Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(8) (2025) 1383-1406
DOI: 10.22060/ceej.2025.23363.8149

# Development of a Scheduling Model in the Construction Industry Based on Project Quality under Limited Resource Constraints

Mahyar AzizKhani, Davood sedaghat shayegan*, Ali Asghar Amirkardoost

Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

**ABSTRACT:** Project scheduling in the construction industry, especially under resource constraints, has always been a major challenge in project management. In this study, a multi-objective model was presented for scheduling multi-state projects with limited resources, which, in addition to time and cost, also considers the quality of activity execution as an independent objective function. In line with the NP-hard nature of this problem, two meta-heuristic algorithms, PSO and NSGA-III, were used to generate 3D Pareto fronts. The results showed that the NSGA-III algorithm was able to provide answers with relatively low time and cost-effective costs in both resource scenarios; especially in the second case, where the lowest cost of 3572 million rials for a period of 21 days and a quality of 69% was obtained. In contrast, PSO outperformed in the first case in achieving higher quality, producing solutions with a quality of 74% and a similar duration of 17 days, albeit at a higher cost (4304 million rials). Pareto front analysis showed that PSO produced a higher diversity of responses and provided balanced combinations among the three objectives, while NSGA-III tended to produce uniform responses with a focus on cost reduction. The main innovation of this research is the independent inclusion of the quality function in the scheduling model and the in-depth comparison of the performance of the two algorithms under different resource conditions, which can be used as an efficient tool for project decision makers to select the optimal option based on strategic priorities.

**Review History:**
Received: Jul. 21, 2024
Revised: Aug. 19, 2025
Accepted: Oct. 10, 2025
Available Online: Nov. 10, 2025

**Keywords:**
Scheduling Model
Project Scheduling
Time-Cost Optimization
Resource Constraints
Meta-Heuristic Algorithm

## 1- Introduction

Project scheduling under resource constraints has long been a fundamental and challenging problem in the construction industry. The ability to efficiently allocate limited renewable and non-renewable resources while simultaneously achieving desirable levels of project duration, cost, and quality has a significant influence on overall project success [1,2]. In practical construction environments, projects often encounter budget limitations, shortages of skilled labor, and fluctuations in material availability, all of which can adversely affect project quality and productivity [3]. Studies by FMI (2021) and the Iranian Building and Housing Research Center (2020) have shown that in projects with severe financial constraints, quality degradation of up to 35% is commonly observed, while early cracking in concrete structures increases by nearly 28% compared to well-funded projects [4]. Consequently, the need for multi-objective optimization models that can balance time, cost, and quality under resource constraints has become increasingly critical. Traditional approaches to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) mainly focused on minimizing project duration or cost independently, without adequately incorporating quality as a distinct objective [5]. However, in real-world construction projects, trade-offs among time, cost, and quality are inevitable. Accelerating project completion often requires increased resources and direct costs, while reducing cost may result in compromised quality or extended duration [6]. Hence, the introduction of multi-mode resource-constrained project scheduling problems (MRCPSP) allows each activity to be executed through multiple alternative modes, each with different resource requirements, durations, and associated quality levels. This study develops an enhanced multi-objective optimization model for scheduling construction projects under daily renewable and non-renewable resource limitations. The proposed model introduces quality as an independent optimization objective alongside time and cost, thus providing a realistic representation of the trade-offs faced by project managers in practice. To solve this inherently NP-hard problem, two advanced metaheuristic algorithms, Particle Swarm Optimization (PSO) and Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA-III) were implemented and comparatively evaluated [7]. The novelty of this research lies in integrating quality as a separate optimization function within an MRCPSP framework and providing an in-depth

*Corresponding author's email: da.sedaghat@iau.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

comparison of the two algorithms under different resource scenarios.

## 2- Methodology

The proposed model was formulated as a multi-objective optimization problem with three primary objectives:
(i) minimization of total project duration,
(ii) minimization of total cost
(iii) maximization of execution quality.

Each project consists of *n* activities, denoted as nodes within an Activity-on-Node (AON) network, with defined precedence constraints. Each activity can be executed in one of several modes, each mode representing a unique combination of required renewable and non-renewable resources, activity duration, and quality level. The decision variables determine the start time and execution mode of each activity, ensuring that precedence and resource constraints are not violated. To ensure feasibility, several constraints were imposed:

- each activity is executed in exactly one mode;
- resource usage does not exceed daily availability of renewable or non-renewable resources;
- precedence constraints are strictly maintained;
- binary decision variables xjmtx_{jmt}xjmt and yjmy_{jm}yjm indicate activity completion at time *t* and execution mode *m*, respectively.

A minimum overall project quality threshold of 69% was introduced to prevent the algorithms from selecting low-cost but poor-quality solutions. Two metaheuristic algorithms were implemented to solve the model:

### (a) Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO was employed using a numeric encoding scheme for the sequence and mode of activities. Violation of constraints was managed through penalty functions. The algorithm iteratively updates particle positions and velocities based on local and global best solutions, allowing convergence toward an optimal Pareto front [8].

### (b) NSGA-III Algorithm (NSGA-III)

NSGA-III, an extension of NSGA-II, introduces a set of *reference points* to enhance the diversity of solutions in many-objective problems. It sorts individuals based on non-domination ranking and selects elites using reference vectors that distribute solutions uniformly along the Pareto front [9]. Parameter calibration for both algorithms was performed via trial-and-error. For PSO, the best configuration included a population size of 150, 200 iterations, and an inertia weight of 0.8. For NSGA-III, the optimal setup used a population of 100, 200 iterations, a crossover rate of 0.7, and a mutation rate of 0.1. The model was validated using a 10-activity test project, each with multiple execution modes and resource combinations. Two resource availability scenarios were tested one with higher resource supply (Scenario 1) and another with more restrictive conditions (Scenario 2). Both algorithms were implemented in MATLAB, and the resulting Pareto fronts were analyzed for comparative performance evaluation.

**Table 1. A comparative summary of performance metrics.**

| Criterion | Superior Algorithm | Key Values |
|---|---|---|
| Minimum project duration | Both (17 days) | Comparable |
| Minimum cost | NSGA-III | 3572 million Rials |
| Maximum quality | PSO | 74% |
| Pareto diversity | PSO | Broader spread |
| Stability under constraints | NSGA-III | Higher consistency |

## 3- Results and Discussion

The results demonstrated that both algorithms successfully generated feasible and diverse Pareto-optimal solutions, effectively balancing the three conflicting objectives. In Scenario 1 (higher resource availability), PSO achieved the best performance in terms of quality. The highest recorded quality level was 74%, corresponding to a 17-day duration and a total cost of 4304 million Rials. NSGA-III, in the same scenario, produced comparable results with slightly lower quality (71%) and shorter project duration (18 days) at a reduced cost of 4165 million Rials. Overall, PSO exhibited superior exploration capabilities, achieving broader diversity across Pareto solutions. In Scenario 2 (limited resources), NSGA-III outperformed PSO in cost efficiency. The optimal solution from NSGA-III achieved the lowest total cost of 3572 million Rials, with a project duration of 21 days and a quality of 69%. PSO, in comparison, delivered solutions of similar time and quality but at slightly higher costs (up to 3941 million Rials). The three-dimensional Pareto front analysis revealed distinct behavioral characteristics of the algorithms. PSO tended to produce a wider spread of solutions, including high-quality–high-cost combinations, which are valuable when quality is prioritized over budget. In contrast, NSGA-III generated more uniform and stable fronts, emphasizing cost minimization and consistency under constrained resources [10]. Figure-based analysis in Fig. 1 indicated that both algorithms achieved convergence after approximately 150 iterations, with PSO exhibiting faster improvement during the early iterations due to its collective learning mechanism. However, NSGA-III showed greater stability in the later stages, maintaining diversity and avoiding premature convergence. A comparative summary of performance metrics is presented in Table 1.

## References

[1] Merkle, D., Middendorf, M., & Schmeck, H. (2002).

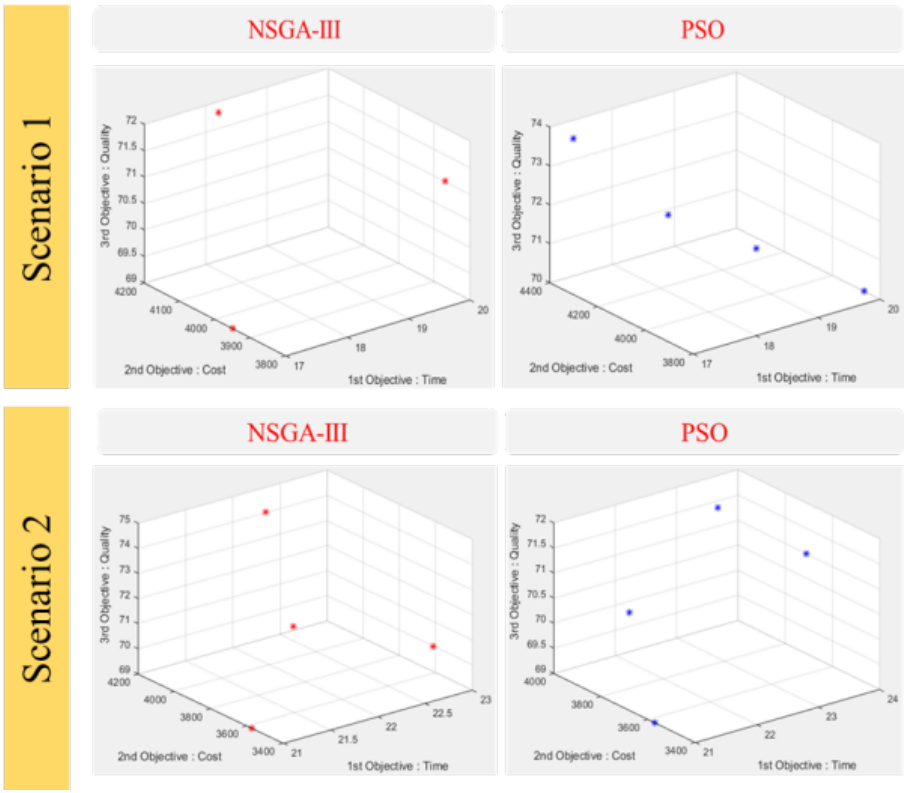



**Fig. 1. The solution obtained from the NSGA-III and PSO algorithms.**

Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(4), 333-346.

[2] Zhang, H., Li, H., & Tam, C. M. (2006). Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling. International journal of project management, 24(1), 83-92.

[3] Zhang, H., Li, X., Li, H., & Huang, F. (2005). Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. Automation in construction, 14(3), 393-404.

[4] Rogalska, M., Bożejko, W., & Hejducki, Z. (2008). Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling. Automation in Construction, 18(1), 24-31.

[5] Balouka, N., & Cohen, I. (2021). A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. European journal of operational research, 291(2), 457-470.

[6] Wang, L., & Zheng, X. L. (2018). A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. Swarm and Evolutionary Computation, 38, 54-63.

[7] Guo, K., & Zhang, L. (2022). Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions. Automation in Construction, 139, 104256.

[8] Xie, L. L., Chen, Y., Wu, S., Chang, R. D., & Han, Y. (2024). Knowledge extraction for solving resource-constrained project scheduling problem through decision tree. Engineering, Construction and Architectural Management, 31(7), 2852-2877.

[9] Yu, Ze, Chuxin Wang, Yuanyuan Zhao, Zhiyuan Hu, and Yuanjie Tang. “Linear Project-Scheduling Optimization Considering a Reverse Construction Scenario.” Applied Sciences 13, no. 16 (2023): 9407.

[10] Zohrehvandi, M., Zohrehvandi, S., Khalilzadeh, M., Amiri, M., Jolai, F., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2024). A Multi-Objective Mathematical Programming Model for Project-Scheduling Optimization Considering Customer Satisfaction in Construction Projects. Mathematics, 12(2), 211.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۸، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۶
DOI: 10.22060/ceej.2025.23363.8149

# توسعه مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌ها در شرایط محدودیت منابع

مهیار عزیزخانی، داود صداقت شایگان*،علی اصغر امیر کاردوست

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی واحدرودهن، رودهن، ایران.

**خلاصه:** زمان‌بندی پروژه در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه تحت محدودیت منابع، همواره از چالش‌های اساسی در مدیریت پروژه به شمار می‌آید. در این پژوهش مدلی چندهدفه برای زمان‌بندی پروژه‌های چندحالته با منابع محدود ارائه گردید که علاوه بر زمان و هزینه، کیفیت اجرای فعالیت‌ها را نیز به‌عنوان یک تابع هدف مستقل در نظر می‌گیرد. در راستای ماهیت NP-hard این مسئله، دو الگوریتم فراابتکاری PSO و NSGA-III برای تولید جبهه‌های پارتو سه‌بعدی به‌کار گرفته شدند. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم NSGA-III در هر دو سناریوی منابع توانسته است پاسخ‌هایی با زمان نسبتاً پایین و هزینه‌های مقرون‌به‌صرفه ارائه دهد؛ به‌ویژه در حالت دوم که کمترین هزینه معادل ۳۵۷۲ میلیون ریال برای مدت ۲۱ روز و کیفیت ۶۹٪ به دست آمد. در مقابل، PSO در حالت اول عملکرد برتری در دستیابی به کیفیت بالاتر داشته و راه‌حل‌هایی با کیفیت ۷۴٪ و مدت مشابه ۱۷ روز، هرچند با هزینه بیشتر (۴۳۰۴ میلیون ریال)، تولید نموده است. تحلیل جبهه‌های پارتو نشان داد که PSO تنوع بالاتری در پاسخ‌ها ایجاد کرده و ترکیب‌های متعادلی میان سه هدف ارائه می‌دهد، در حالی‌که NSGA-III گرایش بیشتری به تولید پاسخ‌های یکنواخت با تمرکز بر کاهش هزینه دارد. نوآوری اصلی این پژوهش، گنجاندن تابع کیفیت به‌صورت مستقل در مدل زمان‌بندی و مقایسه عمیق عملکرد دو الگوریتم در شرایط منابع متفاوت است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیرندگان پروژه به‌منظور انتخاب گزینه بهینه بر اساس اولویت‌های راهبردی به‌کار رود.

**تاریخچه داوری:**
دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

**کلمات کلیدی:**
مدل زمان بندی
زمان بندی پروژه
بهینه سازی زمان–هزینه
محدودیت منابع
الگوریتم فرا ابتکاری

## ۱- مقدمه

در راستای محورهای مهم و اساسی در برنامه توسعه کشور، به‌کارگیری از توان فنی داخلی در اجرای طرح‌ها و پروژه‌های عمرانی، صنعتی و خدماتی، مورد تاکید بسیار قرار دارد. در این زمینه موضوع زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع جهت بهبود بخشیدن به برنامه‌ریزی‌های آتی توسعه و جلوگیری از به هدر رفتن سرمایه‌های ملی و خسارت‌های جبران ناپذیر ناشی از تاخیر در انجام پروژه، مقوله‌ای انکار ناپذیر است. با توجه به چالش‌های پیش‌رو و نیازهای مهم سازمان‌ها نسبت به حجم عظیم طرح‌ها و پروژه‌های زیرساختاری کشور و روند نظارتی بر مدیریت اجرایی آن، ابزاری لازم است که قادر به آنالیز دقیق پروژه و به‌کارگیری موثر توانمندی‌های علمی، فنی و اجرایی و تلفیق آن با فناوری اطلاعات و تکنولوژی روز باشد [۱]. یک پروژه مجموعه‌ای از فعالیت‌هایی است که از طریق روابط منطقی متفاوتی که حاکم بر آنهاست به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کند. به این معنا که هرچند تعدادی از این فعالیت‌ها می‌توانند همزمان و به صورت موازی انجام شوند، اما شروع یا خاتمه تعدادی در گرو انجام یک یا چند فعالیت پیش‌نیاز آن‌ها می‌باشند. اجرای هر فعالیت پروژه معمولاً نیازمند منابع متفاوتی از جمله زمان، سرمایه، نیروی انسانی و غیره است که بعضاً محدود می‌باشند[۲]. همچنین زمان‌بندی پروژه عبارت از تعیین زمان انجام فعالیت‌های یک پروژه، با توجه به محدودیت‌های حاکم بر آن، برای رسیدن به یک هدف معین است [۳]. با استفاده از زمان‌بندی پروژه، مواردی همچون تخصیص منابع به فعالیت‌ها، تعهدات پیمانکاران، تعمیرات پیشگیرانه و تحویل سفارش مشتری داخلی و خارجی به راحتی قابل برنامه‌ریزی خواهد بود [۴]. یکی از مهمترین مسائل در بحث زمان‌بندی پروژه مدل RCPSP است. از زمان پیدایش این مدل در سال ۱۹۶۹ تاکنون مطالعات بسیاری روی آن انجام شده است[۶]. محدودیت‌های اصلی این مدل شامل سطح دسترسی به منابع و روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های پروژه است[۵]. هدف مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود که یک مسئله NP-hard است. تعیین

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: da.sedaghat@iau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

زمان شروع و حالت اجرای هر فعالیت به گونه‌ای می‌باشد که زمان اجرای پروژه را کمینه نماید. بدیهی است مساله نه تنها باید قیود مربوط به ارتباط منطقی فعالیت‌ها را تامین کند، بلکه باید به محدودیت منابع نیز توجه داشته باشد[۲]. از سوی دیگر در انجام پروژه‌های واقعی، با مسائل محدودیت در منابع، روش‌های اجرایی مختلف با زمان و هزینه‌های متفاوت و همچنین وجود عوامل کنترل‌نشدنی نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها یا اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده روبرو می‌باشیم، لذا این امر تصمیم‌گیری را در تعیین زمان‌بندی بهینه برای مدیران پروژه دشوار نموده است.

یکی از جنبه‌های اساسی در پروژه‌های ساختمانی، پیوند مستقیم میان محدودیت منابع و کیفیت خروجی نهایی است. به‌طور معمول، کاهش دسترسی به منابع مالی، انسانی یا تجهیزاتی موجب می‌شود پیمانکاران برای کنترل هزینه‌ها، از مصالح ارزان‌تر یا نیروی کار کم‌تجربه‌تر استفاده کنند و یا برخی فرآیندهای کنترل کیفیت را حذف نمایند. این مسئله به‌طور مستقیم کیفیت ساخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای مثال، بر اساس گزارش *FMI Construction Industry Report (2021)*، بیش از ۳۵٪ از پروژه‌های ساختمانی که با محدودیت شدید بودجه مواجه بوده‌اند، دچار افت محسوس کیفیت در اجرای جزئیات سازه و تاسیسات شده‌اند. در ایران نیز مطالعه‌ای توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۹) نشان داد که در پروژه‌های عمرانی که محدودیت منابع مالی وجود داشته، احتمال بروز ترک‌های زودرس در بتن تا ۲۸٪ بیشتر از پروژه‌های دارای منابع کافی بوده است. از سوی دیگر، محدودیت نیروی انسانی متخصص نیز می‌تواند کیفیت را کاهش دهد؛ به‌عنوان نمونه در پروژه‌های انبوه‌سازی مسکن، کاهش ۲۰٪ نیروی ماهر منجر به افزایش دوباره‌کاری‌ها و تأخیرهای ناشی از اصلاح کار تا ۱۵٪ گزارش شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محدودیت منابع نه‌تنها بر زمان و هزینه، بلکه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر کیفیت پروژه اثرگذار است. مدل پیشنهادی این پژوهش با در نظر گرفتن کیفیت به‌عنوان تابع هدف مستقل، امکان ارزیابی این اثرات و ارائه‌ی راه‌حل‌های متوازن میان سه شاخص کلیدی زمان–هزینه–کیفیت را فراهم می‌سازد. عدم اهتمام و توجه به این پارامترها، موجب تعویق و تاخیر در زمان تکمیل و اتمام پروژه‌های عمرانی در کشور گردیده است، به همین منظور با توجه به چند هدفه بودن مسائل اجرایی، در این پژوهش به بررسی مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چند حالته و بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه پرداخته شده است.

## ۲- چارچوب و پیشینه تحقیق

افزایش تعداد فعالیت‌ها و تعداد منابع برای تکمیل فعالیت‌ها در یک پروژه باعث می‌شود زمان‌بندی این فعالیت‌ها به منظور تکمیل پروژه در حداقل زمان ممکن، تبدیل به یک مسئله بزرگ شود که حل آن از طریق روش معمول تحقیق در عملیات عملی نیست. علاوه بر این، منابع نامحدود در اکثر شرایط قابل توجیه نیست. در واقع منابع مقدار مشخص و محدودی دارند و یا هزینه‌های اضافه کردن به منبع بسیار زیاد است. پس در نهایت می‌توان گفت محدودیت منابع در پروژه یکی از اصلی‌ترین مشکلات برنامه‌ریزی در دنیای واقعی است [۸]. مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود از دسته مسائل مشکل برای حل، دسته‌بندی شده است [۹]. در این مسئله، هر پروژه از تعدادی فعالیت تشکیل شده است، به علاوه تعدادی منبع با ظرفیت‌های محدود در هر دوره زمانی وجود دارد. فعالیت‌ها علاوه بر اینکه نسبت به یکدیگر جهت اجرا دارای اولویت هستند، در استفاده از منابع نیز محدودیت دارند. به طور کلی، RCPSP درگیر یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه است، به نحوی که محدودیت‌های تقدم و تاخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه به طور همزمان ارضا شوند و معیار سنجش معینی از جمله زمان انجام پروژه، هزینه‌ی انجام، تعداد فعالیت‌های تاخیردار و... بهینه گردد[۱۰]. در دنیای واقعی معمولاً فعالیت‌های مربوط به یک پروژه با روش‌ها و در حالت‌های مختلفی قابل اجرا می‌باشند. با توجه به این موضوع و با در نظر گرفتن اهداف مختلف در پروژه، در هر کدام از حالت‌های اجرا، فعالیت‌های پروژه در مدت زمان و با هزینه‌های متفاوتی نسبت به سایر حالت‌ها، انجام می‌گیرند[۱۱]. امروزه از یک سو مدیران به دنبال کاهش هزینه‌های پروژه هستند و از سوی دیگر به دنبال فشرده‌سازی زمان انجام پروژه می‌باشند. اما فشرده‌سازی زمان پروژه که با افزایش منابع تخصیص یافته جهت سرعت بیشتر در اجرای فعالیت‌ها انجام می‌پذیرد، به ناچار باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد. پیش‌بینی این مطلب که نتیجه فشرده‌سازی زمان‌بندی پروژه منجر به افزایش یا کاهش هزینه کل پروژه می‌شود دشوار است. در واقع اگر چه هزینه‌های مستقیم افزایش می‌یابند، ولی به دلیل کاهش زمان پروژه، هزینه‌های غیرمستقیم ممکن است کاهش یابند. این موضوع تاییدی است بر این مطلب که حتی کاهش زمان و هزینه به طور همزمان تنها در بعضی حالات ممکن است[۱۱]. همچنین یکی از مشکلات رایج در مدیریت پروژه، اختلال زمان‌بندی‌ها در اثر عوامل کنترل نشدنی در حین اجرای پروژه است. در نتیجه، مدیران پروژه اغلب در پایبندی به تعهداتشان دچار مشکل می‌شوند. بنابراین زمان‌بندی پروژه علاوه بر زمان

ختم کوتاه، باید حین اجرا دچار کمترین اختلال شود [۴]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی موضوع زمان‌بندی پروژه انجام شده است. در بیشتر تحقیقات فرض می‌شود فعالیت‌ها در یک شرایط ایده‌آل انجام می‌گیرد و زمان‌بندی ارائه شده می‌تواند به طور دقیق مطابق با برنامه اجرا شود. اگر چه در عمل، وجود چندین عامل کنترل نشدنی نظیر افزایش زمان اجرای فعالیت‌ها، نبود دسترسی به منابع، اضافه شدن فعالیت‌های پیش‌بینی نشده به پروژه، شرایط بد آب و هوایی و غیره ممکن است منجر به ایجاد اختلال‌هایی در زمان‌بندی پروژه شود. این اختلال‌ها می‌تواند هزینه‌های قابل توجهی به سیستم پروژه تحمیل کند [۵]. از این رو می‌توان گفت رسالت مدیریت پروژه، ایجاد تعهد در قبال برنامه زمان‌بندی است[۱۲]. لزوم در نظر گرفتن تمامی موارد یاد شده و ارتقاء مدل و توابع هدف در حل مسائل زمانبندی پروژه با منابع محدود حائز اهمیت است. لذا در این پژوهش یک مدل چند هدفه برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چند حالته (MRCPSP) توسعه داده شده است که در آن به بررسی همزمان کمینه‌کردن زمان ختم پروژه و کمینه‌سازی هزینه کل (بودجه‌کل) پرداخته شده است. مدل ارتقا یافته با لحاظ قیود مربوطه و با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو مطالعات متنوعی نیز در ارتباط با بهینه سازی زمان بندی در پروژه‌های ساخت و ساز نیز انجام شده که در این بخش خلاصه ای از این موارد شرح داده خواهد شد.

وانگ و همکاران، (۲۰۱۲) با استفاده از منطق نرم، یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های پروژه و کوتاه کردن مدت زمان ساخت در پروژه‌های تکراری ارائه دادند. مدل آن‌ها مبنی بر این واقعیت است که ترتیب کاری بین نواحی مختلف ثابت نبوده و اغلب تغییر می‌کند. تیم مدیریت پروژه برای کوتاه کردن مدت زمان پروژه، نیاز به منابع اضافه دارند. در نتیجه با اضافه کردن منابع جدید، هزینه مستقیم پروژه افزایش خواهد یافت. در پروژه‌های تکراری ترکیب طول مدت فعالیت‌ها و ترتیب منطقی آن‌ها منجر به طول مدت‌های متفاوت در پروژه می‌شود. از سوی دیگر، نرخ بهره‌وری گروه‌های کاری می‌تواند در اندازه آن‌ها و استراتژی‌های افزایش تولید تاثیرگذار باشد. بنابراین در این تحقیق از مدل خاصی استفاده شده، که توانسته است با ترکیب هزینه به عنوان مهم‌ترین متغیر تصمیم، با منطق نرم و براساس فرآیند بنیادی ساخت و تعداد فعالیت‌هایی که در واحدهای تکراری باید در یک زمان خاص انجام گیرند، روشی سودمند را برای حمایت از تیم پروژه در راستای کاهش هزینه کلی پروژه ارائه دهد [۱۳]. پاویرسکی و ساپیچا (۲۰۱۲) با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، به دنبال پیدا کردن ارزان‌ترین زمان‌بندی، با توجه به محدودیت‌های زمانی می‌باشند. به طور میانگین، این بهینه‌سازی ۱۴/۱٪ کاهش هزینه‌ها، با استفاده از منابع یکسان را در پی داشته است. در این مقاله برای تعیین مقدار بهبود وضعیت زمان‌بندی، از مفهوم سود استفاده شده است که نسبتی بین هزینه و زمان کلی پروژه است [۱۴]. آمول سینگ (۲۰۱۳) مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع را با قاعده اولویت و فرآیند سلسه مراتبی بررسی نموده است. در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی بر مبنای اولویت‌بندی (بحرانی بودن آن) و پیشرفت پروژه در زمان‌بندی چندپروژه‌ای و با هدف حداقل‌سازی زمان اتمام و هزینه‌های جریمه ارائه شده است، این مسئله با استفاده از الگوریتم ترکیبی بر پایه قواعد اولویت‌بندی و AHP ایجاد و به منظور بهینه‌سازی جواب‌ها جهت ارائه توزیع اولویت زمان‌بندی در یک چند پروژه‌ای نتایج خود را منتشر کرده است [۱۵]. پینگ و ولیناگ (۲۰۱۴) یک مدل کارآمد برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود بر پایه الگوریتم ژنتیک ارائه داده‌اند، این الگوریتم با بررسی تعارض و تداخل فعالیت‌ها و منابع بر پایه اولویت‌ها، از تولید کروموزوم‌های غیرعملی جلوگیری کرده و نسبت به ارائه جواب‌های بهینه اقدام نموده است، این مثال در یک پروژه واقعی الکتریکی بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۱۶]. محمد عبدالشاه (۲۰۱۴) به مروری بر روش‌ها در حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پروژه با هدف تحلیل روش‌های مختلف که بطور همزمان و یا جداگانه می‌تواند برای حل مشکلات زمان‌بندی پروژه استفاده شود پرداخته است، این تحقیق به بررسی بیش از ۲۰۰ مقاله منتشر شده از معتبرترین مجلات علمی دنیا پرداخته و با جمع‌آوری و بررسی روش‌های مختلف به منظور روشن شدن ویژگی‌های مدل‌های توسعه یافته و نارسایی آن‌ها جهت به کارگیری مدیران پروژه با توجه به شرایط سازمانی، نوع منابع و فعالیت‌ها پرداخته است و نتایج بررسی خود را در قالب جداول مدون ارائه داده است [۱۷]. اسماعیل علی و همکاران (۲۰۱۶) برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود یک الگوریتم تکاملی تشخیص دهنده (تفاضلی) ارائه داشته‌اند، این الگوریتم که با عنوان DE مطرح شده است با اصلاح جهش و عامل تقاطع با هدف حفظ امکان اجرا برای تولید منحصر به فرد معرفی شده و با ارائه راه حل کارا در جمعیت‌های اولیه و پیشنهاد ساده کردن نمایش برای کروموزم و جانشین‌های قبلی وابسته بین فعالیت‌ها قادر به همگرا کردن و حل بهینه می‌باشد و این الگوریتم با نمونه مثال‌های PSPLIB با فعالیت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ آزمایش و عملکرد آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری در این تحقیق بررسی و نتایج آن ارائه شده است [۱۸]. خانگ و

مینت در سال ۲۰۱۷ سه مدل برنامه‌ریزی خطی برای موازنه زمان، هزینه و کیفیت در برنامه زمانبندی پروژه ابداع کرده بودند را برای پروژه ساخت یک کارخانه سیمان در تایلند بکار بردند و با نرم‌افزار LINGO آنرا حل کردند. با تغییردادن مقادیر کران محدودیت‌های زمان، هزینه و کیفیت در هر مدل مقدار تابع هدف مربوط را محاسبه کردند و حداقل و حداکثر مقداری که می‌توانست در مقدار تابع هدف تأثیرگذار باشد را بدست آوردند و ضمن ارائه جداول و نمودارهایی به تحلیل نتایج پرداختند[۱۹]. زنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای موازنه زمان و هزینه در مسأله زمان‌بندی پروژه یک مدل دو هدفه ارائه کردند. آنها در تابع برازش الگوریتم تغییراتی ایجاد نمودند و باتوجه به اهمیت هر عامل زمان یا هزینه در پروژه وزنی به هرکدام از آنها در تابع برازش تخصیص دادند که باعث می‌شد الگوریتم فضای بزرگتری را نسبت به حالت بدون وزن جستجو کند[۲۰]. لازاری و همکاران در سال ۲۰۲۴ به مطالعه مدل زمان‌بندی چندهدفه پروژه‌های بزرگ و تکرارشونده در صنعت ساخت‌وساز با رویکرد بهینه سازی زمان، هزینه و کیفیت با منابع محدود پرداخته است. در این پژوهش بر پایه مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی چندهدفه با توجه به محدودیت منابع انجام شد. نویسندگان به جای بررسی ساده‌ی نوسانات، رابطه‌ی مستقیم میان نوسان استفاده از منابع و ضررهای واقعی (مثلاً هزینه) را تحلیل نمودند. برای ارزیابی مدل، شاخص‌هایی مانند انحراف معیار روزانه تخصیص منابع نیز لحاظ شد و اثرات منفی ناهنجاری در تخصیص منابع بر تأخیر و هزینه بررسی گردید. نتایج نشان داد که در پروژه‌های با منابع محدود، نوسانات شدید در تخصیص منابع منجر به افزایش قابل‌توجه در تأخیرات و هزینه‌ها می‌شود. همچنین تأکید شد که معیارهای آماری ساده نمی‌توانند زیان‌های واقعی را آشکار سازند و پیشرفت‌های عملی‌تر برای ارزیابی تخصیص منابع مورد نیاز است[۲۱]. در مطالعه ای دیگر ژو و همکاران (۲۰۲۵) به تحلیل همزمان دو نوع محدودیت ریسک زمان‌بندی و منابع در پروژه‌های ساخت‌وساز پرداخته و با رویکردی بر پایه ریسک، تصمیم‌گیری چندهدفه را بررسی نموده اند. ایشان ابتدا چارچوب مسئله را با در نظر گرفتن هم‌زمان تأخیر زمانی و محدودیت منابع توسعه دادند. سپس با رویکرد چندهدفه و ساختار ریسک‌محور، مدل زمان‌بندی را پیاده‌سازی و آزمایش نمودند. یافته‌ها نشان دادند که مدل‌های ساده چندهدفه قادر به تولید تعادل بهتر میان اهداف زمانی، هزینه، کیفیت و ریسک هستند. این مدل به مدیران پروژه اجازه داد تا بر اساس درجه‌ی تحمل ریسک و محدودیت منابع، انتخاب‌های بهینه‌تر داشته باشند و تصمیمات استراتژیک را کارآمدتر اتخاذ نمایند [۲۲]. در سال‌های اخیر، بهبود کیفیت اجرای پروژه‌ها در کنار زمان و هزینه، به یکی از اهداف کلیدی در تحقیقات زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تبدیل شده است. بسیاری از مطالعات اولیه نظیر مدل‌های کلاسیک RCPSP عمدتاً بر کمینه‌سازی زمان یا هزینه تمرکز داشتند و کیفیت را یا ثابت فرض کرده یا لحاظ نکرده‌اند [۲۳]. با این حال، در پاسخ به نیازهای عملی پروژه‌های واقعی، محققانی چون ژانگ و همکاران با معرفی مدل‌هایی چندهدفه، کیفیت را به صورت تابع هدف جداگانه وارد مدل‌سازی کرده‌اند[۲۴]. در این راستا، خاموشی و گل افشانی کیفیت را به عنوان تابعی از منابع اختصاص‌یافته به فعالیت‌ها تعریف نموده و تأکید کردند که کیفیت بالاتر نیازمند هزینه‌های بیشتر است[۲۵]. مطالعاتی مانند عصاف و حسنیان نیز کیفیت را در قالب شاخص‌های فنی و استانداردهای اجرایی مدل کرده و به این نتیجه رسیدند که صرف نظر از کیفیت می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های آتی و ریسک‌های پروژه گردد[۲۶]. به طور مشابه، پژوهش‌های اخیر مانند شاو و همکاران مدلی ترکیبی از زمان، هزینه و کیفیت ارائه داده‌اند و نشان داده‌اند که در برخی پروژه‌ها، بهبود اندک در کیفیت می‌تواند به شدت بهره‌وری کل پروژه را افزایش دهد. این روند پژوهشی نشان می‌دهد که گنجاندن تابع هدف کیفیت در مدل‌های زمان‌بندی پروژه، نقشی اساسی در بهبود تصمیم‌گیری مدیران پروژه داشته و اهمیت آن به ویژه در پروژه‌های زیربنایی و حساس روزبه‌روز در حال افزایش است[۲۷].

با توجه به مواردی که بررسی گردیده است دغدغه جدی برای استفاده از فرایند بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مشاهده گردیده است. از این جهت، در این مطالعه مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌ها در شرایط محدودیت منابع پیاده سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بهینه سازی این مسئله از الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب نخبه گرا ورژن سوم و الگورتم ازدحام ذرات استفاده شده است. با توجه به مطالعاتی که در این بخش بررسی گردید، در این پژوهش توسعه مدل چندهدفه زمان‌بندی پروژه با تمرکز هم‌زمان بر زمان، هزینه و کیفیت، در نظر گرفتن فعالیت‌های چندحالته با منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر روزانه و استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری پیشرفته برای اولین بار در زمینه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی با محدودیت منابع چندحالته بررسی و مورد نظر بوده است. برخلاف بسیاری از مدل‌ها که تنها زمان یا هزینه را در نظر می‌گیرند، این مقاله بهینه‌سازی هر سه شاخص را با هم انجام داده و مدل پیشنهادی پیچیدگی واقعی پروژه‌های ساختمانی را با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف اجرای فعالیت‌ها لحاظ کرده است.

## ۳- روش شناسی پژوهش

در این مطالعه با توجه به اهداف در نظر گرفته شده که در این بخش اشاره می‌گردد، از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات[1] (PSO) [۲۸,۲۹] و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا ورزن سوم[2] (NSGA-III) [۲۹] جهت بهینه سازی مدل زمان بندی در صنعت ساختمان با رویکرد کیفی سازی پروژه‌های عمرانی در شرایط محدودیت منابع استفاده شده و نتایج با الگوریتم‌های دیگر مقایسه و ارزیابی می‌گردد. در این مطالعه، هدف، پیدا کردن مدل چند هدفه برای تصمیم‌گیری در زمان‌بندی پروژه‌ای با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالته و پیشنهاد مدلی ارتقاء یافته برای این نوع مسئله می‌باشد. در ادامه مدل پیشنهادی مسئله، ارائه و به تشریح تابع هدف و محدودیت‌های مربوط به آن پرداخته و اعتبارسنجی و صحت نتایج مدل با دو مثال واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- ۱- تعریف مسئله

در این مطالعه، توابع مسئله و قیود در نظر گرفته شده با توجه به اهداف مطالعه و ارزیابی تحقیقات پیشین در نظر گرفته شده است. پروژه‌ها شامل چند فعالیت بوده و تعدادی منبع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با ظرفیت محدود وجود دارد. هر فعالیت دارای بیش از یک نوع حالت اجرا می‌باشد که هر حالت اجرا، زمان مشخص با منابع مورد نیاز بصورت روزانه می‌باشد. فعالیت‌ها علاوه بر اینکه با توجه به روابط پیش‌نیازی محدودیت اولویت اجراء دارند، در استفاده از منابع روزانه نیز محدودیت دارند. هدف این نوع مسائل، معمولاً کمینه کردن زمان و هزینه اتمام پروژه با کسب کیفیت بهینه می‌باشد، به نحوی که با رعایت محدودیت‌های پیش‌نیازی، ایده‌ال‌ترین استفاده از منابع موجود برای اجرای فعالیت‌ها و در نهایت بهترین توالی و حالت اجرای فعالیت و اتمام به موقع پروژه با کمترین هزینه و بهترین کیفیت تضمین گردد. ساده‌ترین حالت این مسئله، مسئله پایه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع است که در آن هر فعالیت تنها با یک حالت اجرایی قابل انجام می‌باشد و منابع نیز تنها منابع تجدیدپذیر هستند. همانطور که واضح است در عمل گاه یک فعالیت به بیش از یک روش قابل انجام هستند و به عنوان نمونه می‌توان با به‌کارگیری منابع بیشتر و یا روش دیگر اجرا، آن فعالیت را به اتمام رسانید. در اغلب مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالته، تابع هدف تنها به دنبال کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه با لحاظ روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع می‌باشد. عامل بعدی، هزینه نهایی تمام شده در یک پروژه است که با توجه به شرایط محدودیت بودجه در کشور، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از این رو جهت اعمال این موارد در مسئله، جدا از بدست اوردن بهترین زمان و توالی فعالیتها، همزمان کمترین هزینه در مسئله نظر گرفته می‌شود و همزمان جهت کارآیی بهتر زمانبندی مسئله کیفیت را نیز جزء اهداف مسئله در نظر میگیریم، لذا با لحاظ نمودن پارامترهای یاد شده، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت چندحالته از یک مدل تک هدفه به یک مدل چندهدفه کارا ارتقا خواهد یافت[۳۱].

در مدل فرض شده است که پروژه از n فعالیت تشکیل شده و توسط شبکه AON و به صورت گراف G=(V,E) نمایش داده می‌شود که گره (V) نشان‌دهنده فعالیت و یال (E) روابط پیش‌نیازی را بیان می‌کنند. یک پروژه شامل j فعالیت را در نظر می‌گیریم که فعالیت‌ها به صورت j=1,… J, شماره‌گذاری شده‌اند. به دلیل مسائل فنی، روابط اولویت‌بندی و حق تقدم بین فعالیت‌ها حاکم می‌باشد. این روابط حق تقدم توسط مجموعه‌های پیش‌نیازی مستقیم $P_i$ نمایش داده می‌شود و بیان کننده این است که فعالیت j شروع نمی‌شود مگر اینکه تمام پیش‌نیازی‌های آن به اتمام رسیده باشند و ساختار پروژه به صورت فعالیت روی گره نمایش داده می‌شود. یک برنامه زمان‌بندی برای مدل تحت محدودیت منابع با یک زمان شروع $T_j$ و در حالت $M_j$ برای هر فعالیت j تعیین می‌شود. فعالیت j باید در زمان شروع در یکی از حالات اجرایی که به صورت m=1,2,…,M نمایش داده می‌شود، آغاز گردد. هر فعالیت می‌تواند در یکی از چند مُد اجرای مختلف انجام پذیرد. هر مُد، ترکیبی از منابع مختلف، میزان استفاده از آن‌ها و زمان مربوط به انجام آن فعالیت را به صورت روزانه به نمایش می‌گذارد. وقتی فعالیتی در مُد انتخاب شده شروع شد، اجازه متوقف شدن و یا تغییر مُد به آن داده نمی‌شود. فعالیت j امکان دارد در یکی از مُد داده شده در مجموعه مُدها اجرا شود. فعالیت با هر حالت اجرایی که شروع می‌شود باید با همان حالت هم اتمام یابد. همچنین فعالیت‌های j=0 و j=J+1 فعالیت‌های مجازی آغاز و پایان شبکه پروژه می‌باشد. هر فعالیت (به جز فعالیت‌های مجازی) به مقدار معینی از منابع برای اجرای خود نیاز دارند. در این مدل منابع تجدیدپذیر روزانه مورد نیاز برای فعالیت j برای اجرا در حالت m با $r^k_{jmb}$ و تجدیدناپذیر با $nr^v_{jmb}$ نمایش داده شده است. برای هر منبع تجدیدپذیر روزانه $r^k_{jmb} \in T_{kt}$ و هر منبع تجدیدناپذیر روزانه $r^v_{jmb} \in T_{vt}$ ، همچنین برای منابع تجدید پذیر و تجدیدناپذیر کل منابع مصرفی نباید از $TR_k$ و $TNR_v$ بیشتر باشد. هزینه هر منبع تجدید پذیر با $C_k$ و تجدیدناپذیر با

1. Particle swarm optimization (PSO)
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-third version (NSGA-III)

$C_v$معرفی شده است. برای حل مدل پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری شامل PSO و NSGA-III استفاده شده است[۳۲].

همانطور که در مطالعات گذشته نشان داده شده برای دستیابی به یک زیرمجموعه با ویژگی خوب نیاز به الگوریتمی با توانایی حل مسئله در توابع مختلف می‌باشد[۳۳-۳۶]. این موضوع عمدتا به دلیل این واقعیت است که با افزایش تعداد اهداف فشار انتخاب بر اساس تسلط پرتو به شدت کاهش می یابد . به تازگی، یک نقطه مرجع مبنی بر NSGA-II به عنوان NSGA-III برای مقابله با مسائل چند هدفی پیشنهاد می شود، که در آن حفظ تنوع در میان اعضای جمعیت با تهیه و انطباق به روز رسانی تعدادی از نقاط مرجع به خوبی گسترده شده، حفظ می شود. همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل و الگوریتم پیشنهادی، دو حالت برای منابع روزانه در دسترس برای فعالیت‌ها و شبکه مسئله ارائه می‌گردد.

### ۳- ۲- پارامترهای مسئله

پارامترهای مسئله با توجه به مدل پیشنهادی به شرح ذیل می‌باشد:

$EV_j$ ارزش افزوده فعالیت j

$q_j m$ کیفیت فعالیت j در مد m

$r^k_{jmb}$ میزان منبع تجدیدپذیر مورد نیاز نوع k در مد m در طول انجام فعالیت

$nr^v_{jmb}$ میزان منبع تجدیدناپذیر مورد نیاز نوع v در مد m در طول انجام فعالیت

$R_{kt}$ میزان منابع تجدید پذیر در دسترس در روز t

$NR_{vt}$ میزان منابع تجدیدناپذیر در دسترس در روز t

$TR_k$ مجموع منابع تجدید پذیر

$TNR_v$ مجموع منابع تجدیدناپذیر

$d_{jm}$ مدت زمان انجام فعالیت j در مد m

$C_k$ هزینه هر واحد منبع تجدیدپذیر k

$C_v$ هزینه هر واحد منبع تجدیدپذیر v

$\theta_j$ مجموعه فعالیت‌هایی که پیش نیاز فعالیت j میباشند .

### ۳- ۳- متغیرهای مسئله

$X_{jmt}$: اگر فعالیت j در مد m در روز t تکمیل شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است

$Y_{jm}$: اگر فعالیت j در مد m انجام شود ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.

برای هر فعالیت، دقیقاً یک مد (حالت اجرایی) انتخاب شده است و سایر مدها برای همان فعالیت فعال نشده‌اند ( $Y_{jm}=0$ )

### ۳- ۴- مدل پیشنهادی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع روزانه و فعالیت‌های چندحالته

همانطورکه اشاره شد، دراین مطالعه، مسئله‌ی زمان‌بندی چند هدفه با فعالیت‌های چند حالته در نظر گرفته شده که در ادامه، هر یک از این اهداف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. رویکرد بهینه سازی توابع این مطالعه با بهبود در مدل مطالعه ژانگ و ژینگ پیاده سازی شده است [۳۰]. توابع هدف این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

- **حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه با منابع محدود روزانه**

اولین هدفی که در تابع هدف باید در نظر گرفت، کمینه کردن حداکثر زمان اتمام پروژه است. این تابع هدف را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\min \sum_{t=EF_{J+1}}^{LF_{J+1}} tX_{(J+1),1,t} \qquad (۱)$$

- **حداقل‌سازی هزینه پروژه با منابع محدود روزانه**

دومین هدفی که در تابع هدف در نظر گرفته شده، کمینه کردن هزینه اتمام پروژه است. این تابع هدف را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\min \sum_{J=1}^{J}\sum_{m=1}^{Mj}\sum_{k=1}^{K}\sum_{b=\max\{t,EFj\}}^{\min\{t+d_{jm}-1,LF_j\}} c_k r^k_{jmb} x_{jmb} + \qquad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{Mj}\sum_{v=1}^{V}\sum_{b=\max\{t,EF_j\}}^{\min\{t+d_{jm}-1,LF_j\}} C_v nr^v_{jmb} x_{jmb}$$

- **حداکثرسازی کیفیت اجرای پروژه**

- کیفیت فعالیت‌ها وابسته به مد انتخابی اجرای آن‌هاست. استفاده از تجهیزات بهتر یا تیم‌های متخصص‌تر، کیفیت را افزایش می‌دهد. کیفیت نهایی پروژه نیز مجموع وزن‌دار کیفیت فعالیت‌هاست؛ یعنی فعالیت‌هایی که اهمیت بیشتری دارند سهم بیشتری در کیفیت نهایی دارند.

$$Max \frac{1}{\sum_{j=1}^{J} EV_j} \times \sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{Mj} EV_j \times q_{jm} \times y_{jm} \quad (۳)$$

### ۳- ۵- محدودیت‌های مدل

محدودیت‌های اعمال شده بمنظور کنترل منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دسترس روزانه و مورد نیاز پرداخته شده است که بشرح ذیل می‌باشد.

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EFj}^{LF_j} X_{jmt} = 1 \qquad \forall j \in J \quad (۴)$$

$$\sum_{m=1}^{Mj} \sum_{t=EFj}^{LFj} t \times X_{jmt} \le \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{t=EFj}^{LFj} (t - d_{jm}) \times X_{jmt} \quad (۵)$$
$$\forall j \in J$$

$$\sum_{t=EFj}^{LFj} X_{jmt} + Y_{jm} \ge R \qquad \forall j \in J \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{Mj} r_{jmb}^{k} x_{jmb} \le R_{kt} \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{Mj} nr_{jmb}^{v} x_{jmb} \le NR_{vt} \quad \forall v \in V \ , \ \forall t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{b=\max\{t,EFj\}}^{\min\{(t+t_{jm}-1,LF_j\}} r_{jmb}^{k} x_{jmb} \le TR_k \qquad \forall k \in K \quad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{m=1}^{Mj} \sum_{b=\max\{t,EFj\}}^{\min\{(t+t_{jm}-1,LF_j\}} nr_{jmb}^{v} x_{jmb} \le TNR_v \quad (۱۰)$$

$$Xjmt, Yjm \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \ , \quad \forall m \in Mj \ , \ \forall t \in T \quad (۱۱)$$

رابطه (۴) تضمین می‌کند هر فعالیت تنها در یک مد انجام شده و در یک روز پایان می یابد. رابطه (۵) رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها را تضمین می‌کند. رابطه (۶) تعیین کننده مد اجرایی هر یک از فعالیت‌ها جهت تعیین میزان کیفیت اجرای آن فعالیت می‌باشد. رابطه (۷) میزان منابع تجدیدپذیر در دسترس برای هر منبع را بطور روزانه بررسی می‌کند. به همین ترتیب رابطه (۸) میزان منابع تجدید ناپذیر در دسترس بازای هر منبع را بطور روزانه بررسی می‌کند. رابطه (۹) تضمین می‌کند کل منابع مورد نیاز تجدیدپذیر برای انجام تمام فعالیت‌ها از میزان کل منابع در دسترس تجاوز نکند. همچنین رابطه (۱۰) تضمین می‌کند کل منابع مورد نیاز تجدید ناپذیر برای انجام تمام فعالیت‌ها از میزان منابع در دسترس تجاوز نکند. رابطه (۱۱) متغیرهای صفر و یک مسئله را نشان می‌دهد. اگر منابع بسیار محدود باشند، الگوریتم ممکن است به سراغ مدهایی با کیفیت پایین برود که هزینه کمتری دارند. تنها راه کنترل این موضوع، وزن‌دهی به کیفیت در تابع هدف یا اعمال قید مستقل روی مقدار نهایی کیفیت است. از این رو، حداقل کیفیت در این مطالعه ۶۹٪ در نظر گرفته شده است.

### ۳- ۶- طراحی مسئله نمونه

با توجه به مطالعه مرجع این تحقیق که مسئله نمونه براساس آن پیاده سازی شده است[۳۷,۳۸]، به منظور بررسی مدل و صحت نتایج، یک مدل شامل ۱۰ فعالیت با حالت‌های اجرایی مختلف و منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مورد نیاز بصورت روزانه درنظر گرفته شده و پیش‌نیاز هر فعالیت نیز مشخص گردیده است. همچنین کیفیت فعالیت در هر مد و ارزش افزوده کیفیت هر فعالیت مطابق جدول (۱) پیوست ارائه شده است. با توجه به بررسی زمان- هزینه در مدل پیشنهادی، هزینه‌های هریک از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر نیز در جدول (۱) درج گردیده‌است. همچنین شبکه AON این مثال در شکل (۱) ترسیم شده است.

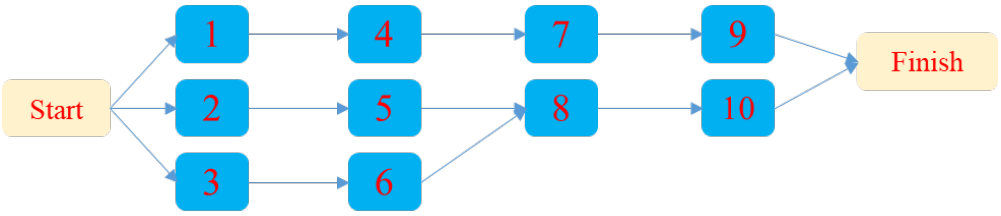
همانطور که در جداول پیوست نشان داده شده است، این پروژه از ۱۰ فعالیت تشکیل شده است. نحوه ارتباط این فعالیت‌ها نیز در شکل (۱) به صورت شبکه نشان داده می‌شود که کار را برای یافتن نحوه ارتباط میان فعالیت‌ها آسان‌تر می‌کند. همچنین در جداول پیوست تمامی فعالیت‌ها با ذکر میزان منابع و زمان لازم مطرح گردیده است. در این جدول برای هر کدام از فعالیت‌ها چندین روش اجرا در نظر گرفته شده است و هریک از پارامترهای منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مشخص شده است .

به منظور صحت و اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، مثال فرضی در نظر گرفته شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با دو نوع منابع روزانه متفاوت

**جدول ۱. هزینه هر واحد از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیرمورد نیاز برای اجرای فعالیت ها.**

**Table 1. Cost per unit of renewable and non-renewable resources required to implement activities.**

| منابع | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| هزینه پیشنهادی بازای هر واحد (میلیون ریال) | ۱۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۵ | ۲۰ | ۳۰ |




**شکل ۱. شبکه گرهی مربوط به پروژه.**

**Fig. 1. Project node network.**

**جدول ۲. حداقل و حداکثر مقادیر منابع فعالیت‌ها.**

**Table 2. Minimum and maximum activity resource values.**

| منابع | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| حداکثر منابع مورد نیاز | ۷۸ | ۶۶ | ۶۷ | ۶۴ | ۶۶ | ۳۵ |
| حداقل منابع مورد نیاز | ۴۵ | ۴۶ | ۳۴ | ۳۹ | ۴۹ | ۲۳ |

حل شده که در ادامه به بررسی هر یک از آنها پرداخته شده است. همچنین حداقل و حداکثر منابع مورد نیاز جهت تکمیل فعالیتهای معرفی شده طبق جدول (۲) محاسبه گردیده است.

به منظور تحلیل بیشتر مدل پیشنهادی، دو حالت تخصیص منبع روزانه در نظر گرفته شده است که به ترتیب در جدول (۲) و (۳) پیوست گزارش شده‌اند.

### ۳- ۷- تنظیم پارامتر الگوریتم های فراابتکاری پیشنهادی

همانطورکه اشاره گردید در این مطالعه دو الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به منظور بهینه‌سازی مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و فعالیت‌های چندحالته توسعه داده شده است. هدف پیدا کردن بهترین توالی و بهترین حالت اجرای فعالیت‌ها با توجه به محدودیت روزانه منابع بوده، به طوری که بهترین مقدار توابع هدف حاصل شود.

الگوریتم NSGA-III تفاوت اصلی در استفاده از نقطه‌های مرجع دارد که به پخش شدن یکنواخت جواب‌ها روی مرز پارتو کمک می‌کند. اجزای اصلی الگوریتم شامل موارد زیر می‌باشد:

- ایجاد جمعیت اولیه
- ارزیابی توابع هدف
- مرتب‌سازی بر اساس عدم سلطه
- Crowding distance یا استفاده از نقاط مرجع برای انتخاب بهتر
- انتخاب والدین، تولید فرزندان با crossover و mutation
- ترکیب والدین و فرزندان جهت انتخاب بهترین‌ها برای نسل بعد

همچنین پیاده سازی الگوریتم PSO در این مقاله، از رویکرد کدگذاری

**جدول ۳. مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-III.**

**Table 3. Values of NSGA-III algorithm parameters.**

| پارامتر | تعریف | مقادیر | | |
|---|---|---|---|---|
| Npop | تعداد جمعیت اولیه | ۵۰ | ۸۰ | ۱۰۰ |
| Max_iteration | تعداد نسل ها (تکرار) | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰ |
| Cross_rate | نرخ عملگر تقاطع | ۰/۵ | ۰/۷ | ۰/۹ |
| Mut_rate | نرخ عملگر جهش | ۰/۵ | ۰/۳ | ۰/۱ |

عددی برای ترتیب و مد فعالیت‌ها استفاده شده و تخطی از محدودیت‌ها با اعمال جریمه در تابع هدف، مدیریت شده است. مراحل اجرایی اجرای این الگوریتم نیز به شرح زیر می‌باشد:

- تولید اولیه ذرات (جمعیت اولیه با توزیع تصادف)
- محاسبه توابع هدف برای هر ذره
- به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات
- اعمال محدودیت‌ها و ارزیابی ذرات
- ثبت بهترین موقعیت‌های فردی و جمعی
- تکرار مراحل تا رسیدن به شرط توقف

برای تنظیم پارامترهای هر دو الگوریتم، مطابق جدول (۳) مقادیر مختلفی بازای هر پارامتر در نظر گرفته شده است.

در ادامه با استفاده از روش سعی و خطا براساس مقادیر تابع هدف، بهترین مقدار برای هر یک از آنها بدست آمده و در جدول (۴) گزارش شده است.

**جدول ۴. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم PSO و NSGAIII**

**Table 4. Optimal values of PSO and NSGAIII algorithm parameters**

| پارامتر | بهترین مقدار | |
|---|---|---|
| | PSO | NSGA-III |
| Npop | ۱۵۰ | ۱۰۰ |
| Max_iteration | ۲۰۰ | ۲۰۰ |
| Cross_rate | ۰/۸ | ۰/۷ |

## ۴- بحث و نتایج

### ۴- ۱- بهینه سازی حالت اول

مدل پیشنهادی با استفاده از دو الگوریتم PSO و NSGA-III بهینه‌سازی گردیده است. با توجه به مقادیر منابع روزانه در دسترس جدول (۵) در کد مربوطه در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و حل شده است. جواب‌های پارتو بدست آمده از دو الگوریتم در جدول (۵) گزارش شده است.

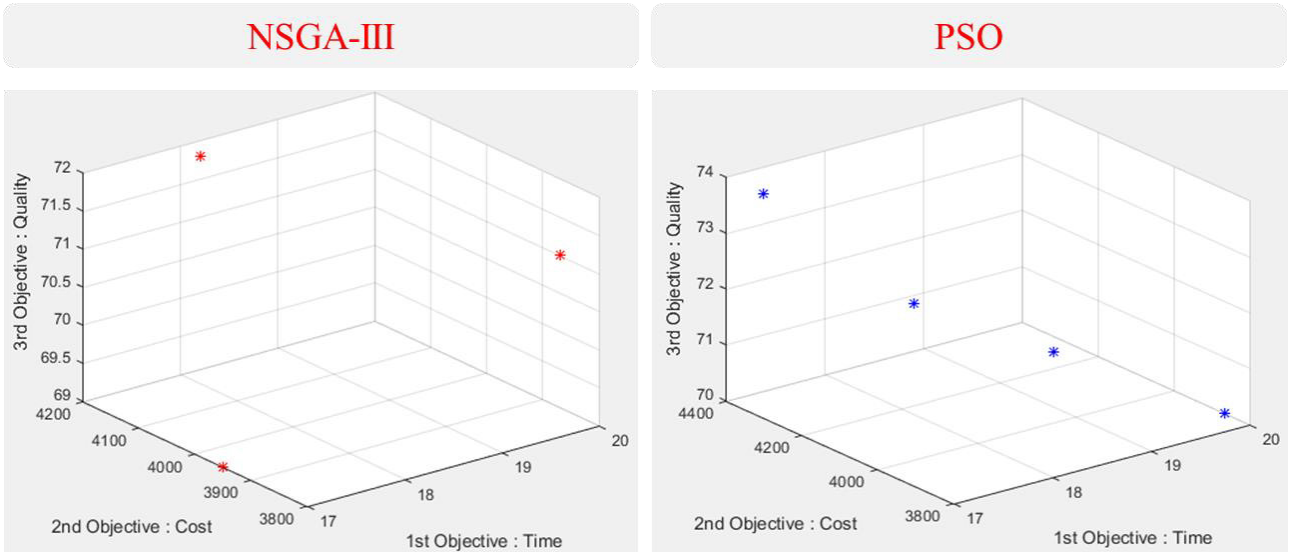
همانطورکه در جدول (۵) نشان داده شده، الگوریتم NSGA-III قادر به پیدا کردن سه جواب نامغلوب شده است درحالی‌که با استفاده از روش PSO چهار جواب پارتو بدست آمده است. از مقایسه دو روش مشاهده می‌گردد که جواب‌های بدست آمده تقریبا به هم نزدیک بوده و حتی در یک مورد دقیقا یکسان بوده است. این امر نشان‌دهنده عملکرد صحیح دو الگوریتم فرابتکاری پیشنهادی می‌باشد. با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود که کمترین زمان، هزینه و بیشترین کیفیت به ترتیب برابر ۱۷ روز، ۴۳۰۴ میلیون ریال و ۷۴ درصد می‌باشند. همچنین شکل (۲) جواب‌های بدست آمده از دو الگوریتم NSGA-III و PSO را نمایش می‌دهند.

همچنین نتایج مربوط به توالی انجام فعالیت‌ها، حالت‌های اجرایی انتخابی و زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها برای حالت اول بدست آمده از الگوریتم NSGA-III در جدول (۶) مشخص شده است.

جدول ۵. نتایج بدست آمده از حل مسئله نمونه در حالت اول توسط دو روش پیشنهادی.

Table 5. Results obtained from solving the sample problem in the first case by the two proposed methods

| جواب | جواب بدست آمده از NSGA-III | | | جواب بدست آمده از PSO | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | زمان (روز) | هزینه (میلیون ریال) | کیفیت (درصد) | زمان (روز) | هزینه (میلیون ریال) | کیفیت (درصد) |
| ۱ | ۲۰ | ۳۸۷۰ | ۷۱ | ۲۰ | ۳۸۶۵ | ۷۰ |
| ۲ | ۱۸ | ۴۱۶۵ | ۷۲ | ۱۹ | ۴۰۵۷ | ۷۱ |
| ۳ | ۱۷ | ۳۹۵۰ | ۶۹ | ۱۸ | ۴۱۶۵ | ۷۲ |
| ۴ | - | - | - | ۱۷ | ۴۳۰۴ | ۷۴ |




شکل ۲. جواب بدست آمده از الگوریتم PSO و NSGA-III برای حالت اول مسئله نمونه

Fig. 2. The solution obtained from the PSO and NSGA-III algorithms for the first case of the sample problem.

جدول ۶. اطلاعات مربوط به جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III برای حالت اول.

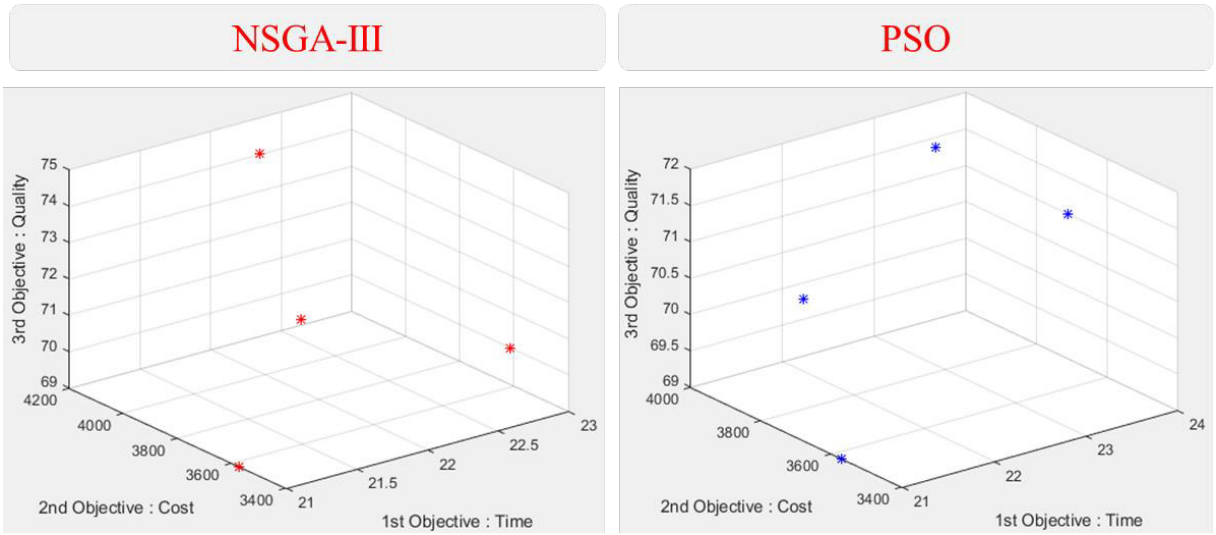
Table 6. Information related to solution number 1 obtained from the NSGA-III algorithm for the first case.

| | فعالیت‌ها | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| توالی فعالیت ها | ۲ | ۵ | ۱ | ۴ | ۷ | ۹ | ۳ | ۶ | ۸ | ۱۰ |
| مد انتخابی فعالیت | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۲ |
| زمان انجام فعالیت | ۳ | ۳ | ۴ | ۴ | ۲ | ۴ | ۴ | ۲ | ۳ | ۳ |
| زمان شروع | ۰ | ۳ | ۰ | ۴ | ۹ | ۱۱ | ۴ | ۱۰ | ۱۴ | ۱۷ |
| زمان پایان | ۳ | ۶ | ۴ | ۸ | ۱۱ | ۱۵ | ۸ | ۱۲ | ۱۷ | ۲۰ |

جدول ۷. نتایج بدست آمده از حل مسئله نمونه در حالت اول توسط دو روش پیشنهادی.

Table 7.Results obtained from solving the sample problem in the first case by the two proposed methods.

| جواب | جواب بدست آمده از NSGA-III | | | جواب بدست آمده از PSO | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | زمان (روز) | هزینه (میلیون ریال) | کیفیت (درصد) | زمان (روز) | هزینه (میلیون ریال) | کیفیت (درصد) |
| ۱ | ۲۳ | ۳۶۱۳ | ۷۰ | ۲۴ | ۳۷۱۰ | ۷۱ |
| ۲ | ۲۲ | ۳۸۶۴ | ۷۱ | ۲۳ | ۳۸۲۵ | ۷۲ |
| ۳ | ۲۲ | ۴۰۲۰ | ۷۵ | ۲۲ | ۳۹۴۱ | ۷۰ |
| ۴ | ۲۱ | ۳۵۷۲ | ۶۹ | ۲۱ | ۳۵۷۲ | ۶۹ |




شکل ۳. جواب بدست آمده از الگوریتم NSGA-III و PSO برای حالت دوم مسئله نمونه

Fig. 3. The solution obtained from the NSGA-III and PSO algorithms for the second case of the sample problem.

### ۴- ۲- بهینه سازی حالت دوم

در این بخش میزان منابع در دسترس روزانه در حالت دوم مطابق جدول ۴-۵ در نظر گرفته شده و اطلاعات مربوطه در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و مسئله نمونه حل شده است. جواب‌های پارتو بدست آمده از دو الگوریتم در جدول (۷) ارائه شده است.

مطابق جدول (۷) مشاهده می‌گردد که تعداد جواب‌های بدست آمده از هر دو روش برابر ۴ بوده است. از مقایسه دو روش مشاهده می‌گردد که جواب‌های بدست آمده تقریبا به هم نزدیک بوده و حتی در یک مورد دقیقا یکسان بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین زمان، هزینه و بیشترین کیفیت به ترتیب برابر ۲۱ روز، ۳۵۷۲ میلیون ریال و ۷۵ درصد می‌باشند. همچنین شکل (۳) جواب‌های بدست آمده از دو الگوریتم NS-GA-III و PSO را نمایش می‌دهند.

هچنین نتایج مربوط به توالی انجام فعالیت‌ها، حالت‌های اجرایی انتخابی و زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها برای جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III در جدول (۸) مشخص شده است.

**جدول ۸. اطلاعات مربوط به جواب شماره ۱ بدست آمده از الگوریتم NSGA-III برای حالت دوم.**

**Table 8. Information related to solution number 1 obtained from the NSGA-III algorithm for the second case.**

| | فعالیت‌ها | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **توالی فعالیت ها** | ۲ | ۳ | ۶ | ۱ | ۴ | ۷ | ۹ | ۵ | ۸ | ۱۰ |
| **مد انتخابی فعالیت** | ۲ | ۳ | ۱ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ |
| **زمان انجام فعالیت** | ۳ | ۴ | ۲ | ۵ | ۲ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ |
| **زمان شروع** | ۰ | ۰ | ۹ | ۲ | ۸ | ۱۰ | ۱۳ | ۳ | ۱۶ | ۱۹ |
| **زمان پایان** | ۳ | ۴ | ۱۱ | ۷ | ۱۰ | ۱۳ | ۱۷ | ۷ | ۱۹ | ۲۲ |

### ۴- ۳- مقایسه دو الگوریتم NSGA-III و PSO

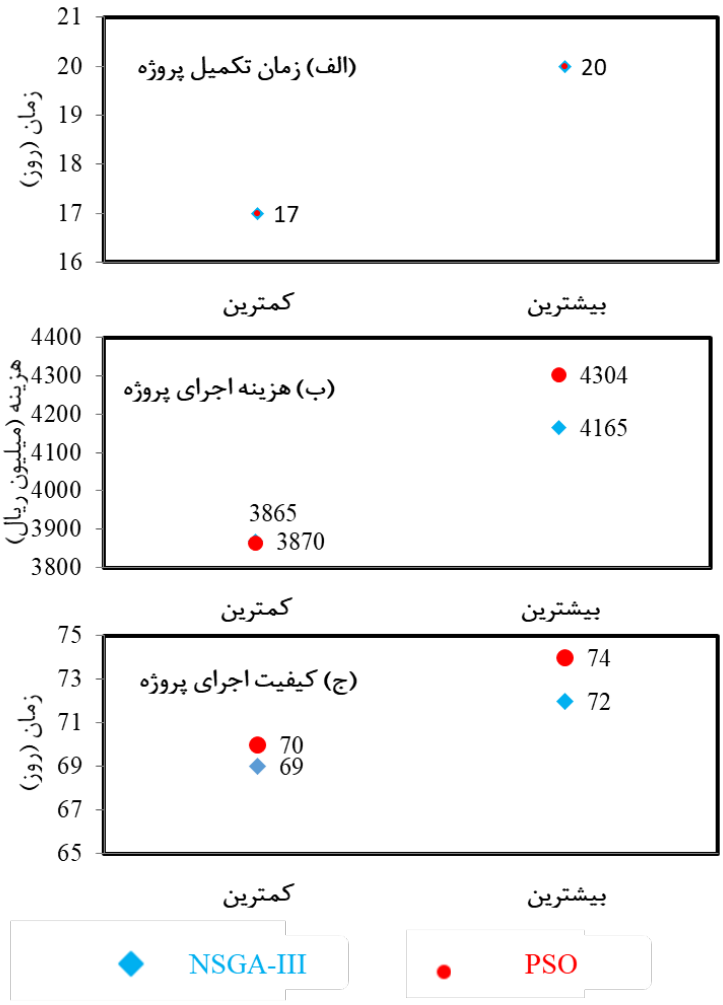
براساس نتایج بدست آمده در این بخش، دو الگوریتم پیشنهادی براساس توابع هدف با یکدیگر مقایسه می‌گردند. شکل (۴) بهترین و بدترین مقادیر بدست آمده از توابع هدف این مطالعه (زمان تکمیل پروژه، هزینه اجرای پروژه و کیفیت اجرای پروژه) نشان می‌دهد.

همانطورکه در شکل (۴) الف مشاهده می‌شود، هر دو الگوریتم در این تابع هدف به یک شکل عمل کرده‌اند، طوریکه کمترین و بیشترین زمان تکمیل بدست آمده از هر دو روش یکسان بوده است. به جهت هزینه اجرایی نیز الگوریتم PSO کمی بهتر عمل کرده و جوابی با هزینه‌ای نسبتا کمتر از الگوریتم NSGA-III بدست آورده است. البته در مقابل بیشترین هزینه نیز از همین الگوریتم بدست آمده است. به عبارت دیگر می‌توان گفت پراکندگی جواب بدست آمده از روش PSO به ازای این تابع هدف بیشتر بوده است. در ادامه نیز کیفیت اجرای پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تابع هدف نیز الگوریتم PSO عملکرد بهتری داشته و توانسته جواب‌هایی با سطح کیفی بالاتری بدست آورد. از مقایسه سه تابع هدف و نتایج بدست آمده می‌توان بیان نمود که الگوریتم PSO جواب‌های بهتری نسبت به NSGA-III بدست آورده است (شکل (۴) ج).

نمودار پارتو سه‌بعدی حاصل از اجرای الگوریتم‌های PSO و NSGA-III، با در نظر گرفتن سه تابع هدف شامل زمان تکمیل پروژه، هزینه اجرای پروژه و کیفیت اجرای فعالیت‌ها، تصویری جامع از عملکرد این دو الگوریتم در شرایط مختلف منابع ارائه می‌دهد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-III در هر دو حالت منابع توانسته پاسخ‌هایی با زمان‌های نسبتاً پایین و هزینه‌های قابل قبول ارائه دهد؛ به‌ویژه در حالت دوم که کمترین هزینه (۳۵۷۲ میلیون ریال) برای زمان ۲۱ روز و کیفیت ۶۹٪ حاصل شده است. با این حال، PSO در حالت اول توانسته پاسخ‌هایی با کیفیت بالاتر (تا ۷۴٪) برای همان زمان (۱۷ روز) تولید کند، اگرچه هزینه در این حالت بیشتر (۴۳۰۴ میلیون ریال) بوده است. نکته قابل توجه در پاسخ‌های PSO، تنوع بالاتر در پارتوها و توانایی آن در تولید ترکیب‌هایی با تعادل مناسب میان سه هدف مورد نظر است، به‌گونه‌ای که در برخی موارد پاسخ‌هایی با کیفیت بالا و هزینه متوسط نیز مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، NSGA-III در ارائه پاسخ‌های متعادل عملکردی یکنواخت‌تر دارد، اما در دستیابی به حداکثر کیفیت، به‌ویژه در حالت اول منابع، نسبت به PSO عملکرد ضعیف‌تری داشته است. به‌طور کلی، اگر اولویت تصمیم‌گیرنده بر کیفیت اجرای پروژه باشد، پاسخ‌های PSO در حالت اول توصیه می‌شود، اما اگر محدودیت بودجه حاکم باشد، خروجی NSGA-III در حالت دوم می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. بنابراین، هر دو الگوریتم در شرایط خاص خود قابلیت ارائه پاسخ‌های بهینه را داشته و تصمیم‌گیرنده می‌تواند بسته به اولویت‌های استراتژیک پروژه، از میان پاسخ‌های پارتو یکی را انتخاب نماید.

جدول (۹) جمع بندی از پاسخ‌های الگوریتم‌ها در حل مسئله ارائه نموده است. اگر کیفیت اولویت دارد (مثلاً در پروژه‌های حساس یا زیربنایی)، پاسخ‌های PSO مناسب‌تر است. با این حال، اگر هدف، کاهش هزینه در منابع محدودتر است، پاسخ NSGA-III در حالت دوم مزیت دارد. همچنین جواب‌های پارتو اجازه می‌دهند تصمیم‌گیر با توجه به سیاست سازمان، یکی از گزینه‌ها را برگزینند.

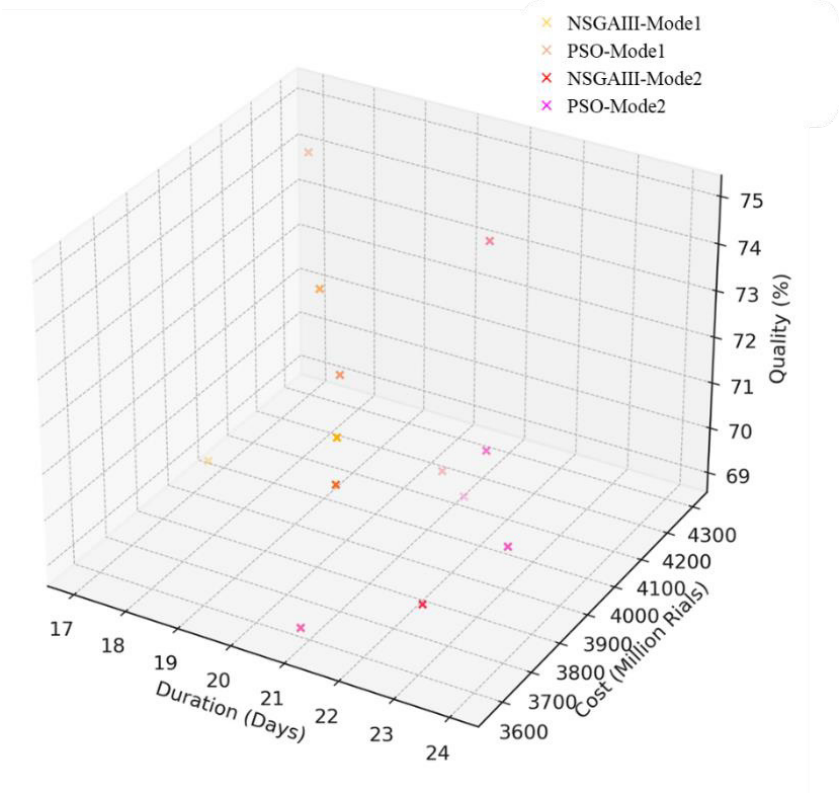
بررسی رفتار الگوریتم‌ها نشان داد که PSO به‌واسطه‌ی سازوکار یادگیری جمعی و حرکت جهت‌دار حول بهترین‌های سراسری، در چشم‌انداز




**شکل ۴. ارزیابی کیفیت بدست آمده از دو روش پیشنهادی.**

**Fig. 4. Quality assessment obtained from the two proposed methods.**

نسبتاً نرمِ تابع کیفیت، توان بهره‌برداری بالاتری داشته است. نگاشت پیوسته به گسسته‌ی بردارهای سرعت به فضای حالت‌های اجرایی نیز جهش‌های ساختاری هماهنگی را ممکن می‌سازد که دسترسی به ترکیبات با کیفیت بالا با افزایش اندک زمان/هزینه را تسریع می‌کند. در نتیجه، در سناریوی منابعِ نسبتاً نامحدود، PSO جبهه‌های پارتویی با کیفیت برتر ارائه کرده است. در نقطه مقابل، در سناریوی منابعِ محدود که فضای شدنی باریک و ناهموار است، NSGA-III به‌کمک سازوکار انتخاب مبتنی بر بردارهای مرجع و حفظ تنوع جهت‌مند، توانست افراد شدنیِ کم‌هزینه را در جمعیت نگه دارد و با جهش‌های کوچک ژنتیکی آن‌ها را به‌صورت تدریجی بهبود دهد. این ویژگی باعث شد NSGA-III در بُعد هزینه، به‌ویژه تحت محدودیت‌های شدید روزانه، عملکرد بهتری نسبت به PSO داشته باشد. همچنین، نتایج مطالعه نشان داد که پارامترهای کنترلی الگوریتم‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت راه‌حل‌های به‌دست‌آمده دارند. به‌عنوان نمونه، در الگوریتم NSGA-III افزایش اندازه جمعیت باعث پوشش یکنواخت‌تر جبهه پارتو و شناسایی نقاط کم‌هزینه‌تر شد، در حالی‌که نرخ جهش بالا، هرچند تنوع جمعیت را تقویت کرد، اما گاه موجب کاهش سرعت همگرایی گردید. در مقابل، الگوریتم PSO نسبت به اندازه جمعیت حساسیت کمتری داشت، اما پارامترهای وزن اینرسی و ضرایب یادگیری تأثیر مستقیمی بر توانایی الگوریتم در دستیابی به راه‌حل‌های با کیفیت بالاتر داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب پارامترها برای هر الگوریتم می‌تواند اولویت‌های متفاوتی در میان سه هدف مورد نظر برجسته سازد. با این حال، مدل پیشنهادی نیز با محدودیت‌هایی مواجه است؛ از جمله فرض ثبات نرخ منابع در کل افق زمانی، عدم




**شکل ۵. نمودار جواب های پارتو مقایسه برای دو حالت مستخرج شده از جدول ۵ و۷.**

**Fig. 5. Comparison Pareto solutions diagram for two cases extracted from Tables 5 and 7.**

**جدول ۹. تشریح پاسخ‌های پارتو در بهینه سازی مسئله.**

**Table 9. Description of Pareto solutions in optimization problem.**

| الگوریتم برتر | معیار |
|---|---|
| هر دو PSO و NSGA-III با ۱۷ روز | کمترین زمان |
| NSGA-III در حالت دوم (۳۵۷۲ میلیون ریال) | کمترین هزینه |
| PSO در حالت اول با ۷۴٪ | بیشترین کیفیت |
| PSO برتر است | تنوع پاسخ‌های پارتو |
| هر دو قابل قبول، PSO کمی انعطاف‌پذیرتر | پایداری در شرایط مختلف منابع |

درنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های واقعی پروژه مانند تأخیرهای پیش‌بینی‌نشده یا تغییرات ناگهانی هزینه‌ها، و همچنین پیچیدگی محاسباتی بالای مدل که اجرای آن را در پروژه‌های بسیار بزرگ یا با منابع متنوع‌تر دشوار می‌سازد. این محدودیت‌ها می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات آینده برای توسعه مدل‌های کاراتر و واقع‌گرایانه‌تر باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل زمان‌بندی پروژه با فعالیت‌های چندحالته و منابع محدود ارائه شده است. در این مطالعه، سه تابع هدف اصلی شامل کمینه‌سازی زمان، کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی کیفیت را به‌صورت هم‌زمان بهینه نموده تا مدلی با در نظر گرفتن حالت‌های اجرایی مختلف برای فعالیت‌ها، منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر روزانه ارائه شود. در این فرایند بهینه‌سازی فرا ابتکاری پیچیدگی‌های واقعی پروژه‌های ساختمانی به‌صورت دقیق‌تری بررسی و مدل‌های توسعه داده شده با پیاده‌سازی الگوریم‌های NSGA-III و PSO بهینه سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر دو سناریوی متفاوت از محدودیت منابع نشان داد که هر دو الگوریتم توانایی تولید مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو با تعادل‌های گوناگون میان سه هدف مورد نظر را داشته اند. به‌طور خاص، الگوریتم PSO در تولید پاسخ‌هایی با کیفیت بالاتر عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داد، در حالی که NSGA-III توانست پاسخ‌هایی با هزینه پایین‌تر در شرایط منابع محدود ارائه دهد. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از مدل چندهدفه پیشنهادی می‌تواند ابزار تصمیم‌گیری مؤثری برای مدیران پروژه باشد تا بر اساس اولویت‌های راهبردی پروژه، از میان پاسخ‌های پارتو گزینه بهینه را انتخاب نمایند. همچنین، در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت به‌صورت مستقل، یکی از نوآوری‌های اصلی این تحقیق است که به تصمیم‌گیری واقع‌بینانه‌تر در پروژه‌های واقعی کمک شایانی خواهد نمود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای مدیران پروژه در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این‌که مدل پیشنهادی سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را به‌صورت همزمان در نظر می‌گیرد، مدیران قادر خواهند بود جبهه‌ای از راه‌حل‌های پارتو را مشاهده کرده و بر اساس اولویت‌های استراتژیک سازمان، گزینه‌ی مناسب را انتخاب کنند. برای مثال، در شرایطی که کیفیت ساخت اهمیت بالاتری دارد (مانند پروژه‌های عمرانی با الزامات ایمنی یا دوام بلندمدت)، می‌توان از پاسخ‌های حاصل از الگوریتم PSO بهره برد که کیفیت بالاتری را فراهم می‌سازد. در مقابل، در پروژه‌هایی با محدودیت شدید مالی، راه‌حل‌های ارائه‌شده توسط NSGA-III می‌تواند گزینه بهتری باشد. همچنین مدیران پروژه می‌توانند با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، اثرات تغییر در تخصیص منابع یا انتخاب حالت‌های اجرایی مختلف برای فعالیت‌ها را پیش‌بینی کنند و قبل از شروع اجرا، تصمیم‌های بهینه‌تری اتخاذ نمایند. این ویژگی به کاهش ریسک شکست پروژه و افزایش احتمال دستیابی به اهداف کلیدی کمک می‌کند. با وجود دستاوردهای قابل توجه، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است. نخست، مدل ارائه‌شده منابع را ثابت و قطعی در طول افق زمانی پروژه فرض می‌کند، در حالی‌که در پروژه‌های واقعی، منابع ممکن است تحت تأثیر عواملی چون تأخیر در تأمین مصالح یا نوسانات مالی تغییر کنند. دوم، اثر عدم‌قطعیت‌ها (مانند تغییرات ناگهانی در هزینه‌ها یا وقوع ریسک‌های پیش‌بینی‌نشده) در مدل لحاظ نشده است. سوم، پیچیدگی محاسباتی مدل در پروژه‌های بزرگ با تعداد زیاد فعالیت‌ها و حالت‌های اجرایی، زمان پردازش بالایی ایجاد می‌کند که می‌تواند استفاده عملی آن را در پروژه‌های بسیار عظیم محدود سازد. همچنین تنها دو الگوریتم فرابتکاری (PSO و NSGA-III) بررسی شده‌اند و امکان دارد سایر الگوریتم‌ها یا رویکردهای ترکیبی عملکرد متفاوتی ارائه دهند. این محدودیت‌ها زمینه‌ای برای تحقیقات آتی فراهم می‌سازد تا مدل‌های کاراتر و واقع‌بینانه‌تر توسعه یابند و با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها و روش‌های محاسباتی سریع‌تر، قابلیت استفاده عملی بیشتری در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس پیدا کنند.

## منابع


[1] Merkle, D., Middendorf, M., & Schmeck, H. (2002). Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(4), 333-346.

[2] Zhang, H., Li, H., & Tam, C. M. (2006). Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling. International journal of project management, 24(1), 83-92.

[3] Zhang, H., Li, X., Li, H., & Huang, F. (2005). Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. Automation in construction, 14(3), 393-404.

[4] Rogalska, M., Bożejko, W., & Hejducki, Z. (2008). Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm

in construction project scheduling. Automation in Construction, 18(1), 24-31.

[5] Balouka, N., & Cohen, I. (2021). A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. European journal of operational research, 291(2), 457-470.

[6] Wang, L., & Zheng, X. L. (2018). A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. Swarm and Evolutionary Computation, 38, 54-63.

[7] Guo, K., & Zhang, L. (2022). Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions. Automation in Construction, 139, 104256.

[8] Xie, L. L., Chen, Y., Wu, S., Chang, R. D., & Han, Y. (2024). Knowledge extraction for solving resource-constrained project scheduling problem through decision tree. Engineering, Construction and Architectural Management, 31(7), 2852-2877.

[9] Yu, Ze, Chuxin Wang, Yuanyuan Zhao, Zhiyuan Hu, and Yuanjie Tang. "Linear Project-Scheduling Optimization Considering a Reverse Construction Scenario." Applied Sciences 13, no. 16 (2023): 9407.

[10] Zohrehvandi, M., Zohrehvandi, S., Khalilzadeh, M., Amiri, M., Jolai, F., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2024). A Multi-Objective Mathematical Programming Model for Project-Scheduling Optimization Considering Customer Satisfaction in Construction Projects. Mathematics, 12(2), 211.

[11] Ashrafian, A., Behnood, A., Golafshani, E. M., Panahi, E., & Berenjian, J. (2024). Toward presenting an ensemble meta-model for evaluation of pozzolanic mixtures incorporating industrial by-products. Structural Concrete, 25(2),

[12] Fan, Su-Ling, Kuo-Shun Sun, and Yu-Ren Wang. "GA optimization model for repetitive projects with soft logic." Automation in Construction 21 (2012): 253-261.

[13] Pawiński, Grzegorz, and Krzysztof Sapiecha. "Resource allocation optimization in critical chain method." Annales UMCS, Informatica. Vol. 12. No. 1. (2012).

[14] Singh, Amol. "Resource constrained multi-project scheduling with priority rules & analytic hierarchy process." Procedia Engineering 69 (2014): 725-734.

[15] Peng, L., and P. Wuliang. "An Efficient Simulation Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling Problem." Open Mechanical Engineering Journal 8 (2014): 9-13.

[16] Abdolshah, Mohammad. "A Review of Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Approaches and Solutions." (2014).

[17] Ali, Ismail M., et al. "A Differential Evolution Algorithm for Solving Resource Constrained Project Scheduling Problems." Australasian Conference on Artificial Life and Computational Intelligence. Springer International Publishing, (2016).

[18] B. Khang, A. Ming, H. genetic algorithm for mode identity and the resource constrained project scheduling problem, Sci. Iran. 20 (3) (2017) 824–831.

[19] H. Zhang, C. Tam, H. Li, Multi-mode project scheduling based on particle swarm optimization, Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng. 21 (201) 93–103.

[20] A. Tavana, S. Colak, S. Erenguc, A neurogenetic approach for the resource constrained project scheduling problem, Comput. Oper. Res. 38 (1) (2019) 44–50.

[21] Lazari, V., Chassiakos, A., & Karatzas, S. (2024). Multi-objective resource-constrained scheduling in large and repetitive construction projects. Algorithms, 17(8), 351. https://doi.org/10.3390/a17080351

[22] Zhou, J., Tang, Y., & Tian, Y. (2025). Multi-Objective Trade-Offs for Construction Projects with Dual Constraints of Schedule Risk and Resources Under a Risk-Driven Perspective. Sustainability, 17(5), 1926.

[23] Zhang, H., Li, H., & Tam, C. M. (2012). Impact of quality management on project cost performance. Construction Management and Economics, 30(7), 565-578.

[24] Khamooshi, H., & Golafshani, H. (2014). EDM: Earned duration management, a new approach to schedule performance management and measurement.

International Journal of Project Management, 32(6), 1019-1041.

[25] Assaf, S., & Hassanain, M. (2019). Causes of quality failures in building construction projects. Journal of Building Engineering, 20, 101-112.

[26] Shao, X., Li, P., & Ding, L. (2020). A multi-objective optimization model for construction project scheduling considering quality, time and cost. Automation in Construction, 113, 103138

[27] Marini, F., & Walczak, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 149, 153-165.

[28] Ishibuchi, H., Imada, R., Setoguchi, Y., & Nojima, Y. (2016, July). Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems. In 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) (pp. 3045-3052). IEEE.

[29] Zhang, L., Du, J., & Zhang, S. (2014). Solution to the time-cost-quality trade-off problem in construction projects based on immune genetic particle swarm optimization. Journal of Management in Engineering, 30(2), 163-172.

[30] Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects. Expert systems with applications, 42(6), 3089-3104.

[31] Teymourifar, A., Rodrigues, A. M., & Ferreira, J. S. (2020, July). A comparison between NSGA-II and NSGA-III to solve multi-objective sectorization problems based on statistical parameter tuning. In 2020 24th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC) (pp. 64-74). IEEE.

[32] Gu, Q., Xu, Q., & Li, X. (2022). An improved NSGA-III algorithm based on distance dominance relation for many-objective optimization. Expert Systems with Applications, 207, 117738.

[33] Sedaghat Shayegan D. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using a metaheuristic algorithm, Int J Optim Civil Eng 2022; 12(4): 545-55.

[34] Saberi AA, Sedaghat Shayegan D (2021) Optimization of Haraz Dam reservoir operation using CBO metaheuristic algorithm. Journal Int J Optim Civ Eng 11(4):599–610. https:// doi. org/ 10. 13140/RG.2. 2. 14648. 85636

[35] Saberi AA, Ahmadi H, Sedaghat Shayegan D, Amirkardoust A (2023) Prediction of electricity consumption using three meta-heuristic algorithms. Int J Optim Civil Eng. 13(1):111–125

[36] Sedaghat Shayegan D, Lork A, Hashemi AH. optimum cost design of reinforced concrete slabs using Mouth Brooding Fish (MBF) algorithm, J Appl Eng Sci 2020; 10(23): ISSUE 1 ART.NO. 290: pp. 95-100.

[37] Bhesdadiya, R. H., Trivedi, I. N., Jangir, P., Jangir, N., & Kumar, A. (2016). An NSGA-III algorithm for solving multi-objective economic/environmental dispatch problem. Cogent Engineering, 3(1), 1269383.

[38] Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction. Automation in Construction, 19(8), 1067-1075.

**چگونه به این مقاله ارجاع دهیم**

*M. AzizKhani, D. sedaghat shayegan, A. A. Amirkardoost, Development of a Scheduling Model in the Construction Industry Based on Project Quality under Limited Resource Constraints, Amirkabir J. Civil Eng., 57(8) (2025) 1383-1406.*

**DOI:** 10.22060/ceej.2025.23363.8149

## پیوست

**جدول ۱. فعالیت‌ها، پیش‌نیازها، گزینه‌های اجرایی و میزان منابع مورد نیاز برای اجرای هر فعالیت (ادامه دارد)**

**Table 1. Activities, prerequisites, implementation options and the amount of resources required to implement each activity. (Continued)**

| فعالیت | پیشنیاز | حالت | زمان | روزشمار | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 | کیفیت q | ارزش افزوده Ev |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۱ | ۳ | ۱ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۴ | ۲ | ۵۰ | ۷۰ |
| | | | | ۲ | ۴ | ۳ | ۳ | ۴ | ۳ | ۲ | | |
| | | | | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۵ | ۰ | | |
| | | ۲ | ۴ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | ۳ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۳ | ۲ | ۲ | ۱ | ۳ | ۰ | | |
| | | ۳ | ۵ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۰ | ۱ | ۳ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۱ | ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | | |
| | | | | ۵ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۰ | | |
| ۲ | ۰ | ۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۴۵ | ۶۰ |
| | | | | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۰ | ۲ | ۰ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۶۵ | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | | |
| ۳ | ۰ | ۱ | ۲ | ۱ | ۳ | ۳ | ۴ | ۳ | ۴ | ۳ | ۴۰ | ۸۰ |
| | | | | ۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ | ۶۰ | |
| | | | | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| | | ۴ | ۴ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۸۰ | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | | |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۲ | ۴ | ۴ | ۴ | ۲ | ۶۵ | ۷۰ |
| | | | | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۴ | ۳ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۰ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۸۵ | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | | |
| ۵ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ | ۵ | ۴ | ۵ | ۴ | ۳ | ۳ | ۹۰ | ۸۵ |
| | | | | ۲ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۳ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۴ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۲ | ۷۰ | |
| | | | | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | | |
| | | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۵۵ | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | | |

**جدول ۱. فعالیت‌ها، پیش‌نیازها، گزینه‌های اجرایی و میزان منابع مورد نیاز برای اجرای هر فعالیت.**

**Table 1. Activities, prerequisites, implementation options and the amount of resources required to implement each activity.**

| فعالیت | پیشنیاز | حالت | زمان | روزشمار | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 | کیفیت q | ارزش افزوده Ev |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶ | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۵ | ۴ | ۰ | ۱ | ۴ | ۱ | ۶۰ | ۸۰ |
| | | | | ۲ | ۴ | ۳ | ۰ | ۰ | ۲ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۲ | ۱ | ۰ | ۵ | ۴ | ۲ | ۴ | ۳ | ۷۰ | |
| | | | | ۲ | ۰ | ۴ | ۴ | ۱ | ۳ | ۲ | | |
| ۷ | ۴ | ۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۵ | ۳ | ۲ | ۴۵ | ۷۰ |
| | | | | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۶۵ | |
| | | | | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۲ | ۱ | ۱ | | |
| ۸ | ۵و۶ | ۱ | ۳ | ۱ | ۳ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۲ | ۸۵ | ۸۵ |
| | | | | ۲ | ۳ | ۳ | ۲ | ۱ | ۲ | ۰ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | | |
| ۹ | ۷ | ۱ | ۲ | ۱ | ۶ | ۵ | ۴ | ۶ | ۴ | ۲ | ۶۵ | ۹۰ |
| | | | | ۲ | ۴ | ۵ | ۶ | ۵ | ۴ | ۱ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۲ | ۱ | ۷۵ | |
| | | | | ۲ | ۲ | ۴ | ۳ | ۳ | ۲ | ۱ | | |
| | | | | ۳ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ | | |
| | | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۹۰ | |
| | | | | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۱ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۱ | ۰ | | |
| | | | | ۴ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | | |
| ۱۰ | ۸ | ۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۵ | ۳ | ۲ | ۸۵ | ۸۰ |
| | | | | ۲ | ۳ | ۳ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | | |
| | | ۲ | ۳ | ۱ | ۳ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۶۵ | |
| | | | | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۲ | ۰ | | |
| | | | | ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | | |

**جدول ۲. منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دسترس روزانه ( حالت اول ).**

**Table 2. Renewable and non-renewable resources available daily (first case).**

| روز | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 5 | 5 | 5 | 11 | 7 |
| 2 | 7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 3 |
| 3 | 7 | 5 | 5 | 5 | 12 | 6 |
| 4 | 7 | 5 | 5 | 5 | 11 | 7 |
| 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| 6 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 5 |
| 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 8 | 6 | 3 | 4 | 2 | 9 | 6 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 6 |
| 10 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 4 |
| 11 | 8 | 7 | 5 | 8 | 7 | 4 |
| 12 | 7 | 7 | 8 | 5 | 6 | 4 |
| 13 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 14 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 15 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 16 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 17 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 18 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 19 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 20 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 21 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 22 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 23 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 24 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 25 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 26 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 27 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 28 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 29 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 30 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 31 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 32 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 33 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 34 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 35 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 36 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 37 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 38 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| 39 | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 |

**جدول ۳. منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در دسترس روزانه ( حالت دوم).**

**Table 3. Renewable and non-renewable resources available daily (second case).**

| روز | NR1 | NR2 | NR3 | NR4 | R1 | R2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 6 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 7 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 8 | 4 | 3 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 9 | 4 | 3 | 5 | 6 | 15 | 8 |
| 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 15 | 8 |
| 11 | 8 | 6 | 5 | 5 | 15 | 8 |
| 12 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 13 | 6 | 8 | 8 | 12 | 15 | 8 |
| 14 | 10 | 12 | 11 | 10 | 15 | 8 |
| 15 | 4 | 3 | 3 | 3 | 15 | 8 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 8 |