

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Application of the Functional Resonance Analysis Method to Identify Emerging Risks and Model Consequences in a Direct Reduction Iron Unit of the Steel Industry

Somayeh Kheirandish Sarabi¹, Shahram Vosooghi², Hossein Ebrahimi³, Hamidreza Azimi³, MohammadHossein Keyvani Boroujeni⁴, Saber Moradi Hanifi^{2*}

¹Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

²Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

³Department of Occupational Health Engineering, School of Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

⁴Student Research Committee, School of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received: 2026/04/26

Accepted: 2026/08/11

ABSTRACT

Introduction: Steel industry socio-technical systems involve non-linear human, technological, and organizational interactions. As traditional risk assessments often fail to capture emergent risks, this research employs the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to analyze operational variability. Additionally, PHAST 8.4 software models the consequences of accidents triggered by functional fluctuations, providing a comprehensive assessment of hazard zones.

Material and Methods: Conducted in 2025 at a Direct Reduction Iron (DRI) plant, this study used a two-phase approach. First, FRAM analysis utilized expert panels, interviews, and observations to map 14 systemic functions. After identifying functional variability, PHAST (v8.4) simulated catastrophic scenarios, translating abstract functional misalignments into concrete physical impact data.

Results: Using the FRAM method, a total of 14 functions and 42 interactions were identified within the direct reduction unit, among which 6 functions and 9 interactions were determined as critical points. The results indicated that certain organizational and human functions, including maintenance (F12), inspection (F13), and training (F14), act as essential preconditions for key technical functions such as the direct reduction furnace (F2) and the reformer (F6). Evaluation of time and accuracy variability showed that performance fluctuations in the reformer can lead to catastrophic scenarios, such as gas leakage and explosion. PHAST 8.4 modeling results for the reformer unit revealed that in the event of an accident, the 100% fatality radius could reach 15 meters, while under winter meteorological conditions, the thermal radiation impact zone could extend up to 16 meters along the gas pipelines.

Conclusion: This paper provides a practical framework for transitioning from a reactive to a proactive approach. By identifying hidden critical points arising from functional resonance, the findings can support managers in more targeted resource allocation. Furthermore, integrating FRAM with consequence modeling enables a more accurate understanding of accident-scenario propagation and supports the determination of safety boundaries in complex industrial systems.

Keywords: Risk, Steel industry, Systems theory, The functional resonance analysis method, Socio-technical Systems

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kheirandish Sarabi S., Vosooghi Sh., Ebrahimi H., Azimi H., Keyvani Boroujeni M.H., Moradi Hanifi S. Application of the Functional Resonance Analysis Method to Identify Emerging Risks and Model Consequences in a Direct Reduction Iron Unit of the Steel Industry. *J Health Saf Work*. 2026; 16(2): 396-421.

* Corresponding Author Email: moradi.sab@iums.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

The steel industry, as a highly complex socio-technical system, is characterized by tightly coupled human, organizational, and technological interactions that can generate non-linear and emergent safety risks. Despite significant advances in industrial safety management, accidents in such environments continue to occur due to performance variability and the inability of conventional risk assessment methods to capture dynamic system interactions. In particular, the Direct Reduction Iron (DRI) process poses significant safety challenges due to combustible gases, high-temperature operations, and strong interdependencies between technical and human functions.

Traditional risk assessment approaches are often limited in addressing emergent risks, as they primarily rely on linear cause-and-effect relationships and fail to adequately account for system variability and functional interactions. Although systemic approaches such as FRAM have been introduced to analyze performance variability in complex systems, their qualitative nature restricts direct quantification of accident consequences. On the other hand, consequence modeling tools such as PHAST can accurately simulate the physical impacts of hazardous scenarios but cannot incorporate systemic functional interactions.

To address this gap, the present study proposes an integrated approach combining FRAM and PHAST for comprehensive risk analysis in a direct-reduction unit of a steel plant. The objective is to identify critical system functions and their variability-induced interactions using FRAM and subsequently quantify the potential consequences of these critical scenarios using PHAST. This integration enables a more holistic understanding of both systemic causes and physical impacts of industrial accidents, supporting improved risk assessment in complex industrial environments.

2. MATERIAL AND METHODS

This applied study, conducted in 2025, focuses on identifying emerging risks within a DRI unit. The methodology is structured as follows:

2-1- Expert Selection and Data Acquisition

A team of Subject Matter Experts (SMEs), including production managers and senior operators, was established. Data was gathered through direct observation, accident history review,

Standard Operating Procedures (SOPs), and semi-structured interviews.

2-2- Functional Modeling via FRAM

Based on the four fundamental principles of FRAM, the study prioritized Work-As-Done (WAD). Each system function was modeled using six aspects: Input, Output, Time, Control, Precondition, and Resources. Performance variability was quantified through scoring "Precision" (3 levels) and "Time" (4 levels).

2-3- Defuzzification and Deterministic Weighting

Expert judgments were processed using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) by converting linguistic terms into Trapezoidal Fuzzy Numbers. The fuzzy geometric mean was computed via Equation (1):

$$\tilde{S}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (1)$$

This was followed by normalization to determine fuzzy weights using Equation (2):

$$\tilde{w}_i = \tilde{S}_i \otimes (\tilde{S}_1 \otimes \tilde{S}_2 \otimes \dots \otimes \tilde{S}_n)^{-1} \quad (2)$$

Ultimately, the Center of Area (CoA) method was applied based on Equation (3):

$$\tilde{w}_i = \frac{(l_{w_i} + m_{lw_i} + m_{2w_i} + u_{w_i})}{4} \quad (3)$$

For defuzzification, providing deterministic weights to prioritize critical systemic functions and manage uncertainty accurately.

To address the inherent uncertainty and subjectivity in expert judgments during the weighting of evaluation criteria, the FAHP was employed. FAHP extends the classical AHP by incorporating fuzzy set theory, enabling more realistic modeling of ambiguity in human assessments. This approach allows systematic pairwise comparisons of criteria and improves the reliability of weight determination in complex decision-making problems.

2-4- Graphical Modeling via FMV pro.2.2.0

To visualize the intricate functional network, the specialized FMV pro.2.2.0 software was utilized. This tool enables the interactive representation of interdependencies between upstream and

Table 1: Input Parameter Specifications for PHAST Software

Titles		Specifications						
Reformer		Length (m)	Width (m)		Height (m)			
		42	15		17			
Process Parameters		Min. Temp (°C)	Max. Temp (°C)		Pressure (mmH ₂ O)			
		900	1200		-25			
Gas Composition		CH ₄ %	C ₂ H ₆ %	C ₃ H ₈ %	C ₄ H ₁₀ %	C ₅ H ₁₂ %	CO ₂ %	N ₂ %
Natural Gas		89.35	4.03	1.16	0.62	0.25	1.29	3.3
Process Fuel Gas			CH ₄ %	CO%	CO ₂ %	H ₂ %	H ₂ O%	N ₂ %
		Wet	6.19	20.95	18.57	45.71	5	3.7
		Dry	6.5	22	19.5	48	0	4
Weather Parameters		Relative Humidity (%)	Wind Speed (m/s)		Atmospheric Stability Class		Air Temp (°C)	
Spring	Day	20	3.5		C		22	
	Night	30	2.5		E		14	
Summer	Day	10	2.5		D		31	
	Night	18	1.8		F		22	
Autumn	Day	24	2.5		D		17	
	Night	34	1.8		E		10	
Winter	Day	38	2.0		F		6	
	Night	48	1.5		F		2	

downstream functions, mapping the aggregation of performance variability based on SME consensus.

2-5- Emerging Risk Identification and Resonance Management

By analyzing the interplay between internal and external variabilities, the phenomenon of Functional Resonance was identified. This resonance precipitates emerging risks. The systemic threats arising from complex interactions that traditional linear analysis tools fail to predict. Consequently, management strategies focusing on monitoring critical links and optimizing human-machine interactions were proposed.

2-6- Consequence Simulation via PHAST 8.4 and GIS Analysis

To quantify the physical impact of these emerging risks, accident scenarios (including explosion overpressure and thermal radiation) were simulated using PHAST 8.4. The simulation was specifically calibrated for the critical technological function (F6): reformer. Operational parameters and local meteorological data—including wind speed and Pasquil stability classes—were integrated into the model, as detailed in Table 1. Finally,

the resulting impact contours were mapped within a Geographic Information System (GIS) environment to demarcate safety perimeters and identify vulnerable zones within the DRI.

3. RESULTS AND DISCUSSION

This study used a panel of 12 SMEs with experience in the DRI unit to identify 14 functions across the human, technological, and organizational domains. Using FRAM, 42 functional couplings were mapped, establishing a baseline for how operational fluctuations propagate through the facility's socio-technical architecture and enabling comparison over time. To manage uncertainty and bias, FAHP quantified performance variability based on Time and "Precision phenotypes. By weighting judgments by education, experience, and rank, the study identified 9 critical couplings. The functional network and critical functions were visualized with FMV software (v2.2.0), as shown in Figure 1.

The functions with the potential to trigger functional resonance, along with their interactions throughout the DRI unit, have been identified and are indicated by . The analysis pinpointed the Reformer (F6) as the primary systemic

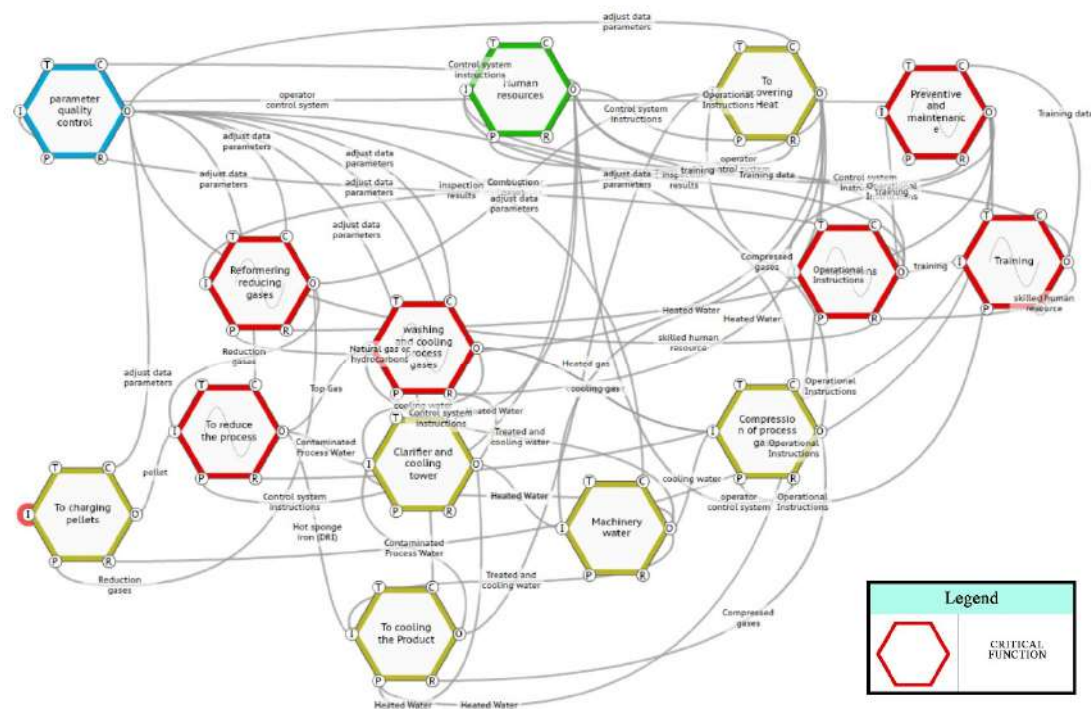


Fig. 1: Graphical representation of critical coupling using FMV software.

bottleneck, demonstrating that minor deviations in upstream functions—such as maintenance accuracy (F12)—can amplify through the network into severe downstream fluctuations. This confirms the principle of functional resonance, in which accidents arise from the alignment of everyday variabilities rather than isolated component failures.

The identified critical variability was subsequently integrated into PHAST 8.4 for consequence modeling of the Reformer's combustion chamber and feed lines revealed that flash-fire hazard radiation is significantly greater during the day due to atmospheric instability and mass transfer rates.

Figure 2 illustrates the flash fire hazard contours for the Reformer unit. Daytime scenarios exhibit significantly larger hazard radii than nighttime scenarios due to atmospheric instability. Specifically, the gas cloud reaches its maximum extent in spring, potentially impacting strategic access routes.

In total rupture scenarios, the fireball heat flux exceeded 110 kW/m^2 , resulting in a 100% lethality radius of 15 meters across all seasons. Furthermore,

the high methane content in natural gas feed lines led to a broader impact radius compared to process fuel lines, indicating that chemical composition and source pressure often override seasonal atmospheric effects in catastrophic release events.

The gap between qualitative functional analysis and quantitative physical impact assessment remains a key limitation in current safety studies. Recent works (e.g., Salehi, 2025; Slater, 2025) have primarily focused on advanced simulation and data-driven approaches such as neural modeling for risk prediction and system behavior analysis. However, these approaches often lack an explicit linkage between functional performance variability and the resulting physical consequence modeling.

In contrast, the proposed FRAM-PHAST integration provides a structured pathway to connect system-level functional variability with quantified hazard consequences, enabling a more coherent representation of accident propagation from operational deviations to physical damage outcomes. Nevertheless, the approach is still subject to limitations, including potential uncertainty in expert judgments and simplifications in representing complex physical obstructions in explosion modeling.

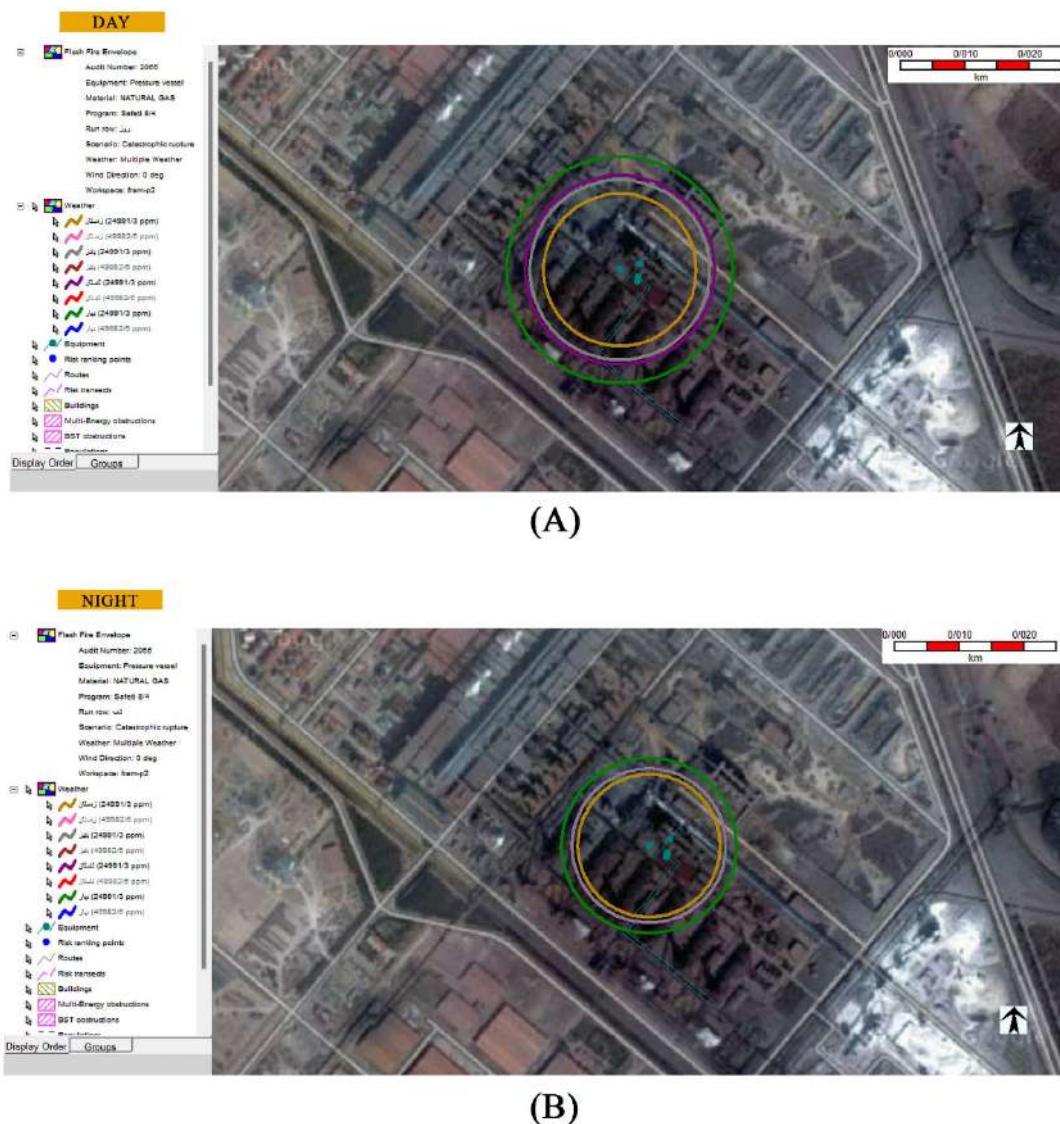


Fig. 2: Contour maps of the Flash Fire hazard zone resulting from natural gas (A) in the day and (B) at night.

4. CONCLUSIONS

This research provides a framework for transitioning from reactive to proactive safety, enabling managers to identify hidden critical points arising from functional interactions. By focusing on targeted resource allocation at systemic bottlenecks, unnecessary costs can be reduced. Furthermore, integrating functional resonance modeling with PHAST software allows for more precise emergency response planning and the determination of safety perimeters based on actual impact radii. This innovative approach offers

a powerful tool for strategic decision-making in complex industrial systems, significantly enhancing operational resilience in the face of uncertainties.

6. ETHICAL CODE

This study is part of a research thesis conducted in partial fulfillment of the requirements for the Master's degree in Occupational Health and Safety Engineering, with ethics code IR.IUMS.REC.1403.846. The study was supported by the Research and Technology Vice-Chancellor of Iran University of Medical Sciences.

بکارگیری روش تحلیل تشدید عملکردی در شناسایی ریسک‌های نوظهور واحد احیاء مستقیم صنعت فولاد و مدل‌سازی پیامدهای مرتبط

سمیه خیراندیش سرابی^۱، شهرام وثوقی^۲، حسین ابراهیمی^۳، حمیدرضا عظیمی^۴، محمدحسین کیوانی بروجنی^۵،
صابر مرادی حنیفی^{*۲}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۲مرکز تحقیقات بهداشت کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۳مرکز تحقیقات آلودگی هوا، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۴گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
^۵کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۰

چکیده

مقدمه: سیستم‌های فنی-اجتماعی فولاد نیازمند مدیریت تعاملات غیرخطی هستند. به دلیل محدودیت روش‌های سنتی، این پژوهش با روش FRAM ریسک‌های نوظهور را شناسایی و با نرم‌افزار PHAST، پیامد حوادث و محدوده اثر آن‌ها را به‌دقت مدل‌سازی کرده است.

روش کار: این مطالعه کاربردی سال ۱۴۰۴ در واحد احیاء مستقیم فولاد انجام شد. با روش FRAM، عملکردهای کلیدی و تغییرپذیری‌های سیستم از طریق پنل خبرگان و مصاحبه شناسایی گردید. پس از تحلیل تعاملات پیچیده فنی-اجتماعی و شناسایی ریسک‌های نوظهور، مدل‌سازی پیامدها با نرم‌افزار PHAST 8.4 انجام شد.

یافته‌ها: در این پژوهش با به‌کارگیری روش FRAM، تعداد ۱۴ عملکرد و ۴۲ تعامل در واحد احیاء مستقیم شناسایی شد که از میان آن‌ها ۶ عملکرد و ۹ تعامل به‌عنوان نقاط بحرانی تعیین گردیدند. نتایج نشان داد که برخی عملکردهای سازمانی و انسانی شامل تعمیرات (F۱۲)، بازرسی (F۱۳) و آموزش (F۱۴) به‌عنوان پیش‌شرط‌های حیاتی بر عملکردهای فنی نظیر کوره احیاء مستقیم (F۲) و ریفرمر (F۶) تأثیرگذار هستند. ارزیابی متغیرهای زمان و دقت مشخص کرد که نوسانات عملکردی در ریفرمر پتانسیل ایجاد سناریوهای فاجعه‌باری نظیر نشت گاز و انفجار را دارد. نتایج مدل‌سازی واحد ریفرمر با نرم‌افزار PHAST 8.4 نشان داد که در صورت بروز حادثه، شعاع مرگومیر ۱۰۰ درصدی به ۱۵ متر رسیده و در شرایط جوی زمستان، شعاع اثرگذاری شار حرارتی در خطوط گاز تا ۱۶ متر امتداد می‌یابد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش، چارچوبی کاربردی برای گذار از رویکرد ایمنی واکنشی به رویکرد پیشگیرانه فراهم می‌آورد. این مطالعه با شناسایی نقاط بحرانی پنهان ناشی از تشدید تعاملات عملکردی، می‌تواند به مدیران در تخصیص هدفمند منابع کمک کند. همچنین، تلفیق تحلیل FRAM با مدل‌سازی پیامد، امکان درک دقیق‌تر از گسترش اثرات سناریوهای حادثه و تعیین حریم‌های ایمنی در سیستم‌های پیچیده صنعتی را فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: ریسک، فولاد، نظریه سیستم‌ها، روش تحلیل تشدید عملکردی، سیستم‌های فنی-اجتماعی

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: moradi.sab@iums.ac.ir

مقدمه

سیستم‌های فنی-اجتماعی شبکه‌ای پویا از اجزای فن‌آوری، انسان‌ها و ساختارهای سازمانی^۱ هستند که برای تحقق اهدافی مشترک تعامل می‌کنند. عملکرد موفق این سیستم‌ها مستلزم هماهنگی ایمن میان این مؤلفه‌هاست؛ چراکه تعاملات آن‌ها می‌تواند موجب بروز ریسک باشد. چارلز پرو^۲ معتقد است در سیستم‌های درهم‌تنیده، وقوع حوادث به دلیل پیچیدگی و تعاملات غیرخطی، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر بوده و کنترل کامل بر آن‌ها ناممکن است (۱). کیم جی ویسنته^۳ تأکید دارد که ایمنی فراتر از طراحی فنی، مستلزم تحلیل تعامل انسان و فناوری در لایه‌های مختلف و بهینه‌سازی محیط شناختی کاربران است. در چنین سیستم‌هایی، رفتار کلی سیستم صرفاً حاصل عملکرد اجزای منفرد نیست، بلکه از تعاملات متقابل و گاه غیرخطی میان انسان، فنی و ساختارهای سازمانی پدید می‌آید. این ویژگی موجب می‌شود شناسایی و مدیریت ریسک در سیستم‌های فنی-اجتماعی پیچیده، به رویکردهایی فراتر از تحلیل‌های صرفاً خطی نیاز داشته باشد (۲).

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه زیرساختی و اقتصادی، نمونه‌ای بارز از سیستم‌های پیچیده فنی-اجتماعی محسوب می‌شود. در میان بخش‌های مختلف این صنعت، واحدهای احیاء مستقیم به دلیل استفاده از گازهای قابل اشتعال و سمی، دماهای عملیاتی بالا و وابستگی شدید به تعاملات انسانی، تجهیزاتی و سازمانی از جمله واحدهای پرخطر به شمار می‌روند (۳). مدیریت ایمنی در این واحدها مستلزم درک تعاملات پیچیده میان عوامل انسانی، فنی و سازمانی است و بخش قابل توجهی از ریسک‌های عملیاتی از همین تعاملات ناشی می‌شود (۴). بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی کار، سالانه میلیون‌ها نفر در اثر حوادث و بیماری‌های شغلی جان خود را از دست می‌دهند و صنعت فولاد نیز

1. Technological
2. Human
3. Organizational
4. Charles perrow
5. Kim vicente

همچنان با حوادثی نظیر انفجار، آتش‌سوزی، خفگی و حوادث مرتبط با تجهیزات فرایندی مواجه است (۵، ۶). پیچیدگی سیستم‌ها و تعاملات غیرخطی، کارآمدی روش‌های سنتی تحلیل ریسک را به چالش کشیده‌اند (۷). مطالعات انجام‌شده در صنایع هسته‌ای، نفت و گاز، هوانوردی و صنایع فرایندی نشان داده‌اند که بسیاری از حوادث بزرگ نه صرفاً در اثر خرابی تجهیزات یا خطای انسانی منفرد، بلکه در نتیجه تعاملات پیچیده و غیرمنتظره میان عوامل انسانی، فنی و سازمانی رخ می‌دهند (۸-۱۰). گزارش حادثه پالایشگاه تگزاس سیتی^۶ (۲۰۰۵) نیز بر شکست در تعامل میان سخت‌افزار، نرم‌افزار و انسان به عنوان علت ریشه‌ای تأکید دارد (۱۱). در همین راستا، دکر^۷ نیز معتقدند بخش عمده شکست‌های بزرگ مهندسی حاصل انباشت تدریجی تغییرات عملکردی و ناتوانی در شناسایی تعاملات نوظهور در سطح سیستم است (۱۲). روش‌های متداولی نظیر تحلیل حالات خرابی و آثار آن یا درخت خطا^۸ و مطالعه‌ی خطر و قابلیت عملکرد^۹ عمدتاً بر روابط خطی علت و معلولی استوار هستند و در تحلیل رفتارهای نوظهور ناشی از تعاملات پویا میان اجزای سیستم با محدودیت مواجه‌اند (۱۳، ۱۴). از این رو، نیاز به رویکردهای سیستمی که بتوانند تغییرپذیری عملکرد و تعاملات پیچیده میان اجزای سیستم را مدل‌سازی کنند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (۱۵).

در پاسخ به محدودیت رویکردهای سنتی، طی سال‌های اخیر رویکردهای سیستمی مبتنی بر مهندسی تاب‌آوری^{۱۰} برای تحلیل رفتار سیستم‌های پیچیده توسعه یافته‌اند (۱۶). با افزایش پیچیدگی تعاملات انسان-ماشین، اریک هولناگل^{۱۱} در دهه ۲۰۱۰، رویکرد ایمنی سطح دو^{۱۲} را معرفی کرد (۸). در این رویکرد، ایمنی به معنای توانایی سیستم برای تداوم عملکردهای موفق در شرایط متغیر و غیرقابل پیش‌بینی تعریف می‌شود. برخلاف دیدگاه سنتی،

6. Texas city refinery explosion

7. Sidney dekker

8. Fault tree analysis (FTA)

9. Hazard and operability study (HAZOP)

10. Resilience engineering (RE)

11. Erik hollnagel

12. Safety-II

ایمنی سطح دو بر بررسی نحوه انجام درست فعالیت‌های روزمره تمرکز داشته و سیستم را مجموعه‌ای یکپارچه و تعاملی می‌بیند (۱۷).

لذا امروزه بهره‌گیری از رویکردهای نوین سیستمی نظیر روش تحلیل تشدید عملکردی، نقشه حادثه^۱ و مدل و فرآیندهای حوادث مبتنی بر نظریه سیستمی^۲ برای مدل‌سازی این عملکردهای متغیر ضرورت یافته است (۱۸). اگرچه این مدل‌های سیستمی برای تحلیل حوادث و ارزیابی ریسک در سیستم‌های پیچیده اجتماعی-فنی توسعه یافته‌اند، اما هر یک تمرکز متفاوتی دارند. مدل‌هایی نظیر AcciMap و STAMP عمدتاً بر ساختارهای کنترل سلسله‌مراتبی و شناسایی شکست‌های کنترلی تمرکز دارند که ماهیتی نسبتاً ایستا دارند. در مقابل، روش FRAM بر اساس پدیده تشدید عملکردی، بر پویایی سیستم و تغییرپذیری عملکردی روزمره تمرکز می‌کند. بر اساس مطالعه مروری دلیخون و همکاران (۲۰۲۲)، مزیت اصلی FRAM نسبت به STAMP و AcciMap در توانایی آن برای مدل‌سازی روابط غیرخطی و درک این نکته است که حوادث صرفاً ناشی از شکست قطعات یا خطای انسانی نیستند، بلکه حاصل هم‌افزایی تغییرپذیری عادی عملکرد در بخش‌های مختلف سیستم هستند. لذا با توجه به ماهیت پویا و غیرخطی فرآیند مورد مطالعه در پژوهش حاضر، روش FRAM برای شناسایی تشدید عملکردی انتخاب گردید (۱۹).

هولناکل روش FRAM را در سال ۲۰۰۴ ابزار برای ارزیابی حوادث ارائه کرد (۲۰) و سپس این روش از سال ۲۰۱۲ به‌عنوان ابزاری جامع برای ارزیابی سطح ریسک ایمنی شناخته شد (۲۱).

FRAM با تکیه بر چهار اصل (برابری موفقیت و شکست، هماهنگی با شرایط، ظهور پیامدها و تشدید عملکردی) برای مدل‌سازی عملکردهای عادی و تحلیل تغییرپذیری انسانی-سازمانی توسعه یافت. این تغییرپذیری حاصل تعاملات در سیستم‌های فنی-اجتماعی پیچیده است که

شرایط مختلف، نتایجی متنوع و گاه پیش‌بینی‌ناپذیر ایجاد کرده و می‌تواند با تشدید عملکردی، به بروز پیامدهای ناخواسته منجر شود (۲۲).

اعتباربخشی روش FRAM توسط نیکلاس گرب^۴ توانایی این متد را در شناسایی ریسک‌های نوظهور تأیید کرد. انتخاب FRAM به دلیل قابلیت آن در مدل‌سازی تعاملات انسانی-فنی، تحلیل پویایی عملکردهای عادی و پرهیز از ساده‌سازی بیش از حد است (۲۳) که دانش عملی و سازگاری‌های کارگران در مواجهه با شرایط غیرمنتظره را به‌عنوان منبعی برای تاب‌آوری سیستم معرفی می‌کند (۴).

از ویژگی‌های کلیدی این روش، مقایسه نظام‌مند کارمتصورشده^۵ با کارانجام‌شده^۶ است که سازگاری کارگران را منبع تاب‌آوری سیستم می‌داند (۲۴). FRAM با رویکردی کل‌نگر به بررسی رفتارهای واقعی عملیات می‌پردازد؛ هرچند به دلیل ماهیت کیفی آن، پژوهش‌های اخیر بر لزوم ترکیب این روش با رویکردهای مکمل برای تقویت قابلیت‌های تحلیلی و اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر در سیستم‌های فنی-اجتماعی تأکید دارند (۲۵).

در روش FRAM، سیستم را در سه سطح: «انسانی» که بازتاب‌دهنده تعاملات منعطف افراد در پاسخ به شرایط؛ «سازمانی» که با چارچوب و مقررات حاکم بر فعالیت‌های جمعی و «فنی» که شامل زیرساخت‌های فیزیکی، اتوماسیون و تجهیزات فرآیندی تحلیل می‌نماید. انحراف در این سطوح بخشی از یک تشدید عملکردی تلقی شده که می‌تواند منجر به پیامدهایی چون رهاسازی مواد خطرناک گردد (۴). بنابراین آن دسته از عملکردهای فنی که طی تحلیل تغییرپذیری، به عنوان نقاط بحرانی سیستم شناسایی شده و پتانسیل بالایی در انتقال یا تشدید نوسانات عملکردی به سایر بخش‌ها دارند، نه تنها به عنوان نقاط آغازین سناریوهای حادثه قلمداد می‌شوند، بلکه به عنوان ورودی‌های کلیدی جهت تعیین دقیق‌تر پیامدها و مدل‌سازی حریم‌های آسیب در ابزارهای

4. Niklas grabbe

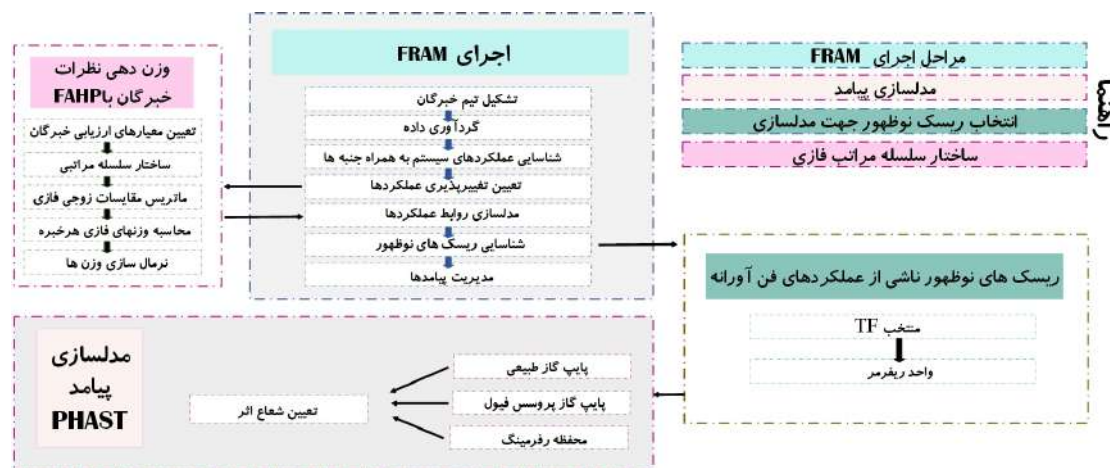
5. Work-as-imagined (WAI)

6. Work as done (WAD)

1. The functional resonance analysis method (FRAM)

2. Accimap

3. Systems-theoretic accident model and processes (STAMP)



شکل ۱: مراحل انجام مطالعه

علل کیفی و ارزیابی کمی پیامدهای فیزیکی است. اگرچه FRAM در شناسایی ریشه‌های نوظهور ریسک و تعاملات پویا توانمند است، اما ماهیت کیفی آن امکان کمی‌سازی دقیق پیامدهای فیزیکی را فراهم نمی‌کند. از سوی دیگر، ابزارهای مدل‌سازی پیامد مانند PHAST اگرچه توانایی دقیق در محاسبه حریم‌های خطر دارند، اما فاقد مکانیسمی برای تحلیل عملکردهای دارای تشدید در سیستم هستند. بنابراین، بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، استفاده از دو رویکرد مکمل شامل FRAM برای شناسایی و تحلیل علل سیستمی تغییرپذیری عملکرد و مدل‌سازی پیامد برای ارزیابی دامنه و شدت پیامدهای ناشی از سناریوهای شکست در واحد احیاء مستقیم صنعت فولاد است.

روش کار

این مطالعه کاربردی سال ۱۴۰۴ در واحد احیاء مستقیم فولاد انجام شد. فرآیند اجرای پژوهش به صورت گام‌به‌گام طراحی شده که نمای کلی آن در شکل (۱) ترسیم شده است.

۲-۱- چارچوب روش FRAM

گام اول- تشکیل تیم خبرگان

ابتدا اقدام به تشکیل تیم تخصصی خبرگان^۴ که می‌تواند متشکل از: مدیریت، مدیر تولید، کارشناس تولید،

تخصصی مدل‌سازی پیامد نظیر PHAST^۱، ALOHA^۲ و FLACS^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۶).

اگرچه FRAM در شناسایی عملکردهای بحرانی و تحلیل علل سیستمی توانمند است، اما ماهیت عمدتاً کیفی آن امکان برآورد کمی پیامدهای فیزیکی را فراهم نمی‌کند. از این‌رو، در مطالعات ایمنی فرایندی از ابزارهای مدل‌سازی پیامد نظیر PHAST برای تعیین شعاع پیامد ناشی از شکست استفاده می‌شود (۲۷، ۲۸) که اعتبار مدل‌های ترمودینامیکی آن در شبیه‌سازی رها سازی مواد خطرناک توسط Witlox و همکاران (۲۰۱۸) تأیید شده است (۲۹). استفاده از PHAST در این مطالعه برای تبدیل خروجی‌های فنی FRAM به معیارهای عینی بود. این ابزار وسعت آسیب نشت، حریق و انفجار را در قالب کانتورهای خطر ترسیم کرده تا محدوده اثرگذاری حوادث مشخص شود. این مدل‌سازی با لحاظ پارامترهای محیطی (دما، باد، رطوبت و کلاس پایداری)، مرزهای دقیق پیامدها را بر نقشه واحد صنعتی تعیین می‌کند. تلفیق FRAM و PHAST مدلی جامع ایجاد کرد که علاوه بر تبیین علل شکست، وسعت جغرافیایی، شار گرمایی و حریم خطر را به‌طور دقیق مدل‌سازی می‌کند.

یکی از چالش‌های بنیادین در مطالعات ایمنی سیستم‌های پیچیده، به‌ویژه در صنعت فولاد، شکاف موجود بین تحلیل

1. Process Hazard Analysis Software Tool
2. Areal Locations of Hazardous Atmospheres
3. Flame Acceleration Simulator

4. Subject Matter Experts (SMEs)

کارشناس ایمنی و اپراتورهای باسابقه باشد. معیارهای ورود برای انتخاب این افراد شامل داشتن حداقل سه سال سابقه کار تخصصی در واحد DRI و تسلط کامل بر فرآیندهای عملیاتی بود. همچنین جهت تضمین کیفیت داده‌ها، معیارهای خروج از جمله عدم تمایل به مشارکت مستمر در جلسات مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و یا عدم دسترسی به زمان کافی برای تکمیل فرآیند تحلیل لحاظ شد.

گام دوم- گردآوری اطلاعات

رایج‌ترین شیوه برای گردآوری داده‌ها: مشاهده دقیق فرآیند و بررسی سوابق حوادث، کلیه دستورالعمل‌های عملیاتی، مستندات فرآیندی و آئین‌نامه، ساختار سازمانی صنعت و انجام مصاحبه نیمه ساختاریافته SMEs است (۴). جلسات مصاحبه به صورت نیمه‌ساختاریافته با حضور SMEs برگزار گردید. پیش از شروع مصاحبه، روش FRAM و اهداف پژوهش برای SMEs تشریح شد تا با درک کاملی از چارچوب نظری مطالعه، اطلاعات لازم را ارائه دهند. در طول مصاحبه‌ها، پس از طرح سوالات کلیدی درباره فرآیندهای DRI، اعضاء تیم، آزاد بودند تا تجربیات و تعاملات را با جزئیات شرح دهند. همزمان، با بررسی جامع مستندات فنی، دستورالعمل‌های عملیاتی و کتابچه‌های راهنمای فرآیند DRI، عملکردهای سیستم شناسایی و استخراج شدند. این فرآیند گردآوری و تحلیل داده‌ها تا زمان رسیدن به اشباع داده‌ها ادامه یافت تا اطمینان حاصل شد که تمامی عملکردها و تعاملات اصلی سیستم پوشش داده شدند. سپس، محتوای مصاحبه‌ها به صورت نظام‌مند تحلیل و اطلاعات استخراج‌شده بر اساس شش جنبه روش FRAM سازمان‌دهی گردید. علاوه بر مصاحبه‌ها، جهت اعتبارسنجی و تکمیل داده‌ها، فرآیند مشاهده میدانی در واحد DRI انجام پذیرفت. این مشاهده‌ها با همراهی یکی از SMEs (کارشناس ایمنی دارای سابقه و تسلط کامل بر فرآیند) صورت گرفت. در این مرحله، از طریق بازبینی دقیق نقشه‌های جریان فرآیند و

نقشه‌های لوله‌کشی و ابزار دقیق، تمامی جریان‌های فیزیکی و اطلاعاتی سیستم به صورت جامع شناسایی و ثبت شدند. ترکیب داده‌های حاصل از مشاهده مستقیم، تحلیل اسناد فنی و مصاحبه‌های خبرگان، منجر به استخراج نهایی عملکردهای مدل FRAM گردید (۳۰).

گام سوم- شناسایی عملکردهای سیستم به همراه جنبه‌ها

بر اساس چهار اصل بنیادین روش FRAM (۱) برابری موفقیت‌ها و شکست‌ها، (۲) هماهنگی با شرایط موجود، (۳) اصل نوظهوری پیامدها و (۴) تشدید عملکردی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته منطبق بر فعالیت‌های روزانه انجام شد. در این فرآیند، تمرکز بر WAD به جای WAI معطوف گشته و عملکردها بر مبنای واقعیت‌های عملیاتی صنعت شناسایی شدند. در روش FRAM، هر عملکرد به صورت یک شش‌ضلعی ترسیم می‌شود که هر گوشه آن نماینده یک جنبه شامل ورودی، خروجی، زمان، کنترل، پیش‌شرط و منابع است. این شش جنبه ابعاد مختلف یک فعالیت را برای توصیف دقیق عملکرد پوشش می‌دهند (۴).

- ورودی: منابع، مواد یا اطلاعات لازم برای شروع فرایند و تولید خروجی.
- خروجی: نتیجه نهایی حاصل از اجرای یک فعالیت در سیستم.
- زمان: عاملی که چگونگی انجام یا تکمیل عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد
- کنترل: ابزارهای هدایت و نظارت شامل برنامه‌ها، دستورالعمل‌ها و الگوریتم‌های فرآیند.
- پیش‌شرط: شرایط یا وضعیت‌های ضروری که باید پیش از آغاز فعالیت برقرار باشند
- منابع: الزامات اجرای عملکرد که حین کار مصرف می‌شوند (نظیر انرژی، مهارت، ابزار و نیروی انسانی).

2. Piping and instrumentation diagram (P&ID)
3. Input
4. Output
5. Time
6. Control
7. Precondition
8. Resource

1. Process flow diagram (PFD)

جدول ۱: تبدیل ترم‌های زبانی به اعداد فازی دوزنقه‌ای

اهمیت کلامی	معادل	مقادیر ساعتی	اعداد فازی دوزنقه‌ای
برابر	Equally important	۱	(۱, ۱, ۱, ۱)
کمی مهم‌تر	Weakly important	۳	(۱, ۱, ۳, ۵)
مهم‌تر	Fairly important	۵	(۳, ۵, ۵, ۷)
خیلی مهم‌تر	Strongly important	۷	(۵, ۷, ۷, ۹)
خیلی زیاد مهم‌تر	Absolutely important	۹	(۷, ۹, ۹, ۹)

گام چهارم- تعیین تغییرپذیری‌های عملکردها

در این مرحله، تغییرپذیری عملکردی (نوسان در نحوه اجرای هر عملکرد) برای هر عملکرد شناسایی می‌شود. این تغییرپذیری ممکن است ریشه درونی (ناشی از ماهیت عملکرد)، بیرونی (متأثر از شرایط محیطی) یا ساختاری (ناشی از تعاملات بین عملکردها) داشته باشد. برای درک نحوه ایجاد ریسک‌های نوظهور، دو نوع تغییرپذیری بررسی می‌گردد: اول، «دقت»^۱ در سه سطح (دقیق: ۱، قابل قبول: ۲، غیردقیق: ۳) و «زمان»^۲ در چهار سطح (به‌موقع: ۱، خیلی زود: ۲، خیلی دیر: ۳ و انجام نشد: ۴) تا امکان تحلیل کمی فراهم شود (۳۱).

این سطوح، تأثیر عملکرد بالادستی بر پایین‌دستی را می‌سنجند. همچنین برای وزن‌دهی نهایی به نظرات خبرگان و مدیریت عدم قطعیت، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۳ جهت اولویت‌بندی شفاف معیارها استفاده شد (۳۲).

برای اجرای FAHP ابتدا ماتریس مقایسه زوجی فازی ترسیم و سپس مقادیر ترم‌های زبانی با استفاده از جدول (۱) به اعداد فازی دوزنقه‌ای^۴ تبدیل می‌شوند (۳۳).

برای محاسبه میانگین هندسی فازی ($\tilde{r}_i$) از رابطه (۱) استفاده می‌شود (۳۴):

$$\tilde{S}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

جهت محاسبه وزن فازی هر معیار ($\tilde{w}_i$) برای

1. Time
2. Precision
3. Fuzzy analytic hierarchical process (FAHP)
4. Trapezoidal fuzzy numbers (TFNs)

نرمال‌سازی میانگین‌های هندسی از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$\tilde{w}_i = \tilde{S}_i \otimes (\tilde{S}_1 \otimes \tilde{S}_2 \otimes \dots \otimes \tilde{S}_n)^{-1} \quad (۲)$$

و در نهایت برای غیرفازی‌سازی از معیار میانگین‌گیری وزنی نقاط دوزنقه‌ای فازی با روش مرکز سطح (CoA) از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$\tilde{w}_i = \frac{(l_{w_i} + m_{1w_i} + m_{2w_i} + u_{w_i})}{4} \quad (۳)$$

به منظور غلبه بر ماهیت کیفی عملکردها در روش FRAM و استخراج مقادیر وزنی تغییرپذیری در ابعاد زمان و دقت، روش ترکیبی FRAM-FAHP با تکیه بر رویکرد Tierra-Arévalo و همکاران (۲۰۲۳) پیاده‌سازی شد (۳۵). این فرآیند تجمیعی با هدف بهره‌گیری از نظرات SMEs صورت گرفت و نتایج حاصل از آن، جهت شناسایی عملکردهای دارای پتانسیل تشدید عملکردی، به عنوان داده‌های ورودی در نرم‌افزار FMV مورد استفاده قرار گرفتند

گام پنجم- مدل‌سازی عملکردها

برای ترسیم دقیق این ارتباطات، از نرم‌افزار FMV^{۲۰۲۰} (توسعه‌یافته توسط پروفیسور هولناگل) استفاده شد؛ این ابزار امکان نمایش تعاملی عملکردها و تحلیل ارتباطات آن‌ها را در قالب گراف‌های شبکه‌ای فراهم می‌کند (۳۸). در این راستا، ارتباطات بین عملکردهای بالادستی و پایین‌دستی بر اساس قضاوت خبرگان و با لحاظ کردن تجمیع اثرات تغییرپذیری، در نرم‌افزار تعریف و ترسیم گردید (۳۶).

5. FRAM model visualizer

جدول ۲: مشخصات پارامترهای ورودی به نرم افزار PHAST

مشخصات							عناوین
ارتفاع (m)				عرض (m)		طول (m)	ابعاد ریفرمر
۱۷				۱۵		۴۲	
فشار داخلی (mmH ₂ O)				دمای بیشینه (°C)		دمای کمینه (°C)	پارامترهای فرآیندی
-۲۵				۱۲۰۰		۹۰۰	
N ₂ %	CO ₂ %	C ₅ H ₁₂ %	C ₄ H ₁₀ %	C ₃ H ₈ %	C ₂ H ₆ %	CH ₄ %	ترکیبات گازها
۳/۳	۱/۲۹	۰/۲۵	۰/۶۲	۱/۱۶	۴/۰۳	۸۹/۳۵	گاز طبیعی
N ₂ %	H ₂ O%	H ₂ %	CO ₂ %	CO%	CH ₄ %		گاز فرآیندی
۳/۷	۵	۴۵/۷۱	۱۸/۵۷	۲۰/۹۵	۶/۱۹	تر	
۴	۰	۴۸	۱۹/۵	۲۲	۶/۵	خشک	
دمای هوا (°C)		کلاس پایداری جوی		سرعت باد (m/s)		رطوبت نسبی(%)	پارامترهای جوی
۲۲		C		۳/۵		۲۰	روز
۱۴		E		۲/۵		۳۰	شب
۳۱		D		۲/۵		۱۰	روز
۲۲		F		۱/۸		۱۸	شب
۱۷		D		۲/۵		۲۴	روز
۱۰		E		۱/۸		۳۴	شب
۶		F		۲/۰		۳۸	روز
۲		F		۱/۵		۴۸	شب

موج انفجار و شار حرارتی) از نقشه مقیاس بندی شده واحد مورد نظر استفاده گردید تا ابعاد محیطی و فاصله منبع حادثه تا دیگر زیرساخت‌ها به‌دقت لحاظ شود. هدف از این مدل‌سازی، تعیین دقیق شعاع آسیب در واحد احیاء مستقیم و شناسایی حریم‌های ایمن بر اساس سطوح آستانه است. انتخاب این آستانه‌ها و تحلیل نتایج، متناسب با ماهیت گازهای فرآیندی و شرایط جوی منطقه صورت گرفته که روشی استاندارد برای تعیین حریم‌های حفاظتی در صنایع فرآیندی محسوب می‌شود.

مشخصات جریان‌های گازی، پارامترهای عملیاتی و ابعاد تجهیزات در جدول (۲) ارائه شده است؛ این مقادیر جهت محاسبه نرخ نشت و توزیع انرژی، بر اساس خروجی‌های ریفمر تنظیم شده‌اند. همچنین برای شبیه‌سازی دقیق شعاع اثر، داده‌های هواشناسی بومی شامل سرعت باد، دما، رطوبت و کلاس‌های پایداری پاسکونیل (در فصول و نوبت‌های مختلف) به نرم‌افزار وارد شد. مطابق جدول (۲)، تمامی پارامترهای ورودی بر اساس ویژگی‌های عملکردی گلوگاه F6 (شناسایی شده توسط FRAM) انتخاب و کالیبره گردیده‌اند.

گام ششم- شناسایی ریسک‌های نوظهور

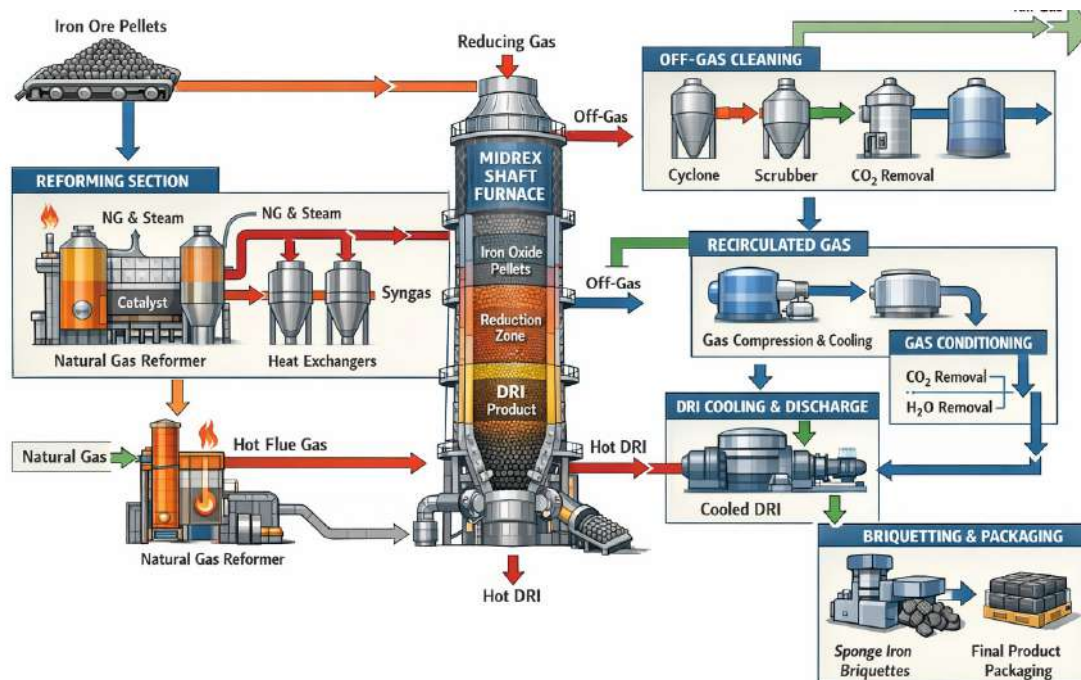
تغییرپذیری‌های داخلی و خارجی عملکردها (ناشی از ارتباط با سایر بخش‌ها) می‌توانند به تشدید و شکل‌گیری ریسک‌های نوظهور منجر شوند. این ریسک‌های سیستمی حاصل تعاملات پیچیده‌ای هستند که پیش‌تر در فجایع تاریخی یا با ابزارهای سنتی تحلیل حوادث، قابل پیش‌بینی و تجربه نبوده‌اند.

گام هفتم- مدیریت پیامدها

در نهایت اقداماتی برای کنترل تغییرپذیری‌های ناخواسته و تقویت عملکردهای مطلوب پیشنهاد می‌شود. پایش عملکردهای کلیدی، شناخت ارتباطات بحرانی و تحلیل عوامل تشدید، مبنای تصمیم‌گیری برای بهبود تعامل انسان-ماشین و کاهش خطر در سیستم‌های پیچیده است.

۲-۲-۲- مدل‌سازی پیامد

جهت ارزیابی پیامدهای ریسک‌های نوظهور، از نرم‌افزار PHAST 8.4 استفاده و کانتورهای شدت اثر



شکل ۲: نمای کلی DRI در صنعت فولاد

فنی تجهیزات مذکور می‌تواند به بروز حوادث بزرگ منجر گردد. از این‌رو، در این پژوهش مبنای شناسایی مخاطرات بر تحلیل تشدید عملکردی این زیرواحدها و مدل‌سازی حریم‌های آسیب ناشی از آن‌ها استوار گشته است.

یافته‌ها

نتایج روش FRAM

جهت شناسایی دقیق عملکردها و تعاملات در روش FRAM، تیمی متشکل از ۱۲ نفر از SMEs انتخاب گردیدند که مشخصات دموگرافیک آنان در جدول (۳) ارائه شده است.

جلسات مصاحبه نیمه ساختاریافته با حضور SMEs به صورت انفرادی و تیمی برگزار شد تا در نهایت ۱۴ عملکرد اصلی سیستم فنی-اجتماعی پیچیده واحد DRI در سه حوزه انسانی، فنی و سازمانی شناسایی شدند که در جدول (۴) نشان داده می‌شود.

سپس برای تمامی عملکردهای شناسایی شده در واحد DRI، جنبه‌های شش‌گانه روش FRAM (شامل

۲-۳- آشنایی با واحد احیاء مستقیم فولاد

واحد احیاء مستقیم^۱ (DRI) صنعت فولاد به دلیل ماهیت فرآیندی، از بخش‌های استراتژیک صنعتی محسوب می‌شوند. در این واحد، گندله‌های اکسیدی طی واکنش با گازهای احیایی (CO و H_2) در کوره به آهن اسفنجی تبدیل می‌گردند. گاز مورد نیاز در بخش ریفرمر، از طریق شکست حرارتی گاز طبیعی در حضور کاتالیزور تولید می‌شود. ریفرمر شامل مشعل‌های متعدد، لوله‌های حاوی کاتالیست و محفظه احتراق است که تحت دما و فشار بالا عمل می‌کند. کل فرآیند شامل چهار زیرسیستم اصلی: واحد ریفرمر (تولید گاز)، کوره احیا (واکنش اصلی)، سیستم غبارگیر (پاکسازی گاز) و واحد خنک‌کننده است که تعامل هماهنگ آن‌ها استمرار تولید را تضمین می‌کند.

عملکرد هماهنگ این تجهیزات مستلزم مدیریت دقیق جریان‌های حجیم گاز در دماهای عملیاتی بالا و فشار کنترل شده است. با توجه به ماهیت غیرخطی و پیوستگی این فرآیندها، هرگونه انحراف در عملکردهای

1. Direct reduction iron

جدول ۳: مشخصات SMEs

ردیف	سمت سازمانی	جنسیت	سابقه کار	سن	تحصیلات	کد خبره ^۱
۱	رئیس واحد تولید	مرد	۲۷	۵۳	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	E1
۲	سرپرست تولید	مرد	۲۵	۵۰	کارشناسی مهندسی متالورژی	E2
۳	کارشناسان دفتر فنی	مرد	۱۳	۴۰	کارشناسی مهندسی شیمی	E3
۴		مرد	۱۱	۳۹	دیپلم فنی	E4
۵	کارشناس ابزار دقیق	مرد	۵	۳۴	کارشناسی مهندسی مکانیک	E5
۶	کارشناس ایمنی ناحیه	مرد	۱۷	۴۱	کارشناسی ارشد HSE	E6
۷	اپراتورهای سایت	مرد	۶	۲۸	فوق دیپلم برق صنعتی	E7
۸		مرد	۱۷	۴۱	کاردانی مکانیک	E8
۹		مرد	۵	۳۶	دیپلم فنی	E9
۱۰	کارشناس تعمیرات	مرد	۲۱	۳۹	کارشناسی مهندسی برق	E10
۱۱	اپراتور اتاق کنترل	مرد	۶	۴۲	فوق دیپلم کنترل فرآیند	E11
۱۲		مرد	۷	۳۴	کارشناسی مهندسی مواد	E12

^۱ Expert (E)

جدول ۴: توصیف عملکردهای شناسایی شده در واحد DRI

کد	عملکرد	تعریف و توصیف عملکرد
F1	شارژ گندله اکسیدی و تخلیه و انتقال آن	شارژ و تامین گندله‌های سنگ آهن جهت بارگذاری در کوره‌های احیاء
F2	فرآیند احیاء (کربن دهی در کوره احیاء مستقیم)	تبدیل گندله‌های اکسیدی به آهن اسفنجی بوسیله گازهای احیاء کننده
F3	شستشو و خنک کاری گازهای فرآیندی	پاکسازی از ناخالصی‌ها یا ذرات جامد و کاهش دمای گازهای خروجی از کوره
F4	کمپرسورهای پروسس و کولینگ	فشرده‌سازی گازهای فرآیندی برای انتقال یا استفاده مجدد در فرآیند و خنک کاری گازهای فشرده شده
F5	سیستم بازیاب حرارتی	بازیابی حرارت تلف شده از گازهای داغ خروجی و تبدیل آن به انرژی قابل استفاده
F6	ریفرورمر و تولید گازهای احیاء	تبدیل گاز طبیعی یا سایر هیدروکربن‌ها به گازهای احیاء کننده
F7	سیستم خنک کاری محصول	کاهش دمای آهن اسفنجی تولیدشده پس از خروج از کوره احیاء مستقیم
F8	سیستم آب ماشینری	سیستمی گردش آب یا مایعات خنک کننده برای جلوگیری از دمای بیش از حد بالا
F9	سیستم کلاریفایر و کولینگ تاور	جداسازی و تصفیه ذرات جامد و ناخالصی‌ها از آب فرآیندی و خنک کاری آن
F10	نیروی انسانی	مدیریت، نظارت، اجرا، و نگهداری کلیه فعالیت‌ها و سیستم‌ها.
F11	سیستم کنترل پارامترهای فرآیندی و کیفیت محصول	کنترل و تنظیم پارامترهای فرآیند (مانند دما، فشار، جریان مواد و ترکیب گازها)
F12	تعمیرات پیشگیرانه و برنامه ریزی شده	برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به‌صورت دوره‌ای و پیشگیرانه
F13	بازرسی‌ها	بررسی‌های دوره‌ای، نظارت بر شرایط عملیاتی
F14	آموزش	توسعه مهارت‌ها، دانش و توانایی‌های نیروی انسانی

^۱ Functions (F)

نیمه‌ساختاریافته با SMEs جهت سنجش حساسیت عملکردها به دو بُعد «زمان» و «دقت» انجام شد. در این جلسات، پیامدهای ناشی از خطا یا تأخیر در هر عملکرد بررسی و پاسخ‌ها در سه سطح اثر تقویتی، بی‌اثر و کاهش‌ی جهت استخراج ضرایب اهمیت طبقه‌بندی شدند. سپس با نرم‌افزار FMVpro.2.2.0، مدل گرافیکی ۱۴ عملکرد واحد DRI و تعاملات آن‌ها ترسیم شد (شکل ۴)؛ این مدل مبنای تحلیل مسیرهای انتشار تغییرپذیری، شناسایی نقاط بحرانی و تخمین ریسک‌های نوظهور قرار گرفت.

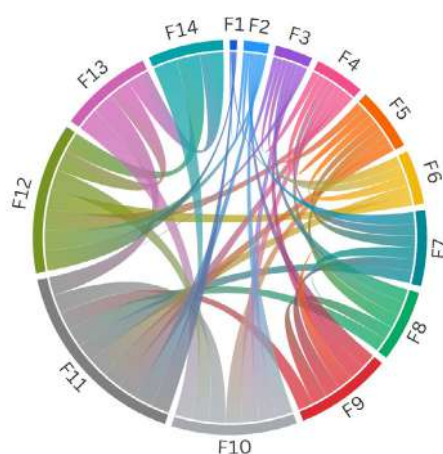
ورودی، خروجی، پیش‌شرط، منابع، کنترل و زمان) و همچنین تعاملات بین عملکردی توسط SMEs تعیین گردید. جدول (۵) نمونه‌ای از تحلیل جامع جنبه‌ها و تعاملات را برای عملکرد «شارژ و تخلیه گندله با کد F1» نشان می‌دهد.

در نهایت ۴۲ تعامل در سیستم فنی-اجتماعی پیچیده واحد DRI تعیین شد. شکل (۳) تمامی تعاملات میان عملکردها و جنبه‌های آنها را نشان می‌دهد.

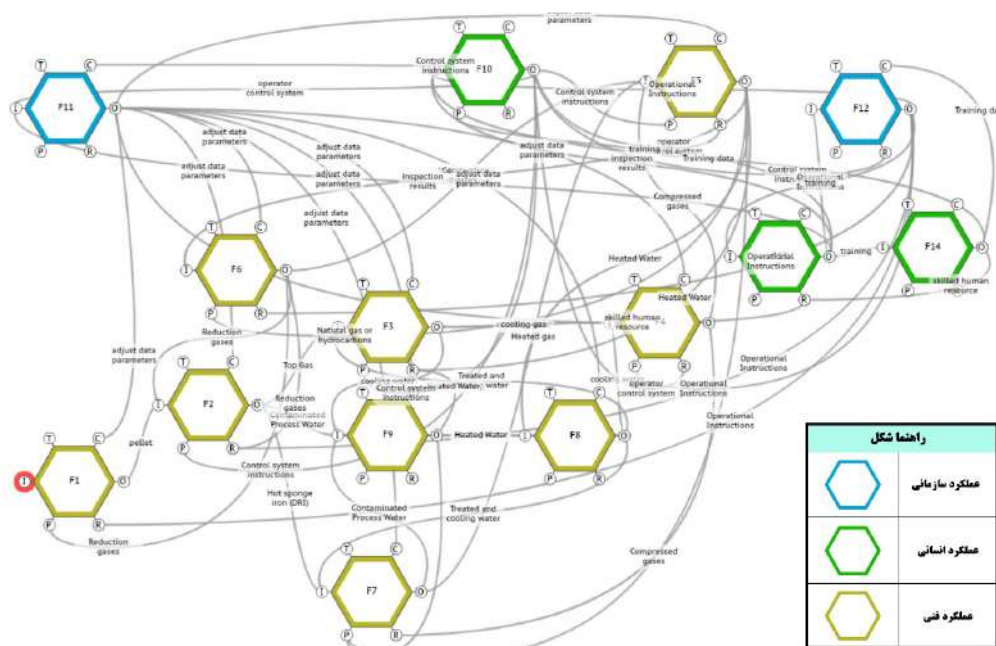
برای ارزیابی تغییرپذیری، مصاحبه‌های

جدول ۵: نمونه ای از عملکردهای شناسایی شده واحد DRI به همراه جنبه‌ها و تعاملات آن

عملکرد	جنبه‌ها	توصیف جنبه‌ها	تعاملات	توصیف تعاملات
F1	ورودی	گندله‌های اکسیدی	F1(O) → F2(I) انتقال گندله به کوره احیاء جهت انجام فرآیند کربن‌دهی	توزیع ناهمگن دانه بندی گندله ← کاهش نفوذپذیری بستر در کوره
	خروجی	آهن اسفنجی تولید شده		
	پیش شرط	وجود گندله‌های اکسیدی با کیفیت مناسب، اطمینان از عملکرد صحیح تجهیزات انتقال و شارژ		
	منابع	تجهیزات مکانیکی: نوار نقاله، سیستم‌های شارژ و...	F1(R) → F11(O) داده های نظارتی (مانند دانه بندی و رطوبت) به سیستم کنترل کیفیت	خطا در سنسورها ← تولید آهن اسفنجی با متالیزاسیون نامناسب
	کنترل	دستورالعمل‌های عملیاتی، سیستم‌های کنترل، نظارت اپراتورها بر فرآیند		
	زمان	همزمان با تولید مستمر روزانه		



شکل ۳: دیاگرام بصری تمامی تعاملات واحد DRI



شکل ۴: ترسیم اولیه عملکردها و تعاملات در نرم‌افزار FMV

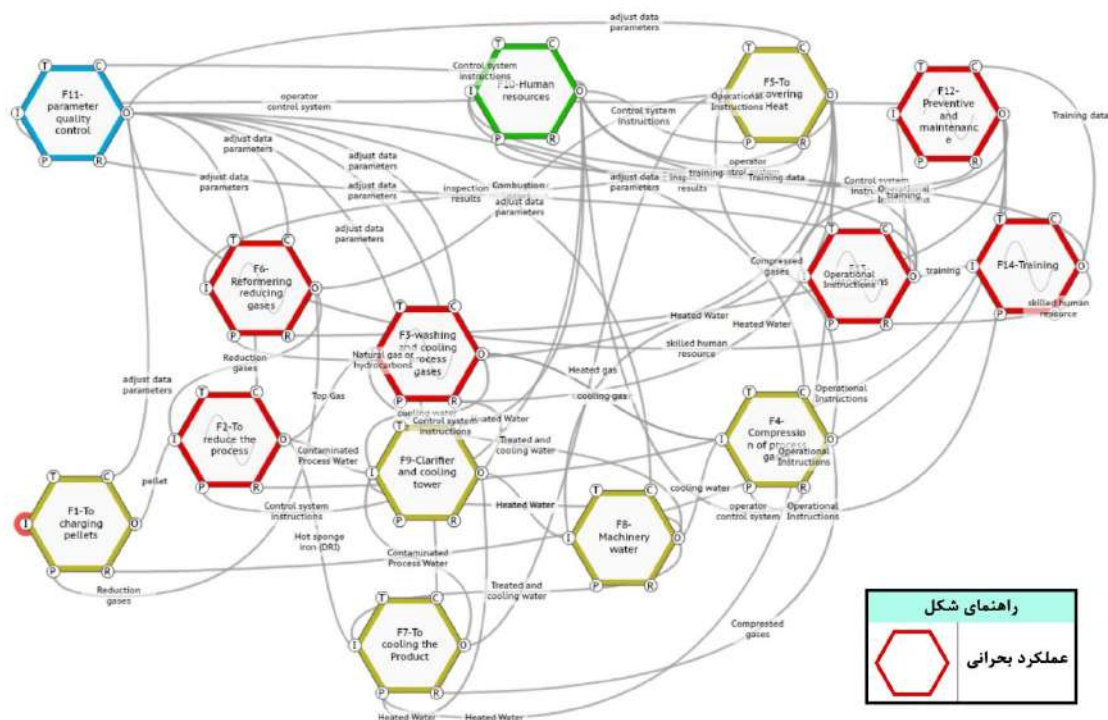
جدول ۶: وزن نهایی هر یک از متغیرهای «زمان» و «دقت» عملکردها^۱

P	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	T	T8	T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	کد
	total	۰.۱۳۴۵	۰.۱۰۲۵	۰.۰۶۵۴	۰.۱۲۳۹	۰.۱۲۱۷	۰.۱۱۷۳	۰.۱۷۵۹	total	۰.۱۳۴۵	۰.۱۰۲۵	۰.۰۶۵۴	۰.۱۲۳۹	۰.۱۲۱۷	۰.۱۱۷۳	۰.۱۵۸۸	۰.۱۷۵۹	
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	F1
	۰.۲۶۹	۰.۲۰۵	۰.۱۳۰۸	۰.۲۴۷۸	۰.۲۴۳۴	۰.۲۴۳۴	۰.۲۴۳۴	۰.۳۵۱۸	۱	۰.۱۳۴۵	۰.۱۰۲۵	۰.۰۶۵۴	۰.۱۲۳۹	۰.۱۲۱۷	۰.۱۱۷۳	۰.۱۵۸۸	۰.۱۷۵۹	F1
۲.۸۷۶۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱.۷۰۰۲	۲	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۱	F2
	۰.۴۰۳۵	۰.۳۰۷۵	۰.۱۹۶۲	۰.۲۴۷۸	۰.۲۴۷۸	۰.۲۵۱۹	۰.۲۴۷۸	۰.۳۵۱۸	۱.۷۰۰۲	۰.۲۶۹	۰.۳۰۷۵	۰.۰۶۵۴	۰.۱۲۳۹	۰.۳۶۵۱	۰.۲۴۳۴	۰.۱۵۸۸	۰.۱۷۵۹	F2
۲.۷۰۰۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۱.۱۳۴۵	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	F3
	۰.۴۰۳۵	۰.۳۰۷۵	۰.۱۹۶۲	۰.۲۴۷۸	۰.۲۴۷۸	۰.۲۵۱۹	۰.۲۴۷۸	۰.۳۵۱۸	۱.۱۳۴۵	۰.۲۶۹	۰.۱۰۲۵	۰.۰۶۵۴	۰.۱۲۳۹	۰.۱۲۱۷	۰.۱۱۷۳	۰.۱۵۸۸	۰.۱۷۵۹	F3

^۱ Time (T)

^۲ Precision (P)

^۳ Functions (F)



شکل ۵: نمایش گرافیکی تعاملات بحرانی توسط نرم افزار FMV

معناداری نداشته و اولویت‌بندی عملکردها کاملاً ثابت باقی ماند (۳۷).

اعداد کمی وزن‌های نهایی نظرات SMEs به داخل نرم‌افزار FMV انتقال داده شد تا عملکردها و تعاملات دارای پتانسیل تغییرپذیری و ایجاد‌کننده پدیده تشدید شناسایی شوند که تحت عنوان تعاملات بحرانی از آن نام برده می‌شود (۳۸). شکل (۵) عملکردهای دارای پتانسیل تغییرپذیری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) مشخص شد که پس از انتقال داده‌های مرتبط با وزن نهایی متغیرهای «زمان» و «دقت» برای هر عملکرد در داخل نرم‌افزار FMV، عملکردهای دارای پتانسیل ایجاد‌کننده پدیده تشدید به همراه تعاملات آنها در کل واحد DRI مشخص شده که با علامت $\checkmark$ نمایش داده شده است.

جهت اعتبارسنجی روش FRAM در شناسایی عملکردهای مولد تشدید، موارد شناسایی‌شده مجدداً توسط SMEs بازبینی و تأیید نهایی شد. طبق نظر آنها، از

در این مرحله، ابتدا حالات عملکردها توسط خبرگان ارزیابی و بر اساس سطوح «زمان» (۴ سطح) و «دقت» (۳ سطح)، امتیازدهی شد. جهت ورود مقداری واحد به نرم‌افزار FMV و حذف سوگیری‌ها، نظرات خبرگان با FAHP یکپارچه گردید. در این راستا، از چهار معیار تحصیلات، تجربه کاری، موقعیت سازمانی و سن برای وزن‌دهی به نظرات استفاده شد. در نهایت با اقتباس از روش یزدی و همکاران (۲۰۱۷)، وزن نهایی متغیرهای زمان و دقت از حاصل ضرب وزن این شاخص‌ها در امتیازات هر خبره استخراج گردید که بخشی از نتایج در جدول (۶) ارائه شده است (۳۲).

به منظور اعتبارسنجی و بررسی پایداری نتایج حاصل از روش FAHP چانگ، آنالیز حساسیت انجام شد. در این مرحله، وزن معیار اصلی موقعیت سازمانی خبرگان به عنوان مؤثرترین شاخص، به میزان $\pm 10\%$ تغییر داده شد. نتایج حاصل از بازبینی محاسبات نشان داد که مقادیر نهایی «زمان» و «دقت» برای عملکردهای F1-F14 تغییر

جدول ۷: تعاملات بحرانی شناخته شده در واحد DRI

ردیف	عملکرد بالا دستی	جنبه عملکرد بالا دستی	عملکرد پایین دستی	جنبه عملکرد پایین دستی
۱	F6	خروجی	F12	ورودی
۲	F12	خروجی	F2	منابع
۳	F2	خروجی	F3	ورودی
۴	F2	خروجی	F6	پیش شرط
۵	F13	خروجی	F12	ورودی
۶	F12	خروجی	F13	ورودی
۷	F14	خروجی	F13	منابع
۸	F13	خروجی	F14	ورودی
۹	F14	خروجی	F12	کنترل

نتایج مدل‌سازی پیامد

با شناسایی عملکرد ریفرمر (F6) به‌عنوان گلوگاه اصلی تشدید، مدیریت پیامدها در این بخش به‌دلیل فشار بالا و اشتعال‌زایی گازها اهمیت مضاعف دارد. از آنجا که نوسانات F6 (ناشی از اختلال در F12) می‌تواند به نشت یا انفجار منجر شود، این پارامترها به‌عنوان ورودی مبنا در نرم‌افزار PHAST 8.4 لحاظ شدند. این رویکرد با تبدیل نوسانات ریفرمر به ابعاد فیزیکی حوادث، امکان تعیین حریم‌های ایمنی و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی را در واحد DRI فراهم می‌کند. جهت مدل‌سازی، متغیرهای محیطی شامل کلاس پایداری و شرایط جوی در چهار فصل (طبق جدول ۲) و دو بازه شب و روز در نظر گرفته شد؛ چراکه پارامترهایی نظیر سرعت باد و کلاس پاسکویل، تأثیری مستقیم بر نحوه انتشار گازها و هندسه پیامدهای حرارتی و انفجاری دارند (۳۹).

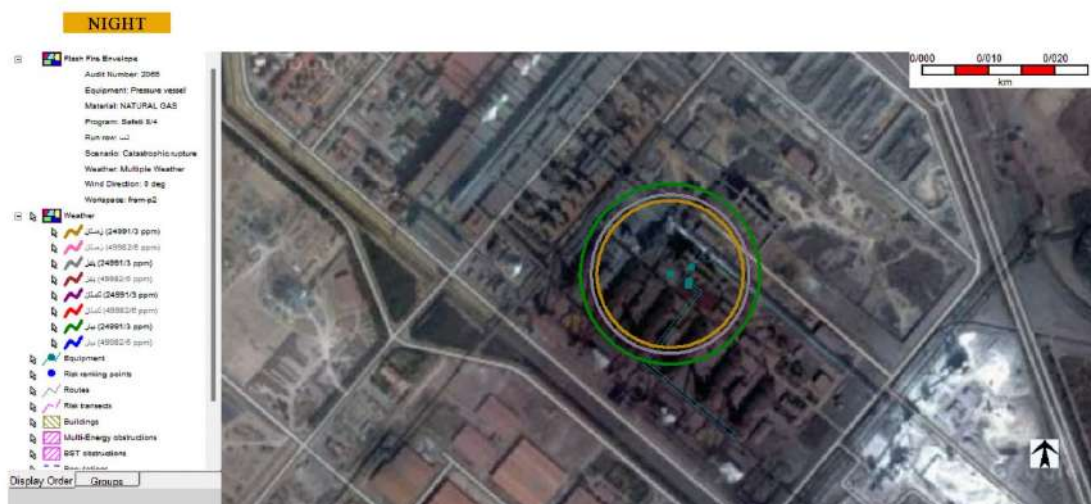
در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی دقیق پیامدهای احتمالی، سناریوهای گسیختگی کامل عملکرد ریفرمر^۱ و شکستگی خطوط لوله^۲ برای لوله‌های کوتاه و بلند به‌عنوان بدترین حالت ممکن جهت مدل‌سازی انتخاب شدند. بر این اساس، سناریوهای نشت در سه بخش کلیدی واحد ریفرمر شبیه‌سازی گردیدند که عبارتند از: ۱. لوله کوتاه^۳

میان ۴۲ تعامل موجود، ۹ مورد بین عملکردهای بالادستی و پایین‌دستی دارای بیشترین پتانسیل تغییرپذیری و تشدید تشخیص داده شدند. جدول (۷) این تعاملات را به همراه جنبه‌های عملکردی مربوطه نشان می‌دهد. جدول (۷) عملکردهای دارای پتانسیل تشدید و تعاملات بحرانی آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج واحد DRI بیانگر ضرورت رویکردی سیستمیک برای کنترل تغییرپذیری در گلوگاه‌هاست. با توجه به نقش کلیدی عملکردهای انسانی و سازمانی (F12-F14) به‌عنوان پیش‌شرط بخش‌های فنی و تجهیزاتی (F2, F6)، راهبرد مدیریتی باید بر پایش نوسانات و تقویت مکانیسم‌های میرایی جهت جلوگیری از انتقال تغییرپذیری به ریفرمر و کوره متمرکز شود. پس از ترسیم نتایج روش FRAM و تعاملات در نرم‌افزار FMV، عملکردی که بیشترین میزان دریافت و انتشار تغییرپذیری را در شبکه عملکردی داشت، به‌عنوان عملکرد بحرانی انتخاب گردید. همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، F6 (واحد ریفرمر) و F2 (واحد کوره احیاء) دارای بیشترین تعدد تعاملات بحرانی هستند. در این میان، معیار انتخاب عملکرد F6 جهت مدل‌سازی، تعدد ارتباطات عملکردی و نقش آن در پایداری فرآیند بود. سپس بر اساس ماهیت فنی و تجهیزاتی این عملکرد، سناریوی حادثه تعریف شد و در قالب یک رویداد از دست رفتن مهار سیستم، به‌عنوان ورودی مدل‌سازی پیامد در نرم‌افزار PHAST مورد استفاده قرار گرفت.

1. Catastrophic rupture
2. Line rupture
3. Short pipes



(الف)



(ب)

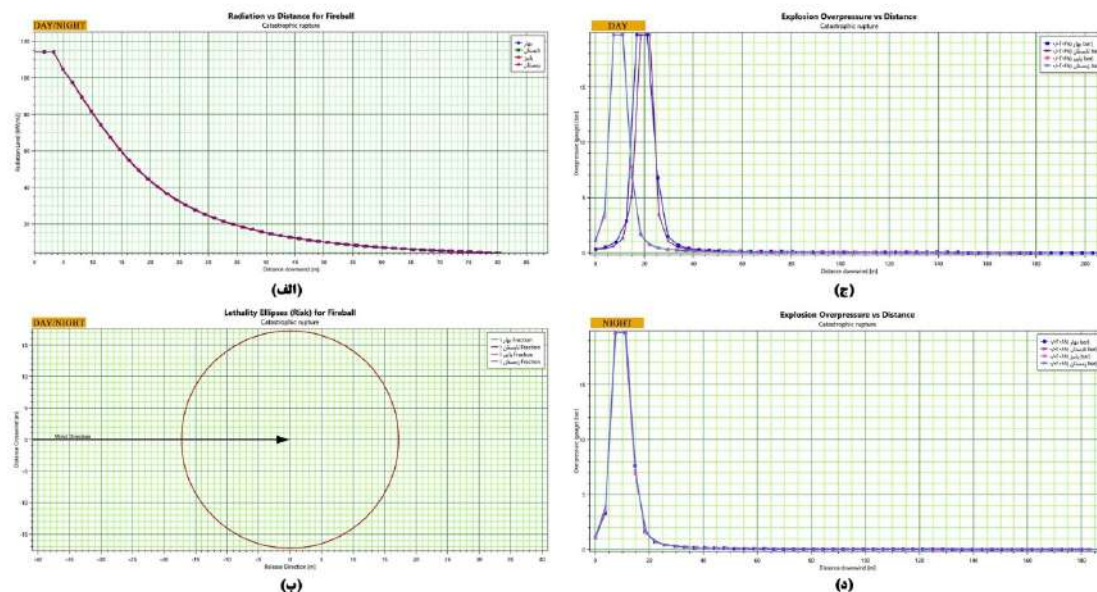
شکل ۶: نقشه‌های کانتور محدوده آتش ناگهانی ناشی از نشت گاز طبیعی در شرایط جوی روز (الف) و شب (ب).

در روز است که باعث پوشش سطح بیشتری توسط ابر اشتعال‌پذیر پیش از رقیق‌سازی می‌شود. طبق کانتورها، بیشترین پیشروی ابر گازی در فصل بهار رخ می‌دهد که نواحی اطراف ریفرمر و مسیرهای دسترسی را نیز در بر می‌گیرد. در مقابل، طی شب به دلیل پایداری جو، ابر گازی در نزدیکی منبع نشت متمرکز مانده و شعاع اثرگذاری محدودتری دارد. این نقشه نقاط استراتژیک در معرض خطر بالای اشتعال و برگشت شعله را به خوبی مشخص می‌کند.

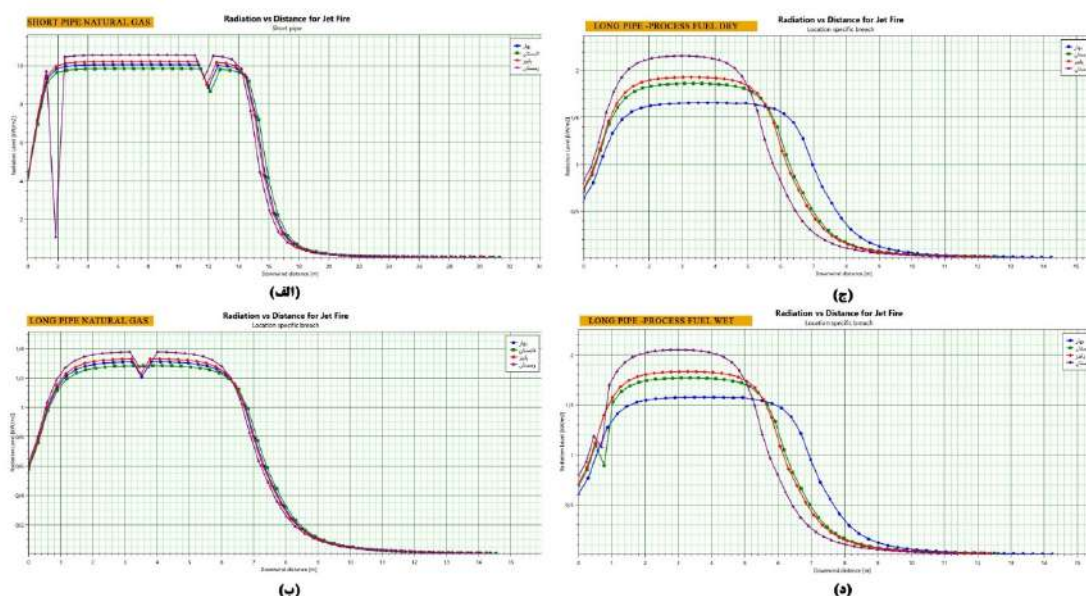
شامل خوراک گاز طبیعی مشعل‌ها؛ ۲. لوله بلند؛ شامل گاز فرآیندی (تر و خشک) و گاز طبیعی تحت دمای بالا؛ ۳. محفظه احتراق ریفرمر. نتایج این سناریوها در اشکال (۶)، (۷) و (۸) نمایش داده شده است.

شکل (۶) نمای هوایی واحد ریفرمر و محدوده آتش ناگهانی را نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر (الف) و (ب) بیانگر بزرگ‌تر بودن شعاع خطر در روز نسبت به شب است؛ علت این امر ناپایداری جوی و افزایش انتقال جرم

1. Long pipes



شکل ۷: شعاع اثر گوی آتش و فشار موج انفجار ناشی از شکست پارگی کامل ریفمر در شرایط جوی مختلف.



شکل ۸: نمودارهای مقایسه‌ای شعاع تحت تأثیر تشعشعات ناشی از آتش فورانی برحسب فاصله برای خطوط گاز طبیعی و فرآیندی تر و خشک داخل ریفمر در فصول مختلف.

مرگ و میر صد درصدی در این محدوده شده و تحت تأثیر جهت باد گسترش می‌یابد. در بخش انفجار، مقایسه نمودارهای (ج) و (د) نقش پایداری جوی را برجسته می‌کند؛ در شب به دلیل پایداری جو، پیک فشار در ۱۵ متری شدیدتر و مستقل

شکل (۷) پیامدهای گسیختگی کامل محفظه ریفمر را در دو سناریوی گوی آتش و انفجار نشان می‌دهد. طبق نمودار (الف)، شار حرارتی گوی آتش در ابتدا به بیش از 110 kW/m^2 رسیده و تا شعاع ۱۵ متری تخریب بالایی دارد. مطابق نمودار (ب)، این شدت حرارت منجر به

از فصل است. اما در روز، ناپایداری جوی تفاوت فصلی ایجاد می‌کند، به‌طوری‌که فشار موج در ۱۵ متری به ۱۸ بار (تخریب کامل سازه) رسیده، در بهار تا فاصله ۴۰ متری تداوم یافته و در ۱۲۰ متری به ۰/۲۰۶۸ بار کاهش می‌یابد.

تحلیل مقایسه‌ای در شکل (۸) نشان می‌دهد نشت از خطوط گاز طبیعی بیشترین شار حرارتی (بیش از 10 kW/m^2) را در فواصل نزدیک دارد که ناشی از فشار بالا و نرخ رهاسازی جرمی در ورودی مشعل‌هاست. طبق نمودارهای (الف) و (ب)، شار حرارتی خط لوله کوتاه در بازه ۲ تا ۱۴ متری حدود 10 kW/m^2 و برای خط لوله بلند در فاصله ۱ تا ۶ متری 13 kW/m^2 برآورد شد. در مقابل، سوخت فرآیند (ج) و (د) حساسیت فصلی بیشتری نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که میزان شار آن‌ها در فاصله ۱ تا ۶ متری بین $1/5 \text{ kW/m}^2$ تا $2/2$ متغیر است. همچنین در زمستان به دلیل افزایش چگالی هوا و کاهش اختلاط اتمسفری، شدت تابش در نزدیکی منبع نسبت به تابستان افزایش یافته و شعاع اثرگذاری در خطوط کوتاه گاز طبیعی را تا ۱۶ متر می‌رساند.

بحث

این مطالعه با استفاده از دو رویکرد مکمل شامل FRAM برای شناسایی و تحلیل علل سیستمی تغییرپذیری عملکرد و مدل‌سازی پیامد با نرم‌افزار PHAST برای ارزیابی دامنه و شدت پیامدهای ناشی از سناریوهای شکست در واحد احیاء مستقیم صنعت فولاد است. نوآوری اصلی این مطالعه، عبور از تحلیل‌های صرفاً کیفی یا شبیه‌سازی‌های آماری محض (مانند مونت کارلو) (۳۱) و برقراری پیوند میان تغییرپذیری عملکردی و شعاع اثر حوادث است؛ رویکردی که شکاف میان مهندسی تاب‌آوری و ارزیابی پیامد را با تبدیل نوسانات عملیاتی به کانتورهای شدت اثر پر می‌کند. این چارچوب نشان می‌دهد که تشدید عملکردی مستقیماً بر حریم‌های ایمنی تجهیزات حساسی همچون ریفورمر اثرگذار است

1. Monte carlo simulation (MCS)

(۸). تحلیل FRAM با شناسایی ۱۴ عملکرد کلیدی و ۴۲ تعامل عملیاتی، بستر لازم برای بررسی پدیده تشدید را فراهم آورد. واحد ریفورمر (F6) به دلیل تعامل استراتژیک با عملکردهای تعمیرات (F12) و بازرسی (F13) و دارا بودن بیشترین میزان تعاملات بحرانی، به‌عنوان کانون مدل‌سازی انتخاب شد. جنبه متمایز این پژوهش، تبدیل تغییرپذیری‌های این دو عملکرد به ورودی‌های نرم‌افزار PHAST بود که رابطه غیرخطی میان عملکردهای انسانی و سازمانی بالادستی و پیامدهای فیزیکی پایین‌دستی (ریفورمر) را آشکار ساخت. یافته‌ها نشان داد که هم‌افزایی انحراف در دقت اجرای تعمیرات (F12) و نارسایی در فرآیندهای بازرسی (F13)، از طریق تشدید تعاملات بحرانی، موجب تغییرپذیری پارامترهای عملیاتی ریفورمر (F6) و افزایش تصاعدی شعاع اثر حوادث می‌شود؛ نتیجه‌ای که با اصل تشدید عملکردی همسویی کاملی دارد. این امر مبتنی آن است که چگونه ضعف همزمان در لایه‌های انسانی و سازمانی می‌تواند به یک تشدید عملکردی بحرانی در تجهیزات حساس منجر شود (۴۰). به‌منظور ارزیابی دقیق پیامدهای ریسک‌های نوظهور و تبیین بدترین سناریوی محتمل بر اساس خروجی‌های روش FRAM، گسیختگی کامل محفظه احتراق ریفورمر (F6) به‌عنوان سناریوی مبنا جهت محاسبه شعاع آسیب ناشی از انفجار و گوی آتش لحاظ گردید. خروجی مدل‌سازی در سناریوی گسیختگی کامل (شکل ۷)، انطباق منحنی‌های فصلی در نمودار گوی آتش را نشان داد؛ این امر بیانگر غلبه اثر منبع بر پارامترهای اقلیمی است، به‌گونه‌ای که حجم عظیم گاز رهاشده، تأثیر فصل را کمرنگ کرده و شعاع مرگ‌ومیر ۱۰۰٪ را در تمامی فصول تا فاصله ۱۵ متری ثابت نگه می‌دارد. تحلیل شکل (۸) نیز نشان داد که علاوه بر فشار و دبی، ماهیت شیمیایی سیال عاملی کلیدی است؛ تفاوت فاحش شار حرارتی بین گاز طبیعی و فرآیندی، مستقیماً با درصد متان (۸۹/۳۵٪ در مقابل ۶/۵٪ و ۶/۱۹٪) ارتباط دارد. این موضوع شعاع خطر در خطوط گاز طبیعی را علی‌رغم فشارهای مشابه، به‌طور معناداری گسترده‌تر کرده است؛ یافته‌ای که بر

ضرورت تعیین حریم‌های ایمنی حداکثری، مستقل از شرایط فصلی تأکید می‌کند.

در این راستا، تحلیل شدت اثرات بر مبنای حدود آستانه استاندارد ایمنی فرآیند، شامل ارزیابی پیامدها بر اساس کانتورهای شار حرارتی $12/5 \text{ kW/m}^2$ (حداقل آستانه مرگ‌ومیر، معادل حدود 1% مرگ‌ومیر در یک دقیقه مواجهه و آستانه شروع آسیب جدی به تجهیزات و مواد قابل اشتعال) (41) و $37/5 \text{ kW/m}^2$ (آستانه آسیب شدید به تجهیزات فرایندی و تأسیسات، همراه با احتمال مرگ‌ومیر بسیار بالا در مواجهه‌های کوتاه‌مدت) (42) ، همچنین کانتور فشار اضافی $0/02$ بار ($\approx 0.3 \text{ psig}$) به‌عنوان آستانه شروع خسارات ساختمانی شامل شکست بخشی از شیشه‌ها، خسارت‌های جزئی ساختمانی و حد فاصله ایمن برای ساختمان‌های بنایی در (43) نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در سناریوی گسیختگی ریفرمر، شار حرارتی در لحظات اولیه به 110 kW/m^2 و فشار موج انفجار در فاصله 15 متری به 18 بار می‌رسد؛ این مقادیر که به‌طور قابل‌توجهی فراتر از حدود آستانه تخریب $(0/02 \text{ بار و } 37/5 \text{ kW/m}^2)$ هستند، مؤید مرگ‌ومیر 100% و انهدام کامل زیرساخت‌ها در شعاع مذکور می‌باشند که تغییرپذیری عملکردی در گلوگاه F6 (شناسایی شده در روش FRAM)، در صورت عدم پایش و کنترل، پتانسیل وقوع یک فاجعه با ابعاد وسیع را داراست که ضرورت بازنگری در حریم‌های ایمنی و اقدامات اصلاحی را دوجندان می‌کند.

این نتیجه با یافته‌های هراتی (2018) همسو است که نشان داد شدت شار حرارتی گاز طبیعی در واحدهای احیاء مستقیم، پیامدهای شدیدتری نسبت به نشت موادی چون پروپیلن اکساید ایجاد می‌کند (44) . اما فراتر از تحلیل‌های سنتی، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از چارچوب FRAM و با استناد به مبانی Patriarca و همکاران (2017) ، ریشه این حوادث را در تغییرپذیری‌های عملکردی (زمان و دقت) جستجو کرد (45) .

برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر شناسایی علل خطا تمرکز داشتند، نوآوری این پژوهش در کمی‌سازی

دقیق این تغییرپذیری‌ها و پیوند آن‌ها با پیامدهای فیزیکی بود. اگرچه مطالعات اخیر $(2024-2025)$ گام‌هایی در جهت تلفیق FRAM برداشته‌اند مانند تمرکز بر تعاملات انسان-ماشین توسط Salehi (46) یا معرفی مدل‌های نرم‌افزاری مانند Neuron FRAM توسط Hill و Slater (47) ، اما خلأ موجود در مطالعات، فقدان یک پیوند علی‌کمی بین تغییرپذیری کیفی عملکردها و شدت فیزیکی حادثه بود. پژوهش حاضر رویکرد مکمل FRAM و PHAST، این شکاف را پر کرده و نشان داد که چگونه انحرافات کوچک در لایه‌های سازمانی، می‌توانند منجر به پیامدهای فیزیکی گسترده شوند؛ رویکردی که با مطالعات Yu (48) و Tierra-Arévalo هم‌راستا است اما از طریق استفاده از داده‌های واقعی صنعتی، عمق تحلیلی بیشتری دارد (49) .

در این مطالعه، برای مدیریت عدم قطعیت نظرات خبرگان پیرامون تغییرپذیری «زمان» و «دقت»، از FAHP جهت تبدیل نوسانات کیفی FRAM به وزن‌های قطعی استفاده شد. این روش با کاهش سوگیری، اولویت‌بندی شفاف‌تری از عملکردهای بحرانی با بیشترین پتانسیل تشدید ارائه می‌دهد. استفاده از رویکرد ترکیبی FRAM و FAHP در این مطالعه، با هدف غلبه بر محدودیت‌های ذهنی در ارزیابی تغییرپذیری عملکردها صورت گرفت. در واقع، این ادغام اجازه می‌دهد تا تحلیل‌های کیفی روش FRAM، از طریق یک چارچوب کمی و ساختاریافته، اولویت‌بندی شوند. همان‌طور که در مطالعه Tierra-Arévalo و همکاران (2023) اشاره شده است، ترکیب این دو روش، قابلیت تحلیل واقع‌بینانه‌تری از سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌کند (35) . این رویکرد در پژوهش حاضر، پلی میان تحلیل سیستمیک نوسانات و مدل‌سازی کمی پیامدها در نرم‌افزار PHAST ایجاد کرد و منجر به شناسایی دقیق‌تر نقاط مستعد تشدید عملکردی گردید. نتایج با مطالعات Guo (2023) مبتنی بر روش دمپستر-شافر (50) ، و مرادی (2024) با استفاده از تاپسیس فازی (51) ، همسو است. با این حال، مزیت FAHP در این پژوهش، ساختاردهی دقیق مقایسات و استفاده از

اعداد فازی دوزنقه‌ای است که انطباق بهتری با ماهیت چندبعدی عملکردها در FRAM دارد. این روش با کاهش سوگیری خبرگان، اولویت‌بندی شفاف‌تری از عملکردهای بحرانی (تعمیرات و بازرسی) ارائه داد که پتانسیل بالایی در ایجاد پدیده تشدید عملکردی دارند. این یافته با نتایج مطالعات دلیخون (۲۰۲۴) با ادغام FRAM و MCS در صنعت سیمان (۳۱) و Costantino (۲۰۲۴) با تلفیق FRAM، FTA و SPAR-H در صنایع نظامی (۵۲) که بر شناسایی عملکردهای کلیدی در سیستم‌های پیچیده تأکید داشتند، همخوانی دارد.

مقایسه نتایج پیامد با مطالعات موردی مشابه، باز هم صحت این رویکرد را تأیید می‌کند. اگرچه در مطالعه دلشاد (۲۰۲۵)، شعاع مرگ‌ومیر در واحد باز یافت گوگرد تا ۷۰ متر برآورد شد، اما در پژوهش حاضر برای واحد ریفرمر (F6)، این شعاع حدود ۱۵ متر بود. این تفاوت بخاطر ماهیت متفاوت سیال و دبی رهاسازی ناشی از شرایط خاص تعمیراتی (F12) است. با این حال، تشابه نگران‌کننده‌ای در بخش فشار موج انفجار وجود دارد؛ جایی که پتانسیل تخریب سازه‌ای در هر دو مطالعه تا شعاع ۱۵-۳۵ متر شناسایی شد (۵۳). این یافته کلیدی نشان می‌دهد که حتی اگر گوی آتش کوچک‌تر باشد، ریسک ناشی از تشدید عملکردی همواره بر سازه‌های حیاتی تأثیر مستقیم دارد.

در نهایت، این پژوهش با نقد رویکردهای صرفاً واکنشی نظیر مطالعه فلاح (۲۰۲۳) که به دلیل غیرعملیاتی بودن فواصل جداسازی، تمرکز را صرفاً بر سناریوهای نشت معطوف کرده بود (۵۴) بر لزوم پیشگیری از رخداد در منبع تأکید می‌ورزد. یافته‌های ما نشان می‌دهد که در عملکرد ریفرمر، پیشگیری از گسیختگی از طریق تغییرپذیری در عملکردهای تعمیرات (F12) و بازرسی (F13) میسر است. در این راستا، پیشنهاد می‌گردد مدیریت ریسک از پایش سنتی شاخص‌های تاخیری، به سمت استقرار سیستم پایش آنلاین شاخص‌های پیشرو نظیر دقت در اجرای کالیبراسیون مشعل‌ها و تداوم زمانی بازرسی‌های غیرمخرب بر روی تیوب‌های ریفرمر حرکت

کند. استقرار پروتکل‌های آمادگی عملیاتی و بهینه‌سازی تعاملات انسانی-سازمانی از طریق چک‌لیست‌های مبتنی بر روش FRAM، می‌تواند شکاف میان فواصل ایمنی تئوری و محدودیت‌های اجرایی صنعت را پر نماید. این تغییر پارادایم از مدیریت پیامد به کنترل پویای عملکردها، تضمین‌کننده تاب‌آوری واحد در برابر سناریوهای گسیختگی فاجعه‌بار خواهد بود.

هم‌سویی نتایج این پژوهش با یافته‌های Marzec (۲۰۲۵) که بر کاهش هزینه‌های ریسک از طریق تحلیل تغییرپذیری در صنعت هوانوردی تأکید داشتند (۵۵) نشان می‌دهد که رویکرد مکمل FRAM با ابزار PHAST، گامی نوین در ارتقای دقت ارزیابی ریسک در صنایع فرآیندی است. برآورد شعاع مرگ‌ومیر ۱۰۰ درصدی در محدوده ۱۵ متری واحد ریفرمر، ضرورت به‌کارگیری این چارچوب ترکیبی را برای شناسایی ریسک‌های نوظهور در صنایع فولاد دوجندان می‌کند. این رویکرد با پیوند زدن تحلیل کیفی لایه‌های فنی به ارزیابی کمی پیامد، ضمن شناسایی نقاط کور ایمنی، بستری دقیق برای تدوین سناریوهای واکنش اضطراری فراهم ساخته است. بنابراین، بازنگری در طرح‌های مقابله با شرایط اضطراری بر اساس شعاع آسیب استخراج‌شده برای واحد ریفرمر (F6) و جایگزینی پارادایم تغییرپذیری عملکردی به جای نگاه سنتی خطای انسانی در پروتکل‌های آموزشی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

علی‌رغم دستاوردهای مذکور، این مطالعه با محدودیت‌هایی مواجه بود؛ نخست اینکه تکیه بر نظرات کیفی خبرگان در روش FRAM و FAHP، حتی با وجود اعمال منطق فازی، همچنان پتانسیل سوگیری ذهنی را داراست. همچنین، مدل‌سازی پیامد در نرم‌افزار PHAST بر اساس سناریوهای استاندارد انجام شده و تأثیر موانع فیزیکی پیچیده محیطی (مانند چیدمان سازه‌ها و اثر تخریبی دومینو بر تجهیزات مجاور) بر الگوی انتشار موج انفجار لحاظ نگردیده است. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی، جهت ارتقای دقت مدل، از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل

تحلیل‌ها تایید کرد که ماهیت شیمیایی سیال (درصد متان) عامل تعیین‌کننده در گسترش کانتورهای ریسک است و منجر به ایجاد شار حرارتی (110 kW/m^2) و فشار موج انفجار (۱۸ بار) می‌گردد که به‌طور قابل‌توجهی فراتر از آستانه‌های استاندارد است. همچنین ضعف در لایه‌های انسانی و سازمانی، از طریق پدیده تشدید عملکردی، مستقیماً پیامدهای فیزیکی فاجعه‌باری را در عملکردهای فنی-تجهیزاتی حساس ایجاد می‌کند. این دستاورد، ضرورت بازنگری در حریم‌های ایمنی و تغییر رویکرد از شناسایی خطاهای تک‌بعدی به مدیریت تغییرپذیری‌های سیستمیک را در صنایع حساس به‌شدت توصیه می‌کند.

≡ کد اخلاق

این مطالعه بخشی از پایان‌نامه تحقیقاتی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار با کد اخلاق IR.IUMS.REC.1403.846 است، که توسط معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران حمایت شده است.

≡ REFERENCES

1. Perrow C. Normal accidents: Living with high risk technologies-Updated edition: Princeton university press; 2011.
2. Vicente KJ. Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work: CRC press; 1999.
3. Association WS. 2025/1/29 [Available from: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>].
4. Hollnagel E. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems: Crc Press; 2017.
5. Organization IL. Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases 2025 [Available from: <https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases>].
6. association ws. Safety and health in the steel industry Data report 2024 2025 [Available from: <https://worldsteel.org/safety-and-health/safety-and-health-in-the-steel-industry-data-report-2024/>].

دقیق‌تر برهم‌کنش موج انفجار با موانع محیطی استفاده شود.

≡ نتیجه گیری

این مطالعه با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل ریسک سیستمیک در واحد احیاء مستقیم فولاد، موفق شد پیوندی عملیاتی میان تغییرپذیری‌های عملکردی (روش FRAM) و پیامدهای فیزیکی (مدل‌سازی PHAST) برقرار کند. یافته‌های کلیدی این مطالعه نشان داد که کانون ریسک در سیستم، در تعاملات بحرانی میان عملکردهای تعمیرات، بازرسی و عملکرد واحد ریفرمر نهفته است. هم‌افزایی تغییرپذیری‌ها در تعمیرات و بازرسی، منجر به تشدید عملکردی در واحد ریفرمر و افزایش تصاعدی شعاع اثر حوادث می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی پیامدها در سناریوی گسیختگی کامل ریفرمر، حاکی از غلبه مطلق اثر منبع بر پارامترهای اقلیمی است که در آن شعاع مرگ‌ومیر ۱۰۰٪ در همه فصول تا فاصله ۱۵ متری ثابت باقی می‌ماند. همچنین،

7. Hollnagel E. Coping with complexity: past, present and future. Cognition, Technology & Work. 2012;14:199-205.
8. Hollnagel E. Safety-I and safety-II: the past and future of safety management: CRC press; 2018.
9. Spill NCotBDHO, Dril O. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling: Report to the President, January 2011: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling: Government Printing Office; 2011.
10. Defazio P, Larsen R. The design, development and certification of the Boeing 737 MAX (Final Committee Report). The House Committee on Transportation and Infrastructure. 2020.
11. Holmstrom D, Altamirano F, Banks J, Joseph G, Kaszniak M, Mackenzie C, et al. CSB investigation of the explosions and fire at the BP Texas City refinery on March 23, 2005. Process safety progress. 2006;25(4):345-9.
12. Dekker S. Drift into failure: From hunting broken components to understanding complex systems: CRC press; 2016.

13. Messina A. Study of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) applied to a commercial aviation incident: Politecnico di Torino; 2019.
14. Leveson NG. Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety: The MIT Press; 2016.
15. Dekker SW. Drifting into failure: Complexity theory and the management of risk. Chaos and complexity theory for management: Nonlinear dynamics: IGI Global; 2013. p. 241-53.
16. Hollnagel E. Safety-II in practice: developing the resilience potentials: Routledge; 2017.
17. Hollnagel E, Woods DD. Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering: CRC press; 2005.
18. De Linhares T, Maia Y, e Melo PFF. The phased application of STAMP, FRAM and RAG as a strategy to improve complex sociotechnical system safety. Progress in Nuclear Energy. 2021;131:103571.
19. 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.
20. Hollnagel E, Goteman O. The functional resonance accident model. Proceedings of cognitive system engineering in process plant. 2004;2004:155-61.
21. Slater D, Hollnagel E, Hill R, Nomoto H, Patriarca R, Smith D, et al. FRAM: The Development of the Complex System Analysis Methodology. 2023.
22. Patriarca R, Bergström J, Di Gravio G, Costantino F. Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. Safety science. 2018;102:79-100.
23. Grabbe N, Arifagic A, Bengler K. Assessing the reliability and validity of an FRAM model: the case of driving in an overtaking scenario. Cognition, Technology & Work. 2022;24(3):483-508.
24. Naruki Yasue, Go Sato, Sawaragi T. Resilience assessment of FPSO leakage emergency response based on quantitative Reliability Engineering and System Safety. 2026.
25. Yasue N, Sato G, Sawaragi T. Extracting knowledge of workers by identifying performance variability using functional resonance analysis method. Reliability Engineering & System Safety. 2025:111466.
26. Keyvani Brojeni M, Kheirandish Sarabi S, Vosoughi S, Souri B, Akbarzadeh Miandoab F, Moradi Hanifi S. QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT OF A CARBON DIOXIDE STORAGE TANK BY USING CONSEQUENCE MODELING AND FUZZY BAYESIAN NETWORKS. Iran Occupational Health Journal. 2025;22(1):12.
27. Aliabadi MM, Ramezani H, Kalatpour O. Quantitative Risk Assessment of Condensate Storage Tank, Considering Domino Effects. Journal of Health & Safety at Work. 2022;12(1).
28. Consequence IRSNM. Modeling of Explosion Events by PHAST Software in an Industrial Unit-A Case Study of 2 Phases of South Pars. Bulding of the Georgian National Academy of Science. 2015;9(1):26-316.
29. Witlox HW, Fernández M, Harper M, Oke A, Stene J, Xu Y. Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere. Journal of loss prevention in the process industries. 2018;55:457-70.
30. McCarthy GW. FRAM: The functional resonance analysis method, modelling complex socio-technical systems. Aviation, Space, and Environmental Medicine. 2013;84(11):1215-.
31. Delikhoon M, Habibi E, Zarei E, Banda OAV, Faridan M. Towards decision-making support for complex socio-technical system safety assessment: a hybrid model combining FRAM and dynamic Bayesian networks. Process Safety and Environmental Protection. 2024;187:776-91.
32. Yazdi M. Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2017;17(4):756-64.
33. Akbaş S, Erbay Dalkılıç T. Analytic Hierarchy Process Using Trapezoidal Fuzzy Number Based Weights for Portfolio Selection. International Journal of Engineering Science Invention. 2017;6(12).
34. Qendraj DH, Xhafaj E, Xhafaj A, Halidini E. Ranking the most important attributes of using google classroom in online teaching for Albanian universities: A fuzzy AHP method with triangular fuzzy numbers and trapezoidal fuzzy numbers. Adv Sci Technol Eng Syst J. 2021;6:297-308.
35. Tierra-Arévalo JM, del Carmen Pardo-Ferreira M, Herrera-Pérez V, Rubio-Romero JC. Qualities of the alternative approach of the functional resonance analysis method and the analytic hierarchy process. Review. Occupational and Environmental Safety and Health V:

- Springer; 2023. p. 825-35.
36. Hill R, Slater D. Using a Metadata Approach to Extend the Functional Resonance Analysis Method to Model Quantitatively, Emergent Behaviours in Complex Systems. *Systems*. 2024.
37. Vinogradova-Zinkevič I. Comparative sensitivity analysis of some fuzzy AHP methods. *Mathematics*. 2023;11(24):4984.
38. Vose D. Risk analysis: a quantitative guide: John Wiley & Sons; 2008.
39. Hanna S CJ, D. S. Hazardous gas model evaluation with field observations. *Atmospheric Environment Part A General Topics*. 1993;;27(15):2265-85.
40. Hollnagel E. An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk assessment of organisational change. 2012.
41. Zhou X, Hao Y, Yang J, Xing Z, Xue H, Huang Y. Study of the thermal radiation hazard from a combustible gas fireball resulting from a high-pressure gas pipeline accident. *Processes*. 2023;11(3):886.
42. Choi J-Y, Byeon S-H. Case study: Safety assessment of plant layout between ethylene storage tanks and process equipment according to capacity and weather conditions. *International journal of environmental research and public health*. 2020;17(8):2849.
43. Djedri A, Ladouani H, Ramdane F. Application of the Fire and Explosion Risk Assessment study on drilling rig.
44. Bahram Harati, Ali Karim, Ali Askari, Fateme Dehghani, Nasrollahi A. Modeling and evaluation of safety consequences of propylene oxide leakage, a petrochemical company. *Journal of Health and Safety at Work* 2018;Vol. 8; No. 2; Summer 2018.
45. Patriarca R, Di Gravio G, Costantino F. A Monte Carlo evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to assess performance variability in complex systems. *Safety science*. 2017;91:49-60.
46. Salehi V, Salmon PM, Burns C, McGill A, Smith D, Veitch B. Towards Holistic Functional Task Analysis. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. 2025;35(1):e21059.
47. Slater D, Hill R. AN "INTELLIGENT" FMV,(FRAM MODEL VISUALISER)FOR ESTIMATING PROBABILITIES OF OUTCOMES IN COMPLEX SYSTEMS. 2025.
48. Yu J, Zeng Q, Yu Y, Zhang B, Ma W, Wu S, et al. Resilience assessment of FPSO leakage emergency response based on quantitative FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025;253:110526.
49. Tierra-Arévalo JM, del Carmen Pardo-Ferreira M, Salguero-Caparrós F, Rubio-Romero JC. Identifying System Performance Variability in the Concreting of a Building Slab. In: Baptista JS, Melo RB, Carneiro P, Castelo Branco J, Costa N, Duarte J, et al., editors. *Occupational and Environmental Safety and Health VI: Volume 1: Occupational Risk Assessment, Management and Case Studies*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025. p. 53-63.
50. Guo Y, Jin Y, Hu S, Yang Z, Xi Y, Han B. Risk evolution analysis of ship pilotage operation by an integrated model of FRAM and DBN. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;229:108850.
51. Moradi Hanifi S, Azimi H, Riccardo P, Keighobadi E, Fardafshari M. Application of Functional Resonance Analysis and Fuzzy Topsis to Identify and Prioritize Factors Affecting Newly Emerging Risks. Hamid and Riccardo, Patriarca and Keighobadi, Elham and Fardafshari, Mojtaba, Application of Functional Resonance Analysis and Fuzzy Topsis to Identify and Prioritize Factors Affecting Newly Emerging Risks. 2024.
52. Costantino F, Di Gravio G, Patriarca R, Tronci M. A systemic approach for stochastic reliability management in human-machine systems. *Decision Analytics Journal*. 2024;10:100410.
53. Towhid Delshad, Farhad Shahraki, Mohammad Reza Sardashti Birjandi, Bidar B. A Consequence Analysis of a Hydrogen Sulfide Gas Release using PHAST Software in the Sulfur Recovery Unit of Abadan Oil Refinery Company. *Journal of Health and Safety at Work*. 2025; 2025; 15(4): 932-959.
54. Mohammad Reza Fallah Ghanbari, Katayoun Jahangiri, Mostafa Pouyakian, Farid Ghaffari. Separation Distance of Petrol and LPG Cargo Tankers in Parking Lot: A Consequence Modeling Study. *Iran Occupational Health* 2. 2023;023 (01 Aug);20: 11).
55. Marzec D, Skorupski J. FRAM-Based Analysis of Airport Risk Assessment Process. *Aerospace*. 2025;12(2):99.