System Engineering and Productivity/ 2026/ Vol.6/ No.3/ 263-285

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2026.2081153.1449

An Integrated Approach of FMEA, BWM-CoCoSo, and K-means for Risk Management of EPC Projects in the Petrochemical Industry

Esmaeil Alinezhad[1], Hassan Ramezani[2,*], Javad Zarei[1]

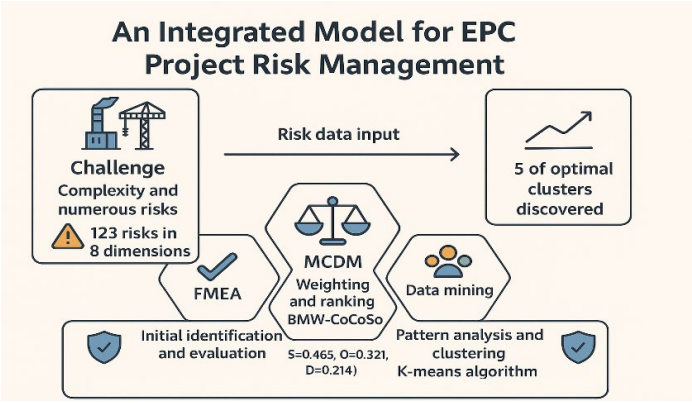
[1] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

[2] M.Sc. Student, Department of Industrial Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

HIGHLIGHTS

- A novel hybrid FMEA, BWM, CoCoSo & K-means framework for EPC risk management
- BWM-CoCoSo determines optimal features' weights and ranking of identified risks.
- K-means reveals hidden patterns of risks for integrated mitigation strategies.
- Validated with 123 real risks from a petrochemical industry case study

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 29 October 2025
Revised: 7 December 2025
Accepted: 8 December 2025
Available online: 13 December 2025
*Correspondence:
Alinezhad@Sutech.ac.ir
How to cite this article:
Alinezhad, E., Ramezani, H., & Zarei, J. (2026). An integrated approach of FMEA, BWM-CoCoSo, and K-means for risk management of EPC projects in the petrochemical industry. *System Engineering and Productivity*, 6 (3), 263-285.

Keywords:
Risk management
EPC projects
FMEA
Data mining
MCDM

ABSTRACT

Effective risk management is critically important for Engineering, Procurement, and Construction (EPC) projects in the petrochemical industry, given their complex, capital-intensive, and high-risk nature. Traditional methods like Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), despite their widespread use, suffer from limitations such as equal weighting of criteria and an inability to handle large volumes of risks efficiently. To bridge this gap, this study proposes a novel hybrid framework for the systematic identification, assessment, and prioritization of risks. The proposed model integrates the core FMEA approach with the Best-Worst Method (BWM) for determining optimal weights of Severity, Occurrence, and Detection criteria, and the Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for precise risk ranking. A key innovation is the incorporation of the K-means clustering algorithm, which uncovers hidden patterns and groups risks with similar profiles, providing managers with a holistic view for developing integrated mitigation strategies. The framework is applied to a real-world case study in Iran's petrochemical industry involving 123 identified risks across eight dimensions. Clustering results reveal five distinct risk clusters, facilitating focused attention on critical areas. Furthermore, the final CoCoSo ranking identifies the most significant risks in domains such as knowledge management from past projects, price volatility of equipment, and integrated information management. This integrated framework serves as a strategic tool, enhancing the capability of EPC project managers in optimal resource allocation and effective response planning for complex project risks.

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

1. Introduction

Risk management is a fundamental pillar for the success of complex and costly projects, especially in capital-intensive industries like petrochemicals. These projects, often executed under Engineering, Procurement, and Construction (EPC) contracts, are exposed to a wide range of inherent uncertainties and risks during the design, procurement, and construction phases (Bachari & Iranfar, 2025). The integrated nature of EPC contracts increases inherent complexity and makes coordinated risk management across all phases an undeniable necessity (Wang et al., 2025). Reports indicate that over 80% of large oil and gas projects face significant schedule delays, highlighting their high vulnerability to unrealized risks (Khademvatani et al., 2024). This performance gap underscores the urgent need for more systematic and advanced frameworks for risk identification, assessment, and prioritization.

The petrochemical industry is a prime environment for costly incidents due to complex processes and hazardous materials (Ebadzadeh et al., 2023). Failure to manage risks can lead to substantial financial losses and irreversible consequences (Bustamante Visbal et al., 2025). Therefore, shifting from traditional approaches towards preventive, quantitative, and integrated methods has become a dominant paradigm (Awodi et al., 2023). One widely used qualitative method is Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). However, despite its simplicity, this method faces serious limitations. The assignment of equal weights to the three criteria (Severity, Occurrence, Detection) and the calculation of the Risk Priority Number (RPN) through simple multiplication are significant critiques, as the relative importance of criteria can vary considerably (Celik & Gul, 2021). Moreover, traditional FMEA may yield unrealistic results in complex environments with non-linear relationships (Liu et al., 2013).

To overcome these shortcomings, research has turned towards integrating FMEA with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods (Enayati Fatollah et al., 2022). Among MCDM methods, the Best-Worst Method (BWM) has emerged as an efficient tool for determining criteria weights due to its requirement for fewer pairwise comparisons (Rezaei, 2015). Hybrid ranking methods like the Combined Compromise Solution (CoCoSo) enhance the stability and reliability of results (Yazdani et al., 2019). However, even these combined approaches can become inefficient when dealing with a large volume of risks. This is where data mining approaches, particularly clustering techniques like K-means, can play a vital complementary role by enabling managers to focus on groups of risks with similar profiles (Ghazal et al., 2021). Nevertheless, few studies have simultaneously integrated these three domains (FMEA, MCDM, and data mining) specifically for petrochemical EPC projects. To address this research gap, the present paper proposes a novel, systematic hybrid framework.

2. Methodology

In the methodology section of your paper, you should provide details of the methods used in your research. This includes an explanation of the data collection methods, tools, techniques, and statistical analyses used in the research. The goal is for the reader to be able to understand how your research was conducted and, if necessary, replicate it. In other words, the methodology section should be clear enough to allow for an assessment of the replicability and validity of the study's results.

3. Results and Discussion

Applying the Group BWM based on collective expert judgment yielded optimal weights: Severity (S) = 0.465, Occurrence (O) = 0.321, and Detection (D) = 0.214. This result negates the equal-weight assumption of classical FMEA, indicating that "Severity of effect" holds the highest importance.

The K-means clustering algorithm grouped the 123 risks into five distinct clusters. The distribution is summarized in Table 1.

Table 1. Summary of clustering results for identified risks

Cluster label	# Of risks in the cluster	# Of top 15% risks in the cluster
Cluster 0	35	0
Cluster 1	23	17
Cluster 2	25	0
Cluster 3	9	0
Cluster 4	31	1
Overall	123	18

A critical finding was that 17 out of the top 20 highest-priority risks identified by CoCoSo belonged to Cluster 1. This cluster is characterized by risks with high severity and high occurrence scores, making it a critical focal point. This demonstrates the practical utility of clustering as a powerful screening tool.

The top-ranked risks identified in cluster 1 (containing the largest number of the highest-priority risks) were: 1) Failure to document lessons from previous projects (Engineering), 2) Increase in price of materials/equipment (Procurement), 3) Lack of integrated information management by the main contractor (Construction), 4) Delays in obtaining financial facilities (Ownership/Management), and 5) Developing an inappropriate Work Breakdown Structure (Construction).

The results validate the proposed framework. The BWM output confirmed that equal weighting in FMEA is an oversimplification. The convergence of the CoCoSo ranking with the clustering output provides managers with both macro (cluster-level) and micro (individual risk-level) insights. The prominence of risks related to knowledge management and integration underscores that

managerial and organizational factors are paramount.

4. Conclusions

This study developed a comprehensive framework integrating FMEA, BWM, CoCoSo, and K-means clustering for risk management in petrochemical EPC projects. Applied to a real case study (123 risks), the model demonstrated that the equal-weight assumption in classical FMEA is invalid, with BWM-derived weights showing Severity (0.465) as the most critical criterion. The K-means algorithm effectively grouped risks into five clusters, with Cluster 1 containing the majority of top-ranked risks, proving clustering's value as a strategic focus tool. The final CoCoSo ranking highlighted critical risks primarily in organizational learning, supply chain economics, and project integration. The integrated framework overcomes key FMEA limitations, providing a systematic process from identification to intelligent grouping and prioritization. It equips managers with a powerful tool for optimal resource allocation in high-stakes EPC environments. Future research could explore diverse risk assessment criteria and investigate risk evaluation under uncertain conditions to enhance the efficacy of project risk management.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

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

References

Awodi, N. J., Liu, Y., Ayo-Imoru, R. M., & Ayodeji, A. (2023). Fuzzy TOPSIS-based risk assessment model for effective nuclear decommissioning risk management. *Progress in Nuclear Energy, 155,* 104524. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104524

Bachari, M. S., & Iranfar, M. (2025). Project risk assessment: A holistic risk identification, analysis and evaluation approach, The case of EPC projects. *Journal of Project Management, 10*(2), 283–300. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2025.2.001

Bustamante Visbal, J. P., Ortega-Toro, R., & Hernández Fernández, J. A. (2025). Application of Risk Management in Applied Engineering Projects in a Petrochemical Plant Producing Polyvinyl Chloride in Cartagena, Colombia. *ChemEngineering*, *9*(4), 75.https://doi.org/10.3390/chemengineering9040075

Celik, E., & Gul, M. (2021). Hazard identification, risk assessment and control for dam construction safety using an integrated BWM and MARCOS approach. *Automation in Construction 127,* 103699. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103699

Ebadzadeh, F., Monavari, S. M., Jozi, S. A., Robati, M., & Rahimi, R. (2023). Combining the Bow-tie model and EFMEA method for environmental risk assessment in the petrochemical industry. *International Journal of Environmental Science and Technology, 20*(2), 1357–1368. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04690-y

Enayati Fatollah, S., Dabbagh, R., & Shahsavar Jalavat, A. (2025). An extended approach using failure modes and effects analysis (FMEA) and weighting method for assessment of risk factors in the petrochemical industry. *Environment, Development & Sustainability*, *27*(9). https://doi.org/10.1007/s10668-022-02609-8

Ghazal, T., Hussain, M., Said, R., Nadeem, A., Hasan, M. K., Ahmad, M., Khan, M., & Naseem, M. (2021). Performances of K-Means Clustering Algorithm with Different Distance Metrics. *Intelligent Automation and Soft Computing, 30,* 735–742. https://doi.org/10.32604/iasc.2021.019067

Khademvatani, A., Shokouhi, M., & Naami, F. (2024). Comprehensive Risk Identification and Prioritization for Engineering, procurement, and Construction (EPC) Projects: A Case of Karoon Oil and Gas Exploitation Company. *Industrial Management Perspective*, *14*(4), 257–292. https://doi.org/10.48308/jimp.14.4.257

Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications, 40*(2), 828–838. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, *53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Wang, J., Yu, J., Gu, X., Xie, M. L., & Ma, W. B. (2025). Integrated risk response decision-making frameworks for EPC+PPP projects: A consideration of the dual status of the private sector. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 1–22. https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2024-0742

Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., & Turskis, Z. (2019). A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision, 57*(9), 2501–2519. https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۲۶۳-۲۸۵

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2026.2081153.1449

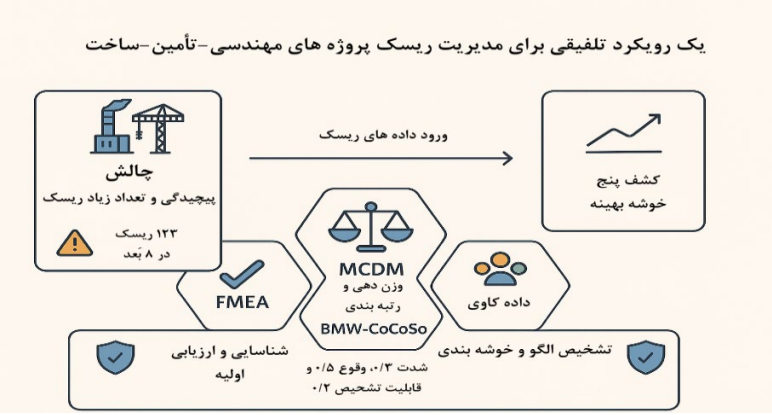
یک رویکرد تلفیقی از روش‌های FMEA، BWM-CoCoSo و K-means برای مدیریت ریسک پروژه‌های EPC در صنایع پتروشیمی

اسماعیل علی‌نژاد[۱]، حسن رمضانی[۲]،*، جواد زارعی[۱]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- یک چارچوب تلفیقی جدید از FMEA، CoCoSo-BWM و K-means برای مدیریت ریسک EPC
- CoCoSo-BWM وزن بهینه معیارها و رتبه‌بندی ریسک‌ها را تعیین می‌کند.
- K-means الگوهای پنهان ریسک‌ها برای راهبردهای یکپارچه کاهش آشکار می‌کند.
- اعتبارسنجی با ۱۲۳ ریسک واقعی از یک مطالعه موردی صنعت پتروشیمی

چکیده

مدیریت ریسک در پروژه‌های مهندسی، تدارکات و ساخت (EPC) صنایع پتروشیمی، به دلیل ماهیت پیچیده، سرمایه‌بر و پرخطر این پروژه‌ها، از اهمیت حیاتی برخوردار است. باوجود کاربرد گسترده روش‌های مرسومی مانند تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا (FMEA)، محدودیت‌هایی از قبیل وزن یکسان معیارها و ناتوانی در پردازش حجم انبوه ریسک، کارایی آن را کاهش می‌دهد. این مقاله با هدف پر کردن این شکاف، یک چارچوب ترکیبی نوین برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی سیستماتیک ریسک‌ها پیشنهاد می‌دهد. روش پیشنهادی، رویکرد FMEA را با روش بهترین-بدترین (BWM) برای تعیین وزن بهینه معیارها و با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره CoCoSo برای رتبه‌بندی دقیق ریسک‌ها تلفیق می‌کند. دیگر نوآوری اصلی این مدل، ادغام الگوریتم خوشه‌بندی K-means است که امکان کشف الگوهای پنهان و گروه‌بندی ریسک‌ها با مشخصات مشابه را فراهم می‌سازد، تمرکز بر ریسک‌های بحرانی را تسهیل می‌کند و به مدیران دید کلانی برای اتخاذ راهکارهای مدیریتی ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی واقعی در صنعت پتروشیمی ایران با ۱۲۳ ریسک شناسایی‌شده اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که رتبه‌بندی CoCoSO، مهم‌ترین ریسک‌ها را در حوزه‌هایی مانند مدیریت دانش پروژه‌های قبلی، نوسانات قیمت تجهیزات و مدیریت اطلاعات یکپارچه شناسایی کرده است. چارچوب یکپارچه پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری راهبردی، توانمندی مدیران پروژه‌های EPC پتروشیمی را در تخصیص بهینه منابع و تدوین پاسخ‌های مؤثر به ریسک‌های پیچیده افزایش دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

*نویسنده مسئول:

alinezhad@sutech.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

مدیریت ریسک

پروژه‌های مهندسی-تأمین-ساخت

تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا

داده‌کاوی

تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه

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

۱- مقدمه

مدیریت ریسک به‌عنوان یک رکن اساسی در موفقیت پروژه‌های پیچیده و پرهزینه، به‌ویژه در صنایع سرمایه‌بری مانند پتروشیمی، شناخته می‌شود (Zhao, 2024). این پروژه‌ها که اغلب در قالب قراردادهای مهندسی، تدارکات و ساخت (EPC) اجرا می‌شوند، در معرض طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های ذاتی در مراحل طراحی، تأمین و اجرا قرار دارند (Bachari & Iranfar, 2025). ماهیت یکپارچه قراردادهای EPC اگرچه مزایایی چون کاهش تعارضات و یکپارچگی منابع را به همراه دارد، اما پیچیدگی ذاتی را افزایش داده و مدیریت هماهنگ ریسک‌ها در تمامی فازها را به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل می‌کند (Wang et al., 2025). گزارش‌ها حاکی از آن است که بیش از ۸۰ درصد از پروژه‌های بزرگ نفت و گاز با هزینه‌ای فراتر از یک میلیارد دلار، با تأخیرهای زمانی قابل‌توجهی مواجه می‌شوند که این خود نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالا در برابر ریسک‌های تحقق‌نیافته است (Khademvatani et al., 2024). چنین شکاف عملکردی، لزوم به‌کارگیری چارچوب‌های نظام‌مند و پیشرفته‌تری را برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها در این پروژه‌ها پررنگ می‌سازد.

در این میان، صنعت پتروشیمی به دلیل وابستگی به فرایندهای پیچیده، مواد اولیه پرخطر و الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و ایمنی، بستری مستعد برای وقوع حوادث پرهزینه است (Ebadzadeh et al., 2023). ریسک‌ها در این صنعت می‌توانند ریشه در عوامل فنی، مدیریتی، مالی، سیاسی و زیست‌محیطی داشته باشند و شکست در مدیریت آن‌ها می‌تواند منجر به خسارات مالی کلان، تأخیرهای طولانی، آسیب به اعتبار سازمان و پیامدهای انسانی و زیست‌محیطی جبران‌ناپذیر شود (Bustamante Visbal et al., 2025)؛ بنابراین، حرکت از رویکردهای سنتی و واکنشی مدیریت ریسک به سمت روش‌های پیشگیرانه، کمی‌نگر و یکپارچه، به یک پارادایم غالب در پژوهش‌های معاصر این حوزه تبدیل شده است (Awodi et al., 2023).

یکی از پرکاربردترین روش‌های کیفی در شناسایی و ارزیابی اولیه ریسک، تجزیه‌وتحلیل حالت و اثرات شکست (FMEA) است که با تمرکز بر پیشگیری، به ارزیابی ریسک‌ها بر اساس سه معیار شدت (S)، احتمال وقوع (O) و احتمال تشخیص (D) می‌پردازد. بااین‌حال، این روش علیرغم سادگی و مقبولیت گسترده، با محدودیت‌های جدی مواجه است. انتساب وزن یکسان به معیارهای سه‌گانه و محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) از طریق ضرب ساده آن‌ها، از مهم‌ترین نقدهای وارده است، چراکه در دنیای واقعی، اهمیت نسبی این معیارها بسته به ماهیت ریسک و دیدگاه تصمیم‌گیرنده می‌تواند کاملاً متفاوت باشد (Celik & Gul, 2021). علاوه بر این، روش FMEA قادر به مدیریت ریسک‌های با RPN یکسان ولی اثرات کاملاً متفاوت نیست و در محیط‌های پیچیده با روابط ماهوی غیرخطی (که از ویژگی‌های ذاتی پروژه‌های EPC پتروشیمی است) ممکن است نتایج غیرواقع‌بینانه‌ای ارائه دهد (Liu et al., 2013).

برای فائق آمدن بر این کاستی‌ها، ادبیات پژوهشی به سمت تلفیق FMEA با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) روی آورده است (Hemmasian Etefagh, 2022). این ادغام، امکان در نظرگیری وزن‌های متفاوت و متناسب برای معیارها و نیز استفاده از منطق پیشرفته‌تر برای رتبه‌بندی را فراهم می‌آورد (Enayati Fatollah et al., 2022). در میان روش‌های MCDM، روش بهترین-بدترین (BWM) به دلیل نیاز به مقایسات زوجی کمتر، سادگی و قابلیت محاسبه نرخ ناسازگاری، به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تعیین وزن معیارها مطرح شده است (Rezaei, 2015). از سوی دیگر، روش‌های رتبه‌بندی ترکیبی مانند CoCoSo با یکپارچه‌سازی منطق چندین روش تصمیم‌گیری، پایداری و قابلیت اطمینان نتایج را افزایش می‌دهند (Yazdani et al., 2019). بااین‌حال، حتی این رویکردهای ترکیبی نیز زمانی که با حجم انبوهی از ریسک‌های شناسایی‌شده در یک پروژه EPC بزرگ مواجه می‌شویم، ممکن است ناکارآمد باشند. تحلیل تک‌تک ریسک‌ها می‌تواند بسیار زمان‌بر و پیچیده باشد و دید کلی و کلان از الگوهای حاکم بر ریسک‌ها را از مدیران سلب کند.

اینجاست که رویکردهای داده‌کاوی (Data Mining) و به‌ویژه تکنیک‌های خوشه‌بندی مانند K-means می‌توانند نقش مکملی حیاتی ایفا کنند (Gholamian, 2023). خوشه‌بندی به مدیران پروژه این امکان را می‌دهد تا به‌جای تمرکز بر ریسک‌های منفرد، بر گروه‌هایی از

ریسک‌ها با مشخصات مشابه (ازنظر S، O و D) متمرکز شوند و استراتژی‌های مدیریتی یکپارچه‌ای را برای هر خوشه طراحی کنند (Ghazal et al., 2021). این نگاه کل‌نگر، امکان تخصیص بهینه منابع محدود به حوزه‌های پرریسک‌تر را فراهم ساخته و به مدیران در درک ساختار پنهان ریسک‌های پروژه یاری می‌رساند. بااین‌وجود، مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که پژوهش‌های معدودی به تلفیق هم‌زمان این سه حوزه (FMEA، MCDM و داده‌کاوی) پرداخته‌اند. بیشتر مطالعات یا بر شناسایی و وزن‌دهی عوامل ریسک متمرکز شده‌اند، یا صرفاً به رتبه‌بندی ریسک‌ها با یک روش MCDM پرداخته‌اند، بدون آنکه از توانایی‌های تحلیلی داده‌کاوی برای کشف خوشه‌های ریسک بهره گیرند. همچنین، تمرکز بسیاری از تحقیقات بر پروژه‌های ساختمانی عمومی بوده و مطالعات نظام‌مند کمتری به مدیریت یکپارچه ریسک در تمامی فازهای پروژه‌های EPC در صنعت خاص و پرریسک پتروشیمی پرداخته‌اند (Khodayari et al., 2022؛ Avazpour et al., 2025).

برای پر کردن این شکاف پژوهشی، مقاله حاضر یک چارچوب ترکیبی نوین و نظام‌مند را پیشنهاد می‌دهد که سه روش FMEA، BWM، CoCoSo و خوشه‌بندی K-means را در یک مدل یکپارچه تلفیق می‌کند. هدف این پژوهش، ارائه رویکردی است که نه‌تنها قادر به شناسایی و وزن‌دهی دقیق معیارهای ارزیابی ریسک با در نظرگیری دیدگاه خبرگان باشد، بلکه بتواند از طریق رتبه‌بندی پیشرفته و خوشه‌بندی هوشمند، درکی جامع و عملی از ریسک‌های پروژه‌های EPC در صنعت پتروشیمی ارائه دهد و مبنایی برای تدوین استراتژی‌های مدیریت ریسک کارآمد و مقرون‌به‌صرفه فراهم آورد. انتظار می‌رود خروجی این مدل، تصمیم‌گیران و مدیران پروژه را در تخصیص منابع به بحرانی‌ترین ریسک‌ها و خوشه‌های ریسک یاری رسانده و گامی در جهت افزایش احتمال موفقیت و کنترل بهتر این پروژه‌های پیچیده و حیاتی باشد.

ساختار ادامه پژوهش به‌صورت زیر است: در بخش دوم مهم‌ترین مقالات موجود در ادبیات موضوع بررسی، خلاصه‌سازی و شکاف‌های موجود استخراج و نوآوری‌های مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش سوم جزئیات رویکرد پیشنهادی و اجزای آن به‌طور کامل تشریح می‌شود. نتایج پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی روی داده‌های واقعی یک مطالعه موردی در صنعت پتروشیمی و تحلیل یافته‌ها و ارائه راهکارهای بهبودی در بخش چهارم آورده می‌شود. درنهایت بخش پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله می‌پردازد.

۲- ادبیات موضوع

در ادامه ابتدا خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در ادبیات موضوع ارائه و سپس به بیان شکاف‌ها و نوآوری‌های این پژوهش پرداخته می‌شود.

کونها و همکاران یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه روش‌های PROMETHEE II و PROMETHEE GDSS برای اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان بحرانی در پروژه‌های EPC صنعت نفت و گاز با استفاده از عوامل ریسک شناسایی‌شده از ادبیات و نظرسنجی از خبرگان در سناریوهای بحرانی ارائه دادند (Da Cunha et al., 2022). عنایتی فتح‌الله و همکاران، یک رویکرد بسط یافته مبتنی بر روش تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا و روش وزن‌دهی صرفاً به ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای ریسک در صنعت پتروشیمی با استفاده از روش G-MOORA پرداختند (Enayati Fatollah et al., 2022). کسید-جالهوم و رئوف-محجوب با استفاده از ساختار شکست ریسک موسسه مدیریت پروژه (PMI)، به رتبه‌بندی و تحلیل علت‌های بالقوه ریسک‌های پروژه در پروژه‌های ساخت به کمک دیمتل فازی خاکستری و ترجیحات نخبگان پرداختند که ریسک‌های ساخت و طراحی در رتبه‌های بالا قرار گرفتند (Jalhoom & Mahjoob, 2024). ویسبال و همکاران یک مدل برای مدیریت فاکتورهای ریسک در صنعت پتروشیمی با استفاده از تکنیهای AHP و رگرسیون خطی ارائه و برای اعتبارسنجی آن از داده‌های واقعی در کلمبیا استفاده کردند که عوامل خطاهایی مانند خطاهای طراحی، جزئیات مهندسی و کنترل HSE مهم‌ترین فاکتورهای ریسک شناسایی شدند (Bustamante Visbal et al., 2025). چن و همکاران یک سیستم ارزیابی انتشار کربن بر اساس روش تلفیقی آنتروپی-تاپسیس و k-means برای پروژه‌های ساخت فونداسیون ارائه کردند که نتایج مطالعه نشان داد که عملیات خاک‌برداری بیشترین تأثیر را بر انتشار کربن دارد

(Chen et al., 2025). عبادزاده و همکاران با ترکیب مدل Bow-tie و روش EFMEA به ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی در فرایند تولید آمونیاک و اوره در یک مجتمع پتروشیمی پرداختند (Ebadzadeh et al., 2023). آن‌ها با شناسایی ۲۴ جنبه زیست‌محیطی و محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) نشان دادند که انتشار CO_2 از برج دفع بحرانی‌ترین ریسک است. خادم وطنی و همکاران در مطالعه‌ای به شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های EPC در شرکت بهره‌برداری نفت و گاز کارون با استفاده از ترکیب روش دلفی فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) پرداختند و نشان دادند که ریسک‌های اقتصادی مانند نرخ تورم و افزایش قیمت تجهیزات، همچنین ریسک‌های مدیریتی مانند فشار کارفرما و تأخیر پرداخت مالی، از بالاترین اولویت‌ها برخوردارند (Khademvatani et al., 2024). هو و همکاران در یک مطالعه موردی، فرایند ارزیابی ریسک مؤثری را برای پروژه‌های پیچیده EPC در حوزه تصفیه فاضلاب یا استفاده از دو معیار شدت و فرکانس و شاخص اهمیت نسبی ارائه کردند (Vo et al., 2025). این مطالعه نشان داد که ریسک‌های فاز مطالعاتی بیشترین تأثیر را بر فازهای بعدی پروژه دارند. حسین‌پور در مطالعه‌ای به ارزیابی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مواجهه شغلی با عوامل شیمیایی در صنعت پتروشیمی با استفاده از روش‌های بهترین-بدترین فازی (FBWM) و فازی تاپسیس (FTOPSIS) پرداخته و نشان داد که ترکیبات آلی فرار (VOCs) مهم‌ترین عامل خطر برای کارکنان این صنعت محسوب می‌شوند (Hosseinpour, 2024).

هه و هان در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک‌های لجستیک پروژه‌های EPC بین‌المللی با استفاده از روش ترکیبی آنتروپی-پوشش داده‌ها (Entropy-DEA) پرداختند (He & Han, 2022). این مطالعه با تعریف ۲۲ عامل ریسک در شش گروه اصلی و اعتبارسنجی مدل از طریق نظرسنجی از خبرگان صنعت نشان داد که ریسک‌های حقوقی-سیاسی، عملیاتی و مدیریتی مهم‌ترین ریسک‌ها در زنجیره تأمین این پروژه‌ها هستند. پروز و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی و اولویت‌بندی فاکتورهای ریسک حیاتی در اجرای ساخت‌وساز مدولار در پاکستان با استفاده از ترکیب روش‌های فازی دلفی (FDM) و روش کامل سازگاری (FUCOM) پرداختند (Pervez et al., 2022). این مطالعه نشان داد که کمبود مهارت و تجربه، ظرفیت ناکافی سازندگان و عدم امکان تغییر طراحی مهم‌ترین ریسک‌ها در بستر پاکستان هستند. در پژوهش سلامای یک چارچوب MCDM فازی برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه و از روش MAUT برای رتبه‌بندی فناوری‌های کاهنده ریسک استفاده شده است (Salamai, 2025).

نتایج مطالعه نشان داد که ریسک‌های اجتماعی دارای بیشترین وزن بوده و هوش مصنوعی مؤثرترین فناوری است.

وانگ و همکاران در مطالعه‌ای یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه برای پاسخ به ریسک در پروژه‌های EPC+PPP ارائه دادند که در آن، از SFUCOM، شبکه دوسطحی و DSM برای اولویت‌بندی ریسک و بهینه‌سازی پاسخ‌ها استفاده می‌کند (Wang et al., 2025). جین و همکاران در مطالعه‌ای به انتخاب بهترین برنامه تجهیزات حفاظت فردی (PPE) در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از روش‌های ANP و Fuzzy VIKOR پرداختند (Jin & Goodrum, 2024). حقانیت و همکاران در مطالعه‌ای به اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های حذف حریم شبکه توزیع برق با استفاده از رویکرد رتبه‌بندی خاکستری یا همان GOPA پرداختند و نشان دادند که تغییر اولویت پروژه‌ها، فشار برای تحویل زودهنگام و انتخاب نامناسب پیمانکار از مهم‌ترین ریسک‌ها هستند (Haghaniat et al., 2024). در یک مطالعه دیگر، باچاری و ایرانفر چارچوبی جامع برای ارزیابی ریسک پروژه‌های EPC ارائه کردند که مراحل شناسایی، تحلیل و ارزیابی ریسک را با استفاده از روش‌های دلفی، F-LBWA و F-CoCoSo پوشش می‌دهد (Bachari & Iranfar, 2025). این مطالعه نشان داد که ریسک‌های فاز ساخت بیشترین اهمیت را در پروژه‌های EPC دارند.

یو و ما در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک زنجیره تأمین پروژه‌های زیرساختی بزرگ در قراردادهای EPC با استفاده از یک روش ترکیبی شامل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (f-AHP) و روش آزمایشگاهی تصمیم‌گیری فازی (f-DEMATEL) پرداختند (Yu & Ma, 2025). این پژوهش نشان داد که ریسک‌های سیاسی، امنیت اجتماعی و سبک مدیریت، مهم‌ترین عوامل ریسک در این نوع پروژه‌ها هستند. یوللّه و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی

تکنیک‌های شناسایی ریسک‌های سیاسی در پروژه‌های بین‌المللی ساخت‌وساز با استفاده از تحلیل عاملی و پرسش‌نامه پرداختند (Ullah et al., 2024). این پژوهش نشان داد که عواملی مانند فساد، تغییرات قوانین و بی‌ثباتی دولت میزبان بیشترین تأثیر را بر موفقیت پروژه‌های بین‌المللی دارند. الابتینه و همکاران در مطالعه‌ای به شناسایی عوامل کلیدی ریسک تأخیر در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از یادگیری ماشین بدون نظارت و الگوریتم خوشه‌بندی K-means پرداختند (Al-Bataineh et al., 2024). این پژوهش با تحلیل داده‌های پیمانکاران در مناطق درحال‌توسعه و دسته‌بندی عوامل به چهار خوشه نشان داد که چالش‌های مالی، عملیاتی، نیروی کار و مدیریتی مهم‌ترین دسته‌های ریسک هستند. احمدوند و اقبالی یک مدل برای شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌ها در پروژه‌های زیرزمینی به روش AHP پرداختند (Ahmadvand & Eghbali, 1400). نتایج پیاده‌سازی روی خط ۷ متروی تهران نشان داد که ریسک‌های عدم تطبیق شرایط فیزیکی موجود با تجهیزات اجرایی، عدم تأمین قطعات یدکی اصلی و فرسوده بودن ماشین‌آلات و عدم تطابق تجهیزات با استانداردهای روز مهم‌ترین ریسک‌ها هستند.

ارجمند آقدره و اقبالی یک مدل تلفیقی برای شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها در روسازی بتنی مسلح پیوسته خیابان افتخاری به روش ترکیبی دیمتل و ANP ارائه دادند (Arjmand Aghdareh & Eghbali, 1401). نتایج نشان داد که مشکلات مالی پیمانکار، پیشنهاد قیمت پایین‌تر از حد معقول و عدم تأمین منابع اعتبار مالی مطمئن مهم‌ترین ریسک‌ها هستند. خدایاری و همکاران در یک مطالعه به موضوع تعیین مهم‌ترین فاکتورهای ریسک پروژه‌های برون‌سپاری در شرکت‌های قطعه‌سازی خودرو با استفاده از روش FMEA و تصمیم‌گیری پرداختند (Khodayari et al., 2024). ایشان نشان دادند که مهم‌ترین عوامل و فاکتورهای ریسک عبارت‌اند از: مدیریت زیرساخت‌ها، بازرگانی و مدیریت پیمانکار. صیادی تورانلو و همکاران برای ارزیابی ریسک در زنجیره تأمین پایدار از یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر FMEA، AHP و VIKOR استفاده کردند (Sayyadi Tooranloo et al., 2023). نتایج حاصله از مطالعه موردی سنگ‌آهن بافق نشان داد که نوسانات قیمت و هزینه، تورم و تغییرات نرخ ارز و تحریم مهم‌ترین ریسک‌های زنجیره تأمین سنگ آهن هستند. در یک مطالعه، یزدانی و کشوری به شناسایی و ارزیابی خطاهای انسانی در پروژه‌های پالایشگاهی با استفاده از ترکیب روش‌های AHP و TOPSIS پرداختند (Yazdani Hoshyar & Keshvari, 2023). ایشان نشان دادند که نارضایتی و احتمال بروز اغتشاش و شورش و تحصن، تأمین منابع ارزی و تهدیدات روحی روانی از مهم‌ترین ریسک‌های مطرح در پروژه‌های پالایشگاهی نفت هستند.

خلاصه مهم‌ترین ویژگی‌های مقالات موجود و مرتبط در ادبیات موضوع در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول و طبق بهترین جستجوی نویسندگان، شکاف‌های زیر در ادبیات موضوع قابل استخراج است:

۱) اغلب پژوهش‌های موجود در ادبیات صرفاً به مدیریت ریسک در پروژه‌های فاز ساخت پرداخته‌اند. حال‌آنکه در پروژه‌های بزرگ که پیمانکاران متولی انجام هر سه فاز مهندسی، تأمین و ساخت هستند لزوم مدیریت یکپارچه ریسک‌ها در هر سه فاز احساس می‌شود.

۲) اغلب پژوهش‌های موجود در ادبیات به بررسی و تعیین وزن فاکتورها و عوامل کلیدی ریسک‌ها پرداخته‌اند و در کمتر مقالاتی به شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌ها باتوجه به عوامل ریسک موجود نیز پرداخته شده است. همان تعداد اندکی که رتبه‌بندی ریسک را هم انجام داده‌اند از روش‌های نوین و ترکیبی MCDM مانند CoCoSo (که هم‌زمان از مزایای چند مدل MCDM مختلف بهره می‌برد) کمتر استفاده شده است.

۳) روش تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای مدیریت ریسک است که در بسیاری از پژوهش‌های موجود از به‌کارگیری آن غفلت شده است. درحالی‌که استفاده از ماهیت معیارهایی که در آن مطرح شده است می‌تواند به بهبود فرایند مدیریت ریسک کمک کند.

۴) یکی از جدیدترین و پرکاربردترین روش‌های تعیین وزن معیارها، روش بهترین-بدترین است که نیاز به حجم اندکی از مقایسات زوجی دارد و کارایی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی

مقایسات زوجی کامل مانند AHP و FUCOM دارد. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود تعداد اندکی از مقالات از این روش بهره برده‌اند.

۵) در مقالات مطرح در حوزه مدیریت ریسک مدلی مشاهده نمی‌شود که روش‌های داده‌کاوی را نیز در مدل‌های مدیریت ریسک ترکیب کند. این در حالی است که به دلیل مقیاس بزرگ برخی پروژه‌ها به‌خصوص در صنعت پتروشیمی، مدیریت تفکیکی (دانه به دانه) ریسک‌ها کاری دشوار و یا غیرممکن است. روش‌های داده‌کاوی مانند خوشه‌بندی قادر است یک تصویر بزرگ از ریسک‌های موجود ارائه کند که مدیران را قادر می‌سازد به‌جای تمرکز بر هر ریسک به‌صورت جداگانه، خوشه‌های پنهان موجود در ریسک‌ها را مدیریت و برنامه‌ریزی کنند.

۶) این‌گونه مدل‌ها به‌خوبی با ساختار مسائل مدیریت ریسک و مدل‌های ترکیبی تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا-تصمیم‌گیری چندمعیاره انطباق دارند و نقش مکمل و هم‌افزای خود را به‌خوبی ایفا می‌کنند.

جدول ۱. خلاصه مقایسه‌ای ویژگی‌های کلیدی مقالات موجود در ادبیات موضوع و پژوهش حاضر

Table 1. Comparative summary of key features from the existing literature and the present research

مرجع	نوع پروژه E	نوع پروژه P	نوع پروژه C	FMEA	تعیین وزن معیارها	رتبه‌بندی ریسک‌ها	داده‌کاوی	حوزه مطالعه	مطالعه موردی
(Da Cunha et al., 2022)	❋	❋	❋		نظرات خبرگان	PROMETHEE II		زنجیره تأمین	برزیل
(Enayati Fatollah et al., 2022)	❋	❋	❋	❋	G-MOORA	-		پتروشیمی	ایران
(Jalhoom & Mahjoob, 2024)			❋		دیمتل	-		ساخت‌وساز	عراق
(Bustamante Visbal et al., 2025)	❋				AHP	رگرسیون خطی		پتروشیمی	کلمبیا
(Chen et al., 2025)			❋		آنتروپی	TOPSIS	❋	ساخت‌وساز	چین
(Ebadzadeh et al., 2023)			❋	❋	-	معیار RPN		پتروشیمی	ایران
(Khademvatani et al., 2024)	❋	❋	❋	❋	AHP	معیار RPN		نفت و گاز	ایران
(Vo et al., 2025)	❋	❋	❋		تحلیل عاملی	شاخص RII		تصفیه فاضلاب	ویتنام
(Hosseinpour, 2024)			❋		بهترین-بدترین	TOPSIS		پتروشیمی	ایران
(Pervez et al., 2022)			❋		FUCOM	-		ساخت‌وساز	پاکستان
(He & Han, 2022)	❋	❋	❋		آنتروپی	DEA		پروژه بین‌المللی	چین
(Salamai, 2025)			❋		میانگین‌گیری	MAUT		زنجیره تأمین	عربستان
(Wang et al., 2025)	❋	❋	❋		SFUCOM	DSM		تونل‌سازی	چین
(Jin & Goodrum, 2024)			❋		ANP	VIKOR		ایمنی ساختمان	چین
(Haghaniat et al., 2024)	❋				-	GOPA		شبکه توزیع برق	ایران
(Bachari & Iranfar, 2025)	❋	❋	❋	❋	LBWA	CoCoSo		نفت و گاز	ایران
(Yu & Ma, 2025)	❋	❋	❋		AHP	دیمتل-AHP		پروژه زیرساختی	چین
(Ullah et al., 2024)			❋		تحلیل عاملی	-		ساخت‌وساز	چین
(Al-Bataineh et al., 2024)			❋		-	میانگین امتیاز	❋	ساخت‌وساز	اندونزی
(Ahmadvand & Eghbali, 1400)			❋		AHP	AHP		تونل‌سازی مترو	ایران
(Arjmand Aghdareh & Eghbali, 1401)	❋	❋	❋		دیمتل	ANP		روسازی خیابان	ایران
(Khodayari et al., 2024)		❋	❋	❋	دیمتل-ANP	-		قطعه‌سازی	ایران
(Sayyadi Tooranloo et al., 2023)			❋	❋	AHP	VIKOR		سنگ‌آهن	ایران
(Yazdani Hoshyar & Keshvari, 2023)			❋		AHP	TOPSIS		پالایشگاه نفت	ایران
پژوهش حاضر	❋	❋	❋	❋	بهترین-بدترین	CoCoSo	❋	پتروشیمی	ایران

۷) اکثر مقالات موجود به موضوع مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی، خیابانی، تونل‌سازی و دیگر پروژه‌های عمرانی شهری پرداخته‌اند و مقالات کمتری بر حوزه صنعت پتروشیمی تمرکز کرده‌اند. این در حالی است که صنایع پتروشیمی در ایران علاوه بر حاشیه سود و ارزآوری بالا، به دلیل ماهیت فرایندی تولید پیچیده، دارای ریسک‌ها و خطرات متنوعی است که ضرورت مدیریت یکپارچه آن در هر سه فاز مهندسی، تأمین و ساخت برای پیمانکاران فعال در این حوزه را دوچندان می‌کند. لازم به ذکر است که همان تعداد مقالات اندکی که در حوزه پتروشیمی ارائه شده‌اند نیز دچار محدودیت‌هایی هستند که در جدول **۱** قابل‌مشاهده است (مثلاً عدم پوشش هر سه فاز طراحی-تأمین-ساخت، تمرکز صرف بر شناسایی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی ریسک‌ها و عدم ارائه رویکرد برای شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌ها، عدم بهره‌گیری از روش‌های داده‌کاوی و غیره).

برای پوشش و مدیریت شکاف‌های مذکور، در این پژوهش یک مدل یکپارچه تلفیقی از تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا، تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه و داده‌کاوی برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک‌های صنایع پتروشیمی ارائه شده است که قادر است به‌صورت سیستماتیک، علاوه بر شناسایی و تعیین وزن معیارهای ریسک‌ها، آن‌ها را به‌راحتی رتبه‌بندی و خوشه‌های پنهانشان را برای تحلیل‌های تکمیلی و ارائه راهکارهای کاهش ریسک کشف کند. در بخش سوم جزئیات مدل پیشنهادی به‌طور کامل تبیین می‌شود.

۳- رویکرد پیشنهادی

۳-۱- بیان مسئله و هدف

ماهیت ریسک و همچنین مقادیر شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص آن‌ها با توجه به ماهیت صنعت، تجارت و ساختار شرکت‌ها متفاوت است. پژوهش پیش رو به‌منظور ایجاد یک چارچوب جدید یکپارچه و نظام‌مند برای مدیریت ریسک پروژه‌های EPC با استفاده از ترکیبی از روش‌های داده‌کاوی، تصمیم‌گیری چندمعیاره و تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا ارائه شده است. هدف این پژوهش، شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های مهندسی-تأمین-ساخت در پروژه‌ها به‌خصوص در حوزه‌های مرتبط با صنایع پتروشیمی است که از این منظر در دسته تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد. خروجی این مدل می‌تواند به مسئولان و مدیران سازمان کمک کند که توان، انرژی محدود و تمرکز خود را بر مدیریت ریسک‌های مهم سازمان معطوف کنند.

۳-۲- گام‌های رویکرد یکپارچه پیشنهادی

در شکل **۱** گام‌ها و مراحل اصلی رویکرد پیشنهادی به تصویر کشیده شده است.

در ادامه، گام‌ها و مراحل اصلی رویکرد پیشنهادی به‌تفصیل تبیین می‌شود:

۳-۲-۱- شناسایی و تعیین لیست نهایی ریسک‌ها در حوزه مهندسی، تأمین و ساخت

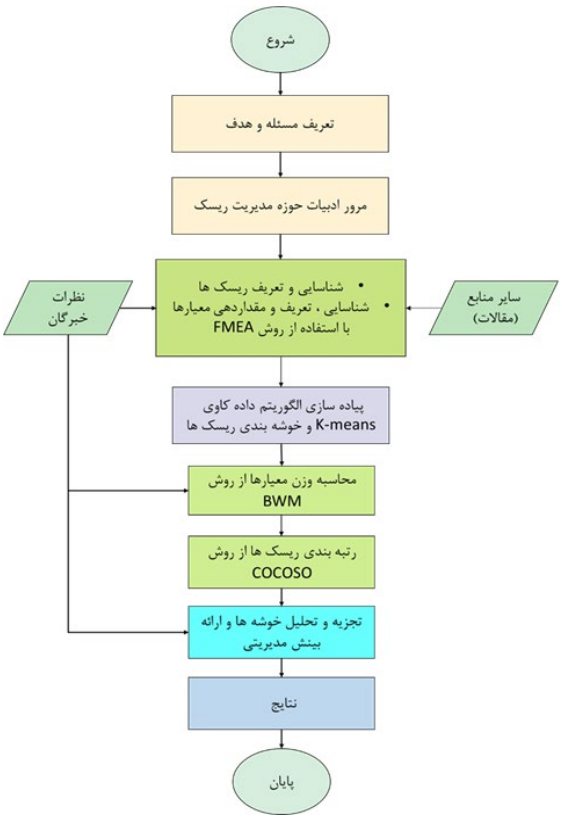
اغلب پروژه‌های مهندسی-تأمین-ساخت ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود را دارند و یک عمل تکراری و روتین نیستند. از سوی دیگر اغلب ریسک‌های موجود در این‌گونه پروژه‌ها صرفاً یک احتمال رویداد دارند و ممکن است قبلاً اتفاق نیفتاده یا تشخیص داده نشده باشند. ازاین‌رو، شناسایی و تعیین ریسک‌های اصلی در پروژه‌های EPC مستلزم وجود سطح معینی از دانش در مورد ساختار پروژه‌های EPC و جریان‌های فیزیکی، مالی و اطلاعاتی است.

در این پژوهش برای شناسایی نظام‌مند ریسک‌ها، ابتدا با مطالعه گزارش‌ها و صورت‌جلسات نمونه پروژه‌های EPC در صنعت پتروشیمی، ریسک‌های اصلی داخلی و خارجی با بهره‌گیری از ادبیات حوزه در ابعاد مالکیت/مدیریت عالیه، مهندسی، تدارکات، ساخت، سیاسی/اجتماعی، اقتصاد، کلان و بازار، حقوقی/قانونی و حوادث طبیعی/غیرطبیعی شناسایی و به کمک آن‌ها لیست اولیه ریسک‌ها استخراج می‌شود. سپس در جلسات با تیم خبرگان، موضوعیت/عدم موضوعیت این ریسک‌ها بررسی می‌شود. علاوه بر این، دیگر ریسک‌هایی که به‌طور خاص در پروژه‌های EPC محتمل هستند ولی در لیست اولیه نبوده‌اند به کمک این تیم استخراج خواهد شد. درنهایت

لیست ریسک‌ها از تجمیع لیست اولیه و لیست ریسک‌های پیشنهادی ایشان ایجاد خواهد شد.

۳-۲-۲- تعیین معیارهای (ویژگی‌های) مورداستفاده برای اولویت‌بندی ریسک‌ها

یکی از مهم‌ترین گام‌ها و مراحل ابتدایی که هم‌زمان با مرحله شناسایی ریسک‌ها می‌بایست صورت پذیرد، تعیین معیارهای اولویت‌بندی ریسک‌ها است. در این پژوهش از معیارهای موجود در روش مشهور تجزیه‌وتحلیل حالات بالقوه خطا یعنی شدت وقوع، احتمال رخداد و قابلیت کشف برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است. در جدول **۲** توضیحات تکمیلی آن‌ها آورده شده است.



شکل ۱. فلوچارت (گام‌های کلی) رویکرد یکپارچه پیشنهادی.

Figure 1. Flowchart of the general steps of the proposed integrated approach.

۳-۲-۳- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

با لحاظ‌کردن ریسک‌ها به‌عنوان سطر و معیارها به‌عنوان ستون، ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. برای تسهیل در تکمیل در امتیازدهی این ماتریس توسط تیم خبرگان، از هر خبره خواسته شده است که ریسک‌ها را با استفاده از یک طیف لیکرت ۱۰ درجه‌ای مطابق با یک جدول راهنما (مشابه جدول **۳**) مقداردهی نمایند. سپس از روش میانگین هندسی برای برآیندگیری نظرات خبرگان و تبدیل چند ماتریس تصمیم‌گیری به یک ماتریس تصمیم‌گیری واحد و نهایی استفاده شده است. علت انتخاب میانگین هندسی به‌جای میانگین حسابی، مبانی تئوریک قوی آن در ادبیات تجمیع قضاوت‌هاست که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

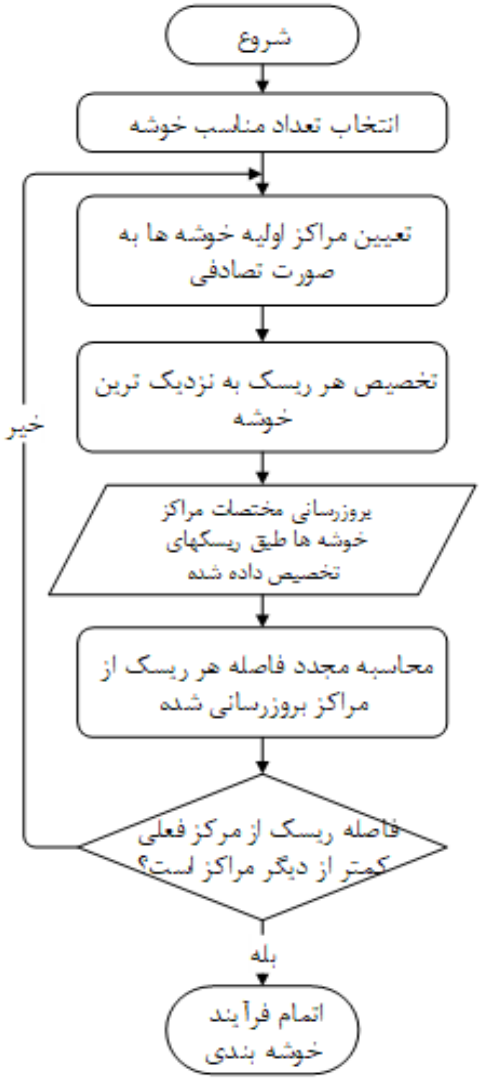
۱) کاهش حساسیت به قضاوت‌های افراطی و افزایش پایداری برآیند (Saaty, 2008).
۲) سازگاری با ماهیت نسبی مقیاس‌های ارزیابی (Saaty, 2008).
۳) حفظ ویژگی‌های سازگاری و وابستگی متقابل در ماتریس‌های مقایسه‌ای که در روش‌های MCDM حیاتی است (Forman & Peniwati, 1998).
۴) تولید برآیندی که به‌طور متوازن‌تری نماینده اجماع گروهی است (Xu, 2000).

برای آنکه از تأثیر ناخواسته امتیاز ریسک‌ها در سه معیار O، S و D بر نتایج رتبه‌بندی جلوگیری شود، اعداد موجود در هر ستون (معیار) از ماتریس تصمیم‌گیری طبق فرمول بی‌مقیاس‌سازی فازی، استاندارد و نرمال می‌شوند. با این کار، بزرگ‌ترین عدد موجود در آن ستون به عدد یک، کوچک‌ترین عدد موجود به عدد صفر و دیگر اعداد بینابینی نیز به یک عدد بین صفر و یک تبدیل می‌شوند.

۳-۲-۴- خوشه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از روش K-means

خوشه‌بندی از دسته روش‌های توصیف‌کننده در علم داده‌کاوی محسوب می‌شود که برای ایجاد یک تصویر ذهنی کلی و بزرگ از گزینه‌ها (در اینجا ریسک‌ها) قابل‌استفاده است. ایده کلی این پژوهش در تلفیق این رویکرد در فرایند ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌ها این هست که برای سازمان‌ها و شرکت‌هایی که تعداد و تنوع ریسک‌ها بسیار زیاد است. می‌توان به‌جای تحلیل تفکیکی هر ریسک (که کاری زمان‌بر، دشوار و یا غیرممکن است)، ریسک‌ها را بر اساس شباهت ذاتی‌شان در معیارهای O، S

و D خوشه‌بندی و سپس خوشه‌های ذاتی حاصله را از جنبه‌های مختلف (بسته به هدف تحلیل‌گر و تصمیم‌گیران) مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داد. در این پژوهش از مشهورترین روش خوشه‌بندی یعنی K-means برای یافتن خوشه‌های پنهان ریسک‌ها استفاده شده است. گام‌های روش خوشه‌بندی به‌طور خلاصه در شکل **۲** نشان داده شده است.



شکل ۲. فلوچارت کلی روش پیشنهادی برای خوشه‌بندی ریسک‌ها به روش K-means.

Figure 2. Overall flowchart of the proposed K-means-based risk clustering method.

قبل از توضیح گام‌های بعدی ذکر این نکته لازم است که در روش سنتی FMEA، ارزش وزنی هر سه معیار O، S و D یکسان لحاظ و آن‌ها به‌صورت خطی در هم ضرب می‌شود تا یک امتیاز به نام RPN حساب شود. سپس ریسک‌هایی با بیشترین مقدار RPN به‌عنوان مهم‌ترین ریسک‌ها لحاظ می‌شوند. این در حالی است که در اغلب مسائل دنیای واقعی، بسته به ماهیت سازمان‌ها و شرکت‌ها، اهمیت این سه معیار و نحوه تأثیر آن‌ها روی ریسک‌ها و رتبه‌بندی ممکن است در ذهن خبرگان و تصمیم‌گیران مختلف، یکسان نباشد. ازاین‌رو در این پژوهش برای غلبه بر این‌گونه کاستی‌های FMEA، از یک رویکرد تلفیقی و سیستماتیک مبتنی بر تصمیم‌گیری چند شاخصه برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است. بدین‌صورت که ابتدا بجای تعیین وزن یکسان برای سه معیار O، S و D و استفاده از ضرب خطی آن‌ها، از روش سیستماتیک بهترین-بدترین (BWM) برای تعیین وزن معیارها استفاده می‌شود. سپس این وزن‌ها به‌عنوان ورودی به یکی از روش‌های شناخته‌شده و نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره به نام CoCoSo محسوب و اولویت‌بندی نهایی ریسک‌ها حاصل می‌شود. در ادامه توضیحات مربوط به این دو روش به‌تفصیل آورده شده است:

۳-۲-۵- به کارگیری روش بهترین-بدترین برای تعیین نظام‌مند و بهینه وزن معیارها

روش بهترین-بدترین (BWM) برای اولین‌بار توسط رضایی در سال ۲۰۱۵ معرفی شده است (Rezaei, 2015). BWM یک روش مبتنی بر مقایسات زوجی است که از یک مدل بهینه‌سازی برای محاسبه ارزش معیارهای بهینه برای یک مسئله چند شاخصه استفاده می‌کند. مراحل پنج‌گانه روش BWM برای مسئله پیشنهادی به شرح ذیل است:

مرحله ۱- تعیین مجموعه معیارها با نماد $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ که در اینجا همان معیارهای O، S و D هستند.

مرحله ۲- تعیین بهترین و بدترین معیار که از این به بعد به ترتیب با B و W نشان داده می‌شوند.

مرحله ۳- تعیین بردار ارجحیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها که با $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ نشان داده می‌شود و در آن، a_{Bi} ترجیح بهترین معیار B نسبت به دیگر معیار i است.

مرحله ۴- تعیین ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار که با $A_W = (a_{1W}. a_{2W}. \dots . a_{nW})$ نشان داده می‌شود و در آن، a_{iw} ترجیح دیگر معیار i نسبت به بدترین معیار W است.

جدول ۲. معیارهای اولویت‌بندی ریسک‌ها

Table 2. Considered risk prioritization criteria

نام	معادل	نماد	تعریف	بازه
شدت اثر	Severity	S	میزان تأثیر بر عملکرد سیستم	لیکرت ده‌تایی
احتمال وقوع	Occurence	O	میزان فراوانی وقوع ریسک	لیکرت ده‌تایی
قابلیت تشخیص	Detection	D	میزان بروز پیش‌علائم	لیکرت ده‌تایی

جدول ۳. جدول راهنمای امتیازدهی ریسک‌ها در معیارها

Table 3. Risk scoring guide for criteria

شدت اثر (S)	احتمال وقوع (O)	قابلیت تشخیص (D)	امتیاز
بسیار خطرناک بدون هشدار اولیه	فوق‌العاده زیاد	غیرقابل‌شناسایی	۱
بسیار خطرناک با هشدار اولیه	خیلی زیاد	غیرقابل‌شناسایی	۲
بسیار زیاد	تکرارشونده	بسیار پایین	۳
زیاد	زیاد	پایین	۴
متوسط-بالا	متوسط-بالا	معمولی	۵
متوسط	متوسط	معمولی	۶
کم-متوسط	کم-متوسط	بسیار بالا	۷
کم	کم	بسیار بالا	۸
خیلی کم	خیلی کم	به‌راحتی	۹
فاقد اثر	فوق‌العاده کم	به‌راحتی	۱۰

مرحله ۵- ساخت مدل ریاضی با فرم کلی مدل (۱) باهدف کمینه‌سازی نرخ ناسازگاری بین وزن بهینه واقعی یک معیار با مقایسات زوجی انجام‌شده (که با ε نشان داده شده است). متغیرهای اصلی این مدل، وزن معیارها یا همان W_i ها هستند که با حل بهینه مدل، وزن‌های معیارها به‌صورت بهینه حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که برای تضمین بهینگی وزنهای حاصله، ابتدا با استفاده از تعریف قدرمطلق، محدودیت‌های غیرخطی مدل مذکور به محدودیت‌های خطی تبدیل (هر محدودیت به دو محدودیت معادل تبدیل می‌شود) و سپس مدل با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌یابی مانند GAMS حل می‌شود.

$$\begin{aligned} &\text{Min } \varepsilon \\ &S.t. \ |W_B - a_{Bi} w_i| \le \varepsilon \ \forall i \\ &|W_i - a_{iW} w_W| \le \varepsilon \ \forall i \\ &\sum_{i=1}^{n} W_i = 1 \\ &W_i \ge 0 \ for \ all \ i \end{aligned} \qquad (۱)$$

همان‌گونه که قبل‌تر اشاره شد، تابع هدف این مدل به کمینه‌سازی نرخ ناسازگاری بین وزن بهینه واقعی یک معیار با مقایسات زوجی انجام‌شده می‌پردازد. محدودیت اول تضمین می‌کند که نسبت وزن واقعی بهترین معیار (W_B) به هر معیار دیگر مانند i از نرخ ناسازگاری ε بیشتر نباشد. همچنین محدودیت دوم این اطمینان را می‌دهد که نسبت وزن هر معیاری مانند i به وزن بدترین معیار (W_W) از نرخ ناسازگاری بیشتر نباشد. محدودیت سوم بدین دلیل به مدل اضافه شده است که تضمین کند مجموع وزن‌ها برابر یک باشند. درنهایت، محدودیت آخر تضمین می‌کند که وزن‌ها مقدار غیرمنفی به خود بگیرند.

۳-۲-۶- رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها در هر خوشه با استفاده از روش کوکوسو

روش CoCoSo که برای اولین‌بار توسط یزدانی و همکاران (Yazdani et al., 2019) در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد شده است، دو مدل جمع وزنی ساده (SAW) و مدل ضرب وزنی (WPM) را ترکیب و از مزیت‌های هر دو مدل استفاده می‌کند. گام‌های پنج‌گانه روش کوکوسو به شرح ذیل می‌باشد:

مرحله ۱- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری موزون اولیه $D = [x_{ij}]_{m\times n}$ که همان ماتریس تصمیم‌گیری حاصل از بخش ۳-۲-۵ است. در اینجا i اندیس ریسک و j اندیس معیار است.

مرحله ۲- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری ریسک‌ها توسط رابطه (۲) و (۳) به ترتیب برای شاخص‌های مثبت و منفی.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (۲)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (۳)$$

لازم به ذکر است که مطابق جدول **۳**، چون ماهیت (جنبه) منفی برای معیار D در همان مرحله امتیازدهی با استفاده از امتیازدهی معکوس در طیف لیکرت از بین می‌رود، بنابراین برای همه شاخص‌ها می‌توان از رابطه (۲) استفاده کرد.

مرحله ۳- محاسبه مقادیر جمع وزنی و ضرب وزنی برای هر ریسک که به ترتیب طبق رابطه (۴) و (۵) قابل‌محاسبه است. لازم به ذکر است که در این دو رابطه، Wj نشان‌دهنده وزن بهینه شاخص j است که خروجی بخش ۵-۲-۳ و از ورودی‌های روش کوکوسو است.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} (w_j r_{ij}) \quad (۴)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (r_{ij})^{w_j} \quad (۵)$$

مرحله ۴- محاسبه وزن نسبی گزینه‌ها به کمک روابط (۶)، (۷) و (۸). شایان‌ذکر است که λ یک نوع ضریب وزن‌دهی در بازه [۱و۰] برای تعیین میزان اهمیت و نقش مقادیر جمع وزنی و ضرب وزنی در محاسبه امتیاز نهایی هر ریسک است که در حالت پیش‌فرض ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$M_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^{m} (P_i + S_i)} \ \forall i \quad (۶)$$

$$M_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \ \forall i \quad (۷)$$

$$M_{ic} = \frac{\lambda \times S_i + (1-\lambda) \times P_i}{\lambda \times \max_i S_i + (1-\lambda) \times \max_i P_i} \ \forall i \quad (۸)$$

مرحله ۵- محاسبه امتیاز نهایی هر ریسک با استفاده از رابطه (۹) و اولویت‌بندی نهایی ریسک‌ها بر اساس M_i به ترتیب نزولی.

$$M_i = \sqrt[3]{M_{ia} \times M_{ib} \times M_{ic}} + \frac{1}{3}(M_{ia} \times M_{ib} \times M_{ic}) \quad (۹)$$

به‌عنوان حسن‌ختام این بخش باید اشاره کرد که رتبه‌بندی اولویت‌ها خود یک گام مهم برای مأموریتی مهم‌تر است. مدیران پروژه‌های EPC می‌بایست با تحلیل هزینه-منفعت، استراتژی‌های مناسب را برای کاهش عوامل خطر شناسایی و اجرایی نمایند.

۴- نتایج محاسباتی

در این بخش به ارائه مهم‌ترین نتایج محاسباتی مدل پیشنهادی که بر اساس داده‌های واقعی حاصل شده است پرداخته می‌شود.

۴-۱- مطالعه موردی

مدل پیشنهادی در این پژوهش متمرکز بر مدیریت ریسک در پروژه‌های مهندسی-تأمین-ساخت در صنعت پتروشیمی است. تیم خبرگان مورداستفاده در این مطالعه نیز ترکیبی از افراد توانمند، باتجربه و متخصص در حوزه پروژه‌های EPC بوده‌اند. خلاصه اطلاعات و سوابق ایشان در جدول **۴** آورده شده است.

جدول ۴. خلاصه اطلاعات و سوابق تیم خبرگان

Table 4. Summary of expert panel information and their background

خبره	مدرک	رشته	سمت	سابقه
۱	لیسانس	مواد	رئیس مرکز اسناد و DCC پروژه	۳۵ سال
۲	ارشد	صنایع	معاون برنامه‌ریزی و کنترل پروژه	۲۱ سال
۳	ارشد	صنایع	کارشناس ارشد کنترل پروژه	۱۱ سال
۴	دکتری	برق	رئیس واحد فنی	۱۲ سال

برای استخراج و نهایی‌سازی لیست ریسک‌ها از دستورالعمل توضیحی در بخش ۱-۲-۳ استفاده و تعداد ۱۲۳ ریسک در ۸ بُعد

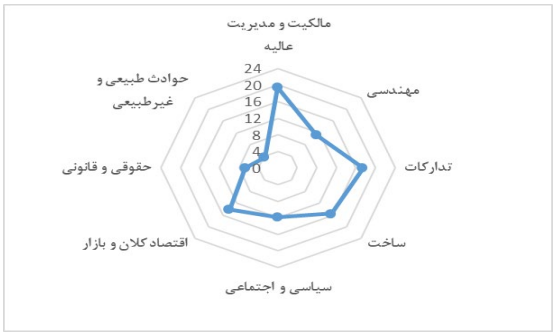
۱) مالکیت و مدیریت عالیه
۲) مهندسی
۳) تدارکات
۴) ساخت
۵) سیاسی و اجتماعی
۶) اقتصاد کلان و بازار

۷) حقوقی و قانونی و درنهایت
۸) حوادث طبیعی و غیرطبیعی به‌عنوان لیست نهایی ریسک‌ها به کمک تیم خبرگان تعیین شد.

نمونه‌ای از ریسک‌های شناسایی و نهایی‌شده درجدول **۵** آورده شده است. علاوه بر این، شکل **۳** فراوانی ریسک در هریک از ابعاد ۸گانه را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل **۳** مشاهده می‌شود، بیشترین فراوانی ریسک در ابعاد مالکیت و مدیریت عالیه، تدارکات و ساخت به ترتیب با تعداد ۱۹ ، ۱۷ و ۱۶ عدد اتفاق افتاده است.

۴-۲- یافته‌ها

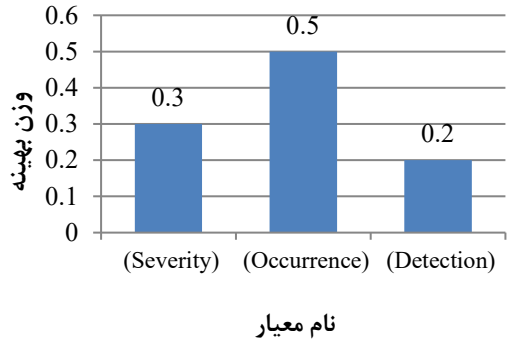
برای امتیازدهی ریسک‌ها در سه معیار S، O و D، یک فرم مشابه متدلوژی تبیینی در بخش ۳-۲-۳ برای استخراج ماتریس تصمیم‌گیری از نگاه هر خبره طراحی، توسط ایشان تکمیل شد. سپس از میانگین هندسی برای ادغام نظرات خبرگان استفاده و ماتریس نرمال‌شده آن، به‌عنوان ورودی روش کوکوسو و خوشه‌بندی K-means در نظر گرفته شد. علاوه بر آن، مطابق توضیحات بخش ۵-۲-۳، ماتریس مقایسات بهترین معیار نسبت به دیگر معیارها و مقایسات دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار توسط نظر توافقی خبرگان تکمیل و وزن بهینه معیارها با استفاده از فرم خطی مدل (۱) محاسبه شد که در شکل **۴** گزارش شده است.



شکل ۳. نمودار تارعنکبوتی ابعاد قرار گرفتن در معرض خطر ابعاد مختلف پروژه EPC.

Figure 3. Radar chart of risk exposure dimensions for different dimensions of the EPC project.

شکل **۵** نیز ده ریسک برتر شناسایی شده بر اساس مقدار RPN نشان می‌دهد. در ادامه برای تشکیل خوشه‌ها بر اساس شباهت ذاتی ریسک‌ها، الگوریتم خوشه‌بندی K-means (توضیحی در بخش ۴-۲-۳)، در نرم‌افزار Python ۳/۱۱ پیاده‌سازی و داده‌های ریسک با استفاده از آن خوشه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که برای تعیین مناسب تعداد خوشه‌ها از روش مشهور Elbow مطابق استفاده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود نقطه زانویی نمودار و تعداد مناسب خوشه برابر با ۵ عدد است. ازاین‌رو، الگوریتم K-means با در نظر گرفتن k=۵ اجرا و منجر به تشکیل ۵ خوشه بانام‌های خوشه صفر تا خوشه چهار مطابق شکل ۷ شده است.



شکل ۴. اوزان بهینه معیارها حاصل از حل مدل بهترین-بدترین گروهی با توافق جمعی نظرات خبرگان

Figure 4. Optimal criteria weights derived from the group best-worst method (BWM) with expert consensus.

همچنین مطابق جدول **۶** مشخص است که این پنج خوشه به ترتیب حاوی ۳۵، ۲۳، ۲۵، ۹ و ۳۱ ریسک هستند. در ادامه، با اعمال روش رتبه‌بندی COCOSO بر روی خوشه‌های حاصله، امتیاز (M_i) ریسک‌های موجود در هر خوشه محاسبه و بر اساس آن مهم‌ترین ریسک‌های موجود در هر خوشه مشخص شدند (جدول **۷**). بر اساس یافته‌های جدول **۶** و جدول **۷** مشخص است که خوشه ۱ نسبت به دیگر خوشه‌ها تعداد بیشتری از ریسک‌های مهم را در خود جای داده است.

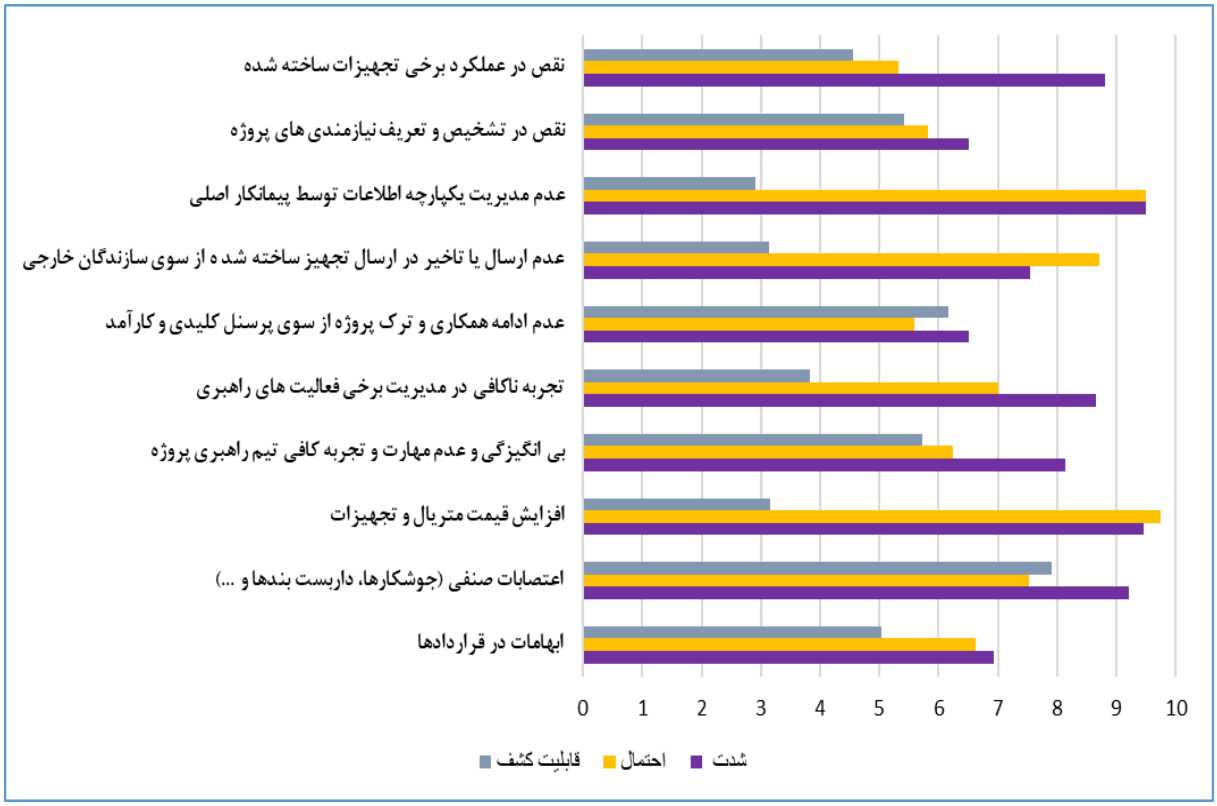
۴-۳- مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با رویکرد سنتی FMEA

برای نشان‌دادن عینی ارزش‌افزوده مدل ترکیبی، پنج ریسک برتر شناسایی‌شده توسط مدل پیشنهادی با نتایج روش کلاسیک FMEA مقایسه شده است. تحلیل مقادیر O، S وD این ریسک‌ها و جایگاه متفاوت آن‌ها در دو رتبه‌بندی، چند برتری کلیدی رویکرد جدید را آشکار می‌سازد.

جدول ۵. یک نمونه کوچک از ریسک‌های نهایی شناسایی‌شده به همراه خلاصه توضیحات آن‌ها

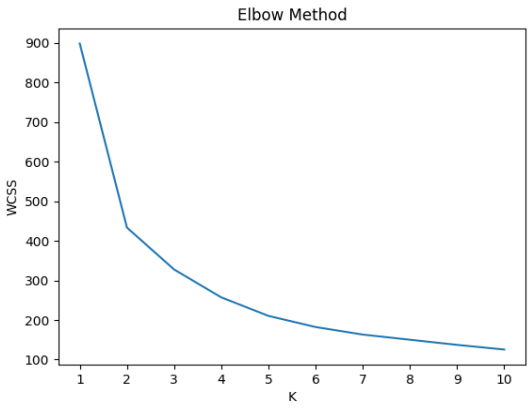
Table 5. A small-scale example of the final identified risks along with a summary of their descriptions

ردیف	منشأ	منبع	بُعد در معرض خطر	کد	خلاصه عنوان ریسک
۹۷	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA2	ریزگردها و طوفان
۹۸	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA3	باران شدید
۹۹	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA4	دما و رطوبت بالا
۱۰۰	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA5	تروریسم و خرابکاری
۱۰۱	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA6	آتش‌سوزی و انفجار در واحد
۱۰۲	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA7	آتش‌سوزی و انفجار در واحدهای مجاور
۱۰۳	خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA8	سرقت
۱۰۴	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR1	ایجاد ساختار شکست نامتناسب پروژه
۱۰۵	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR2	زمان‌بری تعدیل مبلغ قرارداد پیمانکار از سوی کارفرما
۱۰۶	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR3	ترک پروژه از سوی پرسنل کلیدی و کارآمد
۱۰۷	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR4	نارضایتی پرسنل از تفاوت حقوق و مزایا دریافتی با منطقه
۱۰۸	خارجی	پروژه واقعی	تأمین	PR5	عدم ارسال/تأخیر در ارسال از سوی سازندگان خارجی
۱۰۹	داخلی	پروژه واقعی	مهندسی	PR6	عدم ثبت بازخورد و رفع ایرادات فنی از پروژه‌های قبل
۱۱۰	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR7	مشکلات پرسنل اقماری (دوری، رفت‌وآمد و غیره)
۱۱۱	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR8	آلودگی صوتی محیط کاری
۱۱۲	داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR9	آلودگی هوای محیط کاری (گازهای سمی، فلزها و غیره)



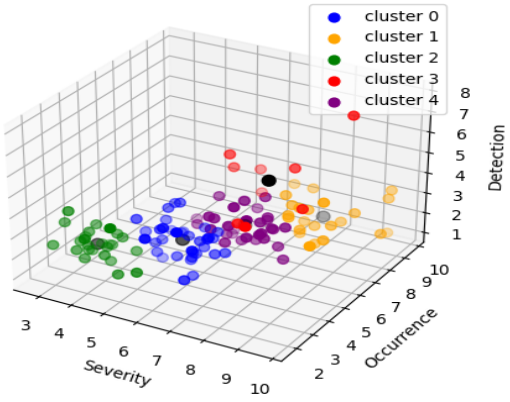
شکل ۵. ده ریسک برتر بر اساس معیار RPN در روش کلاسیک FMEA

Figure 5. The top ten risks based on the RPN criterion in the classical FMEA method.



شکل ۶. نتایج روش Elbow برای تعیین تعداد مناسب خوشه در روش K-means

Figure 6. The results of the Elbow method for determining the optimal number of clusters in the K-means algorithm.



شکل ۷. نحوه توزیع ریسک‌ها در خوشه‌ها.

Figure 7. The distribution of risks across clusters.

در روش کلاسیک FMEA که از مقدار RPN برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده می‌کند، ریسک اعتصابات صنفی باوجود داشتن شدت نسبتاً بالا (۹/۲)، به دلیل امتیاز بسیار بالای وقوع (۷/۵) و قابلیت تشخیص (۷/۹) به‌عنوان ریسک نخست شناسایی شده است. این در حالی است که مدل ترکیبی، با اعمال وزن بهینه معیارها این ریسک را در میان پنج ریسک برتر قرار نداده است. در مقابل، مدل پیشنهادی ریسک عدم ثبت بازخورد و رفع ایرادات فنی از پروژه‌های قبل را با وجود امتیاز تشخیص بسیار پایین (۱/۲)، به دلیل دارا بودن بالاترین امتیازهای شدت و وقوع (هر دو ۹/۴۹) به‌عنوان بحرانی‌ترین ریسک معرفی کرده است. این تغییر رتبه‌بندی، نشان‌دهنده میزان حساسیت بیشتر مدل ترکیبی به ریسک‌های با پیامدهای شدید بلندمدت است، حتی اگر تشخیص آن‌ها آسان باشد. همچنین، با مقایسه جایگاه دو ریسک مشترک افزایش قیمت متریال (IP14) و عدم مدیریت یکپارچه اطلاعات (PR12) مشخص می‌شود که در روش کلاسیک FMEA ، ریسک IP14 به دلیل امتیاز وقوع بسیار بالا (۹/۷۴) رتبه دوم را کسب کرده است؛ درحالی‌که ریسک PR12 با وجود امتیازهای شدت و وقوع مشابه (۹/۵)، به دلیل امتیاز تشخیص پایین‌تر (۲/۹ در مقابل ۳/۱۶) در رتبه چهارم قرار گرفته است. این نمونه‌ای از محدودیت RPN در تفکیک ریسک‌ها با مقادیر نزدیک است. مدل ترکیبی با درنظرگیری وزن معیارها و منطق یکپارچه CoCoSo، این دو ریسک را به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار داده و تمایز دقیق‌تری بین آن‌ها قائل شده است.

به‌عنوان جمع‌بندی، این مقایسه نشان می‌دهد که مدل ترکیبی پیشنهادی، با غلبه بر محدودیت وزن یکسان معیارها و حساسیت بیش‌ازحد RPN به امتیاز تشخیص، خروجی متوازن‌تر و استراتژی‌محورتری ارائه می‌دهد. این مدل تمرکز تصمیم‌گیران را از ریسک‌های عملیاتی با احتمال وقوع و تشخیص بالا (مانند اعتصابات) به سمت ریسک‌های ریشه‌ای با شدت اثر بالا و پیامدهای ماندگار سازمانی (مانند ضعف مدیریت دانش و یکپارچگی اطلاعات) معطوف می‌سازد.

۴-۴- تحلیل حساسیت نتایج رتبه‌بندی نسبت به تغییر وزن بهینه معیارها

به‌منظور ارزیابی پایداری و قابلیت اطمینان نتایج رتبه‌بندی حاصل از روش COCOSO، تحلیل حساسیت با تغییر هم‌زمان وزن‌های سه معیار S (شدت)، O (احتمال وقوع) و D (قابلیت تشخیص) انجام شد. وزن‌های بهینه اولیه این معیارها خروجی روش بهترین-بدترین و به ترتیب ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۲ در نظر گرفته شدند. برای بررسی حساسیت مدل، بازه تغییر ٪۱۰± حول وزن‌های اولیه در نظر گرفته شد. بدین منظور، ۱۱ سناریو مختلف طراحی شد که در هر سناریو، وزن هر سه معیار به میزان یکسانی (از ٪۱۰- تا ٪۱۰+ با گام ٪۲) تغییر یافت و سپس نرمال‌سازی شدند تا مجموع آن‌ها برابر یک باقی بماند.

جدول ۶. خلاصه نتایج خوشه‌بندی ریسک‌ها

Table 6. Summary of risk clustering results.

برچسب خوشه	تعداد ریسک موجود در خوشه	تعداد ریسک ۱۵٪ برتر موجود در خوشه
خوشه صفر	۳۵	۰
خوشه یک	۲۳	۱۷
خوشه دو	۲۵	۰
خوشه سه	۹	۰
خوشه چهار	۳۱	۱
مجموع	۱۲۳	۱۸

جدول ۷. خلاصه‌ای از نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها (از دیدگاه رتبه کلی آن‌ها در روش کوکوسو)

Table 7. Summary of Risk Ranking Results (from the perspective of their overall rank using the COCOSO method)

منشأ	منبع	بُعد	کد	خلاصه عنوان ریسک	رتبه	خوشه
داخلی	پروژه واقعی	مهندسی	PR6	عدم ثبت بازخورد و رفع ایرادات فنی از پروژه‌های قبل	۱	۱
داخلی	مقالات	تدارکات	IP14	افزایش قیمت متریال و تجهیزات	۲	۱
داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR12	عدم مدیریت یکپارچه اطلاعات توسط پیمانکار اصلی	۳	۱
داخلی	مقالات	مالکیت و مدیریت عالیه	IM1	تأخیر در فرایند دریافت تسهیلات	۴	۱
داخلی	پروژه واقعی	ساخت	PR1	ایجاد ساختار شکست نامتناسب پروژه	۵	۱
...	...	...	...	...	...	...
خارجی	مقالات	حقوقی و قانونی	EL5	وضع قوانین و دستورالعمل‌های جدید از سوی NPC	۱۱۹	۲
داخلی	مقالات	ساخت	IC8	تخمین اشتباه زمان و هزینه فعالیت توسط پیمانکاران	۱۲۰	۲
داخلی	مقالات	مالکیت و مدیریت عالیه	IM19	انتخاب نامناسب محل پروژه	۱۲۱	۲
خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA7	آتش‌سوزی و انفجار در واحدهای مجاور	۱۲۲	۲
خارجی	مقالات	حوادث طبیعی و غیرطبیعی	EA1	زمین‌لرزه	۱۲۳	۲

این سناریوها شامل حالاتی مانند (شدت ۰/۲۸۲، وقوع ۰/۵۱۰ و قابلیت تشخیص ۰/۲۰۱) برای کاهش ٪۶ تا (شدت ۰/۳۱۸، وقوع ۰/۴۹۰ و قابلیت تشخیص ۰/۱۹۲) برای افزایش ٪۶ بودند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه‌بندی نهایی از پایداری قابل‌توجهی برخوردار است. گزینه‌های برتر، به‌ویژه رتبه اول (IM1)، در تمامی ۱۱ سناریو جایگاه خود را حفظ کردند. رتبه‌بندی ۱۰ گزینه نخست تحت تأثیر تغییرات وزن، نوسان محسوسی نداشت که این امر، اعتماد به نتایج اولیه را تقویت می‌کند. بااین‌حال، تغییرات جزئی در رتبه‌های میانی، به‌ویژه برای حدود ۵ گزینه (نظیر IM5 و PR2) مشاهده شد که حساسیت بالاتری نسبت به توزیع وزن معیارها از خود نشان دادند. برای سنجش کمی میزان شباهت رتبه‌بندی در هر سناریو با رتبه‌بندی پایه (وزن‌های اولیه)، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد که ضرایب همبستگی برای تمامی ۱۱ سناریو در بازه [۰/۹۹۵,۰/۹۷۸] قرار دارند. این مقادیر بسیار نزدیک به ۱، حاکی از همبستگی بسیار قوی و مثبت بین تمامی رتبه‌بندی‌های حاصل از سناریوهای مختلف و رتبه‌بندی مرجع است. بالا بودن این ضرایب، به‌وضوح تأیید می‌کند که تغییرات اعمال‌شده در بازه موردبررسی، ساختار و ترتیب کلی رتبه‌بندی را به‌طور اساسی تغییر نداده و نتایج اولیه از اتکاپذیری بالایی برخوردارند. به‌عنوان جمع‌بندی، تحلیل حساسیت انجام‌شده مؤید مقاومت مدل پیشنهادی رتبه‌بندی ریسک‌ها در این مطالعه است. پایداری رتبه گزینه‌های برتر و ضرایب همبستگی بسیار بالا نشان می‌دهند که نتایج رتبه‌بندی نهایی نسبت به نوسانات جزئی در وزن‌های معیارها (که ممکن است از خطاهای

ذهنی ارزیابی یا عدم قطعیت ناشی شود) کاملاً پایدار و قابل دفاع هستند. این یافته، اعتبار خروجی‌های مدل و قابلیت استفاده از آن را در فرآیندهای پشتیبانی تصمیم در حوزه موردمطالعه تأیید می‌کند.

۴-۵- راهکارهای پیشنهادی برای مدیریت ریسک‌های برتر

با توجه به نتایج مدل پیشنهادی در بخش ۲-۴ و اینکه ۱۷ ریسک برتر در خوشه شماره ۱ قرار گرفته است، در ادامه پنج ریسک برتر موجود در این خوشه به‌صورت پایلوت تحلیل و راهکارهای پیشنهادی به‌منظور مدیریت آن‌ها ارائه می‌شود:

ریسک رتبه ۱- عدم ثبت بازخورد و رفع ایرادات فنی از پروژه‌های قبل: ازآنجایی‌که شرکت مذکور از شرکت‌های بزرگ EPC بوده و پروژه‌های متعددی در صنایع پتروشیمی طراحی و اجرا کرده است پیشنهاد می‌شود که به‌منظور مدیریت خطرات مربوط به این ریسک، سیستمی جهت ثبت بازخوردها برای این شرکت ایجاد شود. با انجام این کار می‌توان از داده‌های ثبت‌شده و مستندات پروژه‌های گذشته در مدیریت بهتر پروژه‌های مشابه جاری و آینده استفاده کرد که منجر به صرفه‌جویی اقتصادی و جلوگیری از هدر رفت زمان و سرمایه فنی می‌شود.

ریسک رتبه ۲- افزایش قیمت متریال و تجهیزات (تدارکات): احتمال افزایش قیمت متریال و تجهیزات با توجه به وضعیت خاص تحریمی حاکم بر فضای صنعت دور از انتظار نمی‌باشد. برای مدیریت هرچه بهتر این ریسک، رصد بازارهای جهانی، تحلیل اوضاع سیاسی جهان و اتخاذ تصمیمات سیستماتیک برای تأمین متریال و تجهیزات در حجم و زمان مناسب می‌تواند بسیار راهگشا باشد. یکی از ابزارهای کاملاً مناسب برای نیل به این هدف، استفاده از مدل‌های کنترل تولید و موجودی غیرقطعی جهت زمان‌بندی و تعیین حجم سفارشات است.

ریسک رتبه ۳- عدم مدیریت یکپارچه اطلاعات توسط پیمانکار اصلی (ساخت): در مورد پروژه‌هایی که اولین تجربه کاری و ارتباط مستقیم با پیمانکاران جزء (دست‌دوم) می‌باشد این نوع ریسک غالبا وجود دارد و مطرح می‌شود. ازجمله اقدامات اصلاحی برای مدیریت ریسک‌های این حیطه، بهره‌گیری از مدیران کارآمد و باتجربه در این بخش می‌باشد.

ریسک رتبه ۴- تأخیر در فرایند دریافت تسهیلات (مالکیت و مدیریت عالیه): دریافت تسهیلات می‌تواند به‌عنوان موتور و قوه محرک محسوب شود و برای پیشبرد فعالیت‌های پروژه بسیار حائز اهمیت باشد. راهکار پیشنهادی اقدام به‌موقع شرکت و پیگیری مستمر در خصوص دریافت و تأمین ضمانت‌نامه‌های موردنیاز برای دریافت چنین تسهیلاتی می‌باشد.

ریسک رتبه ۵- ایجاد ساختار شکست نامتناسب پروژه (ساخت): ازآنجاکه در هنگام ایجاد ساختار شکست پروژه، نقصان اطلاعات به دلیل تغییر ظرفیت واحد اوره و متوقف بودن فعالیت‌های مهندسی وجود داشت ریسک عدم تناسب ساختار شکست در بخش ساختمان و نصب پررنگ شده است. راهکار پیشنهادی برای مدیریت این ریسک، کارشناسی دقیق بخش برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، عدم ریزکردن سطوح ساختار شکست تا دریافت اطلاعات کافی و برآورد تناسب بودجه و هزینه در مقاطع مختلف پروژه می‌باشد.

۴-۶- محدودیت‌های پژوهش

علی‌رغم تلاش برای ارائه چارچوبی نظام‌مند، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که بایستی در تفسیر و تعمیم نتایج موردتوجه قرار گیرند. نخست، وزن‌دهی معیارها و ارزیابی اولیه ریسک‌ها مبتنی بر قضاوت‌های ذهنی خبرگان است که اگرچه با روش‌های علمی تجمیع شده، اما ذاتاً در معرض سوگیری‌های احتمالی و عدم قطعیت قرار دارد. دوم، مدل در محیطی قطعی اجراشده و عدم قطعیت ذاتی پارامترهای کیفی ارزیابی ریسک (به‌ویژه در مراحل اولیه پروژه) را به‌طور صریح مدل‌سازی نکرده است. سوم، مطالعه موردی در بافت خاص صنعت پتروشیمی ایران انجام شده است؛ لذا وزن‌های به‌دست‌آمده و اولویت‌بندی ریسک‌های خاص ممکن است تحت تأثیر شرایط ویژه این صنعت و محیط باشد و تعمیم نتایج کمی به سایر صنایع یا کشورها نیازمند احتیاط و اعتبارسنجی مجدد است.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب جامع و عملیاتی برای مدیریت ریسک در پروژه‌های پیچیده مهندسی، تدارکات و ساخت (EPC) در صنعت پتروشیمی انجام شد. ماهیت چندفازی، سرمایه‌بر و پرریسک این پروژه‌ها، همراه با محدودیت‌های روش‌های سنتی ارزیابی ریسک مانند FMEA، ضرورت ارائه رویکردی نوین و ترکیبی را ایجاب می‌کرد.

مدل پیشنهادی در این تحقیق با تلفیق سه حوزه کلیدی تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، تجزیه‌وتحلیل حالات شکست (FMEA) و داده‌کاوی، گامی در جهت پوشش شکاف موجود در ادبیات موضوع برداشت. نتایج پیاده‌سازی این مدل بر روی یک مطالعه موردی واقعی، کارایی و اثربخشی آن را به‌وضوح نشان می‌دهد. شناسایی ۱۲۳ ریسک در هشت بُعد اصلی (شامل مالکیت/مدیریت عالیه، مهندسی، تدارکات، ساخت، سیاسی/اجتماعی، اقتصاد کلان و بازار، حقوقی/قانونی و حوادث طبیعی) گویای طیف گسترده و متنوع تهدیداتی است که یک پروژه EPC پتروشیمی با آن مواجه است. تحلیل این ریسک‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی بهترین-بدترین (BWM) منجر به تعیین وزن‌های بهینه ۰/۴۶۵ برای شدت، ۰/۳۲۱ برای احتمال وقوع و ۰/۲۱۴ برای احتمال تشخیص شد.

این نتیجه، ناکارآمدی فرض وزن یکسان برای معیارها در روش کلاسیک FMEA را رد کرده و نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، معیار شدت اثر دارای بیشترین اهمیت در ارزیابی ریسک‌های این حوزه است. یکی از نوآوری‌های کلیدی این پژوهش، به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی K-means بر روی داده‌های ریسک بود. بر اساس معیار البو (Elbow)، تعداد بهینه خوشه‌ها برابر ۵ تعیین شد که منجر به گروه‌بندی ریسک‌ها در خوشه‌های ۰ تا ۴ گردید. این خوشه‌ها به ترتیب شامل ۳۵، ۲۳، ۲۵، ۹ و ۳۱ ریسک بودند. مهم‌تر آنکه، ۱۷ ریسک از ۲۰ ریسک برتر شناسایی‌شده توسط روش ترکیبی، در خوشه شماره ۱ (با ۲۵ عضو) قرار گرفتند. این یافته، ارزش خوشه‌بندی را به‌عنوان یک ابزار غربالگری قوی اثبات می‌کند؛ به‌طوری‌که مدیران می‌توانند با تمرکز اولیه بر یک خوشه، بخش عمده‌ای از ریسک‌های بحرانی را پوشش دهند و از سردرگمی در مواجهه با لیست طولانی ریسک‌های منفرد جلوگیری کنند. رتبه‌بندی نهایی با روش ترکیبی CoCoSo، مهم‌ترین ریسک‌های پروژه را مشخص نمود. ریسک‌های برتر شناسایی‌شده عمدتاً در حوزه‌های مدیریت دانش، تأمین مالی و هماهنگی فرایندی متمرکز بودند. ازجمله این ریسک‌ها می‌توان به عدم ثبت و بازخورد تجربیات پروژه‌های قبلی، افزایش قیمت متریال و تجهیزات، عدم مدیریت یکپارچه اطلاعات توسط پیمانکار اصلی، تأخیر در دریافت تسهیلات مالی و ایجاد ساختار شکست کار (WBS) نامتناسب اشاره کرد. این نتایج بر اهمیت مدیریت دانش سازمانی، رصد هوشمند بازار تأمین و تقویت هماهنگی و یکپارچگی اطلاعاتی در کنار ملاحظات فنی و مالی تأکید می‌کنند. درنهایت، این پژوهش نشان داد که رویکرد ترکیبی پیشنهادی، نه‌تنها بر محدودیت‌های روش FMEA کلاسیک غلبه می‌کند، بلکه با ارائه یک نقشه راه گام‌به‌گام و سیستماتیک، از شناسایی اولیه ریسک تا اولویت‌بندی و گروه‌بندی هوشمند آن‌ها، ابزاری قدرتمند در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران قرار می‌دهد. تلفیق منطق تصمیم‌گیری چندمعیاره با بینش‌آفرینی داده‌کاوی، امکان درک عمیق‌تر و مدیریت کارآمدتر ریسک‌های پیچیده پروژه‌های EPC پتروشیمی را فراهم ساخته است.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با تمرکز بر توسعه بیشتر این مدل در شرایط عدم قطعیت فازی، تطبیق آن با سایر انواع قراردادها و نیز ارزیابی کارایی هزینه-منفعت راهکارهای کنترلی پیشنهادی برای هر خوشه از ریسک‌ها، گام‌های بعدی را در تکمیل این چارچوب بردارند. خروجی این تحقیق می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) در حوزه مدیریت ریسک پروژه‌های بزرگ صنعتی قرار گیرد.

تحقیقات پیش رو می‌تواند دیگر ملاک‌های ارزیابی ریسک را نیز موردمطالعه قرار داد. همچنین ارزیابی ریسک در شرایط عدم قطعیت می‌تواند جهت کارایی مدیریت ریسک پروژه مفید باشد.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

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

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Ahmadvand, M., & Eghbali, H. (2022). Identifying and ranking of risk types in underground projects using the AHP method (applied example: Tehran Metro Line 7). *System Engineering and Productivity*, *1*(1), 7-29 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2022.243365

Al-Bataineh, F., Khatatbeh, A. A., & Alzubi, Y. (2024). Unsupervised machine learning for identifying key risk factors contributing to construction delays. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, *16*(1), 170–185. https://doi.org/10.2478/otmcj-2024-0014

Arjmand Aghdareh, S., & Eghbali, H. (2022). Designing a Risk Management Model in Continuous Reinforced Concrete Pavements (CRCP) Using Network Analysis Method. *System Engineering and Productivity*, *2*(2), 7-24 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2022.243408

Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity*, *5*(3), 179-198 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333

Awodi, N. J., Liu, Y., Ayo-Imoru, R. M., & Ayodeji, A. (2023). Fuzzy TOPSIS-based risk assessment model for effective nuclear decommissioning risk management. *Progress in Nuclear Energy*, *155*, 104524. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104524

Bachari, M. S., & Iranfar, M. (2025). Project risk assessment: A holistic risk identification, analysis and evaluation approach, The case of EPC projects. *Journal of Project Management*, *10*(2), 283–300. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2025.2.001

Bustamante Visbal, J. P., Ortega-Toro, R., & Hernández Fernández, J. A. (2025). Application of Risk Management in Applied Engineering Projects in a Petrochemical Plant Producing Polyvinyl Chloride in Cartagena, Colombia. *ChemEngineering*, *9*(4), 75. https://doi.org/10.3390/chemengineering9040075

Celik, E., & Gul, M. (2021). Hazard identification, risk assessment and control for dam construction safety using an integrated BWM and MARCOS approach under interval type-2 fuzzy sets environment. *Automation in Construction*, *127*, 103699. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103699

Chen, Y., He, G., Fang, Y., Li, D., & Wang, X. (2025). Carbon Emission Evaluation System for Foundation Construction Based on Entropy–TOPSIS and K-Means Methods. *Sustainability*, *17*(1), 369. https://doi.org/10.3390/su17010369

da Cunha, R. A., Rangel, L. A. D., Rudolf, C. A., & dos Santos, L. (2022). A decision support approach employing the PROMETHEE method and risk factors for critical supply assessment in large-scale projects. *Operations Research Perspectives*, *9*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100238

Ebadzadeh, F., Monavari, S. M., Jozi, S. A., Robati, M., & Rahimi, R. (2023). Combining the Bow-tie model and EFMEA method for environmental risk assessment in the petrochemical industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *20*(2), 1357–1368. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04690-y

Enayati Fatollah, S., Dabbagh, R., & Shahsavar Jalavat, A. (2025). An extended approach using failure modes and effects analysis (FMEA) and weighting method for assessment of risk factors in the petrochemical industry. *Environment, Development & Sustainability*, *27*(9). https://doi.org/10.1007/s10668-022-02609-8

Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, *108*(1), 165-169. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0

Ghadami Gholsheikh, N., Hossein Zadeh, A., & Sanavi Garousiyan, V. (2025). Design and validation of smart customer experience in Agricultural Bank of Khorasan Razavi Province with a mixed-methods approach. *System Engineering and Productivity*, *5*(1), 65-91 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049020.1244

Ghazal, T., Hussain, M., Said, R., Nadeem, A., Hasan, M. K., Ahmad, M., Khan, M., & Naseem, M.

Mode Analysis Method and Decision-Making Technique. *System Engineering and Productivity*, *4*(3), 31-48 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2031280.1212

Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, *40*(2), 828–838. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010

Pervez, H., Ali, Y., Pamucar, D., Garai-Fodor, M., & Csiszárik-Kocsir, Á. (2022). Evaluation of critical risk factors in the implementation of modular construction. *PLOS ONE*, *17*(8), e0272448. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272448

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, *53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 102 (2), 251–318. https://doi.org/10.1007/BF03191825

Salamai, A. A. Fuzzy MCDM Framework for Risk Management in Construction Supply Chain. *Proceedings of the 7th International Conference on Finance, Economics, Management and IT Business - FEMIB*, 146–153. https://orcid.org/0000-0001-9679-1545

Sayyadi Tooranloo, H., Hafizi Atabak, R., & Chehrehgosha, N. (2023). Risk Assessment in Sustainable Supply Chain with Failure Analysis Approach and its Effects in Intuitive Fuzzy Environment (Case study: Iran Central Iron Ore Company-Bafgh). *System Engineering and Productivity*, *3*(2), 61-88. (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2023.709552

Ullah, S., Xiaopeng, D., Anbar, D. R., Victor Amaechi, C., Kolawole Oyetunji, A., Ashraf, M. W., & Siddiq, M. (2024). Risk identification techniques for international contracting projects by construction professionals using factor analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, *15*(4), 102655. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102655

Vo, H. M., Yang, J.-B., & Rangasamy, V. (2025). Effective Risk Assessment of Complicated EPC Projects: A Case Study of Wastewater Treatment Plant Projects. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, *11*(2), 05025001. https://doi.org/10.1061/AJRUA6.RUENG-1533

Wang, J., Yu, J., Gu, X., Xie, M. L., & Ma, W. B. (2025). Integrated risk response decision-

(2021). Performances of K-Means Clustering Algorithm with Different Distance Metrics. *Intelligent Automation and Soft Computing*, *30*, 735–742. https://doi.org/10.32604/iasc.2021.019067

Gholamian, S. A. (2025). Evaluation and selection of sustainable suppliers by providing a decision support system based on a new data envelopment analysis model and cumulative star utility. *System Engineering and Productivity*, *4*(1), 1-13 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2025845.1198

Haghaniat, S., Moosavirad, S. H., & Namjoo, M. R. (2024). Prioritizing project risks by a transdisciplinary approach using the grey ordinal priority approach: A case study of an electricity distribution company. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, *15*. https://doi.org/10.22545/2024/00266

Hemmasian Etefagh, M. (2022). Identifying and evaluating factors affecting contractor selection using a combination of construction management perspectives and multi-criteria decision-making methods. *System Engineering and Productivity*, *2*(2), 105-121 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2022.243413

He, J., & Han, D. (2022). Evaluation of Key Factors of Logistics Risks for Overseas EPC Projects. *Advances in Civil Engineering*, *2022*(1), 4447399. https://doi.org/10.1155/2022/4447399

Hosseinpour, A. (2024). *Evaluation and prioritizing factors affecting occupational exposure to the chemical agent through multiple criteria decision-making (MCDM) in the petrochemical industry* [PhD Thesis, Universidade do Porto (Portugal)].

Jalhoom, R. J. K., & Mahjoob, A. M. R. (2024). An MCDM Approach for Evaluating Construction-Related Risks using a Combined Fuzzy Grey DEMATEL Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(2), 13572–13577. https://doi.org/10.48084/etasr.6959

Jin, H., & Goodrum, P. M. (2024). Prioritization of Personal Protective Equipment Plans for Construction Projects Based on an Integrated Analytic Network Process and Fuzzy VIKOR Method. *Applied Sciences*, *14*(21), 9904. https://doi.org/10.3390/app14219904

Khademvatani, A., Shokouhi, M., & Naami, F. (2024). Comprehensive Risk Identification and Prioritization for Engineering, procurement, and Construction (EPC) Projects: A Case of Karoon Oil and Gas Exploitation Company. *Industrial Management Perspective*, *14*(4), 257–292. https://doi.org/10.48308/jimp.14.4.257

Khodayari, R., Yazdani, M., Pourghader Chobar, A., & Salehan, S. T. (2024). Risk Management of Outsourcing Projects in Auto Parts Manufacturing Companies by Using Failure

making frameworks for EPC+PPP projects: A consideration of the dual status of the private sector. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 1–22. https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2024-0742

Yazdani Hoshyar, A., & Keshvari, A. (2023). Investigating and Formulating Anthropogenic Threats in Refinery Projects with a Combination of AHP-TOPSIS Method: A Case Study of Tehran Oil Refinery. *System Engineering and Productivity*, *2*(4), 94-119 (In Persian).
https://doi.org/10.22034/sep.2023.704334

Xu, Z. (2000). On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP. *European Journal of Operational Research*, 126 (3), 683–687. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00082-X

Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., & Turskis, Z. (2019). A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, *57*(9), 2501–2519. https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458

Yu, R., & Ma, L. (2025). Risk evaluation of mega infrastructure construction supply chain in engineering-procurement-construction projects: An integrated fuzzy AHP and fuzzy DEMATEL approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *32*(5), 3217–3235. https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2023-0472

Zhao, X. (2024). Construction risk management research: Intellectual structure and emerging themes. *International Journal of Construction Management*, *24*(5), 540–550. https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2167303