و رفتار ساکنان و شرایط شبکه تأثیر می‌پذیرد.

در سال‌های پایانی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و به‌ویژه بهینه‌سازی چندهدفه به مضامین اصلی تبدیل شدند. رشد این رویکرد صرفاً ورود یک روش جدید نیست، بلکه نشان‌دهنده تغییر منطق پژوهش‌ها از نگاه تک‌معیاره و ایستا به کاهش مصرف انرژی، به رویکرد پویا و چندمعیاره بهینه‌سازی یکپارچه عملکرد ساختمان است، رویکردی که انرژی، کیفیت محیط داخل و پیامدهای زیست‌محیطی را هم‌زمان بررسی می‌کند. بنابراین، هوش مصنوعی از ابزار پیش‌بینی مصرف به بخشی از سازوکار تصمیم‌گیری طراحی ارتقا یافته و الگوریتم‌های تکاملی نیز امکان ارزیابی هم‌زمان گزینه‌های متعدد و استخراج راه‌حل‌های غیرمغلوب را فراهم کرده‌اند.

بعد دوم ساختار فکری و خوشه‌های علمی: تحلیل شبکه‌ها نشان داد هسته مفهومی حوزه بر بهره‌وری و مصرف انرژی، ساختمان‌های مسکونی و مدیریت انرژی استوار است و با یادگیری ماشین، الگوریتم‌های ژنتیک، شبیه‌سازی عملکرد، آسایش حرارتی و انتشار کربن پیوند دارد. این وضعیت، گذار از بهینه‌سازی تک‌بعدی انرژی به هم‌بهینه‌سازی انرژی، آسایش و کربن را نشان می‌دهد. بااین‌حال، با وجود نقش مؤثر مدیریت انرژی، زمان‌بندی بار و شبکه هوشمند در اتصال ساختمان به زیرساخت انرژی، روش‌هایی مانند یادگیری تقویتی، کنترل پیش‌بین و شبکه‌های عصبی هنوز در طراحی معماری و مجتمع‌های مسکونی جایگاه مرکزی ندارند. بنابراین، فاصله میان توسعه الگوریتم‌ها و کاربرد زمینه‌مند، قابل‌اعتماد و قابل‌تفسیر آن‌ها، مهم‌ترین گسست ساختاری حوزه است. همچنین، تمرکز تولید علمی در میان تعداد محدودی نویسنده و شکل‌گیری شبکه‌های کوچک، از ضعف همکاری‌های بین‌مؤسسه‌ای، بین‌المللی و میان‌رشته‌ای حکایت دارد که تکرار مطالعات، محدودیت داده‌ها و کاهش تعمیم‌پذیری مدل‌ها را در پی دارد. حوزه پس از رشد اولیه، به مرحله تعمیق کیفی رسیده و اکنون اعتبار مدل‌ها، مقایسه‌پذیری نتایج و اعتبارسنجی میدانی اهمیت بیشتری یافته‌اند.

بعد سوم شکاف‌های روش‌شناختی: مرور نظام‌مند مطالعات، چهار شکاف اصلی را شناسایی کرد. نخست، بسیاری از مدل‌ها همچنان بر شبیه‌سازی و داده‌های فرضی متکی‌اند و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های واقعی بهره‌برداری، پایش بلندمدت و بازخورد ساکنان محدود است؛ وضعیتی که قابلیت اتکای نتایج در عمل را کاهش می‌دهد. دوم، رفتار ساکنان غالباً ساده و قابل‌پیش‌بینی فرض می‌شود، درحالی‌که الگوهای حضور، ترجیحات حرارتی، استفاده از تجهیزات و

واکنش به قیمت انرژی می‌توانند نتایج بهینه‌سازی را به‌طور معناداری تغییر دهند. سوم، تمرکز بر کربن بهره‌برداری، توجه به کربن نهفته مصالح و ارزیابی چرخه‌عمر ساختمان، از طراحی و ساخت تا تعمیر، بازسازی و پایان عمر، را محدود کرده است. چهارم، تفاوت‌های اقلیمی، اقتصادی، فرهنگی و کالبدی مناطق به‌قدر کافی در مدل‌ها لحاظ نمی‌شود؛ بنابراین، تعمیم مستقیم نتایج میان اقلیم‌های مختلف اعتبار محدودی دارد. افزون بر این، تفسیرپذیری پایین مدل‌های پیچیده هوش مصنوعی، اعتماد معماران، مهندسان و سیاست‌گذاران را کاهش می‌دهد. بنابراین مسئله اصلی نه کمبود الگوریتم، بلکه فاصله میان توسعه روش‌ها و کاربرد زمینه‌مند، قابل‌اعتماد و قابل‌تفسیر آن‌ها در فرایند واقعی طراحی است. از این رو چالش اصلی حوزه دیگر «یافتن روش بهتر» نیست، بلکه «کاهش فاصله میان روش و عمل» است.

بر پایه همین یافته‌ها، مسیر پیش رو را می‌توان در چند محور سامان داد. نخست، توسعه چارچوب‌های ترکیبی و قابل‌اعتبارسنجی که در آن تلفیق یادگیری ماشین با الگوریتم‌های تکاملی و مدل‌های جانشین، هزینه و زمان شبیه‌سازی را کاهش داده و امکان ارزیابی تعداد بیشتری از گزینه‌های طراحی را فراهم کند. دوم، به‌کارگیری یادگیری تقویتی و کنترل پیش‌بین در کنار دوقلوهای دیجیتال مجتمع‌های مسکونی برای کاستن از فاصله میان مرحله طراحی و بهره‌برداری واقعی، مدل‌هایی که باید با داده‌های پایش‌شده مصرف انرژی، شرایط حرارتی، کیفیت هوای داخل، الگوی حضور و رضایت ساکنان آموزش و اعتبارسنجی شوند. سوم، بسط دامنه تابع هدف فراتر از انرژی عملیاتی و آسایش حرارتی، به‌گونه‌ای که انتشار کربن در چرخه حیات ساختمان، هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی، عدالت انرژی، کیفیت هوای داخل و قابلیت پذیرش اجتماعی را به‌صورت هم‌زمان لحاظ کند. چهارم، گنجاندن گزارش تحلیل حساسیت، عدم‌قطعیت و آزمون انتقال‌پذیری به‌عنوان بخشی ثابت از مطالعات و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در سناریوهای اقلیمی و رفتاری متفاوت. پنجم، توسعه پایگاه‌های داده باز و استاندارد و تقویت شبکه‌های همکاری میان‌رشته‌ای به‌عنوان پیش‌شرط خروج از مطالعات موردی پراکنده و حرکت به سمت دانش قابل‌انتقال و قابل‌تکرار.

با وجود یافته‌های حاصل از تحلیل علم‌سنجی، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی از جمله وابستگی نتایج به پایگاه‌های اطلاعاتی منتخب، بازه زمانی بررسی‌شده و راهبرد جست‌وجوی به‌کاررفته مواجه است. همچنین، تحلیل کتاب‌سنجی به‌تنهایی امکان ارزیابی مستقیم عملکرد واقعی الگوریتم‌ها یا اعتبارسنجی نتایج آن‌ها در شرایط بهره‌برداری از مجتمع‌های مسکونی را فراهم نمی‌کند. ازاین‌رو پژوهش‌های آینده می‌توانند با استفاده از داده‌های تجربی و مطالعات موردی، یافته‌های حاضر را تکمیل و اعتبارسنجی کنند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند، سپاسگزاری می‌کنیم.

References:

1.Abdelhady, M. I. M. (2021). Numerical simulation for the geometrical courtyard parameters affecting the indoor natural ventilation, case study in Sur, Oman. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, *13*(3), 1-15.https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/20043

2.Akyüz, M. K. (2025). Enviroeconomic optimization of insulation thickness for building exterior walls through thermoeconomic and life cycle assessment analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, *65*, 105606. 10.1016/j.csite.2024.105606

3.Al-Tamimi, N. (2021). Cost benefit analysis of applying thermal insulation alternatives to Saudi residential buildings. *JES. Journal of Engineering Sciences*, *49*(2), 156-177. 10.21608/JESAUN.2021.50485.1021

4.Asadpour, F., Shirdel, A. H., & Naghipour, P. (2024). Evaluation of perceptual indicators of physical environment affecting the inducement of citizen's sense of place in urban neighborhoods. *Energy and Buildings*, *325*, 114992. 10.1016/j.enbuild.2024.114992

5.Asadpour, F., Shirdel, A. H., Naghipour, P., & Naghipour, A. (2026). Bioclimatic Patterns and Socio-Behavioral Drivers Effective in Mitigating Thermal Hazards in Dense Urban Fabrics. *Geography and Human Relationships*, e252356. (In Persian) 10.22034/gahr.2026.600007.2839

6.Chou, J. S., & Nguyen, H. M. (2024). Simulating long-term energy consumption prediction in campus buildings through enhanced data augmentation and metaheuristic-optimized artificial intelligence. *Energy and Buildings*, *312*, 114191. 10.1016/j.enbuild.2024.114191

7.Dasi, H., Ying, Z., & Ashab, M. F. B. (2024). Proposing hybrid prediction approaches with the integration of machine learning models and metaheuristic algorithms to forecast the cooling and heating load of buildings. *Energy*, *291*, 130297.10.1016/j.energy.2024.130297

8.Fellah, M., Ouhaibi, S., Belouaggadia, N., Mansouri, K., & Sebaibi, N. (2024). Enhancing building energy efficiency across diverse climatic zones in marocco through optimized eco-friendly insulation thickness with air gap. *Energy Reports*, *12*, 1551-1565. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.040

9.Gu, Y., Deng, L., Qin, X., Zhou, X., Shi, X., & Jin, X. (2026). Performance analysis and optimization of the buoyancy-driven ventilation in the courtyard building. *Frontiers of Architectural Research*. 10.1016/j.foar.2026.04.006

10.Haseeb, Q. S., Yunus, S. M., Shoshan, A. A. A., & Aziz, A. I. (2023). A study of the optimal form and orientation for more energy efficiency to mass model multi-storey buildings of Kirkuk city, Iraq. *Alexandria Engineering Journal*, *71*, 731-741. 10.1016/j.aej.2023.03.020

11.Li, C., Pan, Y., Liu, Z., Liang, Y., Yuan, X., Huang, Z., & Zhou, N. (2024). Optimal design of building envelope towards life cycle performance: Impact of considering dynamic grid emission factors. *Energy and Buildings*, *323*, 114770. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114770

12.Lotfi, Y., & Hassan, M. (2024). Optimizing energy efficiency and thermal comfort of green envelope applications in hot arid climate. *Discover Applied Sciences*, *6*(2), 66. 10.1007/s42452-024-05698-4

13.Mahdinejad, J. D., & Shirdel, A. H. (2024). Analysis And Ranking of Factors Affecting The Design of Sustainable Housing in the Cold and Dry Climate of Sabzevar Based on Energy Consumption Optimization. (In Persian) 10.25524/jsae.2024.1126030

14.Mohajeri, M., Moafi, M., & Shirdel, A. H.(2026). Investigating the Role of Natural Light in Achieving Sustainable Architecture with Focusing on Sustainability and Energy Efficiency. https://elitesjournal.com/fa/page.php?rid=1206

15.Olfat, M., Asadpour, F., & Shirdel, A. H. (2025). Scientometric Analysis of Research Trends in Smart and Sustainable Architecture in Educational Environments: With an Emphasis on Green Schools and Campuses. *Scientometrics Research Journal*.(In Persian) 10.22070/rsci.2025.20848.1844

16.Olfat, M., Shirdel, A. H., Asadpour, F., & Haghnia, S. (2026). Futures-Oriented Directions in Sustainable Design for Senior Housing: A Scientometric Analysis of Research on Energy Load Reduction and Occupant Comfort (1980–2025). *Journal of Cross-Cultural Gerontology*, *41*(4), 53. 10.1007/s10823-026-09600-0

17.Qahfarokhi, F. M., & Fanni, Z. (2026). Evaluation of effects of ecological parks on the urban environment (Case Study: Shahmanzar Hafeshjan Shahrekord). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *7*(3), 215-229.(In Persian) https://www.srds.ir/article_243837_en.html

18.Rahaee, O., Salehi, S. S., & Shirdel, A. (2024). Improving the quality of natural ventilation in Masjedsoleiman's Schools' classrooms based on the openings' position and the outdoor shading blades with CFD Method. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, *12*(1), 129-150. (In Persian) 10.22061/jsaud.2024.10110.2179

19.Rahaei, O., Omidi, M., & Shirdel, A. H. (2025). Examining Investigating the Effect of the Central Courtyard Structure on the Natural Ventilation of Traditional Houses in Yazd; Case Study: Lariha and Golshan Houses. Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU), 16(1), 37-50. (In Persian) https://doi.org/10.30475/isau.2025.441169.2126

20.Rahaei, O., Shirdel, A. H., Asadpour, F., & Omidi, M. (2026). Explaining the Pattern of Natural Ventilation in Central Courtyards of Traditional Houses Based on Orientation. *Sustainable Cities and Society: Advances*, 100025. 10.1016/j.scsadv.2026.100025

21.Rouhi, S., & Mahdinejad, J. (2025). Investigating the efficiency of indigenous passive cooling systems in traditional Iranian houses: Quantitative and qualitative analysis in hot and dry climates. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *6*(2), 1-22.(In Persian) https://www.srds.ir/article_211227_en.html

22.Shirdel, A. H. (2025). Bibliometric Analysis of the Global Sustainable Buildings Trend (2020–2025): Focusing on Integrating Smart Technologies in Energy Management, Improving Quality of Life, and Reducing Environmental Impacts. *Journal of Environmental Science Studies*, *10*(3), 10660-10675. (In Persian) 10.22034/jess.2025.544659.2400

23.Shirdel, A. H., & Asadpour, F. (2026). Residents' Perception and Experience of Sustainable Design Components Influencing Energy Consumption Optimization in Residential Complexes (Case Study: Sabzevar City). *Geography and Human Relationships*, e247262.(In Persian) 10.22034/gahr.2026.591404.2809

24.Shirdel, A. H., Moafi, G. M., & Mohajeri, M. (2026). Investigating the Role of Natural Light in Achieving Sustainable Architecture with Focusing on Sustainability and Energy Efficiency. https://elitesjournal.com/fa/page.php?rid=1206

25.Shirdel, A. H., Olfat, M., Asadpour, F., & Heidari, M. S. (2026). Integrating Vernacular Patterns and Modern Passive Design Strategies for Energy Optimization in Iran's Hot-Arid Climate (Case Study: Qom City). *International Journal of Urban Management and Energy Sustainability*, *7*(2), 205-226. 10.22034/ijumes.2026.2069856.1326

26.Shirdel, A., & Mahdi Nejad, J. (2025). Explaining the principles of smart housing architecture with the aim of reducing the efficiency of non-renewable energy in order to preserve the environment. *Architectural Technologies Studies*, *4*(4), 7-22.(In Persian) https://arch.fatemiyehshiraz.ac.ir/article_725541_en.html

27.Sun, H., Bensalem, R., Dik, A., Tao, Z., Wang, Z., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2025). The impact of courtyard roof shape on adjacent building natural ventilation and passive cooling. *Journal of Building Engineering*, *111*, 113331. 10.1016/j.jobe.2025.113331

28.Usman, M., & Frey, G. (2021). Multi-objective techno-economic optimization of design parameters for residential buildings in different climate zones. *Sustainability*, *14*(1), 65. https://doi.org/10.3390/su14010065

29.Wang, R., Lu, S., & Li, Q. (2019). Multi-criteria comprehensive study on predictive algorithm of hourly heating energy consumption for residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, *49*, 101623. 10.1016/j.scs.2019.101623

30.Xie, Y., & Sun, X. (2025). Smart implementation and expectations for sustainable buildings: A scientometric analysis. *Buildings*, *15*(14), 2436. 10.3390/buildings15142436

31.Yu, H., Zhong, F., Du, Y., Xie, X. E., Wang, Y., Zhang, X., & Huang, S. (2023). Short-term cooling and heating loads forecasting of building district energy system based on data-driven models. *Energy and Buildings*, *298*, 113513. 10.1016/j.enbuild.2023.113513

32.Zhang, L., Cao, M., Li, N., Luo, L., Chen, Y., & Li, Z. (2025). Machine learning prediction of heating and cooling loads based on Athenian residential buildings' simulation dataset. *Energy and Buildings*, *342*, 115808. 10.1016/j.enbuild.2025.115808

OPEN ACCESS

COPYRIGHTS

© The Author(s). This is an open access article under the CC BY-NC license: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

Publisher: Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association