System Engineering and Productivity/ 2026/ Vol.6/ No.1/ 251-271

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2067829.1372

Design of a Preventive Maintenance Mathematical Model for High-speed Press Machines

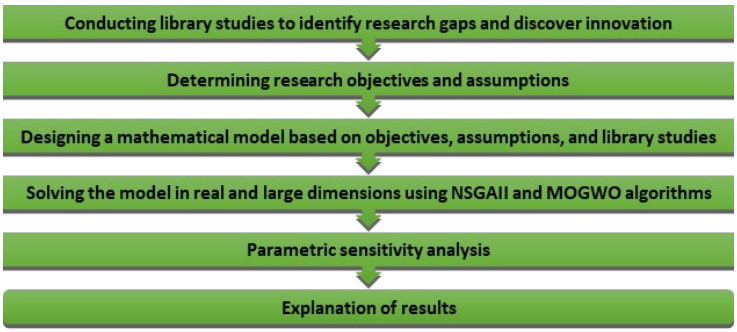
Kazem Ramezani[1], Mohammad Hossein Darvish Motevalli[2,*], Majid Motamedi[3], Mohammad Mehdi Movahedi[4]

[1] Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Ro. C., Islamic Azad University, Rudehen, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Industrial Management, WT. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Industrial Management, Nos. C., Islamic Azad University, Nowshahr, Iran
[4] Associate Professor, Department of Industrial Management, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Presenting a novel preventive maintenance model for a high-speed press machine
- Modeling the multi-objective optimization problem using metaheuristic algorithms
- Reducing maintenance costs and downtime

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 4 August 2025
Revised: 27 August 2025
Accepted: 12 September 2025
Available online: 13 September 2025
*Correspondence: mhd.darvish@iau.ac.ir
How to cite this article:
Ramezani, K., Motevalli, M. H. D., Motamedi, M., & Movahedi, M. M. (2026). Design of a preventive maintenance mathematical model for high-speed press machines. *System Engineering and Productivity*, 6 (1), 251-271.

Keywords:
Preventive maintenance
Multi-objective optimization
NSGA-II algorithm
Gray Wolf algorithm
High-speed press machine

ABSTRACT

In modern manufacturing systems, preventive maintenance is recognized as a key strategy for optimizing performance and reducing costs. This research aims to develop a novel preventive maintenance model for high-speed press machines. The proposed model, considering operational constraints and targeting the minimization of time and cost while maximizing reliability, is formulated as a multi-objective optimization problem. To solve this problem, the metaheuristic algorithms NSGA-II and Grey Wolf Optimizer have been employed, and the model's effectiveness has been evaluated through solving small-scale examples. The results indicate that the proposed model can significantly reduce maintenance costs and simultaneously minimize machine downtime by determining optimal times for preventive maintenance activities. Furthermore, the suggested preventive maintenance model improves system reliability, leading to increased productivity and reduced costs associated with sudden failures. This model can serve as an effective decision-making tool for managers and engineers in various industries.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

In recent years, the accelerating trend of knowledge and technology development at humanity's disposal, coupled with the achievement of new fields in science and technology, has led to the design, construction, and production of complex and sensitive engineering systems and equipment (Ulansky & Raza, 2024). Maintenance is among the fundamental concepts in organizations, and their position is moving and growing, holding a special rank among managers and employees of the organization (Alqaryuti et al., 2025). By implementing preventive maintenance policies, breakdown costs have significantly decreased compared to when no specific policy governed maintenance, were carried out after failure (Shams et al., 2025).

High-speed press machines are considered crucial devices capable of high-volume production, making them profitable for manufacturing plants due to their high speed and productivity. Factories strive to utilize them for profitability. Therefore, the maintenance of these machines is of high importance and always constitute a major concern for production managers in factories that use these machines for producing various products. This paper addresses the optimization of preventive maintenance by presenting a multi-objective linear mathematical model with integer and mixed variables. This model, after mathematical modeling, is validated and tested using real data from a manufacturing plant (as a case study at Khavar Hasste Iranian Company). For this purpose, specialized software in the field of operations research will be utilized. One of the very important aspects in the maintenance unit is preventing emergency shutdowns, with various factors related to the preservation and maintenance of equipment, and the existence of a reliable program. In this study, given sufficient data on preventive maintenance program issues and the sensitivity of this topic, optimization regarding preventive maintenance is addressed, considering various constraints and different objectives, which will have varying degrees of importance depending on different sections of this complex.

2. Methodology

This research, in terms of its objective and outcome, is applied and based on operational research methods, which are carried out through the development of a mathematical model. In terms of execution nature, it is descriptive. The variables in this research are quantitative. This research is considered cross-sectional in terms of time. The current study does not use statistical analysis due to the use of mathematical modeling and the development of a mathematical model, and thus lacks a statistical population and sample. The data for the current research has been collected from the failure information of the high-press machine, and the data collection tool is the failure dataset of this machine. The goal is to provide a model for preventive maintenance for this machine, pursuing three objectives:

- Minimizing cost
- Minimizing time
- Maximizing reliability

These objectives are pursued based on the decision variables of reliability and effective component life. For the press machine, there are various components, and the fundamental assumption is that component replacement is not possible during preventive maintenance, and thus the production system is halted during maintenance.

3. Results and Discussion

In this section, the model presented in the previous section is analyzed. To solve the model, the metaheuristic algorithms NSGAII and Grey Wolf Optimizer have been used. In this stage, first, the model validation is performed, followed by a comparison of the algorithms. Then, the model is solved based on the case study, and finally, a sensitivity analysis of the important and influential parameters is conducted.

4. Conclusions

The proposed model can reduce maintenance costs by determining the maintenance time and, on the other hand, lead to an improvement in downtime and maintenance time, which would otherwise impose a high cost on a system utilizing a high-speed press machine. The system's reliability also increases with the help of the proposed model, and consequently, it can be expected that improved reliability will have a positive impact on the machine's performance. From a managerial insight's perspective, it should be emphasized that given the high importance of the high-speed press machine, preventive maintenance should be prioritized. Planning maintenance based on the model presented in the current research can contribute to improving the model's performance. To enhance the machine's reliability, structured preventive maintenance planning is necessary, and corrective maintenance should be avoided due to its high cost. The absence of preventive maintenance can lead to increased idle time and machine downtime, as the machine may not be usable in case of corrective failure. This can result in significant time being spent on corrective maintenance, thus preventive maintenance should be considered in this regard.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Kazem Ramezani: Conceptual research model, literature review and theoretical background, data

analysis; **Mohammad Hossein Darvish Motevali:** literature review and theoretical background, data analysis, and statistical analysis draft. **Majid Motamedi:** Drafting the manuscript, preliminary review of the report, and research methodology development. **Mohammad Mehdi Movahedi:** Text revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Alqaryuti, A., Moawad, K., Salah, K., Mayyas, A., & Jayaraman, R. (2025). Blockchain-driven framework for preventive maintenance management of aircraft hydraulic systems. *Discover Internet of Things*, *5*(1), 1-25. https://doi.org/10.1007/s43926-025-00149-x

Shams, H., Hashemzadeh Khorasgani, G. R., Abbaspour Esfadan, G., Farsijani, H., & Shahmansouri, A. (2025). Presentation of a mathematical model to examine the economic advantages of maintenance strategies. *System Engineering and Productivity*, *5*(2), 17-33. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264

Ulansky, V., & Raza, A. (2024). A historical survey of corrective and preventive maintenance models with imperfect inspections: Cases of constant and non-constant probabilities of decision making. *Aerospace*, *11*(1), 92. https://doi.org/10.3390/aerospace11010092

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۵/ دوره ۶/ شماره ۱/ صفحه ۲۵۱-۲۷۱

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2067829.1372

طراحی مدل ریاضی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای دستگاه‌های پرس سرعت‌بالا

کاظم رمضانی[۱]، محمدحسین درویش متولی[۲،*]، مجید معتمدی[۳]، محمدمهدی موحدی[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

[۲] استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

[۴] دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- ارائه مدل نوین نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای دستگاه پرس سرعت‌بالا
- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری
- کاهش هزینه‌های نگهداری و زمان ازکارافتادگی

چکیده

در سیستم‌های تولیدی مدرن، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌عنوان یک استراتژی کلیدی برای بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌ها شناخته می‌شود. این پژوهش باهدف توسعه یک مدل نوین نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای دستگاه پرس سرعت‌بالا انجام‌شده است. مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان، به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرموله شده است. برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های فرابتکاری NSGA-II و گرگ خاکستری استفاده‌شده و کارایی مدل از طریق حل نمونه‌های کوچک‌مقیاس مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است با تعیین زمان‌های بهینه برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و درعین‌حال، زمان ازکارافتادگی دستگاه را نیز به حداقل برساند. علاوه بر این، مدل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه پیشنهادی با بهبود قابلیت اطمینان سیستم، منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی‌های ناگهانی می‌شود. این مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری مؤثر برای مدیران و مهندسان در صنایع مختلف مورداستفاده قرار گیرد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

*نویسنده مسئول:

mhd.darvish@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم NSGA-II

الگوریتم گرگ خاکستری

دستگاه پرس سرعت‌بالا

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

در عصر حاضر، بدون تردید یکی از بنیان‌های اساسی در هر سازمان، تجهیزات، ماشین‌آلات و نیروی انسانی هست که بایستی برای افزایش بهره‌وری و دستیابی به استانداردهای جهانی توجه خاصی به افزایش کارایی ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌های تعمیراتی و توقف ماشین‌آلات داشت. موفقیت سازمان‌ها در ارائه خدمات و افزایش کیفیت آن به علل گوناگونی بستگی دارد. در این بین داشتن یک نظام نگهداری و تعمیرات اصولی که یکی از مباحث مهم هر سازمان می‌باشد ضرورت دارد. نظر به اینکه نگهداری و تعمیرات یکی از ارکان مهم و اصلی بهره‌وری است، لذا می‌توان از آن به‌عنوان یک فرهنگ که سعی در بهبود شرایط موجود دارد نام برد. فرهنگی که به نیروی انسانی می‌آموزد چه جهتی را انتخاب کند و چه مسیری را بپیماید تا بهترین و بیشترین بازدهی حاصل گردد. ازآنجاکه همیشه پیشگیری بهتر از درمان می‌باشد یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات، استراتژی سرویس نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[1] می‌باشد که شامل مجموعه‌ای از برنامه‌های نگهداری می‌باشد که به‌صورت دوره‌ای (مبتنی بر تقویم، کارکرد و یا ترکیبی) و با هدف حفظ شرایط کارکردی عادی تجهیزات و جلوگیری از خرابی برنامه‌ریزی نشده انجام می‌شود. با توجه به اهمیت نقش مؤثر تجهیزات و ماشین‌آلات و ارتباط نزدیک آن‌ها با مسائل نیروی انسانی، فنی و اجرایی، تهیه برنامه نگهداری و تعمیرات باید به‌گونه‌ای باشد که نیازهای بهره‌بردار را برطرف نموده تا حداکثر راندمان بهینه در امر بهره‌برداری از کل سیستم حاصل آید.

هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بین پانزده تا هفتاد درصد هزینه‌های عملیاتی یک سازمان را بسته به نوع صنعت شامل می‌شود (Khodayari & Abdolahzadeh, 2018). این تکنیک با ابزارهای گوناگون از علم مدیریت در حال حاضر به‌صورت نظری و علمی قادر به حل درصد زیادی از این مشکلات است، البته باید یادآور شود که این کاربرد، تنها بخش کوچکی از علم وسیع نگهداری و تعمیرات است (Chen et al., 2024). در سال‌های اخیر روند شتابنده توسعه دانش و فناوری‌های در دست بشر و از سویی، دستیابی به زمینه‌های نوین علوم و تکنولوژی، منجر به طراحی، ساخت و تولید سیستم‌ها و تجهیزات پیچیده و حساس مهندسی‌شده است (Ulansky & Raza, 2024). این سامانه‌های پیشرفته، بیشتر در صنایع بسیار حساسی چون صنایع وابسته به خودرو، صنایع هوایی، دفاعی و مانند آن‌ها کاربرد دارند. ازآنجایی‌که نقص در عملکرد چنین سیستم‌هایی ممکن است منجر به بروز خسارات شدید و جبران‌ناپذیر جانی و مالی شود، حصول اطمینان از عملکرد درست آن‌ها در بازه‌های زمانی موردنظر، از ملزومات اصلی در طراحی و ساخت سیستم است (Sánchez-Garrido, 2024). همان‌طور که می‌دانید قابلیت اطمینان، احتمال عملکرد صحیح یک سیستم تا زمان مشخص و در شرایط کاری معین است. با توجه به تعریف، باید زمان و شرایط کاری مشخص‌شده باشد (Su et al., 2024). اهمیت قابلیت اطمینان آن‌چنان زیاد است که در زمینه بهینه‌سازی و بهبود آن، مدل‌های و روش‌های حل متعددی پیشنهادشده است (Salehian & Jahan, 2022؛ Emadi et al., 2024). نگهداری و تعمیرات ازجمله مفاهیم بنیادی در سازمان‌ها بوده و جایگاه آن در حال حرکت و رو به رشد است و رتبه ویژه‌ای در سطح مدیران و کارکنان سازمان دارد (Gorji & Jamali, 2022). با اعمال سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های خرابی نسبت به زمانی که سیاست خاصی بر نگهداری و تعمیرات حاکم نبود و تعمیرات بعد از خرابی صورت می‌گرفت، کاهش چشمگیری یافت (Shams et al., 2025).

دستگاه‌های پرس با سرعت‌بالا به‌عنوان دستگاه‌های مهمی به شمار می‌روند که قادر به تولید در حجم بالا بوده و لذا می‌توانند برای کارخانه‌های تولیدی سودآور بوده و به دلیل سرعت‌بالا دارای بهره‌وری بالایی نیز می‌باشند و کارخانه‌ها در جهت سودآوری در تلاش برای استفاده از آن‌ها می‌باشند؛ بنابراین نگهداری و تعمیرات این دستگاه‌ها دارای اهمیت بالایی بوده و همواره دغدغه اصلی مدیران تولید کارخانه‌هایی را تشکیل می‌دهد که از این دستگاه‌ها جهت تولید محصولات مختلف بهره می‌گیرند.

در این مقاله به بهینه‌سازی نگهداری پیشگیرانه با ارائه یک مدل ریاضی از جنس چندهدفه خطی و با حضور اعداد صحیح و مختلط پرداخته می‌شود. این مدل پس از مدل‌سازی ریاضی، اعتبارسنجی می‌شود و با بهره‌گیری از

[1] Preventive maintenance

داده‌های واقعی در کارخانه تولیدی (به‌صورت موردی و واقعی در شرکت خاور هسته ایرانیان) مورد آزمون قرار می‌گیرد. برای این منظور از نرم‌افزارهای تخصصی در حوزه تحقیق در عملیات بهره‌گیری خواهد شد. یکی از موارد بسیار مهم در واحد نگهداری و تعمیرات جلوگیری از توقفات اضطراری است که عوامل متعددی در حفظ و تعمیر و نگهداری تجهیزات مرتبط، وجود برنامه قابل‌اطمینان، خواهد بود. در این مطالعه با توجه به داده‌های کافی از مسائل برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و حساسیت این موضوع، به بهینه‌سازی در رابطه با بحث نگهداری پیشگیرانه با وجود محدودیت‌های مختلف و اهداف متفاوت که با توجه به بخش‌های مختلف این مجموعه دارای اهمیت کمتر یا بیشتر خواهد شد، پرداخته می‌شود.

ساختار مقاله حاضر به این صورت است که در بخش بعدی مرور ادبیات ارائه شد و سپس مدل تحقیق معرفی می‌شود پس‌ازآن به تجزیه‌وتحلیل مدل پرداخته‌شده و در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش به ارائه مرور ادبیات پرداخته می‌شود. مرور ادبیات انجام‌شده مربوط به مقالات ۵ سال اخیر می‌باشد که تمامی آن‌ها در حوزه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه می‌باشند. مقالات به تفکیک مقالات داخلی و خارجی مرور شده و در انتها شکاف تحقیقاتی بر اساس جدول مرور ادبیات استخراج می‌شود (جدول ۱). در مقاله دامچی و صائبی (Damchi & Saebi, 2023)، در راستای دستیابی به کاربرد مدیریت ریسک در مدیریت دارایی‌ها در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی، مدل برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن شاخص‌های ریسک مشهود و نامشهود پیشنهادشده است. در پژوهش فاطمی و همکاران (Javadi et al., 2024)، تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه هوشمند در صنعت نساجی و پوشاک در تعامل با تولید به کمک نرم‌افزار SPSS25 پرداخته شد. هدف از مطالعه افشارنیا و مرزبان، بررسی روند نرخ خرابی و کارایی ماشین برداشت نیشکر در طی یک دوره ۶ ساله و پیش‌بینی آن در شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان بود (Afsharnia & Marzban, 2020). در مقاله حسنی (Hasani, 2018)، مدلی ریاضی برای مسئله برنامه‌ریزی زمان‌بندی جریان کارگاهی توزیعی جایگشتی با امکان برگشت دوباره‌کارها و لحاظ کردن برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه‌شده است. صدیقی و همکاران (Sedighi et al., 2025)، به دنبال ارائه مدل به‌منظور حداقل ساختن کل هزینه‌های تعمیر و نگهداری با در نظر گرفتن محدودیت حداقل دسترسی‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم است. دی‌اولیویرا سالز و همکاران (de Oliveira Salles et al,. 2025)، به معرفی یک رویکرد برای برآورد دوره‌های تعمیر و نگهداری و بازرسی بهینه در دستگاه‌های هیدروژنراتور از طریق رویه الگوریتم بر اساس شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌پردازد. روئیز کاسترو و زاپاتا سبالوس (Ruiz-Castro & Zapata-Ceballos, 2025)، به مدل‌سازی الگوریتمی سیستم چند وضعیتی افزونه پیچیده در معرض وقایع متعدد تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و از دست رفتن دستگاه و سیاست مکش چندگانه از طریق یک MMAP می‌پردازد. ونگ (Wang, 2025)، به مدیریت سایت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و کنترل کیفیت تجهیزات ماشین‌آلات حفاری نفتی بر اساس کنترل هوشمند می‌پردازد. الکاریوتی و همکاران (Alqaryuti et al., 2025)، چارچوب بلاکچین را برای مدیریت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های هیدرولیک هواپیما ارائه می‌کنند. علی و همکاران (Ali et al., 2025)، استراتژی‌های پایدار را برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و جایگزینی در سیستم‌های انرژی فتوولتائیک ارائه می‌کنند. اولانسکی و رضا (Ulansky & Raza, 2024)، به بررسی رویکردهای مختلف تعمیر و نگهداری نظیر تعمیر و نگهداری اصلاحی و پیشگیرانه پرداخته و عملکرد آن‌ها را ارزیابی می‌کنند. دل کاستیلو و پارلیکاد (del Castillo & Parlikad, 2024)، ارائه‌گر یک مدل بهینه‌سازی برای در نظر گرفتن تعمیر و نگهداری پیش‌گویانه و پیشگیرانه در حین تلاش برای توازن بار کاری جهت تحقق تقاضای عملیاتی و تعدیل جرائم حاصل از شکست برای تحقق این تقاضا می‌باشد. چن و همکاران (Chen et al,. 2024)، ارائه‌گر یک مرور جامع و سیستماتیک در مورداستفاده از اتلاف بازیافت شده به‌عنوان گزینه‌ای برای مواد طبیعی می‌باشد.

جدول۱. مرور ادبیات (یافته‌های تحقیق)

Table 1. Literature review (research findings)

رفرنس	هزینه	قابلیت اطمینان	زمان	هدف		رویکرد مدل‌سازی	محدودیت بودجه	سطح ظرفیت انبار	دوره زمانی		مطالعه موردی
				تک هدفه	چند هدفه				یک دوره	چند دوره	
Wang, 2025	●			●		مدل‌سازی ریاضی			●		
Alqaryuti et al., 2025	●	●			●	مدل‌سازی ریاضی			●		●
Ali et al., 2025				●		مدل‌سازی ریاضی			●		
Ulansky & Raza, 2024						مروری			●		
Chen et al., 2024						مروری			●		
Kaewbumrung et al., 2024				●		روش آمار مهندسی			●		●
Sánchez-Garrido et al., 2024				●		تصمیم‌گیری چندمعیاره			●		●
Su et al., 2024	●			●		مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه			●		●
Wang et al., 2025						مروری			●		●
Sedighi et al., 2025	●	●			●	مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح ترکیبی			●		
Ruiz-Castro & Zapata-Ceballos, 2025			●		●	مدل‌سازی الگوریتمی	●			●	
Borowski et al., 2023					●	مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح ترکیبی			●		●
Pourghader Chobar, 2022		●			●	مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی	●	●		●	●
تحقیق حاضر	●	●	●		●	مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی					●

کاوبومورونگ و همکاران (Kaewbumrung et al,. 2024)، به بررسی استرس برش دیوار یا نیروی به ازای هر ناحیه اعمال‌شده به‌وسیله باد نزدیک به سطح تیغه دوربین می‌پردازد. سانچز گاریدو و همکاران ، به بررسی ده گزینه برای ساخت ساختمان مسکونی پرداخته و بررسی‌کننده اثر آن بر اقتصاد محیط و حتی جامعه در خصوص چرخه‌های تعمیر و نگهداری بسته به استراتژی پیشگیرانه استفاده‌شده برای هر طراحی می‌باشد (Sánchez-Garrido et al,. 2024). مقاله رمضانی و همکاران (Ramezani et al,. 2024)، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در پرس‌های با سرعت‌بالا با استفاده از تحلیل قابلیت

اطمینان بلادرنگ و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه می‌کنند. سو و همکاران (Su et al,. 2024)، پارامترهای تعمیر و نگهداری ناقص را وارد تابع نرخ شکست می‌کنند تا یک مدل وضعیت را بر اساس معادله افتراقی تصادفی ایجاد کرده و به توصیف تغییر وضعیت نگهداری ناقص بپردازند. ونگ و همکاران (Wang et al,. 2025)، یک مدل نظری را برای بررسی زمان پیاده‌سازی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ارائه نموده و به محاسبه کاربرد مشتری و طراحی محصول می‌پردازد. بوروسکی و همکاران (Borowski et al,. 2023)، مدل ریاضی تعیین زمان تعویض پیشگیرانه در سیستم خدمات ماشین‌آلات کشاورزی با حداقل تعمیر برای کاهش توقفات و هزینه‌ها ارائه نمودند. شریف‌زادگان و پورقادر چوبر در سال ۲۰۲۲، در تحقیق خود مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با محدودیت منابع انسانی را انجام دادند که نتیجه حاصله مطلوب بوده است (Pourghader Chobar, 2022).

بر اساس مرور ادبیات انجام‌شده مشاهده می‌شود که تحقیقات بسیاری در حوزه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه صورت گرفته است، اما در خصوص پرس‌های با سرعت‌بالا هیچ تحقیقی که از مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌سازی زمان و هزینه تعمیر و نگهداری استفاده کرده باشد و زمان بهینه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را تعیین کرده باشد وجود نداشته و با توجه به اهمیت دستگاه موردبررسی و عدم انجام مدل‌سازی در این حوزه می‌توان گفت شکاف تحقیقاتی وجود دارد که تحقیق حاضر به دنبال رفع آن می‌باشد. در واقع دستگاه‌های پرس با سرعت‌بالا به دلیل ویژگی و اهمیت بسیاری که دارند نیازمند تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بوده و لذا برنامه‌ریزی مناسب باید در خصوص آن‌ها صورت گیرد. غفلت از این موضوع می‌تواند هزینه‌های بالایی را به سیستم تولید جدا ازکارافتادگی سیستم تحمیل نموده و تولید را به تأخیر اندازد؛ بنابراین در این خصوص باید شکل ویژه‌ای مطالعات انجام شود. ضمن اینکه هزینه بالای تعمیر و نگهداری اصلاحی این دستگاه‌ها لزوم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه نظیر تعویض قطعات کوچکی که می‌تواند در صورت عدم تعویض کل سیستم را از کار بیاندازد و همچنین روغن‌کاری بیش‌ازپیش با اهمیت و جلوه‌گر می‌نماید. در تحقیق حاضر بر اساس جدول ارائه‌شده مدلی ارائه می‌شود که به‌طور هم‌زمان هزینه، زمان تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان را بهینه نماید با توجه به اینکه در ادبیات تحقیق چنین مدلی در خصوص تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به‌ندرت ارائه‌شده و ضمن اینکه موارد دیگری همچون محدودیت بودجه به‌خصوص در مورد دستگاه با پرس بالا ارائه نشده است، مدل ارائه‌شده یک مدل نوآورانه می‌باشد.

۳- روش تحقیق و مدل ریاضی

این پژوهش از نظر هدف و نتیجه از نوع کاربردی و مبتنی بر روش‌های پژوهش عملیاتی است که با توسعه مدل ریاضی انجام می‌شود. به لحاظ ماهیت اجرا از نوع توصیفی است. متغیرهای این پژوهش از نوع کمی هستند. این پژوهش از نظر زمان مقطعی به شمار می‌آید. تحقیق حاضر به دلیل استفاده از مدل‌سازی ریاضی و توسعه مدل ریاضی از تحلیل آماری استفاده نمی‌کند و لذا فاقد جامعه آماری و نمونه می‌باشد. داده‌های تحقیق حاضر از اطلاعات خرابی دستگاه با پرس بالا جمع‌آوری‌شده و ابزار جمع‌آوری اطلاعات دیتاست خرابی این دستگاه می‌باشد. هدف ارائه مدلی برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای این دستگاه می‌باشد که سه هدف در این خصوص دنبال می‌شود.

- حداقل ساختن هزینه
- حداقل ساختن زمان
- حداکثرسازی قابلیت اطمینان

بر اساس متغیرهای تصمیم قابلیت اطمینان و عمر مؤثر قطعه این اهداف دنبال می‌شود. برای دستگاه پرس قطعات مختلفی وجود دارد که فرض اساسی این است که امکان جایگزینی قطعه در زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه وجود نداشته و لذا سیستم تولید در زمان تعمیر و نگهداری متوقف می‌باشد. در ادامه به معرفی مفروضات مسئله پرداخته می‌شود.

۱) مدل چنددوره‌ای است.
۲) مدل قطعی است.
۳) مدل چندهدفه است.
۴) عامل بهبود قطعه در نظر گرفته‌شده است.
۵) پارامترها شکل و عمر قطعه در نظر گرفته‌شده‌اند.

۶) سه نوع هزینه شکست، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه جایگزینی وجود دارد.
۷) دو نوع زمان تعمیر و نگهداری و جایگزینی وجود دارد.
۸) برای کل سیستم حداقل سطح قابلیت اطمینان در نظر گرفته‌شده است.
۹) تعمیر و نگهداری سیستم دارای محدودیت بودجه می‌باشد.

در مفروضات فوق پارامتر شکل و عمر قطعه به علت اثرگذاری بر نتایج در نظر گرفته‌شده ست ضمن اینکه هزینه‌ها به سه دسته شکست و هزینه تعمیر و جایگزینی در نظر گرفته‌شده یعنی قطعه هم می‌تواند دچار شکست شود و هم شامل تعمیر و هم مشمول جایگزینی شود؛ بنابراین زمان نیز به دو بخش نگهداری و جایگزینی تفکیک می‌شود. ضمن اینکه حداقل سطح قابلیت اطمینان برای این در نظر گرفته‌شده که قابلیت اطمینان از این حد پایین‌تر در نظر گرفته نشود.

در خصوص محدودیت‌های مدل نیز باید اشاره شود که هزینه‌های تحت چارچوب محدودی به‌عنوان بودجه قرارگرفته و نمی‌توان هزینه نامحدودی را برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در نظر گرفت. این محدودیت در مورد قابلیت اطمینان نیز لحاظ شده است ضمن اینکه عمر مؤثر قطعه نیز مشمول محدودیت است به این صورت که عمر بی‌نهایت نمی‌توان برای یک قطعه در نظر گرفت.

لازم به ذکر است مدل ارائه‌شده بر اساس خواسته‌ها و ضرورت‌های دستگاه پرس با سرعت‌بالا طراحی‌شده و لذا پارامترهای موردنظر مطابق با داده‌های این دستگاه و هم‌چنین نیازها و اهداف مرتبط با آن می‌باشد ازاین‌جهت ممکن است برخی پارامترها که موردنیاز این دستگاه نیست در مدل لحاظ نشده باشد.

پارامترها

λ_i: پارامتر عمر قطعه i دستگاه پرس با سرعت‌بالا
β_i: پارامتر شکل قطعه i دستگاه پرس با سرعت‌بالا
a_i: عامل بهبود قطعه i دستگاه پرس با سرعت‌بالا
F_i: هزینه شکست غیرمنتظره قطعه i برای ماشین پرس با سرعت‌بالا
MM_i: هزینه تعمیر و نگهداری قطعه i ماشین پرس با سرعت‌بالا
$RR1_i$: هزینه جایگزینی قطعه i ماشین پرس با سرعت‌بالا
TM_i: متوسط زمان تعمیر و نگهداری قطعه i ماشین پرس با سرعت‌بالا
TR_i: زمان جایگزینی قطعه i ماشین پرس با سرعت‌بالا
BT_i: دفعات خرابی قطعه i
Z: هزینه ثابت سیستم دستگاه پرس با سرعت‌بالا
RR: قابلیت اطمینان سیستم پرس با سرعت‌بالا
GB: بودجه تخصیص‌یافته به قطعات سیستم دستگاه پرس با سرعت‌بالا
N: تعداد کل قطعات دستگاه پرس با سرعت‌بالا
T: کل دوره‌های زمانی
J: کل بازه‌های زمانی

متغیرهای تصمیم

X_{ij}: عمر مؤثر قطعه i دستگاه پرس با سرعت‌بالا در شروع دوره j
Y_{ij}: عمر مؤثر قطعه i دستگاه با پرس بالا در انتهای دوره j
M_{ij}: اگر قطعه i دستگاه با پرس بالا در دوره j تعمیر شود ۱ و در غیر این صورت صفر
R_{ij}: اگر قطعه i دستگاه با پرس بالا در دوره j جایگزین شود ۱ و در غیر این صورت صفر
$MTBF_{ij}$: متوسط زمان بین خرابی‌ها برای قطعه i دستگاه پرس با سرعت‌بالا

توابع هدف

$$min\, z1 = \sum_{i}^{N}\sum_{j}^{T}[F_i\,\lambda_i((Y_{ij})^{\beta_i} - ((X_{ij})^{\beta_i}) + MM_iM_{ij} + RR_iR_{ij} + \sum_{j}^{T}[Z(\ -\prod\nolimits_{j}^{T}(1-(M_{ij}+R_{ij})))] \quad (۱)$$

رابطه فوق به دنبال حداقل ساختن هزینه تعمیر و نگهداری در سیستم پرس با سرعت‌بالا می‌باشد.

$$min\, z2 = \sum_{i}^{N}\sum_{j}^{T} TM_iM_{ij} + TR_iR_{ij} \quad (۲)$$

رابطه فوق به دنبال حداقل ساختن زمان تعمیر و نگهداری و جایگزینی قطعه در دستگاه پرس با سرعت‌بالا است.

$$max\ z3 = \prod_i^N \prod_j^T e^{-[\lambda_i((Y_{ij})^{\beta_i} - (X_{ij})^{\beta_i}]} + MTBF_{ij} \quad (۳)$$

رابطه فوق به دنبال حداکثرسازی قابلیت اطمینان در سیستم موردمطالعه می‌باشد.

در خصوص سه هدف فوق باید اجاره شود که ارتباط بین زمان و هزینه می‌تواند معکوس باشد به‌عبارت‌دیگر با افزایش هزینه انتظار کاهش زمان وجود دارد. در خصوص ارتباط بین قابلیت اطمینان و هزینه نیز چنین ارتباط معکوسی وجود دارد. ضمن اینکه تلاش شده با توجه به ویژگی‌های خاص دستگاه موردمطالعه مدلی جدید در این حوزه ارائه شود.

محدودیت‌ها

$$X_{ij} = (1 - M_{ij-1})(1 - R_{ij-1})Y_{ij} + M_{ij-1}(a_i Y_{ij-1}) \quad (۴)$$

رابطه فوق به محاسبه عمر مؤثر قطعه در شروع دوره می‌پردازد.

$$Y_{ij} = X_{ij} + \frac{T}{J} \quad (۵)$$

رابطه فوق به محاسبه عمر مؤثر قطعه در انتهای دوره می‌پردازد.

$$M_{ij} + R_{ij} \le 1 \quad (۶)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که در یک دوره قطعه یا تعمیر می‌شود یا جایگزین می‌شود.

$$\prod_i^N \prod_j^T e^{-[\lambda_i((Y_{ij})^{\beta_i} - (X_{ij})^{\beta_i}]} \ge RR \quad (۷)$$

رابطه فوق نشانگر این است که قابلیت اطمینان سیستم باید از حداقل تعیین‌شده بیشتر باشد.

$$\sum_i^B \sum_j^T [F_i\, \lambda_i((Y_{ij})^{\beta_i} - ((X_{ij})^{\beta_i}) + MM_i M_{ij} + RR_i R_{ij}] + \sum_j^T [Z(-\prod_j^T (1 - (M_{ij} + R_{ij})))] \le GB \quad (۸)$$

رابطه فوق نشانگر محدودیت بودجه تعمیر و نگهداری می‌باشد.

$$MTBF_{ij} = \frac{T - \sum_i^N \sum_j^T TM_i M_{ij} + TR_i R_{ij}}{BT_i} \quad (۹)$$

رابطه فوق به محاسبه متوسط زمان بین خرابی‌ها می‌پردازد.

$$X_{ij} \ge 0 \quad (۱۰)$$

$$Y_{ij} \ge 0 \quad (۱۱)$$

$$MTBF_{ij} \ge 0 \quad (۱۲)$$

$$M_{ij} \in \{0.1\} \quad (۱۳)$$

$$R_{ij} \in \{0.1\} \quad (۱۴)$$

روابط فوق نشانگر محدودیت متغیرهای عدد صحیح مسئله است.

۳-۱- روش حل

در این تحقیق یک مدل سه هدفه برای حداقل ساختن زمان و هزینه و حداکثرسازی قابلیت اطمینان ارائه می‌شود که این مدل با استفاده از الگوریتم‌های NSGAII و گرگ خاکستری حل می‌شود. در ادامه به شرح ذیل این الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. بر اساس ترکیب نظر خبرگان و هم‌چنین مطالعات کتابخانه‌ای و مرور مدل‌های مرتبط با روش تعمیر و نگهداری پیشگیرانه اهداف پارامترها و متغیرها تعیین‌شده و موارد استخراجی بر اساس مرور ادبیات با واقعیت‌های مرتبط با مطالعه موردی یعنی دستگاه پرس با سرعت‌بالا تطبیق داده شد و مدل نهایی بر این اساس طراحی گردید. دلیل انتخاب الگوریتم‌های مزبور کاربرد آن‌ها در مسائل مشابه و همچنین قدمت بالای الگوریتم NSGAII در حل مسائل مشابه با مسائل تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و قدرت بالای این دو الگوریتم در تولید نقاط پارتو و زمان محاسبه می‌باشد که انگیزه اصلی محقق برای انتخاب دو الگوریتم مزبور قلمداد می‌شود.

۴- تجزیه‌وتحلیل

در این بخش مدل ارائه‌شده در بخش قبلی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGAII و گرگ خاکستری استفاده‌شده است. در این مرحله ابتدا اعتبارسنجی مدل انجام‌شده و سپس مقایسه الگوریتم‌ها صورت گرفته، سپس حل مدل بر اساس موردمطالعه صورت گرفته و سپس تحلیل حساسیت پارامترهای مهم و اثرگذار انجام می‌شود.

در اولین مرحله به اعتبارسنجی مدل پرداخته می‌شود، لازم به ذکر است که اعتبارسنجی مدل‌های بهینه‌سازی بخش مهم از کار بهینه‌سازی می‌باشند که نشانگر صحت عملکرد مدل طراحی‌شده می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای اعتبارسنجی وجود دارد که در این بخش اعتبارسنجی بر اساس واکنش منطقی مدل به افزایش ابعاد مسئله مورداستفاده قرار می‌گیرد. در ابتدا ابعاد مسئله شامل قطعات دوره‌های زمانی و بازه‌های زمانی در ۲۰ بعد معرفی‌شده و در هر بعد این مسئله نسبت به قبل افزایش می‌یابد. پیاده‌سازی انجام‌شده بر اساس داده‌های واقعی از کارگاه انجام‌شده و برای حل مدل به‌کاررفته است و بر اساس این افزایش است که حل مدل صورت می‌گیرد (شکل **۱** تا **۴**). همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر ۴ نمودار نشانگر افزایش ناشی از افزایش ابعاد می‌باشند. به این معنا که با افزایش ابعاد هم مقادیر توابع هدف افزایش‌یافته و هم‌زمان محاسبه افزایش‌یافته است که این نشانگر عملکرد و کارکرد درست مدل می‌باشد. بنابراین می‌توان در ادامه به تحلیل نتایج مدل و مقایسه الگوریتم‌ها پرداخت.

در ادامه به مقایسه الگوریتم‌های مورداستفاده برای حل مدل ارائه‌شده پرداخته می‌شود دو الگوریتم NSGAII و الگوریتم گرگ خاکستری در تحقیق حاضر به‌منظور حل مدل استفاده می‌شوند که در این بخش از منظر معیارهای مسائل چندهدفه و همچنین نتایج حاصل از توابع هدف مقایسه این دو الگوریتم صورت گرفته و الگوریتم برتر که یکی از اهداف مسئله حاضر می‌باشد انتخاب می‌گردد. در ابتدا نتایج حاصل از معیارهای مسائل چندهدفه مقایسه می‌شود (شکل **۵**). لازم به ذکر است نقاط پارتو در مسائل چندهدفه نشانگر تلاقی بهینگی چندهدفه بوده و لذا هر چه یک الگوریتم بتواند نقاط پارتو بیشتری تولید کند، دارای کارآمدی بیشتری می‌باشد. در تحقیق حاضر مشاهده می‌شود که درمجموع الگوریتم NSGAII نقاط پارتوی بیشتری به دست آورده و لذا از این نظر نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری دارای برتری است. ضمن اینکه مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد امکان تولید نقاط پارتو کمتر شده و از بهینگی مسئله به سبب پیچیدگی بیشتر کاسته می‌شود. در شکل **۶** مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد فاصله تا نقطه ایده‌آل برای هر دو الگوریتم افزایش‌یافته است، اما الگوریتم گرگ خاکستری فاصله تا نقطه ایده‌آل بیشتری ایجاد کرده و با توجه به اینکه هر چه الگوریتمی به فاصله تا نقطه ایده‌آل کمتری برسد، الگوریتم بهینه‌تری می‌باشد، بنابراین در این خصوص الگوریتم NSGAII دارای برتری محسوسی نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری می‌باشد. در شکل **۷** مشاهده می‌شود فاصله ازدحامی الگوریتم گرگ خاکستری به شکل محسوسی بیش از الگوریتم NSGAII می‌باشد و لذا الگوریتم NSGAII دارای برتری می‌باشد. در شکل **۸** مشاهده می‌شود که الگوریتم گرگ خاکستری درمجموع زمان محاسبه کمتری داشته است، هرچند در برخی موارد مشاهده می‌شود که این الگوریتم در برخی مثال‌ها زمان محاسبه بیشتری دارد اما در کل نمودار نارنجی که مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری است پایین‌تر از نمودار آبی قرار دارد؛ بنابراین از نظر چهارمین معیار یعنی زمان محاسبه الگوریتم گرگ خاکستری دارای برتری محسوسی می‌باشد.

در ادامه به تحلیل حساسیت دو پارامتر مهم الگوریتم NSGAII یعنی نرخ تقاطع و جهش پرداخته می‌شود به این صورت که با آزمون مقادیر مختلف نرخ تقاطع مقادیر حاصل از هزینه به‌دست‌آمده و مقایسه بر اساس مقادیر تابع هدف هزینه انجام می‌شود. در شکل **۹** مشاهده می‌شود که نرخ تقاطع بهینه در الگوریتم NSGAII مقدار ۰/۶ می‌باشد چراکه در این مقدار کمترین مقدار هزینه حاصل‌شده است. در خصوص نرخ جهش نیز چنین آزمونی انجام‌شده است. در شکل **۱۰** دیده می‌شود که بهینه‌ترین نرخ جهش مقدار ۰/۰۲ می‌باشد چراکه کمترین مقدار هزینه‌بر اساس این نرخ جهش حاصل‌شده است باید تأکید شود که صرفاً یک تابع هدف یعنی هزینه برای آزمون نتایج مقادیر نرخ جهش و تقاطع در نظر گرفته‌شده است. پس از مقایسه الگوریتم‌ها از نظر معیارهای مسائل چند هدفه می‌بایست از نظر دستیابی به توابع هدف مقایسه الگوریتم‌ها صورت گیرد. بر اساس تحلیل شکاف صورت گرفته می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ابعاد فاصله بین الگوریتم‌ها از نظر زمان و هزینه و قابلیت اطمینان افزایش‌یافته و از سوی دیگر می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم NSGAII از نظر هر سه تابع هدف به مقدار بهینه‌تری دست‌یافته است که همچنان

می‌تواند بر برتری الگوریتم NSGAII تأکید داشته باشد (شکل **۱۱**).

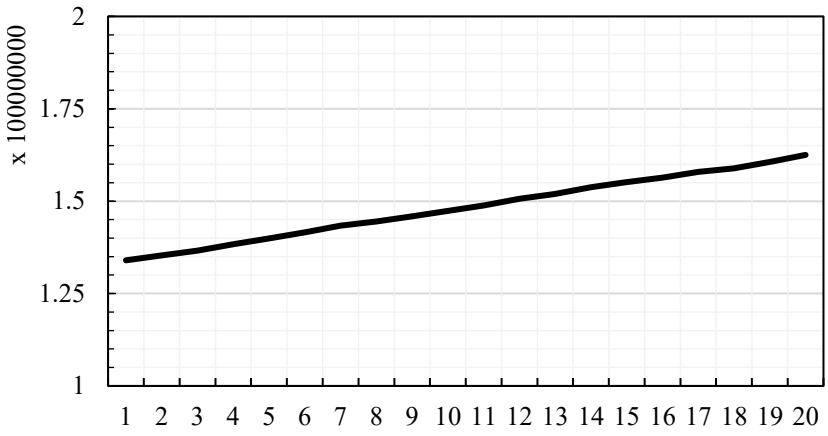
۴-۱- تحلیل حساسیت مدل

در ادامه تحلیل حساسیت بر اساس پارامترها هزینه تعمیر و نگهداری هزینه تعویض و هزینه شکست صورت می‌گیرد و تعیین می‌شود که این هزینه‌ها بر قابلیت اطمینان زمان و هزینه چه اثری دارند. در ابتدا هزینه شکست هر قطعه در فرایند ۳۰ قطعه موردبررسی کنکاش می‌شود و مشخص می‌شود که هزینه شکست کدام قطعه اثر بیشتری بر هزینه زمان و قابلیت اطمینان به‌عنوان توابع هدف مدل بر جا می‌گذارند. نتایج به‌دست‌آمده برای هر ۳۰ قطعه موردبررسی در شکل‌های **۱۲** تا **۱۹** ارائه گردیده است. در شکل **۱۲** مشاهده می‌شود که کدام قطعه می‌تواند در صورت شکست هزینه کمتری به سیستم تحمیل کند و کدام قطعه هزینه بیشتری را موجب می‌شود، مثلاً قطعه ۱۱ کمترین هزینه را در صورت شکست به سیستم تحمیل می‌کند، درحالی‌که قطعه شماره ۲۱ بیشترین هزینه را به سیستم تحمیل می‌کند که بر این اساس می‌توان مشخص کرد کدام قطعه دارای وضعیت بحرانی‌تری می‌باشد. مطابق شکل **۱۳**، در خصوص زمان مشاهده می‌شود که قطعات ۱، ۸، ۱۷ و ۲۵ در صورت شکست بیشترین تأخیر زمانی را به سیستم تحمیل می‌کنند و دلیل آن دشواری در تعمیر این قطعات است، ضمن این‌که قطعه ۳ و ۲۱ و ۲۲ و ۱۷ منجر به کمترین تأخیر زمانی در ازسرگیری تولید دستگاه با پرس بالا می‌باشد. در شکل **۱۴** می‌توان مشاهده کرد قطعه شماره ۲۴ در صورت شکست بیشترین قابلیت اطمینان را دارد، درحالی‌که قطعات ۲۳، ۱، ۱۱ و ۶ منجر به کمترین قابلیت اطمینان در سیستم دستگاه با پرس بالا می‌شوند.

به دنبال تحلیل حساسیت هزینه شکست در ادامه تحلیل حساسیت هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه تعویض صورت گرفته و اثر آن بر هزینه زمان و قابلیت اطمینان بررسی‌شده و در انتها مشخص می‌شود کدام استراتژی یعنی تعویض یا تعمیر با توجه به هزینه تحمیل‌شده مؤثر می‌باشد. لازم به ذکر است که هزینه بررسی‌شده مربوط به‌کل قطعات بوده و صرفاً یک قطعه را شامل نمی‌شود. نتایج در جداول و نمودارهای ذیل ارائه گردیده است. در شکل **۱۵** می‌توان مشاهده کرد که با افزایش هزینه تعمیر و نگهداری کل قطعات قابلیت اطمینان تا ۲۰ درصد کاهش‌یافته و هزینه تا ۴ درصد و زمان تا ۱۰ درصد افزایش‌یافته و درواقع جواب مسئله تا حد قابل‌توجهی به سمت بدتر شدن میل می‌کند. بر اساس شکل **۱۶** مشاهده می‌شود با افزایش هزینه تعویض یا جایگزینی هزینه کل سیستم تا ۳ درصد زمان تا ۹ درصد و قابلیت اطمینان تا ۱۷ درصد به سمت بدتر شدن میل می‌کند، اما باید تأکید شود در این بخش هدف مقایسه دو هزینه جایگزینی و تعمیر و نگهداری است و درواقع هدف کشف این نکته است که کدام هزینه شرایط بهتری را به وجود آورده و درنهایت کدام استراتژی در خصوص دستگاه پرس با سرعت‌بالا مناسب می‌باشد. این مقایسه در ادامه صورت گرفته است. در شکل **۱۷** می‌توان مشاهده کرد که هزینه جایگزین اثر کمتری بر هزینه کل گذاشته و به میزان کمتری باعث افزایش آن می‌شود. ازاین‌رو در خصوص هزینه می‌توان گفت اثر هزینه جایگزینی بیش از هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد. از شکل **۱۸** می‌توان دریافت که اثر زمانی هزینه تعمیر و نگهداری اندکی کمتر از هزینه جایگزینی است. البته تفاوت بسیار ناچیز است، اما درمجموع در خصوص زمان می‌توان گفت تعمیر و نگهداری قطعات در دستگاه با پرس بالا ارجحیت بیشتری نسبت به تعویض دارد. از نظر قابلیت اطمینان مشاهده می‌شود که تعمیر و نگهداری باعث قابلیت اطمینان کمتری می‌شود، هرچند هر دو هزینه در صورت افزایش می‌توانند قابلیت اطمینان را کاهش دهند، اما اثر هزینه جایگزینی کمتر است؛ بنابراین می‌توان گفت استراتژی جایگزینی قطعه به‌صورت کلی برای قابلیت اطمینان بیشتر در دستگاه با پرس بالا ارجحیت بیشتری نسبت به استراتژی تعمیر و نگهداری دارد و به‌صورت کلی با توجه به اینکه استراتژی تعویض برای قابلیت اطمینان و هزینه اثر بهتری داشته و درواقع دو تابع هدف مسئله را بهبود می‌بخشد. می‌توان گفت این استراتژی، استراتژی مناسب‌تری نسبت به استراتژی تعمیر و نگهداری می‌باشد، اما درمجموع انتخاب استراتژی به مؤلفه‌های دیگری نیز بستگی دارد که در تحقیق حاضر صرفاً تمرکز بر اهداف تعیین‌شده مدل می‌باشد (شکل **۱۹**).

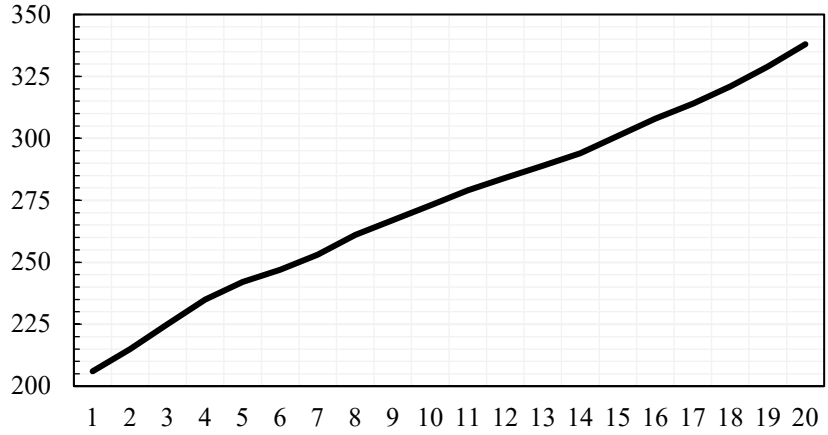
۵- نتیجه‌گیری

در این بخش، به تحلیل نتایج به تفکیک بخش روش‌شناسی و مطالعه موردی پرداخته می‌شود. در بخش روش‌شناسی مشخص شد که از بین دو الگوریتم مورداستفاده، الگوریتم NSGAII به دلیل تولید نقاط پارتو بیشتر فاصله تا نقطه ایده‌آل کمتر و فاصله ازدحامی کمتر در وضعیت بهتری قرار دارد، اما باید تأکید شود که فاصله بین الگوریتم‌ها از نظر این معیارها فاصله چندانی نیست، اما از نظر این فاصله نیز الگوریتم NSGAII دارای برتری می‌باشد؛ بنابراین نتایج این الگوریتم برای حل مدل ارائه‌شده برتر بوده و قابلیت اتکا دارد.



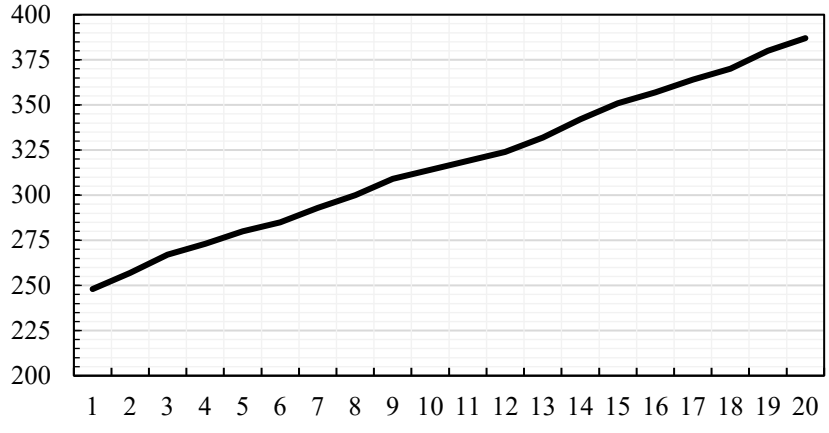
شکل ۱. افزایش هزینه با افزایش ابعاد مسئله.

Figure 1. Cost increases with increasing problem size.



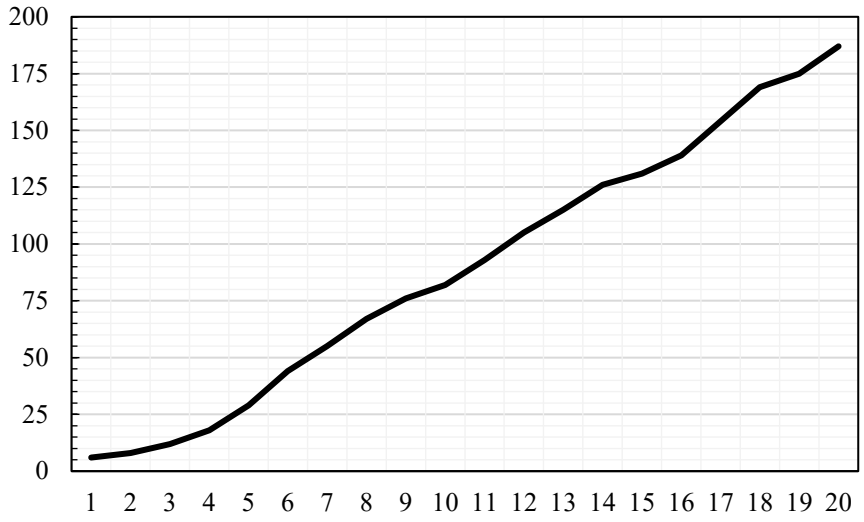
شکل ۲. افزایش زمان با افزایش ابعاد مسئله.

Figure 2. Time increases with increasing problem size.



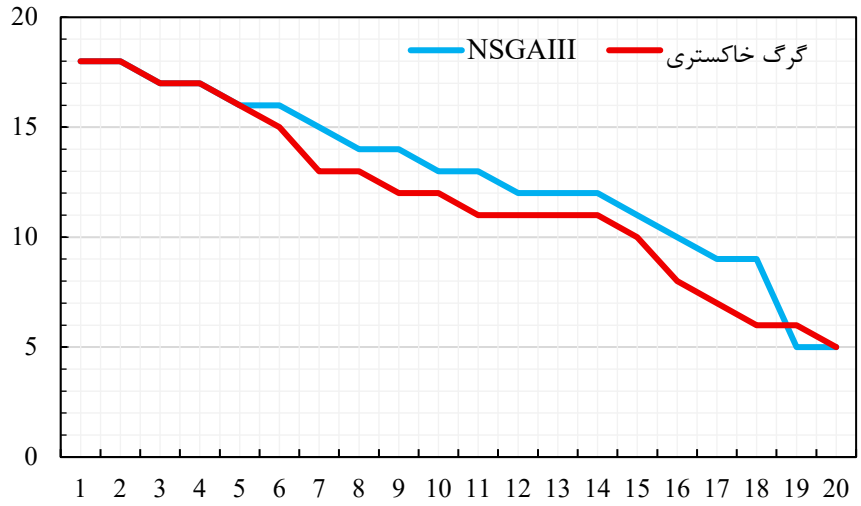
شکل ۳. افزایش قابلیت اطمینان با افزایش ابعاد مسئله.

Figure 3. Reliability increases with increasing problem size.



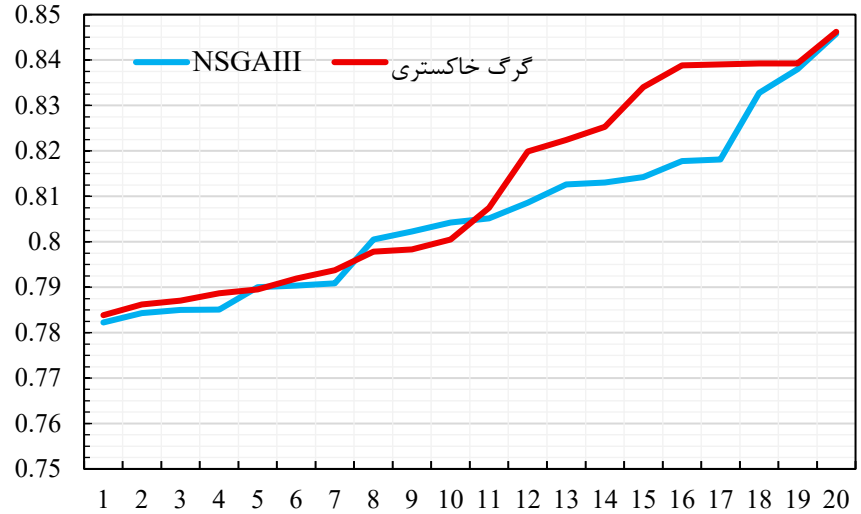
شکل ۴. افزایش زمان محاسبه با افزایش ابعاد مسئله.

Figure 4. Computation time increases with increasing problem size.



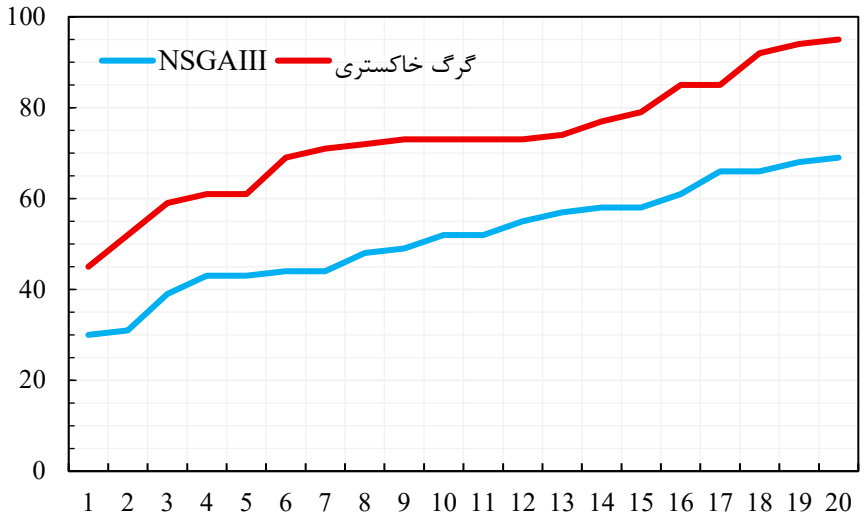
شکل ۵. مقایسه الگوریتم‌های فرابتکاری از نظر تولید نقاط پارتو.

Figure 5. Comparison of metaheuristic algorithms in terms of Pareto front generation.



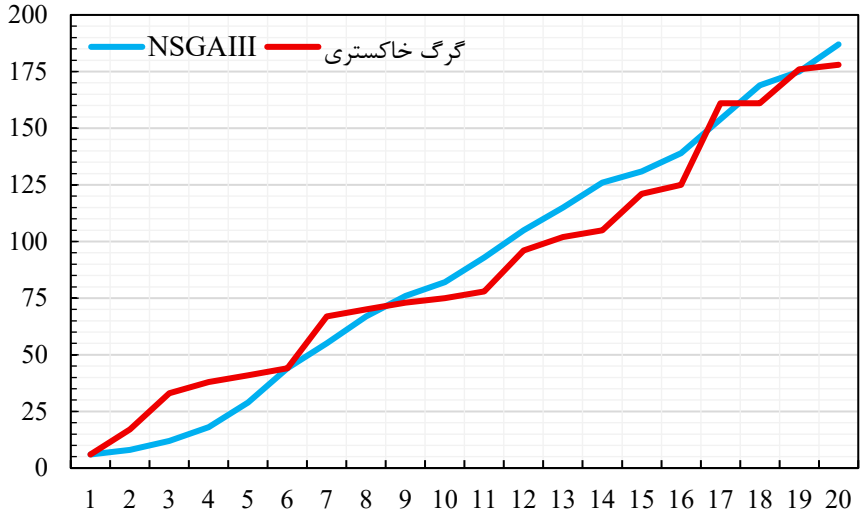
شکل ۶. مقایسه الگوریتم‌های فرابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده‌آل.

Figure 6. Comparison of metaheuristic algorithms in terms of distance to the ideal point.



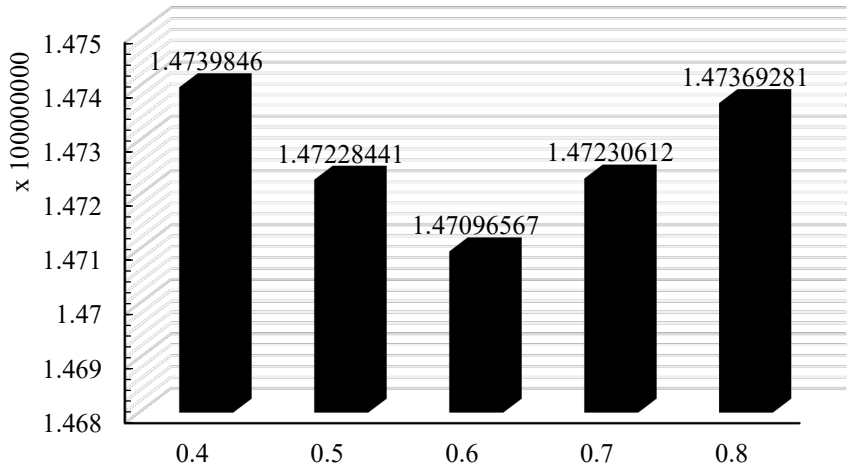
شکل ۷. مقایسه الگوریتم‌های فرابتکاری از نظر فاصله ازدحامی.

Figure 7. Comparison of metaheuristic algorithms in terms of crowding distance.



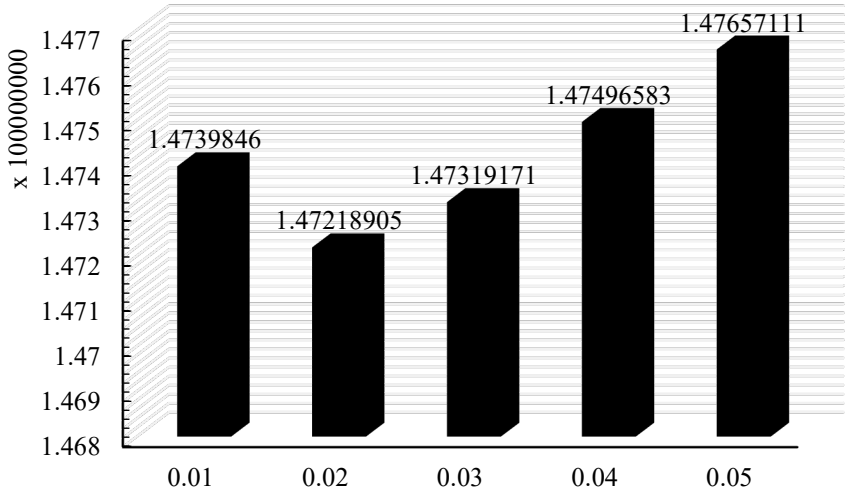
شکل ۸. مقایسه الگوریتم‌های فرابتکاری از نظر زمان محاسبه.

Figure 8. Comparison of metaheuristic algorithms in terms of computation time.



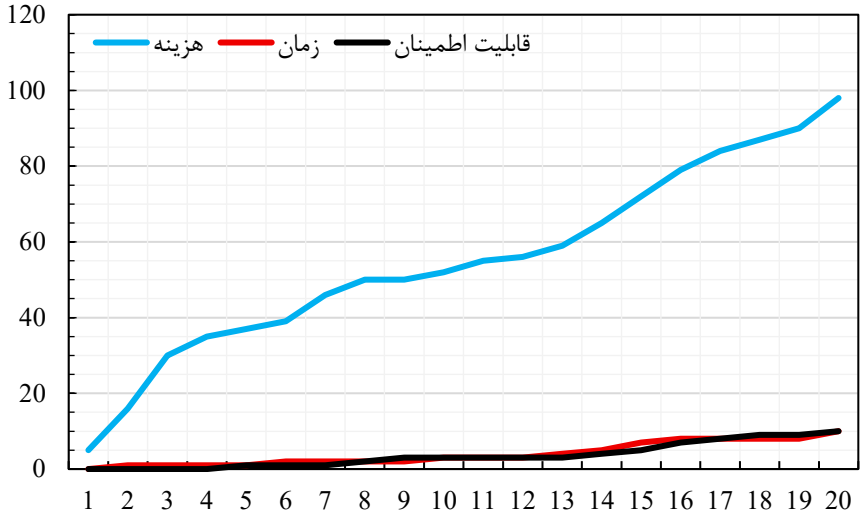
شکل ۹. مقایسه مقادیر مختلف نرخ تقاطع بر تابع هدف هزینه.

Figure 9. Comparison of different crossover rates on the cost objective function.



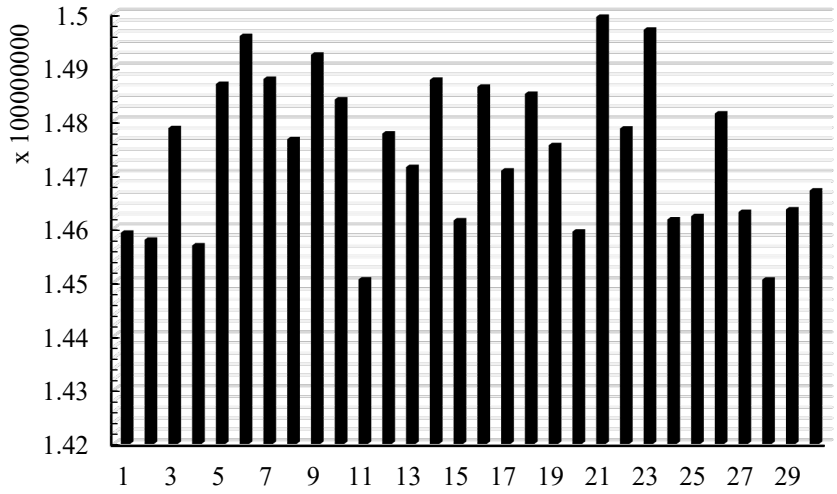
شکل ۱۰. مقایسه مقادیر مختلف نرخ جهش بر تابع هدف هزینه.

Figure 10. Comparison of different mutation rates on the cost objective function.



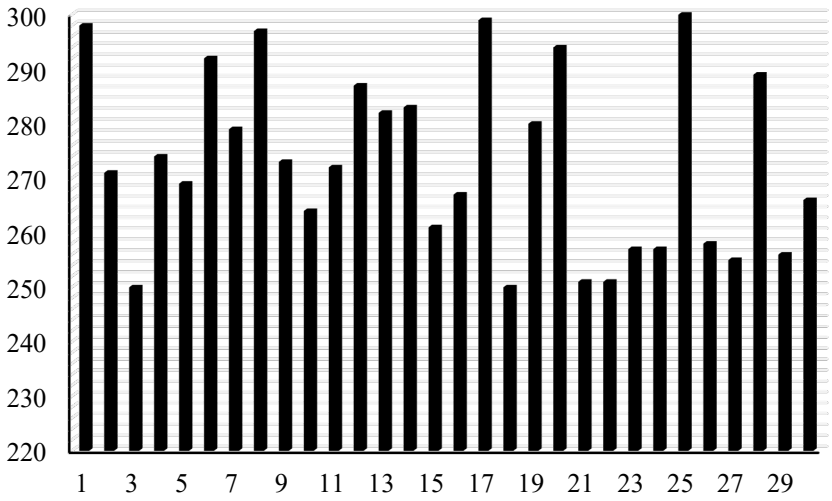
شکل ۱۱. تحلیل شکاف الگوریتم‌های فراابتکاری.

Figure 11. Gap analysis of metaheuristic algorithms.



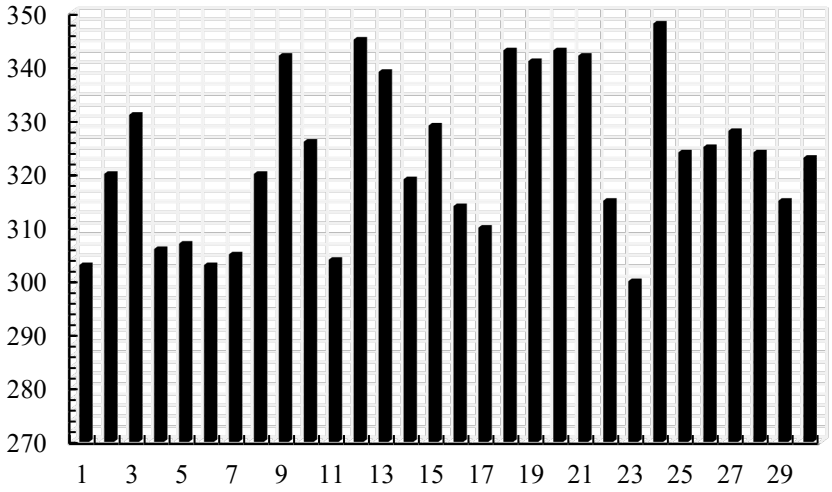
شکل ۱۲. تحلیل حساسیت هزینه شکست قطعه برای هدف هزینه.

Figure 12. Sensitivity analysis of component failure cost for the cost objective.



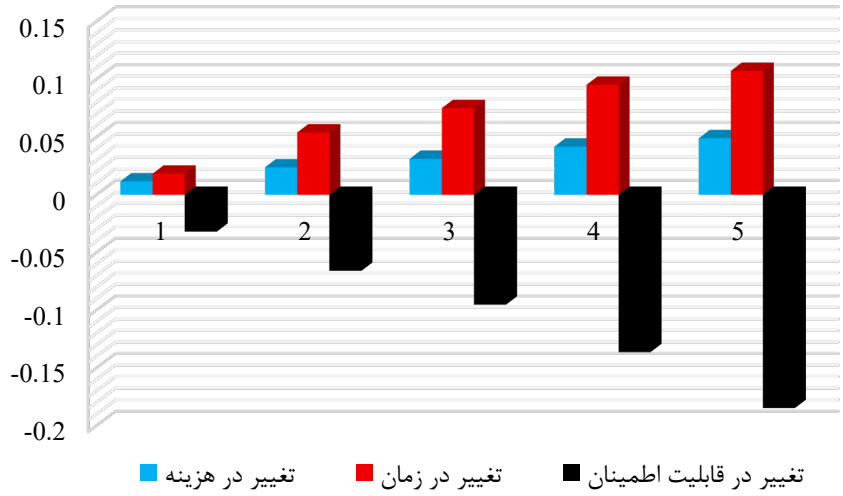
شکل ۱۳. تحلیل حساسیت هزینه شکست قطعه برای هدف زمان.

Figure 13. Sensitivity analysis of component failure cost for the time objective.



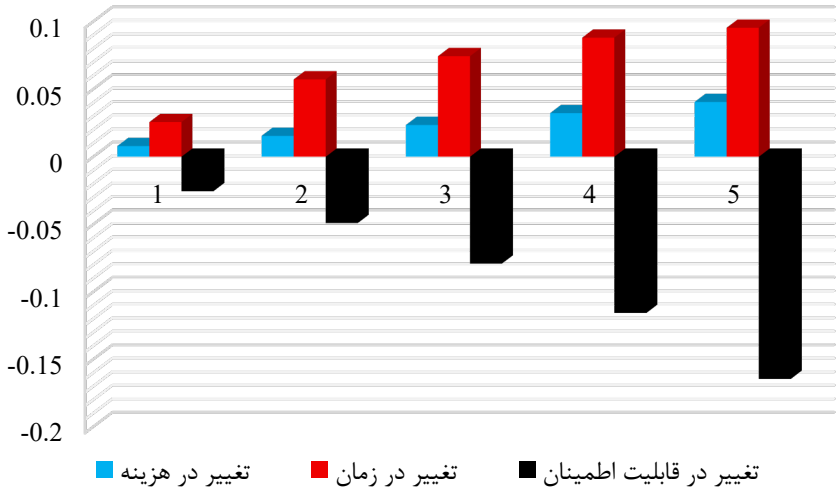
شکل ۱۴. تحلیل حساسیت هزینه شکست قطعه برای هدف قابلیت اطمینان.

Figure 14. Sensitivity analysis of component failure cost for the reliability objective.



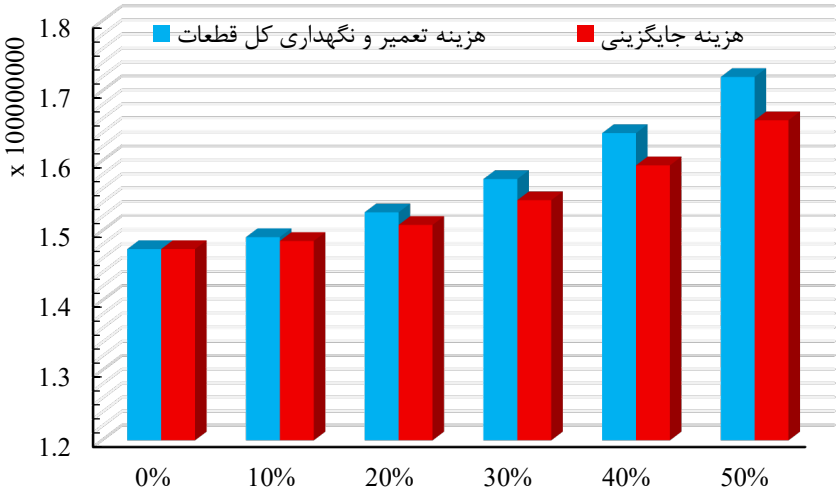
شکل ۱۵. تحلیل حساسیت هزینه تعمیر و نگهداری.

Figure 15. Sensitivity analysis of maintenance cost.



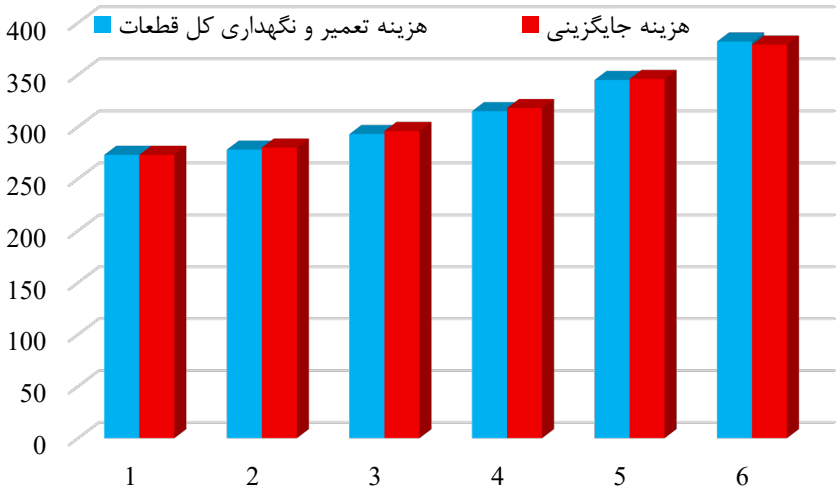
شکل ۱۶. تحلیل حساسیت هزینه جایگزینی.

Figure 16. Sensitivity analysis of replacement cost.



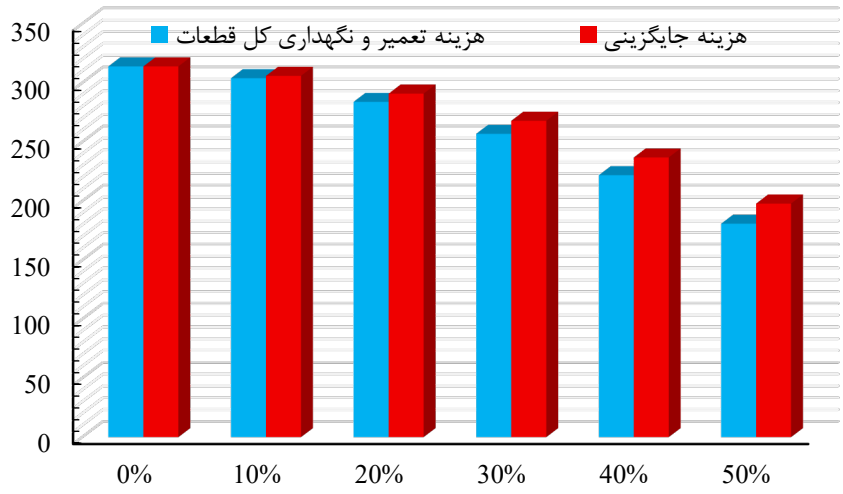
شکل ۱۷. مقایسه اثر هزینه جایگزینی و هزینه تعمیر و نگهداری بر هزینه کل.

Figure 17. Comparison of the effect of replacement cost and maintenance cost on total cost.



شکل ۱۸. مقایسه اثر هزینه جایگزینی و هزینه تعمیر و نگهداری بر زمان کل.

Figure 18. Comparison of the effect of replacement cost and maintenance cost on total time.



شکل ۱۹. مقایسه اثر هزینه جایگزینی و هزینه تعمیر و نگهداری بر قابلیت اطمینان کل.

Figure 19. Comparison of the effect of replacement cost and maintenance cost on total reliability.

در خصوص موردمطالعه در تحقیق حاضر مشخص شد که کدام قطعه به دلیل شکست هزینه بیشتری به سیستم تحمیل کرده و لذا این قطعه برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه می‌تواند در اولویت قرار گیرد. البته صرفاً بحث بر سر هزینه نیست و زمان خرابی به دلیل تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان سیستم نیز در مدل تحقیق حاضر دارای اهمیت بود که ازاین‌جهت مدل تحقیق حاضر قادر به ارائه نتایجی سودمند در خصوص دستگاه پرس با سرعت‌بالا بود. نکته مهم دیگر در خصوص موردمطالعه تعیین استراتژی تعمیر و نگهداری برای هر یک از قطعات بود به‌عبارت‌دیگر با توجه به سه هدف زمان، هزینه و قابلیت اطمینان مشخص شد که بهتر است هر قطعه تعمیر شود یا تعویض و بر این اساس تدوین استراتژی تعمیر و نگهداری برای دستگاه پرس با سرعت‌بالا صورت گرفت. از سوی دیگر مشخص شد که هزینه تعمیر و نگهداری و تعویض چه اثری بر کل اهداف و کل مدل بر جا می‌گذارند که بر این اساس اثر هزینه تعمیر و نگهداری بیشتر بوده و لذا می‌توان گفت تعویض قطعات منجر به شرایط بهتری برای سیستم می‌شود و درمجموع استراتژی مناسب‌تری برای دستگاه پرس با سرعت‌بالا می‌باشد.

مدل ارائه‌شده می‌تواند با تعیین زمان تعمیر و نگهداری، هزینه تعمیر و نگهداری را کاهش داده و از سوی دیگر منجر به بهبود زمان ازکارافتادگی و تعمیر و نگهداری شود که در غیر این صورت هزینه بالایی را به سیستمی که از دستگاه پرس با سرعت‌بالا استفاده می‌کند تحمیل می‌نماید. قابلیت اطمینان سیستم نیز با کمک مدل ارائه‌شده افزایش می‌یابد و درنتیجه می‌توان انتظار داشت بهبود قابلیت اطمینان اثر مثبتی بر عملکرد دستگاه برجا می‌گذارد. از نظر بینش‌های مدیریتی باید تأکید شود که با توجه به اینکه دستگاه با پرس دارای سرعت‌بالا دارای اهمیت بالایی می‌باشد، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه باید در دستور کار قرارگرفته و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بر اساس مدل ارائه‌شده در تحقیق حاضر می‌تواند به بهبود عملکرد مدل کمک نماید. به‌منظور بالا بردن قابلیت اطمینان دستگاه لازم است برنامه‌ریزی مدون تعمیر و نگهداری پیشگیرانه صورت گرفته و از تعمیر و نگهداری اصلاحی به دلیل هزینه بالا اجتناب شود. عدم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه می‌تواند باعث افزایش زمان بیکاری و ازکارافتادگی دستگاه شود، چراکه دستگاه قابل‌استفاده در صورت خرابی اصلاحی نیست و همین امر می‌تواند باعث شود به‌منظور تعمیر و نگهداری اصلاحی زمان زیادی صرف شده و لذا تعمیر و نگهداری پیشگیرانه باید در این خصوص به یک مدل جدی و راهبردی تبدیل شود. تحقیق حاضر مدل را به‌صورت قطعی در نظر گرفت در حالی که تحقیق آتی می‌تواند محدودیت تحقیق حاضر را با ارائه یک مدل احتمالی مرتفع نماید تا مسئله به جهان واقعی نزدیک‌تر شود.

۶- فهرست علائم

i	قطعه
t	دوره زمانی
j	بازه زمانی

مشارکت‌های نویسندگان

کاظم رمضانی: مدل مفهومی پژوهش، مرور ادبیات و پیشینه نظری، مدل ریاضی، تحلیل داده‌ها؛ **محمدحسین درویش متولی:** مرور ادبیات و پیشینه نظری، تحلیل داده‌ها و کدنویسی؛ **مجید معتمدی**: تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی اولیه گزارش و تدوین روش‌شناسی پژوهش؛ **محمدمهدی موحدی:** بازنگری متن.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

از همه همکارانی که با ارائه بینش و تخصص خود به این تحقیق کمک شایانی کردند، سپاسگزاریم. همچنین از داوران ناشناس به خاطر پیشنهادات ارزشمندشان برای بهبود مقاله تشکر می‌کنیم.

مراجع

Afsharnia, F., & Marzban, A. (2020). Investigating the long-term effect of preventive maintenance strategy on the operational efficiency and failure rate of sugarcane harvester using time series. *Journal of Agricultural Machinery, 10*(2), 347–359. https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.70962

Ali, B. M., Tariq, J., Mohammed, A., Fakhruldeen, H. F., Hanoon, T. M., Khurramov, A., & Algburi, S. (2025). Sustainable strategies for preventive maintenance and replacement in photovoltaic power systems: Enhancing reliability, efficiency, and system economy. *Unconventional Resources, 6*, Article 100170. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100170

Alqaryuti, A., Moawad, K., Salah, K., Mayyas, A., & Jayaraman, R. (2025). Blockchain-driven framework for preventive maintenance management of aircraft hydraulic systems. Discover Internet of Things, 5(1), 1-25. https://doi.org/10.1007/s43926-025-00149-x

Borowski, S., Szubartowski, M., Migawa, K., Sołtysiak, A., Neubauer, A., Hujo, L. U., & Nosian, J. (2023). Mathematical model for determining the time of preventive replacements in the agricultural machinery service system with minimal repair. *Applied Sciences*, *13*(1), 640. https://doi.org/10.3390/app13010640

Chen, X., Li, Q., Sesay, T., You, Q., & Chineche, E. B. (2024). Valorization of recycled wastes in pavement preventive maintenance: A review on reclaimed asphalt pavement and recycled waste tire. *Heliyon, 10*(6), Article e27776. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27776

Damchi, Y., & Saebi, J. (2023). Risk-based preventive maintenance planning model considering intangible risk indices. *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, 53(3), 171–182. https://doi.org/10.22034/tjee.2023.53875.4540

de Oliveira Salles, G. M., Baracy, Y. L., Venturini, L. F., Weigert-Dalagnol, G. R., de Souza Benedito, R. A., & Issicaba, D. (2025). Inspection and preventive maintenance optimization of electrographite brushes for a hydrogenerator unit in the Brazilian interconnected power system. *Results in Engineering, 25*, 103770. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103770

del Castillo, A. C., & Parlikad, A. K. (2024). Dynamic fleet management: Integrating predictive and preventive maintenance with operation workload balance to minimise cost. *Reliability Engineering & System Safety, 249*, Article 110243. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110243

Emadi, S. H., Sadeghian, A., Rabbani, M., & Dehghan Dehnavi, H. (2024). Application of optimal control approach in the optimization of production inventory systems in supply chain. *System Engineering and Productivity, 4*(1), 85–98. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2026595.1203

Gorji, M. A., & Jamali, M. B. (2022). Comprehensive model for evaluating maintenance and repair policies based on interval fuzzy numbers. *System Engineering and Productivity, 2*(1), 51–74. https://doi.org/10.22034/sep.2022.243404

Hasani, A. A. (2018). Multi-objective hybrid metaheuristic search algorithm for distributed reentrant permutation flow shop scheduling via considering preventive maintenance under uncertainty. *Research in Production and Operations Management, 9*(2), 1–22. https://doi.org/10.22108/jpom.2018.92504.0

Javadi, M., Fatemi, S., Azizi, A., & Najafi, E. (2024). Designing an intelligent dynamic model of preventive maintenance and repairs in the textile and clothing industry in interaction with production using fuzzy-artificial neural network. *Engineering Management and Soft Computing, 9*(2), 63–90. https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.9078.1169

Kaewbumrung, M., Plengsa-Ard, C., Pansang, S., & Palasai, W. (2024). Preventive maintenance of horizontal wind turbines via computational fluid dynamics-driven wall shear stress evaluation. *Results in Engineering, 22*, 102383. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102383

Khodayari, M., & Abdollahzadeh, S. (2018). Proposing an approach to determine the appropriate multi-product preventive and maintenance policies using simulation and MCDM. *Industrial Management Journal*, *10*(2), 279-296. https://doi.org/10.22059/imj.2018.248555.1007365

Moshiri, S., & Rashidi Komijan, A. (2023). Integrated supply-production-distribution model with the aim of profit maximization (Case study: Zimaband Ariafer Factory). *System Engineering and Productivity, 3*(1), 157–184. https://doi.org/10.22034/sep.2023.706146

Pourghader Chobar, A. (2022). Mathematical modeling and problem solving Integrated production planning and preventive maintenance with limited human resources. *Journal of New Researches in Mathematics*, *8*(39), 5-24.

Ramezani, K., Motamedi, M., Darvish Motevali, M. H., & MehdiMovahedi, M. (2024). A Multi-Objective Optimization Approach for Smart Preventive Maintenance in High-Speed Presses Using MOPSO and Real-Time Reliability Analysis. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, *16*(3), 118-130.

Ruiz-Castro, J. E., & Zapata-Ceballos, H. A. (2025). Algorithmic modelling of a complex redundant multi-state system subject to multiple events, preventive maintenance, loss of units and a multiple vacation policy through a MMAP. *Mathematics and Computers in Simulation, 230*, 165–192. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2024.11.005

Salehian, Z., & Jahan, A. (2022). Establishing a reliability-based maintenance methodology in a gas pressure reduction system. *System Engineering and Productivity, 1*(1), 121–136. https://doi.org/10.22034/sep.2022.243401

Sánchez-Garrido, A. (2024). On Krylov Complexity. *arXiv preprint arXiv:2407.03866*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.03866

Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2024). Sustainable preventive maintenance of MMC-based concrete building structures in a harsh environment. *Journal of Building Engineering, 95*, 110155. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110155

Sedighi, A., Ghandehari, M., & Abtahi, S. M. (2025). Condition-based preventive maintenance planning of railway tracks: A genetic algorithm-based mathematical model. *Industrial Management Journal, 17*(1), 1–33. (In Persian). https://doi.org/10.22059/imj.2025.383567.1008199

Shams, H., Hashemzadeh Khorasgani, G. R., Abbaspour Esfadan, G., Farsijani, H., & Shahmansouri, A. (2025). Presentation of a mathematical model to examine the economic advantages of maintenance strategies. *System Engineering and Productivity*, *5*(2), 17-33. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264

Su, H., Li, Y., & Cao, Q. (2024). A stochastic model of preventive maintenance strategies for wind turbine gearboxes considering the incomplete maintenance. *Scientific Reports, 14*(1), 5700. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56436-0

Ulansky, V., & Raza, A. (2024). A historical survey of corrective and preventive maintenance models with imperfect inspections: Cases of constant and non-constant probabilities of decision making. *Aerospace, 11*(1), 92. https://doi.org/10.3390/aerospace11010092

Wang, D. D., Wang, K., Qian, Z., & Jiang, F. (2025). Is it wise for manufacturers to implement preventive maintenance in the sharing business model? *International Journal of Production Research, 63*(4), 1415–1435. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2377691

Wang, Y. (2025). Quality control and preventive maintenance site management of oil drilling machinery equipment based on intelligent monitoring. *Academic Journal of Engineering and Technology Science, 8*(1), 50–55. https://doi.org/10.25236/AJETS.2025.080108