

Integrating Sustainability into Maintenance Strategy Selection: A FUCOM-based Case Study from Automotive Parts Industry

Hamid Moakedi¹, Fazel Hajizadeh Ebrahimi¹, Majid Soltanmohammadi²

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, College of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

² M.Sc., Department of Industrial Engineering, College of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

HIGHLIGHTS

- Preventive Maintenance (PM) was selected as the most desirable strategy.
- The social dimension was identified as the highest priority sustainability aspect.
- "Replacing worn-out equipment with green equipment" was recognized as the most critical criterion.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 October 2025

Revised: 3 November 2025

Accepted: 10 November 2025

Available online: 11 November 2025

*Correspondence: moakedi@qut.ac.ir

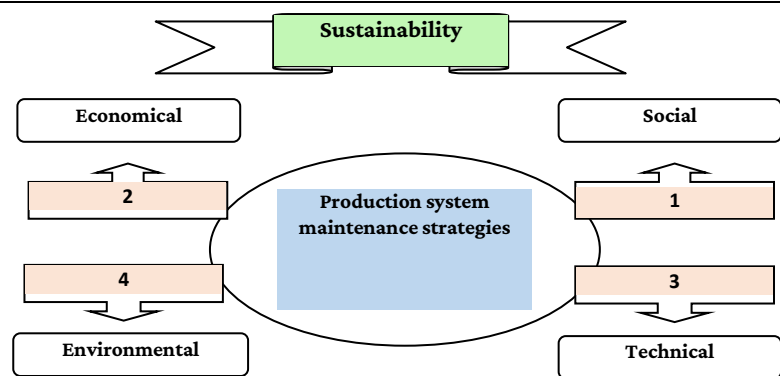
How to cite this article:

Moakedi, H., Ebrahimi, F. H., & Soltanmohammadi, M. (2026). Integrating sustainability into maintenance strategy selection: a fucom-based case study from automotive parts industry. *System Engineering and Productivity*, 6 (2), 291-321.

Keywords:

Sustainable Maintenance
Automotive Parts Industry
Multi-Criteria Decision-Making
FUCOM
Maintenance Strategy Selection

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This study aimed to identify and prioritize maintenance strategies for production systems based on sustainability principles in the automotive parts industry. The present study is applied in terms of purpose and descriptive-survey in terms of data collection. Using literature review and expert opinions, sustainability criteria were identified and confirmed via the Delphi method within four dimensions: economic, social, environmental, and technical. The weights of the main criteria and sub-criteria were then calculated using the FUCOM multi-criteria decision-making method. Finally, seven maintenance strategies were ranked using the SAW and TOPSIS techniques. The statistical population consisted of four automotive parts manufacturing companies, and data were collected through questionnaires and surveys from 10 experts. The findings revealed that among the sustainability dimensions, the social dimension held the highest priority, followed by the economic, technical, and environmental dimensions. Among the sub-criteria, "Decommissioning worn-out equipment and replacing it with green equipment" ranked first, followed by "Compliance with safety and environmental standards" and "Employee expertise." Regarding the maintenance strategies, the Preventive Maintenance (PM) strategy ranked first, the Total Productive Maintenance (TPM) strategy ranked second, and the Predictive Maintenance (PreM) strategy ranked third. Given the high priority of the social and economic dimensions, it is recommended that managers in the automotive parts industry focus on preventive and total productive maintenance strategies to enhance both productivity and the sustainability of their operations.

1. Introduction

Maintenance has evolved from a mere supportive function to a critical strategic imperative in modern production systems. It is instrumental in ensuring equipment reliability, sustaining product quality, and enhancing operational efficiency (Shakerikenari et al., 2019). In today's intensely competitive industrial landscape, the traditional perception of maintenance as a cost center is obsolete; it is now unequivocally recognized as a profit-generating function vital for long-term organizational success and competitiveness (Sabet Motlaq, 2018).

Concurrently, escalating global pressures—ranging from stringent environmental regulations to growing societal expectations for corporate responsibility—have rendered sustainability a non-negotiable pillar of industrial operations. The concept of sustainable maintenance, which seeks an optimal balance between economic prosperity, social equity, environmental responsibility, and technical feasibility, has consequently emerged as a paramount strategic objective for industries worldwide (Ighravwe & Oke, 2019). The automotive industry, a cornerstone of many national economies, epitomizes this dual challenge. It operates with complex, capital-intensive machinery that demands meticulous maintenance, all while being under constant scrutiny to adhere to ambitious sustainability goals (Ighravwe et al., 2019; Chen et al., 2019; De Campos & Simon, 2019; Kumar et al., 2018; Mahmoud et al., 2024; Sadeghi et al., 2012; Sahoo, 2018; Sahoo, 2019). Within this sector, automotive parts manufacturing faces unique pressures due to its position in the supply chain, requiring robust and rational frameworks to select maintenance strategies that align with these multifaceted objectives (Shahrjerdi & Ghorbanpour, 2023; Shakerikenari, & Safaei Ghadikalai, 2019; Shams et al., 2025). While Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods have been extensively applied in maintenance management, their application integrated with a *comprehensive* sustainability framework within the automotive parts industry remains notably limited (Taghipour & Awkh Darestani, 2018). Previous studies often focus on one or two dimensions of sustainability, typically economic and technical, while treating social and environmental aspects as secondary concerns or neglecting them altogether. Furthermore, many existing models rely on older weighting methods that require a large number of pairwise comparisons and can suffer from consistency issues, potentially compromising the reliability of the results.

This study aims to bridge this critical gap by developing and applying an integrated, robust MCDM model explicitly designed for sustainable maintenance strategy selection in the Iranian automotive parts industry. The research is guided by the following primary questions:

1. What is the relative priority of sustainable maintenance criteria (across economic, social, environmental, and technical dimensions) in the automotive parts industry?
2. How are these four sustainability dimensions prioritized against each other in this context?
3. How are common maintenance strategies ranked based on these weighted sustainability criteria?

The novelty and contribution of this work are threefold. First, it introduces a *holistic four-dimensional sustainability framework* tailored to the specific context of maintenance in the automotive parts sector. Second, it employs the FUCOM (Full Consistency Method) for criteria weighting—a method chosen for its significant advantage of requiring fewer pairwise comparisons from experts while guaranteeing high consistency, thus enhancing the reliability of the derived weights (Pamučar et al., 2018). Third, it integrates FUCOM with two well-established ranking techniques, SAW (Simple Additive Weighting) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), to provide a robust and cross-validated prioritization of maintenance strategies. This hybrid FUCOM-SAW-TOPSIS framework is applied to a real-world industrial case study, offering actionable insights for managers and contributing a validated methodological tool to the body of knowledge.

2. Methodology

The research was conducted in three main phases.

2.1. Phase 1: Identification and Validation of Criteria

Through a comprehensive literature review, 30 sub-criteria across four main sustainability dimensions were identified (Economic: 10, Social: 8, Environmental: 6, Technical: 6). These criteria were validated over two rounds of the Delphi method with a panel of 10 experts. The reliability of the questionnaire was confirmed with a Cronbach's Alpha of 0.893. A high consensus was achieved, leading to the final confirmation of all criteria.

2.2. Phase 2: Weighting Criteria using FUCOM

The FUCOM method was employed to determine the objective weights of the criteria and sub-criteria, significantly reducing the number of pairwise comparisons and ensuring full consistency (Pamučar et al., 2018). The steps are as follows:

1. Ranking of Criteria: Experts ranked the criteria based on their importance.
2. Determination of Comparative Priorities (φ): The priority of criterion C_j over $C_{(j+1)}$ was determined.
3. Calculation of Final Weights: The final weights (w_1, w_2, \dots, w_k) were calculated by solving the following optimization model:

min χ
subject to:

$$|w_j/w_{(j+1)} - \varphi(j/(j+1))| \leq \chi, \text{ for all } j$$

$$|w_j/w_{(j+2)} - \varphi(j/(j+1)) * \varphi((j+1)/(j+2))| \leq \chi, \text{ for all } j$$

$$\sum w_j = 1, w_j \geq 0$$

This model was solved using LINGO software.

2.3. Phase 3: Ranking Strategies using SAW and TOPSIS

Seven common maintenance strategies were evaluated:

- Breakdown Maintenance (BM),
- Preventive Maintenance (PM),
- Corrective Maintenance (CM),
- Reliability-Centered Maintenance (RCM),
- Total Productive Maintenance (TPM)
- Condition-Based Maintenance (CBM), and
- Predictive Maintenance (PreM).

Experts rated these strategies against the validated sub-criteria. The SAW and TOPSIS methods were then used for final ranking, providing a robust comparison.

3. Results and Discussion

3.1. Weighting of Dimensions and Sub-Criteria

The weights of the main sustainability dimensions, calculated via FUCOM, are presented in Table 1. The social dimension was found to be the most critical. The top three sub-criteria by their final global weights are shown in Table 2. "Replacing worn-out equipment with green equipment" was the most influential factor overall.

3.2. Ranking of Maintenance Strategies

The rankings of the seven maintenance strategies, obtained through both SAW and TOPSIS methods, are summarized in Table 3. Both methods consistently identified PM as the top strategy, followed by TPM and PreM.

4. Conclusions

This study successfully developed and applied a structured MCDM framework to integrate sustainability into maintenance strategy selection. The finding that the social dimension holds the highest priority underscores a shift in managerial focus towards human capital, psychological well-being, and organizational culture as foundational elements for sustainable operations in the Iranian automotive parts sector. The top rank of Preventive Maintenance (PM) aligns with its proactive nature, which effectively balances cost, resource consumption, equipment reliability, and safety, making it a cornerstone of sustainable practice. The high global weight of sub-criteria like "Replacing worn-out equipment with green equipment" and "Employee expertise" signals that strategic, long-term investments (in both technology and people) are perceived as more critical for sustainability than short-term operational controls.

The theoretical and practical implications of this research are as follows.

1. Theoretical: This research enriches the sustainable maintenance literature by introducing a validated, hybrid FUCOM-SAW-TOPSIS model. It demonstrates the efficacy of FUCOM in complex, multi-dimensional decision environments.

2. Practical: The framework provides managers with a clear, actionable tool to prioritize resources and select maintenance strategies that align with broader sustainability goals. The results guide managers to focus on social factors and employee well-being while not neglecting strategic technological upgrades.

In conclusion, this paper presents a robust and replicable model for selecting sustainable maintenance strategies. The integrated use of FUCOM, SAW, and TOPSIS ensured a rigorous and reliable outcome. For the automotive parts industry, the recommended path is to prioritize Preventive (PM) and Total Productive Maintenance (TPM) strategies, supported by investments in green technologies and employee skill development. Future research could explore the application of this framework in other industries or use other emerging MCDM methods for comparative analysis.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have contributed equally to the conceptualization, methodology, investigation, writing, and review of this manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors are grateful to the industry experts who participated in the surveys and the anonymous reviewers for their valuable insights.

References

- Chen, C., Liu, Y., Sun, X., Di Cairano-Gilfedder, C., & Titmus, S. (2019). Automobile maintenance prediction using deep learning with GIS data. *Procedia CIRP*, 81, 447-452. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.077>
- De Campos, R. S., & Simon, A. T. (2019). Insertion of sustainability concepts in the maintenance strategies to achieve sustainable manufacturing. *Independent Journal of Management & Production*, 10(6), 1908-1931. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v10i6.939>
- Ighravwe, D. E., & Oke, S. A. (2019). A multi-criteria decision-making framework for selecting a

- suitable maintenance strategy for public buildings using sustainability criteria. *Journal of Building Engineering*, 24, 100753. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100753>
- Kumar, A., Shankar, R., & Thakur, L. S. (2018). A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. *Journal of computational science*, 27, 428-439. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.006>
- Mahmud, I., Ismail, I., Abdulkarim, A., Shehu, G. S., Olarinoye, G. A., & Musa, U. (2024). Selection of an appropriate maintenance strategy using analytical hierarchy process of cement plant. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 13(2), 103-109. <https://doi.org/10.1007/s41872-024-00249-7>
- Pamučar, D., Stević, Ž., & Sremac, S. (2018). A new model for determining weight coefficients of criteria in mcdm models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 10(9), 393. <https://doi.org/10.3390/sym10090393>
- Sabet Motlaq, M. (2018). Applying the Concept of Rough Set Theory in Multi-Attribute Decision Making Methods for Evaluating and Selecting the Most Appropriate Maintenance and Repair Strategy. *Strategic Management Research*, 24(70), 65-89. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jitm.2017.61419>
- Shahrjerdi, R., & Ghorbanpour, M. (2023). Evaluation of maintenance strategies of physical assets of service companies with a green approach using fuzzy analytic hierarchy process, case study: Tehran Province Water and Wastewater Company. *Water and Wastewater Science and Engineering*, 8(4), 70-84. (In Persian). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.378307.1340>
- Shakerikenari, E., & Safaei Ghadikalai, A.H. (2019). Determining Maintenance and Repair Strategies Using a Multi-Stage Fuzzy Inference System (Case Study: Shahid Salimi Neka Power Plant). *Industrial Management Studies*, 17(54), 291-325. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/jims.2017.21543.1754>
- Shakerikenari, E., Valipour Khatir, M., & Safaei Ghadikalai, A.H. (2019). Determining Maintenance and Repair Strategies Using a Multi-Stage Fuzzy Inference System. *Industrial Management Studies*, 17(54), 291-325. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/jims.2017.21543.1754>
- 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. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264>
- Taghipour, R. & Awkh Darestani, S. (2018). Maintenance Strategy Selection using Fuzzy Hierarchical Approach. *Quarterly Scientific-Research Journal of Industrial Management Studies*, 16(50), 193-228. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/jims.2018.9111>
- Sadeghi, A., & Alborzi Manesh, R. (2012). The application of fuzzy group Analytic Network Process to selection of best maintenance strategy- A case study in Mobarakeh. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62, 1378-1383. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.236>
- Sahoo, S. (2018). An empirical exploration of TQM, TPM and their integration from Indian manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(7), 1188-1210. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0075>
- Sahoo, S. (2019). Assessment of TPM and TQM practices on business performance: a multi-sector analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(3), 412-434. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2018-0048>

Table 1. Weights of the main sustainability dimensions

| Dimension | Weight | Rank |
|---------------|--------|------|
| Social | 0.2568 | 1 |
| Economic | 0.2495 | 2 |
| Technical | 0.2473 | 3 |
| Environmental | 0.2464 | 4 |

Table 2. Top three sub-criteria by global weight

| Sub-Criterion | Global Weight | Rank |
|---|---------------|------|
| Replacing worn-out equipment with green equipment | 0.0469 | 1 |
| Compliance with safety & environmental standards | 0.0459 | 2 |
| Employee expertise | 0.0448 | 3 |

Table 3. Final ranking of maintenance strategies

| Strategy | SAW Score | SAW Rank | TOPSIS Score | TOPSIS Rank |
|----------|-----------|----------|--------------|-------------|
| PM | 0.9050 | 1 | 0.8514 | 1 |
| TPM | 0.8304 | 2 | 0.6535 | 2 |
| PreM | 0.7907 | 3 | 0.4499 | 3 |
| RCM | 0.7548 | 4 | 0.2871 | 4 |
| CM | 0.7441 | 5 | 0.2842 | 5 |
| CBM | 0.7343 | 6 | 0.2574 | 6 |
| BM | 0.7273 | 7 | 0.2308 | 7 |

ادغام پایداری در انتخاب استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات: یک مطالعه موردی مبتنی بر روش فوکام در صنعت قطعه‌سازی خودرو

حمید مؤکدی^۱،*، فاضل حاجی‌زاده ابراهیمی^۱، مجید سلطان‌محمدی^۲

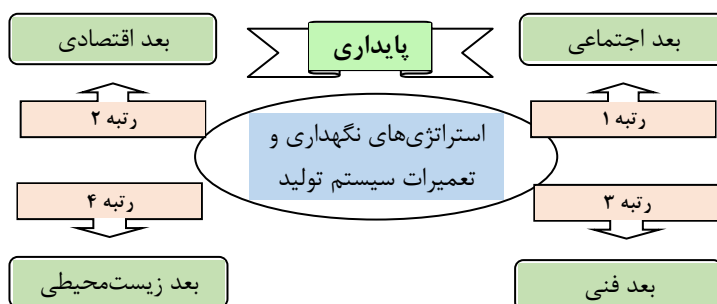
^۱ استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

برجسته‌ها

- نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) به‌عنوان مطلوب‌ترین استراتژی انتخاب شد.
- در بین ابعاد پایداری، بعد اجتماعی دارای بالاترین اهمیت شناسایی گردید.
- «جایگزینی تجهیزات فرسوده با تجهیزات سبز» به‌عنوان مهم‌ترین معیار در تصمیم‌گیری شناخته شد.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

*نویسنده مسئول:

moakedi@qut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نگهداری و تعمیرات پایدار
صنعت قطعه‌سازی خودرو
تصمیم‌گیری چندمعیاره
فوکام
انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات سیستم تولید مبتنی بر اصول پایداری در صنعت قطعه‌سازی خودرو انجام شد. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر گردآوری داده‌ها، توصیفی پیمایشی است. با استفاده از مطالعه ادبیات و نظرات خبرگان، معیارهای پایداری در چهار بعد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی شناسایی و با روش دلفی تأیید شدند. سپس با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فوکام، وزن معیارها و زیرمعیارها محاسبه گردید. در نهایت، هفت استراتژی نگهداری و تعمیرات با استفاده از دو تکنیک مجموع وزنی ساده و تاپسیس رتبه‌بندی شدند. جامعه آماری پژوهش را چهار شرکت قطعه‌سازی خودرو تشکیل دادند و داده‌ها از طریق پرسشنامه و نظرسنجی از ۱۰ خبره گردآوری شد. یافته‌ها نشان داد که در بین ابعاد پایداری، بعد اجتماعی بالاترین اولویت را دارد و ابعاد اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در بین زیرمعیارها، از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزینی با تجهیزات سبز، رتبه اول و رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی و تخصص کارکنان در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در رتبه اول، استراتژی نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر در رتبه دوم و استراتژی نگهداری پیش‌بینی‌کننده در رتبه سوم قرار گرفتند. با توجه به اولویت بالای ابعاد اجتماعی و اقتصادی، به مدیران صنعت قطعه‌سازی خودرو توصیه می‌شود با تمرکز بر استراتژی‌های پیشگیرانه و بهره‌ور فراگیر، ضمن ارتقای بهره‌وری، پایداری عملیات خود را بهبود بخشند.

۱- مقدمه

سازمانی، ادغام آن‌ها در فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به یک ضرورت در شرکت‌های تولیدی تبدیل شده است. با حمایت از اجرای شیوه‌های تولید پایدار، نگهداری پایدار به بهبود عملکرد پایداری شرکت‌های تولیدی کمک می‌کند (Hami et al., 2020) و این مسأله در صنعت تولید خودرو در کشور از اهمیت مضاعفی برخوردار است.

در سال‌های اخیر نگهداری و تعمیرات به‌عنوان عامل مؤثر و قابل‌توجهی در بهبود کارکرد دستگاه‌ها بوده و نقش نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های تولیدی مدرن مهم‌تر شده است. نگهداری و تعمیرات نقش مهمی در دستیابی به اهداف سازمانی، حفظ قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، کاهش زمان توقف تجهیزات، کیفیت تولیدات، کاهش ریسک، افزایش بهره‌وری، ایمنی تجهیزات و غیره برعهده دارد، لذا نگهداری و تعمیرات و استراتژی‌های آن از جایگاه ویژه‌ای در صنایع برخوردار است (Taghipour & Awkh Darestani, 2018) و تعیین بهترین استراتژی در این زمینه می‌تواند به باقی‌ماندن کارخانجات صنعتی در گردانه رقابت کمک نماید (Al-Barzemanesh, 2011).

متأسفانه برخلاف مشکلات تولیدی که سرمایه‌گذاری و توجه زیادی از سوی محققین و نظریه‌پردازان به آن‌ها شده، نگهداری و تعمیرات در گذشته چندان مورد توجه قرار نگرفته است؛ از سوی دیگر، فقدان استراتژی مدون بر اساس اصول مدیریت علمی در حوزه نگهداری و تعمیرات، سیستم‌ها را به سیستمی واکنشی در برابر محیطی پویا، بر اساس رویکرد کیفیت و مشتری‌محوری تبدیل نموده است (Zakeri Getabi, 2014).

عملکرد نامناسب تجهیزات، پدیده‌ای است که هر سازمان تولیدی با آن روبه‌رو می‌شود. انتخاب نوع راهبرد نگهداری و تعمیرات در قبال این پدیده به عوامل مختلفی بستگی دارد. با توجه به این‌که عملکرد نامناسب تجهیزات یکی از عوامل مهم اتلاف منابع، کاهش کیفیت خروجی، ازدست‌دادن مشتری، حوادث نیروی انسانی، هزینه بالا و غیره است، اهمیت این مسأله زمانی دوچندان می‌شود که کالای تولیدی، یک محصول استراتژیک در خط تولید پیوسته باشد (Sharafat et al., 2018).

هزینه نگهداری و تعمیرات یکی از هزینه‌های اصلی شرکت‌ها است که بسته به نوع هر صنعت، ۲۰ تا ۶۵ درصد از هزینه‌های تولیدی را شامل می‌شود. به علت

امروزه سیاست‌های نگهداری و تعمیرات (نت) نقش بسیار مهمی در فرآیند تولیدی و حفظ و نگهداری ماشین‌ها و تجهیزات مرتبط در شرایط قابل‌قبول و استاندارد ایفا می‌کنند (Tabatabaei & Davoudi, 2018). نگهداری و تعمیرات یکی از اجزای حیاتی ساختار سازمانی در اکثر شرکت‌ها می‌باشد. صرف‌نظر از نوع صنعت و محصولات در حال تولید، تمامی شرکت‌های صنعتی دارای منابع فنی از جمله ماشین‌آلات و تجهیزاتی هستند که نیاز به نگهداری و تعمیرات دارند. با توجه به نظر (Graisa, 2011) نگهداری و تعمیرات یک عملکرد حیاتی از هر سیستم برای عملکرد کارآمد (Hami et al., 2020) و از مباحث مهم هر صنعت است که از طرق مختلف منجر به افزایش بهره‌وری و کارایی می‌گردد و نقش مهمی در ایجاد سطوح اطمینان، کیفیت محصول و نیازهای امنیتی ایفا می‌کند (Zakeri Getabi, 2014). اهمیت مقوله نگهداری و تعمیرات از آنجاست که مدیریت کارآمد آن می‌تواند در تداوم خطوط تولید و کاهش هزینه‌ها بسیار مؤثر باشد (Shakerikenari & Safaei, 2019).

امروزه، به دلیل فشار دولت‌ها، علاقه به تولید آگاهانه از محیط‌زیست ضرورت یافته و مسأله پایداری را نمی‌توان نادیده گرفت و به آن کم‌توجهی کرد. منظور از مفهوم پایداری، تضمین استفاده مؤثر و مسئولانه منابع محدود سازمان به‌منظور حفظ و بهبود عملکرد و دستیابی به اهداف می‌باشد (Wątrobski et al., 2023). اصطلاح پایداری به معنای نگهداری و انطباق مداوم با محیط در حال تغییر، در زمینه اجتماعی و اقتصادی تعریف شده است. مطالعات اخیر نشان‌دهنده نگرانی فزاینده محققان نسبت به نظارت و اندازه‌گیری عملکرد پایداری در سطوح مختلف و در بسیاری از زمینه‌ها است. با این حال، هیچ رویکرد توافقی برای ارزیابی پایداری سیستم‌های نگهداری و تعمیرات وجود ندارد. علاوه بر این، شاخص‌های اجتماعی کمتر توسعه‌یافته و موجز هستند (Wątrobski et al., 2023).

پیوندهای ارزشمند بین استراتژی نگهداری و تعمیرات و نگهداری پایدار اهمیت بالایی دارد و پایداری به‌عنوان محوری برای نگرانی‌های مسئولیت تولید درک می‌شود و به دلیل گنجاندن پایداری در اکثر فعالیت‌ها و فرآیندهای

یک استراتژی مناسب بایستی همه جوانب را سنجید و با در نظر گرفتن فاکتورهای متعدد اعم از مالی و غیرمالی بهترین استراتژی را انتخاب نمود (Tabatabaei & Davoudi, 2018).

توجه به معیارهای مهم نگهداری و تعمیرات ضروری است. استراتژی‌هایی برای اتخاذ معیارهای تصمیمات ارزشمند به صورت جداگانه با نحوه کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂، هزینه‌های عمرانی، دستیابی به حداکثر درجه حرارت ناسازگاری و کارکردن مطابق بودجه سال مالی مرتبط هستند (Ighravwe & Oke, 2019). با توجه به تجمع آلاینده‌گی و پساب‌های موجود در جامعه، معمولاً شروع دعوی قضایی علیه شرکت‌ها مشاهده می‌شود و ممکن است شرکت‌ها به دلیل عدم مسئولیت شرکتی متهم شوند، که باعث تخریب محیط‌زیست شده‌اند. براین اساس انتخاب یک استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات می‌تواند چاره‌ساز واحدهای صنعتی جهت کاهش ریسک شکست تجهیزات، راندمان تولید و کارایی آن باشد (Shakerikenari & Safaei, 2019).

مطالعاتی مثل (Ramezani et al., 2025) در زمینه طراحی مدل ریاضی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و (shams et al., 2025) در حوزه تحلیل اقتصادی راهبردهای نگهداری و تعمیرات نشان داده‌اند که رویکردهای کمی می‌توانند به صورت مؤثری برای بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات به کار گرفته شوند. همچنین، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه‌های مختلف از جمله ارزیابی تأمین‌کنندگان (Kalashi et al., 2025) و طراحی چیدمان (Kashanian Monfared et al., 2025) به اثبات رسیده است. انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات مسئله‌ای است که در آن معیارهای متفاوتی تأثیرگذار می‌باشند. از این رو، می‌توان گفت مسئله انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات نوعی مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره است (Taghipour & Awkh Darestani, 2018). برای نمونه (Mahmud et al., 2024) در مطالعه‌ای بر روی یک کارخانه سیمان، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات بهینه استفاده کردند. اگرچه روش AHP سنتی‌تر است و به مقایسات زوجی بیشتری نیاز دارد، اما مطالعه مذکور به خوبی نشان می‌دهد که رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره تا چه

کم‌توجهی سازمان‌ها به نگهداری و تعمیرات، سالانه هزینه قابل‌توجهی با انتخاب اشتباه استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات از دست می‌رود و یک سوم از کل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در نتیجه فعالیت‌های غیرضروری و نادرست هدر می‌رود (Sabet Motlaq, 2018).

براساس مطالعات صورت‌گرفته ۱۵ تا ۳۰ درصد (میانگین) از کل هزینه‌های مربوط به تولید، به هزینه‌های تعمیراتی اختصاص می‌یابد. بیشتر شرکت‌های بزرگ ۲ تا ۳۶ درصد از معاملات خود را به دلیل توقفات خطوط از دست می‌دهند و در این بین اجرای بهینه و موفق استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات از جایگاه بسیار مهمی برخوردار است (Taghipour & Awkh Darestani, 2018).

بنابراین توسعه روش‌های علمی برای هدایت تصمیم‌گیری و پایداری ماشین‌آلات مهم است (Ighravwe & Oke, 2019) و این امر باعث شده است تا محققان توجه بیشتری به این حوزه داشته باشند. با وجود این، مدیران سازمان‌ها اغلب به فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات کارخانه به چشم هزینه نگاه می‌کنند. در حالی که با تمرکز بر آن می‌توان از آن به‌عنوان یک مرکز سودآوری یاد کرد. در حقیقت، امروزه نگهداری و تعمیرات، در حال تغییر از یک مرکز هزینه به یک مرکز سودآوری می‌باشد (Sabet Motlaq, 2018). نگهداری و تعمیرات مناسب تجهیزات کارخانه، هزینه‌های عملیاتی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش داده و بهره‌وری و کیفیت محصولات شرکت را افزایش می‌دهد و به‌عنوان ابزاری مهم در تولید بهره‌ور مطرح است (Shakerikenari & Safaei, 2019). به‌کارگیری سیستم نگهداری و تعمیرات خاص متناسب با سازمان می‌تواند نقش بسزایی در کاهش قیمت تمام‌شده محصول نهایی ایفا کند؛ اما این تأثیرات تنها محدود به هزینه نبوده، در سرعت ارائه محصول در کل زنجیره تأمین، کیفیت محصول، قابلیت اطمینان، چابکی سازمان و مواردی از این دست هم تأثیرات خاص خود را خواهد داشت (Mohagher et al., 2016).

انتخاب استراتژی مناسب با مجموعه‌ای از تصمیم‌گیری‌های ترکیبی و هم‌شکل به سازمان در راه رسیدن به هدف کمک می‌کند. از این رو استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات باید مؤثر و با اهداف تجارت و تولید هم‌سازگار باشد و در نهایت موجب ایجاد مزیت رقابتی برای سازمان گردد (Zakeri Getabi, 2014). جهت انتخاب

اندازه می‌توانند در اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری در محیط‌های صنعتی پیچیده مؤثر واقع شوند. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش نوین فوکام، در صدد توسعه این خط پژوهشی و رفع برخی محدودیت‌های روش‌های سنتی مانند AHP برآمده است.

با بررسی ادبیات و توجه به مطالعات انجام‌شده (Sadeghi & Alborzi Manesh, Momeni et al., 2011; Taghipour & Awkh Darestani, Ghavami, 2013; 2012) مشاهده می‌شود که پژوهش‌های بسیار اندکی با استفاده جداگانه و یا هم‌زمان از تکنیک‌های چند معیاره در مسائل تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات در صنایع مختلف صورت گرفته است و توسعه و کاربرد این مدل‌ها همچنان در این حوزه احساس می‌شود. از این‌رو، تحقیق حاضر با به‌کارگیری یک چارچوب ترکیبی نوآورانه مستقیماً از توصیه مقاله مروری (Oudah & Kassam, 2025) مبنی بر برتری روش‌های هیبرید پیروی می‌کند. علاوه بر این، این مطالعه با تمرکز بر ابعاد چهارگانه پایداری در صدد غنی‌سازی مجموعه معیارهای شناسایی‌شده در ادبیات پیشین برآمده و گامی نو در انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات برداشته و آن را در صنعت قطعه‌سازی خودرو به کار می‌بندد.

ضرورت این پژوهش از دو جنبه نظری و عملی قابل تبیین است. از جنبه نظری، این تحقیق به توسعه ادبیات نگهداری و تعمیرات پایدار در بستر ایران می‌پردازد و چارچوبی بومی برای تلفیق اصول پایداری در مدیریت نگهداری ارائه می‌دهد. همچنین، گسترش کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه نگهداری پایدار از دیگر ابعاد نظری این پژوهش محسوب می‌شود. از جنبه عملی، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به مدیران صنعت قطعه‌سازی در انتخاب استراتژی‌های نگهداری کارآمد و پایدار کمک نموده و از طریق انتخاب استراتژی بهینه، موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری شود. در نهایت، این پژوهش در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت خودرو کشور گام برمی‌دارد.

این پژوهش در راستای دستیابی به هدف کلی خود، توسط سؤالات تحقیقاتی زیر هدایت می‌شود:

(۱) اولویت و وزن معیارها و زیرمعیارهای پایداری (در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و

¹ Total Productive Maintenance

² Total Quality Management

³ Preventive Maintenance

⁴ Autonomous Maintenance

هزینه‌ها کاهش می‌یابد، موجودی انبار به حداقل می‌رسد و بهره‌وری نیروی کار افزایش می‌یابد (Nakajima, 1988). مدل سنتی TPM از هشت فعالیت یا ستون با پایه قوی 5s تشکیل شده است که منجر به افزایش قابل توجه بهره‌وری نیروی کار، کاهش هزینه‌های نگهداری و کاهش توقف تولید و خرابی می‌شود. برنامه 5s (مدیریت محل کار)، شامل ساماندهی^۱، مرتب‌سازی/نظم‌و ترتیب^۲، پاکیزه‌سازی^۳، استانداردسازی^۴ و انضباط^۵ می‌شود (Rizkya, 2021).

۲-۲- انواع استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات در صنعت خودروسازی

برای سال‌های زیاد، ماشین‌آلات در مقایسه با نیروی کار دستی، جایگزین‌های بهتری ارائه می‌کردند؛ زیرا ماشین‌ها می‌توانستند کارهای پرزحمت را سریع‌تر انجام دهند و باثبات‌تر باشند. امروزه، ماشین‌آلات دیگر یک جایگزین نیستند، بلکه یک ضرورت در بسیاری از صنایع به شمار می‌روند. نگهداری مؤثر کلید عملیات موفق است. تأخیر در برنامه تولید، بهره‌برداری ضعیف از تجهیزات و خرابی‌های متعدد تجهیزات، نشانه‌هایی از نگهداری ضعیف هستند. سرمایه‌گذاری استراتژیک در بخش نگهداری تجهیزات حیاتی است و منجر به بهبود عملکرد و افزایش جایگاه سازمان در بازار می‌شود (Modgil & Sharma, 2016). بنابراین، انتخاب یک استراتژی مناسب نگهداری می‌تواند سازمان‌ها را در دستیابی به این هدف، کمک نماید (Mohammadfam et al., 2017; Aghaei & Fazli, 2012). مطالعات گسترده‌ای در حوزه استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات صنعت خودروسازی از سوی محققین صورت گرفته است. برای مثال، در مقاله (Pophaley & Vyas, 2010) نگهداری و تعمیرات اصلاحی^۶ (CM)، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) و نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌کننده^۷ (PreM) به‌عنوان سه استراتژی مناسب صنعت خودروسازی پیشنهاد شده است.

نگهداری، عملیات و کیفیت محصول و عملکرد است و از سال ۱۹۸۸ به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی نگهداری بهتر از طریق مشارکت کارکنان شناخته شد (Taghavifard et al., 2023).

نگهداری یک سیستم معمولاً به اقدامات تعمیراتی مانند تعمیر، تعویض، تعمیرات اساسی، بازرسی، سرویس، تنظیم، تست، اندازه‌گیری و تشخیص عیوب برای جلوگیری از خرابی‌هایی که منجر به توقف عملیات تولید می‌شود، مرتبط است (Sahoo, 2019). TPM را می‌توان به‌عنوان یک برنامه بهبود در نظر گرفت که یک سیستم جامع نگهداری بهره‌ور را در طول کل عمر تجهیزات ایجاد می‌کند و شامل تمام زمینه‌های مرتبط با تجهیزات و مشارکت همه کارکنان است تا نگهداری بهره‌ور را از طریق انگیزه یا فعالیت‌های داوطلبانه تیم برای اطمینان از بهره‌برداری کارآمد از کارخانه با اتصال توابع تولید، نگهداری و مهندسی ارتقا دهد. بنابراین، اجرای TPM مسئولیت همه کارکنان در سراسر سازمان است. این امر شامل دستیابی به نقص صفر و خرابی صفر در عملیات روزانه می‌شود (Modgil & Sharma, 2016). این مطالعه TPM را به‌عنوان روشی برای به حداکثر رساندن اثربخشی تجهیزات و بهبود کارآمدی با ایجاد یک سیستم جامع نگهداری بهره‌ور در طول کل عمر تجهیزات، که تمام زمینه‌های مرتبط با تجهیزات، برنامه‌ریزی، استفاده و نگهداری را در برمی‌گیرد، توصیف می‌کند.

به گفته سایچی ناکاجیما، پدر TPM، TPM یک سیستم نگهداری و تعمیرات است که کل عمر تجهیزات را در هر بخش از جمله برنامه‌ریزی، ساخت و نگهداری پوشش می‌دهد. بنابراین، با توجه به مفهوم رویکرد TPM، پنج ویژگی کلیدی آن را در اثربخشی تجهیزات بالا، توسعه سیستم نگهداری پیشگیرانه، سیستمی از توابع متقابل، شامل تمام نیروی انسانی، مبتنی بر نگهداری پیشگیرانه از طریق فعالیت گروهی معرفی کرد (Taghavifard et al., 2023).

تمام این تلاش‌ها برای رسیدن به خرابی صفر، نقص صفر، حادثه صفر و اتلاف صفر است که به‌عنوان اهداف نهایی TPM در نظر گرفته شده‌اند (Nakajima, 1988). (Ahuja, & Khamba, 2008). در نتیجه حذف خرابی‌ها و نقص‌ها، نرخ بهره‌وری عملکرد تجهیزات بهبود می‌یابد،

¹ Seiri

² Seiton

³ Seiso

⁴ Seiketsu

⁵ Shitsuke

⁶ Corrective Maintenance (CM)

⁷ Predictive Maintenance (PreM)

استراتژی‌های رایج در اغلب صنایع تولیدی به کار گرفته می‌شوند (Peng, 2018; Modgil & Sharma, 2016; Taghavifard et al., 2023).

نگهداری و تعمیرات پس از خرابی (BM): مدیریت خرابی دوره‌ای است پیش از دهه ۱۹۵۰، زمانی که ماشین‌آلات عمدتاً برای افزایش خروجی تولید به کار می‌رفتند. استفاده از تجهیزات یک جایگزین بود، نه یک ضرورت. در اغلب موارد، نیروی کار دستی به‌عنوان پشتیبان در نظر گرفته می‌شد. بنابراین، عملکرد تجهیزات به‌طور کلی ردیابی نمی‌شد. در این روش، تعمیر ماشین‌آلات و تجهیزات تنها زمانی انجام می‌شود که دستگاه از کارافتاده و دیگر قادر به انجام عملکرد مورد نظر نباشد (Peng, 2018; Modgil & Sharma, 2016). به عبارتی، چیزی به‌نام بخش تعمیرات در شرکت‌ها وجود خارجی نداشت. در BM، خرابی تجهیزات به‌عنوان بلایای طبیعی تلقی می‌شد و تنها می‌توان در صورت وقوع با آن‌ها برخورد کرد (Peng, 2018). این نوع نگهداری معایبی مانند توقف برنامه‌ریزی‌نشده ماشین‌آلات، هزینه بالای قطعات یدکی و زمان تعمیر نامشخص را به دنبال داشت (Modgil & Sharma, 2016).

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM): این روش یک گام فراتر از نگهداری و تعمیرات پس از خرابی (BM) است. اولین رویکرد علمی به مدیریت تجهیزات در دهه ۱۹۵۰ با به‌کارگیری مفهوم نگهداری پیشگیرانه (PM) آغاز شد. در طول این دوره، PM به‌عنوان تنها راه برای کاهش خرابی تجهیزات و توقف‌های بدون برنامه مورد طرفداری قرار گرفت و همچنان یکی از کلیدی‌ترین اقدامات به شمار می‌رود (Peng, 2018). بنابراین، هدف PM کاهش خرابی‌های بدون برنامه یا بدون پیش‌بینی تجهیزات و افزایش طول عمر آن‌ها است (Modgil & Sharma, 2016). این مفهوم دارای چندین مزایا شامل؛ توقف برنامه‌ریزی‌شده، کنترل قطعات یدکی، کاهش خرابی‌ها و بدون زمان انتظار یا تأخیر است (Taghavifard et al., 2023).

نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM): CM در سال ۱۹۵۷ معرفی شد و به‌عنوان نگهداری و تعمیرات انجام‌شده جهت قراردادن تجهیزات/ ماشین‌آلات در شرایط کار عادی از طریق اقدامات اصلاحی تعریف

در مطالعه (Nezami & Yildirim, 2013) با هدف تعیین استراتژی‌های نگهداری پایدار در صنعت خودروسازی، پس از انتخاب معیارهای پایداری در زمینه نگهداری و تعمیرات به رتبه‌بندی پنج استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)، نگهداری و تعمیرات پس از خرابی^۱ (BM)، نگهداری بر اساس قابلیت اطمینان^۲ (RCM)، نگهداری مبتنی بر وضعیت^۳ (CBM) و نگهداری و تعمیرات بهره‌ور کل (TPM) پرداخته شده است. در مطالعه (Aghaei & Fazli, 2012) که با هدف انتخاب بهترین استراتژی نگهداری و تعمیرات برای خودروسازی سایپا دیزل و ایران‌خودرو دیزل ایران انجام شده است، به ترتیب PM، CM، RCM، TPM، CBM و PreM به عنوان استراتژی‌های مناسب نگهداری و تعمیرات خودروهای سنگین معرفی شده‌اند.

محمدفام و همکاران (Mohammadfam et al., 2017) با هدف تعیین استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک در صنعت خودروسازی، استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر زمان^۴ (TBM)، نگهداری و تعمیرات دوره‌ای^۵ (Perm) و (CBM) را در مطالعه خود مورد توجه قرار داده‌اند. در مطالعات دیگری، استراتژی PM (Ngadiman et al., 2015) و استراتژی PreM (Chen et al., 2019)، به‌صورت اختصاصی در صنعت خودروسازی موردبررسی قرار گرفته‌اند.

در مطالعه حاضر، با بهره‌گیری از نظر خبرگان این صنعت و استناد به مطالعات قبلی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، استراتژی‌هایی که برای نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات در صنعت قطعه‌سازی خودرو انتخاب شدند، عبارت‌اند از:

- ۱) نگهداری و تعمیرات پس از خرابی (BM)
 - ۲) نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)
 - ۳) نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)
 - ۴) نگهداری بر اساس قابلیت اطمینان (RCM)
 - ۵) نگهداری و تعمیرات بهره‌ور جامع (TPM)
 - ۶) نگهداری مبتنی بر وضعیت (CBM)
 - ۷) نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌کننده (PreM)
- قابل ذکر است که این استراتژی‌ها به‌عنوان

¹ Breakdown Maintenance

² Reliability-Centered Maintenance (RCM)

³ Condition Based Maintenance

⁴ Time Based Maintenance

⁵ Periodic Maintenance

مشارکت اپراتور در ایجاد قابلیت اطمینان تجهیزات تأکید می‌کند. اجرای TPM در دهه ۱۹۷۰ را می‌توان به سه مؤلفه اصلی تقسیم کرد: پیشگیری از تعمیرات (رویکردی برای حذف خرابی تجهیزات از طریق طراحی یا انتخاب تجهیزاتی که بدون نیاز به نگهداری و تعمیرات، عمل کنند)، نگهداری پیشگیرانه و نگهداری خودمختار (استراتژی مشارکت پرسنل تولید در کل فرآیند نگهداری تجهیزات). بنابراین، اپراتورها تولید مسئولیت انجام بازرسی‌های اولیه، روانکاری، تعویض قطعات ساده و پاک‌سازی تجهیزات را برعهده دارند (Peng, 2018).

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM): CBM، رویکردی است که از شرایط و یا وضعیت عملکرد واقعی سیستم‌ها و تجهیزات کارخانه برای بهینه‌سازی عملکرد کلی کارخانه استفاده می‌کند. این رویکرد با توجه به توسعه روش‌های تشخیص ماشین‌آلات ارائه‌شده و زمانی که علائم شکست از طریق نظارت و یا بازرسی شناسایی می‌شوند، اقدامات پیشگیرانه صورت می‌گیرد. بنابراین CBM سیستم را قادر می‌سازد تا اقدامات مناسبی را در زمان مناسب برای جلوگیری از شکست به‌کار گیرد (Mohammadfam et al., 2017).

نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی‌کننده (PreM): از دهه ۱۹۸۰، فناوری‌های رایانه‌ای به‌طور فزاینده‌ای در کسب‌وکارها به کار گرفته شد. استفاده از رایانه‌ها مدیران نگهداری را قادر ساخت تا فعالیت‌های نگهداری را بیشتر بهینه کنند. سیستم‌های مدیریت کامپیوتری نگهداری و تعمیرات^۱ (CMMS) برای ارتقای اثربخشی مدیریت تجهیزات به‌طور گسترده اجرا شد (Modgil & Sharma, 2016). مفهوم PreM، به‌عنوان جزء جدیدی از TPM به مدیریت نگهداری اضافه شد (Peng, 2018). این روش بر اساس پایش وضعیت لحظه‌ای ماشین‌آلات برای شناسایی مشکلات احتمالی عمل می‌کند. در این روش، تعمیرات بر اساس شرایط خاص دستگاه و نه بر اساس یک برنامه‌ریزی از پیش تعیین‌شده، انجام می‌شود. بنابراین، PreM، نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM) است (Modgil & Sharma, 2016). PreM بر این اصل کار می‌کند که پیشگیری بهتر از درمان است. اجرای چنین مفهومی تا پیش از ظهور فناوری‌های پیشرفته

می‌شود. CM عمدتاً به نگهداری و تعمیرات تجهیزات پس از خرابی با تعمیر تجهیزات و بازگرداندن آن‌ها به محل کار با شرایط بهبودیافته می‌پردازد. برای بهبود قابلیت اطمینان، عمر تجهیزات و ایمنی آن هدف CM، کاهش خرابی یا خرابی تجهیزات است (Taghavifard et al., 2023). CM جایی است که یک مشکل ممکن است بلافاصله به‌عنوان یک مسئله دیده نشود؛ اما اگر اکنون اقدام نشود، احتمالاً در آینده نزدیک به یک مشکل تبدیل خواهد شد. BM جایی است که خرابی قبلاً رخ داده است.

نگهداری بر اساس قابلیت اطمینان (RCM): این مفهوم در دهه ۱۹۶۰ پایه‌گذاری شد و در ابتدا بر روی نگهداری هواپیماها متمرکز بود. روش RCM یک فرآیند منطقی را برای تعیین نیازهای نگهداری و تعمیرات با توجه به قابلیت اطمینان ذاتی و اهمیت ماشین‌آلات دنبال می‌کند (Modgil & Sharma, 2016). روند RCM در پنج مرحله انجام می‌شود: شناسایی تمام عملکردهای تجهیزات؛ بررسی تمام روش‌هایی که ممکن است باعث از دست رفتن عملکرد تجهیزات شوند؛ بازرسی تک‌تک موارد از دست‌رفتن عملکرد برای تعیین تمام حالت‌های خرابی که می‌توانند باعث بروز مشکل شوند؛ تجزیه و تحلیل پیامدهای هر حالت خرابی و قراردادن آن‌ها در چهار دسته: ایمنی، آسیب زیست‌محیطی، عملیاتی و غیرعملکردی؛ توسعه برنامه‌های عملیاتی برای شناسایی شرایط قبل از خرابی به‌منظور جلوگیری از خرابی‌ها (Peng, 2018).

نگهداری بهره‌ور فراگیر (TPM): با پیشگامی صنعت خودروسازی ژاپن، به‌ویژه تویوتا و شرکت‌های وابسته، مدیریت تجهیزات با استفاده از مفهوم TPM وارد مرحله جدیدی شد. TPM مفهومی است که روش آمریکایی نگهداری پیشگیرانه (PM) را با کنترل کیفیت فراگیر ژاپنی (TQC) و مشارکت کل کارکنان (TEI) ترکیب می‌کند. تمرکز هر دو نگهداری پیشگیرانه و نگهداری بهره‌ور بر جنبه صرفاً فنی مدیریت تجهیزات تحت چتر اصول مدیریت علمی، پس از جنبش روابط انسانی در مدیریت کلی سازمان‌ها، به سمت در نظر گرفتن عوامل انسانی حرکت کرد. بر اساس گفته‌های ناکاجیما، اهداف دوقلوی TPM خرابی صفر و نقص صفر هستند. برای دستیابی به چنین اهداف جاه‌طلبانه‌ای، TPM بر اهمیت

^۱ Computerized Maintenance Management Systems

حوزه، به‌طور کامل این توانایی را نشان نداده‌اند (Ighravwe & Oke, 2017).

متخصصان دانشگاهی و صنعتی اغلب به نگهداری پایدار و مجموعه‌ای از فرآیندهای به هم مرتبط برای دوام دارایی‌ها در طول بهره‌برداری، کاهش تأثیر لجستیک بر جنبه‌های اقتصادی، دستیابی به بهترین شیوه‌های سازمانی و مدیریتی، افزایش ایمنی اجتماعی کارکنان و کاهش پیامدهای زیست محیطی اشاره می‌کنند (Nardo et al., Olugu et al., 2022). ناردو و همکاران (Nardo et al., 2021) با توسعه یک چارچوب مفهومی برای پایداری و نگهداری بهینه در شرکت‌های کوچک و متوسط مالزیایی بر لزوم حل مشارکتی و بهینه‌سازی جنبه‌های مختلف مدیریت نگهداری و تعمیرات تأکید شده است. دی کامپوس و سیمون (De Campos & Simon, 2019) علاوه بر معرفی مفهوم نگهداری پایدار، به مزایای داخلی و خارجی که شرکت هنگام اجرای نگهداری پایدار به دست می‌آورد، اشاره شده است. نمونه‌هایی از این مزایا در جدول ۱ آورده شده است.

برای اینکه اقدامات نگهداری و تعمیرات بتوانند تعادل بین ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را برقرار کنند، ابتدا باید مفاهیم پایداری در استراتژی‌های نگهداری گنجانده شود تا کنترل بهتری بر هزینه‌های نگهداری، کیفیت بالاتر محصولات و خدمات، کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از اقدامات نگهداری و همچنین کمک به رفاه اقتصادی، سلامت، ایمنی و آموزش کارکنان حاصل شود (De Campos & Simon, 2019).

طراحی به کمک رایانه (CAD) و ساخت به کمک رایانه (CAM) عمدتاً غیرعملی بود (Taghavifard et al., 2023). تفاوت دو استراتژی PreM و CBM را می‌توان در ۳ آیتم استفاده از دیتا، هدف، ابزارهای مورد استفاده خلاصه کرد.

۲-۳- استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایداری

عوامل مختلفی در موفقیت‌آمیز بودن برنامه‌ریزی نگهداری تأثیرگذار هستند، به همین دلیل شرکت‌های تولیدی به‌طور مداوم در حال بررسی استراتژی نگهداری خود هستند، تا الزامات سیاست‌های نگهداری کوتاه‌مدت و میان‌مدت خود را اصلاح و ثبت کنند. انتخاب یک استراتژی نگهداری برای رعایت استانداردهای زیست محیطی و ایمنی، افزایش در دسترس بودن و طولانی کردن عمر دارایی درعین حال کاهش خرابی‌های پرهزینه بسیار مهم است (Ighravwe, 2022). نگهداری پایدار به شاخه‌ای از یادگیری و عمل اشاره دارد که بازتاب‌دهنده ادامه حیات یک سیستم همراه با نقشی برای کاهش کل هزینه‌های عملیاتی، افزایش کمیت (تولید)، کاهش عدم اطمینان تجهیزات و ارتقای عملکرد کلی کارخانه است. حوزه نگهداری پایدار توانایی قابل توجهی برای تأثیرگذاری بر حوزه‌های مهم فعالیت‌های فنی، محیط‌زیست و تنظیمات اجتماعی دارد. باوجود این، منابع موجود در این

جدول ۱. مزایای داخلی و خارجی اجرای نگهداری پایدار (منبع: De Campos & Simon, 2019)

Table 1. Internal and external benefits of implementing sustainable maintenance

| مزایا | داخلی | خارجی |
|-------------|---|--|
| بعد اقتصادی | - کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی | - کاهش ریسک خسارت‌های جدی |
| | - کاهش موجودی مواد | - کاهش جریمه‌های ناشی از خرابی‌ها |
| | - کاهش هزینه تولید به ازای هر واحد محصول | - افزایش سطح رقابت‌پذیری سازمان |
| بعد اجتماعی | - ارتقاء سطح ایمنی کارکنان عملیاتی و تعمیراتی | - کاهش یا حذف جریمه‌های ناشی از رویه‌های نادرست |
| | - کاهش تعداد حوادث ناشی از کار | - کاهش اختلالات و عدم انطباق با قوانین برای جوامع محلی |
| | | - کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر |
| بعد محیطی | - کاهش حجم ضایعات تولیدی | - ایجاد تصویری مثبت از شرکت در زمینه ایمنی و بهداشت |
| | - کاهش مصرف انرژی | |

اجتماعی، محیط‌زیست و فنی ش تقسیم‌بندی شده است؛ به‌طوری‌که هر کدام از این ابعاد دارای یکسری زیر معیار نیز می‌باشند (جدول ۲). بعد اقتصادی شامل ۱۰ معیار، بعد اجتماعی شامل ۸ معیار؛ بعد محیط‌زیست شامل ۶ معیار؛ و بعد فنی نیز شامل ۶ معیار است. بدیهی است که به‌منظور عملیاتی‌سازی این معیارها در شرکت منتخب، باید از خبرگان این شرکت نیز نظرسنجی به عمل آید.

۴-۲- پیشینه پژوهش

واتروبسکی و همکاران (Wątrobski et al., 2023) برای ارزیابی سیستم‌های مراقبت‌های بهداشتی پایدار، به‌دنبال ارائه یک چارچوب مفهومی و ساختاری که بتواند اندازه‌گیری سیستم‌های سلامت مبتنی بر پایداری اجتماعی را هدایت کند، یک روش چندمعیاره جدید به‌نام فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر پارادایم پایداری قوی (SSP-AHP)، به‌کاربرده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که پایدارترین سیستم‌های اجتماعی کشورهای شمال اروپا هستند. آن‌ها سطح بالایی از حمایت اجتماعی و مالی را ارائه می‌دهند و به نتایج بهداشتی بسیار خوبی دست می‌یابند. علاوه بر این، پایداری اجتماعی آن‌ها با ایجاد تعادل در تمام ارزش‌های شناسایی‌شده حفظ می‌شود. از سوی دیگر، ناپایدارترین سیستم‌ها، واقع در کشورهای اروپای مرکزی و شرقی، دارای سطح بالایی از نیازهای برآورده نشده، کمبود نیروی کار و کمبود بودجه در مراقبت‌های بهداشتی هستند.

پنگ و همکاران (Peng et al, 2022) برای بهینه‌سازی استراتژی نگهداری پل‌های درحال تخریب با درنظرگرفتن معیارهای پایداری، از جمله عملکرد ایمنی، تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، یک چارچوب بهینه‌سازی سیستماتیک و یک روش تصمیم‌گیری نوین، مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و یک الگوریتم تصمیم‌گیری مبتنی بر تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی برای تجزیه و تحلیل چندبعدی ترجیحات^۱ توسعه داده شده است. نتایج تحلیل موردی نشان می‌دهد. در مقایسه با نگهداری اصلاحی، اجرای نگهداری پیشگیرانه برای تحقق توسعه پایدار پل‌های درحال تخریب مناسب‌تر است.

در این زمینه نظامی و بیلدریم بیان داشتند پیاده‌سازی موفق یک برنامه توسعه پایدار مستلزم درنظرگرفتن مجموعه‌ای از معیارهای از پیش تعیین‌شده در تمام سطوح فعالیت‌های عملیاتی است (Nezami & Yildirim, 2013). این محققین از طریق بحث با کارشناسان پایداری در صنعت خودروسازی و از طریق یک مرور جامع ادبیات، مجموعه‌ای جامع از معیارها که عمدتاً توسط سایر مقالات تحقیقاتی در مورد استراتژی نگهداری و تعمیرات پایدار چندگانه در نظر گرفته شده، را برای هر ستون پایداری ارائه داده‌اند. ایقراوه و اوکه (Ighravwe & Oke, 2017)، یک مدل سلسله‌مراتبی به‌منظور انتخاب استراتژی نگهداری پایدار در صنعت سیمان، بر پایه چهار بعد یعنی محیطی (۴ زیرمعیار)، اجتماعی و ایمنی (۵ زیرمعیار)، فنی (۵ زیرمعیار) و اقتصادی (۵ زیرمعیار) به تصویر کشیده شده است. به‌طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر، این نویسندگان، در صنعت مجتمع‌های مسکونی، استراتژی‌های نگهداری را در چهار بعد؛ محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی دسته‌بندی کرده‌اند؛ با این تفاوت که استراتژی‌های دو صنعت در برخی از آیتم‌ها باهم فرق دارند. ایقراوه (Ighravwe, 2022)، با مطالعه بر روی بخش نگهداری و تعمیرات یک شرکت تولیدی در لاگوس نیجریه که در زمینه تولید کنسرو و بطری نوشیدنی‌های غیر الکلی فعالیت می‌کند، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس چهار بعد استراتژی‌های پایداری رتبه‌بندی شده‌اند. شهرجردی و قربانپور به منظور ارزیابی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات دارایی‌های فیزیکی در شرکت‌های خدمات‌رسان با رویکرد سبز با استفاده از نظر کارشناسان خبره، ۱۲ معیار (شامل سطح صدمات بالقوه برای کارگران، میزان تأثیر بالقوه بر آب‌وهوای محیط اطراف، هزینه چرخه عمر تجهیز، میزان برخورداری از تکنولوژی سبز، میزان هدررفت سوخت و انرژی، سطح بالقوه آسیب به تأسیسات، آلودگی قابل پیش‌بینی، درصد ضایعات تولیدی بر اثر خرابی، میزان تأثیر در بازیافت (Shahrjerdi & Ghorbanpour, 2023)). روند زوال منابع تجدیدنپذیر، تولید زباله‌های جامد قابل‌دفع، و پتانسیل گرم‌شدن زمین در خصوص توسعه پایدار به کار گرفته شده است.

در این مقاله، پس از بررسی ادبیات موضوع، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایداری به چهار بعد اقتصادی،

¹ Multidimensional Analysis of Preference (LINMAP)

جدول ۲. ابعاد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایداری

Table 2. Dimensions of sustainability-based maintenance

| ابعاد | زیرمعیارها | منابع |
|-----------|--|--|
| اقتصادی | ✓ امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فناوری | Nezami & Yildirim (2013) Ighravwe & Oke (2017; 2019) Ighravwe (2022) |
| | ✓ نوآوری | Shahrjerdi & Ghorbanpour (2023) Hosseinzadeh et al. (2019) |
| | ✓ تقاضای رضایت‌بخش | |
| | ✓ بازده زمانی (کارایی) | |
| | ✓ مدیریت پسماندهای مایع و جامد | |
| | ✓ مصرف انرژی | |
| | ✓ کنترل هزینه عملیاتی، برون‌سپاری، پیاده‌سازی/ اجرا | |
| | ✓ سرمایه‌گذاری | |
| | ✓ اصلاح قراردادهای نگهداری و تعمیر | |
| | ✓ نظارت بر فرآیند طراحی و ساخت قطعات | |
| اجتماعی | ✓ حمایت و رضایت ذینفعان | Nezami & Yildirim (2013) Ighravwe & Oke (2017; 2019) |
| | ✓ ایمنی و سلامت اپراتورها | Ighravwe (2022) |
| | ✓ پذیرش توسط پرسنل | Shahrjerdi & Ghorbanpour (2023) Hosseinzadeh et al. (2019) |
| | ✓ رضایت شغلی | |
| | ✓ ارتباطات | |
| | ✓ رفاه روانی اجتماعی | |
| | ✓ انتقال تجربه | |
| | ✓ آموزش کاربری | |
| محیط‌زیست | ✓ کنترل انتشار ضایعات/ زباله | Nezami & Yildirim (2013) Ighravwe & Oke (2017; 2019) |
| | ✓ سیستم‌های پشتیبان مدیریت زیست‌محیطی | Ighravwe (2022) |
| | ✓ کنترل مصرف منابع و انرژی | Shahrjerdi & Ghorbanpour (2023) Hosseinzadeh et al. (2019) |
| | ✓ کنترل صدا و ارتعاش | |
| | ✓ از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزین کردن تجهیزات سبز | |
| | ✓ رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی | |
| فنی | ✓ بهره‌وری ماشین | Nezami & Yildirim (2013) Ighravwe & Oke (2017; 2019) |
| | ✓ نرخ خطای نگهداری و تعمیرات | Ighravwe (2022) |
| | ✓ نرخ خرابی و زمان خرابی | Shahrjerdi & Ghorbanpour (2023) Hosseinzadeh et al. (2019) |
| | ✓ کیفیت قطعات و مواد | |
| | ✓ تخصص کارکنان | |
| | ✓ عملیات تجاری | |

استراتژی‌های نگهداری سه ابزار چندمعیاره شامل تکنیک‌های تحلیل خاکستری (GRA)، ارزیابی نسبت جمعی^۱ (ARAS) و تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی^۲ (SWARA) انتخاب شده‌اند. پژوهش‌های پیشین مرتبط با نگهداری و تعمیرات پایدار (SMA) در بخش تولید کشورهای توسعه‌یافته و در حال

براساس نتایج تحلیل حساسیت نرخ تنزیل پولی تأثیر بیشتری بر هزینه نگهداری چرخه عمر دارد که عمدتاً توسط کل هزینه‌های اجتماعی کنترل می‌شود، درحالی‌که هزینه مستقیم نگهداری تنها بخش کوچکی را تشکیل می‌دهد.

ایقراوه (Ighravwe, 2022) با استفاده از تخصص صنعت و دانشگاه، چارچوبی برای کمک به پایداری استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات ایجادشده و به منظور ارزیابی

¹Additive Ratio Assessment

²Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis

CBM باعث افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و در نتیجه کاهش هزینه نگهداری می‌شود. چارچوب پیشنهادی از یک روش بهینه‌سازی CBM استفاده می‌کند که از الگوریتم استنتاج مبتنی بر قاعده فازی بدون مرتب (FURIA)^۳ برای پیش‌بینی اطلاعات استفاده می‌کند. FURIA یک توسعه از الگوریتم RIPPER است و مرزهای تصمیم‌گیری بهتری بین کلاس‌های مختلف ایجاد می‌کند. همچنین بیان شده است که شرکت‌های صنعتی یکی از بزرگ‌ترین عوامل مصرف مواد و انرژی در محیط زیستی هستند که منابع طبیعی آن رو به اتمام است و تأثیرات فعالیت‌های انسانی همچنان در حال افزایش است. مدل پیشنهادی آن‌ها مفهوم اقتصاد چرخشی را با انتخاب مناسب‌ترین قطعات یدکی برای استفاده در فعالیت‌های نگهداری از دیدگاه پایداری، ادغام می‌کند (Franciosi et al., 2017).

علی‌رغم این که تحقیقات در خصوص نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایداری به سرعت مورد توجه محققین قرار گرفته است، تاکنون این حوزه در کشورمان ایران مورد غفلت واقع شده و تعداد مطالعات اندکی که در این زمینه وجود دارد. برای مثال، دراستراتژی‌های پایداری به‌صورت کلی مورد توجه قرار گرفته است، اما، مطالعات مربوط به شیوه‌های مدیریتی در یک حوزه خاص کشور یا صنعت بهتر است در آن زمینه به صورت مطالعه موردی، مورد بررسی قرار گیرد (Shahrjerdi & Ghorbanpour., 2023). از این‌رو، تحقیق حاضر این شکاف را به رسمیت شناخته و با جدیت با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دنبال نموده است؛ زیرا معیارهای زیادی در این مسأله دخیل هستند.

۳- روش پژوهش

این مطالعه با هدف شناسایی و اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر اصول پایداری در صنعت قطعه‌سازی خودرو انجام شده است. لذا از نظر هدف یک تحقیق کاربردی به شمار می‌آید. چراکه سعی دارد تا اهمیت نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات و تجهیزات شرکت‌ها را به‌ویژه در بخش تولید، برجسته نماید.

توسعه بررسی شده است که با انجام تحلیل محتوا روی پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه با تنظیمات تحقیقاتی مختلف، نگهداری پایدار را به چهار بعد فنی، اجتماعی و ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی طبقه‌بندی کردند (Hami et al., 2020).

ایقراوه و اوکه (Ighravwe & Oke, 2019) به بررسی چگونگی انتخاب یک راهبرد نگهداری مناسب برای ساختمان‌های عمومی با استفاده از مدل‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای تأیید تناسب آن‌ها با شیوه‌های پایدار پرداخته شده است. نویسندگان روش‌های تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA)، ارزیابی مجموع ضرب وزنی (WASPAS)، طراحی بدیهی فازی (FAD) و ارزیابی نسبت جمعی (ARAS) را برای ارزیابی معیارهای پایداری و انتخاب استراتژی مناسب مبتنی بر پایداری ادغام کرده‌اند.

اشاره شده است که شرکت‌های صنعتی برای پاسخگویی به نیازهای آتی جهانی‌شدن پایدار و قوانین دولتی برای تولید سبز، به دنبال کاهش مصرف انرژی هستند (Xia et al., 2018). بر این اساس برای تولید پایدار، این نویسندگان یک چارچوب نگهداری با رویکرد انرژی را برای مدیریت خط ماشین‌کاری در تولید دسته‌ای پیشنهاد می‌کنند. مدل چندویژگی^۱ (MAM) در سطح ماشین، ویژگی انرژی را برای برنامه‌ریزی پویای فواصل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) ادغام می‌کند. علاوه بر این، یک سیاست جدید پنجره صرفه‌جویی در انرژی^۲ (ESW) برای کاهش انرژی کل خط پیشنهاد داده شده است. سیاست ESW در سطح سیستم، تعاملات مصرف انرژی، ویژگی‌های تولید دسته‌ای و فرصت‌های نگهداری در سطح سیستم را یکپارچه می‌کند.

در یک چارچوب تولید پایدار مبتنی بر تحلیل داده‌های بزرگ توسعه داده شده است که برنامه زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات را از طریق بهینه‌سازی نگهداری مبتنی بر شرایط (CBM) بهینه می‌کند و همچنین دقت پیش‌بینی را برای کمیت‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی عمر باقیمانده بهبود می‌بخشد (Kumar et al., 2018). با استفاده کارآمد از اطلاعات پایش و پیش‌بینی شرایط،

¹ Multi-Attribute Model

² Energy Saving Window

³ Fuzzy Unordered Rule Induction Algorithm (FURIA)

کرد که با به‌کارگیری این روش، به نتایج معتبری دست یافتند.



شکل ۱. فازهای سه‌گانه پژوهش.

Figure 1. The three phases of the research.

لازم به توضیح است که به منظور پیاده‌سازی روش دلفی، نیاز است تا چند خبره به‌عنوان اعضای پانل تکنیک دلفی، انتخاب شوند. در این روش، نمونه‌گیری برای تعیین متخصصان، اغلب به روش غیرتصادفی هدفمند از نوع قضاوتی استفاده شده و تعداد اعضای پانل چنانچه شرکت‌کنندگان همگن باشند، بین ۱۰ تا ۲۰ عضو برای پانل کافی خواهد بود (Rasouli et al., 2014).

بنابراین، در این تحقیق به تعداد ۱۰ نفر از خبرگان (از میان کارشناسان فنی و مدیران عملیاتی بخش نگهداری و تعمیرات ۴ شرکت مذکور) جهت انجام نظرسنجی اکتفا شده است. تسلط نظری (تسلط به موضوع پایداری و دانش کافی در این حوزه)، تجربه عملی (حداقل ۱۵ الی ۲۰ سال)، تحصیلات آکادمیک (حداقل کارشناسی)، تمایل و توانایی مشارکت در پژوهش به‌عنوان معیارهای انتخاب خبرگان در نظر گرفته شد و نهایتاً داده‌های موردنیاز به روش پیمایشی و از طریق نظرسنجی طی تهیه و توزیع پرسشنامه بین ۱۰ نفر از خبرگان صنعت قطعه‌سازی خودرو جمع‌آوری گردید.

در فاز دوم تحقیق، معیارهای انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات پایدار در صنعت قطعه‌سازی خودرو با به‌کارگیری روش فوکام وزن‌دهی شدند. در میان روش‌های مختلف وزن‌دهی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش فوکام برای این پژوهش انتخاب شد. این انتخاب مبتنی بر دو مزیت کلیدی این روش است. اول اینکه، روش فوکام

از طرف دیگر، با توجه به این که معیارهای اولویت‌بندی استراتژی پایدار و همچنین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات، از طریق مرور جامع ادبیات، بررسی مطالعات تجربی پیشین و نظرات متخصصان معتبر در این حوزه، شناسایی و طبقه‌بندی شده‌اند، لذا از نظر جمع‌آوری و دستیابی به اطلاعات، در زمره تحقیقات توصیفی-پیمایشی قرار می‌گیرد.

جامعه آماری پژوهش را شرکت‌های قطعه‌سازی که ۴ مورد آن‌ها به‌صورت هدفمند انتخاب شد (صنایع تولیدی و قطعه‌سازی کروز، شرکت قطعات خودرو عظام، گروه صنعتی پارت لاستیک و شرکت رایزکو)، شکل می‌دهند. لذا واحد تحلیل در این پژوهش، شرکت می‌باشد. لازم به‌ذکر است معیار انتخاب این ۴ شرکت علاوه بر دسترسی بهتر به افراد خبره بخش نگهداری و تعمیرات، برخورداری از ماشین‌آلات پیشرفته و سنگین است که نیاز به ۲-۲ استراتژی نگهداری و تعمیرات مطرح‌شده در بخش ۲-۲ (یعنی BM، PM، CM، RCM، TPM، CBM و PreM) را دارند.

روش اجرای پژوهش در سه فاز اصلی به شرح شکل ۱ انجام پذیرفت:

- ۱) شناسایی و اعتبارسنجی معیارهای پایداری با استفاده از مرور ادبیات و تکنیک دلفی
- ۲) وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها با به‌کارگیری روش فوکام^۱
- ۳) رتبه‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از تکنیک‌های مجموع وزنی ساده^۲ (SAW) و تاپسیس^۳. این چارچوب یکپارچه، امکان اتخاذ تصمیمی مبتنی بر شواهد و منطبق با اصول پایداری را فراهم می‌سازد.

در فاز اول تحقیق، معیارهای پایداری در ۴ بعد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). برای غربالگری و تأیید نهایی معیارها، از تکنیک دلفی استفاده شد. اثربخشی فرآیند دلفی در دستیابی به اجماع را می‌توان در (Mousavi Ramezanzadeh & Nazari, 2025) مشاهده

¹ Full Consistency Method (FUCOM)

² Simple Additive Weighting (SAW)

³ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

میانگین هندسی نظرات خبرگان به عنوان مقدار نهایی هر x_{ij} در ماتریس تصمیم وارد شد. این ماتریس کامل شده، پس از نرمال‌سازی به روش‌های مربوطه، به‌عنوان ورودی مشترک برای هر دو تکنیک مجموع وزنی ساده (SAW) و تاپسیس مورد استفاده قرار گرفت. نکته آخر اینکه به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و اجرای مدل‌های تصمیم‌گیری، از نرم‌افزار لینگو برای حل مدل بهینه‌سازی فوکام و از نرم‌افزار اکسل برای پیاده‌سازی تکنیک‌های رتبه‌بندی مجموع وزنی ساده و تاپسیس استفاده شد.

۳-۱- روش فوکام

الگوریتم فوکام، یک تکنیک نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به دلیل نیاز به مقایسات زوجی کمتر و دستیابی به سازگاری کامل در مقایسه‌ها، از دقت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، از این الگوریتم به منظور وزن‌دهی معیارها استفاده می‌شود که مراحل اجرای آن به شرح زیر است:

گام ۱ (رتبه‌بندی معیارها): معیارهای مورد نظر (C_1, C_2, \dots, C_n) بر اساس اهمیت و ترجیح تصمیم‌گیرنده به صورت نزولی (از مهم‌ترین به کم‌اهمیت‌ترین) رتبه‌بندی می‌شوند: $C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)}$ که k بیانگر رتبه معیار است.

گام ۲ (تعیین برتری مقایسی معیارها یا تعیین ضریب مقایسه‌ای): تصمیم‌گیرنده میزان ارجحیت معیار رتبه j را نسبت به معیار رتبه $j+1$ تعیین می‌کند. این ارجحیت به صورت $\varphi_{j/(j+1)}$ نشان داده می‌شود. به این ترتیب، بردار مقایسات زوجی χ تشکیل می‌شود:

$$\chi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \quad (1)$$

گام ۳ (محاسبه ضرایب وزنی نهایی معیارها): در این مرحله، وزن نهایی معیارها (w_1, w_2, \dots, w_k) با حل یک مدل بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. مدل بهینه‌سازی به صورت زیر است:

$\min \chi$

subject to:

$$\left| \frac{w_j}{w_{j+1}} - \varphi_{j/(j+1)} \right| \leq \chi, \quad \forall j \quad (2)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_{j+2}} - \varphi_{j/(j+1)} \cdot \varphi_{j+1/(j+2)} \right| \leq \chi, \quad \forall j$$

تنها به $(k-1)$ مقایسه زوجی نیاز دارد که k تعداد معیارها است در حالی که روش‌هایی مانند AHP به $k(k-1)/2$ مقایسه نیاز دارند. این امر، بار شناختی بر خبرگان را به طور قابل توجهی کاهش داده و امکان مشارکت مؤثر آنان را فراهم می‌کند. دوم، مدل بهینه‌سازی فوکام با کمینه کردن ناسازگاری، تضمین می‌کند که وزن‌های نهایی از سازگاری کامل برخوردارند که این امر قابلیت اطمینان نتایج را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

لازمه فاز دوم تحقیق، نظرسنجی از خبرگان در زمینه نگهداری و تعمیرات دستگاه‌ها و ماشین‌آلات صنعت قطعات خودروسازی می‌باشد که در این مطالعه طی تهیه و توزیع پرسشنامه مقایسات زوجی مبتنی بر روش فوکام صورت گرفته است. از آنجایی که در اکثر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فرمول خاصی جهت تعیین اندازه نمونه وجود ندارد (Ghasemi et al., 2015). در نتیجه به منظور تکمیل ماتریس مقایسات زوجی در فاز دوم، از همان ۱۰ خبره فاز یک استفاده شد.

نهایتاً در فاز سوم تحقیق، به منظور رتبه‌بندی ۷ استراتژی مربوط به نگهداری و تعمیرات در شرکت‌های قطعه‌سازی خودرو از دو روش مجموع وزنی ساده (SAW) و تاپسیس استفاده شد. لازم به توضیح است که به منظور اطمینان از صحت و قابلیت اتکای نتایج رتبه‌بندی، از دو تکنیک به صورت هم‌زمان استفاده شد. روش مجموع وزنی ساده به دلیل سادگی ساختار و محاسبات مستقیم، و روش تاپسیس به دلیل در نظر گرفتن فاصله از راه‌حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل انتخاب شدند. تطابق نتایج حاصل از این دو روش مختلف، بر قابلیت اطمینان یافته‌های تحقیق می‌افزاید. پس از تعیین وزن نهایی معیارها در فاز دوم، ماتریس تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی استراتژی‌ها تشکیل گردید. این ماتریس به صورت $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ تعریف می‌شود که در آن $m = 7$ تعداد استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات (گزینه‌ها) و $n = 30$ تعداد زیرمعیارهای نهایی (معیارهای پایداری) است. هر عنصر x_{ij} از این ماتریس، عملکرد گزینه i ام (استراتژی) در برابر معیار پایداری j ام را نشان می‌دهد. برای تکمیل این ماتریس، از همان ۱۰ خبره فاز قبلی دعوت شد تا هر یک از ۷ استراتژی را نسبت به هر ۳۰ زیرمعیار، بر اساس مقیاس ۵ درجه‌ای لیکرت (۱= بسیار ضعیف تا ۵= بسیار عالی) ارزیابی نمایند،

راه حل ضد ایده آل را داشته باشد. مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است:

گام ۱ (تشکیل ماتریس تصمیم): ماتریس تصمیم X مشابه روش SAW تشکیل می شود.

گام ۲ (نرمال سازی ماتریس تصمیم): ماتریس تصمیم با استفاده از روش نرمال سازی اقلیدسی به ماتریس نرمال شده R تبدیل می شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (6)$$

گام ۳ (تشکیل ماتریس نرمال شده وزنی): ماتریس نرمال شده در وزن معیارها ضرب می شود:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (7)$$

گام ۴ (تعیین راه حل ایده آل و ضد ایده آل): راه حل ایده آل مثبت A^+ و راه حل ایده آل منفی A^- به صورت زیر تعریف می شوند:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \\ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right\} \quad (8)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \\ = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right\}$$

که در آن مجموعه معیارهای سودمند و J_2 مجموعه معیارهای هزینه ای است.

گام ۵ (محاسبه فاصله هر گزینه از راه حل ایده آل و ضد ایده آل): فاصله اقلیدسی هر گزینه از A^+ و A^- محاسبه می شود:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

گام ۶ (محاسبه شباهت نسبی به راه حل ایده آل):

شباهت نسبی هر گزینه C_i از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

مقدار C_i بین ۰ و ۱ است. هر چه C_i به ۱ نزدیک تر باشد، گزینه بهتر است.

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0$$

هدف از این مدل، کمینه کردن ناسازگاری X و محاسبه وزن هایی است که بیشترین انطباق را با ترجیحات تصمیم گیرنده دارند.

۳-۲- روش مجموع وزنی ساده (SAW)

این روش به دلیل سهولتی که دارد به عنوان یکی از محبوب ترین و رایج ترین روش های تصمیم گیری چندمعیاره شناخته می شود که بر اساس جمع وزنی امتیازات عمل می کند. در این روش از یک تابع افزایش خطی برای نمایش ترجیحات تصمیم گیرندگان استفاده می شود. مراحل اجرای این الگوریتم عبارتند از:

گام ۱ (تشکیل ماتریس تصمیم): ماتریس تصمیم X تشکیل می شود که در آن m گزینه و n معیار وجود دارد. عنصر x_{ij} نشان دهنده عملکرد گزینه i ام در معیار j ام است.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (3)$$

گام ۲ (نرمال سازی ماتریس تصمیم): برای یکسان سازی مقیاس معیارها، ماتریس تصمیم نرمال سازی می شود. برای معیارهای سودمند و هزینه ای به ترتیب از روابط زیر استفاده می شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i(x_{ij})}, \quad (\text{برای معیارهای سودمند}) \quad (4)$$

$$r_{ij} = \frac{\min_i(x_{ij})}{x_{ij}}, \quad (\text{برای معیارهای هزینه ای})$$

گام ۳ (محاسبه امتیاز نهایی هر گزینه): امتیاز نهایی هر گزینه از جمع وزنی مقادیر نرمال شده آن محاسبه می شود:

$$A_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij} \quad (5)$$

که در آن وزن معیار j ام است و $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

گام ۴ (رتبه بندی گزینه ها): گزینه ها بر اساس امتیاز نهایی A_i به صورت نزولی رتبه بندی می شوند. گزینه ای که بالاترین امتیاز را دارد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می شود.

۳-۳- روش تاپسیس

این روش بر این اصل استوار است که گزینه منتخب باید کمترین فاصله از راه حل ایده آل و بیشترین فاصله از

گام ۷ (رتبه‌بندی گزینه‌ها): گزینه‌ها بر اساس مقادیر G_i به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- تأیید و غربالگری شاخص‌های پایداری

ابتدا، به منظور غربالگری و تأیید شاخص‌های پژوهش از روش دلفی استفاده شد که در ۲ دور انجام پذیرفت. در مرحله نخست، پرسشنامه‌ای با ۳۰ شاخص برای سنجش عوامل تأثیرگذار در گزینش راهبردهای نگهداری و تعمیرات سیستم تولید با رویکرد پایداری در صنعت قطعه‌سازی خودرو تدوین و به ۱۰ متخصص ارائه شد تا بر مبنای مقیاس پنج‌گانه لیکرت، آن‌ها را ارزیابی کنند. اعتبار پرسشنامه با ضریب آلفای کرونباخ $0/893$ که بالاتر از حد قابل قبول $0/7$ است، تأیید شد. این ضریب میزان بارگیری همزمان سازه‌ها را در زمان افزایش یک متغیر آشکار موردسنجش قرار می‌دهد و مقدار عددی آن بین 0 و 1 می‌باشد. متغیرهایی که مقدار آلفای آن‌ها برابر $0/70$ به دست آید، پایایی برای پرسشنامه موردنظر در سطح قابل قبول است (Taherdoost, 2016). مقدار ضریب هم‌هنگی کندال نیز $0/126$ به دست آمد که طبق پژوهش (Mashayekhi et al., 2005) معنادار است؛ اما برای توقف فرآیند دلفی کافی نیست و نیاز به بررسی پیشرفت آن در دور بعدی وجود دارد. ضریب هم‌هنگی کندال نشان می‌دهد که افرادی که چند مقوله را بر اساس اهمیت هر یک از مقوله‌ها به کار برده‌اند، از این لحاظ با یکدیگر اتفاق نظر دارند.

در این زمینه مشایخی و همکاران (Mashayekhi et al., 2005) بیان کردند چنانچه طی دو راند (دور) دلفی این ضریب تفاوت زیادی نکند، یعنی اجماع صورت گرفته است. به طوری که در راند اول حتی اگر این ضریب کوچک هم باشد معنادار است و باید راند دوم انجام شود تا اختلافش با مقدار ضریب کندال راند اول مشخص شود. در دور دوم، پرسشنامه بدون حذف هیچ معیاری (زیرا همه میانگین‌ها بالای ۳ بودند) همراه با میانگین امتیازات دور اول مجدداً به خبرگان ارائه شد که اکثر آن‌ها نظرات قبلی خود را تأیید کردند. در این مرحله، ضریب پایایی و هم‌هنگی کندال به ترتیب $0/701$ و $0/158$ محاسبه گردید.

بررسی نتایج حاصل از اجرای دو مرحله‌ای تکنیک دلفی در این تحقیق نشان‌دهنده دستیابی به اجماع نظر میان مشارکت‌کنندگان است که می‌توان فرآیند را متوقف کرد؛ زیرا در مرحله دوم، بیش از ۹۰ درصد شرکت‌کنندگان به تمامی شاخص‌ها، امتیاز بالا و بسیار بالا (میانگین بیشتر از ۳) اختصاص داده‌اند. همچنین، بین دور نخست و دوم تغییر محسوسی در افزودن یا کاستن معیارها مشاهده نشده و افزایش ناچیز $0/03$ در ضریب هم‌هنگی کندال بین این دو مرحله، بیانگر عدم رشد چشمگیر در میزان توافق اعضای پنل است.

۴-۲- تعیین وزن شاخص‌ها

در این قسمت از پژوهش، وزن شاخص‌ها با استفاده از روش فوکام تعیین می‌شود. این روش، ابتدا روی زیرمعیارهای هر معیار و سپس روی معیارهای اصلی پیاده‌سازی می‌شود.

اولین گام این است که شاخص‌ها را بر اساس درجه اهمیت به صورت نزولی مرتب کنیم. این فرآیند با استفاده از میانگین امتیازات داده‌شده، انجام می‌گیرد که نتایج برای معیارهای اقتصادی در جدول ۳ آورده شده است.

در گام دوم، امتیاز مهم‌ترین معیار یعنی امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فن‌آوری (A1) بر امتیاز تک‌تک شاخص‌ها تقسیم می‌شود. نتایج در جدول ۴ آورده شده است. به عنوان مثال، عدد مربوط به سلول A8 به صورت زیر محاسبه شده است.

$$A8 = \frac{4.5}{4.3} = 1.047 \quad (11)$$

در گام سوم، به منظور تعیین ضریب وزنی، بر اساس اعداد جدول ۴، امتیاز هر شاخص بر شاخص قبل خود تقسیم می‌شود که نتایج در جدول ۵ آورده شده است. به عنوان

مثال، $\varphi_{A1/A8}$ و $\varphi_{A8/A10}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_{A1/A8} = \frac{1.047}{1} = 1.047 \quad (12)$$

$$\varphi_{A8/A10} = \frac{1.071}{1.047} = 1.023 \quad (13)$$

با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ می‌توان مقدار $\varphi_{A1/A10}$ را نیز به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\varphi_{A1/A10} = \varphi_{A1/A8} \times \varphi_{A8/A10} = 1.047 \times 1.023 = 1.071 \quad (14)$$

سرمایه‌گذاری با وزن ۰/۱۱۰۲ رتبه دوم و نظارت بر فرآیند طراحی و ساخت قطعات با وزن ۰/۱۰۷۶ رتبه سوم را کسب کرده است.

به طریق مشابه، برای زیرمعیارهای اجتماعی، محیط‌زیست و فنی نیز مدل بهینه‌سازی تشکیل شده و وزن هر یک از آن‌ها محاسبه می‌گردد که نتایج در جدول ۷ آورده شده است.

وزن نهایی زیرمعیارها از ضرب وزن معیارها در وزن زیرمعیارها حاصل می‌شود که در جدول ۸ و شکل ۲ آورده شده است. بر این اساس از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزین کردن تجهیزات سبز، رتبه اول را در تمامی زیرمعیارها کسب کرده است. رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی رتبه دوم و تخصص کارکنان رتبه سوم را کسب کرده است.

سپس، مدل بهینه‌سازی فوکام به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \min Z \\ |A1/A8-1.047| \leq Z \\ |A10/A9-1.024| \leq Z \quad |A8/A10-1.023| \leq Z \\ |A7/A5-1.026| \leq Z \quad |A9/A7-1.051| \leq Z \\ |A3/A2-1.028| \leq Z \quad |A5/A3-1.027| \leq Z \\ |A4/A6-1.029| \leq Z \quad |A2/A4-1.029| \leq Z \\ |A8/A9-1.049| \leq Z \quad |A1/A10-1.071| \leq Z \\ |A9/A5-1.078| \leq Z \quad |A10/A7-1.076| \leq Z \\ |A5/A2-1.056| \leq Z \quad |A7/A3-1.054| \leq Z \\ |A2/A6-1.059| \leq Z \quad |A3/A4-1.058| \leq Z \\ A1+A2+A3+A4+A5+A6+A7+A8+A9+A10 \\ 0=1 \end{aligned} \quad (15)$$

با حل مدل بالا در نرم‌افزار لینگو، وزن معیارهای بعد اقتصادی حاصل می‌شود که در جدول ۶ آورده شده است. بر این اساس امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فن‌آوری با وزن ۰/۱۱۵۴ رتبه اول را کسب کرده است.

جدول ۳. ترتیب نزولی معیارهای اقتصادی

Table 3. Descending order of economic criteria

| رتبه | میانگین امتیاز | معیار | کدمعیار |
|------|----------------|---|---------|
| ۱ | ۴/۵ | امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فن‌آوری | A1 |
| ۲ | ۴/۳ | سرمایه‌گذاری | A8 |
| ۳ | ۴/۲ | نظارت بر فرآیند طراحی و ساخت قطعات | A10 |
| ۴ | ۴/۱ | اصلاح قراردادهای نگهداری و تعمیر | A9 |
| ۵ | ۳/۹ | کنترل هزینه‌های عملیاتی، پیاده‌سازی/اجرا و برون‌سپاری | A7 |
| ۶ | ۳/۸ | مدیریت پسماند مایع و جامد | A5 |
| ۷ | ۳/۷ | تقاضای رضایت‌بخش | A3 |
| ۸ | ۳/۶ | نوآوری | A2 |
| ۹ | ۳/۵ | بازده زمانی (کارایی) | A4 |
| ۱۰ | ۳/۴ | مصرف انرژی | A6 |

جدول ۴. مقایسه معیارهای اقتصادی با مهم‌ترین معیار

Table 4. Comparison of economic criteria with the most important criterion

| | A1 | A8 | A10 | A9 | A7 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | ۱/۰۰۰ | ۱/۰۴۷ | ۱/۰۷۱ | ۱/۰۹۸ | ۱/۱۵۴ |
| A5 | | A3 | A2 | A4 | A6 |
| A1 | ۱/۱۸۴ | ۱/۲۱۶ | ۱/۲۵۰ | ۱/۲۸۶ | ۱/۳۲۴ |

جدول ۵. تعیین ضریب وزنی زوجی شاخص‌ها (φ)

Table 5. Determining the pairwise weighting coefficient of indicators (φ)

| | A1 | A8 | A10 | A9 | A7 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| (φ) | ۱/۰۰۰ | ۱/۰۴۷ | ۱/۰۲۳ | ۱/۰۲۴ | ۱/۰۵۱ |
| (φ) | | A3 | A2 | A4 | A6 |
| (φ) | ۱/۰۲۶ | ۱/۰۲۷ | ۱/۰۲۸ | ۱/۰۲۹ | ۱/۰۲۹ |

جدول ۶. وزن زیرمعیارهای اقتصادی

Table 6. Weights of economic sub-criteria

| رتبه | وزن | نام معیار | کد معیار |
|------|--------|---|----------|
| ۱ | ۰/۱۱۵۴ | امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فن‌آوری | A1 |
| ۸ | ۰/۰۹۲۳ | نوآوری | A2 |
| ۷ | ۰/۰۹۴۹ | تقاضای رضایت‌بخش | A3 |
| ۹ | ۰/۰۸۹۷ | بازده زمانی (کارآیی) | A4 |
| ۶ | ۰/۰۹۷۵ | مدیریت پسماند مایع و جامد | A5 |
| ۱۰ | ۰/۰۸۷۲ | مصرف انرژی | A6 |
| ۵ | ۰/۱۰۰۰ | کنترل هزینه‌های عملیاتی، پیاده‌سازی/اجرا و برون‌سپاری | A7 |
| ۲ | ۰/۱۱۰۲ | سرمایه‌گذاری | A8 |
| ۴ | ۰/۱۰۵۱ | اصلاح قراردادهای نگهداری و تعمیر | A9 |
| ۳ | ۰/۱۰۷۶ | نظارت بر فرآیند طراحی و ساخت قطعات | A10 |

جدول ۷. وزن زیرمعیارهای سایر ابعاد

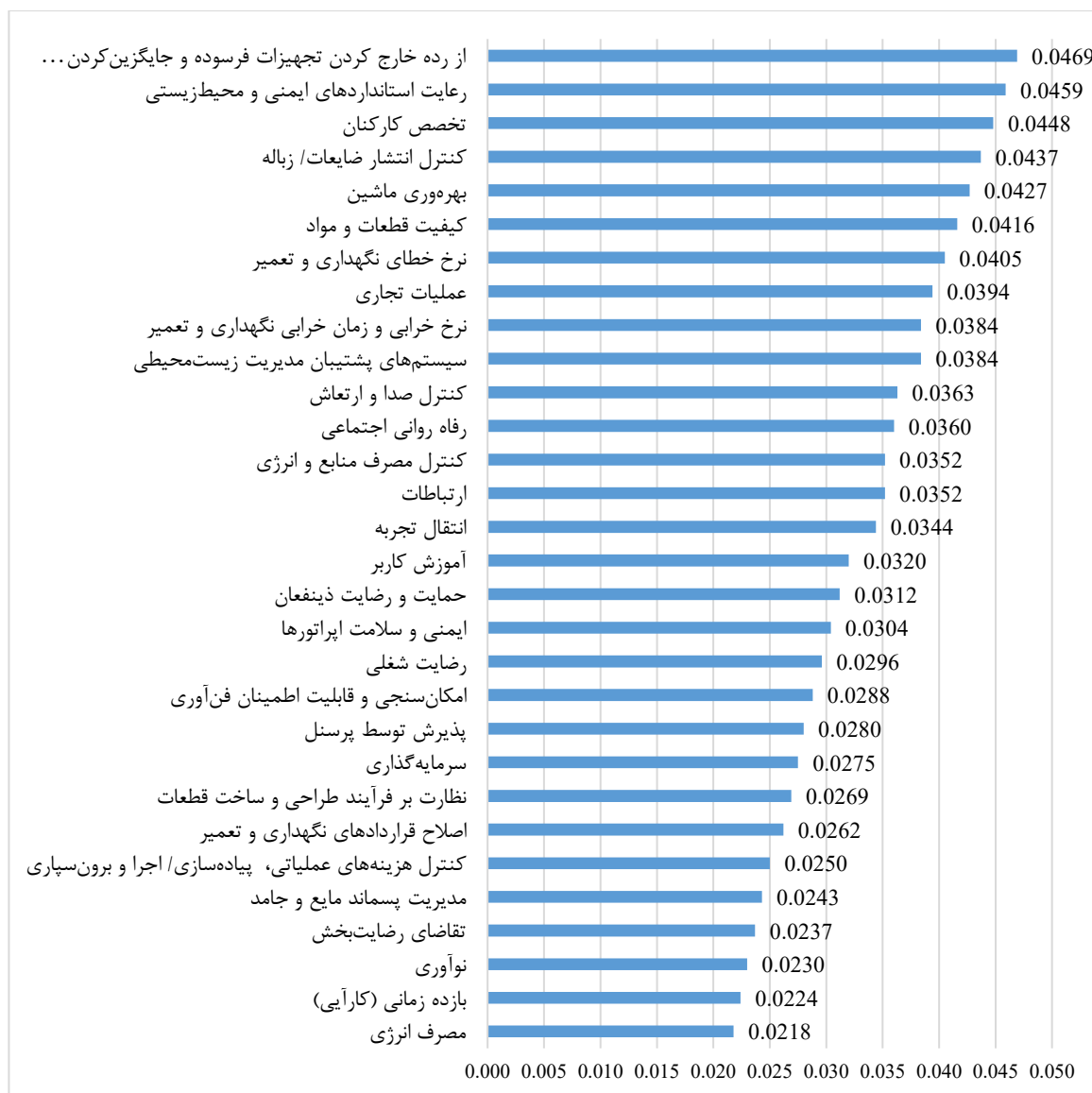
Table 7. Weights of sub-criteria for other dimensions

| رتبه | وزن | نام معیار | کد معیار |
|------|--------|--|---------------|
| | | | بعد اجتماعی |
| ۵ | ۰/۱۲۱۵ | حمایت و رضایت ذینفعان | B1 |
| ۶ | ۰/۱۱۸۴ | ایمنی و سلامت اپراتورها | B2 |
| ۸ | ۰/۱۰۹۰ | پذیرش توسط پرسنل | B3 |
| ۷ | ۰/۱۱۵۲ | رضایت شغلی | B4 |
| ۲ | ۰/۱۳۷۱ | ارتباطات | B5 |
| ۱ | ۰/۱۴۰۲ | رفاه روانی اجتماعی | B6 |
| ۳ | ۰/۱۳۴۰ | انتقال تجربه | B7 |
| ۴ | ۰/۱۲۴۶ | آموزش کاربر | B8 |
| | | | بعد محیط‌زیست |
| ۳ | ۰/۱۷۷۵ | کنترل انتشار ضایعات/زباله | C1 |
| ۴ | ۰/۱۵۵۸ | سیستم‌های پشتیبان مدیریت زیست محیطی | C2 |
| ۶ | ۰/۱۴۲۹ | کنترل مصرف منابع و انرژی | C3 |
| ۵ | ۰/۱۴۷۲ | کنترل صدا و ارتعاش | C4 |
| ۱ | ۰/۱۹۰۵ | از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزین کردن تجهیزات سبز | C5 |
| ۲ | ۰/۱۸۶۲ | رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی | C6 |
| | | | بعد فنی |
| ۲ | ۰/۱۷۲۵ | بهره‌وری ماشین | D1 |
| ۴ | ۰/۱۶۳۸ | نرخ خطای نگهداری و تعمیرات | D2 |
| ۶ | ۰/۱۵۵۱ | نرخ خرابی و زمان خرابی نگهداری و تعمیر | D3 |
| ۳ | ۰/۱۶۸۱ | کیفیت قطعات و مواد | D4 |
| ۱ | ۰/۱۸۱۱ | تخصص کارکنان | D5 |
| ۵ | ۰/۱۵۹۵ | عملیات تجاری | D6 |

جدول ۸. وزن نهایی زیرمعیارها

Table 8. Final weights of sub-criteria

| معیار | وزن معیار | زیرمعیار | وزن نسبی | وزن نهایی | رتبه نهایی | زیرمعیار | | |
|--|-----------|--|----------|-------------------------------------|------------|----------|---|--|
| اقتصادی | ۰/۲۴۹۵ | امکان سنجی و قابلیت اطمینان فن‌آوری | ۰/۱۱۵۴ | ۰/۰۲۸۸ | ۲۰ | | | |
| | | نوآوری | ۰/۰۹۲۳ | ۰/۰۲۳۰ | ۲۸ | | | |
| | | تقاضای رضایت‌بخش | ۰/۰۹۴۹ | ۰/۰۲۳۷ | ۲۷ | | | |
| | | بازده زمانی (کارآیی) | ۰/۰۸۹۷ | ۰/۰۲۲۴ | ۲۹ | | | |
| | | مدیریت پسماند مایع و جامد | ۰/۰۹۷۵ | ۰/۰۲۴۳ | ۲۶ | | | |
| | | مصرف انرژی | ۰/۰۸۷۲ | ۰/۰۲۱۸ | ۳۰ | | | |
| | | کنترل هزینه‌های عملیاتی، پیاده‌سازی/ اجرا و برون‌سپاری | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۰۲۵۰ | ۲۵ | | | |
| | | سرمایه‌گذاری | ۰/۱۱۰۲ | ۰/۰۲۷۵ | ۲۲ | | | |
| | | اصلاح قراردادهای نگهداری و تعمیر | ۰/۱۰۵۱ | ۰/۰۲۶۲ | ۲۴ | | | |
| | | نظارت بر فرآیند طراحی و ساخت قطعات | ۰/۱۰۷۶ | ۰/۰۲۶۹ | ۲۳ | | | |
| اجتماعی | ۰/۲۵۶۸ | حمایت و رضایت ذینفعان | ۰/۱۲۱۵ | ۰/۰۳۱۲ | ۱۷ | | | |
| | | ایمنی و سلامت اپراتورها | ۰/۱۱۸۴ | ۰/۰۳۰۴ | ۱۸ | | | |
| | | پذیرش توسط پرسنل | ۰/۱۰۹۰ | ۰/۰۲۸۰ | ۲۱ | | | |
| | | رضایت شغلی | ۰/۱۱۵۲ | ۰/۰۲۹۶ | ۱۹ | | | |
| | | ارتباطات | ۰/۱۳۷۱ | ۰/۰۳۵۲ | ۱۳ | | | |
| | | رفاه روانی اجتماعی | ۰/۱۴۰۲ | ۰/۰۳۶۰ | ۱۲ | | | |
| | | انتقال تجربه | ۰/۱۳۴۰ | ۰/۰۳۴۴ | ۱۵ | | | |
| | | آموزش کاربر | ۰/۱۲۴۶ | ۰/۰۳۲۰ | ۱۶ | | | |
| | | محیط‌زیست | ۰/۲۴۶۴ | کنترل انتشار ضایعات/ زباله | ۰/۱۷۷۵ | ۰/۰۴۳۷ | ۴ | |
| | | | | سیستم‌های پشتیبان مدیریت زیست‌محیطی | ۰/۱۵۵۸ | ۰/۰۳۸۴ | ۹ | |
| کنترل مصرف منابع و انرژی | ۰/۱۴۲۹ | | | ۰/۰۳۵۲ | ۱۴ | | | |
| کنترل صدا و ارتعاش | ۰/۱۴۷۲ | | | ۰/۰۳۶۳ | ۱۱ | | | |
| از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزین کردن تجهیزات سبز | ۰/۱۹۰۵ | | | ۰/۰۴۶۹ | ۱ | | | |
| رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی | ۰/۱۸۶۲ | | | ۰/۰۴۵۹ | ۲ | | | |
| بهره‌وری ماشین | ۰/۱۷۲۵ | | | ۰/۰۴۲۷ | ۵ | | | |
| فنی | ۰/۲۴۷۳ | نرخ خطای نگهداری و تعمیر | ۰/۱۶۳۸ | ۰/۰۴۰۵ | ۷ | | | |
| | | نرخ خرابی و زمان خرابی نگهداری و تعمیر | ۰/۱۵۵۱ | ۰/۰۳۸۴ | ۱۰ | | | |
| | | کیفیت قطعات و مواد | ۰/۱۶۸۱ | ۰/۰۴۱۶ | ۶ | | | |
| | | تخصص کارکنان | ۰/۱۸۱۱ | ۰/۰۴۴۸ | ۳ | | | |
| | | عملیات تجاری | ۰/۱۵۹۵ | ۰/۰۳۹۴ | ۸ | | | |



شکل ۲. وزن و اولویت نهایی زیرمعیارها.

Figure 2. Final weights and priorities of sub-criteria.

با حل مدل بالا در نرم‌افزار لینگو، وزن معیارها حاصل می‌شود که در جدول ۹ آورده شده است. بر این اساس، در بین معیارهای اصلی، معیار اجتماعی با وزن ۰/۲۵۶۸ رتبه اول را کسب کرده است.

۳-۴- رتبه‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات

در این قسمت از پژوهش، به منظور رتبه‌بندی ۷ استراتژی مربوط به نگهداری و تعمیرات در شرکت‌های قطعه‌سازی خودرو، از دو روش SAW و تاپسیس استفاده شده است.

لازم به ذکر است که برای محاسبه وزن معیارهای اصلی، ابتدا از امتیازات زیرمعیارهای هر معیار میانگین گرفته می‌شود تا امتیاز معیار اصلی مشخص شود. سپس، معیارها به صورت نزولی بر اساس میانگین امتیازات مرتب‌شده و سپس به طریق مشابه، با استفاده از الگوریتم فوکام وزن معیارها محاسبه می‌شود. مدل بهینه‌سازی در رابطه زیر آورده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z \\ |B/A-1.029| \leq Z \quad |A/D-1.009| \leq Z \\ |D/C-1.004| \leq Z \quad |B/D-1.038| \leq Z \\ |A/C-1.013| \leq Z \\ A+B+C+D=1 \end{aligned} \quad (16)$$

امتیازات در دو روش متفاوت است (به دلیل تفاوت در منطق محاسباتی)، اما ترتیب رتبه‌ها کاملاً یکسان است که نشان می‌دهد اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری از قابلیت اتکای بالایی برخوردار است.

جدول ۱۱. رتبه نهایی استراتژی‌ها به روش تاپسیس

Table 11. Final ranking of strategies using the TOPSIS method

| استراتژی | d ⁺ | d ⁻ | امتیاز نهایی | رتبه |
|----------|----------------|----------------|--------------|------|
| PM | ۰/۷۰۶۹ | ۰/۱۲۳۴ | ۰/۸۵۱۴ | ۱ |
| TPM | ۰/۷۲۸۴ | ۰/۳۸۶۳ | ۰/۶۵۳۵ | ۲ |
| PreM | ۰/۳۷۶۹ | ۰/۴۶۱۰ | ۰/۴۴۹۹ | ۳ |
| RCM | ۰/۲۶۲۴ | ۰/۶۵۱۶ | ۰/۲۸۷۱ | ۴ |
| CM | ۰/۲۴۰۱ | ۰/۶۰۴۹ | ۰/۲۸۴۲ | ۵ |
| CBM | ۰/۲۱۷۲ | ۰/۶۲۶۶ | ۰/۲۵۷۴ | ۶ |
| BM | ۰/۲۰۵۹ | ۰/۶۸۶۲ | ۰/۲۳۰۸ | ۷ |

جدول ۱۲. مقایسه رتبه‌بندی استراتژی‌ها

Table 12. Comparison of strategy rankings

| استراتژی | امتیاز نهایی | | رتبه |
|----------|--------------|--------|------|
| | SAW | تاپسیس | |
| PM | ۰/۹۰۵۰ | ۰/۸۵۱۴ | ۱ |
| TPM | ۰/۸۳۰۴ | ۰/۶۵۳۵ | ۲ |
| PreM | ۰/۷۹۰۷ | ۰/۴۴۹۹ | ۳ |
| RCM | ۰/۷۵۴۸ | ۰/۲۸۷۱ | ۴ |
| CM | ۰/۷۴۴۱ | ۰/۲۸۴۲ | ۵ |
| CBM | ۰/۷۳۴۳ | ۰/۲۵۷۴ | ۶ |
| BM | ۰/۷۲۷۳ | ۰/۲۳۰۸ | ۷ |

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه، با تلفیق روش‌های دلفی، فوکام، SAW و تاپسیس، یک رویکرد سیستماتیک و مستحکم را برای تصمیم‌گیری در زمینه انتخاب استراتژی پایدار نگهداری و تعمیرات در صنعت قطعه‌سازی خودرو ایران فراهم می‌سازد.

یافته‌های این پژوهش فراتر از یک رتبه‌بندی ساده بوده و دارای مفاهیم ارزشمند نظری و عملی است که در زیربخش‌های مجزا ارائه می‌گردد.

۵-۱- یافته‌های کلیدی

نتایج کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از:

با توجه به ۷ استراتژی نگهداری و تعمیرات معرفی شده برای این پژوهش، ابتدا طی یک پرسشنامه از ۱۰ خبره بخش نگهداری و تعمیرات خواسته شد که هر استراتژی را بر اساس هر زیرمعیار پژوهش با استفاده از طیف ۱ تا ۵ امتیاز دهند. سپس میانگین امتیازات محاسبه شد.

درنهایت، وزن زیرمعیارها در ماتریس تصمیم ضرب شده و اعداد هر استراتژی به صورت سطری باهم جمع می‌شوند تا امتیاز نهایی هر استراتژی تعیین شود و بر اساس آن رتبه‌بندی صورت می‌گیرد که در جدول ۱۰ آورده شده است. بر این اساس، استراتژی PM رتبه اول، استراتژی TPM رتبه دوم و استراتژی PreM رتبه سوم را کسب کرده است.

رتبه‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از روش تاپسیس نیز انجام گرفت. نتایج در جدول ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استراتژی PM رتبه نخست، TPM رتبه دوم و PreM نیز جایگاه سوم را کسب نموده است.

جدول ۹. اوزان معیارهای اصلی

Table 9. Weights of main criteria

| کد معیار | نام معیار | وزن | رتبه |
|----------|-----------|--------|------|
| B | اجتماعی | ۰/۲۵۶۸ | ۱ |
| A | اقتصادی | ۰/۲۴۹۵ | ۲ |
| D | فنی | ۰/۲۴۷۳ | ۳ |
| C | محیط‌زیست | ۰/۲۴۶۴ | ۴ |

جدول ۱۰. رتبه نهایی استراتژی‌ها به روش SAW

Table 10. Final ranking of strategies using the SAW method

| استراتژی | امتیاز نهایی | رتبه |
|----------|--------------|------|
| PM | ۰/۹۰۵۰ | ۱ |
| TPM | ۰/۸۳۰۴ | ۲ |
| PreM | ۰/۷۹۰۷ | ۳ |
| RCM | ۰/۷۵۴۸ | ۴ |
| CM | ۰/۷۴۴۱ | ۵ |
| CBM | ۰/۷۳۴۳ | ۶ |
| BM | ۰/۷۲۷۳ | ۷ |

همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از دو روش SAW و تاپسیس همخوانی کامل دارند. این همگرایی در رتبه‌بندی، حاکی از ثبات و قابلیت اطمینان بالای نتایج تحقیق حاضر است. اگرچه مقادیر عددی

- (۱) بعد اجتماعی به عنوان مؤثرترین بعد پایداری در انتخاب استراتژی نگهداری شناسایی شد و ابعاد اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی در رده‌های بعدی قرار گرفتند.
- (۲) رتبه اول بعد اجتماعی حاکی از آن است که در بستر صنعت قطعه‌سازی ایران، عوامل انسانی و روابط کاری (مانند رفاه روانی و کیفیت ارتباطات) حتی از ملاحظات فنی و اقتصادی نیز پیشی گرفته‌اند. این یافته ممکن است بازتابی از تأکید فزاینده بر مسئولیت‌های اجتماعی شرکتی و اهمیت محیط‌کار سالم در بهره‌وری بلندمدت باشد.
- (۳) اولویت‌بندی زیرمعیارهای اجتماعی نیز مؤید همین موضوع است، به طوری که رفاه روانی اجتماعی، ارتباطات و انتقال تجربه در صدر قرار گرفتند. این نتایج به مدیران هشدار می‌دهد که برای دستیابی به نگهداری پایدار، باید بیش از پیش بر سرمایه انسانی و فرهنگ‌سازمانی متمرکز شوند.
- (۴) در بین معیارهای اقتصادی، امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان فناوری و سرمایه‌گذاری به ترتیب بالاترین رتبه‌ها را کسب کردند که نشان‌دهنده نگاه راهبردی و بلندمدت خبرگان به مقوله نگهداری و تعمیرات است.
- (۵) رتبه پایین مصرف انرژی در بین معیارهای اقتصادی و همین‌طور رتبه چهارم بعد محیط‌زیست در میان ابعاد اصلی، زنگ خطری برای صنعت است و نشان می‌دهد که علی‌رغم اهمیت زیست‌محیطی، این معیارها در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی مدیران از اولویت کمتری برخوردارند.
- (۶) در بین معیارهای بعد فنی، کسب رتبه‌های اول تا سوم توسط تخصص کارکنان، بهره‌وری ماشین و کیفیت قطعات و مواد نشان‌دهنده یک نگرش زیرساختی و راهبردی از سوی خبرگان است. آن‌ها به وضوح دریافته‌اند که بدون سرمایه انسانی ماهر (با بالاترین وزن)، حتی پیشرفته‌ترین ماشین‌آلات نیز به حداکثر بهره‌وری نخواهند رسید و بدون مواد اولیه و
- (۷) در بین معیارهای بعد زیست‌محیطی، معیارهای از رده خارج کردن تجهیزات فرسوده و جایگزینی با تجهیزات سبز و رعایت استانداردهای ایمنی و محیط‌زیستی به ترتیب در رتبه‌های اول و دوم قرار گرفتند. این نتیجه حاکی از آن است که راهکارهای اساسی و پیشگیرانه (مانند نوسازی بنیادی ناوگان ماشین‌آلات) بر راهکارهای کنترلی و عملیاتی (مانند مدیریت ضایعات در حین تولید) از اولویت بالاتری برخوردار هستند.
- (۸) هنگامی که نتایج ابعاد فنی و زیست‌محیطی را در کنار هم می‌گذاریم، یک نکته کلیدی آشکار می‌شود: معیارهایی مانند نرخ خرابی و عملیات تجاری (از بعد فنی) در مقایسه با معیارهایی مانند کنترل مصرف منابع و انرژی و کنترل صدا و ارتعاش (از بعد زیست‌محیطی) از وزن بیشتری برخوردار شده‌اند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که در دیدگاه تصمیم‌گیرندگان، کارایی عملیاتی و پایداری اقتصادی کوتاه‌مدت (که مستقیماً تحت تأثیر خرابی و عملکرد تجاری است) هنوز بر ملاحظات زیست‌محیطی بلندمدت‌تر (مانند مصرف بهینه منابع و آلودگی‌های صوتی) ارجحیت دارد. این شکاف، فرصتی برای مدیران فراهم می‌آورد تا با یکپارچه‌سازی اهداف فنی و زیست‌محیطی، به سمت مدل‌های کاملاً پایدار حرکت کنند.
- (۹) در رتبه‌بندی استراتژی‌های نگهداری، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) توسط هر دو روش SAW و تاپسیس به عنوان مطلوب‌ترین استراتژی شناسایی شد و نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر (TPM) و نگهداری و تعمیرات

بیشتری بر روی سرمایه انسانی، رفاه روانی، ارتباطات سازمانی و انتقال تجربه انجام دهند.

(۲) اولویت‌بندی استراتژی‌ها: به مدیران توصیه می‌شود اجرا و بهبود استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) و نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر (TPM) را در اولویت قرار دهند، چراکه این استراتژی‌ها بیشترین همخوانی را با اهداف جامع پایداری در این صنعت دارند.

(۳) سرمایه‌گذاری‌های راهبردی: کسب رتبه اول توسط زیرمعیارهایی مانند جایگزینی تجهیزات سبز و تخصص کارکنان نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت راهبردی در فناوری و نیروی انسانی، حیاتی‌تر از کنترل‌های عملیاتی کوتاه‌مدت تلقی می‌شوند. تخصیص بودجه برای ارتقای ماشین‌آلات به تجهیزات کم‌مصرف و آموزش مستمر پرسنل توصیه می‌شود.

(۴) شاخص‌های عملکرد متوازن: سازمان‌ها باید شاخص‌های عملکردی طراحی کنند که نه تنها کارایی اقتصادی و فنی، بلکه عوامل اجتماعی (مانند رضایت شغلی و آمار ایمنی) و انطباق زیست‌محیطی را نیز پایش کند.

۴-۵- محدودیت‌ها و پیشنهادات آتی

این پژوهش، علیرغم دستاوردهای اشاره‌شده، دارای محدودیت‌هایی است که مسیرهایی را برای پژوهش‌های آینده می‌گشاید:

(۱) این مطالعه در بافت خاص صنعت قطعه‌سازی خودروی ایران انجام شده است. بنابراین، قابلیت تعمیم‌یافته‌ها به سایر صنایع یا بافت‌های فرهنگی ممکن است محدود باشد. پژوهش‌های آتی می‌توانند این چارچوب را در سایر بخش‌ها (مانند پتروشیمی، نیروگاه‌ها) یا کشورها اعتبارسنجی کنند.

(۲) این پژوهش بر اساس نظرات ۱۰ خبره انجام شده است. اگرچه این تعداد برای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌کاررفته کافی است، اما تحقیقات آتی با نمونه بزرگ‌تر و متنوع‌تری از خبرگان می‌توانند یافته‌ها را تقویت کنند.

پیش‌بینی‌کننده (PreM) به ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

۵-۲- مفاهیم نظری

این پژوهش از چند منظر به غنای ادبیات موضوع کمک می‌کند:

(۱) ارائه چارچوب جامع پایداری: پژوهش حاضر یک چارچوب جامع چهار بعدی (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فنی) را برای مدیریت نگهداری پایدار معرفی و اعتبارسنجی کرده است. این چارچوب شکاف موجود در مطالعات پیشین که اغلب به ابعاد اجتماعی کم‌توجهی کرده‌اند را پر می‌کند.

(۲) توسعه روش‌شناختی: این مطالعه کارایی روش فوکام را در حوزه نگهداری پایدار به نمایش گذاشته است. استفاده از فوکام که به مقایسات زوجی کمتری نیاز دارد و سازگاری کامل را تضمین می‌کند، قابلیت اطمینان وزن‌دهی معیارها در محیط‌های پیچیده تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد.

(۳) اعتبارسنجی با تکنیک‌های چندمعیاره: برای اطمینان بیشتر از نتایج، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات با دو روش مختلف (SAW و تاپسیس) رتبه‌بندی شدند. از آنجاکه نتایج هر دو روش یکسان بود، می‌توان به صحت و قابلیت اطمینان رتبه‌بندی نهایی اطمینان داشت.

(۴) افزایش دانش در بافت خاص: این تحقیق با ارائه شواهد تجربی از بستر کمتر مطالعه‌شده صنعت قطعه‌سازی خودروی ایران، ادبیات نگهداری پایدار را غنی می‌سازد و اولویت منحصربه‌فرد بعد اجتماعی در این زمینه را برجسته می‌کند.

۵-۳- مفاهیم عملی

یافته‌های این مطالعه راهکارهای عملیاتی زیر را برای مدیران و سیاست‌گذاران به همراه دارد:

(۱) تغییر در تمرکز مدیریتی: اولویت بالای بعد اجتماعی به مدیران هشدار می‌دهد که برای دستیابی به عملیات پایدار، باید سرمایه‌گذاری

- reliability management*, 25(7), 709-756.
<https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- Al-Barzemanesh, R. (2011). Selecting the most appropriate maintenance and repair strategy using the fuzzy analytic hierarchy process (case study of Mobarakeh steel transformers in Isfahan), Master's thesis, supervised by Professor Abdolhamid Safai Ghadikkalai. *University of Mazandaran*, Faculty of Economics and Administrative Sciences. (In Persian).
- Chen, C., Liu, Y., Sun, X., Di Cairano-Gilfedder, C., & Titmus, S. (2019). Automobile maintenance prediction using deep learning with GIS data. *Procedia CIRP*, 81, 447-452.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.077>
- De Campos, R. S., & Simon, A. T. (2019). Insertion of sustainability concepts in the maintenance strategies to achieve sustainable manufacturing. *Independent Journal of Management & Production*, 10(6), 1908-1931.
<https://doi.org/10.14807/ijmp.v10i6.939>
- Franciosi, C., Lambiase, A., & Miranda, S. (2017). Sustainable maintenance: a periodic preventive maintenance model with sustainable spare parts management. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13692-13697.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2536>
- Ghasemi, A. R., Maleki, M. H., Karimi, A. (2015). Prioritizing the development of extra-organizational relations based on cultural values using cluster analysis and analytic hierarchy process. *Management of Government Organizations*, 3(2), 59-74. (In Persian).
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322522.1394.3.0.16.4>
- Ghavami, S. (2013). Evaluation and selection of appropriate maintenance and repair strategy for press brakes using fuzzy graph network analysis and simulation, Process analysis: Lama Electronics Company. Master's thesis, *Ferdowsi University of Mashhad*, Iran. (In Persian).
- Graisa, M. M. (2011). *An investigation into the need and implementation of total productive maintenance (TPM) in Libyan cement industry*. Nottingham Trent University (United Kingdom).
- Hami, N., Shafie, S. M., Omar, S., Ibrahim, Y. M., Abdulameer, S. S., & Muhamad, M. R. (2020). A review of sustainable maintenance in the manufacturing companies. *International Journal of Supply Chain Management*, 9(3), 935-944.
- Hosseinzadeh, M., Mehregan, M.R., & Ghayim, H. (2019). Sustainable Supply of Rotating Equipment Parts for the Oil Industry Using System Dynamics Metasynthesis and Revealing and Testing Strategic Assumptions. *Industrial Management Perspective*, 11(3), 9-43. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jimp.11.3.9>

- ۳) جمع‌آوری داده‌ها عمدتاً بر اساس پرسشنامه بوده است. پژوهش‌های آینده می‌توانند از رویکردهای ترکیبی استفاده کنند و با به‌کارگیری مصاحبه‌های عمیق، بینش کیفی غنی‌تری از دلایل ترجیحات خبرگان، به‌ویژه در مورد وزن بالای بعد اجتماعی، به دست آورند.
- ۴) این مطالعه بر شناسایی و وزن‌دهی معیارها متمرکز بود. یک مسیر امیدبخش برای پژوهش‌های آینده، توسعه یک مدل کمی یا مبتنی بر شبیه‌سازی برای ارزیابی تأثیر اجرای استراتژی‌های نگهداری رتبه برتر (PM و TPM) بر شاخص‌های خاص عملکرد پایداری (مانند کاهش ردپای کربن، نرخ جابجایی کارکنان) است و واکاوی موانع و چالش‌هایی که مانع اولویت‌یافتن بیشتر بعد زیست‌محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری می‌شوند، نیز حوزه ارزشمندی برای پژوهش‌های آینده است.

مشارکت‌های نویسندگان

نقش و سهم هر یک از نویسندگان در نگارش این مقاله برابر بوده است.

تضاد منافع

هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر بین نویسندگان وجود ندارد و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

در اینجا از عوامل اجرایی نشریه و داوران محترم، تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌داریم.

مراجع

- Aghaei, M., & Fazli, S. (2012). Applying a combined approach of DEMATEL and ANP to select the appropriate maintenance and repair strategy (case study: commercial vehicle industry). *Industrial Management Perspective*, 6, 89-107. (In Persian).
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *International journal of quality &*

- Mohagher, A., Sharafat, A., Asgharizadeh, E., & Mirghafouri, H. (2016). Designing a new model to evaluate the maintenance and repair system in the electrical industry. *Scientific-Research Journal of Quality and Productivity of the Iranian Electrical Industry*, 5(9), 68-80. (In Persian).
- Mohammadfam, I., Shafikhani, A., Shafikhani, A.A., & Ghasemi, F. (2017). Determining an appropriate risk-based maintenance and repair strategy to improve safety indicators. *Occupational Health and Safety Quarterly*, 7(4), 279-290. (In Persian).
- Momeni, M., Fathi, M.R., Karimi Zarchi, M., & Azizollahi, S. (2011). A Fuzzy TOPSIS-Based Approach to Maintenance Strategy Selection: A Case Study, *Middle-East Journal of Scientific Research*, 8(3), 699-706.
- Mousavi Ramezanzadeh, A., & Nazari, M. (2025). Identifying and prioritizing effective nudges for social acceptance of green electricity: A fuzzy Delphi study. *System Engineering and Productivity* (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2065794.1352>
- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: total productive maintenance. (Translation). *Productivity Press, Inc.*, 1988, 129.
- Nardo, M., Converso, G., Castagna, F., & Murino, T. (2021). Development and implementation of an algorithm for preventive machine maintenance. *Engineering Solid Mechanics*, 9(4), 347-362. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2021.7.003>
- Nezami, F. G., & Yildirim, M. B. (2013). A sustainability approach for selecting maintenance strategy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4), 332-343. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.765928>
- Oluğu, E. U., Wong, K. Y., Chung Ee, J. Y., & Mammedov, Y. D. (2022). Incorporating sustainability and maintenance for performance assessment of offshore oil and gas platforms: a perspective. *Sustainability*, 14(2), 807. <https://doi.org/10.3390/su14020807>
- Oudah, M. M., & Kassam, A. E. H. (2025, February). Multi-criteria decision-making approach in maintenance strategy selection: A review and descriptive analysis. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3169, No. 1, p. 040023). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0256002>
- Peng, J., Yang, Y., Bian, H., Zhang, J., & Wang, L. (2022). Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(3), 395-411. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1855215>
- Ighravwe, D. E. (2022). Assessment of Sustainable Maintenance Strategy for Manufacturing Industry. *Sustainability*, 14(21), 13850. 1-17. <https://doi.org/10.3390/su142113850>
- Ighravwe, D. E., & Oke, S. A. (2017). A multi-hierarchical framework for ranking maintenance sustainability strategies using PROMETHEE and fuzzy entropy methods. *Journal of building pathology and rehabilitation*, 2, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0028-7>
- Ighravwe, D. E., & Oke, S. A. (2019). A multi-criteria decision-making framework for selecting a suitable maintenance strategy for public buildings using sustainability criteria. *Journal of Building Engineering*, 24, 100753. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100753>
- Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Rezaeian, J. (2025). Evaluation and selection of suppliers in a viable closed-loop supply chain under mixed uncertainty. *System Engineering and Productivity* (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2066007.1355>
- Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseinezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System Engineering and Productivity*, 5(2), 97-118. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049327.1252>
- Kumar, A., Shankar, R., & Thakur, L. S. (2018). A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. *Journal of computational science*, 27, 428-439. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.006>
- Mahmud, I., Ismail, I., Abdulkarim, A., Shehu, G. S., Olarinoye, G. A., & Musa, U. (2024). Selection of an appropriate maintenance strategy using analytical hierarchy process of cement plant. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 13(2), 103-109. <https://doi.org/10.1007/s41872-024-00249-7>
- Mashayekhi, A.N., Farhangi, A.A., Momeni, M., & Alidoosti, S. (2005). Investigating key factors affecting the use of information technology in Iranian government organizations: Application of the Delphi method. *Modares Ulum Ananisati*, 9(3), 191-232. (In Persian).
- Modgil, S., & Sharma, S. (2016). Total productive maintenance, total quality management and operational performance: An empirical study of Indian pharmaceutical industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(4), 353-377. https://doi.org/10.1108/JQME-10-2015-0048?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate

- Procedia Manufacturing*, 43, 728-735. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.111>
- Shahrjerdi, R., & Ghorbanpour, M. (2023). Evaluation of maintenance strategies of physical assets of service companies with a green approach using fuzzy analytic hierarchy process, case study: Tehran Province Water and Wastewater Company. *Water and Wastewater Science and Engineering*, 8(4), 70-84. (In Persian). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.378307.1340>
- Shakerikenari, E., & Safaei Ghadikalai, A.H. (2019). Determining Maintenance and Repair Strategies Using a Multi-Stage Fuzzy Inference System (Case Study: Shahid Salimi Neka Power Plant). *Industrial Management Studies*, 17(54), 291-325. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/jims.2017.21543.1754>
- 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. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264>
- Sharafat, A. & Mohqer, A. (2018). Designing a Mechanism for Selecting an Appropriate Maintenance and Repair Strategy. *Industrial Management Perspective*, 8(30), 31-69. (In Persian).
- Tabatabaei, S.A., & Davoudi, S.M.R. (2018). Ranking of maintenance and repair strategies in production systems considering sustainable development principles using fuzzy TOPSIS method (case study: Saba Steel). *Fourth International Conference on Management, Entrepreneurship and Economic Development*, Takestan. (In Persian).
- Taghavifard, M.T., Khani, A.M., & Bayrami, S. (2023). Total Quality Management: Principles, Methods and Applications (First Edition). Tehran: Senior Authored Educational Publishing House. (In Persian). <https://doi.org/10.1201/9781003053156>
- Taghipour, R. & Awkh Darestani, S. (2018). Maintenance Strategy Selection using Fuzzy Hierarchical Approach. *Quarterly Scientific-Research Journal of Industrial Management Studies*, 16(50), 193-228. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/jims.2018.9111>
- Taherdoost, H. (2016). Validity and reliability of the research instrument; how to test the validation of a questionnaire/survey in a research. *International journal of academic research in management (IJARM)*, 5. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3205040>
- Peng, K. (2018). Equipment management in the post-maintenance era: a new alternative to total productive maintenance (TPM). *Productivity Press*. <https://doi.org/10.4324/9781003054856>
- Pophaley, M., & Vyas, R. K. (2010). Choice criteria for maintenance strategy in automotive industries. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5(6), 446-452. <https://doi.org/10.1080/17509653.2010.10671136>
- Ramezani, K., Darvish Motevalli, M. H., Motamedi, M., & Movahedi, M. M. (2025). Design of a preventive maintenance mathematical model for high-speed press machines. *System Engineering and Productivity* (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2067829.1372>
- Rasouli, R., Moghli, A.R., Rashidi, M. (2014). Designing a Model for Strengthening the Organizational Retention of Knowledge-Based Employees: Using the Delphi Technique. *Journal of Career and Organizational Counseling*, 6(21), 66-94. (In Persian).
- Rizkya, I., Sari, R. M., Syahputri, K., & Tarigan, U. (2021). Evaluation of total productive maintenance implementation in manufacture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1122, No. 1, p. 012059. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012059>
- Sabet Motlaq, M. (2018). Applying the Concept of Rough Set Theory in Multi-Attribute Decision Making Methods for Evaluating and Selecting the Most Appropriate Maintenance and Repair Strategy. *Strategic Management Research*, 24(70), 65-89. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jitm.2017.61419>
- Sadeghi, A., & Alborzi Manesh, R. (2012). The application of fuzzy group Analytic Network Process to selection of best maintenance strategy- A case study in Mobarakeh. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62, 1378-1383. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.236>
- Sahoo, S. (2018). An empirical exploration of TQM, TPM and their integration from Indian manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(7), 1188-1210. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0075>
- Sahoo, S. (2019). Assessment of TPM and TQM practices on business performance: a multi-sector analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(3), 412-434. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2018-0048>
- Sahoo, S., & Yadav, S. (2020). Influences of TPM and TQM practices on performance of engineering product and component manufacturers.

- Wątrobski, J., Bączkiewicz, A., & Rudawska, I. (2023), A Strong Sustainability Paradigm based Analytical Hierarchy Process (SSP-AHP) method to evaluate sustainable healthcare systems, *Ecological Indicators*, 154(110493), 1-27. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.00718>
- Xia, T., Xi, L., Du, S., Xiao, L., & Pan, E. (2018). Energy-oriented maintenance decision-making for sustainable manufacturing based on energy saving window. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(5), 051001. <https://doi.org/10.1115/1.4038996>
- Zakeri Getabi, F. (2014). Investigating Maintenance Strategies and Selecting the Most Appropriate Strategy Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques (Case Study of Ghaemshahr Canning Factories). Master's Thesis, Supervised by Professor Abdolhamid Safai Ghadikkalai, *University of Mazandaran*, Faculty of Economics and Administrative Sciences. (In Persian).