System Engineering and Productivity/ 2027/ Vol.7/ No.1/ 331-349

System Engineering and Productivity

10.22034/sep.2026.2094315.1526

An Integrated Fuzzy-Based Risk Management Model for Power Plant Maintenance

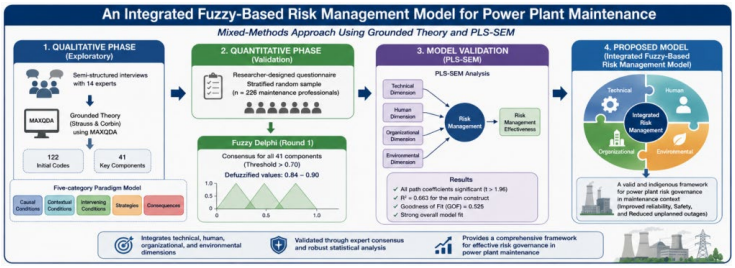
Mehdi Baghandeh[1], Arshad Farahmandian[1,*], Firouzeh Hajialiakbari[1], Mohammad Hasan Abdolahi[2]

[1] Department of Management, Za.c., Islamic Azad University, Zanjan, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, Za.c., Islamic Azad University, Zanjan, Iran

HIGHLIGHTS

- Mixed-methods design integrates grounded theory with fuzzy Delphi and PLS-SEM validation
- Fuzzy Delphi achieved expert consensus on all 41 components across 5 paradigm categories in one round
- PLS-SEM confirms a five-dimensional risk governance model with strong GOF = 0.525

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 13 July 2026
Revised: 30 August 2026
Accepted: 6 September 2026
Available online: 6 September 2026
*Correspondence:
afarahmandian110@iau.ac.ir
How to cite this article:
Baghandeh, M., Farahmandain, A., Hajialiakbari, F., & Abdolahi, M. H. (2027). An integrated fuzzy-based risk management model for power plant maintenance. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 331-349.

Keywords:
Risk management
Fuzzy logic
Fuzzy Delphi method
Maintenance and Repair (M&R)
Grounded theory
PLS-SEM

ABSTRACT

Effective risk management in power plant maintenance and repair (M&R) is critical for ensuring operational reliability and minimizing unexpected downtime. This study designs and validates an optimal risk management model for power plant M&R by integrating fuzzy logic with an exploratory sequential mixed-methods approach. In the qualitative phase, semi-structured interviews (17 conducted; theoretical saturation confirmed from the 14th interview onward) with domain experts—analyzed via grounded theory (Strauss and Corbin) in MAXQDA yielded 122 initial codes and 41 key components organized into a five-category paradigm model (causal conditions, contextual conditions, intervening conditions, strategies, and consequences). In the quantitative phase, a researcher-designed questionnaire was administered to a stratified random sample of n=226 power plant M&R specialists. Fuzzy Delphi confirmed expert consensus above the 0.70 threshold for all 41 components in a single round (defuzzified values 0.84–0.90). Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) validated the conceptual model: all path coefficients were statistically significant ($t > 1.96$), $R^2 = 0.663$ for the core Risk Management construct, and the overall model fit index (GOF = 0.525) confirmed strong fit. The proposed model which integrates technical, human, organizational, and environmental dimensions provides a validated, locally grounded framework for power plant risk governance in Iran.

2538-2195/© 2027 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

Sustainable supply of electrical energy is a fundamental requirement for economic and industrial development, and power plants, as critical infrastructures for electricity generation, play a decisive role in energy security and reliability (Shojaei & Haeri, 2019). Continuous safe and efficient operation of these units depends largely on the effectiveness of maintenance and repair (M&R) systems. Power plant equipment is characterized by complex structures, advanced technology, and high capital costs; any disruption can lead to production stoppages, reduced system reliability, increased operational costs, and safety or environmental hazards (Ke et al., 2023). Consequently, effective management of M&R activities is not only a technical necessity but also a strategic imperative. Systematic identification and evaluation of risks associated with M&R processes can prevent critical failures, optimize resource allocation, and enhance equipment reliability and operational continuity.

Risk management, as a systematic approach to identifying, analyzing, evaluating, and controlling uncertainties, has gained particular importance in improving the performance of M&R systems (Dorfeshan et al., 2022). However, risk assessment in complex industrial environments faces significant challenges: many decisions rely on expert judgment and incomplete information, and classical deterministic methods often fail to provide an accurate picture of the actual risk situation (Panchal & Kumar, 2017). In response, fuzzy-logic-based approaches have been employed to model uncertainty (Shetwan et al., 2025), the fuzzy Delphi method has been used to extract expert consensus and refine indicators, and structural equation modeling has enabled testing of theoretical model structures.

Despite the growing importance of risk management in power plant M&R, three major research gaps persist in the literature. First, existing models predominantly examine technical dimensions in isolation and overlook the systemic interactions among technical, human, organizational, and environmental dimensions (Shetwan et al., 2025). Second, most models treat uncertainty statically and pay insufficient attention to the temporal dynamics of equipment degradation (Ke et al., 2023). Third, no validated and locally adapted framework exists for the Iranian power sector that accounts for specific constraints such as infrastructure aging. Accordingly, the present study aims to design and validate an integrated fuzzy-based risk management model for power plant M&R using an exploratory sequential mixed-methods approach.

2. Methodology

This applied research follows an exploratory sequential mixed-methods design (Corbin et al., 2008). The spatial scope covers Iranian thermal and combined-cycle power plants, and the temporal scope spans the years 1403–1405 (Persian calendar).

In the qualitative phase, semi-structured interviews (45–90 minutes) were conducted with 17 domain experts selected through purposive sampling (theoretical saturation confirmed from the 14th interview onward). The experts included safety, health, and environment specialists as well as operational personnel with direct responsibility for M&R in thermal power plants. Interview data were analyzed using the systematic grounded-theory coding procedures of Corbin and Strauss (Corbin et al., 2008) in MAXQDA software. The analysis proceeded through open coding (122 initial codes), axial coding (41 key components), and selective coding (extraction of the paradigmatic model). Qualitative validation was performed via member checking, systematic comparison with the literature, methodological triangulation, external expert review, practical applicability assessment, and presentation in scientific sessions.

In the quantitative phase, the statistical population comprised managers, experts, and specialists in power plant M&R across Iran. Sample size was determined as 226 using G*Power software (effect size, power = 0.90, number of predictors = 41). A total of 250 questionnaires were distributed and 226 valid responses were returned (response rate ≈ 90.4 %). Stratified random sampling was employed according to power-plant type (thermal, gas, combined-cycle, hydro) and organizational level. A researcher-designed questionnaire based on the 41 components extracted from the qualitative phase and employing a five-point Likert scale was developed. Content validity was confirmed by content validity ratio (CVR ≥ 0.62) and content validity index (CVI ≥ 0.79) with the judgment of 10 subject-matter experts. Reliability was assessed by Cronbach's alpha and composite reliability (both > 0.70). Data analysis was performed using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) in SmartPLS 4.0.

To manage epistemic uncertainty in expert judgments, triangular fuzzy numbers were employed. A five-level linguistic scale was mapped onto triangular fuzzy numbers, and defuzzification was conducted by the center-of-gravity method. Components whose defuzzified values were ≥ 0.70 were retained as valid indicators for the quantitative model.

3. Results and Discussion

Systematic coding of the interview data yielded 122 initial codes that were aggregated into 41 key components. Selective coding organized these components within the Strauss–Corbin paradigmatic model. The core category was defined as "design and implementation of a comprehensive risk-management model for power plant maintenance and repair." The 41 components were distributed across five paradigmatic categories:

causal conditions (8 components), contextual conditions (9), intervening conditions (6), strategies (9), and consequences (9).

The paradigmatic model indicates that risk management in power plant M&R is primarily driven by a cluster of causal conditions, equipment failure probability, causes and severity of human error, fire risks, unsafe acts, and severe accidents that interact with contextual conditions (specific technical environments of different plant types) and are moderated by intervening conditions (especially safety culture and decision-making frameworks). Strategies such as preventive actions, effective control methods, and risk training convert the causal forces into operational outcomes.

After the first round of the fuzzy Delphi method with 14 experts, fuzzy and defuzzified values were calculated for all 41 components. The lower fuzzy bound (L) was ≥ 0.70 for every component, the upper bound (U) equaled 1.00 in all cases, and no defuzzified value fell below 0.84. This strong single-round convergence, unusual in typical Delphi applications that require two or three rounds, reflects a shared risk schema among Iranian power plant specialists, most likely arising from common institutional constraints (regulatory standards and MAPNA Group procedures). All 41 components were therefore retained.

Measurement-model evaluation in SmartPLS 4.0 confirmed satisfactory construct reliability (Cronbach's alpha and composite reliability > 0.70 for all constructs), convergent validity (AVE > 0.50 for all constructs), and discriminant validity (Fornell–Larcker criterion satisfied; HTMT ratios < 0.90). Structural-model results from bootstrapping (5 000 resamples) showed that all five hypothesized path coefficients were statistically significant ($t > 1.96$, $p < 0.05$). The coefficient of determination for the core construct "risk management" was $R^2 = 0.663$, indicating that 66.3 % of its variance is explained solely by causal conditions. R^2 for strategies reached 0.926 and for consequences 0.414. These values exceed those reported in comparable studies (Ke et al., 2023). The overall goodness-of-fit index (GOF = 0.525), calculated according to the formula proposed by Tenenhaus et al. (2005), indicated strong model fit according to the thresholds of Wetzels et al. (2009) (0.10 = weak, 0.25 = moderate, 0.36 = strong). Blindfolding further confirmed predictive relevance (positive Q^2 values for all endogenous constructs).

Theoretically, the identification of causal conditions as the primary structural drivers of risk aligns with prior findings that equipment complexity and operational intensity are the most important antecedents of M&R risk (Panchal & Kumar, 2017). The grounded-theory approach, however, provides a more comprehensive picture by positioning human error and unsafe acts as systemic causal factors rooted in organizational culture and structure rather than merely as operational outcomes. This result is consistent with findings that approximately 60 % of power-plant accidents are attributable to human error (Aliabadi et al., 2024). Distinguishing safety culture as an intervening rather than a purely contextual condition further enriches existing theoretical frameworks (Seker & Zavadskas, 2017; Dorfeshan et al., 2022) and is consistent with high-reliability-organization theory. Practically, the validated five-category model supplies plant managers with a structured framework for risk governance. Energy isolation management, effective control methods, and supervisory efficacy emerged as the highest-priority strategic components (defuzzified values = 0.90) and should therefore receive priority in resource allocation and improvement programs. Simultaneous cultural interventions are essential, because the effectiveness of technical controls depends on the development of safety culture, managerial commitment, and employee participation.

4. Conclusions

By integrating grounded theory, the fuzzy Delphi method, and PLS-SEM within a fuzzy-logic framework, this study successfully designed and validated a comprehensive, locally grounded, and scientifically robust model for risk management in power plant maintenance and repair. The model organizes 41 key components into five paradigmatic categories (causal conditions, contextual conditions, intervening conditions, strategies, and consequences) and thereby offers a holistic representation of the factors influencing risk management and their interactions in operational power plant environments.

Empirical validation confirmed that all hypothesized structural relationships are statistically significant ($t > 1.96$, $p < 0.05$) and that the overall model fit is strong (GOF = 0.525), with R^2 values ranging from 0.414 to 0.926 for the key constructs. The study advances the risk-management literature by elevating human and organizational factors, particularly human error and safety culture, from peripheral or environmental variables to core structural categories within the paradigmatic model.

Effective risk management in power plant M&R therefore requires an integrated, systemic, and multidimensional approach that simultaneously addresses technical factors, human error, safety culture, planning and execution systems, organizational conditions, and operational-environment characteristics. the proposed integrated fuzzy-based risk management model for power plant M&R represents a meaningful contribution to both theory and practice. It offers a locally adapted, multidimensional, and scientifically validated solution that addresses the specific needs of the Iranian power sector. By enabling proactive risk identification, evaluation, prioritization, and control, the model is expected to significantly enhance operational safety, equipment reliability,

organizational performance, and overall sustainability of the power industry in Iran.

Acknowledgments

The authors sincerely thank the Editor-in-Chief, the anonymous reviewers, and the editorial staff for their constructive feedback and timely handling of the manuscript.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Author contributions

Mehdi Baghandeh: Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Arshad Farahmandian:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing; **Firouzeh Hajialiakbari:** Supervision, Writing – review & editing; **Mohammad Hasan Abdolahi:** Supervision, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Data available on request: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

Aliabadi, M. M., Mohammadfam, I., & Khorshidikia, S. (2024). Human error identification and risk assessment in loading and unloading of petroleum products by road trucks using the SHERPA and fuzzy inference system method. *Heliyon*, *10*(15). e34072. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34072

Corbin, J. M., Strauss, A. L., & Strauss, A. L. (2008). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (Vol. 3). Thousand Oaks, CA: sage.

Dorfeshan, Y., Mousavi, S. M., & Vahdani, B. (2022). Determining critical paths of projects by a new hybrid approach based on developed MULTIMOORA and SWARA methods under consideration of time, cost, quality, risk and safety criteria in an interval type-2 fuzzy environment. *Industrial Management Studies*, *20*(67), 85-119 (In Persian). https://doi.org/10.22054/jims.2022.25775.1887

Ke, Y., Lu, L., & Luo, X. (2023). Identification and formation mechanism of key elements of supply chain resilience: Exploration based on grounded theory and verification of SEM. *Plos one*, *18*(11), e0293741. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293741

Panchal, D., & Kumar, D. (2017). Risk analysis of compressor house unit in thermal power plant using integrated fuzzy FMEA and GRA approach. *International Journal of industrial and systems Engineering*, *25*(2), 228-250. https://doi.org/10.1504/IJISE.2017.081519

Seker, S., & Zavadskas, E. K. (2017). Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites. *Sustainability*, *9*(11), 2083. https://doi.org/10.3390/su9112083

Shetwan, A. G., Rekik, S., & Ghlaio, Y. (2025). A hybrid failure mode and effects analysis with decision-making trial and evaluation laboratory approach for enhanced fault assessment in power plants. *Energy Exploration & Exploitation*, *43*(6), 2604-2636. https://doi.org/10.1177/01445987251350736

Shojaei, P., & Haeri, S. A. S. (2019). Development of supply chain risk management approaches for construction projects: A grounded theory approach. *Computers & Industrial Engineering*, *128*, 837-850. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.045

Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y.-M., & Lauro, C. (2005). PLS path modeling. *Computational Statistics & Data Analysis, 48*(1), 159–205. https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.03.005

Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S., Sliwinski, P., & Zimroz, R. (2022). Fuzzy risk-based maintenance strategy with safety considerations for the mining industry. *Sensors*, *22*(2), 441. https://doi.org/10.3390/s22020441

Wetzels, M., Odekerken-Schröder, G., & van Oppen, C. (2009). Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration. *MIS Quarterly, 33*(1), 177–195. https://doi.org/10.2307/20650284

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۳۳۱-۳۴۹

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

10.22034/sep.2026.2094315.1526

مدل یکپارچه مدیریت ریسک مبتنی بر رویکرد فازی در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی

مهدی باغنده[۱]، ارشد فرهمندیان[۱،*]، فیروزه حاجی‌علی‌اکبری[۱]، محمدحسن عبدالهی[۲]

[۱] گروه مدیریت، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

[۲] گروه مهندسی صنایع، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- طرح پژوهشی آمیخته با تلفیق نظریه داده‌بنیاد، دلفی فازی و اعتبارسنجی PLS-SEM.
- اجماع خبرگان در مرحله اول دلفی فازی برای تمامی ۴۱ مؤلفه در ۵ مقوله پارادایمی تأیید شد.
- مدل پنج‌بعدی مدیریت ریسک با مقدار GOF = 0.525 از برازش قوی برخوردار است.

چکیده

مدیریت مؤثر ریسک در نگهداری و تعمیرات (نت) نیروگاهی برای تضمین قابلیت اطمینان عملیاتی و کاهش توقف‌های ناخواسته امری حیاتی است. این پژوهش با هدف طراحی و اعتبارسنجی مدل بهینه مدیریت ریسک در نت نیروگاهی با بهره‌گیری از رویکرد آمیخته اکتشافی متوالی انجام شده است. در مرحله کیفی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۷ (با اشباع نظری از مصاحبه چهاردهم) خبره حوزه تحلیل‌شده با نظریه داده‌بنیاد (سبک استراوس و کوربین) در MAXQDA منجر به استخراج ۱۲۲ کد اولیه و ۴۱ مؤلفه کلیدی در قالب مدل پارادایمی پنج‌مقوله‌ای (شرایط علّی، زمینه‌ای، مداخله‌گر، راهبردها و پیامدها) شد. در مرحله کمّی، پرسشنامه محقق‌ساخته به نمونه‌ای تصادفی طبقه‌ای از ۲۲۶ متخصص نت نیروگاهی ارائه گردید. دلفی فازی اجماع خبرگان بالاتر از آستانه ۰/۷۰ را برای تمام ۴۱ مؤلفه در مرحله اول (مقادیر فازی‌زدایی‌شده ۰/۸۴ تا ۰/۹۰) تأیید کرد. مدل‌سازی معادلات ساختاری با حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) مدل مفهومی را اعتبارسنجی کرد: همه ضرایب مسیر از نظر آماری معنادار بودند ($t > 1.96$)، $R^2 = 0.663$ برای متغیر اصلی مدیریت ریسک، و شاخص برازش کلی GOF = 0.525 برازش قوی را تأیید کرد. مدل پیشنهادی با یکپارچه‌سازی ابعاد فنی، انسانی، سازمانی و محیطی، چارچوبی معتبر و بومی برای حاکمیت ریسک نیروگاهی در ایران ارائه می‌دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

*نویسنده مسئول:

afarahmandian110@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

مدیریت ریسک

منطق فازی

روش دلفی فازی

نگهداری و تعمیرات (نت)

نظریه داده‌بنیاد

مدل‌سازی معادلات ساختاری با حداقل مربعات جزئی

©۲۰۲۷ 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

تأمین پایدار انرژی الکتریکی یکی از الزامات اساسی توسعه اقتصادی و صنعتی کشورها به شمار می‌رود و نیروگاه‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی تولید برق، نقشی تعیین‌کننده در پایداری و امنیت انرژی ایفا می‌کنند (Shojaei & Haeri, 2019). استمرار عملکرد ایمن و کارآمد این واحدها تا حد زیادی به کارایی نظام نگهداری و تعمیرات وابسته است. تجهیزات نیروگاهی با ساختاری پیچیده، فناوری پیشرفته و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بسیار بالا هرگونه اختلال در عملکردشان می‌تواند پیامدهایی نظیر توقف تولید، کاهش قابلیت اطمینان سیستم، افزایش هزینه‌های عملیاتی و مخاطرات ایمنی و زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد (Ke et al., 2023). از این‌رو، مدیریت اثربخش فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات نه‌تنها یک ضرورت فنی، بلکه یک الزام راهبردی محسوب می‌شود. در این راستا، شناسایی و ارزیابی نظام‌مند ریسک‌های مرتبط با فرایندهای نگهداری و تعمیرات می‌تواند نقش مهمی در پیشگیری از خرابی‌های بحرانی، تخصیص بهینه منابع و ارتقای قابلیت اطمینان و تداوم بهره‌برداری از تجهیزات نیروگاهی ایفا کند.

مدیریت ریسک[1] به‌عنوان رویکردی نظام‌مند برای شناسایی، تحلیل، ارزیابی و کنترل عدم‌قطعیت‌ها، جایگاه ویژه‌ای در بهبود عملکرد سیستم‌های نگهداری و تعمیرات یافته است (Dorfeshan et al., 2022). با این حال، ارزیابی ریسک در محیط‌های پیچیده صنعتی با چالش‌هایی همراه است؛ بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر قضاوت‌های کارشناسی و اطلاعات ناقص است. روش‌های قطعی کلاسیک ممکن است نتوانند تصویر دقیقی از وضعیت واقعی ریسک ارائه دهند (Panchal & Kumar, 2017). در پاسخ به این چالش، رویکردهای مبتنی بر منطق فازی[2] (FL) برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت مورد توجه قرار گرفته‌اند (Shetwan et al., 2025). روش دلفی فازی[3] (FDM) نیز در استخراج اجماع خبرگان و پالایش شاخص‌ها کاربرد دارد، و مدل‌سازی معادلات ساختاری[4] (SEM) امکان آزمون ساختار نظری مدل‌ها را فراهم می‌کند.

با وجود اهمیت روزافزون مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی، سه شکاف پژوهشی اساسی در ادبیات وجود دارد: نخست، مدل‌های موجود عمدتاً ابعاد فنی را به‌صورت مجزا بررسی کرده و تعاملات سیستمی ابعاد فنی، انسانی، سازمانی و محیطی را نادیده می‌گیرند (Shetwan et al., 2025). دوم، اکثر مدل‌ها عدم قطعیت را به‌صورت ایستا مدل می‌کنند و به پویایی زمانی تخریب تجهیزات توجه نمی‌کنند (Ke et al., 2023). سوم، هیچ چارچوب معتبر و بومی‌شده‌ای برای بخش نیروگاهی ایران با محدودیت‌های خاص از جمله فرسودگی زیرساخت‌ها وجود ندارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف طراحی و اعتبارسنجی مدلی یکپارچه برای مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی با رویکرد فازی و آمیخته انجام شده است (Babazadeh & Sadeghpour, 2022؛ Izadi-Yazdanabadi & Mohammadbagheri, 2024؛ Shakerikenari, E., & Safaei Ghadikalai, 2019؛ Motalebinejad et al., 2024؛ Yusoff et al., 2024؛ Shojaeimehr, S., & Rahmani, 2022).

۲- مرور مبانی نظری و پیشنیه پژوهش

۲-۱- ریسک در محیط نگهداری و تعمیرات نیروگاهی

نیروگاه‌ها از جمله پیچیده‌ترین سامانه‌های صنعتی هستند که پایداری عملکردشان نقش مستقیمی در امنیت انرژی دارد (Eti et al., 2007). در این سامانه‌ها، نگهداری و تعمیرات نه‌تنها فعالیتی پشتیبان، بلکه مؤلفه اصلی تضمین قابلیت اطمینان تجهیزات محسوب می‌شود. ریسک در نگهداری و تعمیرات فرآیندی نظام‌مند برای شناسایی، تحلیل، ارزیابی، اولویت‌بندی و کنترل عوامل تهدیدکننده عملکرد است (Makajić-Nikolić, 2020). ریسک‌ها از منشأهای متعددی مانند فرسودگی تجهیزات، خطاهای انسانی، ضعف برنامه‌ریزی، محدودیت منابع و نوسانات عملیاتی ناشی می‌شوند و در تعامل با یکدیگر اثرات مرکبی ایجاد می‌کنند (Khan et al., 2003).

ریسک در سیستم‌های نگهداری و تعمیرات نیروگاهی ماهیتی چندسطحی و پویا دارد: ریسک‌های فنی به قابلیت اطمینان تجهیزات وابسته‌اند؛ ریسک‌های انسانی شامل مهارت نیروی انسانی، خطاهای اپراتوری و کیفیت

[1] Risk Management (RM)
[2] Fuzzy Logic (FL)
[3] Fuzzy Delphi Method (FDM)
[4] Structural Equation Modeling (SEM)

تصمیم‌گیری هستند؛ عوامل سازمانی مانند ضعف در سیاست‌گذاری و نبود فرهنگ ایمنی سطح ریسک را افزایش می‌دهند؛ و شرایط محیطی و بیرونی بر وضعیت ریسک اثرگذارند (Aliabadi et al., 2024). این تنوع و درهم‌تنیدگی عوامل ریسک ارزیابی صرفاً با روش‌های خطی و قطعی را ناممکن می‌سازد.

۲-۲- محدودیت رویکرد های سنتی و رویکرد فازی

رویکردهای سنتی مدیریت ریسک در محیط‌های نیروگاهی با محدودیت‌های اساسی روبه‌رو هستند: اتکا به داده‌های قطعی و روابط خطی در حالی که اطلاعات واقعی نت نیروگاهی ناقص و متکی بر ادراک کارشناسان است (Tubis et al., 2022)؛ ناتوانی در تحلیل روابط متقابل بین عوامل ریسک؛ و ناتوانی در ترکیب ابعاد کیفی و کمی در یک چارچوب منسجم در تحقیق انجام شده توسط نمازین و بهبودیان (Namazian & Behboodian, 2023). منطق فازی این محدودیت‌ها را از طریق تعریف درجات عضویت و بیان طیفی واقعیت برطرف می‌کند. مفاهیمی مانند «ریسک بالا»، «احتمال متوسط» و «شدت زیاد» در ارزیابی‌های کارشناسی رایج‌اند و رویکرد فازی امکان: (۱) تبدیل قضاوت‌های زبانی به مقادیر تحلیلی؛ (۲) مدیریت عدم‌قطعیت اپیستمیک؛ و (۳) وزن‌دهی شاخص‌ها و اولویت‌بندی ریسک‌ها را فراهم می‌کند (Ghorbani Noe, 2022؛ Shetwan et al., 2025).

۲-۳- جمع بندی پیشینه و شکاف پژوهشی

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش‌های موجود با استفاده از روش‌های کلاسیک، از جمله تحلیل حالات خرابی و آثار آن[1] و تحلیل درخت خطا[2]، و همچنین رویکردهای فازی، از جمله فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی[3]، روش ترجیح بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل فازی[4] و روش دلفی فازی، دستاوردهای ارزشمندی ارائه داده‌اند. با این حال، شکاف‌های پژوهشی مشخصی همچنان باقی است: اولاً، هیچ مدل معتبری با رویکرد آمیخته نظریه داده بنیاد PLS-SEM برای صنعت نیرو گاهی ایران وجود ندارد. ثانیاً، خطای انسانی و عوامل سازمانی به عنوان مقوله‌های علی ساختار یافته مدل نشده‌اند. ثالثاً، چارچوب های وارداتی با محدودیتهای خاص صنعت برق ایران از جمله فرسودگی زیرساختهای، محدودیتهای تأمین قطعات و الگوی مدیریتی خاص سازگار نیستند (Khan et al., 2003). پژوهش حاضر با رویکرد آمیخته متوالی اکتشافی هر سه شکاف را هدف قرار داده است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- طرح پژوهشی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و به لحاظ رویکرد، آمیخته اکتشافی متوالی است (Corbin et al., 2008). قلمرو مکانی پژوهش، صنعت نیروگاهی ایران (نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی) و قلمرو زمانی آن سال‌های ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۵ است.

۳-۲- مرحله کیفی: نظریه داده‌بنیاد

مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته (۴۵ تا ۹۰ دقیقه) با ۱۴ خبره منتخب به روش هدفمند شامل متخصصین مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست و متخصصان اجرایی دارای مسئولیت مستقیم در حوزه نت نیروگاه‌های حرارتی تا رسیدن به اشباع نظری انجام شد (۱۷ مصاحبه انجام شد؛ اشباع نظری از مصاحبه چهاردهم تأیید گردید). داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها با استفاده از روش کدگذاری نظام‌مند کوربین و همکاران در سال ۲۰۰۸ (Corbin et al., 2008) در نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شدند و فرآیند تحلیل از طریق کدگذاری باز (۱۲۲ کد اولیه)، کدگذاری محوری (۴۱ مؤلفه) و کدگذاری انتخابی (استخراج مدل پارادایمی) انجام گرفت. اعتبارسنجی مرحله کیفی از طریق بازبینی توسط مشارکت‌کنندگان، مقایسه نظام‌مند با ادبیات پژوهش، مثلث‌بندی روشی، ارزیابی توسط خبرگان خارج از پژوهش، بررسی قابلیت کاربست عملی و ارائه در نشست‌های علمی انجام شد.

۳-۳- مرحله کمی: PLS-SEM

[1] Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)
[2] Fault Tree Analysis (FTA)
[3] Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)
[4] Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

جامعه آماری پژوهش شامل مدیران، کارشناسان و متخصصان حوزه نگهداری و تعمیرات نیروگاه‌های کشور بود. حجم نمونه با استفاده از نرم‌افزار G*Power برابر با ۲۲۶ نفر تعیین شد (اندازه اثر $f^2 = 0.15$ ، $\alpha = 0.05$، توان برابر با ۰/۹۰، تعداد پیش‌بین‌ها برابر با ۴۱) در مجموع ۲۵۰ پرسشنامه توزیع و ۲۲۶ پرسشنامه معتبر و قابل استفاده بازگردانده شد (نرخ پاسخ‌دهی تقریبا برابر با ۹۰/۴٪). نمونه‌گیری به روش تصادفی طبقه‌ای (متناسب با نوع نیروگاه شامل حرارتی، گازی، سیکل ترکیبی و آبی و نیز سطح سازمانی) انجام گرفت. تعداد دقیق نیروگاه‌های مورد بررسی و سهم هر طبقه از نمونه در مستندات موجود در زمان این بازنگری ثبت نشده و به‌عنوان یک مورد باز در بخش محدودیت‌های پژوهش ذکر شده است. پرسشنامه محقق‌ساخته بر اساس ۴۱ مؤلفه استخراج‌شده از مرحله کیفی و با مقیاس پنج‌گزینه‌ای لیکرت طراحی شد. روایی محتوایی ابزار از طریق نسبت روایی محتوا (CVR ≥0.62) و شاخص روایی محتوا (CVI ≥0.79) و با نظر ۱۰ خبره موضوعی تأیید شد. پایایی ابزار نیز با استفاده از آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی (هر دو بالاتر از ۰/۷۰) ارزیابی گردید. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) در نرم‌افزار Smart PLS 4.0 انجام شد.

۴-۳- تحلیل دلفی فازی

به‌منظور مدیریت عدم‌قطعیت اپیستمیک در قضاوت‌های خبرگان، از اعداد فازی مثلثی استفاده شد. مقیاس زبانی پنج‌سطحی به اعداد فازی مثلثی نگاشت شد: خیلی‌کم = (۰، ۰، ۰/۲۵)، کم = (۰، ۰/۲۵، ۰/۵)، متوسط = (۰/۲۵، ۰/۵، ۱)، زیاد = (۰/۵، ۰/۷۵، ۱)، خیلی‌زیاد = (۰/۷۵، ۱، ۱). فرآیند فازی‌زدایی با استفاده از روش مرکز ثقل انجام شد ($D(\tilde{a}) = (l + m + u)/3$). بر اساس معیارهای دلفی فازی، مؤلفه‌هایی که مقدار فازی‌زدایی‌شده آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۷۰ بود، به‌عنوان شاخص‌های معتبر در مدل کمّی حفظ شدند.

۴-یافته‌های پژوهش

۴-۱- یافته‌های کیفی: مدل پارادایمی

کدگذاری نظام‌مند داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها منجر به استخراج ۱۲۲ کد اولیه و تجمیع آن‌ها در قالب ۴۱ مؤلفه کلیدی شد. در ادامه، کدگذاری انتخابی این مؤلفه‌ها را در چارچوب مدل پارادایمی استراوس و کوربین سازمان‌دهی کرد. مقوله محوری پژوهش عبارت است از: «طراحی و پیاده‌سازی الگوی جامع مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی». این مقوله بر اساس چهار معیار برخاسته از داده‌ها به‌عنوان مقوله هسته انتخاب شد: در تمامی مصاحبه‌ها و تجربه‌های خبرگان به‌صورت منسجم تکرار و تأکید شده بود؛ توانایی پیوند دادن تمامی مقوله‌های دیگر (شرایط علّی، زمینه‌ای، مداخله‌گر، راهبردها و پیامدها) را داشت؛ امکان تبیین کامل پدیده اصلی پژوهش را فراهم می‌کرد؛ و سایر مقوله‌ها ماهیتاً حول این مقوله جایگاه سازمان‌یافته و نتیجه‌بخش خود را می‌یافتند. **جدول ۱**، توزیع ۴۱ مؤلفه استخراج‌شده در مقوله‌های پارادایمی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. توزیع ۴۱ مؤلفه در مقوله‌های مدل پارادایمی

Table 1. Distribution of the 41 components across the categories of the paradigmatic model

مقوله پارادایمی	تعداد	مؤلفه‌های کلیدی
شرایط علّی	۸	ریسک‌های اصلی؛ ریسک‌های حریق؛ ریسک‌های محیطی/الکتریکی؛ حوادث شدید؛ شدت خطای انسانی؛ علل خطای انسانی؛ احتمال خرابی تجهیزات؛ اعمال ناایمن
شرایط زمینه‌ای	۹	ریسک‌های نوظهور؛ ریسک‌های خورشیدی/بادی/سیکل ترکیبی؛ تفاوت نوع نیروگاه؛ ریسک‌های عملیاتی؛ ریسک‌های شیمیایی؛ ریسک‌های توربین/تخصصی؛ ریسک‌های محیطی /تولیدی؛ الگوی زمانی حوادث
شرایط مداخله‌گر	۶	موانع ایمنی؛ کفایت استانداردها؛ فرهنگ ایمنی؛ چالش‌های آینده؛ الگوی زمانی خطرات؛ نوع تصمیم‌گیری
راهبردها	۹	اقدامات پیشگیرانه؛ روش‌های کنترل مؤثر؛ کارآمدی نظارت؛ بهبود مدیریت ریسک؛ مدل‌های ریاضی تحلیل ریسک؛ مکمل بودن مدل‌ها؛ آموزش ریسک؛ کمیته‌های ریسک؛ مدیریت ایزولاسیون انرژی
پیامدها	۹	بهبود تصمیم‌گیری نهایی؛ مدیریت کار در ارتفاع؛ مدیریت کار گرم؛ مدیریت مواد شیمیایی؛ مدیریت تغییر؛ اصلاح اعمال ناایمن؛ عوامل مدل جامع ریسک؛ ریسک‌های ارتفاع؛ بهبود تصمیم‌گیری

مطابق با شکل ۱، مدل پارادایمی پنج‌مقوله‌ای نشان می‌دهد که مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی اساساً توسط خوشه‌ای از شرایط علّی هدایت می‌شود احتمال خرابی تجهیزات، علل و شدت خطای انسانی، ریسک‌های حریق، اعمال ناایمن و حوادث شدید که با شرایط زمینه‌ای (محیط‌های فنی خاص نوع نیروگاه) تعامل دارند و توسط شرایط مداخله‌گر (به‌ویژه فرهنگ ایمنی و چارچوب‌های تصمیم‌گیری) تعدیل می‌شوند. راهبردهایی مانند اقدامات پیشگیرانه، روش‌های کنترل مؤثر و آموزش ریسک، نیروهای علّی را به پیامدهای عملیاتی تبدیل می‌کنند.

۴-۲- نتایج دلفی فازی

پس از اجرای مرحله نخست روش دلفی فازی و جمع‌آوری نظرات ۱۴ خبره، مقادیر فازی و فازی‌زدایی‌شده برای تمامی ۴۱ مؤلفه محاسبه گردید. حد پایین فازی (L) برای همه مؤلفه‌ها ≤ ۰/۷۰، حد بالا (U) در همه موارد برابر ۱/۰۰ و مقدار فازی‌زدایی‌شده برای هیچ مؤلفه‌ای کمتر از ۰/۸۴ نبود. این همگرایی قوی که در کاربردهای دلفی معمولاً نیاز به ۲-۳ مرحله دارد نشان‌دهنده طرحواره ریسک مشترک بین متخصصان نیروگاهی ایران است. این کفایت تک‌مرحله‌ای، هرچند در کاربردهای دلفی غیرمتعارف است، با هم‌گرایی روش‌شناختی سه‌گانه پشتیبانی می‌شود: ساختار پنج‌مقوله‌ای و ۴۱ مؤلفه‌ای مشابه، مستقل از یکدیگر، از سه مسیر تحلیلی متفاوت به‌دست آمد کدگذاری داده‌بنیاد مصاحبه‌ها، تحلیل عاملی اکتشافی گویه‌های کمّی و فرایند اجماع دلفی فازی که شاهدی هم‌گرا بر این است که ادامه فرایند دلفی به دورهای بعدی، احتمالاً مجموعه مؤلفه‌های پذیرفته‌شده را تغییر نمی‌داد. این هم‌گرایی، در کنار طرحواره ریسک مشترکی که احتمالاً ناشی از مواجهه مشترک خبرگان با محدودیت‌های نهادی یکسان (استانداردهای نظارتی، رویه‌های گروه مپنا) است، از تصمیم به خاتمه فرایند پس از دور نخست پشتیبانی می‌کند. تمامی ۴۱ مؤلفه در مرحله اول تأیید شدند. جدول ۲ نتایج کامل دلفی فازی را نشان می‌دهد. در مجموع، نتایج این مرحله بیانگر آن است که مؤلفه‌های شناسایی‌شده از پشتوانه قابل‌قبولی از اجماع خبرگان برخوردار بوده و می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای مراحل بعدی تحلیل، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۳- نتایج مدل اندازه‌گیری

تحلیل داده‌های کمّی در SmartPLS 4.0 انجام گرفت. مدل اندازه‌گیری از نظر پایایی سازه، روایی همگرا و روایی واگرا ارزیابی شد.

۴-۳-۱- پایایی سازه‌ها

آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی برای همه سازه‌ها از ۰/۷۰ بالاتر بود که انسجام درونی مطلوب را تأیید می‌کند (جدول ۳).

۴-۳-۲- روایی همگرا

مقادیر میانگین واریانس استخراج‌شده[1] (AVE) برای همه سازه‌ها از ۰/۵۰ بالاتر بود که توانایی مناسب سازه‌ها در تبیین واریانس شاخص‌های مربوطه را تأیید می‌کند (جدول ۴).

۴-۳-۳- روایی واگرا

با استفاده از معیار فورنل-لارکر، ریشه دوم AVE هر سازه از ضرایب همبستگی آن با سایر سازه‌ها بیشتر بود که تمایز مفهومی بین همه ابعاد را تأیید می‌کند (جدول ۵).

۴-۴- نتایج مدل ساختاری

۴-۴-۱- ضرایب مسیر و معناداری

آزمون بوت‌استرپ (۵۰۰۰ نمونه‌گیری مجدد) تأیید کرد که هر پنج رابطه مسیر فرض‌شده در مدل از نظر آماری معنادار هستند ($p < 0.05$ ،$t > 1.96$). جدول ۶ به همراه شکل ۲ و شکل ۳ نتایج کامل ضرایب مسیر را نشان می‌دهد.

۴-۴-۲- ضریب تعیین (R^2)

مقدار R^2 برای متغیر اصلی مدیریت ریسک برابر ۰/۶۶۳ بود که نشان می‌دهد ۶۶/۳٪ از واریانس آن صرفاً توسط

[1] Average Variance Extracted (AVE)

شرایط علّی، به‌عنوان تنها پیش‌آیند ساختاری آن ($\beta = 0.814$)، تبیین می‌شود. R^2 برای راهبردها ۰/۹۲۶ است که برآیند سهم هم‌زمان مدیریت ریسک ($\beta = 0.348$)، شرایط زمینه‌ای ($\beta = 0.317$) و شرایط مداخله‌گر ($\beta = 0.325$) به‌عنوان سه پیش‌بین موازی این سازه است. مقدار R^2 برای پیامدها ۰/۴۱۴ بود. این مقادیر از مدل‌های مشابه در ادبیات موضوع یعنی مرجع (Ke et al., 2023) بالاتر است ($R^2 = 0.54$).

شکل ۱. الگوی نهایی مدل پارادایمی مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی.

Figure 1. Final paradigmatic model of risk management in power plant maintenance and repairs.

جدول ۲. میانگین فازی نظرات خبرگان در مرحله نخست نظرسنجی و مقدار فازی‌زدایی‌شده

Table 2. Fuzzy mean of experts' opinions in the first stage of the survey and the defuzzified value

شماره	مؤلفه‌های مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی	میانگین فازی	میانگین فازی‌زدایی‌شده
۱	ریسک‌های اصلی	(۱/۰۰ ،۰/۹۰ ،۰/۷۰)	۰/۸۷
۲	ریسک‌های حریق	(۱/۰۰ ،۰/۸۸ ،۰/۷۲)	۰/۸۷
۳	ریسک‌های محیطی/الکتریکی	(۱/۰۰ ،۰/۸۶ ،۰/۷۰)	۰/۸۵
۴	حوادث شدید	(۱/۰۰ ،۰/۹۳ ،۰/۷۵)	۰/۸۹
۵	شدت خطای انسانی	(۱/۰۰ ،۰/۸۴ ،۰/۷۰)	۰/۸۵
۶	علل خطای انسانی	(۱/۰۰ ،۰/۹۲ ،۰/۷۲)	۰/۸۸
۷	احتمال خرابی تجهیزات	(۱/۰۰ ،۰/۸۲ ،۰/۷۰)	۰/۸۴
۸	اعمال ناایمن	(۱/۰۰ ،۰/۸۸ ،۰/۷۰)	۰/۸۶
۹	ریسک‌های نوظهور	(۱/۰۰ ،۰/۸۴ ،۰/۷۰)	۰/۸۵
۱۰	ریسک‌های خاص/خورشیدی	(۱/۰۰ ،۰/۸۳ ،۰/۷۰)	۰/۸۴
۱۱	ریسک‌های بادی/فشار کاری	(۱/۰۰ ،۰/۸۷ ،۰/۷۰)	۰/۸۶
۱۲	ریسک‌های سیکل ترکیبی	(۱/۰۰ ،۰/۸۹ ،۰/۷۰)	۰/۸۶
۱۳	تفاوت‌های نوع نیروگاه	(۱/۰۰ ،۰/۸۸ ،۰/۷۰)	۰/۸۶
۱۴	ریسک‌های عملیاتی	(۱/۰۰ ،۰/۹۰ ،۰/۷۰)	۰/۸۷
۱۵	ریسک‌های شیمیایی	(۱/۰۰ ،۰/۹۳ ،۰/۷۵)	۰/۸۹
۱۶	ریسک‌های توربین/تکنیکی	(۱/۰۰ ،۰/۸۹ ،۰/۷۰)	۰/۸۶
۱۷	ریسک‌های تخصصی/اسپول	(۱/۰۰ ،۰/۸۷ ،۰/۷۰)	۰/۸۶

ادامه جدول ۲.

Table 2 continued.

شماره	مؤلفه‌های مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی	میانگین فازی	میانگین فازی‌زدایی‌شده
۱۸	ریسک‌های محیطی–تولیدی	(۰/۷۰، ۰/۹۰، ۱/۰۰)	۰/۸۷
۱۹	الگوی زمانی حوادث	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۲۰	موانع ایمنی	(۰/۷۰، ۰/۹۰، ۱/۰۰)	۰/۸۷
۲۱	کفایت استانداردها	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۲۲	فرهنگ ایمنی	(۰/۷۰، ۰/۸۲، ۱/۰۰)	۰/۸۴
۲۳	چالش‌های آینده	(۰/۷۰، ۰/۹۰، ۱/۰۰)	۰/۸۷
۲۴	الگوی زمانی خطرات/وقایع	(۰/۷۰، ۰/۸۴، ۱/۰۰)	۰/۸۵
۲۵	نوع تصمیم‌گیری	(۰/۷۰، ۰/۹۰، ۱/۰۰)	۰/۸۷
۲۶	اقدامات پیشگیرانه	(۰/۷۰، ۰/۸۷، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۲۷	روش‌های مؤثر کنترل	(۰/۷۵، ۰/۹۴، ۱/۰۰)	۰/۹۰
۲۸	کارآمدی نظارت	(۰/۷۵، ۰/۹۴، ۱/۰۰)	۰/۹۰
۲۹	بهبود مدیریت ریسک	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۰	مدل‌های ریاضی تحلیل ریسک	(۰/۷۰، ۰/۸۳، ۱/۰۰)	۰/۸۴
۳۱	مکمل بودن مدل‌ها	(۰/۷۰، ۰/۸۶، ۱/۰۰)	۰/۸۵
۳۲	آموزش ریسک	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۳	کمیته‌های ریسک	(۰/۷۰، ۰/۸۸، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۴	ریسک‌های ایزولاسیون انرژی	(۰/۷۰، ۰/۹۰، ۱/۰۰)	۰/۸۷
۳۵	اصلاح اعمال ناایمن	(۰/۷۵، ۰/۹۳، ۱/۰۰)	۰/۸۹
۳۶	عوامل مدل جامع ریسک	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۷	بهبود تصمیم‌گیری نهایی	(۰/۷۰، ۰/۸۸، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۸	مدیریت کار در ارتفاع	(۰/۷۰، ۰/۸۹، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۳۹	مدیریت کار گرم	(۰/۷۰، ۰/۸۷، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۴۰	مواد شیمیایی/مدیریت تغییر	(۰/۷۰، ۰/۸۷، ۱/۰۰)	۰/۸۶
۴۱	ریسک‌های ارتفاع	(۰/۷۰، ۰/۸۷، ۱/۰۰)	۰/۸۶

جدول ۳. مقادیر آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی متغیرهای پژوهش

Table 3. Cronbach's alpha and composite reliability of research variables

متغیر	ضریب آلفای کرونباخ ($\alpha > 0.7$)	ضریب پایایی ترکیبی ($CR > 0.7$)
راهبردها	۰/۹۱۱	۰/۹۲۶
شرایط زمینه‌ای	۰/۹۰۶	۰/۹۲۱
شرایط علّی	۰/۸۹۴	۰/۹۱۴
شرایط مداخله‌ای	۰/۸۴۱	۰/۸۸۶
مدیریت ریسک در نگهداری وتعمیرات نیروگاهی	۰/۷۲۱	۰/۸۱۹
پیامدها	۰/۸۶۶	۰/۸۹۸

جدول ۴. میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) متغیرهای پژوهش

Table 4. Average Variance Extracted (AVE) for research variables

متغیر	میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE)
راهبردها	۰/۵۵۷
شرایط زمینه‌ای	۰/۵۱۸
شرایط علّی	۰/۵۴۲
شرایط مداخله‌ای	۰/۵۷۱
مدیریت ریسک در نگهداری وتعمیرات نیروگاهی	۰/۵۷۹
پیامدها	۰/۵۹۷

جدول ۵. معیار فورنل-لارکر: $\sqrt{\text{AVE}}$ (قطر اصلی) در برابر همبستگی بین سازه‌ها

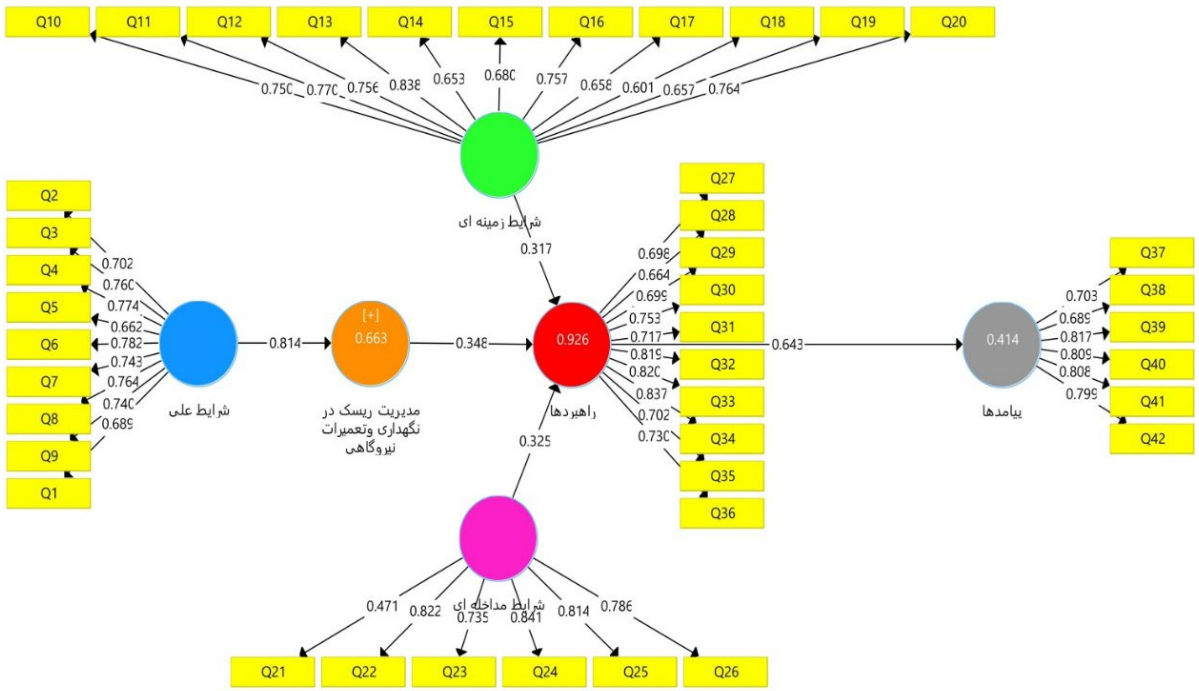
Table 5. Fornell-Larcker criterion: $\sqrt{\text{AVE}}$ (diagonal) vs. inter-construct correlations

متغیر	راهبردها	شرایط زمینه‌ای	شرایط علّی	شرایط مداخله‌ای	مدیریت ریسک	پیامدها
راهبردها	۰/۷۴۶					
شرایط زمینه‌ای	۰/۷۱۳	۰/۷۲۰				
شرایط علّی	۰/۶۶۲	۰/۶۱۶	۰/۷۳۶			
شرایط مداخله‌ای	۰/۷۴۰	۰/۵۴۹	۰/۷۰۰	۰/۷۵۶		
مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی	۰/۷۳۲	۰/۶۶۲	۰/۷۱۴	۰/۶۵۷	۰/۷۶۱	
پیامدها	۰/۶۴۳	۰/۶۸۳	۰/۶۷۶	۰/۷۰۱	۰/۷۴۳	۰/۷۷۳

جدول ۶. ضرایب مسیر و مقادیر آماره t در مدل ساختاری

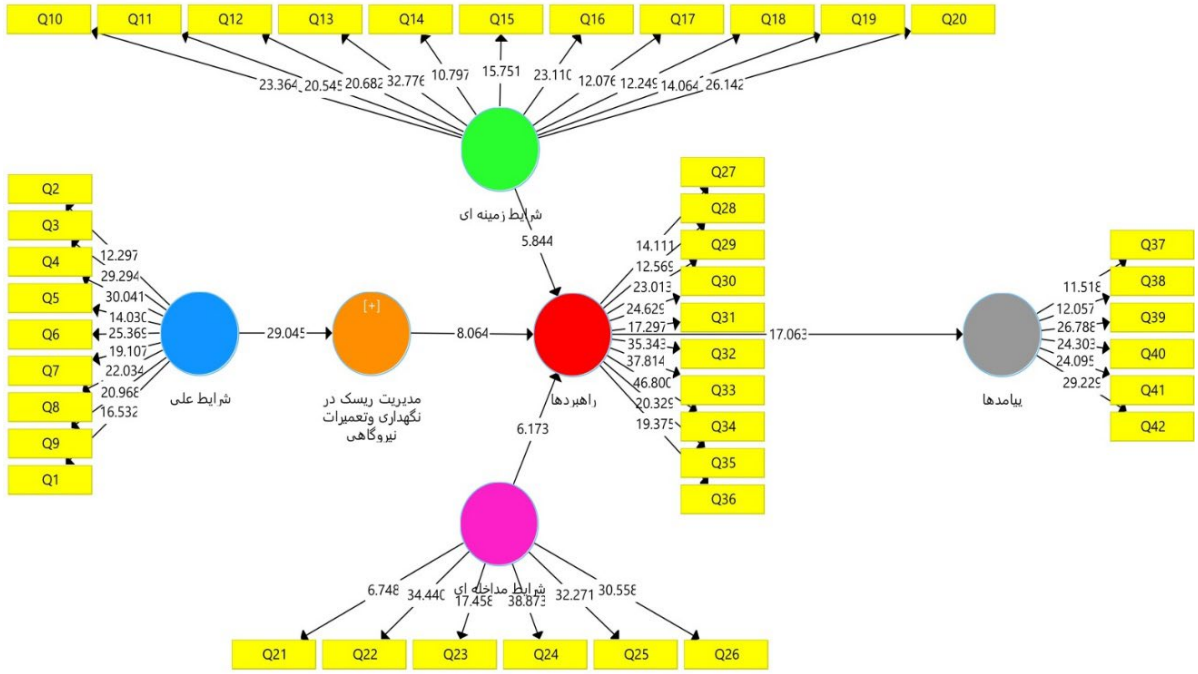
Table 6. Structural model path coefficients and significance values

پیش‌بینی (پیامد)	ضریب مسیر (β)	آماره t	نتیجه
شرایط علّی ← مدیریت ریسک	۰/۸۱۴	۲۹/۰۴۵	تأیید شد
شرایط زمینه‌ای ← راهبردها	۰/۳۱۷	۵/۸۴۴	تأیید شد
شرایط مداخله‌گر ← راهبردها	۰/۳۲۵	۶/۱۷۳	تأیید شد
مدیریت ریسک ← راهبردها	۰/۳۴۸	۸/۰۶۴	تأیید شد
راهبردها ← پیامدها	۰/۶۴۳	۱۷/۰۶۳	تأیید شد



شکل ۲. مدل ساختاری پژوهش در حالت ضرایب مسیر استاندارد.

Figure 2. The structural model of the research in terms of standardized path coefficients.



شکل ۳. مدل ساختاری پژوهش در حالت ضرایب معناداری.

Figure 3. T The structural model of the research in terms of significance coefficients.

جدول ۷. مقادیر اشتراکی و ضرایب تعیین متغیرهای مدل

Table 7. Communality values and coefficients of determination for model variables

متغیر	ضرایب تعیین	مقادیر اشتراکی
راهبردها	۰/۴۴۳	۰/۹۲۶
شرایط زمینه‌ای	۰/۴۰۵	–
شرایط علّی	۰/۴۱۹	–
شرایط مداخله‌ای	۰/۴۰۳	–
مدیریت ریسک در نگهداری وتعمیرات نیروگاهی	۰/۳۵۳	۰/۶۶۳
پیامدها	۰/۴۲۸	۰/۴۱۴

۴-۴-۳- شاخص برازش کلی[1] مدل (GOF)

معیار برازش کلی مدل در روش حداقل مربعات جزئی (PLS)، مطابق رابطه پیشنهادی تننهاوس و همکاران (Tenenhaus et al., 2005)، به‌صورت $GOF = \sqrt{\overline{Communality} \times \overline{R^2}}$ محاسبه می‌شود که در آن، Communality بیانگر میانگین مقادیر اشتراکی و R^2 نشان‌دهنده میانگین ضرایب تعیین سازه‌های درون‌زا است. مقادیر مربوط به اشتراکی و ضریب تعیین (R^2) برای هر یک از سازه‌های پژوهش در **جدول ۷** ارائه شده است. با جایگذاری مقادیر به‌دست‌آمده در رابطه مذکور، مقدار شاخص برازش کلی مدل (GOF) محاسبه شد که نتیجه آن به‌صورت زیر به دست آمد ($GOF = \sqrt{(0.408 \times 0.667)} = 0.525$). با توجه به اینکه مقادیر ۰/۱۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۶ به‌ترتیب بیانگر برازش ضعیف، متوسط و قوی مدل هستند (Wetzels et al., 2009)، مقدار به‌دست‌آمده (GOF = 0.525) نشان‌دهنده برازش قوی مدل است. بنابراین، ساختار پنج‌بعدی مدل مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی از برازش مطلوب برخوردار بوده و اعتبار آن تأیید می‌شود.

علاوه بر شاخص GOF، توان پیش‌بینی مدل با رویه بلایندفولدینگ (فاصله حذف $D = 7$) ارزیابی شد.

[1] Goodness of Fit

مقادیر Q^2 روایی متقاطع[1] برای تمامی سازه‌های درون‌زا مثبت به‌دست آمد: راهبردها ($Q^2 = 0.443$)، مدیریت ریسک ($Q^2 = 0.353$) و پیامدها ($Q^2 = 0.428$)، و نیز برای بلوک‌های اندازه‌گیری برون‌زا شرایط علّی ($Q^2 = 0.419$)، شرایط زمینه‌ای ($Q^2 = 0.405$) و شرایط مداخله‌گر ($Q^2 = 0.403$)؛ این نتایج (بر پایه معیار استون-گایزر، $Q^2 > 0$) توان پیش‌بینی قابل‌قبول مدل را برای تمامی سازه‌ها تأیید می‌کند. روایی واگرا با نسبت هترو-مونوتریت (HTMT) نیز پایین‌تر از آستانه محافظه‌کارانه ۰/۹۰ برای تمامی جفت‌سازه‌ها گزارش شد که نتایج معیار فورنل-لارکر پیش‌گفته را تأیید می‌کند. تمامی ۴۲ بار عاملی گویه‌ها در سطح $p < 0.001$ با روش بوت‌استرپ (۵۰۰۰ زیرنمونه) معنادار بودند؛ بارهای استاندارد در بازه ۰/۴۷۱ تا ۰/۸۴۱ و آماره t بوت‌استرپ در بازه ۶/۷۵ تا ۴۶/۸۰ قرار داشت. شاخص‌های عامل تورم واریانس (VIF) برای بررسی هم‌خطی سازه‌های با ماهیت احتمالاً تکوینی، و شاخص برازش SRMR، بخشی از خروجی اصلی SmartPLS بازیابی‌شده برای این پژوهش نبودند؛ در راستای همان اصل شفافیتی که در سرتاسر این بازنگری رعایت شده، این کاستی در بخش محدودیت‌های پژوهش به‌صراحت ذکر شده است، نه آنکه نادیده گرفته شود.

۵- بحث

۵-۱- پیامدهای نظری

شناسایی شرایط علّی به‌عنوان محرک اصلی ساختاری ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی با یافته‌های پانچال و کومار (Panchal & Kumar, 2017) سازگار است؛ به‌گونه‌ای که این پژوهشگران، پیچیدگی تجهیزات و شدت عملیات را مهم‌ترین پیش‌آیندهای ریسک در فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات معرفی کرده‌اند. با این حال، رویکرد نظریه داده‌بنیاد به‌کاررفته در پژوهش حاضر، تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از ماهیت این ریسک‌ها ارائه می‌دهد. بر این اساس، خطای انسانی (مؤلفه‌های ۵ و ۶) و اعمال ناایمن (مؤلفه ۸) صرفاً به‌عنوان پیامدهای اجرایی یا خرابی‌های عملیاتی تلقی نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان عوامل علّی سیستمی که ریشه در فرهنگ و ساختار سازمانی دارند، نقش‌آفرینی می‌کنند. این نتیجه با یافته‌های علی‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۲۴ (Aliabadi et al., 2024) مبنی بر انتساب حدود ۶۰ درصد از حوادث نیروگاهی به خطای انسانی همسو است و در عین حال، با قرار دادن خطای انسانی در قالب یک مقوله علّی ساختاری در مدل پارادایمی، گامی فراتر از مطالعات پیشین برمی‌دارد.

از سوی دیگر، تمایز میان شرایط علّی و شرایط مداخله‌گر، به‌ویژه جایگاه فرهنگ ایمنی (مؤلفه ۲۲) به‌عنوان یک شرط مداخله‌گر و نه یک عامل علّی، تکمیل‌کننده مبانی نظری پژوهش‌های پیشین است. در حالی که سکر و زاوادسکاس (Seker & Zavadskas, 2017) و درفشان و همکاران (Dorfeshan et al., 2022) فرهنگ ایمنی را عمدتاً به‌عنوان یک متغیر زمینه‌ای یا پس‌زمینه‌ای معرفی کرده‌اند، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فرهنگ ایمنی نقش یک عامل مداخله‌گر فعال را ایفا می‌کند؛ عاملی که می‌تواند مسیر بین شرایط علّی و راهبردهای مدیریت ریسک را تقویت یا تضعیف کند. این یافته با مبانی نظری سازمان‌های با قابلیت اطمینان بالا[2] همخوانی دارد و بیانگر آن است که سرمایه‌گذاری در ارتقای فرهنگ ایمنی، به‌ویژه در صنعت نیروگاهی ایران، می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کاهش ریسک‌های عملیاتی داشته باشد.

همچنین، کفایت اجرای دلفی فازی در یک مرحله با تأیید تمامی ۴۱ مؤلفه و کسب مقادیر فازی‌زدایی‌شده بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۸۴ از دیگر یافته‌های قابل‌توجه این پژوهش است. چنین سطحی از همگرایی، در مقایسه با اغلب مطالعات دلفی که معمولاً به دو یا سه مرحله نیاز دارند، نشان‌دهنده وجود درک و الگوی مشترک از ریسک در میان خبرگان صنعت نیروگاهی ایران است. این همگرایی احتمالاً ناشی از مواجهه مشترک متخصصان با الزامات، استانداردها و محدودیت‌های نهادی مشابه بوده و از منظر روش‌شناختی، می‌تواند مبنایی برای به‌کارگیری کارآمدتر روش دلفی در جوامع حرفه‌ای همگن در پژوهش‌های آینده فراهم سازد.

۵-۲- پیامدهای کاربردی

مدل پارادایمی پنج‌مقوله‌ای اعتبارسنجی‌شده، چارچوبی نظام‌مند و ساختاریافته برای حاکمیت و مدیریت ریسک

[1] Redundancy

[2] High Reliability Organizations

در اختیار مدیران نیروگاه‌ها قرار می‌دهد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت ایزولاسیون انرژی (مؤلفه ۳۴)، روش‌های کنترل مؤثر (مؤلفه ۲۷) و کارآمدی نظارت (مؤلفه ۲۸) با کسب بالاترین مقدار فازی‌زدایی‌شده (۰/۹۰)، از مهم‌ترین عوامل راهبردی در مدیریت ریسک محسوب می‌شوند؛ ازاین‌رو، برنامه‌ریزی، تخصیص منابع و اقدامات اصلاحی مدیران باید در اولویت بر تقویت این مؤلفه‌ها متمرکز باشد.

از سوی دیگر، جایگاه فرهنگ ایمنی (مؤلفه ۲۲) به‌عنوان یک عامل مداخله‌گر نشان می‌دهد که اجرای کنترل‌های فنی به‌تنهایی برای کاهش ریسک کافی نیست، بلکه اثربخشی این کنترل‌ها در گرو توسعه فرهنگ ایمنی، ارتقای تعهد مدیریتی، افزایش مشارکت کارکنان و نهادینه‌سازی رفتارهای ایمن در سازمان است؛ بنابراین، مداخلات فرهنگی باید هم‌زمان و همسو با اقدامات فنی مدیریت ریسک طراحی و اجرا شوند.

علاوه بر این، مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.414$) برای متغیر پیامدها نشان می‌دهد که بهبود راهبردهای مدیریت ریسک تأثیر مستقیمی بر نتایج و عملکرد عملیاتی دارد. این یافته بیانگر آن است که استقرار نظام جامع مدیریت ریسک می‌تواند به ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری مدیریتی، افزایش ایمنی محیط کار، کاهش احتمال وقوع حوادث، بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات و در نهایت افزایش بهره‌وری و پایداری عملکرد نیروگاه منجر شود.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد آمیخته و منطق فازی، موفق به طراحی و اعتبارسنجی مدلی جامع، بومی و علمی برای مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی شد. نتایج پژوهش نشان داد که تلفیق نظریه داده‌بنیاد، روش دلفی فازی و مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM)، امکان ارائه مدلی معتبر، کاربردی و متناسب با شرایط صنعت نیروگاهی کشور را فراهم می‌کند.

دستاورد نخست این پژوهش، ارائه یکی از نخستین مدل‌های پارادایمی اعتبارسنجی‌شده مدیریت ریسک در حوزه نگهداری و تعمیرات نیروگاهی در ایران است که ۴۱ مؤلفه کلیدی را در قالب پنج مقوله اصلی شامل (شرایط علّی، شرایط زمینه‌ای، شرایط مداخله‌گر، راهبردها و پیامدها) سازمان‌دهی می‌کند. این ساختار، تصویری جامع از عوامل مؤثر بر مدیریت ریسک و نحوه تعامل آن‌ها در محیط‌های عملیاتی نیروگاه ارائه می‌دهد.

دستاورد دوم، تأیید تجربی اعتبار مدل پیشنهادی از طریق تحلیل‌های آماری است. نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که تمامی روابط فرض‌شده بین سازه‌ها از نظر آماری معنادار بوده و شاخص برازش کلی مدل ($GOF = 0.525$) بیانگر برازش قوی و مطلوب مدل است. این یافته، اعتبار ساختار پنج‌بعدی مدل را از منظر آماری تأیید کرده و قابلیت استفاده از آن را در محیط‌های واقعی نیروگاهی نشان می‌دهد.

دستاورد سوم پژوهش، توسعه ادبیات مدیریت ریسک از طریق تبیین جایگاه عوامل انسانی و سازمانی در قالب مقوله‌های ساختاری مدل پارادایمی است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عواملی نظیر خطای انسانی، فرهنگ ایمنی و مؤلفه‌های سازمانی را به‌عنوان متغیرهای جانبی یا محیطی در نظر گرفته‌اند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این عوامل نقش بنیادی و تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و مدیریت ریسک داشته و باید به‌عنوان اجزای اصلی مدل‌های مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرند.

در مجموع، یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که مدیریت اثربخش ریسک در نگهداری و تعمیرات نیروگاهی مستلزم اتخاذ رویکردی یکپارچه، سیستمی و چندبعدی است؛ رویکردی که به‌طور هم‌زمان عوامل فنی، خطای انسانی، فرهنگ ایمنی، نظام برنامه‌ریزی و اجرای تعمیرات، شرایط سازمانی و ویژگی‌های محیط عملیاتی را مدنظر قرار دهد. از این‌رو، مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب عملیاتی و تصمیم‌یار برای مدیران و متخصصان صنعت نیروگاهی در شناسایی، ارزیابی، اولویت‌بندی و کنترل ریسک‌های عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه ارتقای ایمنی، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و بهبود عملکرد سازمان را فراهم سازد.

۶-۱- محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با وجود تلاش برای رعایت اصول دقیق روش‌شناختی، با محدودیت‌هایی مواجه بوده که لازم است به‌طور شفاف مورد توجه قرار گیرند:

۱) **محدودیت زمانی:** طرح مقطعی پژوهش تنها یک برهه زمانی را ثبت کرده و امکان بررسی روند تحول ریسک‌ها و روابط میان مؤلفه‌ها در بازه‌های زمانی طولانی‌تر را فراهم نکرده است.

۲) محدودیت مکانی: گردآوری داده‌ها محدود به نیروگاه‌های ایران (حرارتی، گازی، سیکل ترکیبی و آبی) بوده و تعداد دقیق نیروگاه‌های بررسی‌شده و سهم هر طبقه از نمونه در مستندات موجود ثبت نشده و باید توسط نویسندگان از فایل‌های اصلی داده گزارش شود.

۳) **محدودیت جامعه آماری:** جامعه آماری به مدیران، کارشناسان و متخصصان حوزه نگهداری و تعمیرات و ایمنی محدود بوده و دیدگاه‌های پیمانکاران، تأمین‌کنندگان تجهیزات و جامعه محلی در این پژوهش لحاظ نشده است.

۴) **محدودیت ذاتی روش:** رویکرد ترکیبی کیفی-کمّی از نقاط قوت این پژوهش است، اما فرایند کدگذاری و تفسیر داده‌های کیفی نمی‌تواند کاملاً از تأثیر ذهنیت پژوهشگر مبرا باشد؛ همچنین طرح مقطعی پژوهش امکان اثبات قطعی روابط علّی میان سازه‌ها را فراهم نمی‌کند و ضرایب مسیر گزارش‌شده باید به‌عنوان همبستگی‌های آماری معتبر در چارچوب مدل نظری تفسیر شوند، نه شواهد قطعی علو معلولی.

۵) **محدودیت منبع داده:** هر دو ابزار گردآوری داده متکی بر ادراکات و خودگزارش‌دهی خبرگان و پاسخ‌دهندگان بوده و داده عینی درباره خرابی‌های واقعی تجهیزات، حوادث ایمنی یا عملکرد واقعی تعمیرات در تحلیل لحاظ نشده که می‌تواند زمینه‌ساز سوگیری پاسخ اجتماعاپسندیده یا سوگیری روش مشترک باشد.

۶) محدودیت تحلیلی: اعتبارسنجی مدل معادلات ساختاری در این پژوهش بر پایه آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی، میانگین واریانس استخراج‌شده، معیار فورنل-لارکر، نسبت HTMT و روایی متقاطع (Q^2 از طریق بلایندفولدینگ) به‌همراه شاخص برازش کلی تننهاوس انجام شده که همگی مؤید پایایی، روایی و توان پیش‌بینی مدل هستند؛ با این حال، آماره‌های هم‌خطی VIF (به‌ویژه با توجه به ماهیت احتمالاً تکوینی برخی سازه‌های پیش‌آیند)، اندازه اثر f^2، ارزیابی برون‌نمونه‌ای PLSpredict و شاخص برازش SRMR بخشی از خروجی اصلی SmartPLS بازیابی‌شده برای این پژوهش نبودند و برای بازاعتبارسنجی آتی با فایل اصلی پروژه پیشنهاد می‌شوند.

۷) **محدودیت تعمیم‌پذیری:** یافته‌ها بازتاب‌دهنده شرایط خاص فناورانه، فرهنگی و مقرراتی صنعت برق ایران هستند و تعمیم آن‌ها به سایر کشورها یا بخش‌های صنعتی باید با احتیاط صورت گیرد.

۸) **محدودیت دامنه بررسی:** با توجه به ماهیت چندبعدی مدیریت ریسک در نگهداری و تعمیرات، برخی ابعاد حقوقی، سیاسی و بین‌المللی پدیده ممکن است در چارچوب دلفی فازی و نظریه داده‌بنیاد به‌کار رفته در این پژوهش به‌طور کامل پوشش داده نشده باشند.

۶-۲- پیشنهادهای پژوهش

۶-۲-۱- پیشنهادهای کاربردی

با توجه به یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای کاربردی زیر برای بهبود مدیریت ریسک در حوزه نگهداری و تعمیرات نیروگاهی ارائه می‌شود:

۱) مدیران نیروگاه‌ها پیشنهاد می‌شود مدل پارادایمی پنج‌مقوله‌ای اعتبارسنجی‌شده این پژوهش را به‌عنوان یک چارچوب نظام‌مند برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک در فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به‌کار گیرند. بر اساس نتایج پژوهش، مدیریت ایزولاسیون انرژی، روش‌های کنترل مؤثر و کارآمدی نظام نظارت باید در اولویت برنامه‌های بهبود و سرمایه‌گذاری قرار گیرند.

۲) به‌منظور افزایش دقت و کاهش عدم‌قطعیت در فرآیندهای تصمیم‌گیری، استفاده از رویکردهای مبتنی بر منطق فازی در ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها در نظام مدیریت نگهداری و تعمیرات نهادینه شود و به‌عنوان بخشی از فرآیندهای استاندارد مدیریت ریسک مورد استفاده قرار گیرد.

۳) توسعه و استقرار نظام‌های اطلاعاتی یکپارچه نگهداری و تعمیرات (CMMS/EAM) با قابلیت جمع‌آوری، تحلیل و پایش مستمر داده‌های ریسک، به‌منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و پایش شاخص‌های پنج بُعد اصلی مدل، در دستور کار سازمان‌های بهره‌بردار نیروگاهی قرار گیرد.

۴) برنامه‌های ارتقای فرهنگ ایمنی، آموزش کارکنان، توسعه رهبری ایمنی و افزایش مشارکت کارکنان باید هم‌زمان با اجرای کنترل‌های فنی مدیریت ریسک طراحی و اجرا شوند؛ زیرا نتایج پژوهش نشان داد که فرهنگ ایمنی به‌عنوان یک عامل مداخله‌گر، نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی راهبردهای مدیریت ریسک ایفا می‌کند.

۶-۲-۲- پیشنهادهای پژوهشی

با توجه به نتایج و محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای مطالعات آینده ارائه می‌شود:

۱) پیشنهاد می‌شود مدل اعتبارسنجی‌شده مدیریت ریسک ارائه‌شده در این پژوهش، در سایر انواع نیروگاه‌ها از جمله نیروگاه‌های تجدیدپذیر، برق‌آبی، سیکل ترکیبی و سایر صنایع فرایندی مورد آزمون و اعتبارسنجی قرار گیرد تا میزان تعمیم‌پذیری و کارایی آن در محیط‌های عملیاتی مختلف ارزیابی شود.

۲) پژوهشگران می‌توانند با تلفیق رویکرد فازی و مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) با روش‌هایی نظیر شبکه‌های بیزی پویا، مدل‌های پیشرفته‌تری برای تحلیل تغییرات زمانی، پیش‌بینی ریسک و ارزیابی روابط پویا میان عوامل مؤثر بر مدیریت ریسک توسعه دهند.

۳) بررسی نقش فناوری‌های نوین از جمله سامانه‌های هوشمند پایش وضعیت تجهیزات[1]، فناوری‌های صنعت ۴.۰، اینترنت اشیا صنعتی، هوش مصنوعی و سیستم‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه[2] در بهبود راهبردهای مدیریت ریسک و ارتقای پیامدهای عملیاتی، از موضوعات مهم و کاربردی برای پژوهش‌های آینده محسوب می‌شود.

۴) همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تأثیر متغیرهایی نظیر فرهنگ سازمانی، بلوغ مدیریت دارایی‌های فیزیکی، رهبری ایمنی و آمادگی دیجیتال سازمان بر اثربخشی مدل مدیریت ریسک بررسی شود تا ابعاد انسانی، مدیریتی و فناورانه مدل با دقت بیشتری تبیین و تکمیل گردد.

قدردانی

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

تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی دریافت نکرده است.

تعارض 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.

مشارکت‌های نویسندگان

مهدی باغنده: مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش – بازبینی و

[1] Condition Monitoring
[2] Predictive Maintenance

ویرایش؛ **ارشد فرهمندیان:** مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **فیروزه حاجی‌علی‌اکبری:** راهنمایی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **محمدحسن عبدالهی:** راهنمایی، نگارش – بازبینی و ویرایش.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست در دسترس هستند: داده‌های پشتیبانی‌کننده نتایج این مطالعه در اختیار نویسندگان مسئول بوده و در صورت درخواست منطقی در دسترس قرار خواهند گرفت.

مراجع

Aliabadi, M. M., Mohammadfam, I., & Khorshidikia, S. (2024). Human error identification and risk assessment in loading and unloading of petroleum products by road trucks using the SHERPA and fuzzy inference system method. *Heliyon*, *10*(15). e34072. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34072

Babazadeh, A. A., & Sadeghpour, M. (2022). Evaluation and identification of the risk level of activities of Neka combined-cycle power plant using FMEA method. *Proceedings of the 3rd International Conference on Modern Challenges and Solutions in Industrial Engineering, Management and Accounting*, Chabahar, Iran. (In Persian). https://civilica.com/doc/1564612/

Corbin, J. M., Strauss, A. L., & Strauss, A. L. (2008). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (Vol. 3). Thousand Oaks, CA: sage.

Dorfeshan, Y., Mousavi, S. M., & Vahdani, B. (2022). Determining critical paths of projects by a new hybrid approach based on developed MULTIMOORA and SWARA methods under consideration of time, cost, quality, risk and safety criteria in an interval type-2 fuzzy environment. *Industrial Management Studies*, *20*(67), 85-119 (In Persian). https://doi.org/10.22054/jims.2022.25775.1887

Eti, M. C., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2007). Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station. *Applied Energy*, *84*(2), 202-221. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.001

Ghorbani Noe, S. (2022). Risk Management Based on Fuzzy Expert Systems in Construction Projects. *Civil and Project*, *4*(1), 11-28. https://doi.org/10.22034/cpj.2022.04.01.1121

Izadi-Yazdanabadi, H., & Mohammadbagheri, M. (2024). Investigating the relationship between attitude toward organizational change and organizational excellence and interpersonal conflict with crisis management in Kerman power plants. In *Proceedings of the 9th International Conference on Management, Accounting, Banking and Economics of Iran*, Mashhad, Iran. (In Persian). https://civilica.com/doc/2122628/

Ke, Y., Lu, L., & Luo, X. (2023). Identification and formation mechanism of key elements of supply chain resilience: Exploration based on grounded theory and verification of SEM. *Plos one*, *18*(11), e0293741. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293741

Khan, F. I., & Haddara, M. M. (2003). Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. *Journal of loss prevention in the process industries*, *16*(6), 561-573. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.08.011

Makajić-Nikolić, D. (2020). ISO 31000: risk management guidelines. In *Encyclopedia of Sustainable Management* (pp. 1-4). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02006-4_314-1

Motalebinejad, B., Hosseina, M., Vahedi, M., & Moghaddam, M. S. (2024). Analysis of the Economic Impacts of Optimal Management of Large-Scale Energy Storage Facilities. *Journal of Southern Communication Engineering*, *13*(51), 79-94 (In Persian). https://doi.org/10.30495/jce.2023.1997636.1226

Namazian, A., & Behboodian, S. (2023). Developing an optimization model for prioritizing and selecting project risk response strategies. *Industrial Management Studies*, *21*(71), 225-261 (In Persian). https://doi.org/10.22054/jims.2024.75036.2870

Panchal, D., & Kumar, D. (2017). Risk analysis of compressor house unit in thermal power plant using integrated fuzzy FMEA and GRA approach. *International Journal of industrial and systems Engineering*, *25*(2), 228-250. https://doi.org/10.1504/IJISE.2017.081519

Seker, S., & Zavadskas, E. K. (2017). Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites. *Sustainability*, *9*(11), 2083. https://doi.org/10.3390/su9112083

Shakerikenari, E., & Safaei Ghadikalai, A.H. (2019). Determining Maintenance and Repair Strategies Using a Multi-Stage Fuzzy Inference System (Case Study: Shahid Salimi Neka Power Plant). *Industrial Management Studies*, 17(54),

291-325 .(In Persian). https://doi.org/10.22054/jims.2017.21543.1754

Shetwan, A. G., Rekik, S., & Ghlaio, Y. (2025). A hybrid failure mode and effects analysis with decision-making trial and evaluation laboratory approach for enhanced fault assessment in power plants. *Energy Exploration & Exploitation*, *43*(6), 2604-2636. https://doi.org/10.1177/01445987251350736

Shojaei, P., & Haeri, S. A. S. (2019). Development of supply chain risk management approaches for construction projects: A grounded theory approach. *Computers & Industrial Engineering*, *128*, 837-850. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.045

Shojaeimehr, S., & Rahmani, D. (2022). Risk management of photovoltaic power plants using a novel fuzzy multi-criteria decision-making method based on prospect theory: A sustainable development approach. *Energy Conversion and Management: X*, *16*, 100293. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100293

Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y.-M., & Lauro, C. (2005). PLS path modeling. *Computational Statistics & Data Analysis, 48*(1), 159–205. https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.03.005

Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S., Sliwinski, P., & Zimroz, R. (2022). Fuzzy risk-based maintenance strategy with safety considerations for the mining industry. *Sensors*, *22*(2), 441. https://doi.org/10.3390/s22020441

Wetzels, M., Odekerken-Schröder, G., & van Oppen, C. (2009). Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration. *MIS Quarterly, 33*(1), 177–195. https://doi.org/10.2307/20650284

Yusoff, H. M., Heng, P. P., Illias, M. R. H., Karrupayah, S., Fadhli, M. A., & Hod, R. (2024). A qualitative exploration and a Fuzzy Delphi validation of high-risk scaffolding tasks and fatigue-related safety behavioural deviation among scaffolders. *Heliyon*, *10*(15). e34599. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34599