Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444



**Civil and Project Journal**
http://www.cpjournals.com/

*Research Article*

# Impact of Safety Technologies on Safety Performance Indicators for Risk Reduction in the Construction Industry: A Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) Approach

**MohammadHossein Moradijou[1]***
1*- M.Sc. in Project and Construction Management, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Received: 03 May 2026; Revised: 06 June 2026Accepted: 08 June 2026Published: 23 October 2026

## Abstract

*Despite advances in digital technologies, safety management in the construction industry remains challenged by persistent difficulties in risk control and mitigation. This study aims to systematically evaluate how the benefits of safety technologies influence safety performance indicators in construction projects. Based on the literature and expert judgment, 14 key benefits of safety technologies and 15 safety performance indicators were identified and modeled through static and dynamic Fuzzy Cognitive Mapping (FCM). The results show that the impacts of safety technology benefits are uneven across performance indicators. Documentation- and reporting-related benefits, including improved accident investigation, injury reporting, and near-miss reporting, exerted the strongest indirect effects and formed the most influential positive feedback loops. In contrast, advanced technologies such as BIM and VR/AR showed comparatively lower effectiveness, mainly due to infrastructural constraints. Among the indicators, those related to training, planning, and inspection experienced the greatest improvement, while culture-related indicators responded more slowly. The dynamic analysis further revealed that the combined-benefit scenario provides the fastest route toward system convergence and risk reduction. The findings highlight that prioritizing low-cost, accessible, and data-driven technologies can serve as an effective strategy for enhancing safety performance in infrastructure-constrained contexts. This study contributes data-driven insights for technology investment prioritization and supports the transition of the construction industry from reactive safety management toward proactive and learning-oriented systems.*

**Keywords:** *Safety technologies; Safety performance; Risk mitigation; Construction industry; Fuzzy Cognitive Mapping (FCM).*

**Cite this article as** Moradijou,M . (2026). Impact of Safety Technologies on Safety Performance Indicators for Risk Reduction in the Construction Industry: A Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) Approach. (e245062). Civil and Project journal, 8(8), e245062 doi:https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

**ISSN:** 2676-511X

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: *m.moradijou@mail.sbu.ac.ir*

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444



نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

# تأثیر فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکرد ایمنی در کاهش مخاطرات صنعت ساختمان: رویکرد نقشه شناختی فازی (FCM)

**محمدحسین مرادی جو[1*]**

*۱- کارشناسی ارشد مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری ۱۶ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۸ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آبان ۱۴۰۵

## چکیده

*مدیریت ایمنی در صنعت ساخت با وجود پیشرفت‌های فناورانه، همچنان با چالش‌های جدی در کنترل و کاهش مخاطرات مواجه است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی نظام‌مند سازوکار اثرگذاری مزایای فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکرد ایمنی در پروژه‌های ساختمانی انجام شد. بدین منظور، ۱۴ مزیت کلیدی فناوری‌های ایمنی و ۱۵ شاخص عملکرد ایمنی با اتکا به ادبیات معتبر و نظر خبرگان شناسایی و با استفاده از رویکرد نقشه شناختی فازی (FCM) مورد مدل‌سازی استاتیک و دینامیک قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که تأثیر مزایا بر شاخص‌ها یکنواخت نیست؛ مزایای مرتبط با مستندسازی و گزارش‌دهی شامل "بهبود تحقیق و بررسی حوادث، گزارش‌دهی آسیب‌ها و گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع" بالاترین اثر غیرمستقیم و حلقه‌های بازخورد مثبت را ایجاد می‌کنند، در حالی‌که فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند BIM و VR/AR به‌دلیل محدودیت زیرساختی، اثربخشی کمتری دارند. همچنین شاخص‌های مرتبط با آموزش، برنامه‌ریزی و بازرسی بیشترین بهبود را ثبت کردند، اما ابعاد فرهنگی کندترین واکنش را نشان دادند. نتایج تحلیل دینامیک نیز نشان داد سناریوی ترکیبی مزایا سریع‌ترین مسیر همگرایی و کاهش مخاطرات را فراهم می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرکز بر فناوری‌های کم‌هزینه، قابل‌دستیابی و داده‌محور، راهبردی مؤثر برای ارتقای عملکرد ایمنی در کشورهایی با محدودیت زیرساختی است. این پژوهش بینشی داده‌محور برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های فناورانه ارائه می‌کند و گذار صنعت ساخت از رویکردهای واکنشی به سیستم‌های پیش‌فعال و یادگیرنده را تسهیل می‌نماید؛ به‌ویژه در بستر کشورهایی با محدودیت منابع.*

**کلمات کلیدی: *فناوری‌های ایمنی؛ عملکرد ایمنی؛ کاهش مخاطرات؛ صنعت ساختمان؛ نقشه شناختی فازی (FCM)***

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.moradijou@mail.sbu.ac.ir

## ۱- مقدمه

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین بخش‌های اقتصادی جهان شناخته می‌شود و نرخ حوادث و آسیب‌های شغلی آن به‌مراتب بالاتر از سایر صنایع گزارش شده است (Zhou et al., 2015). آمارهای اخیر نیز تداوم ضعف در مدیریت ایمنی را نشان می‌دهند؛ به‌طوری که طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ هزاران آسیب و بیماری شغلی و ده‌ها مورد حادثه مرگبار گزارش شده است (HSE, 2024). این عملکرد نامطلوب، حتی در اقتصادهای پیشرفته نیز مشاهده می‌شود و ضرورت به‌کارگیری رویکردهای نوآورانه در ارتقای پیامدهای سلامت و ایمنی را برجسته می‌سازد.

مدیریت سنتی ایمنی در ساخت‌وساز - با اتکا بر فرآیندهای کاغذی و بازبینی‌های پراکنده - توان کافی برای پایش لحظه‌ای کارگاه، تبادل سریع اطلاعات و پشتیبانی از رفاه نیروی کار ندارد (Haupt et al., 2019). درنتیجه، اتخاذ رویکردهای فناورانه که بتوانند رفتارهای ایمن را تقویت و رعایت مقررات را تضمین کنند ضروری است (Adekunle et al., 2024; Ortega et al., 2025).

فناوری‌های دیجیتال نوین مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا (IoT)، واقعیت افزوده و مجازی (AR/VR)، پهپادها و سامانه‌های هوش مصنوعی ظرفیت تحول اساسی در مدیریت ایمنی را دارند (Antwi-Afari et al., 2019). این فناوری‌ها علاوه بر پشتیبانی از برنامه‌ریزی، آموزش و نظارت، امکان شناسایی و پیش‌بینی خطرات بالقوه در تمام چرخه پروژه را فراهم می‌سازند و موجب بهبود قابل‌توجه عملکرد ایمنی می‌شوند (Agyekum et al., 2022; Li et al., 2018).

بااین‌حال، اغلب پژوهش‌ها بر امکان‌سنجی یا موانع به‌کارگیری فناوری تمرکز داشته‌اند و کمتر به مسیرهای اثرگذاری مزایا بر شاخص‌های عملکرد ایمنی پرداخته‌اند؛ به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه با محدودیت منابع. درک این مسیرها برای تصمیم‌گیری آگاهانه در سرمایه‌گذاری فناورانه و تحقق بهبود پایدار ایمنی ضروری است. از این‌رو، این پژوهش دو سؤال اصلی را دنبال می‌کند: مزایای کلیدی فناوری‌های پیشرفته ایمنی کدام‌اند و این مزایا چگونه موجب بهبود و پایداری عملکرد ایمنی در صنعت ساخت می‌شوند؟

به‌منظور پاسخ‌گویی، مطالعه حاضر به‌صورت نظام‌مند مزایای فناوری‌های ایمنی را شناسایی و تأثیر آن‌ها را بر شاخص‌های عملکرد ایمنی با بهره‌گیری از نظر خبرگان و ادبیات معتبر تحلیل می‌کند. یافته‌ها با ارائه جهت‌گیری‌های کاربردی، به سازمان‌های ساخت کمک می‌کند تا مزایای با بیشترین اثربخشی را در شرایط محدودیت منابع در اولویت قرار دهند.

## ۲- ادبیات نظری

اندازه‌گیری عملکرد ایمنی علاوه بر ارزیابی وضعیت موجود ایمنی و پایش پیشرفت سیستم‌های مدیریت ایمنی، می‌تواند ورودی مؤثری برای برنامه‌های مشوق و ابزاری برای هدایت رفتارهای ایمن کارکنان باشد. بااین‌حال، پرسش‌هایی همچون تعیین شاخص‌های مناسب، انتخاب ابزارهای متناسب با نوع صنعت و میزان کارآمدی شاخص‌های OSHA همچنان محل بحث هستند.

### ۲-۱- انواع اندازه‌گیری عملکرد ایمنی

اندازه‌گیری عملکرد ایمنی معمولاً بر دو دسته شاخص استوار است: شاخص‌های پس‌رو (Lagging) و شاخص‌های پیشرو (Leading) که دومی در پژوهش‌ها و صنعت کاربرد و اولویت بیشتری یافته است.

شاخص‌های پس‌رو، مانند نرخ کل آسیب‌های ثبت‌شده و نرخ مرگ‌ومیر، عملکرد ایمنی را بر اساس پیامدهای پس از وقوع حادثه می‌سنجند و به دلیل سهولت جمع‌آوری، قابلیت مقایسه و شناسایی روندها کاربرد گسترده‌ای دارند (Hinze et al., 2013; Lingard et al., 2013). بااین‌حال، این شاخص‌ها «فقدان ایمنی» را اندازه‌گیری می‌کنند (Arezes and Miguel, 2003) و به دلیل احتمال پایین وقوع حوادث، قادر به شناسایی تغییرات سیستم مدیریت ایمنی نیستند؛ حتی در مواردی ممکن است به دلیل ارتباط با نظام‌های پاداش، منجر به کم گزارش‌دهی شوند (Cadieux et al., 2006; Sparer and Dennerlein, 2013)

همچنین، برخی شاخص‌ها همچون گزارش‌های نزدیک به حادثه بسته به نحوه استفاده می‌توانند در هر دو دسته طبقه‌بندی شوند (Toellner, 2001, Manuele, 2009).

در مقابل، شاخص‌های پیشرو ماهیتی آینده‌نگر دارند و شکاف‌ها و ضعف‌های سیستم کنترل ریسک را پیش از وقوع حادثه آشکار می‌سازند (HSE, 2006, Dyreborg, 2009). این شاخص‌ها بازخورد منظم به سیستم مدیریت ایمنی ارائه داده و امکان اجرای اقدامات اصلاحی زودهنگام را فراهم می‌کنند (Lingard et al., 2013). شاخص‌های پیشرو می‌توانند بر اساس علل مستقیم وقوع حوادث، شامل متغیرهای مرتبط با رفتار، فرهنگ و کارکرد موانع حفاظتی طراحی شوند (Mohaghegh and Mosleh, 2009). از منظر هینز و همکاران، شاخص‌های پیشرو به دو نوع غیرفعال (Passive Indicators) و فعال (Active Indicators) دسته‌بندی می‌شوند (Hinze et al., 2013). در سال‌های اخیر، چارچوب‌های متعددی برای توسعه شاخص‌های پیش فعال ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به مدل‌های هالوول و همکاران (Hallowell et al., 2013) و گو و ییو (Guo and Yiu, 2016) اشاره کرد.

بر اساس مرور نظام‌مند ادبیات و بهره‌گیری از چارچوب‌های معتبر صنعتی و پژوهشی (Hinze et al., 2013; CII, 2012; OSHA, 2019; Xu et al., 2021)، این مطالعه چارچوب متوازن شامل ۱۵ شاخص کلیدی عملکرد ایمنی را اتخاذ کرده است که ۱۲ شاخص پیشرو و ۳ شاخص پس‌رو را دربرمی‌گیرد تا ارزیابی جامع‌تری از عملکرد ایمنی ساخت‌وساز ارائه شود (جدول ۱).

**جدول ۱: شاخص‌های جامع عملکرد ایمنی**

| ابعاد | شاخص‌ها | منابع |
|---|---|---|
| اقدامات پیش فعال (شاخص‌های پیشرو) | ۱- اثربخشی آموزش و تربیت ایمنی (SP1) | Hinze et al. (2013); CII (2012); Hallowell et al. (2013); Liang et al. (2018) |
| | ۲- نرخ شناسایی و گزارش‌دهی خطر (SP2) | Hinze et al. (2013); OSHA (2019); Hallowell et al. (2013); Liang et al. (2018) |
| | ۳- کیفیت بازرسی و پایش ایمنی (SP3) | CII (2012); Hallowell et al. (2013); Bhagwat et al. (2022); Liang et al. (2018) |
| | ۴- برنامه‌ریزی ایمنی و اقدامات کنترلی (SP4) | Hinze et al. (2013); CII (2012); OSHA (2019) |
| | ۵- مشاهدات رفتار ایمنی (SP5) | CII (2012); OSHA (2019); Hallowell et al. (2013) |
| | ۶- جو ایمنی و سطح آگاهی (SP6) | Lingard et al. (2012); Alruqi et al. (2018); Guo et al. (201) ; Liang et al. (2018) |
| | ۷- میزان استفاده از تجهیزات حفاظت فردی (SP7) | OSHA (2019); Hinze et al. (2013); CII (2012) |
| | ۸- میزان کیفیت ممیزی ایمنی (SP8) | CII (2012); OSHA (2019); Hallowell et al. (2013) |
| | ۹- گزارش‌دهی و بررسی حوادث نزدیک به وقوع (SP9) | Hinze et al. (2013); OSHA (2019); CII (2012) |
| | ۱۰- میزان مشارکت در جلسات ایمنی (SP10) | CII (2012); OSHA (2019); Liang et al. (2018) |
| | ۱۱- نرخ اجرای اقدامات اصلاحی (SP11) | OSHA (2019); CII (2012); Hallowell et al. (2013) |
| | ۱۲- پذیرش و به‌کارگیری فناوری (SP12) | Xu et al. (2024); Yap et al. (2023); Ting & Yahaya (2024); Chong et al. (202) ; Liang et al. (2018) |
| نتایج واکنشی (شاخص‌های پس‌رو) | ۱۳- نرخ آسیب و حوادث (RIR، LTIFR) (SP13) | OSHA 2019; Hinze et al. (2013); Manjourides & Dennerlein (2019); Liang et al. (2018) |
| | ۱۴- شدت آسیب‌ها (روزهای از دست‌رفته ....) (SP14) | Hinze et al. (2013); Manjourides & Dennerlein (2019); OSHA (201) ; Liang et al. (2018) |
| | ۱۵- هزینه‌ها و پرداخت‌های مرتبط با حوادث (SP15) | OSHA (2019); Hallowell et al. (2013) |

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

### ۲-۲- کاربرد فناوری‌ها برای بهبود ایمنی ساخت

پیشرفت‌های فناورانه نقش اساسی در ارتقای ایمنی ساخت‌وساز داشته و با افزایش کارایی فرآیندها، پایش لحظه‌ای و واکنش سریع به شرایط اضطراری، رویکردهای سنتی واکنشی را به راهبردهای پیش فعال تبدیل کرده‌اند (Hasanzadeh et al., 2018; Zhou et al., 2013). این فناوری‌ها طیف گسترده‌ای از کاربردها را پوشش می‌دهند؛ از جمع‌آوری و تحلیل داده‌های ایمنی در زمان واقعی، انتقال سریع اطلاعات، پشتیبانی از ارزیابی ریسک و پیش‌بینی حوادث تا تقویت آگاهی و رفتار ایمن کارگران (Akinlolu et al., 2020; Nnaji and Karakhan, 2020; Nnaji et al., 2019). افزون بر این، فناوری‌های بصری‌سازی، ابزارهای پوشیدنی و دستگاه‌های موبایلی با ایجاد تعامل میان دارایی‌ها و فرآیندها، سطح مراقبت و استانداردهای ایمنی را بهبود می‌بخشند (Alaloul et al., 2020). فناوری‌های آموزشی مبتنی بر واقعیت افزوده/مجازی نیز با شبیه‌سازی محیط‌های واقعی، در تقویت توانایی کارگران برای شناسایی و مدیریت خطر مؤثرند (Cheng et al., 2020; Li et al., 2012). در سطح مهندسی ایمنی، ابزارهای مبتنی بر BIM امکان شناسایی و حذف خطرات بالقوه را در مراحل طراحی فراهم کرده و به‌عنوان مؤثرترین سطح سلسله‌مراتب کنترل‌ها عمل می‌کنند (Qi et al., 2014; Zhang et al., 2013). همچنین، دستگاه‌های ایمنی پوشیدنی به‌واسطه سهولت استفاده و پایش مداوم وضعیت نیروی کار، به‌طور گسترده برای کاهش حوادث و ارتقای سلامت کارکنان مورد توجه قرار گرفته‌اند (Awolusi et al., 2018). بر این اساس، جدول ۲ کاربردهای کلیدی فناوری‌های پیشرفته در بهبود مدیریت ایمنی در مراحل طراحی و اجرا را بر اساس ادبیات معتبر نشان می‌دهد.

**جدول ۲: مزایای فناوری‌های ایمنی و سلامت**

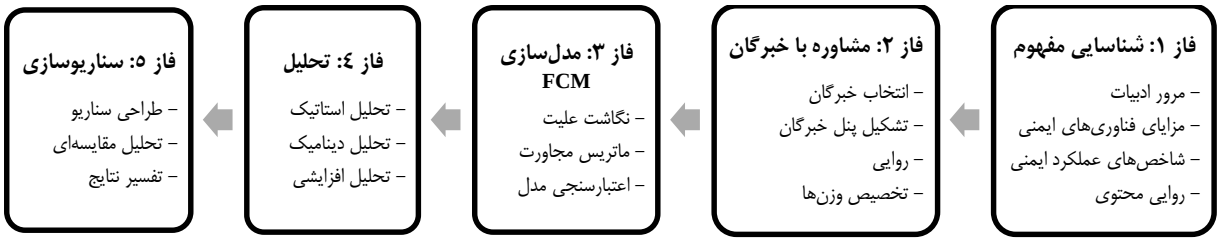
| دسته‌بندی | مزایای فناوری‌های ایمنی | فناوری‌های مرتبط | منابع |
|---|---|---|---|
| پیشگیری و آگاهی از خطرات | B1- بهبود آگاهی کارگران از خطرات | IoT Sensors & Wearables | (Hasan et al. 2012; Kannan and Santhi 2013; Nnaji et al. 2020b) |
| | B2- کمک به هشدار کارگران نسبت به خطرات | IoT Warning Systems | (Kiani et al. 2014; Qian, 2021; Pang et al. 2024; Chen et al. 2021) |
| | B3- کمک به تجسم خطر | VR/AR & 3D Visualization | (Ding et al. 2014; Kim and Ahn 2011; Kim and Teizer 2014; Zhang et al. 2013) |
| | B4- جداسازی کارگران از خطر | Automation & Robotics | (Kiani et al. 2014; Chen and Teizer, 2013; Fan et al. 2021) |
| پایش و کنترل فعال | B5- حذف خطر در مرحله طراحی | BIM & Digital Twins | (Qi et al. 2014; Zhang et al. 2013) |
| | B6- بهبود بازرسی‌های ایمنی | Drones & Computer Vision | (Cambraia et al. 2010; Themistocleous et al. 2014; Woodcock 2014) |
| برنامه‌ریزی، آموزش و هماهنگی | B7- بهبود اثربخشی آموزش‌ها | VR/AR Training | (Cheng et al. 2020; Li and Liu 2012) |
| | B8- ارتقای برنامه‌ریزی ایمنی | AI & Analytics | (Chantawit et al. 2005; Fargnoli and Lombardi 2020) |
| | B9- بهبود ارتباطات | Digital Collaboration | (Haupt et al. 2019; Zhou et al. 2015) |
| مستندسازی و تحقیق | B10- ارتقای فرایند تحقیق و بررسی حوادث | Mobile Apps & Cloud | (Golizadeh et al. 2018; Nnaji and Karakhan 2020) |
| | B11- بهبود گزارش‌دهی آسیب‌ها | Mobile Reporting Apps | (Li et al. 2015; Shen and Marks, 2016) |
| | B12- بهبود گزارش‌دهی حوادث نزدیک به وقوع | Mobile Apps & Analytics | (Hallowell et al. 2013; Huang and Hinze 2006; Weinstein et al. 2005) |
| پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق با مقررات | B13- تسهیل تصمیم‌گیری در زمان واقعی | IoT Dashboards | (Li et al. 2015; Qian, 2021; Sakr and Sadhu, 2023) |
| | B14- پشتیبانی از انطباق با مقررات ایمنی | AI Compliance Software | (Ding et al. 2022; Liang and Liu 2022; Wang et al. 2024) |

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

## ۳- روش تحقیق

این پژوهش با هدف تحلیل نظام‌مند تأثیر مزایای فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکرد ایمنی در صنعت ساخت انجام شده است. برای این منظور، از روش نقشه‌شناختی فازی (FCM) بهره گرفته می‌شود که امکان مدل‌سازی روابط علّی، پیچیده و پویا میان مزایا و نتایج عملکردی را فراهم می‌سازد. کارایی FCM در حوزه‌هایی همچون شناسایی عوامل کلیدی موفقیت، ارزیابی سیستم‌های اطلاعاتی و توسعه سناریوهای استراتژیک اثبات شده است (Bueno and Salmeron, 2008). این روش با ثبت تعاملات علّی و مدیریت عدم‌قطعیت موجود در شدت وابستگی‌ها، بینش‌های قابل اتکا برای متخصصان و تصمیم‌گیرندگان ارائه کرده و از طراحی مداخلات مبتنی بر شواهد جهت بهبود پایدار عملکرد ایمنی پشتیبانی می‌کند (Glykas, 2010).

شکل ۱ نمای کلی از فرآیند ساخت و اعتبارسنجی مدل FCM را نشان می‌دهد که برای نمایش تعاملات میان مزایای فناورانه و شاخص‌های عملکرد ایمنی تدوین شده است. اعتبارسنجی مدل نیز بر اساس پروتکل‌های مستند در مطالعات پیشین انجام شده تا قابلیت اطمینان و صحت نمایش روابط سیستم ایمنی تضمین شود (Kleijnen, 1995).




**شکل ۱: چارچوب جامع روش‌شناسی پژوهش**

### ۳-۱- نقشه‌های شناختی فازی (FCMs)

نقشه شناختی فازی (FCM) یک رویکرد مدل‌سازی پویا و قابل‌تفسیر برای نمایش تکامل مفاهیم وابسته از طریق به‌روزرسانی‌های تکرارشونده است. این روش از نظر معماری شباهت‌هایی با شبکه‌های عصبی مصنوعی دارد، اما رفتار و روش تحلیل آن متمایز است (Yegnanarayana, 2009). مزیت FCM در سادگی مفهومی، محاسبات سریع و توانایی مدیریت عدم قطعیت است که آن را برای مسائل پیچیده دنیای واقعی، به‌ویژه در صنعت ساخت‌وساز، به ابزاری کارآمد تبدیل می‌کند (Christoforou et al., 2017). FCM امکان بهره‌گیری از دانش خبرگان در شرایط محدودیت داده‌های تجربی را فراهم کرده و انعطاف‌پذیری بالایی برای کاربردهای عملی دارد (Lopez et al., 2014).

در یک مدل FCM ، گره‌ها مفاهیم ($C_i$) را نشان می‌دهند و کمان‌های جهت‌دار با وزن ($W_{ij}$) میزان و جهت اثر علّی مفاهیم بر یکدیگر را کمی‌سازی می‌کنند (Salmeron et al., 2019). این وزن‌ها می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند و قدر مطلق آن‌ها شدت تأثیر را نشان می‌دهد ($W_{ij} > 0$ اثر تقویت‌کننده، $W_{ij} < 0$ اثر بازدارنده).

در روش‌شناسی FCM ، تحلیل عمدتاً از طریق دو روش متمایز انجام می‌شود: استاتیک و دینامیک. رویکرد استاتیک شامل ارزیابی این است که گره‌های ورودی و میانی به طور جمعی چگونه بر گره‌های خروجی در مدل تأثیر می‌گذارند. مسیر علّی از یک مفهوم آغاز ($C_i$) به مفهوم هدف ($C_j$) از یک دنباله پیوندشده تشکیل‌شده است، مانند $Ci \rightarrow Ck_1 \rightarrow \ldots \rightarrow Ck \square \rightarrow Cj$. تأثیری که $C_i$ بر $C_j$ از طریق این مسیر غیرمستقیم دارد با تجمیع تأثیرات آبشاری در طول هر گام مسیر تعیین می‌شود. در نهایت، تأثیر جامع $C_i$ بر $C_j$ از مجموع همه این تأثیرات غیرمستقیم عبورکننده از شبکه ناشی می‌شود، و انتشار تجمعی علیت را که در نظریه FCM بنیادی آن مطرح است انعکاس می‌دهد (Kosko, 1986).

جبر فازی علّی بنیادی به کار رفته در اینجا عملگر تأثیر غیرمستقیم (I) را به‌عنوان عملگر حداقل (t-norm) تفسیر می‌کند، در حالی که عملگر تأثیر عمومی (T) با عملگر حداکثر (s-norm) مطابقت دارد، هر دو در مجموعه‌ای جزئی ترتیب‌شده از مقادیر علّی تعریف‌شده‌اند (Pelaez et al., 1996). فضای مفهومی علّی را با ~ نشان دهید و یک تابع لبه علّی فازی e: ~ x ~ P را فرض

کنید. فرض کنید m مسیر علّی مختلف وجود دارد که مفهوم گره $C_i$ را به $C_j$ متصل می‌کند که هرکدام به‌صورت دنباله‌ای (i, $k_1$ …. k□, j) نمایش داده می‌شود که 1 ~< r ~ < m. تأثیر غیرمستقیم اعمال‌شده توسط $C_i$ بر $C_j$ در طول r ام مسیر علّی به‌صورت $Ir(C_i,C_j)$ رسمی شده است، در حالی که تأثیر علّی کلی یا تجمیع‌شده در سراسر تمام m مسیر به‌وسیله $T(C_i,C_j)$ بیان می‌شود. این روابط از طریق بیان‌های ریاضی زیر ضبط می‌شوند:

(1) $I\sim(C_i,C_j) = \min(w(C_p, C_{p+},): (p, p+1) \sim (i, k\sim\ldots. k,\sim j))$

(2) $T(C_i,C_j) = \max(Ir(C_i, C_j))$ , where $l< \sim r <\sim m$

که در آن p و p+1 شاخص‌های مسیر مجاور از چپ به راست هستند (Papageorgiou, 2010).

در تحلیل دینامیک، ارزیابی رفتار مدل از طریق اجرای تکرارشونده FCM و بر اساس وضعیت اولیه سیستم انجام می‌شود. این وضعیت اولیه شامل ماتریس وزن‌ها (W) که جهت و شدت روابط علّی میان مفاهیم را نشان می‌دهد و بردار فعال‌سازی اولیه ($A_0$) است که میزان فعال‌سازی مفاهیم در آغاز شبیه‌سازی را مشخص می‌سازد. هدف اصلی تحلیل دینامیک تعیین حالت‌های تعادل مفاهیم است که به‌صورت سیستماتیک وابستگی‌های علّی مدل شده و تأثیرات را ادغام می‌کند. این هدف از طریق یک روش محاسباتی بازگشتی حاصل می‌شود که در آن مقادیر اختصاص‌یافته به هر مفهوم به‌صورت تکراری با توجه به فرمول‌بندی ارائه‌شده در معادله ۳ اصلاح می‌شوند (Groumpos, 2010).

$$(3) \qquad A_i^t = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} A_j^{t-1} W_{ji} + A_i^{t-1}\right)$$

در چارچوب FCM ، $A_i^t$ وضعیت مفهوم $C_i$ در تکرار جاری t را نشان می‌دهد، در حالی که $A_i^{t-1}$ و $A_j^{t-1}$ وضعیت‌های مفاهیم $C_i$و $C_j$ از گام زمانی قبل را نشان می‌دهند. تأثیر علّی از $C_j$ به $C_i$ توسط وزن $W_{ji}$ کمّی می‌شود، که هم مقدار و هم جهت رابطه را در بر می‌گیرد. تابع آستانه یا فعال‌سازی f ، که ابتدا توسط Glaser (1978) مورد بحث قرار گرفت، مقدار محاسبه‌شده را در محدوده تعریف‌شده‌ای نگاشت می‌کند، و بدین‌ترتیب سطح فعال‌سازی را برای مفهوم تولید می‌کند. این سطح فعال‌سازی می‌تواند به‌عنوان درجه عضویت فازی مفهوم تفسیر شود که با توصیف‌کننده‌های کیفی مثل پایین، متوسط یا بالا مطابقت دارد (Kosko, 1986). در عمل، این نرمال‌سازی اغلب از طریق تابع سیگموئید لگاریتمی حاصل می‌شود، جایی که پارامتر $\omega > 0$ شیب منحنی را کنترل می‌کند، همان‌طور که در معادله ۴ رسمی‌شده است (Hobbs et al., 2002).

$$f(x) = \frac{1}{1+ e^{-\omega(x)}}$$

### ۳-۲- انتخاب متخصصین و تشکیل گروه کارشناسی

توسعه مدل‌های FCM به طور عمده بر دانش و قضاوت متخصصان متکی است تا روابط علّی پیچیده سیستم به‌درستی شناسایی و ترسیم شود (Rodríguez Repiso et al., 2007). ازاین‌رو، انتخاب دقیق گروه خبرگان که از تجربه و مهارت کافی در حوزه پژوهش برخوردار باشند اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا اعتبار و قابلیت اتکای نتایج مستقیماً به کیفیت ورودی‌های آنان وابسته است (Yaman et al., 2009). برای دستیابی به دیدگاهی جامع و متوازن، گروهی ناهمگون از متخصصان با نقش‌های حرفه‌ای متنوع در صنعت ساخت - از مدیریت پروژه و طراحی تا مشاوره ایمنی و پیمانکاری - به طور هدفمند انتخاب شد تا تنوع دیدگاه‌ها موجب غنای تحلیل شود (Ravasan et al., 2014). با توجه به ماهیت میان‌رشته‌ای مطالعه و بر اساس اصول پذیرفته‌شده FCM ، هفت متخصص برای مشارکت در فرآیند مدل‌سازی انتخاب شدند (Lopez et al., 2014). مشخصات کامل خبرگان در جدول ۳ ارائه شده است.

**جدول ۳: اطلاعات جمعیت‌شناختی متخصصین**

| شناسه | نقش | تجربه | مشخصات |
|---|---|---|---|
| متخصص ۱ | مدیر ارشد HSE | ۲۲ سال | کارشناسی‌ارشد مدیریت صنعتی، مسئول اجرای سیستم‌های نظارت ایمنی دیجیتال در پروژه‌های نفت و گاز، تجربه عملی در استفاده از فناوری‌های ایمنی |
| متخصص ۲ | مدیر ارشد پروژه | ۲۰ سال | کارشناسی مهندسی عمران، تجربه پیاده‌سازی سیستم‌های گزارش‌دهی ایمنی و نظارت واقع زمان در پروژه‌های زیربنایی |
| متخصص ۳ | متخصص ایمنی | ۱۸ سال | کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، تخصص در استانداردهای بین‌المللی ایمنی و کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت ایمنی |
| متخصص ۴ | مسئول ایمنی و بهداشت | ۱۶ سال | کارشناسی مهندسی ایمنی شغلی، مسئول ایمنی پروژه‌های راه‌سازی، تونل‌سازی و زیرساخت‌های سنگین |
| متخصص ۵ | استاد دانشگاه و محقق | ۱۹ سال | دکتری مهندسی صنایع، تحقیق در زمینه مدیریت ایمنی، سیستم‌های هوشمند، و فناوری‌های نوین در صنعت |
| متخصص ۶ | مدیر کنترل ایمنی پروژه | ۱۷ سال | کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، مدیریت پروژه‌های ساختمانی بزرگ و کنترل ایمنی کارگاه‌ها |
| متخصص ۷ | بازرس فنی و کارشناس استاندارد | ۲۳ سال | کارشناسی‌ارشد مدیریت کیفیت، تخصص در استانداردهای ایمنی ملی و بین‌المللی و ارزیابی انطباق با مقررات |

متخصصان مشارکت‌کننده به طور هدفمند بر اساس تجربه عملی در پروژه‌های ساخت دارای اجزای فناورانه انتخاب شدند تا ترکیبی از مهارت فنی و درک سازمانی در مدیریت ایمنی فراهم شود. این افراد در فعالیت‌های حیاتی ایمنی - شامل برنامه‌ریزی خطر، پایش ایمنی در زمان واقعی و آموزش کارکنان - مشارکت مستمر داشته‌اند و بدین ترتیب قادر بودند پیچیدگی‌های واقعی عملکرد ایمنی را در مراحل مختلف چرخه عمر پروژه منعکس کنند؛ از طراحی و برنامه‌ریزی تا اجرا و نظارت. تمامی خبرگان حداقل ۱۶ سال سابقه حرفه‌ای داشته و اغلب دانش تخصصی دانشگاهی را با تجربه عملی گسترده ترکیب کرده‌اند که این امر دقت در تفسیر روابط علّی و کالیبراسیون وزن‌های مدل FCM را تقویت کرده است. تنوع نقش‌های حرفه‌ای آنان نیز به غنای تحلیلی پژوهش کمک کرده و امکان بازنمایی جامع تعاملات میان فناوری‌های ایمنی و دینامیک‌های عملکرد ایمنی در محیط‌های ساخت‌وساز را فراهم آورده است.

### ۳-۳- ایجاد مدل FCM

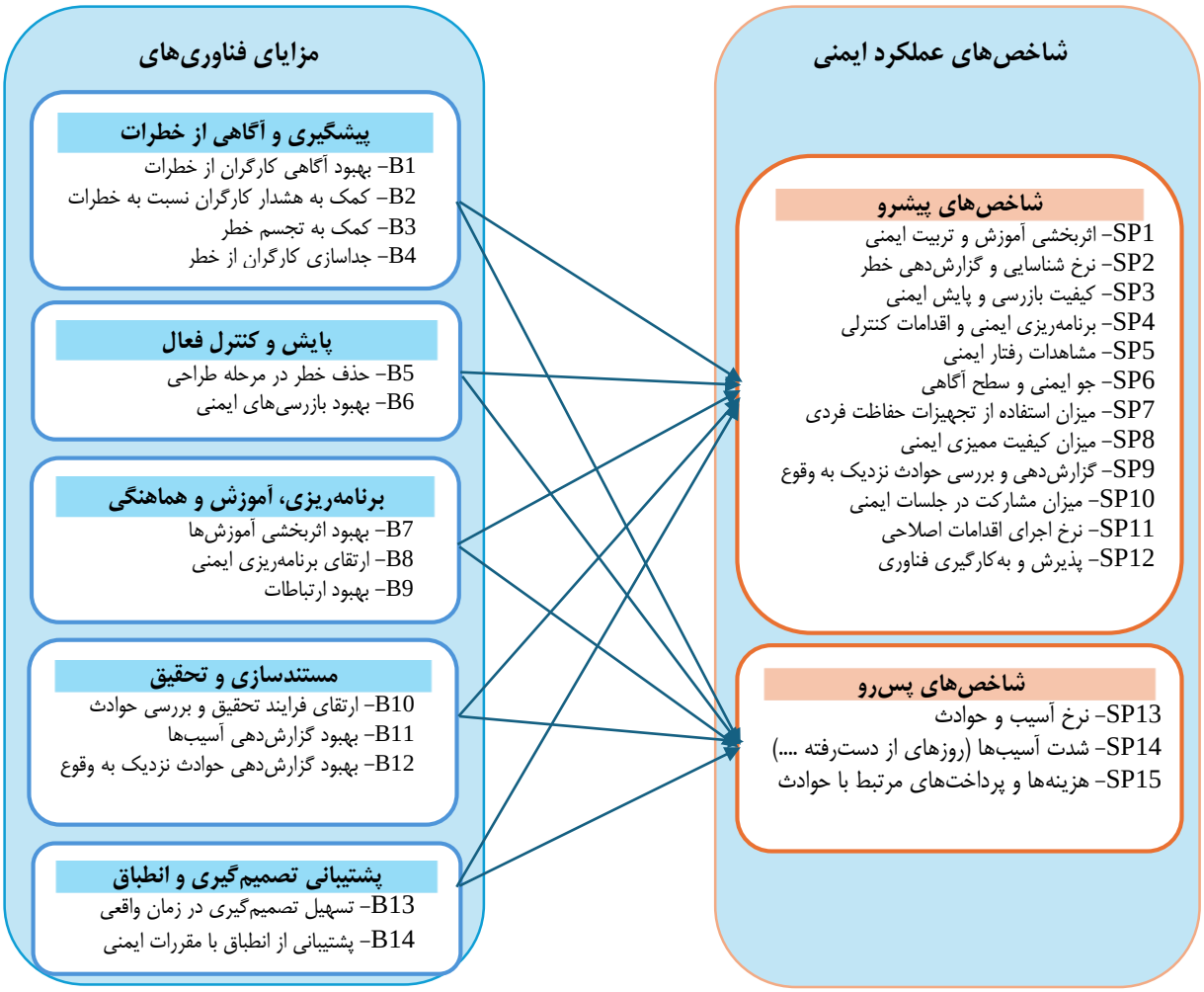
مرحله نخست توسعه مدل FCM بر شناسایی و مفهوم‌سازی دقیق مزایای کلیدی فناوری‌های ایمنی و شاخص‌های عملکرد ایمنی متمرکز بود. این مزایا با هدف نمایش هم‌افزایی و پوشش کامل ابعاد عملکرد ایمنی، در پنج دسته اصلی شامل پیشگیری و آگاهی از خطرات، نظارت و کنترل فعال، برنامه‌ریزی و آموزش، مستندسازی و تحقیق، و پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق با مقررات طبقه‌بندی شدند. برای تضمین جامعیت مدل، اعتبار مفهومی ساختارها از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و با بهره‌گیری از اصل اشباع نظری بررسی شد تا اطمینان حاصل شود که مفهوم یا مؤلفه مرتبطی نادیده نمانده است (Breckenridge et al., 2009). سپس، گروه خبرگان نیز در ارزیابی کفایت مفهومی مشارکت داشتند و تأیید کردند که ساختارهای شناسایی‌شده، نمایانگر اثر واقعی فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکردی در پروژه‌های ساخت‌وساز هستند. در نتیجه این فرایند سیستماتیک توسعه و اعتبارسنجی، تعداد ۱۴ مزیت کلیدی فناوری‌های ایمنی به‌عنوان لایه اول و ۱۵ شاخص عملکرد ایمنی به‌عنوان لایه دوم مدل FCM نهایی شدند (شکل ۲).

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

## ۴- یافته های تحقیق

### ۴-۱- تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

تجزیه‌وتحلیل FCM دو رویکرد اصلی را شامل می‌شود: استاتیک و دینامیک. تحلیل استاتیک بررسی می‌کند که چگونه مفاهیم منفرد از طریق پیوندهای علّی تجمعی بر نتایج تأثیر می‌گذارند، و ساختار سیستم را آشکار می‌کند. تحلیل دینامیک تغییرات فعال‌سازی مفهومی را در طول تکرارها مدل‌سازی می‌کند، حالت‌های پایا را شناسایی می‌کند، و امکان آزمایش سناریوهای مختلف تحت شرایط متغیر را فراهم می‌کند. برای انجام هر دو تحلیل، یک چارچوب محاسباتی سفارشی مبتنی بر پایتون توسعه داده شد که به دلیل انعطاف‌پذیری و کارایی آن در مدیریت دینامیک‌های غیرخطی و تکراری FCM انتخاب شد.




**شکل ۲: الگوهای مزایای فناوری‌های ایمنی و شاخص‌های عملکرد ایمنی**

### ۴-۲- تحلیل استاتیک

شکل ۲ نمایی بصری از مدل پیشنهادی FCM ارائه می‌دهد و روابط علّی میان مزایای فناوری‌های ایمنی ($B_i$) و اجزای شاخص‌های عملکرد ایمنی ($SP_j$) را نمایش می‌دهد. به‌منظور وضوح و تسهیل تحلیل‌های بعدی، این مزایا در پنج دسته موضوعی شامل پیشگیری و آگاهی از خطرات (B1-B4)، نظارت فعال و کنترل (B5-B6)، برنامه‌ریزی، آموزش و هماهنگی (B7-B9)، مستندسازی و تحقیق (B10-B12)، و پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق با مقررات (B13-B14) گروه‌بندی شدند. تحلیل استاتیک FCM با استفاده از معادلات ۱ تا ۴ و روش ترکیبی max–min ، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم مزایا را بر شاخص‌های عملکردی محاسبه کرد و مسیرهای علّی $B_i \rightarrow SP_j$ را به‌صورت نظام‌مند ارزیابی نمود. این تحلیل نشان داد که اثربخشی مزایا

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

در همه اجزای عملکرد ایمنی یکنواخت نیست و هر یک از فناوری‌ها سهم‌های متفاوتی در بهبود مؤلفه‌های عملکردی دارند. نتایج کمی این ارزیابی در جدول ۴ ارائه شده است و پایه‌ای برای تفسیر تفاوت‌های معنادار در سطح و ماهیت اثرات فناورانه در مدیریت ایمنی فراهم می‌کند.

**جدول ۴: تأثیرات غیرمستقیم (بر اساس روابط حداکثر از حداقل‌ها در FCM)**

| | SP 1 | SP 2 | SP 3 | SP 4 | SP 5 | SP 6 | SP 7 | SP 8 | SP 9 | SP 10 | SP 11 | SP 12 | SP 13 | SP 14 | SP 15 | میانگین تأثیر غیرمستقیم* | میانگین تأثیر مستقیم** | افزایش FCM*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B1 | ۵۸ | ۵۸ | ۵۴ | ۵۸ | ۴۸ | ۴۲ | ۵۸ | ۵۴ | ۵۸ | ۵۸ | ۴۸ | ۵۸ | ۵۴ | ۵۸ | ۴۸ | ۵۴,۰ | ۶۸,۵ | -۱۴,۵ |
| B2 | ۶۴ | ۵۲ | ۶۰ | ۶۴ | ۶۰ | ۴۴ | ۶۰ | ۶۴ | ۶۴ | ۶۴ | ۶۰ | ۶۴ | ۶۰ | ۶۴ | ۵۲ | ۵۹,۷ | ۵۸,۲ | +۱,۵ |
| B3 | ۵۲ | ۳۸ | ۴۸ | ۵۲ | ۴۸ | ۳۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۵۲ | ۵۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۳۸ | ۴۷,۵ | ۶۲,۸ | -۱۵,۳ |
| B4 | ۷۲ | ۶۸ | ۷۲ | ۶۸ | ۶۴ | ۵۲ | ۶۸ | ۷۲ | ۴۲ | ۶۸ | ۴۸ | ۶۴ | ۷۲ | ۶۸ | ۶۸ | ۶۴,۱ | ۶۴,۳ | -۰,۲ |
| B5 | ۳۸ | ۲۸ | ۳۶ | ۴۲ | ۲۸ | ۲۸ | ۳۲ | ۴۲ | ۴۲ | ۴۲ | ۳۶ | ۴۲ | ۳۲ | ۳۶ | ۳۲ | ۳۵,۷ | ۳۸,۴ | -۲,۷ |
| B6 | ۸۲ | ۷۸ | ۸۶ | ۸۲ | ۷۸ | ۵۸ | ۸۲ | ۸۶ | ۸۲ | ۶۴ | ۷۲ | ۸۲ | ۷۸ | ۸۲ | ۷۸ | ۷۸,۰ | ۸۸,۶ | -۱۰,۶ |
| B7 | ۴۴ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۴ | ۳۸ | ۴۴ | ۴۴ | ۳۲ | ۴۴ | ۳۶ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۲,۵ | ۴۸,۲ | -۵,۷ |
| B8 | ۵۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۵۲ | ۴۸ | ۴۲ | ۶۸ | ۶۸ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۸ | ۵۲ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۲ | ۵۱,۰ | ۵۴,۳ | -۳,۳ |
| B9 | ۳۶ | ۳۲ | ۳۴ | ۳۴ | ۳۲ | ۲۸ | ۳۲ | ۳۲ | ۳۲ | ۳۴ | ۳۲ | ۴۲ | ۳۲ | ۳۴ | ۳۲ | ۳۳,۲ | ۳۸,۶ | -۵,۴ |
| B10 | ۷۶ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۲ | ۷۲ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۲ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۶ | ۷۲ | ۷۴,۹ | ۶۲,۴ | +۱۲,۵ |
| B11 | ۶۸ | ۶۸ | ۶۴ | ۶۸ | ۶۲ | ۶۴ | ۶۴ | ۶۸ | ۶۸ | ۶۸ | ۶۲ | ۶۸ | ۶۴ | ۶۸ | ۶۲ | ۶۵,۶ | ۵۲,۸ | +۱۲,۸ |
| B12 | ۷۲ | ۷۲ | ۶۸ | ۷۲ | ۶۸ | ۶۸ | ۶۸ | ۷۲ | ۷۲ | ۷۲ | ۶۸ | ۷۲ | ۶۸ | ۷۲ | ۶۸ | ۶۹,۹ | ۵۸,۲ | +۱۱,۷ |
| B13 | ۴۸ | ۴۲ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۶ | ۳۶ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۶ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۸ | ۴۲ | ۴۶,۰ | ۴۴,۸ | +۱,۲ |
| B14 | ۵۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۵۲ | ۴۶ | ۴۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۵۲ | ۵۲ | ۴۸ | ۵۲ | ۵۲ | ۵۲ | ۴۶ | ۴۹,۷ | ۵۸,۳ | -۸,۶ |

*میانگین تأثیرات غیرمستقیم = میانگین مقادیر تأثیرات غیرمستقیم تمام شاخص‌های عملکردی

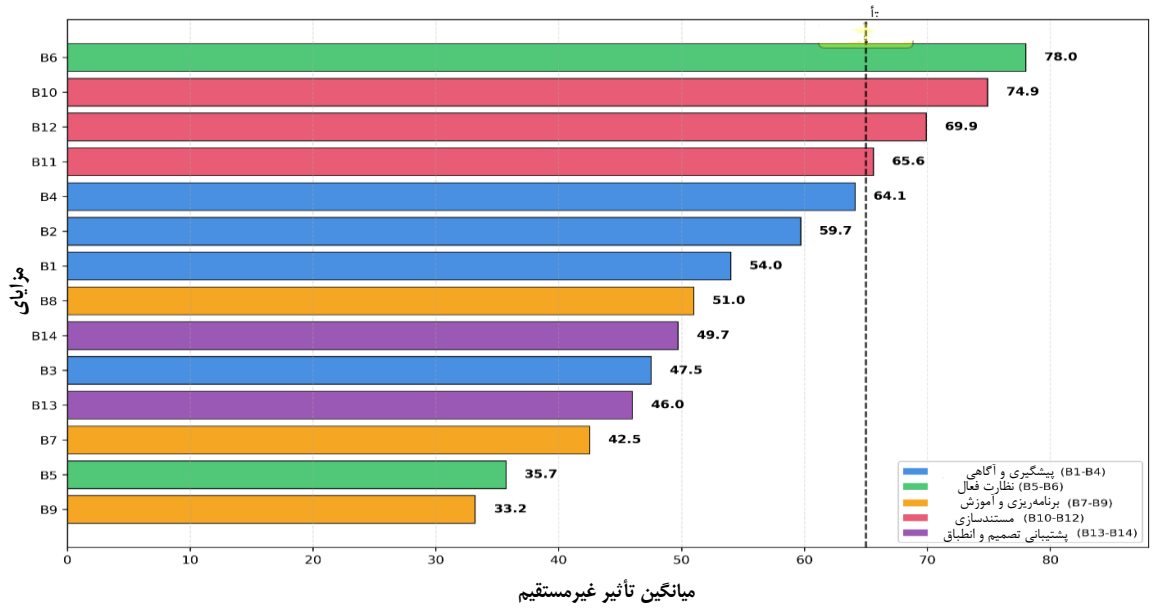
**میانگین تأثیرات مستقیم = میانگین روابط مستقیم هر مزیت

***افزایش FCM = میانگین تأثیرات غیرمستقیم - میانگین تأثیرات مستقیم

### ۴-۳- عملکرد مزایا

تحلیل استاتیک چهار مزیت فناوری‌های ایمنی با تأثیر بالا (تأثیرات غیرمستقیم ≤ ۶۵) را شناسایی کرد که ۲۹٪ از تمام مزایا را تشکیل می‌دهند اما تأثیر نامتناسبی را در سراسر سیستم‌های شاخص‌های عملکردی ایجاد می‌کنند (شکل ۳).

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

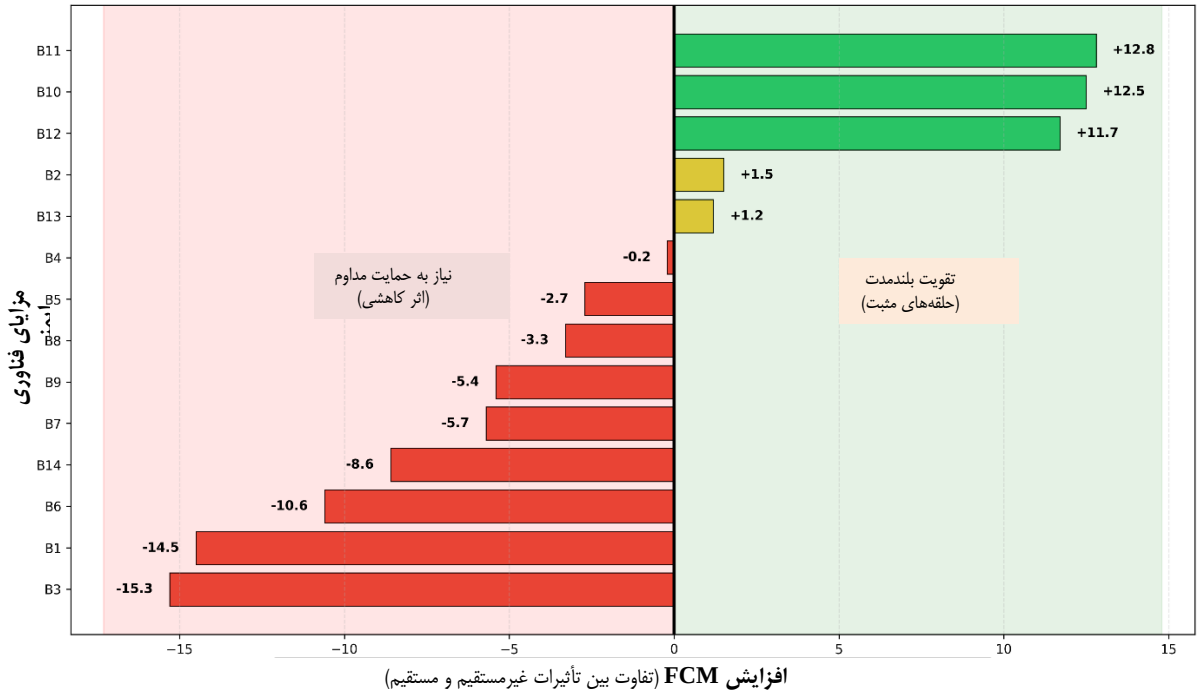



**شکل ۳: رتبه‌بندی مزایای فناوری‌های ایمنی بر اساس تأثیرات غیرمستقیم**

تحلیل استاتیک نشان داد *بهبود بازرسی‌های ایمنی* (B6) بالاترین تأثیرات غیرمستقیم (۷۸,۰) را دارد، اما به دلیل کاهش منفی در افزایش FCM (۱۰,۶-) اثربخشی بلندمدت آن به توسعه فناوری‌های پیشرفته مانند پهپادها و سامانه‌های داده‌محور و نیز ارتقای مهارت نیروی انسانی وابسته است. همچنین، *بهبود تحقیق حوادث* (B10) با بیشترین افزایش مثبت (۱۲,۵+) و تأثیرات غیرمستقیم قوی (۷۴,۹) مزیتی استراتژیک محسوب می‌شود، زیرا بدون نیاز به فناوری‌های پیچیده و صرفاً با ابزارهای دیجیتال ساده قابل پیاده‌سازی بوده و موجب تقویت یادگیری و بهبود مستمر می‌گردد. دو مزیت دیگر، یعنی *بهبود گزارش‌دهی خطاهای نزدیک* (B12) و *بهبود گزارش‌دهی آسیب‌ها* (B11) نیز با افزایش مثبت معنادار ( ۱۱,۷+ و ۱۲,۸+) و تأثیرات غیرمستقیم بالا (۶۹,۹ و ۶۵,۶)، راهکارهایی کم‌هزینه و مؤثر برای ارتقای فرهنگ گزارش‌دهی و شفافیت عملکرد ایمنی در صنعت ساخت ایران هستند.

*جداسازی کارگران از خطرات* (B4) با تأثیرات غیرمستقیم قابل‌توجه (۶۴,۱) و افزایش تقریباً خنثی (۰,۲-) در فهرست مزایای با تأثیر متوسط-بالا قرار می‌گیرد. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه سطح اتوماسیون و دسترسی به فناوری‌های پیشرفته رباتیک در ایران محدود است، اما راهکارهای سنتی و کم‌هزینه جداسازی کارگران- نظیر حفاظ‌های فیزیکی، علائم هشدار و محدودسازی دسترسی- همچنان می‌توانند بازدهی ایمنی بالایی ایجاد کنند. از سوی دیگر، پایداری اثر این مزیت نیز قابل‌توجه است، زیرا پس از پیاده‌سازی اولیه، نیاز به مداخلات مداوم نداشته و اثرات آن در طول زمان حفظ می‌شود (شکل ۴).

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444



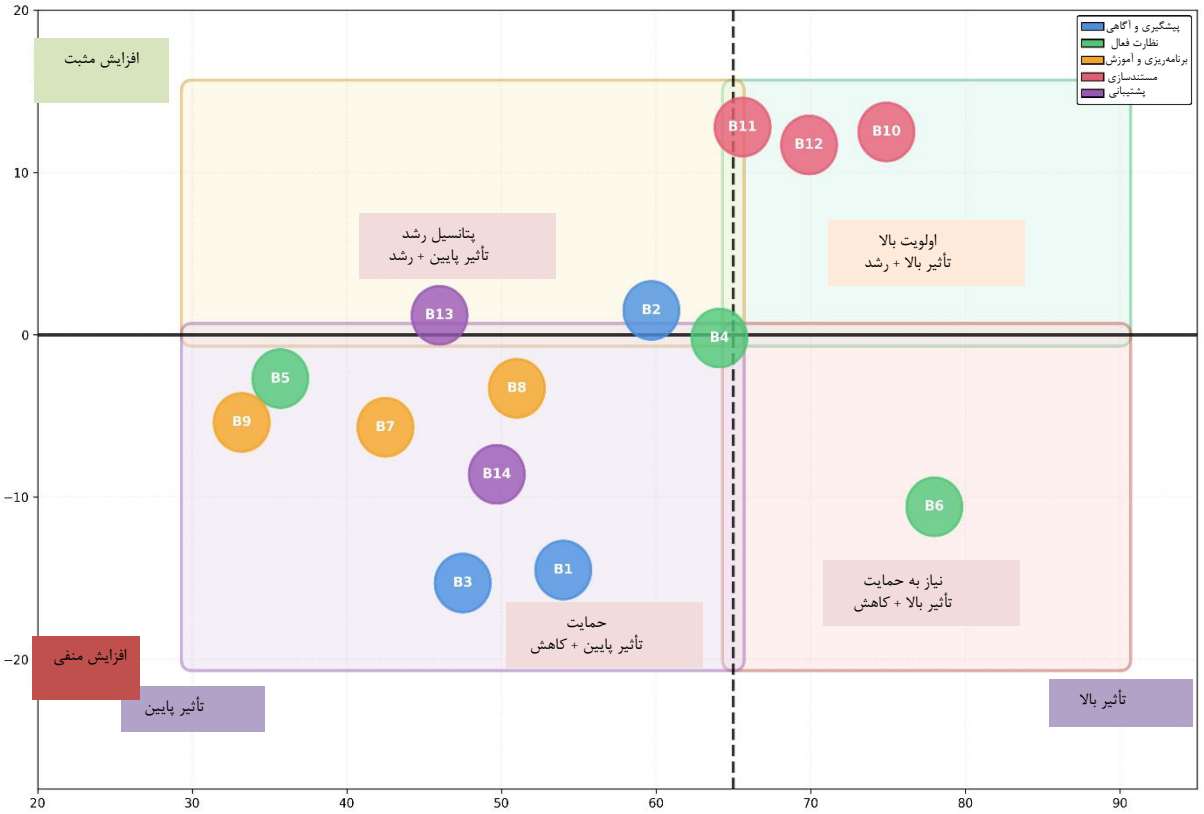

**شکل ۴: نمودار افزایش FCM- نشان‌دهنده رشد بلندمدت و حلقه‌های بازخورد مزایا** (افزایش مثبت نشان می‌دهد که مزیت با گذشت زمان و از طریق حلقه‌های بازخورد، تأثیر بیشتری نسبت به تأثیر اولیه‌اش دارد (رشد خودتقویت‌کننده). افزایش منفی نشان می‌دهد که مزیت بدون حمایت و سرمایه‌گذاری مستمر، تأثیرش کاهش می‌یابد)

*هشدار به کارگران در مورد خطرات* (B2) با افزایش مثبت محدود (۱٫۵+) و تأثیر متوسط (۵۹٫۷) گزینه‌ای قابل‌اتکا برای توسعه تدریجی فناوری ایمنی در ایران است، زیرا سامانه‌های هشدار IoT هزینه‌بر نبوده و دسترس‌پذیر هستند. *پشتیبانی از پیروی با مقررات ایمنی* (B14) نیز تأثیر متوسط (۴۹٫۷) اما با کاهش منفی (۸٫۶-) نشان می‌دهد که چالش‌های اجرایی و خلأهای نظارتی همچنان مانع اثربخشی کامل این مزیت است. همچنین، *تسهیل تصمیم‌گیری در زمان واقعی* (B13) با عملکرد متوسط (۴۶٫۰) و افزایش مثبت محدود (۱٫۲+) نشان می‌دهد که گرچه داشبوردهای IoT و نظارت هوشمند در پروژه‌های بزرگ در حال توسعه هستند، اما هنوز در صنعت ساخت ایران فراگیر نشده‌اند.

*حذف خطر در مرحله طراحی* (B5) کمترین تأثیرات (۳۵٫۷) را به‌همراه داشت که منعکس‌کننده سطح پایین پذیرش BIM و فناوری‌های طراحی ایمن در ایران است؛ فناوری‌هایی که نیازمند سرمایه‌گذاری بالا و نیروی انسانی متخصص می‌باشند. *بهبود اثربخشی آموزش* (B7) نیز به دلیل هزینه بالای VR/AR و محدودیت دسترسی، اثر کم‌تری (۴۲٫۵) نشان داد. *تجسم بصری خطرات* (B3) (۴۷٫۵) و *ارتقای ارتباطات بین کارگران* (B9) (۳۳٫۲) نیز در همین دسته قرار گرفتند، که این موضوع بیشتر به محدودیت زیرساخت دیجیتال و عدم پذیرش گسترده ابزارهای فناورانه در صنعت ساخت ایران بازمی‌گردد، نه کم‌اهمیتی ذاتی این مزایا.

شکل ۵ ماتریس استراتژیک عملکرد مزایا را نمایش می‌دهد که در آن مزایای فناوری‌های ایمنی بر اساس دو معیار کلیدی قرار گرفته‌اند: تأثیرات غیرمستقیم (محور X)، به‌عنوان شاخص اثر فوری و افزایش FCM (محور Y)، به‌عنوان شاخص پایداری و رشد بلندمدت. این ماتریس چهار ربع اصلی ایجاد می‌کند که هرکدام از آن‌ها راهبردهای متفاوتی را برای مدیریت و سرمایه‌گذاری اقتضا می‌کنند.

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444




**شکل ۵: ماتریس استراتژیک عملکرد مزایا – نشان‌دهنده موقعیت استراتژیکی هر مزیت**

### ربع ۱: اولویت بالا (تأثیر بالا + افزایش مثبت)

*بهبود تحقیق حوادث*(B10) ، *بهبود گزارش‌دهی آسیب‌ها* (B11) و *گزارش‌دهی خطاهای نزدیک* (B12) در این ربع قرار دارند. این مزایا ضمن برخورداری از تأثیرات قوی، رشد مستمر اثر را از طریق چرخه‌های بازخورد مثبت تضمین می‌کنند.

- راهبرد: سرمایه‌گذاری فوری و پایدار، تقویت زیرساخت‌های داده‌محور و حمایت سازمانی مستمر.

### ربع ۲: پتانسیل رشد (تأثیر پایین + افزایش مثبت)

*هشدار به کارگران* (B2) و *تصمیم‌گیری واقع‌زمان* (B13) در این ربع شناسایی شدند. اگرچه تأثیر فعلی آن‌ها متوسط است، اما رشد مثبت نشان‌دهنده ظرفیت ارتقای قابل‌توجه در آینده است.

- راهبرد: توسعه تدریجی، اجرای پایلوت و گسترش مرحله‌ای.

### ربع ۳: نیاز به حمایت (تأثیر بالا + افزایش منفی)

*جداسازی کارگران از خطرات* (B4) و *بهبود بازرسی‌های ایمنی* (B6) تأثیر بالا دارند، اما عدم پایداری اثر در بلندمدت چالش اصلی آن‌هاست.

- راهبرد: حمایت و نظارت مستمر، بازآموزی دوره‌ای و ارتقای پیوسته فناوری.

### ربع ۴: حمایتی (تأثیر پایین + افزایش منفی)

این ربع شامل آگاهی از خطرات (B1)، تجسم خطرات (B3)، حذف خطر در طراحی (B5)، بهبود آموزش (B7)، تقویت برنامه‌ریزی (B8)، ارتقای ارتباطات (B9)، و انطباق با مقررات (B14) است. این مزایا اگرچه اثر اولیه محدودتری دارند، اما نقش

زیربنایی در سلامت سیستم ایمنی ایفا می‌کنند. برخی از آن‌ها مانند B3 و B5 به دلیل وابستگی به فناوری‌های پیشرفته، در ایران با محدودیت‌های اجرایی مواجه‌اند.

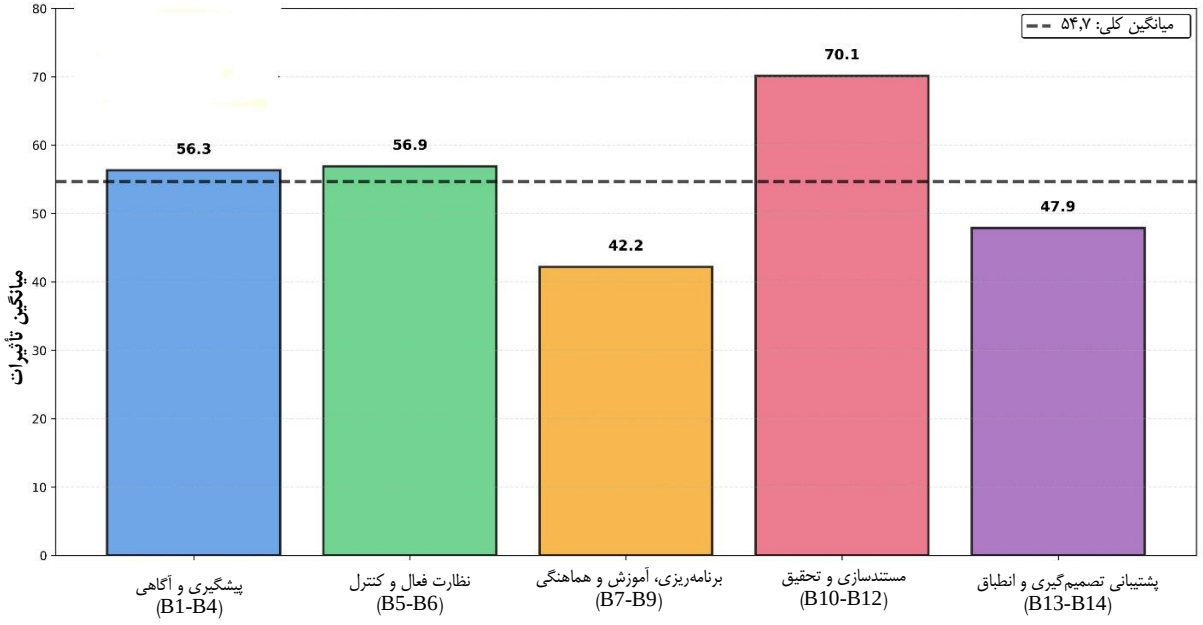
- راهبرد: استفاده بهینه از منابع موجود، یکپارچه‌سازی با برنامه‌های پایه‌ای و تنظیم انتظارات واقع‌بینانه.

در مجموع، ماتریس استراتژیک تأکید می‌کند که مزایای مرتبط با مستندسازی و گزارش‌دهی (B10-B12) باید اولویت اصلی سرمایه‌گذاری در صنعت ساخت ایران باشند؛ چرا که هم مؤثرند و هم خودتقویت‌کننده. در مقابل، مزایایی با تأثیر بالا اما ناپایدار مانند B4 و B6 باید تحت حمایت و کنترل مستمر قرار گیرند. همچنین مزایای پتانسیل‌دار B2 و B13 مناسب توسعه مرحله‌ای هستند و گروه چهارم به‌عنوان بلوک‌های حمایتی سیستم ایمنی باید به‌تدریج تقویت شوند تا کارایی کلی سیستم حفظ شود.

### ۴-۴- تمایز عملکرد بر اساس دسته‌های مزایا

نتایج نشان می‌دهد که دسته *پیشگیری و آگاهی از خطرات* (B1-B4) میانگین تأثیر ۵۶٫۳ را دارد. در این میان، *هشدار به کارگران* (B2) و *جداسازی کارگران از خطرات* (B4) عملکرد بهتری دارند، زیرا با روش‌های کم‌هزینه و فناوری‌های ساده‌تر قابل اجرا هستند؛ در حالی‌که *آگاهی از خطرات* (B1) و *تجسم بصری خطرات* (B3) به ابزارهای پیشرفته نظیر سنسورهای پوشیدنی و سامانه‌های تجسم نیاز دارند که پذیرش آن‌ها در ایران محدود است. دسته *نظارت فعال و کنترل* (B5-B6) نیز میانگین تأثیر ۵۶٫۹ را نشان می‌دهد، اما اختلاف درون‌گروهی قابل توجه است؛ به‌گونه‌ای که *بهبود بازرسی‌های ایمنی* (B6) تأثیر بسیار بالاتری (۷۸٫۰) نسبت به *حذف خطر در طراحی* (B5) ۳۵٫۷ دارد. دلیل این تفاوت، تداوم رویکرد سنتی بازرسی‌های فیزیکی در ایران و عدم فراگیری BIM و فناوری‌های طراحی ایمن است.

میانگین اثر دسته *برنامه‌ریزی، آموزش و هماهنگی* (B7-B9) برابر ۴۲٫۲ بوده که ضعیف‌ترین عملکرد را به خود اختصاص داده است؛ این موضوع منعکس‌کننده دسترسی محدود به فناوری‌های آموزشی پیشرفته (VR/AR) و زیرساخت‌های همکاری دیجیتال در کشور است، به‌طوری‌که آموزش‌های سنتی همچنان غالب هستند. دسته *مستندسازی و تحقیق* (B10-B12) با بالاترین میانگین اثر (۷۰٫۱)، مؤثرترین و عملی‌ترین گروه مزایا در زمینه صنعت ساخت ایران است، زیرا این نوع مداخلات اغلب مبتنی بر ابزارهای دیجیتال ساده و کم‌هزینه بوده و اثر پایدار و خودتقویت‌کننده ایجاد می‌کنند. در نهایت، دسته *پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق مقرراتی* (B13-B14) با میانگین ۴۷٫۹ پتانسیل رشد قابل‌توجهی دارد، اما بهره‌برداری از آن مستلزم بهبود زیرساخت‌های نرم‌افزاری، تقویت سازوکارهای اجرایی و ارتقای رویکردهای نظارتی است.



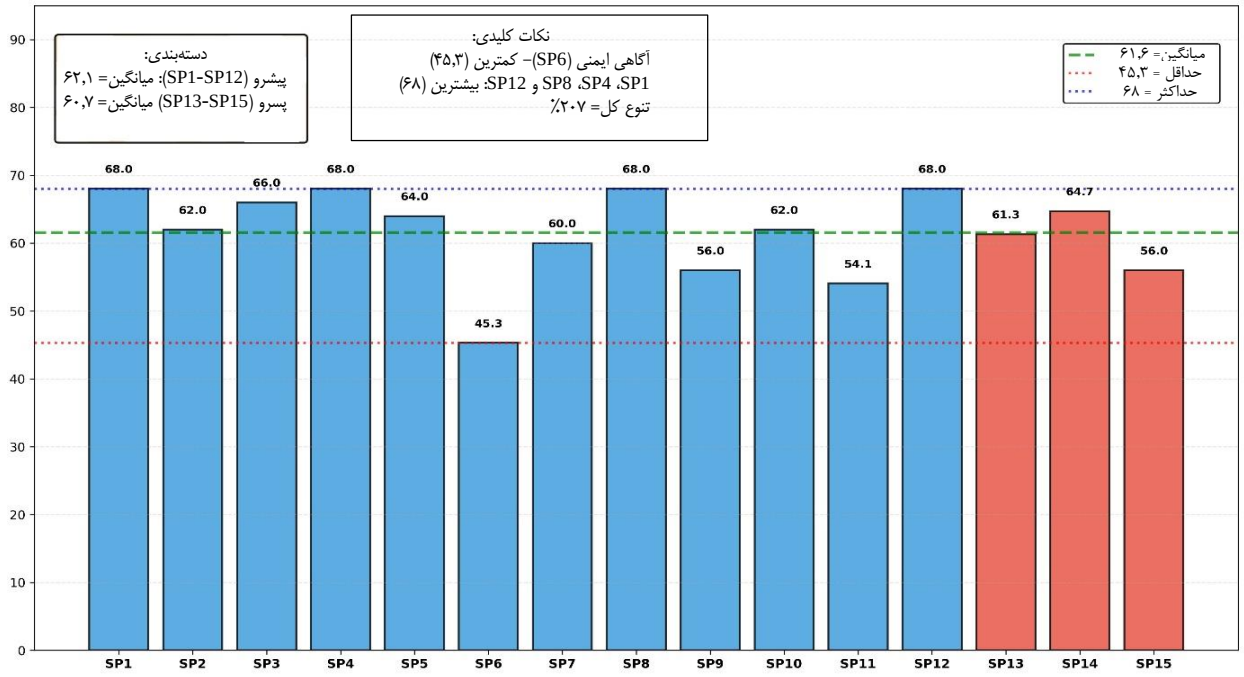
Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

**شکل ۶: تمایز عملکرد بر اساس دسته‌های مزایا- میانگین تأثیرات غیرمستقیم برای هر دسته**

### ۴-۵- تحلیل پاسخ‌پذیری شاخص‌های عملکرد ایمنی

نتایج تحلیل استاتیک نشان‌دهنده ناهمگونی قابل‌توجه در پاسخ‌پذیری شاخص‌های عملکرد ایمنی است؛ دامنه تغییرات میانگین از ۲۸ تا ۸۶ (به عبارت دیگر، تفاوتی ۲۰۷ درصدی)، بیانگر آن است که سیستم عملکرد ایمنی در ایران نسبت به مداخلات فناورانه واکنش یکسانی ندارد.

**شکل ۶: تنوع پاسخ‌پذیری شاخص‌های عملکرد ایمنی**




### ۴-۶- شاخص‌های عملکردی پیشرو (SP1-SP12)

شاخص‌های مرتبط با *آموزش و کنترل عملیاتی* (SP1، SP4، SP8 و SP12) بالاترین پاسخ‌پذیری را نشان دادند (میانگین ۶۸). این یافته تأکید می‌کند که اصلاح رویه‌های اجرایی، ارتقای برنامه‌ریزی و تقویت توانمندی‌های نظارتی بیشترین اثر را از فناوری می‌پذیرند. در مقابل، *سطح فرهنگ و آگاهی ایمنی* (SP6) با میانگین ۴۵,۳ پایین‌ترین پاسخ‌پذیری را داشت- حدود ۲۵٪ پایین‌تر از میانگین کلی (۶۱,۶). این مسئله نشان می‌دهد فناوری به‌تنهایی قادر به اصلاح فرهنگ ایمنی نیست و به *مداخلات رفتاری، رهبری سازمانی و آموزش مستمر* نیاز دارد. *نرخ اجرای اقدام‌های اصلاحی و پیشگیرانه* (SP11) نیز عملکرد متوسط (۵۴,۱) را ثبت کرد؛ موضوعی که بیانگر چالش‌های اجرایی و محدودیت منابع در پروژه‌های ساخت ایران است.

### ۴-۷- شاخص‌های عملکردی پسرو (SP13-SP15)

این دسته - که پیامدهای واقعی عملکرد ایمنی را نشان می‌دهند - میانگین ۶۰,۷ را ثبت کردند و نشان دادند که فناوری‌های ایمنی حتی در سناریوهای محدودیت فناوری می‌توانند بهبود ملموسی در *کاهش حوادث*، *شدت آسیب‌ها و پیامدهای اقتصادی* ایجاد کنند. به‌صورت خاص، *نرخ آسیب‌ها و حوادث* (SP13) و *شدت آسیب‌ها و روزهای کاری از دست‌رفته* (SP14) میانگین‌های نسبتاً بالای ۶۱,۳ و ۶۴,۷ را نشان دادند. در مقابل، *هزینه‌های خسارت* (SP15) میانگین متوسط‌تری (۵۶,۰) داشت که بیانگر نیاز به رویکردهای چندبعدی و ادغام‌شده برای کنترل هزینه‌ها است.

### ۴-۸- تحلیل دینامیک FCM

در این پژوهش، تحلیل دینامیک FCM برای پیش‌بینی پیامدهای اجرای فناوری‌های ایمنی و انجام تحلیل‌های سناریوی «چه می‌شود اگر» به کار گرفته شد. این تحلیل با استفاده از تأثیرات محاسبه‌شده مزایای فناوری‌های ایمنی (B1-B14) بر شاخص‌های عملکرد ایمنی (SP1-SP15) انجام شد تا الگوهای پایداری و اثرگذاری طولانی‌مدت این مزایا ارزیابی گردد. بر این اساس، شش سناریوی متمایز طراحی شد که هرکدام فعال‌سازی یک خوشه از مزایا را نشان می‌دهند: پیشگیری و آگاهی (سناریو ۱)، نظارت و کنترل (سناریو ۲)، برنامه‌ریزی و آموزش (سناریو ۳)، مستندسازی و تحقیق (سناریو ۴)، پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق (سناریو ۵) و سناریوی ترکیبی مبتنی بر نظر متخصصین (سناریو ۶). در هر سناریو تنها مزایای خوشه هدف فعال شده و دیگر مزایا غیرفعال می‌مانند، سپس بردارهای حالت اولیه به‌صورت تکراری طبق معادلات ۳ و ۴ به‌روزرسانی می‌شوند تا همگرایی سیستم حاصل شود($\varepsilon \leq 0.001$) . جدول ۵ مقادیر اولیه و مقادیر تعادلی را نشان داده و مبنایی برای ارزیابی تفاوت‌های تأثیرگذاری خوشه‌ها فراهم می‌کند. یافته‌های دینامیک امکان شناسایی مزایایی را که نقش مؤثرتری در دستیابی به عملکرد ایمنی پایدار دارند فراهم کرده و از اولویت‌بندی راهبردهای یکپارچه‌سازی فناوری در پروژه‌های ساخت‌وساز پشتیبانی می‌کند.

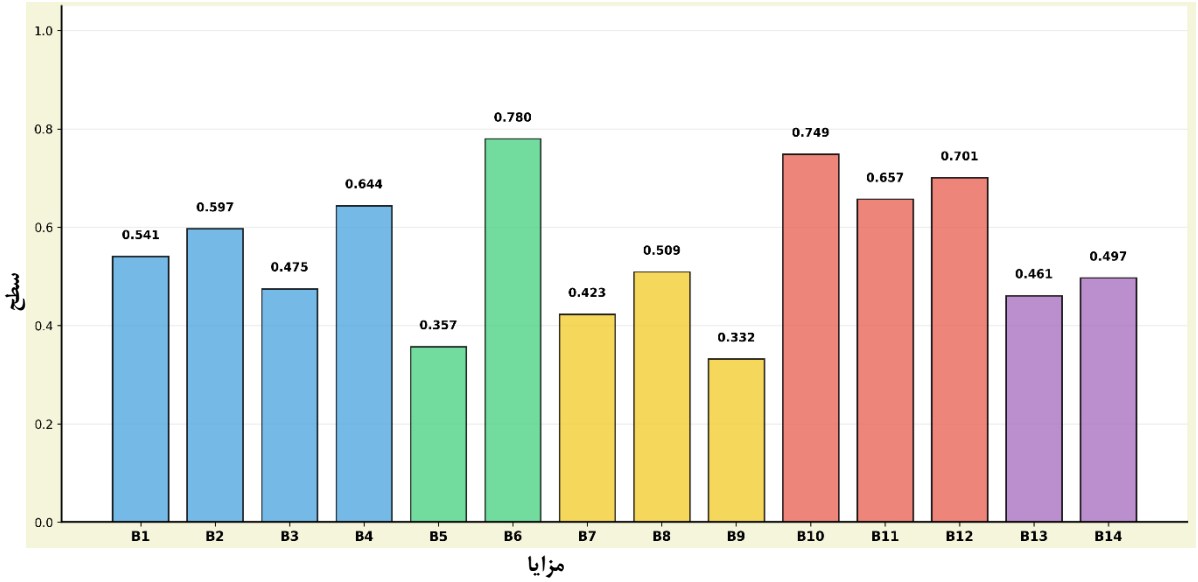
**جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی سناریوها**

| | سناریو ۱ | وضعیت نهایی ۱ | سناریو ۲ | وضعیت نهایی ۲ | سناریو ۳ | وضعیت نهایی ۳ | سناریو ۴ | وضعیت نهایی ۴ | سناریو ۵ | وضعیت نهایی ۵ | سناریو ۶ | وضعیت نهایی ۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B1 | ۱ | ۰,۵۴۱ | ۰ | ۰,۵۴۱ | ۰ | ۰,۵۴۱ | ۰ | ۰,۵۴۱ | ۰ | ۰,۵۴۱ | ۱ | ۰,۵۴۱ |
| B2 | ۱ | ۰,۵۹۷ | ۰ | ۰,۵۹۷ | ۰ | ۰,۵۹۷ | ۰ | ۰,۵۹۷ | ۰ | ۰,۵۹۷ | ۱ | ۰,۵۹۷ |
| B3 | ۱ | ۰,۴۷۵ | ۰ | ۰,۴۷۵ | ۰ | ۰,۴۷۵ | ۰ | ۰,۴۷۵ | ۰ | ۰,۴۷۵ | ۱ | ۰,۴۷۵ |
| B4 | ۱ | ۰,۶۴۴ | ۰ | ۰,۶۴۴ | ۰ | ۰,۶۴۴ | ۰ | ۰,۶۴۴ | ۰ | ۰,۶۴۴ | ۱ | ۰,۶۴۴ |
| B5 | ۰ | ۰,۳۵۷ | ۱ | ۰,۳۵۷ | ۰ | ۰,۳۵۷ | ۰ | ۰,۳۵۷ | ۰ | ۰,۳۵۷ | ۱ | ۰,۳۵۷ |
| B6 | ۰ | ۰,۷۸۰ | ۱ | ۰,۷۸۰ | ۰ | ۰,۷۸۰ | ۰ | ۰,۷۸۰ | ۰ | ۰,۷۸۰ | ۱ | ۰,۷۸۰ |
| B7 | ۰ | ۰,۴۲۳ | ۰ | ۰,۴۲۳ | ۱ | ۰,۴۲۳ | ۰ | ۰,۴۲۳ | ۰ | ۰,۴۲۳ | ۱ | ۰,۴۲۳ |
| B8 | ۰ | ۰,۵۰۹ | ۰ | ۰,۵۰۹ | ۱ | ۰,۵۰۹ | ۰ | ۰,۵۰۹ | ۰ | ۰,۵۰۹ | ۱ | ۰,۵۰۹ |
| B9 | ۰ | ۰,۳۳۲ | ۰ | ۰,۳۳۲ | ۱ | ۰,۳۳۲ | ۰ | ۰,۳۳۲ | ۰ | ۰,۳۳۲ | ۱ | ۰,۳۳۲ |
| B10 | ۰ | ۰,۷۴۹ | ۰ | ۰,۷۴۹ | ۰ | ۰,۷۴۹ | ۱ | ۰,۷۴۹ | ۰ | ۰,۷۴۹ | ۱ | ۰,۷۴۹ |
| B11 | ۰ | ۰,۶۵۷ | ۰ | ۰,۶۵۷ | ۰ | ۰,۶۵۷ | ۱ | ۰,۶۵۷ | ۰ | ۰,۶۵۷ | ۱ | ۰,۶۵۷ |
| B12 | ۰ | ۰,۷۰۱ | ۰ | ۰,۷۰۱ | ۰ | ۰,۷۰۱ | ۱ | ۰,۷۰۱ | ۰ | ۰,۷۰۱ | ۱ | ۰,۷۰۱ |
| B13 | ۰ | ۰,۴۶۱ | ۰ | ۰,۴۶۱ | ۰ | ۰,۴۶۱ | ۰ | ۰,۴۶۱ | ۱ | ۰,۴۶۱ | ۱ | ۰,۴۶۱ |
| B14 | ۰ | ۰,۴۹۷ | ۰ | ۰,۴۹۷ | ۰ | ۰,۴۹۷ | ۰ | ۰,۴۹۷ | ۱ | ۰,۴۹۷ | ۱ | ۰,۴۹۷ |
| SP1 | ۰ | ۰,۷۶۵ | ۰ | ۰,۷۶۵ | ۰ | ۰,۷۶۵ | ۰ | ۰,۷۶۵ | ۰ | ۰,۷۶۵ | ۰ | ۰,۷۶۵ |
| SP 2 | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ |
| SP 3 | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ |
| SP 4 | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ |
| SP 5 | ۰ | ۰,۷۰۰ | ۰ | ۰,۷۰۰ | ۰ | ۰,۷۰۰ | ۰ | ۰,۷۰۰ | ۰ | ۰,۷۰۰ | ۰ | ۰,۷۰۰ |
| SP 6 | ۰ | ۰,۵۷۵ | ۰ | ۰,۵۷۵ | ۰ | ۰,۵۷۵ | ۰ | ۰,۵۷۵ | ۰ | ۰,۵۷۵ | ۰ | ۰,۵۷۵ |
| SP 7 | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ |
| SP 8 | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ |
| SP 9 | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ | ۰ | ۰,۶۹۰ |
| SP 10 | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ |
| SP 11 | ۰ | ۰,۶۶۰ | ۰ | ۰,۶۶۰ | ۰ | ۰,۶۶۰ | ۰ | ۰,۶۶۰ | ۰ | ۰,۶۶۰ | ۰ | ۰,۶۶۰ |
| SP 12 | ۰ | ۰,۷۴۵ | ۰ | ۰,۷۴۵ | ۰ | ۰,۷۴۵ | ۰ | ۰,۷۴۵ | ۰ | ۰,۷۴۵ | ۰ | ۰,۷۴۵ |
| SP 13 | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ | ۰ | ۰,۷۳۵ |
| SP 14 | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ | ۰ | ۰,۷۵۵ |
| SP 15 | ۰ | ۰,۶۶۵ | ۰ | ۰,۶۶۵ | ۰ | ۰,۶۶۵ | ۰ | ۰,۶۶۵ | ۰ | ۰,۶۶۵ | ۰ | ۰,۶۶۵ |

Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444

### ۴-۹- تحلیل عملکرد مزایای فناوری‌های ایمنی

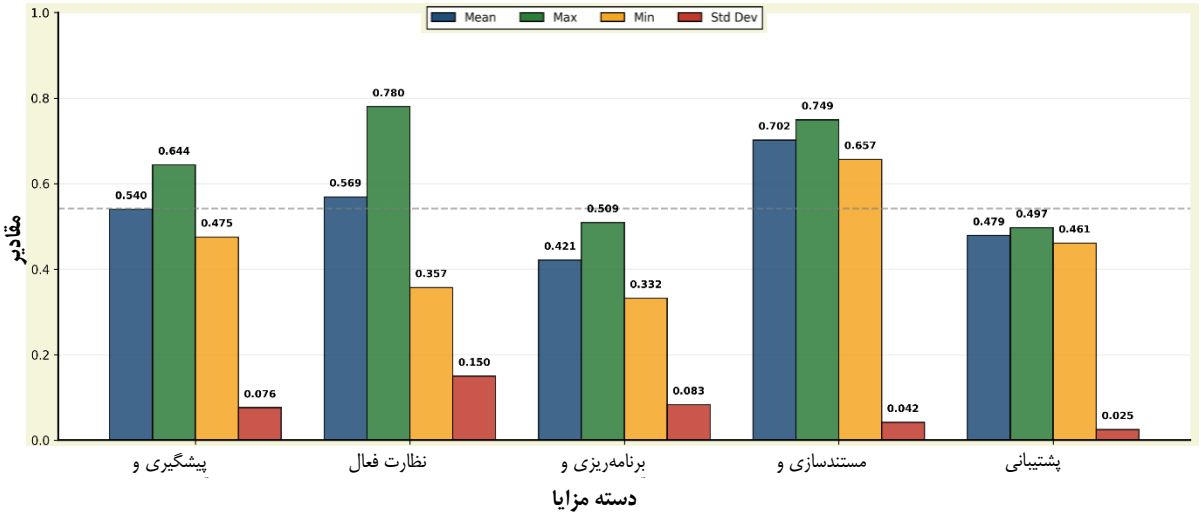
اگرچه شاخص‌های عملکرد ایمنی در تمام سناریوها به تعادل مشابهی می‌رسند، اما سطوح فعال‌سازی تعادلی مزایا تفاوت‌های معناداری در کارایی آن‌ها را آشکار می‌سازد (شکل ۷). *بهبود بازرسی‌های ایمنی* (B6) با بالاترین سطح فعال‌سازی (۰,۷۸۰) مؤثرترین اهرم ارتقای ایمنی در پروژه‌های ساخت ایران محسوب می‌شود، زیرا با ترکیب بازرسی‌های سنتی و دیجیتال، هم عملیاتی است و هم پذیرش سازمانی بالایی دارد. پس از آن، *بهبود تحقیق حوادث* (B10) (۰,۷۴۹) و *گزارش‌دهی خطاهای نزدیک* (B12) (۰,۷۰۱) قرار دارند که شواهدی از نقش تحول‌آفرین فناوری‌های ساده و کم‌هزینه مانند اپلیکیشن‌های موبایلی و سامانه‌های ابری در ایجاد چرخه‌های یادگیری و بهبود مستمر ارائه می‌دهند.




**شکل ۷: رتبه‌بندی مزایای فناوری‌های ایمنی بر اساس سطح فعال‌سازی در سناریوها**

مقایسه دسته‌ها نشان می‌دهد که *مستندسازی و تحقیق* (B10-B12) با بالاترین میانگین فعال‌سازی (۰,۷۰۲) اثربخش‌ترین خوشه فناورانه برای بستر ایران است و باید در اولویت اجرای فناوری قرار گیرد. در مقابل، دسته *برنامه‌ریزی، آموزش و هماهنگی* (B7-B9)کمترین میانگین (۰,۴۲۱) را ثبت کرده است که محدودیت در زیرساخت‌های آموزشی دیجیتال و ارتباطی را یادآور می‌شود. همچنین، *پیشگیری و آگاهی* (B1-B4) و *پشتیبانی تصمیم‌گیری و انطباق مقرراتی* (B13-B14) پتانسیل قابل‌توجهی برای رشد دارند، مشروط بر بهبود تدریجی زیرساخت‌های فناورانه و اجرایی. گستره عملکردی ۴۵ نقطه‌ای (۰,۳۳۲-۰,۷۸۰) تأکید می‌کند که اثربخشی فناوری‌ها یکسان نیست و تصمیم‌گیری فناورانه باید بر اولویت‌بندی داده‌محور استوار باشد (شکل ۸).

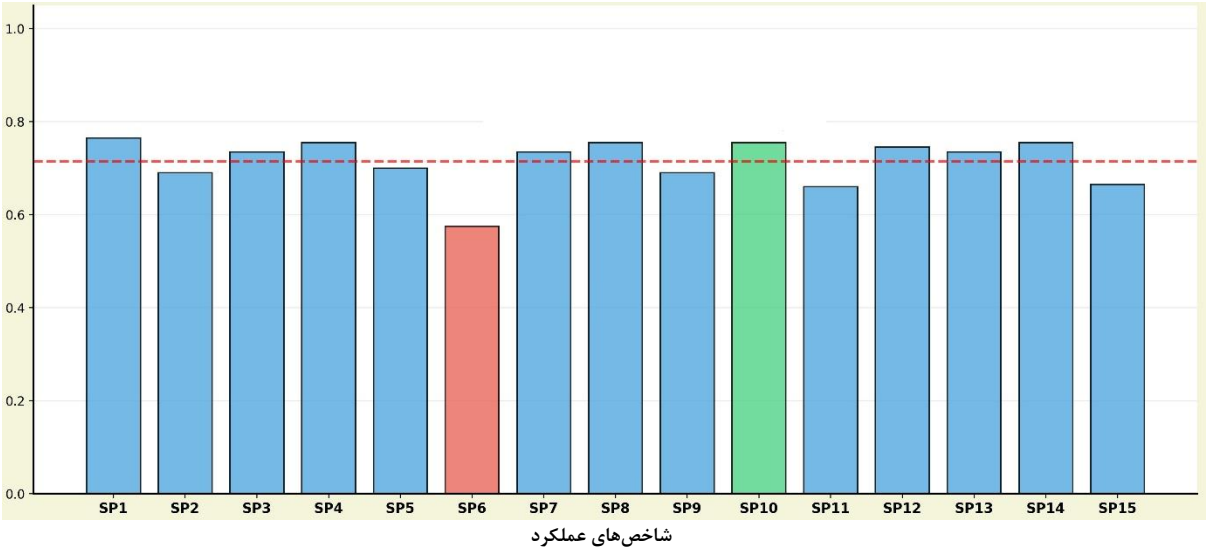
Civil and Project Journal, 2026, 8(8), 25-50
. https://doi.org/10.22034/cpj.2026.584813.1444




**شکل ۸: معیارهای عملکرد دسته‌های مزایای تکنولوژی ایمنی (میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار)**

### ۴-۱۰- تحلیل پاسخ‌پذیری شاخص‌های عملکرد ایمنی

نتایج تحلیل دینامیک بیانگر تفاوت ۱۹ نقطه‌ای در سطوح فعال‌سازی تعادلی شاخص‌های عملکرد ایمنی است (دامنه: ۰٫۵۷۵–۰٫۷۶۵)، که نشان‌دهنده پاسخ‌پذیری ناهمگون سیستم ایمنی نسبت به مداخلات فناورانه است (شکل ۹). شاخص‌های مرتبط با *آموزش و کنترل عملیاتی* (SP1, 4, 8, 12) بالاترین سطوح فعال‌سازی (۰٫۷۵۵–۰٫۷۶۵) را به‌دست آورده‌اند و این موضوع تأکید می‌کند که بهبود رویه‌های اجرایی و برنامه‌ریزی عملیاتی سریع‌ترین و مؤثرترین مسیر ارتقای ایمنی در پروژه‌های ساخت ایران است. در مقابل، *آگاهی و فرهنگ ایمنی* (SP6) کمترین پاسخ‌پذیری (۰٫۵۷۵) را ثبت کرده است؛ حدود ۲۲٪ پایین‌تر از میانگین کل، که نشان می‌دهد ابعاد فرهنگی مقاوم‌ترین شاخص‌ها در برابر فناوری هستند و نیازمند مداخلات تدریجی، رهبری سازمانی و تغییر رفتار هستند. همچنین، *نرخ اجرای اقدام‌های اصلاحی* (SP11) با فعال‌سازی میانی (۰٫۶۶۰) نشان می‌دهد که فاصله قابل‌توجهی میان شناسایی خطرات و اجرای اقدامات اصلاحی در پروژه‌های کشور وجود دارد؛ چالشی که بیش از هر چیز ریشه در ضعف پاسخ‌دهی مدیریتی و فشارهای زمانی دارد.




**شکل ۹: مقایسه فعال‌سازی شاخص‌های عملکرد در تمام سناریوها**

### ۴-۱۱- تفسیر همگرایی سیستمی

نتایج تحلیل دینامیک نشان می‌دهد که هر شش سناریوی مداخله‌ای به یک حالت تعادل مشترک (میانگین فعال‌سازی = ۰,۷۰۷) همگرا می‌شوند؛ امری که استقلال مسیر را در تحول عملکرد ایمنی صنعت ساخت ایران تأیید می‌کند. این ویژگی بیانگر آن است که با وجود تفاوت در ترتیب و نوع مداخله فناورانه، حلقه‌های بازخورد و پیوندهای علّی در سیستم به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که نهایتاً نتایج پایدار مشابهی حاصل می‌شود. بنابراین، سازمان‌ها می‌توانند مهارتوسعه فناوری‌ها را مطابق با محدودیت‌های منابع، آمادگی دیجیتال و شرایط پروژه تنظیم کنند، بدون آنکه دستیابی به وضعیت بهینه نهایی را به خطر بیندازند.

با این حال، سرعت همگرایی در سناریوها متفاوت است و اهمیت چگونگی شروع تحول را برجسته می‌کند. سناریوی ترکیبی مبتنی‌بر نظر متخصصان (سناریو ۶) در ۱۲ تکرار به تعادل رسیده و سریع‌ترین مسیر تحول را ارائه می‌دهد (۶۰ درصد سریع‌تر از تک‌خوشه‌ای‌ها). پس از آن سناریوی *مستندسازی و تحقیق* (۱۵ تکرار) و *پیشگیری و آگاهی* (۱۸ تکرار) قرار می‌گیرند. کندترین همگرایی مربوط به *برنامه‌ریزی و آموزش* (سناریو ۳) با ۳۰ تکرار است - تفاوتی معادل ۱۵۰ درصد نسبت به سناریوی سریع.

این الگو نشان می‌دهد که شروع تحول با مزایای پربازده مانند B6 ، B10 و B12 سرعت اصلاحات را به طور معناداری افزایش می‌دهد، در حالی‌که اتکا به مزایای کم‌اثرتر B5 ، B7، B9 تحول را کند می‌کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل نظام‌مند تأثیر مزایای فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکرد ایمنی در صنعت ساخت‌وساز، ۱۴ مزیت کلیدی و ۱۵ شاخص عملکرد ایمنی را شناسایی و از طریق مدل‌سازی نقشه شناختی فازی (FCM) به‌صورت استاتیک و دینامیک ارزیابی کرد. یافته‌ها نشان داد که مزایای فناورانه تأثیر یکنواختی بر شاخص‌های عملکرد ندارند و برخی از آن‌ها محرک‌های اصلی بهبود ایمنی هستند و باید در اولویت سرمایه‌گذاری قرار گیرند.

در تحلیل استاتیک مشخص شد که مزایای مرتبط با *بازرسی ایمنی، تحقیق و بررسی حوادث، گزارش‌دهی آسیب‌ها و گزارش‌دهی نزدیک به حادثه* بیشترین تأثیر غیرمستقیم را بر شاخص‌های پیشرو و پس‌رو دارند. این مزایا که در دسته *مستندسازی و گزارش‌دهی* قرار می‌گیرند، با توجه به هزینه کم و قابلیت پیاده‌سازی سریع (مبتنی بر ابزارهای موبایلی و سامانه‌های ابری)، مناسب‌ترین گزینه برای صنعت ساخت ایران هستند. در مقابل، مزایای مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته مانند BIM ، دوقلوی دیجیتال و VR/AR اثرپذیری پایین‌تری داشتند که منعکس‌کننده موانع زیرساختی، مهارتی و سرمایه‌ای موجود در کشور است. همچنین شاخص‌های عملکردی واکنش‌های متفاوتی نشان دادند؛ مؤلفه‌های آموزشی، برنامه‌ریزی و نظارت اجرایی به‌سرعت بهبود یافتند، درحالی‌که ابعاد فرهنگی کندترین واکنش را نشان دادند.

تحلیل دینامیک نیز نشان داد که هرچند سناریوهای مختلف مداخله‌ای در نهایت به تعادل عملکردی مشابهی دست می‌یابند، اما *سرعت همگرایی* یکسان نیست. سناریوی ترکیبی مبتنی بر فعال‌سازی هم‌زمان چند مزیت کلیدی، سریع‌ترین روند بهبود را ایجاد کرد؛ در حالی‌که سناریوهای تک خوشه‌ای زمان طولانی‌تری برای دستیابی به تعادل نیاز داشتند. این یافته تأکید می‌کند که ترکیب راهبردی مزایای پربازده به‌ویژه B6، B10 و B12 می‌تواند زمان کاهش مخاطرات را به‌صورت معنادار کوتاه‌تر نماید. همچنین تأثیر مثبت فناوری بر شاخص‌های پس‌رو مانند *کاهش نرخ و شدت حوادث*، نشان‌دهنده توانایی فناوری‌های ایمنی در ایجاد نتایج ملموس و قابل سنجش در ارتقای ایمنی است.

## ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل نظام‌مند تأثیر مزایای فناوری‌های ایمنی بر شاخص‌های عملکرد ایمنی در صنعت ساخت‌وساز، ۱۴ مزیت کلیدی و ۱۵ شاخص عملکرد ایمنی را شناسایی و از طریق مدل‌سازی نقشه شناختی فازی (FCM) به‌صورت استاتیک و دینامیک ارزیابی کرد. یافته‌ها نشان داد که مزایای فناورانه تأثیر یکنواختی بر شاخص‌های عملکرد ندارند و برخی از آن‌ها محرک‌های اصلی بهبود ایمنی هستند و باید در اولویت سرمایه‌گذاری قرار گیرند.

در تحلیل استاتیک مشخص شد که مزایای مرتبط با *بازرسی ایمنی، تحقیق و بررسی حوادث، گزارش‌دهی آسیب‌ها و گزارش‌دهی نزدیک به حادثه* بیشترین تأثیر غیرمستقیم را بر شاخص‌های پیشرو و پس‌رو دارند. این مزایا که در دسته *مستندسازی و گزارش‌دهی* قرار می‌گیرند، با توجه به هزینه کم و قابلیت پیاده‌سازی سریع (مبتنی بر ابزارهای موبایلی و سامانه‌های ابری)، مناسب‌ترین گزینه برای صنعت ساخت ایران هستند. در مقابل، مزایای مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته مانند BIM ، دوقلوی دیجیتال و VR/AR اثرپذیری پایین‌تری داشتند که منعکس‌کننده موانع زیرساختی، مهارتی و سرمایه‌ای موجود در کشور است. همچنین شاخص‌های عملکردی واکنش‌های متفاوتی نشان دادند؛ مؤلفه‌های آموزشی، برنامه‌ریزی و نظارت اجرایی به‌سرعت بهبود یافتند، در حالی‌که ابعاد فرهنگی کندترین واکنش را نشان دادند.

تحلیل دینامیک نیز نشان داد که هرچند سناریوهای مختلف مداخله‌ای در نهایت به تعادل عملکردی مشابهی دست می‌یابند، اما *سرعت همگرایی* یکسان نیست. سناریوی ترکیبی مبتنی بر فعال‌سازی هم‌زمان چند مزیت کلیدی، سریع‌ترین روند بهبود را ایجاد کرد؛ در حالی‌که سناریوهای تک خوشه‌ای زمان طولانی‌تری برای دستیابی به تعادل نیاز داشتند. این یافته تأکید می‌کند که ترکیب راهبردی مزایای پربازده به‌ویژه B6، B10 و B12 می‌تواند زمان کاهش مخاطرات را به‌صورت معنادار کوتاه‌تر نماید. همچنین تأثیر مثبت فناوری بر شاخص‌های پس‌رو مانند *کاهش نرخ و شدت حوادث*، نشان‌دهنده توانایی فناوری‌های ایمنی در ایجاد نتایج ملموس و قابل سنجش در ارتقای ایمنی است.

## ۶- پیامدهای نظری و عملی

از دیدگاه نظری، ارائه یک مدل FCM دوسطحی و تحلیل تلفیقی استاتیک-دینامیک در این مطالعه، سازوکار اثرگذاری مزایای فناورانه بر ایمنی را به‌صورت روشن تبیین کرده و خلأ موجود در ادبیات پیرامون نقش مستقیم مزایای فناوری‌های ایمنی در بهبود عملکرد ایمنی را پوشش می‌دهد. این رویکرد چارچوبی توسعه‌پذیر ارائه می‌دهد که می‌تواند در سایر فناوری‌ها و صنایع نیز به کار گرفته شود.

از منظر عملی، یافته‌ها مسیر بهینه سرمایه‌گذاری فناورانه را پیشنهاد می‌کنند؛ ابتدا تمرکز بر فناوری‌های کم‌هزینه‌تر با تأثیر بالا و حلقه‌های یادگیری مثبت (B10-B12) و در ادامه حرکت تدریجی به سمت فناوری‌های پیشرفته‌تر پس از ایجاد بلوغ سازمانی. این مطالعه همچنین بر اهمیت نهادینه‌سازی سیستماتیک گزارش‌دهی، تحلیل حوادث و مدیریت دانش ایمنی برای تقویت چرخه یادگیری سازمانی تأکید می‌کند.

اتکا به قضاوت خبرگان و شبیه‌سازی مفهومی از محدودیت‌های پژوهش حاضر است؛ بنابراین ارزیابی تجربی مدل در پروژه‌های واقعی، توسعه مدل برای شرایط سازمانی و قراردادی متفاوت، و بررسی اثرات بلندمدت مداخلات فناورانه، مسیرهای مهم مطالعات آینده خواهند بود.

## مراجع

Zhou, Z., Goh, Y. M., & Li, Q. (2015). Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety science*, *72*, 337-350.

HSE, H. (2024). Construction statistics in Great Britain.

Haupt, T. C., Akinlolu, M., & Raliile, M. T. (2019, November). Applications of digital technologies for health and safety management in construction. In *Proceedings of the 8th World Construction Symposium, Colombo, Sri Lanka* (pp. 88-97).

Adekunle, S., Onatayo, D., Ejohwomu, I., & Aigbavboa, C. (2024). Examining challenges in adopting safety leading indicators for construction projects in South Africa. *Frontiers in Built Environment*, *10*, 1441941.

Ortega, N., Paes, D., Feng, Z., Sutrisna, M., & Yiu, T. W. (2025). Investigating the factors that define and influence safety culture: perspectives from expert professionals. *Architecture, Structures and Construction*, *5*(1), 13.

Antwi-Afari, M. F., Li, H., Wong, J. K. W., Oladinrin, O. T., Ge, J. X., Seo, J., & Wong, A. Y. L. (2019). Sensing and warning-based technology applications to improve occupational health and safety in the construction industry: A literature review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *26*(8), 1534-1552.

Agyekum, K., Pittri, H., Botchway, E. A., Amudjie, J., Kumah, V. M. A., Kotei-Martin, J. N., & Oduro, R. A. (2022). Exploring the current technologies essential for health and safety in the Ghanaian construction industry. *Merits*, *2*(4), 314-330.

Li, X., Yi, W., Chi, H. L., Wang, X., & Chan, A. P. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in construction*, *86*, 150-162.

Laufer, A., & Ledbetter, W. B. (1986). Assessment of safety performance measures at construction sites. *Journal of construction engineering and management*, *112*(4), 530-542.

Hinze, J., Thurman, S., & Wehle, A. (2013). Leading indicators of construction safety performance. *Safety science*, *51*(1), 23-28.

Lingard, H., Wakefield, R., & Blismas, N. (2013, May). If you cannot measure it, you cannot improve it: Measuring health and safety performance in the construction industry. In *the 19th Triennial CIB World Building Congress, Queensland University of Technology,, Brisbane, Queensland, Australia*.

Arezes, P. M., & Sérgio Miguel, A. (2003). The role of safety culture in safety performance measurement. *Measuring business excellence*, *7*(4), 20-28.

Cadieux, J., Roy, M., & Desmarais, L. (2006). A preliminary validation of a new measure of occupational health and safety. *Journal of Safety Research*, *37*(4), 413-419.

Sparer, E. H., & Dennerlein, J. T. (2013). Determining safety inspection thresholds for employee incentives programs on construction sites. *Safety Science*, *51*(1), 77-84.

Toellner, J. (2001). Improving safety & health performance: identifying & measuring leading indicators. *Professional Safety*, *46*(9), 42.

Manuele, F. A. (2009). Leading & lagging indicators. *Professional Safety*, *54*(12), 28-33.

HSE, C. 2006. Developing Process Safety Indicators. A Step-by-step Guide for Chemical and Major Hazard Industries. *Health and Safety Executive*.

Dyreborg, J. (2009). The causal relation between lead and lag indicators. *Safety Science*, *47*(4), 474-475.

Mohaghegh, Z., & Mosleh, A. (2009). Measurement techniques for organizational safety causal models: Characterization and suggestions for enhancements. *Safety science*, *47*(10), 1398-1409.

Hallowell, M. R., Hinze, J. W., Baud, K. C., & Wehle, A. (2013). Proactive construction safety control: Measuring, monitoring, and responding to safety leading indicators. *Journal of construction engineering and management*, *139*(10), 04013010.

Guo, B. H., & Yiu, T. W. (2016). Developing leading indicators to monitor the safety conditions of construction projects. *Journal of management in engineering*, *32*(1), 04015016.

Construction Industry Institute (CII). (2012). Measuring Safety Performance with Active Safety Leading Indicators (Research Report 284-11). Austin, TX: Construction Industry Institute.

Occupational Safety and Health Administration. (2019). Using leading indicators to improve safety and health outcomes. *US: Department of Labor*.

Xu, J., Cheung, C., Manu, P., & Ejohwomu, O. (2021). Safety leading indicators in construction: A systematic review. *Safety science*, *139*, 105250.

Bhagwat, K., Delhi, V. S. K., & Nanthagopalan, P. (2022). Construction safety performance measurement using a leading indicator-based jobsite safety inspection method: case study of a building construction project. *International journal of occupational safety and ergonomics*, *28*(4), 2645-2656.

Lingard, H. C., Cooke, T., & Blismas, N. (2012). Designing for construction workers' occupational health and safety: a case study of socio-material complexity. *Construction Management and Economics*, *30*(5), 367-382.

Alruqi, W. M., Hallowell, M. R., & Techera, U. (2018). Safety climate dimensions and their relationship to construction safety performance: A meta-analytic review. *Safety science*, *109*, 165-173.

Guo, H., Yu, Y., & Skitmore, M. (2017). Visualization technology-based construction safety management: A review. *Automation in construction*, *73*, 135-144.

Xu, J., Li, J., & Chen, X. (2024). Assessment of technology adoption in construction safety management: Case study in China. *Science Progress*, *107*(4), 00368504241304198.

Liang, H., Zhang, S., & Su, Y. (2018). Using leading and lagging indicators to select safe contractors at the prequalification stage of construction projects. *International journal of occupational and environmental health*, *24*(1-2), 61-74.

Yap, J. B. H., Lee, K. P. H., Skitmore, M., Lew, Y. L., Lee, W. P., & Lester, D. (2023). Predictors to increase safety technology adoption in construction: an exploratory factor analysis for Malaysia. *Journal of Civil Engineering and Management*, *29*(2), 157-170.

Ting, T. L., & Yahaya, I. (2024). Adoption of technology for construction site safety management: unveiling insight from Penang contractors. *Planning Malaysia*, *22*.

Chong, H. Y., Xu, Y., Lun, C., & Chi, M. (2023). The adoption intentions of wearable technology for construction safety. *Buildings*, *13*(11), 2747.

Manjourides, J., & Dennerlein, J. T. (2019). Testing the associations between leading and lagging indicators in a contractor safety pre- qualification database. *American journal of industrial medicine*, *62*(4), 317-324.

Hasanzadeh, S., Esmaeili, B., & Dodd, M. D. (2018). Examining the relationship between construction workers' visual attention and situation awareness under fall and tripping hazard conditions: Using mobile eye tracking. *Journal of construction engineering and management*, *144*(7), 04018060.

Zhou, Z., Irizarry, J., & Li, Q. (2013). Applying advanced technology to improve safety management in the construction industry: a literature review. *Construction Management and Economics*, *31*(6), 606-622.

Akinlolu, M., Haupt, T. C., Edwards, D. J., & Simpeh, F. (2022). A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies. *International Journal of Construction Management*, *22*(14), 2699-2711.

Nnaji, C., & Karakhan, A. A. (2020). Technologies for safety and health management in construction: Current use, implementation benefits and limitations, and adoption barriers. *Journal of Building Engineering*, *29*, 101212.

Nnaji, C., Gambatese, J., Karakhan, A., & Eseonu, C. (2019). Influential safety technology adoption predictors in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *26*(11), 2655-2681.

Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2020). Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain shams engineering journal*, *11*(1), 225-230.

Cheng, J. C., Chen, K., & Chen, W. (2020). State-of-the-art review on mixed reality applications in the AECO industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(2), 03119009.

Li, H., Chan, G., & Skitmore, M. (2012). Multiuser virtual safety training system for tower crane dismantlement. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *26*(5), 638-647.

Qi, J., Issa, R. R., Olbina, S., & Hinze, J. (2014). Use of building information modeling in design to prevent construction worker falls. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *28*(5), A4014008.

Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in construction*, *29*, 183-195.

Awolusi, I., Marks, E., & Hallowell, M. (2018). Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. *Automation in construction*, *85*, 96-106.

Hasan, S., Zaman, H., Han, S., Al-Hussein, M., & Su, Y. (2012). Integrated building information model to identify possible crane instability caused by strong winds. In *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World* (pp. 1281-1290).

Kannan, M. R., & Santhi, M. H. (2013). Constructability assessment of climbing formwork systems using building information modeling. *Procedia Engineering*, *64*, 1129-1138.

Nnaji, C., Gambatese, J., Lee, H. W., & Zhang, F. (2020b). Improving construction work zone safety using technology: A systematic review of applicable technologies. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, *7*(1), 61-75.

Kiani, A., Salman, A., & Riaz, Z. (2014). Real-time environmental monitoring, visualization, and notification system for construction H&S management. *Journal of Information Technology in Construction*, *19*, 72-91.

Qian, H. (2021, July). Design of tunnel automatic monitoring system based on BIM and IOT. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1982, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.

Pang, B., Shi, J., Jiang, L., & Pan, Z. (2024). A Semantic Approach to Dynamic Path Planning for Fire Evacuation through BIM and IoT Data Integration. *Advances in Civil Engineering*, *2024*(1), 8839865.

Chen, H., Hou, L., Zhang, G. K., & Moon, S. (2021). Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, *125*, 103631.

Ding, L., Zhou, Y., & Akinci, B. (2014). Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD. *Automation in construction*, *46*, 82-93.

Kim, H., & Ahn, H. (2011). Temporary facility planning of a construction project using BIM (Building Information Modeling). In *Computing in Civil Engineering (2011)* (pp. 627-634).

Kim, K., & Teizer, J. (2014). Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling. *Advanced Engineering Informatics*, *28*(1), 66-80.

Cheng, T., & Teizer, J. (2013). Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications. *Automation in construction*, *34*, 3-15.

Fan, W., Zhou, J., Zhou, J., Liu, D., Shen, W., & Gao, J. (2021). Safety management system prototype/framework of deep foundation pit based on BIM and IoT. *Advances in Civil Engineering*, *2021*(1), 5539796.

Cambraia, F. B., Saurin, T. A., & Formoso, C. T. (2010). Identification, analysis and dissemination of information on near misses: A case study in the construction industry. *Safety science*, *48*(1), 91-99.

Themistocleous, K., Neocleous, K., Pilakoutas, K., & Hadjimitsis, D. G. (2014, August). Damage assessment using advanced non-intrusive inspection methods: Integration of space, UAV, GPR, and field spectroscopy. In *Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014)* (Vol. 9229, pp. 496-500). SPIE.

Woodcock, K. (2014). Model of safety inspection. *Safety science*, *62*, 145-156.

Cheng, J. C., Chen, K., & Chen, W. (2020). State-of-the-art review on mixed reality applications in the AECO industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(2), 03119009.

Li, Y., & Liu, C. (2012). Integrating field data and 3D simulation for tower crane activity monitoring and alarming. *Automation in Construction*, *27*, 111-119.

Chantawit, D., Hadikusumo, B. H., Charoenngam, C., & Rowlinson, S. (2005). 4DCAD- Safety: visualizing project scheduling and safety planning. *Construction Innovation*, *5*(2), 99-114.

Fargnoli, M., & Lombardi, M. (2020). Building information modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: Research trends emerging from one decade of studies. *Buildings*, *10*(6), 98.

Haupt, T. C., Akinlolu, M., & Raliile, M. T. (2019, November). Emerging technologies in construction safety and health management. In *International Conference on Innovation, Technology, Enterprise, and Entrepreneurship (ICITEE)* (pp. 413-420).

Zhou, Z., Goh, Y. M., & Li, Q. (2015). Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety science*, *72*, 337-350.

Golizadeh, H., Hon, C. K., Drogemuller, R., & Hosseini, M. R. (2018). Digital engineering potential in addressing causes of construction accidents. *Automation in Construction*, *95*, 284-295.

Li, H., Lu, M., Chan, G., & Skitmore, M. (2015). Proactive training system for safe and efficient precast installation. *Automation in Construction*, *49*, 163-174.

Shen, X., & Marks, E. (2016). Near-miss information visualization tool in BIM for construction safety. *Journal of construction engineering and management*, *142*(4), 04015100.

Huang, X., & Hinze, J. (2006). Owner's role in construction safety. *Journal of construction engineering and management*, *132*(2), 164-173.

Weinstein, M., Gambatese, J., & Hecker, S. (2005). Can design improve construction safety?: Assessing the impact of a collaborative safety-in-design process. *Journal of construction engineering and management*, *131*(10), 1125-1134.

Sakr, M., & Sadhu, A. (2023). Visualization of structural health monitoring information using Internet-of-Things integrated with building information modeling. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, *2*(3), 100053.

Ding, L., Jiang, W., & Zhou, C. (2022). IoT sensor-based BIM system for smart safety barriers of hazardous energy in petrochemical construction. *Frontiers of Engineering Management*, *9*(1), 1-15.

Liang, Y., & Liu, Q. (2022). Early warning and real-time control of construction safety risk of underground engineering based on building information modeling and internet of things. *Neural Computing and Applications*, *34*(5), 3433-3442.

Wang, J., Luo, H., Pena-Mora, F., Zhou, W., & Fang, W. (2024). An integrated BIM-IoT framework for real-time quality monitoring in construction site. *Journal of Construction Engineering and Management*, *150*(11), 05024013.

Bueno, S., & Salmeron, J. L. (2008). Fuzzy modeling enterprise resource planning tool selection. *Computer Standards & Interfaces*, *30*(3), 137-147.

Glykas, M. (Ed.). (2010). *Fuzzy cognitive maps: Advances in theory, methodologies, tools and applications* (Vol. 247). Springer.

Kleijnen, J. P. (1995). Verification and validation of simulation models. *European journal of operational research*, *82*(1), 145-162.

Yegnanarayana, B. (2009). *Artificial neural networks*. PHI Learning Pvt. Ltd.

Christoforou, A., & Andreou, A. S. (2017). A framework for static and dynamic analysis of multi-layer fuzzy cognitive maps. *Neurocomputing*, *232*, 133-145.

Lopez, C., & Salmeron, J. L. (2014). Dynamic risks modelling in ERP maintenance projects with FCM. *Information sciences*, *256*, 25-45.

Salmeron, J. L., Mansouri, T., Moghadam, M. R. S., & Mardani, A. (2019). Learning fuzzy cognitive maps with modified asexual reproduction optimisation algorithm. *Knowledge-Based Systems*, *163*, 723-735.

Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International journal of man-machine studies, 24(1), 65-75.

Peláez, C. E., & Bowles, J. B. (1996). Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. *information sciences*, *88*(1-4), 177-199.

Papageorgiou, E. I. (2010). A novel approach on constructed dynamic fuzzy cognitive maps using fuzzified decision trees and knowledge-extraction techniques. In *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications* (pp. 43-70). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Groumpos, P. P. (2010). Fuzzy cognitive maps: basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps: Advances in theory, methodologies, tools and applications* (pp. 1-22). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Glaser, B. (1978). Theoretical sensitivity. *Advances in the methodology of grounded theory*.

Hobbs, B. F., Ludsin, S. A., Knight, R. L., Ryan, P. A., Biberhofer, J., & Ciborowski, J. J. (2002). Fuzzy cognitive mapping as a tool to define management objectives for complex ecosystems. *Ecological Applications*, *12*(5), 1548-1565.

Rodriguez-Repiso, L., Setchi, R., & Salmeron, J. L. (2007). Modelling IT projects success: Emerging methodologies reviewed. *Technovation*, *27*(10), 582-594.

Yaman, D., & Polat, S. (2009). A fuzzy cognitive map approach for effect-based operations: An illustrative case. *Information Sciences*, *179*(4), 382-403.

Ravasan, A. Z., & Mansouri, T. (2014). A FCM-based dynamic modeling of ERP implementation critical failure factors. *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*, *10*(1), 32-52.

Breckenridge, J., & Jones, D. (2009). Demystifying theoretical sampling in grounded theory research. *Grounded Theory Review*, *8*(02), 113-126.