

Developing a Comprehensive Smart Technology-Based HSE Risk Management Model for Container Ports Using Network Analysis and Multi-Criteria Decision-Making: A Case Study of Shahid Rajaei Port

Kambiz. Karimi Zadeh^{1*}

¹ Department of Health and Environmental Safety, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding author email address: kambiz.karimizadeh@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Karimi Zadeh, K. (2026). Developing a Comprehensive Smart Technology-Based HSE Risk Management Model for Container Ports Using Network Analysis and Multi-Criteria Decision-Making: A Case Study of Shahid Rajaei Port. *Journal of Technology in Entrepreneurship and Strategic Management*, 5(3), 1-26.



© 2026 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

ABSTRACT

This study aimed to develop and validate a comprehensive smart technology-based health, safety, and environmental risk management model for Shahid Rajaei Port using network analysis and multi-criteria decision-making. This applied and developmental study employed an exploratory sequential mixed-methods design. The study population consisted of HSE, container operations, information technology, automation, environmental management, firefighting, and crisis management specialists working at Shahid Rajaei Port. Twenty-four experts were selected through purposive and snowball sampling. Data were collected through document review, semi-structured interviews, fuzzy Delphi questionnaires, fuzzy DEMATEL matrices, analytic network process pairwise comparisons, and technology evaluation matrices. The data were analyzed using thematic analysis, fuzzy Delphi, fuzzy DEMATEL, the analytic network process, and fuzzy VIKOR. Qualitative analysis identified 20 indicators within five dimensions: safety and operational, managerial and organizational, technological and cybersecurity, environmental, and occupational health risks. Kendall's coefficient of concordance in the second Delphi round was 0.71 and statistically significant. Fuzzy DEMATEL identified the managerial and organizational dimension as the strongest causal factor, with a net influence value of 1.15. The analytic network process assigned weights of 0.286, 0.243, and 0.203 to the safety and operational, managerial and organizational, and technological and cybersecurity dimensions, respectively. Mobile equipment collisions, container drops, and weak safety culture were the three highest-priority indicators. Fuzzy VIKOR ranked the integrated intelligent HSE command center, Internet of Things sensor networks, and artificial intelligence-based predictive analytics as the leading technological alternatives. Effective HSE risk management in container ports requires a network-based, proactive, and data-driven approach in which managerial and organizational reforms are integrated with the phased implementation of smart technologies and an integrated HSE command center.

Keywords: HSE risk management, smart technology, container port, fuzzy DEMATEL, analytic network process, fuzzy VIKOR, Shahid Rajaei Port

Extended Abstract

Introduction

Container ports are among the most complex and high-risk nodes of international supply chains because they involve the continuous interaction of workers, heavy machinery, hazardous cargo, transportation fleets, digital control systems, storage facilities, and environmental resources. Container handling operations expose employees and infrastructure to multiple health, safety, and environmental risks, including collisions involving mobile equipment, dropped containers, crane and spreader failures, fires, explosions, falls from height, occupational fatigue, noise, vibration, heat stress, chemical exposure, fuel leakage, marine pollution, and disruption of automated control systems. Because these hazards are interdependent, conventional risk assessment approaches that examine risks as isolated events cannot adequately explain the causal pathways through which organizational weaknesses, human errors, equipment failures, and technological vulnerabilities produce major accidents. Integrating occupational health and safety into enterprise risk management can elevate HSE concerns from operational compliance issues to strategic organizational priorities and enable their consideration in resource allocation, governance, and performance management (Kılıç & Vayvay, 2025).

The organizational context is particularly important because safety outcomes are strongly influenced by leadership commitment, safety culture, role clarity, training quality, maintenance policies, communication systems, and employee participation. Strategic leadership can improve occupational health and safety by coordinating quality management practices, organizational priorities, and safety responsibilities (Fadhel & Alqurs, 2025). Safety culture should also be understood as a measurable organizational capability that shapes reporting behavior, learning from error, and compliance with preventive controls (Glebova et al., 2023). A constructive error-acceptance culture may encourage employees to report near misses and operational failures, whereas punitive responses can suppress critical safety information and increase the probability of repeated human error (Gholamhoseinpour et al., 2025). Moreover, job clarity supports safety performance because employees who clearly understand their responsibilities and operational boundaries are better able to coordinate activities and avoid unsafe actions (Baker et al., 2023). Safety attitudes and human resource practices are also related to employee productivity, indicating that safety and operational efficiency should not be treated as conflicting objectives (Mutegi et al., 2023).

Human factors remain central to risk formation in container terminals. Workers must continuously interpret warning signals, equipment movements, cargo conditions, weather changes, and the behavior of other employees while working under time pressure. Risk perception can affect safety participation through multiple pathways, while mindfulness may strengthen workers' ability to respond appropriately to hazards (Zong et al., 2025). Psychological safety and organizational justice can further support self-regulation by allowing employees to communicate concerns, admit errors, and challenge unsafe decisions without fear of unfair consequences (Hussein & Akhtar, 2023). Training for resilience and critical situation management is therefore essential because conventional instruction may not adequately prepare personnel for uncertain, rapidly evolving emergencies (Ketelaars et al., 2024). Effective HSE interventions also depend on organizational, educational, managerial, and contextual conditions rather than on the technical quality of the intervention alone (Ashoori et al., 2025).

Rapid digitalization has created new opportunities for transforming port risk management from a reactive to a predictive system. Artificial intelligence can analyze large volumes of operational and

historical data, identify hidden accident patterns, support decision-making, and forecast equipment failures; however, data quality, algorithmic bias, transparency, accountability, and cybersecurity remain significant challenges (Yazdi et al., 2024). Big data and artificial intelligence have demonstrated potential for improving safety monitoring, quality management, and managerial decision-making through real-time analysis (Jiang et al., 2024). Deep learning and computer vision can detect unsafe behavior, unauthorized entry into hazardous zones, missing personal protective equipment, smoke, fire, and dangerous proximity between workers and machinery (Mohy et al., 2024). The integration of text-, vision-, and audio-based artificial intelligence applications can further strengthen hazard detection and incident analysis (Rabbi, 2024). Ontology-based systems and knowledge graphs can organize dispersed safety information and reveal relationships among hazards, activities, equipment, and controls (Doukari et al., 2024; Hao, 2025). Nevertheless, technology can become a new source of risk when sensors are unreliable, algorithms generate false warnings, communication systems fail, or cyberattacks disrupt automated operations. Therefore, intelligent HSE management should be designed as a socio-technical system that integrates leadership, safety culture, human competence, operational controls, data infrastructure, and digital technologies. Accordingly, this study aimed to develop a comprehensive smart technology-based HSE risk management model for container ports using network analysis and multi-criteria decision-making at Shahid Rajaei Port.

Methods and Materials

This applied and developmental study used an exploratory sequential mixed-methods design. The qualitative phase employed document analysis and thematic analysis, while the quantitative phase combined fuzzy Delphi, fuzzy DEMATEL, the analytic network process, and fuzzy VIKOR. The research setting included container berths, container yards, warehouses, equipment traffic routes, loading and unloading units, HSE departments, firefighting and emergency response units, information technology systems, and monitoring facilities at Shahid Rajaei Port in Hormozgan Province, Iran.

The study participants were 24 experts selected through criterion-based purposive and snowball sampling. The panel included 7 HSE managers and specialists, 5 container operations managers and supervisors, 4 information technology, automation, and intelligent systems specialists, 3 firefighting and emergency management experts, 3 port environmental specialists, and 2 senior port managers. Eligibility criteria included at least a bachelor's degree, a minimum of 5 years of relevant experience in port or maritime operations, direct experience in HSE risk identification or control, familiarity with container terminal processes, and willingness to participate in all research stages. The participants had a mean professional experience of 14.6 years, ranging from 6 to 28 years.

Data were collected through HSE reports, accident and near-miss records, inspection documents, semi-structured interviews, a researcher-developed HSE risk questionnaire, fuzzy Delphi forms, fuzzy DEMATEL pairwise influence matrices, analytic network process comparisons, and a fuzzy technology evaluation matrix. Twenty-four interviews lasting between 45 and 75 minutes were conducted. The interviews were transcribed verbatim and analyzed through familiarization, open coding, theme development, theme review, and final categorization. The initial indicators were then evaluated in two fuzzy Delphi rounds. Fuzzy DEMATEL was used to determine causal relationships and distinguish influential from dependent dimensions. The analytic network process was applied to calculate the final weights of dimensions and indicators while accounting for interdependence. Finally, seven smart

technology alternatives were assessed by fuzzy VIKOR according to effectiveness, predictive capability, response speed, implementation cost, integration capacity, reliability, cybersecurity, usability, scalability, and training requirements. Sensitivity analysis was conducted by changing the VIKOR compromise coefficient and modifying the main criterion weights.

Findings

Analysis of the interviews and documents produced 412 meaning units, 124 initial codes, 37 organizing concepts, 20 final indicators, and 5 main dimensions: safety and operational risks, managerial and organizational risks, technological and cybersecurity risks, environmental risks, and occupational health risks. All 20 indicators were retained after fuzzy Delphi analysis. The experts' agreement ranged from 79.2% to 95.8%, and the defuzzified scores ranged from 0.78 to 0.92. Kendall's coefficient of concordance increased from 0.56 in the first round to 0.71 in the second round. The second-round chi-square value was 323.76 with 19 degrees of freedom and a significance level below 0.001, indicating satisfactory convergence of expert judgments.

The highest fuzzy Delphi score was obtained for collisions between mobile equipment, workers, vehicles, or other machinery at 0.92. Container drops, spreader failure, and crane instability received a score of 0.91, as did weak safety culture and insufficient management commitment. Poor data integrity and unreliable sensors received 0.90, while fire, explosion, and hazardous cargo incidents received 0.89.

Fuzzy DEMATEL showed that the safety and operational dimension had the highest overall prominence, with a D+R value of 8.90. The technological and cybersecurity dimension ranked second with 8.61, followed by the managerial and organizational dimension with 8.57. However, the managerial and organizational dimension had the highest net causal effect, with a D-R value of 1.15, identifying it as the principal causal driver of the model. Safety and operational risks also had a positive causal value of 0.54, while technological and cybersecurity risks had a smaller positive value of 0.09. Environmental and occupational health dimensions were predominantly dependent, with D-R values of -0.31 and -0.47, respectively. The strongest relationship was the effect of managerial and organizational factors on safety and operational risks, with a total relation value of 0.43.

The analytic network process assigned the highest dimension weight to safety and operational risks at 0.286. Managerial and organizational risks ranked second at 0.243, followed by technological and cybersecurity risks at 0.203, environmental risks at 0.147, and occupational health risks at 0.121. At the indicator level, mobile equipment collision had the highest final network weight at 0.0887. Container drop and spreader failure ranked second at 0.0772, weak safety culture and management commitment ranked third at 0.0729, fire and explosion ranked fourth at 0.0658, and ineffective preventive maintenance ranked fifth at 0.0632. Poor data integrity and unreliable sensors, inadequate training and human error control, cybersecurity vulnerability, falls from height, and algorithmic error completed the ten highest-priority indicators.

Fuzzy VIKOR ranked the integrated intelligent HSE command center as the best technological strategy, with a compromise index of 0.000. The Internet of Things sensor network ranked second with 0.177, and artificial intelligence-based predictive analytics ranked third with 0.240. Computer vision ranked fourth with 0.368, the digital twin ranked fifth with 0.524, smart personal protective equipment ranked sixth with 0.696, and drones and inspection robots ranked seventh with 1.000. The difference between the first and second alternatives exceeded the acceptable advantage threshold. Sensitivity analysis confirmed the stability of the top three alternatives across compromise coefficient values of 0.25, 0.50,

and 0.75. Spearman rank correlations between the baseline and sensitivity scenarios ranged from 0.929 to 1.000.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that HSE risk management in container ports should not be organized as a collection of isolated safety procedures. Instead, it should operate as an integrated causal network in which managerial decisions, technological infrastructure, human competence, equipment condition, and operational hazards continuously interact. Although safety and operational risks received the highest overall weight, managerial and organizational factors were the strongest causal drivers. This distinction is important because it indicates that visible accidents such as equipment collisions, container drops, and fires are often the downstream consequences of weak management commitment, poor maintenance, inadequate training, deficient coordination, and limited organizational learning.

The high priority assigned to data integrity, sensor reliability, cybersecurity, and algorithm accuracy further indicates that port digitalization introduces both opportunities and vulnerabilities. Intelligent technologies can support early warning, predictive maintenance, behavioral monitoring, and emergency response, but their effectiveness depends on reliable data and secure, interoperable systems. Consequently, technological modernization should be accompanied by governance mechanisms for data quality, algorithm validation, access control, cybersecurity, human oversight, and continuous performance evaluation.

The integrated intelligent HSE command center emerged as the most appropriate strategic alternative because it provides the organizational and technical infrastructure needed to connect multiple technologies and convert fragmented data into coordinated decisions. Internet of Things sensors and predictive analytics were ranked as the next priorities because they provide continuous operational data and support anticipatory intervention before hazards become accidents. Computer vision, digital twins, wearables, drones, and inspection robots should be implemented as complementary components according to operational needs, infrastructure readiness, and available resources.

Overall, the proposed model consists of four interconnected layers. Managerial and organizational factors form the causal foundation; technological and cybersecurity factors provide the supporting infrastructure; safety and operational risks represent the primary intervention points; and environmental and occupational health outcomes constitute the major consequences. The intelligent HSE command center connects these layers through continuous monitoring, prediction, warning, response, feedback, and organizational learning. The model therefore offers a structured pathway for transforming HSE management at Shahid Rajaee Port from a reactive and fragmented approach into a proactive, data-driven, network-based, and continuously learning system.

ارائه الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در بنادر کانتینری با رویکرد تحلیل شبکه‌ای و تصمیم‌گیری چندمعیاره در اسکله شهید رجایی

کامبیز کریمی زاده 

۱. گروه ایمنی بهداشت و محیط زیست، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: kambiz.karimizadeh@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:

کریمی زاده، کامبیز. (۱۴۰۵). ارائه الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در بنادر کانتینری با رویکرد تحلیل شبکه‌ای و تصمیم‌گیری چندمعیاره در اسکله شهید رجایی. *تکنولوژی در کار آفرینی و مدیریت استراتژیک*، ۵(۳)، ۱-۲۶.



© ۱۴۰۵ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

پژوهش حاضر با هدف ارائه و اعتبارسنجی الگوی جامع مدیریت ریسک بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در اسکله شهید رجایی با استفاده از تحلیل شبکه‌ای و تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شد. این پژوهش از نظر هدف کاربردی - توسعه‌ای و از نظر روش، آمیخته اکتشافی متوالی بود. جامعه پژوهش شامل مدیران و متخصصان HSE، عملیات کانتینری، فناوری اطلاعات، اتوماسیون، محیط‌زیست، آتش‌نشانی و مدیریت بحران اسکله شهید رجایی بود که از میان آنان ۲۴ خبره با روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی انتخاب شدند. داده‌ها با بررسی اسناد، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته، پرسشنامه دلفی فازی، ماتریس دیمتل فازی، مقایسات زوجی فرایند تحلیل شبکه‌ای و ماتریس ارزیابی فناوری‌ها گردآوری شد. تحلیل داده‌ها با تحلیل مضمون، دلفی فازی، دیمتل فازی، فرایند تحلیل شبکه‌ای و ویکور فازی انجام گرفت. تحلیل کیفی به استخراج ۲۰ شاخص در پنج بعد ایمنی و عملیاتی، مدیریتی و سازمانی، فناوری و سایبری، محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای منجر شد. ضریب همابستگی کندال در دور دوم دلفی برابر با ۰.۷۱ و معنادار بود. در تحلیل دیمتل، بعد مدیریتی و سازمانی با مقدار خالص ۱.۱۵ قوی‌ترین عامل علی شناسایی شد. در فرایند تحلیل شبکه‌ای، ابعاد ایمنی و عملیاتی، مدیریتی و سازمانی و فناوری و سایبری به ترتیب وزن‌های ۰.۲۸۶، ۰.۲۴۳ و ۰.۲۰۳ را کسب کردند. برخورد تجهیزات متحرک، سقوط کانتینر و ضعف فرهنگ ایمنی سه اولویت اصلی بودند. ویکور فازی نیز مرکز فرماندهی یکپارچه HSE، حسگرهای اینترنت اشیا و تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی را در رتبه‌های نخست قرار داد. مدیریت مؤثر ریسک HSE در بنادر کانتینری مستلزم رویکردی شبکه‌ای، پیش‌نگر و داده‌محور است که در آن اصلاح عوامل مدیریتی و سازمانی با استقرار تدریجی فناوری‌های هوشمند و ایجاد مرکز فرماندهی یکپارچه همراه شود.

کلیدواژه‌ها: مدیریت ریسک HSE، فناوری هوشمند، بندر کانتینری، دیمتل فازی، فرایند تحلیل شبکه‌ای، ویکور فازی، اسکله شهید رجایی

مقدمه

بنادر کانتینری به عنوان گره های راهبردی زنجیره تأمین جهانی، محیط هایی پیچیده، پویا و به شدت متراکم از نظر تعامل انسان، ماشین، زیرساخت، کالا و اطلاعات محسوب می شوند. در این محیط ها، جرثقیل های ساحلی، تجهیزات جابه جایی کانتینر، کامیون ها، کشنده ها، انبارها، مخازن، سامانه های کنترلی، کارکنان عملیاتی و شبکه های ارتباطی به صورت هم زمان و وابسته به یکدیگر فعالیت می کنند. هرگونه اختلال در یکی از این اجزا می تواند زنجیره ای از پیامدهای ایمنی، بهداشتی، محیط زیستی، اقتصادی و عملیاتی را ایجاد کند. احتمال برخورد تجهیزات متحرک، سقوط کانتینر، آتش سوزی، انفجار، نشت مواد خطرناک، سقوط کارکنان از ارتفاع، مواجهه با صدا و ارتعاش، خستگی ناشی از نوبت کاری، آلودگی آب و خاک و اختلال در سامانه های کنترل دیجیتال، تنها بخشی از مخاطرات موجود در عملیات بندری هستند. از این رو، مدیریت ریسک بهداشت، ایمنی و محیط زیست در بنادر کانتینری را نمی توان به مجموعه ای از دستورالعمل های پراکنده، بازرسی های دوره ای یا واکنش های پس از وقوع حادثه محدود کرد؛ بلکه این مدیریت باید در قالب یک نظام یکپارچه، داده محور، پیش نگر و سازگار با پیچیدگی های محیط عملیاتی طراحی شود. ادغام رسمی مؤلفه های ایمنی و بهداشت حرفه ای در ساختار مدیریت ریسک سازمانی می تواند موجب شود که ریسک های HSE از سطح فعالیت های جانبی و انطباقی فراتر رفته و به بخشی از تصمیم گیری راهبردی، تخصیص منابع و نظام حکمرانی سازمان تبدیل شوند (Kılıç & Vayvay, 2025).

ماهیت شبکه ای فعالیت های بندری سبب می شود که ریسک ها به صورت مستقل از یکدیگر شکل بگیرند. برای مثال، ضعف در نگهداری پیشگیرانه می تواند احتمال نقص اسپریدر یا خرابی جرثقیل را افزایش دهد، نقص تجهیزات ممکن است به سقوط کانتینر یا توقف عملیات منجر شود و پیامدهای چنین حادثه ای می تواند به آسیب کارکنان، آلودگی محیط زیست، اختلال در زنجیره تأمین و خسارت مالی گسترده بینجامد. همچنین، فشار زمانی، ابهام نقش، ضعف ارتباطات و ناکافی بودن آموزش می تواند رفتارهای نایمن را تشدید کرده و قابلیت کارکنان برای تشخیص و کنترل شرایط بحرانی را کاهش دهد. شفاف بودن نقش ها و مسئولیت های شغلی، یکی از عوامل مهم در ارتقای عملکرد ایمنی محسوب می شود، زیرا کارکنانی که حدود وظایف، الزامات عملکردی و انتظارات ایمنی را به درستی درک می کنند، با احتمال بیشتری رفتارهای پیشگیرانه و مسئولانه از خود نشان می دهند (Baker et al., 2023). یافته های حوزه مدیریت منابع انسانی نیز نشان داده اند که نگرش کارکنان نسبت به ایمنی و کیفیت رویه های سازمانی می تواند با بهره وری و عملکرد آنان ارتباط داشته باشد و این امر ضرورت پیوند میان ایمنی، مدیریت کارکنان و عملکرد سازمانی را تقویت می کند (Mutegi et al., 2023). بنابراین، ارزیابی ریسک در بندر باید علاوه بر پیامدهای مستقیم حوادث، روابط علی و تأثیرات متقابل عوامل انسانی، مدیریتی، فنی و محیطی را نیز در نظر گیرد.

یکی از ارکان بنیادین مدیریت پایدار ریسک HSE، توسعه فرهنگ ایمنی در سازمان است. فرهنگ ایمنی مجموعه ای از ارزش ها، نگرش ها، ادراک ها و الگوهای رفتاری مشترک است که نحوه برخورد مدیران و کارکنان با مخاطرات را شکل می دهد. سازمانی که در آن گزارش خطا، شبه حادثه و نقص تجهیزات با سرزنش و تنبیه همراه باشد، با پنهان کاری، تأخیر در گزارش دهی و کاهش یادگیری سازمانی مواجه خواهد شد. در مقابل، فرهنگ پذیرش خطا در چارچوبی مسئولانه می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره نقاط ضعف فرایندها فراهم کرده و احتمال تکرار حوادث را کاهش دهد. بررسی ارتباط عملکرد نظام HSE با فرهنگ پذیرش خطا و احتمال خطای انسانی نشان می دهد که کیفیت نظام مدیریتی و نحوه واکنش سازمان به خطاهای انسانی می تواند در کنترل مخاطرات شغلی نقش تعیین کننده ای داشته باشد (Gholamhoseinpour et al., 2025). ارزیابی کارایی مدیریت فرهنگ ایمنی در شرکت های انرژی نیز نشان داده است که فرهنگ ایمنی باید به عنوان یک سازوکار مدیریتی قابل سنجش، پایش و بهبود مستمر مورد توجه قرار گیرد، نه صرفاً به عنوان یک شعار سازمانی (Glebova

(et al., 2023). در محیط بندری، چنین فرهنگی مستلزم تعهد آشکار مدیریت ارشد، مشارکت کارکنان، گزارش‌دهی بدون ترس، تحلیل ریشه‌ای خطاها، بازخورد سریع و تبدیل تجربه‌های عملیاتی به اقدامات اصلاحی است.

در کنار فرهنگ ایمنی، رهبری راهبردی و حمایت مدیریت ارشد نقش مهمی در اثربخشی نظام HSE دارد. مدیران با تعیین اولویت‌ها، تخصیص بودجه، انتخاب فناوری، طراحی ساختار پاسخ‌گویی و نظارت بر عملکرد واحدها، زمینه موفقیت یا شکست برنامه‌های ایمنی را فراهم می‌کنند. شواهد نشان می‌دهد که رهبری راهبردی می‌تواند از طریق استقرار رویکردهای مدیریت کیفیت جامع، عملکرد بهداشت و ایمنی شغلی را ارتقا دهد و هماهنگی بیشتری میان اهداف ایمنی و فرایندهای سازمانی ایجاد کند (Fadhel & Alqurs, 2025). همچنین، شناسایی شرایط مؤثر بر مداخلات ایمنی و سلامت نشان داده است که موفقیت برنامه‌های HSE به مجموعه‌ای از عوامل سازمانی، مدیریتی، آموزشی و اجرایی وابسته است و اجرای یک مداخله بدون در نظر گرفتن بستر سازمانی، الزاماً به بهبود پایدار منجر نمی‌شود (Ashoori et al., 2025). در بنادر کانتینری، حمایت مدیریت باید در اقداماتی مانند تأمین تجهیزات ایمن، توسعه نگهداری پیشگیرانه، ایجاد مرکز فرماندهی یکپارچه، آموزش کارکنان، اجرای مانورهای اضطراری، پایش شاخص‌های پیشرو و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال قابل مشاهده باشد.

اجرای رویه‌های ایمنی همواره با چالش‌هایی مانند مقاومت کارکنان، محدودیت منابع، ابهام مقررات، فشار عملیاتی، تعارض میان سرعت و ایمنی و ضعف نظارت مواجه است. بررسی چالش‌های اجرای مقررات ایمنی نشان می‌دهد که وجود الزام قانونی به‌تنهایی برای بهبود عملکرد ایمنی کافی نیست و نحوه تفسیر، اجرا، نظارت و پذیرش سازمانی مقررات نیز اهمیت دارد (Baroun, 2025). تجربه حوزه‌های مختلف نشان داده است که ضعف مدیریت ریسک می‌تواند حتی در سازمان‌ها و پروژه‌های دارای منابع گسترده به شکست‌های جدی منجر شود؛ به‌گونه‌ای که ناکارآمدی در شناسایی، اولویت‌بندی و پاسخ به ریسک‌ها ممکن است دستیابی به اهداف راهبردی را مختل کند (Bryce & Dowling, 2024). در مدیریت عملیات بندری نیز تمرکز بیش از حد بر حجم تخلیه و بارگیری، زمان گردش کشتی و سرعت جابه‌جایی کانتینر، بدون توجه متوازن به شاخص‌های HSE، می‌تواند زمینه افزایش رفتارهای پرخطر و تصمیم‌های کوتاه‌مدت را فراهم سازد. ازاین‌رو، نظام مدیریت ریسک باید بتواند میان بهره‌وری عملیاتی و حفاظت از کارکنان، تجهیزات و محیط‌زیست تعادل برقرار کند.

عامل انسانی همچنان یکی از مهم‌ترین اجزای شکل‌گیری و کنترل ریسک در محیط‌های پیچیده است. ادراک کارکنان از خطر، میزان مشارکت آنان در فعالیت‌های ایمنی و توانایی خودتنظیمی در شرایط فشار می‌تواند بر احتمال وقوع حادثه تأثیر بگذارد. ادراک ریسک می‌تواند از مسیرهای مختلف بر مشارکت ایمنی اثر بگذارد و عواملی مانند ذهن‌آگاهی ممکن است شدت این رابطه را تعدیل کنند (Zong et al., 2025). در عملیات کانتینری، کارکنان باید بتوانند در زمان محدود، حجم بالایی از اطلاعات محیطی را پردازش کرده و نسبت به حرکت تجهیزات، علائم هشدار، شرایط بار، وضعیت آب‌وهوا و رفتار سایر افراد واکنش مناسب نشان دهند. در چنین شرایطی، خستگی، فشار روانی و کاهش تمرکز می‌تواند ادراک خطر را تضعیف کند. وجود ایمنی روان‌شناختی نیز برای گزارش مخاطرات و یادگیری از خطاها ضروری است. ایمنی روان‌شناختی و عدالت سازمانی می‌توانند خودتنظیمی کارکنان را تقویت کرده و به آنان اطمینان دهند که بیان نگرانی‌ها و گزارش مشکلات، پیامدهای منفی ناعادلانه به دنبال نخواهد داشت (Hussein & Akhtar, 2023). توسعه ایمنی روان‌شناختی حتی در محیط‌های آموزشی مدیریت نیز به‌عنوان زمینه‌ای برای مشارکت، بیان آزادانه نگرانی‌ها و یادگیری مؤثر شناخته شده است (Fisher & Rosikiewicz, 2025)؛ اصلی که در محیط‌های عملیاتی پرریسک، اهمیت بیشتری می‌یابد.

آمادگی برای مدیریت شرایط بحرانی نیز بخش جدایی‌ناپذیر مدیریت ریسک HSE است. حوادث بندری معمولاً در شرایطی رخ می‌دهند که کارکنان باید تحت فشار زمانی، ابهام و محدودیت اطلاعات تصمیم‌گیری کنند. آموزش‌های سنتی که صرفاً بر انتقال دستورالعمل‌ها تمرکز دارند، ممکن است برای مواجهه با موقعیت‌های غیرمنتظره کافی نباشند. مرور پژوهش‌های مربوط به آموزش تاب‌آوری برای مدیریت

موقعیت‌های بحرانی نشان می‌دهد که آموزش مؤثر باید توانایی سازگاری، تصمیم‌گیری در شرایط نامطمئن، هماهنگی تیمی و بازیابی عملکرد پس از اختلال را تقویت کند (Ketelaars et al., 2024). همچنین، تجربه مداخلات خودمدیریتی در حوزه‌های سلامت نشان داده است که مشارکت فعال افراد، پایش مستمر و بازخورد منظم می‌تواند کنترل شرایط پیچیده را بهبود بخشد (Carter et al., 2024). با تعمیم محتاطانه این اصل به HSE، کارکنان بندر نباید صرفاً دریافت‌کننده دستورات باشند، بلکه باید در شناسایی مخاطرات، گزارش شرایط ناایمن، ارزیابی اثربخشی کنترل‌ها و یادگیری از رویدادها مشارکت فعال داشته باشند.

با وجود اهمیت عوامل انسانی و سازمانی، افزایش پیچیدگی عملیات بندری، استفاده از سامانه‌های خودکار و حجم بالای داده‌ها، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند را افزایش داده است. هوش مصنوعی می‌تواند از طریق تحلیل داده‌های گذشته و جاری، الگوهای منتهی به حادثه را شناسایی کرده و امکان گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌بینانه را فراهم کند. تحلیل مقایسه‌ای کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت ریسک نشان داده است که این فناوری ظرفیت بالایی برای شناسایی الگوها، پیش‌بینی رخدادها، پشتیبانی از تصمیم‌گیری و کاهش عدم قطعیت دارد، هرچند استفاده از آن با چالش‌هایی مانند کیفیت داده، شفافیت الگوریتم، سوگیری، امنیت و مسئولیت‌پذیری همراه است (Yazdi et al., 2024). در صنعت برق نیز استفاده از استخراج موضوع و گراف دانش برای تدوین استانداردهای مدیریت ریسک ایمنی نشان داده است که ترکیب داده‌های متنی و ساختارهای دانشی می‌تواند به سازمان‌دهی بهتر اطلاعات ریسک و کشف روابط میان عوامل کمک کند (Hao, 2025). چنین قابلیت‌هایی در بندر می‌تواند برای تحلیل گزارش‌های حادثه، سوابق تعمیرات، هشدارهای حسگرها و داده‌های عملکردی تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد.

بینایی ماشین و یادگیری عمیق نیز از ابزارهای مهم برای پایش هوشمند محیط‌های عملیاتی هستند. دوربین‌های متصل به الگوریتم‌های تشخیص تصویر می‌توانند ورود افراد به مناطق ممنوعه، استفاده نکردن از تجهیزات حفاظت فردی، قرارگیری کارکنان در مسیر حرکت ماشین‌آلات، تشکیل دود یا شعله و رفتارهای ناایمن را به‌صورت خودکار شناسایی کنند. نوآوری‌های مبتنی بر یادگیری عمیق و بینایی رایانه‌ای در مدیریت ایمنی کارگاه‌ها نشان داده‌اند که این فناوری‌ها ظرفیت قابل توجهی برای تشخیص خطر، پایش رفتار و ارائه هشدارهای بلادرنگ دارند (Mohy et al., 2024). بررسی ادغام هوش مصنوعی در ایمنی نیز نشان می‌دهد که کاربردهای متنی، تصویری و صوتی می‌توانند در کنار یکدیگر برای تحلیل گزارش‌ها، پایش محیط و تشخیص وضعیت‌های غیرعادی به کار روند، هرچند مسائل مربوط به کیفیت داده، تعمیم‌پذیری مدل‌ها و پذیرش کاربران همچنان باقی است (Rabbi, 2024). استفاده از داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی در مدیریت ایمنی و کیفیت نیز نشان داده است که تجمیع داده‌ها و تحلیل هوشمند می‌تواند تصمیم‌گیری مدیریتی را دقیق‌تر و سریع‌تر سازد (Jiang et al., 2024).

یکی دیگر از ظرفیت‌های مهم فناوری، ایجاد ساختارهای دانشی و هستی‌شناسی برای یکپارچه‌سازی اطلاعات پراکنده ایمنی است. در محیط بندری، داده‌های مربوط به حوادث، تجهیزات، کارکنان، مواد خطرناک، شرایط محیطی و اقدامات کنترلی معمولاً در سامانه‌های جداگانه ذخیره می‌شوند. نبود زبان مشترک میان این سامانه‌ها می‌تواند تحلیل جامع ریسک را دشوار کند. توسعه ابزارهای مبتنی بر هستی‌شناسی در مدیریت ایمنی پروژه‌های ساختمانی نشان داده است که مدل‌سازی روابط میان مخاطرات، فعالیت‌ها، عوامل و کنترل‌ها می‌تواند دسترسی به دانش ایمنی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری را بهبود بخشد (Doukari et al., 2024). در بنادر هوشمند، یکپارچه‌سازی این ساختارها با حسگرهای اینترنت اشیا، دوقلوی دیجیتال، سامانه‌های مدیریت نگهداری و داشبوردهای HSE می‌تواند تصویری لحظه‌ای از سطح ریسک ارائه دهد و امکان ردیابی مسیرهای علی حادثه را فراهم سازد.

با این حال، هوشمندسازی مدیریت HSE نباید صرفاً به خرید و نصب فناوری محدود شود. فناوری زمانی اثربخش خواهد بود که با ساختارهای مدیریتی، آموزش کارکنان، رویه‌های عملیاتی و فرهنگ سازمانی هماهنگ شود. عملکرد نامناسب حسگر، داده ناقص، هشدارهای کاذب، خطای الگوریتمی یا حمله سایبری می‌تواند خود به منبع جدیدی از ریسک تبدیل شود. مطالعات مرتبط با شیوه‌های ایمنی پایدار در صنایع پرخطر نشان داده‌اند که مدیریت مؤثر مخاطرات نیازمند هماهنگی میان کنترل‌های فنی، سیاست‌های HSE، مشارکت کارکنان و پایداری سازمانی است (Jamil et al., 2025). راهبردهای مدیریت منابع انسانی در صنایع نفت و گاز نیز بر نقش آموزش، توسعه شایستگی، ارتباطات، مشارکت کارکنان و ارزیابی عملکرد در کاهش ریسک تأکید دارند (Oyewole et al., 2024). بنابراین، فناوری هوشمند باید به عنوان بخشی از یک نظام اجتماعی - فنی دیده شود که در آن انسان، فرایند، ساختار و فناوری به طور متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند.

ماهیت پیچیده ریسک‌های بندری همچنین مستلزم استفاده از رویکردهای تحلیلی است که بتوانند وابستگی و بازخورد میان معیارها را مدل‌سازی کنند. روش‌های سنتی ارزیابی ریسک معمولاً احتمال و شدت پیامد را به صورت مستقل در نظر می‌گیرند و قادر نیستند نقش علی عوامل یا اثرات زنجیره‌ای آن‌ها را به طور کامل نشان دهند. مرور مدیریت ریسک در نگهداری هوانوردی نشان داده است که در سیستم‌های پیچیده و ایمنی محور، ترکیب رویکردهای سازمانی، انسانی و فنی برای تحلیل جامع ریسک ضروری است (Mendes et al., 2022). در بنادر نیز ضعف نگهداری، فشار کاری، خطای انسانی، کیفیت داده، امنیت سایبری و شرایط محیطی می‌توانند یکدیگر را تقویت کنند. از این رو، استفاده از تحلیل شبکه‌ای می‌تواند روابط اثرگذاری و اثرپذیری میان عوامل را مشخص سازد و عوامل علی را از پیامدهای ثانویه متمایز کند. فرایند تحلیل شبکه‌ای نیز امکان وزن‌دهی معیارها را در نظر گرفتن وابستگی‌های درونی و بیرونی را فراهم می‌آورد، در حالی که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توانند گزینه‌های فناوری را بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای گاه متعارض مانند اثربخشی، هزینه، قابلیت اطمینان، امنیت، سهولت اجرا و مقیاس‌پذیری رتبه‌بندی کنند.

اگرچه مطالعات پیشین هر یک بخشی از موضوع، مانند فرهنگ ایمنی، رهبری، مدیریت منابع انسانی، آموزش تاب‌آوری، هوش مصنوعی، بینایی ماشین، گراف دانش یا مدیریت ریسک سازمانی را بررسی کرده‌اند، همچنان خلأ قابل توجهی در ارائه الگویی یکپارچه برای مدیریت ریسک HSE در بنادر کانتینری وجود دارد. بخش مهمی از پژوهش‌ها به صنایع ساخت‌وساز، انرژی، سلامت، ورزش، تولید یا هوانوردی اختصاص یافته‌اند و انتقال مستقیم نتایج آن‌ها به محیط بندری بدون توجه به ویژگی‌های عملیاتی، سازمانی و فناوریانه بندر امکان‌پذیر نیست. افزون بر این، بسیاری از الگوهای موجود یا بر شناسایی مخاطرات تمرکز دارند یا بر کاربرد یک فناوری خاص، در حالی که مدیریت ریسک در بندر نیازمند تلفیق هم‌زمان عوامل مدیریتی، انسانی، فنی، سایبری، محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای است. در چنین الگویی باید ابتدا عوامل و شاخص‌های کلیدی شناسایی شوند، سپس روابط علی و شبکه‌ای آن‌ها تعیین گردد، وزن و اولویت ریسک‌ها محاسبه شود و در نهایت فناوری‌های هوشمند متناسب با ساختار ریسک رتبه‌بندی و انتخاب شوند.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارائه الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در بنادر کانتینری با استفاده از تحلیل شبکه‌ای و تصمیم‌گیری چندمعیاره در اسکله شهید رجایی بود.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و توسعه‌ای و از نظر رویکرد روش‌شناختی، یک پژوهش آمیخته اکتشافی متوالی بود که با هدف شناسایی، تحلیل، وزن‌دهی و اولویت‌بندی ریسک‌های بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست و ارائه یک الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در اسکله شهید رجایی انجام شد. در بخش کیفی، از روش تحلیل مضمون و در بخش کمی، از ترکیب دلفی فازی، تکنیک

دیتمل فازی، فرایند تحلیل شبکه‌ای و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور فازی استفاده شد. انتخاب این طرح به این دلیل صورت گرفت که مدیریت ریسک HSE در بنادر کانتینری دارای ابعاد متعدد، روابط متقابل پیچیده، عدم قطعیت بالا و وابستگی میان عوامل انسانی، فنی، محیطی، مدیریتی و فناورانه است و تحلیل این روابط با استفاده از روش‌های خطی و سلسله‌مراتبی متعارف به‌تنهایی امکان‌پذیر نیست. قلمرو مکانی پژوهش، مجتمع بندری شهید رجایی در استان هرمزگان و به‌طور مشخص اسکله‌ها، محوطه‌های کانتینری، انبارها، مسیرهای تردد تجهیزات، واحدهای تخلیه و بارگیری، واحدهای HSE، آتش‌نشانی و مدیریت بحران، فناوری اطلاعات و سامانه‌های نظارتی این مجتمع بود. جامعه پژوهش را مدیران، سرپرستان و کارشناسانی تشکیل دادند که در حوزه‌های ایمنی، بهداشت حرفه‌ای، محیط‌زیست، عملیات بندری، تخلیه و بارگیری کانتینر، مدیریت بحران، فناوری اطلاعات، اتوماسیون صنعتی و سامانه‌های هوشمند در اسکله شهید رجایی فعالیت داشتند. نمونه اصلی پژوهش شامل ۲۴ نفر از خبرگان بود که به روش نمونه‌گیری هدفمند مبتنی بر معیار و در ادامه با استفاده از روش گلوله‌برفی انتخاب شدند. این تعداد شامل ۷ نفر از مدیران و کارشناسان HSE، ۵ نفر از مدیران و سرپرستان عملیات کانتینری، ۴ نفر از متخصصان فناوری اطلاعات، اتوماسیون و سامانه‌های هوشمند، ۳ نفر از کارشناسان آتش‌نشانی و مدیریت بحران، ۳ نفر از متخصصان محیط‌زیست بندری و ۲ نفر از مدیران ارشد مجتمع بندری بود. معیارهای ورود به پژوهش شامل داشتن حداقل مدرک کارشناسی، برخورداری از حداقل ۵ سال سابقه فعالیت مرتبط در محیط‌های بندری یا صنایع دریایی، داشتن تجربه مستقیم در زمینه شناسایی یا کنترل ریسک‌های HSE، آشنایی با فرایندهای عملیاتی بنادر کانتینری و تمایل به مشارکت در همه مراحل پژوهش بود. ناقص گذاشتن بیش از ۱۰ درصد پرسش‌ها، عدم شرکت در یکی از دوره‌های دلفی یا نداشتن انسجام منطقی در قضاوت‌های زوجی به‌عنوان معیارهای خروج در نظر گرفته شد. میانگین سابقه حرفه‌ای خبرگان ۱۴.۶ سال بود و دامنه سابقه آنان از ۶ تا ۲۸ سال متغیر بود. از نظر تحصیلات، ۸ نفر دارای مدرک کارشناسی، ۱۲ نفر دارای مدرک کارشناسی ارشد و ۴ نفر دارای مدرک دکتری تخصصی بودند. در مرحله کیفی، مصاحبه‌ها تا دستیابی به اشباع نظری ادامه یافت؛ به‌گونه‌ای که پس از مصاحبه بیست‌ویکم مضمون جدیدی استخراج نشد و سه مصاحبه بعدی به‌منظور اطمینان از تثبیت اشباع نظری انجام گرفت. پیش از اجرای اصلی، ابزار پژوهش در یک مطالعه مقدماتی با مشارکت ۱۰ نفر از کارشناسان واجد شرایط اسکله شهید رجایی که در نمونه اصلی وارد نشدند، بررسی شد. همه مشارکت‌کنندگان پس از دریافت توضیحات لازم درباره اهداف پژوهش، محرمانگی اطلاعات، اختیاری بودن مشارکت و امکان انصراف در هر مرحله، رضایت آگاهانه خود را اعلام کردند. همچنین، اطلاعات افراد به‌صورت کدگذاری شده ثبت شد و نتایج تنها در سطح کلی گزارش گردید.

گردآوری داده‌ها با استفاده از بررسی اسناد و گزارش‌های HSE، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته، پرسشنامه محقق‌ساخته شناسایی و ارزیابی ریسک‌های HSE، پرسشنامه دلفی فازی، ماتریس مقایسات زوجی دیتمل فازی، پرسشنامه فرایند تحلیل شبکه‌ای و ماتریس ارزیابی فناوری‌های هوشمند انجام شد. در مرحله نخست، گزارش‌های حوادث و شبه‌حوادث، فرم‌های بازرسی ایمنی، گزارش‌های آتش‌نشانی، اسناد ارزیابی ریسک، گزارش‌های پایش آلاینده‌های محیط کار، مستندات زیست‌محیطی، دستورالعمل‌های تخلیه و بارگیری، گزارش‌های توقف عملیات و سوابق نقص تجهیزات بررسی شدند. سپس مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۲۴ خبره انجام شد. راهنمای مصاحبه شامل ۱۲ پرسش اصلی و تعدادی پرسش تکمیلی بود که موضوعاتی مانند مهم‌ترین مخاطرات ایمنی در عملیات کانتینری، عوامل مؤثر بر حوادث تجهیزات جابه‌جایی کانتینر، ریسک‌های بهداشت حرفه‌ای، تهدیدهای زیست‌محیطی، ضعف‌های سازمانی، آسیب‌پذیری‌های سایبری، محدودیت‌های سامانه‌های کنترلی موجود و قابلیت‌های فناوری‌های هوشمند برای پیشگیری، پایش، هشداردهی و واکنش به ریسک‌ها را پوشش می‌داد. مصاحبه‌ها به‌صورت حضوری و در محیطی آرام انجام شد، هر مصاحبه بین ۴۵ تا ۷۵ دقیقه به طول انجامید و با رضایت مشارکت‌کنندگان

ضبط و سپس به صورت کلمه به کلمه پیاده‌سازی شد. برای افزایش اعتبار داده‌های کیفی، از بازبینی مشارکت‌کنندگان، بررسی همکار پژوهشی، مقایسه مستمر کدها، ثبت مسیر تصمیم‌گیری و تطبیق یافته‌های مصاحبه با اسناد HSE استفاده شد.

بر اساس نتایج بررسی اسناد، مصاحبه‌ها و مرور چارچوب‌های تخصصی مدیریت ریسک، نسخه اولیه پرسشنامه شناسایی ریسک‌های HSE با ۵۴ گویه تدوین شد. این پرسشنامه پنج حوزه اصلی شامل ریسک‌های ایمنی و حوادث عملیاتی، ریسک‌های بهداشت حرفه‌ای، ریسک‌های محیط‌زیستی، ریسک‌های مدیریتی و سازمانی و ریسک‌های فناوریانه و سایبری را اندازه‌گیری می‌کرد. ریسک‌های ایمنی و عملیاتی شامل مواردی مانند برخورد تجهیزات متحرک، سقوط کانتینر، واژگونی جرثقیل، خرابی اسپریدر، سقوط از ارتفاع، آتش‌سوزی، انفجار و تداخل مسیرهای حرکت بود. ریسک‌های بهداشت حرفه‌ای شامل مواجهه با صدا، ارتعاش، گرما، آلاینده‌های شیمیایی، ارگونومی نامناسب، خستگی و فشار روانی شغلی بود. ریسک‌های محیط‌زیستی نیز نشت سوخت و مواد خطرناک، آلودگی آب و خاک، انتشار آلاینده‌های هوا، مدیریت نامناسب پسماند و پیامدهای زیست‌محیطی حوادث دریایی را دربر می‌گرفت. در حوزه مدیریتی و سازمانی، عواملی مانند ضعف آموزش، نارسایی ارتباطات، نبود هماهنگی بین واحدها، فشار زمانی، ناکافی بودن فرهنگ ایمنی، ضعف نگهداری پیشگیرانه و کمبود آمادگی در شرایط اضطراری بررسی شد. حوزه فناوریانه و سایبری نیز شامل اختلال در سامانه‌های کنترل، ضعف یکپارچگی داده‌ها، از کار افتادن حسگرها، حملات سایبری، خطای الگوریتمی، نبود زیرساخت ارتباطی پایدار و وابستگی بیش از حد به سامانه‌های خودکار بود. میزان اهمیت هر گویه در پرسشنامه اولیه بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای از ۱ به معنای «اهمیت بسیار کم» تا ۵ به معنای «اهمیت بسیار زیاد» ارزیابی شد. همچنین، برای ارزیابی شدت ریسک، سه مؤلفه احتمال وقوع، شدت پیامد و قابلیت کشف پیش از وقوع بر اساس مقیاس ۱ تا ۱۰ سنجیده شد.

روایی صوری و محتوایی ابزار با استفاده از نظر ۸ نفر از اعضای پنل خبرگان بررسی شد. خبرگان، گویه‌ها را از نظر وضوح، تناسب، ضرورت، پوشش مفهومی و قابلیت استفاده در محیط بندری ارزیابی کردند و اصلاحات لازم در نحوه نگارش، ادغام گویه‌های مشابه و حذف موارد مبهم اعمال شد. برای سنجش روایی محتوایی، نسبت روایی محتوا و شاخص روایی محتوا محاسبه شد و تنها گویه‌هایی حفظ شدند که مقادیر آن‌ها از حدود قابل قبول بیشتر بود. پایایی بخش مقیاسی پرسشنامه در مطالعه مقدماتی با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ بررسی شد و ضریب آلفای کل ابزار ۰.۹۱ به دست آمد. ضرایب مربوط به ابعاد مختلف نیز بیشتر از ۰.۸۰ بود که نشان‌دهنده همسانی درونی مطلوب ابزار بود. در مرحله دلفی فازی، خبرگان میزان اهمیت و ضرورت هر شاخص را با استفاده از متغیرهای کلامی «بسیار کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «بسیار زیاد» مشخص کردند و هر متغیر کلامی به یک عدد فازی مثلثی تبدیل شد. فرایند دلفی در دو دور اجرا شد و معیار حفظ هر شاخص شامل دستیابی به میانگین فازی زدایی شده بیشتر از ۰.۷۰، توافق حداقل ۷۵ درصدی خبرگان و کاهش فاصله دیدگاه‌ها در دور دوم بود.

برای تعیین روابط علی و میزان تأثیرگذاری متقابل شاخص‌ها، پرسشنامه دیمتل فازی تدوین شد. در این پرسشنامه، خبرگان میزان تأثیر هر عامل بر سایر عوامل را با استفاده از طیف پنج‌درجه‌ای از «بدون تأثیر» تا «تأثیر بسیار زیاد» ارزیابی کردند. قضاوت‌های کلامی به اعداد فازی مثلثی تبدیل شد و از آن‌ها برای تشکیل ماتریس روابط مستقیم استفاده گردید. پس از شناسایی ساختار روابط شبکه‌ای، پرسشنامه مقایسات زوجی فرایند تحلیل شبکه‌ای تهیه شد. این ابزار برای مقایسه اهمیت نسبی ابعاد، معیارها و زیرمعیارها با در نظر گرفتن وابستگی‌های درونی و بیرونی میان آن‌ها به کار رفت. مقایسات زوجی بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی انجام شد و برای هر ماتریس، نرخ ناسازگاری محاسبه گردید. مقایساتی که نرخ ناسازگاری آن‌ها بیشتر از ۰.۱۰ بود، برای بازنگری در اختیار خبره مربوط قرار گرفت. در مرحله نهایی، هفت دسته فناوری هوشمند شامل حسگرهای اینترنت اشیا، تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی، سامانه‌های بینایی ماشین، دوقلوی دیجیتال بندر، پهپادها و ربات‌های بازرسی، تجهیزات حفاظت فردی هوشمند و مرکز فرماندهی یکپارچه HSE بر اساس معیارهای اثربخشی در کاهش ریسک،

قابلیت پیش‌بینی حادثه، سرعت واکنش، هزینه پیاده‌سازی، امکان یکپارچه‌سازی، قابلیت اطمینان، امنیت سایبری، سهولت استفاده، مقیاس‌پذیری و الزامات آموزشی ارزیابی شدند. ارزیابی این گزینه‌ها با استفاده از متغیرهای کلامی فازی انجام گرفت تا عدم قطعیت موجود در قضاوت خبرگان و تفاوت برداشت آنان از عملکرد فناوری‌ها در تحلیل نهایی لحاظ شود.

تحلیل داده‌ها در چند مرحله متوالی انجام شد. در مرحله کیفی، متن مصاحبه‌ها پس از پیاده‌سازی چندین بار مطالعه شد و واحدهای معنایی مرتبط با مخاطرات HSE، عوامل ایجادکننده ریسک، پیامدها، ضعف‌های کنترلی و کاربرد فناوری‌های هوشمند استخراج گردید. سپس کدگذاری اولیه انجام شد و کدهای مشابه در قالب مفاهیم فرعی و مضامین اصلی ادغام شدند. فرایند تحلیل مضمون شامل آشنایی با داده‌ها، تولید کدهای اولیه، جست‌وجوی مضامین، بازبینی مضامین، تعریف و نام‌گذاری مضامین و تدوین شبکه نهایی مضامین بود. برای بررسی قابلیت اعتماد کدگذاری، بخشی از مصاحبه‌ها به‌طور مستقل توسط پژوهشگر دوم کدگذاری شد و ضریب توافق بین کدگذاران محاسبه گردید. اختلاف‌های موجود نیز از طریق بحث و دستیابی به توافق رفع شد. یافته‌های کیفی همراه با نتایج تحلیل اسناد، مبنای تدوین فهرست اولیه عوامل و شاخص‌های الگوی مدیریت ریسک قرار گرفت.

در مرحله دلفی فازی، دیدگاه‌های کلامی خبرگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل و میانگین فازی هر شاخص محاسبه شد. پس از فازی‌زدایی، شاخص‌هایی که حد نصاب تعیین‌شده را کسب کردند، در مدل باقی ماندند. میزان توافق خبرگان بین دو دور با استفاده از ضریب هماهنگی کندال بررسی شد و افزایش این ضریب به‌عنوان نشانه نزدیک شدن دیدگاه‌های خبرگان در نظر گرفته شد. سپس برای تحلیل روابط علی و شبکه‌ای عوامل، روش دیمتل فازی اجرا شد. در این مرحله، ابتدا ماتریس روابط مستقیم گروهی تشکیل و نرمال‌سازی شد و در ادامه ماتریس روابط کل به دست آمد. مجموع سطرهای هر عامل به‌عنوان میزان تأثیرگذاری و مجموع ستون‌ها به‌عنوان میزان تأثیرپذیری آن عامل محاسبه شد. مقدار حاصل از جمع تأثیرگذاری و تأثیرپذیری، درجه اهمیت و مرکزیت هر عامل را نشان داد و تفاضل این دو مقدار برای تفکیک عوامل علی از عوامل معلولی استفاده شد. عواملی که مقدار تفاضل مثبت داشتند، در گروه عوامل اثرگذار یا علی و عواملی که مقدار منفی داشتند، در گروه عوامل اثرپذیر یا معلولی قرار گرفتند. حد آستانه روابط نیز بر اساس میانگین مقادیر ماتریس روابط کل تعیین شد و تنها روابطی که از این حد بیشتر بودند، در نقشه شبکه‌ای نهایی نمایش داده شدند.

پس از تعیین روابط متقابل، وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای محاسبه شد. برای این منظور، ابتدا مدل شبکه‌ای شامل خوشه‌های اصلی، عناصر هر خوشه و روابط وابستگی میان عناصر بر اساس نتایج دیمتل ترسیم شد. سپس میانگین هندسی قضاوت‌های خبرگان برای تجمیع مقایسات زوجی به کار رفت و بردارهای اولویت محلی استخراج شد. در ادامه، سوپرماتریس ناموزون، سوپرماتریس موزون و سوپرماتریس حد تشکیل شد و وزن نهایی هر شاخص از سوپرماتریس حد به دست آمد. برای اطمینان از اعتبار قضاوت‌ها، نرخ ناسازگاری همه ماتریس‌ها بررسی شد و تنها ماتریس‌هایی که نرخ ناسازگاری کمتر از ۰.۱۰ داشتند، در تحلیل نهایی وارد شدند. به‌منظور تعیین اولویت نهایی ریسک‌ها، وزن شبکه‌ای هر عامل در امتیازهای احتمال وقوع، شدت پیامد و قابلیت کشف ضرب شد و عدد اولویت ریسک تعدیل‌شده محاسبه گردید. این روش سبب شد علاوه بر ویژگی‌های ذاتی هر ریسک، اهمیت شبکه‌ای و نقش علی آن در ایجاد یا تشدید سایر ریسک‌ها نیز در اولویت‌بندی لحاظ شود.

در مرحله نهایی، فناوری‌ها و راهبردهای هوشمند مدیریت ریسک با استفاده از روش ویکور فازی رتبه‌بندی شدند. ابتدا ماتریس تصمیم فازی بر اساس ارزیابی خبرگان تشکیل و نرمال‌سازی شد. سپس راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی برای هر معیار تعیین شد و مقادیر سودمندی گروهی، بیشینه تأسف فردی و شاخص سازش برای هر گزینه محاسبه گردید. ضریب سازش برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شد تا میان مطلوبیت جمعی معیارها و کمینه‌سازی نامطلوب‌ترین وضعیت تعادل برقرار شود. گزینه‌ای که کمترین مقدار شاخص سازش را به دست آورد،

به‌عنوان راهکار دارای بالاترین اولویت معرفی شد. شرایط مزیت قابل قبول و ثبات قابل قبول نیز برای انتخاب راه‌حل سازشی بررسی گردید. به‌منظور سنجش پایداری نتایج، تحلیل حساسیت با تغییر ضریب سازش در مقادیر ۰.۲۵، ۰.۵۰ و ۰.۷۵ و همچنین با تغییر ۱۰ درصدی وزن معیارهای اصلی انجام شد. ثبات رتبه‌بندی فناوری‌ها در سناریوهای مختلف با استفاده از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن ارزیابی شد. در پایان، نتایج تحلیل مضمون، دلفی فازی، دیمتل فازی، فرایند تحلیل شبکه‌ای و ویکور فازی با یکدیگر تلفیق شد و الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در قالب مجموعه‌ای از ابعاد، شاخص‌ها، روابط علی، وزن‌های اولویت، ریسک‌های بحرانی و فناوری‌های پیشنهادی برای اسکله شهید رجایی تدوین گردید.

یافته‌ها

در این پژوهش، داده‌های مربوط به هر ۲۴ نفر از خبرگان وارد تحلیل نهایی شد و هیچ پرسشنامه‌ای به دلیل نقص اطلاعات، ناسازگاری شدید قضاوت‌ها یا انصراف مشارکت‌کننده حذف نشد. از مجموع مشارکت‌کنندگان، ۲۱ نفر معادل ۸۷.۵ درصد مرد و ۳ نفر معادل ۱۲.۵ درصد زن بودند. میانگین سنی خبرگان ۴۳.۸ سال با انحراف معیار ۷.۱ سال بود و دامنه سنی آنان از ۳۲ تا ۵۸ سال متغیر بود. از نظر گروه سنی، ۷ نفر معادل ۲۹.۲ درصد در گروه ۳۰ تا ۳۹ سال، ۱۱ نفر معادل ۴۵.۸ درصد در گروه ۴۰ تا ۴۹ سال و ۶ نفر معادل ۲۵ درصد در گروه ۵۰ سال و بیشتر قرار داشتند. میانگین سابقه حرفه‌ای مشارکت‌کنندگان ۱۴.۶ سال با انحراف معیار ۶.۲ سال بود و کمترین و بیشترین سابقه فعالیت آنان به ترتیب ۶ و ۲۸ سال به دست آمد. از نظر سطح تحصیلات، ۸ نفر معادل ۳۳.۳ درصد دارای مدرک کارشناسی، ۱۲ نفر معادل ۵۰ درصد دارای مدرک کارشناسی ارشد و ۴ نفر معادل ۱۶.۷ درصد دارای مدرک دکتری تخصصی بودند. از نظر حوزه تخصصی نیز ۷ نفر از مدیران و کارشناسان HSE، ۵ نفر از مدیران و سرپرستان عملیات کانتینری، ۴ نفر از متخصصان فناوری اطلاعات، اتوماسیون و سامانه‌های هوشمند، ۳ نفر از کارشناسان آتش‌نشانی و مدیریت بحران، ۳ نفر از متخصصان محیط‌زیست بندری و ۲ نفر از مدیران ارشد مجتمع بندری شهید رجایی در پژوهش شرکت کردند. این ترکیب نشان داد که پنل خبرگان از تنوع تخصصی مناسبی برخوردار بود و دیدگاه‌های مدیریتی، عملیاتی، ایمنی، بهداشتی، محیط‌زیستی و فناورانه به‌طور هم‌زمان در فرایند طراحی و اعتبارسنجی الگو مورد توجه قرار گرفت.

تحلیل مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و اسناد HSE به استخراج ۴۱۲ واحد معنایی منجر شد. پس از حذف موارد تکراری و ادغام مفاهیم مشابه، ۱۲۴ کد اولیه و ۳۷ مفهوم سازمان‌دهنده به دست آمد. در مرحله بازبینی و پالایش، مفاهیم در قالب ۲۰ شاخص نهایی و پنج بعد اصلی شامل ریسک‌های ایمنی و عملیاتی، ریسک‌های مدیریتی و سازمانی، ریسک‌های فناورانه و سایبری، ریسک‌های محیط‌زیستی و ریسک‌های بهداشت حرفه‌ای سازمان‌دهی شدند. همه ۲۰ شاخص وارد فرایند دلفی فازی شدند. ضریب هماهنگی کندال در دور نخست برابر با ۰.۵۶ و در دور دوم برابر با ۰.۷۱ بود. آزمون معنی‌داری ضریب کندال در دور دوم نشان داد که توافق خبرگان از نظر آماری معنی‌دار است و سطح همگرایی مناسبی میان دیدگاه‌های آنان وجود دارد. مقدار آماره خی‌دو در دور دوم برابر با ۳۲۳.۷۶ با ۱۹ درجه آزادی و سطح معنی‌داری کمتر از ۰.۰۰۱ به دست آمد. نتایج غربالگری نهایی شاخص‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱

نتایج اعتبارسنجی و غربالگری شاخص‌های الگوی مدیریت ریسک HSE با استفاده از دلفی فازی

بعد اصلی	کد	شاخص نهایی	امتیاز فازی‌زدایی شده دور نخست	امتیاز فازی‌زدایی شده دور دوم	درصد خبرگان	توافق وضعیت نهایی
ایمنی و عملیاتی	S1	برخورد تجهیزات متحرک با کارکنان، وسایل نقلیه یا سایر تجهیزات	۰.۸۹	۰.۹۲	۹۵.۸	تأیید
ایمنی و عملیاتی	S2	سقوط کانتینر، نقص اسپریدر و ناپایداری جرثقیل‌های کانتینری	۰.۸۷	۰.۹۱	۹۵.۸	تأیید
ایمنی و عملیاتی	S3	آتش‌سوزی، انفجار و حوادث مرتبط با کالاهای خطرناک	۰.۸۴	۰.۸۹	۹۱.۷	تأیید
ایمنی و عملیاتی	S4	سقوط از ارتفاع و نالایمی عملیات تعمیر و نگهداری	۰.۷۸	۰.۸۴	۸۷.۵	تأیید
مدیریتی و سازمانی	M1	ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت به الزامات HSE	۰.۸۶	۰.۹۱	۹۵.۸	تأیید
مدیریتی و سازمانی	M2	ناکارآمدی نگهداری پیشگیرانه و مدیریت یکپارچگی تجهیزات	۰.۸۴	۰.۸۹	۹۱.۷	تأیید
مدیریتی و سازمانی	M3	ناکافی بودن آموزش، شایستگی حرفه‌ای و کنترل خطاهای انسانی	۰.۸۲	۰.۸۷	۹۱.۷	تأیید
مدیریتی و سازمانی	M4	ضعف هماهنگی بین‌واحدی، ارتباطات و آمادگی واکنش اضطراری	۰.۷۸	۰.۸۴	۸۷.۵	تأیید
فناورانه و سایبری	T1	ضعف یکپارچگی، دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها و حسگرها	۰.۸۳	۰.۹۰	۹۱.۷	تأیید
فناورانه و سایبری	T2	آسیب‌پذیری سایبری و اختلال در تداوم سامانه‌های کنترلی	۰.۸۲	۰.۸۹	۹۱.۷	تأیید
فناورانه و سایبری	T3	خطای الگوریتمی و ناکافی بودن دقت تحلیل‌های پیش‌بینانه	۰.۸۰	۰.۸۷	۸۷.۵	تأیید
فناورانه و سایبری	T4	ضعف زیرساخت ارتباطی و قابلیت تعامل میان سامانه‌های هوشمند	۰.۷۶	۰.۸۳	۸۳.۳	تأیید
محیط‌زیستی	E1	نشت سوخت، روغن و مواد خطرناک در محوطه یا آب‌های بندری	۰.۸۲	۰.۸۸	۹۱.۷	تأیید
محیط‌زیستی	E2	آلودگی آب، خاک و زیست‌بوم دریایی ناشی از عملیات بندری	۰.۷۹	۰.۸۵	۸۷.۵	تأیید
محیط‌زیستی	E3	مدیریت نامناسب پسماندها و بقایای کالاهای خطرناک	۰.۷۵	۰.۸۲	۸۳.۳	تأیید
محیط‌زیستی	E4	مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا	۰.۷۱	۰.۷۸	۷۹.۲	تأیید
بهداشت حرفه‌ای	H1	خستگی، نوبت‌کاری، فشار زمانی و بار ذهنی کارکنان	۰.۸۱	۰.۸۷	۹۱.۷	تأیید
بهداشت حرفه‌ای	H2	مواجهه با گرما، صدا، ارتعاش و شرایط نامطلوب محیط کار	۰.۷۸	۰.۸۴	۸۷.۵	تأیید
بهداشت حرفه‌ای	H3	بار ارگونومیک، وضعیت بدنی نامناسب و جابه‌جایی دستی بار	۰.۷۶	۰.۸۲	۸۳.۳	تأیید
بهداشت حرفه‌ای	H4	مواجهه شغلی با مواد شیمیایی، گازها و ذرات تنفسی	۰.۷۴	۰.۸۰	۸۳.۳	تأیید

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، همه شاخص‌های استخراج‌شده امتیاز فازی‌زدایی‌شده بیشتر از حد آستانه ۰.۷۰ را به دست آوردند و درصد توافق خبرگان درباره ضرورت حضور آن‌ها در الگوی نهایی بین ۷۹.۲ تا ۹۵.۸ درصد متغیر بود. بیشترین امتیاز دور دوم به شاخص برخورد تجهیزات متحرک با کارکنان، وسایل نقلیه یا سایر تجهیزات با امتیاز ۰.۹۲ اختصاص یافت. پس از آن، شاخص‌های سقوط کانتینر و نقص تجهیزات جابه‌جایی با امتیاز ۰.۹۱ و ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت با امتیاز ۰.۹۱ قرار گرفتند. این یافته نشان داد که خبرگان، حوادث ناشی از تداخل حرکت تجهیزات، ناپایداری بار و ضعف جهت‌گیری مدیریتی نسبت به ایمنی را مهم‌ترین منابع ریسک HSE در اسکله شهید رجایی ارزیابی کردند. شاخص ضعف یکپارچگی و قابلیت اطمینان داده‌ها و حسگرها نیز با امتیاز ۰.۹۰ در جایگاه بالایی قرار گرفت که بیانگر وابستگی اثربخشی مدیریت هوشمند HSE به کیفیت داده‌های عملیاتی است. کمترین امتیاز مربوط به مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای با مقدار ۰.۷۸ بود؛ با این حال، امتیاز این شاخص همچنان بالاتر از حد پذیرش قرار داشت و ۷۹.۲ درصد خبرگان آن را برای حضور در مدل ضروری دانستند. افزایش امتیاز تمام شاخص‌ها از دور نخست به دور دوم، همراه با افزایش ضریب هماهنگی کندال، نشان‌دهنده کاهش پراکندگی دیدگاه‌ها و شکل‌گیری اجماع نسبتاً قوی میان خبرگان بود. بنابراین، هیچ‌یک از ۲۰ شاخص در پایان فرایند دلفی حذف نشد و همه آن‌ها وارد مرحله تحلیل روابط علی و شبکه‌ای شدند.

برای تعیین نوع و شدت روابط میان ابعاد اصلی، ماتریس روابط مستقیم فازی بر اساس قضاوت خبرگان تشکیل و پس از نرمال‌سازی، ماتریس روابط کل محاسبه شد. مقدار آستانه روابط برابر با ۰.۱۸۷ به دست آمد و تنها روابطی که مقدار آن‌ها بیشتر از این حد بود، در ترسیم شبکه علی حفظ شدند. نتایج تحلیل دیمتل فازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲

نتایج تحلیل دیمتل فازی ابعاد اصلی مدیریت ریسک HSE

بعد اصلی	میزان تأثیرگذاری D	میزان تأثیرپذیری R	برجستگی D+R	رابطه خالص D-R	نوع عامل	رتبه برجستگی
ایمنی و عملیاتی	۴.۷۲	۴.۱۸	۸.۹۰	۰.۵۴	علی	۱
فناورانه و سایبری	۴.۳۵	۴.۲۶	۸.۶۱	۰.۰۹	علی	۲
مدیریتی و سازمانی	۴.۸۶	۳.۷۱	۸.۵۷	۱.۱۵	علی	۳
محیط‌زیستی	۳.۹۱	۴.۲۲	۸.۱۳	منفی ۰.۳۱	معلولی	۴
بهداشت حرفه‌ای	۳.۶۴	۴.۱۱	۷.۷۵	منفی ۰.۴۷	معلولی	۵

بر اساس جدول ۲، بعد ایمنی و عملیاتی با مقدار برجستگی ۸.۹۰، بیشترین میزان حضور و تعامل را در شبکه ریسک HSE داشت. به بیان دیگر، این بعد هم بر سایر ابعاد اثر قابل توجهی اعمال می‌کرد و هم از تغییرات آن‌ها تأثیر می‌پذیرفت. بعد فناورانه و سایبری با برجستگی ۸.۶۱ در رتبه دوم قرار گرفت و مقدار مثبت رابطه خالص آن نشان داد که این بعد، هرچند به‌طور هم‌زمان از ساختار مدیریتی و شرایط عملیاتی تأثیر می‌پذیرد، در مجموع نقش علی محدودی در شبکه دارد. بعد مدیریتی و سازمانی با مقدار رابطه خالص ۱.۱۵، قوی‌ترین عامل علی مدل بود. این نتیجه نشان داد که ضعف یا تقویت فرهنگ ایمنی، تعهد مدیریت، نگهداری پیشگیرانه، آموزش کارکنان و هماهنگی اضطراری می‌تواند بیشترین اثر زنجیره‌ای را بر سایر ریسک‌های بندر ایجاد کند. اگرچه برجستگی بعد مدیریتی و سازمانی اندکی کمتر از دو بعد نخست بود، مقدار بالای D-R نشان داد که این بعد سرچشمه اصلی انتقال ریسک به حوزه‌های عملیاتی، فناورانه، محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای است. در مقابل، ابعاد محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای به ترتیب با مقادیر خالص منفی ۰.۳۱ و ۰.۴۷ در گروه عوامل معلولی قرار گرفتند. بنابراین،

پیامدهای محیط‌زیستی و آسیب‌های مرتبط با سلامت شغلی کارکنان عمدتاً محصول برهم‌کنش ضعف‌های مدیریتی، اختلال‌های فناورانه و مخاطرات عملیاتی بودند. قوی‌ترین رابطه مستقیم شناسایی‌شده در ماتریس روابط کل، اثر بعد مدیریتی و سازمانی بر بعد ایمنی و عملیاتی با مقدار ۰.۴۳ بود. پس از آن، اثر بعد فناورانه و سایبری بر ایمنی و عملیات با مقدار ۰.۳۹ و اثر ایمنی و عملیات بر محیط‌زیست با مقدار ۰.۳۶ قرار گرفت. این روابط نشان دادند که بهبود مدیریت ریسک صرفاً از طریق کنترل پیامدهای نهایی کافی نیست و مداخله باید ابتدا بر عوامل علی، به‌ویژه نظام مدیریت، نگهداری، آموزش، داده‌های عملیاتی و قابلیت اطمینان سامانه‌های هوشمند متمرکز شود.

پس از شناسایی روابط علی، ساختار شبکه‌ای معیارها بر اساس خروجی دیمتل تشکیل شد و مقایسات زوجی فرایند تحلیل شبکه‌ای انجام گرفت. نرخ ناسازگاری تمام ماتریس‌های مقایسه زوجی کمتر از ۰.۱۰ بود و مقادیر آن بین ۰.۰۱۸ تا ۰.۰۸۶ قرار داشت. بنابراین، قضاوت خبرگان از انسجام منطقی قابل قبول برخوردار بود. وزن نهایی ابعاد و شاخص‌ها پس از تشکیل سوپرماتریس ناموزون، سوپرماتریس موزون و سوپرماتریس حد در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳

وزن‌ها و رتبه‌بندی نهایی ابعاد و شاخص‌های مدیریت ریسک HSE بر اساس فرایند تحلیل شبکه‌ای

رتبه نهایی	وزن نهایی شبکه‌ای	وزن محلی	شاخص	کد	وزن بعد	بعد اصلی
۱	۰.۰۸۸۷	۰.۳۱۰	برخورد تجهیزات متحرک با کارکنان، وسایل نقلیه یا سایر تجهیزات	S1	۰.۲۸۶	ایمنی و عملیاتی
۲	۰.۰۷۷۲	۰.۲۷۰	سقوط کانتینر، نقص اسپریدر و ناپایداری جرثقیل‌های کانتینری	S2	۰.۲۸۶	ایمنی و عملیاتی
۴	۰.۰۶۵۸	۰.۲۳۰	آتش‌سوزی، انفجار و حوادث مرتبط با کالاهای خطرناک	S3	۰.۲۸۶	ایمنی و عملیاتی
۹	۰.۰۵۴۳	۰.۱۹۰	سقوط از ارتفاع و نایمنی عملیات تعمیر و نگهداری	S4	۰.۲۸۶	ایمنی و عملیاتی
۳	۰.۰۷۲۹	۰.۳۰۰	ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت به الزامات HSE	M1	۰.۲۴۳	مدیریتی و سازمانی
۵	۰.۰۶۳۲	۰.۲۶۰	ناکارآمدی نگهداری پیشگیرانه و مدیریت یکپارچگی تجهیزات	M2	۰.۲۴۳	مدیریتی و سازمانی
۷	۰.۰۵۸۳	۰.۲۴۰	ناکافی بودن آموزش، شایستگی حرفه‌ای و کنترل خطاهای انسانی	M3	۰.۲۴۳	مدیریتی و سازمانی
۱۱	۰.۰۴۸۶	۰.۲۰۰	ضعف هماهنگی بین‌واحدی، ارتباطات و آمادگی واکنش اضطراری	M4	۰.۲۴۳	مدیریتی و سازمانی
۶	۰.۰۵۸۹	۰.۲۹۰	ضعف یکپارچگی، دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها و حسگرها	T1	۰.۲۰۳	فناورانه و سایبری
۸	۰.۰۵۴۸	۰.۲۷۰	آسیب‌پذیری سایبری و اختلال در تداوم سامانه‌های کنترلی	T2	۰.۲۰۳	فناورانه و سایبری
۱۰	۰.۰۴۸۷	۰.۲۴۰	خطای الگوریتمی و ناکافی بودن دقت تحلیل‌های پیش‌بینانه	T3	۰.۲۰۳	فناورانه و سایبری
۱۳	۰.۰۴۰۶	۰.۲۰۰	ضعف زیرساخت ارتباطی و قابلیت تعامل میان سامانه‌های هوشمند	T4	۰.۲۰۳	فناورانه و سایبری
۱۲	۰.۰۴۴۱	۰.۳۰۰	نشت سوخت، روغن و مواد خطرناک در محوطه یا آب‌های بندری	E1	۰.۱۴۷	محیط‌زیستی
۱۴	۰.۰۳۹۷	۰.۲۷۰	آلودگی آب، خاک و زیست‌بوم دریایی ناشی از عملیات بندری	E2	۰.۱۴۷	محیط‌زیستی
۱۶	۰.۰۳۳۸	۰.۲۳۰	مدیریت نامناسب پسماندها و بقایای کالاهای خطرناک	E3	۰.۱۴۷	محیط‌زیستی
۱۸	۰.۰۲۹۴	۰.۲۰۰	مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا	E4	۰.۱۴۷	محیط‌زیستی
۱۵	۰.۰۳۵۱	۰.۲۹۰	خستگی، نوبت‌کاری، فشار زمانی و بار ذهنی کارکنان	H1	۰.۱۲۱	بهداشت حرفه‌ای
۱۷	۰.۰۳۱۵	۰.۲۶۰	مواجهه با گرما، صدا، ارتعاش و شرایط نامطلوب محیط کار	H2	۰.۱۲۱	بهداشت حرفه‌ای
۱۹	۰.۰۲۹۰	۰.۲۴۰	بار ارگونومیک، وضعیت بدنی نامناسب و جابه‌جایی دستی بار	H3	۰.۱۲۱	بهداشت حرفه‌ای
۲۰	۰.۰۲۵۴	۰.۲۱۰	مواجهه شغلی با مواد شیمیایی، گازها و ذرات تنفسی	H4	۰.۱۲۱	بهداشت حرفه‌ای

نتایج جدول ۳ نشان داد که بعد ایمنی و عملیاتی با وزن ۰.۲۸۶ مهم‌ترین بعد الگوی مدیریت ریسک HSE در اسکله شهید رجایی بود. پس از آن، ابعاد مدیریتی و سازمانی با وزن ۰.۲۴۳، فناورانه و سایبری با وزن ۰.۲۰۳، محیط‌زیستی با وزن ۰.۱۴۷ و بهداشت حرفه‌ای با وزن ۰.۱۲۱ قرار گرفتند. مجموع وزن سه بعد نخست برابر با ۰.۷۳۲ بود؛ بنابراین، بیش از ۷۳ درصد اهمیت شبکه‌ای مدل به ریسک‌های ایمنی

و عملیاتی، مدیریتی و سازمانی و فناوریانه و سایبری اختصاص یافت. در سطح شاخص‌ها، برخورد تجهیزات متحرک با کارکنان و سایر تجهیزات با وزن نهایی ۰.۰۸۸۷ بالاترین اولویت را کسب کرد. سقوط کانتینر، نقص اسپریدر و ناپایداری جرثقیل با وزن ۰.۰۷۷۲ در رتبه دوم و ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت با وزن ۰.۰۷۲۹ در رتبه سوم قرار گرفت. آتش‌سوزی، انفجار و حوادث کالاهای خطرناک با وزن ۰.۰۶۵۸ و ناکارآمدی نگهداری پیشگیرانه با وزن ۰.۰۶۳۲ نیز رتبه‌های چهارم و پنجم را به خود اختصاص دادند. قرار گرفتن شاخص ضعف یکپارچگی و قابلیت اطمینان داده‌ها و حسگرها در رتبه ششم با وزن ۰.۰۵۸۹ نشان داد که کیفیت داده، صحت عملکرد حسگرها و پیوستگی جریان اطلاعات از عناصر اساسی مدیریت هوشمند ریسک به شمار می‌روند. ناکافی بودن آموزش و کنترل خطاهای انسانی، آسیب‌پذیری سایبری و اختلال سامانه‌های کنترلی، سقوط از ارتفاع و خطای الگوریتمی نیز در میان ۱۰ شاخص نخست قرار گرفتند. این نتایج نشان داد که اولویت‌های مدل تنها به حوادث فیزیکی محدود نیست، بلکه زیرساخت مدیریتی، نگهداری، صلاحیت کارکنان، امنیت سایبری و قابلیت اعتماد سامانه‌های هوشمند نیز سهم چشمگیری در سطح ریسک دارند. در مقابل، مواجهه با مواد شیمیایی و ذرات تنفسی با وزن ۰.۰۲۵۴، بار ارگونومیک با وزن ۰.۰۲۹۰ و مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها با وزن ۰.۰۲۹۴ پایین‌ترین رتبه‌ها را به دست آوردند. پایین‌تر بودن وزن این شاخص‌ها به معنای کم‌اهمیت بودن آن‌ها نبود، بلکه نشان می‌داد که در ساختار روابط متقابل الگو، میزان اثرگذاری شبکه‌ای آن‌ها در مقایسه با عوامل علی و عملیاتی کمتر است.

در مرحله نهایی، هفت راهکار فناوریانه بر اساس ۱۰ معیار اثربخشی در کاهش ریسک، قابلیت پیش‌بینی حادثه، سرعت واکنش، هزینه پیاده‌سازی، قابلیت یکپارچه‌سازی، قابلیت اطمینان، امنیت سایبری، سهولت استفاده، مقیاس‌پذیری و الزامات آموزشی با روش ویکور فازی ارزیابی شدند. در این روش، کمتر بودن مقادیر سودمندی گروهی، بیشینه تأسف فردی و شاخص سازش نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر گزینه بود. نتایج رتبه‌بندی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴

رتبه‌بندی فناوری‌های هوشمند مدیریت ریسک HSE بر اساس روش ویکور فازی

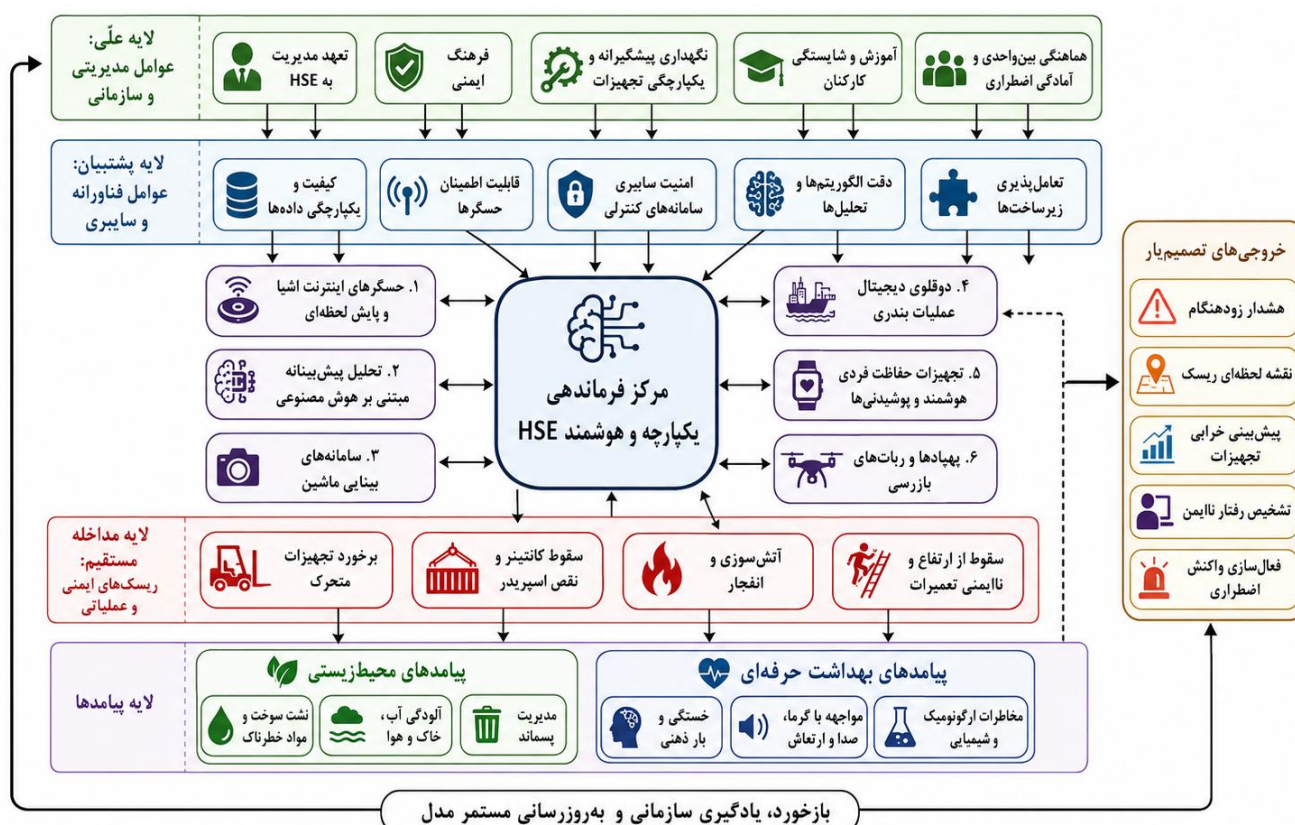
راهکار فناوریانه	سودمندی گروهی S	بیشینه تأسف فردی R	شاخص سازش Q	رتبه نهایی	وضعیت پیشنهادی
مرکز فرماندهی یکپارچه و هوشمند HSE	۰.۲۱۸	۰.۰۶۱	۰.۰۰۰	۱	اولویت راهبردی نخست
شبکه حسگرهای اینترنت اشیا و پایش لحظه‌ای	۰.۲۷۰	۰.۰۷۴	۰.۱۷۷	۲	زیرساخت اجرایی ضروری
تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی	۰.۲۹۱	۰.۰۷۸	۰.۲۴۰	۳	اولویت توسعه تحلیلی
سامانه‌های بینایی ماشین و تشخیص خودکار مخاطره	۰.۳۳۴	۰.۰۸۶	۰.۳۶۸	۴	اولویت عملیاتی تکمیلی
دوقلو دیجیتال عملیات بندری	۰.۳۸۲	۰.۰۹۷	۰.۵۲۴	۵	اولویت توسعه میان‌مدت
تجهیزات حفاظت فردی هوشمند و پوشیدنی‌ها	۰.۴۳۱	۰.۱۱۰	۰.۶۹۶	۶	راهکار پشتیبان کارکنان
پهپادها و ربات‌های بازرسی	۰.۵۱۷	۰.۱۳۳	۱.۰۰۰	۷	راهکار مکمل تخصصی

بر اساس جدول ۴، مرکز فرماندهی یکپارچه و هوشمند HSE با شاخص سازش صفر، مطلوب‌ترین گزینه برای استقرار در اسکله شهید رجایی شناسایی شد. این راهکار در هر دو شاخص سودمندی گروهی و بیشینه تأسف فردی نیز کمترین مقدار را به دست آورد و بنابراین، شرط ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری ویکور را تأمین کرد. فاصله شاخص سازش گزینه نخست و دوم برابر با ۰.۱۷۷ بود که از حد مزیت قابل قبول برابر با ۰.۱۶۷ بیشتر بود. در نتیجه، مرکز فرماندهی یکپارچه HSE به عنوان راه‌حل سازشی برتر و دارای مزیت قابل قبول انتخاب شد.

شبکه حسگرهای اینترنت اشیا با شاخص سازش ۰.۱۷۷ در رتبه دوم قرار گرفت. این فناوری به دلیل امکان پایش لحظه‌ای موقعیت تجهیزات، وضعیت کانتینرها، دما، دود، گاز، ارتعاش، نشت مواد و شرایط محیطی، زیرساخت اصلی تغذیه داده برای سایر فناوری‌های هوشمند محسوب شد. تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی با شاخص ۰.۲۴۰ رتبه سوم را کسب کرد و برای پیش‌بینی خرابی تجهیزات، تشخیص الگوهای منتهی به حادثه، تحلیل رفتار پرخطر و برنامه‌ریزی نگهداری پیشگويانه مناسب ارزیابی شد. سامانه بینایی ماشین با شاخص ۰.۳۶۸ در رتبه چهارم قرار گرفت و کاربرد اصلی آن در تشخیص ورود کارکنان به مناطق خطرناک، شناسایی استفاده نکردن از تجهیزات حفاظت فردی، کنترل مسیر حرکت ماشین‌آلات و تشخیص دود یا شعله تعیین شد. دوقلوی دیجیتال، تجهیزات حفاظت فردی هوشمند و پهپادها و ربات‌های بازرسی به ترتیب رتبه‌های پنجم تا هفتم را به دست آوردند. پایین‌تر بودن رتبه پهپادها و ربات‌ها عمدتاً ناشی از هزینه پیاده‌سازی، محدودیت‌های عملیاتی، الزامات نگهداری و دشواری یکپارچه‌سازی آن‌ها با فرایندهای جاری بندر بود. تحلیل حساسیت با تغییر ضریب سازش در مقادیر ۰.۲۵، ۰.۵۰ و ۰.۷۵ نشان داد که سه گزینه نخست در همه سناریوها جایگاه خود را حفظ کردند. همچنین، با افزایش یا کاهش ۱۰ درصدی وزن معیارهای اصلی، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن میان رتبه‌بندی اولیه و رتبه‌بندی سناریوهای حساسیت بین ۰.۹۲۹ تا ۱.۰۰۰ به دست آمد که بیانگر پایداری و استحکام مناسب نتایج بود.

شکل ۱

الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در اسکله شهید رجایی



الگوی نهایی نشان داد که مدیریت اثربخش ریسک HSE در اسکله شهید رجایی باید از یک ساختار چندلایه و شبکه‌ای پیروی کند. در لایه نخست، عوامل مدیریتی و سازمانی شامل تعهد مدیریت، فرهنگ ایمنی، نگهداری پیشگیرانه، آموزش کارکنان و هماهنگی اضطراری

به‌عنوان محرک‌های علی اصلی قرار گرفتند. این عوامل بر کیفیت عملیات، رفتار کارکنان، آمادگی تجهیزات و قابلیت بهره‌برداری از فناوری‌های هوشمند اثر مستقیم داشتند. در لایه دوم، عوامل فناوریانه و سایبری شامل کیفیت داده‌ها، قابلیت اطمینان حسگرها، امنیت سامانه‌های کنترلی، دقت الگوریتم‌ها و تعامل‌پذیری زیرساخت‌ها قرار گرفتند. این لایه نقش پیونددهنده میان مدیریت سازمانی و کنترل بلادینگ عملیات را ایفا می‌کرد. در لایه سوم، ریسک‌های ایمنی و عملیاتی شامل برخورد تجهیزات، سقوط کانتینر، آتش‌سوزی، انفجار و سقوط از ارتفاع به‌عنوان مهم‌ترین عرصه مداخله مستقیم معرفی شدند. پیامدهای محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای نیز در لایه چهارم قرار گرفتند و عمدتاً از ترکیب خطاهای مدیریتی، اختلال‌های فناوریانه و حوادث عملیاتی ناشی می‌شدند. در مرکز الگو، مرکز فرماندهی یکپارچه و هوشمند HSE قرار گرفت که داده‌های حسگرهای اینترنت اشیا، سامانه‌های بینایی ماشین، تحلیل‌های پیش‌بینانه، تجهیزات پوشیدنی، دوقلوی دیجیتال و ابزارهای بازرسی هوشمند را دریافت، تلفیق و تحلیل می‌کرد. خروجی این مرکز شامل هشدارهای زودهنگام، نقشه لحظه‌ای ریسک، پیش‌بینی خرابی، تشخیص رفتار نالایم، فعال‌سازی واکنش اضطراری و ارائه داشبوردهای تصمیم‌گیری به مدیران بود. بازخورد حاصل از اقدامات کنترلی نیز مجدداً به سامانه بازمی‌گشت تا وزن ریسک‌ها، آستانه‌های هشدار و مدل‌های پیش‌بینی به‌صورت مستمر به‌روزرسانی شوند. بنابراین، الگوی نهایی یک چرخه پویا شامل شناسایی، پایش، پیش‌بینی، اولویت‌بندی، کنترل، واکنش و یادگیری سازمانی را ارائه کرد و نشان داد که موفقیت مدیریت هوشمند HSE به استقرار هم‌زمان زیرساخت مدیریتی، داده‌ای، فناوریانه و عملیاتی وابسته است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه الگوی جامع مدیریت ریسک HSE مبتنی بر فناوری‌های هوشمند در اسکله شهید رجایی انجام شد و نتایج آن نشان داد که مدیریت اثربخش ریسک در بنادر کانتینری مستلزم توجه هم‌زمان به ابعاد ایمنی و عملیاتی، مدیریتی و سازمانی، فناوریانه و سایبری، محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای است. در مرحله دلفی فازی، هر ۲۰ شاخص شناسایی شده امتیازی بالاتر از حد پذیرش کسب کردند و میزان توافق خبرگان درباره ضرورت حضور آن‌ها در الگوی نهایی بین ۷۹.۲ تا ۹۵.۸ درصد قرار گرفت. در میان این شاخص‌ها، برخورد تجهیزات متحرک، سقوط کانتینر و نقص اسپریدر، ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت، ضعف یکپارچگی داده‌ها و قابلیت اطمینان حسگرها و آتش‌سوزی و انفجار بالاترین امتیازها را به دست آوردند. نتایج تحلیل دیمتل فازی نیز نشان داد که بعد مدیریتی و سازمانی با مقدار خالص اثرگذاری ۱.۱۵، قوی‌ترین عامل علی مدل است، در حالی که ابعاد محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای عمدتاً نقش معلولی دارند. بر اساس فرایند تحلیل شبکه‌ای، بعد ایمنی و عملیاتی با وزن ۰.۲۸۶ در رتبه نخست قرار گرفت و پس از آن ابعاد مدیریتی و سازمانی با وزن ۰.۲۴۳ و فناوریانه و سایبری با وزن ۰.۲۰۳ قرار گرفتند. در سطح شاخص‌ها نیز برخورد تجهیزات متحرک، سقوط کانتینر و ضعف فرهنگ ایمنی سه اولویت اصلی شناسایی شدند. در نهایت، نتایج ویکور فازی نشان داد که مرکز فرماندهی یکپارچه و هوشمند HSE، شبکه حسگرهای اینترنت اشیا و تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی به‌ترتیب سه فناوری دارای بالاترین اولویت برای توسعه مدیریت هوشمند ریسک در اسکله شهید رجایی هستند.

قرار گرفتن بعد ایمنی و عملیاتی در رتبه نخست نشان می‌دهد که ماهیت پرتحرک و متراکم عملیات کانتینری، خطرهای مستقیم ناشی از تعامل انسان و ماشین را به مهم‌ترین حوزه مداخله تبدیل کرده است. تردد هم‌زمان جرثقیل‌ها، کشنده‌ها، لیفتراک‌ها، کامیون‌ها و کارکنان در محوطه‌ای محدود، احتمال برخورد، سقوط بار، گیر افتادن کارکنان و خرابی تجهیزات را افزایش می‌دهد. برخورد تجهیزات متحرک با وزن نهایی ۰.۰۸۸۷، بالاترین رتبه را در میان همه شاخص‌ها کسب کرد که بیانگر حساسیت بالای عملیات بندری نسبت به کنترل ترافیک، تفکیک مسیرهای حرکتی و پایش موقعیت تجهیزات است. این نتیجه با یافته‌هایی همسو است که نشان می‌دهند نگرش ایمنی کارکنان،

کیفیت رویه‌های اجرایی و نحوه سازمان‌دهی محیط کار بر رفتار ایمن و بهره‌وری تأثیر دارد (Mutege et al., 2023). همچنین، روشن بودن نقش‌ها، وظایف و محدوده مسئولیت کارکنان می‌تواند ابهام عملیاتی را کاهش دهد و عملکرد ایمنی را بهبود بخشد (Baker et al., 2023). در محیط بندری، ابهام در حق تقدم تجهیزات، مسئولیت هدایت بار، محدوده حضور کارکنان و نحوه ارتباط اپراتورها می‌تواند به بروز خطاهای هماهنگی و حوادث جدی منجر شود.

رتبه دوم سقوط کانتینر، نقص اسپریدر و ناپایداری جرثقیل نشان داد که یکپارچگی تجهیزات و نگهداری پیشگیرانه از اجزای اساسی مدیریت ریسک بندری هستند. خرابی قفل‌های اسپریدر، نقص سامانه‌های ترمز، پارگی کابل‌ها، خطای اندازه‌گیری وزن کانتینر و نارسایی حسگرهای جرثقیل می‌تواند پیامدهای انسانی و مالی گسترده‌ای ایجاد کند. در این پژوهش، ناکارآمدی نگهداری پیشگیرانه نیز در میان پنج شاخص نخست قرار گرفت و در تحلیل دیمتل، بعد مدیریتی و سازمانی اثر مستقیمی بر ریسک‌های عملیاتی داشت. این یافته نشان می‌دهد که خرابی تجهیزات صرفاً مسئله‌ای فنی نیست، بلکه می‌تواند نتیجه تصمیم‌های مدیریتی درباره زمان‌بندی تعمیرات، تخصیص بودجه، دسترسی به قطعات، فشار برای ادامه عملیات و کیفیت نظارت باشد. مرور نظام‌های مدیریت ریسک در نگهداری هوانوردی نیز نشان داده است که ایمنی در سیستم‌های پیچیده به ادغام عوامل فنی، انسانی و سازمانی وابسته است و خطاهای نگهداری باید در چارچوبی فراتر از نقص فردی تحلیل شوند (Mendes et al., 2022). بنابراین، مدیریت یکپارچگی تجهیزات در بندر باید با تحلیل داده‌های تعمیراتی، پایش وضعیت، ثبت خطاهای تکرارشونده و پیش‌بینی زمان خرابی همراه شود.

شناسایی بعد مدیریتی و سازمانی به‌عنوان قوی‌ترین عامل علی، یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش بود. اگرچه ریسک‌های ایمنی و عملیاتی بالاترین وزن را داشتند، اما منشأ بسیاری از آن‌ها در تصمیم‌ها، سیاست‌ها و رویه‌های مدیریتی قرار داشت. ضعف فرهنگ ایمنی و تعهد مدیریت با وزن ۰۰۷۲۹ سومین شاخص مهم مدل بود و اثرگذاری بالای بعد مدیریتی نشان داد که بهبود این حوزه می‌تواند هم‌زمان چندین دسته از ریسک‌ها را کاهش دهد. ادغام ایمنی و بهداشت حرفه‌ای در مدیریت ریسک سازمانی می‌تواند سبب شود تصمیم‌های ایمنی در سطح راهبردی و در کنار اهداف مالی و عملیاتی اتخاذ شوند (Kılıç & Vayvay, 2025). همچنین، رهبری راهبردی از طریق ایجاد انسجام میان مدیریت کیفیت، سیاست‌های سازمانی و الزامات ایمنی می‌تواند عملکرد HSE را تقویت کند (Fadhel & Alqurs, 2025). بنابراین، تعهد مدیریت نباید تنها در قالب بیانیه‌ها یا دستورالعمل‌ها باقی بماند، بلکه باید در تخصیص منابع، توقف عملیات ناایمن، حمایت از گزارش‌دهی، سرمایه‌گذاری در فناوری و پاسخ‌گویی مدیران منعکس شود.

اهمیت فرهنگ ایمنی در مدل نهایی با یافته‌های مطالعات مرتبط با مدیریت فرهنگ ایمنی و پذیرش خطا نیز همسو بود. در محیطی که کارکنان از پیامدهای گزارش اشتباه یا شبه‌حادثه نگران باشند، اطلاعات حیاتی مربوط به ریسک پنهان می‌ماند و سازمان امکان یادگیری پیشگیرانه را از دست می‌دهد. ارتباط عملکرد نظام HSE با فرهنگ پذیرش خطا و احتمال خطای انسانی نشان می‌دهد که برخورد سازمان با خطا می‌تواند بر رفتار گزارش‌دهی و سطح ریسک تأثیر بگذارد (Gholamhoseinpour et al., 2025). همچنین، ارزیابی فرهنگ ایمنی در شرکت‌های انرژی بر ضرورت سنجش مستمر نگرش‌ها، رفتارها و عملکرد مدیریتی تأکید کرده است (Glebova et al., 2023). در اسکله شهید رجایی نیز ایجاد فرهنگ گزارش‌دهی بدون سرزنش، تحلیل ریشه‌ای حوادث و بازخورد سریع می‌تواند اطلاعات مورد نیاز برای سامانه‌های هوشمند را فراهم کند. هوش مصنوعی و تحلیل پیش‌بینانه زمانی کارآمد خواهند بود که داده‌های واقعی، کامل و بدون تحریف در اختیار آن‌ها قرار گیرد؛ از این‌رو، فرهنگ ایمنی و فناوری هوشمند رابطه‌ای متقابل دارند.

نتایج نشان داد که ناکافی بودن آموزش، شایستگی حرفه‌ای و کنترل خطاهای انسانی در رتبه هفتم قرار دارد و بخشی از ساختار علی ریسک را تشکیل می‌دهد. این یافته بیانگر آن است که فناوری نمی‌تواند جایگزین کامل مهارت، قضاوت و آمادگی کارکنان شود. کارکنان بندر

باید علاوه بر مهارت فنی، توانایی تشخیص خطر، تصمیم‌گیری در شرایط فشار، ارتباط مؤثر و واکنش هماهنگ در بحران را داشته باشند. آموزش تاب‌آوری برای مدیریت موقعیت‌های بحرانی می‌تواند قابلیت سازگاری، تصمیم‌گیری و بازیابی عملکرد را در شرایط غیرمنتظره بهبود بخشد (Ketelaars et al., 2024). همچنین، ادراک ریسک کارکنان بر میزان مشارکت آنان در فعالیت‌های ایمنی اثر می‌گذارد و ویژگی‌هایی مانند ذهن‌آگاهی می‌تواند این رابطه را تقویت کند (Zong et al., 2025). بنابراین، آموزش HSE در بنادر باید از روش‌های سخنرانی‌محور فراتر رود و شامل شبیه‌سازی سناریو، تمرین واکنش اضطراری، تحلیل حادثه، آموزش مبتنی بر شایستگی و بازخورد بلادرنگ باشد. در همین راستا، ایمنی روان‌شناختی نیز برای مشارکت فعال کارکنان در مدیریت ریسک اهمیت دارد. کارکنانی که احساس می‌کنند می‌توانند بدون ترس از سرزنش یا تنبیه، خطرها، خطاها و نگرانی‌های خود را بیان کنند، اطلاعات بیشتری در اختیار سازمان قرار می‌دهند و در اصلاح فرایندها مشارکت می‌کنند. رابطه ایمنی روان‌شناختی با خودتنظیمی و نقش عدالت سازمانی نشان می‌دهد که فضای منصفانه و حمایتگر می‌تواند کنترل رفتار و مسئولیت‌پذیری کارکنان را تقویت کند (Hussein & Akhtar, 2023). همچنین، ایجاد ایمنی روان‌شناختی زمینه مشارکت، یادگیری و بیان دیدگاه‌های انتقادی را فراهم می‌سازد (Fisher & Rosikiewicz, 2025). این مسئله در مدیریت هوشمند HSE اهمیت مضاعف دارد، زیرا هشدارهای الگوریتمی و داده‌های حسگرها باید با تجربه کارکنان تلفیق شوند و کارکنان بتوانند خطاهای سامانه یا هشدارهای کاذب را بدون نگرانی گزارش کنند.

قرار گرفتن بعد فناوریانه و سایبری در رتبه سوم و نزدیک بودن برجستگی آن به ابعاد ایمنی و مدیریتی نشان داد که فناوری در الگوی پیشنهادی صرفاً ابزار پشتیبان نیست، بلکه یکی از اجزای اصلی ساختار ریسک محسوب می‌شود. ضعف یکپارچگی، دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها و حسگرها در رتبه ششم و آسیب‌پذیری سایبری سامانه‌های کنترلی در رتبه هشتم قرار گرفتند. این یافته نشان می‌دهد که دیجیتالی شدن بندر، در کنار مزایای آن، منابع جدیدی از ریسک ایجاد می‌کند. تحلیل‌های هوش مصنوعی تنها زمانی معتبر هستند که داده‌های ورودی دقیق، کامل و به‌موقع باشند. بررسی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت ریسک نیز نشان داده است که کیفیت داده، شفافیت الگوریتم، سوگیری و پاسخ‌گویی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از این فناوری هستند (Yazdi et al., 2024). همچنین، استفاده از استخراج موضوع و گراف دانش برای مدیریت استانداردهای ایمنی نشان می‌دهد که سازمان‌دهی ساختاریافته اطلاعات می‌تواند به شناسایی روابط پیچیده و تصمیم‌گیری بهتر کمک کند (Hao, 2025).

اولویت نخست مرکز فرماندهی یکپارچه و هوشمند HSE نشان داد که ارزش فناوری‌ها بیش از آنکه در عملکرد منفرد آن‌ها باشد، در یکپارچه‌سازی و تبدیل داده‌ها به تصمیم نهفته است. این مرکز می‌تواند داده‌های حسگرهای اینترنت اشیا، دوربین‌ها، سامانه‌های نگهداری، وضعیت آب‌وهوا، اطلاعات بار و گزارش‌های کارکنان را تلفیق و به هشدارهای عملیاتی تبدیل کند. توسعه ابزارهای هستی‌شناسی‌محور در مدیریت ایمنی نشان داده است که ساختاردهی مفاهیم و روابط میان خطرها، فعالیت‌ها و اقدامات کنترلی می‌تواند دسترسی به دانش و تصمیم‌گیری را بهبود دهد (Doukari et al., 2024). در اسکله شهید رجایی نیز مرکز فرماندهی می‌تواند به‌عنوان هسته‌ای برای ایجاد زبان مشترک میان واحدهای عملیات، HSE، آتش‌نشانی، نگهداری، فناوری اطلاعات و مدیریت بحران عمل کند. این یکپارچگی می‌تواند از پراکندگی اطلاعات جلوگیری کرده و زمان تشخیص و واکنش به شرایط بحرانی را کاهش دهد.

رتبه دوم حسگرهای اینترنت اشیا نیز با ماهیت لحظه‌ای ریسک‌های بندری سازگار است. حسگرها می‌توانند موقعیت تجهیزات، سرعت حرکت، فاصله از کارکنان، وضعیت اسپریدر، دمای تجهیزات، نشت گاز، ارتعاش و شرایط محیطی را به‌صورت مستمر پایش کنند. چنین داده‌هایی امکان عبور از بازرسی دوره‌ای به پایش پیوسته را فراهم می‌سازند. رتبه سوم تحلیل پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی نیز نشان داد که خبرگان، پیش‌بینی حادثه و خرابی را مهم‌تر از واکنش پس از وقوع دانسته‌اند. کاربرد داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی می‌تواند کیفیت

تصمیم‌گیری و مدیریت ایمنی را ارتقا دهد (Jiang et al., 2024). همچنین، ترکیب کاربردهای متنی، تصویری و صوتی هوش مصنوعی ظرفیت گسترده‌ای برای تشخیص مخاطرات و تحلیل شرایط عملیاتی ایجاد می‌کند (Rabbi, 2024). در بندر، تحلیل داده‌های حسگرها، گزارش‌های شبه‌حادثه، سوابق تعمیرات و الگوهای تردد می‌تواند احتمال خرابی یا رفتار پرخطر را پیش از تبدیل شدن به حادثه مشخص کند. سامانه‌های بینایی ماشین در رتبه چهارم قرار گرفتند که اهمیت نظارت خودکار بر رفتار و شرایط محیطی را نشان می‌دهد. الگوریتم‌های بینایی ماشین می‌توانند ورود کارکنان به منطقه خطر، حضور فرد در شعاع حرکت جرثقیل، استفاده نکردن از تجهیزات حفاظت فردی، تشکیل دود و آتش و تراکم غیرعادی تجهیزات را تشخیص دهند. نقش یادگیری عمیق و بینایی رایانه‌ای در مدیریت ایمنی کارگاه‌های ساختمانی نشان داده است که این فناوری‌ها می‌توانند تشخیص بلادرنگ مخاطرات و پایش رفتارهای ناایمن را تقویت کنند (Mohy et al., 2024). با این حال، کارایی این سامانه‌ها به کیفیت تصویر، شرایط نور، پوشش دوربین، دقت الگوریتم و نحوه واکنش اپراتورها وابسته است. بنابراین، استفاده از بینایی ماشین باید با نظارت انسانی، بازبینی عملکرد مدل و سازوکارهای کنترل هشدار کاذب همراه باشد.

قرار گرفتن دوقلوی دیجیتال، تجهیزات حفاظت فردی هوشمند و پهپادها در رتبه‌های بعدی نشان داد که این فناوری‌ها با وجود ظرفیت بالا، از نظر هزینه، زیرساخت و آمادگی سازمانی با محدودیت بیشتری مواجه‌اند. دوقلوی دیجیتال می‌تواند سناریوهای ترافیکی، خرابی تجهیزات، آتش‌سوزی و تخلیه اضطراری را شبیه‌سازی کند، اما نیازمند داده‌های کامل، مدل‌سازی دقیق و تعامل‌پذیری سامانه‌هاست. تجهیزات پوشیدنی نیز می‌توانند خستگی، ضربان قلب، دمای بدن و ورود کارکنان به مناطق خطرناک را پایش کنند، اما مسائل مربوط به حریم خصوصی، پذیرش کارکنان و نگهداری تجهیزات باید مورد توجه قرار گیرد. پهپادها و ربات‌های بازرسی نیز برای مناطق مرتفع، خطرناک یا دور از دسترس مفید هستند، اما هزینه اجرا و محدودیت‌های عملیاتی، جایگاه آن‌ها را در اولویت کوتاه‌مدت کاهش داده است. این نتیجه با دیدگاهی همسو است که شیوه‌های ایمنی پایدار را حاصل ترکیب فناوری، مدیریت، مشارکت کارکنان و کنترل‌های سازمانی می‌داند (Jamil et al., 2025).

معلولی بودن ابعاد محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای نشان داد که بسیاری از پیامدهای این دو حوزه از ضعف‌های مدیریتی، اختلال‌های فناورانه و حوادث عملیاتی ناشی می‌شوند. نشت سوخت، آلودگی آب و خاک و انتشار آلاینده‌ها اغلب نتیجه خرابی تجهیزات، پاسخ دیر هنگام یا کنترل ناکافی عملیات هستند. خستگی، مواجهه با صدا و ارتعاش و مخاطرات ارگونومیک نیز می‌توانند تحت تأثیر نوبت‌کاری، فشار زمانی، طراحی ضعیف کار و نبود پایش مستمر قرار گیرند. بنابراین، کنترل پیامدهای محیط‌زیستی و بهداشتی باید علاوه بر اقدامات مستقیم، بر اصلاح علل بالادستی متمرکز شود. راهبردهای مدیریت منابع انسانی در صنایع پرخطر نیز بر نقش آموزش، طراحی شغل، ارتباطات، مشارکت کارکنان و ارزیابی عملکرد در کاهش ریسک تأکید کرده‌اند (Oyewole et al., 2024). همچنین، شناسایی شرایط مؤثر بر مداخلات سلامت و ایمنی نشان می‌دهد که اثربخشی اقدامات به هماهنگی میان عوامل مدیریتی، اجرایی و محیطی وابسته است (Ashoori et al., 2025).

در مجموع، الگوی به‌دست‌آمده نشان داد که مدیریت ریسک HSE در بندر باید از رویکردی خطی و واکنشی به رویکردی شبکه‌ای، پیش‌نگر و یادگیرنده تغییر یابد. در این الگو، عوامل مدیریتی و سازمانی محرک‌های اصلی، فناوری‌ها ابزارهای پایش و پیش‌بینی، ریسک‌های عملیاتی نقاط مداخله مستقیم و پیامدهای محیط‌زیستی و بهداشت حرفه‌ای خروجی‌های قابل کنترل سیستم هستند. مرکز فرماندهی هوشمند نیز نقش اتصال‌دهنده این اجزا را بر عهده دارد. این ساختار با ضرورت ادغام ایمنی در مدیریت ریسک سازمانی (Kılıç & Vayvay, 2025)، نقش رهبری و کیفیت مدیریت (Fadhel & Alqurs, 2025)، اهمیت فرهنگ ایمنی (Glebova et al., 2023) و ظرفیت هوش مصنوعی در مدیریت ریسک (Yazdi et al., 2024) همخوانی دارد. از این‌رو، مزیت اصلی الگوی پیشنهادی در آن است که فناوری را جایگزین مدیریت و عامل انسانی نمی‌داند، بلکه آن را درون یک نظام اجتماعی - فنی و در تعامل با فرهنگ، شایستگی، نگهداری و تصمیم‌گیری سازمانی قرار می‌دهد.

این پژوهش با چند محدودیت همراه بود. نخست آنکه داده‌های اصلی از دیدگاه ۲۴ نفر از خبرگان اسکله شهید رجایی گردآوری شد و هرچند ترکیب تخصصی آنان متنوع بود، نتایج ممکن است تحت تأثیر تجربه، ادراک و قضاوت حرفه‌ای مشارکت‌کنندگان قرار گرفته باشد. دوم آنکه مدل در یک بندر کانتینری مشخص تدوین شد و تفاوت در اندازه بندر، نوع تجهیزات، حجم عملیات، ساختار مدیریتی و سطح بلوغ فناوری می‌تواند قابلیت تعمیم مستقیم نتایج را محدود کند. سوم آنکه برخی از شاخص‌های فناوری، مانند دقت الگوریتم، امنیت سایبری و قابلیت اطمینان حسگرها، بر اساس ارزیابی خبرگان سنجیده شدند و عملکرد واقعی آن‌ها در یک اجرای عملیاتی بلندمدت مورد آزمون قرار نگرفت. چهارم آنکه روابط علی و وزن شاخص‌ها در یک مقطع زمانی تعیین شدند، در حالی که سطح ریسک، فناوری‌های مورد استفاده و شرایط عملیاتی بندر ممکن است در طول زمان تغییر کند. همچنین، دسترسی محدود به برخی داده‌های محرمانه حوادث، خرابی تجهیزات و رخدادهای سایبری می‌توانست بر جامعیت ارزیابی‌ها اثر بگذارد.

پیشنهاد می‌شود الگوی ارائه‌شده در بنادر کانتینری دیگر با اندازه، حجم عملیات و سطح بلوغ فناوریانه متفاوت آزمون و نتایج آن مقایسه شود. انجام مطالعات طولی می‌تواند تغییر وزن و روابط میان ریسک‌ها را پس از استقرار فناوری‌های هوشمند بررسی کند. همچنین، اجرای آزمایشی مرکز فرماندهی هوشمند HSE و سنجش شاخص‌هایی مانند کاهش شبه‌حوادث، زمان واکنش، تعداد هشدارهای صحیح، نرخ هشدار کاذب و هزینه‌های نگهداری می‌تواند اعتبار عملی مدل را ارزیابی کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از داده‌های واقعی حسگرها، دوربین‌ها، سامانه‌های تعمیر و نگهداری و گزارش‌های حادثه برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی استفاده شود. بررسی نگرش کارکنان نسبت به نظارت هوشمند، حریم خصوصی، اعتماد به الگوریتم‌ها و پذیرش فناوری نیز می‌تواند ابعاد انسانی اجرای مدل را روشن‌تر سازد. افزون بر این، استفاده از روش‌های پویایی سیستم، شبکه‌های بی‌زی، شبیه‌سازی عامل‌محور و دوقلوی دیجیتال برای تحلیل سناریوهای بحران و تغییرات زمانی ریسک توصیه می‌شود.

پیشنهاد می‌شود مدیریت اسکله شهید رجایی استقرار مدل را با تقویت فرهنگ ایمنی، بازنگری نظام نگهداری پیشگیرانه و ایجاد سازوکار گزارش‌دهی بدون سرزنش آغاز کند. سپس، شبکه‌ای یکپارچه از حسگرهای اینترنت اشیا برای پایش موقعیت تجهیزات، وضعیت اسپریدر، سرعت حرکت، نشت مواد، دما، دود و ارتعاش ایجاد شود. داده‌های این شبکه باید در مرکز فرماندهی یکپارچه HSE جمع‌آوری و با اطلاعات دوربین‌ها، سامانه تعمیر و نگهداری و گزارش‌های کارکنان ترکیب شود. توسعه تحلیل پیش‌بینانه برای شناسایی خرابی تجهیزات و الگوهای منتهی به حادثه، اجرای سامانه بینایی ماشین در نقاط پرتردد و پرخطر و تعریف سطوح استاندارد هشدار نیز ضروری است. هم‌زمان باید آموزش کارکنان، تمرین سناریوهای اضطراری، حفاظت از داده‌ها، کنترل دسترسی و ارزیابی امنیت سایبری تقویت شود. توصیه می‌شود اجرای فناوری‌ها به صورت مرحله‌ای و بر اساس پروژه‌های آزمایشی انجام گیرد و اثربخشی هر مرحله با شاخص‌های مشخص ایمنی، عملیاتی، محیط‌زیستی و اقتصادی سنجیده شود.

تقدیر و تشکر

از تمامی کسانی که در انجام این مطالعه همراهی نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازن اخلاقی

در پژوهش حاضر تمامی موازن اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Ashoori, H., Doosti, M., & Alavi, S. H. (2025). Effective Intervention Conditions on the Health and Safety System of School Sports in Iran. *Educational Management - Health Sciences*, 2(3), 19-28. https://www.eduhealthsci.ir/article_229292.html
- Baker, L., Nguyen, T., & Patel, R. (2023). Job clarity and safety performance: A study of sports facility staff. *Human Resource Management Review*, 33(2), 100851. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100851>
- Baroun, A. E. (2025). Challenges in Implementing Safety Procedures: Examining Kuwait's Labor Law Article 83 Impact on Employee Performance. *International Journal of Law and Management*. <https://doi.org/10.1108/ijlma-11-2024-0411>
- Bryce, C., & Dowling, M. (2024). The road to olympic failure is paved in poor risk management. *Safety Science*, 169, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106331>
- Carter, N., Nalbant, G., Chahal, P., & Chattopadhyay, K. (2024). Effectiveness and Safety of Self-Management Interventions for Improving Glycemic Control and Health-Related Quality of Life Among Adults with Type 2 Diabetes Mellitus in Sub-Saharan Africa: A Systematic Review and Meta-Analysis. *JBIM Evidence Synthesis*, 22(9), 1715-1788. <https://doi.org/10.11124/JBIES-23-00273>
- Doukari, O., Wakefield, J., Martinez, P., & Kassem, M. (2024). An ontology-based tool for safety management in building renovation projects. *Journal of Building Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108609>
- Fadhel, R., & Alqurs, A. (2025). Enhancing Occupational Health and Safety through Strategic Leadership: The Mediating Role of Total Quality Management in Hodeida Hospitals, Yemen. *Risk Management and Healthcare Policy*, 823-842. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S506296>
- Fisher, K. L., & Rosikiewicz, B. L. (2025). Implementing Psychological Safety in the Online Graduate Management Classroom. *Management Teaching Review*. <https://doi.org/10.1177/23792981251326887>
- Gholamhoseinpour, M., Rahbari Najafabadi, S., & Aghahosseini, T. (2025). Investigating the relationship between health, safety, and environment management system performance and error acceptance culture among nurses: The mediating role of human error probability Naghsh Jahan Institute of Higher Education, Isfahan, Department of Industrial Engineering].
- Glebova, E. V., Volokhina, A. T., & Vikhrov, A. E. (2023). Assessment of the Efficiency of Occupational Safety Culture Management in Fuel and Energy Companies. *Journal of Mining Institute*, 259, 68-78. <https://doi.org/10.31897/pmi.2023.12>
- Hao, F. (2025). Research on Safety Risk Management Standards for the Power Industry Based on Topic Mining and Knowledge Graph. *Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. <https://doi.org/10.1002/tee.70021>
- Hussein, A., & Akhtar, S. (2023). Psychological Safety and Self-Regulation among Public Sector Employees: The Moderating Effect of Organizational Justice. *Public Personnel Management*, 52(2), 245-268. <https://doi.org/10.1177/00910260221098765>
- Jamil, Z., Nordin, S. M., Miraj, M., Alqahtani, M., Shaik, R. A., Akhter, S., & Isha, A. S. N. (2025). Sustainable Safety Practices and Hazard Management in the Oil and Gas Industry: An HSE Perspective. *Frontiers in Public Health*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1611106>

- Jiang, W., Nazarudin, M. N., & Mazalan, N. S. (2024). Enhancing Safety and Quality in College Sports Management Through Big Data and Artificial Intelligence (AI). *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 9(3), 24782. <https://doi.org/10.55267/iadt.07.14849>
- Ketelaars, E., Gaudin, C., Flandin, S., & Poizat, G. (2024). Resilience training for critical situation management. An umbrella and a systematic literature review. *Safety Science*, 170, 106311. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106311>
- Kılıç, Y., & Vayvay, Ö. (2025). Integrating Occupational Health and Safety Into Enterprise Risk Management: A Structural Evaluation. *Frontiers in Public Health*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1608227>
- Mendes, N., Vieira, J. G. V., & Mano, A. P. (2022). Risk Management in Aviation Maintenance: A Systematic Literature Review. *Safety Science*, 153, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105810>
- Mohy, A. A., Bassioni, H. A., Elgendi, E. O., & Hassan, T. M. (2024). Innovations in Safety Management for Construction Sites: The Role of Deep Learning and Computer Vision Techniques. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-04-2023-0062>
- Mutegi, T. M., Joshua, P. M., & Maina, J. K. (2023). Workplace Safety, Employee Safety Attitudes and Employee Productivity of Manufacturing Firms. *Sa Journal of Human Resource Management*. <https://doi.org/10.4102/sajhrm.v21i0.1989>
- Oyewole, A. T., Okoye, C. C., Ofodile, O. C., Odeyemi, O., Adeoye, O. B., Addy, W. A., & Ololade, Y. J. (2024). Human resource management strategies for safety and risk mitigation in the oil and gas industry: a review. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(3), 623-633. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i3.875>
- Rabbi, A. B. K., Jeelani, Idris. (2024). AI integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio based applications. *Automation in Construction*, 164, 105443. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105443>
- Yazdi, M., Zarei, E., Adumene, S., & Beheshti, A. (2024). Navigating the Power of Artificial Intelligence in Risk Management: A Comparative Analysis. *Safety*, 10(2), 42. <https://doi.org/10.3390/safety10020042>
- Zong, Z., Long, T., Ou, Y., & Zhang, S. (2025). Dual-path influence of risk perception on construction workers' safety participation and the moderating role of mindfulness. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(1), 04024194. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JCEMD4.COENG-15534>