



Artificial Intelligence and Its Role in the evolution of architectural education and sustainable architectural design: Opportunities and Challenges

Shabnam Akbari Namdar¹

Assistant Professor Department of Architecture & Urban Planning, Ta.C. Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Elnaz Zargin²

Ph.D. Student, Department of Architecture, Ta.C. Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

The rapid development of artificial intelligence (AI) technologies has laid a fundamental evolution in architectural education and design. This research has been implemented using a descriptive-analytical approach and utilizing qualitative methods such as content analysis and network analysis with VOSviewer software to investigate the role of AI in enhancing the quality of architectural education, adaptive learning processes and sustainable design practices. The research hypothesis assumes that the accurate implementation and localization of AI technologies, through the integration of data-driven analysis, real-time feedback and human-machine interaction can significantly improve educational methodologies and the creation of innovative and sustainable designs. By analyzing the content of 120 selected papers, this study was presented a three-layer conceptual model including : technological infrastructure (including learning algorithms and simulation tools), human creativity and human-machine interaction and cultural and climatic localization. The findings suggest that realizing this evolution requires the reinforcement of technological infrastructure, enhancement of digital literacy, and reformation in educational structures. This study emphasizes the synergy between human creativity and technological capabilities and it introduces AI as a transformative factor in education and architectural design.

Keywords: Artificial Intelligence, Architectural Education, Architectural Design, Sustainable agriculture , Opportunities and Challenges

1. Corresponding Author: Email: Namdar@iau.ac.ir

2. Email: elnaz.zargin@iau.ac.ir



Extended Abstract

Introduction

The rapid advancement especially in the field of artificial intelligence (AI) has opened a new perspective for architectural education and design, a field inherently interdisciplinary has always required creative responses to challenges such as performance optimization, achieving sustainability and creative decision-making. Artificial intelligence (AI) with its capacity to analyze complex data and intelligent solution generation has enabled qualitative improvements in education and design. However, existing studies have only a superficial view of this capacity and have overlooked a deeper understanding of human-machine interaction, the role of human creativity and the necessity of localization. This research aims to present an applied framework for the purposeful utilization of artificial intelligence in education and architectural design from a human-centered and localized perspective; a framework that in addition to improving the quality of learning but it also leads to nurture creativity and facilitate sustainable decision-making. This study has been emphasized on the creative interaction between human and machine and the role of cultural and social contexts in the adoption of technology instead of solely focusing on technology. Accordingly, the research hypothesis is founded on the principle that implementation of precise, intelligent and context-aware of artificial intelligence technologies can create a fundamental evolution in education and architectural design; a transformation that does not aim to replace human but rather to promote human abilities.

Data and Method

This present study has a descriptive-analytical approach and it aims to develop a conceptual model for the application of artificial intelligence in education and architectural design by utilizing a systematic review of scientific sources from the past decade. To collect data, 120 selected papers from reputable databases such as Scopus, Web of Science and Google Scholar were analyzed using specialized keywords. In the analysis phase, the data were examined using two complementary methods:

Bibliometric analysis using VOSviewer software was conducted to visualize co-occurrence and co-authorship networks, which identified three main conceptual clusters: AI technologies, personalized education and sustainable and creative design.

Bibliometric Analysis:

Using VOSviewer software, co-word and co-authorship networks were mapped. This analysis identified three major conceptual clusters:

- (1) Core AI technologies,
- (2) Personalized and adaptive learning in architecture,
- (3) Sustainable and creative design processes.



Architectural Design Education and AI Visualization

Analysis using manual coding to extract key information about AI in architectural education. As a result, a framework was developed, focusing on the interaction between human creativity and cultural contextualization; dimensions of architecture education and design.

Cultural localization

Human creativity and human-machine interaction

Technological infrastructure

Cultural, human, and technological

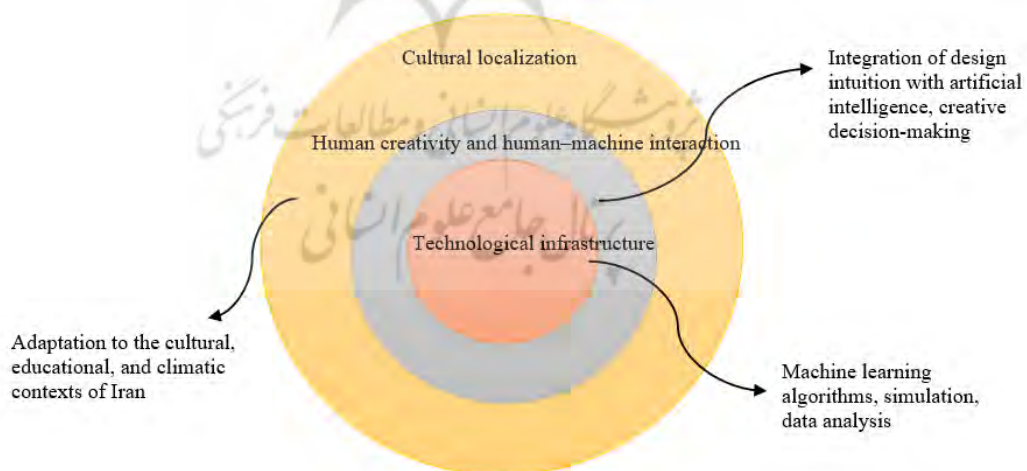


Figure 2: Three-layer conceptual model of the interaction between artificial intelligence and architectural education

Moreover, through structural analysis of the model, causal relationships among the three main layers were examined, and the functional map of each layer in interaction with the others was delineated.



Results and Discussion

These analyses indicate that despite the considerable potential of artificial intelligence (AI) to transform architectural education and design, multiple challenges and limitations persist. These include insufficient technological infrastructure, unequal access, inadequate specialized preparedness among faculty, cultural barriers and resistance to adopting modern technologies, as well as ethical and social concerns that continue to hinder the full development of AI applications in this field. Although AI possesses the capability to analyze complex data and optimize design processes, it cannot replace human creativity, judgment, and contextual understanding. Therefore, AI should be employed as a complementary and interactive tool to enhance accuracy, creativity, and sustainability in design.

Successful realization of this vision requires the advancement of sophisticated technological infrastructures, interdisciplinary specialized training for both professors and students, enhancement of digital literacy, and the formulation of clear ethical frameworks. Moreover, integrating AI with principles of sustainable design and cultural localization can create new opportunities for the revitalization of sustainable architectural environments, particularly within industrial brownfields and indigenous contexts such as the city of Tabriz.

The proposed three-layer conceptual model highlights the coordinated interaction among technology, human creativity and cultural context as the key to successful localization of AI. This model can serve as a strategic guide for policymakers, educational planners and architectural professionals. Finally, AI is not merely a technological tool but a fundamental catalyst for improving educational quality, design creativity and achieving sustainable architecture for the future.

Conclusion

This present study indicated that artificial intelligence technologies can play a key and transformative role in the processes of architectural education and design; however, realizing this evolution depends on purposeful, precise implementation tailored to local contexts. The utilization of technologies such as adaptive learning systems, real-time feedback and algorithms of creative form generation significantly enhances the quality of education and strengthens creativity and sustainability in architectural design. In addition, attention to organizational culture, development of technological infrastructure and the advancement of interdisciplinary skills and digital literacy among professors and students are the most critical prerequisites for successful utilization of AI in both educational and professional architectural environments. Findings from bibliometric and qualitative analyses confirm the central role of machine learning technologies, adaptive education, and innovative form generation on this path.

The presented three-layer conceptual model focusing the synergistic interaction among technological infrastructure, human creativity and cultural localization provides a comprehensive framework for understanding the opportunities and challenges of applying AI in architectural education. This model can serve as an effective guide for revising curriculum, designing interdisciplinary courses, strengthening infrastructures and empowering human resources. Finally, artificial intelligence transcends being a mere technological tool, positioning itself as a driving and transformative force in enhancing the quality of education, design creativity and the sustainability of future architecture.



Received: 02/05/2025

Accepted: 22/07/2025

Therefore, adopting a systematic and forward-looking approach to the development of AI applications in architectural education and design—particularly within local contexts—is essential and strategic.

References

- 1) Akbari Namdar, Shabnam, & Khodaei, Hanieh. (2025). Revitalizing Forgotten Architectural Spaces: A Proposal for Sustainable Architecture Development (Case Study: Industrial Spaces in Tabriz). *New Ideas in The Geographical Sciences*, 9(3), 1-16. (in Persian)
- 2) Almarashdeh, I. (2021). The role of artificial intelligence in enhancing online learning: A study in architecture education. *International Journal of Educational Technology*, 32(2), 87–103.
- 3) Alsharif, N., Al-Zahrani, A., Al-Mutairi, M., & Baqadir, A. (2020). Integration of AI in VR and AR for architecture education. *Journal of Educational Technology & Society*, 23(4), 45–58.
- 4) Aluko, R. O., Adenuga, O. A., Kukoyi, P. O., Soyngbe, A. A., & Oyedeji, J. O. (2016). Predicting the academic success of architecture students by pre-enrolment requirement: Using machine-learning techniques. *Construction Economics and Building*, 16(4), 86–98.
- 5) Aluko, R. O., Daniel, E. I., Oshodi, O., & Aigbavboa, C. (2018). Towards reliable prediction of academic performance of architecture students using data mining techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 16(1), 57–68.
- 6) Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Benefits, risks, and challenges. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 4(3), 79–83.
- 7) Binns, S. (2020). Ethical challenges of artificial intelligence in architectural education. *Journal of Architecture and Ethics*, 5(2), 113–127.
- 8) Björk, B.-C. (1999). The future of building information modeling. CIB Publication 2.
- 9) Bonnardot, L., Dupuis, M., & Rondeau, J. (2021). Artificial intelligence in architecture design: Challenges and implications for creativity. *Journal of Architectural Computing*, 32(4), 225–239.
- 10) Borges, A., Pinto, A., & Duarte, P. (2021). Computational intelligence in architectural design: An evolutionary approach. Springer.
- 11) Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2022). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. W. W. Norton & Company.
- 12) Cao, Y., Gao, X., Yin, H., Yu, K., & Zhou, D. (2024). Reimagining tradition: A comparative study of artificial intelligence and virtual reality in sustainable architecture education. *Sustainability*, 16(24), 11135.
- 13) Chien, C., & Lee, C. (2021). Adaptive learning systems in architectural education: AI for personalizing design education. *Architectural Science Review*, 64(1), 45–57.
- 14) Chien, S., Lee, S., & Wang, L. (2021). EvoArch: An evolutionary algorithm for architectural layout design. ResearchGate.
- 15) Eastman, C., Teicholz, P., & Sacks, R. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and fabricators* (2nd ed.). Wiley.
- 16) Garcia, R., et al. (2022). Enhancing architectural learning with AI, VR, and AR. *Education and Design Journal*, 32(2), 78–94.
- 17) Gero, J. S., & Maher, M. L. (2020). *Computational models in architecture*. Springer.
- 18) Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., & Alwaer, H. (2021). Artificial intelligence in architecture and building design: A comprehensive review of current applications. *Automation in Construction*, 123, 103541.
- 19) Goh, A., & Chow, W. (2021). The role of AI in the transformation of architectural education and design practices. *Journal of Educational Technology and Design*, 25(1), 51–67.



Received: 02/05/2025

Accepted: 22/07/2025

- 20) Günay, H., Aldridge, L., & Ghanbari, M. (2023). Artificial neural networks for sustainable architectural design: Energy efficiency and material selection. *Journal of Building Engineering*, 61, 105227.
- 21) Hosseini, M., & Nikbakht, A. (2022). Smart platforms in architecture: A review on AI-driven tools in education and design. *Architectural Technology Review*, 34(4), 289–305.
- 22) Huang, C., & Zhang, J. (2021). Social and ethical considerations in AI applications for architectural education. *International Journal of AI & Architecture*, 13(2), 118–134.
- 23) Jabareen, H. (2022). *Smart design technologies in architecture*. Routledge.
- 24) Jha, P., & Sharma, P. (2021). Integrating AI in architectural education: A pathway to innovation. *Journal of Architectural Education*, 78(3), 152–165.
- 25) Jin, S., Tu, H., Li, J., Fang, Y., Qu, Z., Xu, F., Liu, K., & Lin, Y. (2024). Enhancing architectural education through artificial intelligence: A case study of an AI-assisted architectural programming and design course. *Buildings*, 14(6), 1613.
- 26) Kamaei, Sepideh, & Kaboli, Dr. Ahmad Reza. (2024). Evaluation of Iranian Architecture and Social Interactions in Cultural Spaces. *New Ideas in The Geographical Sciences*, 3(2), 47-62 . (in Persian)
- 27) Kim, H., Cho, C. Y., & Hong, S. W. (2023). Impact of agent-based simulation on novice architects' workplace design exploration and trade-offs. *Automation in Construction*, 145, 104635.
- 28) Kiviniemi, M. (2014). *BIM and intelligent systems in architecture*. Elsevier.
- 29) Koh, J., Tan, K., & Lee, Y. (2022). Deep learning in architectural form generation: Applications and challenges. *Computers, Environment and Urban Systems*, 90, 101720.
- 30) Kotsiantis, S. B., Zervas, P. G., & Kalliris, D. (2023). AI in architectural education: Overcoming resistance to new technologies. *International Journal of Architectural Education*, 47(1), 45–59.
- 31) Koutamanis, A. (2020). Architectural design and artificial intelligence: A review of the role of creativity in design processes. *Design Studies*, 69(1), 1–17.
- 32) Leung, K., & Chan, M. (2022). AI in learning analytics for architecture education. *Education and Technology Journal*, 27(4), 430–445.
- 33) Li, B. (2023). Educational challenges and opportunities for integrating AI in architectural design: A global perspective. *Journal of Educational Technology*, 44(2), 234–250.
- 34) Li, W., Zhang, Y., & Wang, F. (2023). Optimization of energy and cost in building design using genetic algorithms. *ScienceDirect*.
- 35) Li, X., Xie, Y., & Zhang, M. (2022). *Fuzzy logic and evolutionary algorithms in design decision making*. Cambridge University Press.
- 36) Liu, J., Tan, Z., & Wang, Q. (2022). AI-based personalization and adaptive learning in architecture: Enhancing learning processes and outcomes. *Education and Information Technologies*, 27(6), 8607–8625.
- 37) Lu, Y., Wu, W., Geng, X., Liu, Y., Zheng, H., & Hou, M. (2022). Multi-objective optimization of building environmental performance: An integrated parametric design method based on machine learning approaches. *Building and Environment*, 208, 108629.
- 38) Miao, Y., Wu, J., Zhang, H., & Shen, G. Q. (2020). Understanding the role of artificial intelligence in construction project management. *Automation in Construction*, 122, 103465.
- 39) Newton, D. (2019). Generative deep learning in architectural design. *Technology|Architecture+Design*, 3(2), 176–189.
- 40) Nguyen, T., Le, T., & Tran, H. (2022). Artificial intelligence in architectural education: Revolutionizing learning processes. *Journal of Architectural Education*, 76(4), 123–139.
- 41) Papageorgiou, D., & Nikolaou, M. (2023). AI in architecture education: Automated assessment and student performance analysis. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 1–19.



Received: 02/05/2025

Accepted: 22/07/2025

- 42) Patel, M., & Lee, J. (2023). Generative design in architecture: Harnessing the power of deep learning. *Frontiers of Architectural Research*, 12(2), 250–265.
- 43) Perkins, S., et al. (2021). AR and AI in architecture: A new educational approach. *Architectural Technology Journal*, 19(2), 99–110.
- 44) Ralston, P. A. S., Hoyer, J. D., & Rambo-Hernandez, K. E. (2019). Building better engineers: A study of academic and career success in engineering with implications for education and diversity. *International Journal of STEM Education*, 6(1), 1–12.
- 45) Salem, O. (2021). Financial and infrastructural barriers to AI implementation in architecture education. *International Journal of Technology and Education*, 29(3), 203–217.
- 46) Schwab, K. (2021). *The fourth industrial revolution*. Penguin.
- 47) Serban, O., Thies, W., & Roussev, B. (2020). Machine learning in architecture: A review. *Automation in Construction*, 119, 103339.
- 48) Shatin, A., Farooq, M., & Rehman, A. (2021). Developing AI skills in architecture education: Strategies for faculty development. *Journal of Architectural Education*, 60(2), 94–110.
- 49) Smith, A., Wang, J., & Brown, C. (2021). *AI in architecture: Integrating machine learning with architectural design*. Routledge.
- 50) Sun, Y., Zhao, X., & Li, F. (2022). Artificial intelligence in architectural education: Overcoming challenges and enhancing skills. *Educational Review*, 28(1), 99–113.
- 51) Swan, M., & Lile, B. (2020). Artificial intelligence in architecture: Financial and infrastructure challenges. *Journal of Building Education*, 35(2), 243–257.
- 52) Tegos, S., Vassiliou, A., & Andreou, D. (2023). The future role of artificial intelligence in architectural and interior design education to improve efficiency, sustainability, and creativity. *ResearchGate*.
- 53) Törmä, M., Heikkilä, S., & Salo, A. (2020). Advanced data analysis algorithms for architectural design. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 12(2), 233–245.
- 54) Wang, Y., Huang, J., & Zhang, Z. (2022). *Machine learning applications in architecture and design*. Wiley.
- 55) Wang, Z., Hu, Z., & Fang, D. (2021). Artificial intelligence in architecture: Emerging trends and future prospects. *Journal of Architectural and Planning Research*, 38(3), 205–220.
- 56) Yang, M., Li, X., & Wang, Y. (2021). *Neural networks in architecture: From design to construction*. Springer.
- 57) Yuan, W., Li, Z., & Zhao, X. (2021). Using machine learning and genetic algorithms for energy optimization and cost reduction in building design. *ScienceDirect*.
- 58) Zhang, L., Wu, Y., & Yang, J. (2023). Using machine learning to simulate building behavior and improve design decisions. *ScienceDirect*.
- 59) Zhao, Y., & Wang, X. (2023). *AI-driven smart architecture: The future of building design and construction*. Elsevier.
- 60) Zhu, W., Chen, R., Lin, J., & Zhou, H. (2023). Machine learning for architectural design prediction. *Journal of Computational Architecture*, 17(1), 220–233.
- 61) Zhuang, X., Zhu, P., Yang, A. Y., & Caldas, L. (2025). Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. *Automation in Construction*, 174, 106129.



هوش مصنوعی و نقش آن در تحول آموزش و طراحی معماری پایدار: فرصت‌ها و چالش‌ها

شبنم اکبری نامدار^۱

استادیار گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

الناز زرگین^۲

دانشجوی دکتری معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

رشد روزافزون فناوری‌های هوش مصنوعی، زمینه‌ساز تحول بنیادین در آموزش و طراحی معماری شده است. این پژوهش با رویکرد توصیفی - تحلیلی و بهره‌گیری از روش‌های کیفی مانند تحلیل محتوا و تحلیل شبکه‌ای با نرم‌افزار VOSviewer، به بررسی نقش هوش مصنوعی در ارتقای کیفیت آموزش معماری، یادگیری انطباقی و طراحی پایدار پرداخته است. فرضیه پژوهش آن است که پیاده‌سازی دقیق و بومی‌سازی شدن فناوری‌های هوش مصنوعی، می‌تواند از طریق تلفیق تحلیل داده‌محور، بازخورد بلادرنگ و تعامل انسان - ماشین، منجر به بهبود فرایندهای آموزشی و خلق طراحی‌های نوآورانه و پایدار شود. با تحلیل محتوای ۱۲۰ مقاله منتخب، مدلی مفهومی سه‌لایه ارائه گردید که شامل: زیرساخت فناوریانه (شامل الگوریتم‌های یادگیری و شبیه‌سازی‌ها)، خلاقیت انسانی و تعامل انسان - ماشین، و بومی‌سازی فرهنگی و اقلیمی است. یافته‌ها نشان می‌دهد تحقق این تحول مستلزم تقویت زیرساخت‌های فناوریانه، ارتقای سواد دیجیتال، و بازنگری در ساختارهای آموزشی است. این پژوهش با تأکید بر هم‌افزایی میان قوه خلاق انسانی و قابلیت‌های فناوریانه، هوش مصنوعی را به‌عنوان عاملی تحول‌آفرین در آموزش و طراحی معماری معرفی می‌کند.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی، آموزش معماری، طراحی معماری، معماری پایدار، فرصت‌ها و چالش‌ها

Email: Namdar@iau.ac.ir

2. Email: elnaz.zargin@iau.ac.ir

^۱. نویسنده مسئول:

مقدمه

باتوجه به رشد چشمگیر هوش مصنوعی، ضرورت بهره‌گیری هدفمند، دقیق و بومی از این ابزار نوین در فرایندهای آموزش و طراحی معماری بیش از پیش نمایان شده است. معماری به عنوان دانشی میان‌رشته‌ای میان هنر و علم، همواره با چالش‌هایی چون بهینه‌سازی عملکرد، پاسخ به نیازهای پایداری و تقویت خلاقیت طراحی روبه‌رو بوده است. هوش مصنوعی با توان تحلیل داده‌های کلان، شبیه‌سازی عملکرد و ارائه راهکارهای هوشمند، امکانی نوین برای تحول در کیفیت آموزش و فرایند طراحی فراهم می‌آورد (Serban, Thies, & Roussev, 2020). اگرچه تأثیرات مثبت هوش مصنوعی بر آموزش و طراحی معماری به‌طور کلی پذیرفته شده است، بسیاری از پژوهش‌های پیشین دارای بیان‌های کلی و بدیهی بوده‌اند و ابعاد پیچیده‌تر تعامل انسان و ماشین، تأثیر بر فرایندهای خلاقانه و چالش‌های بومی‌سازی در محیط‌های آموزشی و حرفه‌ای کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Wang, Hu, & Fang, 2021). این خلأ پژوهشی موجب شده است فرصت‌های بالقوه فناوری هوش مصنوعی در ارتقای آموزش معماری و توسعه مهارت‌های تحلیلی و خلاقانه دانشجویان به‌طور کامل شناسایی و بهره‌برداری نشود. از سوی دیگر، نیاز فزاینده به معماری پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی در طراحی‌های معماری، ضرورت توجه ویژه به فناوری‌های نوین را بیش از پیش افزایش داده است. هوش مصنوعی می‌تواند با پردازش داده‌های بزرگ، پیش‌بینی نتایج طراحی و ارائه راهکارهای بهینه، نقش مؤثری در تحقق اهداف پایداری ایفا نماید (Miao, Wu, Zhang, & Shen, 2020). تمرکز این پژوهش بر پیوند میان هوش مصنوعی و طراحی معماری پایدار، از منظر تحلیل داده‌محور و تصمیم‌گیری هوشمندانه، یکی از نوآوری‌های کلیدی تحقیق به‌شمار می‌رود. هدف اصلی این پژوهش، تدوین چارچوبی دقیق، کاربردی و بومی‌شده برای بهره‌برداری از فناوری‌های هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری است که بتواند ضمن ارتقای کیفیت آموزش، تقویت خلاقیت و تسهیل تصمیم‌گیری‌های پایدار، زمینه‌ساز تحولی واقعی در این حوزه باشد. فرضیه اصلی بر این مبنا است که «پیاده‌سازی هدفمند، گسترده و بومی‌شده فناوری‌های هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری، می‌تواند موجب ارتقای کیفیت آموزش، افزایش خلاقیت در طراحی و تسهیل تصمیم‌گیری‌های پایدار شود.» این فرضیه با تأکید بر بومی‌سازی و هدفمندی، از کلی‌گویی‌های پیشین فاصله می‌گیرد و سعی دارد ابعاد عملیاتی‌تر و دقیق‌تر موضوع را پوشش دهد.

سؤال اصلی این تحقیق عبارت است از:

- هوش مصنوعی چگونه می‌تواند فرایند آموزش و طراحی معماری و معماری پایدار را به‌صورت مؤثر بهبود بخشد و چه نقش کلیدی در تحول آموزشی و حرفه‌ای این حوزه ایفا کند؟

سؤالات فرعی

- کاربردهای هوش مصنوعی در بهینه‌سازی یادگیری شخصی‌سازی‌شده و تحلیل عملکرد دانشجویان معماری کدام‌اند؟
- هوش مصنوعی چگونه می‌تواند در تسهیل تصمیم‌گیری‌های خلاقانه و پایدار در فرایند طراحی معماری مؤثر واقع شود؟



- چه موانع و چالش‌هایی در پیاده‌سازی فناوری‌های هوش مصنوعی در محیط‌های آموزشی و حرفه‌ای معماری وجود دارد؟
- چه راهبردها و مدل‌های مفهومی می‌توانند تعامل مؤثر میان توانمندی‌های انسانی و فناوری هوش مصنوعی را در آموزش و طراحی معماری تضمین کنند؟
- نقش فناوری‌های مکمل مانند واقعیت مجازی و واقعیت افزوده در ارتقای یادگیری تجربی معماری باهوش مصنوعی چگونه تعریف می‌شود؟

روش پژوهش حاضر شامل مرور نظام‌مند ادبیات علمی منتشر شده در ده سال اخیر به زبان‌های فارسی و انگلیسی و تحلیل کیفی تجربیات کاربردی در حوزه هوش مصنوعی در آموزش معماری است. برای تحلیل عمیق‌تر مفاهیم کلیدی، از تحلیل شبکه هم‌واژگانی با نرم‌افزار VOSviewer و تحلیل ساختاری مدل مفهومی بهره گرفته شده است. همچنین، با روش تحلیل محتوای کیفی، ۱۲۰ مقاله منتخب بررسی شده و شاخص‌های محوری در طراحی و آموزش معماری با رویکرد هوش مصنوعی استخراج شده‌اند. مدل مفهومی این پژوهش بر اساس تعامل مکمل میان توانمندی‌های انسانی و فناوری هوش مصنوعی در فرایند طراحی شکل گرفته است. تحلیل ساختاری مدل مفهومی سه‌لایه ارائه شده، بر پایه ارتباط متقابل میان زیرساخت‌های فناورانه، خلاقیت انسانی، و بومی‌سازی فرهنگی است که در بخش‌های بعدی به صورت تفصیلی بررسی شده است. انتظار می‌رود یافته‌های این مطالعه علاوه بر افزایش فهم نظری، زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های آموزشی فناورانه، بازاندیشی در سرفصل‌های درسی و گسترش رویکردهای نوین در آموزش و طراحی معماری باشد. به این ترتیب، این پژوهش درصدد است نقش کلیدی در تحول آموزشی و حرفه‌ای معماری ایفا کرده و راهکارهای عملی برای بهره‌برداری بهینه از فناوری هوش مصنوعی در این حوزه ارائه دهد.

پیشینه تحقیق

در دهه اخیر، هوش مصنوعی به عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین، جایگاهی مهم در آموزش و طراحی معماری یافته است. با این حال، اکثر مطالعات پیشین گرایش به بررسی منفرد ابزارها و کاربردهای AI داشته‌اند و کمتر به تحلیل ساختاری روابط میان متغیرهای فناورانه، آموزشی و فرهنگی پرداخته‌اند. از این رو، این بخش، پیشینه را به صورت تحلیل محور و نظام‌مند در چهار حوزه اصلی بررسی می‌کند:

۱. الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی طراحی

بسیاری از پژوهش‌ها بر بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)^۱ و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)^۲ در بهینه‌سازی عملکرد طراحی معماری تأکید کرده‌اند. این الگوریتم‌ها امکان تولید راهکارهای کارآمدتر، پایدارتر و

1 Genetic Algorithm

2 Particle Swarm Optimization (PSO)

سازگارتر با معیارهای چندگانه محیطی و زیبایی‌شناختی را فراهم کرده‌اند (Ghaffarianhoseini et al., 2021; Günay et al., 2022; Lu et al., 2023).

تحلیل ساختاری:

نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها بیشتر در سطح پارامتریک و تحلیل کمی عمل کرده‌اند و در زمینه‌های فرهنگی، بوم‌شناختی یا مفهومی طراحی، هنوز کاستی‌هایی وجود دارد (جدول ۱).

جدول ۱: الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی طراحی معماری

نویسنده	سال	نوع الگوریتم	کارکرد	نکته کلیدی
Ghaffarianhoseini et al.	۲۰۲۱	تکاملی	پایداری طراحی	بهبود کارایی انرژی
Günay et al.	۲۰۲۳	شبکه عصبی	انتخاب مصالح	کاهش مصرف انرژی
Lu et al.	۲۰۲۲	GAN + GA	طراحی چندهدفه	کاهش زمان محاسبات

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

۲. یادگیری عمیق و تولید فرم‌های نوآورانه

مطالعات متعددی از قابلیت یادگیری عمیق در خلق فرم‌های نوین معماری حمایت کرده‌اند. این رویکردها با بهره‌گیری از شبکه‌های مولد رقابتی (GAN) و شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، امکان تولید فرم‌هایی پیچیده، غیر دکارتی و پاسخ‌گو به زمینه‌های محیطی را فراهم کرده‌اند (Koh et al., 2022; Patel & Lee, 2023; Zhuang et al., 2025).

تحلیل ساختاری:

چالش اصلی در این حوزه «خلاقیت مصنوعی محدود» و «شباهت نتایج به داده‌های آموزشی اولیه» است. همچنین بسیاری از پژوهش‌ها فاقد سنجش تطبیقی میان خروجی هوش مصنوعی و طراحی انسان‌محور هستند (جدول ۲).

جدول ۲: یادگیری عمیق در تولید فرم‌های معماری

نویسنده	سال	فناوری	خروجی	چالش
Koh et al.	۲۰۲۲	GAN	فرم پیچیده	خلاقیت محدود
Patel & Lee	۲۰۲۳	Deep Generative	فرم کارآمد	فقدان زمینه‌گرایی
Zhuang et al.	۲۰۲۵	ML + گراف	فرم‌های خلاقانه	نیاز به داده‌های غنی

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

1 Generative Adversarial Networks (GANs)

2 Convolutional Neural Networks (CNNs)

۳. سیستم‌های یادگیری هوشمند و شخصی‌سازی آموزش معماری

تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهند که یادگیری تطبیقی مبتنی بر AI، توانسته است آموزش معماری را با نیازهای فردی هماهنگ کرده و بازدهی را افزایش دهد (Liu et al., 2022; Jin et al., 2024).

تحلیل ساختاری:

درعین‌حال، بسیاری از این سیستم‌ها فاقد انعطاف فرهنگی و محتوایی در زمینه معماری سنتی یا بومی هستند و تعامل میان استاد و دانشجو در محیط استودیوهای طراحی هنوز به طور کامل شبیه‌سازی نشده است (جدول ۳).

جدول ۳: یادگیری شخصی‌سازی شده در آموزش معماری

محدودیت	اثر	ویژگی کلیدی	سال	نویسنده
نیاز به داده‌های فردی	بهبود نتایج	Adaptive AI	۲۰۲۲	Liu et al.
هزینه و پیچیدگی اجرا	افزایش تعامل	AI+VR	۲۰۲۴	Jin et al.

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

۴. ارزیابی عملکرد دانشجویان باهوش مصنوعی

استفاده از آنالیز یادگیری، ارزیابی خودکار و مدل‌های پیش‌بینی عملکرد، به بهبود نظارت آموزشی و بازخورد لحظه‌ای کمک کرده است (Papageorgiou & Nikolaou, 2023; Aluko et al., 2016).

تحلیل ساختاری:

درحالی‌که دقت این سیستم‌ها در سنجش نمرات عددی قابل توجه است، اما در ارزیابی کیفی، خلاقیت‌محور و ایده‌پردازانه، هنوز جایگزینی برای تعامل انسانی وجود ندارد (جدول ۴).

جدول ۴: ارزیابی خودکار و تحلیل پیشرفت دانشجویان

چالش	کارکرد	نوع مدل	سال	نویسنده
ناتوانی در سنجش شهودی	بازخورد مؤثر	AI Analytics	۲۰۲۳	Papageorgiou & Nikolaou
عدم درک بستر فرهنگی	پیش‌بینی عملکرد	SVM	۲۰۱۶	Aluko et al.

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

تحلیل نهایی شکاف‌های پژوهشی:

باوجود دستاوردهای فناورانه، پیشینه پژوهش دارای کاستی‌هایی ساختاری است که پژوهش حاضر در پی پاسخ به آن‌هاست:

- نبود تحلیل علی از تأثیر هم‌زمان متغیرهای فنی، آموزشی و فرهنگی؛
- عدم ارزیابی تطبیقی میان طراحی انسان‌محور و طراحی ماشینی
- فقدان چارچوب‌های میان‌رشته‌ای تلفیقی برای ارتقای خلاقیت و پایداری (Newton, 2019; Cao et al., 2024).

مبانی نظری

۱. مفاهیم بنیادی هوش مصنوعی و کاربرد آن در طراحی معماری

۱.۱ تعریف هوش مصنوعی و مفاهیم مرتبط در معماری

هوش مصنوعی شاخه‌ای از علوم کامپیوتر است که به توسعه سیستم‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که قادر به انجام وظایف هوشمندانه مشابه انسان هستند. در حوزه معماری، هوش مصنوعی با بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ و هوش محاسباتی^۲، امکان تحلیل داده‌های پیچیده، بهینه‌سازی فرایند طراحی و ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری‌های معماری را فراهم می‌آورد (Zhao et al., 2023). این فناوری‌ها می‌توانند چالش‌های طراحی‌های پیچیده را کاهش داده و عملکرد کلی پروژه‌های معماری را بهبود بخشند.

۱.۲ یادگیری ماشین در طراحی معماری

یادگیری ماشین، شاخه‌ای از هوش مصنوعی، به سیستم‌ها امکان یادگیری خودکار از داده‌ها و بهبود عملکرد بدون برنامه‌ریزی صریح را می‌دهد. در معماری، یادگیری ماشین به معماران کمک می‌کند تا با تحلیل داده‌های گسترده و متنوع، الگوهای رفتاری کاربران و شرایط محیطی را شناسایی کرده و تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند. همچنین، این فناوری امکان شبیه‌سازی سناریوهای طراحی برای پیش‌بینی و بهبود عملکرد نهایی بنا را فراهم می‌آورد (Wang et al., 2022; Smith et al., 2021).

۱.۳ شبکه‌های عصبی در طراحی معماری

شبکه‌های عصبی^۳ مصنوعی، مدل‌هایی الهام‌گرفته از ساختار شبکه عصبی مغز انسان، قادر به تحلیل و پردازش داده‌های پیچیده و غیرخطی هستند. در معماری هوشمند، این شبکه‌ها برای تحلیل تعاملات فضایی، پیش‌بینی رفتار انرژی ساختمان‌ها و بهینه‌سازی فرایندهای ساخت‌وساز استفاده می‌شوند. به‌کارگیری شبکه‌های عصبی موجب افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی و تسریع فرایندهای طراحی و ساخت می‌گردد (Yang et al., 2021).

۱.۴ هوش محاسباتی در معماری: بهینه‌سازی طراحی و تصمیم‌گیری

هوش محاسباتی^۴ به مجموعه‌ای از روش‌های الگوریتمی اطلاق می‌شود که با شبیه‌سازی فرایندهای تصمیم‌گیری انسانی، به حل مسائل پیچیده می‌پردازد. در معماری، الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و منطق فازی، امکان ارزیابی گزینه‌های مختلف طراحی و انتخاب بهترین راه‌حل‌ها بر اساس معیارهای متنوع را فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها، ضمن تسهیل تصمیم‌گیری، موجب افزایش کارایی و کیفیت نهایی پروژه‌های معماری می‌شوند (Borges et al., 2021; Li et al., 2022). اگرچه هوش مصنوعی فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای تحول در معماری فراهم کرده است، اما محدودیت‌هایی

1 Artificial Neural Networks

2 Computational Intelligence

3 Artificial Neural Networks (ANNs)

4 Computational Intelligence



مانند نیاز به داده‌های گسترده و باکیفیت، پیچیدگی الگوریتم‌ها و هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، چالش‌های مهمی محسوب می‌شوند که باید به آن‌ها توجه شود.

۲. روند تاریخی به‌کارگیری هوش مصنوعی در طراحی معماری و آموزش معماری

از دهه ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰، هوش مصنوعی تحولاتی اساسی در طراحی و آموزش معماری ایجاد کرده است. ورود سیستم‌های CAD، سیستم‌های خبره^۲، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)^۳ و پیشرفت‌های یادگیری ماشین، به طراحان این امکان را داده است که تصمیمات بهینه‌تری بگیرند و فرایندهای طراحی و آموزش را بهبود بخشند (Eastman et al., 2018; Gero & Maher, 2020) (جدول ۵).

جدول ۵: جدول تاریخیچه و تکامل هوش مصنوعی و مهم‌ترین تحولات و فناوری‌های کلیدی

دوره زمانی	فناوری‌ها و تحولات کلیدی	توضیحات
دهه ۱۹۶۰-۱۹۷۰	ورود CAD به معماری	استفاده از نرم‌افزارهای CAD برای ترسیم دقیق‌تر نقشه‌ها و تسریع فرایند طراحی آغاز شد (Eastman et al., 2018).
دهه ۱۹۸۰	ظهور سیستم‌های خبره (Expert Systems)	سیستم‌های خبره برای اتخاذ تصمیمات پیچیده در طراحی‌ها و انتخاب مصالح به کار گرفته شدند (Eastman et al., 2018).
دهه ۱۹۹۰-۲۰۰۰	ظهور BIM و گسترش یادگیری ماشین	مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی طراحی‌ها گسترش یافت (Björk, 1999).
دهه ۲۰۱۰-۲۰۲۰	یادگیری عمیق، واقعیت افزوده و واقعیت مجازی	پیشرفت‌های یادگیری عمیق، واقعیت افزوده و واقعیت مجازی برای شبیه‌سازی طراحی‌ها و آموزش معماری به کار گرفته شدند (Jabareen, 2022).
دهه ۲۰۲۰ به بعد	هوش مصنوعی مولد و GAN	استفاده از هوش مصنوعی مولد (GAN) برای تولید طرح‌های نوآورانه و پیشرفت‌های BIM و یادگیری عمیق برای تحلیل داده‌های پیچیده معماری (Zhao et al., 2023).

مأخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

هوش مصنوعی در طراحی معماری توانسته بهینه‌سازی طرح، تولید سریع‌تر مدل‌ها و تحلیل‌های دقیق‌تر را ممکن سازد، اما محدودیت‌هایی مانند عدم توانایی در درک کامل نیازهای انسانی و زیبایی‌شناسی، وابستگی به داده‌های محدود و امکان بروز خطاهای الگوریتمی، چالش‌هایی جدی در کاربرد عملی این فناوری‌ها هستند.

1 Computer-Aided Design Systems

2 Expert Systems

3 Building Information Modeling (BIM)

۳. فرایندهای هوش مصنوعی در معماری

۳.۱ کاربردهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، شبیه‌سازی‌های هوشمند و الگوریتم‌های بهینه‌سازی^۱ طراحی ترکیب BIM با فناوری‌های هوش مصنوعی، به خودکارسازی و بهینه‌سازی فرایندهای طراحی، تحلیل و ساخت کمک می‌کند. الگوریتم‌های پیشرفته قادر به پیش‌بینی رفتار انرژی، عملکرد سازه‌ای و هزینه‌های پروژه هستند و ابزارهای مؤثری برای تصمیم‌گیری بهینه فراهم می‌آورند (Azhar, 2011; Zhao et al., 2023). شبیه‌سازی‌های یادگیری عمیق امکان پیش‌بینی رفتارهای پیچیده سازه و محیط را فراهم کرده‌اند و الگوریتم‌های تکاملی در انتخاب بهینه گزینه‌های طراحی نقش کلیدی دارند (Kiviniemi, 2014).

۳.۲ استفاده از هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های طراحی

هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های پروژه‌های پیشین و نتایج عملکردی، الگوهای نوین را شناسایی و کیفیت طراحی را ارتقا می‌دهد. این فناوری به معماران کمک می‌کند تا تعامل میان فضاها و محیط پیرامون را بهتر درک کرده و تصمیمات مبتنی بر شواهد اتخاذ کنند که منجر به طراحی‌های کارآمدتر و پایدارتر می‌شود (Azhar, 2011; Schwab, 2021). هرچند هوش مصنوعی ابزارهای نوآورانه‌ای برای ایجاد ایده‌های طراحی ارائه می‌دهد، اما محدودیت‌هایی در زمینه استقلال خلاقیت و فقدان حس زیبایی‌شناسی واقعی وجود دارد که باعث می‌شود خلاقیت انسانی همچنان نقش محوری خود را حفظ کند. علاوه بر این، نگرانی‌هایی درباره جایگزینی طراحان انسانی مطرح است.

۴. تأثیر هوش مصنوعی بر خلاقیت و پایداری در طراحی معماری.

۴.۱ ارتقای خلاقیت از طریق الگوریتم‌های طراحی مولد

الگوریتم‌های طراحی مولد، با بررسی هم‌زمان محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی، امکان تولید گزینه‌های متعدد و نوآورانه را فراهم می‌کنند. شبکه‌های مولد تخاصمی (GAN)^۲ و الگوریتم‌های تکاملی^۳، فرم‌های نوآورانه و غیرخطی خلق می‌کنند که روش‌های سنتی قادر به تولید آن‌ها نیستند (Zhao et al., 2023). این فناوری‌ها فرایند طراحی را از روندی خطی به فضایی اکتشافی و پویا تبدیل می‌کنند.

۴.۲ طراحی پایدار مبتنی بر داده و پیش‌بینی‌های هوشمند

هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل داده‌های محیطی، پیش‌بینی رفتار انرژی ساختمان و انتخاب مصالح کم‌مصرف عمل می‌کند. مدل‌های هوشمند با استفاده از داده‌های اقلیمی و مصرف انرژی، عملکرد زیست‌محیطی طرح‌ها را پیش از ساخت ارزیابی و پیشنهاداتی برای کاهش اثرات کربنی ارائه می‌دهند (Schwab, 2021).

1 Optimization Algorithms

2 Generative Adversarial Networks (GANs)

3 Evolutionary Algorithms

۴.۳ تعامل انسان و هوش مصنوعی در طراحی خلاقانه و پایدار

هوش مصنوعی به عنوان ابزار مکمل معمار عمل می‌کند و تعامل میان خلاقیت انسانی و پردازش هوشمند منجر به ایجاد فرایندهای مشارکتی و تصمیم‌گیری بهینه می‌شود که ترکیبی از زیبایی‌شناسی، عملکرد و پایداری است. هوش مصنوعی با ارائه سیستم‌های یادگیری هوشمند و تحلیل عملکرد دانشجویان، آموزش معماری را متحول کرده است، اما چالش‌هایی مانند مقاومت فرهنگی در برابر تغییر، نیاز به زیرساخت‌های فناوری پیشرفته، و نگرانی از کاهش تعامل انسانی و مهارت‌های عملی در آموزش وجود دارد که باید مدیریت شود.

۵. کاربردهای هوش مصنوعی در تحول آموزش معماری

معماری فرایندی چندبعدی است که دانش، هنر، خلاقیت و مهارت‌های تخصصی را در بستر فرهنگ و تمدن به هم می‌آمیزد (کمایی و کابلی، ۱۴۰۳). هوش مصنوعی فرصت‌های گسترده‌ای برای تحول آموزش معماری فراهم کرده است که شامل یادگیری شخصی‌سازی شده، شبیه‌سازی‌های تعاملی، استفاده از واقعیت مجازی و تحلیل یادگیری می‌شود (Li et al., 2022). این فناوری‌ها موجب ارتقای مهارت‌های تحلیلی، تفکر انتقادی و خلاقیت دانشجویان می‌گردند و آموزش را از حالت سنتی به فضای تعاملی و تجربی تبدیل می‌کنند (Jabareen, 2022).

۵.۱ سیستم‌های یادگیری انطباقی و پلتفرم‌های هوش مصنوعی در آموزش معماری

سیستم‌های یادگیری انطباقی مبتنی بر هوش مصنوعی، با تحلیل داده‌های وسیع عملکرد دانشجویان، محتوای آموزشی را به صورت پویا و متناسب با نیازهای فردی تنظیم می‌کنند و مسیرهای یادگیری بهینه‌ای فراهم می‌آورند (Nguyen et al., 2022). این سیستم‌ها با شخصی‌سازی مسیر یادگیری، تسهیل درک مفاهیم پیچیده و ارتقای کیفیت یادگیری در مقیاس وسیع را ممکن می‌سازند. پلتفرم‌های هوش مصنوعی نیز از طریق شبیه‌سازی فرایندهای طراحی و آموزش در محیط‌های مجازی، به بهینه‌سازی طراحی و پیش‌بینی نتایج کمک می‌کنند (Ralston et al., 2019). بازخوردهای آنی و تحلیل داده‌ها به دانشجویان امکان می‌دهد روند پیشرفت خود را به طور مستمر ارزیابی کنند و تصمیم‌گیری‌های طراحی را با دقت بیشتری انجام دهند. البته استفاده مؤثر از این فناوری‌ها نیازمند زیرساخت‌های فناورانه مناسب، آموزش تخصصی اساتید و مدیریت کارآمد داده‌هاست (جدول ۶).



جدول ۶: کاربرد سیستم‌های یادگیری انطباقی و پلتفرم‌های هوش مصنوعی در آموزش معماری

مؤلفه	تأثیر بر فرایند یادگیری	تأثیر بر فرایند طراحی	مزایا	چالش‌ها
سیستم‌های یادگیری انطباقی	شخصی‌سازی مسیر یادگیری بر اساس نیازها و پیشرفت فردی	-	تسهیل درک مفاهیم پیچیده و ارتقای کیفیت یادگیری در مقیاس وسیع	نیاز به جمع‌آوری داده‌های دقیق و پایش مستمر عملکرد
پلتفرم‌های هوش مصنوعی	شبیه‌سازی و تحلیل فرایندهای آموزشی در محیط‌های مجازی	بهینه‌سازی فرایندهای طراحی مبتنی بر تحلیل داده‌های پیچیده	افزایش دقت پیش‌بینی نتایج و بهبود تعاملات طراحی	نیاز به مهارت تخصصی برای بهره‌برداری مؤثر
بازخوردهای آنی و تجزیه و تحلیل داده‌ها	ارائه بازخورد فوری و شخصی شده به دانشجویان	بهبود کیفیت طرح‌ها از طریق تحلیل داده‌های عملکردی	تسریع فرایند تصمیم‌گیری و ارتقای کیفیت یادگیری	نیاز به مدیریت مؤثر حجم انبوه داده‌ها
شبیه‌سازی‌های هوشمند	تمرین مفاهیم معماری از طریق محیط‌های شبیه‌سازی شده	پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات طراحی بر محیط و جامعه	بهینه‌سازی طرح‌ها به صورت داده‌محور و هوشمند	نیاز به دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و منابع مناسب

مأخذ: نگارندگان

استفاده از سیستم‌های یادگیری انطباقی و پلتفرم‌های هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری می‌تواند تحولی بنیادین ایجاد کند. این فناوری‌ها با تحلیل داده‌های پیچیده و انجام شبیه‌سازی‌های دقیق، فرایندهای یادگیری و طراحی را بهینه می‌سازند. با این حال، بهره‌برداری اثربخش از این ابزارها مستلزم مدیریت کارآمد داده‌ها، آموزش تخصصی اساتید و فراهم‌سازی زیرساخت‌های فناورانه مناسب است.

۵.۲ هوش مصنوعی، واقعیت مجازی و واقعیت افزوده در یادگیری تجربی معماری

ترکیب هوش مصنوعی با واقعیت مجازی (VR) و واقعیت افزوده (AR) تحول چشمگیری در آموزش معماری ایجاد کرده است. این فناوری‌ها با ایجاد محیط‌های تعاملی، امکان مشاهده و تحلیل دقیق فضاهای معماری را در مقیاس واقعی فراهم می‌کنند. با استفاده از هدست‌های VR، دانشجویان می‌توانند تأثیر پارامترهای مختلف مانند نور، تهویه و آکوستیک را بر طراحی‌های خود بررسی کنند. هوش مصنوعی در این محیط‌ها عملکرد سیستم‌های معماری را تحلیل و بازخورد بهینه ارائه می‌دهد (Alsharif et al., 2020). در واقعیت افزوده، مدل‌های دیجیتال در محیط‌های واقعی نمایش داده شده و داده‌های محیطی به صورت زنده پردازش می‌شوند تا بازخورد آنی به دانشجویان داده شود (Perkins et al., 2021). این روش آموزش مفاهیم پیچیده‌ای؛ مانند طراحی شهری و تعامل انسان و فضا را تسهیل می‌کند و مهارت تفکر انتقادی و تحلیل سریع را در دانشجویان ارتقا می‌بخشد (Garcia et al., 2022). با وجود قابلیت‌های هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، محدودیت‌هایی از جمله پیچیدگی مدل‌سازی دقیق شرایط محیطی،

1 Virtual Reality (VR)

2 Augmented Reality

وابستگی به داده‌های ناکامل و هزینه‌های پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند، مانع گسترش سریع‌تر این کاربردها در پروژه‌های معماری پایدار شده است.

۶. افزایش کارایی و ارتقای کیفیت آموزش معماری

۶.۱ ارزیابی عملکرد دانشجویان و تحلیل داده‌های بزرگ

هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، ارزیابی عملکرد دانشجویان معماری را شخصی‌سازی و بهبود داده است. این سیستم‌ها با تحلیل داده‌های متنوع، نقاط ضعف و قوت هر دانشجو را شناسایی و بازخورد آنی ارائه می‌دهند که به اساتید در بهبود فرایند یادگیری کمک می‌کند (Papageorgiou & Nikolaou, 2023). همچنین هوش تجاری و تحلیل داده‌های بزرگ، به اساتید امکان می‌دهد تا شیوه‌های مؤثر آموزشی را شناسایی و مسیرهای یادگیری را بهینه‌سازی کنند (Leung & Chan, 2022).

۶.۲ پیش‌بینی نتایج طراحی با هوش مصنوعی

هوش مصنوعی نقش کلیدی در پیش‌بینی نتایج طراحی معماری ایفا می‌کند. مدل‌های یادگیری ماشینی، الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی عمیق می‌توانند عملکرد طرح‌ها را در شرایط مختلف شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند (Zhu et al., 2023). از کاربردهای مهم این مدل‌ها می‌توان به پیش‌بینی مصرف انرژی، راحتی ساکنان و پایداری محیط زیستی اشاره کرد که باعث بهینه‌سازی طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر می‌شود. استفاده از هوش مصنوعی در این مرحله، موجب کاهش خطاهای انسانی، افزایش دقت در اجرای طرح‌ها و بهره‌برداری از داده‌های پیش‌بینی‌شده برای تطبیق‌پذیری بیشتر با نیازهای کاربران نهایی می‌گردد. با بهره‌گیری از این رویکرد، می‌توان طرح‌هایی با کارایی بالا، مصرف انرژی بهینه و سازگاری بهتر با شرایط اقلیمی و اجتماعی ارائه داد. فناوری‌ها نه تنها کیفیت طرح‌ها را ارتقا می‌دهند، بلکه باعث کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی نیز می‌شوند (جدول ۷).

جدول ۷ جامع تحلیل و پیش‌بینی نتایج طراحی با استفاده از هوش مصنوعی

مرحله	توضیحات	چالش‌ها	فرصت‌ها
جمع‌آوری داده‌ها	جمع‌آوری داده‌های مرتبط با ویژگی‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی پروژه‌های معماری.	کیفیت و کمیت داده‌ها	دسترسی به داده‌های دقیق و جامع برای تحلیل‌های بهتر.
پیش‌پردازش داده‌ها	پاک‌سازی و نرمال‌سازی داده‌ها به منظور آماده‌سازی برای مدل‌های یادگیری.	پیچیدگی در تنظیم مقیاس‌ها و پاک‌سازی داده‌ها	ارتقای دقت مدل‌ها و بهبود کیفیت داده‌ها.
استخراج ویژگی‌ها	استخراج ویژگی‌های مؤثر در طراحی معماری از داده‌های موجود.	انتخاب ویژگی‌های مناسب و مرتبط	شناسایی الگوهای مهم و تأثیرگذار در فرایند طراحی.
آموزش مدل‌های یادگیری عمیق	استفاده از داده‌های پیش‌پردازش‌شده برای آموزش مدل‌های پیچیده یادگیری.	نیاز به منابع محاسباتی و تخصص فنی بالا	امکان یادگیری الگوهای پیچیده و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق.
ارزیابی مدل‌ها	ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای دقیق و داده‌های تست.	تفسیرپذیری نتایج و معیارهای ارزیابی	بهبود مستمر مدل‌ها با استفاده از بازخوردهای اجرایی.

بهینه‌سازی تکاملی	به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و ارتقای مدل‌ها.	پیچیدگی در تنظیم دقیق پارامترها	بهینه‌سازی طرح‌ها و افزایش کارایی سیستم‌ها.
تحلیل نتایج	تحلیل دقیق نتایج مدل‌ها برای شناسایی نقاط قوت و ضعف طرح‌ها.	تفسیرپذیری نتایج و تأثیر در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک	ارائه تحلیل‌های جامع و تقویت فرایند تصمیم‌گیری.
پیش‌بینی عملکرد طراحی	پیش‌بینی نتایج و عملکرد طراحی‌ها با توجه به متغیرهای محیطی و اقتصادی.	وابستگی به داده‌های تاریخی	پیش‌بینی دقیق‌تر و پاسخ‌گویی به تغییرات محیطی.
تصمیم‌گیری و اجرای طرح‌ها	اتخاذ تصمیمات نهایی برای طراحی و پیاده‌سازی پروژه‌ها بر اساس تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌ها.	مقاومت در برابر تغییر و پذیرش فناوری‌های نوین	افزایش کیفیت تصمیمات و کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی.

مآخذ: نگارندگان

۶.۳ شبیه‌سازی‌های هوشمند در آموزش معماری

شبیه‌سازی‌های هوشمند^۱، ابزار قدرتمندی برای آموزش معماری هستند که امکان بررسی شرایط مختلف محیطی، ساختاری و عملکردی ساختمان را فراهم می‌کنند. این شبیه‌سازی‌ها به کمک داده‌های واقعی و مدل‌های هوشمند، سناریوهای متعددی را پیش‌بینی می‌کنند و دانشجویان را در مواجهه با مسائل واقعی طراحی یاری می‌کنند (Kim & Park, 2023).

۶.۴ الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی

الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی، از جمله الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه‌ها و روش‌های تکاملی، در آموزش معماری برای یافتن راهکارهای بهینه در طراحی‌های پیچیده کاربرد دارند. این الگوریتم‌ها می‌توانند معیارهای مختلفی مانند هزینه، پایداری، عملکرد انرژی و زیبایی‌شناسی را هم‌زمان در نظر بگیرند و گزینه‌های متعددی را به دانشجویان ارائه کنند (Kim & Park, 2023). اگرچه روندهای فعلی نویدبخش توسعه سریع‌تر هوش مصنوعی در معماری هستند، اما چالش‌هایی مانند مسائل اخلاقی، حریم خصوصی، و نیاز به قوانین و استانداردهای شفاف، به همراه محدودیت‌های فنی و اقتصادی، می‌توانند روند توسعه و پذیرش این فناوری را محدود کنند.

نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی با فراهم آوردن ابزارهای نوین تحلیلی، بهینه‌سازی و تولید خلاقانه، نقش کلیدی در تحول فرایندهای طراحی و آموزش معماری ایفا می‌کند. ادغام فناوری‌های هوشمند با دانش انسانی، امکان ایجاد بناهای پایدار، کارآمد و نوآورانه را فراهم ساخته است. با ادامه پیشرفت‌های علمی و فناوری، چشم‌اندازهای جدیدی برای توسعه معماری خلاقانه و پایدار در بستر آموزش و عمل طراحی فراهم خواهد شد. کاربرد هوش مصنوعی در آموزش معماری نه تنها باعث تحول در شیوه‌های یاددهی و یادگیری شده، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کیفیت، کارایی و پیش‌بینی‌پذیری فرایندهای طراحی ایفا می‌کند. از تحلیل داده‌های آموزشی تا ارزیابی عملکرد طرح‌های معماری، هوش مصنوعی امکان تصمیم‌سازی مبتنی بر داده، شخصی‌سازی مسیرهای یادگیری، و بهینه‌سازی طرح‌ها را فراهم می‌آورد. با این حال، چالش‌هایی نظیر

دسترسی به داده‌های دقیق، نیاز به زیرساخت‌های فناورانه، و لزوم آموزش تخصصی منابع انسانی همچنان به‌عنوان موانعی در مسیر بهره‌برداری کامل از این فناوری مطرح هستند. رفع این چالش‌ها می‌تواند راه را برای تحول بنیادین در آموزش و طراحی معماری هموار سازد (جدول ۸).

جدول ۸ تحلیل سیستم‌های یادگیری و طراحی فرصت‌ها و چالش‌ها

مؤلفه	تأثیر بر فرایند طراحی	تأثیر بر فرایند یادگیری	مزایا	چالش‌ها
سیستم‌های یادگیری انطباقی	ارتقای درک مفاهیم طراحی با ارائه بازخوردهای فردی	تنظیم محتوای آموزشی بر اساس نیازهای فردی دانشجویان	یادگیری شخصی‌سازی‌شده، افزایش مشارکت	نیاز به زیرساخت‌های تحلیلی، حفظ حریم خصوصی داده‌ها
پلتفرم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی	پیش‌بینی نتایج طراحی و ارزیابی عملکرد طرح‌ها پیش از اجرا	شبیه‌سازی تجربی فرایند آموزش در محیط‌های تعاملی	افزایش دقت تصمیم‌گیری، کاهش خطای طراحی	پیچیدگی فنی، لزوم آموزش اساتید و دانشجویان
واقعیت مجازی/افزوده در یادگیری	بهبود درک فضایی و تعامل انسان با محیط مصنوع	ایجاد تجربه‌های واقعی و ملموس از فضاها	تسهیل آموزش مفاهیم پیچیده فضایی	هزینه‌های بالا و نیاز به تجهیزات پیشرفته
تحلیل یادگیری و داده‌کاوی	بهینه‌سازی مسیرهای طراحی بر اساس داده‌های عملکردی	ارزیابی دقیق روند پیشرفت دانشجو	ارتقای کیفیت آموزش و طراحی	چالش‌های مربوط به مدیریت داده‌ها و صحت تحلیل‌ها

مأخذ: نگارندگان

هوش مصنوعی در آموزش معماری نه تنها ابزارهای نوین برای یادگیری و طراحی فراهم می‌آورد، بلکه رویکردهای سنتی را به سمت آموزش تعاملی، داده‌محور و دانش‌محور سوق می‌دهد. با این حال، تحقق کامل این پتانسیل نیازمند آمادگی نهادی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناورانه، و توسعه مهارت‌های دیجیتال در میان اساتید و دانشجویان است.

روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر با رویکرد کاربردی و توصیفی - تحلیلی، به بررسی نقش فناوری‌های هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، تدوین سازوکاری مفهومی برای بهره‌برداری مؤثر از هوش مصنوعی به‌منظور ارتقای کیفیت آموزشی و دستیابی به طراحی‌های خلاقانه و پایدار است. فرضیه پژوهش بر این اساس است که فناوری‌های هوش مصنوعی، در صورت پیاده‌سازی دقیق و متناسب با بسترهای بومی، قادر به بهبود فرایندهای آموزش معماری (از طریق آموزش انطباقی، یادگیری مبتنی بر عملکرد و بازخورد بلادرنگ) و طراحی معماری (با رویکرد داده‌محور، پایداری و خلاقیت فرم) خواهند بود (جدول ۹).

جدول ۹: مراحل روش تحقیق

فعالیت‌ها و ابزارها	مرحله
تحلیل نیاز آموزش معماری، طراحی فرضیه مبتنی بر بومی‌سازی AI	تعریف مسئله و فرضیه
مرور نظام‌مند ۱۲۰ مقاله از پایگاه‌های Scopus، WOS، Google Scholar	گردآوری داده‌ها
استفاده از نرم‌افزار VOSviewer برای تحلیل هم‌واژگانی و هم‌نویسندگی	تحلیل کتاب‌سنجی
کدگذاری دستی و استخراج شاخص‌ها و مفاهیم کلیدی	تحلیل محتوای کیفی
تدوین مدل سه‌لایه‌ای بر پایه یافته‌های کمی و کیفی	طراحی مدل مفهومی
تحلیل روابط علت - معلولی بین زیرساخت، خلاقیت و بومی‌گرایی	ارزیابی و تحلیل ساختاری

مآخذ: نگارندگان

گردآوری داده‌ها

برای دستیابی به اهداف پژوهش، مرور نظام‌مند ۱۲۰ مقاله منتخب از پایگاه‌های معتبر Scopus، Web of Science و Google Scholar انجام شد. مقالات با کلیدواژه‌های مرتبط و در بازه زمانی ده سال اخیر انتخاب شدند تا تصویر به‌روز و جامعی از وضعیت تحقیقات مرتبط با هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری ارائه شود.

تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در دو مسیر مکمل صورت گرفت:

- تحلیل کتاب‌سنجی:

با استفاده از نرم‌افزار تخصصی VOSviewer، شبکه‌های هم‌واژگانی و هم‌نویسندگی تحلیل شدند. این تحلیل سه خوشه مفهومی اصلی را شناسایی کرد که شامل فناوری‌های پردازش داده و یادگیری ماشین، آموزش تطبیقی و طراحی پایدار و خلاقانه هستند.

- تحلیل محتوای کیفی:

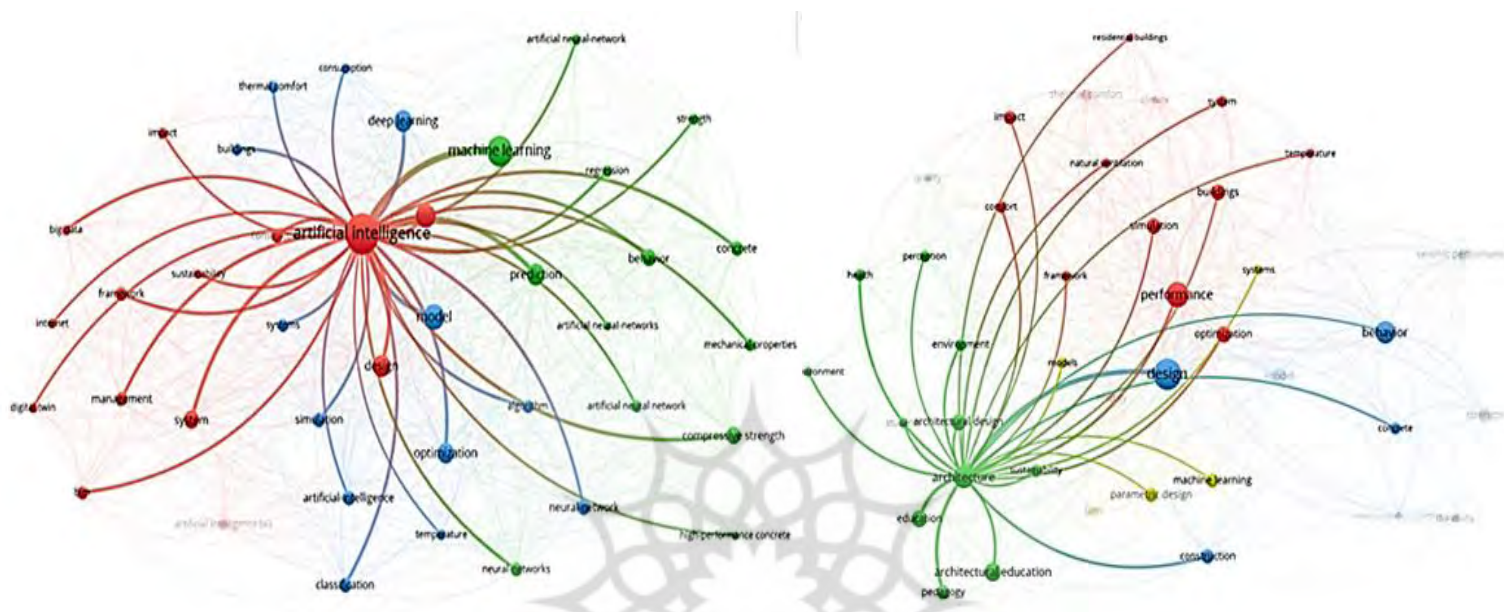
متن کامل مقالات منتخب به روش تحلیل محتوای ساختاریافته و کدگذاری دستی بررسی گردید. در این تحلیل فرصت‌ها، چالش‌ها و راهبردهای بومی‌سازی هوش مصنوعی در آموزش معماری استخراج شد.

نتایج تحلیل کتاب‌سنجی

تحلیل شبکه هم‌واژگانی نشان داد که واژگانی چون «creativity» و «sustainability» در مرکز شبکه قرار دارند و ارتباط قوی میان «machine learning» و «architectural studio» اهمیت ادغام فناوری در محیط‌های آموزشی معماری را تأیید می‌کند.

خوشه قرمز: شامل واژگان «AI»، «machine learning»، «deep learning» و «data-driven design» و تمرکز بر فناوری‌های اصلی هوش مصنوعی است.

خوشه آبی: مفاهیمی چون «design education»، «architecture studio»، «adaptive learning» و «student performance» را در بر می‌گیرد که مربوط به یادگیری شخصی‌سازی شده است. خوشه سبز: واژگانی مانند «creativity»، «parametric design»، «generative design» و «sustainability» که نقش هوش مصنوعی در نوآوری و طراحی پایدار را برجسته می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱: آموزش طراحی معماری و AI در vos viewer

مأخذ: نگارندگان

مدل مفهومی این پژوهش بر پایه تحلیل پیشینه و یافته‌های اخیر در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در طراحی و آموزش معماری، در قالب یک ساختار سه‌لایه‌ای طراحی شده است. این سه‌لایه عبارت‌اند از: زیرساخت فناوریانه (AI Infrastructure)، خلاقیت انسانی و تعامل انسان - ماشین، و پایداری فرهنگی و بومی‌سازی. این ساختار به گونه‌ای طراحی شده که هم چالش‌های فنی و فرهنگی را پوشش دهد و هم امکان تحلیل علی در بستر آموزش معماری را فراهم آورد (Ghaffarianhoseini et al., 2021; Patel & Lee, 2023).

لایه اول: زیرساخت فناوریانه (AI-Infrastructure Layer)

این لایه شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی و سامانه‌های تحلیل داده در طراحی و آموزش معماری است. این بخش از مدل، مسئول پردازش داده‌ها، تولید فرم، تحلیل نیازهای آموزشی و اجرای ارزیابی‌های خودکار است (Liu et al., 2022; Koh et al., 2022).

نقش کلیدی:

تولید فرم‌های پیچیده از طریق GAN ها و CNN ها (Newton, 2019; Zhao & Wang, 2022).

بهینه‌سازی مصرف انرژی و انتخاب مصالح با مدل‌های ML (Günay et al., 2023).

یادگیری شخصی‌سازی شده و تحلیل پیشرفت دانشجویان (Papageorgiou & Nikolaou, 2023).

لایه دوم: خلاقیت انسانی و تعامل انسان - ماشین

در این لایه، تأکید بر آن است که فناوری نمی‌تواند جایگزین قضاوت خلاقانه انسانی شود. معماران و اساتید باید درک زمینه‌ای و شهود طراحی را در تعامل با ابزارهای AI حفظ کنند. این لایه نشان می‌دهد که ابزارهای هوش مصنوعی باید مکمل فرایند خلاق انسانی باشند، نه جایگزین آن (Koutamanis, 2020; Jones, 2019).

نقش کلیدی:

تصمیم‌گیری نهایی با ملاحظات زیباشناسی و بوم‌گرایی
حفظ هویت طراحی و تلفیق آن با الگوریتم‌های هوشمند (Bonnardot et al., 2021).
ارتقای فرایند طراحی به‌جای اتوماسیون صرف آن

لایه سوم: پایداری فرهنگی و بومی‌سازی

این لایه بر ضرورت درک تفاوت‌های اقلیمی، آموزشی، فرهنگی و زیرساختی در کشورهایی چون ایران تأکید دارد. مدل‌های جهانی تنها در صورت بومی‌سازی و تطابق با زمینه‌های فرهنگی - اجتماعی، می‌توانند موفق باشند (Almarashdeh, 2021; Chien & Lee, 2021).

نقش کلیدی:

کاهش شکاف دیجیتال و مقاومت فرهنگی نسبت به فناوری (Brynjolfsson & McAfee, 2022).
تلفیق فناوری با آموزش پایدار و بازآفرینی محیطی (نامدار و خدائی، ۱۴۰۴).
طراحی دوره‌های میان‌رشته‌ای مناسب بستر دانشگاه‌های ایرانی (Sun et al., 2022).

تحلیل ساختاری مدل مفهومی:

جدول ۱۰ ساختار عملکردی مدل مفهومی سه‌لایه در آموزش معماری مبتنی بر هوش مصنوعی

خروجی‌ها	پردازش	ورودی‌ها	لایه
پیشنهاد طراحی، بازخورد آموزشی	پردازش الگوریتمی، شبیه‌سازی، ارزیابی	داده‌های طراحی، عملکرد، تحلیل رفتار	زیرساخت فناوریانه
طراحی بوم‌گرا و نوآورانه	تلفیق با خروجی AI، انتخاب نهایی	شهود، تجربه زیباشناختی، قضاوت حرفه‌ای	خلاقیت انسانی
سیاست‌های آموزشی و طراحی بومی‌شده	بومی‌سازی الگوریتم‌ها، بازطراحی	ویژگی‌های فرهنگی و اقلیمی	پایداری و بومی‌گرایی

مأخذ: نگارندگان

ارتباط میان‌لایه‌های سه‌گانه مدل مفهومی نشان می‌دهد که بدون توسعه زیرساخت‌های فناورانه، امکان تحلیل و ارائه بازخورد دقیق وجود ندارد. همچنین در غیاب خلاقیت انسانی، بهره‌گیری مؤثر از خروجی‌های AI ممکن نیست. پایداری فرهنگی نیز عامل تعیین‌کننده در پذیرش یا مقاومت نسبت به فناوری‌های نوین است. این وابستگی‌ها بیانگر ماهیت چندبعدی تحول آموزشی در معماری است.

نوآوری مدل این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین (جدول ۱۱):

جدول ۱۱ مقایسه تحلیلی مدل مفهومی سه‌لایه با پژوهش‌های پیشین در حوزه آموزش معماری مبتنی بر هوش مصنوعی

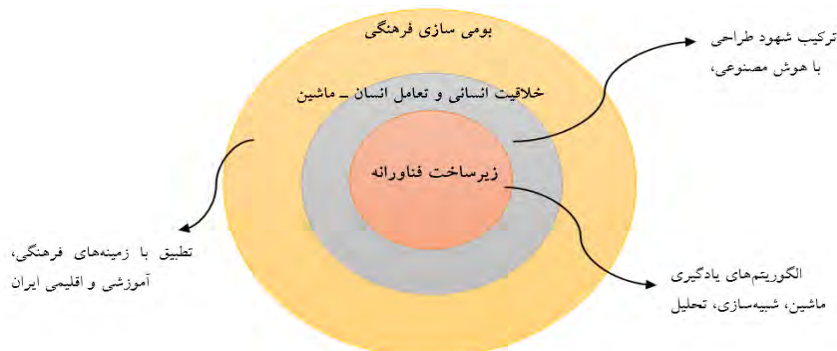
جنبه تحلیلی	پژوهش‌های پیشین	مدل این پژوهش
سطح تحلیل	غالباً تک‌لایه‌ای و فناوری‌محور	سه‌لایه‌ای و تلفیقی از انسان، فناوری و زمینه فرهنگی
نقش معلم و دانشجو	اغلب منفعل یا مصرف‌کننده فناوری	عامل خلاق و فعال در تعامل با فناوری
توجه به پایداری فرهنگی	محدود یا نادیده گرفته شده	لایه مستقل در ساختار مفهومی
پاسخ به چالش‌های ایرانی	کلی و غیربومی	تحلیل زمینه‌مند و پیشنهادها منطبق با آموزش معماری ایران

مآخذ: نگارندگان

مدل سه‌لایه‌ای پژوهش، به جای تحلیل صرف فنی، چارچوبی مفهومی و چندبعدی برای تحلیل علت و معلولی تحول آموزش معماری در بستر فناوری ارائه می‌دهد. این مدل نه تنها قابلیت پیاده‌سازی عملی دارد، بلکه می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های کلان آموزش معماری مبتنی بر هوش مصنوعی نیز نقش‌آفرینی کند.

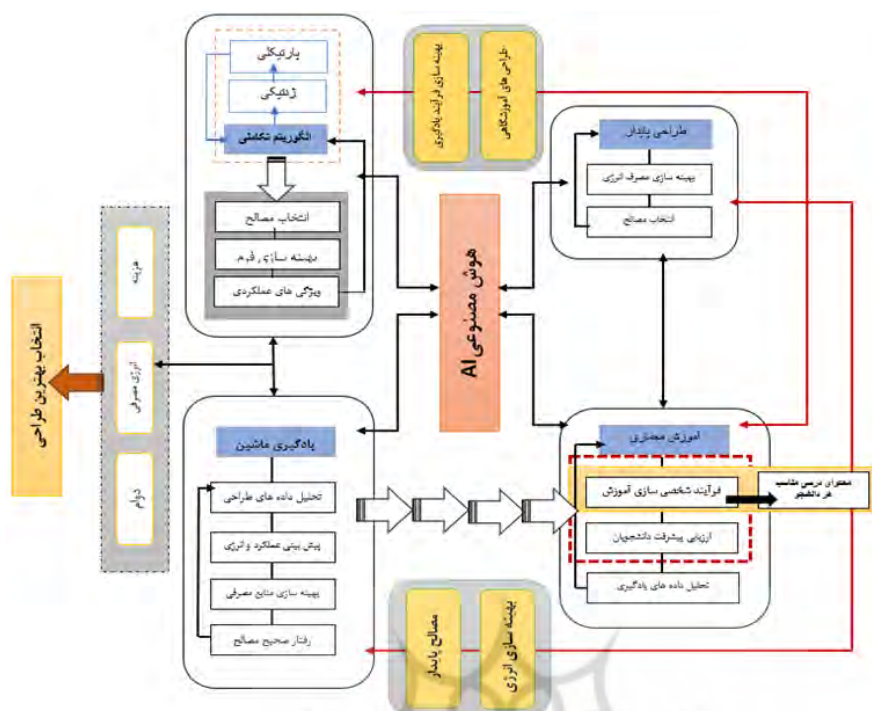
بخش تحلیل ساختاری:

به منظور ارتقای تحلیل پژوهش، روابط میان سه‌لایه کلیدی مدل مفهومی شامل زیرساخت‌های فناورانه، توانمندسازی نیروی انسانی و کاربرد هوش مصنوعی در فرایند آموزش و طراحی به صورت ساختاری تحلیل شدند. این تحلیل نشان می‌دهد که موفقیت در هر لایه بدون توجه به دو لایه دیگر ناکافی است و تحول آموزش معماری مبتنی بر هوش مصنوعی نیازمند رویکردی چندبعدی و هم‌افزا است. این ساختار تحلیلی درک بهتری از موانع و فرصت‌ها فراهم کرده و مسیرهای راهبردی متناسب با بسترهای بومی را نشان می‌دهد (شکل ۲) و (شکل ۳).



شکل ۲: مدل مفهومی سه‌لایه تعامل هوش مصنوعی با آموزش معماری

مآخذ: نگارندگان



شکل ۳: مدل پیشنهادی مفهومی

مأخذ: نگارندگان

تحلیل انتقادی مدل مفهومی پیشنهادی:

مدل مفهومی ارائه شده چارچوبی منسجم و نظام مند برای تلفیق فناوری‌های هوش مصنوعی در فرایندهای آموزش و طراحی معماری فراهم می‌آورد؛ اما ساختار علت و معلولی آن ساده و خطی بوده و پیچیدگی‌های واقعی حوزه آموزشی و طراحی را به طور کامل بازتاب نمی‌دهد. اثربخشی فناوری‌های هوش مصنوعی به متغیرهای متعددی از جمله کیفیت داده‌ها، توانمندی کاربران، ساختارهای نهادی و زمینه‌های فرهنگی و اجتماعی وابسته است که در این مدل به طور تحلیلی لحاظ نشده‌اند. همچنین، نقش متغیرهای محیطی و اقلیمی در پذیرش و کارایی فناوری‌ها مورد غفلت قرار گرفته است. باوجود توجه به تعامل انسان و ماشین به عنوان لایه‌ای کلیدی، تحلیل‌های رفتاری و شناختی لازم برای درک فرصت‌ها و محدودیت‌های این تعامل ناکافی است. برای ارتقای اعتبار و کاربردی شدن مدل، ضرورت انجام مطالعات میدانی و تحلیل تطبیقی نمونه‌های موفق وجود دارد. از این رو، پژوهش‌های آینده باید به رویکردهای تحلیلی پیچیده‌تر، گنجاندن متغیرهای محیطی - فرهنگی و آزمون‌های میدانی توجه ویژه‌ای داشته باشند تا مدل مفهومی به الگویی عملی و راهبردی در آموزش و طراحی معماری مبتنی بر هوش مصنوعی تبدیل شود.

بحث

۱. چالش‌ها و محدودیت‌های آموزش معماری مبتنی بر هوش مصنوعی

۱.۱. موانع زیرساختی، نابرابری دسترسی و آمادگی حرفه‌ای اساتید

استفاده از هوش مصنوعی در آموزش معماری با پتانسیل‌های وسیع خود، با موانع مهمی در زیرساخت‌های فناورانه و نیروی انسانی مواجه است. دانشگاه‌های کشورهای در حال توسعه از کمبود تجهیزات پیشرفته، عدم دسترسی به نرم‌افزارهای تخصصی و سرمایه محدود برای توسعه فناوری رنج می‌برند. همچنین، بسیاری از اساتید به علت کمبود آموزش تخصصی در زمینه فناوری‌های نوظهور، در کاربرد مؤثر هوش مصنوعی دچار مشکل‌اند؛ بنابراین توسعه برنامه‌های آموزش میان‌رشته‌ای و سرمایه‌گذاری مشترک دانشگاه، صنعت و دولت ضروری است (Nguyen et al., 2022; Tegos et al., 2023).

۱.۲. مقاومت فرهنگی در برابر پذیرش فناوری‌های نوین

یکی از موانع جدی در پذیرش فناوری‌های نوین در آموزش معماری، مقاومت نهادی و فردی در برابر تغییر است. معماری به‌عنوان حوزه‌ای با بنیان‌های خلاقانه و زیباشناختی، اغلب با نگرانی‌هایی نسبت به جایگزینی ابزارهای فناورانه با فرایندهای شهودی و انسانی روبه‌روست. این امر، به‌ویژه در میان اساتید و دانشجویان محافظه‌کار، موجب تعلل در پذیرش فناوری می‌شود. ارتقای سواد دیجیتال، آموزش مهارت‌های میان‌رشته‌ای و تدوین سیاست‌های حمایتی، گام‌های مؤثری برای تسهیل این روند هستند (Brynjolfsson & McAfee, 2022; Kotsiantis et al., 2023).

۱.۳. دغدغه‌های اخلاقی و ملاحظات اجتماعی

کاربرد هوش مصنوعی در آموزش معماری با پرسش‌های جدی اخلاقی همراه است؛ از جمله نگرانی درباره شفافیت الگوریتم‌ها، حفظ کرامت انسانی، و عدالت آموزشی. استفاده نابرابر از فناوری، می‌تواند نابرابری‌های موجود را تشدید کند. پاسخ به این دغدغه‌ها، مستلزم تدوین چارچوب‌های اخلاقی روشن، نظارت حرفه‌ای و افزایش آگاهی عمومی نسبت به ماهیت و حدود قابلیت‌های هوش مصنوعی است (Li, 2023).

۲. محدودیت‌های فنی و مفهومی استفاده از هوش مصنوعی در طراحی معماری

علی‌رغم توانایی‌های بالای الگوریتم‌های هوش مصنوعی در تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرایندها، این فناوری در مواجهه با پیچیدگی‌های مفهومی، فرهنگی و زیباشناختی طراحی معماری با چالش‌هایی جدی روبه‌رو است. معماری، در بُعدی بنیادین، بر خلاقیت، قضاوت انسانی و درک زمینه‌ای استوار است و جایگزینی کامل این مؤلفه‌ها با فناوری، نه ممکن است و نه مطلوب. از این‌رو، بهره‌گیری از هوش مصنوعی در طراحی معماری باید به‌عنوان ابزاری مکمل برای ارتقای خلاقیت و دقت در تصمیم‌گیری تلقی شود (Bonnardot et al., 2021) (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: چالش‌ها و راه‌حل‌ها در استفاده از هوش مصنوعی در طراحی معماری

مؤلفه	تأثیر بر آموزش	تأثیر بر فرایند طراحی
دقت محدود پیش‌بینی‌ها	کاهش کیفیت یادگیری تطبیقی	لزوم بهبود کیفیت داده‌ها (Ghaffarianhoseini et al., 2021)
خروجی‌های غیرقابل پیش‌بینی	دشواری در آموزش مبتنی بر الگوریتم	نیاز به الگوریتم‌های انطباق‌پذیرتر (Törmä et al., 2020)
نیاز به خلاقیت انسانی	عدم جایگزینی فرایندهای خلاق	لزوم تعامل انسان و ماشین (Koutamanis, 2020)
ملاحظات فرهنگی و زیباشناختی	لزوم بومی‌سازی آموزش	ضرورت حفظ هویت طراحی (Bonnardot et al., 2021)

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

۳. موانع اجرایی پیاده‌سازی فناوری هوش مصنوعی در آموزش معماری

۳.۱. محدودیت‌های مالی و فنی

فناوری‌های هوش مصنوعی نیازمند زیرساخت‌های پرهزینه‌ای از جمله سرورهای پردازش سنگین، نرم‌افزارهای تخصصی و شبکه‌های پایدار هستند. در بیشتر دانشگاه‌های جهان در حال توسعه، فراهم‌سازی این امکانات بدون حمایت دولتی یا خصوصی، دشوار است؛ لذا سیاست‌گذاری حمایتی و سرمایه‌گذاری هدفمند، پیش‌شرط تحقق این تحول فناورانه است (Swan & Lile, 2020; Salem, 2021).

۳.۲. چالش‌های اخلاقی، امنیتی و اجتماعی

استفاده از فناوری‌های مبتنی بر داده، همواره با نگرانی‌هایی درباره حریم خصوصی، مالکیت فکری، و کاهش تعاملات انسانی همراه است. در آموزش معماری، این چالش‌ها برجسته‌تر شده و نیازمند تدوین پروتکل‌های اخلاقی دقیق هستند (Huang & Zhang, 2021; Binns, 2020).

۳.۳. کمبود مهارت‌های میان‌رشته‌ای

ضعف در آموزش مفاهیم فناورانه به اساتید و دانشجویان، مانع مهمی برای بهره‌برداری مؤثر از AI در آموزش معماری است. طراحی و اجرای دوره‌های آموزشی مشترک میان دانشکده‌های معماری، علوم داده و مهندسی کامپیوتر، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است (Sun et al., 2022; Shahin et al., 2021).

۴. موانع، راهکارها و نقش هوش مصنوعی در تحول آموزش و طراحی معماری پایدار

توسعه زیرساخت‌ها و پلتفرم‌های آموزشی هوشمند

تحول در آموزش معماری، مستلزم ایجاد بسترهای فناورانه‌ای چون سامانه‌های تحلیل داده، الگوریتم‌های یادگیری عمیق و ابزارهای مبتنی بر BIM است. این ابزارها، با فراهم‌سازی محیطی تعاملی و داده‌محور، ظرفیت بالایی برای ارتقای مهارت‌های طراحی و تصمیم‌گیری دانشجویان دارند (Goh & Chow, 2021; Hosseini & Nikbakht, 2022).



۴.۱. توانمندسازی اساتید از طریق آموزش‌های میان‌رشته‌ای

اساتید، نقش کلیدی در پیاده‌سازی موفق فناوری‌ها ایفا می‌کنند؛ بنابراین آشنایی آنان با مفاهیمی چون یادگیری ماشینی، طراحی الگوریتمی و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی ضروری است. آموزش‌های عملی و تجربی، در کنار مشارکت در پروژه‌های پژوهشی مشترک، از جمله روش‌های مؤثر در این مسیر هستند (Binns, 2020; Jha & Sharma, 2021).

۵. نقش هوش مصنوعی در بازآفرینی پایدار فضاهای معماری

ترکیب فناوری‌های نوین با اصول طراحی پایدار، به‌ویژه در بازآفرینی فضاهای صنعتی متروکه، افق‌های تازه‌ای در توسعه شهری پایدار می‌گشاید. هوش مصنوعی با قابلیت تحلیل داده‌های پیچیده اقلیمی، مصرف انرژی، و الگوهای رفتاری، ابزاری توانمند در طراحی محیط‌های سازگار با طبیعت است. تجربه شهر تبریز، به‌عنوان نمونه‌ای بومی، ظرفیت بالایی برای استفاده از این مدل ترکیبی دارد (نامدار و خدائی، ۱۴۰۴) (جدول ۱۳).

جدول ۱۳: چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از هوش مصنوعی در طراحی معماری پایدار

موضوع مورد بررسی	فرصت	چالش	رفرنس
زیرساخت فنی	تحلیل مؤثر داده‌های معماری	نیاز به سخت‌افزارهای پیشرفته	Nguyen, et al (2022)
ظرفیت فرهنگی	توسعه مهارت‌های میان‌رشته‌ای	مقاومت فرهنگی و نیاز به بازآموزی	Almarashdeh, I (2021)
طراحی پایدار	بهینه‌سازی انرژی و محیط	پیچیدگی اجرایی و نیاز به داده دقیق	Chien, S., & Lee, Y (2021)
الگوریتم‌های تصمیم‌یار	افزایش بهره‌وری و عمر مفید ساختمان	هزینه و زمان‌بر بودن اجرا	Alsharif et al (2020)

مآخذ: نگارندگان با استفاده از منابع ارجاع شده

در راستای اصلاح و دقیق‌تر شدن فرضیه اصلی پژوهش، بر این نکته تأکید شده است که هوش مصنوعی در صورت پیاده‌سازی هدفمند، دقیق و بومی‌سازی شده، می‌تواند فرایندهای آموزش و طراحی معماری را به شکلی پایدار، خلاقانه و بهینه متحول سازد. این فرضیه فراتر از کلی‌گویی‌های بدیهی است و بر ضرورت تدوین مدل‌های مفهومی جامع و تحلیل علت‌ومعلولی پیچیده تأکید دارد. تحلیل کتاب‌سنجی و محتوایی نشان می‌دهد که فناوری‌های یادگیری ماشین، آموزش انطباقی و تولید فرم‌های نوآورانه نقش محوری در این تحول دارند. مدل سه‌لایه ارائه شده، تعامل انسان و ماشین، بازخورد خودکار و داده‌کاوی را به طور هماهنگ بررسی می‌کند و رویکردی چندبعدی برای شناخت فرصت‌ها و چالش‌های بومی‌سازی هوش مصنوعی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که فناوری‌های هوش مصنوعی می‌توانند نقشی کلیدی و تحول‌آفرین در فرایندهای آموزش و طراحی معماری ایفا کنند؛ اما تحقق این تحول، منوط به پیاده‌سازی هدفمند، دقیق و متناسب با بسترهای بومی است. استفاده از فناوری‌هایی نظیر سیستم‌های یادگیری انطباقی، بازخوردهای بلادرنگ و الگوریتم‌های تولید فرم خلاقانه، به طور قابل توجهی کیفیت آموزش را ارتقا داده و خلاقیت و پایداری در طراحی معماری را تقویت می‌کند. علاوه بر این، توجه به فرهنگ‌سازمانی، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و ارتقای مهارت‌های میان‌رشته‌ای و سواد دیجیتال در میان اساتید

و دانشجویان، از مهم‌ترین پیش‌نیازهای موفقیت بهره‌برداری از هوش مصنوعی در محیط‌های آموزشی و حرفه‌ای معماری به شمار می‌روند. یافته‌های تحلیل‌های کتاب‌سنجی و کیفی، نقش محوری فناوری‌های یادگیری ماشین، آموزش انطباقی و تولید فرم‌های نوآورانه را در این مسیر تأیید می‌کنند. مدل مفهومی سه‌لایه ارائه شده، با تمرکز بر تعامل هم‌افزا میان زیرساخت فناوریانه، خلاقیت انسانی و بومی‌سازی فرهنگی، چارچوبی جامع برای فهم فرصت‌ها و چالش‌های به‌کارگیری هوش مصنوعی در آموزش معماری فراهم آورده است. این مدل می‌تواند راهنمایی مؤثر برای بازنگری در سرفصل‌های درسی، طراحی دوره‌های میان‌رشته‌ای، تقویت زیرساخت‌ها و توانمندسازی نیروی انسانی باشد. در نهایت، هوش مصنوعی فراتر از یک ابزار فناوریانه صرف، به‌عنوان عاملی محرک و تحول‌آفرین در ارتقای کیفیت آموزش، خلاقیت طراحی و پایداری معماری آینده مطرح است؛ لذا اتخاذ رویکردی نظام‌مند و آینده‌نگر در توسعه کاربردهای هوش مصنوعی در آموزش و طراحی معماری، به‌ویژه در زمینه‌های بومی، امری ضروری و راهبردی است.

نوآوری‌های مقاله

- ارائه مدل مفهومی سه‌لایه برای تلفیق AI با آموزش و طراحی معماری
- تحلیل چالش‌های بومی و زمینه‌مند در پیاده‌سازی هوش مصنوعی در معماری ایران
- تأکید بر تربیت میان‌رشته‌ای اساتید به‌عنوان راهبرد کلیدی
- بررسی پیوستگی میان طراحی پایدار، بازآفرینی شهری و الگوریتم‌های هوشمند
- ارزیابی هم‌زمان ابعاد فنی، فرهنگی و اخلاقی در بهره‌برداری از AI در معماری

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

- طراحی چارچوب ارزیابی بومی اخلاق حرفه‌ای در استفاده از AI در معماری ایران
- مقایسه تطبیقی عملکرد سیستم‌های آموزش هوشمند در دانشکده‌های معماری داخلی و خارجی
- تحلیل اثرات فناوری واقعیت افزوده و یادگیری عمیق بر خلاقیت و مهارت‌افزایی دانشجویان معماری
- تدوین الگوهای مشارکت دانشگاه و صنعت در توسعه الگوریتم‌های طراحی پایدار



منابع و مآخذ

- (۱) اکبری نامدار، شبنم، خدائی، هانیه. (۱۴۰۴). بازآفرینی فضای معماری از یادرفته، طرحی برای توسعه معماری پایدار (نمونه موردی: فضاهای صنعتی در تبریز). *اندیشه‌های نو در علوم جغرافیایی*، ۹(۳)، ۱-۱۶.
- (۲) کمایی، سپیده، کابلی، دکتر احمد رضا، (۱۴۰۳). ارزیابی معماری ایرانی و تعاملات اجتماعی در فضاهای فرهنگی. *اندیشه‌های نو در علوم جغرافیایی*، ۳(۲)، ۴۷-۶۲.
- 3) Almarashdeh, I. (2021). The role of artificial intelligence in enhancing online learning: A study in architecture education. *International Journal of Educational Technology*, 32(2), 87–103.
- 4) Alsharif, N., Al-Zahrani, A., Al-Mutairi, M., & Baqadir, A. (2020). Integration of AI in VR and AR for architecture education. *Journal of Educational Technology & Society*, 23(4), 45–58.
- 5) Aluko, R. O., Adenuga, O. A., Kukoyi, P. O., Soyingbe, A. A., & Oyediji, J. O. (2016). Predicting the academic success of architecture students by pre-enrolment requirement: Using machine-learning techniques. *Construction Economics and Building*, 16(4), 86–98.
- 6) Aluko, R. O., Daniel, E. I., Oshodi, O., & Aigbavboa, C. (2018). Towards reliable prediction of academic performance of architecture students using data mining techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 16(1), 57–68.
- 7) Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Benefits, risks, and challenges. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 4(3), 79–83.
- 8) Binns, S. (2020). Ethical challenges of artificial intelligence in architectural education. *Journal of Architecture and Ethics*, 5(2), 113–127.
- 9) Björk, B.-C. (1999). The future of building information modeling. CIB Publication 2.
- 10) Bonnardot, L., Dupuis, M., & Rondeau, J. (2021). Artificial intelligence in architecture design: Challenges and implications for creativity. *Journal of Architectural Computing*, 32(4), 225–239.
- 11) Borges, A., Pinto, A., & Duarte, P. (2021). Computational intelligence in architectural design: An evolutionary approach. Springer.
- 12) Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2022). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. W. W. Norton & Company.
- 13) Cao, Y., Gao, X., Yin, H., Yu, K., & Zhou, D. (2024). Reimagining tradition: A comparative study of artificial intelligence and virtual reality in sustainable architecture education. *Sustainability*, 16(24), 11135.
- 14) Chien, C., & Lee, C. (2021). Adaptive learning systems in architectural education: AI for personalizing design education. *Architectural Science Review*, 64(1), 45–57.
- 15) Chien, S., Lee, S., & Wang, L. (2021). EvoArch: An evolutionary algorithm for architectural layout design. ResearchGate.
- 16) Eastman, C., Teicholz, P., & Sacks, R. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and fabricators* (2nd ed.). Wiley.
- 17) Garcia, R., et al. (2022). Enhancing architectural learning with AI, VR, and AR. *Education and Design Journal*, 32(2), 78–94.
- 18) Gero, J. S., & Maher, M. L. (2020). *Computational models in architecture*. Springer.

- 19) Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., & Alwaer, H. (2021). Artificial intelligence in architecture and building design: A comprehensive review of current applications. *Automation in Construction*, 123, 103541.
- 20) Goh, A., & Chow, W. (2021). The role of AI in the transformation of architectural education and design practices. *Journal of Educational Technology and Design*, 25(1), 51–67.
- 21) Günay, H., Aldridge, L., & Ghanbari, M. (2023). Artificial neural networks for sustainable architectural design: Energy efficiency and material selection. *Journal of Building Engineering*, 61, 105227.
- 22) Hosseini, M., & Nikbakht, A. (2022). Smart platforms in architecture: A review on AI-driven tools in education and design. *Architectural Technology Review*, 34(4), 289–305.
- 23) Huang, C., & Zhang, J. (2021). Social and ethical considerations in AI applications for architectural education. *International Journal of AI & Architecture*, 13(2), 118–134.
- 24) Jabareen, H. (2022). *Smart design technologies in architecture*. Routledge.
- 25) Jha, P., & Sharma, P. (2021). Integrating AI in architectural education: A pathway to innovation. *Journal of Architectural Education*, 78(3), 152–165.
- 26) Jin, S., Tu, H., Li, J., Fang, Y., Qu, Z., Xu, F., Liu, K., & Lin, Y. (2024). Enhancing architectural education through artificial intelligence: A case study of an AI-assisted architectural programming and design course. *Buildings*, 14(6), 1613.
- 27) Kim, H., Cho, C. Y., & Hong, S. W. (2023). Impact of agent-based simulation on novice architects' workplace design exploration and trade-offs. *Automation in Construction*, 145, 104635.
- 28) Kiviniemi, M. (2014). *BIM and intelligent systems in architecture*. Elsevier.
- 29) Koh, J., Tan, K., & Lee, Y. (2022). Deep learning in architectural form generation: Applications and challenges. *Computers, Environment and Urban Systems*, 90, 101720.
- 30) Kotsiantis, S. B., Zervas, P. G., & Kalliris, D. (2023). AI in architectural education: Overcoming resistance to new technologies. *International Journal of Architectural Education*, 47(1), 45–59.
- 31) Koutamanis, A. (2020). Architectural design and artificial intelligence: A review of the role of creativity in design processes. *Design Studies*, 69(1), 1–17.
- 32) Leung, K., & Chan, M. (2022). AI in learning analytics for architecture education. *Education and Technology Journal*, 27(4), 430–445.
- 33) Li, B. (2023). Educational challenges and opportunities for integrating AI in architectural design: A global perspective. *Journal of Educational Technology*, 44(2), 234–250.
- 34) Li, W., Zhang, Y., & Wang, F. (2023). Optimization of energy and cost in building design using genetic algorithms. *ScienceDirect*.
- 35) Li, X., Xie, Y., & Zhang, M. (2022). *Fuzzy logic and evolutionary algorithms in design decision making*. Cambridge University Press.
- 36) Liu, J., Tan, Z., & Wang, Q. (2022). AI-based personalization and adaptive learning in architecture: Enhancing learning processes and outcomes. *Education and Information Technologies*, 27(6), 8607–8625.
- 37) Lu, Y., Wu, W., Geng, X., Liu, Y., Zheng, H., & Hou, M. (2022). Multi-objective optimization of building environmental performance: An integrated parametric design method based on machine learning approaches. *Building and Environment*, 208, 108629.
- 38) Miao, Y., Wu, J., Zhang, H., & Shen, G. Q. (2020). Understanding the role of artificial intelligence in construction project management. *Automation in Construction*, 122, 103465.



- 39) Newton, D. (2019). Generative deep learning in architectural design. *Technology|Architecture+Design*, 3(2), 176–189.
- 40) Nguyen, T., Le, T., & Tran, H. (2022). Artificial intelligence in architectural education: Revolutionizing learning processes. *Journal of Architectural Education*, 76(4), 123–139.
- 41) Papageorgiou, D., & Nikolaou, M. (2023). AI in architecture education: Automated assessment and student performance analysis. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 1–19.
- 42) Patel, M., & Lee, J. (2023). Generative design in architecture: Harnessing the power of deep learning. *Frontiers of Architectural Research*, 12(2), 250–265.
- 43) Perkins, S., et al. (2021). AR and AI in architecture: A new educational approach. *Architectural Technology Journal*, 19(2), 99–110.
- 44) Ralston, P. A. S., Hoyer, J. D., & Rambo-Hernandez, K. E. (2019). Building better engineers: A study of academic and career success in engineering with implications for education and diversity. *International Journal of STEM Education*, 6(1), 1–12.
- 45) Salem, O. (2021). Financial and infrastructural barriers to AI implementation in architecture education. *International Journal of Technology and Education*, 29(3), 203–217.
- 46) Schwab, K. (2021). *The fourth industrial revolution*. Penguin.
- 47) Serban, O., Thies, W., & Roussev, B. (2020). Machine learning in architecture: A review. *Automation in Construction*, 119, 103339.
- 48) Shahin, A., Farooq, M., & Rehman, A. (2021). Developing AI skills in architecture education: Strategies for faculty development. *Journal of Architectural Education*, 60(2), 94–110.
- 49) Smith, A., Wang, J., & Brown, C. (2021). *AI in architecture: Integrating machine learning with architectural design*. Routledge.
- 50) Sun, Y., Zhao, X., & Li, F. (2022). Artificial intelligence in architectural education: Overcoming challenges and enhancing skills. *Educational Review*, 28(1), 99–113.
- 51) Swan, M., & Lile, B. (2020). Artificial intelligence in architecture: Financial and infrastructure challenges. *Journal of Building Education*, 35(2), 243–257.
- 52) Tegos, S., Vassiliou, A., & Andreou, D. (2023). The future role of artificial intelligence in architectural and interior design education to improve efficiency, sustainability, and creativity. *ResearchGate*.
- 53) Törmä, M., Heikkilä, S., & Salo, A. (2020). Advanced data analysis algorithms for architectural design. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 12(2), 233–245.
- 54) Wang, Y., Huang, J., & Zhang, Z. (2022). *Machine learning applications in architecture and design*. Wiley.
- 55) Wang, Z., Hu, Z., & Fang, D. (2021). Artificial intelligence in architecture: Emerging trends and future prospects. *Journal of Architectural and Planning Research*, 38(3), 205–220.
- 56) Yang, M., Li, X., & Wang, Y. (2021). *Neural networks in architecture: From design to construction*. Springer.
- 57) Yuan, W., Li, Z., & Zhao, X. (2021). Using machine learning and genetic algorithms for energy optimization and cost reduction in building design. *ScienceDirect*.
- 58) Zhang, L., Wu, Y., & Yang, J. (2023). Using machine learning to simulate building behavior and improve design decisions. *ScienceDirect*.
- 59) Zhao, Y., & Wang, X. (2023). *AI-driven smart architecture: The future of building design and construction*. Elsevier.

- 60) Zhu, W., Chen, R., Lin, J., & Zhou, H. (2023). Machine learning for architectural design prediction. *Journal of Computational Architecture*, 17(1), 220–233.
- 61) Zhuang, X., Zhu, P., Yang, A. Y., & Caldas, L. (2025). Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. *Automation in Construction*, 174, 106129.

