Journal of Health and Safety at Work 2024; 14(1): 119-134

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Risk Analysis of The Steel Erection Process Using The Functional Resonance Analysis Method

Mehran Maleki Roveshti[1], Zahra Naghavi-Konjin[2,*], Siavash Etemadinezhad[1], Jamshid Yazdani Charati[4]

[1]Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran.
[2]Department of Biostatistics, School of Public Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran.

Received: 2023-4-5 Accepted: 2024-3-3

ABSTRACT

Introduction: Steel erection is known as one of the most hazardous construction activities. From an occupational health and safety perspective, this process carries high risk. Therefore, this study aims to conduct a qualitative risk analysis of steel structure assembly and model it using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM).

Material and Methods: In this cross-sectional study, the construction site of a high-rise building steel structure was first visited to identify the main processes involved. Then, semi-structured and open-ended interviews were conducted with 33 workers partaking in this process. Data from the interviews and process identification were entered into FRAM Model Visualiser (FMV) software to investigate and model complex relationships and interactions between daily tasks.

Results: Of the 19 major system component functions identified, four functions had potential instability and defects due to complex human, organizational, and technological function interactions. By intensifying the FRAM graphic model, risks may be imposed on the system if the interactions of these four functions are neglected. These include coordination with the experienced rigger, preparation of the tower crane, attachment of parts at the installation site, and execution of the rescue rope.

Conclusion: The findings demonstrate that conducting qualitative risk assessment and modeling the steel frame construction process using FRAM allows for an in-depth understanding of nonlinear conditions and dynamics resulting from escalating technical-social interactions. This approach enables a comprehensive analysis of system safety status.

Keywords: *Construction industry, Steel erection, Industrial safety, Risk assessment, FRAM*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mehran Maleki Roveshti, Zahra Naghavi-Konjin, Siavash Etemadinezhad, Jamshid Yazdani Charati. Risk Analysis of The Steel Erection Process Using The Functional Resonance Analysis Method. J Health Saf Work. 2024; 14(1): 119-134.

1. INTRODUCTION

Dynamism and continual developments are prominent features of the construction industry. As one of the most hazardous industries with high-risk activities, construction workers face substantial risks that can lead to serious injuries and even death. Compared to other industries, the construction industry has among the most accidents. According to the U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), one

* Corresponding Author Email: *z.naghavi@mazums.ac.ir*

Copyright © 2024 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.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

in five work-related fatalities in 2016 occurred in construction. Construction projects often utilize metal structures, which provide suitable and cost-effective options over other building materials. However, erecting steel structures involves complex and dynamic tasks with considerable uncertainties. All methods employed to analyze risks in steel structure assembly are currently traditional approaches. These fail to capture the nonlinear and dynamic nature of the work.

Moreover, to our knowledge, very few studies examine the operational risks of metal structure construction, especially regarding worker safety and health. Therefore, this study aims to leverage the functional resonance analysis method (FRAM) to analyze risks in the steel erection process. FRAM can provide a systematic and comprehensive methodology as a complex socio-technical system.

2. MATERIAL AND METHODS

This descriptive cross-sectional study was conducted in 2021 at a high-rise construction project site belonging to a company in Tehran. Purposive sampling was used to select participants. Inclusion criteria comprised at least one year of experience in various steel structure erection processes and willingness to cooperate with researchers. First, field visits and individual and participatory observations of work tasks were undertaken in coordination with project managers and officials to collect initial data. Then, workers' perspectives and the decision-making team's (expert panel) opinions were leveraged to identify and analyze risks involved in steel structure erection. For this purpose, a set of questions was designed as a template for conducting semi-structured and open-ended interviews. The decision-making team (expert panel) consisted of members with diverse attitudes, specializations, and backgrounds in steel structure erection.

3. RESULTS AND DISCUSSION

All participants in this study were male, with an average age of 30.6 ± 7.6 years. In addition, their average work experience was 5.6 ± 4.2 years, and over 65% were married. Regarding education,

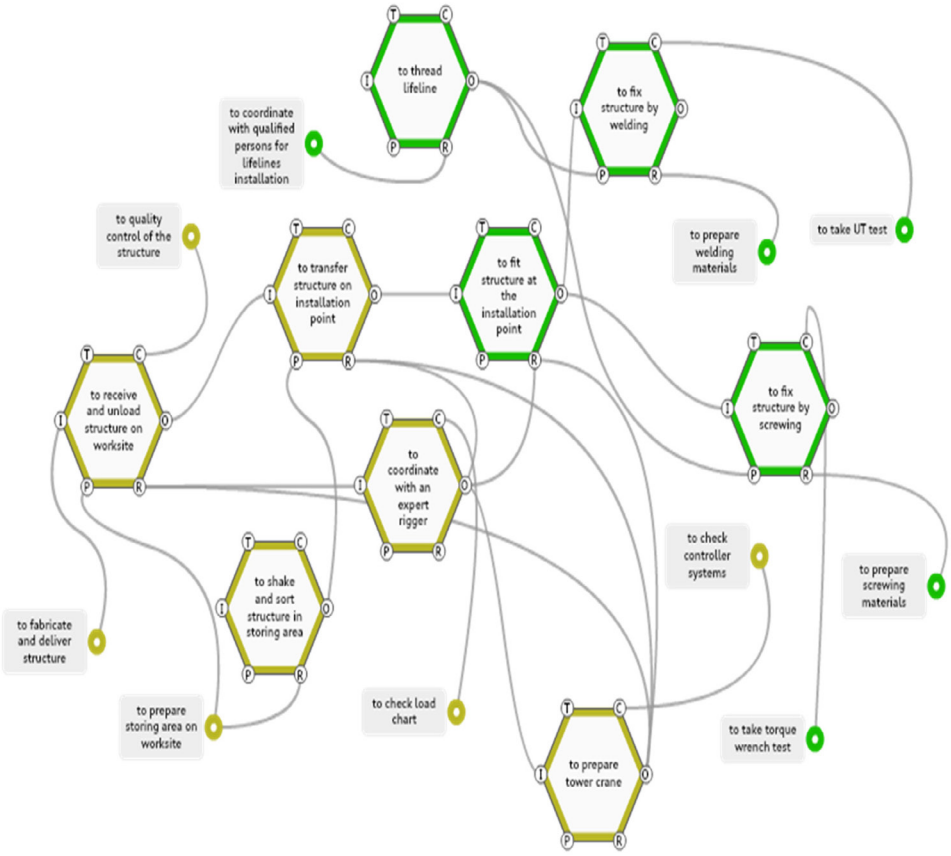


Fig. 1: FRAM network steel erection operation

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

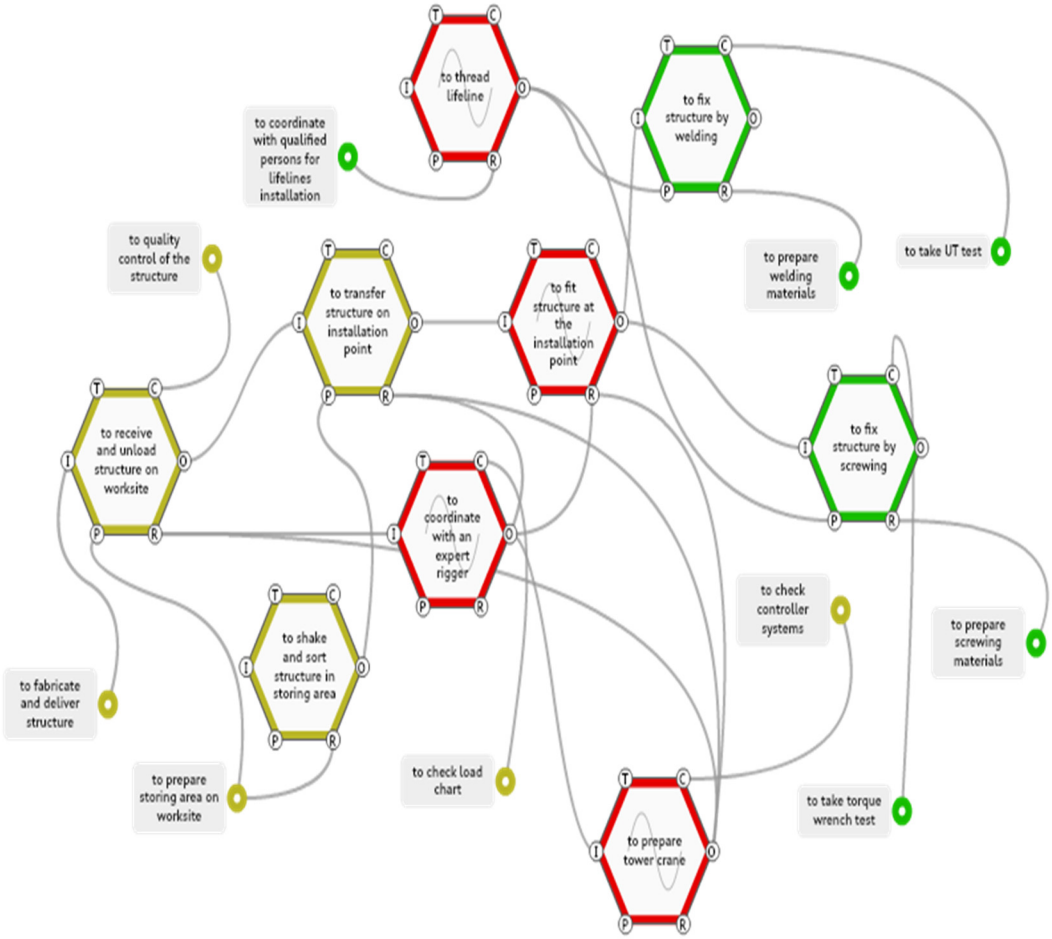


Fig. 2: FRAM network process of steel erection by applying functional intensification

Table 1: List of functions identified in the steel erection operation

Recognized functions	
To fabricate and deliver structure	To fit structure at the installation point
To receive and unload structure on the worksite	To take the UT test
To quality control of the structure	To prepare welding materials
To coordinate with qualified persons for lifelines installation	To fix structure by screwing
To prepare storing area on the worksite	To check controller systems
To shake and sort structure in storing area	To prepare tower crane
To transfer structure on the installation point	To take torque wrench test
To thread lifeline	To prepare screwing materials
To fix structure by welding	To check the load chart
To coordinate with an expert rigger	

most participants' highest level was elementary school or high school diploma. The observations, site visits, and interviews revealed that the steel structure erection process comprises two main processes: pre-workshop operations and workshop operations. Pre-workshop operations include structural design, architectural design, scheduling, delivery of structures, procurement of construction

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

machinery, and review of execution plans per Iran's National Building Regulations. However, this study primarily focused on workshop operations consisting of two key processes: loading and assembly of structures. Four of the 19 major system component functions identified (Table 1) were found to have potential instability and failure due to complex human, organizational, and technological function interactions. The analysis results of human, organizational, and technological functions are shown in Figure 1. Intensification of the system's graphical model indicated that neglecting interactions across four key functions can impose risks on the system (Figure 2). These four functions are coordination with an experienced rigger, preparation of the tower crane, stabilization of parts at the installation site, and execution of the rescue rope.

4. CONCLUSIONS

In total, 19 functions were identified in the steel structure erection process at the workshop level. The FRAM risk analysis of steel structure operations showed that four functions can potentially resonate if interactions between them are neglected and appropriate measures are not implemented. This could then impact employee safety and health. FRAM enables the examination of a complex socio-technical system as a combination of various human, organizational, and technological functions whose variability poses risks to the system under study. FRAM provides a promising new approach to analyzing such system components. The graphical model obtained from this study can easily identify intensified functions to guide the implementation of necessary dampening measures.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study is the result of a master's thesis. The authors would like to express their sincere gratitude to all those who cooperated in the research.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار
جلد ۱۴/ شماره ۱/ بهار ۱۴۰۳ صفحات ۱۱۹-۱۳۴

آنالیز ریسک برپایی اسکلت فلزی با استفاده از روش آنالیز تشدید عملکردی

مهران ملکی روشتی[۱]، زهرا نقوی کنجی[۱*]، سیاوش اعتمادی نژاد[۱]، جمشید یزدانی چراتی[۲]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
[۲]گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

چکیده

مقدمه: فرایند برپایی اسکلت فلزی به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین فعالیت‌ها در صنعت ساخت‌وساز شناخته می‌شود. همچنین این فرایند از نظر ایمنی و بهداشت شغلی، بسیار پرخطر محسوب می‌گردد. لذا هدف پژوهش حاضر، آنالیز کیفی ریسک برپایی اسکلت فلزی و مدل‌سازی آن با استفاده از روش آنالیز تشدید عملکردی (FRAM) است.

روش کار: در مطالعه توصیفی-مقطعی حاضر، ابتدا بازدیدی از سایت برپایی اسکلت فلزی یک برج بلندمرتبه درحال ساخت در یک شرکت ساختمانی جهت شناسایی فرایندهای اصلی در پروسه برپایی انجام گردید. سپس با ۳۳ نفر از کارگران شاغل در این فرایند، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و انتها باز، صورت گرفت. داده‌های حاصل از مصاحبه و مشخصات فرایند، جهت تجزیه‌وتحلیل و مدل‌سازی روابط پیچیده و تعاملات بین وظایف روزانه در نرم‌افزار FRAM Model Visualiser (FMV) وارد گردید.

یافته ها: نتایج مطالعه نشان داد، در ۴ عملکرد از ۱۹ عملکرد اصلی اجزای سیستم شناسایی شده، به‌دلیل تعاملات پیچیده مابین عملکردهای فنی، انسانی و سازمانی، پتانسیل بی‌ثباتی و شکست وجود دارد. اعمال تشدید در مدل گرافیکی سیستم نشان داد درصورت نادیده گرفتن فعل‌وانفعالات در ۴ عملکرد شامل هماهنگی با ریگر باتجربه، آماده‌سازی تاور کرین، تثبیت قطعات در محل نصب و اجرای طناب نجات، ممکن است ریسک‌هایی جبران‌ناپذیری بر سیستم تحمیل گردد.

نتیجه گیری: یافته‌ها نشان داد، ارزیابی کیفی ریسک و مدل‌سازی پروسه برپایی اسکلت فلزی با به‌کارگیری روش FRAM برای درک شرایط غیرخطی و پویایی ناشی از تشدید بین تعاملات فنی-اجتماعی، می‌تواند تحلیل جامعی از وضعیت ایمنی سیستم ارائه دهد.

کلمات کلیدی: *صنعت ساخت‌وساز، برپایی اسکلت فلزی، ایمنی صنعتی، ارزیابی ریسک، FRAM*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *z.naghavi@mazums.ac.ir*

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

مقدمه

ماهیت پویا و تحولات گوناگون در فرایندهای کاری، از ویژگی‌های برجسته صنعت ساخت‌وساز است(۱). این صنعت با دارا بودن بیشترین حوادث، جزو صنایع با ریسک بالا محسوب می‌گردد(۲). محیط کاری متغیر، شرایط کاری ضعیف، مشاغل موقت، پیمانکاران اصلی و فرعی و اپراتورهای مستقل، از جمله دلایل افزایش ریسک حوادث در این صنعت است(۳). ازاین‌رو، کارگران ساخت‌وساز در مقایسه با کارگران سایر صنایع، در معرض خطرات بیشتری قرار دارند که نتیجهٔ آن آسیب‌های جدی و حتی مرگ‌ومیر است(۴, ۵). مطابق با آمار اداره ایمنی و سلامت شغلی آمریکا (OSHA) در سال ۲۰۱۶، از هر پنج مورد حادثه منجر به مرگ، یک مورد از آن در صنعت ساخت‌وساز رخ داده است(۶). بررسی روند حوادث شغلی توسط ایزدی و همکاران، حاکی از رخداد بیشترین حوادث ناشی از کار در صنعت ساخت‌وساز نسبت به سایر صنایع در بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۶ در ایران می‌باشد(۷).

امروزه هدف اصلی شرکت‌های فعال در حوزه ساخت‌وساز، نه‌تنها پیشگیری از بروز حوادث، بلکه مقابله با اختلالات و تغییرات روزانه به‌منظور حفظ سیستم در حالت عملکرد عادی است و برای دستیابی به آن، لازم است تا مدیریت ایمنی یک سیستم صنعتی انعطاف‌پذیر و رزیلینس‌محور باشد. موضوع ایمنی با توجه به سابقه حوادث شغلی در صنعت ساخت‌وساز، همواره مورد توجه محققان بوده و مطالعات زیادی در زمینه‌های مختلف این موضوع انجام شده است(۱, ۲, ۸).

مواردی از قبیل: معرفی استانداردهای ایمنی، بررسی استانداردها و قوانین ایمنی(۹) و تطابق آنها با شرایط موجود در کشور، ارزیابی ایمنی از روش‌های مختلف با ارائه مدل‌ها و چارچوب‌هایی برای استفاده در پروژه‌های آتی و عوامل ایمنی محیطی، مورد بررسی بیشتری قرار گرفته است(۱۰).

در دهه‌های اخیر، صنعت ساخت‌وساز به‌طور چشمگیری تکامل یافته و بیشتر فرایندهای آن پیچیده‌تر شده‌اند(۱۱). محیط کاری صنعت ساخت‌وساز (یعنی پروژه‌های ساختمانی عمودی، افقی یا زیرزمینی) به‌دلیل ساختار بسیار بهم پیوسته، گردش کار سخت به لحاظ کنترل و غیرقابل پیش‌بینی بودن و نیز تعامل پیچیدهٔ مؤلفه‌های آن، به‌عنوان سیستم فنی-اجتماعی پیچیده‌ای شناخته می‌شود. مطالعات تئوری سیستم‌های فنی-اجتماعی پیچیده، به‌جای تفحص دربارهٔ اجزای یک سیستم به‌صورت مجزا، به روابط مؤلفه‌ها در یک سیستم پیچیده می‌پردازند(۱۲). سیستم‌های فنی-اجتماعی پیچیده متشکل از مؤلفه‌ها یا عملکردهایی از جمله تکنولوژی‌ها (فناوری‌ها)، انسان‌ها و سازمان‌هاست(۱۳). جنبه اجتماعی نیز شامل عوامل انسانی است که به فرد (ویژگی‌های کارگران) مربوط می‌شود.

جنبه‌های فنی مختلفی مانند: ابزارها، منابع، دستگاه‌ها و هر نیازی که اجرای عملکرد سیستمی را برآورده می‌کند، وجود دارد و جنبه سازمانی شامل محیط کاری، ساختار سازمانی، سیاست‌ها، خط‌مشی‌ها و سایر موارد هستند(۱۴). روابط پیچیده بین انسان‌ها و محیط‌های آنها از جمله تکنولوژی‌ها و سازمان‌ها، نشان می‌دهد که ایمنی در چنین سیستم‌هایی، فرایندی خطی و مستقیم نیست(۱۵). ماهیت غیرخطی و وابستگی‌ها، ممکن است باعث تقویت پیامدهای نامطلوب سیستم‌های پیچیده شود(۱۶).

ازآنجایی‌که روش‌های سنتی تحلیل و ارزیابی ریسک قادر به نشان دادن نحوهٔ تعامل اجزای سیستم از جمله عوامل فنی، انسانی و سازمانی نیستند، لذا ترکیب این عوامل می‌تواند منجر به حادثه شود(۱۷). به همین دلیل، در پایان قرن بیستم، رویکرد جدیدی برای تجزیه‌وتحلیل ریسک در سیستم‌های فنی-اجتماعی به‌کار گرفته شد(۱۸).

روش آنالیز تشدید عملکردی (FRAM)، که توسط هولناگل معرفی شد(۱۹)، می‌تواند به‌صورت کیفی، نحوهٔ عملکردهای یک سیستم پیچیده را با در نظر گرفتن تعاملات اجتماعی و تکنولوژی مدل‌سازی کند(۲۰). از نظر علمی این روش با درک محدودیت‌های ایمنی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

سنتی (Safety-I)، توسعه‌یافته است و به‌طور فزاینده‌ای در محیط‌های صنعتی با نتایج موفقیت‌آمیزی به‌کار گرفته شده است(۲۱). تفکر ایمنی سنتی (Safety-I) بر اینکه چه چیزی به خطا می‌رود به‌جای اینکه چه چیزی درست پیش می‌رود (تفکر ایمنی جدید یا Safety-II)، تمرکز می‌کند(۲۲). برخلاف سایر روش‌های سنتی ارزیابی کیفی ریسک، FRAM ماهیتی پویا داشته و ریسک را به‌عنوان مجموعه‌ای غیرخطی از تعاملات بین انسان، سازمان و تکنولوژی در نظر می‌گیرد.

بنابراین مرزهای سیستم با توجه به تغییرات عملکردها مشخص می‌شود و تشدید عملکرد، هستهٔ اصلی این روش را تشکیل می‌دهد(۲۳). نقطه قوت FRAM، تأمین درک کلی از اینکه چگونه سیستم فنی-اجتماعی کار می‌کند یا باید کار کند، می‌باشد(۲۴).

در پروژه‌های ساخت‌وساز عموماً از اسکلت فلزی استفاده می‌گردد که مناسب‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر از دیگر سازه‌هاست(۲۵). درعین‌حال، فعالیت برپایی اسکلت فلزی دارای پیچیدگی و پویایی خاص خود می‌باشد(۲۶) و با عدم قطعیت‌های زیادی مشخص می‌گردد(۲۷). شناسایی ریسک‌های نوظهور در صنعت ساخت‌وساز به‌دلیل تعاملات پیچیده فنی-اجتماعی دشوار است. درحال‌حاضر، روش‌های کیفی به‌کار گرفته شده برای آنالیز ریسک برپایی سازه اسکلت فلزی جزو روش‌های سنتی تجزیه‌وتحلیل ریسک می‌باشند که قادر به درک ماهیت غیرخطی و پویای فعالیت‌های کاری نیستند. ازاین‌رو، هدف پژوهش حاضر استفاده از روش FRAM برای آنالیز کیفی ریسک فرایند برپایی اسکلت فلزی است که در یک سیستم پیچیده فنی-اجتماعی می‌تواند نگرش سیستمی و جامع ارائه دهد.

روش کار

پژوهش حاضر از نوع توصیفی-مقطعی بوده و در یکی از پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی یک شرکت ساختمانی در تهران در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. مراحل اجرای پژوهش به تفصیل در ذیل شرح داده شده است.

۱- گردآوری داده‌ها

در ابتدا، با هماهنگی و کسب مجوز از مدیران و مسئولان پروژه، بازدیدهای میدانی و مشاهدات فردی-مشارکتی از فرایندهای کاری و وظایف روزانه کارگران برپایی اسکلت فلزی به‌منظور جمع‌آوری داده‌های اولیه صورت گرفت. سپس برای شناسایی و آنالیز کیفی ریسک برپایی اسکلت فلزی مجموعه سؤالاتی به‌عنوان الگو جهت انجام مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و انتها باز، طراحی گردید. کارگران فعال در پروسه برپایی اسکلت فلزی با روش نمونه‌گیری هدفمند و با معیارهای ورود از جمله داشتن حداقل یک سال سابقه کاری و تمایل به همکاری با پژوهشگران، وارد این مطالعه شدند. ۳۳ نفر از کارگران در جلسات پرسش و پاسخ در گروه‌های ۱ تا ۵ نفره شرکت کردند.

همچنین یک تیم تصمیم‌گیری از خبرگان پروژه (پانل خبرگان) که افرادی با تخصص و سابقه بالا در فرایند برپایی اسکلت فلزی بودند، انتخاب گردید. پانل خبرگان با هدف اصلاح شکاف و بررسی نظرات کارگران و متخصصین ایجاد گردید.

در جدول ۱، جزئیات و اطلاعات حاصل از مشاهدات، مصاحبه‌ها و تیم تصمیم‌گیری گزارش شده است.

۲- تحلیل داده‌ها

وظایف روزانه را می‌توان بدون پیش تعریف روابط، سطوح یا ساختارهای خاص به‌صورت عملکردی با به‌کارگیری روش FRAM توصیف کرد. ازاین‌رو، نتایج یک فعالیت یا فرایند، مبتنی بر چهار اصل اساسی زیر است:

الف) اصل برابری موفقیت‌ها و شکست‌ها:

این اصل بیان می‌دارد که موفقیت به معنای پیش‌بینی رخدادهای نوظهور، جهت شناسایی به موقع آن و نهایتاً بازخورد مناسب در مقابل آن است، درحالی‌که شکست در نقطهٔ مقابل موفقیت قرار می‌گیرد.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

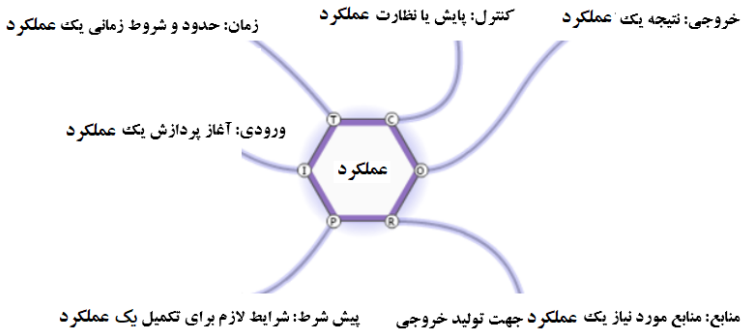
جدول ۱: جزئیات جمع آوری داده‌های پژوهش

۱	*مشاهدات (مستندسازی عکس و فیلم)
	مرحله ۱: فرآیند باربرداری تعداد عکس=۱۲ تعداد فیلم=۲
	مرحله ۲: فرآیند نصب تعداد عکس=۱۷ تعداد فیلم=۴
۲	*مصاحبه‌ها (مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته و انتها باز)
	کارگران سازه فولادی (شغل و تعداد) ریگر= ۳ راننده جراثقیل=۴ لیفتینگ، نصب و تکمیل کاری= ۲۶
۳	تیم تصمیم‌گیری (پانل خبرگان)

مدرک تحصیلی	سابقه کاری (سال)
کارشناسی ارشد عمران	۱۵
کارشناسی ارشد مکانیک	۵
کارشناسی ارشد HSE	۱۱
کارشناسی عمران	۷
کارشناسی ارشد HSE	۳

*بازه زمانی مشاهدات و مصاحبه‌ها: ۱۰ – ۳۰ دقیقه

*زمان کل مشاهدات و مصاحبه‌ها: ۵۲۶ دقیقه



شکل ۱: عناصر مشخصه روش FRAM (۲۹)

ب) اصل هماهنگی با شرایط موجود:

این اصل به این معنی است که تقریباً هیچ برنامه‌ای به‌صورت ایده‌آل و انطباق‌یافته با مستندات سازمان نیست.

ج) اصل نوظهوری:

هرچند شکست در هریک از اجزای سیستم می‌تواند منجر به بی‌ثباتی و پیامدهایی چون شبه‌حادثه و حادثه شود، اما ترکیب شکست در چندین جزء از مجموعهٔ عملکردهای سیستم، می‌تواند منجر به بروز حالت نوظهوری گردد.

د) اصل تشدید عملکرد:

به‌عنوان تغییرپذیری قابل‌تشخیص (فراآستانه‌ای) تعریف می‌شود که از تعامل ناخواسته تغییرپذیری روزانه عملکردهای چندگانه پدیدار می‌شود(۲۸).

در روش FRAM، اساس تجزیه‌وتحلیل و آنالیز ریسک، یافتن عناصر مشخصه توابع سیستمی است که با عملکردها/ وظایف مرتبط هستند. به‌دنبال شناسایی عملکردها، آنالیز سیستم به‌واسطهٔ مشخص کردن هر عملکرد برحسب شش جنبه یا پارامتر شامل ورودی، خروجی، پیش‌شرط، منابع، کنترل و زمان انجام گرفت

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

جدول ۲: فرآین‌دهای اصلی برپایی سازه اسکلت فلزی

فرآیند اصلی	توصیف
۱. باربرداری سازه	در این فرآیند، بعد از ساخت و ارسال قطعات اسکلت فلزی توسط کارخانه در سایت پروژه، مکانی برای تخلیه و انبار آن ایجاد می‌گردد. بعد از چینش و الویت‌بندی قطعات، ریگر تجهیزات باربرداری را آماده می‌سازد و قطعات فلزی به موقعیتِ از پیش تعیین شده (مطابق با نقشه کارگاه) جابجا می‌گردد. این فرآیند زمانی به پایان می‌رسد که نصاب اسکلت، بار را در محل جبهه کاری برای تثبیت اولیه سازه دریافت نماید.
۲. نصب سازه	
الف) تثبیت سازی	در فرآیند تثبیت‌سازی، نصاب اسکلت قطعات فلزی را در موقعیت خود بصورت اتصال پیچ و مهره‌ای یا اتصال جوشی قرار می‌دهد. بعد از اتمام تثبیت اولیه، نصاب اسکلت، به اپراتور جرثقیل فرمان می‌دهد که قلاب جرثقیل آزاد و مجددا به سوی محوطه سایت باز گردد.
ب) تکمیل کاری	در فرآیند تکمیل کاری، کلیه اتصالات سازه‌ای (پیچ و مهره‌ای یا جوشی) تکمیل نهایی می‌گردد. نصاب‌های اسکلت فلزی در تکمیل این فعالیت نقش پررنگی ایفا می‌نمایند.

(شکل ۱). در ادامه از نرم‌افزار FRAM Model (FMV) Visualizer نسخه ۰.۴.۱.۱، برای ایجاد ساختار، نمایش گرافیکی و تشدید عملکردی استفاده گردید.

یافته ها

جنسیت همهٔ افراد شرکت‌کننده در این مطالعه مرد و میانگین سنی آنها ۷/۶±۳۰/۶ سال بود. همچنین میانگین سابقه کاری ۴/۲±۵/۸/۶ سال و بیش از ۶۵ درصد شرکت‌کنندگان متأهل بودند. از نظر تحصیلات، بیشترین فراوانی مربوط به مقطع زیردیپلم و دیپلم و سپس بالای دیپلم بود. نتایج حاصل از مشاهدات و بازدیدهای میدانی از سایت پروژه و نیز مصاحبه‌های انجام گرفته شده نشان داد، فرایندهای برپایی اسکلت فلزی شامل دو فرایند اصلی عملیات پیش‌کارگاهی و عملیات کارگاهی است. در عملیات پیش‌کارگاهی مواردی از قبیل طراحی و معماری سازه، زمان‌بندی پیشرفت سازه، ساخت و تحویل سازه، تأمین ماشین‌آلات عمرانی و بازبینی نقشه‌های اجرایی مطابق با آیین‌نامه‌های مقررات ملی ساختمان‌سازی ایران در نظر گرفته می‌شوند. اما عملیات کارگاهی مشتمل بر دو فرایند باربرداری و نصب سازه می‌باشد که تمرکز اصلی این پژوهش بر روی عملیات کارگاهی است. فرایندهای عملیات کارگاهی برپایی اسکلت فلزی در جدول ۲ توصیف شده است.

پس از تعیین فرایندهای اصلی برپایی اسکلت فلزی، شناسایی عملکردها/وظایف ضروری مطابق چارت شرح وظایف شغلی کارگران، روش‌ها و دستورالعمل‌های جاری در مشاغل مورد نظر و با همکاری و راهنمایی تیم تصمیم‌گیری انجام گردید. در مجموع ۱۹ عملکرد مطابق جدول ۳ شناسایی و سپس اقدام به تعیین ورودی، خروجی، پیش‌شرط، منابع، زمان و کنترل در خصوص هر عملکرد/ وظیفه گردید.

نظر به اینکه نرم‌افزار FRAM، قابلیت زبان فارسی را ندارد، نام عملکردها به زبان انگلیسی ذکر شده است.

پس از بررسی جداگانه عملکردهای تشدید شونده، شش مسیر که ممکن است در آنها چند عملکرد با تأثیر بر یکدیگر موجب گسترده شدن مسیر در سطح شبکه شوند، شناسایی شدند. مسیر عملکردهای شبکه FRAM سیستم با مشخصه انسانی، سازمانی و تکنولوژیکی در شکل ۲ ترسیم شده است. به‌طور مثال، عملکرد دریافت و تخلیه قطعات در سایت کاری تابع ورودی برای انجام عملکرد ارسال قطعات به محل نصب است که مسیری از O به I را به وجود آورده است.

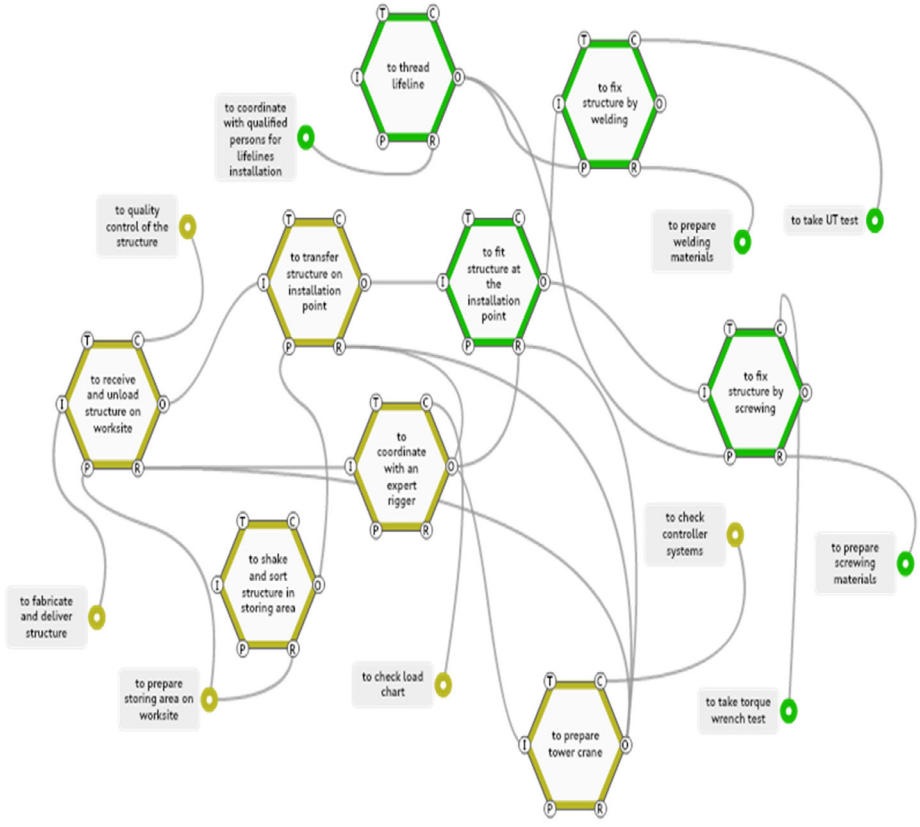
شش جنبه تشریحی هرکدام از عملکردهای شناسایی شده سیستم (شکل ۲) بیانگر این امر که در مرحله بعدی، توصیف تغییرپذیری عملکرد برای درک چگونگی جفت‌شدگی (کوپلینگ) عملکردها و اینکه چگونه تغییرپذیری عملکردهای بالادست می‌تواند بر عملکردهای پایین‌دست تأثیر گذارد، مورد نیاز است.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

جدول ۳. لیست عملکردهای شناسایی شده در عملیات برپایی اسکلت فلزی

نام عملکرد	عبارت انگلیسی	مشخصه	نام عملکرد	عبارت انگلیسی	مشخصه
ساخت و ارسال قطعات	To fabricate and deliver structure	تکنولوزیکی	تثبیت قطعات در محل نصب	To fit structure at the installation point	انسانی
دریافت و تخلیه قطعات در سایت کاری	To receive and unload structure on worksite	انسانی	انجام تست UT	To take UT test	سازمانی
کنترل کیفیت قطعات	To quality control of the structure	سازمانی	فراهم‌سازی مواد جوشکاری	To prepare welding materials	تکنولوژیکی
هماهنگی با متخصصین نصب طناب نجات	To coordinate with qualified persons for lifelines installation	سازمانی	تکمیل سازه با پیچ و مهره	To fix structure by screwing	انسانی
آماده‌سازی محوطه انبار قطعات در سایت کاری	To prepare storing area on worksite	انسانی	چک کردن عملگرهای کنترلی	To check controller systems	سازمانی
چینش و الویت‌بندی قطعات در محوطه انبار	To shake and sort structure in storing area	انسانی	آماده‌سازی تاورکرین	To prepare tower crane	سازمانی
ارسال قطعات به محل نصب	To transfer structure on the installation point	انسانی	انجام تست ترک‌متر	To take torque wrench test	سازمانی
اجرای طناب نجات	To thread lifeline	سازمانی	فراهم‌سازی مواد پیچ و مهره	To prepare screwing materials	تکنولوژیکی
تکمیل سازه با جوشکاری	To fix structure by welding	انسانی	چک کردن جدول بار	To check load chart	انسانی
هماهنگی با ریگر با تجربه	To coordinate with an expert rigger	انسانی			

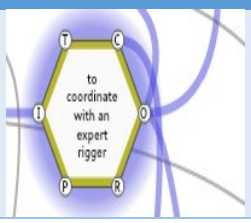


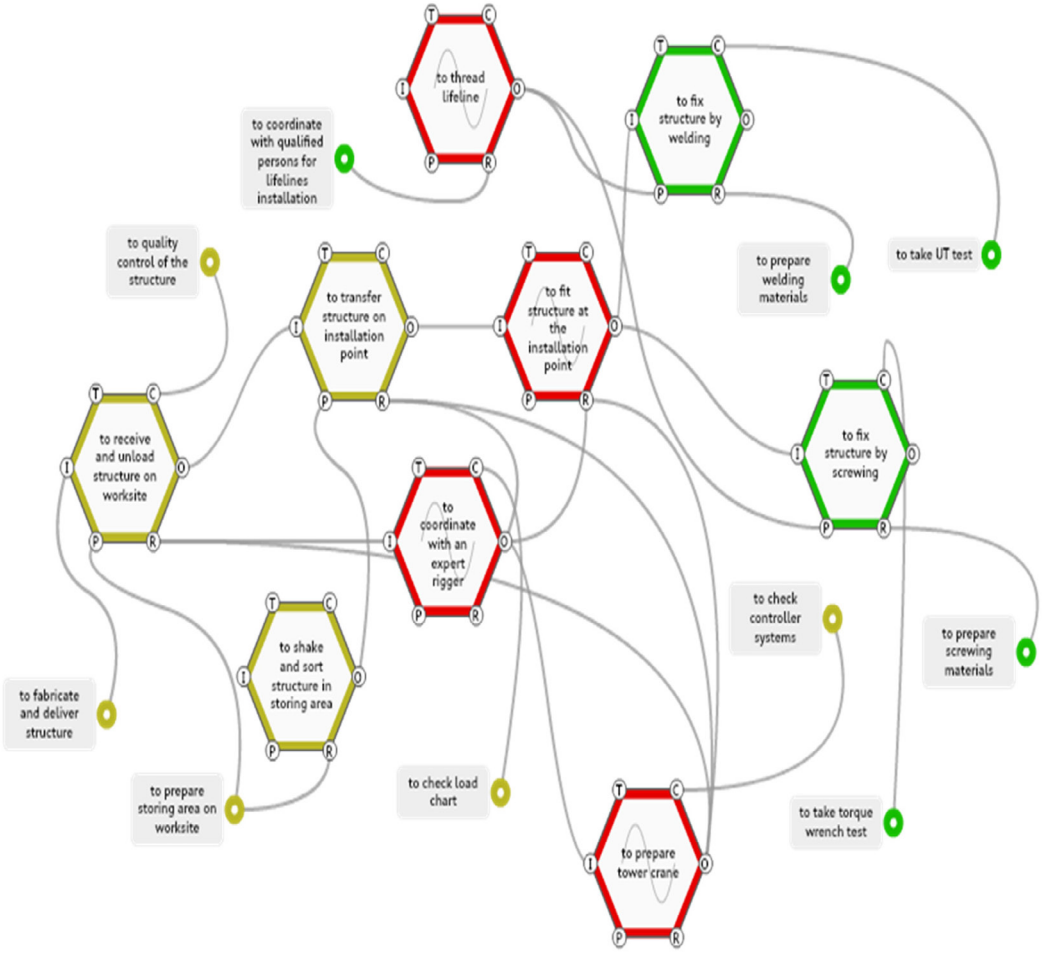
شکل ۲: شبکه FRAM عملیات برپایی‌اسکلت فلزی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

جدول۴. شناسایی تغییرات عملکردی هماهنگی با ریگر با تجربه

تغییرات عملکرد هماهنگی با ریگر باتجربه		
خروجی تغییر پذیری	خروجی تابع سیستمی	
به موقع	تناسب سرعت عملیات	
خیلی زود	تعجیل در سرعت عملیات	
خیلی دیر	تاخیر در سرعت عملیات	
هرگز	اختلال در عملیات	



شکل ۳: شبکه FRAM فرآیند برپایی اسکلت فلزی با اعمال تشدید عملکردی

جدول ۴، تغییرپذیری عملکرد «هماهنگی با ریگر باتجربه» را به‌عنوان نمونه مشخص می‌کند. ریگر باید در مورد جابه‌جایی و انتقال بار و خصوصیات آن از جمله تناژ بار، نوع بار، حجم بار و... تصمیم‌گیری کند. هرگونه تصمیم نادرست وی می‌تواند باعث شود تا ریسک سیستم افزایش یابد و سبب بروز حادثه گردد. دیدگاه سیستماتیک آنالیز ریسک FRAM، شناسایی و کاهش تغییرپذیری و ممانعت از تداوم حالت‌های تشدیدی در سیستم است، در غیر این

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

صورت، نتایج نامطلوب به بار می‌آید.

از میان همهٔ عملکردهای شناسایی شده در عملیات برپایی اسکلت فلزی مطابق جدول ۳، چهار عملکرد دارای تشدید عبارت بودند از: هماهنگی با ریگر باتجربه (To coordinate with an expert rigger)، آماده‌سازی تاور کرین (To prepare tower crane)، تثبیت قطعات در محل نصب (To fit structure at the installation point) و اجرای طناب نجات (To thread lifeline).

شکل ۳، شبکه FRAM فرایند را با اعمال تشدید عملکردی نشان می‌دهد. عملکردها/وظایفی که دارای تغییرپذیری زیاد بوده‌اند با حاشیه قرمز رنگ از سایر عملکردها متمایز شده‌اند.

بحث

مطالعه حاضر با هدف آنالیز ریسک عملیات برپایی اسکلت فلزی با استفاده از روش آنالیز تشدید عملکردی انجام گردید. یافته‌های مطالعه نشان داد در ۱۹ عملکرد اصلی شناسایی شده اجزای سیستم، چهار عملکرد به‌دلیل تعاملات پیچیده مابین عملکردهای انسانی، سازمانی و تکنولوژیکی دارای پتانسیل بی‌ثباتی و شکست است. اعمال تشدید در مدل گرافیکی سیستم نشان داد، درصورت چشم‌پوشی از تعاملات ۴ عملکرد هماهنگی با ریگر باتجربه، آماده‌سازی تاور کرین، تثبیت قطعات در محل نصب و اجرای طناب نجات، خطراتی به سیستم تحمیل خواهد گردید. تغییرپذیری این عملکردها/وظایف ممکن است به دیگر عملکردهای چندگانه سیستم توسعه یابد و کارآیی سیستم را تحت‌تأثیر قرار دهد.

در مطالعهٔ اردشیر و همکاران (۲۰۱۴)، ارزیابی ریسک‌های ایمنی مؤثر بر ایمنی افراد در پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی با رویکرد فازی نشان داد که کار در ارتفاع با فاکتور ریسک ۸۹٪ به‌عنوان بحرانی‌ترین ریسک محسوب می‌شود(۳۰). چهار عامل خطمشی، فرایند، مدیریت، کارکنان و انگیزه، عوامل مؤثر بر ایمنی در کارگاه‌های ساختمانی بیان شده‌اند(۳۱).

ترفیعی و انوشه (۱۳۸۹) در ارزیابی ریسک مخاطرات بالقوه اسکلت فلزی و جرثقیل در ساختمان‌سازی به روش تکنیک تجزیه‌وتحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA)، بالاترین عدد اولویت ریسک (RPN) را مرتبط با فعالیت‌های انتقال قطعات به محل ساخت، تخلیه قطعات به محل کار، انتقال قطعه روی سازه جهت نصب و واژگونی جرثقیل ارزیابی کردند(۳۲) که نتایج مطالعه حاضر هم‌سو با نتایج مذکور می‌باشد.

همچنین در ارزیابی ریسک ایمنی مبتنی بر شبکه بیزین و درخت خطا (FTA) در ساخت‌وساز اسکلت فلزی، سقوط از ارتفاع، سقوط بار و اجسام از ارتفاع، سقوط ابزارآلات کار از ارتفاع و برق‌گرفتگی از اصلی‌ترین حوادث به وقوع پیوسته در برپایی اسکلت فلزی گزارش شده‌اند(۳۳). ازاین‌رو اجرای طناب نجات در پروژه‌های برپایی اسکلت فلزی می‌تواند ریسک سقوط افراد از ارتفاع را کاهش دهد.

نتایج پژوهش Pardo-Ferreira و همکاران (۲۰۲۰) با عنوان «به‌کارگیری روش FRAM برای درک فعالیت‌های ساخت‌وساز برای سازه‌های بتنی»، نشان داد زمان سفارش و تحویل بتن، باربرداری با تاور کرین و حفاظزنی جهت پیشگیری از سقوط در فاز ساخت‌وساز بتنی از عملکردهای تشدیددار هستند که لازم است میرا گردند. همچنین نیاز به بهبود فرهنگ ایمنی و استقرار نظام ایمنی و بهداشت شغلی برای وظایف کاری روزانه بیان گردید(۱۱).

از جمله منابع تغییرپذیری بیرونی که ممکن است بر فعالیت ساخت‌وساز برپایی اسکلت فلزی تأثیر گذارد، شرایط آب‌وهوایی است. وزش باد، رعدوبرق، بارش باران و برف بیشترین تأثیر را در روند پیشرفت برپایی اسکلت فلزی می‌گذارند. مشابه سایر فعالیت‌های ساخت‌وساز، اکثر فعالیت‌های عمرانی در فضای باز و غیرسرپوشیده انجام شده و برپایی اسکلت فلزی نیز دستخوش تغییرات آب‌وهوایی زیادی است. هنگام برپایی و نصب سازه، لازم است تا شرایط آب‌وهوایی مد نظر قرار گیرد زیرا می‌تواند ایمنی کارگران و روند اجرای سازه را تحت‌تأثیر قرار دهد.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

دیگر منبع تغییرپذیری بیرونی، ساخت و ارسال پیش از موعد یا تأخیر در تحویل قطعات فولادی توسط کارخانه سازنده به سایت پروژه است. این امر می‌تواند منجر به اختلال در روند برنامه زمان‌بندی برپایی اسکلت فلزی‌گردد. به این معنی که حجم کاری فعالیت‌ها می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد. به همین دلیل ممکن است کارفرما و پیمانکاران برای تنظیم و تعادل مدت زمان پیشرفت فیزیکی پروژه، فعالیت را متوقف یا به کارگران اضافه‌کاری تحمیل نمایند.

دیگر منبع تغییرپذیری بیرونی، سازمان‌های دولتی و غیردولتی هستند. درک و اجرای بهتر حفاظت‌ها (از قبیل سیستم‌های حفاظت در برابر سقوط، تجهیزات حفاظت فردی و...)، نظارت نزدیک در محل سایت کاری، افزایش اجبار اجرای قوانین از سوی مقامات به‌عنوان راه‌کارهای ایمنی در رویارویی با حوادث برپایی اسکلت فلزی از جمله سقوط از ارتفاع، ضربه، له شدگی، سقوط در طی عملیات بالابری بار، برخورد اجسام در حال سقوط یا پرتابی و شوک الکتریکی بیان شده‌اند(۳۴).

استقرار و پیاده‌سازی سیستم‌های بهداشت شغلی و مدیریت ایمنی (OHS-MS)، می‌تواند نقش کلیدی را در کاهش ریسک‌های سایت کاری ایفا کند(۳۵).

در مطالعه‌ای که توسط آسیوند و جمالی‌زاده (۲۰۱۸ و ۲۰۲۰) انجام گرفت، یافته‌ها نشان داد که بهبود چشمگیر در جو ایمنی نشان‌دهندهٔ نقش بسزای مداخلات آموزشی به‌همراه مداخلات فنی به‌عنوان عوامل اساسی در بهبود وضعیت ایمنی کارگران در سازمان می‌باشد(۳۶, ۳۷) که می‌توان نقش آن را به‌عنوان یکی از منابع کاهنده تشدید در نظر گرفت.

یکی دیگر از اصلی‌ترین دلایل بروز حوادث در برپایی اسکلت فلزی، نبود تعهد و مسئولیت‌پذیری کلیه ارکان یک پروژه در همهٔ سطوح، از واحدهای اجرایی تا پیمانکاران و پرسنل ایشان در رعایت اصول و ضوابط ایمنی در سایت است(۳۸).

در نشریه شماره ۴۴۷ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی نهاد ریاست جمهوری مقاله‌ای با عنوان «مدیریت ایمنی در کارگاه‌های عمرانی، مسئولیت‌های ایمنی کارفرمایان و پیمانکاران جزء» منتشر شده است که در آن بیان شده مواردی در برپایی اسکلت فلزی از جمله: الف) استقرار و پیاده‌سازی تمام برنامه‌های ایمنی، مستندسازی و گزارش‌دهی؛ ب) نظارت بر حُسن انجام کار توسط کارفرما؛ ج) ارائه تجهیزات حفاظت فردی مناسب و آموزش به‌کارگیری آن (۳۹)، را می‌توان از منابع کاهنده تغییرپذیری درونی در سیستم دانست که می‌تواند با نتایج مطالعه حاضر هم‌سویی و هم‌گرایی داشته باشد.

رویکرد مبتنی بر روش FRAM امکان تجزیه‌وتحلیل تمام تعاملات فنی-اجتماعی سیستم و اثرات تغییرپذیری عمده بر روی سیستم کلی را فراهم کرد(۳۵). در نتیجه، رویکرد ارائه‌شده کوپلینگ‌های (اتصالات) حیاتی و ریسک‌های تهدیدکننده ایمنی سیستم را شناسایی کرد.

به‌منظور بهبود اعتبار یافته‌های پژوهش حاضر، برای گردآوری داده از روش‌های مختلفی (مشاهده کار، مصاحبه‌های انتها باز، بررسی دستورالعمل‌ها، راهنماها، پروتکل‌ها و...) برای توصیف تغییرپذیری در کار، یعنی کار به‌گونه‌ای که تصور می‌شود انجام شود یا توصیف می‌شود (Work-As-Imagined) و کار به‌گونه‌ای که در واقعیت انجام می‌شود یا مشاهده می‌شود (Work-As-Done)، بهره گرفته شد(۴۰).

از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به زمان‌بر بودن مصاحبه‌ها به‌دلیل عدم توانایی کافی کارگران در انتقال مفاهیم ایمنی و اجرایی عملیات برپایی اسکلت فلزی، همکاری نامطلوب پیمانکار اسکلت فلزی با محققان، به‌دلیل ایجاد تأخیر در روند عملیات اجرایی اشاره نمود.

علاوه‌بر آن، پیچیده بودن و نیاز آموزشی بالای یادگیری روش آنالیز تشدید عملکردی FRAM از جمله محدودیت‌های دیگر این مطالعه است.

همچنین توصیه می‌گردد با توجه به نرخ بالای بروز حوادث و وجود ریسک‌های غیرقابل قبول در پروژه‌های ساخت‌وساز اسکلت فلزی، در مطالعات آتی وظایف و

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

حیطه‌های کاری و همچنین صلاحیت‌ها و شایستگی‌های مدیران ایمنی و سرپرستان اجرایی و نقش آنان در جهت کاهش میزان حوادث و صدمات کارگران مورد بررسی قرار گیرد.

تعیین ارتباط موضوع مدیریت ایمنی مبتنی بر تاب‌آوری در ساخت‌وسازهای اسکلت فلزی با فاکتورهای پیشگیرانه نیز جای بحث دارد. زیرا این ساختار می‌تواند ضمن تعیین شرح وظایف افراد، سطح مسئولیت‌پذیری افراد، اعم از مدیران ارشد، سرپرستان، ناظران و پیمانکاران را در قبال مسائل ایمنی ارتقا دهد.

نتیجه گیری

کارگران در صنعت ساخت‌وساز در معرض خطراتی هستند که تعیین کمّیت آنها به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد این حوزه فعالیت که در آن تغییرات محلی در محل کار لزوماً به گروه خاصی از کارگران محدود نبوده و به‌طور بالقوه همه کارگران سایت را تحت‌تأثیر قرار دهد، دشوار است. این وضعیت می‌تواند تا حد زیادی فهرست خطراتی را که هر هفته و گاهی هر روز تجربه می‌شوند، تغییر دهد. بنابراین، نیاز به استفاده از روش‌های ارزیابی کیفی ریسک‌های شغلی جهت توسعه روش‌های پیشگیری از حوادث شغلی و کاهش یا تخفیف پیامدهای آنها می‌باشد.

در مطالعه حاضر، روش آنالیز تشدید عملکردی (FRAM) این امکان را فراهم کرد که یک سیستم پیچیده فنی-اجتماعی را به‌صورت ترکیبی از عملکردهای مختلف انسانی، سازمانی و تکنولوژیکی که تغییرپذیری آنها می‌تواند ریسک‌هایی را برای سیستم مورد مطالعه در پی داشته باشد، در نظر بگیریم. نتایج ارائه‌شده نشان‌دهندهٔ تغییرات بالقوه وظایف کاری با دارا بودن تعاملات پیچیده میان ۱۹ عملکرد شناسایی شده است. در توابع عملکردی سیستم، خروجی هریک از فعالیت‌ها، به‌عنوان ورودی فعالیت بعدی می‌باشد.

همچنین از طریق لینک‌های ارتباطی مشخص شده، خطا و بی‌ثباتی در یک فعالیت به فعالیت دیگر منتقل می‌شود که اگر فعالیت مقصد قادر به میرا کردن خطای ورودی نباشد، پدیده تشدید (رزونانس) رخ داده و به همین ترتیب این فرایند تا فعالیت‌های بعدی ادامه پیدا می‌کند. احتمال تشدید در سیستم در ۴ تابع عملکردی اجرای طناب نجات، هماهنگی با ریگر باتجربه، آماده‌سازی تاور کرین و تثبیت قطعات در محل نصب، تعیین گردید.

مدل گرافیکی به‌دست‌آمده می‌تواند به شناسایی آسان عملکردهای تشدید شونده و اتخاذ تدابیر لازم برای تقویت نقاط قوت و رفع نقاط ضعف کمک شایانی نماید.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد با شماره طرح ۸۷۵۹ و کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1400.198 در پژوهش‌های پزشکی است. نویسندگان صمیمانه از کلیه کسانی که در اجرای این تحقیق همکاری لازم را داشته‌اند، قدردانی می‌نمایند.

REFERENCES

1. Rosa LV, Haddad AN, de Carvalho PVR. Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). Cogn Technol Work. 2015;17(4):559-73.
2. Kines P, Andersen LPS, Spangenberg S, Mikkelsen KL, Dyreborg J, Zohar D. Improving construction site safety through leader-based verbal safety communication. J Safety Res. 2010;41(5):399-406.
3. Rosa L, Haddad A, Carvalho P. Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). Cogn Technol Work. 2015;17.
4. Mitropoulos P, Cupido G. Safety as an Emergent Property: Investigation into the Work Practices of High-Reliability Framing Crews. J Constr Eng M. 2009;135(5):407-15.
5. Lee K-P, Lee H-S, Park M, Kim H, Han S. A real-time location-based construction labor safety management system. J CIV ENG MANAG. 2014;20:1-13.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]
[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

6. OSHA. Commonly Used Statistics 2018 [Available from: https://www.osha.gov/oshstats/commonstats.html.
7. Izadi N, Aminian O, Esmaeili B. Occupational Accidents in Iran: Risk Factors and Long Term Trend (2007-2016). J Res Health Sci. 2019;19(2):e00448.
8. Irizarry J, Simonsen K, Abraham D. Effect of Safety and Environmental Variables on Task Durations in Steel Erection. J Constr Eng M. 2005;131.
9. Choe S, Yun S, Leite F. Analysis of the effectiveness of the OSHA steel erection standard in the construction industry. Saf Sci. 2016;89:190-200.
10. Zandiye K, Taherkhani R, Ziaie Moayed R. History of safety in Iranian construction industry. J Constr Eng M. 2016;1(1):12-9.
11. Pardo-Ferreira MdC, Rubio-Romero JC, Gibb A, Calero-Castro S. Using functional resonance analysis method to understand construction activities for concrete structures. Saf Sci. 2020;128:104771.
12. Bayramova A, Edwards DJ, Roberts C, Rillie I. Enhanced safety in complex socio-technical systems via safety-in-cohesion. Saf Sci. 2023;164:106176.
13. Hollnagel E. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems: Crc Press; 2017.
14. Carayon P. Human factors of complex sociotechnical systems. Appl Ergon. 2006;37(4):525-35.
15. Grant E, Salmon PM, Stevens NJ, Goode N, Read GJ. Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction? Saf Sci. 2018;104:99-109.
16. Bjerga T, Aven T, Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. Reliab Eng Syst Saf. 2016;156:203-9.
17. Underwood P, Waterson P. Accident analysis models and methods: guidance for safety professionals. Loughborough University. 2013.
18. Foster CJ, Plant KL, Stanton NA. Adaptation as a source of safety in complex socio-technical systems: A literature review and model development. Saf Sci. 2019;118:617-31.
19. Hollnagel E, Goteman O. The functional resonance accident model. Proceedings of cognitive system engineering in process plant. 2004;2004:155-61.
20. 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. Saf Sci. 2017;91:49-60.
21. Hollnagel E, Hounsgaard, J., Colligan, L. FRAM - the Functional Resonance Analysis Method: a handbook for the practical use of the method. Center for Quality. 2014.
22. Vanderhaegen F. Erik Hollnagel: Safety-I and Safety-II, the past and future of safety management. Springer; 2015.
23. Shirali G, Ebrahipour V, Salahi LM. Proactive risk assessment to identify emergent risks using functional resonance analysis method (FRAM): A case study in an oil process unit. Iran Occupational Health. 2014;10.
24. Hollnagel E. FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling complex socio-technical systems. Farnham, UK: Ashgate. 2012.
25. Liang Q. Analysis and Design of Steel and Composite Structures. CRC Press. 2014.
26. Ardeshir A, Maknoon R, Rekab Islami Zadeh M, Jahantab Z. HSE risks assessment in urban high-rise construction using Fuzzy Approach. Saf Health Work. 2015;5(2):1-12.
27. Al-Bahar JF, Crandall KC. Systematic Risk Management Approach for Construction Projects. J CONSTR ENG M. 1990;116(3):533-46.
28. Hollnagel E. Resilience Engineering: A New Understanding of Safety. J Ergon Soc Korea. 2016;35:185-91.
29. Hollnagel E. FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-Technical Systems. CRC Press. 2012.
30. Ardeshir A, maknoon r, rekab eslami zadeh m, jahantab z. Safety Risk Management effective on Occupational Health in High-rise Building construction projects with Fuzzy approach. Iran Occupational Health. 2014;11(3):82-95.
31. Bijari M, Khodadadi R, Khazai M. Investigating the Factors Affecting Safety in Iranian Construction Workshops. Fourth National Congress of Civil Engineering; Tehran, 2008.
32. Tarfei A, Anoshe V. Risk assessment of potential hazards of steel structures and cranes in construction building by FMEA method. The Second International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran; Tehran, 2019.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]

33. Leu S-S, Chang C-M. Bayesian-network-based safety risk assessment for steel construction projects. Accid Anal Prev. 2013;54:122-33.
34. Krishnamurthy N, editor Safety during steel erection. Proceedings of the 10th Pacific Structural Steel Conference (PSSC 2013); 2013.
35. Lee J, Jung J, Yoon SJ, Byeon S-H. Implementation of ISO45001 Considering Strengthened Demands for OHSMS in South Korea: Based on Comparing Surveys Conducted in 2004 and 2018. Saf Health Work. 2020;11(4):418-24.
36. Asivandzadeh e, jamalizadeh z. Evaluating the impact of training and technical interventions on safety climate and safety performance of workers in the construction industry. J Occup Hyg Eng. 2018;5(3):45-52.
37. Asivandzadeh E, Jamalizadeh Z, Safari Variani A, Mohebi A, Khoshnavaz H. Evaluating the Impact of Training and Technical Interventions on Improving Safety Culture and Understanding the Risk of Dangerous Situations at Height among Construction Workers. J Health. 2020;11(1):109-22.
38. Shakeri E, Darabi M, Torabi Z M. Detect of Accident Causes in Construction Workplace. Amirkabir J Civil Eng. 2012;43(2):51-61.
39. HSE Management in Civil Projects. Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System 2009. p. 214.
40. Patriarca R, Di Gravio G, Woltjer R, Costantino F, Praetorius G, Ferreira P, et al. Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method. Saf Sci. 2020;129:104827.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-22]

[DOI: 10.18502/jhsw.v14i1.17126]