

Development of an Entrepreneurship and Time–Cost–Risk Optimization Framework in EPC Projects Using Hybrid Metaheuristic Algorithms

Ehsan. Najafi Chimeh^{1*}

¹ M.Sc. Student in Project Management, Department of Industrial Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding author email address: ehsannajafi827@gmail.com

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Najafi Chimeh, E. (2025). Development of an Entrepreneurship and Time–Cost–Risk Optimization Framework in EPC Projects Using Hybrid Metaheuristic Algorithms. *Journal of Technology in Entrepreneurship and Strategic Management*, 4(4), 1-22.



© 2025 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

ABSTRACT

This study aimed to develop and evaluate an integrated optimization framework for the simultaneous management of time, cost, and risk in EPC projects using hybrid metaheuristic algorithms and uncertainty scenario analysis. This applied modeling and simulation-based study was conducted to design an advanced decision-support framework for engineering, procurement, and construction projects. First, the work breakdown structure of an EPC project was modeled, and activity precedence relationships, resource constraints, direct and indirect costs, and risk-related variables were identified. A multi-objective function was then formulated to simultaneously minimize total project duration, final project cost, and overall risk level. Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and hybrid metaheuristic configurations were employed to solve the optimization model. To incorporate dynamic uncertainty in activity durations and resource availability, more than 5,000 uncertainty scenarios were simulated and analyzed. The performance of the proposed framework was compared with conventional project scheduling and resource allocation approaches. Inferential results indicated that the proposed hybrid framework outperformed traditional scheduling methods in the simultaneous optimization of time, cost, and risk. Comparative scenario analysis demonstrated that the application of hybrid metaheuristic algorithms reduced total project duration by approximately 20% to 35% compared with conventional approaches. Moreover, delay-related additional costs decreased by approximately 15% to 30%. Sensitivity analysis and comparative assessment of high-risk scenarios further showed that the proposed model substantially reduced the overall project risk level and generated more efficient Pareto-optimal solutions for decision-making under resource constraints and uncertainty. The proposed framework can be used as an intelligent and integrated decision-support tool for EPC project management. By combining multi-objective optimization, hybrid metaheuristic algorithms, and uncertainty analysis, the model enables project managers to identify more efficient implementation scenarios. The framework may contribute to reducing delays, controlling cost overruns, improving risk mitigation, and supporting optimal managerial decision-making in complex industrial EPC projects.

Keywords: EPC project management, multi-objective optimization, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, project scheduling, project cost, risk analysis, metaheuristic algorithms, uncertainty, intelligent decision-support system

Extended Abstract

Introduction

Engineering, Procurement, and Construction (EPC) projects are among the most complex delivery systems in industrial, infrastructure, energy, and large-scale construction sectors because they integrate engineering design, procurement decisions, construction execution, contractual responsibilities, resource allocation, and risk transfer within a single project framework. Although the EPC model is often adopted to improve coordination and accountability, its practical implementation is frequently challenged by time overruns, cost escalation, supply chain disruptions, design changes, stakeholder misalignment, contractual ambiguity, and uncertainty in resource availability. Recent studies on large-scale international EPC projects emphasize that objective control in these projects requires more than conventional scheduling and cost-monitoring tools; it requires integrated, adaptive, and analytically supported decision-making frameworks capable of managing multiple project objectives simultaneously (Song & Lu, 2025). In this regard, EPC project management has increasingly moved toward multi-objective optimization, digital construction management, intelligent decision-support systems, and scenario-based planning approaches (Piyush et al., 2023; You, 2022).

A central challenge in EPC project management is the simultaneous optimization of time, cost, and risk. Traditional project scheduling methods, such as CPM and PERT, provide useful baseline structures for identifying activity precedence and critical paths, but they are limited when activity durations, procurement delays, resource constraints, and risk events are uncertain. EPC projects are rarely executed under stable conditions; instead, they are exposed to changing technical, financial, legal, environmental, and logistical conditions. Studies on EPC risk evaluation have shown that project risks are multidimensional and interdependent, particularly in prefabricated construction, hydropower engineering, logistics, and cross-border infrastructure projects (Cao & Lei, 2023; He & Han, 2022; Li et al., 2023; Xia et al., 2022). Therefore, a project plan that minimizes time without considering cost and risk may generate excessive resource pressure, financial inefficiency, and execution vulnerability. Likewise, cost minimization without time and risk integration may result in delayed delivery or poor operational feasibility.

Cost control is another critical issue in EPC projects. Under EPC contracting, cost performance is affected not only by direct and indirect costs but also by design optimization, procurement strategies, transaction costs, contract conditions, delay penalties, and coordination efficiency. Previous research has highlighted that cost control in EPC-based construction requires integrated management across design, procurement, and execution stages (Weihao, 2024). Moreover, transaction cost analysis in prefabricated housing development has shown that developers' decisions can significantly influence process efficiency and cost outcomes (Wu et al., 2024). From a broader value-management perspective, project cost should not be treated as an isolated financial indicator; rather, it should be analyzed in relation to systemic value, sustainability, performance, and risk (Margherita et al., 2022). This perspective is particularly relevant to EPC projects, where managerial decisions generate cascading consequences across time, cost, risk, and stakeholder outcomes.

The increasing use of digital technologies and intelligent analytical methods has created new possibilities for optimizing EPC project performance. Digital construction, business analytics, open innovation, and intelligent decision-support systems can improve forecasting, coordination, and resource allocation in complex project environments (Huang et al., 2024; Valmohammadi et al., 2024). In addition,

metaheuristic algorithms such as Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, simulated annealing, and hybrid computational models are especially suitable for solving large-scale, nonlinear, constrained, and multi-objective optimization problems. Similar intelligent optimization logics have been applied in entrepreneurship path planning and technology-enabled decision-making contexts, showing that hybrid data-driven and optimization-based systems can support complex decisions under uncertainty (Niu, 2025). Within EPC project management, these approaches can help identify Pareto-optimal alternatives rather than a single deterministic schedule, enabling managers to select the best compromise solution according to organizational priorities and risk tolerance.

The entrepreneurial dimension of EPC optimization is also important. Entrepreneurship in this context does not merely refer to new venture creation; rather, it refers to opportunity recognition, innovative resource configuration, strategic decision-making, resilience, and value creation under uncertainty. Operations management has been increasingly recognized as a core component of entrepreneurial theory and practice because operational decisions shape growth, efficiency, and sustainability (Fine et al., 2022). In construction projects, the managerial role of civil engineers has also been reframed as an entrepreneurial function involving innovation, coordination, and value creation (Entika et al., 2020). Furthermore, research on strategic entrepreneurship, sustainable supply chain management, corporate entrepreneurship, resilience, circular economy, and green entrepreneurship demonstrates that sustainable performance depends on the integration of innovation, resource efficiency, risk management, and adaptive decision-making (Conduah & Essiaw, 2022; Haddad et al., 2024; Mardani et al., 2024; Nourelhouda, 2022). Accordingly, developing a hybrid metaheuristic framework for EPC time–cost–risk optimization can be understood as both a technical optimization effort and an entrepreneurial decision-support mechanism for improving project value under uncertainty.

Methods and Materials

This study employed an applied modeling and simulation-based research design to develop and evaluate an integrated optimization framework for EPC projects. The proposed framework was designed to optimize project time, total cost, delay-related additional cost, and overall risk level under uncertain execution conditions. First, the work breakdown structure of a representative EPC project was modeled, and activity precedence relationships, resource constraints, direct costs, indirect costs, delay-related costs, and risk variables were identified. The project network was then transformed into a multi-objective optimization problem in which the objective function simultaneously minimized total project duration, final project cost, and overall risk index.

To solve the optimization problem, three computational approaches were evaluated: Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and a hybrid Genetic Algorithm–Particle Swarm Optimization model. The hybrid model was developed to combine the global search capability of the Genetic Algorithm with the rapid convergence capacity of Particle Swarm Optimization. In order to represent uncertainty in activity durations, resource availability, cost fluctuations, and risk exposure, more than 5,000 simulated scenarios were generated. These scenarios were classified across different levels of uncertainty, including low, moderate, and high uncertainty. The performance of the proposed hybrid framework was compared with the classical CPM/PERT approach and with the independent Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization models.

The analytical process included descriptive comparison of performance indicators, one-way analysis of variance to examine differences among optimization methods, Bonferroni post-hoc tests for pairwise comparisons, and scenario-based sensitivity analysis to evaluate model stability across uncertainty levels. The main performance indicators included total project duration, total project cost, delay-related additional cost, overall risk index, percentage reduction in project duration, percentage reduction in project cost, and percentage improvement in risk level. A Pareto-front analysis was also conducted to identify efficient trade-off solutions and determine the best compromise solution among time, cost, and risk objectives.

Findings

The results showed that the proposed hybrid Genetic Algorithm–Particle Swarm Optimization framework outperformed the classical CPM/PERT method and the independent metaheuristic models across all major performance indicators. In the classical method, the mean total project duration was 642.38 days, while this value decreased to 517.26 days in the Genetic Algorithm, 504.81 days in Particle Swarm Optimization, and 421.57 days in the hybrid model. Therefore, the hybrid framework reduced total project duration by 34.37% compared with the classical approach. The total project cost also decreased from 1184.62 in the classical method to 836.18 in the hybrid model, indicating a 29.42% improvement in cost performance. Similarly, delay-related additional cost declined from 184.27 to 72.34, showing that the proposed framework substantially reduced cost overruns associated with schedule delays.

The risk-related results also supported the superiority of the proposed model. The overall project risk index was 0.684 in the classical method, 0.552 in the Genetic Algorithm, 0.529 in Particle Swarm Optimization, and 0.412 in the hybrid model. This pattern indicates that the hybrid model achieved the lowest risk level while also reducing time and cost. The results of one-way analysis of variance confirmed statistically significant differences among the compared methods in total project duration, total project cost, delay-related additional cost, and overall risk index. For total project duration, the F value was 5043.156 with an effect size of 0.752, indicating a strong effect of optimization method on project duration. For total cost, the F value was 2509.613 with an effect size of 0.601. The effect sizes for delay-related cost and overall risk index were 0.570 and 0.617, respectively, showing that the differences among methods were not only statistically significant but also practically meaningful.

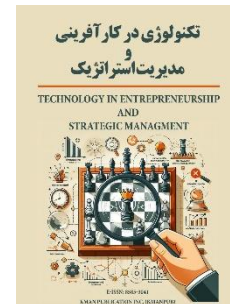
The Bonferroni post-hoc analysis further showed that all pairwise differences among the classical method, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and hybrid model were statistically significant. The largest mean difference in project duration was observed between the classical method and the hybrid model, equal to 220.81 days. The largest mean difference in total cost was also observed between the classical method and the hybrid model, equal to 348.44. In terms of risk, the difference between the classical method and the hybrid model was 0.272, representing the strongest risk reduction among all comparisons. Scenario-based analysis demonstrated that the hybrid model maintained its superiority across all uncertainty levels. Under high uncertainty, project duration decreased from 686.81 days in the classical method to 445.36 days in the hybrid model, total cost decreased from 1275.88 to 867.56, and the risk index decreased from 0.768 to 0.473. The Pareto-front analysis also showed that the hybrid framework generated balanced trade-off solutions, allowing the selection of a best compromise solution without excessive sacrifice in any single objective.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that the proposed hybrid metaheuristic framework provides a more effective approach for managing the simultaneous time–cost–risk trade-off in EPC projects than conventional scheduling and single-algorithm optimization methods. The superiority of the hybrid model can be explained by its ability to explore a broad solution space while maintaining efficient convergence toward high-quality alternatives. The Genetic Algorithm component supports diversity and global exploration, while the Particle Swarm Optimization component improves convergence speed and solution refinement. As a result, the combined framework avoids some limitations of deterministic scheduling and reduces the probability of becoming trapped in inefficient local solutions.

The results also indicate that EPC project optimization should not be based on a single objective. Reducing project time alone may increase cost and risk, while minimizing cost alone may lead to delays or operational vulnerability. The proposed framework addressed this issue by generating Pareto-optimal solutions and enabling decision-makers to evaluate balanced alternatives. This is particularly important in EPC projects because managers often need to choose between accelerating execution, controlling expenditure, and maintaining acceptable risk exposure. The best compromise solution identified in the Pareto-front analysis provides a practical decision point for balancing these competing objectives.

Overall, the study concludes that the hybrid Genetic Algorithm–Particle Swarm Optimization framework can serve as an intelligent decision-support tool for EPC project managers. It improves project performance by reducing duration, controlling cost, lowering delay-related expenses, and mitigating overall risk under uncertainty. The framework also strengthens entrepreneurial and value-oriented project management by enabling innovative resource configuration, scenario-based decision-making, and adaptive planning. Therefore, the proposed model can contribute to more resilient, efficient, and strategically informed management of complex EPC projects.



توسعه چارچوب بهینه‌سازی کار آفرینی و زمان-هزینه-ریسک در پروژه‌های EPC با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری

احسان نجفی چیمه^{*۱}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت پروژه، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: ehsannajafi827@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:

نجفی چیمه، احسان. (۱۴۰۴). توسعه چارچوب بهینه‌سازی کار آفرینی و زمان-هزینه-ریسک در پروژه‌های EPC با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری. تکنولوژی در کار آفرینی و مدیریت استراتژیک، ۴(۴)، ۱-۲۲.



© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

هدف این پژوهش، توسعه و ارزیابی یک چارچوب بهینه‌سازی یکپارچه برای مدیریت هم‌زمان زمان، هزینه و ریسک در پروژه‌های EPC با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری و تحلیل سناریوهای عدم قطعیت بود. این پژوهش از نوع مدل‌سازی کاربردی و شبیه‌سازی محور بود که با هدف طراحی یک ابزار تصمیم‌یار برای پروژه‌های مهندسی، تأمین و ساخت انجام شد. ابتدا ساختار شکست کار پروژه EPC تدوین و روابط تقدم و تأخر فعالیت‌ها، محدودیت‌های منابع، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، و متغیرهای ریسک شناسایی شدند. سپس یک تابع هدف چندمعیاره برای حداقل‌سازی هم‌زمان مدت کل پروژه، هزینه نهایی و سطح ریسک تعریف شد. برای حل مدل، از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و نسخه‌های ترکیبی فراابتکاری استفاده گردید. به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت پویا در زمان فعالیت‌ها و دسترسی به منابع، بیش از ۵,۰۰۰ سناریوی شبیه‌سازی شده تحلیل شد و عملکرد چارچوب پیشنهادی با رویکردهای کلاسیک زمان‌بندی و تخصیص منابع مقایسه گردید. نتایج استنباطی نشان داد که چارچوب ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های سنتی زمان‌بندی، عملکرد برتری در بهینه‌سازی هم‌زمان زمان، هزینه و ریسک دارد. تحلیل مقایسه‌ای سناریوها نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی موجب کاهش حدود ۲۰ تا ۳۵ درصدی مدت کل پروژه و کاهش حدود ۱۵ تا ۳۰ درصدی هزینه‌های اضافی ناشی از تأخیر شد. همچنین ارزیابی حساسیت و مقایسه سناریوهای پریسک نشان داد که مدل پیشنهادی توانست سطح ریسک کلی پروژه را به طور معناداری نسبت به روش‌های کلاسیک کاهش دهد و راه‌حل‌های پارتوی کارآمدتری برای تصمیم‌گیری تحت محدودیت منابع ارائه کند. چارچوب پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار هوشمند و یکپارچه در مدیریت پروژه‌های EPC مورد استفاده قرار گیرد. این مدل با ترکیب بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های فراابتکاری و تحلیل عدم قطعیت، امکان انتخاب سناریوهای اجرایی کارآمدتر را فراهم می‌سازد و می‌تواند به کاهش تأخیر، کنترل هزینه و مدیریت ریسک در پروژه‌های صنعتی پیچیده کمک کند.

کلیدواژگان: مدیریت پروژه EPC، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، زمان‌بندی پروژه، هزینه پروژه، تحلیل ریسک، فراابتکاری، عدم قطعیت، تصمیم‌یار هوشمند

مقدمه

پروژه‌های EPC، شامل مهندسی، تأمین و ساخت، از پیچیده‌ترین قالب‌های قراردادی و اجرایی در پروژه‌های صنعتی، زیرساختی، انرژی، نفت و گاز، حمل‌ونقل و ساخت‌وساز پیشرفته محسوب می‌شوند. در این نوع پروژه‌ها، کارفرما بخش عمده‌ای از مسئولیت‌های طراحی، تدارکات، اجرا، هماهنگی و تحویل را به پیمانکار EPC واگذار می‌کند و انتظار دارد پروژه در چارچوب زمان، هزینه، کیفیت، الزامات قراردادی و مقرراتی از پیش تعیین‌شده تکمیل شود. با وجود این، ماهیت یکپارچه و چندمرحله‌ای پروژه‌های EPC سبب می‌شود که هرگونه تغییر در طراحی، تأخیر در زنجیره تأمین، نوسان قیمت منابع، ضعف هماهنگی میان ذی‌نفعان، تغییر شرایط محیطی، یا بروز ریسک‌های فنی و حقوقی بتواند به‌صورت زنجیره‌ای بر کل عملکرد پروژه اثر بگذارد. از این‌رو، کنترل هم‌زمان اهداف زمان، هزینه و ریسک، یکی از چالش‌های اصلی مدیریت پروژه‌های EPC است و مطالعات جدید نیز نشان می‌دهند که کنترل هدف در پروژه‌های بزرگ بین‌المللی EPC نیازمند رویکردهای جامع، داده‌محور و انطباق‌پذیر است (Song & Lu, 2025).

در رویکردهای سنتی مدیریت پروژه، زمان‌بندی معمولاً بر اساس روش‌هایی مانند مسیر بحرانی، برآورد قطعی فعالیت‌ها، تحلیل شبکه‌ای و تخصیص ایستای منابع انجام می‌شود. اگرچه این روش‌ها در پروژه‌های نسبتاً پایدار و کم‌ابهام می‌توانند کارآمد باشند، اما در پروژه‌های EPC که در معرض تغییرات مداوم طراحی، تأخیر تأمین تجهیزات، محدودیت منابع، تغییرات مقرراتی، و ریسک‌های قراردادی قرار دارند، کارایی محدودی دارند. در چنین شرایطی، برنامه زمان‌بندی صرفاً یک سند کنترلی نیست، بلکه باید به یک سازوکار تصمیم‌یار پویا تبدیل شود که بتواند اثر متقابل تصمیم‌های مهندسی، تأمین، ساخت، هزینه و ریسک را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کند. بررسی‌های اخیر در حوزه مدیریت زنجیره تأمین EPC نیز نشان داده‌اند که موفقیت این پروژه‌ها به توانایی سازمان‌ها در هماهنگ‌سازی جریان اطلاعات، جریان مواد، تصمیم‌های تأمین، و ارتباطات بین‌سازمانی وابسته است (Huang et al., 2024). بنابراین، مدل‌های بهینه‌سازی در پروژه‌های EPC باید از سطح زمان‌بندی ساده عبور کرده و به سمت چارچوب‌های چندهدفه و یکپارچه حرکت کنند.

یکی از ابعاد کلیدی در این زمینه، مسئله هزینه و کنترل مالی پروژه است. در پروژه‌های EPC، هزینه کل پروژه تنها به هزینه مستقیم فعالیت‌ها محدود نیست، بلکه هزینه‌های غیرمستقیم، هزینه‌های ناشی از تأخیر، هزینه‌های فرصت، هزینه‌های تغییرات طراحی، هزینه‌های لجستیک، هزینه‌های ادعاهای قراردادی، و هزینه‌های ناشی از افزایش ریسک نیز باید در تصمیم‌گیری لحاظ شوند. پژوهش‌های مرتبط با کنترل هزینه در ساخت‌وساز پیش‌ساخته تحت مدل EPC نشان داده‌اند که ساختار قراردادی EPC می‌تواند ظرفیت بالایی برای یکپارچه‌سازی تصمیم‌های طراحی و اجرا فراهم کند، اما در صورت نبود نظام کنترل هزینه دقیق، همین ساختار می‌تواند به افزایش پیچیدگی مالی و کاهش شفافیت تصمیم‌گیری منجر شود (Weihao, 2024). از سوی دیگر، ادبیات مدیریت ارزش نشان می‌دهد که رویکردهای کلاسیک مدیریت هزینه کل باید به سمت مدیریت ارزش نظام‌مند حرکت کنند؛ زیرا در پروژه‌های پیچیده، هدف صرفاً کاهش هزینه نیست، بلکه ایجاد تعادل میان هزینه، زمان، کیفیت، پایداری، ریسک و ارزش راهبردی پروژه است (Margherita et al., 2022). این دیدگاه با ماهیت پروژه‌های EPC سازگار است؛ زیرا تصمیم به کاهش زمان پروژه، در صورتی که بدون تحلیل هزینه و ریسک انجام شود، ممکن است به افزایش فشار منابع، کاهش کیفیت اجرا و افزایش احتمال شکست منجر شود.

بعد دیگر مسئله، مدیریت ریسک است. پروژه‌های EPC به دلیل گستردگی ذی‌نفعان، تنوع منابع، وابستگی فعالیت‌ها، و عدم قطعیت محیطی، با ریسک‌های چندلایه مواجه‌اند. این ریسک‌ها شامل ریسک‌های فنی، مالی، لجستیکی، قراردادی، طراحی، تأمین، ایمنی، حقوقی و محیطی هستند. مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی ریسک پروژه‌های EPC در ساختمان‌های پیش‌ساخته نشان داده‌اند که ریسک‌های این

نوع پروژه‌ها ماهیت ساختاریافته و شبکه‌ای دارند و باید با روش‌هایی تحلیل شوند که روابط بین عوامل ریسک را در نظر بگیرند (Cao & Lei, 2023). همچنین، پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی جامع ریسک در ساختمان‌های پیش‌ساخته با استفاده از مدل EPC بر این نکته تأکید کرده‌اند که ریسک پروژه تنها حاصل جمع عوامل مستقل نیست، بلکه نتیجه تعامل پیچیده میان عوامل فنی، مدیریتی، قراردادی و محیطی است (Xia et al., 2022). در پروژه‌های نیروگاهی و برق‌آبی EPC نیز استفاده از مدل‌های استدلال شواهد فازی بهبودیافته برای ارزیابی ریسک نشان داده است که عدم قطعیت و ابهام در داده‌های ریسک باید به صورت صریح در مدل‌های تصمیم‌گیری وارد شود (Li et al., 2023). افزون بر این، در پروژه‌های EPC خارج از کشور، ریسک‌های لجستیکی به دلیل فاصله جغرافیایی، محدودیت‌های حمل‌ونقل، نوسان مقررات و اختلالات زنجیره تأمین اهمیت ویژه‌ای دارند (He & Han, 2022). بنابراین، یک چارچوب کارآمد برای پروژه‌های EPC باید بتواند زمان، هزینه و ریسک را به عنوان سه بعد وابسته و نه سه متغیر مستقل تحلیل کند.

در سال‌های اخیر، تحول دیجیتال و فناوری‌های هوشمند زمینه جدیدی برای بازاندیشی مدیریت پروژه‌های EPC فراهم کرده‌اند. توسعه مدیریت ساخت دیجیتال، تحلیل داده، هوش مصنوعی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، سیستم‌های تصمیم‌یار و روش‌های محاسباتی پیشرفته، امکان تحلیل سناریوهای متعدد و انتخاب راه‌حل‌های بهینه را افزایش داده است. پژوهش‌های مربوط به قابلیت‌های مدیریت ساخت دیجیتال نشان می‌دهند که فناوری‌های نوین می‌توانند هماهنگی، شفافیت، قابلیت پیش‌بینی و کنترل تصمیم‌ها را در پروژه‌های پیچیده ارتقا دهند (Piyush et al., 2023). همچنین، مفهوم ساخت هوشمند بر این اصل استوار است که صنعت ساخت‌وساز برای عبور از ناکارآمدی‌های سنتی باید به سمت دیجیتالی‌سازی، داده‌محوری، اتوماسیون و تصمیم‌گیری هوشمند حرکت کند (You, 2022). کاربرد فناوری‌های نوین در صنایع ساخت، تولید و مهندسی نیز نشان می‌دهد که توسعه ظرفیت‌های صنعتی و تولیدی بدون بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌یار، بهینه‌سازی و مدیریت داده نمی‌تواند پاسخگوی پیچیدگی‌های عملیاتی باشد (Pandey et al., 2021). در این مسیر، مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر سیستم‌های عصبی-فازی نیز برای پیش‌بینی عملکرد پروژه در بخش پایین‌دستی صنعت نفت ایران مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های هوشمند با داده‌های پروژه می‌تواند دقت تحلیل عملکرد را افزایش دهد (Faraji, 2021).

یکی از رویکردهای مهم برای مواجهه با پیچیدگی پروژه‌های EPC، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و ترکیبی است. الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید، و روش‌های ترکیبی، برای حل مسائل پیچیده‌ای طراحی شده‌اند که فضای جست‌وجوی بزرگ، اهداف متعارض، محدودیت‌های متعدد و عدم قطعیت بالا دارند. در حوزه برنامه‌ریزی مسیرهای کارآفرینی هوشمند در بافت‌های روستایی، ترکیب روش‌هایی مانند LSTM و شبیه‌سازی تبرید نشان داده است که تلفیق یادگیری هوشمند و بهینه‌سازی می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های پیچیده و وابسته به مسیر کارآمد باشد (Niu, 2025). این منطق را می‌توان به پروژه‌های EPC نیز تعمیم داد؛ زیرا در این پروژه‌ها، انتخاب توالی فعالیت‌ها، تخصیص منابع، کنترل هزینه و کاهش ریسک، همگی ماهیتی مسیرمحور، وابسته به محدودیت و چندهدفه دارند. همچنین، کاربرد فناوری بلاکچین در خوداشتغالی و صنعت ماشین‌آلات ساختمانی نشان داده است که فناوری‌های نوین می‌توانند الگوهای سنتی کسب‌وکار و تصمیم‌گیری در صنایع ساخت را تغییر دهند (Liao, 2022). بنابراین، استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی در پروژه‌های EPC نه تنها یک ابزار محاسباتی، بلکه بخشی از تحول مدیریتی و فناوریانه صنعت ساخت محسوب می‌شود.

در کنار مسائل فنی و محاسباتی، پروژه‌های EPC دارای بعد سازمانی و ذی‌نفعی قوی هستند. طراحی، تأمین و ساخت در این پروژه‌ها توسط بازیگران متعدد انجام می‌شود و هماهنگی میان کارفرما، پیمانکار، مشاور، تأمین‌کنندگان، نهادهای نظارتی و تیم‌های اجرایی نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه دارد. پژوهش‌های مرتبط با مشارکت چندذی‌نفعی در بهینه‌سازی طراحی پروژه‌های EPC نشان داده‌اند که مشارکت مؤثر ذی‌نفعان می‌تواند کیفیت تصمیم‌های طراحی و اجرا را افزایش دهد، اما این مشارکت نیازمند سازوکارهای هماهنگی، اعتماد و

تبادل اطلاعات است (Chen et al., 2023). همچنین، تحلیل شبکه اجتماعی در پروژه‌های EPC راه‌آهن نشان داده است که سازوکارهای همکاری میان طراحی و ساخت، نقش مهمی در کاهش ناهماهنگی و بهبود عملکرد پروژه دارند (Fan et al., 2023). از منظر قراردادی و حقوقی نیز توسعه چارچوب‌های قانونی برای پروژه‌های EPC موفق ضروری است؛ زیرا ابهام در مسئولیت‌ها، تخصیص ریسک، سازوکار حل اختلاف و الزامات انطباق می‌تواند به افزایش هزینه و تأخیر منجر شود (Latilo et al., 2024). در پروژه‌های زیرساختی کمربند و جاده در غرب آسیا نیز تحلیل SWOT نشان داده است که پروژه‌های EPC علاوه بر فرصت‌های اقتصادی و فنی، با تهدیدهای محیطی، مالی و نهادی قابل توجهی مواجه‌اند (Nikjow et al., 2021). این یافته‌ها نشان می‌دهند که چارچوب بهینه‌سازی زمان-هزینه-ریسک باید نسبت به بافت نهادی، قراردادی و ذی‌نفعی پروژه حساس باشد.

پیوند میان مدیریت پروژه EPC و کارآفرینی نیز از منظر نوآوری، خلق ارزش، مدیریت عدم قطعیت و تصمیم‌گیری راهبردی اهمیت دارد. کارآفرینی در اینجا صرفاً به ایجاد کسب‌وکار جدید محدود نیست، بلکه شامل توانایی سازمان پروژه برای شناسایی فرصت‌ها، تخصیص خلاقانه منابع، مدیریت ریسک، نوآوری در فرایندها و خلق ارزش در شرایط عدم قطعیت است. در ادبیات مدیریت عملیات و کارآفرینی، تأکید شده است که مدیریت عملیات می‌تواند نقش مهمی در نظریه و عمل کارآفرینی ایفا کند؛ زیرا تصمیم‌های عملیاتی بر ظرفیت رشد، پایداری و خلق ارزش در کسب‌وکارهای نوآور اثر می‌گذارند (Fine et al., 2022). آموزش پویایی رشد کسب‌وکار از طریق شبیه‌سازی‌های شفاف نیز نشان داده است که شبیه‌سازی می‌تواند ابزار مؤثری برای درک روابط علی، پیامدهای تصمیم و رفتار سیستم‌های پیچیده باشد (Capelo et al., 2021). در حوزه ساخت‌وساز، بازتصور نقش مدیریتی مهندسان عمران به‌عنوان یک کارکرد کارآفرینانه نشان می‌دهد که مدیران پروژه باید فراتر از اجرای فنی، توانایی نوآوری، هماهنگی منابع و تصمیم‌گیری اقتصادی داشته باشند (Entika et al., 2020). از این منظر، چارچوب بهینه‌سازی پیشنهادی برای پروژه‌های EPC می‌تواند نوعی سازوکار کارآفرینانه در مدیریت پروژه تلقی شود؛ زیرا با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، فرصت‌های کاهش زمان، کاهش هزینه و کاهش ریسک را شناسایی و به تصمیم‌های اجرایی تبدیل می‌کند.

مطالعات جدید کارآفرینی نیز بر اهمیت سرمایه اجتماعی، نوآوری، پایداری، تاب‌آوری و تحلیل داده در عملکرد سازمانی تأکید دارند. برای نمونه، نقش کارآفرینی راهبردی، نوآورانه و سرمایه اجتماعی در عملکرد سازمان از طریق مدیریت زنجیره تأمین پایدار نشان می‌دهد که خلق ارزش پایدار نیازمند پیوند میان نوآوری، همکاری و مدیریت منابع است (Haddad et al., 2024). همچنین، مدیریت مالی راهبردی در کارآفرینی یکی از عوامل کلیدی رشد و پایداری کسب‌وکار محسوب می‌شود و می‌تواند در کنترل هزینه و تخصیص منابع نقش بنیادین داشته باشد (Lamanauw & Lalawang, 2024). از سوی دیگر، تحلیل‌های مربوط به کارآفرینی شرکتی، نوآوری باز و تحلیل کسب‌وکار نشان می‌دهند که سازمان‌های امروزی برای تصمیم‌گیری مؤثر باید از داده، ظرفیت تحلیلی و شبکه‌های نوآوری استفاده کنند (Valmohammadi et al., 2024). در همین راستا، رابطه میان هویت اجتماعی کارآفرین و کارآفرینی راهبردی، با میانجی‌گری رهبری پایدار، اهمیت جهت‌گیری راهبردی و رهبری در تصمیم‌های کارآفرینانه را نشان می‌دهد (Liu et al., 2022). مرور نظام‌مند تاب‌آوری و کارآفرینی نیز بیان می‌کند که تاب‌آوری یکی از توانمندی‌های اصلی برای مواجهه با بحران، عدم قطعیت و تغییرات محیطی است (Conduah & Essiaw, 2022). این مفاهیم با پروژه‌های EPC ارتباط مستقیم دارند؛ زیرا مدیر پروژه در محیطی عمل می‌کند که باید میان محدودیت منابع، فشار زمانی، تغییرات محیطی و الزامات عملکردی تعادل ایجاد کند.

بعد پایداری و اقتصاد چرخشی نیز به‌تدریج در مدیریت پروژه‌های صنعتی و کارآفرینی اهمیت بیشتری یافته است. فرصت‌ها و چالش‌های اقتصاد چرخشی در کارآفرینی نشان می‌دهد که کسب‌وکارها و پروژه‌های صنعتی باید به‌جای تمرکز صرف بر کارایی کوتاه‌مدت، به پایداری، استفاده مجدد از منابع، کاهش اتلاف و خلق ارزش بلندمدت توجه کنند (Mardani et al., 2024). کارآفرینی سبز در صنعت

انرژی‌های تجدیدپذیر نیز نشان می‌دهد که محیط بیرونی، سیاست‌ها، منابع و فناوری‌ها می‌توانند جهت‌گیری کارآفرینانه و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های پایدار را شکل دهند (Nourelhouda, 2022). نوآوری‌های مهندسی و کارآفرینی پایدار نیز بر این نکته تأکید دارند که توسعه فناوری، مدیریت منابع و پایداری باید در قالب راهبردهای یکپارچه دیده شوند (Olurina et al., 2023). افزون بر این، مطالعات مربوط به انتقال انرژی و نوآوری‌های نهادی نشان داده‌اند که اجرای فناوری‌های نوین، مانند انرژی خورشیدی همراه با ذخیره‌سازی هیدروژن، وابسته به بافت نهادی، یادگیری سازمانی و ظرفیت انطباق است (Inderberg et al., 2023). در پروژه‌های EPC، این موضوع به معنای آن است که چارچوب بهینه‌سازی نباید صرفاً به معیارهای فنی محدود شود، بلکه باید ظرفیت تصمیم‌گیری در شرایط تغییر فناوری، پایداری و تحول نهادی را نیز داشته باشد.

از منظر توسعه اقتصادی و سیاست صنعتی، پروژه‌های EPC می‌توانند به‌عنوان بستری برای توسعه توان داخلی، اشتغال، فناوری، یادگیری سازمانی و کارآفرینی صنعتی عمل کنند. برنامه‌های توسعه کارآفرینی با تکیه بر منابع محلی نشان می‌دهند که توانمندسازی کارآفرینان و استفاده از ظرفیت‌های بومی می‌تواند به رشد اقتصادی منطقه‌ای کمک کند (Kandukuri & Samunnatha, 2023). در حوزه کسب‌وکارهای کوچک و متوسط دریایی نیز سیاست‌های توسعه اقتصادی برای ایجاد بنگاه‌های پایدار بر اهمیت طراحی سیاست، حمایت نهادی و ظرفیت‌سازی تأکید دارند (Zulu, 2021). در سطح کلان‌تر، بحث سیاست صنعتی جدید و مأموریت‌های بزرگ اقتصادی نشان می‌دهد که دولت‌ها و نهادهای توسعه‌ای برای جهت‌دهی به نوآوری و سرمایه‌گذاری، به ابزارهای تحلیلی و چارچوب‌های تصمیم‌گیری دقیق نیاز دارند (Henrekson et al., 2024). همچنین، در مواجهه با بحران‌هایی مانند همه‌گیری COVID-19، سیاست‌های نوآوری و کارآفرینی می‌توانند به توسعه زیست‌بوم کارآفرینانه پایدار کمک کنند (Shu et al., 2022). این دیدگاه‌ها نشان می‌دهند که توسعه چارچوب‌های هوشمند برای پروژه‌های EPC صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه می‌تواند در سطح سیاست‌گذاری صنعتی، توسعه کارآفرینی و ارتقای ظرفیت نهادی نیز اهمیت داشته باشد.

از سوی دیگر، انتخاب راهبرد قراردادی و سناریوهای اجرایی در پروژه‌های EPC مستلزم توجه هم‌زمان به معیارهای زمان، بودجه، مشخصات فنی، مقررات و بازده است. برنامه‌ریزی سناریویی برای انتخاب راهبرد قراردادی به منظور تحقق اهدافی مانند تحویل به‌موقع، رعایت بودجه، انطباق با مشخصات، رعایت مقررات و دستیابی به بازده نشان داده است که تصمیم‌گیری در پروژه‌های بزرگ باید مبتنی بر تحلیل چندسناریویی باشد (Putro & Rino, 2023). این رویکرد با مسئله اصلی پژوهش حاضر همسو است؛ زیرا در پروژه‌های EPC، بهترین راه‌حل معمولاً یک مقدار منفرد و قطعی نیست، بلکه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو است که هرکدام توازن متفاوتی میان زمان، هزینه و ریسک ایجاد می‌کنند. همچنین، بررسی هزینه‌های مبادله در توسعه مسکن پیش‌ساخته با استفاده از شبکه باور بیزی نشان داده است که تصمیم‌های توسعه‌دهندگان می‌تواند بر هزینه‌های مبادله و کارایی فرآیند توسعه اثر بگذارد (Wu et al., 2024). این یافته‌ها اهمیت مدل‌های احتمالاتی، سناریویی و تصمیم‌یار را برای تحلیل عدم قطعیت و انتخاب راه‌حل‌های بهینه تقویت می‌کنند.

با وجود گسترش پژوهش‌ها در زمینه مدیریت ریسک EPC، کنترل هزینه، تحول دیجیتال، کارآفرینی و الگوریتم‌های هوشمند، هنوز خلأ مهمی در ادبیات وجود دارد. بسیاری از مطالعات، زمان، هزینه یا ریسک را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند و برخی دیگر بیشتر بر ارزیابی ریسک، تحلیل زنجیره تأمین، مشارکت ذی‌نفعان یا تحول دیجیتال متمرکز بوده‌اند. در مقابل، پروژه‌های واقعی EPC نیازمند چارچوبی هستند که بتواند این ابعاد را به‌طور هم‌زمان و در محیطی مبتنی بر عدم قطعیت تحلیل کند. علاوه بر این، پیوند میان منطق کارآفرینی، خلق ارزش، تصمیم‌گیری راهبردی و بهینه‌سازی فراابتکاری در پروژه‌های EPC هنوز به‌صورت کافی توسعه نیافته است. سواد کارآفرینی اجتماعی در محیط‌های آموزشی نشان می‌دهد که توسعه قابلیت‌های کارآفرینانه نیازمند یادگیری، درک مسئله و توان حل مسئله در بسترهای واقعی است.

(Sujatmiko et al., 2024). بنابراین، در محیط پروژه‌های EPC نیز می‌توان کارآفرینی را به‌عنوان ظرفیت نوآورانه سازمان پروژه برای حل مسائل پیچیده زمان-هزینه-ریسک در نظر گرفت.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر توسعه چارچوب بهینه‌سازی کارآفرینی و زمان-هزینه-ریسک در پروژه‌های EPC با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری و تحلیل سناریوهای عدم قطعیت است.

روش پژوهش

پژوهش حاضر با عنوان «شناسایی عوامل موفقیت اکوسیستم‌های کارآفرینی دانشگاه‌پایه با رویکرد فراترکیب» با هدف ارائه چارچوبی یکپارچه از عوامل مؤثر بر موفقیت این اکوسیستم‌ها انجام شده است. تحقیق از نظر هدف، پژوهش کاربردی و از حیث ماهیت، توصیفی-تبیینی است. داده‌ها با رویکرد کیفی و از طریق مرور نظام‌مند و فراترکیب مطالعات پیشین جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. فرآیند فراترکیب بر اساس مدل هفت‌مرحله‌ای سندلوسکی و همکاران (۲۰۰۷) شامل تعریف سؤال پژوهش، جستجوی نظام‌مند، انتخاب مطالعات مرتبط، استخراج یافته‌ها، تحلیل و ترکیب مفاهیم، ارزیابی کیفیت مطالعات و ارائه چارچوب نهایی انجام شده است. در ادامه، جامعه مطالعاتی، معیارهای ورود و خروج مقالات، شیوه جستجو در پایگاه‌های علمی، فرآیند غربالگری، روش استخراج کدها و نحوه ترکیب و تحلیل مفاهیم، در چارچوب مراحل فراترکیب به‌صورت نظام‌مند تشریح می‌شود. همچنین، به‌منظور ارتقای اعتبار و قابلیت اعتماد یافته‌ها، سازوکارهای ارزیابی کیفیت مطالعات و کنترل سوگیری‌های احتمالی تبیین خواهد شد. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل و ترکیب داده‌ها در قالب یک چارچوب مفهومی یکپارچه از عوامل موفقیت اکوسیستم‌های کارآفرینی دانشگاه‌پایه ارائه می‌شود.

یافته‌ها

در این پژوهش، واحد اصلی تحلیل شامل سناریوهای شبیه‌سازی شده زمان، هزینه، منابع و ریسک در یک پروژه EPC بود؛ با این حال، به‌منظور اعتبارسنجی مفهومی چارچوب، تعیین واقع‌گرایانه محدودیت‌ها، و ارزیابی تناسب شاخص‌های ریسک، از نظر گروهی از خبرگان نیز استفاده شد. در مجموع، ۱۸ نفر از متخصصان حوزه مدیریت پروژه‌های صنعتی، مدیریت ریسک، زمان‌بندی پروژه و بهینه‌سازی تصمیم در مرحله اعتبارسنجی مشارکت داشتند. از میان آنان، ۱۲ نفر مرد و ۶ نفر زن بودند. میانگین سنی خبرگان ۴۱.۷۲ سال با انحراف معیار ۶.۸۴ بود و میانگین سابقه حرفه‌ای آنان در پروژه‌های صنعتی و EPC برابر با ۱۴.۳۹ سال با انحراف معیار ۵.۲۱ گزارش شد. از نظر سطح تحصیلات، ۱۱ نفر دارای مدرک کارشناسی ارشد و ۷ نفر دارای مدرک دکتری بودند. از نظر حوزه تخصصی، ۶ نفر در مدیریت پروژه‌های ساخت و اجرا، ۵ نفر در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، ۴ نفر در مدیریت ریسک پروژه و ۳ نفر در مدل‌سازی بهینه‌سازی و تحلیل داده فعالیت داشتند. این ترکیب تخصصی نشان داد که اعتبارسنجی اولیه چارچوب از منظرهای اجرایی، مدیریتی و تحلیلی پوشش داده شده و متغیرهای وارد شده به مدل از تناسب کافی با ماهیت چندبعدی پروژه‌های EPC برخوردار بوده‌اند.

جدول ۱

آماره‌های توصیفی شاخص‌های عملکرد چارچوب پیشنهادی و روش‌های مقایسه‌ای

روش بهینه‌سازی	تحلیل و سناریو	تعداد	مدت کل پروژه، روز، میانگین $\pm$ انحراف معیار	هزینه کل پروژه، میانگین $\pm$ انحراف معیار	هزینه اضافی ناشی از تأخیر، میانگین $\pm$ انحراف معیار	شاخص ریسک کل، میانگین $\pm$ انحراف معیار	درصد کاهش مدت نسبت به روش کلاسیک	درصد کاهش هزینه کل نسبت به روش کلاسیک
روش کلاسیک CPM/PERT	۱۲۵۰	۶۴۲.۳۸ $\pm$ ۵۸.۷۴	۱۱۸۴.۶۲ $\pm$ ۱۲۶.۴۱	۱۸۴.۲۷ $\pm$ ۴۲.۱۵	۰.۶۸۴ $\pm$ ۰.۰۹۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
الگوریتم ژنتیک	۱۲۵۰	۵۱۷.۲۶ $\pm$ ۴۳.۱۹	۱۰۰۸.۴۳ $\pm$ ۹۹.۷۲	۱۲۸.۷۳ $\pm$ ۳۵.۶۲	۰.۵۵۲ $\pm$ ۰.۰۷۶	۱۹.۴۸	۱۶.۸۷	۱۴.۸۷
الگوریتم ازدحام ذرات	۱۲۵۰	۵۰۴.۸۱ $\pm$ ۴۰.۸۶	۹۸۴.۷۶ $\pm$ ۹۲.۳۸	۱۱۶.۵۸ $\pm$ ۳۲.۵۱	۰.۵۲۹ $\pm$ ۰.۰۷۱	۲۱.۴۲	۱۶.۸۷	۱۴.۸۷
الگوریتم ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات	۱۲۵۰	۴۲۱.۵۷ $\pm$ ۳۵.۲۴	۸۳۶.۱۸ $\pm$ ۷۸.۵۵	۷۲.۳۴ $\pm$ ۲۶.۴۸	۰.۴۱۲ $\pm$ ۰.۰۶۴	۳۴.۳۷	۲۹.۴۲	۲۹.۴۲

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، روش کلاسیک CPM/PERT ضعیف‌ترین عملکرد را در هر چهار شاخص اصلی، یعنی مدت کل پروژه، هزینه کل، هزینه اضافی ناشی از تأخیر و شاخص ریسک کل، نشان داد. میانگین مدت کل پروژه در روش کلاسیک برابر با ۶۴۲.۳۸ روز بود، در حالی که این مقدار در الگوریتم ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات به ۴۲۱.۵۷ روز کاهش یافت. این نتیجه نشان‌دهنده کاهش ۳۴.۳۷ درصدی مدت کل پروژه در چارچوب پیشنهادی نسبت به روش کلاسیک است. همچنین، هزینه کل پروژه از ۱۱۸۴.۶۲ در روش کلاسیک به ۸۳۶.۱۸ در الگوریتم ترکیبی کاهش یافت که بیانگر کاهش ۲۹.۴۲ درصدی هزینه کل پروژه است. هزینه اضافی ناشی از تأخیر نیز در روش ترکیبی به ۷۲.۳۴ رسید، در حالی که در روش کلاسیک مقدار آن ۱۸۴.۲۷ بود. از نظر شاخص ریسک کل نیز چارچوب پیشنهادی با میانگین ۰.۴۱۲ کمترین سطح ریسک را نسبت به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و روش کلاسیک نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات موجب بهبود هم‌زمان در سه بعد اصلی تصمیم‌گیری، یعنی زمان، هزینه و ریسک شده و مدل پیشنهادی توانسته است راه‌حل‌های پایدارتر و کارآمدتری را در فضای عدم قطعیت پروژه‌های EPC تولید کند.

جدول ۲

نتایج تحلیل واریانس یک‌راهه برای مقایسه روش‌های بهینه‌سازی در شاخص‌های عملکرد پروژه

متغیر وابسته	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	p	η^2
مدت کل پروژه	بین روش‌ها	۳۱۱۱۸۱۴۱.۱۲۵	۳	۱۰۳۷۲۷۱۳.۷۰۸	۵۰۴۳.۱۵۶	<۰.۰۰۱	۰.۷۵۲
مدت کل پروژه	درون روش‌ها	۱۰۲۷۵۷۲۳.۹۶۴	۴۹۹۶	۲۰۵۶.۷۹۰			
مدت کل پروژه	کل	۴۱۳۹۳۸۶۵.۰۸۹	۴۹۹۹				
هزینه کل پروژه	بین روش‌ها	۷۶۴۶۹۹۱۱.۵۹۴	۳	۲۵۴۸۹۹۷۰.۵۳۱	۲۵۰۹.۶۱۳	<۰.۰۰۱	۰.۶۰۱
هزینه کل پروژه	درون روش‌ها	۵۰۷۴۴۰۳۹.۰۱۶	۴۹۹۶	۱۰۱۵۶.۹۳۳			
هزینه کل پروژه	کل	۱۲۷۲۱۳۹۵۰.۶۱۰	۴۹۹۹				
هزینه اضافی ناشی از تأخیر	بین روش‌ها	۷۹۶۲۳۷۰.۲۵۰	۳	۲۶۵۴۱۲۳.۴۱۷	۲۲۱۰.۱۵۹	<۰.۰۰۱	۰.۵۷۰
هزینه اضافی ناشی از تأخیر	درون روش‌ها	۵۹۹۹۵۶۸.۲۵۳	۴۹۹۶	۱۲۰۰.۸۷۴			
هزینه اضافی ناشی از تأخیر	کل	۱۳۹۶۱۹۳۸.۵۰۳	۴۹۹۹				
شاخص ریسک کل	بین روش‌ها	۴۶.۶۴۱	۳	۱۵.۵۴۷	۲۶۸۱.۲۰۷	<۰.۰۰۱	۰.۶۱۷
شاخص ریسک کل	درون روش‌ها	۲۸.۹۶۹	۴۹۹۶	۰.۰۰۶			
شاخص ریسک کل	کل	۷۵.۶۱۰	۴۹۹۹				

نتایج تحلیل واریانس یک‌راهه در جدول ۲ نشان داد که بین روش‌های مورد بررسی از نظر مدت کل پروژه، هزینه کل پروژه، هزینه اضافی ناشی از تأخیر و شاخص ریسک کل تفاوت معنادار وجود دارد. مقدار F برای مدت کل پروژه برابر با ۵۰۴۳.۱۵۶ و سطح معناداری آن کمتر از ۰.۰۰۱ بود که نشان می‌دهد نوع روش بهینه‌سازی اثر بسیار معناداری بر کاهش یا افزایش مدت کل پروژه داشته است. مقدار اندازه اثر برای مدت کل پروژه برابر با ۰.۷۵۲ به دست آمد که نشان‌دهنده سهم بسیار بالای روش بهینه‌سازی در تبیین تغییرات زمان پروژه است. همچنین، تفاوت روش‌ها از نظر هزینه کل پروژه نیز معنادار بود و مقدار F برابر با ۲۵۰۹.۶۱۳ و η^2 برابر با ۰.۶۰۱ گزارش شد. این مقدار نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد تغییرات هزینه کل پروژه به تفاوت میان روش‌های بهینه‌سازی مربوط بوده است. در مورد هزینه اضافی ناشی از تأخیر نیز تفاوت معنادار میان روش‌ها مشاهده شد و مقدار η^2 برابر با ۰.۵۷۰ بود. افزون بر این، شاخص ریسک کل نیز تحت تأثیر معنادار نوع الگوریتم قرار داشت و مقدار F برابر با ۲۶۸۱.۲۰۷ و اندازه اثر برابر با ۰.۶۱۷ به دست آمد. بنابراین، یافته‌های استنباطی تأیید می‌کنند که عملکرد چارچوب پیشنهادی صرفاً یک تفاوت توصیفی یا تصادفی نبوده، بلکه تفاوت آن نسبت به روش‌های مقایسه‌ای از نظر آماری معنادار و از نظر اندازه اثر نیز قابل توجه بوده است.

جدول ۳

نتایج آزمون تعقیبی بونفرونی برای مقایسه زوجی روش‌ها در شاخص‌های اصلی پروژه

متغیر وابسته	مقایسه روش‌ها	تفاوت میانگین	خطای استاندارد	حد پایین فاصله اطمینان ۹۵ درصد	حد بالا فاصله اطمینان ۹۵ درصد	p
مدت کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ژنتیک	۱۲۵.۱۲	۱.۸۱۴	۱۲۱.۵۶	۱۲۸.۶۸	<۰.۰۰۱
مدت کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۱۳۷.۵۷	۱.۸۱۴	۱۳۴.۰۱	۱۴۱.۱۳	<۰.۰۰۱
مدت کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ترکیبی	۲۲۰.۸۱	۱.۸۱۴	۲۱۷.۲۵	۲۲۴.۳۷	<۰.۰۰۱
مدت کل پروژه	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۱۲.۴۵	۱.۸۱۴	۸.۸۹	۱۶.۰۱	<۰.۰۰۱
مدت کل پروژه	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ترکیبی	۹۵.۶۹	۱.۸۱۴	۹۲.۱۳	۹۹.۲۵	<۰.۰۰۱
مدت کل پروژه	الگوریتم ازدحام ذرات - الگوریتم ترکیبی	۸۳.۲۴	۱.۸۱۴	۷۹.۶۸	۸۶.۸۰	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ژنتیک	۱۷۶.۱۹	۴.۰۳۱	۱۶۸.۲۹	۱۸۴.۰۹	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۱۹۹.۸۶	۴.۰۳۱	۱۹۱.۹۶	۲۰۷.۷۶	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	روش کلاسیک - الگوریتم ترکیبی	۳۴۸.۴۴	۴.۰۳۱	۳۴۰.۵۴	۳۵۶.۳۴	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۲۳.۶۷	۴.۰۳۱	۱۵.۷۷	۳۱.۵۷	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ترکیبی	۱۷۲.۲۵	۴.۰۳۱	۱۶۴.۳۵	۱۸۰.۱۵	<۰.۰۰۱
هزینه کل پروژه	الگوریتم ازدحام ذرات - الگوریتم ترکیبی	۱۴۸.۵۸	۴.۰۳۱	۱۴۰.۶۸	۱۵۶.۴۸	<۰.۰۰۱
شاخص ریسک کل	روش کلاسیک - الگوریتم ژنتیک	۰.۱۳۲	۰.۰۰۳	۰.۱۲۶	۰.۱۳۸	<۰.۰۰۱
شاخص ریسک کل	روش کلاسیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۰.۱۵۵	۰.۰۰۳	۰.۱۴۹	۰.۱۶۱	<۰.۰۰۱

شاخص ریسک	روش کلاسیک - الگوریتم ترکیبی	۰.۲۷۲	۰.۰۰۳	۰.۲۶۶	۰.۲۷۸	<۰.۰۰۱
کل						
شاخص ریسک	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ازدحام ذرات	۰.۰۲۳	۰.۰۰۳	۰.۰۱۷	۰.۰۲۹	<۰.۰۰۱
کل						
شاخص ریسک	الگوریتم ژنتیک - الگوریتم ترکیبی	۰.۱۴۰	۰.۰۰۳	۰.۱۳۴	۰.۱۴۶	<۰.۰۰۱
کل						
شاخص ریسک	الگوریتم ازدحام ذرات - الگوریتم ترکیبی	۰.۱۱۷	۰.۰۰۳	۰.۱۱۱	۰.۱۲۳	<۰.۰۰۱
کل						

نتایج آزمون تعقیبی بونفرونی در جدول ۳ نشان داد که تفاوت میان همه زوج‌های مقایسه‌شده در شاخص‌های مدت کل پروژه، هزینه کل پروژه و شاخص ریسک کل از نظر آماری معنادار است. بیشترین تفاوت میانگین در مدت کل پروژه مربوط به مقایسه روش کلاسیک با الگوریتم ترکیبی بود؛ به‌گونه‌ای که چارچوب ترکیبی به‌طور متوسط ۲۲۰.۸۱ روز کمتر از روش کلاسیک زمان نیاز داشت. این اختلاف نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی نه‌تنها از روش کلاسیک، بلکه از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات به‌صورت مستقل نیز عملکرد بهتری داشته است. در شاخص هزینه کل پروژه نیز بیشترین تفاوت میانگین میان روش کلاسیک و الگوریتم ترکیبی مشاهده شد و مقدار آن ۳۴۸.۴۴ بود. این یافته بیانگر آن است که ترکیب قابلیت جست‌وجوی سراسری الگوریتم ژنتیک با سرعت همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات توانسته است از گرفتار شدن مدل در راه‌حل‌های محلی جلوگیری کند و راه‌حلی با هزینه کمتر تولید نماید. در شاخص ریسک کل نیز تفاوت میان روش کلاسیک و الگوریتم ترکیبی برابر با ۰.۲۷۲ گزارش شد که بالاترین اختلاف میانگین در میان مقایسه‌های زوجی بود. از آنجا که در همه مقایسه‌ها مقدار p کمتر از ۰.۰۰۱ بود، می‌توان نتیجه گرفت که برتری الگوریتم ترکیبی نسبت به سایر روش‌ها در هر سه شاخص اصلی پایدار، معنادار و قابل اتکا است.

جدول ۴

تحلیل عملکرد چارچوب پیشنهادی در سطوح مختلف عدم قطعیت سناریویی

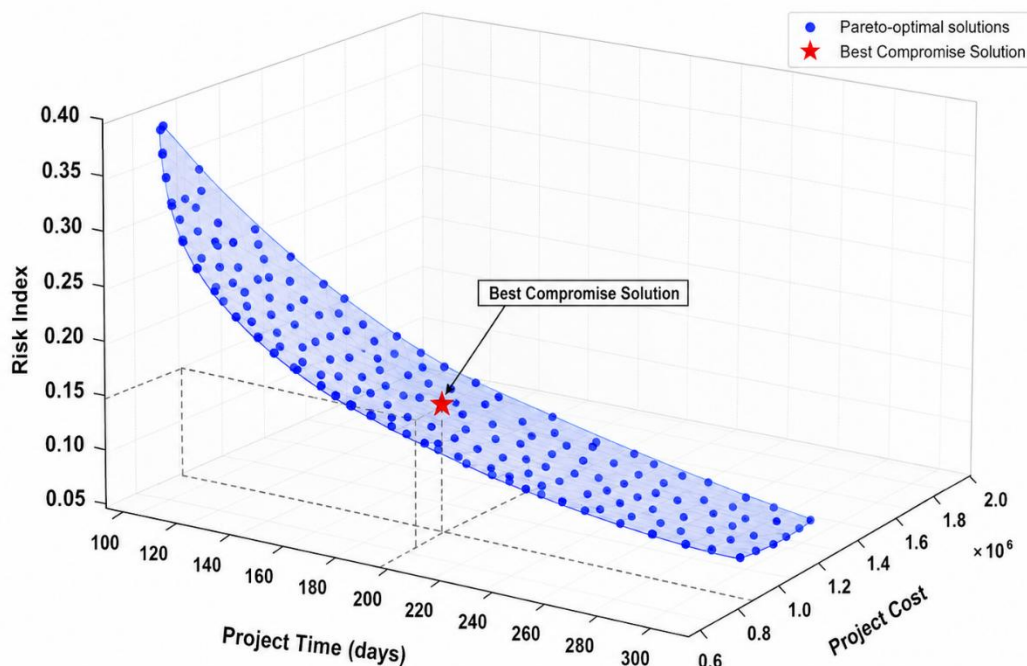
سطح عدم قطعیت	تعداد سناریو	مدت پروژه در روش کلاسیک	مدت پروژه در الگوریتم ترکیبی	درصد بهبود مدت	هزینه کل در روش کلاسیک	هزینه کل در الگوریتم ترکیبی	درصد بهبود هزینه	شاخص ریسک در روش کلاسیک	شاخص ریسک در الگوریتم ترکیبی	درصد بهبود شاخص ریسک
عدم قطعیت پایین	۱۶۶۷	۵۹۸.۴۱	۴۰۲.۱۸	۳۲.۷۹	۱۰۹۶.۲۵	۸۰۴.۶۳	۲۶.۶۰	۰.۶۰۴	۰.۳۵۱	۴۱.۸۹
عدم قطعیت متوسط	۱۶۶۷	۶۴۱.۹۲	۴۲۱.۷۷	۳۴.۳۰	۱۱۸۱.۷۶	۸۳۸.۴۲	۲۹.۰۵	۰.۶۸۱	۰.۴۱۲	۳۹.۵۰
عدم قطعیت بالا	۱۶۶۶	۶۸۶.۸۱	۴۴۵.۳۶	۳۵.۱۶	۱۲۷۵.۸۸	۸۶۷.۵۶	۳۲.۰۰	۰.۷۶۸	۰.۴۷۳	۳۸.۴۱

مطابق نتایج جدول ۴، چارچوب پیشنهادی در هر سه سطح عدم قطعیت پایین، متوسط و بالا توانست نسبت به روش کلاسیک عملکرد بهتری نشان دهد. در سطح عدم قطعیت پایین، مدت پروژه در روش کلاسیک برابر با ۵۹۸.۴۱ روز بود، در حالی که این مقدار در

الگوریتم ترکیبی به ۴۰۲.۱۸ روز کاهش یافت و بهبود ۳۲.۷۹ درصدی را نشان داد. در سطح عدم قطعیت متوسط نیز الگوریتم ترکیبی توانست مدت پروژه را از ۶۴۱.۹۲ روز به ۴۲۱.۷۷ روز کاهش دهد. مهم‌تر آنکه در سطح عدم قطعیت بالا، با وجود افزایش نوسان در مدت فعالیت‌ها، منابع و هزینه‌های تأخیر، چارچوب پیشنهادی همچنان عملکرد پایدار خود را حفظ کرد و مدت پروژه را از ۶۸۶.۸۱ روز در روش کلاسیک به ۴۴۵.۳۶ روز کاهش داد. این الگو در شاخص هزینه کل و ریسک نیز مشاهده شد. درصد بهبود هزینه در سطح عدم قطعیت بالا برابر با ۳۲.۰۰ بود که نشان می‌دهد مدل ترکیبی در شرایط پیچیده‌تر و نامطمئن‌تر نیز توانایی کنترل هزینه‌های پروژه را دارد. همچنین، شاخص ریسک در سطح عدم قطعیت بالا از ۰.۷۶۸ در روش کلاسیک به ۰.۴۷۳ در الگوریتم ترکیبی کاهش یافت. این یافته نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی تنها در شرایط پایدار و قابل پیش‌بینی کارآمد نیست، بلکه در سناریوهای پرنوسان و دارای عدم قطعیت شدید نیز می‌تواند راه‌حل‌های مقاوم، کم‌ریسک و اقتصادی‌تری را برای مدیران پروژه‌های EPC فراهم کند.

شکل ۱

جبهه پارتوی راه‌حل‌های بهینه زمان-هزینه-ریسک در الگوریتم ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات



شکل ۱ نشان‌دهنده توزیع راه‌حل‌های پارتوی حاصل از اجرای الگوریتم ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات در فضای سه‌بعدی زمان، هزینه و ریسک است. الگوی کلی شکل بیانگر آن است که راه‌حل‌های تولیدشده توسط الگوریتم ترکیبی در ناحیه‌ای متمرکز شده‌اند که در آن کاهش زمان پروژه با افزایش شدید هزینه یا ریسک همراه نیست. این موضوع اهمیت زیادی در پروژه‌های EPC دارد؛ زیرا در بسیاری از روش‌های کلاسیک، کاهش زمان معمولاً با افزایش شدید هزینه‌های مستقیم، اضافه‌کاری، فشردگی منابع و ریسک اجرایی همراه می‌شود. با این حال، جبهه پارتوی حاصل از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که چارچوب ترکیبی توانسته است مجموعه‌ای از راه‌حل‌های متوازن را تولید کند که در آن مدیر پروژه می‌تواند بر اساس اولویت سازمان، محدودیت منابع و سطح ریسک قابل پذیرش، بهترین سناریوی اجرایی را انتخاب کند. تمرکز راه‌حل‌ها در ناحیه کم‌زمان، کم‌هزینه و کم‌ریسک نشان‌دهنده همگرایی مطلوب الگوریتم و توانایی آن در شناسایی نقاط تصمیم‌گیری کارآمد

است. بنابراین، شکل ۱ تأیید می‌کند که مدل پیشنهادی صرفاً یک روش کاهش زمان یا کاهش هزینه نیست، بلکه یک چارچوب تصمیم‌یار چندهدفه برای ایجاد تعادل میان اهداف متعارض مدیریت پروژه‌های EPC محسوب می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر، توسعه و ارزیابی چارچوب بهینه‌سازی کارآفرینی و زمان-هزینه-ریسک در پروژه‌های EPC با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که چارچوب ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات نسبت به روش کلاسیک CPM/PERT و همچنین نسبت به اجرای مستقل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات، عملکرد مطلوب‌تری در کاهش هم‌زمان مدت پروژه، هزینه کل و شاخص ریسک داشته است. بر اساس یافته‌های توصیفی، میانگین مدت کل پروژه در روش کلاسیک ۶۴۲.۳۸ روز بود، در حالی که این مقدار در الگوریتم ترکیبی به ۴۲۱.۵۷ روز کاهش یافت و کاهش ۳۴.۳۷ درصدی را نشان داد. همچنین، هزینه کل پروژه از ۱۱۸۴.۶۲ در روش کلاسیک به ۸۳۶.۱۸ در الگوریتم ترکیبی رسید و کاهش ۲۹.۴۲ درصدی هزینه کل را نشان داد. هزینه اضافی ناشی از تأخیر نیز از ۱۸۴.۲۷ به ۷۲.۳۴ کاهش یافت و شاخص ریسک کل از ۰.۶۸۴ به ۰.۴۱۲ در روش کلاسیک به ۰.۴۱۲ در الگوریتم ترکیبی رسید. نتایج تحلیل واریانس نیز نشان داد که تفاوت میان روش‌ها در مدت پروژه، هزینه کل، هزینه تأخیر و شاخص ریسک از نظر آماری معنادار است؛ به‌گونه‌ای که برای مدت کل پروژه مقدار F برابر با ۵۰۴۳.۱۵۶ و اندازه اثر برابر با ۰.۷۵۲ گزارش شد. این مقدار نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از تغییرات زمان پروژه تحت تأثیر نوع روش بهینه‌سازی قرار داشته است. همچنین، نتایج آزمون بونفرونی نشان داد که الگوریتم ترکیبی در همه مقایسه‌های زوجی نسبت به روش‌های دیگر برتری معنادار داشته و بیشترین تفاوت میانگین در مقایسه با روش کلاسیک مشاهده شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی توانسته است از طریق ترکیب قابلیت جست‌وجوی سراسری الگوریتم ژنتیک و سرعت همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات، راه‌حل‌های کارآمدتری برای مدیریت هم‌زمان زمان، هزینه و ریسک در پروژه‌های EPC تولید کند.

یافته اصلی پژوهش، یعنی برتری چارچوب ترکیبی در کاهش زمان پروژه، با ادبیات موجود درباره ضرورت کنترل هدف در پروژه‌های بزرگ EPC همسو است. پروژه‌های EPC به‌ویژه در مقیاس بین‌المللی، معمولاً با محدودیت‌های چندگانه، تغییرات محیطی، تأخیرهای تأمین، پیچیدگی قراردادی و وابستگی شدید میان فعالیت‌ها مواجه‌اند و کنترل زمان در چنین پروژه‌هایی نیازمند ابزارهایی فراتر از روش‌های قطعی و ایستای زمان‌بندی است (Song & Lu, 2025). نتایج حاضر نشان می‌دهد که وقتی برنامه‌ریزی پروژه از حالت خطی و قطعی خارج شده و به‌صورت یک مسئله چندهدفه و سناریومحور تحلیل می‌شود، امکان شناسایی مسیرهای اجرایی کوتاه‌تر و در عین حال قابل‌قبول‌تر فراهم می‌گردد. این یافته با پژوهش‌هایی هم‌راستا است که بر نقش تحول دیجیتال، مدیریت ساخت هوشمند و فناوری‌های تصمیم‌یار در ارتقای قابلیت پیش‌بینی و کنترل پروژه تأکید کرده‌اند (Piyush et al., 2023; You, 2022). به بیان دیگر، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با تحلیل هم‌زمان سناریوهای متعدد، به جای اتکا بر یک برنامه زمان‌بندی منفرد، مجموعه‌ای از گزینه‌های اجرایی را ارزیابی کرده و از میان آن‌ها راه‌حلی را انتخاب می‌کند که در شرایط عدم قطعیت نیز پایداری بیشتری دارند. این منطق با رویکرد برنامه‌ریزی سناریویی در انتخاب راهبرد قراردادی برای دستیابی به اهداف تحویل به‌موقع، رعایت بودجه، انطباق با مشخصات، مقررات و بازده سازگار است (Putro & Rino, 2023).

کاهش معنادار هزینه کل و هزینه‌های اضافی ناشی از تأخیر نیز یکی دیگر از یافته‌های مهم پژوهش بود. در پروژه‌های EPC، هزینه‌ها تنها تابع مقدار منابع مصرف‌شده نیستند، بلکه تأخیر، دوباره‌کاری، اختلالات تأمین، تغییرات طراحی، ضعف هماهنگی و ریسک‌های قراردادی می‌توانند هزینه کل پروژه را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. بنابراین، کاهش هزینه در این نوع پروژه‌ها مستلزم نگاه یکپارچه به زمان، منابع

و ریسک است. یافته حاضر با مطالعاتی همسو است که نشان داده‌اند کنترل هزینه در پروژه‌های EPC، به‌ویژه در ساخت‌وساز پیش‌ساخته، نیازمند مدل‌های تحلیلی دقیق و توجه به روابط میان طراحی، تأمین و اجرا است (Weihaio, 2024; Wu et al., 2024). همچنین، ادبیات مدیریت ارزش نشان می‌دهد که رویکردهای سنتی مدیریت هزینه کل باید به سمت مدیریت ارزش نظام‌مند حرکت کنند؛ زیرا تصمیم‌های هزینه‌ای در پروژه‌های پیچیده باید هم‌زمان با ارزش، پایداری، ریسک و عملکرد بلندمدت تحلیل شوند (Margherita et al., 2022). در پژوهش حاضر، الگوریتم ترکیبی توانست از طریق یافتن توازن میان فشرده‌سازی زمان، تخصیص منابع و کاهش ریسک، هزینه‌های اضافی ناشی از تأخیر را به‌طور چشمگیر کاهش دهد. این نتیجه با دیدگاه‌های مدیریت مالی راهبردی در کارآفرینی نیز همخوان است؛ زیرا مدیریت مالی مؤثر در محیط‌های نامطمئن مستلزم تصمیم‌گیری تحلیلی، تخصیص هوشمند منابع و کنترل پیامدهای مالی تصمیم‌ها است (Lamanauw & Lalowang, 2024).

از منظر مدیریت ریسک، کاهش شاخص ریسک کل در مدل پیشنهادی اهمیت ویژه‌ای دارد. نتایج نشان داد که شاخص ریسک کل در الگوریتم ترکیبی به ۰.۴۱۲ کاهش یافت، در حالی که این شاخص در روش کلاسیک ۰.۶۸۴ بود. این تفاوت نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی توانسته است علاوه بر کاهش زمان و هزینه، ریسک کلی پروژه را نیز کنترل کند. این یافته با پژوهش‌هایی همسو است که نشان داده‌اند ریسک در پروژه‌های EPC ماهیتی چندبعدی، تعاملی و شبکه‌ای دارد و نمی‌توان آن را صرفاً از طریق روش‌های خطی و منفرد تحلیل کرد (Cao & Lei, 2023; Xia et al., 2022). در پروژه‌های EPC برق‌آبی نیز استفاده از مدل‌های فازی و استدلال شواهد نشان داده است که تحلیل ریسک باید ابهام و عدم قطعیت داده‌ها را به‌صورت صریح در نظر گیرد (Li et al., 2023). همچنین، مطالعات مربوط به ریسک‌های لجستیکی در پروژه‌های EPC برون‌مرزی نشان می‌دهد که عدم قطعیت‌های تأمین، حمل‌ونقل، مقررات و موقعیت جغرافیایی می‌توانند عملکرد کل پروژه را تحت تأثیر قرار دهند (He & Han, 2022). از این منظر، برتری الگوریتم ترکیبی در پژوهش حاضر را می‌توان ناشی از توانایی آن در جست‌وجوی راه‌حلی دانست که تنها از نظر زمان یا هزینه مطلوب نیستند، بلکه در برابر سناریوهای ریسکی نیز مقاومت بیشتری دارند.

یافته‌های مربوط به عملکرد مدل در سطوح مختلف عدم قطعیت نیز نشان داد که چارچوب پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت پایین، متوسط و بالا همچنان برتری خود را حفظ کرده است. در سطح عدم قطعیت بالا، الگوریتم ترکیبی مدت پروژه را از ۶۸۶.۸۱ روز در روش کلاسیک به ۴۴۵.۳۶ روز کاهش داد و هزینه کل را نیز از ۱۲۷۵.۸۸ به ۸۶۷.۵۶ رساند. همچنین، شاخص ریسک از ۰.۷۶۸ به ۰.۴۷۳ کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی فقط در شرایط پایدار و قابل پیش‌بینی کارآمد نیست، بلکه در محیط‌های پرتلاطم نیز قابلیت تصمیم‌سازی دارد. این یافته با مطالعات تاب‌آوری و کارآفرینی همسو است که تاب‌آوری را یکی از ظرفیت‌های اصلی برای مواجهه با بحران، تغییر و عدم قطعیت معرفی می‌کنند (Conduah & Essiaw, 2022). در همین راستا، ادبیات کارآفرینی راهبردی و رهبری پایدار نیز نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری موفق در شرایط پیچیده نیازمند ترکیب نگرش راهبردی، نوآوری و توان انطباق است (Liu et al., 2022). از منظر سیاست‌های نوآوری و زیست‌بوم کارآفرینی نیز توسعه سازوکارهای پایدار در شرایط بحران مستلزم استفاده از ابزارهای تحلیلی، ظرفیت نهادی و یادگیری مستمر است (Shu et al., 2022). بنابراین، مدل پیشنهادی را می‌توان نه صرفاً یک ابزار بهینه‌سازی فنی، بلکه نوعی ظرفیت سازمانی برای افزایش تاب‌آوری پروژه‌های EPC در برابر عدم قطعیت دانست.

نتایج پژوهش حاضر همچنین از منظر هماهنگی ذی‌نفعان و یکپارچگی طراحی-ساخت قابل تبیین است. در پروژه‌های EPC، بهینه‌سازی زمان، هزینه و ریسک بدون هماهنگی میان ذی‌نفعان اصلی امکان‌پذیر نیست. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مشارکت چندذی‌نفعی در بهینه‌سازی طراحی پروژه‌های EPC می‌تواند کیفیت تصمیم‌ها را افزایش دهد و از تعارضات اجرایی بکاهد (Chen et al., 2024).

2023). همچنین، تحلیل شبکه اجتماعی در پروژه‌های EPC راه‌آهن نشان داده است که سازوکارهای همکاری میان طراحی و ساخت در کاهش ناهماهنگی و بهبود عملکرد پروژه نقش تعیین‌کننده دارد (Fan et al., 2023). یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که چارچوب ترکیبی با ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو، امکان گفت‌وگوی تصمیم‌محور میان ذی‌نفعان را فراهم می‌کند؛ زیرا مدیران پروژه می‌توانند بر اساس اولویت‌های کارفرما، پیمانکار، تیم طراحی، تیم اجرا و واحد مالی، سناریویی را انتخاب کنند که تعادل مطلوب‌تری میان زمان، هزینه و ریسک داشته باشد. این موضوع با مطالعات مربوط به زنجیره تأمین EPC نیز همسو است؛ زیرا هماهنگی زنجیره تأمین و جریان اطلاعات در پروژه‌های EPC از پیش شرط‌های اصلی کنترل عملکرد پروژه محسوب می‌شود (Huang et al., 2024). همچنین، توسعه چارچوب‌های قانونی و قراردادی مناسب می‌تواند بستر لازم را برای اجرای چنین تصمیم‌هایی فراهم کند و از ابهام در مسئولیت‌ها و تخصیص ریسک بکاهد (Latilo et al., 2024).

از منظر کارآفرینی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآفرینانه در مدیریت پروژه تلقی شود. کارآفرینی در پروژه‌های EPC به معنای خلق کسب‌وکار جدید نیست، بلکه به معنای شناسایی فرصت‌های بهبود، استفاده خلاقانه از منابع، کاهش اتلاف، مدیریت ریسک و خلق ارزش در شرایط محدودیت است. این تفسیر با دیدگاه‌هایی همسو است که نقش مدیریت عملیات را در نظریه و عمل کارآفرینی برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که تصمیم‌های عملیاتی می‌توانند بر رشد، پایداری و عملکرد کارآفرینانه اثرگذار باشند (Fine et al., 2022). همچنین، شبیه‌سازی‌های شفاف در آموزش رشد کسب‌وکار نشان داده‌اند که مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌توانند فهم روابط علی و پیامدهای تصمیم را بهبود بخشند (Capelo et al., 2021). در حوزه مهندسی عمران نیز بازتعریف نقش مدیریتی مهندس به‌عنوان یک کارکرد کارآفرینانه نشان می‌دهد که مدیران پروژه باید علاوه بر توانایی فنی، قابلیت تصمیم‌گیری اقتصادی، نوآوری و هماهنگی منابع را داشته باشند (Entika et al., 2020). بنابراین، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی می‌تواند با تبدیل داده‌های پروژه به گزینه‌های تصمیم‌پذیر، نقش مهمی در تقویت کارآفرینی فناورانه و مدیریتی در پروژه‌های EPC داشته باشد.

همچنین، نتایج پژوهش با ادبیات نوآوری، پایداری و اقتصاد چرخشی ارتباط دارد. کاهش زمان و هزینه در صورتی ارزشمند است که به افزایش ریسک، اتلاف منابع یا کاهش کیفیت منجر نشود. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که چارچوب ترکیبی توانست کاهش زمان و هزینه را همراه با کاهش ریسک محقق کند؛ بنابراین، منطق آن با رویکردهای پایداری و خلق ارزش بلندمدت سازگار است. مطالعات اقتصاد چرخشی در کارآفرینی نشان می‌دهند که فرصت‌های جدید کسب‌وکار و پروژه باید بر پایه کاهش اتلاف، بهینه‌سازی منابع و ارزش‌آفرینی پایدار تحلیل شوند (Mardani et al., 2024). همچنین، پژوهش‌های کارآفرینی سبز و نوآوری‌های مهندسی پایدار نشان داده‌اند که فناوری و مدیریت منابع می‌توانند به بهبود عملکرد پایدار پروژه‌ها و کسب‌وکارها کمک کنند (Nourelhouda, 2022; Olurina et al., 2023). از سوی دیگر، تجربه نوآوری‌های نهادی در گذار انرژی نشان می‌دهد که فناوری‌های جدید زمانی اثرگذار خواهند بود که در بستر سازمانی و نهادی مناسب اجرا شوند (Inderberg et al., 2023). بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌ویژه در پروژه‌های EPC مرتبط با انرژی، زیرساخت و صنایع راهبردی، به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری پایدار و ارزش‌محور مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی و تحلیل سناریوها با روندهای جدید تحلیل کسب‌وکار، نوآوری باز و سیاست صنعتی نیز همخوان است. پژوهش‌های مربوط به تحلیل کسب‌وکار، کارآفرینی شرکتی و نوآوری باز نشان می‌دهند که سازمان‌های موفق، داده و تحلیل را به بخشی از فرایند تصمیم‌گیری راهبردی تبدیل می‌کنند (Valmohammadi et al., 2024). همچنین، مطالعات مربوط به مسیرهای هوشمند کارآفرینی نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های یادگیری و بهینه‌سازی می‌تواند در طراحی مسیرهای تصمیم‌گیری پیچیده مفید باشد (Niu, 2025). از سوی دیگر، تحلیل سیاست صنعتی جدید و مأموریت‌های بزرگ اقتصادی نشان می‌دهد که اجرای پروژه‌های پیچیده نیازمند

چارچوب‌های تصمیم‌گیری دقیق، ارزیابی پیامدها و توجه به ظرفیت نهادی است (Henrekson et al., 2024). در پروژه‌های زیرساختی منطقه‌ای و بین‌المللی نیز تحلیل EPC در بافت طرح کمربند و جاده نشان داده است که فرصت‌های توسعه‌ای پروژه‌های EPC همواره با تهدیدهای مالی، نهادی و ریسکی همراهاند (Nikjow et al., 2021). بر این اساس، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی می‌تواند به مدیران پروژه کمک کند تا به‌جای تصمیم‌گیری بر اساس تجربه یا برآوردهای قطعی، بر پایه تحلیل سناریوها، جبهه پارتو و مقایسه کمی گزینه‌ها تصمیم‌گیری کنند. این امر با مطالعات توسعه کارآفرینی مبتنی بر منابع محلی و سیاست‌های توسعه بنگاه‌های پایدار نیز قابل پیوند است، زیرا هر دو بر ضرورت استفاده اثربخش از منابع، طراحی سیاست و تصمیم‌گیری راهبردی تأکید دارند (Kandukuri & Samunnatha, 2023; Zulu, 2021). همچنین، مطالعات مرتبط با خوداشتغالی و فناوری بلاکچین در صنعت ماشین‌آلات ساختمانی نشان می‌دهند که فناوری‌های نوین می‌توانند الگوهای سنتی فعالیت در صنعت ساخت را تغییر دهند (Liao, 2022). بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند بخشی از حرکت گسترده‌تر صنعت ساخت و پروژه‌های EPC به سمت تصمیم‌گیری هوشمند، کارآفرینی فناورانه و مدیریت ارزش‌محور باشد.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر آن است که چارچوب پیشنهادی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده و سناریوهای مدل‌سازی شده توسعه یافته و اگرچه تلاش شد پارامترها، محدودیت‌ها و دامنه تغییرات بر اساس منطق واقعی پروژه‌های EPC تعریف شوند، اما اجرای مدل در پروژه‌های واقعی ممکن است با متغیرهای پیش‌بینی‌نشده بیشتری مواجه شود. همچنین، همه ابعاد انسانی، سیاسی، فرهنگی و سازمانی پروژه‌های EPC در مدل کمی حاضر قابل بازنمایی کامل نبودند. محدودیت دیگر آن است که عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس مجموعه‌ای مشخص از پارامترهای تنظیم‌شده بررسی شد و تغییر در پارامترهای الگوریتمی، اندازه پروژه، نوع فعالیت‌ها، شدت محدودیت منابع و ساختار قراردادی می‌تواند بر نتایج نهایی اثر بگذارد. افزون بر این، در این مطالعه تمرکز اصلی بر سه شاخص زمان، هزینه و ریسک بود و شاخص‌هایی مانند کیفیت، ایمنی، پایداری زیست‌محیطی، رضایت ذی‌نفعان و پیامدهای حقوقی به‌صورت مستقیم در تابع هدف وارد نشدند.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، چارچوب پیشنهادی با داده‌های واقعی پروژه‌های EPC در صنایع مختلف مانند نفت و گاز، پتروشیمی، نیروگاه، حمل‌ونقل ریلی، ساختمان‌های صنعتی و پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر آزمون شود تا قابلیت تعمیم آن با دقت بیشتری ارزیابی گردد. همچنین، می‌توان نسخه‌های توسعه‌یافته‌تری از مدل را طراحی کرد که علاوه بر زمان، هزینه و ریسک، شاخص‌های کیفیت، ایمنی، پایداری، انتشار کربن، بهره‌وری منابع و رضایت ذی‌نفعان را نیز در تابع هدف لحاظ کند. مقایسه الگوریتم ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات با سایر روش‌های فراابتکاری، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه و مدل‌های فازی نیز می‌تواند به شناسایی کارآمدترین ساختار محاسباتی برای پروژه‌های EPC کمک کند. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده اثر داده‌های زنده پروژه، داشبوردهای مدیریتی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و سامانه‌های تصمیم‌یار بلادرنگ را در بهبود عملکرد چارچوب بررسی کنند.

از نظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیران پروژه، پیمانکاران EPC، مشاوران برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، واحدهای مدیریت ریسک و کارفرمایان پروژه‌های صنعتی مفید باشد. پیشنهاد می‌شود سازمان‌های مجری پروژه‌های EPC از چارچوب‌های تصمیم‌یار چندهدفه برای انتخاب سناریوهای اجرایی استفاده کنند و برنامه‌ریزی پروژه را صرفاً بر اساس روش‌های قطعی و خطی انجام ندهند. همچنین، لازم است داده‌های زمان، هزینه، منابع و ریسک از مراحل اولیه پروژه به‌صورت منظم ثبت، به‌روزرسانی و تحلیل شوند تا مدل‌های بهینه‌سازی بتوانند خروجی‌های دقیق‌تری ارائه دهند. استفاده از جبهه پارتو در جلسات تصمیم‌گیری می‌تواند به مدیران کمک کند تا پیامدهای هر انتخاب را به‌صورت شفاف مشاهده کنند و میان کاهش زمان، کنترل هزینه و سطح ریسک قابل پذیرش تعادل برقرار سازند. افزون بر این، پیشنهاد

می‌شود سازمان‌های پروژه‌محور، آموزش مدیران و کارشناسان خود را در زمینه تحلیل داده، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مدیریت سناریو و تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت تقویت کنند تا ظرفیت عملی استفاده از چنین چارچوب‌هایی در پروژه‌های واقعی افزایش یابد.

تقدیر و تشکر

از تمامی کسانی که در انجام این مطالعه همراهی نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازن اخلاقی

در پژوهش حاضر تمامی موازن اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Cao, P., & Lei, X. (2023). Evaluating Risk in Prefabricated Building Construction Under EPC Contracting Using Structural Equation Modeling: A Case Study of Shaanxi Province, China. *Buildings*, 13(6), 1465. <https://doi.org/10.3390/buildings13061465>
- Capelo, C., Pereira, R., & Dias, J. F. (2021). Teaching the Dynamics of the Growth of a Business Venture Through Transparent Simulations. *The International Journal of Management Education*, 19(3), 100549. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2021.100549>
- Chen, Y., Ren, Z., Hu, B., & Zheng, H. (2023). Investigation of the Critical Factors Influencing Multi-Stakeholders' Participation in Design Optimization of EPC Projects. *Buildings*, 13(7), 1654. <https://doi.org/10.3390/buildings13071654>
- Conduah, A. K., & Essiaw, M. N. (2022). Resilience and Entrepreneurship: A Systematic Review. *F1000research*, 11, 348. <https://doi.org/10.12688/f1000research.75473.1>
- Entika, C. L., Mohammad, S., Jabor, M. K., & Osman, S. (2020). Reimagining Civil Engineer's Managerial Role as an Entrepreneurial Function in the Production System of a Construction Project. *Civil Engineering and Architecture*, 8(4), 417-425. <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080403>
- Fan, Z., Liu, Y., & Li, Y. (2023). Research on Collaborative Mechanisms of Railway EPC Project Design and Construction From the Perspective of Social Network Analysis. *Systems*, 11(9), 443. <https://doi.org/10.3390/systems11090443>
- Faraji, A. (2021). Neuro-Fuzzy System Based Model for Prediction of Project Performance in Downstream Sector of Petroleum Industry in Iran. *Journal of Engineering Design and Technology*, 19(6), 1268-1290. <https://doi.org/10.1108/jedt-06-2020-0241>

- Fine, C. H., Padurean, L., & Naumov, S. (2022). Operations for Entrepreneurs: Can Operations Management Make a Difference in Entrepreneurial Theory and Practice? *Production and Operations Management*, 31(12), 4599-4615. <https://doi.org/10.1111/poms.13851>
- Haddad, E., Al-Dwairi, R. M., Al-Freijat, S. Y., & Mansour, A. (2024). The Impact of Strategic and Innovativeness Entrepreneurship and Social Capital on Business Overall Performance Through Building a Sustainable Supply Chain Management at Jordan Private Universities. *Uncertain Supply Chain Management*, 12(1), 65-76. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2023.10.017>
- He, J., & Han, D. (2022). Evaluation of Key Factors of Logistics Risks for Overseas EPC Projects. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/4447399>
- Henrekson, M., Sandström, C., & Stenkula, M. (2024). Moonshots and the New Industrial Policy: Questioning the Mission Economy. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4687261>
- Huang, J., Fu, X., Chen, X., & Wen, X. (2024). Supply Chain Management for the Engineering Procurement and Construction (EPC) Model: A Review and Bibliometric Analysis. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1693.v1>
- Inderberg, T. H. J., Leikanger, I., & Westskog, H. (2023). Institutional Context, Innovations, and Energy Transitions: Exploring Solar Photovoltaics With Hydrogen Storage at a Secondary School in Norway. *Energy Research & Social Science*, 101, 103147. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103147>
- Kandukuri, V., & Samunnatha, V. (2023). Role of EDPs in Harnessing Local Resources—with Special Reference to Hyderabad and Rangareddy Districts. *Journal of Entrepreneurship and Innovation in Emerging Economies*, 9(2), 288-311. <https://doi.org/10.1177/23939575221145767>
- Lamanauw, B., & Lalowang, I. R. A. (2024). Exploring Strategic Financial Management Techniques in Entrepreneurship: A Detailed Literature Review on Practices That Drive Business Sustainability and Growth. *Atestasi Jurnal Ilmiah Akuntansi*, 7(2), 1111-1132. <https://doi.org/10.57178/atestasi.v7i2.900>
- Latilo, A., Uzougbo, N. S., Ugwu, M. C., Oduro, P., & Aziza, O. R. (2024). Developing Legal Frameworks for Successful Engineering, Procurement, and Construction Projects. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(8), 1868-1883. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i8.1430>
- Li, Q., Guo, Y., Wang, B., Chen, Y., Xie, J., & Wen, C. (2023). Research on Risk Evaluation of Hydropower Engineering EPC Project Based on Improved Fuzzy Evidence Reasoning Model. *Systems*, 11(7), 327. <https://doi.org/10.3390/systems11070327>
- Liao, J. C. (2022). Self-Employment in the Construction Machinery Industry With Blockchain Technology in Mind. *Kinetic Mechanical Engineering*, 3(4). <https://doi.org/10.38007/kme.2022.030403>
- Liu, G., Yin, Q., & Zhang, L. (2022). Relations Between Entrepreneur's Social Identity and Strategic Entrepreneurship: Sustainable Leadership as Mediator. *Frontiers in psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.903927>
- Mardani, A., Song, M., Jabbour, C. J. C., & Saen, R. F. (2024). Guest Editorial: Navigating the Role of Circular Economy in Entrepreneurship: Opportunities and Challenges – Part One. *Management Decision*, 62(8), 2329-2339. <https://doi.org/10.1108/md-08-2024-221>
- Margherita, A., Banchi, E., Biffi, A., Castri, G. d., & Morelli, R. (2022). Beyond Total Cost Management (TCM) to Systemic Value Management (SVM): Transformational Trends and a Research Manifesto for an Evolving Discipline. *Sustainability*, 14(19), 12890. <https://doi.org/10.3390/su141912890>
- Nikjow, M. A., Li, L., Xi-jing, Q. I., & Sepasgozar, S. M. E. (2021). Engineering Procurement Construction in the Context of Belt and Road Infrastructure Projects in West Asia: A SWOT Analysis. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(3), 92. <https://doi.org/10.3390/jrfm14030092>
- Niu, T. (2025). LSTM and Simulated Annealing for Entrepreneurship Path Planning in Smart Rural Contexts. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 16(1), 1-17. <https://doi.org/10.4018/ijaeis.387415>
- Nourelhouda, E. A. (2022). Green Entrepreneurship: External Environment Analysis on the Renewable Energy Industry in Jordan. *Journal of Humanities Arts and Social Science*, 6(3), 275-302. <https://doi.org/10.26855/jhass.2022.09.002>
- Olurina, J. O., Gidiagba, J. O., Ehiaguina, V. E., Ndiwe, T. C., Ayodeji, S. A., Banso, A. A., Tula, O. A., & Ojo, G. G. (2023). Engineering Innovations and Sustainable Entrepreneurship: A Comprehensive Literature Review. *Materials and Corrosion Engineering Management*, 4(2), 70-79. <https://doi.org/10.26480/macem.02.2023.70.79>
- Pandey, P. M., Kumar, P., & Sharma, V. (2021). Advances in Production and Industrial Engineering. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-5519-0>
- Piyush, P., Rajak, S., & Vimal, K. E. K. (2023). A Systematic Literature Review of Enablers and Technologies for Development of Digital Construction Management Capabilities Framework. <https://doi.org/10.46254/in03.20230162>
- Putro, U. S., & Rino, M. (2023). Scenario Planning in Selecting Contract Strategy Scheme to Achieve OTOBOSOROR (On Time, on Budget, on Specification, on Regulation, and on Return) Target in PT Kilang Pertamina International. *European Journal of Business Management and Research*, 8(3), 332-341. <https://doi.org/10.24018/ejbmr.2023.8.3.1987>
- Shu, M., Gao, X., & Duan, L. (2022). Facing the COVID-19 Pandemic and Developing a Sustainable Entrepreneurial Ecosystem: The Theory and Practice of Innovation and Entrepreneurship Policies in China. *International journal of environmental research and public health*, 19(14), 8797. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148797>

- Song, X., & Lu, T. (2025). Research on Factors Affecting and Strategies for Objective Control in Large-Scale International EPC Projects. *Scientific reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29637-4>
- Sujatmiko, H., Raharjo, T. J., Fakhruddin, F., & Suminar, T. (2024). Students' and Teachers' Perceptions of Social Entrepreneurship Literacy: A Case Study in an Indonesian Vocational Boarding School. *Industry and Higher Education*, 40(1), 30-40. <https://doi.org/10.1177/09504222241306609>
- Valmohammadi, C., Sadeghi, M., Taraz, R., & Mehdikhani, R. (2024). Business Analytics, Corporate Entrepreneurship, And open Innovation. *Management Decision*, 62(6), 1977-2001. <https://doi.org/10.1108/md-04-2023-0502>
- Weihao, H. (2024). Review of Cost Control Research in Prefabricated Construction Under EPC Mode. *Advances in Research*, 25(4), 412-420. <https://doi.org/10.9734/air/2024/v25i41120>
- Wu, H., Qian, Q. K., Straub, A., Visscher, H., & Zhuang, T. (2024). How Do Developers Influence the Transaction Costs of China's Prefabricated Housing Development Process? An Investigation Through the Bayesian Belief Network Approach. *Systems*, 12(5), 147. <https://doi.org/10.3390/systems12050147>
- Xia, M., Zhao, L., & Zhao, L. (2022). A Comprehensive Risk-Assessment Method for Prefabricated Buildings Using EPC: A Case Study From China. *Sustainability*, 14(3), 1910. <https://doi.org/10.3390/su14031910>
- You, Z. (2022). Intelligent Construction: Unlocking Opportunities for the Digital Transformation of China's Construction Industry. *Engineering Construction & Architectural Management*, 31(4), 1429-1453. <https://doi.org/10.1108/ecam-08-2022-0706>
- Zulu, B. C. (2021). An Economic Development Policy Implementation Approach to Creation of Sustainable Maritime SMMEs in the KwaZulu-Natal Province. 297-303. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64088-0_26