System Engineering and Productivity/ 2027/ Vol.7/ No.1/ 351-386

System Engineering and Productivity

10.22034/sep.2026.2096894.1538

A Process Improvement Framework Based on Human Reliability Assessment: A Case Study in the Oil Refining Industry

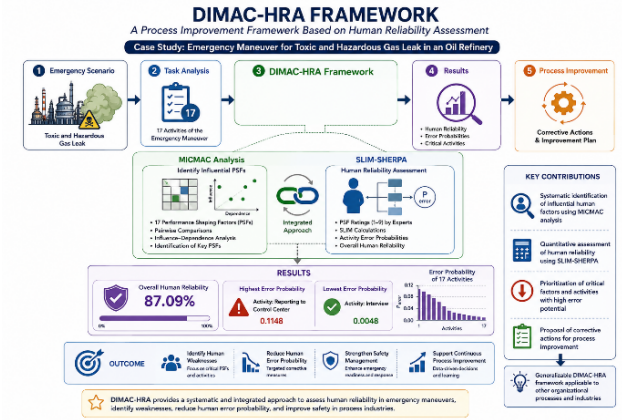
Fereshteh Mashhadi[1], Mohammadreza Vasili[2,*], Seyed Mohammad Kazemi[3], Mehdi Jahangiri[4], Mahdi Karbasian[5]

[1] Department of Industrial Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, Lenj.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran
[3] Department of Industrial Engineering, Is.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran
[4] Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
[5] Department of Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- To propose a process improvement framework based on Human Reliability Assessment.
- To propose a method for Human Reliability Assessment by integrating the SLIM and SHERPA techniques.
- To identify and determine the relative weights of Performance Shaping Factors.
- To identify potential human errors in an emergency response scenario involving a gas leak at an oil refinery.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 7 August 2026
Revised: 2 September 2026
Accepted: 7 September 2026
Available online: 7 September 2026
*Correspondence: reza.vasili@iau.ac.ir
How to cite this article:
Mashhadi, F., Vasili, M., Kazemi, S. M., Jahangiri, M., & Karbasian, M. (2027). A process improvement framework based on human reliability assessment: A case study in the oil refining industry. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 351-386.

Keywords:
Human Reliability Assessment
Performance Shaping Factors
Human Error
Toxic and Dangerous Gas Leak Maneuver
Oil Refinery

ABSTRACT

The safe and reliable operation of process industries largely depends on human reliability in performing safety-critical tasks, particularly under emergency conditions. Emergency response scenarios are among the most important approaches for enhancing organizational preparedness against industrial accidents; therefore, improving their execution process is of significant importance. Despite the development of various Human Reliability Assessment methods, previous studies have mainly focused on estimating human error probabilities, with limited attention to identifying key performance influencing factors and translating assessment results into practical improvement actions. This study proposes a process improvement framework based on Human Reliability Assessment, named DMAIC-HRA. The proposed framework was applied to a toxic and hazardous gas leak emergency response scenario in an oil refinery up to the stage of developing improvement actions. An integrated SLIM–SHERPA approach was developed to assess human reliability by combining human error identification with reliability estimation. The results indicated that the overall human reliability of the investigated process was 87.09%. Among the seventeen analyzed activities, the highest human error probability was related to the "Notification to the Control Center" activity (0.1148), while the lowest was associated with the "Interview" activity (0.0048). Based on the assessment findings, corrective actions were proposed to improve the emergency response process. The proposed framework provides a systematic approach for identifying human performance weaknesses, reducing the likelihood of human error, and enhancing safety management in high-risk process industries. Although the case study results may not be directly generalizable to other organizations, the proposed framework can be adapted for assessing and improving various organizational processes.

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

Human performance is a critical component of safety and reliability in socio-technical systems, particularly in high-risk process industries where human errors may contribute to undesirable events. Human Reliability Assessment (HRA) provides a systematic approach for identifying, analyzing, and quantifying human errors and the factors affecting human performance. However, the practical value of HRA is enhanced when its results are translated into operational decisions and process improvement actions. Therefore, integrating HRA outcomes with continuous process improvement approaches can provide a more comprehensive basis for improving process performance, safety, and reliability. DMAIC is a widely used approach for systematic process improvement (Ji et al., 2024; Patriarca et al., 2024; Yang et al., 2024). Kumar et al. (2021) extended the conventional DMAIC approach by adding an initial preparation phase and a verification phase. Nevertheless, previous studies have generally considered conventional process performance indicators separately from human reliability indicators. Although numerous studies have addressed process improvement or human reliability assessment, the systematic linkage between HRA results and process improvement actions remains insufficiently explored. Accordingly, this study aims to develop and validate a conceptual framework for process improvement based on human reliability assessment. The proposed framework, named DMAIC-HRA, integrates the extended DMAIC model with HRA activities and establishes a systematic relationship between human error assessment results and improvement actions. The structure of the proposed framework is presented in **Figure 1**.

The framework attempts to transform HRA from a primarily analytical tool into a decision-support approach for continuous improvement of operational processes. Considering the importance of emergency response maneuvers for organizational preparedness and the significant role of human performance in such operations, the emergency response maneuver for a toxic and hazardous gas leak in an oil refinery was selected as the case study.

1.1. Literature review

HRA was initially developed as a multidisciplinary approach combining engineering, reliability, human factors, safety engineering, and psychology and has subsequently become an important component of risk assessment in complex systems. Previous HRA studies have applied different qualitative, quantitative, and hybrid methods, including THERP, CREAM, SPAR-H, SLIM, and SHERPA. In particular, SLIM has been used to estimate human reliability and Human Error Probability (HEP) in different industrial contexts. Previous studies have also widely applied DMAIC and its hybrid forms to process improvement in manufacturing, chemical, petroleum, and other industries. However, HRA studies have generally focused on identifying and quantifying human errors, whereas process improvement studies have mainly focused on conventional performance measures. The explicit integration of quantitative human reliability results into a systematic process improvement framework remains limited. The literature was therefore examined from four perspectives: (1) application of SLIM/SHERPA or DMAIC, (2) use of human reliability or human-error-related indicators, (3) application in process industries, and (4) application to emergency-response operations. The comparison indicates that previous studies have generally addressed only a subset of these dimensions. Consequently, the main research gap is the lack of an integrated framework that connects quantitative HRA outputs, particularly HEP and Performance Shaping Factors (PSFs), to process improvement and corrective-action planning.

2. Methodology

This applied and developmental study employed a descriptive and comparative approach using qualitative and quantitative data. The proposed DMAIC-HRA framework was applied to an emergency response process in an Iranian oil refinery. The conceptual consistency and applicability of the framework were reviewed by two academic experts involved in supervising the research. The expert review focused on the conceptual logic, structural relationships, applicability, and added value of integrating HRA into DMAIC. Given the limited number of experts, this assessment was treated as expert judgment rather than statistical validation. The overall implementation procedure is presented in **Figure 2**.

Based on organizational documents, previous maneuver records, field information, and expert judgment, an emergency response maneuver involving a toxic and hazardous gas leak was selected. The maneuver was structured into four stages based on Khan et al. (2006): Awareness, Assessment and Action, Evacuation, and Evaluation. The original four-stage framework was not directly reproduced; rather, its conceptual structure was adapted to the operational conditions of the refinery. The resulting process structure is presented in **Figure 3**.

Ten organizational experts were selected based on predefined criteria, including relevant occupational experience, academic background, and organizational experience. A SHERPA-based worksheet was developed to identify activities, potential human errors, causes, consequences, and corrective or control actions. The content validity of the worksheet was evaluated using the Content Validity Ratio (CVR) and Content Validity Index (CVI). The mean CVR and CVI values were 0.875 and 0.925, respectively. The results of the content validity assessment are presented in **Table 1**.

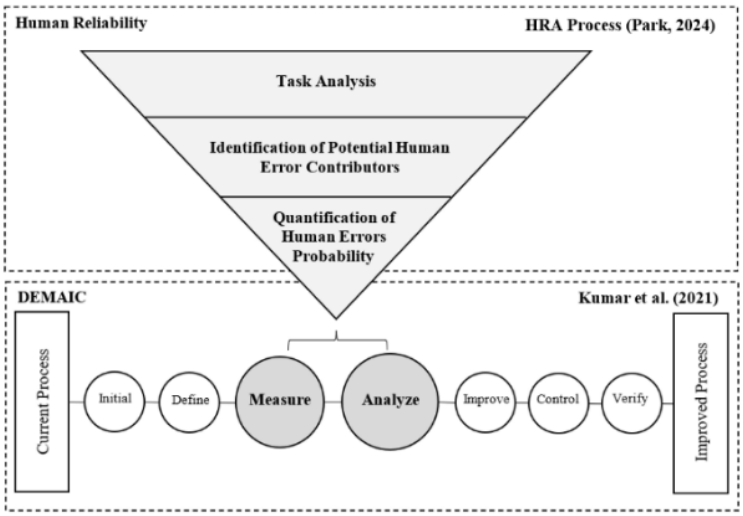


Figure 1. The researcher's proposed framework for process improvement with a reliability assessment approach (DMAIC-HRA).

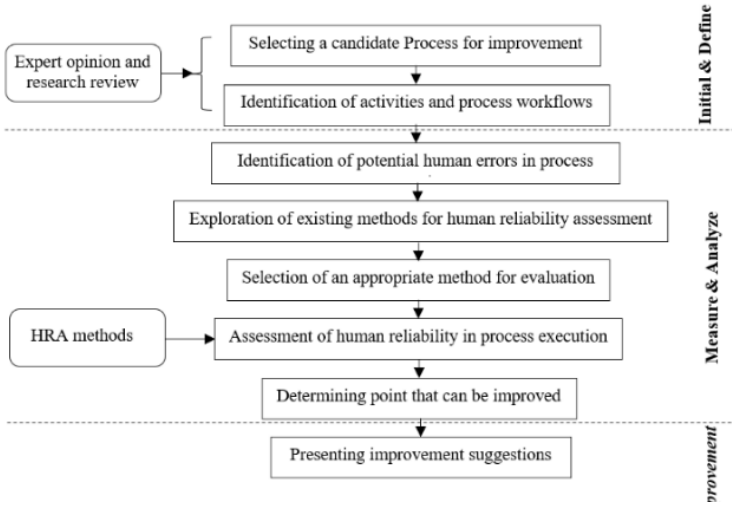


Figure 2. Methodology for process improvement research utilizing a human reliability approach.

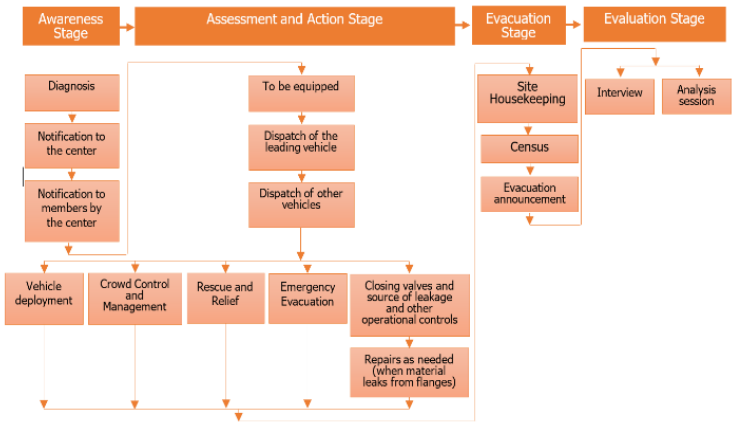


Figure 3. Execution process of toxic and hazardous gas leak maneuver.

Table 1. CVR and CVI results for items

Item / Indicator	1	2	3	4	5	6	7	8
CVR	0.8	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	1.0	0.8
CVI	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0

All eight items were retained because their content validity indices were within acceptable ranges. For human reliability assessment, an integrated SLIM-SHERPA approach was developed. SHERPA was used to systematically identify activities, potential human errors, error causes, consequences, and control measures, while SLIM was used to quantify HEP and human reliability. This integration allowed qualitative human-error identification to be combined with quantitative reliability estimation. Initially, 25 PSFs were considered based on previous research and expert review. Similar factors were conceptually combined and irrelevant factors were removed. The influential PSFs for each maneuver stage were then identified using MICMAC analysis. Pairwise comparisons were subsequently used to determine the relative weights of the influential PSFs, and experts rated the contribution of each PSF to individual human errors using a 1–9 scale. Expert judgments were aggregated using the geometric mean. The PSF with the highest weight was Skill in the Awareness stage, System States in Assessment and Action, Experience in Evacuation, and Skill in Evaluation. These weights and PSF ratings were incorporated into the SLIM calculations to estimate the SLI and HEP for each identified human error. A total of 17 activities and 59 potential human errors were identified across the four maneuver stages. The process-level HEP was calculated by considering the relationships among activities and stages.

3. Results and Discussion

The analysis identified 12 potential human errors in Awareness, 33 in Assessment and Action, 8 in Evacuation, and 6 in Evaluation, resulting in 59 potential human errors across the maneuver process. The causes and characteristics of errors differed among the stages, demonstrating the influence of operational and contextual factors on human performance. The results showed that the Evacuation stage had the highest HEP, approximately 0.1291, while the Evaluation stage had the lowest HEP. Among the 17 activities, the highest HEP was associated with the “Notification to the Control Center” activity (0.1148), whereas the lowest was associated with the “Interview” activity (0.0048). The overall process HEP was estimated at 0.1291, corresponding to an overall human reliability of 87.09%. The results were reviewed by organizational experts and were considered consistent with the operational characteristics of the refinery and previous emergency response experience. The findings indicate that the Evacuation stage represents a particularly important opportunity for improvement because of its relatively higher contribution to human unreliability.

3.1. Sensitivity Analysis of PSF Weights

To examine the robustness of the results, a sensitivity analysis was conducted by changing the weight of the highest-weight PSF in each maneuver stage by ±20%, while proportionally adjusting the remaining weights so that their sum remained equal to one. The results showed that changes in PSF weights affected HEP values at both activity and stage levels. The largest sensitivity was observed in the Evaluation stage, whereas the overall process HEP changed by approximately +6.65% and −6.71% relative to the baseline condition. Although changes in PSF weights affected the magnitude of HEP, the prioritization of activities showed a degree of stability. Therefore, the sensitivity analysis indicates that the results are affected by PSF weighting, while the main prioritization pattern remains reasonably stable.

3.2. Sensitivity Analysis of Reference Errors and SLIM Coefficients

A second sensitivity analysis was conducted to examine the effect of selecting alternative reference errors on the SLIM coefficients a and b and, consequently, on the final HEP. In the baseline condition, the reference errors corresponding to rows 13 and 31 of the human error reference table were selected. Two alternative scenarios were then defined using rows 13 and 18 and rows 18 and 31, respectively. In the baseline condition, the process HEP was 0.1291 and process human reliability was 87.09%. Selecting reference errors from rows 13 and 18 increased HEP to 0.1812, representing a 40.36% increase, while human reliability decreased to 81.88%. Selecting rows 18 and 31 increased HEP to 0.2186, representing a 69.33% increase, while human reliability decreased to 71.45%. These results demonstrate that reference-error selection is an important source of uncertainty in estimating HEP through the SLIM calibration coefficients. However, the observed changes should not necessarily be interpreted as model instability; rather, they demonstrate the sensitivity of quantitative HEP estimates to the selection of reference points used to transform SLI into HEP.

3.3. Improvement Actions

Based on the HRA results and expert judgment, improvement actions were identified and prioritized using four criteria: expected effect on reducing HEP, implementation cost, implementation time, and feasibility. Three improvement actions were prioritized: (1) designing and implementing standardized forms for personnel registration and counting, (2) improving spatial-awareness skills through familiarity with aerial unit maps and continuous emergency drills, and (3) upgrading the emergency notification system and applying intelligent technologies to identify the accident location and operational unit. The first action received the highest priority, followed by the spatial-awareness improvement action and the emergency notification system upgrade. These findings indicate that improving human reliability cannot rely solely

on conventional safety training; rather, improvements in human skills, organizational procedures, information systems, and technological support should be considered simultaneously.
Compared with previous studies, the proposed approach extends conventional process improvement by explicitly incorporating human reliability into process analysis and improvement. While previous research has examined human performance factors or applied DMAIC to process improvement, the present study establishes a systematic linkage between PSF identification, human-error analysis, quantitative HEP estimation, and improvement-action prioritization. Thus, DMAIC-HRA provides an integrated analytical basis for considering human reliability as an explicit dimension of process performance.

4. Conclusions

This study developed and applied the DMAIC-HRA framework to establish a systematic connection between human reliability assessment and process improvement. The framework integrates HRA activities into the DMAIC structure and uses human reliability results to identify process weaknesses and formulate improvement actions. Application of the framework to a toxic and hazardous gas leak emergency response maneuver in an oil refinery resulted in the identification of 17 activities and 59 potential human errors across four stages: Awareness, Assessment and Action, Evacuation, and Evaluation. The integrated SLIM-SHERPA approach combined structured human-error identification with quantitative human reliability estimation. The overall process HEP was estimated at 0.1291, corresponding to an overall human reliability of 87.09%. The highest HEP was associated with the "Notification to the Control Center" activity, while the Evacuation stage had the highest stage-level HEP. The sensitivity analyses showed that both PSF weighting and the selection of reference errors influence quantitative HEP estimates. Nevertheless, the PSF sensitivity analysis indicated a degree of stability in activity prioritization. The reference-error sensitivity analysis highlighted the importance of considering calibration uncertainty when interpreting SLIM-based HEP estimates. The prioritized improvement actions demonstrate how HRA results can be translated into practical process-improvement decisions. Therefore, the main contribution of DMAIC-HRA is not merely the simultaneous use of DMAIC and HRA, but the establishment of a systematic pathway through which human-error identification and reliability estimation can inform the prioritization of process improvement actions. The study was limited to the analysis and formulation of improvement recommendations; the proposed corrective actions were not implemented during the study period. Consequently, post-intervention human reliability was not re-measured and the effectiveness of the interventions was not empirically evaluated. Future studies should implement the proposed actions, reassess human reliability after intervention, and examine the applicability of the framework in other emergency processes and industrial organizations.

Acknowledgments

The authors sincerely thank the editorial team of the *Systems Engineering and Productivity*, the anonymous reviewers, the experts from the studied organization, and all those who contributed to improving the quality of this manuscript.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest related to this study. The findings were obtained impartially and without the influence of any personal or professional interests.

Author contributions

Fereshteh Mashhadi: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Mohammadreza Vasili:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing; **Seyed Mohammad Kazemi:** Supervision, Writing – review & editing; **Mehdi Jahangiri:** Supervision, Writing – review & editing; **Mahdi Karbasian:** 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

Ji, C., Gao, F., & Liu, W. (2024). Dependence assessment in human reliability analysis based on cloud model and best-worst method. *Reliability Engineering & System Safety*, *242*, 109770. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109770

Khan, F. I., Amyotte, P. R., & DiMattia, D. G. (2006). HEPI: A new tool for human error probability calculation for offshore operation. *Safety Science*, *44*(4), 313–334. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.10.008

Kumar, P., Singh, D., & Bhamu, J. (2021). Development and validation of DMAIC based framework for process improvement: a case study of Indian manufacturing organization. *International journal of quality & reliability management*, *38*(9), 1964–1991. https://doi.org/10.1108/ijqrm-10-2020-0332

Patriarca, R., Ramos, M., Paltrinieri, N., Massaiu, S., Costantino, F., Di Gravio, G., & Boring, R. L. (2020). Human reliability analysis: Exploring the intellectual structure of a research field. *Reliability Engineering & System Safety*, *203*, 107102. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107102

Yang, S., Demichela, M., Geng, J., Wang, L., & Ling, Z. (2024). A data-driven Bayesian network of management and organizational factors for human reliability analysis in the process industry. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35048

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۳۳۱-۳۸۶

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

10.22034/sep.2026.2096894.1538

یک چارچوب بهبود فرایند مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان انسان: یک مطالعه موردی در صنعت پالایش نفت

فرشته مشهدی[۱]، محمدرضا وسیلی[۲]*، سیدمحمد کاظمی[۳]، مهدی جهانگیری[۴]، مهدی کرباسیان[۵]

[۱] گروه مهندسی صنایع، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

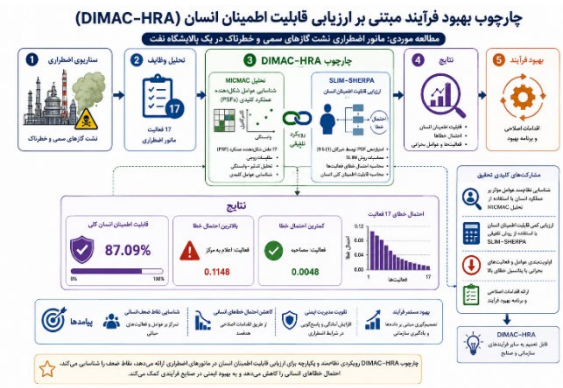
[۲] گروه مهندسی صنایع، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

[۳] گروه مهندسی صنایع، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

[۴] گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

[۵] گروه مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



چکیده

در صنایع فرایندی، عملکرد ایمن و پایدار سیستم‌ها تا حد زیادی به قابلیت اطمینان انسان در انجام وظایف حساس، به‌ویژه در شرایط اضطراری، وابسته است. مانورهای واکنش در شرایط اضطراری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای افزایش آمادگی سازمانی در مقابله با حوادث تعریف و اجرا می‌شوند؛ ازاین‌رو، بهبود فرایند اجرای آن‌ها اهمیت دارد. باوجود توسعه روش‌های مختلف ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، بسیاری از مطالعات بر برآورد احتمال خطای انسانی تمرکز داشته و کمتر به شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد انسان و تبدیل نتایج ارزیابی به اقدامات بهبود فرایند پرداخته‌اند. در این تحقیق، یک چارچوب بهبود فرایند مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان انسان با عنوان DMAIC-HRA پیشنهاد شد. این چارچوب برای مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک در یک پالایشگاه نفت تا مرحله پیشنهاد اقدام‌های اصلاحی اجرا شد. به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، یک روش تلفیقی با عنوان SLIM-SHERPA پیشنهاد شد. نتایج نشان داد قابلیت اطمینان انسان در فرایند مورد مطالعه ۸۷/۰۹ درصد است. مچنین، از میان هفده فعالیت بررسی‌شده، بیشترین احتمال خطا مربوط به فعالیت «اعلام به مرکز» با مقدار ۰/۱۱۴۸ و کمترین احتمال خطا مربوط به فعالیت «مصاحبه» با مقدار ۰/۰۰۴۸ بود. بر اساس نتایج ارزیابی، اقدامات اصلاحی برای بهبود فرایند پیشنهاد شد. چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان رویکردی نظام‌مند برای شناسایی نقاط ضعف انسانی، کاهش احتمال خطا و ارتقای مدیریت ایمنی در صنایع فرایندی مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه نتایج مطالعه موردی ممکن است مستقیماً قابل‌تعمیم به سایر سازمان‌ها نباشد، چارچوب ارائه‌شده قابلیت استفاده در ارزیابی و بهبود سایر فرایندهای سازمانی را دارد.

برجسته‌ها

- پیشنهاد چارچوب بهبود فرآیند مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی
- پیشنهاد روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی از طریق یکپارچه‌سازی تکنیک‌های SLIM و SHERPA
- شناسایی و تعیین وزن‌های نسبی عوامل شکل‌دهنده عملکرد
- شناسایی خطاهای بالقوه انسانی در سناریوی پاسخ اضطراری ناشی از نشت گاز در پالایشگاه نفت

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۶/۱۶

*نویسنده مسئول:

reza.vasili@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ارزیابی قابلیت اطمینان انسان

عوامل شکل‌دهنده عملکرد

خطای انسانی

مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک

پالایشگاه نفت

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© 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

در سیستم‌های اجتماعی-فنی (مانند مجتمع‌های مدرن پتروشیمی، حمل‌ونقل ریلی، هوانوردی تجاری و غیره) انسان‌ها نقشی حیاتی ایفا می‌کنند (Patriarca et al., 2020). نقش عملکرد انسانی در چنین سیستم‌هایی اغلب بسیار پررنگ است، زیرا خطاهای انسانی غالباً می‌توانند عامل بروز حوادث گوناگونی باشند (Ji et al., 2024). خطاهای انسانی شامل عواملی است که بر قابلیت اطمینان انسان[1] در شرایط و محیط‌های مختلف تأثیر می‌گذارند (Yang et al., 2024). تقریباً ۵۰ تا ۸۰ درصد از رویدادها و حوادث با خطاهای انسانی مرتبط هستند (Liu et al., 2025). در این راستا، برای پیشگیری یا به‌حداقل‌رساندن پیامدهای غیرمنتظره حوادث ناشی از عملکرد انسانی، باید روابط میان عملکرد انسان و ماشین‌های پیرامون او به‌دقت تبیین و بررسی شود (Vechgama et al., 2025b؛ Vechgama et al., 2025a). ازاین‌رو، تضمین قابلیت اطمینان انسانی در سیستم‌های اجتماعی-فنی (Hamza & Diaconeasa, 2023) برای پیشگیری از بروز خسارات مالی یا مخاطرات ایمنی ضروری است. در این سیستم‌ها، قابلیت اطمینان انسانی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها محسوب می‌شود (Vechgama et al., 2025b؛ Vechgama et al., 2025a؛ Yang et al., 2024). قابلیت اطمینان انسان به احتمال عملکرد موفق فرد در چارچوب پارامترها و بازه‌های زمانی تعیین‌شده برای انجام وظایف اشاره دارد (Yang et al., 2024؛ Zarei et al., 2021) و قابلیت اطمینان انسان[2] به‌عنوان رویکردی پیشگیرانه برای شناسایی، مدل‌سازی و کمی‌سازی خطای انسانی (به‌عنوان عامل اصلی بروز حوادث)، به کار گرفته می‌شود (Zarei et al., 2021). ازاین‌رو شناسایی، پیش‌بینی و ارزیابی خطاهای انسانی و ارائه راهکارهای کنترلی مناسب برای کاهش بروز آن‌ها امری حیاتی است (Hossein et al., 2024)؛ بنابراین به‌منظور پیش‌بینی قابلیت اطمینان انسانی، باید به موضوع خطای انسانی پرداخته شود و فعالیت‌های انسانی مرتبط به‌صورت متوالی مورد بررسی قرار گیرند (Sezer et al., 2024). این رویکرد بر تعیین کمی احتمال خطاهای انسانی پیش از منجر شدن به خرابی‌های بحرانی، تمرکز دارد و بدین‌وسیله ایمنی کلی و قابلیت اطمینان عملیاتی را ارتقا می‌دهد (Gao, 2026).

HRA یک حوزه چندرشته‌ای است (Xiao et al., 2025a) و با استفاده از روش‌های کمی و کیفی (Yang et al., 2024) می‌تواند سهم عملکرد انسان را در قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم (Laumann, 2020) از طریق پیش‌بینی نرخ خطای انسانی و ارزیابی افت عملکرد در سیستم‌های انسان-ماشین سنجش نماید (Ji et al., 2024). هدف اصلی HRA (Hamza & Diaconeasa, 2023)، شناسایی رویدادهای شکست انسانی[3] و تعیین کمی احتمال خطای انسانی[4] است. فرایند HRA که در اکثر روش‌های موجود HRA مدنظر قرار می‌گیرد، شامل سه مرحله است: (۱) تحلیل وظیفه، (۲) شناسایی عوامل مؤثر بر بروز خطای انسانی، و (۳) تعیین کمّی احتمال خطای انسانی (Park, 2024). از طرفی روش‌های HRA اغلب شامل توصیف‌های کلی از (الف) انواع وظیفه و (ب) عوامل شکل‌دهنده عملکرد[5] است (Laumann, 2020). PSFها که برای برجسته ساختن عوامل مؤثر بر خطا و تعدیل مقادیر HEP استفاده می‌شود (Park & Boring, 2025) به این صورت تعریف می‌شوند: جنبه‌ای از ویژگی‌های فردی انسان، محیط، سازمان یا خود وظیفه که به طور خاص عملکرد انسان را تضعیف یا تقویت می‌کند و باعث افزایش یا کاهش احتمال وقوع خطای انسانی می‌شود (Laumann, 2020). ازاین‌رو می‌توان گفت پتانسیل وقوع خطای انسانی[6] تحت‌تأثیر عوامل شکل‌دهنده عملکرد قرار دارد (Farhadi et al., 2023). عواملی نظیر استرس، تجربه (Park & Boring, 2025)، پیچیدگی وظیفه، شرایط محیطی، آموزش کارکنان و کیفیت دستورالعمل‌ها (Gao, 2026) که همگی تأثیر بسزایی بر عملکرد انسان در محیط‌های عملیاتی دارند، نمونه‌هایی از PSFها هستند. در روش‌های HRA، ارزیابی میزان تأثیرگذاری PSFها بر عملکرد نیز لازم است (Laumann, 2020). پیشرفته‌ترین روش‌های HRA در نیروگاه‌های هسته‌ای توسعه‌یافته و به کار گرفته شده‌اند، درحالی‌که در صنایع فرایندی عمدتاً بر

[1] Human Reliability (HR)
[2] Analysis Human Reliability (HRA)
[3] Human Failure Events (HFE)
[4] Human error probabilities (HEP)
[5] Performance Shaping Factors (PSFs)
[6] Human Error (HE)

جنبه‌های فنی عملیات و تجهیزات ایمنی فرایند متمرکز بوده است (Ramos et al., 2020). این درحالی است که صنایع فرایندی به‌عنوان یکی از انواع سیستم‌های اجتماعی-فنی، به دلیل تعاملات پیچیده میان مؤلفه‌های سخت (ماشین‌آلات) و مؤلفه‌های نرم (انسان)، در معرض حوادث احتمالی قرار دارند. بنابراین در این صنایع لازم است ضمن توجه به قابلیت اطمینان مؤلفه سخت (Yang et al., 2024) و بهبود مستمر گسترده در ایمنی فرایند، به‌ویژه در زمینه عوامل انسانی و سازمانی، برنامه‌های اصلی خود را بر مدیریت عوامل انسانی نیز متمرکز سازند. زیرا عوامل انسانی نقش حیاتی در چرخه حیات صنایع فرایندی شیمیایی از جمله طراحی، ساخت، عملیات عادی، نگهداری، عملیات اضطراری و ازرده خارج کردن تجهیزات ایفا می‌کنند (Zarei et al., 2021). در دهه‌های اخیر HRA به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر برای شناسایی، تحلیل و کمی‌سازی احتمال وقوع خطاهای انسانی توسعه و در حوزه‌های مختلف صنعتی نیز به کار گرفته شده است. بااین‌حال ارزش واقعی این ارزیابی، زمانی محقق می‌شود که نتایج آن به تصمیم‌های عملی و کاربردی برای اصلاح و بهبود فرایندها منجر شود. از طرفی برای بهبود فرایند می‌توان از رویکردهای مختلف بهبود مستمر استفاده نمود. یکی از رویکردهای بهبود مستمر، روش «تعریف-اندازه‌گیری-تحلیل-بهبود-کنترل»[1] است که کومار و همکاران (Kumar et al., 2021) در تحقیق خود با اضافه‌کردن «مرحله اولیه» به‌عنوان اولین گام و «تأیید» به‌عنوان آخرین گام، DMAIC را توسعه دادند.

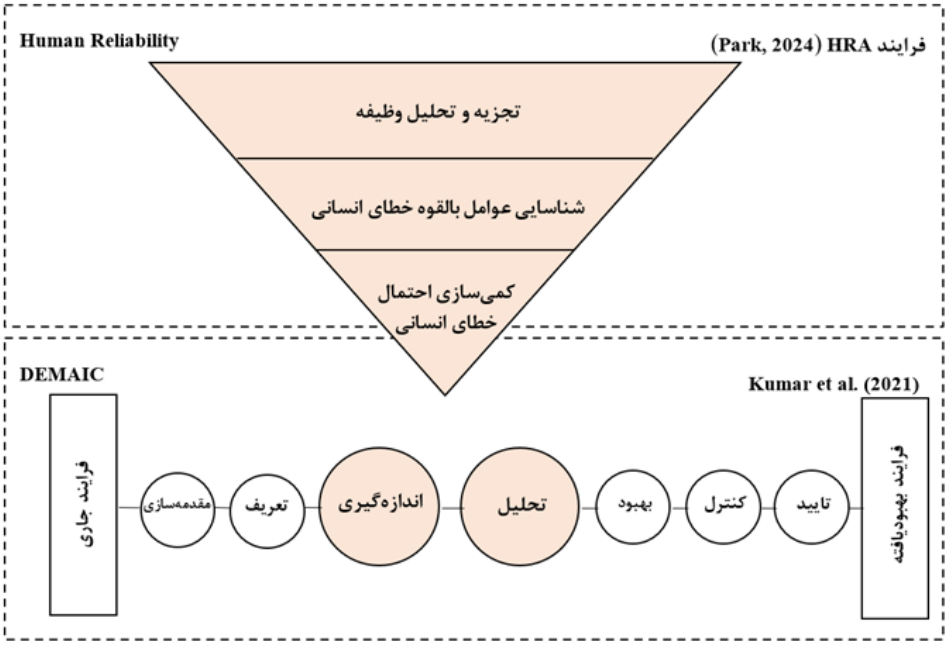
اگر در چارچوب بهبود فرایند کومار، در دو مرحله اندازه‌گیری و تحلیل، علاوه بر شاخص‌های عملکردی فرایند، «قابلیت اطمینان انسان» نیز مورد توجه قرار گیرد، انتظار می‌رود بهبود فرایند از جامعیت بیشتری برخوردار شود؛ زیرا قابلیت اطمینان انسان، جزئی از قابلیت اطمینان کل است. اگرچه مطالعات مختلفی در زمینه بهبود فرایندها یا ارزیابی قابلیت اطمینان انسان انجام شده است؛ با این حال، اجرای پروژه‌های DMAIC با تمرکز بر قابلیت اطمینان انسان همچنان به‌عنوان یک شکاف تحقیقاتی باقی مانده است.

با توجه به مطالب فوق، این تحقیق با هدف توسعه و اعتبارسنجی یک چارچوب مفهومی برای بهبود فرایند مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان انسان انجام شده است. این چارچوب با بهره‌گیری از مدل کومار و همکاران (Kumar et al., 2021) و فرایند HRA ارائه‌شده توسط پارک (Park, 2024)، طراحی و با عنوان DMAIC-HRA نام‌گذاری و ساختار آن در **شکل ۱** نشان داده شده است.

چارچوب پیشنهادی با ایجاد ارتباطی نظام‌مند میان نتایج HRA و اقدامات بهبود فرایند، ارزیابی خطای انسانی را از یک ابزار صرفاً تحلیلی به ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری و بهبود مستمر فرایندهای عملیاتی تبدیل می‌کند. ایده اصلی چارچوب، ادغام HRA با چرخه DMAIC است؛ به‌گونه‌ای که قابلیت اطمینان عملکرد انسان، در کنار شاخص‌های متداول فرایندی، به‌عنوان یکی از مبانی شناسایی نقاط ضعف و تعیین زمینه‌های بهبود مورد توجه قرار گیرد. نوآوری تحقیق حاضر صرفاً در استفاده هم‌زمان از DMAIC و HRA نیست، بلکه در ایجاد ارتباط نظام‌مند میان خروجی‌های HRA و فرایند تصمیم‌گیری برای بهبود است. بدین ترتیب، چارچوب پیشنهادی ضمن حفظ منطق چرخه DMAIC، بُعد انسانی فرایند را نیز در فرایند بهبود لحاظ می‌کند. جزئیات مراحل و نحوه اجرای چارچوب پیشنهادی در بخش روش تحقیق ارائه شده است.

ازآنجاکه مانورهای واکنش در شرایط اضطراری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های مقابله با انواع مختلف حوادث (Abbassinia et al., 2020) به طور منظم برای حفظ سطوح قابل‌قبول آمادگی اضطراری انجام می‌شوند، یکی از فرایندهای مهم در صنایع فرایندی محسوب می‌شود. اجرای تمرین‌های اضطراری با خطرات قابل‌توجهی همراه است و خطای انسانی یکی از عوامل اصلی بروز حوادث در حین اجرای این تمرین‌ها است (Ahn et al., 2022). بنابراین بهبود فرایند اجرای مانور واکنش در شرایط اضطراری می‌تواند در کاهش احتمال خطا و ارتقای آمادگی اضطراری مؤثر باشد. ازآنجاکه بیشتر حوادث در پالایشگاه‌های نفتی به‌عنوان یک صنعت فرایندی، ناشی از نشت گازهای سمی و خطرناک است (EORC., 2022)، مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک برای این تحقیق انتخاب می‌شود.

[1] Define-Measure-Analyze-Improve-Control (DMAIC)



شکل ۱. چارچوب پیشنهادی محقق برای بهبود فرایند با رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان (DMAIC-HRA).

Figure 1. The Researcher's Proposed Framework for Process Improvement with a Reliability Assessment Approach (DMAIC-HRA).

انتظار می‌رود نتایج این تحقیق علاوه بر توسعه دانش در حوزه ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، راهکارهای عملی برای بهره‌گیری از نتایج این ارزیابی در بهبود فرایندهای عملیاتی به‌ویژه مانورهای واکنش در شرایط اضطراری در صنایع فرایندی ارائه کند. در ادامه پس از پیشینه تحقیق و تبیین شکاف تحقیق، روش تحقیق و مبانی نظری بیان می‌شود و پس از ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج، پیشنهادهایی برای مطالعات آینده بیان می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

اصطلاح «ارزیابی قابلیت اطمینان انسان» اولین بار در قالب یک نظام چندبعدی شامل علوم مهندسی، قابلیت اطمینان و مهندسی عوامل انسانی، مهندسی ایمنی و روان‌شناسی در دهه ۱۹۶۰ مطرح شد و به‌عنوان بخشی از فرایند ارزیابی ریسک در سامانه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت (Jahangiri et al., 2017). پس از آن مطالعات در حوزه‌های مختلف از جمله ارزیابی خطای انسانی و قابلیت اطمینان انسان در مواقع اضطراری انجام شد که اغلب مربوط به صنایع فرایندی فراساحلی[1] بوده و در صنایع فرایندی خشکی[2] مانند صنایع فرایندی شیمیایی، مطالعات به نسبت بسیار کمتری مشاهده شده است (Farhadi et al., 2023). از طرفی با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه بهبود فرایندها، مشاهده می‌شود که به HRA به‌عنوان یک شاخص مورد سنجش، توجه زیادی نشده است. به‌منظور تحلیل نظام‌مند شکاف تحقیقاتی، ابتدا مطالعات پیشین در دو حوزه «قابلیت اطمینان انسان» و «بهبود فرایند»، بررسی شد. سپس مطالعاتی که در حداقل یکی از چهار منظر زیر با تحقیق حاضر اشتراک داشتند، در **جدول ۱** و **جدول ۲** آورده شده است. این چهار منظر عبارتند از:

۱) استفاده از یکی از روش‌های شاخص احتمال موفقیت[3] (SLIM) یا رویکرد نظام‌مند کاهش و پیش‌بینی خطای انسانی[4] (SHERPA) برای محاسبه قابلیت اطمینان انسان در مطالعات مرتبط با این حوزه و استفاده از روش DMAIC درخصوص مطالعات مرتبط با بهبود فرایند؛

۲) محاسبه قابلیت اطمینان انسان به‌عنوان خروجی اصلی مطالعات مرتبط با این حوزه و استفاده از

[1] Offshore
[2] Onshore

[3] Success Likelihood Index Method (SLIM)
[4] Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (SHERPA)

شاخص‌های مرتبط با خطا یا قابلیت اطمینان انسان در مطالعات مرتبط با بهبود فرایند؛

۳) اجرای مطالعه در صنایع فرایندی و شیمیایی؛

۴) مطالعه فرایندهای مرتبط با واکنش اضطراری.

جدول ۱. مطالعات مرتبط با قابلیت اطمینان انسان

Table 1. Studies related to human reliability

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش SLIM یا SHERPA	شاخص قابلیت اطمینان انسان	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Bevilacqua & Ciarapica, 2018	توسعه روش مدیریت ریسک عوامل انسانی[1] با تلفیق عوامل انسانی با سیستم مدیریت ریسک	تعیین علل خطای انسانی، عوامل مؤثر بر عملکرد و شاخص ریسک و پیشنهاد اقدامات اصلاحی	صنعت شیمیایی، سیستم مدیریت ریسک پالایشگاه			✓		۱
Zheng et al., 2020	ارائه مدلی مبتنی بر روش پیش‌بینی نرخ خطای انسانی[2] و روش‌شناسی شبکه بیزی[3]	احتمال خطای انسانی	فرایند اضطراری مرکز کنترل ساحلی				✓	۱
Abbassinia et al., 2020	CREAM فازی	احتمال خطای انسانی در شرایط اضطراری	صنایع شیمیایی			✓	✓	۲
Ramos et al., 2020	استفاده از روش Phoenix HRA	ارزیابی ریسک منابع انسانی، افزایش ایمنی و امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک	صنایع شیمیایی-پالایشگاه نفت			✓		۱
Jahani et al., 2021	استفاده از روش واکاوی واقعه انسانی[4]	احتمال خطای انسانی	صنایع شیمیایی			✓		۱
Chen et al., 2021	استفاده از روش Phoenix HRA	قابلیت اطمینان انسان	واکنش در شرایط اضطراری		✓		✓	۲
Parhizkar et al., 2021	روشی برای ارزیابی احتمال و پویایی ریسکِ تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری برای سیستم‌های دریایی پیچیده	احتمال خطای انسانی	واحد حفاری با قابلیت موقعیت‌یابی پویا				✓	۱

[1] Human Factor Risk Management (HFRM)
[2] Human Error Rate Prediction (THERP)
[3] Bayesian Network (BN)
[4] A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)

ادامه جدول ۱.

Table 1 continued.

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش SLIM یا SHERPA	شاخص قابلیت اطمینان انسان	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Zarei et al., 2021	تحلیل عمیق متون علمی بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۲۰	عوامل انسانی در سه عنصر حیاتیِ عملیات تعمیر و نگهداری، عملیات اضطراری و عملیات اتاق کنترل	صنایع شیمیایی فرایندی			✓	✓	۲
Ahn et al., 2022	به‌کارگیری چارچوبی مبتنی بر روش ارزیابی ریسک استانداردشده کارخانه[1] برای مانور اضطراری سقوط فرد از کشتی به دریا	قابلیت اطمینان انسان	صنعت دریایی - مانور واکنش در شرایط اضطراری و استفاده از قایق نجات		✓		✓	۲
Farhadi et al., 2023	تعیین عوامل شکل‌دهنده عملکرد برای ارزیابی خطای انسانی در تیم واکنش اضطراری با استفاده از دلفی فازی	ضریب اهمیت PSFها	صنایع فرایند شیمیایی			✓	✓	۲
Sezer et al., 2024	استفاده از روش فازی تحلیل قابلیت اطمینان و خطای شناختی[2] و شبکه بیزی	احتمال خطای انسانی	عملیات تخلیه محموله نفت خام در نفت‌کش‌ها			✓		۱
Yang et al., 2024	ارائه چارچوبی با در نظر گرفتن انتخاب منبع داده، مقایسه الگوریتم‌های ساخت CBN و اعتبارسنجی نتایج	عوامل مدیریتی و سازمانی[3] که منجر به خطای انسانی می‌شوند.	صنایع فرایندی			✓		۱
Arici et al., 2026	استفاده از روش شاخص احتمال موفقیت[4] با رویکرد فازی	شناسایی وظیفه بحرانی با بیشترین احتمال خطای انسانی	عملیات ایمن گرمایش مخازن در تانکرهای حمل مواد شیمیایی	✓		✓		۲

[1] Standardized Plant Analysis Risk HRA (SPAR-H)
[2] Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)
[3] Management and organizational factors (MOFs)
[4] Success Likelihood Index Method (SLIM)

ادامه جدول ۱.

Table 1 continued.

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش SLIM یا SHERPA	شاخص قابلیت اطمینان انسان	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Tamburini et al., 2025	ارائه مدلی جدید در شبکه‌های بیزی پویا	ارزیابی کمی تاب‌آوری	سیستم سوخت‌رسانی هیدروژن مایع			✓	✓	۲
Liu et al., 2025	ارائه روشی نظام‌مند برای HRA پویا مبتنی بر روش SPAR-H و مدل‌سازی ساختاری تفسیری[۱] برای تحلیل روابط میان PSFها	قابلیت اطمینان انسان	اتاق کنترل نیروگاه هسته‌ای	✓	✓			۲
Liao et al., 2025	ارائه روشی برای HRA در فرایند تحویل کنترل خودرو به راننده مبتنی بر تلفیق روش تحلیل فرایند مبتنی بر نظریه سیستم‌ها و اطلاعات و BN-SLIM	قابلیت اطمینان انسان	سیستم رانندگی خودکار سطح[۳] مرسدس-بنز	✓	✓			۲
Vechgama, et al., 2025a	پیشنهاد روشی برای توسعه PSFهای اختصاصی برای چارچوب HRA و استفاده از روش SLIM	احتمال خطای انسانی	راکتور تحقیقاتی تریگا[۲]	✓				۱
Vechgama, et al., 2025b	استفاده از روش احتمال شاخص موفقیت[۳]	قابلیت اطمینان انسانی	راکتور تحقیقاتی تریگا		✓			۱
Zhao & Liu, 2025	استفاده از روش شاخص احتمال موفقیت در مقیاس بزرگ[۴]	احتمال خطای انسانی	-	✓				۱
Gao, 2026	ارائه رویکردی نوین مبتنی بر روش SLIM با بهره‌گیری از مدل ابری، نظریه پر کردن آب[۵] و روش سازگاری کامل[۶]	احتمال خطای انسانی	عملیات سوخت‌گیری هوایی	✓				۱

[1] Interpretive Structural Modelling (ISM)
[2] TRIGA
[3] Probability of Success Index Method
[4] Large-Scale Probability of Success Index Method
[5] Water-Filling
[6] Full Consistency Method (FUCOM)

ادامه جدول ۱.

Table 1 continued.

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش SLIM یا SHERPA	شاخص قابلیت اطمینان انسان	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Xiao et al., 2025b	یک چارچوب پویای مبتنی بر ریسک[1] با ادغام شبکه‌های بیزی[2]، شبکه‌های عصبی حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت[3] و رویه‌های عملیاتی اضطراری[4]	قابلیت اطمینان انسانی	راکتور خنک‌شده با گاز با دمای بالا[5] در صنعت هسته‌ای		✓		✓	۲
Dogancan & Celik, 2026	تلفیق روش تحلیل قابلیت اطمینان انسانی در عملیات کشتی[6] برای ارزیابی HEP در عملیات سیستم‌های اطفای حریق در نفت‌کش‌ها	احتمال خطای انسانی	سیستم‌های آتش‌نشانی کشتی‌های نفت‌کش				✓	۱
تحقیق حاضر	تلفیق روش SHERPA و SLIM	قابلیت اطمینان انسان	مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در یک شرکت پالایش نفت	✓	✓	✓	✓	۴

جدول ۲. مطالعات مرتبط با بهبود فرایند

Table 2. Studies related to process improvement

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش DMAIC	شاخص (خطا یا قابلیت اطمینان انسان)	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Arturo Garza-Reyes et al., 2014	پیشنهاد کاربرد تجربی نسخه اصلاح‌شده DMAIC	کاهش بهینه زمان تحویل	صنایع هوافضا – فرایند مونتاژ موتور	✓				۱

[1] Dynamic Risk-Informed Framework (DRIF)
[2] Bayesian Networks (BNS)
[3] Long Short-Term Memory (LSTM)
[4] Emergency Operating Procedures (EOPs)
[5] High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)
[6] Shipboard Operation Human Reliability Analysis (SOHRA)

ادامه جدول ۲.

Table 2 continued.

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش DMAIC	شاخص (خطا یا قابلیت اطمینان انسان)	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Prashar, 2016	ارائه یک چارچوب ترکیبی مفهومی با استفاده از DMAIC، تاگوچی[1] و شش سیگما	بهبود فرایند	صنعت خودرو-فرایند مونتاژ کمک فنر	✓				۱
Nicholds & Mo, 2018	ارائه یک تابع برای قابلیت اطمینان	احتمال موفقیت پروژه‌های بهبود فرایند[2]	صنعت خودرو	✓	✓			۲
Kumar et al., 2021	ارائه یک چارچوب برای بهبود فرایندها از طریق توسعه DMAIC	کیفیت محصول، سطح شش سیگما، رضایت مشتری و صرفه‌جویی مالی	صنعت خودرو-فرایند تولید	✓				۱
Antosz et al., 2022	شش سیگما	بهبود کارایی	فرایند نگهداری و تعمیرات	✓				۱
Bafandegan Emroozi & Modares, 2024	استفاده از چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر مارکوف و استفاده از اینترنت اشیا[3] به‌جای بازرسی‌های دستی	احتمال خطای انسانی، موجودی، تخصیص منابع، کاهش زمان از کارافتادگی عملیاتی	مدیریت موجودی قطعات یدکی کارخانه سیمان		✓			۱
Huang & Madeira, 2024	توسعه یک روش با عنوان بررسی کد مبتنی بر خطای انسانی[4]	کاهش خطاهای نرم افزار	تولید نرم‌افزار	✓	✓			۲
Bayu Sejati et al., 2024	تلفیق سیستم مدیریت عملکرد مبتنی بر دانش و شش سیگما	افزایش بهره‌وری پیمانکاران بدون به-خطر انداختن ایمنی افراد	صنایع شیمیایی - عملیات بالادستی میادین نفتی	✓	✓	✓		۳
Zhao & Liu, 2025	ادغام DMAIC و مدل پاپیونی[5]	ریسک مراقبت‌های بهداشتی	درمان با پرتو	✓	✓			۲

[1] Taguchi
[2] Probability Of Success (POS)
[3] Internet of Things (IoT)
[4] Human Error-based Code Review (HECR)
[5] Bow Tie Model

ادامه جدول ۲.

Table 2 continued.

محقق	رویکرد/ابزار	خروجی	فرایند/صنعت	روش DMAIC	شاخص (خطا یا قابلیت اطمینان انسان)	صنایع فرایندی	عملیات در شرایط اضطراری	تعداد منظر مشترک
Sikander et al., 2025	ادغام گسترش عملکرد کیفیت، DMAIC و شبیه‌سازی مونت کارلو	بهبود کیفیت محصول، برآورده کردن انتظارات مشتری و کاهش ریسک‌های اولویت‌بندی‌شده	تولید منسوجات خانگی	✓				۱
Kaya et al., 2025	ادغام چارچوب دقیق ارزیابی نرمال بودن داده‌ها سیستم استنتاج فازی	افزایش دقت تصمیم‌گیری و کاهش احتمال از دست دادن اطلاعات	صنعت خودرو - کنترل فرایند آماری		✓			۱
تحقیق حاضر	استفاده از شاخص قابلیت اطمینان انسان در پروژه‌های بهبود فرایند با رویکرد DMAIC	محاسبه شاخص قابلیت اطمینان انسان	مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در یک شرکت پالایش نفت	✓	✓	✓	✓	۴

این چهار منظر در کنار یکدیگر امکان مقایسه مطالعات پیشین را نه صرفاً بر اساس شباهت موضوعی، بلکه بر اساس میزان انطباق روش، شاخص ارزیابی، زمینه صنعتی و شرایط عملیاتی با تحقیق حاضر فراهم می‌کنند؛ بنابراین، می‌توان شکاف تحقیق را در چهار مورد خلاصه کرد:

۱) شکاف روش‌شناختی: مطالعات HRA عمدتا بر ارزیابی خطای انسانی و قابلیت اطمینان تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که مطالعات DMAIC بر بهبود نظام‌مند فرایند تمرکز کرده‌اند؛

۲) شکاف در تبدیل نتایج HRA به اقدامات بهبود؛

۳) شکاف یکپارچه‌سازی: اتصال نظام‌مند خروجی‌های HRA، به‌ویژه HEP و PSFها، به مراحل تحلیل و بهبود فرایند کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛

۴) شکاف زمینه‌ای: کاربرد این رویکرد یکپارچه در مانور واکنش اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک در یک صنعت پالایشی، با تمرکز بر قابلیت اطمینان انسان، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

برخی از مطالعات، از جمله بایو سجاتی و همکاران (Bayu Sejati et al., 2024) به تلفیق بهبود فرایند با ملاحظات عملکرد انسانی و ایمنی در صنایع شیمیایی نزدیک شده‌اند؛ با این‌حال این مطالعات الزاما از یک روش HRA مانند SLIM یا SHERPA برای شناسایی و ارزیابی خطاهای انسانی در فعالیت‌های یک عملیات مانور نشست گازهای سمی و خطرناک استفاده نکرده‌اند؛ بنابراین، یک «چارچوب بهبود فرایند مبتنی بر قابلیت اطمینان انسان» و همچنین «بهبود فرایند مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک در صنایع فـرایندی با تمرکز بر شاخص

قابلیت اطمینان انسان» می‌تواند این شکاف‌ها را پر نماید. نتایج مقایسه مطالعات پیشین بر اساس چهار منظر نشان می‌دهد که مطالعات موجود، هر یک تنها بخشی از این ابعاد را پوشش داده‌اند. برخی مطالعات بر استفاده از روش‌های SLIM یا SHERPA برای تحلیل عملکرد و خطای انسانی تمرکز داشته‌اند، اما خروجی آن‌ها لزوماً به‌صورت شاخص قابلیت اطمینان انسان در یک چارچوب بهبود فرایند مورد استفاده قرار نگرفته است. از سوی دیگر، مطالعات مبتنی بر DMAIC عمدتاً بر شناسایی و رفع مسائل فرایندی تمرکز داشته‌اند و نقش کمی‌شده قابلیت اطمینان انسان را به‌عنوان ورودی نظام‌مند فرایند بهبود در نظر نگرفته‌اند. همچنین، در مطالعات انجام‌شده در صنایع فرایندی و شرایط اضطراری، تمرکز غالب بر ارزیابی خطای انسانی یا عملکرد اپراتور بوده و ارتباط این ارزیابی با یک چرخه نظام‌مند بهبود فرایند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، شکاف تحقیقاتی اصلی را می‌توان در نبود یک چارچوب یکپارچه برای پیوند ارزیابی کمی قابلیت اطمینان انسان با چرخه DMAIC، به‌گونه‌ای که نتایج HRA به شناسایی و اولویت‌بندی زمینه‌های بهبود و ارائه اقدامات اصلاحی منجر شود، بیان کرد؛ بنابراین، تحقیق حاضر با هدف پر کردن این شکاف، چارچوب DMAIC-HRA را ارائه می‌کند که در آن ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در چرخه بهبود فرایند ادغام شده و خروجی آن به‌عنوان مبنایی برای تحلیل نقاط ضعف انسانی و فرایندی و تعیین پیشنهادهای بهبود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انسانی یا عملکرد اپراتور بوده و ارتباط این ارزیابی با یک چرخه نظام‌مند بهبود فرایند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، شکاف تحقیقاتی اصلی را می‌توان در نبود یک چارچوب یکپارچه برای پیوند ارزیابی کمی قابلیت اطمینان انسان با چرخه DMAIC، به‌گونه‌ای که نتایج HRA به شناسایی و اولویت‌بندی زمینه‌های بهبود و ارائه اقدامات اصلاحی منجر شود، بیان کرد. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف پر کردن این شکاف، چارچوب DMAIC-HRA را ارائه می‌کند که در آن ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در چرخه بهبود فرایند ادغام شده و خروجی آن به‌عنوان مبنایی برای تحلیل نقاط ضعف انسانی و فرایندی و تعیین پیشنهادهای بهبود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

این تحقیق از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای، از نظر روش، توصیفی، از نظر تحلیل، مقایسه‌ای، از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته (کیفی-کمی) و از نظر زمان جمع‌آوری داده‌ها، مقطعی است.

بر اساس شکاف تحقیقاتی شناسایی‌شده در مطالعات پیشین و با هدف ایجاد پیوند نظام‌مند میان بهبود فرایند و قابلیت اطمینان انسان، چارچوب DMAIC-HRA توسعه داده شد. در این چارچوب، ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در ساختار چرخه DMAIC قرار گرفته و نتایج آن در مراحل اندازه‌گیری و تحلیل برای شناسایی نقاط ضعف مرتبط با عملکرد انسان و عوامل مؤثر بر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس یافته‌های حاصل از این تحلیل به‌عنوان مبنایی برای تعریف و اولویت‌بندی اقدامات بهبود در مرحله بهبود به کار گرفته می‌شوند. بنابراین، چارچوب پیشنهادی ضمن بهره‌گیری از ساختار نظام‌مند DMAIC، قابلیت اطمینان انسان را به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مؤثر بر عملکرد فرایند وارد فرایند تصمیم‌گیری برای بهبود می‌کند.

اجرای چارچوب پیشنهادی شامل مجموعه‌ای از مراحل و فعالیت‌های متوالی است که از تعریف فرایند و تعیین دامنه مطالعه آغاز شده و پس از اندازه‌گیری و تحلیل قابلیت اطمینان انسان، به شناسایی و اولویت‌بندی زمینه‌های بهبود و ارائه اقدامات اصلاحی منتهی می‌شود. مراحل اجرایی و نحوه ارتباط آن‌ها در ادامه این بخش تشریح می‌شود. با توجه به قلمرو موضوعی و زمانی تحقیق، مراحل تعریف و مقدمه‌سازی، اندازه‌گیری و تحلیل از چارچوب پیشنهادی، اجرا شدند. به‌منظور بررسی اعتبار مفهومی و ساختاری چارچوب پیشنهادی DMAIC-HRA، بازبینی تخصصی توسط دو خبره دانشگاهی انجام شد. فرم اعتبارسنجی، منطق مفهومی چارچوب، ارتباط میان مراحل، انسجام ساختار، کفایت اجزای چارچوب، امکان‌پذیری کاربرد و میزان انطباق آن با هدف تحقیق را مورد ارزیابی قرار داد. هر دو خبره پس از بررسی چارچوب، فرم بازبینی تخصصی را تکمیل کردند. نتایج ارزیابی خبرگان نشان داد که اجزای اصلی چارچوب از نظر مفهومی با هدف تحقیق همخوانی داشته، توالی مراحل و ارتباط میان آن‌ها منطقی است و ادغام DMAIC

با HRA از انسجام روش‌شناختی قابل قبولی برخوردار است. همچنین، خبرگان قابلیت استفاده از چارچوب را برای تحلیل و بهبود فرایندهای دارای مؤلفه انسانی، به‌ویژه در محیط‌های صنعتی و شرایط اضطراری، تأیید کردند. بر اساس بازخوردهای دریافت‌شده، اصلاحات لازم در نحوه ارائه و تبیین چارچوب در مقاله اعمال شد. مراحل و نحوه اجرای این تحقیق به شرح **شکل ۲** است. اجرای پیشنهادهای بهبود در قلمرو این تحقیق نمی‌باشد. با توجه به نظر خبرگان و بررسی مطالعات انجام شده، یکی از فرایندهای واکنش در شرایط اضطراری انتخاب و سپس سوابق مانورهای اجرا شده بررسی می‌شود. پس از شناسایی فعالیت‌ها و گردش کار فرایند، خطاهای احتمالی در اجرای فرایند شناسایی و قابلیت اطمینان انسان ارزیابی می‌گردد. پس از ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، پیشنهادهایی که می‌تواند در کاهش احتمال خطای بالقوه انسانی مؤثر باشد، ارائه می‌شود. این مراحل به شرح زیر در یکی از شرکت‌های پالایش نفت ایران اجرا می‌شود.

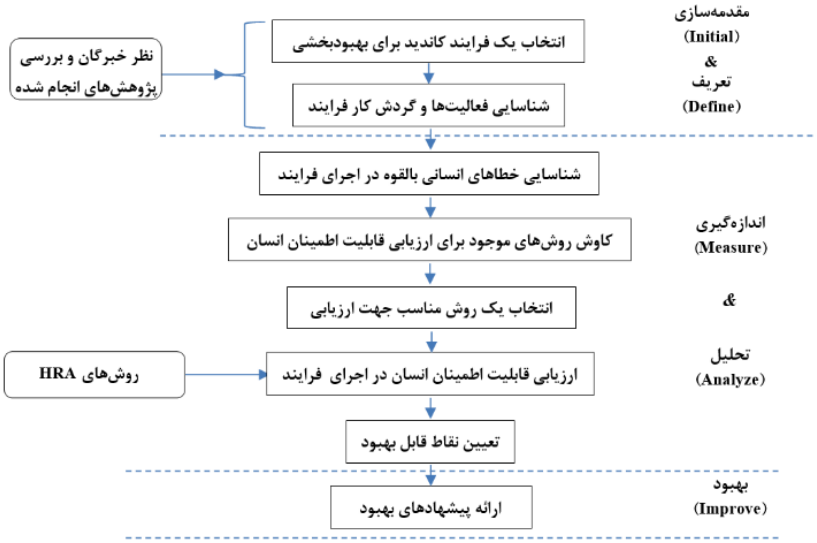
۳-۱- مقدمه‌سازی و تعریف

با توجه به‌عنوان تحقیق و ماهیت سازمان موردمطالعه، مانور واکنش در شرایط اضطراری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای سازمان که بهبود آن در دستور کار سازمان بوده و اطمینان از صحت اجرای آن، دارای اهمیت است، برای اجرای این تحقیق انتخاب می‌شود. با استفاده از مطالعه مستندات و سوابق مانورهای برگزار شده در سازمان موردمطالعه و همچنین دریافت نظر از خبرگان، یکی از مهم‌ترین مانورها انتخاب می‌شود. سپس فعالیت‌های مانور انتخابی شناسایی و در چارچوب چهارمرحله‌ای ارائه شده توسط تحقیق خان و همکاران (Khan et al., 2006) تدوین می‌شود.

به‌منظور استفاده از نظرات خبرگان در اجرای این تحقیق، ابتدا فهرست مدرسان داخلی که دارای سابقه تدریس در دوره‌های آموزشی ایمنی، آتش‌نشانی، HSE یا واکنش در شرایط اضطراری را در سازمان مورد مطالعه دارند از اداره آموزش سازمان، دریافت و انتخاب خبره بر اساس سه معیار انجام شد: ۱) شاغل در یکی از ادارات ایمنی یا آتش‌نشانی؛ ۲) تحصیلات دانشگاهی در زمینه شیمی یا ایمنی؛ و ۳) حداقل ۱۰ سال سابقه کار در سازمان مورد مطالعه. از تعداد ۲۷ نفر فهرست دریافتی، ۱۰ نفر به‌عنوان خبره به شرح **جدول ۳** انتخاب شدند.

۳-۲- اندازه‌گیری و تحلیل

در این مرحله، ابتدا به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای شناسایی خطاهای انسانی در مانورهای اضطراری، کاربرگی با اقتباس از کاربرگ روش SHERPA ارائه‌شده توسط جهانگیری و همکاران (Jahangiri et al., 2017)، همان‌گونه که در **شکل ۳** نشان داده شده است، توسط محقق طراحی شد.



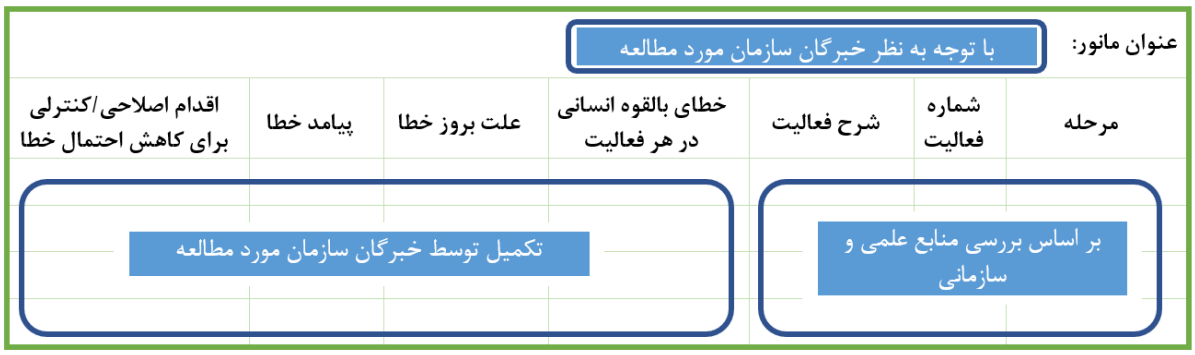
شکل ۲. نحوه اجرای تحقیق بهبود فرایند با رویکرد قابلیت اطمینان انسان.

Figure 2. Methodology for process improvement research utilizing a human reliability approach.

جدول ۳. مشخصه‌های خبرگان

Table 3. Characteristics of experts

ردیف	سمت سازمانی	سابقه (سال)	رشته تحصیلی
۱	رئیس ایمنی	۱۶	مهندسی شیمی
۲	رئیس آتش‌نشانی	۲۴	مهندسی شیمی
۳	مسئول نوبت‌کاری ایمنی عملیات	۱۶	ایمنی صنعتی و محیط کار
۴	مسئول نوبت‌کاری ایمنی عملیات	۱۸	ایمنی صنعتی
۵	مهندسی ایمنی عملیات	۱۴	ایمنی صنعتی
۶	مهندسی ایمنی عملیات	۱۵	ایمنی صنعتی
۷	مهندسی ایمنی عملیات	۱۸	ایمنی صنعتی
۸	مسئول شناسایی و ارزیابی ریسک‌های عملیاتی	۱۳	ایمنی صنعتی
۹	مسئول مدیریت ایمنی فرایند	۱۴	ایمنی، بهداشت و محیط زیست
۱۰	مهندس حریق	۲۰	مهندسی صنایع شیمیایی



شکل ۳. نمونه کاربرگ شناسایی خطای بالقوه انسانی در فرایند مانور واکنش در شرایط اضطراری.

Figure 3. Worksheet for identifying potential human errors in emergency response maneuver processes.

جدول ۴. نتیجه CVR و CVI گویه‌ها

Table 4. CVR and CVI Results for Items

شاخص / گویه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
CVR	۰/۸	۱/۰	۰/۸	۰/۸	۱/۰	۰/۸	۱/۰	۰/۸
CVI	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۸	۱/۰

این کاربرگ برای ثبت اطلاعات مربوط به فعالیت‌های هر مانور مورد استفاده قرار می‌گیرد و شامل هشت مؤلفه است: عنوان مانور، مرحله، شماره فعالیت، شرح فعالیت، خطای بالقوه انسانی در هر فعالیت، علت بروز خطا، پیامد خطا و اقدام اصلاحی/کنترلی برای کاهش احتمال خطا. به‌منظور سنجش روایی محتوایی کاربرگ طراحی شده، نظرات خبرگان در دو معیار «ضرورت» و «میزان مرتبط‌بودن هر گویه با هدف کاربرگ» به‌صورت جداگانه دریافت و سپس دو شاخص نسبت روایی محتوا[1] و شاخص روایی محتوا[2] محاسبه شد. نتایج محاسبات در جدول ۴ نشان داده شده است.

میانگین CVR و CVI در کل گویه‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۸۷۵ و ۰/۹۲۵ است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده و قرارگیری شاخص‌های روایی محتوایی گویه‌ها در محدوده قابل‌قبول، هر ۸ گویه از نظر ضرورت و میزان ارتباط با هدف کاربرگ، مورد تأیید خبرگان قرار گرفتند و هیچ‌یک از گویه‌ها حذف نشد. بنابراین، کاربرگ طراحی‌شده از روایی محتوایی مطلوبی برخوردار است و به‌عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات مورد استفاده قرار گرفت.

[1] Content Validity Ratio (CVR)

[2] Content Validity Index (CVI)

در گام بعد، با توجه به صنعت موردمطالعه، مزایا و معایب روش‌های مختلف HRA و همچنین نظر استادان راهنما و مشاور، روش مناسب برای ارزیابی قابلیت اطمینان انسان انتخاب می‌شود. بر اساس روش انتخاب شده، پارامترهای مورد نیاز تعیین و قابلیت اطمینان انسان در فرایند موردمطالعه محاسبه و تحلیل می‌شود. با توجه به نتایج ارزیابی و موارد دارای ظرفیت بهبود، پیشنهادهای بهبود در جلسه‌ای با خبرگان صنعت موردمطالعه، تعیین می‌شود. با توجه به قلمرو موضوعی و زمانی تحقیق، امکان‌سنجی پیشنهادهای بهبود در این تحقیق انجام نمی‌شود.

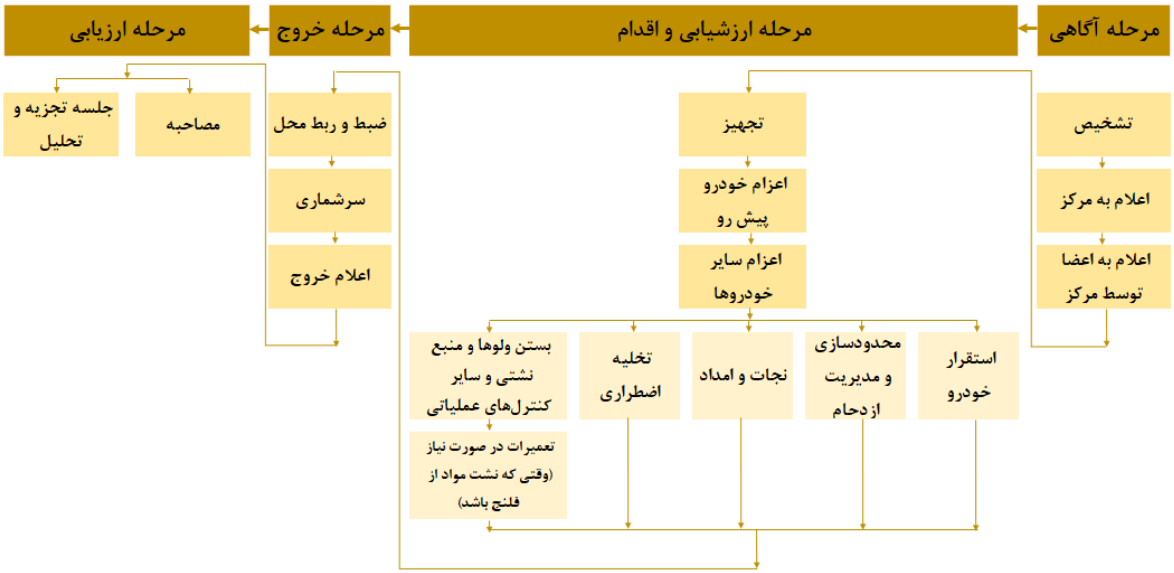
۴- یافته‌های تحقیق و بحث

مهم‌ترین مانورهای واکنش در شرایط اضطراری سازمان مورد مطالعه عبارت‌اند از: قطع کلی آب، برق، بخار، سوخت هوای فشرده، آب خنک‌کننده، سرریز و ریزش مواد نفتی و شیمیایی، نشت گاز یا مواد نفتی در واحدهای بهره‌برداری، آتش‌سوزی در واحدهای عملیاتی، آتش‌سوزی در مخازن، آتش‌سوزی در انبار مواد شیمیایی، بمباران‌های هوایی، سقوط هواپیما یا احتمال انجام اقدامات خرابکارانه در محوطه‌های عملیاتی و اداری، وقوع حوادث غیر مترقبه طبیعی شامل طوفان، سیل، زلزله، آتش‌سوزی و انفجار در واحدهای صنعتی همجوار، نشت گاز آمونیاک، سولفید هیدروژن، در سطح وسیع، انتشار و نشت گاز کلر (EORC., 2023). پس از مطالعات میدانی و مصاحبه با خبرگان سازمان، «مانور نشت گازهای سمی و خطرناک» از بین مانورهای واکنش در شرایط اضطراری، به‌عنوان فرایند برای بهبودبخشی انتخاب شد.

به‌منظور شناسایی فعالیت‌ها و ترسیم فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در سازمان مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از مثلث‌سازی داده‌ها[1]، اطلاعات مرتبط با نحوه اجرای مانور و اقدامات واکنش اضطراری از چند منبع جمع‌آوری و بررسی شد. این منابع عبارت بودند از: روش اجرای واکنش در شرایط اضطراری؛ سناریوهای نشت گازهای سمی و خطرناک؛ فهرست توالی اقدامات[2]؛ صورتجلسات مانورهای نشت گازهای سمی و خطرناک؛ مطالعات و مشاهدات میدانی. در مرحله بعد، به‌منظور ایجاد یک ساختار مفهومی برای سازمان‌دهی فعالیت‌های شناسایی‌شده، از چارچوب چهارمرحله‌ای تحقیق خان و همکاران (Khan et al., 2006) استفاده شد. چهار مرحله این چارچوب به‌عنوان مبنایی مفهومی برای دسته‌بندی فعالیت‌های فرایند مورد مطالعه در نظر گرفته شد. بااین حال، از آنجا که فعالیت‌های تعریف‌شده در چارچوب خان و همکاران (Khan et al., 2006)، به‌طور کامل با فعالیت‌ها و الزامات عملیاتی سازمان مورد مطالعه منطبق نبود، چارچوب مذکور به‌صورت مستقیم بازتولید نشد؛ بلکه ساختار چهارمرحله‌ای آن به‌عنوان مبنای مفهومی و الهام‌بخش برای سازمان‌دهی و بومی‌سازی فعالیت‌های شناسایی‌شده در شرایط واقعی سازمان مورد استفاده قرار گرفت. فعالیت‌های اصلی فرایند و «سری/موازی بودن» آن‌ها بر اساس بررسی و تطبیق منابع مطالعاتی و همچنین میزان «وابستگی» بین فعالیت‌ها بر اساس منطق فرایندی و ماهیت فعالیت‌ها، تعیین و نمودار اولیه فرایند ترسیم گردید. نتایج بررسی و نمودار اولیه در جلسه‌ای با حضور خبرگان سازمان مورد مطالعه ارائه و به‌صورت تعاملی، مورد بازبینی قرار گرفت. اصلاحات پیشنهادی خبرگان در همان جلسه اعمال و نمودار نهایی به شرح **شکل ۴** به‌عنوان نمایش بومی‌شده فرایند اجرای مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در سازمان مورد مطالعه به توافق خبرگان رسید. این فرایند نهایی به‌عنوان مبنای شناسایی و تحلیل فعالیت‌ها و خطاهای انسانی در مراحل بعدی مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به تمرکز این تحقیق بر بهبود فرایند، «فعالیت» به‌عنوان سطح عملیاتی مورد تحلیل و واحد اصلی ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در نظر گرفته می‌شود و احتمال خطای انسانی برای هر فعالیت محاسبه می‌شود. در برخی منابع مورد استفاده در این تحقیق، از اصطلاح «وظیفه» برای اشاره به واحد عملیاتی تحلیل استفاده شده است. با توجه به تفاوت در نحوه تجزیه فرایند و سطح تحلیل در مطالعات مختلف، در تحقیق حاضر اصطلاح «فعالیت» به‌صورت یکسان در مراحل شناسایی، تحلیل و محاسبه قابلیت اطمینان به کار گرفته شده است. بنابراین، روابط و فرمول‌های اقتباس‌شده از منابع، بدون تغییر در منطق محاسباتی، متناسب با واحد تحلیل این تحقیق یعنی فعالیت بازتعریف و نمادگذاری شده‌اند.

[1] Data Triangulation
[2] Master Sequence Event List (MSEL)



شکل ۴. فرایند اجرای مانور نشت گازهای سمی و خطرناک.

Figure 4. Execution process of toxic and hazardous gas leak maneuver.

پس از شناسایی فعالیت‌ها، «کاربرگ شناسایی خطای بالقوه انسانی» با هدف شناسایی خطاهای هر یک از فعالیت‌های فرایند موردمطالعه، «علت بروز خطا»، «پیامد خطا» و «اقدام کنترلی برای کاهش احتمال خطا» و از طریق مصاحبه با خبرگان تکمیل شد. تعداد خطاهای شناسایی شده در مرحله آگاهی ۱۲ مورد، در مرحله ارزشیابی و اقدام ۳۳ مورد، در مرحله خروج ۸ مورد و در مرحله ارزیابی ۶ مورد بود. بیشترین فراوانی علت بروز خطا در مرحله آگاهی، مربوط به «استرس» و «عدم آموزش» با ۶۷ درصد؛ در مرحله ارزشیابی و اقدام، «دانش ناکافی» با ۴۸ درصد؛ در مرحله خروج، «اطلاعات ناقص» با ۸۷ درصد و در مرحله ارزیابی، «عدم آگاهی» با ۸۳ درصد بود.

به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، روش‌های مختلف HRA بررسی شد و روش SLIM، با توجه به کاربردپذیری، انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده از قضاوت خبرگان (Liao et al., 2025) به‌عنوان مبنای محاسبه قابلیت اطمینان انسان در فرایند مورد مطالعه انتخاب شد. از دهه ۱۹۸۰ تاکنون، بیش از پنجاه روش HRA برای تخمین احتمال خطاهای انسانی، از تکنیک پیش‌بینی نرخ خطای انسانی تا روش کلی سیستم تحلیل رویداد یکپارچه انسانی، پیشنهاد شده است (Yang et al., 2024). در میان روش‌های مختلف HRA، از جمله CREAM، THERP و SPAR-H، روش SLIM به دلیل استفاده ساختاریافته از قضاوت کارشناسی برای کمی‌سازی احتمال خطای انسانی، شناخته شده است (Sezer et al., 2024). برخلاف برخی روش‌های HRA سنتی که عمدتاً به نرخ‌های خطای از پیش تعریف‌شده یا داده‌های تجربی متکی هستند، SLIM امکان ارزیابی متخصص‌محور عوامل شکل‌دهنده عملکرد و تعیین اهمیت نسبی آن‌ها را فراهم می‌کند و از این طریق قابلیت سازگاری بیشتری با زمینه‌های مختلف عملیاتی، به‌ویژه شرایطی که داده‌های تاریخی کافی در دسترس نیست، دارد (Arici et al., 2026؛ Liao et al., 2025).

بااین‌حال، SLIM به‌تنهایی الزامی برای شناسایی ساختاری فعالیت‌ها، «پیامد ناشی از خطا» و «راهکار کنترلی» ندارد؛ درحالی‌که این مؤلفه‌ها در کاربرگ SHERPA مورد توجه قرار می‌گیرند. ازاین‌رو، در تحقیق حاضر، از قابلیت‌های مکمل دو روش استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که شناسایی فعالیت‌ها، خطاهای بالقوه انسانی، پیامدهای ناشی از خطا و راهکارهای کنترلی با استفاده از بخش‌های مرتبط کاربرگ SHERPA انجام گرفت و SLIM برای کمی‌سازی احتمال خطای انسانی و محاسبه قابلیت اطمینان انسان به کار گرفته شد. بدین‌ترتیب، رویکرد تلفیقی SLIM-SHERPA با هدف پوشش هم‌زمان شناسایی و تحلیل خطاهای انسانی و کمی‌سازی قابلیت اطمینان انسان در فرایند مورد مطالعه به کار گرفته شد.

به‌منظور شناسایی PSFها، فهرست ۲۹تایی PSFهای ارائه شده در تحقیق فرهادی و همکاران (Farhadi et al., 2023) طی جلسه‌ای با حضور خبرگان سازمان مورد مطالعه بررسی و برخی از عوامل به دلیل نزدیکی مفهومی با هم ادغام و برخی هم حذف گردید. دو عامل آب و هوا و عوامل محیطی؛ دو عامل ویژگی‌های عملیاتی و ویژگی‌های فیزیکی و دو عامل استرس و عوامل استرس‌زای فیزیولوژیکی با یکدیگر ادغام شدند. عامل روش اجرایی به‌عنوان بخشی از «عوامل سازمانی» در نظر گرفته شد. عبارت «شیفت کاری» به «زمان برگزاری مانور» تغییر نام داده شد. همچنین عامل «حجم کار» با توجه به اینکه مانور یک برنامه از قبل برنامه‌ریزی شده است، حذف شد. به این ترتیب تعداد بیست و چهار PSF به‌عنوان فهرست اولیه عوامل شکل‌دهنده عملکرد در نظر گرفته شد. این PSFها عبارت‌اند از: آموزش، تجربه، مهارت، ارگونومی، تجهیزات معیوب، حالات سیستم، ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی، پیچیدگی فعالیت، تناسب با فعالیت، عوامل سازمانی، عوامل تیمی، آب و هوا و عوامل محیطی، زمان در دسترس، زمان برگزاری مانور، شناختی و روان‌شناختی، ویژگی‌های اجتماعی، عوامل حادثه، تصمیم‌گیری، آگاهی ازموقعیت، دینامیک پاسخ و سازگاری، حواس پرتی، استرس و عوامل استرس‌زای فیزیولوژیکی، شناسایی و تایید اپراتور، نوبت‌کاری. با توجه به ضرورت تعیین PSFهای اثرگذار در فرایند موردمطالعه و همچنین نوع آن‌ها در مرحله تعیین ضریب اهمیت، در مرحله اول از اعضای کمیته مدیریتی واکنش در شرایط اضطراری و همچنین دو کارشناس با تجربه در زمینه ایمنی و پدافند در شرکت موردمطالعه خواسته شد تا میزان اثرگذاری هر PSF را در هر یک از چهار مرحله فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک، در یک پرسش‌نامه که با طیف لیکرت طراحی شده بود، تعیین نمایند. خبرگان در هر مرحله از فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک، میزان تأثیرگذاری هر PSF در قابلیت اطمینان انسان را با یک عدد از ۱ تا ۵ مشخص کردند. سپس داده‌های دریافت شده از خبرگان وارد نرم‌افزار اکسل شد و با توجه به روش معرفی شده در تحقیق بافندگان و مدرس (Bafandegan Emroozi & Modares, 2024)، میانگین هندسی نظرات خبرگان محاسبه و اساس انتخاب PSFهای نهایی شد. فهرست PSFهای اثرگذار بر قابلیت اطمینان انسان در مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در **جدول ۵** نشان‌داده‌شده است. اطلاعات **جدول ۵** نشان می‌دهد که عوامل آموزش، تجربه، مهارت، حواس‌پرتی، دینامیک پاسخ و سازگاری، تصمیم‌گیری، آگاهی از موقعیت، عوامل تیمی، حالات سیستم، ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی، آب و هوا و عوامل محیطی، زمان در دسترس و زمان برگزاری مانور در هر چهار مرحله از نوع PSFهای اثرگذار است.

برای تعیین وزن PSFها می‌توان از انواع روش‌های مختلف وزن‌دهی استفاده کرد. یکی از متداول‌ترین این روش‌ها استفاده از «مقایسات زوجی» است. با توجه به تعداد زیاد PSFها در هر یک از چهارمرحله، ابتدا می‌توان با استفاده از تحلیل ماتریس ضرب‌های تأثیر متقاطع اعمال شده بر یک طبقه‌بندی[1]، PSFهای اثرگذار را شناسایی کرد. برای این کار ابتدا خبرگان روابط علی میان PSFها را بر اساس ماتریس ISM (Habibi & Afridi, 2023) و با استفاده از علائم V/A/X/O (V: اگر عامل سطر i باعث محقق شدن عامل ستون j می‌شود؛ A: اگر عامل ستون j باعث محقق شدن عامل سطر i می‌شود؛ X: اگر عامل i و j رابطه دو طرفه دارند و O: اگر بین عامل سطر i و ستون j هیچ ارتباطی وجود ندارد) تعیین نمودند. به‌منظور ادغام نظرات از روش حداکثری فراوانی، استفاده و یک ماتریس واحد تهیه شد. داده‌های ماتریس روابط علی میان PSFها، با استفاده از تبدیل نمادها به ماتریس صفر و یک تبدیل و به این ترتیب ماتریس دسترسی اولیه تعیین می‌شود. داده‌های این ماتریس در نرم‌افزار «MICMAC» وارد و خروجی‌های مختلف نرم‌افزار بررسی شد.

اولین خروجی نرم‌افزار، ماتریس نهایی روابط بین PSFها براساس مقدار صفر و یک در هر مرحله است. در تمام مراحل با ۲ بار تکرار، ماتریس نهایی به دست آمد و درجه پرشدگی در هر چهار مرحله بیش از ۵۰ درصد است که نشان می‌دهد عوامل تاحدودی بر هم تأثیر داشته‌اند.

مقدار صفر بیانگر نبود رابطه مستقیم و مقدار یک بیانگر وجود رابطه مستقیم دو عامل است. تعداد صفرها و تعداد یک‌ها به ترتیب در مرحله آگاهی ۱۷۳ و ۲۲۷، در مرحله ارزشیابی و اقدام ۱۴۲ و ۲۱۹، در مرحله خروج ۱۱۹ و ۱۷۰ و در مرحله ارزیابی ۸۲ و ۱۱۴ است.

[1] Matrix of Crossed Impact Multiplications Applied to a Classification: MICMAC

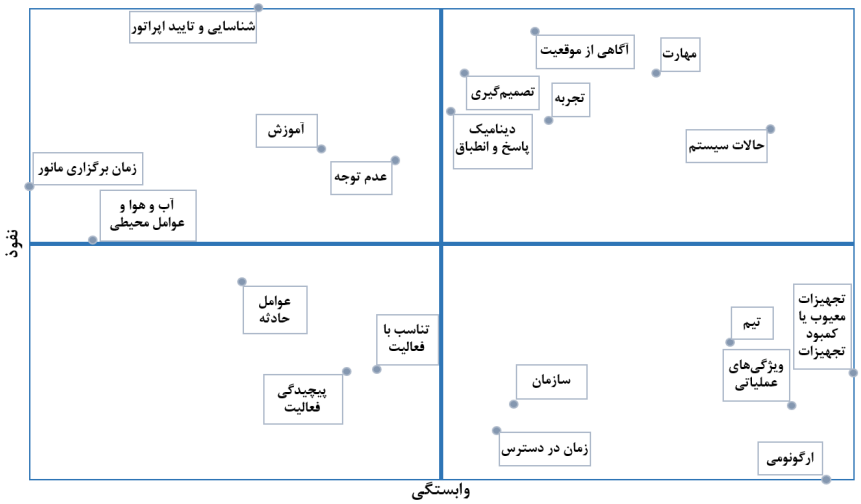
جدول ۵. PSFهای اثرگذار بر قابلیت اطمینان انسان در مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک

Table 5. PSFs Affecting human reliability in toxic and hazardous gas leak emergency maneuver

مرحله آگاهی		مرحله ارزشیابی		مرحله خروج		مرحله ارزیابی	
ردیف	PSF	ردیف	PSF	ردیف	PSF	ردیف	PSF
۱	آموزش	۱	آموزش	۱	آموزش	۱	آموزش
۲	تجربه	۲	تجربه	۲	تجربه	۲	تجربه
۳	مهارت	۳	مهارت	۳	مهارت	۳	مهارت
۴	ارگونومی	۴	تجهیزات معیوب	۴	تجهیزات معیوب	۴	حالات سیستم
۵	تجهیزات معیوب	۵	حالات سیستم	۵	حالات سیستم	۵	تناسب با فعالیت
۶	ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی	۶	ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی	۶	ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی	۶	ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی
۷	پیچیدگی فعالیت	۷	پیچیدگی فعالیت	۷	عوامل سازمانی	۷	عوامل تیمی
۸	حالات سیستم	۸	تناسب با فعالیت	۸	عوامل تیمی	۸	تصمیم‌گیری
۹	تناسب با فعالیت	۹	عوامل سازمانی	۹	زمان در دسترس	۹	زمان در دسترس
۱۰	عوامل سازمانی	۱۰	عوامل تیمی	۱۰	آب و هوا و عوامل محیطی	۱۰	زمان برگزاری مانور
۱۱	آب و هوا و عوامل محیطی	۱۱	آب و هوا و عوامل محیطی	۱۱	زمان برگزاری مانور	۱۱	آب و هوا و عوامل محیطی
۱۲	زمان در دسترس	۱۲	زمان در دسترس	۱۲	عوامل حادثه	۱۲	آگاهی از موقعیت
۱۳	عوامل تیمی	۱۳	عوامل حادثه	۱۳	تصمیم‌گیری	۱۳	حواس‌پرتی
۱۴	زمان برگزاری مانور	۱۴	زمان برگزاری مانور	۱۴	دینامیک پاسخ و سازگاری	۱۴	دینامیک پاسخ و سازگاری
۱۵	عوامل حادثه	۱۵	تصمیم‌گیری	۱۵	آگاهی از موقعیت		
۱۶	تصمیم‌گیری	۱۶	آگاهی از موقعیت	۱۶	حواس‌پرتی		
۱۷	دینامیک پاسخ و سازگاری	۱۷	دینامیک پاسخ و سازگاری	۱۷	شناسایی و تایید اپراتور		
۱۸	آگاهی از موقعیت	۱۸	حواس‌پرتی				
۱۹	حواس‌پرتی	۱۹	شناسایی و تایید اپراتور				
۲۰	شناسایی و تایید اپراتور						

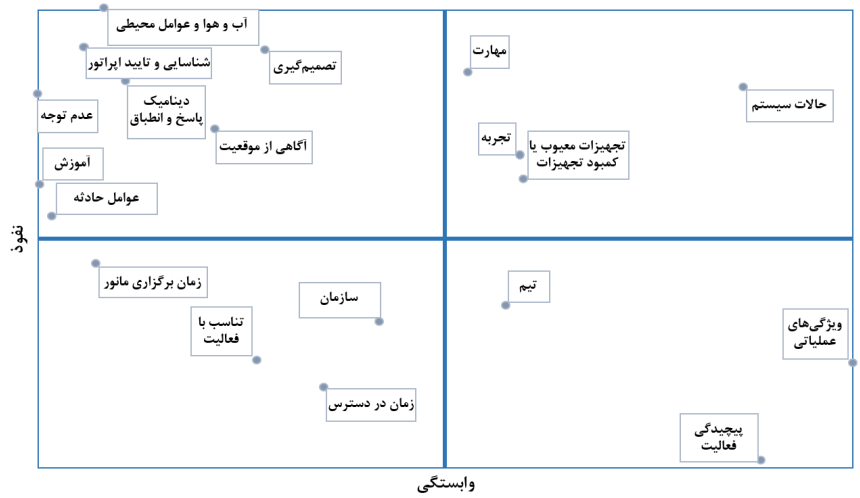
دومین خروجی نرم‌افزار، درجه مطلوبیت و بهینه‌شدگی ماتریس است. این ماتریس در همه مراحل با ۲ بار چرخش از مطلوبیت و بهینه‌شدگی بالایی برخوردار بود که حاکی از روایی بالای پرسش‌نامه و پاسخ‌های آن دارد.

سومین خروجی نرم‌افزار، نمودار «وابستگی- نفوذ» برای هر مرحله است. در این نمودار، محور افقی وابستگی (تأثیرپذیری) و محور عمودی قدرت نفوذ (تأثیرگذاری) را نشان می‌دهد. این نمودار به چهار ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه اول متغیرهایی با وابستگی و نفوذ زیاد (متغیرهای دوگانه)، ناحیه دوم متغیرهایی با وابستگی کم و نفوذ زیاد (متغیرهای تأثیرگذار)، ناحیه سوم متغیرهایی با وابستگی و نفوذ کم (متغیرهای خودمختار) و ناحیه چهارم متغیرهایی با وابستگی زیاد و نفوذ کم (متغیرهای تأثیرپذیر) می‌باشند. متغیرهایی که در نواحی سوم و چهارم قرار می‌گیرند، درصورت تأیید منطق تحلیل و با توجه به هدف مطالعه قابلیت حذف دارند (Habibi & Afridi, 2023). این نمودارها برای هر یک از چهار مرحله، به ترتیب در شکل ۵ تا شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



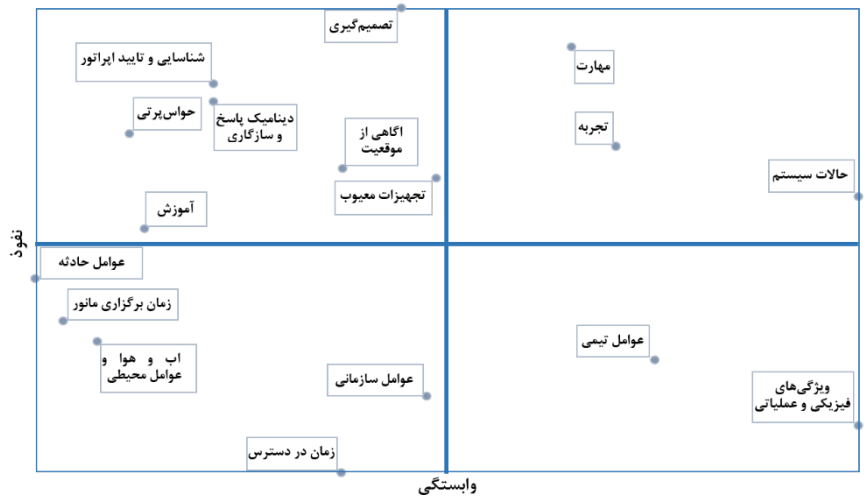
شکل ۵. نمودار وابستگی- نفوذ PSFها در مرحله آگاهی مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک.

Figure 5. PSF interdependency–influence diagram- awareness stage of emergency maneuver.



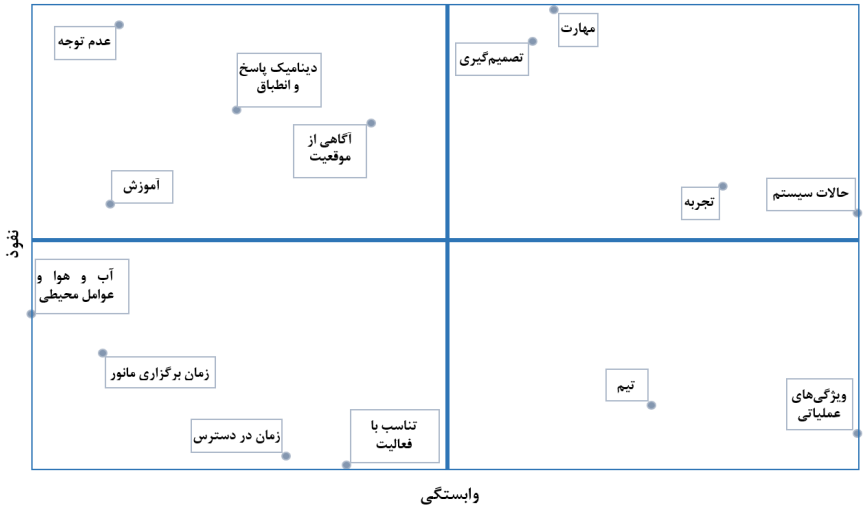
شکل ۶. نمودار وابستگی- نفوذ PSFها در مرحله ارزشیابی و اقدام مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک.

Figure 6. PSF interdependency–influence diagram - assessment and action stage of emergency maneuver



شکل ۷. نمودار وابستگی- نفوذ PSFها در مرحله خروج مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک.

Figure 7. PSF interdependency–influence diagram- evacuation stage of emergency maneuver.



شکل ۸. نمودار وابستگی- نفوذ PSFها در مرحله ارزیابی مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک.

Figure 8. PSF interdependency–influence diagram - evaluation stage of emergency maneuver.

بر اساس بررسی این چهار نمودار، فهرست PSFهای هر یک از چهار مرحله مانور که مبنای تحلیل در روش SLIM-SHERPA قرار گرفت، عبارتند از:

- مرحله آگاهی: آموزش، زمان برگزاری مانور، حواس‌پرتی، آب و هوا و عوامل محیطی، شناسایی و تایید اپراتور، تجربه، مهارت، حالات سیستم، تصمیم‌گیری، آگاهی از موقعیت، دینامیک پاسخ و سازگاری؛
- مرحله ارزشیابی و اقدام: آموزش، آب و هوا و عوامل محیطی، عوامل حادثه، تصمیم‌گیری، آگاهی از موقعیت، دینامیک پاسخ و سازگاری، حواس‌پرتی، شناسایی و تایید اپراتور، تجربه، مهارت، تجهیزات معیوب و حالات سیستم؛
- مرحله خروج: آموزش، عوامل حادثه، حواس‌پرتی، شناسایی و تایید اپراتور، دینامیک پاسخ و سازگاری، تصمیم‌گیری، آگاهی از موقعیت، تجهیزات معیوب، تجربه، مهارت و حالات سیستم؛
- مرحله ارزیابی: آموزش، حواس‌پرتی، دینامیک پاسخ و سازگاری، آگاهی از موقعیت، تصمیم‌گیری، مهارت، تجربه و حالات سیستم.

به‌منظور تعیین وزن هر PSF از طریق «مقایسات زوجی» و با استفاده از طیف ساعتی، نظرات خبرگان اخذ و پس از اجماع نظرات (میانگین هندسی) و انجام محاسبات مربوطه در نرم‌افزار اکسل، وزن PSFها با نرخ ناسازگاری حدود ۰/۱ به دست آمد. بررسی محاسبات نشان می‌دهد که در مرحله آگاهی، «مهارت»، در مرحله ارزشیابی و اقدام، «حالات سیستم»، در مرحله خروج، «تجربه» و در مرحله ارزیابی، «مهارت» بالاترین ضریب اهمیت را دارند. در مرحله بعد از خبرگان خواسته شد تا به‌منظور امتیازدهی PSFها نقش هر PSF را در هر کدام از خطاها در مقیاس ۱ تا ۹ نمره‌دهی نمایند که پس از اجماع نظرات (میانگین هندسی)، امتیاز هر PSF در هر خطا تعیین شد.

پس از تعیین وزن و امتیاز هر PSF، با استفاده از محاسبات تعریف‌شده در روش SLIM، برای هر خطا شاخص SLI طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Jahangiri et al., 2017).

$$\mathrm{SLI}_j = \sum R_{ij}\, W_i \qquad (۱)$$

SLI: شاخص احتمال موفقیت فعالیت زام

W_i: وزن PSF iام

R_{ij}: تأثیر PSF iام بر خطای زام

درمرحله بعد، شاخص SLI با استفاده از رابطه (۲)، به احتمال موفقیت تبدیل می‌شود (Jahangiri et al., 2017).

$$\log P = a\,\mathrm{SLI} + b \qquad (۲)$$

P: احتمال موفقیت فعالیت زام

a و b ضرایب ثابتی هستند که با داشتن مقادیر احتمال موفقیت برای دو فعالیت مشخص، از طریق دو معادله و دو مجهول، قابل محاسبه هستند. در این تحقیق برای تعیین این دو ضریب، می‌توان از بین ۵۹ خطای شناسایی‌شده، دو خطا انتخاب و خطای مشابه آن‌ها را در «جدول

داده‌های خطای انسانی (Grozdanović, 2006)» شناسایی و احتمال آن‌ها را به‌عنوان احتمال دو خطای انتخابی، در نظر گرفت. پس از بررسی فهرست خطاهای شناسایی‌شده در مانور مورد مطالعه و مقایسه محتوایی آن با «جدول داده‌های خطای انسانی»، دو خطا با بیشترین فراوانی توافق خبرگان انتخاب شد. خطای «ارائه یا انتقال اطلاعات اشتباه محل حادثه» از فعالیت «اعلام به مرکز» و خطای «عدم سفت نمودن پیچ و مهره ها به اندازه کافی» از فعالیت «تعمیرات» دو خطای در نظر گرفته شده از فهرست خطاهای شناسایی شده در مانور مورد مطالعه بودند. این دو خطا به‌ترتیب با خطای ردیف ۱۳ (نرخ خطای عمومی برای ارتباط شفاهی) با احتمال ۰/۰۳ و خطای ردیف ۳۱ (خطا در عملیات روتین ساده) با احتمال ۰/۰۰۱ از جدول داده‌های خطای انسانی مطابقت داشتند. با جایگزینی این دو احتمال و همچنین مقدار SLI این دو خطا (که طبق محاسبات انجام شده بر اساس رابطه (۱)، به ترتیب ۵/۴۳ و ۲/۲۵ می‌باشد) در رابطه (۲)، یک دستگاه معادلاتی دو معادله و دو مجهول به شرح رابطه (۳) تشکیل و ضرایب ثابت a و b تعیین می‌شود.

$$\begin{cases} \log(1-0.03) = 5.43a + b \\ \log(1-0.001) = 2.25a + b \end{cases} \quad (۳)$$
$$a = -0.0040$$
$$b = 0.0086$$

از این دو ضریب برای محاسبه «لگاریتم احتمال موفقیت»، «احتمال موفقیت» یا همان 1-HEP ((لگاریتم احتمال موفقیت)۱۰) و «احتمال بروز خطا» یا HEP در هر فعالیت استفاده می‌شود.

برای محاسبه احتمال خطای انسانی نیز می‌توان از رابطه (۴) استفاده نمود.

$$\mathrm{HEP} = 1 - P \quad (۴)$$

HEP: احتمال خطای انسانی فعالیت زام

P: احتمال موفقیت فعالیت زام

با توجه به روابط بین فعالیت‌ها، خطای انسانی مجموعه فعالیت‌ها بر اساس تحقیق هی و همکاران (He et al., 2008) محاسبه می‌شود. این روابط در رابطه (۵) تا رابطه (۸) نشان‌داده‌شده است.

اگر زیرفعالیت‌ها موازی باشند، تنها در صورت شکست تمامی زیرفعالیت، فعالیت اصلی با شکست مواجه می‌شود و اگر وابستگی بین زیرفعالیت زیاد باشد، احتمال خطای انسانی در فعالیت اصلی بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{HEP}_{\mathrm{Activity}} \approx \min\left(\mathrm{HEP}_{\mathrm{sub-Activity}}\right) \quad (۵)$$

اگر زیرفعالیت‌ها موازی باشند، تنها در صورت شکست تمامی زیر فعالیت‌ها، فعالیت اصلی با شکست مواجه می‌شود و اگر وابستگی بین زیر فعالیت‌ها کم باشد، یا فعالیت‌ها مستقل از یکدیگر باشند، احتمال خطای انسانی در فعالیت اصلی بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{HEP}_{\mathrm{Activity}} = \prod \mathrm{HEP}_{\mathrm{sub-Activity}} \quad (۶)$$

اگر زیرفعالیت‌ها متوالی باشند، شکست در یکی از زیرفعالیت‌ها منجر به شکست فعالیت اصلی می‌شود و اگر وابستگی بین زیر فعالیت‌ها زیاد باشد، احتمال خطای انسانی در فعالیت اصلی بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{HEP}_{\mathrm{Activity}} \approx \max\left(\mathrm{HEP}_{\mathrm{sub-Activity}}\right) \quad (۷)$$

اگر زیر فعالیت‌ها متوالی باشند، شکست در یکی از زیر فعالیت‌ها منجر به شکست فعالیت اصلی می‌شود و اگر وابستگی بین زیر فعالیت‌ها کم باشد یا فعالیت‌ها مستقل از یکدیگر باشند، احتمال خطای انسانی در فعالیت اصلی بر اساس رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \mathrm{HEP}_{\mathrm{Activity}} &= 1 - \prod(1 - \mathrm{HEP}_{\mathrm{sub-Activity}}) \\ &\approx \sum \mathrm{HEP}_{\mathrm{sub-Activity}} \end{aligned} \quad (۸)$$

برای محاسبه خطای هر فعالیت، لازم است تا حالات مختلفی که برای بروز خطا در هر فعالیت اتفاق می‌افتد بررسی گردد. به‌عنوان نمونه، حالات زیر برای رخداد خطا در انجام فعالیت «تشخیص» از مرحله آگاهی، می‌تواند وجود داشته باشد:

- احتمال رخداد همه خطاها:

(HEP1)(HEP2)(HEP3)(HEP4)(HEP5)

- احتمال رخداد چهار خطا:

(HEP1)(HEP2)(HEP3)(HEP4)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP2)(HEP3)(HEP5)(1-HEP4) +
(HEP1)(HEP2)(HEP4)(HEP5)(1-HEP3) +
(HEP1)(HEP3)(HEP4)(HEP5)(1-HEP2) +
(HEP2)(HEP3)(HEP4)(HEP5)(1-HEP1)

- احتمال رخداد سه خطا:

(HEP1)(HEP2)(HEP3)(1-HEP4)(1- HEP5) +
(HEP1)(HEP2)(HEP4)(1-HEP3)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP2)(HEP5)(1-HEP3)(1-HEP4) +

(HEP1)(HEP3)(HEP4)(1-HEP2)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP3)(HEP5)(1-HEP2)(1-HEP4) +
(HEP1)(HEP4)(HEP5)(1-HEP2)(1-HEP3) +
(HEP2)(HEP3)(HEP4)(1-HEP1)(1-HEP5) +
(HEP2)(HEP3)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP4) +
(HEP2)(HEP4)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP3)+
(HEP3)(HEP4)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP2)

- احتمال رخداد دو خطا:

(HEP1)(HEP2)(1-HEP3)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP3)(1-HEP2)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP4)(1-HEP2)(1-HEP3)(1-HEP5) +
(HEP1)(HEP5)(1-HEP2)(1-HEP3)(1-HEP4) +
(HEP2)(HEP3)(1-HEP1)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP2)(HEP4)(1-HEP1)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP2)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP3)(1-HEP4) +
(HEP3)(HEP4)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP5) +
(HEP3)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP4) +
(HEP4)(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP3)

- احتمال رخداد یک خطا:

(HEP1)(1-HEP2)(1-HEP3)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP2)(1-HEP1)(1-HEP3)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP3)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP4)(1-HEP5) +
(HEP4)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP3)(1-HEP5) +
(HEP5)(1-HEP1)(1-HEP2)(1-HEP3)$(1\text{-}HEP_4)$

برای محاسبه خطای فعالیت مورد نظر، ۵ احتمال فوق با یکدیگر جمع می‌شود. این محاسبات برای کلیه فعالیت‌ها انجام شد. برای محاسبه احتمال خطای هر «مرحله» و همچنین «کل فرایند»، از قوانین ارتباط بین فعالیت‌ها یا بین مرحله‌ها استفاده می‌شود. احتمال خطای زیرفعالیت/فعالیت‌های اصلی و مراحل چهارگانه در **جدول ۶** نشان داده شده است.

با توجه به محاسبات انجام شده در **جدول ۶**، این نتیجه به دست می‌آید که بیشترین احتمال بروز خطا مربوط به مرحله «خروج» و کمترین احتمال خطا مربوط به مرحله «ارزیابی» است. همچنین از بین هفده فعالیت در کل فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک، بالاترین احتمال بروز خطا مربوط به فعالیت «اعلام به مرکز» با ۰/۱۱۴۸ و کمترین احتمال بروز خطا مربوط به فعالیت «مصاحبه» با ۰/۰۰۴۸ است. داده‌های این جدول به خبرگان سازمان مورد مطالعه ارائه شد و با توجه به سوابق حوادث و همچنین اجرای مانورهای واکنش در شرایط اضطراری، از دیدگاه خبرگان، نتایج با واقعیت‌های سازمان مورد مطالعه همخوانی دارد.

جدول ۶. احتمال خطای انسانی زیرفعالیت/فعالیت‌های اصلی و مراحل مانور نشت گازهای سمی و خطرناک

Table 6. HEP for toxic and hazardous gas leakage maneuver sub-activity/main activities and stages

ردیف	مرحله	شرح فعالیت	HEP هر زیرفعالیت	HEP فعالیت اصلی	HEP هر مرحله
۱	آگاهی	تشخیص	۰/۰۶۶۶		۰/۱۱۴۸
۲		اعلام به مرکز	۰/۱۱۴۸		
۳		اعلام به اعضا توسط مرکز	۰/۰۸۷۴		
۴	ارزشیابی و	تجهیز	۰/۰۲۶۳		۰/۰۴۰۲
۵	اقدام	اعزام خودرو پیش رو	۰/۰۴۰۲		
۶		اعزام سایر خودروها	۰/۰۲۷۳		
۷		استقرار خودرو	۰/۰۲۱۶	۵×۱۰^{-۸}	
۸		محدودسازی و مدیریت ازدحام	۰/۰۳۱۵		
۹		نجات و امداد	۰/۱۰۳۸		
۱۰		تخلیه اضطراری	۰/۰۳۳۷		
۱۱		بستن ولوها و منبع نشتی و سایر کنترل‌های عملیاتی	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۲۱	
۱۲		تعمیرات در صورت نیاز(وقتی که نشت مواد از فلنج باشد)	۰/۰۲۲۱		
۱۳	خروج	ضبط و ربط محل	۰/۰۰۸۴		۰/۱۲۹۱
۱۴		سرشماری	۰/۰۸۲۳		
۱۵		اعلام خروج	۰/۰۴۲۹		
۱۶	ارزیابی	مصاحبه	۰/۰۰۴۸		۰/۰۰۰۱۸
۱۷		جلسه تجزیه و تحلیل	۰/۰۳۶۱		

ازآنجاکه نوع رابطه چهار مرحله مانور به‌صورت متوالی با وابستگی زیاد است، برای محاسبه احتمال خطای انسانی از رابطه (۶) استفاده و به این ترتیب خطای انسانی کل مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک به میزان ۰/۱۲۹۱ محاسبه شد. با کم‌کردن این عدد از یک، قابلیت اطمینان کل مانور محاسبه و برابر ۰/۸۷۰۹ به دست آمد.

$$\text{HEP فرایند} = \max(\text{HEP}_i) \quad :۰/۱۲۹۱$$

$$\text{HR فرایند} = 1 - \text{HEP فرایند} \quad :٪۸۷/۰۹$$

به‌منظور بررسی پایداری نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان انسان و میزان تأثیرپذیری آنها از عدم‌قطعیت موجود در «وزن‌دهی PSF» و همچنین انتخاب خطاهای مرجع برای تعیین ضرایب ثابت a و b تحلیل حساسیت انجام شد.

۴-۱- تحلیل حساسیت نسبت به وزن PSFها

با توجه به اینکه وزن PSFها در هر مرحله از طریق مقایسات زوجی تعیین شده بود، در این تحلیل، در هر یک از چهار مرحله مانور، PSF دارای بالاترین وزن به‌عنوان PSF بحرانی آن مرحله انتخاب شد. سپس وزن PSF منتخب در دو سناریو به میزان ۲۰ درصد نسبت به مقدار پایه افزایش و کاهش داده شد و وزن سایر PSFها به‌صورت متناسب تعدیل گردید، به‌گونه‌ای که مجموع اوزان در هر مرحله برابر با یک باقی بماند. در ادامه، محاسبات HEP فعالیت‌ها و مراحل با استفاده از اوزان تعدیل‌شده تکرار و نتایج حاصل با حالت پایه مقایسه شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر وزن PSFهای منتخب، اگرچه در هر چهار مرحله موجب تغییر در HEP فعالیت‌ها شد، اما میزان این اثرگذاری در مراحل مختلف یکسان نبود. خلاصه محاسبات تحلیل حساسیت در **جدول ۷** آورده شده است. مطابق **جدول ۷**، بیشترین حساسیت در مرحله ارزیابی مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که تغییر ۲۰ درصدی وزن PSF «مهارت» موجب تغییر ۲۳/۴۱ درصدی در افزایش HEP و ۲۲/۰۶ درصدی در کاهش HEP نسبت به مقدار پایه شد. پس از آن، مرحله خروج با PSF «تجربه» قرار داشت که تغییر وزن آن به‌ترتیب موجب ۶/۶۶ و ۶/۷۴ درصد تغییر در HEP شد. در مراحل آگاهی و ارزشیابی و اقدام نیز تغییرات HEP نسبت به حالت پایه، در سناریوهای افزایش یا کاهش وزن، حدود ۴/۳۶ درصد بوده است. در سطح کل فرایند، تغییر وزن PSFهای منتخب به‌ترتیب در سناریوهای افزایش و کاهش وزن، موجب تغییر حدود ۶/۵۶ و ۶/۷۱ درصدی HEP نهایی شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حساسیت HEP نسبت به وزن PSFها در مراحل مختلف مانور متفاوت است و مرحله ارزیابی، از منظر PSF منتخب، بیشترین تأثیرپذیری را از تغییرات وزن دارد.

مقایسه رتبه فعالیت‌ها نیز نشان می‌دهد که تغییر وزن PSFهای منتخب الزاماً موجب جابه‌جایی کامل اولویت فعالیت‌ها نمی‌شود. در سناریوی افزایش ۲۰ درصدی وزن PSF، رتبه فعالیت‌های ۲، ۱۰، ۵، ۱۵، ۱، ۱۴، ۳ و ۹ بدون تغییر باقی ماند؛ در سناریوی کاهش ۲۰ درصدی نیز فعالیت‌های ۱۶، ۱۳، ۱۰ و ۵ رتبه خود را حفظ کردند. بنابراین، نتایج تحلیل حساسیت ضمن نشان‌دادن تأثیرپذیری HEP از تغییر وزن PSFها، حاکی از وجود سطحی از پایداری در اولویت‌بندی فعالیت‌ها نیز هست.

در مجموع، یافته‌های تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که وزن PSFها یکی از عوامل مؤثر بر نتایج HRA است، اما میزان اثرگذاری آن به مرحله فرایند و PSF موردنظر وابسته است. ازاین‌رو، PSFهایی که تغییر وزن آن‌ها منجر به تغییرات بزرگ‌تر در HEP می‌شود، می‌توانند به‌عنوان نقاط اهرمی مهم برای تعیین اولویت اقدامات بهبود قابلیت اطمینان انسانی مورد توجه تصمیم‌گیرندگان قرار گیرند.

۴-۲- تحلیل حساسیت نسبت به انتخاب خطاهای مرجع برای تعیین ضرایب ثابت a و b

به‌منظور بررسی حساسیت نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان انسان نسبت به انتخاب خطاهای مرجع و در نتیجه ضرایب ثابت a و b، یک تحلیل حساسیت انجام شد. در حالت پایه، خطاهای متناظر با ردیف‌های ۱۳ و ۳۱ جدول مرجع خطاها، با توجه به خطاهای شناسایی‌شده و مقادیر SLI، به‌عنوان خطاهای مرجع انتخاب شدند. سپس، به‌منظور بررسی اثر تغییر خطاهای مرجع، خطای متناظر با ردیف ۱۸ نیز وارد تحلیل شد و دو سناریوی جایگزین شامل ترکیب خطاهای ردیف‌های ۱۳ و ۱۸ و ترکیب خطاهای ردیف‌های ۱۸ و ۳۱ تعریف گردید. در هر یک از سناریوها، ضرایب a و b، مجدداً محاسبه و HEP و قابلیت اطمینان فرایند تعیین شد. خطای «تخلیه ارسال مواد به

مخزن بدون گنجایش» از فعالیت «بستن ولوها و منبع نشتی و سایر کنترل‌های عملیاتی»، معادل احتمال خطای ردیف ۱۸ جدول داده‌های خطای انسانی (Grozdanović, 2006)، با عنوان تخلیه اشتباه انباره، در نظر گرفته شده است. خلاصه نتایج محاسبات در **جدول ۸** نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که انتخاب خطاهای مرجع و به تبع آن تغییر ضرایب a و b، بر مقدار HEP و قابلیت اطمینان فرایند اثرگذار است. در سناریوی انتخاب خطاهای ردیف‌های ۱۳ و ۱۸، مقدار HEP فرایند از ۰/۱۲۹۱ در حالت پایه به ۰/۱۸۱۲ افزایش یافت که بیانگر ۴۰/۳۶ درصد افزایش نسبت به حالت پایه است؛ در همین شرایط، قابلیت اطمینان فرایند از ۸۷/۰۹ درصد به ۸۱.۸۸ درصد کاهش یافت. در سناریوی انتخاب خطاهای ردیف‌های ۱۸ و ۳۱، HEP فرایند به ۰/۲۱۸۶ رسید که معادل ۶۹/۳۳ درصد افزایش نسبت به حالت پایه است، درحالی‌که قابلیت اطمینان فرایند به ۷۱/۴۵ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده ۱۷.۹۶ درصد کاهش نسبت به حالت پایه است. مقایسه سناریوها نشان می‌دهد که سناریوی شامل خطاهای ردیف‌های ۱۸ و ۳۱، حساسیت بیشتری نسبت به انتخاب خطاهای مرجع ایجاد می‌کند و بیشترین تغییر در HEP و قابلیت اطمینان فرایند در این حالت مشاهده شده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب خطاهای مرجع، از طریق تأثیرگذاری بر ضرایب a و b، یکی از منابع عدم‌قطعیت در برآورد HEP است. بااین‌حال، این تغییرات به‌تنهایی به معنای ناپایداری مدل نیست، بلکه نشان‌دهنده حساسیت نتایج کمی مدل به نحوه انتخاب نقاط مرجع برای تبدیل SLI به HEP است. ازاین‌رو، در تفسیر نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان انسان، اثر انتخاب خطاهای مرجع و ضرایب متناظر با آن‌ها باید مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۷. تحلیل حساسیت HEP نسبت به وزن PSF

Table 7. Sensitivity analysis of HEP to PSF weight

مرحله	PSF با بالاترین وزن	△HEP٪	
		سناریو اول (+۲۰٪)	سناریو دوم (-۲۰٪)
آگاهی	مهارت	+۴/۳۶٪	-۴/۳۶٪
ارزشیابی و اقدام	حالات سیستم	-۳/۲۳٪	+۳/۲۳٪
خروج	تجربه	+۶/۶۶٪	-۶/۷۴٪
ارزیابی	مهارت	+۲۳/۴۱٪	-۲۲/۰۶٪
کل فرایند		+۶/۶۵٪	-۶/۷۱٪

جدول ۸. تحلیل حساسیت نسبت به انتخاب خطاهای مرجع برای تعیین ضرایب ثابت a و b

Table 8. Sensitivity analysis of the choice of reference errors for determining coefficients a and b

پارامتر	حالت پایه	سناریو	
	خطاهای ردیف ۱۳ و ۳۱	در نظر گرفتن خطاهای ردیف ۱۸ و ۳۱	در نظر گرفتن خطاهای ردیف ۱۳ و ۱۸
a	-۰/۰۰۴۰	-۰/۰۰۵۱	-۰/۰۰۱۷
b	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۴۲
فرایند HEP	۰/۱۲۹۱	۰/۲۱۸۶	۰/۱۸۱۲
فرایند HR	٪۸۷/۰۹	٪۷۱/۴۵	٪۸۱/۸۸
△HEP٪	-	+۶۹/۳۳٪	+۴۰/۳۶٪
△HR٪	-	-۱۷/۹۶٪	-۵/۹۸٪

۴-۳- پیشنهادهای بهبود فرایند مورد مطالعه

در یک جلسه مشترک با خبرگان سازمان مورد مطالعه، نتایج حاصل از ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی و خطاهای شناسایی‌شده در فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک بررسی و اقداماتی برای کاهش احتمال خطاها پیشنهاد و اولویت‌بندی شد.

بیشترین احتمال خطا مربوط به «مرحله خروج» و در این مرحله، مربوط به «فعالیت سرشماری» بود. از آنجا که همه خطاهای شناسایی شده در این فعالیت (عدم آگاهی از تعداد نفرات درگیر در صحنه در حین عملیات و پس از عملیات، عدم ثبت اطلاعات نفرات اعزام به بیمارستان خارج از شرکت، عدم ثبت اطلاعات نفرات اعزام شده به اورژانس داخل شرکت، عدم ثبت اطلاعات نفرات کارآموز، بازدیدکننده) دارای احتمال بروز یکسانی بودند، طراحی فرم‌هایی به‌منظور ثبت اطلاعات و تکمیل آن، به‌عنوان یکی از پیشنهادهای بهبود مطرح شد. بعد از مرحله خروج، بیشترین احتمال بروز خطا مربوط به «مرحله آگاهی» می‌باشد. ارتقای مهارت تجسم فضایی با الزام افراد به تسلط کامل در خصوص نقشه هوایی واحدها، تمرین مستمر و اجرای مانورهای متنوع از جمله مانورهای پشتیبانی و ارتقای سامانه اعلام شرایط اضطراری و استفاده از سیستم‌های هوشمند، از جمله اقداماتی بود که برای کاهش این احتمال پیشنهاد شدند. به‌منظور اولویت‌بندی اقدامات پیشنهادی، یک فرم طراحی و بین خبرگان توزیع شد. بر اساس فرم مذکور، اقدامات پیشنهادی بر اساس چهار معیار تأثیر بر کاهش احتمال خطای انسانی (HEP)، هزینه اجرا، زمان اجرا و قابلیت پیاده‌سازی (با وزن برابر و معادل ۰/۲۵) توسط خبرگان بین ۱ تا ۵ امتیازبندی شدند. وزن چهار معیار به‌صورت برابر و معادل ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. در معیارهای تأثیر بر کاهش HEP و قابلیت پیاده‌سازی، امتیاز بالاتر نشان‌دهنده وضعیت مطلوب‌تر و در معیارهای هزینه و زمان اجرا، امتیاز بالاتر نشان‌دهنده هزینه کمتر و زمان کوتاه‌تر است. امتیاز نهایی هر اقدام نیز از مجموع حاصل‌ضرب امتیاز هر معیار در وزن آن معیار محاسبه شد. پس از تکمیل فرم‌ها، میانگین وزنی امتیازها به‌عنوان امتیاز هر اقدام در نظر گرفته شد. خلاصه نتایج اولویت‌بندی در **جدول ۹** ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، «طراحی و استقرار فرم‌های ثبت و سرشماری نفرات» با امتیاز ۵ در رتبه نخست قرار گرفت. این اقدام به دلیل هزینه و زمان اجرای پایین و قابلیت پیاده‌سازی بالا، در اولویت نخست قرار گرفت. «ارتقای مهارت آگاهی فضایی از طریق تسلط کارکنان بر نقشه هوایی واحدها و اجرای مستمر مانورهای متنوع» با امتیاز ۴/۲۵ در رتبه دوم قرار گرفت. این اقدام می‌تواند توانایی کارکنان در تشخیص و اعلام صحیح موقعیت حادثه را افزایش داده و احتمال بروز خطا در فعالیت اعلام به مرکز را کاهش دهد. «ارتقای سامانه اعلام شرایط اضطراری و استفاده از سیستم‌های هوشمند برای تعیین محل حادثه و واحد عملیاتی» با امتیاز ۳ در رتبه سوم قرار گرفت. این اقدام به دلیل برخورداری از ظرفیت مناسب برای کاهش وابستگی فرایند به تشخیص و انتقال اطلاعات توسط افراد، از تأثیر بالقوه بالایی بر کاهش HEP برخوردار است؛ بااین‌حال، نیاز به زیرساخت فنی، سرمایه‌گذاری و زمان بیشتر برای اجرا موجب شده است در مقایسه با دو اقدام نخست، اولویت پایین‌تری داشته باشد. اجرای این پیشنهاد مستلزم بررسی سامانه موجود، تعیین نیازمندی‌های فنی، ارزیابی فناوری‌های مناسب، اجرای آزمایشی و در نهایت استقرار سامانه متناسب با شرایط سازمان است.

برنامه اجرایی سه اقدام پیشنهادی، به شرح **جدول ۱۰** تدوین شد. اجرای اقدام نخست می‌تواند با تعیین اطلاعات مورد نیاز، طراحی فرم استاندارد، بررسی و تأیید آن توسط واحدهای ذی‌ربط، اجرای آزمایشی در یک مانور و اصلاح و استقرار نهایی انجام شود. این اقدام با استفاده از منابع موجود واحدهای HSE، شرایط اضطراری و عملیات و در یک بازه کوتاه‌مدت قابل اجرا است. در اقدام دوم، ابتدا محتوای آموزشی و نقشه‌های مورد نیاز تهیه و سپس آموزش آگاهی فضایی، تمرین شناسایی موقعیت واحدها و مانورهای پشتیبانی و عملیاتی اجرا می‌شود. عملکرد کارکنان پس از هر تمرین ارزیابی و نقاط ضعف شناسایی‌شده اصلاح خواهد شد. اجرای این اقدام در یک بازه کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و با همکاری واحدهای آموزش، HSE و مدیریت شرایط اضطراری امکان‌پذیر است. اقدام سوم نیز در یک بازه میان‌مدت و پس از بررسی فنی و اقتصادی زیرساخت‌های مورد نیاز قابل پیگیری است.

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین، به‌ویژه بایو سجاتی و همکاران(Bayu Sejati et al., 2024) و فرهادی و همکاران (Farhadi et al., 2023)، نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجهی در رویکرد و خروجی‌های تحقیق است. بایو سجاتی و همکاران (Bayu Sejati et al., 2024) با استفاده از تکنیک DMAIC و با هدف افزایش بهره‌وری پیمانکاران، بدون به‌خطر انداختن ایمنی نیروی انسانی در عملیات

بالادستی میادین نفتی اندونزی، تحقیق خود را اجرا کردند. یکی از مهم‌ترین نتایج خروجی تحقیق ایشان، کاهش ۷۲ درصدی نسبت به سطح پایه در میانگین نرخ حوادث ایمنی شامل نرخ کل حوادث قابل ثبت، روزهای کاری ازدست‌رفته، موارد محدودیت کاری یا تغییر شغل و تصادفات وسایل نقلیه موتوری بود. بااین‌حال، شاخص قابلیت اطمینان انسان در میان شاخص‌های عملکردی فرایند مورد مطالعه در تحقیق ایشان لحاظ نشده بود.

ازسوی‌دیگر، فرهادی و همکاران (Farhadi et al., 2023) با استفاده از روش دلفی فازی، عوامل شکل‌دهنده عملکرد مؤثر بر واکنش در شرایط اضطراری در صنایع فرایندی را شناسایی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مهم‌ترین PSFها شامل استرس و عوامل فیزیولوژیکی، شایستگی، تیم و سازمان هستند. با وجود شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد انسان، در این تحقیق نیز قابلیت اطمینان انسان محاسبه و ارزیابی نشده است.

جدول ۹. اولویت‌بندی پیشنهادهای بهبود

Table 9. Prioritization of Improvement Suggestions

ردیف	پیشنهادهای بهبود	تأثیر بر کاهش HEP	هزینه اجرا	زمان اجرا	قابلیت پیاده‌سازی	امتیاز نهایی
۱	طراحی و استقرار فرم‌های ثبت و سرشماری نفرات	۵	۵	۵	۵	۵
۲	ارتقای مهارت آگاهی فضایی از طریق تسلط کارکنان بر نقشه هوایی واحدها و اجرای مستمر مانورهای متنوع	۴	۴	۴	۵	۴/۲۵
۳	ارتقای سامانه اعلام شرایط اضطراری و استفاده از سیستم‌های هوشمند برای تعیین محل حادثه و واحد عملیاتی	۵	۲	۲	۳	۳

جدول ۱۰. طرح اجرایی پیشنهادهای بهبود

Table 10. Implementation Plan for Improvement Suggestions

پیشنهادهای بهبود	مراحل اجرایی	مدت زمان	منابع مورد نیاز	واحدهای مسئول
طراحی و استقرار فرم‌های ثبت و سرشماری نفرات	۱- تعیین اطلاعات موردنیاز ۲- طراحی فرم استاندارد ۳- بررسی و تأیید توسط واحدهای ذی‌ربط ۴- اجرای آزمایشی در یک مانور ۵- اصلاح و استقرار نهایی	کوتاه مدت	فرم‌های چاپی یا الکترونیکی	اداره HSE و پدافند غیرعامل با همکاری اداره تحلیل سیستم‌ها
ارتقای مهارت آگاهی فضایی از طریق تسلط کارکنان بر نقشه هوایی واحدها و اجرای مستمر مانورهای متنوع	۱- تهیه نقشه‌های هوایی و محتوای آموزشی ۲- آموزش کارکنان ۳- تمرین شناسایی موقعیت واحدها ۴- اجرای مانورهای پشتیبانی و عملیاتی ۵- ارزیابی عملکرد و رفع نقاط ضعف	میان مدت	مربی آموزشی، نقشه‌های واحدها، فضای آموزشی، سناریوهای مانور	اداره آموزش؛ اداره HSE و پدافند غیرعامل
ارتقای سامانه اعلام شرایط اضطراری و استفاده از سیستم‌های هوشمند برای تعیین محل حادثه و واحد عملیاتی	۱- ارزیابی سامانه موجود ۲- تعیین نیازمندی‌های فنی ۳- بررسی و انتخاب فناوری مناسب ۴- اجرای آزمایشی ۵- ارزیابی عملکرد و استقرار نهایی	بلندمدت	تجهیزات و زیرساخت فناوری اطلاعات و ارتباطات، نرم‌افزار/سامانه هوشمند	اداره HSE و پدافند غیرعامل با همکاری اداره‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات و اداره حراست

در مقایسه با مطالعات پیشین، تحقیق حاضر ضمن ارائه یک چارچوب مفهومی، نشان داد که شاخص قابلیت اطمینان انسان می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های عملکردی فرایندها در نظر گرفته شود .همچنین، در این تحقیق مهم‌ترین PSFهای مؤثر در فرایند مورد مطالعه شامل مهارت، تجربه، آگاهی از موقعیت، تیم و آموزش تعیین شدند و در ادامه، قابلیت اطمینان انسانی مانور اضطراری تخصصی در شرکت پالایش نفت ارزیابی شد. این درحالی است که این موارد در مطالعات پیشین مشاهده نشده است؛ بنابراین، تحقیق حاضر علاوه بر شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد انسان، با ارزیابی کمی قابلیت اطمینان انسانی، گامی فراتر از مطالعات پیشین برداشته و امکان استفاده از این شاخص را در ارزیابی عملکرد فرایندهای اضطراری فراهم کرده است.

۵- نتیجه‌گیری

در صنایع فرایندی پیچیده و پرریسک، عملکرد ایمن و پایدار سیستم‌ها حاصل تعامل میان مؤلفه‌های انسانی، فنی و سازمانی است. اگرچه پیشرفت‌های فناورانه نقش مهمی در کاهش ریسک‌های عملیاتی داشته‌اند، اما انسان همچنان یکی از اجزای اصلی سیستم‌های اجتماعی-فنی محسوب می‌شود و عملکرد وی می‌تواند تحت‌تأثیر عوامل مختلف محیطی، سازمانی و فرایندی قرار گیرد. ازاین‌رو، شناسایی و مدیریت عوامل مؤثر بر عملکرد انسان و ارتقای قابلیت اطمینان انسانی، یکی از رویکردهای مهم در بهبود ایمنی و کاهش احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته در صنایع حساس، به‌ویژه صنعت پالایش نفت، به شمار می‌رود. تحقیق حاضر باهدف ارائه یک چارچوب بهبود فرایند مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان انسان انجام شد. این چارچوب پیشنهادی با عنوان DMAIC-HRA نام‌گذاری شد. هدف اصلی این چارچوب، ایجاد ارتباطی نظام‌مند میان نتایج حاصل از ارزیابی خطاهای انسانی و اقدامات عملی برای بهبود فرایند بود؛ به‌نحوی که خروجی ارزیابی قابلیت اطمینان انسان صرفاً به شناسایی احتمال خطا محدود نشده و بتواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی مداخلات اصلاحی در سطح فرایند و سیستم مورد استفاده قرار گیرد. طبق این چارچوب در مرحله اندازه‌گیری و تحلیل علاوه بر شاخص‌های عملکردی، شاخص قابلیت اطمینان انسان نیز محاسبه می‌شود. با توجه به محدودیت زمانی تحقیق، مراحل مقدمه‌سازی، تعریف، اندازه‌گیری و تحلیل چارچوب پیشنهادی با رویکرد HRA باهدف شناسایی اقدامات اصلاحی برای بهبود مانور اضطراری نشت گازهای سمی و خطرناک یکی از پالایشگاه‌های نفت ایران نیز اجرا شد. هفده فعالیت فرایند انتخابی در چهار مرحله آگاهی، ارزشیابی و اقدام، خروج و ارزیابی تبیین و تعداد پنجاه و نه خطا در کل فرایند شناسایی شد. پس از ارزیابی PSFهای استخراج شده از مطالعات گذشته، تعداد بیست و پنج PSF در مراحل چهارگانه ارزیابی شدند. سپس برای شناسایی PSFهای مؤثر در هر مرحله تعیین عوامل مناسب برای مقایسات زوجی از تحلیل MICMAC استفاده شد. پس از محاسبه وزن PSFها، امتیاز آن‌ها نیز بر اساس میانگین هندسی نظر خبرگان درخصوص نقش PSF در خطای انسانی تعیین شد. این دو عدد (وزن و امتیاز PSF) مبنای محاسباتی روش تلفیقی پیشنهادی با عنوان SLIM-SHERPA، قرار گرفت. از مزایای این روش HRA پیشنهادی، شناسایی «علل بروز خطا» در هر فعالیت و تسهیل در تعریف «اقدام اصلاحی اثربخش» برای حذف علت خطا است. با انجام محاسبات طبق فرمول‌ها و قوانین مربوطه، خطاهای هر مرحله و در نهایت احتمال خطای کل فرایند محاسبه شد و سپس با کسر این مقدار از یک، قابلیت اطمینان فرایند مانور نشت گازهای سمی و خطرناک در پالایشگاه نفت موردمطالعه، به میزان ۸۷/۰۹ درصد محاسبه گردید. از بین مراحل چهارگانه مانور موردمطالعه، بیشترین احتمال بروز خطای انسانی مربوط به مرحله خروج، با مقدار حدود ۰/۱۳، و پس از آن مربوط به مرحله آگاهی با مقدار حدود ۰/۱۱ بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که بهبود قابلیت اطمینان انسان صرفاً از طریق آموزش‌های ایمنی و آتش‌نشانی و اجرای مانورها به‌صورت سنتی حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند رویکردی جامع برای اصلاح شرایط سیستم، بهبود سیستم‌های ثبت وقایع و چک‌لیست‌های مناسب، افزایش مهارت تجسم فضایی و تسلط کامل به نقشه هوایی واحدهای عملیاتی، تنوع در اجرای مانورها از جمله مانورهای پشت‌میزی و ارتقای سیستم اعلام شرایط اضطراری از جمله استفاده از سیستم‌های هوشمند برای تعیین محل حادثه و نام واحد عملیاتی، است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی در

چارچوب DMAIC-HRA صرفاً به شناسایی فعالیت‌های دارای احتمال خطای بالاتر محدود نمی‌شود، بلکه می‌تواند مبنایی برای تعیین، اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی اقدامات بهبود متناسب با شرایط سازمان قرار گیرد. بدین ترتیب، استفاده از HEP به‌عنوان یکی از شاخص‌های عملکردی فرایند، امکان هدایت اقدامات اصلاحی به سمت فعالیت‌هایی را فراهم می‌کند که بیشترین ظرفیت کاهش خطای انسانی را دارند. نتایج این مطالعه در مقایسه با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تلفیق ارزیابی قابلیت اطمینان انسان با تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد و رویکرد بهبود فرایند می‌تواند دیدگاه جامع‌تری برای مدیریت خطاهای انسانی در شرایط اضطراری ارائه دهد. محدودیت زمانی و محدودیت مکانی از جمله محدودیت‌های این تحقیق بودند؛ لذا پیشنهاد می‌شود، اقدامات اصلاحی پیشنهادی اجرا و مجدداً قابلیت اطمینان انسانی محاسبه شود. از آنجا که مطالعه تنها بر روی یک فرایند واکنش اضطراری در یک پالایشگاه انجام شده است؛ بنابراین تعمیم نتایج آن به سایر شرایط اضطراری و صنایع دیگر باید با احتیاط صورت گیرد. در صورت اجرای این چارچوب در سایر شرکت‌های پالایشی، می‌توان از شاخص قابلیت اطمینان انسان به‌عنوان یک شاخص‌های عملکردی مانورها برای مقایسه بین شرکت‌ها استفاده کرد. همچنین با ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در سایر مانورها می‌توان افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم مدیریت ایمنی فرایند را انتظار داشت. یکی دیگر از پیشنهادهای پژوهش‌های آینده تعیین وزن PSFها با استفاده از روش‌های دیگر از جمله SWARA است.

قدردانی

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

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.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت‌های نویسندگان

فرشته مشهدی: مفهوم‌پردازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **محمدرضا وسیلی:** مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **سیدمحمد کاظمی:** راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **مهدی جهانگیری:** راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **مهدی کرباسیان:** 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

Abbassinia, M., Kalatpour, O., Motamedzadeh, M., Soltanian, A., & Mohammadfam, I. (2020). The application of lean production in reducing human error and improving response in emergencies: A case study in a petrochemical industry. *Iranian Journal of Ergonomics*, *8*(2), 39–49. https://doi.org/10.30699/jergon.8.2.39

Ahn, S. I., Kurt, R. E., & Akyuz, E. (2022). Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships. *Ocean Engineering*, *251*, 111089. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111089

Antosz, K., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Waszkowski, R., & Machado, J. (2022). Application of Lean Six Sigma for sustainable maintenance: case study. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(19), 181–186. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.204

Arici, S. S., Sezer, S. I., & Akyuz, E. (2026). Prediction of human error in chemical tanker ship's tank heating process to enhance operational safety. *Journal of Marine Science and Application*, *25*(2), 523-535. https://doi.org/10.1007/s11804-025-00628-1

Applications, *296*, 129129. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129129

Grozdanović, M., & Stojiljković, E. (2006). Framework for human error quantification. *Facta universitatis-series: Philosophy, Sociology and Psychology*, *5*(1), 131-144.

Habibi, A., & Afridi, S. (2023). *Multi-criteria decision making (deterministic and fuzzy)*. Naroon Publications.

Hamza, M., & Diaconeasa, M. A. (2023). Investigating the applicability of human reliability analysis methods during early design stages of non-light-water nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy*, *161*, 104716. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104716

He, X., Wang, Y., Shen, Z., & Huang, X. (2008). A simplified CREAM prospective quantification process and its application. *Reliability Engineering & System Safety*, *93*(2), 298–306. https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.10.026

Hossein, A. R. Z., Sayadi, A. R., Rahimdel, M. J., & Moradi, M. R. (2024). Human reliability analysis in maintenance and repair operations of mining trucks: A Bayesian network approach. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34765

Huang, F., & Madeira, H. (2024). Advancing modern code review effectiveness through human error mechanisms. *Journal of Systems and Software*, *214*, 112060. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112060

Jahangiri, M., Daneshmandi, H., & Salmani Nodooshan, H. (2017). *Safety and Human Errors (Identification, Assessment and Management of Human Errors, and Human Reliability Analysis)*. Hak Publications (In Persian).

Jahani, F., Kouhnavard, B., & Jafarzadeh, Z. (2021). Identifying and evaluating human errors in Operating a furnace in a petrochemical industry using human event analysis technique (ATHEANA). *Occupational Hygiene and Health Promotion*. https://doi.org/10.18502/ohhp.v5i4.8461

Ji, C., Gao, F., & Liu, W. (2024). Dependence assessment in human reliability analysis based on cloud model and best-worst method. *Reliability Engineering & System Safety*, *242*, 109770. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109770

Kaya, I., Ilbahar, E., Gündoğdu, F. K., Karaşan, A., Yazır, K., & Olgac, E. (2025). Design of attribute control charts under uncertainty with normality analyses: Impact of operator hesitancy during inspection processes in manufacturing industry with a real case application. *Applied Soft Computing*, *170*, 112625. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112625

Arturo Garza-Reyes, J., Flint, A., Kumar, V., Antony, J., & Soriano-Meier, H. (2014). A DMAIRC approach to lead time reduction in an aerospace engine assembly process. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *25*(1), 27-48. https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2012-0058

Bafandegan Emroozi, V., & Modares, A. (2024). Identifying critical factors affecting human error probability in power plant operations and their sustainability implications. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, *8*(3), 813–829. https://doi.org/10.1007/s41660-024-00392-9

Bayu Sejati, R. H., Wibisono, D., & Adhiutama, A. (2024). The collaborative approaches of the knowledge-based performance management system and lean six sigma to improve contractor productivity and safety performances. *International Journal of Lean Six Sigma*, *15*(5), 1065–1101. https://doi.org/10.1108/ijlss-07-2023-0125

Bevilacqua, M., & Ciarapica, F. E. (2018). Human factor risk management in the process industry: A case study. *Reliability Engineering & System Safety*, *169*, 149–159. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.08.013

Chen, S., Zhang, L., & Qing, T. (2021). A human reliability analysis methodology based on an extended Phoenix method for severe accidents in nuclear power plants: Qualitative analysis framework. *Reliability Engineering & System Safety*, *214*, 107750. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107750

Dogancan, V., & Celik, M. (2026). Integrating human reliability analysis into SIRE 2.0 post-inspection process: The case of fire-fighting system operations onboard tanker vessel. *Ocean Engineering*, *343*, 123630. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123630

EORC. (2022). Safety Instructions for Handling Chemicals No. EMS-WI-12-04. In: Esfahan Oil Refining Company.

EORC. (2023). Emergency Response Procedure No. EMS-PR-03-07. In: Esfahan Oil Refining Company.

Farhadi, S., Mohammadfam, I., Kalatpour, O., & Ghasemi, F. (2023). Determining performance shaping factors to assess human error in the emergency response team in chemical process industries: a case study. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, *29*(1), 294–305. https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2043646

Gao, F. (2026). A novel cloud model and consensus-based success likelihood index method for human reliability analysis in air refueling operations. *Expert Systems with*

Khan, F. I., Amyotte, P. R., & DiMattia, D. G. (2006). HEPI: A new tool for human error probability calculation for offshore operation. *Safety Science*, *44*(4), 313–334. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.10.008

Kumar, P., Singh, D., & Bhamu, J. (2021). Development and validation of DMAIC based framework for process improvement: a case study of Indian manufacturing organization. *International journal of quality & reliability management*, *38*(9), 1964–1991. https://doi.org/10.1108/ijqrm-10-2020-0332

Laumann, K. (2020). Criteria for qualitative methods in human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, *194*, 106198. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.001

Liao, W., Qiao, Y., Dong, T., Gou, Z., & Chen, D. (2025). A human reliability analysis method based on STPA-IDAC and BN-SLIM for driver take-over in Level 3 automated driving. *Reliability Engineering & System Safety*, *254*, 110577. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110577

Liu, X., Yan, S., Zhang, X., & Ahmed, W. (2025). Dynamic human reliability analysis method for nuclear power plant main control room based on SPAR-H and SD. *Nuclear Engineering and Technology*, *57*(3), 103253. https://doi.org/10.1016/j.net.2024.10.015

Nicholds, B. A., & Mo, J. P. (2018). Reliability analysis of productivity enhancement initiatives. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *29*(6), 1003–1024. https://doi.org/10.1108/jmtm-12-2016-0187

Parhizkar, T., Utne, I. B., Vinnem, J. E., & Mosleh, A. (2021). Dynamic probabilistic risk assessment of decision-making in emergencies for complex systems, case study: dynamic positioning drilling unit. *Ocean Engineering*, *237*, 109653. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109653

Park, J. (2024). A framework to determine the holistic multiplier of performance shaping factors in human reliability analysis–An explanatory study. *Reliability Engineering & System Safety*, *242*, 109727. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109727

Park, J., & Boring, R. L. (2025). Dynamic human reliability analysis using the EMRALD dynamic risk assessment tool. *Reliability Engineering & System Safety*, *264*, 111260. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111260

Patriarca, R., Ramos, M., Paltrinieri, N., Massaiu, S., Costantino, F., Di Gravio, G., & Boring, R. L. (2020). Human reliability analysis: Exploring the intellectual structure of a research field. *Reliability Engineering & System Safety*, *203*, 107102. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107102

Prashar, A. (2016). A conceptual hybrid framework for industrial process improvement: integrating Taguchi methods, Shainin System and Six Sigma. *Production Planning & Control*, *27*(16), 1389–1404. https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1225999

Ramos, M. A., Droguett, E. L., Mosleh, A., & Moura, M. D. C. (2020). A human reliability analysis methodology for oil refineries and petrochemical plants operation: Phoenix-PRO qualitative framework. *Reliability Engineering & System Safety*, *193*, 106672. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106672

Rodgers, M., & Oppenheim, R. (2019). Ishikawa diagrams and Bayesian belief networks for continuous improvement applications. *The TQM Journal*, *31*(3), 294-318. https://doi.org/10.1108/TQM-11-2018-0184

Sezer, S. I., Elidolu, G., Aydin, M., Ahn, S. I., Akyuz, E., & Kurt, R. E. (2024). Analyzing human reliability for the operation of cargo oil pump using fuzzy CREAM extended Bayesian Network (BN). *Ocean Engineering*, *299*, 117345. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117345

Sikander, S., Naseem, A., Shahzad, A., Akhtar, M. J., & Salman, A. (2025). Improving production processes with a customer-centric perspective using a novel hybrid approach in the textile sector. *International Journal of Productivity and Performance Management*, *74*(5), 1796–1827. https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2024-0254

Tamburini, F., Iaiani, M., & Cozzani, V. (2025). Analysis of system resilience in escalation scenarios involving LH2 bunkering operations. *Reliability Engineering & System Safety*, *257*, 110816. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110816

Vechgama, W., Park, J., Kim, Y., Wetchagarun, S., Pechrak, A., Pornroongruengchok, W., & Silva, K. (2025a). Suggestion of specific performance shaping factor update for the human reliability analysis framework of the TRIGA research reactor. *Reliability Engineering & System Safety*, *260*, 111010. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111010

Vechgama, W., Park, J., Wetchagarun, S., Pechrak, A., Pornroongruengchok, W., & Silva, K. (2025b). Full-scale demonstration of human reliability analysis framework for TRIGA research reactor. *Progress in Nuclear Energy*, *184*, 105718. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105718

Xiao, X., Chen, P., Qi, B., Zhao, H., Liang, J., Tong, J., & Wang, H. (2025a). KRAIL: A knowledge-driven framework for human reliability analysis integrating IDHEAS-DATA and large language models. *Reliability Engineering & System Safety*, 111585. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111585

Xiao, X., Qi, B., Liu, S., Chen, P., Liang, J., Tong, J., & Wang, H. (2025b). A dynamic risk-informed framework for emergency human error prevention in high-risk industries: A Nuclear Power Plant case study. *Reliability Engineering & System Safety*, *261*, 111080. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111080

Yang, S., Demichela, M., Geng, J., Wang, L., & Ling, Z. (2024). A data-driven Bayesian network of management and organizational factors for human reliability analysis in the process industry. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35048

Zarei, E., Khan, F., & Abbassi, R. (2021). Importance of human reliability in process operation: A critical analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, *211*, 107607. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107607

Zhao, H., & Liu, Y. (2025). Integrating DMAIC Philosophy and Bow-Tie Model for Quantitative Risk Assessment in Health Care. *Quality Management in Healthcare*, *34*(4), 289–298. https://doi.org/10.1097/QMH.0000000000000457

Zheng, X., Bolton, M. L., Daly, C., & Biltekoff, E. (2020). The development of a next-generation human reliability analysis: Systems analysis for formal pharmaceutical human reliability (SAFPH). *Reliability Engineering & System Safety*, *202*, 106927. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106927