Journal of Health and Safety at Work 2026; 16(1): 188-212

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Application of the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) in Accident Analysis and Safety Recommendation Prioritization: A Multi-Criteria Decision-Making Approach

Morteza Pajoohnia[1], Fakhradin Ghasemi[2], Shahram Mahmoudi Herris[3], Leila Omidi[1*]

[1]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2]Department of Occupational Health and Safety Engineering, Abadan University of Medical Sciences, Abadan, Iran
[3]Department of Health, Safety, and Environment (HSE), MAPNA Group, Tehran, Iran

Received: 11-10-2025 Accepted: 16-2-2026

ABSTRACT

Introduction: The present study was conducted with the objectives of identifying the human and organizational factors contributing to a drum fall accident, classifying these contributing factors based on the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) framework, and prioritizing safety recommendations using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques.

Material and Methods: The HFACS technique was initially applied across its four levels to determine the human and organizational factors involved in the HP drum fall accident from a rotator within a manufacturing industry. Subsequently, the proposed safety recommendations were prioritized using the Best-Worst Method (BWM) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), based on four criteria: effectiveness, initial cost, reliability, and maintainability.

Results: The contributing factors identified in this study included inattention to the longitudinal movement of the drum during rotation on the rotator, as well as non-compliance with the rotator's loading capacity relative to its mechanical strength and associated equipment (HFACS Level 1); failure to conduct a design risk assessment to identify critical points related to structural balance and stability (HFACS Level 2); non-adherence to the manufacturing sequence (HFACS Level 3); and the omission of a mechanical locking system for the rotator on the rail and failure to use certified rotating equipment with specified capacities (HFACS Level 4). The three safety recommendations identified with the highest priority were "using certified rotating equipment with specified capacity limits (relative closeness coefficient = 0.822)", "adhering to the standard drum fabrication sequence (0.749)", and "the on-site presence of a supervisor or foreman (0.698)".

Conclusion: The ultimate objective of safety management systems is to propose corrective safety measures based on findings from accident analysis. Implementing safety recommendations as a structured framework not only prevents accident occurrence but also establishes protective layers that mitigate the recurrence of similar accidents in the future.

Keywords: *Accident, Human Factors Analysis and Classification System (HFACS), Safety recommendations, Organizational factors.*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Pajoohnia M., Ghasemi F., Mahmoudi Herris Sh., Omidi L. Application of the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) in Accident Analysis and Safety Recommendation Prioritization: A Multi-Criteria Decision-Making Approach. J Health Saf Work. 2026; 16(1): 188-212.

* Corresponding Author Email: *omidil@sina.tums.ac.ir*

Copyright © 2026 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Accidents and their underlying causes remain a central focus of safety and human factors research worldwide. It is now widely accepted that accidents represent a complex systemic phenomenon, meaning causal factors exist and interact across all levels of complex socio-technical systems. Acknowledging that human understanding of accidents is incomplete, and it is expected that accidents will continue to occur is not necessarily a function of poor investigation but reflects the inherent and evolving complexity of how accidents happen. Consequently, the methods used for accident analysis are crucial for understanding root causes and identifying areas for systemic safety improvement.

The role of human factors in accidents is undeniable. However, the approach to investigating these factors varies. The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) has proven particularly useful across various domains. HFACS, applied in industries like aviation, mining, and healthcare, is built upon a foundational model that describes four levels of human error, each originating from 1) unsafe acts, 2) preconditions for unsafe acts, 3) unsafe supervision, and 4) organizational influences. HFACS operationalizes this model by providing a detailed structure with causal categories at each level, moving beyond simply blaming the individual at the sharp end.

The analysis process begins at Level 1 by identifying unsafe acts, such as skill-based errors, decision-making errors, and perceptual errors, as well as violations. Level 2 involves the preconditions for these acts, including factors related to the operator's condition, environmental factors, and personnel factors. Level 3 examines unsafe supervision, such as inadequate supervision. Finally, Level 4 investigates organizational influences, seeking failures in resource management, organizational climate, and organizational processes. Research suggests that effective countermeasures must be based on a comprehensive framework that includes these higher-level factors like organizational culture and workplace design.

The ultimate objective of safety management systems is to develop corrective and compensatory measures in this domain. One approach for deriving safety interventions and recommendations involves considering the relationships between failure pathways and proposing corresponding corrective actions based on input from practitioners and end-users. The objective of such methods is to ensure comprehensive coverage of various failure types and safety interventions through systematic allocation of countermeasures to each contributing factor.

Safety professionals often have differing perspectives on the importance of various safety recommendations and their performance. To reconcile these diverse viewpoints and select the most suitable recommendations, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods are highly suitable. These methods are designed to handle problems involving uncertainty and multiple, often conflicting, criteria.

Heavy industries, particularly boiler manufacturing, are high-risk environments due to complex activities and hazardous operational processes. Despite significant safety advancements, high-consequence accidents remain a serious challenge. Therefore, this study was conducted with the following objectives: (1) to identify the human and organizational factors contributing to a HP drum fall accident, (2) to classify these causal factors using the HFACS framework, and (3) to prioritize proposed safety recommendations using an MCDM technique.

2. MATERIAL AND METHODS

This study employed the HFACS to investigate a HP drum fall accident within a boiler manufacturing industry. The process involved identifying causal factors across all four levels: unsafe acts (including errors—perceptual, skill-based, and decision-making—as well as routine and exceptional violations); preconditions for unsafe acts (encompassing environmental factors, condition of operators, and personnel factors); unsafe supervision (including inadequate supervision, planning inappropriate operations, failure to correct known problems, and supervisory violations); and organizational influence (involving resource management, organizational climate, and organizational processes).

Evaluating safety recommendations is a manageable task in retrospective accident analysis where a specific event sequence has already occurred. In this study, based on prior research and established criteria for assessing safety recommendations, four key criteria were selected to evaluate the proposed safety recommendations: (1) effectiveness, (2) initial cost,

(3) reliability, and (4) maintainability.

Based on the findings derived from the HFACS method, 20 safety recommendations were identified and proposed for accident prevention in the present study. To prioritize the identified safety recommendations, a structured MCDM approach was used. In Best-Worst Method (BWM) method, experts only compare the most important (Best) criterion and the least important (Worst) criterion to all other criteria, significantly streamlining the data collection process. This method was used to determine the relative weights of the four criteria (effectiveness, initial cost, reliability, and maintainability) based on input from domain experts.

The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was then employed to rank the safety recommendations. The core principle of TOPSIS is that the optimal alternative should have the shortest distance from the positive ideal solution and the greatest distance from the negative-ideal solution. The TOPSIS procedure was applied to establish a final priority ranking of the proposed safety recommendations.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The analysis identified several contributory factors for the accident. Contributing factors included the non-compliance with the rotator's loading capacity relative to the mechanical strength of its frame and associated equipment, coupled with a failure to ensure uniform load distribution between the drive and idler sections of the rotator.

Furthermore, significant supervisory and procedural failures were determined. This encompassed inadequate supervision, planning inappropriate operation, failure to correct known problem, and supervisory violations. Additional contributory factors were the absence of precise markings, non-adherence to the standard tank fabrication sequence, and the lack of a formal standard operating procedure. Deficiencies in technical execution were also prominent, namely the failure to conduct precise inspections of the rotator's connections and related equipment, the absence of a standard procedure for accurately determining the diameter, length, and center of gravity of selected drum prior to operational use, and the failure to utilize a specialized and properly trained workforce.

In this study, five industrial experts participated in the criteria weighting process using the BWM. The results of the safety recommendation prioritization revealed that using certified rotating equipment with specified capacity (possessing inspection certification), with a closeness coefficient of 0.822, constitutes the most critical safety recommendation. Furthermore, adhering to the standard tank fabrication sequence and the on-site presence of a supervisor or foreman, with closeness coefficients of 0.749 and 0.698, respectively, were ranked second and third. In contrast, the protective layers for the load monitoring system and precise marking were positioned at the lowest ranks. Other safety recommendations, such as tank deviation monitoring and automatic rotator shutdown system, standard operating procedures, and the standard procedure for accurately determining drum diameter, length, and center of gravity, were placed in intermediate ranks.

4. CONCLUSIONS

The application of the HFACS technique to the drum fall accident from a rotator in a boiler manufacturing industry identified causal and contributory factors across all system level. These contributing factors included skill-based errors, perceptual errors, and routine violations at Level 1; shortcomings in the technological environment, coordination, and planning at Level 2; inadequate supervision, planning inappropriate operation, failure to correct known problems, and supervisory violations at Level 3; as well as deficiencies in organizational climate, organizational processes, and resource management at Level 4.

Subsequently, industrial expert judgment and the HFACS findings converged to identify critical safety recommendations for the accident prevention. These include the use of certified rotating equipment with specified capacity limits, adherence to the standard drum fabrication sequence, and the on-site presence of a supervisor. Furthermore, other essential safety recommendations are the implementation of a standard procedure for accurately determining tank diameter, length, and center of gravity prior to operation, coupled with ensuring a uniform load distribution between the drive and idler sections of the rotator.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by the Tehran University of Medical Sciences and Health Services

(Grant no. 1403-4-294-74914). The authors highly appreciate the support. The authors would like to thank all subject matter experts who participated in the study.

6. ETHICAL CODE

This research was approved by the Ethics Committee of Tehran University of Medical Sciences (Code: IR.TUMS.SPH.REC.1403.148).

7. FUNDING

This study was supported by the Tehran University of Medical Sciences and Health Services (Grant no. 1403-4-294-74914).

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار جلد ۱۶/ شماره ۱/ بهار ۱۴۰۵ صفحات ۱۸۸-۲۱۲

بکارگیری سیستم تحلیل و طبقه بندی فاکتورهای انسانی در تحلیل حادثه و اولویت‌بندی توصیه‌های ایمنی: یک رویکرد مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره

مرتضی پژوه نیا[۱]، فخرالدین قاسمی[۲]، شهرام محمودی هریس[۳]، لیلا امیدی[۱*]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی‌کار، دانشگاه علوم پزشکی آبادان، آبادان، ایران
[۳]واحد سلامت، ایمنی و محیط زیست، گروه مپنا، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

چکیده

مقدمه: مطالعه حاضر با هدف شناسایی عوامل انسانی و سازمانی مؤثر در حادثه سقوط درام، دسته‌بندی این عوامل بر اساس ساختار سیستم تحلیل و طبقه بندی فاکتورهای انسانی (HFACS) و اولویت بندی توصیه‌های ایمنی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره انجام شد.

روش کار: ابتدا تکنیک HFACS در چهار سطح جهت تعیین فاکتورهای انسانی و سازمانی موثر در حادثه سقوط درام از روی روتیتور در یک صنعت تولیدی بکار گرفته شد. سپس توصیه های ایمنی پیشنهادی با استفاده از روش بهترین - بدترین و TOPSIS بر اساس چهار معیار اثربخشی، هزینه اولیه، قابلیت اطمینان و سهولت تعمیرپذیری اولویت‌بندی گردیدند.

یافته ها: عدم توجه به حرکت طولی درام در حین چرخش بر روی روتیتور، عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه‌های نگه‌دارنده (carriage) (سطح اول HFACS)، عدم ارزیابی ریسک طراحی به منظور شناسایی نقاط بحرانی مرتبط با تعادل و پایداری سازه (سطح دوم HFACS)، عدم رعایت توالی ساخت طبق دفترچه استاندارد محصول و مستندات فنی (سطح سوم HFACS)، عدم تعبیه سیستم قفل‌کن مکانیکی روتیتور بر روی ریل و عدم استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (سطح چهارم HFACS) از عوامل موثر بر رخداد حادثه در این مطالعه بودند. سه توصیه ایمنی شناسایی شده دارای بیشترین اولویت شامل استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه‌دار با ظرفیت های مشخص (۰,۸۲۲ = ضریب نزدیکی)، رعایت توالی استاندارد ساخت درام (۰,۷۴۹) و حضور سرپرست یا ناظر در محل (۰,۶۹۸) بودند.

نتیجه گیری: هدف نهایی سیستم‌های مدیریت ایمنی، ارائه اقدامات ایمنی اصلاحی بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل حادثه است. پیاده‌سازی توصیه‌های ایمنی به عنوان چارچوبی ساختاریافته، نه تنها از وقوع حوادث پیشگیری می‌کند، بلکه با ایجاد لایه‌های حفاظتی از تکرار حوادث مشابه در آینده پیشگیری می‌نماید.

کلمات کلیدی: *حادثه، سیستم تحلیل و طبقه بندی فاکتورهای انسانی، توصیه های ایمنی، فاکتورهای سازمانی*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *omidil@sina.tums.ac.ir*

مقدمه

حوادث و علت وقوع آن ها همچنان از موضوعات کلیدی در تلاش‌های تحقیقاتی ایمنی و فاکتورهای انسانی در سراسر جهان هستند (۱). اکنون به طور کلی پذیرفته شده است که حوادث نشان‌دهنده یک پدیده سیستمی پیچیده هستند، به این معنی که عوامل سببی در تمام سطوح سیستم‌های پیچیده فنی- اجتماعی وجود داشته و در سراسر آنها تعامل دارند (۲). همچنین اذعان شده است که درک انسان از حوادث کامل نیست و حوادث همچنان در سیستم‌های پیچیده فنی- اجتماعی رخ خواهند داد. این امر نه به عنوان تابعی از تحقیقات ضعیف، بلکه نشان دهنده پیچیدگی احتمالی در نحوه رخداد حوادث است. بنابراین، روش‌هایی که محققان و متخصصان تحقیقات حادثه برای تحلیل یا بررسی حوادث استفاده می‌کنند، برای کمک به درک انسان از علل ریشه ای و همچنین نشان دادن اینکه ایمنی سیستم در کجا می‌تواند بهبود یابد، بسیار مهم هستند (۳).

دسته پرطرفداری از تکنیک های تحلیل حادثه تحت عنوان تکنیک های اپیدمیولوژیک شناخته می‌شوند. این تکنیک ها سعی بر این دارند که حوادث صنعتی و شغلی را به بیماری ها در بدن انسان تشبیه نمایند. همانطور که عوامل بیماری زا برای طولانی مدت در بدن میزبان خود بدون هیچ علائم خاص و نمود بیرونی زندگی می‌کنند و به محض یافتن فرصت خود را نمایان می‌سازند، سازمان‌ها دارای نواقص و شکست‌های پنهان متعددی هستند که در طول زمان از انظار مغفول مانده و در زمان مشخص با رفتارهای ناایمن یا شکست های تکنولوژیکی هم‌راستا شده و در قالب حادثه خود را نشان می‌دهند. اساس تمامی تکنیک های مبتنی بر طبقه بندی اپیدمیولوژیک، مدل پنیر سوئیسی Reason می باشد. بر اساس این مدل، هر سازمان دارای لایه‌های دفاعی متنوع و متعدد در برابر خطاها و شکست‌ها بوده که دارای تعدادی از نواقص هستند. لایه‌های دفاعی را می توان به لایه‌های پنیر سوئیسی و نواقص را می توان به حفره های موجود در لایه های پنیر تشبیه نمود. حوادث زمانی رخ می دهند که حفره‌های لایه‌های مختلف در یک راستا قرار می‌گیرند. Reason (۱۹۹۰) همچنین شکست‌های منجر به حادثه را دو دسته آشکار و پنهان دسته‌بندی نمود (۴). شکست‌های آشکار شامل شکست‌های تکنولوژیک و رفتارهای ناایمنی هستند که مستقیماً و بلافاصله منجر به حادثه می شوند و نواقص پنهان همان حفره‌های موجود در لایه‌های پنیر هستند که برای مدت زمان طولانی در سازمان وجود داشته ولی نادیده گرفته می‌شوند. برخی از تکنیک‌های تحلیل حادثه از جمله HFACS و Tripod Beta بر اساس مدل پنیر سوئیسی توسعه یافته‌اند (۵).

چهار سطح از خطای انسانی در مدل‌های ایمنی تشریح شده اند که هر یک بر سطح بعدی تأثیر می‌گذارد. این سطوح عبارتند از ۱) تأثیرات سازمانی، ۲) نظارت ناایمن، ۳) پیش‌شرط‌های اعمال ناایمن و ۴) اعمال ناایمن. اگرچه این مدل‌های بنیادین برای همیشه نحوه نگرش محققان حوزه ایمنی و تحقیقات حادثه را به خطای انسانی تغییر داد، اما سطح جزئیات لازم برای به‌کارگیری آن در دنیای واقعی را ارائه ننمود تا زمانی که Shappell و Wiegmann (۲۰۰۱) یک ساختار جامع خطای انسانی، HFACS[1]، را توسعه دادند. ساختار HFACS دربردارنده ۱۹ دسته علت و معلولی در چهار سطح خطای انسانی شامل سطح عمل، سطح پیش‌شرط، سطح نظارت و سطح تأثیرات سازمانی است (۶).

Lenné و همکاران (۲۰۱۲) تکنیک HFACS را در تحلیل ۲۶۳ حادثه مهم معدنی در کشور استرالیا بکار گرفتند. تحلیل داده‌ها نشان داد که اگرچه بیشترین نرخ رخداد حوادث مرتبط با استفاده از تجهیزات متحرک سطحی (۳۸٪) و کار در ارتفاع (۲۱٪) بوده است، اما شدت آسیب ها عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های الکتریکی و بهره‌برداری از وسایل نقلیه و ماشین‌آلات بود. در میان عوامل شناسایی‌شده بر اساس چارچوب HFACS، چندین مقوله به صورت پرتکرار مشاهده شد که شامل خطاهای ناشی از کمبود مهارت (۶۴٪)، تخلفات (۵۷٪)، مشکلات محیط فیزیکی (۵۶٪) و کاستی‌های فرایندهای سازمانی

1. Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)

(۶۵٪) بود. برنامه‌ریزی نامناسب عملیات، مدیریت ناکافی منابع تیمی و جو سازمانی نامطلوب همراه با نظارت ناکافی از جمله دیگر عوامل اثرگذار گزارش گردید (۷). Wang و همکاران (۲۰۲۵) به منظور بررسی عوامل موثر در حوادث سقوط در سایت‌های ساخت و ساز ساختمان‌های بلند مرتبه با مطالعه ۲۰۷ گزارش از این حوادث از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ از تکنیک HFACS استفاده نمودند. بر اساس مسیرهای علی و روابط سیستماتیک میان علل حوادث، فقدان آگاهی ایمنی در پرسنل، کمبود آموزش، ضعف در مدیریت ایمنی در محل کار و عدم بازرسی‌های دوره‌ای و نگهداری معمول تجهیزات از مهم ترین عوامل رخداد حادثه بودند. همچنین مشخص شد که علل ریشه‌ای این حوادث عمدتاً ناشی از عدم صلاحیت شرکت‌های پیمانکار، نظارت ناکافی بر ایمنی در محل و نقص در صدور مجوز کار در ارتفاع برای پرسنل بوده است (۸).

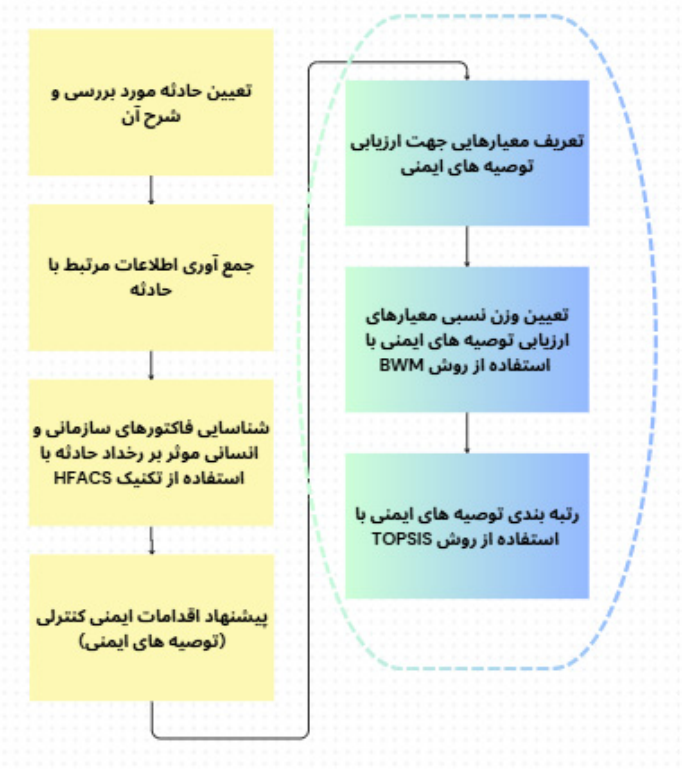
هدف نهایی نظام‌های مدیریت ایمنی، ارائه راهکارهای اصلاحی و جبرانی در این حوزه است. در این راستا، چارچوب HFACS اگرچه در شناسایی و دسته‌بندی شرایط موجود و شناخت جنبه‌های مختلف شکست عملکرد انسانی مفید است، اما کاربرد محدودی در طراحی استراتژی های اصلاحی داشته و راهنمای روشنی برای تدوین راه حل‌های عینی ایمنی ارائه نمی‌دهد. مداخلات ایمنی که صرفاً بر پایه چنین طبقه‌بندی‌هایی استوار باشند، اغلب فاقد تأثیر پایدار خواهند بود؛ چرا که اگرچه حوادث ممکن است الگوهای تکراری از رویدادها را نشان دهند، اما استراتژی‌های مداخله ای مرتبط با آن‌ها، با توجه به الزامات محیطی و محدودیت‌های منابع، ممکن است دستخوش تغییر شوند. یکی از روش های استخراج مداخلات و توصیه های ایمنی در نظر گرفتن ارتباط میان مسیرهای شکست و ارائه اقدامات متناظر اصلاحی بر اساس نظر شاغلین و کاربران است. هدف این روش ها، اطمینان از پوشش حداکثری انواع شکست‌ها و مداخلات ایمنی اصلاحی و لایه های حفاظتی از طریق تخصیص نظام‌مند راهکارها به هر یک از عوامل شکست است (۹).

متخصصان ایمنی در صنایع دیدگاه‌های متفاوتی در مورد درجه اهمیت اقدامات ایمنی و لایه های حفاظتی دارند. این امر آنها را به سطوح مختلف اهمیت برای هر اقدام ایمنی پیشنهادی و اختصاص وزن‌های مختلف به اندازه‌گیری‌ها سوق می‌دهد (۱۰, ۱۱). اختصاص وزن‌های مختلف به شاخص‌های مختلف به مدیران و متخصصان ایمنی این امکان را می‌دهد که استراتژی‌های مختلفی را برای بهبود ایمنی و انتخاب بهترین اقدامات ایمنی برای پیشگیری از رخداد حوادث مشابه تدوین کنند (۱۲). روش‌های MCDM[1] در مواردی که عدم قطعیت وجود دارد، به عنوان مثال ابهام به دلیل فقدان اطلاعات کامل یا ابهام ناشی از قضاوت کیفی تصمیم‌گیرندگان، مناسب هستند (۱۳). در نتیجه، آنها برای مقابله با مسائل دنیای واقعی که این ویژگی‌ها را به اشتراک می‌گذارند، مفید هستند (۱۲). جهت مقایسه و رتبه بندی توصیه های ایمنی، نیاز به ارزیابی آن ها توسط چند معیار وجود دارد. به عبارت دیگر، بدون معیارهای ارزیابی، امکان پذیری استقرار و مقایسه عملکرد استراتژی های کنترلی و مداخله ای وجود ندارد.

در این مطالعه، جهت تعیین وزن معیارها از روش بهترین- بدترین (BWM[2]) استفاده گردید. این روش در سال ۲۰۱۵ توسط رضایی ارائه شده و سعی دارد تعداد مقایسه های زوجی مورد نیاز جهت تعیین وزن نسبی معیارها را به حداقل برساند (۱۴). همچنین، در مطالعه حاضر از روش TOPSIS برای رتبه بندی نهایی توصیه ها و اقدامات ایمنی پیشنهادی بر اساس معیارهای تصمیم گیری تعیین شده، بهره گرفته شد. تکنیک TOPSIS اولین بار توسط Hwang و Yoon برای حل یک مسئله MCDM توسعه داده شد. این روش بر اساس این مفهوم است که گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را از راه حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه حل ایده‌آل منفی داشته باشد (۱۵).

صنایع سنگین، به‌ویژه صنایع تولید بویلر، به دلیل

1. Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
2. Best-Worst Method (BWM)



شکل ۱: فلوچارت مراحل انجام مطالعه

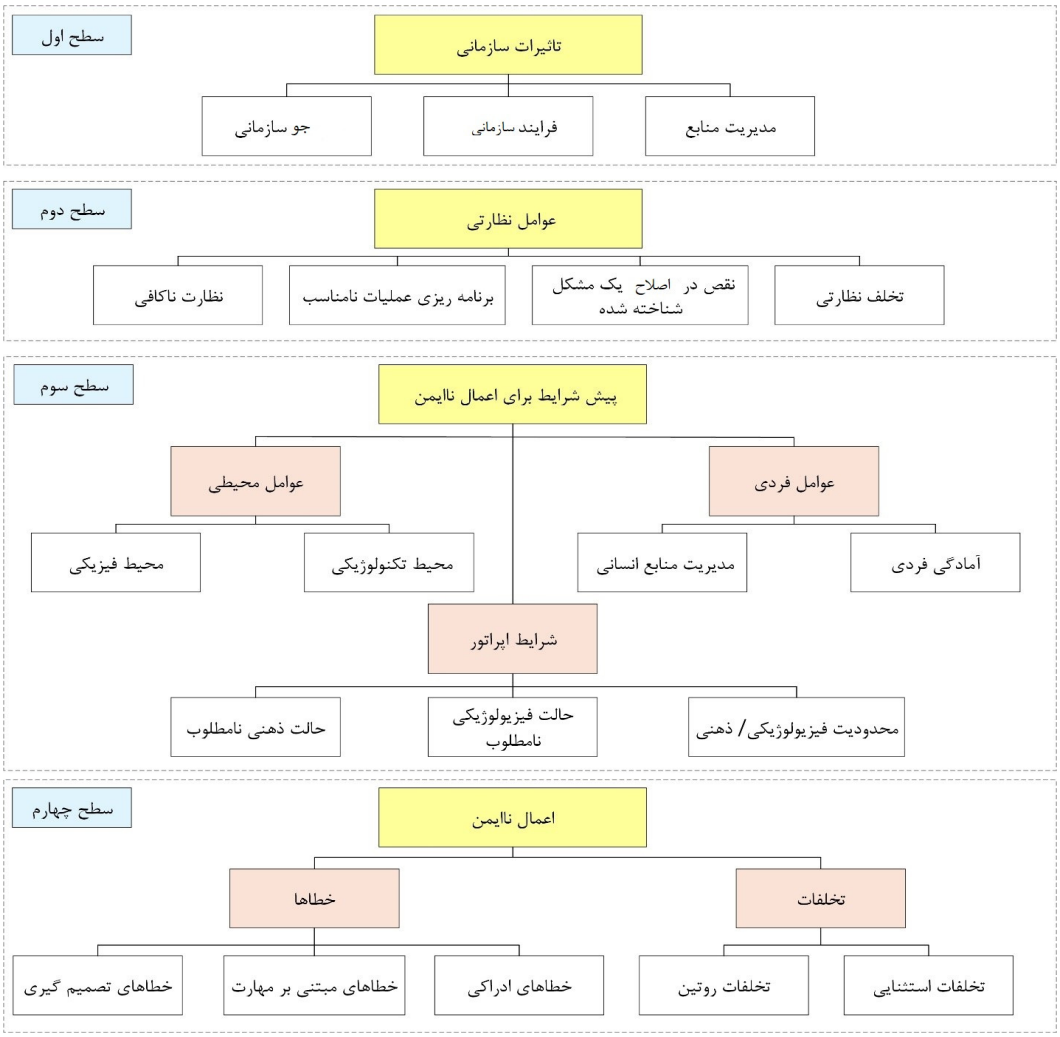
ماهیت فعالیت های پیچیده و فرایندهای عملیاتی پرمخاطره، از جمله محیط‌های کاری با ریسک بالا محسوب می‌شوند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه ایمنی، وقوع حوادث دارای پیامد و خسارت های شدید در این صنایع کماکان به عنوان یک چالش جدی ادامه دارد. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف (۱) شناسایی فاکتورهای انسانی و سازمانی مؤثر در حادثه سقوط درام از روی روتیتور، (۲) دسته‌بندی این عوامل مؤثر بر اساس ساختار HFACS و (۳) اولویت‌بندی توصیه های ایمنی با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره انجام شد

روش کار

در این مطالعه، روش HFACS که برای استفاده در تحلیل حوادث توسعه داده شده است، در شش مرحله در تحلیل حادثه سقوط درام از روی روتیتور در یک صنعت تولید بویلر بکارگرفته شد. شکل ۱ فلوچارت مراحل انجام مطالعه حاضر را نشان می دهد.

۱- جمع آوری اطلاعات مرتبط با حادثه

چهار منبع اصلی جهت جمع آوری اطلاعات مربوط به حادثه عبارتند از افراد، تجهیزات و ساختارهای فیزیکی، موقعیت ها و اسناد کاغذی و الکترونیکی (۱۶). در این مطالعه از هر چهار منبع جهت جمع آوری اطلاعات استفاده گردید. در مطالعه حاضر، فرایند تحلیل حادثه با بهره‌گیری از چارچوب HFACS و با تکیه بر منابع اطلاعاتی چندگانه شامل مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با شاغلین مرتبط، بررسی‌های میدانی (مشاهدات و بازدید از محل)، و مستندات داخلی (دستورالعمل‌ها، ارزیابی‌های ریسک، روش‌های اجرایی و گزارش‌های بازرسی) انجام شد. افراد مصاحبه شونده شامل شش شاغل از واحدهای مختلف صنعت از قبیل تعمیرات و نگهداری، HSE، تکنولوژی تولید، برنامه ریزی و سیستم ها و کارگاه ساخت مخازن بودند. مصاحبه ها طی چندین جلسه بصورت حضوری و تا به اشباع رسیدن اطلاعات دریافتی صورت گرفت. علاوه بر مصاحبه‌ها، بررسی‌های میدانی شامل مشاهدات



شکل ۲: ساختار کلی تکنیک HFACS

مستقیم از محل وقوع حادثه، درام آسیب دیده و روتیتور، تجهیزات حفاظتی موجود و مصاحبه با شاهدان عینی نیز انجام گرفت.

۲- شناسایی فاکتورهای سازمانی و انسانی موثر بر رخداد حادثه با استفاده از تکنیک HFACS

در این مطالعه، از ساختار HFACS و مصاحبه های نیمه ساختاریافته جهت شناسایی فاکتورهای سازمانی و انسانی دخیل در رخداد حادثه استفاده گردید (۱۷). مطابق با شکل ۲، این تکنیک شکست های سازمانی و انسانی را در چهار سطح دسته بندی می نماید (۱۸): (۱) سطح اعمال ناایمن، (۲) سطح پیش شرایط برای اعمال ناایمن، (۳) سطح نظارت و (۴) سطح تأثیرات سازمانی. با استفاده از روش تحلیلی HFACS، پیوندهای پنهان میان هر بخش در طول فرایند بررسی و تحقیق حادثه مشخص می‌شوند (۱۹).

هنگام تحلیل حادثه، اولین گام شامل شناسایی اعمال ناایمن (سطح ۱ HFACS) است. از آنجایی که HFACS از طبقه‌بندی‌های حالت‌های خطای خارجی و شکست استفاده می‌کند، این مورد شامل استفاده از داده‌های موجود برای طبقه‌بندی هرگونه خطا یا تخلفی است که توسط شاغلین (مثلاً خلبانان یا شاغلین معدن) انجام شده

و منجر به وقوع حادثه شده است. در دسته خطاها، سه نوع خطای اساسی تعریف شده‌اند که شامل خطاهای مبتنی بر مهارت، خطاهای تصمیم‌گیری و خطاهای ادراکی هستند. دسته تخلفات شامل اشکال مختلف روتین و استثنایی است (۲۰, ۲۱).

پیش‌شرط‌های اعمال ناایمن (سطح ۲ HFACS) به شرایط نهفته ای اشاره دارد که در وقوع اعمال ناایمن نقش دارند. این سطح شامل سه دسته شرایط اپراتورها، عوامل محیطی و عوامل پرسنلی (فردی) است. سطح سوم در HFACS، یعنی نظارت ناایمن، مواردی را در نظر می‌گیرد که نظارت یا وجود نداشته یا نامناسب بوده است. نقش هر سرپرست فراهم نمودن فرصت موفقیت برای شاغلین است و این امر از طریق ارائه راهنمایی، آموزش، رهبری، نظارت و مشوق‌ها محقق می‌شود. سطح سوم شامل نظارت ناکافی، برنامه ریزی نامناسب عملیات، نقص در اصلاح یک مشکل شناخته شده و تخلفات نظارتی است. سطح چهارم در ساختار HFACS، سطح تأثیرات سازمانی است. در این مرحله، تحلیلگران به دنبال شکست‌هایی در سطوح مدیریتی بالاتر سازمان هستند که در حادثه نقش داشته‌اند. سه دسته از تأثیرات سازمانی مورد کاربرد در این تکنیک شامل مدیریت منابع، جو سازمانی و برنامه ریزی نامناسب عملیات است (۲۰, ۲۱).

در سطح ۱، معمولاً شایع‌ترین اعمال ناایمن شناسایی شده، خطاهای مبتنی بر مهارت هستند. در سطح ۲، پیش‌شرط‌های اعمال ناایمن، محدودیت‌های جسمی و روانی و شکست در مدیریت منابع انسانی به طور برجسته‌ای در حوادث نقش دارند. نظارت ناکافی در سطح ۳ رایج‌ترین عامل نظارتی شناسایی‌شده است و برنامه ریزی نامناسب عملیات در سطح ۴ رایج‌ترین عامل سازمانی شناسایی‌شده است (۷, ۲۲).

۳- پیشنهاد اقدامات ایمنی کنترلی (توصیه های ایمنی)

با توجه به اینکه هدف نهایی سیستم‌های مدیریت ایمنی، تدوین و اجرای اقدامات اصلاحی و کنترلی مؤثر است، در این راستا و پس از شناسایی نظام‌مند عوامل سازمانی و انسانی مؤثر در رخداد حادثه با استفاده از چارچوب تحلیلی HFACS، گام بعدی تدوین راهکارهای کنترلی عملیاتی بر اساس عوامل شکست شناسایی شده بود. برای تبدیل علل شکست شناسایی‌شده به برنامه‌ای اجراپذیر، اقدامات اصلاحی و توصیه‌های ایمنی بر اساس نظرات کارشناسان صنعتی پیشنهاد گردید. در نهایت، این توصیه ها با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی اولویت‌بندی شدند تا مؤثرترین و عملی‌ترین توصیه‌های ایمنی استخراج شوند. پس از تکمیل تحلیل حادثه با چارچوب HFACS و شناسایی عوامل علی در سطوح چهارگانه، فرایند استخراج توصیه های ایمنی در چهار مرحله نظام مند انجام پذیرفت. مرحله نخست، تبدیل عوامل علی به نقاط شکست قابل مداخله بود. در مرحله دوم، برای هر نقطه شکست، یک یا چند "مسیر علی به حادثه" ترسیم شد. این کار از طریق مصاحبه های نیمه ساختاریافته با خبرگان صنعتی انجام گرفت. مرحله سوم، پیشنهاد اقدامات ایمنی متناظر با هر مسیر علی بود. در مرحله چهارم، فهرست اولیه توصیه های ایمنی به بحث گذاشته شد تا از عملی بودن، عدم تداخل با فرآیندهای اصلی، و وضوح آن‌ها اطمینان حاصل شود. خروجی نهایی این فرایند، فهرست ۲۰ توصیه ایمنی بود. این توصیه‌ها از مسیرهای علی شناسایی شده در سطوح مختلف HFACS استخراج شدند.

۴- تعریف معیارهایی جهت ارزیابی توصیه های ایمنی

بر اساس ساختار HFACS عوامل سازمانی و انسانی موثر بر رخداد حادثه شناسایی و توصیه های ایمنی متناظر برای پیشگیری از حوادث آتی و مشابه پیشنهاد گردیدند. اگرچه ساختار HFACS ممکن است هنگام ارائه توصیه های مداخله ای جامع مفید باشد، اما سازمان‌ها به سادگی نمی‌توانند هر توصیه‌ای را اجرا کنند (۲۳). عواملی مانند (۱) اثربخشی، (۲) هزینه اولیه، (۳) قابلیت اطمینان و (۴) سهولت تعمیر پذیری برای ارزیابی عملکرد اقدامات/توصیه های ایمنی پیشنهادی و لایه های حفاظتی در مطالعات گذشته مورد تاکید بوده اند (۲۴, ۲۵). چهار معیار ذکر شده جهت ارزیابی توصیه های ایمنی در مطالعه حاضر

بکار گرفته شد. در مطالعات گذشته نیز Chiu و Hsieh (۲۰۱۶) عوامل موثر بر رخداد خطای انسانی در وظایف تعمیر و نگهداری هوانوردی را با HFACS شناسایی نموده و با موفقیت یکی از روش‌های MCDM را با چهار معیار برای ایجاد استراتژی‌های بهبود کارآمد به کار گرفتند (۲۶). در مطالعه آنان سه متخصص صنعت هواپیمایی با سابقه کار بیش از ۱۵ سال در تعیین وزن معیارهای مورد مطالعه مشارکت داشتند.

۵- تعیین وزن نسبی معیارهای ارزیابی توصیه های ایمنی با استفاده از روش BWM

چهار معیار معرفی شده در مرحله قبل از نظر اهمیت و وزن نسبی یکسان نیستند. جهت تعیین وزن نسبی آنها می توان از رویکردهای مختلف تصمیم گیری چندمعیاره استفاده نمود. در این مطالعه، با توجه به نوع مسئله از روش BWM استفاده گردید. این روش یکی از تکنیک‌های نوین در MCDM است که با هدف ارتقای دقت در تعیین وزن معیارها و کاهش میزان ناسازگاری در مقایسات زوجی طراحی شده است. یکی از مزایای برجسته روش BWM نسبت به سایر تکنیک‌های MCDM مشابه مثل فرایند تحلیل سلسله مراتبی کاهش تعداد مقایسات زوجی مورد نیاز است. در این روش، تنها مقایسه بین بهترین معیار با سایر معیارها و همچنین بدترین معیار با دیگر معیارها انجام می‌شود، که منجر به کاهش چشمگیر حجم داده‌های مورد نیاز می‌گردد (۱۲, ۱۴). در مطالعه حاضر وزن چهار معیار اثربخشی، هزینه اولیه، قابلیت اطمینان و سهولت تعمیر پذیری که برای ارزیابی توصیه های ایمنی تعریف شدند، بر اساس نظر خبرگان (متخصصان حیطه موضوعی) بر اساس مراحل زیر انجام گردید.

۱. شناسایی مجموعه معیارها: در نخستین گام، مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم‌گیری $\{c_1, c_2, \ldots, c_n\}$ که باید ارزیابی و مقایسه شوند، شناسایی می‌شود.

۲. تعیین بهترین و بدترین معیار: در این مرحله، تصمیم‌گیرنده باید معیار بهترین (به‌عنوان تأثیرگذارترین یا مهم‌ترین معیار) و معیار بدترین (به‌عنوان کم اثرترین یا کم‌اهمیت‌ترین معیار) را از میان مجموعه معیارهای موجود مشخص کند.

۳. تعیین ترجیحات معیار بهترین نسبت به سایر معیارها (بردار Best-to-Others): در این مرحله، تصمیم‌گیرنده میزان ترجیح معیار بهترین را نسبت به سایر معیارهای موجود با استفاده از یک عدد صحیح از مجموعه $\{1,2,\ldots,9\}$ مشخص می‌نماید؛ به‌طوری‌که عدد ۱ نشان‌دهنده اهمیت برابر و عدد ۹ بیانگر ترجیح بسیار زیاد معیار بهترین نسبت به معیار دیگر است. نتیجه این مقایسه‌ها، تشکیل برداری موسوم به بردار بهترین به سایرین (Best-to-Others vector) به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{BO} = \left(a_{B1}, a_{B2}, \ldots, a_{Bn}\right)$$

که در آن a_{Bj} بیانگر میزان ترجیح معیار بهترین C_B نسبت به معیار C_j می‌باشد و مقدار بازه j آن در بازه $j = 1, 2, \ldots, n$ قرار دارد.

۴. مقایسه سایر معیارها با بدترین معیار (بردار Others-to-Worst): در این مرحله، تصمیم‌گیرنده باید میزان ترجیح هر یک از معیارها را نسبت به بدترین معیار با استفاده از یک عدد صحیح از مجموعه $\{1,2,\ldots,9\}$ مشخص نماید؛ به‌طوری‌که عدد ۱ بیانگر اهمیت برابر و عدد ۹ نشان دهنده ترجیح بسیار زیاد معیار مورد نظر نسبت به معیار بدترین است.

نتیجه این مقایسه‌ها، تشکیل برداری موسوم به بردار سایر معیارها نسبت به بدترین معیار (Others-to-Worst vector) به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{OW} = \left(a_{1W}, a_{2W}, \ldots, a_{nW}\right)$$

که در آن a_{jW} بیانگر میزان ترجیح معیار C_j نسبت به معیار بدترین C_W می‌باشد و مقدار j آن در بازه $j = 1, 2, \ldots, n$ قرار دارد.

۵. محاسبه وزن‌های بهینه معیارها با استفاده از مدل

جدول ۱: مقادیر شاخص ناسازگاری

a_{BW}	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص ناسازگاری (بیشینه ξ)	۰/۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۶۳	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۳	۴/۴۷	۵/۲۳

برنامه‌ریزی خطی: در این مرحله، وزن‌های بهینه معیارها $(W_1^*, W_2^*, ..., W_n^*)$ از طریق حل مدل برنامه‌ریزی خطی زیر به‌دست می‌آید:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jw} \right| \right\} \quad (۱)$$

این مدل به‌گونه‌ای حل می‌شود که مجموع وزن‌های به‌دست‌آمده برابر با ۱ باشد و تمامی وزن‌ها مقداری نامنفی داشته باشند:

$$\sum_{j=1}^{n} W_j = 1,\ W_j \geq 0\ ,(j = 1,2,...,n) \qquad 2 \qquad (۲)$$

مدل (۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\min \xi$$

به گونه ای که:

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi\ ,(j = 1,2,...,n)$$
$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jw} \right| \leq \xi\ ,(j = 1,2,...,n) \qquad (۳)$$
$$\sum_{j=1}^{n} W_j = 1,\ W_j \geq 0\ ,(j = 1,2,...,n) \quad 3$$

با حل معادله (۳)، وزن‌های بهینه معیارها $(W_1^*, W_2^*, ..., W_n^*)$ و مقدار بهینه ناسازگاری ξ محاسبه می شوند.

۶. محاسبه نرخ ناسازگاری: به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از فرایند BWM، لازم است میزان سازگاری قضاوت‌ها مورد سنجش قرار گیرد. نرخ ناسازگاری، معیاری برای ارزیابی میزان سازگاری قضاوت‌ها در این روش است و نشان می‌دهد که مقایسات زوجی تا چه اندازه با شرط سازگاری $a_{Bj} \times a_{jW} = a_{BW}$ مطابقت دارند. در این مدل، میزان انحراف از این شرط با پارامتر ξ اندازه گیری شده و مقدار بهینه ی آن ξ^* از طریق حل معادله (۳) به دست می آید. سپس با مقایسه ی مقدار به دست آمده ξ^* با شاخص سازگاری که بیانگر مقدار بیشینه ξ بوده و مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده اند، نرخ ناسازگاری بر اساس رابطه (۴) محاسبه می گردد:

$$CR = \frac{\xi^*}{CI\ (max\ \xi)} \quad (۴)$$

۶- رتبه بندی توصیه های ایمنی با استفاده از روش TOPSIS

روش TOPSIS نیز یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نظرات خبرگان می‌پردازد. این روش بر این فرض بنا شده است که گزینه بهینه باید کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. از مزیت های کلیدی این روش می توان به سادگی محاسبات و نیاز اندک به داده‌های ورودی از سوی خبرگان اشاره کرد. جهت رتبه بندی توصیه های ایمنی روش TOPSIS[1] با در نظر گرفتن مراحل زیر بکار گرفته شد (۲۷-۳۰).

۱. تشکیل ماتریس تصمیم: ابتدا ماتریس تصمیم با m گزینه و n معیار تشکیل می‌شود. بر این اساس، مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم‌گیری $\{a_1, a_2, ..., a_m\}$ در نظر گرفته می‌شود و ارزیابی این گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از معیارها $\{c_1, c_2, ..., c_n\}$ انجام می گیرد:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

1. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

در این ماتریس، هر عنصر X_{ij} نشان‌دهنده میزان عملکرد یا ارجحیت گزینه a_i با توجه به معیار c_j می‌باشد. در این مطالعه، از طیف ۹ مرحله ای برای سنجش اهمیت گزینه ها نسبت به هر معیار استفاده شده است، به‌گونه‌ای که عدد ۱ بیانگر اهمیت خیلی کم و عدد ۹ نشان دهنده اهمیت بسیار زیاد گزینه مورد نظر نسبت به معیار مربوطه می باشد.

۲. نرمال‌سازی ماتریس تصمیم: در این مرحله، برای حذف مقیاس‌های متفاوت معیارها و یکسان‌سازی واحدها، ماتریس تصمیم نرمال‌سازی می‌شود. مقدار نرمال‌شده هر عنصر X_{ij} از طریق رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} X_{ij}^{\,2}}} \qquad (۵)$$

که در آن $i = 1,2,...,m$ و $j = 1,2,...,n$ هستند. همچنین، n_{ij} نمایانگر مقدار نرمال شده گزینه a_i نسبت به معیار c_j می باشد.

۳. وزن اختصاص یافته به معیار c_j، با نماد w_j نمایش داده می‌شود که نشان‌دهنده میزان اهمیت نسبی این معیار در مقایسه با سایر معیارها است. در مطالعه حاضر، تعیین وزن‌های بهینه با بهره‌گیری از BWM و مطابق مراحل تشریح شده در بخش پیشین صورت گرفته است.

۴. تشکیل ماتریس نرمال‌شده وزن دار: در این مرحله، وزن هر معیار w_j در مقدار نرمال‌شده n_{ij} ضرب می‌شود تا ماتریس تصمیم وزن دار حاصل شود (رابطه ۶):

$$V_{ij} = n_{ij} \times w_j \qquad (۶)$$

که در آن، V_{ij} مقدار نرمال شده وزن دار گزینه a_i نسبت به معیار c_j می باشد.

۵. تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی برای هر معیار: راه‌حل ایده‌آل مثبت V_j^+ و راه‌حل ایده‌آل منفی V_j^- هر معیار بر اساس نوع معیار (سودمند یا غیرمفید) مطابق روابط زیر مشخص می‌گردد:

- معیارهای سودمند (beneficial):

$$V_j^+ = max\{V_{1j}, V_{2j}, \ldots, V_{mj}\}$$

$$V_j^- = min\{V_{1j}, V_{2j}, \ldots, V_{mj}\}$$

- معیارهای هزینه‌ای یا غیرمفید (non-beneficial criteria):

$$V_j^+ = min\{V_{1j}, V_{2j}, \ldots, V_{mj}\}$$

$$V_j^- = max\{V_{1j}, V_{2j}, \ldots, V_{mj}\}$$

۶. محاسبه فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی: برای هر گزینه، فاصله آن از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (رابطه ۷) و منفی (رابطه ۸)، به‌کمک معادلات زیر محاسبه می‌شود:

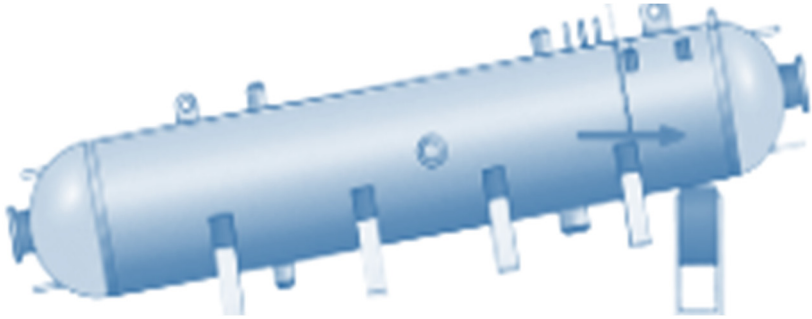
$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \qquad (۷)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \qquad (۸)$$

که در آن، d_i^+ فاصله گزینه a_i از راه‌حل ایده‌آل مثبت V^+ و d_i^- فاصله گزینه a_i از راه‌حل ایده‌آل منفی V^- می‌باشد.

۷. محاسبه نزدیکی نسبی به راه حل ایده آل (ضریب نزدیکی): ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه نسبت به راه‌حل ایده‌آل، با نماد CC_i نمایش داده می‌شود (رابطه ۸) و نشان‌دهنده میزان نزدیکی گزینه a_i به راه‌حل ایده‌آل مثبت است. این ضریب بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \qquad (۹)$$



شکل ۳: شکل شماتیک حادثه

یافته ها

۱- شرح حادثه

در ساعت ۱۱:۵۵ یکی از روزهای پائیز سال ۱۴۰۳ در کارگاه ساخت مخازن تحت فشار، یک درام از نوعHP با وزن تقریبی ۶۵ تن در حین عملیات چرخش محیطی از روی روتیتور سقوط کرد. در زمان وقوع حادثه، درام بر روی روتیتورهای چرخان قرار داشت و عملیات به منظور اجرای موارد اصلاحی بر اساس بازرسی های VT (بازرسی چشمی) متعلقات داخلی در حال انجام بود. در زمان حادثه یک اپراتور جهت سنگ زنی و یک نفر جهت بازرسی چشمی در خارج از مخزن حاضر بوده اند. در حین دوران، درام به‌تدریج دچار حرکت طولی به سمت عدسی می شود. این جا به جایی سبب خروج تدریجی یک سمت درام از روی چرخ های روتیتور شده و در ادامه منجر به اعمال نیرو بر گرداننده سمت مقابل و در نهایت سقوط کامل درام و پرتاب روتیتور به وسط سالن تولید شده است. بررسی های میدانی بر اساس مشاهدات، مستندات و اظهارات شاهدان عینی نشان داد که با نزدیک شدن محل قرار گیری چرخ روتیتور به ناحیه تیپر ابتدای شل و عدسی، کاهش قطر بیرونی در بخش تیپر و انحنای سطح عدسی سبب ایجاد فضای خالی میان چرخ و جداره بیرونی درام شده است. از آنجا که بخش محرک روتیتور در این نقطه قرار داشت، تغییر زاویه طولی درام (به سمت بالا) و متعاقبا افزایش وزن در حالت آنبالانسی روی گرداننده، افتادن گرداننده را تسریع نموده است (شکل ۳). پس از جدا شدن قسمت عقب درام از روتیتور، افزایش فشار وزن به سمت گرداننده سمت مقابل، منجر به حرکت روتیتور روی ریل شده و به دلیل فقدان سیستم قفل کن یا کلمپ، روتیتور از ریل خارج شده و به سمت وسط سالن پرتاب شده و درام به صورت کامل روی زمین و برخی تجهیزات مجاور سقوط نموده است.

۲- فاکتورهای سازمانی و انسانی مؤثر بر رخداد حادثه

نتایج تحلیل حادثه نشان داد که کمبود فاصله برای نصب گرداننده زیر درام و رعایت فاصله ایمن از لبه شل، عدم توجه به حرکت طولی درام در حین چرخش، فقدان دستورالعمل مدون یا روش اجرایی در خصوص استفاده از روتیتور در شرایط خاص، فقدان سیستم قفل‌کن یا کلمپ مکانیکی جهت جلوگیری از حرکت گرداننده روی ریل (تثبیت گرداننده بر روی ریل) و عدم استفاده از روش چرخش رفت و برگشتی جهت مهار حرکت طولی (کنترل تلرانس حرکتی با گردش به جلو و چرخش معکوس از عوامل موثر در رخداد حادثه بودند. جدول ۲ فاکتورهای سازمانی و انسانی موثر بر رخداد حادثه و جایگاه آنها در تکنیک HFACS را نمایش می دهد.

۳- شناسایی توصیه های ایمنی

در مطالعه حاضر بر اساس یافته های حاصل از مرحله تحلیل حادثه، ۲۰ توصیه یا اقدام ایمنی (لایه حفاظتی) در پیشگیری از حادثه بر اساس ساختار HFACS و توجه به نظرات کارشناسان شناسایی و پیشنهاد گردید (جدول ۳) و سپس رتبه بندی توصیه های ایمنی بر اساس معیارهای ارزیابی صورت پذیرفت.

جدول ۲: عوامل موثر بر رخداد حادثه بر اساس ساختار HFACS

سطح HFACS	طبقه بندی	توضیح
سطح اول: اعمال ناایمن	خطای مبتنی بر مهارت	- عدم علامت‌گذاری دقیق و مشاهده چشمی برای پایش میزان دویدگی درام: علامت‌گذاری و مشاهده چشمی برای پایش میزان دویدگی درام به دلیل عدم توجه دچار نقض می شود.
	خطای ادراکی	- عدم بازرسی از اتصالات مکانیکی روتیتور و تجهیزات وابسته شامل پایه‌های متحرک (Carriage) و نگهدارنده
	تخلفات روتین	- عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور: به دلیل محدودیت تجهیزات خط تولید، توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور انجام نشده است. - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم رعایت توالی ساخت درام: توالی ساخت تعریف‌شده در مستندات فنی نظیر نقشه‌های ساخت و برنامه مراحل کاری تدوین‌شده رعایت نشده است.
سطح دوم: پیش شرایط اعمال ناایمن	ابزار/ فناوری	- عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور
	ارتباطات، هماهنگی و برنامه‌ریزی	- عدم حضور سرپرست یا ناظر در محل
سطح سوم: نظارت ناایمن	نظارت ناکافی	- عدم انجام بازرسی دقیق از اتصالات روتیتور و تجهیزات وابسته - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم حضور سرپرست یا ناظر در محل
	برنامه ریزی نامناسب عملیات	- عدم وجود روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری: موقعیت تقریبی مرکز ثقل HP drum بر اساس توزیع وزنی اجزای اصلی به درستی برآورد نشده است؛ همچنین، هنگام ایجاد تغییرات در اجزای داخلی یا خارجی درام (مانند نصب تجهیزات داخلی، نازل‌ها یا قطعات جانبی)، بازنگری لازم در تخمین مرکز ثقل صورت نگرفته که این موضوع منجر به عدم تعادل و افزایش خطرات شده است. - عدم انجام ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار درام) - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور
	شکست در اصلاح مشکل شناخته شده	- عدم تعیین تکیه‌گاه مکانیکی (رول تراست) - عدم تعبیه سیستم قفل‌کن مکانیکی روتیتور بر روی ریل - عدم استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی) - عدم وجود روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری - عدم انجام ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار درام): عدم اجرای مؤثر ارزیابی ریسک طراحی به منظور شناسایی نقاط بحرانی مؤثر بر تعادل و پایداری سازه، منجر به عدم شناسایی ضعف‌های طراحی و بروز شرایط ناایمن در حین بارگذاری و چرخش درام شده است. - عدم ارائه آموزش تخصصی کاربری روتیتور - عدم بهره گیری از نیروی کار متخصص و آموزش دیده
	تخلف نظارتی	- عدم استفاده از شل کمکی (افزایش سطح تماس بین روتیتور و درام) - عدم علامت‌گذاری دقیق و مشاهده چشمی برای پایش میزان دویدگی درام - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم رعایت توالی ساخت درام: هیچ‌گونه کنترل مؤثر یا تصمیم مدیریتی برای پایش و اطمینان از اجرای صحیح و مرحله به مرحله‌ی ساخت، مونتاژ و جوشکاری درام طبق این توالی انجام نشده و انحرافاتی مانند اجرای زود هنگام یا دیر هنگام مراحل، حذف یک مرحله یا جابجایی در ترتیب مراحل به‌وجود آمده‌اند. - عدم نظارت بر اجرای دقیق مراحل ساخت، مونتاژ، جوشکاری و نصب اجزای درام مطابق با توالی مشخص‌شده در مستندات فنی به طور موثر انجام نشده است. - عدم کنترل تلرانس حرکتی با گردش به جلو و چرخش معکوس - عدم استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی) - عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور

ادامه جدول ۲: عوامل موثر بر رخداد حادثه بر اساس ساختار HFACS

سطح HFACS	طبقه بندی	توضیح
سطح چهارم: تاثیرات سازمانی	جو سازمانی	- عدم استفاده از شل کمکی (افزایش سطح تماس بین روتیتور و درام) - عدم رعایت توالی ساخت درام - عدم وجود رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP[1]) کاربری روتیتور - عدم استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی) - عدم انجام ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار درام) - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم کنترل تلرانس حرکتی با گردش به جلو و چرخش معکوس - عدم انجام بازرسی دقیق از اتصالات روتیتور و تجهیزات وابسته - عدم ارائه آموزش تخصصی کاربری روتیتور
	فرایند سازمانی	- عدم استفاده از شل کمکی (افزایش سطح تماس بین روتیتور و درام) - عدم رعایت توالی ساخت درام - عدم وجود رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP) کاربری روتیتور - عدم وجود روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری - عدم انجام ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار دارم)
	مدیریت منابع	- عدم وجود تکیه‌گاه مکانیکی (Thrust Roller) - عدم تعبیه سیستم قفل‌کن مکانیکی روتیتور بر روی ریل - عدم وجود سامانه پایش و تشخیص انحراف درام همراه با آلارم صوتی - عدم وجود سامانه پایش و تشخیص انحراف درام و سامانه توقف خودکار روتیتور ناشی از انحراف بیش از حد درام - عدم استفاده از سیستم Anti-drift (سیستم کنترل و تصحیح خودکار انحراف درام) - عدم وجود سیستم پایش بار - عدم حضور سرپرست یا ناظر در محل - عدم استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی) - عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) - عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور - عدم ارائه آموزش تخصصی کاربری روتیتور - عدم بهره گیری از نیروی کار متخصص و آموزش دیده

۴- محاسبه وزن معیارها با استفاده از روش BWM

در این مطالعه، پنج نفر از خبرگان صنعتی در فرایند وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش BWM مشارکت داشتند. تمامی شرکت‌کنندگان مرد و با میانگین سنی حدود ۴۲ سال بودند. از نظر سطح تحصیلات، ۸۰٪ از خبرگان دارای مدارک تحصیلات تکمیلی (کارشناسی ارشد) بودند و در سمت‌هایی همچون مدیر کارگاه، سرپرست واحد تکنولوژی تولید، کارشناس مهندسی صنایع و مهندس ایمنی فعالیت داشتند. همچنین، میانگین سابقه کاری خبرگان نیز تقریباً ۱۹ سال بود (جداول ۴ و ۵).

به‌منظور وزن‌دهی به معیارهای شناسایی‌شده و تمرکز بر عوامل کلیدی در فرایند تصمیم‌گیری، پرسشنامه‌ای مبتنی بر روش BWM طراحی و میان خبرگان صنعتی توزیع شد. در این مطالعه، پنج خبره از حوزه صنعت در فرایند وزن دهی معیارها نقش فعال داشتند. نرخ ناسازگاری قضاوت‌های خبرگان در فرایند وزن‌دهی معیارها با استفاده از تکنیک BWM در بازه ی ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۶۷ قرار گرفت که نشان‌دهنده سطح مطلوبی از سازگاری قضاوت‌ها است (جدول ۶). در مطالعه حاضر، به منظور افزایش پایایی و اعتبار یافته‌ها، از نظرات ۵ خبرهٔ متخصص با میانگین سابقهٔ کاری ۱۹ سال در حوزهٔ صنعت مربوطه استفاده گردید. همچنین، نرخ ناسازگاری برای کلیهٔ قضاوت‌ها در محدودهٔ قابل قبول (کمتر از ۰/۱)

جدول ۳: توصیه های ایمنی در مطالعه حاضر بر اساس یافته های HFACS

توصیه / اقدام ایمنی پیشنهادی
تکیه‌گاه مکانیکی (Thrust Roller)
قفل‌کن مکانیکی روتیتور بر روی ریل
سامانه پایش و تشخیص انحراف مخزن همراه با آلارم صوتی
سامانه پایش و تشخیص انحراف مخزن و سامانه توقف خودکار روتیتور ناشی از انحراف بیش از حد مخزن
استفاده از شل کمکی برای افزایش سطح تماس بین روتیتور و درام
استفاده از سیستم Anti-drift (سیستم کنترل و تصحیح خودکار انحراف درام)
سیستم پایش بار
رعایت توالی استاندارد ساخت درام
رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP) کاربری روتیتور
مقررات ایمنی: حضور سرپرست یا ناظر در محل
استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی)
روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری
ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار مخزن)
علامت‌گذاری دقیق برای پایش میزان دویدگی مخزن
رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های متحرک (Carriage) و پایه های نگهدارنده روتیتور
توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور
کنترل تلرانس حرکتی با گردش به جلو و چرخش معکوس
بازرسی دوره‌ای از اتصالات مکانیکی روتیتور و اجزای وابسته شامل پایه‌های متحرک (Carriage) و نگهدارنده
آموزش تخصصی کاربری روتیتور
بهره گیری از نیروی کار متخصص و آموزش دیده

جدول ۴: اطلاعات دموگرافیک شرکت‌کنندگان در مرحله وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش BWM

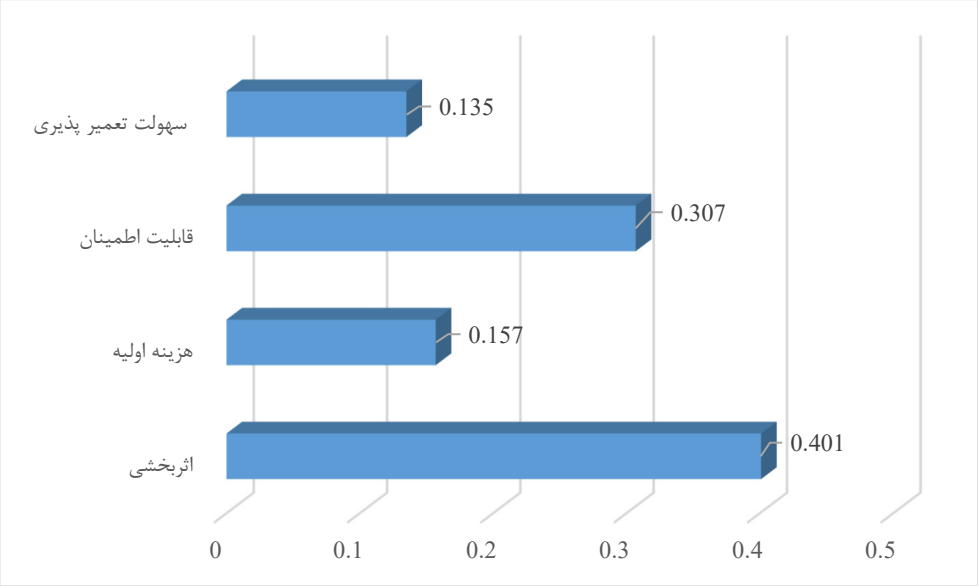
متغیر دموگرافیک	دسته بندی	فراوانی
جنسیت	مرد	۵
	زن	-
سن	کمتر از ۳۰	-
	۴۰-۳۰	۲
	۵۰-۴۰	۲
	بیش از ۵۰	۱
سابقه کاری (سال)	۱۰-۵	-
	۲۰-۱۰	۴
	۳۰-۲۰	-
	بیش از ۳۰	۱
سطح تحصیلات	کارشناسی	۱
	کارشناسی ارشد	۴
	دکتری تخصصی	-
عنوان / جایگاه شغلی	مدیر	۲
	سرپرست	۱
	کارشناس	۲

جدول ۵: مشخصات دموگرافیک مشارکت کنندگان به تفکیک افراد

کد خبره	تحصیلات	رشته تحصیلی	جایگاه شغلی	سابقه کاری (سال)
E1	کارشناسی ارشد	مهندسی مکانیک (گرایش تبدیل انرژی)	رئیس توسعه و بهبود فرایند های تولید	۱۷
E2	کارشناسی ارشد	مدیریت صنعتی	رئیس کارگاه ساخت مخازن	۱۵
E3	کارشناسی ارشد	مهندسی صنایع	کارشناس HSE	۱۵
E4	کارشناسی ارشد	مهندسی مکانیک	سرپرست تعمیرات و نگهداری تجهیزات تولید	۱۵
E5	کارشناسی	مهندسی برق	کارشناس مهندسی صنایع	۳۴

جدول ۶: اوزان و نرخ ناسازگاری معیارها

خبرگان	اثربخشی	هزینه اولیه	قابلیت اطمینان	سهولت تعمیر پذیری	نرخ ناسازگاری
خبره ۱	۰.۵۳۰	۰.۱۸۳	۰.۱۸۳	۰.۱۰۲	۰.۰۰۸۹
خبره ۲	۰.۵۸۷	۰.۲۱۷	۰.۱۳۰	۰.۰۶۵	۰.۰۱۴۶
خبره ۳	۰.۵۷۶	۰.۱۲۵	۰.۲۰۹	۰.۰۸۷	۰.۰۱۷۵
خبره ۴	۰.۲۱۰	۰.۱۵۷	۰.۵۶۱	۰.۷۰	۰.۰۱۸۸
خبره ۵	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۴۵	۰.۳۵	۰.۰۶۷۰
میانگین	۰.۴۰۱	۰.۱۵۷	۰.۳۰۷	۰.۱۳۵	-



شکل ٤: اوزان معیارها با استفاده از روش BWM

تأیید شدند. این امر نشان از سازگاری درونی و قابلیت اتکای مقایسات انجام شده دارد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روش BWM، معیار اثربخشی توصیه های ایمنی با وزن ۰/۴۰۱۰ به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور در انتخاب و ارزیابی اقدامات ایمنی پیشنهادی شناسایی شد. سایر معیارها شامل قابلیت اطمینان، هزینه اولیه و سهولت تعمیرپذیری به‌ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند (شکل ۴).

شکل ۵: مهم‌ترین توصیه های ایمنی شناسایی شده با استفاده از تکنیک TOPSIS

۵- رتبه‌بندی توصیه های ایمنی با استفاده از روش TOPSIS

نتایج رتبه‌بندی توصیه های ایمنی و کنترلی نشان داد که استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه‌دار با ظرفیت مشخص (دارای گواهینامه بازرسی) با ضریب نزدیکی ۰،۸۲۲، مهم‌ترین توصیه ایمنی محسوب می‌شود. همچنین، توصیه های ایمنی شامل رعایت توالی ساخت درام و حضور سرپرست یا ناظر در محل با ضریب نزدیکی ۰،۷۴۹ و ۰،۶۹۸، به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند (شکل ۵). در مقابل، توصیه های ایمنی نظیر سیستم پایش بار و علامت‌گذاری دقیق برای پایش میزان دویدگی درام در پایین‌ترین رتبه‌ها قرار گرفتند. سایر توصیه ها، مانند سامانه پایش و تشخیص انحراف درام با توقف خودکار روتیتور، رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP) و روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن در رتبه‌های میانی قرار گرفتند (جدول ۷).

بحث

مطالعه حاضر با هدف تحلیل حادثه رخ داده در یک صنعت ساخت بویلر (حادثه سقوط درام از روی روتیتور) با استفاده از تکنیک HFACS و بررسی فاکتورهای سازمانی و انسانی موثر بر رخداد حادثه انجام شد. این تحلیل نشان داد که چندین دسته از علل به طور مکرر در هر چهار سطح HFACS تکرار می شوند.

بر اساس یافته های مطالعه حاضر در سطح اول HFACS در حادثه مورد مطالعه؛ خطای مبتنی بر مهارت، خطای ادراکی، تخلفات روتین و تخلفات استثنایی از جمله عوامل موثر در رخداد حادثه بودند. خطاهای مبتنی بر مهارت طی اجرای یک وظیفه روتین و کاملاً تمرین‌شده رخ می‌دهند و عمدتاً به آموزش، رویه‌ها یا مهارت‌های اپراتور مرتبط هستند؛ این خطاها می‌توانند منجر به بروز موقعیت‌های ناایمن شوند. نمونه‌های بارز آن شامل عدم اولویت‌بندی توجه و شکل‌گیری عادت‌های کاری نادرست است. بر اساس یافته‌ها، عدم علامت‌گذاری دقیق و پایش چشمی میزان دویدگی درام، به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در رخداد حادثه در مطالعه حاضر شناسایی شد که در چارچوب خطای مبتنی بر مهارت طبقه بندی می گردد. بر اساس مطالعه Hobbs و همکاران (۲۰۱۰)، خطاهای مبتنی بر مهارت عمدتاً در حین انجام وظایفی رخ می‌دهند که توسط الگوهای حسی- حرکتی خودکار یا بسیار تمرین‌شده کنترل می‌شوند و بنابراین

جدول ۷: نتایج رتبه‌بندی توصیه های ایمنی با استفاده از تکنیک TOPSIS

ردیف	توصیه /اقدام ایمنی پیشنهادی	فاصله از ایده‌ال مثبت (d_i^+)	فاصله از ایده‌ال منفی (d_i^-)	ضریب نزدیکی (CC_i)	رتبه
۱	تکیه‌گاه مکانیکی (Thrust Roller)	۰.۰۵۵	۰.۰۷۹	۰.۵۹۲	۱۰
۲	سیستم قفل‌کن مکانیکی روتیتور بر روی ریل	۰.۰۶۱	۰.۰۸۴	۰.۵۸۱	۱۱
۳	سامانه پایش و تشخیص انحراف درام همراه با الارم صوتی	۰.۰۶۵	۰.۰۶۸	۰.۵۱۱	۱۷
۴	سامانه پایش و تشخیص انحراف درام و سامانه توقف خودکار روتیتور ناشی از انحراف بیش از حد درام	۰.۰۵۰	۰.۰۸۵	۰.۶۳۲	۶
۵	شل کمکی برای افزایش سطح تماس بین روتیتور و درام	۰.۰۵۶	۰.۰۷۷	۰.۵۷۹	۱۲
۶	سامانه Anti-drift (سیستم کنترل و تصحیح خودکار انحراف درام)	۰.۰۸۳	۰.۰۹۵	۰.۵۳۳	۱۶
۷	سیستم پایش بار	۰.۰۸۱	۰.۰۶۳	۰.۴۳۶	۲۰
۸	رعایت توالی استاندارد ساخت درام	۰.۰۳۳	۰.۱۰۰	۰.۷۴۹	۲
۹	رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP) کاربری روتیتور	۰.۰۵۳	۰.۰۹۱	۰.۶۳۳	۵
۱۰	مقررات ایمنی: حضور سرپرست یا ناظر در محل	۰.۰۴۴	۰.۱۰۲	۰.۶۹۸	۳
۱۱	استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی)	۰.۰۲۳	۰.۱۰۶	۰.۸۲۲	۱
۱۲	روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری	۰.۰۴۵	۰.۰۸۸	۰.۶۶۰	۴
۱۳	ارزیابی ریسک طراحی (طراحی ایمن و پایدار مخزن)	۰.۰۶۱	۰.۰۹۱	۰.۵۹۹	۹
۱۴	علامت‌گذاری دقیق برای پایش میزان دویدگی مخزن	۰.۰۹۱	۰.۰۸۱	۰.۴۷۱	۱۹
۱۵	رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور نسبت به مقاومت مکانیکی فریم روتیتور و تجهیزات وابسته	۰.۰۶۴	۰.۰۷۸	۰.۵۴۹	۱۳
۱۶	توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور	۰.۰۵۱	۰.۰۸۷	۰.۶۳۰	۷
۱۷	کنترل تلرانس حرکتی با گردش به جلو و چرخش معکوس	۰.۰۷۵	۰.۰۸۶	۰.۵۳۴	۱۵
۱۸	بازرسی دوره ای از اتصالات مکانیکی روتیتور و تجهیزات وابسته شامل پایه‌های متحرک (Carriage) و نگهدارنده	۰.۰۶۷	۰.۰۶۹	۰.۵۰۷	۱۸
۱۹	آموزش تخصصی کاربری روتیتور	۰.۰۶۶	۰.۰۷۸	۰.۵۳۹	۱۴
۲۰	بهره گیری از نیروی کار متخصص و آموزش دیده	۰.۰۵۱	۰.۰۸۲	۰.۶۱۷	۸

اغلب خارج از حوزه آگاهی هوشیارانه اپراتور قرار دارند. یک نمونه کلاسیک از این نوع خطا در زیرمجموعه "بی‌توجهی"، پدیده عادت‌زدگی است؛ حالتی که در آن یک توالی عملیاتی آشنا و معمول، به‌صورت ناخواسته و برخلاف نیات آگاهانه فرد، فعال می‌گردد (۳۱). خطاهای ادراکی نظیر عدم بازرسی از اتصالات مکانیکی روتیتور و تجهیزات وابسته شامل پایه‌های متحرک (Carriage) و نگهدارنده ناشی از کاهش ورودی‌های حسی اپراتور بوده و در نهایت به تصمیم‌گیری بر اساس اطلاعات نادرست یا ناکافی منجر می‌شوند. نتایج مطالعه Asghari و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده است که عدم برگزاری جلسات توجیهی پیش از آغاز کار و شیفت های نامناسب کاری می تواند منجر به ایجاد خستگی و استرس گردد که در نهایت ممکن است منجر به بروز خطاهای ادراکی گردد (۱۷). مطالعه Celik و Cebi (۲۰۰۹) نیز خطاهای مبتنی بر مهارت را در حوادث دریایی عامل غالب معرفی نموده است. علاوه بر خطاهای مبتنی بر مهارت و تخلفات روتین که در مطالعاتی مانند Lenné و همکاران (۲۰۱۲) در معادن و Naghavi و همکاران (۲۰۱۹) در حوادث فضای محصور پرتکرار گزارش شده‌اند، در مطالعه حاضر، خطاهای ادراکی نیز نقش برجسته‌ای ایفا کرده‌اند (۷, ۱۹, ۳۲). وقوع همزمان خطاهای ادراکی (مانند عدم بازرسی اتصالات مکانیکی) در کنار خطاهای مبتنی بر مهارت نشان می‌دهد که در محیط‌های پیچیده فنی،

شکست در ادراک موقعیت می‌تواند حتی با وجود مهارت، به تصمیم‌گیری ناایمن منجر گردد. بنابراین، تمرکز صرف بر آموزش مهارت‌های عملیاتی کافی نبوده و تقویت آگاهی موقعیتی و آموزش‌های شبیه‌سازی شده برای درک مخاطرات پویا، ضروری به نظر می‌رسد.

در سطح دوم HFACS، در زیر معیار ابزار/ فناوری، عدم رعایت تناسب ظرفیت بارگیری روتیتور با مقاومت مکانیکی پایه های نگهدارنده (Carriage) و عدم توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور از جمله عوامل موثر در رخداد حادثه بودند. محیط فناوری به عواملی اشاره دارد که شامل طیف وسیعی از مسائل طراحی و اتوماسیون از جمله طراحی تجهیزات و کنترل‌ها، ویژگی‌های نمایشگر/رابط، چیدمان، عوامل وظیفه‌ای و اتوماسیون می‌شود. یافته‌های گذشته نشان داده است که عدم تجهیز ماشین‌آلات به حفاظ‌های مناسب، بی نظمی محیط کار، عدم اجرای نظام‌مند سیستم های مدیریت ایمنی و استفاده از تجهیزات و فناوری‌های قدیمی، از جمله عوامل موثر بر رخداد حوادث در محیط های صنعتی هستند. این فاکتورها، به‌نوبه خود، بستری فراهم می‌کنند که به طور مستقیم و غیرمستقیم احتمال وقوع خطاهای ادراکی و خطاهای مبتنی بر مهارت را در میان کارکنان افزایش می‌دهد (۱۷). یافته های مطالعه حاضر این مفهوم را تقویت می‌کند که حتی در حضور خطاهای انسانی، نقص ذاتی در طراحی یا انتخاب تجهیزات می‌تواند به عنوان یک پیش‌شرط قوی، سیستم را به سمت شکست سوق دهد. این امر لزوم ارزیابی ریسک مهندسی و بازرسی فنی مستقل تجهیزات پیش از بهره‌برداری را به وضوح نشان می‌دهد.

در سطح سوم HFACS در این مطالعه، نظارت ناکافی، برنامه ریزی نامناسب عملیات، شکست در اصلاح مشکل شناخته شده و تخلف نظارتی نظیر عدم علامت‌گذاری دقیق، عدم رعایت توالی ساخت درام، عدم وجود روش اجرایی استاندارد و عدم انجام بازرسی دقیق از اتصالات روتیتور و تجهیزات وابسته از جمله عوامل موثر در رخداد حادثه بود. در چارچوب نقش نظارتی، مسئولیت اصلی سرپرستان، ایجاد بستری برای موفقیت کارکنان از طریق ارائه راهنمایی، آموزش، رهبری، نظارت مستمر و مشوق‌های مناسب، به‌منظور تضمین اجرای ایمن و کارآمد وظایف است. برنامه ریزی مناسب عملیات در طول عملیات عادی سبب مدیریت ریسک های موجود می گردد. این یافته با مطالعاتی مانند Naghavi و همکاران (۲۰۱۹) که بر مدیریت ریسک ناکافی تأکید دارند، همسو است. فقدان یک SOP برای کاربری روتیتور، ممکن است منجر به خطاهای ادراکی و عملیاتی گردد (۳۲). انتخاب سرپرستان دارای تعهد به ایمنی، برگزاری دوره های آموزشی، استفاده از تجهیزات با قابلیت اطمینان بالا و تدوین رویه های کاری ایمن، از جمله عوامل موثر بر بهبود ایمنی و پیشگیری از حوادث در محیط های کاری است (۱۷). فقدان دستورالعمل شفاف نه تنها بر عملکرد اپراتور (سطح اول HFACS)، بلکه بر کیفیت نظارت و برنامه‌ریزی نیز سایه می‌اندازد. بنابراین، تدوین رویه های عملیاتی و مبتنی بر ریسک، یک اقدام نظارتی کلیدی است که می‌تواند هم از خطا پیشگیری نماید و هم چارچوبی برای نظارت مؤثر فراهم آورد.

در سطح چهارم HFACS، عواملی نظیر جو سازمانی مانند عدم وجود رویه‌های استاندارد عملیاتی، فرایند سازمانی مانند عدم وجود روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری به عنوان برخی از علل رخداد حادثه شناسایی شدند. سطح عوامل سازمانی در چارچوب HFACS به عنوان تأثیرگذارترین سطح مطرح است. عوامل در این سطح، علاوه بر تأثیرگذاری مستقیم بر ایمنی، به‌طور غیرمستقیم و از طریق تقویت کاستی‌ها در سطوح نظارتی و عملیاتی زیرمجموعه، زمینه را برای بروز خطاها و اعمال ناایمن فراهم می‌کنند (۱۷). یافته های مطالعه Oliveira و همکاران (۲۰۲۳)، فرایندهای سازمانی را به عنوان یکی از عوامل اثرگذار در حوادث صنایع ساختمانی گزارش نموده است. همچنین یافته های دیگر دستورالعمل های ضعیف و آموزش ناکافی را از عوامل موثر بر رخداد حوادث گزارش نموده اند.

تقویت فرهنگ ایمنی و به روز رسانی رویه ها از جمله عوامل موثر در پیشگیری از رخداد حادثه توصیه شده اند (۱۷, ۳۳). تحلیل حادثه مورد مطالعه نشان می‌دهد که سازمان با وجود برخورداری از منابع فنی، ممکن است دارای کاستی هایی در تخصیص و مدیریت این منابع باشد. این امر ضرورت یکپارچه سازی ملاحظات ایمنی در فرایندهای سازمانی مانند طراحی، برنامه‌ریزی مناسب تولید و مدیریت منابع انسانی را آشکار می‌سازد.

در مطالعه حاضر بر اساس نتایج حاصل از بکارگیری تکنیک HFACS در تحلیل حادثه، توصیه ها و اقدامات ایمنی پیشنهاد و بر اساس چهار معیار اصلی اثربخشی، هزینه اولیه، قابلیت اطمینان و سهولت تعمیرپذیری مورد ارزیابی قرار گرفته و اولویت بندی شدند. بر اساس یافته های این مطالعه در خصوص حادثه سقوط درام از روی روتیتور، پنج توصیه یا اقدام ایمنی پیشنهادی کلیدی که بر اساس چهار سطح شناسایی عوامل علی در تکنیک HFACS شناسایی شدند شامل (۱) استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه دار با ظرفیت های مشخص (استفاده از تجهیزات دارای گواهینامه بازرسی)، (۲) رعایت توالی استاندارد ساخت درام، (۳) حضور سرپرست یا ناظر در محل، (۴) روش اجرایی استاندارد جهت تعیین دقیق قطر، طول و مرکز ثقل مخازن انتخابی پیش از عملیات بهره برداری و (۵) توزیع یکنواخت بار بین بخش های محرک و هرزگرد روتیتور، بودند. توصیه ها و اقدامات ایمنی برای جلوگیری، کنترل یا کاهش رویدادها یا حوادث نامطلوب ارائه می شوند. ارزیابی توصیه های ایمنی وابسته به ظرفیت، قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، کارایی، توانایی تحمل بارها، یکپارچگی و استحکام آن ها است. تأثیر اقدامات ایمنی بر توالی رویداد در صورت عملکرد مطابق با هدف طراحی، توانایی عملکرد بر اساس تقاضا، توانایی عملکرد در طول توالی حوادث یا تحت تأثیر بارهای تصادفی معین، توانایی مقاومت در برابر خرابی‌ها و مناسب بودن یا جامع بودن اقدام در محافظت در برابر یک خطر خاص از جمله موارد موثر در ارزیابی توصیه ها و مداخلات ایمنی پیشنهادی هستند. کارآمدی در دستیابی به هدف، منابع مورد نیاز برای پیاده‌سازی و نگهداری، زمان مورد نیاز از ایده تا پیاده سازی و سهولت انجام تعمیرات از سایر عوامل اثرگذار بر ارزیابی توصیه های ایمنی می باشند (۲۴, ۲۵, ۳۴).

مطالعه حاضر با به‌کارگیری چارچوب ترکیبی HFACS-MCDM، رویکردی نظام‌مند برای شناسایی علل رخداد حادثه و اولویت‌بندی توصیه های ایمنی ارائه کرده است. با این حال، این مطالعه با محدودیت‌هایی نیز روبرو بوده است. از جمله محدودیت های مطالعه می توان به تمرکز بر یک حادثه خاص و تکیه بر قضاوت‌های ذهنی خبرگان در مراحل وزن دهی و اولویت بندی اشاره نمود. در مطالعات آتی به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای کاهش عدم قطعیت ناشی از قضاوت‌های ذهنی خبرگان در فرایند اولویت بندی توصیه‌های ایمنی پیشنهاد می‌گردد. بعلاوه، تحلیل حادثه با تکنیک‌های مبتنی بر تفکر سیستمی نظیر STAMP[1] یا FRAM[2] به منظور تحلیل جامع‌تر روابط غیرخطی و پیچیده در رخداد حادثه توصیه می‌شود. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان راهنمای کاربردی برای مدیران و متخصصان ایمنی در صنایع سنگین، به‌ویژه صنایع تولید بویلر، مورد استفاده قرار گیرد. پیاده‌سازی توصیه‌های ایمنی اولویت‌بندی‌شده شامل استفاده از تجهیزات شناسنامه‌دار، حضور ناظر و رعایت توالی استاندارد ساخت می‌تواند به صورت مستقیم در برنامه‌ریزی ایمنی، بازنگری رویه‌ها و آموزش پرسنل ادغام گردد.

کاربرد عملی یافته‌های مطالعه حاضر برای صنعت را می‌توان در قالب یک برنامه اقدام چند سطحی و یکپارچه تبیین نمود. در سطح پیشگیرانه مهندسی و سیستمی، ضروری است فرایندهای طراحی و تدارکات تجهیزات مورد بازنگری قرار گیرند. این امر مستلزم الزامی‌سازی ارزیابی ریسک طراحی به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از چرخه توسعه محصولات جدید و تدوین مشخصات فنی

1. System-Theoretic Accident Model And Processes (STAMP)
2. Functional Resonance Analysis Method (FRAM)

اجباری و مبتنی بر شواهد برای پارامترهای ایمنی است. استقرار یک سیستم نظارتی پیشگیرانه و مبتنی بر ابزار و فناوری سبب بهبود انطباق عملکرد ابزار با مشخصات طراحی، و اثربخشی آن ها می گردد. تدوین، آموزش و نهادینه‌سازی رویه‌های عملیاتی استاندارد برای کار با تجهیزات پیچیده و پرخطر که به‌طور صریح به مخاطرات ویژه آن‌ها می‌پردازد، می‌تواند به کاهش خطاهای ادراکی و عملیاتی در سطح اعمال ناایمن منجر شود. در سطح سازمانی، تقویت یادگیری سازمانی از حوادث و تاکید مؤثر بر حلقه های بازخورد اهمیت می یابد.

در جمع‌بندی، حادثه سقوط درام ممکن است بر اثر عواملی نظیر ضعف طراحی، عدم وجود کنترل‌های مهندسی، عدم رعایت توالی ساخت و تداخلات کاری و کمبود نظارت رخ داده باشد. وقوع چنین سناریویی بیانگر نیاز به بازنگری در طراحی، آموزش پرسنل، تدوین رویه‌های استاندارد عملیاتی کاربری روتیتور و به‌کارگیری تجهیزات ایمنی مکمل (از جمله سیستم‌های قفل‌کن مکانیکی) است.

نتیجه گیری

مطالعه حاضر با استفاده از ترکیب روش‌های HFACS، BWM و TOPSIS به شناسایی و تحلیل نظام‌مند فاکتورهای انسانی و سازمانی مؤثر در حادثه سقوط درام در یک صنعت تولید بویلر پرداخت. با توجه به نتایج حاصله، استفاده از تجهیزات گرداننده شناسنامه‌دار با ظرفیت‌های مشخص، رعایت توالی استاندارد ساخت درام و حضور سرپرست یا ناظر در محل به عنوان اولویت‌های اصلی اقدامات اصلاحی شناسایی شدند. اجرای این توصیه‌ها به‌صورت ساختاریافته می‌تواند نقش مهمی در پیشگیری از حوادث مشابه و تقویت لایه‌های حفاظتی ایفا نماید. در گام بعد، تدوین و نهادینه‌سازی رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP) کاربری روتیتور و طراحی آموزش‌های تخصصی و کاربردی می‌تواند به ارتقای مهارت‌های ادراکی و عملیاتی اپراتورها کمک شایانی نماید. همچنین، تقویت زیرساخت‌های سازمانی و فرهنگ ایمنی از طریق ایجاد سیستم‌های پایش و بازرسی دوره‌ای و استقرار فرایندهای مدیریت ریسک طراحی از سایر موارد بهبود ایمنی در محیط کار است. در نهایت، تعمیم روش ترکیبی HFACS-MCDM ارائه شده در این مطالعه به سایر حوادث و صنایع مشابه می‌تواند در شناسایی نظام‌مند عوامل مؤثر و اولویت‌بندی توصیه ها/اقدامات ایمنی نتایج ارزشمندی به همراه داشته باشد. با بهره‌گیری از این رویکرد تحلیلی و کاربردی، مدیران و تصمیم‌گیران صنعت می‌توانند منابع ایمنی خود را هدفمندتر تخصیص داده و اثربخشی سیاست‌های ایمنی را به شکل معنی داری افزایش دهند.

کد اخلاق

این مطالعه با کد اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.1403.148 بوسیله کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم پزشکی تهران مورد تایید قرار گرفته است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی مصوب در دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران به شماره 1403-4-294-74914 می باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

REFERENCES

1. Mahdavi M, Ghasemi F, Omidi L. The application of a systems thinking-based risk assessment method to identify hospital emergency evacuation risks. Hum Factors Ergon Manuf Serv Ind. 2025;35(3):e70001.
2. Ghasemi F, Kalatpour O, Salehi V, Omidi L. Why are emergency responses ineffective and inefficient? Lessons learnt from past events. J Loss Prev Process Ind. 2024;90:105335.
3. Salmon PM, Cornelissen M, Trotter MJ. Systems-based accident analysis methods: a comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. Saf Sci. 2012;50(4):1158-70.
4. Reason J. Human error. Cambridge: Cambridge University Press; 1990.
5. Ghasemi F, Zarei E, Ahmadi O. Tripod Beta methodology in incident investigation and analysis of complex systems. In: B Sk, editor. Safety causation analysis in sociotechnical systems: advanced models and techniques. Cham: Springer; 2024. p. 93-121.
6. Wiegmann DA, Shappell SA. Applying the human factors analysis and classification system (HFACS) to the analysis of commercial aviation accident data. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2001. Report No.: DOT/FAA/AM-01/3.
7. Lenné MG, Salmon PM, Liu CC, Trotter M. A systems approach to accident causation in mining: an application of the HFACS method. Accid Anal Prev. 2012;48:111-7.
8. Wang Y, Liu C, Xu H, Geng X, Wang Y, Liu Y. Analysis of the causes of falling accidents on building construction sites in China based on the HFACS model. Buildings. 2025;15(9):1412.
9. Chan WTK, Li WC, Yeun R, Wang T. Creating more viable safety recommendations in accident investigation by revising the human factors intervention matrix (HFIX). Int J Ind Ergon. 2025;107:103743.
10. Salehi V, Moradi G, Omidi L, Rahimi E. An MCDM approach to assessing influential factors on healthcare providers' safe performance during the COVID-19 pandemic: probing into demographic variables. J Saf Sci Resil. 2023;4(3):274-83.
11. Omidi L, Bahrami M, Dolatabad KM, Zakerian SA, Azam K. Mindful organizing mediates the relations between group safety climate and safety-related behaviors among operating room team members. Perioper Care Oper Room Manag. 2024;34:100351.
12. Omidi L, Dolatabad KM, Pilbeam C. Differences in perception of the importance of process safety indicators between experts in Iran and the West. J Safety Res. 2023;84:261-72.
13. Ghasemi F, Rahimi J. Failure mode and effect analysis of personal fall arrest system under the intuitionistic fuzzy environment. Heliyon. 2023;9(6):e16606.
14. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega. 2015;53:49-57.
15. Hwang CL, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey. Berlin: Springer; 1981.
16. Vanden Heuvel LN, Lorenzo DK, Jackson LO, Hanson WE, Rooney JJ, Walker DA. Root cause analysis handbook: a guide to efficient and effective incident investigation. 3rd ed. Brookfield, CT: Rothstein Publishing; 2008.
17. Asghari F, Hemmatjou R, Ghahramani A. Investigation of human factors contributing to accidents and unsafe acts of employees and their prioritization using HFACS, DEMATEL, and ANP methods: a case study in the rebar production unit of a steel manufacturing company. J Health Saf Work. 2025;15(3):627-50.
18. Wang J, Fan Y, Niu Y. Routes to failure: analysis of chemical accidents using the HFACS. J Loss Prev Process Ind. 2022;75:104695.
19. Celik M, Cebi S. Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents. Accid Anal Prev. 2009;41(1):66-75.
20. 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. J Loss Prev Process Ind. 2022;78:104823.
21. Patterson JM, Shappell SA. Operator error and system deficiencies: analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS. Accid Anal Prev. 2010;42(4):1379-85.
22. Paul P, Maiti J. The synergic role of sociotechnical and personal characteristics on work injuries in mines. Ergonomics. 2008;51(5):737-67.
23. Shappell S, Wiegmann D. A methodology for assessing safety programs targeting human error in aviation. Int J Aviat Psychol. 2009;19(3):252-69.

24. Sklet S. Safety barriers: definition, classification, and performance. J Loss Prev Process Ind. 2006;19(5):494-506.
25. Hollnagel E. The art of efficient man-machine interaction: improving the coupling between man and machine. In: Bainbridge L, editor. Expertise and technology: cognition, human-computer cooperation. Hove: Psychology Press; 2013. p. 229-41.
26. Chiu MC, Hsieh MC. Latent human error analysis and efficient improvement strategies by fuzzy TOPSIS in aviation maintenance tasks. Appl Ergon. 2016;54:136-47.
27. Omidi L, Salehi V, Zakerian SA, Saraji JN. Performance optimization of human factors and safety performance using an integrated DEA-TOPSIS approach: a case study in the process industry. Soc Sci Humanit Open. 2025;12:101766.
28. Omidi L, Salehi V, Zakerian S, Nasl Saraji J. Assessing the influence of safety climate-related factors on safety performance using an integrated Entropy-TOPSIS approach. J Ind Prod Eng. 2022;39(1):73-82.
29. Omidi L, Moradi G, Salehi V, Khosravifar M. A multi-criteria decision-making approach for prioritizing factors influencing healthcare workers' safety performance: a case of a women's hospital. J Saf Sustain. 2024;1(3):173-80.
30. Jahanshahloo GR, Lotfi FH, Izadikhah M. Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. Appl Math Comput. 2006;181(2):1544-51.
31. Hobbs A, Williamson A, Van Dongen HP. A circadian rhythm in skill-based errors in aviation maintenance. Chronobiol Int. 2010;27(6):1304-16.
32. Naghavi Z, Mortazavi SB, Hajizadeh E. Exploring the contributory factors of confined space accidents using accident investigation reports and semistructured interviews. Saf Health Work. 2019;10(3):305-13.
33. Oliveira SS, de Albuquerque Soares W, Vasconcelos BM. Fatal fall-from-height accidents: statistical treatment using the Human Factors Analysis and Classification System–HFACS. J Safety Res. 2023;86:118-26.
34. Petroleum Safety Authority Norway. Guidelines to regulations relating to management in the petroleum activities (the management regulations). Stavanger: PSA; 2002.