

Analyzing Barriers to the Development of Sustainable Predictive Maintenance in Industrial Equipment of Petrochemical Complexes Using FDM-DEMATEL (A Case Study)

Mahnaz Zarei¹ ,* , Mehdi Keshavarzi² 

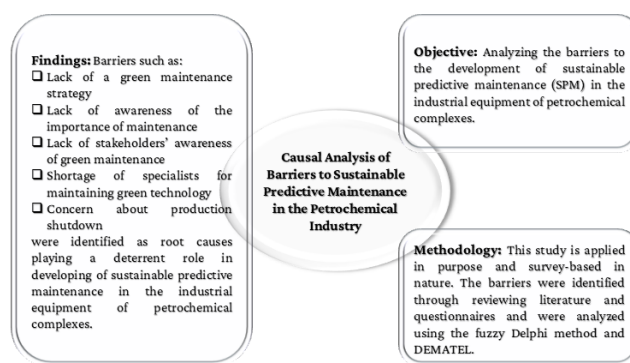
¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

² M.Sc, Department of Industrial Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

HIGHLIGHTS

- 21 barriers were identified in five categories: organizational, social, environmental, technological, and financial.
- Technological and social barriers emerged as the main causal factors.
- A strategic focus on technological and social dimensions can more effectively improve sustainable predictive maintenance systems.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 3 June 2026

Revised: 4 July 2026

Accepted: 18 July 2026

Available online: 18 July 2026

*Correspondence:

mahnaz.zarei@iau.ac.ir

How to cite this article:

Zarei, M., & Keshavarzi, M. (2026). Analyzing Barriers to the development of sustainable predictive maintenance in industrial equipment of petrochemical complexes using FDM-DEMATEL (a case study). *System Engineering and Productivity*, 6 (4), 251-279.

Keywords:

Sustainable Predictive Maintenance

Barriers

Petrochemical Industry

Fuzzy Delphi Method

DEMATEL

ABSTRACT

The aim of this study was to identify and analyze the barriers to implementing sustainable predictive maintenance (SPM) in the industrial equipment of a petrochemical complex. The study was applied in purpose and descriptive-survey in design. Data were collected through a questionnaire from six petrochemical-industry experts selected using snowball sampling. First, 25 initial barriers extracted from the literature were assessed through a two-round fuzzy Delphi process, resulting in the validation of 21 barriers across five dimensions: organizational, social, environmental, technological, and financial. Subsequently, the cause-effect relationships among the barriers were analyzed using DEMATEL at two levels, including the main dimensions and the sub-barriers within each dimension. The results showed that social and technological barriers, with net-effect values of 1.653 and 1.178, respectively, were causal dimensions. In contrast, environmental, organizational, and financial barriers, with net-effect values of -1.737, -0.816, and -0.278, respectively, were classified as effect dimensions. At the sub-barrier level, "lack of a green maintenance strategy" (1.337), "lack of awareness of the importance of maintenance" (0.634), "lack of stakeholders' awareness of green maintenance" (1.143), "shortage of specialists for maintaining green technology" (0.731), and "concern about production shutdowns" (0.654) were identified as the most influential causal barriers within their respective dimensions. The findings underscore the need to formulate a green maintenance strategy, enhance the awareness and skills of employees and stakeholders, develop technological capabilities, and manage the risk of production shutdowns to facilitate the implementation of SPM in petrochemical complexes.

1. Introduction

In recent decades, industrial complexity and stricter safety, competitiveness, and environmental requirements have transformed maintenance from a supporting activity into a strategic component of physical asset management. Maintenance comprises planned actions to preserve or restore equipment and improve reliability, availability, safety, and production continuity. It is therefore linked to organizational economic, environmental, and social outcomes. Sustainable development requires balancing productivity and production continuity, lower resource consumption and emissions, and employee safety and health (Martinod et al., 2018; Ruggerio, 2021).

Predictive maintenance uses condition-monitoring data, sensors, and operational analytics to determine intervention and repair timing. Compared with reactive and time-based policies, it can reduce unexpected failures and unplanned shutdowns, extend equipment useful life, and optimize maintenance expenditure (Pech et al., 2021). Integrating these capabilities with sustainability objectives has led to sustainable predictive maintenance (SPM). SPM improves equipment performance and reliability while supporting energy efficiency, waste reduction, safety-risk mitigation, and reduced environmental impacts (Karuppiyah et al., 2021).

The petrochemical industry is a setting for SPM implementation because it is capital intensive, depends on continuous processes and sensitive equipment, and entails significant safety and environmental risks. Failures in pumps, compressors, turbines, and heat exchangers may have economic, operational, safety, and environmental consequences. Maintenance expenditure can account for approximately 15–17% of total production costs in this industry (Aghaee et al., 2020). Thus, predictive and sustainable maintenance practices can reduce unexpected shutdowns and strengthen operational sustainability.

Despite these benefits, SPM implementation encounters organizational, social, environmental, technological, and financial barriers that may reinforce one another. Identifying barriers alone is insufficient for designing effective interventions; their influence–dependence relationships must also be examined. Previous studies have addressed barriers to Maintenance 4.0, predictive maintenance, and sustainable maintenance management (Naik & Kirkire, 2024; Olugu et al., 2024; Turan & Çaloğlu Büyükselçuk, 2025). However, many studies emphasize factor ranking rather than causal interdependencies and root factors. Few studies jointly examine the five barrier dimensions within a petrochemical context.

The multidimensional, uncertain, and interdependent nature of SPM barriers makes ranking methods alone inadequate. Fuzzy Delphi Method (FDM) manages ambiguity in expert judgments, assesses consensus, and refines literature-derived factors through a multi-stage decision-making logic (Ebrahimi & Bridgelall, 2021; Shafaei et al., 2025). DEMATEL reveals direct and indirect relationships, distinguishes causal from effect factors, and identifies root barriers for prioritizing actions (Si et al., 2018). Accordingly, this study validates barriers using FDM and applies DEMATEL hierarchically: first among five dimensions and then within each dimension.

2. Methodology

The present study was conducted over a four-month period, from May to September 2025. Data were collected through a review of relevant literature and fieldwork, including interviews and questionnaires. First, a literature review identified initial barriers to SPM. Because petrochemical complexes are process-manufacturing systems, literature-derived barriers were used as the initial basis for the case complex. Second, interviews and questionnaires were used to assess the relevance and influence of these barriers through expert judgment.

The study population comprised petrochemical managers and specialists with maintenance and sustainability expertise. Snowball sampling selected six experts with relevant education, substantial experience, and familiarity with operational, planning, and maintenance processes. The panel included four senior managers, one middle manager, and one supervisor; three experts held doctoral degrees, and three had more than 30 years of experience. They also had professional interaction with other southern Iranian petrochemical complexes. The FDM screened and validated the literature-derived barriers. DEMATEL was subsequently applied hierarchically: an integrated model analyzed relationships among five main dimensions, while separate models examined barriers within each dimension. This structure reduced pairwise-comparison burden and supported evaluation quality.

3. Results and Discussion

The FDM results showed that 25 initial barriers were evaluated in the first round. Based on the acceptance threshold of 0.70 for defuzzified scores, four barriers did not receive sufficient expert support and were removed from the subsequent analysis. Accordingly, 21 validated barriers were retained and reassessed in the second round. The defuzzified scores of the retained barriers ranged from 0.7000 to 0.7889, indicating that all of them met the required acceptance threshold. Moreover, the absolute differences between the defuzzified scores of the two

rounds were below 0.10 for all validated barriers. These results indicate relative stability in expert judgments; therefore, the fuzzy Delphi process was concluded after the second round, and the 21 validated barriers were entered into the DEMATEL analysis.

In the DEMATEL stage, the cause-and-effect relationships among the five main dimensions of barriers—organizational, social, environmental, technological, and financial—were analyzed, as presented in Table 1.

Table 1. Influence, influenced degree, total importance, and net effect of main dimensions

Dimensions	r	c	r + c	r - c
Organizational Barriers (C_1)	2.044	2.860	4.904	-0.816
Social Barriers (C_2)	3.384	1.731	5.115	1.653
Environmental Barriers (C_3)	1.499	3.235	4.734	-1.737
Technological Barriers (C_4)	3.237	2.059	5.295	1.178
Financial Barriers (C_5)	2.386	2.664	5.050	-0.278

The results indicated that in terms of net effect ($r-c$), social barriers with a value of 1.653 and technological barriers with 1.178 were identified as causal and driving factors. In contrast, environmental barriers with -1.737, organizational barriers with -0.816, and financial barriers with -0.278 were classified as effect and influenced factors. Furthermore, in terms of total importance ($r+c$), technological barriers ranked first with a value of 5.295, while social, financial, organizational, and environmental barriers, with values of 5.115, 5.050, 4.904, and 4.734, respectively, were placed in the second to fifth ranks. To visually represent these relationships, the cause-and-effect diagram of the main barrier dimensions is presented in Figure 1.

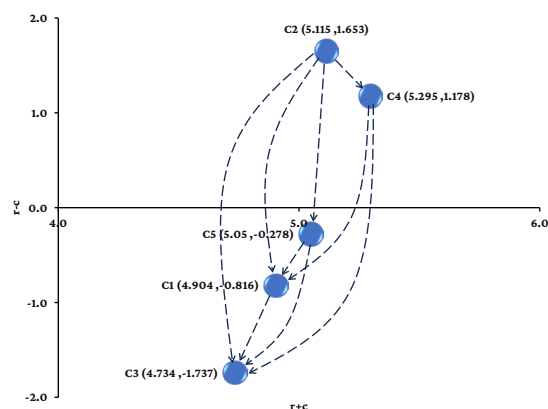


Figure 1. Cause-effect diagram of main dimensions.

Furthermore, the cause-effect relationships among the sub-barriers within each main dimension are depicted in Figures 2–6. At the sub-barrier level, “lack of a green maintenance strategy” (C_{12}), “lack of awareness of the importance of maintenance” (C_{21}), “lack of stakeholders’ awareness of green

maintenance” (C_{32}), “shortage of specialists for maintaining green technology” (C_{42}), and “concern about production shutdowns” (C_{52}) recorded the highest net-effect values within the organizational, social, environmental, technological, and financial dimensions, respectively. Their net-effect values ($r-c$) were 1.337, 0.634, 1.143, 0.731, and 0.654, respectively. Accordingly, these barriers were identified as the most influential causal drivers within their respective dimensions and should be prioritized in efforts to facilitate SPM implementation in the petrochemical complex.

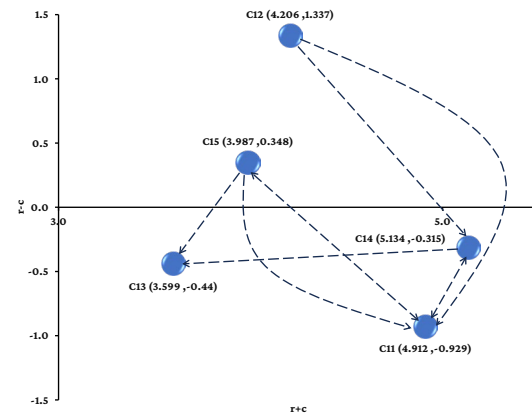


Figure 2. Cause-effect diagram of organizational barriers.

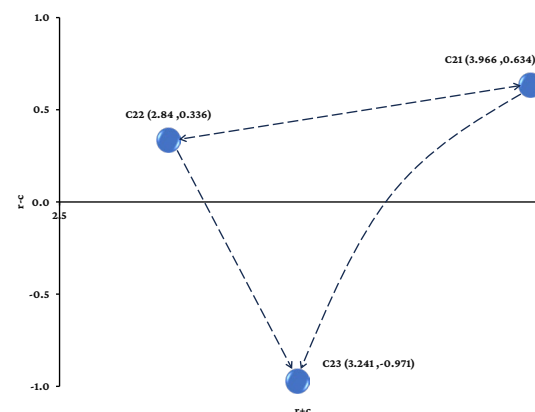


Figure 3. Cause-effect diagram of social barriers.

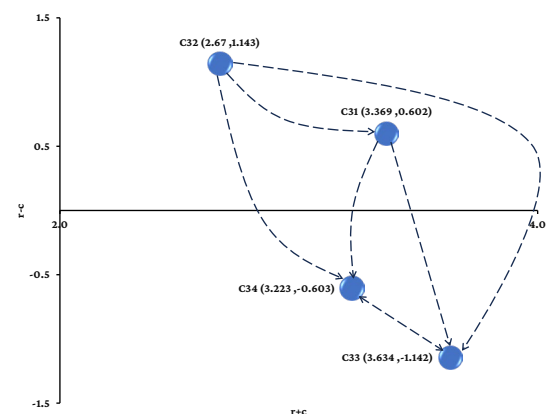


Figure 4. Cause-effect diagram of environmental barriers.

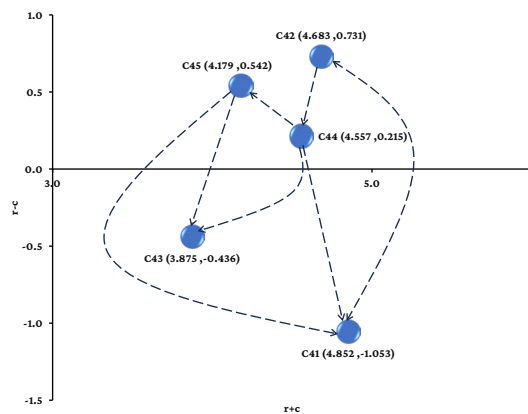


Figure 5. Cause-effect diagram of technological barriers.

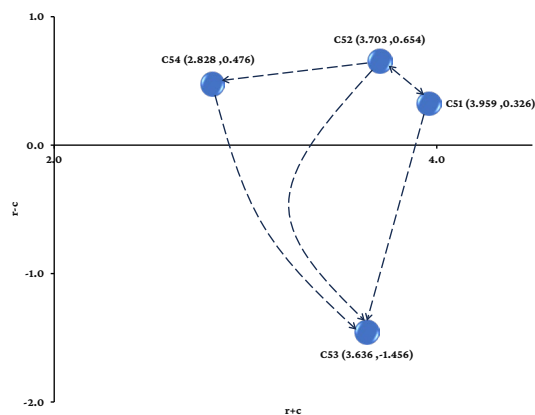


Figure 6. Cause-effect diagram of financial barriers.

Sensitivity analysis across four expert-weighting scenarios supported the robustness of the results. Of 78 rank comparisons, 70 (89.74%) remained unchanged, and the sign of the net-effect index ($r-c$) was stable for all main dimensions and sub-barriers. Thus, the causal-effect classification was unaffected by changes in expert weights.

The findings are broadly consistent with previous research. The causal role of a lack of a green maintenance strategy supports the management-related SPM barriers identified by Karuppiah et al. (2021) and the organizational-managerial barriers reported by Turan and Çaloğlu Büyükselçuk (2025). The importance of maintenance awareness and stakeholder engagement is also consistent with (Moakedi et al., 2026). Moreover, the causal role of specialist shortages and technological barriers aligns with the emphasis on technical capabilities in Maintenance 4.0 studies (Ghasemian Sahebi et al., 2025; Nagy et al., 2026). Finally, concern about production shutdowns supports the findings of El kihel et al. (2022) regarding the role of advanced maintenance in improving availability and reducing unplanned downtime. Accordingly, Managers should adopt a phased approach by establishing a green maintenance strategy, strengthening employee and stakeholder capabilities, gradually developing technological infrastructure through pilot projects, and expanding SPM through cost-benefit analysis and production-shutdown risk

management. This sequence can limit the escalation of technological and social barriers into wider organizational, environmental, and financial challenges.

4. Conclusions

This study identified, validated, and analyzed barriers to sustainable predictive maintenance implementation in a petrochemical complex. Of 25 literature-derived barriers, 21 were validated through fuzzy Delphi and assessed using hierarchical DEMATEL. At the main-dimension level, social and technological barriers were causal, whereas organizational, environmental, and financial barriers were effect dimensions. Technological and social barriers showed the highest centrality in the barrier network. The findings indicate that SPM implementation requires more than financial resources or environmental requirements; it also depends on a green maintenance strategy, employee awareness and participation, technological skills, and infrastructure.

Data were collected from a petrochemical complex and six experts; therefore, findings should be interpreted as a case study and generalized cautiously. Results are based on expert judgments and may reflect experience. Moreover, the hierarchical design analyzed relationships among main dimensions jointly but assessed sub-barriers separately rather than in an integrated model. The cross-sectional design did not capture changes over time. Future research should conduct multi-case studies, involve larger expert panels, compare petrochemical sites, and apply methods such as ISM-MICMAC, DEMATEL-ISM, BWM, ANP, or integrated barrier modeling. Studies may examine how industrial IoT, artificial intelligence, digital twins, data security, and explainable models can reduce SPM implementation barriers.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Mahnaz Zarei: Scientific supervision of the study, development of the theoretical framework and literature review, supervision of the methodology (fuzzy Delphi method and DEMATEL), interpretation of analytical results, scientific revision, and final editing of the manuscript. **Mehdi Keshavarzi:** Conceptualization and research model design, identification of barriers and data collection, implementation of fuzzy Delphi and DEMATEL analyses, preparation of the initial draft, and final editing of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding this research, and that all stages of

the study and data analysis were conducted independently.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the managers, experts, and specialists of the petrochemical company under study for their cooperation in data collection, questionnaire completion, and provision of expert insights.

References

- Aghaee, A., Aghaee, M., Fathi, M. R., Shoa'bin, S., & Sobhani, S. M. (2021). A novel fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach for evaluating maintenance strategies in petrochemical industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(2), 351-365. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2019-0036>
- Ebrahimi, S., & Bridgelall, R. (2021). A fuzzy Delphi analytic hierarchy model to rank factors influencing public transit mode choice: A case study. *Research in transportation business & management*, 39, 100496. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100496>
- El Kihel, Y., El Kihel, A., & Bouyahrouzi, E. M. (2022). Contribution of maintenance 4.0 in sustainable development with an industrial case study. *Sustainability*, 14(17), 11090. <https://doi.org/10.3390/su141711090>
- Ghasemian Sahebi, I., Sadeghpour Firoozabad, A., Mohammadinezhad, E., & Moradi-Moghadam, M. (2026). Mapping barriers to TPM 4.0 implementation through a two-stage fuzzy approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 43(2), 475-498. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2024-0351>
- Karuppiah, K., Sankaranarayanan, B., & Ali, S. M. (2021). On sustainable predictive maintenance: Exploration of key barriers using an integrated approach. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1537-1553. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.023>
- Martinod, R. M., Bistorin, O., Castañeda, L. F., & Rezg, N. (2018). Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.019>
- Moakedi, H., Hajizadeh Ebrahimi, F., & Soltanmohammadi, M. (2026). Integrating Sustainability into Maintenance Strategy Selection: A FUCOM-based Case Study from Automotive Parts Industry. *System Engineering and Productivity*, 6(2), 205-235. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2074271.1408>
- Nagy, M., Valaskova, K., & Lazaroiu, G. (2026). Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems, Internet of Things Sensor Networks, and Machine Intelligence Algorithms for Industry 4.0/5.0 Manufacturing Processes. *Systems*, 14(3), 281. <https://doi.org/10.3390/systems14030281>
- Naik, M. L., & Kirkire, M. S. (2025). Analysis of barriers to Maintenance 4.0 in manufacturing industries. *Benchmarking: An International Journal*, 32(7), 2690-2719. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2023-0852>
- Olugu, E. U., Mammedov, Y. D., Young, J. C. E., & Yeap, P. S. (2024). Integrating spherical fuzzy Delphi and TOPSIS technique to identify indicators for sustainable maintenance management in the oil and gas industry. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(4), 288-302. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.003>
- Pech, M., Vrchota, J., & Bednář, J. (2021). Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory. *Sensors*, 21(4), 1470. <https://doi.org/10.3390/s21041470>
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the total environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Shafaei, A., Heidary-Dahooie, J., Babaei, A., Çalık, A., & Tirkolaee, E. B. (2025). An integrated decision-making approach for identifying sustainable tier-1 suppliers: Fuzzy Delphi-Borda-SWARA. *Annals of Operations Research*, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06923-y>
- Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C., & Zhang, P. (2018). DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical problems in Engineering*, 2018(1), 3696457. <https://doi.org/10.1155/2018/3696457>
- Turan, H., & Çaloğlu Büyükselçuk, E. (2025). Evaluation of the Barriers to Maintenance 4.0 for the Textile Industry via Pythagorean Fuzzy SWARA. *Applied Sciences*, 15(13), 7093. <https://doi.org/10.3390/app15137093>

تحلیل موانع توسعه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در تجهیزات صنعتی مجتمع‌های پتروشیمی با FDM-DEMATEL (یک مطالعه موردی)

مهناز زارعی^{۱*}، مهدی کشاورزی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

برجسته‌ها

- ۲۱ مانع در پنج دسته سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناوری و مالی شناسایی شدند.
- موانع فناوری و اجتماعی، اصلی‌ترین عوامل علی نتیجه شدند.
- تمرکز راهبردی بر ابعاد فناوری و اجتماعی می‌تواند اثربخشی بیشتری در بهبود نظام نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار ایجاد کند.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

*نویسنده مسئول:

mahnaz.zarei@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار

موانع

صنعت پتروشیمی

روش دلفی فازی

دیمتل

چکیده

هدف پژوهش حاضر، شناسایی و تحلیل موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در تجهیزات صنعتی یک مجتمع پتروشیمی است. پژوهش از نظر هدف کاربردی و از حیث ماهیت، توصیفی-پیمایشی است. داده‌ها با استفاده از پرسشنامه و با مشارکت شش خبره در صنعت پتروشیمی، که به روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی انتخاب شدند، گردآوری شد. ابتدا، ۲۵ مانع اولیه استخراج شده از ادبیات در دو دور دلفی فازی ارزیابی شد که از میان آن‌ها، ۲۱ مانع در پنج بعد سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناوری و مالی تأیید شدند. سپس، روابط علی-معلولی موانع با روش دیمتل در دو سطح تحلیل شد. نتایج نشان داد که موانع اجتماعی و فناوری، به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص 0.1178 و 0.1653 ، ابعاد علی مدل هستند؛ درحالی‌که موانع زیست‌محیطی، سازمانی و مالی به ترتیب با مقادیر 0.1737 ، 0.1816 و 0.2778 ، در گروه ابعاد تأثیرپذیر قرار گرفتند. در سطح درون‌بعدي نیز، «عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز» با مقدار 0.1337 ، «عدم آگاهی از اهمیت نگهداری» با مقدار 0.0634 ، «ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز» با مقدار 0.1443 ، «کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز» با مقدار 0.0731 و «نگرانی درباره توقف تولید» با مقدار 0.0654 ، بیشترین تأثیر خالص را در میان عوامل علی هر بعد داشتند و نقش بازدارنده در توسعه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در تجهیزات صنعتی مجتمع‌های پتروشیمی دارند. یافته‌ها بر ضرورت تدوین راهبرد نگهداشت سبز، ارتقای آگاهی و مهارت کارکنان و ذی‌نفعان، توسعه قابلیت‌های فناوری و مدیریت ریسک توقف تولید تأکید دارد.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، پیچیدگی فرایندهای صنعتی و تشدید الزامات ایمنی، رقابتی و زیست‌محیطی موجب شده است که نگهداری و تعمیرات از فعالیتی صرفاً پشتیبان به مؤلفه‌ای راهبردی در مدیریت دارایی‌های فیزیکی تبدیل شود. نگهداری و تعمیرات فعالیت‌هایی برنامه‌ریزی‌شده برای حفظ یا بازگرداندن تجهیزات به وضعیت عملکرد مطلوب است و در ارتقای قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری، ایمنی و تداوم تولید نقش دارد (Martinod et al., 2018). از این‌رو، سیاست‌گذاری نگهداری با پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی سازمان پیوند دارد. توسعه پایدار بر ایجاد توازن میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تأکید دارد؛ به‌گونه‌ای که نیازهای فعلی تأمین شود، بدون آنکه توان نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خود به خطر افتد. در محیط صنعتی، بعد اقتصادی با بهره‌وری و تداوم تولید، بعد زیست‌محیطی با کاهش مصرف منابع و آلاینده‌ها، و بعد اجتماعی با ایمنی و سلامت کارکنان مرتبط است (Ruggerio, 2021).

نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه با اتکا به پایش وضعیت تجهیزات، حسگرها و تحلیل داده‌های عملیاتی، زمان مناسب مداخله و تعمیر را پیش‌بینی می‌کند. این رویکرد در مقایسه با سیاست‌های واکنشی و زمان‌محور، خرابی‌های ناگهانی و توقفات برنامه‌ریزی‌نشده را کاهش می‌دهد، عمر مفید تجهیزات را افزایش می‌دهد و هزینه‌های نگهداری را بهینه می‌سازد (Pech et al., 2021). تلفیق این قابلیت‌ها با اهداف پایداری، مفهوم «نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار (SPM)^۱» را شکل می‌دهد. SPM افزون بر ارتقای عملکرد و قابلیت اطمینان تجهیزات، با کاهش مصرف انرژی، ضایعات، مخاطرات ایمنی و آثار زیست‌محیطی، از اهداف پایداری در سازمان‌های صنعتی پشتیبانی می‌کند (Karuppiyah et al., 2021).

صنعت پتروشیمی به‌دلیل سرمایه‌بر بودن، پیوستگی فرایندهای تولید، حساسیت تجهیزات و مخاطرات ایمنی و زیست‌محیطی، زمینه‌ای مهم برای استقرار SPM است. خرابی تجهیزات مانده پمپ‌ها، کمپرسورها، توربین‌ها و

مبدل‌های حرارتی می‌تواند پیامدهای اقتصادی، عملیاتی، ایمنی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی داشته باشد. همچنین، هزینه‌های نگهداری سهم معناداری از هزینه‌های تولید در این صنعت دارند؛ آقایی و همکاران در گزارشی اعلام کردند که این هزینه‌ها می‌تواند حدود ۱۵ تا ۱۷ درصد هزینه تولید را دربر گیرد؛ بنابراین، استقرار رویکردهای پیش‌بینانه و پایدار می‌تواند توقفات غیرمنتظره را کاهش دهد و پایداری عملیاتی مجتمع‌های پتروشیمی را تقویت کند (Aghaee et al., 2020).

با وجود این مزایا، استقرار SPM با موانع سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناورانه و مالی روبه‌رو است (Karuppiyah et al., 2021). این عوامل متقابلاً یکدیگر را تشدید می‌کنند؛ از این‌رو، شناسایی صرف آن‌ها برای تدوین مداخلات مدیریتی کافی نیست و روابط اثرگذاری و تأثیرپذیری میان آن‌ها نیز باید تحلیل شود. همچنین، مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی به شناسایی یا اولویت‌بندی موانع نگهداشت ۴۰٪، نگهداری پیش‌بینانه و مدیریت نگهداری پایدار پرداخته‌اند (Olugu et al., 2024؛ Naik & Kirkire, 2024).

(Turan & Çaloğlu Büyükselçuk, 2025). با وجود ارزش این مطالعات، بیشتر آن‌ها بر رتبه‌بندی عوامل متمرکز بوده‌اند و روابط علی-معلولی و نقش عوامل ریشه‌ای در شبکه موانع را به‌طور محدود بررسی کرده‌اند. افزون بر این، تعداد اندکی از پژوهش‌ها موانع SPM را با در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناورانه و مالی در بستر صنعت پتروشیمی تحلیل کرده‌اند. چند بعدی بودن، ابهام و وابستگی موانع SPM نشان می‌دهد که روش‌های رتبه‌بندی برای تبیین مسئله کافی نیستند. شناسایی و اعتبارسنجی موانع به قضاوت‌های خبرگان وابسته است که با ابهام و عدم قطعیت همراه‌اند. روش دلفی فازی با تبدیل ارزیابی‌های زبانی به اعداد فازی، مدیریت ابهام، سنجش اجماع و پالایش عوامل استخراج‌شده از ادبیات را امکان‌پذیر می‌سازد (Ebrahimi & Bridgelall, 2021). این منطق با رویکردهای تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای هم‌راستا است که در آن‌ها ابتدا عوامل اولیه با تکیه بر مرور ادبیات و نظر خبرگان پالایش می‌شوند و سپس برای تحلیل بیشتر به کار می‌روند (Shafaei et al., 2025). روش دیمتل نیز برای تحلیل روابط مستقیم و غیرمستقیم، تفکیک عوامل علی و

^۱ Sustainable Predictive Maintenance (SPM)

مدیریت ارشد، فقدان سیستم‌های استاندارد تجزیه و تحلیل عملکرد، عدم هماهنگی فناوری‌ها، نبود آگاهی از اهمیت نگهداری پایدار در میان ذی‌نفعان و بی‌میلی سازمان به تغییر، از موانع ریشه‌ای در پیاده‌سازی این رویکرد محسوب می‌شود (Karuppiyah et al., 2021). گرجی و جمالی به ارائه الگویی جهت انتخاب بهینه سیاست نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن معیارهای متعدد و نامطمئن پرداختند. در این روش، برای وزن‌دهی معیارها از DEMATEL فازی استفاده شد. سپس گزینه‌های سیاست نگهداری با تحلیل گروهی خاکستری مبتنی بر اعداد فازی بازه‌ای رتبه‌بندی گردیدند. مطابق با نتایج نت مبتنی بر قابلیت اطمینان به‌عنوان بهترین گزینه تعیین شد (Gorji & Jamali, 2022).

در حوزه تولید پایدار، جاسیولویکس-کاکزمارک با تمرکز بر تولید پایدار، ۱۰ عامل مرتبط با فعالیت‌های نگهداری را شناسایی و با استفاده از ISM و AHP-FTOPSIS، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد نگهداری در راستای تولید پایدار را رتبه‌بندی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اجرای راهبردهای پیشگیرانه و پیش‌آگهی، استفاده از سیستم‌های جمع‌آوری و پردازش داده و مدرن‌سازی ماشین‌آلات، از عوامل کلیدی موفقیت هستند (Jasiulewicz-Kaczmarek et al., 2021).

در سطح صنایع مختلف، کاربرد روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندشاخصه در تحلیل نگهداشت نیز مورد توجه قرار گرفته است. موکدی و همکاران پژوهشی را با هدف شناسایی و اولویت‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پایدار در صنعت قطعه‌سازی خودرو دادند. ابتدا داده‌ها به‌صورت پیمایشی از ۱۰ خبره در چهار شرکت جمع‌آوری و معیارهای پایداری با روش دلفی تأیید شدند. وزن‌دهی معیارها با روش فوکام انجام گرفت و استراتژی‌ها با مجموع روش وزنی ساده و TOPSIS رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد بعد اجتماعی اولویت نخست است و استراتژی نگهداری پیشگیرانه رتبه اول را کسب کرد (Moakedi et al., 2026). سلطانعلی و همکاران با استفاده از DEMATEL و روش بهترین-بدترین، عوامل مؤثر بر مدیریت نگهداری اثربخش در صنایع کشاورزی را شناسایی کرده و پشتیبانی مدیریت ارشد، تخصیص سرمایه و مدیریت منابع موجودی را مهم‌ترین عوامل علت معرفی کردند (Soltanali et al., 2023).

معلولی و شناسایی عوامل ریشه‌ای به کار گرفته می‌شود تا اولویت راهکارهای پیشنهادی مشخص شود (Si et al., 2018).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی، اعتبارسنجی و تحلیل روابط علی-معلولی میان موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در یک مجتمع پتروشیمی انجام شده است. موانع اولیه از طریق مرور ادبیات استخراج و با روش دلفی فازی از دیدگاه خبرگان اعتبارسنجی شدند. سپس، تحلیل دیمتل به‌صورت سلسله‌مراتبی در دو سطح انجام گرفت؛ به‌گونه‌ای که ابتدا روابط علی-معلولی میان پنج بعد اصلی موانع شامل سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناورانه و مالی بررسی شد و در ادامه، روابط میان موانع هر بعد به‌صورت جداگانه تحلیل گردید. مشارکت پژوهش حاضر شامل ارائه تصویری چندبعدی از موانع SPM، شناسایی ابعاد علی در سطح کلان، تحلیل عوامل علی و معلولی درون هر بعد و فراهم کردن مبنایی برای اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی در یک مجتمع پتروشیمی است؛ از این رو، پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به این پرسش است که پنج بعد اصلی موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار چه روابط علی-معلولی با یکدیگر دارند و در هر بعد، کدام موانع نقش علی یا معلولی ایفا می‌کنند؟

۲- پیشینه پژوهش

پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار با موانع متعددی مواجه است (Karuppiyah et al., 2021). با تأکید بر مرور ادبیات، فهرست عوامل بازدارنده در گذر از نگهداشت سنتی به نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه از منظر پایداری براساس جدول ۱ استخراج شده‌اند. همچنین، در سال‌های اخیر، هم‌زمان با گسترش رویکردهای پایداری و تحول دیجیتال، پژوهش‌های متعددی به تبیین نگهداری و تعمیرات پایدار، انتخاب سیاست‌های نگهداشت و شناسایی موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پرداخته‌اند. کاروپیا و همکاران در مطالعه‌ای متمرکز بر نگهداری پیش‌بینانه پایدار، ابتدا با تحلیل پارتو ۲۰ مانع اصلی را شناسایی کردند و سپس با بهره‌گیری از ISM و DEMATEL، ساختار روابط میان آن‌ها را تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تعهد ضعیف

جدول ۱. موانع مؤثر در پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه از منظر پایداری

Table 1. Barriers affecting the implementation of SPM

بعد	موانع	جنبه پایداری	رفرنس
موانع سازمانی	عدم تعهد مدیریت به نگهداشت سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Naik & Kirkire (2024); Turan & Çaloğlu Büyükselçuk (2025)
	عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	عدم هماهنگی بین بخش‌ها	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Turan & Çaloğlu Büyükselçuk (2025)
	مقاومت در برابر گذار به فناوری سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Naik & Kirkire (2024); Turan & Çaloğlu Büyükselçuk (2025)
	نگرانی بابت توقف عملیات برای تعمیرات	اقتصادی	Karuppiiah et al. (2021)
	کمبود امکانات آموزش کارکنان	اجتماعی	Karuppiiah et al. (2021); Naik & Kirkire (2024); Turan & Çaloğlu Büyükselçuk (2025)
	عدم آگاهی از اهمیت نگهداری	اجتماعی	Karuppiiah et al. (2021)
موانع اجتماعی	بی‌توجهی به ایمنی کارگران	اجتماعی	Karuppiiah et al. (2021); Obiso et al. (2019)
	عدم تقویت بخش نگهداری و تعمیرات	اجتماعی	Karuppiiah et al. (2021)
	ضعف گزارش‌دهی زیست‌محیطی	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
موانع زیست‌محیطی	ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Rauch et al. (2019)
	کمبود شایستگی‌های محیط‌زیستی	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Rauch et al. (2019)
	نبود سیستم اندازه‌گیری عملکرد سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	محدودیت قابلیت‌های فناوری سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021); Rauch et al. (2019)
موانع فناوریانه	کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	عدم هماهنگی در فناوری‌های سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	ترس از شکست فناوری‌های سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	ضعف نظارت بر نگهداشت سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	هزینه بالای معماری فناوری سبز	زیست‌محیطی	Karuppiiah et al. (2021)
	هزینه بالای استراتژی‌های نگهداشت سبز	اقتصادی	Ajmera & Jain (2019); Karuppiiah et al. (2021); Obiso et al. (2019)
	کمبود منابع مالی	اقتصادی	Ajmera & Jain (2019); Karuppiiah et al. (2021)
	هزینه خسارات تجهیزات	اقتصادی	Karuppiiah et al. (2021)
موانع مالی	نگرانی درباره توقف تولید	اقتصادی	Karuppiiah et al. (2021)
	هزینه بالای پیاده‌سازی SPM	اقتصادی	Karuppiiah et al. (2021); Naik & Kirkire (2024)
	بازدهی پایین سرمایه‌گذاری	اقتصادی	Karuppiiah et al. (2021); Naik & Kirkire (2024)

اهمیت را دارند. آن‌ها با انجام شش سناریوی تحلیل حساسیت، پایداری نتایج رتبه‌بندی را تأیید کردند (Turan & Çaloğlu Büyükselçuk, 2025). قاسمیان صاحبی در پژوهشی کوشیدند به شناسایی و تحلیل موانع اجرای نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر در بستر صنعت ۴۰۰ با به‌رمندی از ISM فازی و DEMATEL فازی بپردازند. نتایج نشان داد موانع رفتاری، سازمانی و فناوریانه مهم‌ترین بازدارنده‌های پیاده‌سازی نت بهره‌ور فراگیر در بستر صنعت ۴۰۰ هستند (Ghasemian Sahebi et al., 2025). در صنعت نفت و گاز، اولیوگو و همکاران با تمرکز بر مدیریت نگهداری پایدار،

در مطالعه‌ای دیگر، نایک و کرکایر موانع اصلی پیاده‌سازی نگهداشت ۴۰۰ در صنایع تولیدی را بررسی کرده و نشان دادند که «امنیت داده» مهم‌ترین مانع و «کمبود متخصصان ماهر» کم‌اثرترین مانع در اجرای این رویکرد است. آن‌ها با استفاده از روش FTOPSIS ۲۰ مانع را اولویت‌بندی کرده و نتایج خود را با تحلیل حساسیت تأیید کردند (Naik & Kirkire, 2024). همچنین، توران و چالوغلو بویوک‌سلچوک با تحلیل موانع نگهداشت ۴۰۰ در صنعت نساجی از طریق روش SWARA فازی، نشان دادند که معیارهای «سازمانی و مدیریتی» بیشترین اهمیت را دارند، درحالی‌که موانع مالی و منابع انسانی کمترین

۱۲ شاخص استراتژیک را در چهار بعد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی با روش دلفی فازی شناسایی و سپس با FTOPSIS اولویت‌بندی کردند. آن‌ها نشان دادند که اثربخشی تعمیر و نگهداری - در پیوند با قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و قابلیت نگهداری - یک شاخص محوری در موفقیت تولید پایدار است (Olugu et al., 2024).

در سالیان اخیر، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا صنعتی و تحلیل داده، قابلیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه را توسعه داده‌اند. اوکار و همکاران نقش هوش مصنوعی در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه جهت پیش‌بینی خرابی‌ها پیش از وقوع را بررسی نمودند. آن‌ها به مرور جامع آخرین دستاوردهای فنی، بررسی ادغام هوش مصنوعی در کاربردهای واقعی، تعامل انسان و ربات، چالش‌های اخلاقی و ارزیابی قابلیت اطمینان این سیستم پرداختند. نتایج پژوهش ضمن تحلیل چالش‌ها و فرصت‌های فعلی، پتانسیل بالای حوزه‌های تحقیقاتی آینده نظیر دوقلوی دیجیتال، متاورس، هوش مصنوعی مولد، ربات‌های همکار، بلاک‌چین و اینترنت اشیا صنعتی را در افزایش دقت و خودکارآمدی سیستم‌ها تأکید می‌کند (Ucar et al., 2024). راخولیا و همکاران نیز نقش تلفیق هوش مصنوعی و اینترنت اشیا را برای نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه در محیط‌های تولیدی انقلاب صنعتی چهارم تبیین کردند. آن‌ها نشان دادند به‌کارگیری مدل‌های هوشمند، با کاهش توقفات ناخواسته، افزایش طول عمر تجهیزات، بهبود قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌های نگهداری، کارایی عملیات صنعتی را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌دهد (Rakholia et al., 2025). بیتام و همکاران نیز به تبیین نقش تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی اشیا در تحقق اهداف صنعت ۵.۰، نظیر انسان‌محوری و پایداری پرداختند. آن‌ها تأکید کردند که همگرایی فناوری‌ها با اصول صنعت ۵.۰، بستری مناسب برای توسعه سیستم‌های نگهداری پیش‌بینانه مقیاس‌پذیر، خودمختار و قابل‌اعتماد فراهم آورده است (Bitam et al., 2025). اربی و همکاران با تمرکز بر استفاده از اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در نگهداری پیش‌بینانه، نشان داد که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند زمان توقف‌های غیرمنتظره را کاهش دهد، هزینه‌های نگهداری

را بهینه‌سازی کند و بهره‌وری را افزایش دهد (Er-Ratby et al., 2025). عوامل مؤثر بر پذیرش دوقلوی دیجیتال در نگهداری پیش‌بینانه را از طریق تحلیل عاملی اکتشافی بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که حمایت مدیریت ارشد، پایش سامانه، توجه به رویه‌های پایدار، مدیریت ایمنی و ریسک و نیز ملاحظات حریم خصوصی و امنیت، از عوامل مؤثر بر پذیرش دوقلوی دیجیتال در نگهداری پیش‌بینانه هستند. این یافته‌ها بر اهمیت هم‌زمان عوامل مدیریتی، فناورانه و ایمنی در توسعه زیرساخت‌های هوشمند نگهداشت تأکید می‌کند (Nagrani & Narwane, 2026). همچنین، آرز و همکاران در یک مرور نظام‌مند، ضمن تأکید بر گسترش کاربرد هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در نگهداری پیش‌بینانه، کمبود اعتبارسنجی بلندمدت در محیط‌های واقعی، محدودیت تنوع کاربردها و استفاده ناکافی از هوش مصنوعی توضیح‌پذیر را از شکاف‌های اصلی این حوزه معرفی کردند (Arez et al., 2026).

مطابق جدول ۲، مطالعات پیشین هر یک بخشی از مسئله نگهداری پایدار، نگهداشت ۴.۰، انتخاب سیاست‌های نگهداری یا کاربرد فناوری‌های هوشمند در نگهداری پیش‌بینانه را بررسی کرده‌اند. برخی پژوهش‌ها بر شناسایی عوامل موفقیت، شاخص‌های عملکردی یا موانع استقرار فناوری متمرکز بوده‌اند و برخی دیگر نیز با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به رتبه‌بندی عوامل یا انتخاب راهبرد مناسب نگهداری پرداخته‌اند. باین‌حال، در بخش قابل‌توجهی از این مطالعات، روابط علی-معلولی میان موانع و نحوه اثرگذاری متقابل آن‌ها تحلیل نشده است. افزون بر این، مطالعاتی که از روش‌های ساختاری و علی، مانند ISM و DEMATEL، استفاده کرده‌اند، عمدتاً بر TPM، نگهداشت ۴.۰، تولید پایدار یا صنایع غیرپتروشیمی تمرکز داشته‌اند. همچنین، پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال، بیشتر ظرفیت‌ها و الزامات فناورانه نگهداری پیش‌بینانه را بررسی کرده‌اند و کمتر به پیوند آن‌ها با موانع سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی و مالی پرداخته‌اند؛ در نتیجه، تحلیل هم‌زمان این موانع در بستر یک مجتمع پتروشیمی و تبیین روابط علی-معلولی میان آن‌ها، خلأ اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

جدول ۲. خلاصه تحقیقات مرور شده

Table 2. Summary of reviewed studies

مطالعه	تمرکز اصلی	روش	تمرکز بر PDM	تمرکز بر پایداری اقتصادی	تمرکز بر پایداری اجتماعی	تمرکز بر پایداری زیست محیطی	تحلیل روابط علی	صنعت
Karuppiyah et al. (2021)	شناسایی و تحلیل موانع نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار	پارتو، DEMATEL خاکستری	عمومی	✓	✓	✓	✓	✓
Jasiulewicz-Kaczmarek et al. (2021)	بررسی عوامل عملکرد نگهداشت پایدار	ISM، FAHP، FTOPSIS	تولیدی	✓	✓		✓	
Gorji & Jamali (2022)	انتخاب سیاست بهینه نگهداشت	FDemATEL، تحلیل خاکستری	عمومی	✓				
Soltanali et al. (2023)	عوامل مؤثر بر مدیریت نگهداشت اثربخش	DEMATEL، BWM	کشاورزی	✓			✓	
Naik & Kirkire (2024)	موانع استقرار نگهداشت ۴۰	FTOPSIS	تولیدی					
Olugu et al. (2024)	شاخص‌های مدیریت نگهداشت پایدار	دلفی فازی کروی، FTOPSIS	نفت و گاز		✓	✓	✓	
Ucar et al. (2024)	هوش مصنوعی در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه	مرور نظام‌اند ادبیات	عمومی					✓
Moakedi et al. (2025)	شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای نگهداری پایدار	دلفی، FUCOM، Topsis، SAW	خودروسازی		✓	✓	✓	
Turan & Çaloğlu Büyükselçuk (2025)	موانع استقرار نگهداشت ۴۰	FSWARA	نساجی			✓	✓	
Ghasemian Sahebi et al. (2025)	موانع استقرار TPM 4.0	ISM، FDEMATEL، فازی	تولیدی	✓				
Rakholia et al. (2025)	تلفیق هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه	تحلیل داده	تولیدی					✓
Bitam et al. (2025)	نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه مبتنی بر AIoT	مرور نظام‌اند ادبیات	عمومی					✓
Er-Ratby et al. (2025)	کاربرد فناوری‌های هوشمند در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه	تحلیل داده	عمومی				✓	✓

ادامه جدول ۲.

Table 2 continued.

مطالعه	تمرکز اصلی	روش	تمرکز بر PDM	تمرکز بر پایداری اقتصادی	تمرکز بر پایداری اجتماعی	تمرکز بر پایداری زیست محیطی	تحلیل روابط علی	صنعت
Nagrani & Narwane (2026)	پذیرش دوقلوی دیجیتال در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه	تحلیل عاملی اکتشافی	عمومی	✓	✓			✓
Arez et al. (2026)	هوش مصنوعی در نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه	مرور ادبیات	نظام‌مند تولیدی					✓
پژوهش حاضر	موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار	دلفی DEMATEL	پتروشیمی	✓	✓	✓	✓	✓

۳- روش‌شناسی پژوهش

بهره‌بردار، برنامه‌ریزی و نگهداری و تعمیرات انتخاب شدند (جدول ۳).

جدول ۳. اطلاعات مربوط به کمیته خبرگی

Table 3. Profile of the expert committee

ویژگی	شاخص	تعداد
جنسیت	مرد	۵
	زن	۱
سن (سال)	<۴۰	۱
	۴۱-۵۰	۲
	>۵۰	۳
تحصیلات	لیسانس	۱
	فوق لیسانس	۲
	دکتری	۳
موقعیت سازمانی	مدیر ارشد	۴
	مدیر میانی	۱
	سرپرست	۱
تجربه (سال)	≤۲۰	۱
	۲۱-۳۰	۲
	>۳۰	۳

خبرگان منتخب، علاوه بر تجربه فعالیت در مجتمع مورد مطالعه، سابقه همکاری یا تعامل حرفه‌ای با سایر مجتمع‌های پتروشیمی جنوب کشور را نیز داشتند. انتخاب آنان بر مبنای تخصص مرتبط، تجربه حرفه‌ای و

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و از حیث ماهیت در زمره تحقیقات توصیفی-پیمایشی قرار می‌گیرد. داده‌های پژوهش از طریق دو روش کتابخانه‌ای و پیمایشی، طی یک دوره چهارماهه از خرداد تا شهریور ۱۴۰۴، گردآوری شدند؛ به گونه‌ای که در مرحله نخست، با مرور ادبیات علمی، فهرست اولیه موانع مؤثر بر توسعه نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار، مطابق با جدول ۱، استخراج گردید. از آنجا که بخش عمده مطالعات پیشین، این موانع را در صنایع تولیدی بررسی کرده‌اند و مجتمع‌های پتروشیمی نیز در زمره صنایع تولیدی فرایندی قرار می‌گیرند، فهرست استخراج شده به عنوان مبنای اولیه برای بررسی موانع در مجتمع مورد مطالعه در نظر گرفته شد. سپس، در مرحله دوم، داده‌های میدانی از طریق مصاحبه و پرسشنامه گردآوری شد تا تناسب و اثرگذاری موانع اولیه با استفاده از قضاوت خبرگان صنعت پتروشیمی ارزیابی و اعتبارسنجی شود.

جامعه آماری پژوهش شامل مدیران و کارشناسان متخصص در حوزه نگهداری و تعمیرات و پایداری در صنعت پتروشیمی بود. با استفاده از روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی، ۶ نفر از خبرگان دارای سابقه کاری قابل توجه، تحصیلات مرتبط و آشنایی جامع با فرایندهای

۳-۱- گام‌های روش دلفی فازی

پیش از ارائه مراحل و چارچوب رویکرد پیشنهادی، مروری کوتاه بر مبانی نظری اعداد فازی مثلثی ضروری است. نظریه مجموعه‌های فازی در سال ۱۹۶۵ با هدف مدل‌سازی ابهام و عدم قطعیت در قضاوت‌ها و پاسخ‌های انسانی مطرح شده است. منطق فازی این قابلیت را دارد که قضاوت‌های ذهنی، زبانی و غیردقیق انسان را در قالبی ریاضی بیان کند. در این میان، اعداد فازی مثلثی از پرکاربردترین ابزارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره به شمار می‌آیند و در تحلیل مسائل پیچیده همراه با عدم قطعیت، کاربرد فراوانی دارند. اگر $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ یک عدد فازی مثلثی باشد در این صورت براساس رابطه ۱ تابع عضویت آن عبارت است (Darmian et al., 2023):

$$u_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & a_3 < x \end{cases} \quad (1)$$

به‌طوری‌که $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq 1$ و a_3 به ترتیب بیانگر کمینه و بیشینه مقدار، و a_2 محتمل‌ترین مقدار است. اگر $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ و $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ دو عدد فازی مثلثی باشند در این صورت اعمال جبری بر روی آن‌ها به شرح روابط ۲ الی ۵ عبارت است (Darmian et al., 2023).

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (2)$$

$$\tilde{A} \times \tilde{B} = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3) \quad (3)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1) \quad (4)$$

$$\tilde{A} / \tilde{B} = (a_1 / b_3, a_2 / b_2, a_3 / b_1) \quad (5)$$

روش دلفی فازی به‌طور گسترده به‌منظور دستیابی به اجماع میان خبرگان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dehghani Filabadi et al., 2026; Mousavi Ramezanzadeh & Nazari, 2025). اجرای روش دلفی فازی به شرح زیر است (Ebrahimi & Bridgelall, 2021):

گام ۱. جمع‌آوری داده‌ها از کارشناسان: در این گام، از اعضای کمیته خبرگی خواسته می‌شود تا میزان اهمیت هر یک از عوامل بازدارنده در پیاده‌سازی نگهداری و

آشنایی با الزامات عملیاتی صنعت پتروشیمی انجام شد. تحلیل دیمتل در پژوهش حاضر در دو سطح و با منطق تجزیه سلسله‌مراتبی انجام شد. در سطح نخست، پنج بعد اصلی موانع شامل سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناوریانه و مالی به‌طور هم‌زمان در یک مدل دیمتل بررسی شدند تا روابط علی-معلولی میان ابعاد اصلی مشخص شود. در سطح دوم، موانع مربوط به هر بعد در یک مدل مستقل تحلیل شدند تا عوامل علی و معلولی درون آن بعد شناسایی شوند. انتخاب این ساختار با منطق رویکردهای دیمتل برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و دارای عوامل متعدد هم‌راستا است. در این رویکردها، تجزیه مسئله به ابعاد یا زیرسیستم‌های مرتبط می‌تواند حجم قضاوت‌های زوجی خبرگان را کاهش دهد و به حفظ کیفیت ارزیابی‌ها کمک کند (Du & Li, 2021; Sun, 2022).

فرآیند کلی پژوهش، مراحل تصمیم‌گیری و خروجی هر مرحله در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. فرآیند و مدل تصمیم‌گیری پژوهش.

Figure 1. Research decision-making process and model.

- اگر $a_j \geq \gamma$ ، مانع موردنظر جهت تحلیل بیشتر در راند بعد انتخاب می‌گردد؛
 - اگر $a_j < \gamma$ ، آنگاه مانع مربوطه حذف می‌شود.
- اجماع خبرگی در روش دلفی فازی تا زمانی ادامه می‌یابد که قدر مطلق اختلاف بین عدد تجمیع دیفازی هر مانع در دو تکرار متوالی کمتر از یا مساوی ۰/۱ شود.

جدول ۴. مقیاس ارزیابی کلامی روش دلفی فازی

Table 4. Linguistic assessment scale of FDM

عبارت کلامی	معادل فازی
کاملاً موافقم	(۰/۷, ۰/۹, ۱/۰)
موافقم	(۰/۵, ۰/۷, ۰/۹)
نظری ندارم	(۰/۳, ۰/۵, ۰/۷)
مخالفم	(۰/۱, ۰/۳, ۰/۵)
کاملاً مخالفم	(۰/۰, ۰/۱, ۰/۳)

۳-۲- گام‌های روش دیمتل

تصمیم‌گیری چندمعیاره از رویکردهای کلیدی در مدیریت است که برای گزینش مناسب‌ترین گزینه از میان چندین گزینه، با لحاظ کردن مجموعه‌ای از شاخص‌ها که ممکن است با هم در تعارض باشند، به کار می‌رود. به کارگیری روش‌ها و ابزارهای گوناگون در این حوزه، تحلیل منسجم‌تر و دقیق‌تری از مسائل پیچیده و چندبعدی را امکان‌پذیر می‌کند (Taherdoost & Madanchian, 2023).

در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه‌های مختلفی از قبیل مدیریت ریسک (Khalilzadeh et al., 2021)، ارزیابی توسعه پایدار محلی (Darmian et al., 2023)، انتخاب تأمین‌کننده پایدار-تاب‌آور (Afrasiabi, Tavana, et al., 2022)، مدیریت کیفیت جامع (Mohammadpour et al., 2024)، ارزیابی عملکرد سازمانی (Afrasiabi, Chalmardi, et al., 2022)، ارزیابی مکان‌های بالقوه احداث نیروگاه‌های خورشیدی (Kannan et al., 2021) و سایر حوزه‌ها کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند (Ranjbar Zarnagh et al., 2024).

در این میان، روش دیمتل به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با تمرکز بر تحلیل روابط علی- معلولی میان معیارها، قابلیت تعیین میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آن‌ها را فراهم می‌کند. گام‌های روش دیمتل

تعمیرات پیش‌بینانه پایدار (اشاره‌شده در جدول ۱) را در پرسشنامه این روش براساس الگوی امتیازی پیشنهادشده توسط ابراهیمی و بریجلال مطابق با جدول ۴ ارائه دهند (Ebrahimi & Bridgelall, 2021).

گام ۲. ایجاد اعداد مثلثی فازی و تجمیع آن‌ها: برای محاسبه عدد فازی مثلثی هر مانع و تجمیع آن‌ها از روابط ۶ تا ۹ استفاده گردید (Ebrahimi & Bridgelall, 2021).

$$l_j = \min_i(l_{ij}) \quad (6)$$

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{ij} \quad (7)$$

$$u_j = \max_i(u_{ij}) \quad (8)$$

$$\tilde{a}_j = (l_j, m_j, u_j) \quad (9)$$

به‌طوری‌که $i = (1, 2, \dots, k)$; $j = (1, 2, \dots, n)$ و l_j, m_j و u_j به ترتیب کمترین مقدار، میانگین حساسی و بالاترین مقادیر عناصر اعداد فازی‌اند. اندیس‌های i و j نیز به ترتیب نشانگر خبرگان و موانع هستند.

گام ۳. فازی زدایی داده‌ها: در گام بعد برای هر عدد فازی $\tilde{a}_j = (l_j, m_j, u_j)$ از طریق روش مرکز ثقل فرآیند فازی زدایی مطابق رابطه ۱۰ انجام گرفت (Ebrahimi & Bridgelall, 2021).

$$a_j = \frac{l_j + m_j + u_j}{3}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (10)$$

گام ۴. غربالگری و انتخاب نهایی موانع: برای تعیین موانع واجد تأیید کافی و ورود آن‌ها به مراحل بعدی تحلیل، مقدار آستانه پذیرش (۷) مطابق با پژوهش ابراهیمی و بریجلال برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شد. (Ebrahimi & Bridgelall, 2021).

مبنای انتخاب این حد آستانه، مقیاس کلامی پنج‌درجه‌ای به‌کاررفته در پژوهش است. در این مقیاس، گزینه «موافقم» با عدد فازی مثلثی (۰/۵, ۰/۷, ۰/۹) نمایش داده می‌شود که مقدار دیفازی‌شده آن برابر با ۰/۷ است؛ ازاین‌رو، انتخاب این مقدار به این معناست که یک مانع تنها زمانی برای ورود به مرحله بعد تأیید می‌شود که ارزیابی تجمیع‌شده خبرگان درباره اثرگذاری آن، حداقل در سطح «موافقم» قرار داشته باشد. بر این اساس مقدار a_j هر مانع با γ مقایسه می‌گردد:

گام ۴. محاسبه میزان تأثیرگذاری، تأثیرپذیری، اهمیت کل و تأثیر خالص: با توجه به روابط ۱۶ الی ۱۹ میزان تأثیرگذاری (r_i)، میزان تأثیرپذیری (c_i)، اهمیت کل (M_i)، و تأثیر خالص (N_i) برای هر یک از موانع با استفاده از اطلاعات ماتریس T محاسبه می‌شوند. بر همین اساس عوامل محاسبه‌شده با تأثیر خالص بزرگ‌تر از صفر، عوامل علی و عوامل با تأثیر خالص کم‌تر از صفر، عوامل معلول هستند (Dalvi-Esfahani et al., 2019).

$$r_i = \left\{ \sum_{j=1}^n t_{ij} \right\}_{n \times 1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$c_i = \left\{ \sum_{j=1}^n t_{ji} \right\}_{1 \times n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$M_i = r_i + c_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$N_i = r_i - c_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

که در آن $\sum_{j=1}^n t_{ij}$ نشان‌دهنده مجموع سطری و $\sum_{j=1}^n t_{ji}$ نشان‌دهنده مجموع ستونی ماتریس T است.

گام ۵. ترسیم نمودار علی-معلولی: در نهایت یک نمودار در دستگاه مختصات دکارتی مطابق با $(r_i + c_i, r_i - c_i)$ ترسیم می‌شود. این نمودار فقط روابط بین عواملی را نشان می‌دهد که شرط رابطه ۲۰ را برآورده می‌کند. به‌طوری‌که θ بیانگر حد آستانه است و براساس نظرات خبرگان و یا رابطه ۲۱ تعیین می‌گردد (Si et al., 2018).

$$t_{ij} > \theta; \forall i, j \quad (20)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}}{n^2} \quad (21)$$

۴- یافته‌ها

۴-۱- نتایج روش دلفی فازی

نتایج غربال‌گری و اعتبارسنجی موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار با استفاده از روش دلفی فازی در جدول ۶ ارائه شده است. در دور نخست، ۲۵ مانع اولیه استخراج‌شده از مرور ادبیات در اختیار اعضای کمیته خبرگی قرار گرفت. بر اساس آستانه پذیرش با ۰/۷ برای امتیاز دیفازی‌شده، چهار مانع «نگرانی درباره توقف عملیات برای تعمیرات»، «عدم هماهنگی در فناوری‌های سبز»، «ترس از شکست فناوری‌های سبز» و «هزینه

به شرح زیر عبارت است از (Dalvi-Esfahani et al., 2019):

گام ۱. تشکیل ماتریس تأثیر ارتباط مستقیم گروهی: در این گام، موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در مجتمع پتروشیمی به‌عنوان عوامل سیستم در نظر گرفته شدند. سپس، خبرگان میزان تأثیر مستقیم هر مانع بر سایر موانع را با استفاده از مقیاس عددی پنج‌درجه‌ای پیشنهادشده توسط دلوی-اصفهانی و همکاران مطابق با جدول ۵ ارزیابی کردند. در این مقیاس، مقدار صفر بیانگر «بدون تأثیر» و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر تأثیر مستقیم یک مانع بر مانع دیگر است (Dalvi-Esfahani et al., 2019).

بر این اساس، ماتریس‌های تأثیر مستقیم فردی تشکیل و با تجمیع نظرات خبرگان، ماتریس تأثیر مستقیم گروهی مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌گردد (Dalvi-Esfahani et al., 2019).

$$z_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l z_{ij}^k, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & 0 & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

گام ۲. ایجاد ماتریس تأثیر ارتباط نرمال شده: پس از به دست آمدن ماتریس تأثیر مستقیم گروهی Z ، ماتریس تأثیر مستقیم نرمال‌شده $X = [x_{ij}]_{n \times n}$ را می‌توان از طریق به‌کارگیری روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه کرد. این نرمال‌سازی معمولاً با استفاده از حداکثر مجموع سطری عناصر ماتریس Z انجام می‌شود (Dalvi-Esfahani et al., 2019).

$$X = \frac{Z}{s}, \quad (13)$$

$$s = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n z_{ij}, \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \right) \quad (14)$$

گام ۳. محاسبه ماتریس تأثیر کل: با استفاده از ماتریس تأثیر مستقیم نرمال‌شده X ، ماتریس تأثیر کل $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ براساس رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود. به‌طوری‌که I بیانگر ماتریس همانی است (Dalvi-Esfahani et al., 2019).

$$T = \lim_{h \rightarrow \infty} (X + X^2 + \dots + X^h) = X(I - X)^{-1} \quad (15)$$

را براساس طیف امتیازدهی پنج درجه‌ای روش دیمتل، ارائه شده در جدول ۵، ارزیابی کنند. نظرات خبرگان در جدول ۱۳ ضمیمه شده است. در ادامه، به منظور جمعیت دیدگاه‌های خبرگان، میانگین حسابی نظرات آنان با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه گردید و نتایج حاصل در قالب ماتریس ارتباط مستقیم در جدول ۷ ارائه شده است. در گام بعد، با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴، بیشینه مقدار حاصل از مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس ارتباط مستقیم محاسبه شد که مقدار آن برابر با $2/500$ به دست آمد. سپس، معکوس این مقدار ($0/400$) در کلیه درایه‌های ماتریس ضرب شد تا ماتریس ارتباط مستقیم نرمال شده تشکیل گردد. نتایج این مرحله که بیانگر ماتریس نرمال شده ارتباط مستقیم میان ابعاد اصلی است، در جدول ۸ ارائه شده است.

در مرحله بعد، با اتکا به ماتریس نرمال شده ارتباط مستقیم و با به کارگیری رابطه ۱۵، ماتریس ارتباط کامل محاسبه شد. این ماتریس، مجموع اثرات مستقیم و غیرمستقیم میان ابعاد اصلی موانع در فرآیند پیاده سازی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه از منظر پایداری را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این محاسبات که براساس جمعیت نظرات اعضای کمیته خبرگان به دست آمده‌اند، در جدول ۹ ارائه شده است.

در ادامه، با توجه به روابط ۱۶ الی ۱۹ به ترتیب مقادیر r_i ، c_i ، $r_i + c_i$ و $r_i - c_i$ برای هر یک از موانع محاسبه شد. این نتایج در جدول ۱۰ گزارش شده است.

در پایان، نمودار علی-معلولی موانع مربوط به ابعاد اصلی، مطابق با مختصات $(r_i + c_i, r_i - c_i)$ ترسیم گردید. جهت تعیین روابط معنادار بین موانع اصلی نیز با استفاده از معادلات ۲۰ و ۲۱، مقدار حد آستانه یا θ برابر با $0/502$ به دست آمد. بر همین اساس، نمودار علی-معلولی و روابط معنادار بین موانع اصلی در شکل ۲ ترسیم شده است.

پس از تحلیل روابط میان ابعاد اصلی، محاسبات دیمتل مربوط به موانع هر بعد به صورت جداگانه اجرا شدند. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۱۱ ارائه شده است. شایان ذکر است نظرات خبرگان نیز در جداول ۱۴ الی ۱۸ ضمیمه شده است. همچنین، به منظور تبیین بصری روابط معنادار میان موانع درون هر بعد، نمودارهای علی-معلولی مربوطه در شکل‌های ۲ تا ۷ نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است

خسارت تجهیزات» به ترتیب با مقادیر فازی زدایی شده $0/6111$ ، $0/5667$ ، $0/5889$ و $0/5556$ ، حداقل آستانه لازم را کسب نکردند؛ در نتیجه، از ادامه فرایند دلفی فازی حذف شدند.

جدول ۵. مقادیر عددی شدت اثرگذاری در روش دیمتل

Table 5. Numerical values of influence intensity in DEMATEL

عبارت کلامی	مقدار عددی
تأثیر بسیار زیاد	۴
تأثیر زیاد	۳
تأثیر کم	۲
تأثیر بسیار کم	۱
عدم وجود تأثیر	۰

در نتیجه، ۲۱ مانع باقی‌مانده وارد دور دوم دلفی فازی شدند. نتایج نشان داد امتیاز دیفازی شده موانع تأیید شده در دور دوم در بازه قابل قبولی قرار دارد و همه آن‌ها حداقل آستانه پذیرش را کسب کرده‌اند. همچنین، قدر مطلق اختلاف امتیازهای دیفازی شده میان دو دور $(|a_j^2 - a_j^1|)$ برای همه موانع تأیید شده کمتر از $0/1$ به دست آمد. این نتایج بیانگر ثبات نسبی قضاوت خبرگان در دو دور متوالی است؛ از این رو، فرایند دلفی فازی در پایان دور دوم خاتمه یافت. شایان ذکر است علامت "—" در جدول ۶ نشان می‌دهد که مانع موردنظر به دلیل کسب امتیاز کمتر از $0/7$ در دور نخست، وارد دور دوم دلفی فازی نشده است.

۴-۲- نتایج دیمتل

نتایج تحلیل دیمتل در دو سطح ارائه می‌شود. در سطح نخست، روابط علی-معلولی میان پنج بعد اصلی موانع شامل سازمانی، اجتماعی، زیست محیطی، فناورانه و مالی بررسی شد. در سطح دوم، روابط علی-معلولی میان موانع مربوط به هر بعد به صورت جداگانه تحلیل گردید؛ بنابراین، نتایج سطح نخست برای تبیین روابط میان ابعاد اصلی و نتایج سطح دوم برای شناسایی عوامل علی و معلولی درون هر بعد تفسیر می‌شوند. در سطح نخست، پس از توزیع پرسشنامه میان اعضای کمیته خبرگی، از آنان خواسته شد میزان تأثیرگذاری متقابل ابعاد اصلی شامل موانع سازمانی (C_1)، موانع اجتماعی (C_2)، موانع زیست محیطی (C_3)، موانع فناورانه (C_4) و موانع مالی (C_5)

که مقادیر تأثیرگذاری، تأثیرپذیری، اهمیت کل، تأثیر خالص و رتبه‌های گزارش‌شده برای زیرموانع، فقط در چارچوب همان بعد قابل تفسیر هستند.

جدول ۶. نتایج غربال‌گری و اعتبارسنجی موانع با استفاده از دلفی فازی

Table 6. Results of barrier screening and validation using FDM

مانع	راند اول				راند دوم				$ a_j^2 - a_j^1 $
	a_j^1	u_j^1	m_j^1	l_j^1	a_j^2	u_j^2	m_j^2	l_j^2	
عدم تعهد مدیریت به نگهداشت سبز	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۰۲۲
عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز	۰/۳	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۰۰۰	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۰۶۷
عدم هماهنگی بین بخش‌ها	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۱۱
مقاومت در برابر گذار به فناوری سبز	۰/۳	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۱۱۱	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۶۷
نگرانی بابت توقف عملیات برای تعمیرات	۰/۱	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۶۱۱۱	—	—	—	—	—
کمبود امکانات آموزش کارکنان	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۰۱۱
عدم آگاهی از اهمیت نگهداری	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۰۰
بی‌توجهی به ایمنی کارگران	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۵	۰/۷۰۰	۰/۹	۰/۷۰۰۰	۰/۰۴۴
عدم تقویت بخش نگهداری و تعمیرات	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۱۱
ضعف گزارش‌دهی زیست‌محیطی	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۰۱۱
ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۵	۰/۷۰۰	۰/۹	۰/۷۰۰۰	۰/۰۴۴
کمبود شایستگی‌های محیط‌زیستی	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۰۱۱
نبود سیستم اندازه‌گیری عملکرد سبز	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۰۲۲
محدودیت قابلیت‌های فناوری سبز	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۰۲۲
کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۰۳۳
عدم هماهنگی در فناوری‌های سبز	۰/۱	۰/۶۰۰	۱/۰	۰/۵۶۶۷	—	—	—	—	—
ترس از شکست فناوری‌های سبز	۰/۱	۰/۶۶۷	۱/۰	۰/۵۸۸۹	—	—	—	—	—
ضعف نظارت بر نگهداشت سبز	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۱۱
هزینه بالای معماری فناوری سبز	۰/۳	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۱۱۱	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۶۷
هزینه بالای استراتژی‌های نگهداشت سبز	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۰۲۲
کمبود منابع مالی	۰/۵	۰/۷۶۷	۱/۰	۰/۷۵۵۶	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۰۲۲
هزینه خسارات تجهیزات	۰/۱	۰/۵۶۷	۱/۰	۰/۵۵۵۶	—	—	—	—	—
نگرانی درباره توقف تولید	۰/۵	۰/۸۳۳	۱/۰	۰/۷۷۷۸	۰/۵	۰/۷۳۳	۱/۰	۰/۷۴۴۴	۰/۰۳۳
هزینه بالای پیاده‌سازی SPM	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۸۶۷	۱/۰	۰/۷۸۸۹	۰/۰۲۲
بازدهی پایین سرمایه‌گذاری	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۵	۰/۸۰۰	۱/۰	۰/۷۶۶۷	۰/۰۰۰

جدول ۷. ماتریس ارتباط مستقیم ابعاد اصلی

Table 7. Direct relation matrix of main dimensions

ابعاد اصلی	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	۰/۵۰۰	۰/۳۳۳	۰/۵۰۰	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷
C ₂	۰/۱۶۷	۰/۰۰۰	۰/۱۶۷	۱/۱۶۷	۰/۱۶۷
C ₃	۰/۱۶۷	۰/۳۳۳	۰/۰۰۰	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷
C ₄	۱/۱۶۷	۰/۳۳۳	۰/۶۶۷	۰/۰۰۰	۰/۱۶۷
C ₅	۰/۰۰۰	۰/۱۶۷	۱/۰۰۰	۰/۱۶۷	۰/۰۰۰

جدول ۸. ماتریس ارتباط مستقیم نرمال ابعاد اصلی

Table 8. Normalized direct-relation matrix of main dimensions

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	ابعاد اصلی
۰/۰۰۰	۰/۱۳۳	۰/۲۰۰	۰/۰۶۷	۰/۲۰۰	C ₁
۰/۳۳۳	۰/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۴۶۷	۰/۰۶۷	C ₂
۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۰۶۷	C ₃
۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۲۶۷	۰/۰۰۰	۰/۴۶۷	C ₄
۰/۲۶۷	۰/۰۶۷	۰/۴۰۰	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰	C ₅

جدول ۹. ماتریس ارتباط کامل ابعاد اصلی

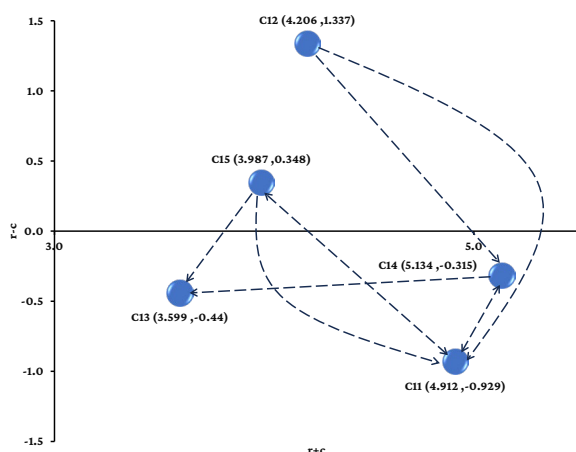
Table 9. Total relation matrix of main dimensions

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	ابعاد اصلی
۰/۳۵۵	۰/۳۳۰	۰/۵۶۸	۰/۳۱۴	۰/۴۷۷	C ₁
۰/۸۳۵	۰/۳۵۹	۰/۷۳۵	۰/۷۸۳	۰/۶۷۲	C ₂
۰/۳۷۸	۰/۲۷۶	۰/۲۸۴	۰/۲۶۰	۰/۳۰۱	C ₃
۰/۶۷۹	۰/۴۴۸	۰/۸۷۶	۰/۳۷۰	۰/۸۶۳	C ₄
۰/۶۱۳	۰/۳۱۹	۰/۷۷۲	۰/۳۳۱	۰/۳۵۰	C ₅

جدول ۱۰. تأثیر گذاری، تأثیر پذیری، اهمیت کل و تأثیر خالص ابعاد اصلی

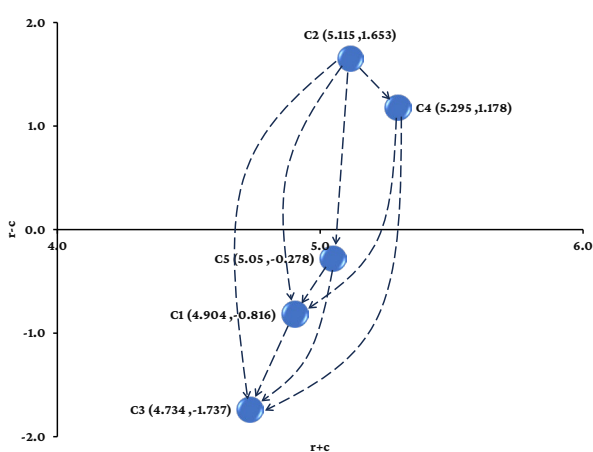
Table 10. Influence, influenced degree, total importance, and net effect of main dimensions

r	c	r + c	r - c	r - c	ابعاد اصلی
۲/۰۴۴	۲/۸۶۰	۴/۹۰۴	-۰/۸۱۶	-۰/۸۱۶	C ₁
۳/۳۸۴	۱/۷۳۱	۵/۱۱۵	۱/۶۵۳	۱/۶۵۳	C ₂
۱/۴۹۹	۳/۲۳۵	۴/۷۳۴	-۱/۷۳۷	-۱/۷۳۷	C ₃
۳/۲۳۷	۲/۰۵۹	۵/۲۹۵	۱/۱۷۸	۱/۱۷۸	C ₄
۲/۳۸۶	۲/۶۶۴	۵/۰۵۰	-۰/۲۷۸	-۰/۲۷۸	C ₅



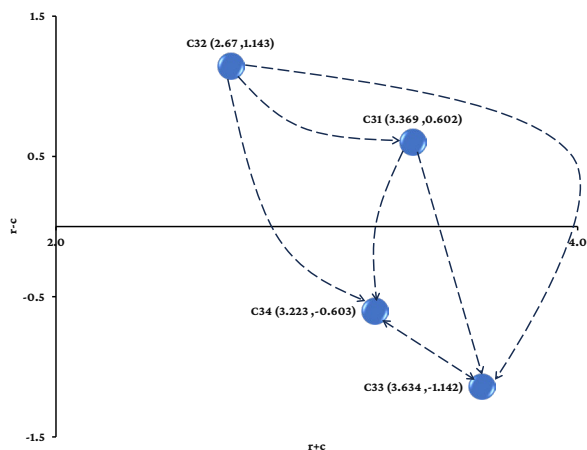
شکل ۳. نمودار علی-معلولی موانع بعد سازمانی.

Figure 3. Cause-effect diagram of organizational barriers.

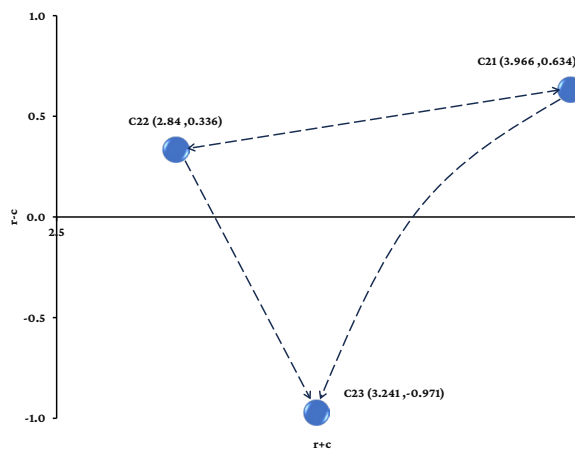


شکل ۲. نمودار علی-معلولی ابعاد اصلی.

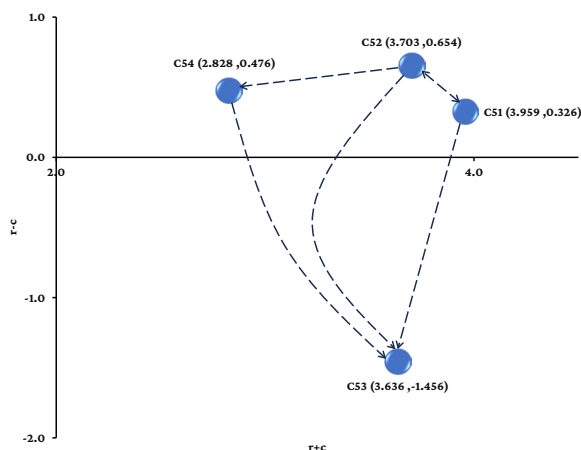
Figure 2. Cause-effect diagram of main dimensions.



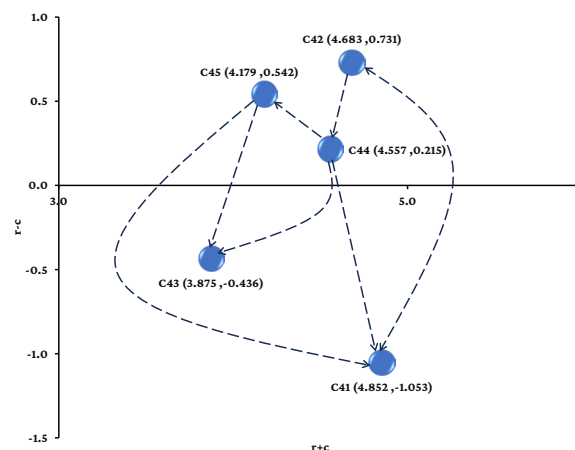
شکل ۵. نمودار علی-معلولی موانع بعد زیست محیطی.
Figure 5. Cause-effect Diagram of environmental barriers.



شکل ۴. نمودار علی-معلولی موانع بعد اجتماعی.
Figure 4. Cause-effect diagram of social barriers.



شکل ۷. نمودار علی-معلولی موانع بعد مالی.
Figure 7. Cause-effect diagram of financial barriers.



شکل ۶. نمودار علی-معلولی موانع بعد فناورانه.
Figure 6. Cause-effect diagram of technological barriers.

جدول ۱۱. تأثیر گذاری، تأثیر پذیری، اهمیت کل و تأثیر خالص موانع هر بعد

Table 11. Influence, influenced degree, total importance, and net effect of barriers in each dimension

ابعاد	موانع	علائم	r	c	r+c	رتبه	r-c	گروه
موانع سازمانی	عدم تعهد مدیریت به نگهداشت سبز	C11	۱/۹۹۱	۲/۹۲۰	۴/۹۱۲	۲	-۰/۹۲۹	معلول
	عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز	C12	۲/۷۷۱	۱/۴۳۵	۴/۲۰۶	۳	۱/۳۳۷	علت
	عدم هماهنگی بین بخش‌ها	C13	۱/۵۷۹	۲/۰۲۰	۳/۵۹۹	۵	-۰/۴۴۰	معلول
	مقاومت در برابر گذار به فناوری سبز	C14	۲/۴۱۰	۲/۷۲۵	۵/۱۳۴	۱	-۰/۳۱۵	معلول
	کمبود امکانات آموزش کارکنان	C15	۲/۱۶۷	۱/۸۲۰	۳/۹۸۷	۴	۰/۳۴۸	علت
موانع اجتماعی	عدم آگاهی از اهمیت نگهداری	C21	۲/۳۰۰	۱/۶۶۶	۳/۹۶۶	۱	۰/۶۳۴	علت
	بی‌توجهی به ایمنی کارگران	C22	۱/۵۸۸	۱/۲۵۲	۲/۸۴۰	۳	۰/۳۳۶	علت
	عدم تقویت بخش نگهداری و تعمیرات	C23	۱/۱۳۵	۲/۱۰۶	۳/۲۴۱	۲	-۰/۹۷۱	معلول
موانع زیست محیطی	ضعف گزارش دهی زیست محیطی	C31	۱/۹۸۵	۱/۳۸۳	۳/۳۶۹	۲	۰/۶۰۲	علت
	ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز	C32	۱/۹۰۷	۰/۷۶۳	۲/۶۷۰	۴	۱/۱۴۳	علت
	کمبود شایستگی‌های محیط‌زیستی	C33	۱/۲۴۶	۲/۳۸۸	۳/۶۳۴	۱	-۱/۱۴۲	معلول
	نبود سیستم اندازه‌گیری عملکرد سبز	C34	۱/۳۱۰	۱/۹۱۳	۳/۲۲۳	۳	-۰/۶۰۳	معلول

ادامه جدول ۱۱.

Table 11 continued.

ابعاد	موانع	علائم	r	c	r+c	رتبه	r-c	گروه
موانع فناورانه	محدودیت قابلیت‌های فناوری سبز	C ₄₁	۱/۹۰۰	۲/۹۵۲	۴/۸۵۲	۱	-۱/۰۵۳	معلول
	کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز	C ₄₂	۲/۷۰۷	۱/۹۷۶	۴/۶۸۳	۲	۰/۷۳۱	علت
	ضعف نظارت بر نگهداشت سبز	C ₄₃	۱/۷۲۰	۲/۱۵۵	۳/۸۷۵	۵	-۰/۴۳۶	معلول
	هزینه بالای معماری فناوری سبز	C ₄₄	۲/۳۸۶	۲/۱۷۱	۴/۵۵۷	۳	۰/۲۱۵	علت
	هزینه بالای استراتژی‌های نگهداشت سبز	C ₄₅	۲/۳۶۱	۱/۸۱۸	۴/۱۷۹	۴	۰/۵۴۲	علت
موانع مالی	کمبود منابع مالی	C ₅₁	۲/۱۴۳	۱/۸۱۷	۳/۹۵۹	۱	۰/۳۲۶	علت
	نگرانی درباره توقف تولید	C ₅₂	۲/۱۷۹	۱/۵۲۴	۳/۷۰۳	۲	۰/۶۵۴	علت
	هزینه بالای پیاده‌سازی SPM	C ₅₃	۱/۰۹۰	۲/۵۴۶	۳/۶۳۶	۳	-۱/۴۵۶	معلول
	بازدهی پایین سرمایه‌گذاری	C ₅₄	۱/۶۵۲	۱/۱۷۶	۲/۸۲۸	۴	۰/۴۷۶	علت

۵/۱۱۵، موانع مالی با مقدار ۵/۰۵۰ و موانع سازمانی با مقدار ۴/۹۰۴ قرار گرفتند. موانع زیست‌محیطی نیز با مقدار ۴/۷۳۴، کمترین اهمیت کل را در میان ابعاد اصلی داشتند.

ج) تحلیل موانع در هر بعد

• (۱) بعد موانع سازمانی

نتایج جدول ۱۱ و شکل ۳ نشان داد که دو مانع «عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز (C₁₂)» و «کمبود امکانات آموزش کارکنان (C₁₅)» به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص ۱/۳۳۷ و ۰/۳۴۸، در گروه عوامل علی قرار دارند. در مقابل، موانع «مقاومت در برابر گذار به فناوری سبز (C₁₄)»، «عدم هماهنگی بین بخش‌ها (C₁₃)» و «عدم تعهد مدیریت به نگهداشت سبز (C₁₁)» به ترتیب با مقادیر ۰/۳۱۵، -۰/۴۴۰ و -۰/۹۲۹ در گروه عوامل معلولی طبقه‌بندی شدند. از منظر اهمیت کل، مانع C₁₄ با مقدار ۵/۱۳۴ در رتبه نخست قرار گرفت. پس از آن، موانع C₁₁، C₁₂ و C₁₅ به ترتیب با مقادیر ۴/۹۱۲، ۴/۲۰۶، ۳/۹۸۷ و ۳/۵۹۹ قرار گرفتند.

• (۲) بعد موانع اجتماعی

در بعد «موانع اجتماعی» (جدول ۱۱ و شکل ۴)، «عدم آگاهی از اهمیت نگهداری (C₂₁)» و «بی‌توجهی به ایمنی کارگران (C₂₂)» به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص ۰/۶۳۴ و ۰/۳۳۶، در گروه عوامل علی شناسایی شدند. مانع «عدم تقویت بخش نگهداری و تعمیرات (C₂₃)» نیز با مقدار ۰/۹۷۱ در گروه عوامل معلولی قرار گرفت. از منظر اهمیت کل، مانع C₂₁ با مقدار ۳/۹۶۶ در رتبه نخست قرار

در ادامه تحلیل نتایج حاصل از روش دیمتل و بررسی روابط علی-معلولی میان موانع پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار، به شرح زیر ارائه می‌شود.

الف) تحلیل ابعاد اصلی براساس شاخص تأثیر خالص یا درجه علیت

• (۱) ابعاد علی (تأثیرگذار)

براساس مقادیر شاخص تأثیر خالص (یا r-c)، ابعادی که دارای مقدار مثبت هستند در گروه ابعاد علی یا تأثیرگذار و ابعادی که دارای مقدار منفی هستند در گروه ابعاد معلولی یا تأثیرپذیر قرار می‌گیرند. نتایج جدول ۱۰ و شکل ۲ نشان می‌دهد که دو بعد «موانع فناورانه (C₄)» و «موانع اجتماعی (C₂)» در گروه ابعاد علی قرار دارند. مقدار شاخص تأثیر خالص این ابعاد به ترتیب برابر با ۱/۱۷۸ و ۱/۶۵۳ به دست آمده است. در مقابل، سه بعد «موانع سازمانی (C₁)»، «موانع زیست‌محیطی (C₃)» و «موانع مالی (C₅)» دارای مقدار منفی شاخص تأثیر خالص بودند و در گروه ابعاد معلولی قرار گرفتند. مقادیر شاخص تأثیر خالص این ابعاد به ترتیب برابر با ۰/۸۱۶، -۱/۷۳۷ و -۰/۲۷۸ بود. در میان ابعاد معلولی، موانع زیست‌محیطی بیشترین مقدار منفی را به خود اختصاص دادند.

ب) تحلیل ابعاد اصلی براساس شاخص اهمیت کل یا درجه مرکزیت

شاخص اهمیت کل (یا r+c) میزان تعامل هر بعد با سایر ابعاد را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۱۰ و شکل ۲، بعد «موانع فناورانه» با مقدار ۵/۲۹۵، بیشترین اهمیت کل را به خود اختصاص داد. پس از آن، موانع اجتماعی با مقدار

۴-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت به منظور بررسی پایداری نتایج دیمتل در برابر تغییر وزن خبرگان انجام شد. طراحی سناریوهای وزن‌دهی خبرگان با اقتباس از مطالعاتی انجام شد که پایداری نتایج دیمتل را از طریق تغییر وزن خبرگان بررسی کرده‌اند (Seker & Zavadskas, 2017). هدف این تحلیل، ارزیابی میزان تغییر در روابط علی-معلولی و شاخص‌های اهمیت کل (r+c) و تأثیر خالص (r-c) در سناریوهای مختلف وزن‌دهی است. بدین منظور، تحلیل حساسیت در سطح ابعاد اصلی و موانع هر بعد انجام شد. در سناریوی نخست، به همه خبرگان وزن برابر اختصاص یافت. سپس، در سه سناریوی دیگر، وزن خبرگان به ترتیب بر مبنای سابقه کاری، سطح تحصیلات و موقعیت سازمانی تغییر داده شد. در سناریوی سابقه کاری، به خبرگان دارای تجربه بیشتر؛ در سناریوی تحصیلات، به خبرگان دارای سطح تحصیلات بالاتر؛ و در سناریوی موقعیت سازمانی، به خبرگان دارای جایگاه مدیریتی بالاتر، وزن بیشتری اختصاص یافت. مجموع وزن خبرگان در همه سناریوها برابر با یک در نظر گرفته شد. سناریوهای وزن‌دهی خبرگان در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. ضرایب وزنی خبرگان در تحلیل حساسیت

Table 12. Expert weighting coefficients in sensitivity analysis

خبره/سناریو	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
E ₁	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۲	۰/۱۲
E ₂	۰/۱۶۷	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۸
E ₃	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱۸
E ₄	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۲	۰/۱۸
E ₅	۰/۱۶۷	۰/۱۵	۰/۲	۰/۱۸
E ₆	۰/۱۶۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱۶

برای هر سناریو، ماتریس روابط مستقیم گروهی به صورت وزنی تشکیل و مراحل محاسباتی دیمتل مجدداً اجرا شد. سپس، مقادیر r+c و r-c و نیز پایداری طبقه‌بندی ابعاد علی و تأثیرپذیر در سناریوهای مختلف مقایسه شد. نتایج در قالب شکل‌های ۸ الی ۱۳ گزارش شده است.

نتایج تحلیل حساسیت در چهار سناریوی {S₁, S₂, S₃, S₄} وزن‌دهی خبرگان نشان داد که ساختار علی-معلولی مدل دیمتل در سطح ابعاد اصلی و زیرموانع از پایداری مناسبی

داشت. موانع C₂₃ و C₂₂ نیز به ترتیب با مقادیر ۳/۲۴۱ و ۲/۸۴۰ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

• (۳) بعد موانع زیست‌محیطی

نتایج جدول ۱۱ و شکل ۵ نشان داد «ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز (C₃₂)» و «ضعف گزارش‌دهی زیست‌محیطی (C₃₁)» به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص ۱/۱۴۳ و ۰/۶۰۲، در گروه عوامل علی قرار دارند. در مقابل، عوامل «نبود سیستم اندازه‌گیری عملکرد سبز (C₃₄)» و «کمبود شایستگی‌های محیط‌زیستی (C₃₃)» به ترتیب با مقادیر ۰/۶۰۳- و ۱/۱۴۲- در گروه عوامل معلولی طبقه‌بندی شدند. از منظر اهمیت کل، مانع C₃₃ با مقدار ۳/۶۳۴ در رتبه نخست قرار گرفت. پس‌از آن، موانع C₃₁، C₃₄ و C₃₂ به ترتیب با مقادیر ۳/۳۶۹، ۳/۲۲۳ و ۲/۶۷۰ قرار داشتند.

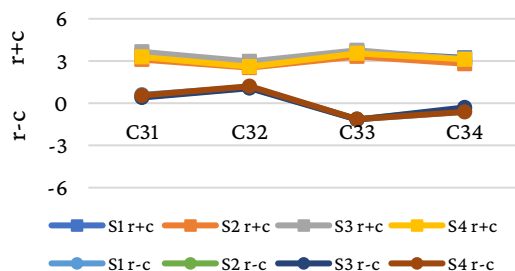
• (۴) بعد موانع فناوریانه

در بعد «موانع فناوریانه» (جدول ۱۱ و شکل ۶)، «کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز (C₄₂)»، «هزینه بالای استراتژی‌های نگهداشت سبز (C₄₅)» و «هزینه بالای معماری فناوری سبز (C₄₄)» به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص ۰/۷۳۱، ۰/۵۴۲ و ۰/۲۱۵، در گروه عوامل علی قرار گرفتند. در مقابل، «محدودیت قابلیت‌های فناوری سبز (C₄₁)» و «ضعف نظارت بر نگهداشت سبز (C₄₃)» به ترتیب با مقادیر ۱/۰۵۳- و ۰/۴۳۶- در گروه عوامل معلولی طبقه‌بندی شدند. از منظر اهمیت کل، مانع C₄₁ با مقدار ۴/۸۵۲ در رتبه نخست قرار گرفته و مهم‌ترین مانع این بخش شناخته می‌شود. پس‌از آن، موانع C₄₄، C₄₂ و C₄₅ و C₄₃ با مقادیر ۴/۶۸۳، ۴/۵۵۷، ۴/۱۷۹ و ۳/۸۷۵ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

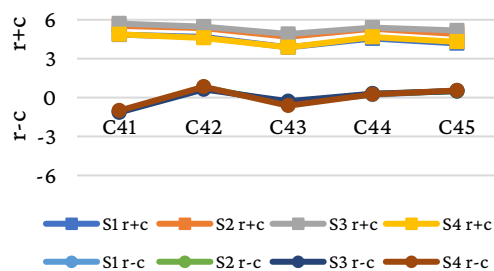
• (۵) بعد موانع مالی

در بعد «موانع مالی» (جدول ۱۱ و شکل ۷)، «نگرانی درباره توقف تولید (C₅₂)»، «بازدهی پایین سرمایه‌گذاری (C₅₄)» و «کمبود منابع مالی (C₅₁)» به ترتیب با مقادیر تأثیر خالص ۰/۶۵۴، ۰/۴۷۶ و ۰/۳۲۶، در گروه عوامل علی قرار گرفتند. مانع «هزینه بالای پیاده‌سازی SPM (C₅₃)» نیز با مقدار ۱/۴۵۶- در گروه عوامل معلولی قرار گرفت. بر اساس شاخص اهمیت کل، موانع C₅₁، C₅₂ و C₅₃ و C₅₄ به ترتیب با مقادیر ۳/۹۵۹، ۳/۷۰۳، ۳/۶۳۶ و ۲/۸۲۸ در رتبه‌های اول تا چهارم جای گرفتند.

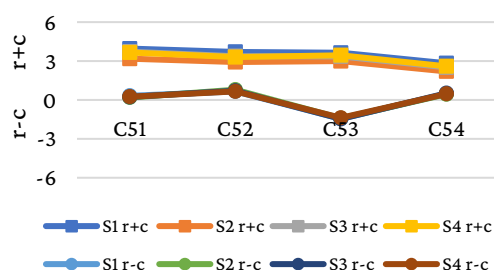
سناریوی S_4 تغییر کرد؛ و در بعد مالی (شکل ۱۳)، C_{52} و C_{53} در سناریوهای S_2 و S_4 نسبت به سناریوهای S_1 و S_3 جابه‌جا شدند. این تغییرات محدود، هیچ تغییری در نقش علی یا تأثیرپذیر عوامل ایجاد نکرد.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت موانع بعد زیست‌محیطی.
Figure 11. Sensitivity analysis of environmental barriers.

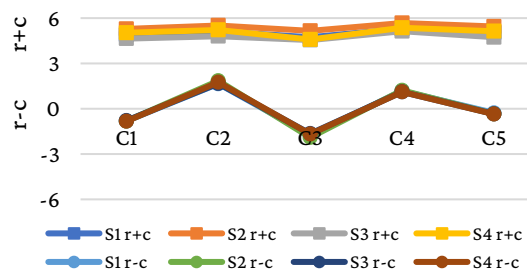


شکل ۱۲. تحلیل حساسیت موانع بعد فناورانه.
Figure 12. Sensitivity analysis of technological barriers.



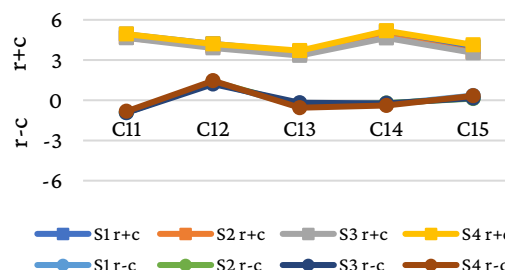
شکل ۱۳. تحلیل حساسیت موانع بعد مالی.
Figure 13. Sensitivity analysis of financial barriers.
به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج، رتبه عوامل در سناریوهای S_2 تا S_4 با سناریوی مبنا (S_1) مقایسه شد. از مجموع ۷۸ مقایسه رتبه‌ای مربوط به ۲۶ عامل، ۷۰ مورد (۸۹/۷۴ درصد) بدون تغییر باقی ماند و تنها ۸ مورد (۱۰/۲۶ درصد) جابه‌جایی محدود رتبه را نشان داد. افزون بر این، علامت شاخص تأثیر خالص $r-c$ برای هیچ‌یک از ابعاد و زیرموانع تغییر نکرد؛ از این‌رو، پایداری طبقه‌بندی علی-

برخوردار است. با وجود تغییر ضرایب وزن خبرگان در سناریوهای مختلف، در سطح ابعاد اصلی، ترتیب اهمیت براساس شاخص $r+c$ ثابت باقی ماند؛ همچنین، علامت شاخص $r-c$ برای هیچ‌یک از ابعاد اصلی تغییر نکرد. به‌گونه‌ای که موانع C_1 ، C_2 ، C_4 ، C_5 و C_3 به ترتیب رتبه‌های اول تا پنجم را حفظ کردند (شکل ۸).



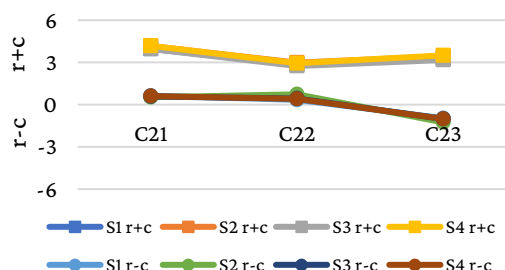
شکل ۸. تحلیل حساسیت ابعاد اصلی.

Figure 8. Sensitivity analysis of the main dimensions.



شکل ۹. تحلیل حساسیت موانع بعد سازمانی.

Figure 9. Sensitivity analysis of organizational barriers.



شکل ۱۰. تحلیل حساسیت موانع بعد اجتماعی.

Figure 10. Sensitivity analysis of social barriers.

در سطح زیرموانع نیز، تفکیک عوامل علی و تأثیرپذیر در همه سناریوها ثابت بود. تنها جابه‌جایی‌های محدودی در رتبه اهمیت کل برخی زیرموانع مشاهده شد: در بعد سازمانی (شکل ۹)، جایگاه C_{11} و C_{14} در سناریوی S_3 جابه‌جا شد؛ در بعد فناورانه (شکل ۱۲)، رتبه C_{42} و C_{44} در

معلولی در همه سناریوها ۱۰۰ درصد بود. این نتایج بیانگر استحکام نتایج مدل در برابر تغییر وزن خبرگان است.

جدول ۱۳. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به ابعاد اصلی

Table 13. Experts' judgment matrices for the main dimensions

E1	C1	C2	C3	C4	C5	E2	C1	C2	C3	C4	C5	E3	C1	C2	C3	C4	C5
C1	—	•	۱	•	•	C1	—	•	۱	•	۱	C1	—	۱	•	•	۱
C2	•	—	•	۱	•	C2	۱	—	۱	۱	•	C2	۱	—	•	۲	•
C3	۱	•	—	•	۱	C3	•	•	—	۱	•	C3	•	۱	—	•	•
C4	•	۱	۱	—	•	C4	•	•	۱	—	۲	C4	•	•	•	—	۱
C5	•	•	۲	•	—	C5	۱	•	۲	•	—	C5	۲	•	۱	•	—
E4	C1	C2	C3	C4	C5	E5	C1	C2	C3	C4	C5	E6	C1	C2	C3	C4	C5
C1	—	•	۱	•	۱	C1	—	•	•	۱	•	C1	—	۱	•	•	•
C2	۱	—	•	۱	۱	C2	۱	—	•	۱	•	C2	۱	—	•	۱	•
C3	•	•	—	•	•	C3	•	۱	—	•	•	C3	۱	•	—	•	•
C4	۱	۱	۱	—	۱	C4	۱	•	•	—	۱	C4	•	•	۱	—	۲
C5	•	•	•	۱	—	C5	۱	•	•	•	—	C5	•	۱	۱	•	—

جدول ۱۴. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به موانع بعد سازمانی

Table 14. Experts' judgment matrices for the organizational barriers

E1	C11	C12	C13	C14	C15	E2	C11	C12	C13	C14	C15	E3	C11	C12	C13	C14	C15
C11	—	۱	•	•	•	C11	—	۱	•	•	•	C11	—	•	۱	۱	•
C12	•	—	•	۲	•	C12	۱	—	•	۱	•	C12	۱	—	•	۱	•
C13	•	۱	—	•	۱	C13	•	•	—	۱	•	C13	•	•	—	۱	•
C14	۳	•	•	—	•	C14	•	•	۱	—	۱	C14	•	•	۱	—	۱
C15	•	•	۱	•	—	C15	۱	•	۱	•	—	C15	۱	•	۱	•	—
E4	C11	C12	C13	C14	C15	E5	C11	C12	C13	C14	C15	E6	C11	C12	C13	C14	C15
C11	—	•	۱	•	۱	C11	—	•	•	۲	•	C11	—	۱	•	•	•
C12	۳	—	•	۱	۱	C12	•	—	•	•	•	C12	۱	—	•	۱	•
C13	۱	•	—	•	•	C13	•	۱	—	•	۱	C13	•	•	—	•	•
C14	•	۱	•	—	۱	C14	۱	•	•	—	•	C14	•	•	۱	—	۱
C15	•	•	•	۱	—	C15	۱	•	۱	•	—	C15	۱	•	•	۲	—

جدول ۱۵. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به موانع بعد اجتماعی

Table 15. Experts' judgment matrices for the social barriers

E1	C21	C22	C23	E2	C21	C22	C23	E3	C21	C22	C23
C21	—	۱	۱	C21	—	•	۱	C21	—	•	۱
C22	۱	—	•	C22	۱	—	•	C22	۱	—	۱
C23	•	•	—	C23	•	•	—	C23	۱	•	—
E4	C21	C22	C23	E5	C21	C22	C23	E6	C21	C22	C23
C21	—	•	۲	C21	—	۲	۱	C21	—	۱	۱
C22	۱	—	۱	C22	•	—	•	C22	•	—	•
C23	•	•	—	C23	۲	•	—	C23	•	۱	—

جدول ۱۶. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به موانع بعد زیست محیطی

Table 16. Experts' judgment matrices for the environmental barriers

E ₁	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	E ₂	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	E ₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄
C ₃₁	—	۱	۱	•	C ₃₁	—	•	۱	۱	C ₃₁	—	•	۱	۲
C ₃₂	•	—	•	۱	C ₃₂	۱	—	•	•	C ₃₂	۱	—	۲	•
C ₃₃	۱	•	—	•	C ₃₃	•	•	—	۱	C ₃₃	•	•	—	۱
C ₃₄	•	۱	۱	—	C ₃₄	۱	•	۱	—	C ₃₄	•	•	۱	—
E ₄	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	E ₅	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	E ₆	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄
C ₃₁	—	•	۱	•	C ₃₁	—	۲	۱	•	C ₃₁	—	•	۱	۲
C ₃₂	۱	—	۲	۱	C ₃₂	۱	—	•	۱	C ₃₂	•	—	۱	۱
C ₃₃	۱	•	—	•	C ₃₃	۲	•	—	•	C ₃₃	•	•	—	۲
C ₃₄	•	•	۱	—	C ₃₄	•	۱	۱	—	C ₃₄	•	•	۱	—

جدول ۱۷. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به موانع بعد فناوریانه

Table 17. Experts' judgment matrices for the technological barriers

E ₁	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	E ₂	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	E ₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅
C ₄₁	—	۱	•	•	•	C ₄₁	—	۲	•	•	•	C ₄₁	—	•	۱	۱	•
C ₄₂	۱	—	•	۱	•	C ₄₂	۱	—	•	۱	•	C ₄₂	۱	—	۱	۱	•
C ₄₃	•	۲	—	•	۱	C ₄₃	•	•	—	۱	•	C ₄₃	•	•	—	۱	•
C ₄₄	۱	•	•	—	•	C ₄₄	•	•	۱	—	۱	C ₄₄	•	۱	۱	—	۱
C ₄₅	•	•	۱	•	—	C ₄₅	۱	•	۱	•	—	C ₄₅	۳	•	۱	•	—
E ₄	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	E ₅	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	E ₆	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅
C ₄₁	—	•	۱	•	۱	C ₄₁	—	•	•	۱	•	C ₄₁	—	۱	•	•	•
C ₄₂	۱	—	•	۱	۱	C ₄₂	•	—	•	•	•	C ₄₂	۳	—	•	۱	•
C ₄₃	۱	•	—	•	•	C ₄₃	•	۱	—	•	۱	C ₄₃	•	•	—	•	•
C ₄₄	•	۱	•	—	۲	C ₄₄	۱	•	•	—	•	C ₄₄	•	•	۱	—	۱
C ₄₅	•	•	•	۱	—	C ₄₅	۱	•	۲	•	—	C ₄₅	۱	•	•	۱	—

جدول ۱۸. ماتریس نظرات خبرگان مربوط به موانع بعد مالی

Table 18. Experts' judgment matrices for the financial barriers

E ₁	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	E ₂	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	E ₃	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
C ₅₁	—	۱	۱	•	C ₅₁	—	۱	۱	•	C ₅₁	—	۱	۱	•
C ₅₂	۱	—	•	۱	C ₅₂	۱	—	•	۱	C ₅₂	۱	—	•	۱
C ₅₃	•	•	—	•	C ₅₃	•	•	—	•	C ₅₃	•	•	—	•
C ₅₄	•	۱	•	—	C ₅₄	•	۱	•	—	C ₅₄	•	۱	•	—
E ₄	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	E ₅	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	E ₆	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
C ₅₁	—	۱	۱	•	C ₅₁	—	۱	۱	•	C ₅₁	—	۱	۱	•
C ₅₂	۱	—	•	۱	C ₅₂	۱	—	•	۱	C ₅₂	۱	—	•	۱
C ₅₃	•	•	—	•	C ₅₃	•	•	—	•	C ₅₃	•	•	—	•
C ₅₄	•	۱	•	—	C ₅₄	•	۱	•	—	C ₅₄	•	۱	•	—

۴-۴- بحث و بینش‌های مدیریتی

یافته‌های پژوهش نشان داد که در سطح ابعاد اصلی، موانع اجتماعی و فناوریانه نقش علی و اثرگذار در استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار دارند. همچنین، بعد فناوریانه و بعد اجتماعی، بیشترین مرکزیت را در شبکه روابط موانع به خود اختصاص داده‌اند. این نتایج بیانگر آن است که ضعف آگاهی، نگرش و رفتارهای مرتبط با نگهداشت، در کنار کمبود قابلیت‌ها و تخصص‌های فناوریانه، می‌تواند منشأ تشدید سایر موانع در مجتمع پتروشیمی باشد. در مقابل، موانع سازمانی، زیست‌محیطی و مالی در سطح ابعاد اصلی بیشتر ماهیت تأثیرپذیر دارند؛ از این‌رو، بخشی از مشکلات این حوزه‌ها را می‌توان پیامد ضعف‌های اجتماعی و فناوریانه دانست.

در سطح درون‌بعدی نیز، نتایج مسیرهای مداخله مدیریتی را روشن‌تر می‌کند. در بعد سازمانی، «عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز» و «کمبود امکانات آموزش کارکنان» عوامل علی هستند؛ از این‌رو، تدوین یک استراتژی رسمی، تعیین مسئولیت واحدها و طراحی برنامه‌های آموزشی، می‌تواند زمینه کاهش مقاومت در برابر گذار به فناوری سبز و افزایش تعهد مدیریتی را فراهم کند. در بعد اجتماعی، «عدم آگاهی از اهمیت نگهداری» و «بی‌توجهی به ایمنی کارگران» نقش محرک دارند؛ در نتیجه، آموزش‌های هدفمند، مشارکت کارکنان در تصمیم‌گیری‌های نگهداشت، پیوند دادن اهداف نگهداری با ایمنی شغلی و اطلاع‌رسانی درباره پیامدهای توفقات ناخواسته، از اقدام‌های ضروری محسوب می‌شود.

در بعد زیست‌محیطی، «ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز» و «ضعف گزارش‌دهی زیست‌محیطی» محرک‌های اصلی‌اند. این نتیجه نشان می‌دهد که صرف استفاده از تجهیزات یا فناوری‌های جدید برای تحقق نگهداشت سبز کافی نیست و باید شاخص‌های زیست‌محیطی در نظام ارزیابی عملکرد، گزارش‌دهی و تصمیم‌گیری‌های نگهداری ادغام شوند. در بعد فناوریانه نیز «کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز»، «هزینه بالای راهبردهای نگهداشت سبز» و «هزینه بالای معماری فناوری سبز» نقش علی دارند. از این‌رو، توسعه مهارت‌های تخصصی، همکاری با شرکت‌های دانش‌بنیان، انتخاب تدریجی فناوری‌های متناسب با نیاز مجتمع و اجرای طرح‌های

آزمایشی در تجهیزات بحرانی، می‌تواند ریسک استقرار فناوری را کاهش دهد.

در بعد مالی، اگرچه این بعد در تحلیل سطح کلان بیشتر تأثیرپذیر است، اما در تحلیل درون‌بعدی، «نگرانی درباره توقف تولید»، «بازدهی پایین سرمایه‌گذاری» و «کمبود منابع مالی» به‌عنوان محرک‌های اصلی شناسایی شدند. این تفاوت ناشی از تحلیل در دو سطح متفاوت است: در سطح کلان، محدودیت‌های مالی تا حدی پیامد موانع اجتماعی و فناوریانه؛ اما در درون بعد مالی، نگرانی از اختلال تولید و ابهام در بازده سرمایه‌گذاری، سایر چالش‌های مالی را تشدید می‌کند؛ بنابراین، تهیه تحلیل هزینه-فایده، آغاز پروژه‌ها از تجهیزات دارای ریسک و ارزش عملیاتی بالاتر و اجرای مرحله‌ای طرح‌ها می‌تواند نگرانی‌های مالی را کاهش دهد.

یافته‌های پژوهش با مطالعات پیشین هم‌راستایی دارد. در بعد سازمانی، شناسایی «عدم وجود استراتژی نگهداشت سبز» به‌عنوان عامل علی، با یافته‌های کارپو و همکاران درباره موانع مدیریتی SPM و نتایج توران و چالوگلو بویوک‌سلچوک درباره موانع سازمانی-مدیریتی در نگهداشت ۴۰ سازگار است (Karuppiah et al., 2021). در بعد اجتماعی، علی‌بودن «عدم آگاهی از اهمیت نگهداری» با نتایج موکدی و همکاران هم‌خوانی دارد؛ زیرا آنان بر بعد اجتماعی و تخصص کارکنان در راهبردهای پایدار تأکید داشته‌اند. همچنین، علی‌بودن «ناآگاهی ذی‌نفعان از نگهداشت سبز» نشان می‌دهد که تحقق اهداف زیست‌محیطی به آگاهی و مشارکت ذی‌نفعان وابسته است (Moakedi et al., 2026). در بعد فناوریانه، «کمبود متخصص برای نگهداری فناوری سبز» با یافته‌های نگ و همکاران سازگار است که بر نیاز نگهداری پیش‌بینانه به مهارت‌های فنی، زیرساخت داده و سرمایه‌گذاری تأکید دارند (Nagy et al., 2026). همچنین، یافته‌های مرتبط با نقش راهبردی فناوری با نتایج قاسمیان صاحبی و همکاران هم‌پوشانی دارد. ایشان نیز در تحلیل پیاده‌سازی نت بهره‌ور فراگیر در بستر صنعت ۴۰، عوامل فناوریانه را از مهم‌ترین بازدارنده‌ها برشمردند که این موضوع در پژوهش حاضر نیز با تأکید بر موانع فناوریانه به‌عنوان یکی از ابعاد کلیدی، اشاره شده است (Ghasemian Sahebi et al., 2025). سرانجام، علی‌بودن

اثربخش‌تر نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار را در مجتمع‌های پتروشیمی فراهم سازد.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، داده‌ها در بستر یک مجتمع پتروشیمی و با مشارکت شش خبره گردآوری شده‌اند؛ بنابراین، یافته‌ها باید در چارچوب مطالعه موردی تفسیر شوند و تعمیم آن‌ها به همه مجتمع‌های پتروشیمی با احتیاط صورت گیرد. هرچند اعضای کمیته خبرگی دارای تجربه تخصصی در صنعت پتروشیمی و سابقه همکاری یا تعامل حرفه‌ای با سایر مجتمع‌های پتروشیمی جنوب کشور بودند، تفاوت در ساختار سازمانی، سطح بلوغ فناوری، شرایط عملیاتی و سیاست‌های مدیریتی شرکت‌های مختلف می‌تواند بر اهمیت و روابط میان موانع اثر بگذارد. دوم، نتایج پژوهش بر قضاوت خبرگان استوار است و ممکن است از تجربه و برداشت‌های فردی آنان تأثیر پذیرد. سوم، تحلیل دیمتل در پژوهش حاضر به صورت سلسله‌مراتبی در دو سطح انجام شد؛ به گونه‌ای که روابط میان پنج بعد اصلی به طور هم‌زمان و روابط موانع هر بعد به صورت مستقل بررسی شد و همه موانع در یک مدل یکپارچه ارزیابی نشدند. افزون بر این، پژوهش به صورت مقطعی انجام شده است و تغییرات موانع در طول زمان یا در مراحل مختلف بلوغ دیجیتال مجتمع بررسی نشده است.

پژوهش‌های آتی می‌توانند با اجرای مطالعات چندموردی در چند مجتمع پتروشیمی، مقایسه نتایج میان شرکت‌ها و مناطق عملیاتی مختلف و استفاده از پنل‌های خبرگی بزرگ‌تر و متنوع‌تر، اعتبار بیرونی و قابلیت تعمیم یافته‌ها را تقویت کنند. مشارکت متخصصان واحدهای تولید، نگهداری و تعمیرات، بازرگانی، کیفیت، ایمنی، محیط‌زیست و فناوری اطلاعات نیز می‌تواند پوشش جامع‌تری از موانع فراهم آورد. همچنین، استفاده از روش‌های مکمل، مانند ISM-MICMAC، DEMATEL، ANP، BWM، یا مدل‌سازی یکپارچه روابط همه موانع، می‌تواند شناخت دقیق‌تری از ساختار موانع ایجاد کند. بررسی نقش اینترنت اشیا، صنعتی، هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال، امنیت داده و قابلیت تفسیرپذیری مدل‌های هوشمند در کاهش موانع نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار نیز از مسیرهای مهم پژوهش‌های آینده است.

«نگرانی درباره توقف تولید» در بعد مالی با ال کیهل و همکاران هم‌سو است؛ زیرا نگهداشت ۴۰٪ با کاهش توقعات برنامه‌ریزی‌نشده، افزایش دسترس‌پذیری، کاهش مصرف انرژی و تقویت ایمنی پیوند دارد (El kihal et al., 2022). بر این اساس، ترتیب پیشنهادی اقدام‌های مدیریتی چنین است: نخست، تدوین استراتژی نگهداشت سبز و تعیین سازوکار راهبری بین‌بخشی؛ دوم، ارتقای آگاهی، مهارت و مشارکت کارکنان و ذی‌نفعان با تأکید بر ایمنی؛ سوم، توسعه تدریجی زیرساخت‌های فناوریانه و اجرای پایلوت در تجهیزات منتخب؛ و چهارم، گسترش پروژه بر مبنای تحلیل هزینه-فایده، مدیریت ریسک توقف تولید و تأمین منابع مالی. چنین رویکرد مرحله‌ای می‌تواند از تبدیل محدودیت‌های فناوریانه و اجتماعی به موانع سازمانی، زیست‌محیطی و مالی گسترده‌تر جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و پیشنهادات

پژوهش حاضر با هدف شناسایی، اعتبارسنجی و تحلیل روابط علی-معلولی موانع استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار در یک مجتمع پتروشیمی انجام شد. در مرحله دلفی فازی، از میان ۲۵ مانع اولیه استخراج‌شده از ادبیات، ۲۱ مانع با کسب حداقل سطح توافق خبرگان تأیید و وارد مرحله تحلیل دیمتل شدند. نتایج تحلیل دیمتل در سطح ابعاد اصلی نشان داد که موانع اجتماعی و فناوریانه در گروه عوامل علی قرار دارند؛ درحالی‌که موانع سازمانی، زیست‌محیطی و مالی بیشتر ماهیت تأثیرپذیر دارند. همچنین، موانع فناوریانه و اجتماعی بیشترین میزان مرکزیت و تعامل را در شبکه ابعاد اصلی نشان دادند. در سطح دوم نیز، عوامل علی و معلولی موانع مربوط به هر بعد به صورت جداگانه شناسایی شدند.

این یافته‌ها بیانگر آن است که موفقیت در استقرار نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه پایدار، صرفاً به تأمین منابع مالی یا تدوین الزامات زیست‌محیطی وابسته نیست؛ بلکه مستلزم توجه هم‌زمان به ارتقای آگاهی و مشارکت کارکنان، توسعه مهارت‌های فناوریانه، ایجاد زیرساخت‌های مناسب و تدوین راهبرد رسمی نگهداشت سبز است. از این رو، تمرکز بر عوامل علی شناسایی‌شده می‌تواند از طریق کاهش تدریجی موانع تأثیرپذیر، زمینه استقرار

- Arez, D., Navas, H. V., & Gaspar, P. (2026). The Bridge Between Artificial Intelligence and Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 16(10), 4882. <https://doi.org/10.3390/app16104882>
- Bitam, T., Yahiaoui, A., Boubiche, D. E., Martínez-Peláez, R., Toral-Cruz, H., & Velarde-Alvarado, P. (2025). Artificial intelligence of things for next-generation predictive maintenance. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(24), 7636. <https://doi.org/10.3390/s25247636>
- Dalvi-Esfahani, M., Niknafs, A., Kuss, D. J., Nilashi, M., & Afrough, S. (2019). Social media addiction: Applying the DEMATEL approach. *Telematics and Informatics*, 43, 101250. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.101250>
- Darmian, S. M., Afrasiabi, A., & Yazdani, M. (2023). Multi-criteria evaluation of agro-processing industries for sustainable local economic development in East of Iran. *Expert systems with applications*, 230, 120607. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120607>
- Dehghani Filabadi, A., Nahid Titkanlue, H., & Jamali, S. (2026). Identification and Ranking of Key Factors in Total Quality Management (TQM) Adoption Using a Hybrid Fuzzy Delphi-SWARA Approach: A Case Study of Shiraz Petrochemical Company. *System Engineering and Productivity*, 6(2), 261-282. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2071569.1394>
- Du, Y. W., & Li, X. X. (2021). Hierarchical DEMATEL method for complex systems. *Expert Systems with Applications*, 167, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113871>
- Ebrahimi, S., & Bridgelall, R. (2021). A fuzzy Delphi analytic hierarchy model to rank factors influencing public transit mode choice: A case study. *Research in transportation business & management*, 39, 100496. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100496>
- El Kihel, Y., El Kihel, A., & Bouyahrouzi, E. M. (2022). Contribution of maintenance 4.0 in sustainable development with an industrial case study. *Sustainability*, 14(17), 11090. <https://doi.org/10.3390/su141711090>
- Er-Ratby, M., Kobi, A., Sadraoui, Y., & Kadiri, M. S. (2025). The impact of predictive maintenance on the performance of industrial enterprises. *SN Computer Science*, 6(1), 73. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03599-2>
- Ghasemian Sahebi, I., Sadeghpour Firoozabad, A., Mohammadinezhad, E., & Moradi-Moghadam, M. (2026). Mapping barriers to TPM 4.0 implementation through a two-stage fuzzy approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 43(2), 475-498. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2024-0351>
- Gorji, M. A., & Jamali, M. B. (2022). Comprehensive model for evaluating maintenance and repair policies based on interval fuzzy numbers. *System*

مشارکتهای نویسندگان

مهنار زارعی: راهبری علمی پژوهش، تدوین چارچوب نظری و بررسی پیشینه تحقیق، نظارت بر روش‌شناسی (دلفی فازی و دیمتل)، تفسیر نتایج تحلیلی، بازنگری علمی و اصلاح نهایی مقاله. **مهدی کشاورزی:** مفهوم‌پردازی و طراحی مدل پژوهش، شناسایی موانع و گردآوری داده‌ها، اجرای تحلیل‌های دلفی فازی و دیمتل، نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله و ویرایش نهایی متن.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافی در انجام این پژوهش وجود نداشته و تمامی مراحل تحقیق و تحلیل نتایج به‌صورت مستقل انجام شده است.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی و سپاس خود را از مدیران، کارشناسان و خبرگان شرکت پتروشیمی مورد مطالعه به دلیل همکاری در گردآوری داده‌ها، تکمیل پرسشنامه‌ها و ارائه دیدگاه‌های تخصصی اعلام می‌دارند.

مراجع

- Afrasiabi, A., Chalmardi, M. K., & Balezentis, T. (2022). A novel hybrid evaluation framework for public organizations based on employees' performance factors. *Evaluation and program planning*, 91, 102020. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2021.102020>
- Afrasiabi, A., Tavana, M., & Di Caprio, D. (2022). An extended hybrid fuzzy multi-criteria decision model for sustainable and resilient supplier selection. *Environmental science and pollution research*, 29(25), 37291-37314. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17851-2>
- Aghaee, A., Aghaee, M., Fathi, M. R., Shoa'bin, S., & Sobhani, S. M. (2021). A novel fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach for evaluating maintenance strategies in petrochemical industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(2), 351-365. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2019-0036>
- Ajmera, P., & Jain, V. (2019). Modelling the barriers of Health 4.0—the fourth healthcare industrial revolution in India by TISM: P. Ajmera, V. Jain. *Operations Management Research*, 12(3), 129-145. <https://doi.org/10.1007/s12063-019-00143-x>

- 32(1), 269-290. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2025-0055>
- Nagy, M., Valaskova, K., & Lazaroïu, G. (2026). Digitalization-Based Predictive Maintenance Systems, Internet of Things Sensor Networks, and Machine Intelligence Algorithms for Industry 4.0/5.0 Manufacturing Processes. *Systems*, 14(3), 281. <https://doi.org/10.3390/systems14030281>
- Naik, M. L., & Kirkire, M. S. (2025). Analysis of barriers to Maintenance 4.0 in manufacturing industries. *Benchmarking: An International Journal*, 32(7), 2690-2719. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2023-0852>
- Obiso, J. J. A., Himang, C. M., Ocampo, L. A., Bongo, M. F., Caballes, S. A. A., Abellana, D. P. M., ... & Jr, R. A. (2019). Management of Industry 4.0—reviewing intrinsic and extrinsic adoption drivers and barriers. *International Journal of Technology Management*, 81(3-4), 210-257. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2019.105310>
- Olugu, E. U., Mammedov, Y. D., Young, J. C. E., & Yeap, P. S. (2024). Integrating spherical fuzzy Delphi and TOPSIS technique to identify indicators for sustainable maintenance management in the oil and gas industry. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(4), 288-302. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.003>
- Pech, M., Vrchota, J., & Bednář, J. (2021). Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory. *Sensors*, 21(4), 1470. <https://doi.org/10.3390/s21041470>
- Rakholia, R., Suárez-Cetrulo, A. L., Singh, M., & Carbajo, R. S. (2025). Integrating AI and IoT for predictive maintenance in Industry 4.0 manufacturing environments: A practical approach. *Information*, 16(9), 737. <https://doi.org/10.3390/info16090737>
- Ranjbar Zarnagh, M., Nabatchian, M., Ershadi, M. J., & Roshanzamir, S. (2024). Identifying and Prioritizing Obstacles to Implementing Lean Manufacturing in Iran's Printing Industry. *System Engineering and Productivity*, 4(3), 83-102. <https://doi.org/10.22034/sep.2024.717031>
- Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, M. (2019). Requirements and barriers for introducing smart manufacturing in small and medium-sized enterprises. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 87-94. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2931564>
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the total environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Seker, S., & Zavadskas, E. K. (2017). Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites. *Sustainability*, 9(11), 2083. <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/11/2083>
- Engineering and Productivity*, 2(1), 51-74. <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243404>
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Antosz, K., Wyczółkowski, R., Mazurkiewicz, D., Sun, B., Qian, C., & Ren, Y. (2021). Application of MICMAC, Fuzzy AHP, and Fuzzy TOPSIS for evaluation of the maintenance factors affecting sustainable manufacturing. *Energies*, 14(5), 1436. <https://doi.org/10.3390/en14051436>
- Kannan, D., Moazzeni, S., mostafayi Darmian, S., & Afrasiabi, A. (2021). A hybrid approach based on MCDM methods and Monte Carlo simulation for sustainable evaluation of potential solar sites in east of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 279, 122368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122368>
- Karuppiiah, K., Sankaranarayanan, B., & Ali, S. M. (2021). On sustainable predictive maintenance: Exploration of key barriers using an integrated approach. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1537-1553. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.023>
- Khalilzadeh, M., Ghasemi, P., Afrasiabi, A., & Shakeri, H. (2021). Hybrid fuzzy MCDM and FMEA integrating with linear programming approach for the health and safety executive risks: a case study. *Journal of modelling in management*, 16(4), 1025-1053. <https://doi.org/10.1108/jm2-12-2019-0285>
- Martinod, R. M., Bistorin, O., Castañeda, L. F., & Rezg, N. (2018). Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.019>
- Moakedi, H., Hajizadeh Ebrahimi, F., & Soltanmohammadi, M. (2026). Integrating Sustainability into Maintenance Strategy Selection: A FUCOM-based Case Study from Automotive Parts Industry. *System Engineering and Productivity*, 6(2), 205-235. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2074271.1408>
- Mohammadpour, M., Afrasiabi, A., & Yazdani, M. (2024). Identifying and prioritizing the barriers to TQM implementation in food industries using group best-worst method (a real-world case study). *International Journal of Productivity and Performance Management*, 73(10), 3335-3362. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-11-2023-0602>
- 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*, 149-167. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2065794.1352>
- Nagrani, S., & Narwane, V. S. (2026). An exploration of factors influencing the adoption of Digital Twin technology in predictive maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*,

- Shafaei, A., Heidary-Dahooie, J., Babaei, A., Çalık, A., & Tirkolaee, E. B. (2025). An integrated decision-making approach for identifying sustainable tier-1 suppliers: Fuzzy Delphi-Borda-SWARA. *Annals of Operations Research*, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06923-y>
- Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C., & Zhang, P. (2018). DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical problems in Engineering*, 2018(1), 3696457. <https://doi.org/10.1155/2018/3696457>
- Soltanali, H., Khojastehpour, M., & Kheybari, S. (2023). Evaluating the critical success factors for maintenance management in agro-industries using multi-criteria decision-making techniques. *Operations Management Research*, 16(2), 949-968. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00348-1>
- Sun, C. C. (2022). Strategic Alliance Pattern Evaluation Model for Taiwan's Machine Tool Industry: A Hierarchical DEMATEL Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 5110327. <https://doi.org/10.1155/2022/5110327>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77-87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Turan, H., & Çaloğlu Büyükselçuk, E. (2025). Evaluation of the Barriers to Maintenance 4.0 for the Textile Industry via Pythagorean Fuzzy SWARA. *Applied Sciences*, 15(13), 7093. <https://doi.org/10.3390/app15137093>
- Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). Artificial intelligence for predictive maintenance applications: key components, trustworthiness, and future trends. *Applied Sciences*, 14(2), 898. <https://doi.org/10.3390/app14020898>
- Zarei, M., & Abbasi, M. (2025). Identifying and ranking obstacles to the implementation of TQM in SMEs using GBWM (case study: Food industry). *Journal of System Management*, 43(3). <https://doi.org/10.82134/sjism.2025.1191660>
- Zarei, M., & Arsalan, M. (2026). Identifying and ranking CSFs of HSE management in construction industry using OPA (A case study). *Innovation Management and Operational Strategies*, 7(1), 133-148. <https://doi.org/10.22105/imos.2025.508897.1448>