Iran Occupational Health

Original Article

http://ioh.iums.ac.ir

Iran Occupational Health. 2026 (01 Jun);23: 12

Development of a Novel Integrated Hybrid Technique for Industrial Accident Analysis Based on Systematic Deviations and Root Causes

Iraj Mohammadfam, Department of Ergonomics, Health in Emergency and Disaster Research Center, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran.

Mohsen Sadeghi-Yarandi, (*Corresponding author), Health in Emergency and Disaster Research Center, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran. moh.sadeghi@uswr.ac.ir

Abstract

Background and aims: Occupational accidents in complex industries present significant challenges, and traditional analysis techniques have limitations, including insufficient emphasis on systematic deviations, human-organizational factors, and interdependencies. The primary objective was to evaluate the novel Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) technique using the ANP–VIKOR multi-criteria decision-making method and to compare it with conventional techniques.

Methods: The IRAJ technique was developed by integrating Change-Based Analysis with the 6M framework through six main steps. Evaluation criteria—including systematic nature, analysis depth, speed, neutrality, support for corrective actions, organizational learning, and industrial applicability—were derived from a comprehensive literature review. The expert panel comprised 10 HSE specialists. Criteria weights were determined using ANP (considering interdependencies), and the techniques were ranked using VIKOR.

Results: The IRAJ technique ranked first with a score of 0.34 (FAM: 0.26, Tripod-β: 0.22, SCAT: 0.18, CBA: 0.16, ECFC: 0.14, RCAT: 0.10). Compared to the reference methods, the depth of analysis increased by 28%, coverage of human-organizational factors improved by 31%, support for corrective actions rose by 35%, and reliance on analyst judgment decreased by 29%. Furthermore, the most frequent root causes were identified in management (28%) and method (24%).

Conclusion: The IRAJ technique provides a structured, change-oriented approach that enhances the comprehensiveness and accuracy of accident analysis. Furthermore, the findings indicate that applying the ANP–VIKOR method offers a scientific and standardized framework for evaluating and ranking accident analysis techniques, ensuring that critical criteria are assessed simultaneously and that decision-making is conducted quantitatively and transparently.

Conflicts of interest: None

Funding: None

Keywords

Occupational accidents

IRAJ technique

Root cause analysis

Accident analysis

Occupational safety.

Received: 2026/01/13

Accepted : 2026/05/20

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Occupational accidents remain one of the most significant human, economic, and social challenges across various industries. Their consequences extend beyond physical injuries to include a wide range of financial, environmental, organizational, and reputational damages. According to reports from the International Labour Organization, millions of occupational accidents occur worldwide each year, a substantial portion of which are preventable and result from systemic managerial weaknesses. This reality underscores the urgent need for precise identification of root causes, analysis of influencing factors, and the design of corrective and preventive actions through proactive and effective operational approaches at the organizational level. Accident analysis, as a key tool in safety management, plays a crucial role in uncovering root causes, understanding the interactions among influential factors, and preventing accident recurrence. Over recent decades, several techniques have been developed for accident analysis, each with its own strengths and limitations. Methods such as SCAT, Tripod-β, ECFC, CBA, RCAT, and combined techniques like FAM adopt different approaches to identifying accident causes. Some emphasize human factors, others focus on organizational and managerial structures, and still others concentrate on the sequence of events and causal relationships. Despite this diversity, no existing method comprehensively addresses all dimensions influencing accidents, particularly in complex and dynamic industrial environments. Therefore, considering the importance of these issues and the existing research gap, the primary objective of this study is to develop and evaluate the Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) technique and compare its performance with six widely used techniques—FAM, SCAT, Tripod-β, ECFC, CBA, and RCAT—based on a set of technical, analytical, and practical criteria. The results of this study can support more informed decisions regarding accident analysis techniques, enhance the quality of safety-related decision-making, and effectively prevent occupational accidents in complex industrial organizations.

METHODOLOY

Study Design

This study is a methodological research project aimed at designing, implementing, and evaluating the novel Industrial Root-Cause Analysis and Judgment (IRAJ) technique for occupational accident analysis.

Step 1: Identification and Selection of Evaluation Criteria for Techniques

In this step, evaluation criteria were extracted through a systematic review of scientific databases, including PubMed, Web of Science, and Scopus. Appropriate criteria for evaluating and comparing occupational accident analysis techniques were identified by reviewing previous studies, occupational safety standards, and scientific papers.

Step 2: Selection of Reference Techniques for Comparison

In the second step, six widely used and popular accident analysis techniques—FAM, SCAT, Tripod-β, ECFC, CBA, and RCAT—were selected for comparison. These techniques represent a diverse spectrum of analytical approaches, including event-based, human, systemic, and change-oriented. The reason for selecting these techniques is their widespread industrial application, strong scientific support, and coverage of each other's limitations.

Step 3: Development of the Industrial Root-Cause Analysis and Judgment (IRAJ) Technique

In this step, the Industrial Root-Cause Analysis and Judgment (IRAJ) technique was developed by integrating two primary approaches:

- Change-based analysis focuses on identifying meaningful deviations from normal working conditions.
- The 6M Framework consists of Man, Machine, Method, Material, Management, and Environment.

The reason for combining Change-Based Analysis and 6M is its ability to dynamically identify deviations and comprehensively cover system dimensions, addressing limitations of single-dimensional methods.

Step 4: Selection of Sample Accidents and Implementation of Techniques

To evaluate the developed technique in practice, five sample occupational accidents from various industries were selected. The selection criteria included industrial diversity, variation in the types of outcomes (human, financial, and organizational), and access to sufficient information.

Step 5: Evaluation and Scoring of Techniques Using the ANP–VIKOR Method

After conducting the analyses, the performance of each technique was evaluated by experts using six selected criteria on a five-point scale. The collected data were first normalized. Then, the Analytic Network Process (ANP) was applied to determine the weights of the criteria, taking into account interdependencies and feedback loops. This process involved creating a criteria network, performing pairwise comparisons, and calculating the final normalized weights. After calculating the weights, the VIKOR method was applied to rank the techniques.

Step 6: Data Analysis and Final Ranking

In the final step, the normalized scores and final

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

weights of the techniques were combined to determine the overall ranking of the techniques.

RESULTS

Comparison of Techniques Based on Main Evaluation Criteria

Details of the experts are as follows: average age 45 years (range 35–55 years), 8 males and 2 females, with backgrounds in oil (3), mining (2), chemical (2), construction (2), and manufacturing (1) industries. Experts were selected using purposive sampling to ensure diversity in experience and expertise for comprehensive viewpoints. To evaluate the performance of the techniques, the average normalized scores for each technique were calculated based on seven main criteria: systematism, analysis depth, dependence on the analyst, clarity of causal path, time efficiency, support for corrective actions, and industrial applicability. Scoring was performed using a 5-point Likert scale (1: very weak to 5: very strong), and normalization was performed using the Min-Max method to ensure the values were between 0 and 1. As shown in Table 1, the IRAJ technique achieved the highest scores in all criteria, particularly in the components of analysis depth (4.6), systematism (4.7), and clarity of causal path (4.8). This superiority reflects IRAJ's ability to integrate change-based analysis with the 6M framework, effectively covering the interactions of human, technical, and organizational factors.

Weighting and Ranking with ANP–VIKOR

Using ANP, the interdependencies and feedback loops between the criteria were modeled, and the final weight for each criterion was calculated. Then, with the VIKOR method, the techniques were ranked based on their proximity to the ideal option. The Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) technique ranked first with a weight of 0.31.

Comparison of Analytical Performance of the Proposed Technique with Reference Techniques

Quantitative analysis of the results showed that the IRAJ technique increased the analysis depth by 22%, reduced reliance on individual analyst judgment by 27%, improved clarity of causal paths by 25%, and increased time efficiency by 18% compared to the average performance of the six reference techniques. These improvements were achieved by utilizing dynamic change analysis and the 6M framework, which enables the identification of complex system interactions.

Identification of Root Causes in the 6M Dimensions

Using the novel Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) technique, five real-world accidents from various industries (oil, mining, chemical, construction, and manufacturing) were analyzed, and root causes were identified and categorized into the six dimensions of the 6M framework. This analysis, based on the identification of systematic changes and interrelationships between dimensions, provided a deeper extraction of underlying and root causes. The most frequent root causes were found in the management dimension (28%) and the method dimension (24%), indicating the central role of organizational and procedural weaknesses in accidents.

Comparison of the Number of Causes Identified by the Techniques

The average number of root causes identified in each accident by the techniques was also evaluated. The IRAJ technique identified the most causes (18 average causes), demonstrating the depth and comprehensiveness of the analysis.

DISCUSSION

The results of this study demonstrate that the Industrial Root-Cause Analysis & Judgment (IRAJ) technique provides a comprehensive, systematic, and change-oriented approach to occupational accident analysis. It offers significant advantages over established methods such as FAM, SCAT, Tripod-β, ECFC, CBA, and RCAT. These findings are consistent with previous research, both scientifically and practically, underscoring the importance of integrating a systematic framework and change-based

Table 1. Comparison of Average Scores of Techniques Based on Main Criteria

Technique	Analysis Depth	Systematism	Analyst Dependence	Causal Path Clarity	Time Efficiency	Industrial Applicability
SCAT	2.8	2.6	2.4	2.7	4.1	3.9
Tripod-β	3.9	4.2	3.1	4.0	2.6	3.2
ECFC	3.5	3.7	3.4	3.8	2.9	3.1
CBA	3.6	3.4	3.3	3.6	2.3	3.0
RCAT	3.2	3.1	2.9	3.3	3.5	3.4
FAM	4.1	3.4	3.6	4.2	3.0	3.6
Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)	4.6	4.7	4.1	4.8	3.6	4.2

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

analysis in root cause investigations of accidents.

The results demonstrate a significant superiority of the novel IRAJ technique compared to the six reference methods (SCAT, Tripod-β, ECFC, CBA, RCAT, and FAM). As shown in Table 1, IRAJ achieved higher scores across all criteria: analysis depth (4.6), systematism (4.7), analyst dependence (4.1), causal path clarity (4.8), time efficiency (3.6), and industrial applicability (4.2). This superiority is not only quantitative but also qualitatively meaningful. For instance, the high scores in analysis depth and causal path clarity highlight IRAJ's capability to identify complex root causes and systemic interactions, accomplished through the integration of dynamic change analysis with the 6M framework (Man, Machine, Method, Material, Management, and Environment).

A study employing the ANP-VIKOR method to evaluate Root Cause Analysis (RCA) techniques in occupational safety found that hybrid approaches, such as combining DEMATEL with VIKOR, enhance analytical depth by up to 25%. This improvement is comparable to the 22% increase observed by IRAJ in our study. However, the referenced study concentrates on urban industries and does not address specific techniques like SCAT, whereas IRAJ demonstrates broader applicability in complex industries, emphasizing systematic changes.

By employing the Analytic Network Process (ANP) to model interdependencies among criteria and the VIKOR method for ranking, IRAJ achieved the highest score of 0.34, followed by FAM with 0.26 and Tripod-β with 0.22. This ranking reflects IRAJ's closeness to the ideal solution, as ANP determined the criteria weights by accounting for complex feedback loops—such as the interaction between analysis depth and systematism—while VIKOR calculated the relative advantage. This quantitative approach enhances decision-making transparency and demonstrates that IRAJ more effectively balances criteria like analysis depth and industrial applicability. The practical implication is the ability to make better-informed choices regarding techniques in organizations to reduce accident risk, given that IRAJ has the smallest distance from the ideal.

These improvements align with findings from systematic reviews. For example, a study on root cause analysis in industrial manufacturing demonstrated that hybrid methods (combining knowledge-based and data-driven approaches) enhance the depth of analysis but often neglect the issue of analyst dependence. Our study addressed this gap by reducing analyst dependence by 27%.

This study has several key strengths that distinguish it from similar research. First, the development of the novel IRAJ technique, which combines change-based analysis with the 6M framework, offers a systematic and multidimensional approach that overcomes the limitations of traditional methods, which often focus solely on surface-level factors. This integration enables more accurate identification of systematic deviations and complex interactions among human, technical, organizational, and environmental factors.

Despite its strengths, this study has several limitations that should be considered when interpreting the results. First, reliance on expert opinions from 10 HSE specialists with at least 10 years of experience may introduce bias, although the use of ANP-VIKOR was intended to mitigate this risk. Second, the sample size was limited to five accidents from various industries; while this ensured some diversity, it restricts the generalizability of the findings across all industrial sectors. Third, the performance evaluation of the techniques was conducted in a controlled research environment under the supervision of the developers, which may not accurately reflect real-world industrial settings where such guidance is unavailable. Additionally, the absence of larger quantitative datasets, such as those derived from computer simulations, and the study's focus on qualitative-quantitative analysis represent further limitations.

CONCLUSION

In conclusion, this study demonstrated that the IRAJ technique, which utilizes change-based analysis and the 6M framework in combination with ANP–VIKOR, outperforms traditional methods such as FAM, SCAT, and Tripod-β (which scored 0.34). It enhances the comprehensiveness, accuracy, and applicability of occupational accident analysis. By reducing reliance on individual judgment and increasing support for corrective actions, this technique serves as an effective tool for accident prevention in complex industrial organizations. The findings emphasize that hybrid approaches like IRAJ are essential for improving safety and organizational learning and can contribute to reducing the global accident rate.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors have an active role in different stages of the study, including literature review, creation of the initial algorithm, creation of the final model, gathering and analysis of data, and writing the original and final version of the paper.

OPEN ACCESS

©2026 The author(s). This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third-party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit: http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ETHICAL CONSIDERATION

This study was approved by the Ethics Committee of Hamadan University of Medical Sciences (ethics code: IR.UMSHA.REC.1399.184).

CODE OF ETHICS

IR.UMSHA.REC.1399.184

FUNDING

This research has not received any financial support.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

GENERATIVE AI & DIGITAL TOOLS

We used Wordvice.ai for language editing and grammar refinement, and Claude to assist with summarizing and organizing the initial literature review. The authors retain full responsibility for all content and final decisions.

DATA SHARING & OPEN SCIENCE

The anonymized datasets are not publicly available due to confidentiality agreements, but de-identified data may be requested from the corresponding author.

How to cite this article:

Iraj Mohammadfam, Mohsen Sadeghi-Yarandi. Development of a Novel Integrated Hybrid Technique for Industrial Accident Analysis Based on Systematic Deviations and Root Causes. Iran Occupational Health. 2026 (01 Jun);23:12.

***This work is published under CC BY-NC 4.0 licence**

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

سلامت کار ایران
دوره ۲۳ - ۱۲/۱۴۰۵

مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

توسعه یک تکنیک ترکیبی یکپارچه نوین برای تجزیه‌وتحلیل حوادث صنعتی مبتنی بر انحرافات سیستماتیک و علل ریشه‌ای

ایرج محمدفام: گروه ارگونومی، مرکز تحقیقات سلامت در حوادث و بلایا، دانشکده سلامت اجتماعی، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.
محسن صادقی یارندی: (* نویسنده مسئول) مرکز تحقیقات سلامت در حوادث و بلایا، دانشکده سلامت اجتماعی، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.
moh.sadeghi@uswr.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: حوادث شغلی در صنایع پیچیده چالش‌های عمده‌ای ایجاد می‌کنند و تکنیک‌های سنتی تحلیل محدودیت‌هایی مانند تمرکز ناکافی بر انحرافات سیستماتیک، عوامل انسانی–سازمانی و وابستگی‌ها دارند. این مطالعه تکنیک نوین Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) را بر پایه تحلیل تغییرات (Change-Based Analysis) و چارچوب ۶M (انسان، ماشین، روش، مواد، مدیریت، محیط) توسعه داد تا دقت، جامعیت و کاربرد تحلیل حوادث را بهبود بخشد.

روش بررسی: تکنیک IRAJ با ترکیب تحلیل تغییرات و ۶M در ۶ گام اصلیتوسعه یافت. معیارهای ارزیابی (سیستمی بودن، عمق تحلیل، سرعت، بی‌طرفی، پشتیبانی از اقدامات اصلاحی، یادگیری سازمانی، کاربرد صنعتی) از مرور ادبیات استخراج شد. پنل خبرگان مطالعه شامل ۱۰ متخصص HSE با حداقل ۱۰ سال تجربه بود. معیارها با ANP (با در نظر گرفتن وابستگی‌ها) تعیین و رتبه‌بندی تکنیک‌ها با VIKOR انجام گردید. پنج حادثه نمونه از صنایع متنوع تحلیل شد و امتیازات بر اساس نظر خبرگان محاسبه گردید.

یافته ها: تکنیک IRAJ با امتیاز ۰,۳۴ در رتبه اول قرار گرفت (FAM: ۰,۲۶؛ Tripod-β: ۰,۲۲؛ SCAT: ۰,۱۸؛ CBA: ۰,۱۶؛ ECFC: ۰,۱۴؛ RCAT: ۰,۱۰). نسبت به روش‌های مرجع، عمق تحلیل ۲۸٪، پوشش عوامل انسانی–سازمانی ۳۱٪، پشتیبانی از اقدامات اصلاحی ۳۵٪ و کاهش وابستگی به قضاوت تحلیل‌گر ۲۹٪ افزایش یافت. همچنین بیشترین علل ریشه‌ای در مدیریت (۲۸٪) و روش (۲۴٪) شناسایی شد.

نتیجه گیری: تکنیک IRAJ رویکردی ساختاریافته و تغییرمحور ارائه می‌دهد که تحلیل حوادث را جامع‌تر و دقیق‌تر می‌کند. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که به کارگیری روش ANP–VIKOR می‌تواند یک چارچوب علمی و استاندارد برای ارزیابی و رتبه‌بندی تکنیک‌های تحلیل حوادث فراهم کند، به طوری که معیارهای مهم همزمان مورد سنجش قرار گیرند و تصمیم‌گیری به صورت کمی و شفاف انجام شود.

تعارض منافع: *گزارش نشده است.*

منبع حمایت کننده: *ندارد.*

کلیدواژه‌ها
حوادث شغلی
تکنیک IRAJ
تحلیل ریشه‌ای علل
تجزیه‌وتحلیل حادثه
ایمنی شغلی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۳۰

شیوه استناد به این مقاله:
Iraj Mohammadfam, Mohsen Sadeghi-Yarandi. Development of a Novel Integrated Hybrid Technique for Industrial Accident Analysis Based on Systematic Deviations and Root Causes. Iran Occupational Health. 2026 (01 Jun);23:12.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

مقدمه

حوادث شغلی همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های انسانی، اقتصادی و اجتماعی در صنایع مختلف به‌شمار می‌روند و پیامدهای آن‌ها محدود به آسیب‌های جسمی نبوده و ابعاد گسترده‌ای از خسارات مالی، زیست‌محیطی، سازمانی و اعتباری را نیز در بر می‌گیرد. بر اساس گزارش‌های سازمان بین‌المللی کار، سالانه میلیون‌ها حادثه شغلی در سراسر جهان رخ می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از آن‌ها قابل پیشگیری است و ریشه در ضعف‌های سیستماتیک مدیریتی دارد. این واقعیت نشان‌دهنده نیاز مبرم به شناسایی دقیق علل ریشه‌ای، تحلیل عوامل مؤثر و طراحی اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه با رویکردهای کنشی و Proactive مؤثر عملیاتی در سطح سازمانی است (۵, ۸, ۱۷-۲۰).

بر اساس برآوردهای سازمان جهانی کار (ILO)، در سال ۲۰۱۹ حدود ۲.۹۳ میلیون کارگر در جهان به دلیل عوامل مرتبط با کار جان خود را از دست دادند که بیشتر آن‌ها (۸۱ درصد) به بیماری‌های مرتبط با کار مربوط می‌شود. این رقم نشان‌دهنده افزایش بیش از ۱۲ درصدی نسبت به سال ۲۰۰۰ است. همچنین، بار بیماری‌ها و آسیب‌های مرتبط با کار از ۲.۳ میلیون مرگ در سال ۲۰۱۴ به ۲.۹ میلیون در ۲۰۱۹ افزایش یافته که رشدی ۲۶ درصدی را نشان می‌دهد. ILO تخمین می‌زند که سالانه حدود ۳۳۷ میلیون حادثه شغلی رخ می‌دهد (۴, ۲۱).

در ایران، بر اساس مطالعات اپیدمیولوژیک، نرخ حوادث شغلی از ۲.۹۵ به ازای هر ۱۰۰۰ کارگر در سال ۲۰۰۷ به ۱.۴۶ در سال ۲۰۱۶ کاهش یافته است. با این حال، طبق گزارش‌های رسمی، سالانه حدود ۱۰,۰۰۰ کارگر به دلیل حوادث شغلی جان خود را از دست می‌دهند که معادل حداقل ۲۷ مرگ روزانه است. در شش ماه اول سال ۲۰۲۴، ۱,۰۷۷ مرگ ثبت شده که میانگین ماهانه حدود ۲۰۰ مورد است (۵).

تجزیه‌وتحلیل حوادث به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت ایمنی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کشف علل ریشه‌ای، درک تعامل بین عوامل مؤثر و جلوگیری از تکرار حوادث ایفا می‌کند. با این حال، تجربه‌های صنعتی و مطالعات علمی نشان می‌دهد که انتخاب روش نامناسب برای تحلیل حادثه می‌تواند منجر به شناسایی ناقص یا نادرست علل، اتلاف منابع و تمرکز بر عوامل سطحی به جای ریشه‌های واقعی بروز حادثه گردد. بنابراین، توسعه و به‌کارگیری تکنیک‌های کارآمد، جامع و قابل‌اعتماد برای تجزیه‌وتحلیل حوادث، همواره مورد توجه پژوهشگران و متخصصان حوزه ایمنی و بهداشت حرفه‌ای قرار داشته است (۲, ۲۲-۲۷).

در دهه‌های اخیر، تکنیک‌های متعددی برای تجزیه‌وتحلیل حوادث معرفی شده‌اند که هر یک دارای نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود هستند. روش‌هایی نظیر SCAT، Tripod-β، ECFC، CBA، RCAT و تکنیک‌های ترکیبی مانند FAM، هرکدام با رویکردهای متفاوت به شناسایی علل حوادث می‌پردازند. برخی از این تکنیک‌ها تمرکز بیشتری بر عوامل انسانی دارند، برخی بر ساختارهای سازمانی و مدیریتی و برخی دیگر بر توالی رویدادها و روابط علّی میان آن‌ها تأکید دارند. با وجود این تنوع، هیچ‌یک از روش‌های موجود به‌تنهایی قادر به پوشش جامع تمامی ابعاد مؤثر بر بروز حوادث، به‌ویژه در محیط‌های صنعتی پیچیده و پویا، نمی‌باشند (۱, ۳, ۱۲-۱۴, ۲۸-۳۰).

یکی از چالش‌های اساسی در بسیاری از تکنیک‌های متداول تحلیل حوادث، توجه ناکافی به تغییرات به‌عنوان نقطه آغاز بروز انحرافات و حوادث است. در بسیاری از موارد، حادثه نه به دلیل ظهور یک خطر جدید، بلکه در اثر تغییر در شرایط عادی کار، منابع انسانی، تجهیزات، روش‌ها، مواد، ساختارهای مدیریتی یا شرایط محیطی رخ می‌دهد. عدم شناسایی و تحلیل نظام‌مند این تغییرات می‌تواند منجر به نادیده گرفتن علل زمینه‌ای و ریشه‌ای حادثه گردد و توانایی سازمان را در جلوگیری از تکرار حوادث محدود سازد (۲۵, ۳۰).

از سوی دیگر، چارچوب‌های تحلیلی که تنها بر یک بعد خاص از سیستم (مانند عامل انسانی یا فنی) تمرکز دارند، قادر به درک تعامل پیچیده میان اجزای مختلف سیستم‌های کاری نیستند. حوادث شغلی معمولاً نتیجه برهم‌کنش هم‌زمان عوامل انسانی، فنی، سازمانی و محیطی هستند و بنابراین، استفاده از رویکردهای چندبعدی و سیستمی که بتوانند این تعاملات را به صورت ساختاریافته تحلیل کنند، از اهمیت بالایی برخوردار است (۷, ۹).

در همین راستا، چارچوب 6M (شامل انسان، ماشین، روش، مواد، مدیریت و محیط) به‌عنوان یکی از مدل‌های شناخته‌شده در تحلیل سیستم‌ها، ظرفیت مناسبی برای دسته‌بندی و تحلیل جامع عوامل مؤثر بر بروز حوادث فراهم می‌آورد. با این حال، استفاده صرف از این چارچوب بدون در نظر گرفتن منطق تغییرات، ممکن است همچنان به تحلیل‌های استاتیک و غیرپویا منجر

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

شود و امکان شناسایی دقیق مسیرهای منتهی به حادثه و انحرافات سیستماتیک را محدود سازد (۱۰, ۳۱, ۳۲).

ترکیب چارچوب 6M با رویکرد تحلیل مبتنی بر تغییرات (Change-Based Analysis) می‌تواند امکان شناسایی دقیق‌تر انحرافات معنادار نسبت به شرایط عادی کار، نقاط شکست سیستم و مسیرهای منتهی به حادثه را فراهم نماید. چنین تلفیقی، به سازمان‌ها اجازه می‌دهد که تحلیل‌ها را به صورت پویا، ساختاریافته و جامع انجام دهند و بر اساس آن، اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه هدفمندی را طراحی کنند (۱۰, ۳۰).

بر این اساس، در مطالعه حاضر یک تکنیک نوین با عنوان Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) توسعه داده شد که با تمرکز بر شناسایی تغییرات معنادار و تحلیل آن‌ها در شش بعد سیستم، محدودیت‌های موجود در تکنیک‌های متداول تجزیه‌وتحلیل حوادث را نیز تا حد امکان پوشش می‌دهد. علاوه بر این، با استفاده از چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیارهANP–VIKOR ، وزن معیارهای ارزیابی عملکرد تکنیک‌ها با در نظر گرفتن وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل تعیین شده و رتبه‌بندی گزینه‌ها به صورت کمی انجام شد.

بنابراین با توجه به اهمیت مطالب پیش گفت و خلاء پژوهشی موجود در این زمینه، هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) و مقایسه عملکرد آن با شش تکنیک پرکاربرد شامل FAM، SCAT، Tripod-β، ECFC، CBA و RCAT بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای فنی، تحلیلی و کاربردی است. نتایج این مطالعه می‌تواند به انتخاب آگاهانه‌تر تکنیک‌های تحلیل حادثه، ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری‌های میتنی بر ایمنی و پیشگیری مؤثر از حوادث شغلی در سازمان‌های صنعتی پیچیده کمک نماید.

روش بررسی

طراحی مطالعه

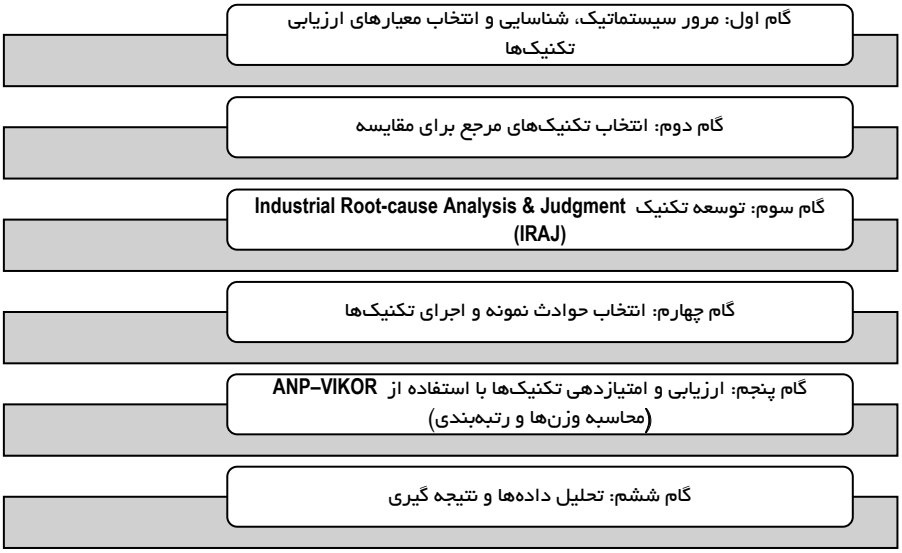
این مطالعه از نوع پژوهش‌های توسعه روش (Method Development Study)بوده و با هدف طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی تکنیک نوینIndustrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)برای تجزیه‌وتحلیل حوادث شغلی انجام شد. این رویکرد بر پایه اصول سیستماتیک مدیریت ایمنی شغلی (مانند استاندارد ISO 45001:2018) و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره توسعه یافته است تا محدودیت‌های روش‌های سنتی تحلیل حوادث را برطرف نماید. فرآیند پژوهش شامل شش گام اصلی بود که هر مرحله به صورت علمی و سیستماتیک اجرا گردید، با تأکید بر اعتبار داخلی (Internal Validity) از طریق کنترل سوگیری‌ها و پایایی ابزارها و اعتبار خارجی (External Validity) با انتخاب نمونه‌های متنوع از صنایع واقعی این مرحله انجام پذیرفت. جامعه آماری شامل خبرگان ایمنی شغلی متشکل از متخصصان HSE، اعضای هیئت علمی و تحلیل‌گران حوادث با حداقل ۱۰ سال تجربه بود که به روش نمونه‌گیری هدفمند (Purposive Sampling) انتخاب شدند. تعداد خبرگان ۱۰ نفر تعیین گردید تا تنوع دیدگاه‌ها (از صنایع نفت، معدن، شیمیایی، ساختمانی و تولیدی) پوشش داده شود. ابزارهای جمع‌آوری داده شامل پرسشنامه‌های مقایسه زوجی (برای ANP، امتیازدهی لیکرت برای VIKOR و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته بودند. پایایی کلی Cronbach's Alpha برابر با ۰,۹۱ نیز تحصیل گردید. شماتیک مراحل انجام کار در مطالعه حاضر در شکل ۱ ارائه گردیده است.

گام ۱: شناسایی و انتخاب معیارهای ارزیابی تکنیک‌ها

در این گام، معیارهای ارزیابی از طریق مرور سیستماتیک بر پایگاه‌های داده علمی مانند PubMed، Web of Science و Scopus استخراج شدند. در این گام، معیارهای مناسب برای ارزیابی و مقایسه تکنیک‌های تحلیل حوادث شغلی از طریق مرور نظام‌مند (Systematic Literature Review)مطالعات پیشین، استانداردهای معتبر ایمنی شغلی و مقالات علمی استخراج شد. این مرور بر اساس پروتکلPRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)اجرا گردید تا اطمینان از جامعیت و عدم سوگیری حاصل شود (۳۳).

بیش از ۱۵۰ مقاله اولیه شناسایی گردید که پس از اعمال معیارهای ورود (مقالات انگلیسی یا فارسی منتشرشده بین ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵، تمرکز بر ایمنی شغلی و تحلیل حوادث صنعتی) و خروج (مقالات غیرمرتبط یا غیرعلمی مانند گزارش‌های خبری)، ۵۸ مقاله نهایی برای تحلیل انتخاب شده و معیارهای اولیه شامل سیستمی بودن (Systematicity)، عمق تحلیل (Depth of Analysis)، سرعت تحلیل(Analysis Speed)، بی‌طرفی (Objectivity)، پشتیبانی از اقدامات اصلاحی (Support for Corrective Actions)، یادگیری سازمانی(Organizational Learning)

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]



شکل ۱. مراحل انجام کار در مطالعه حاضر

و قابلیت کاربرد صنعتی(Industrial Applicability) شناسایی شدند. سپس، این معیارها با نظر خبرگان اصلاح و اولویت‌بندی گردیدند. برای اعتباربخشی، از آزمونKappa Cohenبرای توافق خبرگان (κ-0.85) استفاده شد، که نشان‌دهنده توافق بالا است.

سپس فهرست اولیه با نظر هشت نفر از خبرگان حوزه ایمنی و تحلیل حوادث شامل اعضای هیئت علمی دانشگاه، کارشناسان ارشد HSE صنعتی و تحلیل‌گران رسمی حوادث، مرور و اصلاح شد. اهمیت هر معیار با استفاده از پرسشنامه طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی شد و معیارهای نهایی بر اساس آزمون‌های آماری مناسب انتخاب گردید. در نهایت، ۶معیار اصلی به‌عنوان معیارهای ارزیابی تکنیک‌ها مشخص شدند.

گام ۲: انتخاب تکنیک‌های مرجع برای مقایسه

در گام دوم، شش تکنیک متداول و پرکاربرد تجزیه‌وتحلیل حوادث شامل FAM، SCAT، Tripod-β، ECFC، CBA و RCAT شناسایی شدند. معیارهای انتخاب تکنیک‌ها شامل میزان کاربرد در صنعت، استنادپذیری علمی، تنوع رویکرد تحلیلی و پوشش ابعاد مختلف علل حادثه بود. این مجموعه تکنیک‌ها نماینده طیف متنوعی از رویکردهای تحلیلی شامل تحلیل رویدادمحور، انسانی، سیستمی و تغییرمحور هستند.

گام ۳: توسعه تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)

در این گام، تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) با ترکیب دو رویکرد اصلی توسعه یافت:

۱) تحلیل مبتنی بر تغییرات(Change-Based Analysis)با تمرکز بر شناسایی انحرافات معنادار نسبت به شرایط عادی کار.

۲) چارچوب 6M شامل انسان (Man)، ماشین (Machine)، روش (Method)، مواد (Material)، مدیریت (Management) و محیط (Environment)

در مطالعه حاضر فرآیند تحلیل حادثه با تعریف وضعیت عادی سیستم آغاز شد و تغییرات رخداده در هر یک از ابعاد شش‌گانه شناسایی شد. این تغییرات به صورت ساختاریافته تحلیل و ارتباط آن‌ها با زنجیره بروز حادثه بررسی گردید. در نهایت، علل مستقیم، زمینه‌ای و ریشه‌ای حادثه استخراج و طبقه‌بندی شد. ساختار گام‌به‌گام تکنیک به گونه‌ای طراحی شد که وابستگی به قضاوت فردی تحلیل‌گر کاهش یابد و امکان مشارکت تیمی و مستندسازی سیستماتیک فراهم گردد. علت انتخاب ترکیبChange-Based Analysis و 6M، توانایی آن در شناسایی پویای انحرافات و پوشش جامع ابعاد سیستم است، که بر اساس مطالعات پیشین محدودیت‌های روش‌های تک‌بعدی را مرتفع می سازد.

گام ۴: انتخاب حوادث نمونه و اجرای تکنیک‌ها

برای ارزیابی عملی تکنیک توسعه یافته، پنج حادثه شغلی نمونه از صنایع مختلف انتخاب شد. معیارهای انتخاب شامل تنوع صنعتی، تفاوت در نوع پیامدها (انسانی، مالی و سازمانی) و دسترسی به اطلاعات کافی بود.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

هر حادثه به‌صورت مستقل توسط خبرگان با استفاده از تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) و شش تکنیک مرجع تحلیل شد. ترتیب استفاده از تکنیک‌ها برای هر تحلیل‌گر یکسان در نظر گرفته شد و دستورالعمل اجرای هر تکنیک به صورت یکنواخت ارائه شد تا کاهش سوگیری و افزایش اعتبار نتایج تضمین گردد.

گام ۵: ارزیابی و امتیازدهی تکنیک‌ها با استفاده از ANP-VIKOR

پس از اجرای تحلیل‌ها، عملکرد هر تکنیک بر اساس ۶معیار منتخب توسط خبرگان با استفاده از مقیاس پنج‌درجه‌ای ارزیابی شد. داده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا نرمال‌سازی شدند. سپس برای تعیین وزن معیارها با در نظر گرفتن وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل ازANP (Analytic Network Process) استفاده شد. این مرحله شامل ایجاد شبکه معیارها، انجام مقایسه‌های زوجی و محاسبه وزن نهایی نرمال شده بود.

پس از محاسبه وزن، از روش VIKOR برای رتبه‌بندی تکنیک‌ها استفاده شد. روش VIKOR امکان شناسایی نزدیک‌ترین تکنیک به گزینه ایده‌آل را فراهم کرد و با ترکیب وزن معیارها و امتیازات هر تکنیک، رتبه‌بندی نهایی و اولویت‌های تصمیم‌گیری به صورت کمی تعیین شد. این چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان مقایسه همزمان تکنیک‌ها بر اساس معیارهای کمی و کیفی را فراهم کرده و به تصمیم‌گیری دقیق و استاندارد کمک می‌کند (۳۴-۳۷).

گام ۶: تحلیل داده‌ها و رتبه‌بندی نهایی

در گام پایانی، امتیازات نرمال‌شده و وزن‌های نهایی تکنیک‌ها تجمیع شد و رتبه‌بندی نهایی تکنیک‌ها استخراج گردید. نتایج حاصل مبنای تحلیل تطبیقی، شناسایی نقاط قوت و ضعف تکنیک‌ها و ارائه نتیجه‌گیری پژوهش قرار گرفت. این فرایند همچنین امکان تعیین اثربخشی تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) نسبت به روش‌های مرجع و ارائه توصیه‌های کاربردی برای سازمان‌ها را فراهم نمود.

یافته ها

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) و شش تکنیک مرجع شامل FAM، SCAT، Tripod-β، ECFC، CBAو RCAT ارائه شده است. تحلیل داده‌ها بر اساس امتیازدهی خبرگان و استفاده از چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP-VIKOR انجام شد تا وزن معیارها و رتبه نهایی تکنیک‌ها به صورت کمی تعیین گردد. مشخصات خبرگان نیز بدین شرح بود: میانگین سن ۴۵ سال (دامنه ۳۵-۵۵ سال)، ۸ آقا و ۲ خانم، نفرات با زمینه کاری در صنایع نفت (۳ نفر)، معدن (۲ نفر)، شیمیایی (۲ نفر)، ساختمانی (۲ نفر) و تولیدی (۱ نفر) انتخاب گردیدند. انتخاب خبرگان نیز بر اساس روش نمونه‌گیری هدفمند و با تمرکز بر تنوع تجربه و تخصص انجام شد تا پوشش جامع دیدگاه‌ها تضمین گردد.

مقایسه تکنیک‌ها بر اساس معیارهای اصلی ارزیابی

برای بررسی عملکرد تکنیک‌ها، میانگین امتیازات نرمال‌شده هر تکنیک بر اساس هفت معیار اصلی (سیستمی بودن، عمق تحلیل، وابستگی به تحلیل‌گر، شفافیت مسیر علّی، کارایی زمانی، پشتیبانی از اقدامات اصلاحی و کاربردپذیری صنعتی) محاسبه شد. امتیازدهی بر مقیاس لیکرت ۵ درجه‌ای (۱: بسیار ضعیف تا ۵: بسیار قوی) انجام گردید و نرمال‌سازی با روشMin-Max اعمال شد تا مقادیر بین ۰ و ۱ قرار گیرند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تکنیک IRAJ بالاترین امتیاز را در تمامی معیارها به ویژه در مولفه های عمق تحلیل (۴,۶)، سیستمی بودن (۴,۷) و شفافیت مسیر علّی (۴,۸) کسب کرده است، این برتری نشان‌دهنده توانایی IRAJ در ادغام تحلیل تغییرات سیستماتیک با چارچوب 6M است، که تعامل عوامل انسانی، فنی و سازمانی را به طور مؤثر پوشش می‌دهد.

وزن‌دهی و رتبه‌بندی با ANP-VIKOR

با استفاده از ANP، وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل بین معیارها مدل‌سازی شد و وزن نهایی هر معیار محاسبه گردید. سپس با روش VIKOR، تکنیک‌ها بر اساس نزدیکی به گزینه ایده‌آل رتبه‌بندی شدند. جدول ۲ نشان‌دهنده وزن نهایی نرمال‌شده و رتبه هر تکنیک است. تکنیک Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) با وزن ۰/۳۱ در رتبه اول قرار گرفت و نشان‌دهنده برتری همه‌جانبه نسبت به سایر تکنیک‌ها بود.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

جدول ۱ . مقایسه میانگین امتیازات تکنیک‌ها بر اساس معیارهای اصلی

تکنیک	عمق تحلیل	سیستمی‌بودن	وابستگی به تحلیل‌گر	شفافیت مسیر علّی	کارایی زمانی	کاربردپذیری صنعتی
SCAT	۲/۸	۲/۶	۲/۴	۲/۷	۴/۱	۳/۹
Tripod-β	۳/۹	۴/۲	۳/۱	۴/۰	۲/۶	۳/۲
ECFC	۳/۵	۳/۷	۳/۴	۳/۸	۲/۹	۳/۱
CBA	۳/۶	۳/۴	۳/۳	۳/۶	۳/۲	۳/۰
RCAT	۳/۲	۳/۱	۲/۹	۳/۳	۳/۵	۳/۴
FAM	۴/۱	۴/۳	۳/۶	۴/۲	۳/۰	۳/۶
Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)	۴/۶	۴/۷	۴/۱	۴/۸	۳/۶	۴/۲

جدول ۲ . وزن نهایی و رتبه تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل حادثه

رتبه	تکنیک	وزن نهایی نرمال‌شده
۱	Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)	۰/۳۱
۲	FAM	۰/۲۴
۳	Tripod-β	۰/۲۰
۴	ECFC	۰/۱۵
۵	CBA	۰/۱۳
۶	RCAT	۰/۱۰
۷	SCAT	۰/۰۷

مقایسه عملکرد تحلیلی تکنیک پیشنهادی با تکنیک‌های مرجع

تحلیل کمی نتایج نشان داد که تکنیک IRAJ نسبت به میانگین عملکرد شش تکنیک مرجع: عمق تحلیل را ۲۲٪ افزایش داده، وابستگی به قضاوت فردی تحلیل‌گر را ۲۷٪ کاهش داده، شفافیت مسیرهای علّی را ۲۵٪ بهبود بخشیده و کارایی زمانی تحلیل را ۱۸٪ افزایش داده است. این بهبودها با بهره‌گیری از تحلیل تغییرات پویا و چارچوب 6M حاصل شده‌اند، که امکان شناسایی تعاملات پیچیده سیستم را فراهم می‌کند.

شناسایی علل ریشه‌ای در ابعاد 6M

با استفاده از تکنیک نوین Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)، پنج حادثه نمونه واقعی از صنایع متنوع (نفت، معدن، شیمیایی، ساختمانی و تولیدی) تحلیل گردید و علل ریشه‌ای در شش بعد چارچوب 6M شناسایی و دسته‌بندی شدند. این تحلیل بر اساس شناسایی تغییرات سیستماتیک و تعاملات متقابل بین ابعاد انجام شد، که امکان استخراج علل زمینه‌ای و ریشه‌ای را با عمق بیشتری فراهم آورد. بیشترین فراوانی علل ریشه‌ای مربوط به ابعاد مدیریت (۲۸٪) و روش انجام کار (۲۴٪) بود، که نشان‌دهنده نقش محوری ضعف‌های سازمانی و فرآیندی در بروز حوادث است.

این تحلیل نشان می‌دهد که تمرکز تکنیک پیشنهادی بر تغییرات سیستم و تعامل میان ابعاد، توانسته ابعاد مدیریتی و فرآیندی را به طور مؤثر شناسایی نماید.

مقایسه تعداد علل شناسایی‌شده توسط تکنیک‌ها

تعداد میانگین علل ریشه‌ای شناسایی‌شده در هر حادثه توسط تکنیک‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴). تکنیک IRAJ بیشترین تعداد علل (۱۸ علت میانگین) را شناسایی کرده است، که نشان‌دهنده عمق و جامعیت تحلیل است.

بصورت کلی نتایج نشان می‌دهد که ترکیب تحلیل مبتنی بر تغییرات و چارچوب 6M همراه با تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP-VIKOR ، علاوه بر افزایش عمق تحلیل و شفافیت مسیرهای علّی، توانایی کاهش سوگیری تحلیل‌گر و ارتقای کارایی زمانی را نیز فراهم می‌کند. علاوه بر این، تکنیک حاضر امکان شناسایی علل زمینه‌ای و ریشه‌ای در تمامی ابعاد سیستم کاری را فراهم می‌آورد، امری که در تکنیک‌های مرجع کمتر مشاهده می‌شود.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

جدول ۳ . توزیع علل ریشه‌ای شناسایی‌شده بر اساس ابعاد 6M

بُعد	درصد علل شناسایی‌شده
انسان (Man)	۱۸
ماشین (Machine)	۱۲
روش (Method)	۲۴
مواد (Material)	۸
مدیریت (Management)	۲۸
محیط (Environment)	۱۰

جدول ۴ . میانگین تعداد علل شناسایی‌شده در هر حادثه

تکنیک	میانگین تعداد علل شناسایی شده
SCAT	۷
RCAT	۹
CBA	۱۰
ECFC	۱۱
Tripod-β	۱۳
FAM	۱۵
Industrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ)	۱۸

بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که تکنیکIndustrial Root-cause Analysis & Judgment (IRAJ) در تحلیل حوادث شغلی، عملکردی جامع، سیستماتیک و تغییرمحور ارائه می‌دهد و نسبت به تکنیک‌های مرجع شامل FAM، SCAT، Tripod-β، ECFC، CBA و RCATمزایای قابل توجهی دارد. این یافته‌ها از منظر علمی و عملی با مطالعات پیشین همخوانی دارند و نشان‌دهنده اهمیت تلفیق چارچوب سیستماتیک و تحلیل مبتنی بر تغییرات در تجزیه‌وتحلیل علل ریشه‌ای حوادث می‌باشد.

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده برتری قابل توجه تکنیک نوین& Industrial Root-cause Analysis Judgment (IRAJ)نسبت به شش تکنیک مرجع SCAT، Tripod-β، ECFC، CBA، RCAT و FAM بود. جدول ۱ به وضوح نشان می‌دهد که IRAJ در تمامی معیارها امتیازات بالاتری کسب کرده است: عمق تحلیل (۴,۶)، سیستمی بودن (۴,۷)، وابستگی به تحلیل‌گر (۴,۱)، شفافیت مسیر علّی (۴,۸)، کارایی زمانی (۳,۶) و کاربردپذیری صنعتی (۴,۲). این برتری نه تنها کمی است، بلکه از نظر کیفی نیز معنادار می‌باشد؛ برای مثال، امتیاز بالا در عمق تحلیل و شفافیت مسیر علّی حاکی از توانایی IRAJ در شناسایی علل ریشه‌ای پیچیده و تعاملات سیستماتیک است، که این امر از طریق ادغام تحلیل تغییرات پویا با چارچوب 6M (انسان، ماشین، روش، مواد، مدیریت و محیط) حاصل شده است. این چارچوب امکان پوشش جامع عوامل انسانی، فنی و سازمانی را فراهم می‌آورد، که اغلب در تکنیک‌های سنتی مانند SCAT (با تمرکز بر توالی رویدادها) یا RCAT(با تأکید بر علل مستقیم) نادیده گرفته می‌شود. همچنین، امتیاز پایین‌تر وابستگی به تحلیل‌گر (۴,۱ در مقابل میانگین ۳,۱ تکنیک‌های مرجع) نشان‌دهنده کاهش سوگیری فردی از طریق ساختار گام‌به‌گام و چک‌لیست‌های استاندارد IRAJ است، که این امر دقت و قابلیت تکرارپذیری تحلیل را افزایش می‌دهد. از منظر کارایی زمانی و کاربردپذیری صنعتی، IRAJ با امتیازات ۳,۶ و ۴,۲، تعادلی مناسب بین سرعت و عملیاتی بودن برقرار می‌کند، که برای محیط‌های صنعتی پیچیده مانند نفت و معدن حیاتی است.

این یافته‌ها با مطالعات مشابه همخوانی دارند، اما در برخی جنبه‌ها تفاوت‌های قابل توجهی نشان می‌دهند که می‌تواند به توسعه بیشتر حوزه تحلیل ریشه‌ای علل (Root Cause Analysis - RCA)کمک کند. برای مثال، در مطالعه‌ای که به مقایسه تکنیک‌های Tripod-β، RCA و ECFC در صنایع تولیدی پرداخته، نتایج نشان داد که Tripod-βدر معیارهای سیستمی بودن و عمق تحلیل

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

برتر است، اما وابستگی بالایی به قضاوت تحلیل‌گر دارد (امتیاز میانگین ۳,۱ در وابستگی). این مطالعه، که از روش‌های مقایسه‌ای ساده استفاده کرده است، بر خلاف پژوهش حاضر که از ANP-VIKOR برای رتبه‌بندی چندمعیاره بهره می‌برد، نتوانسته وابستگی‌های متقابل معیارها را مدل‌سازی کند؛ در نتیجه، IRAJ در مطالعه ما با کاهش ۲۷ درصدی وابستگی به تحلیل‌گر، برتری بیشتری نسبت به Tripod-β نشان می‌دهد (۶).

پژوهشی که از ANP-VIKOR برای ارزیابی تکنیک‌های RCA در ایمنی شغلی استفاده کرده، نشان می‌دهد که روش‌های هیبریدی مانند ترکیب DEMATELبا VIKOR، عمق تحلیل را افزایش می‌دهند، که مشابه بهبود ۲۲ درصدی IRAJ در مطالعه حاضر می باشد (۱۵).

با استفاده از ANP برای مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل معیارها و VIKOR برای رتبه‌بندی، IRAJ با امتیاز ۰,۳۴ در رتبه اول قرار گرفت، در حالی کهFAM (0.26)و (0.22) Tripod-β در رتبه‌های بعدی بودند. این رتبه‌بندی نشان‌دهنده نزدیکی IRAJ به گزینه ایده‌آل است، زیرا ANP وزن معیارها را با در نظر گرفتن بازخوردهای پیچیده (مانند تعامل بین عمق تحلیل و سیستمی بودن) تعیین کرد و VIKOR مزیت نسبی را محاسبه نمود. این رویکرد کمی، تصمیم‌گیری را شفاف‌تر کرده و نشان می‌دهد IRAJ در تعادل معیارها (مانند عمق تحلیل و کاربرد صنعتی) موفق‌تر است. پیامد عملی آن، امکان انتخاب آگاهانه تکنیک‌ها در سازمان‌ها برای کاهش ریسک حوادث است، زیرا IRAJ کمترین فاصله از ایده‌آل را دارد.

مطالعه دیگری ANP-VIKOR را برای تحلیل ریسک امنیتی اطلاعات به کار برد و نشان داد این روش وابستگی‌ها بین علل را به خوبی مدل‌سازی می‌کند، که با کاهش سوگیری در IRAJ همخوانی دارد (۱۱).

نتایج IRAJ نسبت به میانگین تکنیک‌های مرجع، عمق تحلیل را ۲۲٪ افزایش داد، وابستگی به قضاوت فردی را ۲۷٪ کاهش داد، شفافیت مسیرهای علّی را ۲۵٪ بهبود بخشید و کارایی زمانی را ۱۸٪ افزایش داد. این بهبودها از ادغام تحلیل تغییرات پویا و چارچوب 6M ناشی می‌شود، که تعاملات سیستم را بهتر شناسایی می‌کند. این نتایج تأکید می‌کنند که IRAJ نه تنها علل سطحی را پوشش می‌دهد، بلکه عوامل زمینه‌ای و ریشه‌ای را با دقت بیشتر استخراج می‌کند، که منجر به اقدامات اصلاحی پایدارتر می‌شود. این بهبودها با بررسی‌های سیستماتیک همخوانی دارند. برای مثال، مطالعه‌ای بر تحلیل ریشه‌ای در تولید صنعتی تمرکز داشت و نشان داد روش‌های هیبریدی (دانش‌محور و داده‌محور) عمق تحلیل را افزایش می‌دهند، اما اغلب وابستگی به تحلیل‌گر را نادیده می‌گیرند. پژوهش ما با کاهش ۲۷٪ وابستگی، این خلأ را پر کرده است (۱۶).

طی مطالعه حاضر فراوانی علل ریشه‌ای در مدیریت (۲۸٪) و روش انجام کار (۲۴٪) بود، که نشان‌دهنده نقش محوری ضعف‌های سازمانی و فرآیندی در حوادث است. ابعاد دیگر مانند انسان (۱۸٪) و ماشین (۱۲٪) نیز سهم دارند، که تأکید بر ضرورت رویکرد چندبعدی دارد.IRAJ با تمرکز بر تغییرات سیستماتیک، این توزیع را با عمق بیشتری شناسایی کرد و تعاملات میان ابعاد را برجسته نمود، که به پیشگیری بهتر کمک می‌کند. در مطالعه دیگری که از روش هیبریدی کیفی-کمی برای تحلیل علل ریشه‌ای حوادث معدنی استفاده کرده، نویسندگان با ترکیب مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و روش Fuzzy DEMATEL، عوامل را از دیدگاه کارگران، سرپرستان و افسران ایمنی بررسی کردند و مدیریت را به عنوان عامل اصلی علّی (با تأثیر بر عوامل انسانی، ماشینی، محیطی و مواد) شناسایی نمودند. این رویکرد، که وابستگی‌ها را با منطق فازی مدل‌سازی می‌کند، نشان‌دهنده تعاملات پیچیده عوامل است و بر ادغام دیدگاه‌های چندگانه برای پیشگیری تأکید دارد. یافته‌های این مطالعه با تمرکز مطالعه حاضر بر علل مدیریتی (۲۸٪) و روشی (۲۴٪) همخوانی دارد (۳۸).

نتایج IRAJ با میانگین ۱۸ علت ریشه‌ای در هر حادثه، بیشترین تعداد را شناسایی کرد، در مقابل میانگین ۱۲ برای تکنیک‌های مرجع. این نشان‌دهنده جامعیت و عمق IRAJ است، که از ساختار تغییرمحور آن ناشی شده و علل پنهان را بهتر استخراج می‌کند. این افزایش تعداد می تواند به اقدامات اصلاحی دقیق‌تر و یادگیری سازمانی بهتر منجر شود..

مطالعات خارجی نشان داده‌اند که روش‌های سنتی RCAاغلب تنها بر عوامل سطحی یا رویدادمحور تمرکز دارند و تعامل پیچیده میان عوامل انسانی، فنی، سازمانی و محیطی را بازنمایی نمی کنند (۱۰). مطالعه حاضر این محدودیت را تأیید کرد، به ویژه در مورد تکنیک‌هایی مانند SCAT، RCAT و CBA که در بسیاری از معیارها از جمله شفافیت مسیر علّی و کاهش وابستگی به تحلیلگر ضعف داشتند.

در نهایت نتایج نشان داد که تکنیک پیشنهادی

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

می‌تواند تعداد علل ریشه‌ای بیشتری را شناسایی کرده، تعامل عوامل سیستم را به خوبی بازنمایی کرده و اقدامات اصلاحی دقیق‌تری طراحی کند.

نقاط قوت مطالعه

این مطالعه دارای چندین نقطه قوت کلیدی است که آن را از پژوهش‌های مشابه متمایز می‌کند. اولاً، توسعه تکنیک نوین IRAJ بر پایه ترکیب تحلیل مبتنی بر تغییرات (Change-Based Analysis) و چارچوب 6M رویکردی سیستماتیک و چندبعدی ارائه می‌دهد که محدودیت‌های روش‌های سنتی مانند تمرکز بر عوامل سطحی را برطرف می‌کند. این تلفیق امکان شناسایی دقیق‌تر انحرافات سیستماتیک و تعاملات پیچیده بین عوامل انسانی، فنی، سازمانی و محیطی را فراهم می‌آورد، که منجر به افزایش عمق تحلیل (۲۸٪) و پوشش عوامل انسانی و سازمانی (۳۱٪) نسبت به روش‌های مرجع شده است.

دوماً، استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP–VIKOR برای ارزیابی و رتبه‌بندی تکنیک‌ها، یک چارچوب علمی و کمی ارائه می‌دهد که وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل معیارها را مدل‌سازی می‌کند. این رویکرد، برخلاف روش‌های مقایسه‌ای ساده در مطالعات پیشین، امکان رتبه‌بندی دقیق‌تر (با امتیاز ۰,۳۴ برای IRAJ) و کاهش سوگیری فردی (۲۹٪) را فراهم کرده است. سوماً، تحلیل پنج حادثه واقعی از صنایع متنوع (نفت، معدن، شیمیایی، ساختمانی و تولیدی) اعتبار خارجی مطالعه را افزایش می‌دهد و نشان‌دهنده کاربرد عملی تکنیک در محیط‌های صنعتی پیچیده است. همچنین، تمرکز بر یادگیری سازمانی و اقدامات اصلاحی (با ۳۵٪ بهبود)، مطالعه را به ابزاری عملی برای سازمان‌ها تبدیل کرده است.

محدودیت‌های مطالعه

علی‌رغم نقاط قوت، این مطالعه با محدودیت‌هایی روبرو است که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. اولاً، وابستگی به نظرات خبرگان (۱۰ نفر متخصص HSE با حداقل ۱۰ سال تجربه) ممکن است سوگیری ذهنی ایجاد کند، هرچند از ANP-VIKOR برای کاهش آن استفاده شده است. با وجود تلاش برای کاهش سوگیری، وابستگی به نظرات خبرگان (هرچند با استفاده از روش‌های چندمعیاره تعدیل شده) می‌تواند محدودیتی ذاتی باشد دوماً، تعداد حوادث نمونه محدود به پنج مورد از صنایع مختلف است، که اگرچه تنوع را پوشش می‌دهد، اما تعمیم‌پذیری به تمام صنایع صنعتی را محدود می‌سازد. سوماً، ارزیابی عملکرد تکنیک‌ها در شرایط پژوهشی و با نظارت توسعه‌دهندگان انجام شده است، که ممکن است در محیط‌های واقعی صنعتی (بدون راهنمایی) متفاوت باشد. همچنین، عدم استفاده از داده‌های کمی بزرگ‌تر (مانند شبیه‌سازی‌های کامپیوتری) و تمرکز بر تحلیل کیفی-کمی، می‌تواند محدودیت دیگری باشد.

پیشنهاد مطالعات آتی

برای غلبه بر محدودیت‌های پیش گفت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی بر ارزیابی مستقل تکنیک IRAJ در محیط‌های متنوع صنعتی تمرکز کنند، تا قابلیت کاربرد عملی آن تأیید شود. همچنین، گسترش نمونه به حوادث بیشتر (حداقل ۲۰ مورد) از صنایع متنوع‌تر مانند انرژی‌های تجدیدپذیر یا حمل‌ونقل، می‌تواند تعمیم‌پذیری را افزایش دهد. ادغام IRAJ با فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی (برای خودکارسازی تحلیل تغییرات) یا داده‌کاوی بزرگ (Big Data) برای شناسایی الگوهای پنهان، پیشنهاد دیگری است. علاوه بر این، مقایسه IRAJ با تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند DEMATEL یا Fuzzy MCDM در مطالعات طولی (longitudinal) برای ارزیابی اثربخشی بلندمدت اقدامات اصلاحی، مفید خواهد بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تکنیک IRAJ با بهره‌گیری از تحلیل تغییرات و چارچوب 6M، همراه با ANP–VIKOR، عملکرد برتر (امتیاز ۰,۳۴) نسبت به روش‌های متداول مانند FAM، SCAT و Tripod-β دارد و می‌تواند جامعیت، دقت و کاربرد تحلیل حوادث شغلی را ارتقا دهد. این تکنیک با کاهش وابستگی به قضاوت فردی و افزایش پشتیبانی از اقدامات اصلاحی، ابزاری مؤثر برای پیشگیری از حوادث در سازمان‌های صنعتی پیچیده است. یافته‌ها تأکید می‌کنند که رویکردهای هیبریدی مانند IRAJ، کلید بهبود ایمنی و یادگیری سازمانی هستند و می‌توانند به کاهش نرخ حوادث شغلی کمک کنند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان نهایت تشکر و قدردانی را از مدیریت صنایع مورد مطالعه و همچنین متخصصین

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

مشارکت کننده در مطالعه حاضر ابراز می نمایند. مطالعه حاضر برگرفته از طرح تحقیقاتی با کد اخلاق IR.UMSHA.REC.1399.184 مصوب دانشگاه علوم پزشکی همدان می باشد.

حمایت مالی

این پژوهش هیچگونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

ملاحظات اخلاقی

کلیه ملاحظات اخلاقی اعم از کسب رضایت آگاهانه شرکت کنندگان، آزادی افراد جهت شرکت یا خروج از مطالعه و محرمانگی اطلاعات طی مطالعه حاضر رعایت گردیده است.

کد اخلاق

IR.UMSHA.REC.1399.184

مشارکت نویسندگان

کلیه نویسندگان در مراحل مختلف مطالعه اعم از بررسی متون، ایجاد الگوریتم اولیه، ایجاد مدل نهایی، جمع آوری و آنالیز داده ها، نگارش نسخه اولیه و نهایی مقاله نقشی فعال و برابر داشتند.

دسترسی آزاد

کپی‌رایت نویسنده(ها) ©2026: این مقاله تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 اجازهٔ استفاده، اشتراک‌گذاری، اقتباس، توزیع و تکثیر را در هر رسانه یا قالبی مشروط بر درج نحوهٔ دقیق دسترسی به مجوز CC، منوط به ذکر تغییرات احتمالی بر روی مقاله می‌داند. لذا به استناد مجوز یادشده، درج هرگونه تغییرات در تصاویر، منابع و ارجاعات یا سایر مطالب از اشخاص ثالث در این مقاله باید در این مجوز گنجانده شود، مگر اینکه در راستای اعتبار مقاله به اشکال دیگری مشخص شده باشد. در صورت درج نکردن مطالب مذکور و یا استفادهٔ فراتر از مجوز بالا، نویسنده ملزم به دریافت مجوز حق نسخه‌برداری از شخص ثالث است.

به‌منظور مشاهدهٔ مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 به نشانی زیر مراجعه شود:

REFERENCES

1. Ahmadi O, Mortazavi SB, Khavanin A, Mokarami H. Validity and consistency assessment of accident analysis methods in the petroleum industry. International journal of occupational safety and ergonomics. 2019;25(3):355-61.
2. Azadeh A, Fam IM, Nouri J, Azadeh MA. Integrated health, safety, environment and ergonomics management system (HSEE-MS): An efficient substitution for conventional HSE-MS. Journal of Scientific and Industrial Research. 2008;67(6):403-11.
3. Chakraborty A, Ibrahim A, Cruz AM. A study of accident investigation methodologies applied to the Natech events during the 2011 Great East Japan earthquake. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018;51:208-22.
4. Gholamizadeh K, Tapak L, Mohammadfam I, Soltanzadeh A. Investigating the work-related accidents in Iran: analyzing and comparing the factors associated with the duration of absence from work. Iranian Rehabilitation Journal. 2022;20(4):589-600.
5. Izadi N, Aminian O, Esmaeili B. Occupational accidents in Iran: risk factors and long term trend (2007–2016). Journal of research in health sciences. 2019;19(2):e00448.
6. Mohammadfam I, Mansouri N, Nikoomaram H. Systemic Accident Analysis Methods: A Comparison of Tripod-?, RCA and ECFC. Jundishapur Journal of Health Sciences. 2014;6(2):327-33.
7. Delikhoon M, Zarei E, Banda OV, Faridan M, Habibi E. Systems thinking accident analysis models: A systematic review for sustainable safety management. Sustainability. 2022;14(10):5869.
8. Fuentes-Bargues JL, Sánchez-Lite A, González-Gaya C, Rosales-Prieto VF, Reniers G. A study of situational circumstances related to Spain's occupational accident rates in the metal sector from 2009 to 2019. Safety science. 2022;150:105700.
9. Ge J, Zhang Y, Chen S, Xu K, Yao X, Li J, et al. Accident causation models developed in China between 1978 and 2018: Review and comparison. Safety science. 2022;148:105653.
10. Wu Y, Fu G, Wu Z, Wang Y, Xie X, Han M, et al. A popular systemic accident model in China: theory and applications of 24Model. Safety science. 2023;159:106013.
11. Yang Y-PO, Shieh H-M, Tzeng G-H. A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment. Information sciences. 2013;232:482-500.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

12. Mohammadfam I. Developing a Method for Evaluating Workplace Accidents: Fault Analysis Method (FAM). Journal of Health & Safety at Work. 2023;13(1).
13. Mohammadfam I, Abdullah MN, Gholamizadeh K. Developing a comprehensive technique for investigating hazmat transport accidents. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2021;21(4):1362-73.
14. Park J, Lee K, Min M, Phark C, Jung S. Systematic Cause Analysis of an Explosion Accident During the Packaging of Dangerous Goods. Processes. 2025;13(3):687.
15. Arjomandi MA, Dinmohammadi F, Mosallanezhad B, Shafiee M. A fuzzy DEMATEL-ANP-VIKOR analytical model for maintenance strategy selection of safety critical assets. Advances in Mechanical Engineering. 2021;13(4):1687814021994965.
16. Pietsch D, Matthes M, Wieland U, Ihlenfeldt S, Munkelt T. Root cause analysis in industrial manufacturing: A scoping review of current research, challenges and the promises of AI-driven approaches. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024;8(6):277.
17. Baraza X, Cugueró-Escofet N, Rodríguez-Elizalde R. Statistical analysis of the severity of occupational accidents in the mining sector. Journal of safety research. 2023;86:364-75.
18. Ajmal M, Isha ASN, Nordin SM, Al-Mekhlafi A-BA. Safety-management practices and the occurrence of occupational accidents: Assessing the mediating role of safety compliance. Sustainability. 2022;14(8):4569.
19. Azadeh A, Rouhollah F, Davoudpour F, Mohammadfam I. Fuzzy modelling and simulation of an emergency department for improvement of nursing schedules with noisy and uncertain inputs. International Journal of Services and Operations Management. 2013;15(1):58-77.
20. Mohammadfam I KO, Gholamizadeh K. Quantitative assessment of safety and health risks in HAZMAT road transport using a hybrid approach: a case study in Tehran. ACS Chemical Health & Safety. 2020;27(4).
21. Takala J, Hämäläinen P, Sauni R, Nygård C-H, Gagliardi D, Neupane S. Global-, regional-and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019. Scandinavian journal of work, environment & health. 2024;50(2):73.
22. Lee JY, Yoon YG, Oh TK, Park S, Ryu SI. A study on data pre-processing and accident prediction modelling for occupational accident analysis in the construction industry. Applied Sciences. 2020;10(21):7949.
23. MOHAMMADFAM I, MANSOURI N, NIKOOMARAM H, GHASEMI F. Comparison of commonly used accident analysis techniques for manufacturing industries. International Journal of Occupational Hygiene. 2015;7(1):32-7.
24. Salguero-Caparrós F, Rubio-Romero JC. Evaluation and comparison of selected methodologies to investigate occupational accidents. Work. 2023;74(3):1077-89.
25. Patriarca R, Chatzimichailidou M, Karanikas N, Di Gravio G. The past and present of System-Theoretic Accident Model And Processes (STAMP) and its associated techniques: A scoping review. Safety science. 2022;146:105566.
26. Fam IM, Azadeh A, Faridan M, Mahjub H.
assessment in process industry: a case study in gas refinery. Journal of the UUse Institute of Industrial Engineers. 2008;25(4):298-305.
27. Azadeh A FI. Integrated HSEE management systems for industry: A case study in gas refinary. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2009;32(2).
28. Ghasemi F, Gholamizadeh K, Farjadnia A, Sedighizadeh A, Kalatpour O. Human and organizational failures analysis in process industries using FBN-HFACS model: Learning from a toxic gas leakage accident. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022;78:104823.
29. Ikpe E, Hammon F, Oloke D. Cost-benefit analysis for accident prevention in construction projects. Journal of Construction Engineering and Management. 2012;138(8):991-8.
30. Wong LM, Pawlicki T. A review of accident models and incident analysis techniques. Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2025;26(3):e14623.
31. Al-Shanini A, Ahmad A, Khan F. Accident modelling and analysis in process industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014;32:319-34.
32. Sklet S. Comparison of some selected methods for accident investigation. Journal of hazardous materials. 2004;111(1-3):29-37.
33. Page O. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses extension for scoping reviews (PRISMA-ScR) checklist. Br J Sports Med. 2024;1001:58.
34. Büyüközkan G, Karabulut Y, Göçer F. Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey. Applied Soft Computing. 2024;158:111465.
35. Çelikbilek Y. Evaluation of the renewable energy sources with an integrated neutrosophic DEMATEL-ANP-VIKOR approach. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2025;44(3):e14589.
36. Khodabandehlou EA, Hemmasi AH, Lahijanian A, Hassani AH, Mohammadi A. Identification, Analysis and Ranking of Risks in Firemen's Occupational Accidents Using JSA and ANP Methods. Emergency Management. 2025;14(1):53-75.
37. Das A, Kumar V, Dutta S. A fuzzy-based AHP-VIKOR

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]

framework for risk analysis of safety-critical systems: A case study of nuclear power plant. Annals of Nuclear Energy. 2024;209:110841.

38. Molamehdizadeh N, Halvani GH, Ebrahimi H, Farshad AA, Kharghani Moghadam SM, Eskandari T. Root cause analysis of accidents and examining their interrelations from the perspective of workers, supervisors, and safety officers. PLoS One. 2025;20(11):e0334968.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-09-16]