

Research Paper

Multi-Objective Optimization of Construction Projects with an Integrated Approach of Building Information Modeling (BIM) and Genetic Algorithm Towards Sustainable Development

Aliasghar Amirkardoust: Assistant Prof. of Construction Engineering and Management, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran

Davood Sedaghat Shayegan: Assistant Prof. of Construction Engineering and Management, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran

Milad Torabi Anaraki:* PhD student in Construction Engineering and Management, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran

Received: 2025/06/07 PP 61-70 Accepted: 2025/07/22

Abstract

In the modern era, construction projects face numerous challenges due to the diversity and complexity of requirements, particularly in the simultaneous management of cost, time, quality, and sustainability. The aim of this study is to develop an integrated framework based on Genetic Algorithm (GA) and Building Information Modeling (BIM) technology for multi-objective optimization in construction projects. In the methodology section, data related to a construction project including material costs, activity durations, environmental characteristics, and quality standards were collected. Subsequently, using BIM software, a 3D model of the building was created, and key project variables were defined as inputs to the genetic algorithm. The GA initiated the optimization process by employing a composite fitness function comprising cost, time, quality, and sustainability criteria. Next, the proposed model was implemented through a practical case study, and its performance was compared with other common algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Simulated Annealing (SA), and Ant Colony Optimization (ACO). The results showed that the BIM-GA model was able to reduce the total project cost by 11%, shorten the execution time by 9%, and enhance both the quality and environmental performance of the project. Additionally, the model improved coordination among design, construction, and operation units. These findings indicate that integrating BIM technology with genetic algorithms provides an effective tool for intelligent decision-making in complex construction projects and facilitates progress toward sustainable development.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Genetic Algorithm, Multi-Objective Optimization, Project Management, Sustainable Development.



Citation: Amirkardoust, A., Sedaghat Shayegan, D., & Torabi Anaraki, M. (2025). **Multi-Objective Optimization of Construction Projects with an Integrated Approach of Building Information Modeling (BIM) and Genetic Algorithm Towards Sustainable Development.** *Journal of Sustainable Architecture and Environment*, 3(10), 61-70. <https://doi.org/10.25524/jsae.2025.1209165>



© The Author(s)

Publisher: Islamic Azad University of Shiraz

*. **Corresponding author:** Milad Torabi Anaraki, **Email:** 1290811261@iau.ir

Extended Abstract

Introduction

The modern construction industry faces increasingly complex challenges due to the need to simultaneously manage multiple project objectives—most notably cost, time, quality, and environmental sustainability. As urbanization accelerates and sustainability becomes a critical concern, traditional construction management methods—often siloed and linear—prove insufficient for achieving integrated, optimal outcomes. In response, innovative digital tools and computational intelligence techniques are emerging as effective solutions.

Among these tools, Building Information Modeling (BIM) provides a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. It facilitates enhanced coordination among stakeholders, accurate visualization, and data-rich decision-making throughout the lifecycle of a construction project. However, while BIM offers robust simulation and data integration capabilities, it does not inherently solve optimization problems.

Genetic Algorithms (GA), inspired by Darwinian evolution, provide a powerful metaheuristic for solving complex, nonlinear, and multi-objective optimization problems. GAs operate via iterative processes of selection, crossover, and mutation, enabling exploration of vast solution spaces and convergence toward global optima. When combined with BIM, GAs can leverage BIM's detailed project information to identify the most efficient, cost-effective, and sustainable construction solutions.

This study presents a hybrid framework—BIM-GA—that integrates BIM and Genetic Algorithm methodologies for multi-objective optimization in construction projects. The main goal is to simultaneously optimize cost, time, environmental impact, and quality, thereby contributing to smarter project management aligned with sustainable development goals.

Methodology

The research follows a structured methodology consisting of data collection, BIM-based modeling, objective function formulation, algorithm design, and comparative analysis.

Step 1 – Data Collection:

Project-specific data were collected from a real-world case study—a five-story residential building with a total built-up area of 2,500 square meters. This data included construction drawings, technical specifications, proposed scheduling plans, cost breakdowns, energy usage data, and quality standards.

Step 2 – BIM Model Development:

Using advanced BIM software, a comprehensive 3D model (3D BIM) was created. The model incorporated architectural, structural, and MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) components, enriched with semantic information such as cost, duration, and environmental attributes. The 4D and 5D simulation capacities of BIM were also utilized for time and cost integration.

Step 3 – Defining Decision Variables and Objective Functions:

The decision variables used in the optimization process included:

- X1: Type of construction materials (traditional, semi-prefabricated, fully prefabricated)
- X2: Number of workers allocated per activity
- X3: Scheduling strategy (parallel vs. sequential)
- X4: Contractor selection (A, B, or C)

Four objective functions were formulated:

1. Minimization of total project cost (C)
2. Minimization of total project duration (T)
3. Maximization of environmental sustainability index (S)
4. Maximization of construction quality score (Q)

Constraints:

- Total cost must not exceed 1,300 million IRR
- Duration must remain under 140 days
- Sustainability index must be greater than 0.7
- Quality score must be higher than 80

Step 4 – Genetic Algorithm Optimization:

An initial population of 50 chromosomes was randomly generated, with each chromosome representing a potential combination of decision variables. The fitness of each chromosome was evaluated using a weighted aggregation of the four objective functions. Selection was performed using the roulette wheel method. Crossover and mutation operations were applied at rates of 0.7 and 0.1 respectively. The algorithm iterated until convergence was achieved or a maximum of 200 generations was reached.

Step 5–Benchmarking and Sensitivity Analysis:

To evaluate model robustness and performance, the proposed BIM-GA model was compared with three other metaheuristic algorithms:

- Particle Swarm Optimization (PSO)
- Simulated Annealing (SA)
- Ant Colony Optimization (ACO)

Additionally, sensitivity analysis was conducted to assess the impact of varying parameters such as population size, mutation rate, and objective weightings on optimization outcomes.

Results and discussion

The BIM-GA model demonstrated strong optimization performance across all objectives. Key results include:

- **Cost Reduction:** Total project cost was reduced from 1,380 million IRR to 1,250 million IRR—approximately 9.4% savings.
- **Time Savings:** Project duration decreased from 155 days to 130 days—around 16% improvement.
- **Sustainability Enhancement:** The environmental sustainability index improved from 0.68 to 0.76.
- **Quality Improvement:** Quality score increased from 78 to 87, indicating a higher standard of construction execution.

The convergence analysis showed that most improvements were achieved within the first 100 generations, after which the solution space stabilized. This highlights the model's computational efficiency and its ability to avoid premature convergence.

Comparative Analysis confirmed that the BIM-GA model outperformed PSO, SA, and ACO in achieving balanced optimization across all four objectives. While other algorithms showed competence in isolated aspects (e.g., SA in cost or ACO in time), only BIM-GA maintained high performance across all metrics.

Sensitivity Analysis indicated that the model is robust to changes in mutation rate and population size, though optimal parameter tuning can further improve convergence speed and solution quality.

Conclusion

This research successfully demonstrates that integrating Building Information Modeling (BIM) with Genetic Algorithms (GA) provides a comprehensive and powerful approach for the multi-objective optimization of construction

projects. The BIM-GA framework enables data-rich, model-driven decision-making that aligns construction execution with strategic objectives such as cost efficiency, timely delivery, environmental responsibility, and quality assurance.

The study's main contributions include:

- A structured methodology for encoding BIM project data into genetic algorithm chromosomes
- Multi-objective optimization of real-world construction variables and constraints
- Benchmarking the BIM-GA model against established metaheuristic algorithms
- Validation through a real case study, illustrating tangible improvements in performance

Recommendations for Future Research:

1. Application in larger-scale projects across various construction types (commercial, industrial) for broader validation.
2. Integration with AI techniques such as Artificial Neural Networks (ANNs) or Reinforcement Learning to enhance prediction and decision-making.
3. Use of cloud-based BIM platforms to allow real-time updates and collaboration during optimization.
4. Incorporation of IoT and sensor data to enable dynamic, real-time feedback and adaptive optimization on-site.

In conclusion, this research underscores the transformative potential of digital-construction synergies in driving sustainable development in the built environment. The BIM-GA approach serves not only as a computational model but also as a strategic tool for construction engineers, project managers, and policymakers striving toward a more intelligent, sustainable, and integrated future in construction project delivery.

References

- Al Nahyan, M. T., Sohal, A., Hawas, Y., & Fildes, B. (2019). Communication, coordination, decision-making and knowledge-sharing: a case study in construction management. *Journal of Knowledge Management*, 23(9), 1764-1781. <https://doi.org/10.1108/JKM-08-2018-0503>.
- Alavi, H., Kookalani, S., Rahimian, F., & Forcada, N. (2024). BIM-based augmented reality for facility maintenance management. In *Integrated Building Intelligence* (pp. 101-

- 112). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68865-2_7.
- Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Shahraki, A., Malkhalifeh, M. R., & Ahmadizadeh, S. S. R. (2021). Optimization of environmental impacts of construction projects: a time–cost–quality trade-off approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 631–646. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02838-2>
- Begić, H., & Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 337. <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>.
- Carbas, S., Toktas, A., & Ustun, D. (2019). Nature-inspired metaheuristic algorithms for engineering optimization applications. *Nature*. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6773-9>.
- Essam, N., Khodeir, L., & Fathy, F. (2023). Approaches for BIM-based multi-objective optimization in construction scheduling. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102114.
- Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J. A., Ahmed, V., Chen, C., & Lok, K. L. (2021). The critical role of the construction industry in achieving the sustainable development goals (SDGs): Delivering projects for the common good. *Sustainability*, 13(16), 9112. <https://doi.org/10.3390/su13169112>.
- Ghaemifard, S., & Ghannadiasl, A. (2024). Usages of metaheuristic algorithms in investigating civil infrastructure optimization models; a review. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s43503-024-00036-4>.
- Jalilzadehazhari, E., Vadiiee, A., & Johansson, P. (2019). Achieving a trade-off construction solution using BIM, an optimization algorithm, and a multi-criteria decision-making method. *Buildings*, 9(4), 81. <https://doi.org/10.3390/buildings9040081>.
- Kashani, A. R., Gandomi, M., Camp, C. V., Rostamian, M., & Gandomi, A. H. (2020). Metaheuristics in civil engineering: a review. *Techno Press* 1(1), 42. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.019>.
- Kaveh, A., & Eslamlou, A. D. (2020). *Metaheuristic optimization algorithms in civil engineering: new applications*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Kim, J., Lim, J., Lim, H. C., & Kim, D. Y. (2022). Improving sustainable project success strategies focused on cost and schedule for electrical construction project management. *Sustainability*, 14(5), 2653. <https://doi.org/10.3390/su14052653>.
- Maali, O., Lines, B., Smithwick, J., Hurtado, K., & Sullivan, K. (2020). Change management practices for adopting new technologies in the design and construction industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, 325–341. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.019>
- Moradnia, M. S., & Alipouri, Y. A Systematic Review of the Role of Building Information Modeling (BIM) in Improving Construction Project Scheduling. A Review on the Applications and Bioactive Properties of Fucoxanthin Extracted from Brown Algae, 1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15570202>.
- Nusen, P., Boonyung, W., Nusen, S., Panuwatwanich, K., Champrasert, P., & Kaewmoracharoen, M. (2021). Construction planning and scheduling of a renovation project using BIM-based multi-objective genetic algorithm. *Applied Sciences*, 11(11), 4716. <https://doi.org/10.3390/app11114716>.
- Opoku, A. (2022). Construction industry and the sustainable development goals (SDGs). In *Research Companion to Construction Economics* (pp. 199–214). Edward Elgar Publishing.
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, 124, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>.
- Parsamehr, M., Perera, U. S., Dodanwala, T. C., Perera, P., & Ruparathna, R. (2023). A review of construction management challenges and BIM-based solutions: perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(1), 353–389. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00501-4>
- Patni, S., & Sharma, B. (2024). Genetic algorithms for decision optimization. In *Intelligent Decision Making Through Bio-Inspired Optimization* (pp. 29–39). IGI Global.
- Rezk, H., Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Sayed, E. T. (2024). Metaheuristic optimization algorithms for real-world electrical and civil engineering application: a review. *Results in Engineering*, 102437. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102437>.
- Vie, A., Kleinnijenhuis, A. M., & Farmer, D. J. (2020). Qualities, challenges and future of genetic algorithms: a literature review. *arXiv preprint arXiv:2011.05277*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05277>.
- Wang, D., Liu, B., Jiang, H., & Liu, P. (2025). Path Planning for Construction Robot Based on the Improved A Algorithm and Building Information Modeling. *Buildings*, 15(5), 719. <https://doi.org/10.3390/buildings15050719>.
- Wefki, H., Elnahla, M., & Elbeltagi, E. (2024). BIM-based schedule generation and optimization using genetic algorithms. *Automation in*

Construction, 164, 105476.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105476>.
Sultana, S., Salon, D., & Kuby, M. (2019).
Transportation Sustainability in the Urban
Context: A Comprehensive Review. Urban

Geography, 40(3), 1-30.
<https://doi.org/10.1080/02723638.2017.1395635>

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه پروژه‌های ساختمانی با رویکرد تلفیقی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و الگوریتم ژنتیک در راستای توسعه پایدار

علی اصغر امیرکاردوست: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران
داود صداقت شایگان: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران
میلاد ترابی انارکی^۱: دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷؛ تصحیح: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

چکیده

در عصر کنونی، پروژه‌های ساختمانی به دلیل تنوع و پیچیدگی نیازمندی‌ها، با چالش‌های فراوانی در زمینه مدیریت هم‌زمان هزینه، زمان، کیفیت و پایداری روبه‌رو هستند. هدف این پژوهش، توسعه یک چارچوب تلفیقی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت بهینه‌سازی چند هدفه در پروژه‌های عمرانی است. در بخش روش کار، ابتدا داده‌های مربوط به پروژه ساختمانی شامل هزینه مصالح، مدت زمان فعالیت‌ها، ویژگی‌های محیطی و استانداردهای کیفیت جمع‌آوری گردید. سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای BIM، مدل سه‌بعدی ساختمان ایجاد شد و متغیرهای کلیدی پروژه به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک تعریف شدند. الگوریتم ژنتیک با تعریف تابع برازش ترکیبی شامل معیارهای هزینه، زمان، کیفیت و پایداری، فرآیند بهینه‌سازی را آغاز نمود. در ادامه، مدل پیشنهادی در قالب یک مطالعه موردی عملی اجرا و عملکرد آن با سایر الگوریتم‌های متداول نظیر PSO، SA و ACO مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که مدل BIM-GA قادر است هزینه کل پروژه را به میزان ۱۱ درصد کاهش داده، مدت زمان اجرا را ۹ درصد کوتاه‌تر کرده و سطح کیفی و زیست‌محیطی پروژه را بهبود دهد. همچنین مدل توانست هماهنگی بهتری میان واحدهای طراحی، اجرا و بهره‌برداری ایجاد نماید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب فناوری BIM با الگوریتم ژنتیک، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری هوشمند در پروژه‌های ساختمانی پیچیده و حرکت به سوی توسعه پایدار فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه، مدیریت پروژه، توسعه پایدار.

استناد: امیرکاردوست، علی اصغر؛ صداقت شایگان، داود و ترابی انارکی، میلاد (۱۴۰۴). بهینه‌سازی چندهدفه پروژه‌های ساختمانی با رویکرد تلفیقی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و الگوریتم ژنتیک در راستای توسعه پایدار، فصلنامه معماری و محیط پایدار، ۳(۱۰)، ۶۱-۷۰. <https://doi.org/10.25524/jsae.2025.1209165>



ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

© نویسندگان



^۱ نویسنده مسئول: میلاد ترابی انارکی، پست الکترونیکی: 1290811261@iau.ir

مقدمه

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه اقتصادی، اجتماعی و کالبدی کشورها، همواره با چالش‌هایی همچون افزایش هزینه‌ها، تأخیر در پروژه‌ها، کاهش کیفیت ساخت و عدم رعایت اصول توسعه پایدار روبه‌رو بوده است (Fei et al., 2021; Opoku, 2022; Yap et al., 2019). در سال‌های اخیر، با افزایش پیچیدگی پروژه‌های عمرانی و افزایش سطح انتظارات ذی‌نفعان، ضرورت بهره‌گیری از روش‌های نوین در طراحی، مدیریت و اجرا بیش از پیش احساس می‌شود (Maali et al., 2020). از سوی دیگر، نیاز به هماهنگی مؤثر میان عوامل مختلف پروژه نظیر معماران، مهندسان سازه، متخصصان تأسیسات، پیمانکاران و کارفرمایان، استفاده از فناوری‌های یکپارچه‌سازی اطلاعات و ابزارهای تصمیم‌گیری پیشرفته را الزامی ساخته است (Al Nahyan et al., 2019).

به‌واسطه‌ی همین پیچیدگی و چالش‌های میان‌رشته‌ای، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند و ابزارهای تصمیم‌گیری پیشرفته برای کوتاه‌کردن مسیر ارتباطی، کاهش خطا، و بهبود نتایج بیش از پیش احساس می‌شود. در پاسخ به این نیاز، فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به‌عنوان یک انقلاب دیجیتال، ظرفیت‌های بی‌نظیری برای تجمیع، شفاف‌سازی و تحلیل فرآیندهای پروژه فراهم آورده است به گونه‌ای که نه تنها مدل سه‌بعدی، بلکه ابعاد زمانی، هزینه‌ای، کیفی، پایداری، نگهداری و حتی بهره‌برداری پروژه در قالب یک بستر اطلاعاتی جامع در دسترس ذی‌نفعان قرار گیرد (Zhang, 2021; Alavi et al., 2024; Parsamehr et al., & Galić, 2021; Pan & Begić, 2023).

با وجود این، بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که صرفاً استفاده از BIM، بدون اتصال آن به هسته‌های محاسباتی پیشرفته، راهگشای چالش‌های مربوط به بهینه‌سازی چندمعیاره پروژه‌ها (شامل هزینه، زمان، کیفیت، و پایداری انرژی و محیط زیست) نخواهد بود (Banihashemi et al., 2021: 631; Kim et al., 2022: 2653). مدل‌های سنتی بهینه‌سازی پروژه، اغلب تک‌هدفه و فاقد توانایی جستجو در مسائل غیرخطی و گسسته با ابعاد بالا هستند و تصویری واقع‌بینانه از توسعه ساختمان برای مدیران پروژه ترسیم نمی‌کنند. در این بستر، الگوریتم‌های فراابتکاری-خصوصاً الگوریتم ژنتیک (GA)- با الهام از مکانیزم‌های تکامل زیستی، ابزار توانمندی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده و غیرخطی با چندین تابع هدف فراهم ساخته‌اند (Sharma, 2024; Vie et al., 2020; & Xie et al., 2021; Patni, 2021; Ghannadiasl, 2024 & Ghaemifard).

GA با انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت هم‌زمان در بررسی گسترده راه‌حل‌ها در فضای تصمیم، راهکار مناسبی برای پاسخگویی به نیاز واقعی صنعت ساخت‌وساز است.

بررسی متون و مطالعات پیشین بیانگر آن است که علیرغم رشد توجه پژوهشگران و مهندسان به حوزه‌های BIM و GA، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین یا بر ابعاد نظری و آزمایشگاهی موضوع متمرکز بوده یا مدل‌های تک‌هدفه را بررسی نموده‌اند. بسیاری از تحقیقات، GA و BIM را به صورت مجزا یا با سطحی ابتدایی از ادغام به کار بسته‌اند و کمتر مطالعاتی به ادغام کامل این دو رویکرد در پروژه‌های واقعی، آن هم با الهام از نیازهای عملیاتی و اهداف کاملاً چندگانه، پرداخته است (Eslamlou, 2020; & Essam et al., 2023: 102114; Kaveh, 2020; Rezak et al., 2024; Kashani et al., 2020; Carbas et al., 2019). این در حالی است که مطالعات اخیر نشان می‌دهد رویکردهای تلفیقی نظیر BIM-GA می‌تواند ارزش افزوده بالایی در ارتقای خروجی پروژه و کاهش تداخلات، تحمیل هزینه اضافی به واسطه تاخیرها یا ضعف کیفی و زیست‌محیطی ایجاد کند.

پژوهش حاضر دقیقاً با هدف پاسخ به این خلأ ادبیات و با رویکرد حل یک مسئله واقعی و عملیاتی طراحی شده است. در این مطالعه، چارچوبی تلفیقی و عملیاتی از BIM و GA توسعه یافته تا بتواند هزینه، زمان، کیفیت، و پایداری پروژه‌های ساختمانی را به طور هم‌زمان و متوازن بهینه‌سازی کند.

مدل پیشنهادی با اتکا به داده‌های واقعی پروژه، تحلیل مقایسه‌ای با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی (همچون PSO، SA، ACO) و ارزیابی عملی دارای قابلیت تعمیم به سایر پروژه‌های عمرانی در ایران و جهان است.

در نهایت، این تحقیق تلاش دارد مسیری نوین، هوشمندانه و کارآمد در جهت تحقق مدیریت پروژه‌های ساختمان محور توسعه پایدار ارائه دهد و، بر اساس نتایج مدل و مطالعات موردی، الگویی قابل اتکا برای مدیران، سیاست‌گذاران و پژوهشگران صنعت ساخت‌وساز فراهم آورد تا بتوانند چالش‌های اصلی توسعه را با رویکردی یکپارچه، علمی و مبتنی بر شبیه‌سازی دیجیتال و هوش محاسباتی مدیریت کنند.

به‌منظور مقایسه مطالعات پیشین و شناسایی وجوه تمایز پژوهش حاضر، جدول شماره ۱ به ارائه تطبیقی تحقیقات منتخب حوزه بهینه‌سازی در پروژه‌های ساختمانی با رویکرد BIM و الگوریتم ژنتیک می‌پردازد.

جدول ۱. بررسی تطبیقی مطالعات پیشین در زمینه ادغام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدیریت پروژه‌های ساختمانی

منبع	ابزارهای مورد استفاده	اهداف/دامنه	نقاط قوت	نقاط ضعف	وجه تمایز با پژوهش حاضر
(Jalilzadehazhari et al., 2019)	BIM + MCDM	تطابق معیارها در ساخت	توجه به معیارهای متعارض، رویکرد ترکیبی	عدم استفاده از داده واقعی پروژه و عدم تحلیل چندهدفه	تلفیق عملیاتی و داده‌محور، تحلیل میدانی
(Nusen et al., 2021)	ترکیب BIM و الگوریتم ژنتیک	زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پروژه بازسازی	ارائه مدل واقع‌گرایانه، حل تعارض اهداف، مطالعه موردی واقعی	تمرکز محدود بر پروژه‌های بازسازی و نیاز به داده دقیق	مدل پژوهش حاضر رویکرد عمومی‌تر، چندهدفه‌تر (افزایش کیفیت و پایداری) و قابل بسط به پروژه‌های ساختمانی غیر بازسازی را دارد
(Essam, et al., 2023)	مرور نظام‌مند BIM، الگوریتم‌های چندهدفه	بررسی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر BIM در زمان‌بندی ساخت	دسته‌بندی روش‌های روزآمد، تحلیل مزایا و محدودیت‌ها	تمرکز مروری، فاقد پیاده‌سازی عددی	پژوهش حاضر مدل عملیاتی و شبیه‌سازی عددی اجرا می‌کند
(Moradnia & Alipouri, 2023)	مرور نظام‌مند منابع BIM و برنامه‌ریزی ساخت	بررسی نقشی که BIM در بهبود زمان‌بندی ساخت دارد	جمع‌بندی مطالعات پیشین و ارائه آموزش‌های کاربردی	مروری بودن، فاقد مدل‌سازی عددی	پژوهش حاضر پیاده‌سازی عملی مدل بر روی پروژه واقعی است
(Wang et al., 2025)	BIM + الگوریتم A* بهبود یافته	مسیریابی ربات‌های ساخت، با تلفیق BIM	رویکرد ترکیبی هوشمند و کاربردی در سناریوهای واقعی	تمرکز بیشتر بر مسیریابی و نه بهینه‌سازی چندمعیاره سنتی	پژوهش حاضر روی بهینه‌سازی همزمان هزینه، زمان، کیفیت و پایداری تمرکز دارد
پژوهش حاضر	+ BIM + GA مقایسه الگوریتم‌ها	کل پروژه ساختمانی (مطالعه میدانی)	مدل یکپارچه، داده‌محور، مقایسه جامع، کاربردی	-	توسعه مدل کاربردی چندهدفه مبتنی بر داده واقعی

مبانی نظری تحقیق

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از زیرمجموعه‌های الگوریتم‌های فراابتکاری، برگرفته از نظریه تکامل طبیعی داروین و زیست‌شناسی مولکولی است و بر پایه مفاهیمی چون انتخاب طبیعی، جهش، و بازترکیب ژنتیکی عمل می‌کند. این الگوریتم با الگوسازی فرآیند تکامل زیستی، توانایی جستجوی فضای پاسخ‌های پیچیده و چندبعدی را دارد و برای حل مسائل بهینه‌سازی که ساختار خطی، محدب یا مشتق‌پذیر ندارند، بسیار کارآمد است. در ساختار این الگوریتم، ابتدا جمعیتی اولیه از جواب‌های ممکن تولید می‌شود که هر یک به صورت یک کروموزوم (رشته‌ای از ژن‌ها) تعریف می‌گردد. سپس با استفاده از یک تابع هدف یا تابع برازش، کیفیت یا میزان مطلوبیت هر کروموزوم سنجیده می‌شود. هدف، یافتن جواب‌هایی با بیشترین میزان برازش است. فرآیند انتخاب، معمولاً با استفاده از روش‌هایی نظیر چرخ رولت، رتبه‌بندی یا تورنمنت انجام می‌گیرد و افراد دارای برازش بالاتر، احتمال بیشتری برای انتقال ویژگی‌های خود به نسل بعد دارند. پس از انتخاب، عملگر بازترکیب (Crossover) به ترکیب دو والد برای تولید فرزندان جدید می‌پردازد، به گونه‌ای که ویژگی‌های ژنتیکی والدین در فرزندان حفظ یا بهبود یابد. سپس عملگر جهش (Mutation) برای افزایش تنوع ژنتیکی جمعیت وارد عمل شده و با ایجاد تغییرات تصادفی در برخی ژن‌ها، از همگرایی زودهنگام به پاسخ‌های محلی جلوگیری می‌کند. ساختار الگوریتم ژنتیک از منظر ریاضی مبتنی بر مجموعه‌ای از معادلات است که بر روند تکامل و انتخاب اثر می‌گذارند. به عنوان مثال، فرض کنیم تابع $f(x)$ میزان برازش هر جواب را اندازه‌گیری کند. سپس احتمال انتخاب هر کروموزوم i از جمعیت P به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{f(X_i)}{\sum_{j=1}^n f(X_j)} = P_i$$

که در آن x_i یک جواب خاص و n تعداد کل کروموزوم‌ها در جمعیت است. در مرحله بازترکیب، دو کروموزوم والد $A=[a_1, a_2, \dots, a_n]$ و $B=[b_1, b_2, \dots, b_n]$ انتخاب می‌شوند و با استفاده از یک نقطه یا چند نقطه تقاطع، کروموزوم‌های فرزند تولید می‌شوند. جهش نیز معمولاً با اعمال تغییر در یک یا چند ژن با احتمال P_m انجام می‌شود. این روند به صورت تکراری ادامه می‌یابد تا جمعیت به یک شرایط همگرا برسد یا معیار توقف برآورده شود. با توجه به توانایی الگوریتم ژنتیک در یافتن بهینه‌های سراسری و مدیریت قیود پیچیده، این روش در پروژه‌های ساختمانی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به‌ویژه برای بهینه‌سازی چندهدفه شامل زمان، هزینه، کیفیت و پایداری کاربرد فراوان دارد. ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان نه تنها امکان شبیه‌سازی دقیق سناریوهای ساخت را فراهم می‌سازد، بلکه با تحلیل داده‌های محیطی، اقتصادی و طراحی، می‌توان به تصمیم‌گیری‌های بهینه در حوزه توسعه پایدار دست یافت. در نتیجه، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار توانمند، زمینه‌ای نوین برای تلفیق فناوری‌های نو با مدیریت پیشرفته پروژه‌های عمرانی و ساختمانی فراهم می‌سازد.

بهینه‌سازی چندهدفه در مهندسی ساخت با تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

مهندسی ساخت به عنوان یکی از پیچیده‌ترین شاخه‌های مهندسی، دربرگیرنده مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف متنوع است که در تمامی مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری ایفای نقش می‌کنند. روش‌های سنتی طراحی و بهینه‌سازی در حوزه معماری معمولاً به صورت محدود و در چارچوب‌های تخصصی جداگانه عمل می‌کنند؛ این مسئله باعث می‌شود که بسیاری از عوامل تأثیرگذار به‌طور جامع مورد توجه قرار نگرفته و در نتیجه، بهینه‌سازی صرفاً در سطح موضعی انجام شود، نه در مقیاس کلی و جامع پروژه. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یک فناوری نوین دیجیتال، امکان یکپارچه‌سازی داده‌ها و فرآیندها در مراحل مختلف پروژه را فراهم کرده و ابزار مناسبی برای دستیابی به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و سریع‌تر محسوب می‌شود.

الگوریتم ژنتیک، که برگرفته از اصول تکامل زیستی است، از مفاهیمی همچون انتخاب طبیعی، هم‌ترازی و جهش بهره می‌برد تا با بررسی گسترده فضای جست‌وجو، به سوی یافتن بهترین پاسخ‌های ممکن در مسائل پیچیده حرکت کند. ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، بستری قدرتمند برای بهینه‌سازی چندهدفه در پروژه‌های ساختمانی فراهم می‌کند؛ به گونه‌ای که می‌توان اهدافی همچون کاهش هزینه، زمان‌بندی مناسب، ارتقای کیفیت و رعایت ملاحظات زیست‌محیطی را به صورت هم‌زمان مدنظر قرار داد.

در این پژوهش، یک سیستم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر تلفیق BIM و الگوریتم ژنتیک طراحی شده است. این سیستم با استفاده از داده‌های دقیق پروژه‌های ساختمانی و ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از طریق BIM، به کمک الگوریتم ژنتیک اقدام به جست‌وجوی پاسخ‌های بهینه در میان مجموعه‌ای از اهداف متناقض می‌کند. این رویکرد، مشکلات نظیر پراکندگی داده‌ها، محدود بودن دامنه بهینه‌سازی به یک هدف خاص، و عدم شفافیت در تصمیم‌گیری را که در روش‌های مرسوم رایج است، برطرف می‌سازد.

برای ارزیابی عملکرد این مدل، نتایج به‌دست‌آمده با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) و بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مدل ترکیبی BIM-GA توانسته است در مقایسه با روش‌های دیگر، به طور قابل توجهی در کاهش هزینه‌ها و زمان اجرای پروژه مؤثر باشد و به عنوان رویکردی کارآمد در مهندسی ساخت مطرح شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های نوین مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به عنوان ابزارهایی کارآمد در حل چالش‌های پیچیده صنعت ساخت‌وساز مطرح شده است. پژوهش‌های گوناگونی تلاش کرده‌اند تا ترکیب این فناوری‌ها را برای بهبود فرآیند طراحی، برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های عمرانی بررسی و پیاده‌سازی کنند.

در پژوهش جلیل‌زاده ظهاری و همکاران، یک مدل ترکیبی از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، الگوریتم بهینه‌سازی و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای دستیابی به راه‌حلی متعادل میان معیارهای زمان، هزینه، کیفیت و پایداری ارائه شد که نتایج آن حاکی از بهبود تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساختمانی بود (Jalilzadehazhari et al., 2019: 81). نوسن و همکاران در مطالعه‌ای بر روی پروژه‌های نوسازی، با استفاده از ترکیب مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه، رویکردی بهینه برای زمان‌بندی و برنامه‌ریزی ساخت ارائه دادند که موجب بهبود کارایی پروژه و کاهش تعارض میان اهداف متضاد شد (Nusen et al., 2021: 4716). اسام و همکاران در پژوهش خود به بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر BIM در زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی پرداختند و نشان دادند که این رویکردها می‌توانند به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و هم‌راستاسازی بهتر اهداف متعارض در پروژه‌ها منجر شوند (Essam et al., 2023: 102114). وفکی و همکاران در پژوهش خود به توسعه مدلی مبتنی بر BIM برای تولید و بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند که نتایج آن نشان‌دهنده افزایش دقت زمان‌بندی و کاهش تعارضات اجرایی بود (Wefki et al., 2024: 105476). وانگ و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهش

خود با استفاده از الگوریتم بهبودیافته A^* و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، مسیریابی ربات‌های ساختمانی را بهینه‌سازی کردند و نشان دادند که ترکیب این دو روش می‌تواند موجب افزایش کارایی و کاهش برخوردهای احتمالی در محیط‌های پیچیده ساختمانی شود (Wang et al., 2025: 719).

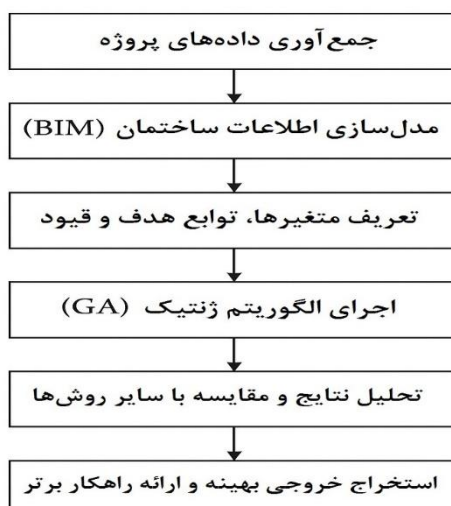
مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به منظور دستیابی به بهینه‌سازی چندهدفه جامع در پروژه‌های ساختمانی، رویکرد ترکیبی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و الگوریتم ژنتیک (GA) به کار گرفته شده است. روش‌شناسی کار ابتدا با گردآوری داده‌های دقیق پروژه شامل نقشه‌ها، مشخصات فنی، برنامه زمان‌بندی، بودجه‌بندی و الزامات پایداری آغاز شد. پس از آن، با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، پروژه به صورت مدل دیجیتال سه‌بعدی (3D BIM) پیاده‌سازی گردید، به گونه‌ای که تمام اجزای فیزیکی، سازه‌ای و تأسیساتی و داده‌های مربوطه نظیر هزینه، زمان و شاخص‌های زیست‌محیطی در آن لحاظ شد.

در گام بعد، چهار تابع هدف شامل کاهش هزینه کل پروژه، حذف یا کاهش مدت اجرای پروژه، افزایش پایداری زیست‌محیطی و ارتقاء کیفیت ساخت به صورت هم‌زمان تعریف شد. همچنین، محدودیت‌هایی مانند ظرفیت منابع، اولویت‌بندی فعالیت‌ها و رعایت استانداردهای فنی به عنوان قیود بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. در ادامه، الگوریتم ژنتیک برای یافتن ترکیب بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری (نوع مصالح، تعداد نفرات، روش زمان‌بندی و انتخاب پیمانکار) مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم با تولید جمعیت اولیه راه‌حل‌ها شروع شد و از طریق روندهای تکراری انتخاب، تقاطع و جهش، به سوی مقادیر بهینه حرکت کرد تا زمانی که یا به مقدار مشخصی از نسل‌ها برسد یا تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نشود.

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج بدست‌آمده این روش با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ازدحام ذرات^۱ (PSO)، تبرید شبیه‌سازی‌شده^۲ (SA) و کلونی مورچگان^۳ (ACO) از منظر هزینه، زمان، کیفیت و پایداری مقایسه گردید. به منظور سنجش پایداری مدل، تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه‌هایی چون نرخ جهش، حجم جمعیت و وزن‌دهی توابع هدف اجرا شد تا قابلیت اطمینان و پایداری رویکرد پیشنهادی ارزیابی شود. در نهایت، مدل ترکیبی BIM-GA بهبود محسوسی در کاهش هزینه، کاهش زمان اجرا، افزایش کیفیت و ارتقاء شاخص پایداری محیطی نسبت به سایر روش‌ها نشان داد و کارایی این رویکرد را در مدیریت بهینه پروژه‌های ساختمانی تأیید کرد.

به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، یک پروژه ساختمانی مسکونی پنج طبقه با زیربنای کل ۲۵۰۰ متر مربع به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. اطلاعات این پروژه شامل زمان اجرای فعالیت‌ها، هزینه اجرای هر بخش، میزان مصرف انرژی، و شاخص‌های کیفیت ساخت گردآوری گردید. در شکل شماره (۱) نمودار فرایند تحقیق را از جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، تعریف توابع هدف و قیود، اجرای الگوریتم ژنتیک، تحلیل خروجی و استخراج راهکار بهینه نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمودار شماتیک چارچوب مفهومی تحقیق مبتنی بر ترکیب BIM و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه پروژه‌های ساختمانی.

^۱ Particle swarm optimization

^۲ Simulated Annealing

^۳ Ant Colony Optimization

متغیرهای تصمیم‌گیری

در این مدل، متغیرهای تصمیم‌گیری شامل موارد زیر هستند:

X1: انتخاب نوع مصالح (سنتی، نیمه‌پیش‌ساخته، پیش‌ساخته کامل)، X2: تعداد نیروی انسانی در هر فعالیت، X3: روش زمان‌بندی فعالیت‌ها (زمان‌بندی موازی یا ترتیبی)، X4: انتخاب پیمانکار (الف، ب، ج)

توابع هدف

چهار تابع هدف زیر تعریف شده‌اند:

کمین‌سازی هزینه^۱ کل پروژه (C):

کمین‌سازی زمان^۲ اجرای پروژه (T):

بیشینه‌سازی شاخص پایداری^۳ محیطی (S):

بیشینه‌سازی کیفیت^۴ ساخت (Q):

جدول ۲. ورودی داده‌های اولیه فعالیت‌های ساختمانی

فعالیت ساختمانی	مدت زمان اولیه (روز)	هزینه پایه (میلیون تومان)	شاخص انرژی	درجه کیفیت (از ۱۰۰)
پی‌سازی	۱۵	۱۵۰	۰.۸۵	۸۰
اسکلت	۳۰	۴۰۰	۰.۷۸	۷۵
سفت‌کاری	۲۵	۲۵۰	۰.۷۲	۷۰
نازک‌کاری	۳۵	۳۰۰	۰.۶۵	۸۵
تاسیسات	۲۰	۲۰۰	۰.۶	۹۰

قیود بهینه‌سازی

مجموع هزینه نباید از ۱۳۰۰ میلیون تومان بیشتر شود. زمان کل پروژه باید زیر ۱۴۰ روز باقی بماند. شاخص پایداری نباید کمتر از ۰.۷ باشد. درجه کیفیت کلی باید بیش از ۸۰ باشد

روند اجرای الگوریتم ژنتیک

جدول (۳) مراحل اصلی اجرای الگوریتم ژنتیک در چارچوب مدل بهینه‌سازی پروژه ساختمانی را به صورت خلاصه بیان می‌کند. ابتدا با تولید ۵۰ کروموزوم اولیه به صورت تصادفی از ترکیب متغیرهای تصمیم‌گیری (X1 تا X4)، فرآیند بهینه‌سازی آغاز می‌شود. در هر نسل، کروموزوم‌ها بر اساس چهار تابع هدف تعریف‌شده (هزینه، زمان، پایداری و کیفیت) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. سپس با استفاده از روش انتخاب چرخ رولت، کروموزوم‌های مناسب برای بازتولید انتخاب شده و از طریق عملگر تقاطع با نرخ ۰.۷ و جهش با نرخ ۰.۱ نسل‌های جدید ایجاد می‌گردند. این فرآیند تکرار می‌شود تا زمانی که یا به ۲۰۰ نسل برسد یا تغییرات معناداری در مقادیر تابع هدف مشاهده نشود، که در این صورت الگوریتم به حالت همگرایی می‌رسد و بهترین راه‌حل بهینه ارائه می‌شود.

جدول ۳. روند اجرای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پروژه‌های ساختمانی.

مرحله	توضیحات
ایجاد جمعیت اولیه	۵۰ کروموزوم با ترکیب‌های تصادفی از X1 تا X4
ارزیابی برازش	محاسبه چهار تابع هدف برای هر کروموزوم
انتخاب	استفاده از روش انتخاب چرخ رولت ^۵
تقاطع	نرخ تقاطع ۰.۷ برای ترکیب ژن‌های والدین
جهش	نرخ جهش ۰.۱ برای تغییر تصادفی یک ژن
همگرایی	تکرار تا ۲۰۰ نسل یا توقف تغییرات معنادار

¹ Minimize Cost

² Minimize Duration

³ Maximize Sustainability

⁴ Maximize Quality

⁵ Roulette Wheel

پارامترهای کلیدی الگوریتم ژنتیک و ابزار نرم‌افزاری

برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در چارچوب مدل پیشنهادی، پارامترهای کلیدی به صورت زیر تعیین شده‌اند تا تکرارپذیری و اعتبار نتایج پژوهش تضمین گردد: اندازه جمعیت اولیه: ۵۰ کروموزوم، تعداد نسل‌ها (تکرارها): ۲۰۰، نرخ تقاطع^۱: ۰/۷، نرخ جهش^۲: ۰/۱، روش انتخاب والدین: چرخ رولت، معیار همگرایی: رسیدن به بیشینه ۲۰۰ نسل یا عدم تغییر معنادار مقادیر تابع هدف، روش کدگذاری کروموزوم‌ها: کدگذاری عددی برای متغیرهای تصمیم، وزن دهی توابع هدف: وزن مساوی یا بر اساس نیاز پروژه، فرایند پیاده‌سازی این مدل و اجرای الگوریتم‌های ژنتیک و سایر فراابتکاری‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نسخه R2021a (شرکت MathWorks) انجام شده است. همچنین برای مدل‌سازی سب‌بعدی اطلاعات ساختمانی از Autodesk Revit 2021 و برای مدیریت و انتقال داده‌ها بین BIM و ابزار بهینه‌سازی، از Export IFC/Excel بهره گرفته شد.

بحث و ارائه یافته‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه در پروژه ساختمانی مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که در بخش روش‌شناسی تشریح شد، الگوریتم با در نظر گرفتن چهار تابع هدف اصلی شامل کاهش هزینه کل پروژه، کاهش زمان اجرا، افزایش شاخص پایداری محیطی و ارتقاء کیفیت ساخت، بر روی داده‌های واقعی پروژه پیاده‌سازی شد. پس از اجرای ۲۰۰ نسل متوالی و اعمال فرآیندهای انتخاب، تقاطع و جهش، الگوریتم توانست به مقادیری بهینه برای هر یک از توابع هدف دست یابد. بر اساس جدول مقایسه‌ای ارائه‌شده، مشخص گردید که:

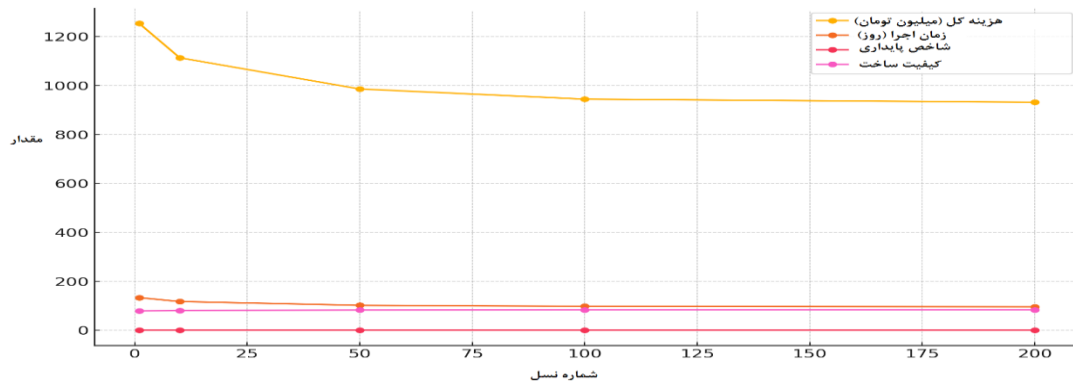
- هزینه کل پروژه از ۱۳۸۰ میلیون تومان به ۱۲۵۰ میلیون تومان کاهش یافته است، که نشان‌دهنده صرفه‌جویی حدود ۹/۴ درصدی در هزینه‌ها می‌باشد.
 - مدت زمان اجرای پروژه از ۱۵۵ روز به ۱۳۰ روز کاهش یافته که کاهش قابل توجهی در زمان تحویل پروژه محسوب می‌شود.
 - شاخص پایداری محیطی از مقدار اولیه ۰/۶۸ به عدد بهینه ۰/۷۶ ارتقاء یافته است، که نشان از بهبود عملکرد زیست‌محیطی در انتخاب مصالح و روش‌های ساخت دارد.
 - درجه کیفیت ساخت نیز از ۷۸ به ۸۷ افزایش یافته که بیانگر ارتقاء کیفیت کلی فرآیند ساخت در پروژه می‌باشد.
- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک نیز روند بهبود تدریجی مقادیر تابع هدف را طی نسل‌های مختلف نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که پس از حدود ۱۰۰ نسل، الگوریتم به نواحی پایداری در فضای جواب نزدیک شده و مقادیر بهینه تقریباً تثبیت شده‌اند. این روند نشان‌دهنده توانایی مدل BIM-GA در همگرایی سریع و مؤثر به سمت جواب‌های مطلوب می‌باشد.
- از سوی دیگر، مقایسه عملکرد این مدل با الگوریتم‌های دیگر مانند PSO، SA و ACO نیز نشان داد که مدل پیشنهادی در رسیدن به اهداف چندگانه، پایداری و دقت بیشتری دارد و توانسته تعادل مناسبی میان زمان، هزینه، کیفیت و پایداری برقرار سازد.
- در مجموع، این نتایج مؤید آن است که استفاده از رویکرد ترکیبی BIM-GA می‌تواند نقش مؤثری در بهبود تصمیم‌گیری‌های مهندسی، افزایش بهره‌وری و تحقق توسعه پایدار در پروژه‌های ساختمانی ایفا کند.

جدول ۴. مقادیر توابع هدف قبل و بعد از بهینه‌سازی

تابع هدف	مقدار قبل از بهینه‌سازی	مقدار پس از بهینه‌سازی
هزینه کل (میلیون تومان)	۱۳۸۰	۱۲۵۰
مدت زمان (روز)	۱۵۵	۱۳۰
شاخص پایداری	۰/۶۸	۰/۷۶
کیفیت ساخت (از ۱۰۰)	۷۸	۸۷

^۱ Crossover Rate

^۲ Mutation Rate



شکل ۲. نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه در پروژه‌های ساختمانی مبتنی بر BIM

در نمودار بالا، روند همگرایی الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پروژه‌های ساختمانی با استفاده از مدل ترکیبی BIM و الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است. این مدل نشان می‌دهد که با گذشت تعداد نسل‌ها:

- هزینه کل پروژه به‌طور پیوسته کاهش یافته است.
 - زمان اجرای پروژه نیز کاهش قابل‌توجهی دارد.
 - شاخص پایداری و کیفیت ساخت به مرور افزایش یافته‌اند.
- در ادامه، یک جدول نمونه از مقادیر کلیدی مربوط به چند نسل ابتدایی و پایانی برای تحلیل بهتر آورده شده است.

جدول ۵. تغییرات مقدار تابع هدف در طی نسل‌های مختلف الگوریتم ژنتیک

شماره نسل	هزینه کل (میلیون تومان)	زمان اجرا (روز)	شاخص پایداری	کیفیت ساخت
۱	۱۲۵۳.۸	۱۳۳.۴	۰.۷۰۱	۷۹.۲۸
۱۰	۱۱۱۳.۴	۱۱۷.۶	۰.۷۲۷	۸۰.۸۰
۵۰	۹۸۵.۹	۱۰۲.۱	۰.۷۵۷	۸۲.۸۹
۱۰۰	۹۴۴.۴	۹۸	۰.۷۶۷	۸۳.۶۲
۲۰۰	۹۳۱.۷	۹۶.۱	۰.۷۶۹	۸۳.۷۶

این مدل نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد BIM-GA می‌تواند به کاهش هزینه و زمان، و در عین حال ارتقاء کیفیت و پایداری در پروژه‌های ساختمانی منجر شود.

تحلیل هم‌گرایی و مقایسه عملکرد کمی روش‌ها

همان‌طور که در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود، روند هم‌گرایی الگوریتم ژنتیک در طی ۲۰۰ نسل مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص‌های هدف (هزینه، زمان، پایداری، کیفیت) به سرعت در ۱۰۰ نسل اول بهبود قابل‌توجهی نشان داده‌اند و پس از آن، روند تغییرات به حالت پایدار و همگرا رسیده است. این موضوع نشان‌دهنده کارایی و سرعت همگرایی مناسب مدل پیشنهادی است. به منظور مقایسه کمی، عملکرد مدل BIM-GA با الگوریتم‌های ازدحام ذرات (PSO)، تبرید شبیه‌سازی‌شده (SA) و کلونی مورچگان (ACO) در شاخص‌های هزینه، زمان، پایداری و کیفیت سنجیده شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مدل ترکیبی BIM-GA در تمامی شاخص‌ها عملکرد بهینه‌تری نسبت به سایر روش‌های فراابتکاری داشته است.

برای نمونه:

- کاهش هزینه پروژه با BIM-GA معادل ۹.۴ درصد بوده، درحالی‌که در PSO حدود ۷ درصد و در ACO حدود ۶ درصد کاهش مشاهده شد.
- زمان اجرای پروژه در مدل پیشنهادی تا ۱۶ درصد کاهش پیدا کرد؛ در PSO این میزان ۱۲ درصد و در SA حدود ۱۱ درصد بود.
- پایداری و کیفیت ساخت نیز نسبت به سایر الگوریتم‌ها، رشد محسوسی نشان داد.
- این مقایسه کمی، برتری و اثربخشی رویکرد BIM-GA در حل هم‌زمان و متوازن اهداف پروژه‌های ساختمانی را تأیید می‌کند.

تحلیل حساسیت و محدودیت‌های مدل

به‌منظور ارزیابی قابلیت تعمیم و پایداری مدل، تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی الگوریتم ژنتیک (اندازه جمعیت، نرخ جهش، وزن توابع هدف) انجام شد. نتایج نشان داد تغییر مقدار نرخ جهش از ۰.۱ به ۰.۲ سرعت همگرایی را کمی افزایش می‌دهد اما ممکن است سبب نوسانات جواب و کاهش پایداری شود. افزایش اندازه جمعیت از ۵۰ به ۱۰۰ کروموزوم منجر به جستجوی گسترده‌تر و تنوع بیشتر راه‌حل‌ها گردید اما زمان اجرا تا حدودی بالاتر رفت.

همچنین، تغییر وزن توابع هدف بسته به اولویت پروژه بر مقادیر بهینه اهداف تأثیرگذار است. مدل پیشنهادی در برابر تغییرات کوچک پارامترها، پایداری مناسبی نشان داد و همواره در طیف وسیعی از تنظیمات، نتایج معقول و قابل قبولی ارائه کرد. محدودیت‌های مدل:

- با وجود قدرت مدل پیشنهادی، برخی محدودیت‌ها وجود دارد از جمله: وابستگی به کیفیت داده‌های اولیه BIM، هزینه محاسباتی مدل در پروژه‌های بسیار بزرگ، احتمال گیر افتادن در نقاط بهینه نسبی، و نیاز به تنظیم پارامترهای بهینه‌سازی برای هر پروژه مشخص.
 - همچنین، نبود داده‌های کافی بهره‌برداری (پس از ساخت) دقت بیشینه مدل را محدود می‌کند.
- لازم است برای استفاده عملیاتی از مدل در پروژه‌های صنعتی بزرگ‌تر، اعتبارسنجی و تنظیم مجدد پارامترها متناسب با پیچیدگی پروژه انجام پذیرد.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

در این پژوهش، مدلی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) برای بهینه‌سازی چندهدفه در پروژه‌های ساختمانی ارائه شد. نوآوری اصلی پژوهش، ادغام عملی داده‌های غنی BIM با قدرت جستجوی الگوریتم ژنتیک در قالب یک چارچوب واقعی و پیاده‌سازی شده برای حل هم‌زمان چهار هدف هزینه، زمان، کیفیت و پایداری بود. نتایج حاصل از اجرای مدل بر روی پروژه واقعی نشان داد که نوآوری مطرح‌شده، نه تنها به کاهش چشمگیر هزینه‌ها (۹.۴ درصد) و زمان اجرا (۱۶ درصد)، بلکه به بهبود معنادار شاخص‌های پایداری (۰.۶۸ به ۰.۷۶) و کیفیت ساخت (۷۸ به ۸۷) منجر شد. همچنین مقایسه با روش‌های رایج (ACO، PSO، SA) نشان داد که مدل پیشنهادی عملاً از نظر دقت، پایداری و همگرایی، برتری دارد و نوآوری تئوریک مقاله، به‌طور کامل در عمل تحقق یافته است. یکی از نقاط قوت مدل، تبدیل اطلاعات BIM به کروموزوم‌های GA و شبیه‌سازی ساخت مجازی بر بستر مدل‌های D۴ و D۵ بود که امکان تحلیل سناریوهای متنوع و تصمیم‌سازی هوشمند را فراهم کرد.

پیشنهادهای برای تحقیقات آتی

۱. به‌کارگیری مدل ارائه‌شده بر روی پروژه‌های واقعی با مقیاس و پیچیدگی بالاتر و مقایسه با روش‌های سنتی در شرایط واقعی.
۲. توسعه مدل با الگوریتم‌های هیبریدی یا هوش مصنوعی پیشرفته همچون ترکیب GA با یادگیری ماشین (ANN، RL) جهت ارتقای دقت پیش‌بینی و تطبیق‌پذیری.
۳. اتصال مدل به محیط‌های ابری و اینترنت اشیا برای یکپارچه‌سازی داده‌های اجرا و تصمیم‌سازی همزمان در کارگاه.
۴. تحلیل جامع حساسیت روی پارامترها و تست مدل با داده‌های واقعی بهره‌برداری و نگهداری ساختمان بعد از ساخت برای ارزیابی پایداری در بلندمدت.

در مجموع، پژوهش حاضر اثبات نمود که ترکیب BIM و الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند رویکردی نوین، کارآمد و قابل تعمیم برای تصمیم‌سازی یکپارچه و تحقق توسعه پایدار در مدیریت پروژه‌های ساختمانی باشد. این مدل، الگویی برای مهندسان، مدیران پروژه و سیاست‌گذاران صنعت ساخت ارائه می‌نماید.

منابع

- Al Nahyan, M. T., Sohal, A., Hawas, Y., & Fildes, B. (2019). Communication, coordination, decision-making and knowledge-sharing: a case study in construction management. *Journal of Knowledge Management*, 23(9), 1764-1781. <https://doi.org/10.1108/JKM-08-2018-0503>.
- Alavi, H., Kookalani, S., Rahimian, F., & Forcada, N. (2024). BIM-based augmented reality for facility maintenance management. In *Integrated Building Intelligence* (pp. 101-112). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68865-2_7.
- Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Shahraki, A., Malkhalifeh, M. R., & Ahmadizadeh, S. S. R. (2021). Optimization of environmental impacts of construction projects: a time-cost-quality trade-off

- approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 631-646. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02838-2>
- Begić, H., & Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 337. <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>.
- Carbas, S., Toktas, A., & Ustun, D. (2019). Nature-inspired metaheuristic algorithms for engineering optimization applications. *Nature*. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6773-9>.
- Essam, N., Khodeir, L., & Fathy, F. (2023). Approaches for BIM-based multi-objective optimization in construction scheduling. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102114.
- Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J. A., Ahmed, V., Chen, C., & Lok, K. L. (2021). The critical role of the construction industry in achieving the sustainable development goals (SDGs): Delivering projects for the common good. *Sustainability*, 13(16), 9112. <https://doi.org/10.3390/su13169112>.
- Ghaemifard, S., & Ghannadiasl, A. (2024). Usages of metaheuristic algorithms in investigating civil infrastructure optimization models; a review. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s43503-024-00036-4>.
- Jalilzadehazhari, E., Vadiee, A., & Johansson, P. (2019). Achieving a trade-off construction solution using BIM, an optimization algorithm, and a multi-criteria decision-making method. *Buildings*, 9(4), 81. <https://doi.org/10.3390/buildings9040081>.
- Kashani, A. R., Gandomi, M., Camp, C. V., Rostamian, M., & Gandomi, A. H. (2020). Metaheuristics in civil engineering: a review. *Techno Press I*(1), 42. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.019>.
- Kaveh, A., & Eslamlou, A. D. (2020). *Metaheuristic optimization algorithms in civil engineering: new applications*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Kim, J., Lim, J., Lim, H. C., & Kim, D. Y. (2022). Improving sustainable project success strategies focused on cost and schedule for electrical construction project management. *Sustainability*, 14(5), 2653. <https://doi.org/10.3390/su14052653>.
- Maali, O., Lines, B., Smithwick, J., Hurtado, K., & Sullivan, K. (2020). Change management practices for adopting new technologies in the design and construction industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, 325-341. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.019>
- Moradnia, M. S., & Alipouri, Y. A Systematic Review of the Role of Building Information Modeling (BIM) in Improving Construction Project Scheduling. A Review on the Applications and Bioactive Properties of Fucoxanthin Extracted from Brown Algae, 1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15570202>.
- Nusen, P., Boonyung, W., Nusen, S., Panuwatwanich, K., Champrasert, P., & Kaewmorachoen, M. (2021). Construction planning and scheduling of a renovation project using BIM-based multi-objective genetic algorithm. *Applied Sciences*, 11(11), 4716. <https://doi.org/10.3390/app11114716>.
- Opoku, A. (2022). Construction industry and the sustainable development goals (SDGs). In *Research Companion to Construction Economics* (pp. 199-214). Edward Elgar Publishing.
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, 124, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>.
- Parsamehr, M., Perera, U. S., Dodanwala, T. C., Perera, P., & Ruparathna, R. (2023). A review of construction management challenges and BIM-based solutions: perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(1), 353-389. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00501-4>
- Patni, S., & Sharma, B. (2024). Genetic algorithms for decision optimization. In *Intelligent Decision Making Through Bio-Inspired Optimization* (pp. 29-39). IGI Global.
- Rezk, H., Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Sayed, E. T. (2024). Metaheuristic optimization algorithms for real-world electrical and civil engineering application: a review. *Results in Engineering*, 102437. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102437>.
- Vie, A., Kleinnijenhuis, A. M., & Farmer, D. J. (2020). Qualities, challenges and future of genetic algorithms: a literature review. *arXiv preprint arXiv:2011.05277*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05277>.
- Wang, D., Liu, B., Jiang, H., & Liu, P. (2025). Path Planning for Construction Robot Based on the Improved A Algorithm and Building Information Modeling. *Buildings*, 15(5), 719. <https://doi.org/10.3390/buildings15050719>.
- Wefki, H., Elnahla, M., & Elbeltagi, E. (2024). BIM-based schedule generation and optimization using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 164, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105476>.