



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Dynamic modeling based on Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) of Building Information Modeling (BIM) and Internet of Things (IoT) integration for construction safety culture

MohammadHossein Moradijou^{1*}

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

Received: 08 June 2026; Revised: 09 July 2026; Accepted: 15 July 2026; Published: 22 November 2026

Abstract

The construction industry, despite advances in modern technologies, still ranks among high-risk sectors in terms of safety indicators. In recent years, Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT) have been introduced as transformative tools in safety management; however, existing studies have mainly focused on the isolated applications of these technologies, and the systemic impact of their integration on the formation and strengthening of safety culture has been less examined from a systems perspective. To address this gap, the present research proposes a dynamic modeling framework based on Fuzzy Cognitive Maps (FCM) to analyze the causal and feedback relationships between the benefits of BIM–IoT integration and the components of construction safety culture. In this study, fourteen key benefits derived from the integration of BIM and IoT and sixteen safety culture components across three dimensions psychological, organizational, and behavioral were identified and structured within an integrated causal model. To capture the system dynamics, beyond direct relationships, reinforcing feedback loops and indirect effects were investigated through dynamic simulation under six analytical scenarios. Moreover, by employing incremental analysis within the FCM framework, the strength of causal pathways and the degree of amplification of indirect effects were quantitatively assessed. The results indicate that benefits such as support for compliance with safety regulations, real-time decision-making, and improved safety inspections have the strongest direct impact on enhancing safety culture. In contrast, components such as hazard visualization, safety training, and near-miss reporting primarily contribute to strengthening safety culture through feedback mechanisms. The findings also highlight the pivotal role of the “proactive safety management” and “safety communication” clusters in sustaining safety culture. By offering a systemic and dynamic approach, this study provides an analytical framework for forecasting and prioritizing technological interventions in safety management for construction projects.

Keywords: Dynamic fuzzy cognitive maps (Dynamic FCM); Building Information Modeling (BIM); Internet of Things (IoT); Construction safety culture.

Cite this article as Moradijou, M. (2026). Dynamic modeling based on Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) of Building Information Modeling (BIM) and Internet of Things (IoT) integration for construction safety culture. (e247203). Civil and Project journal, 8(9), e247203 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2026.590754.1459>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

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



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

مدل سازی پویا مبتنی بر نقشه برداری شناختی فازي FCM از ادغام مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و اینترنت اشياء (IOT) برای فرهنگ ایمنی ساخت و ساز

محمدحسین مرادی جو^{۱*}

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

تاریخ دریافت: ۱۸ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۸ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۲۴ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آذر ۱۴۰۵

چکیده

صنعت ساخت و ساز با وجود توسعه فناوری های نوین، همچنان از نظر شاخص های ایمنی در زمره صنایع پرخطر قرار دارد. در سال های اخیر، مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و اینترنت اشیا (IoT) به عنوان ابزارهایی تحول آفرین در مدیریت ایمنی معرفی شده اند؛ با این حال، پژوهش های موجود عمدتاً بر کاربردهای مجزای این فناوری ها تمرکز داشته و تأثیر نظام مند ادغام آن ها بر شکل گیری و تقویت فرهنگ ایمنی کمتر به صورت سیستمی بررسی شده است. پژوهش حاضر با هدف تبیین این خلأ، یک چارچوب مدل سازی پویا مبتنی بر نقشه های شناختی فازي (FCM) ارائه می دهد تا روابط علی و بازخوردی میان مزایای ادغام BIM-IoT و مؤلفه های فرهنگ ایمنی ساخت و ساز را تحلیل کند. در این مطالعه، چهارده مزیت کلیدی حاصل از ادغام BIM و IoT و شانزده مؤلفه فرهنگ ایمنی در سه بُعد روان شناختی، سازمانی و رفتاری شناسایی و در قالب یک مدل علی یکپارچه صورت بندی شدند. به منظور درک پویایی های سیستم، علاوه بر روابط مستقیم، حلقه های بازخورد تقویتی و اثرات غیرمستقیم نیز از طریق شبیه سازی پویا در شش سناریوی تحلیلی بررسی شد. همچنین با بهره گیری از تحلیل افزایشی در چارچوب FCM، شدت تأثیرگذاری مسیرهای علی و میزان تقویت اثرات غیرمستقیم به صورت کمی ارزیابی گردید. نتایج نشان می دهد مزایایی نظیر پشتیبانی از انطباق با مقررات ایمنی، تصمیم گیری بدون وقفه و بهبود بازرسی های ایمنی بیشترین اثر مستقیم را بر ارتقای فرهنگ ایمنی دارند. در مقابل، مؤلفه هایی همچون تصویرسازی خطر، آموزش ایمنی و گزارش دهی شبه حادثه ها عمدتاً از طریق سازوکارهای بازخوردی به تقویت فرهنگ ایمنی منجر می شوند. یافته ها همچنین بر نقش محوری خوشه های مدیریت پیشگیرانه ایمنی و ارتباطات ایمنی در پایداری فرهنگ ایمنی تأکید دارد. این پژوهش با ارائه رویکردی سیستمی و پویا، چارچوبی تحلیلی برای پیش بینی و اولویت بندی مداخلات فناورانه در مدیریت ایمنی پروژه های ساختمانی فراهم می آورد.

کلمات کلیدی: نقشه های شناختی فازي پویا (Dynamic FCM)؛ مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM)؛ اینترنت اشیا (IoT)؛ فرهنگ ایمنی ساخت و ساز.

۱- مقدمه

صنعت ساخت‌وساز به طور گسترده به عنوان یکی از پرحادثه ترین بخش‌ها شناخته می‌شود (Lingard & Rowlinson, 2005). زیرا دارای محیط‌های کاری پیچیده، پویا و اغلب محدود است، از تجهیزات سنگین و مواد متنوع استفاده می‌کند و عملیات اجرایی آن ذاتاً پرخطر است. با وجود مداخلات گسترده مقرراتی، دولتی و حرفه‌ای، این بخش همچنان با نرخ بالای آسیب‌دیدگی، مرگ‌ومیر و بیماری‌های شغلی روبه‌رو است؛ به گونه‌ای که تخمین زده می‌شود سالانه بیش از ۶۰,۰۰۰ مرگ‌ومیر در پروژه‌های ساخت‌وساز در سراسر جهان رخ می‌دهد (Lingard & Rowlinson, 2005). این وضعیت ضرورت تمرکز بر راهبردهای مؤثرتر برای ارتقای عملکرد ایمنی و سلامت شغلی (OSH) را برجسته کرده است.

در سال‌های اخیر، فرهنگ ایمنی به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در بهبود عملکرد ایمنی و پیشگیری از حوادث مطرح شده است (Lingard & Rowlinson, 2005). شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که استقرار فرهنگ ایمنی توسعه‌یافته در سازمان‌های ساخت‌وسازی می‌تواند رفتارهای ایمن را تقویت و وقوع حوادث را به طور معناداری کاهش دهد، در حالی که ضعف در ابعاد سازمانی و انسانی، اغلب با عملکرد ایمنی نامطلوب و فراوانی بالای حوادث همراه است. با این حال، بخش ساخت‌وساز در بسیاری از کشورها همچنان از فرهنگ ایمنی ضعیف رنج می‌برد و به رویکردهایی پیش فعال‌تر و سازگارتر نیاز دارد (Lingard & Rowlinson, 2005).

هم‌زمان، توسعه فناوری‌های دیجیتال نظیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا (IoT)، حسگرهای پوشیدنی، LiDAR و فناوری‌های غوطه‌ورکننده، چشم‌اندازی جدید برای مدیریت ایمنی فراهم کرده است (Lingard & Rowlinson, 2005). این فناوری‌ها در طیف وسیعی از کاربردها، از جمله پایش لحظه‌ای شرایط کاری، ردیابی تجهیزات و کارگران و حمایت از تصمیم‌گیری ایمنی، به کار گرفته شده‌اند. با وجود این، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود بر جنبه‌های فنی پیاده‌سازی و نتایج کمی و قابل اندازه‌گیری این فناوری‌ها تمرکز دارد و کمتر به این پرداخته است که ادغام این ابزارها چگونه با ابعاد فرهنگی و رفتاری ایمنی تعامل می‌کند.

به طور خاص، تأثیر ادغام BIM-IoT بر شکل‌گیری یک فرهنگ ایمنی پیش فعال و پایدار در ساخت‌وساز هنوز به صورت نظام‌مند بررسی نشده است (Lingard & Rowlinson, 2005). دشواری سنجش تغییرات فرهنگی با شاخص‌های مهندسی و فرض نادرست مبنی بر این که بهبود فناوری خودبه‌خود به تحول فرهنگی منجر می‌شود، از عوامل اصلی این خلأ به شمار می‌رود. در پاسخ به این شکاف، پژوهش حاضر با شناسایی مزایای اصلی ادغام BIM-IoT و تحلیل روابط علی میان این مزایا و ابعاد کلیدی فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز، می‌کوشد نشان دهد که این ادغام فناورانه چگونه می‌تواند توسعه و پایداری بلندمدت فرهنگ ایمنی مثبت را در پروژه‌های ساختمانی تسهیل کند و ابزاری تحلیلی برای اولویت‌بندی مداخلات ایمنی در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد (Lingard & Rowlinson, 2005).

۲- ادبیات نظری

تحولات فناورانه دهه‌های اخیر، رویکردهای مدیریت ایمنی را در صنعت ساخت‌وساز به شکل بنیادین دگرگون کرده‌اند. در این میان، فناوری‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و اینترنت اشیا (IoT) به عنوان دو قابلیت کلیدی، امکان ایجاد سامانه‌های ایمنی داده‌محور، پیش فعال و تعاملی را فراهم کرده‌اند که می‌توانند بر محدودیت‌های رویکردهای سنتی مدیریت ایمنی غلبه کنند (Tang et al., 2019). با وجود این، بخش عمده‌ای از مطالعات تمرکز خود را بر جنبه‌های فنی این فناوری‌ها - مانند کارکردهای مدل‌سازی، ردیابی موقعیت، پایش بدون وقفه و تصویربرداری سه‌بعدی - معطوف کرده و کمتر به این پرسش پرداخته‌اند که ادغام BIM-IoT چگونه بر فرهنگ ایمنی به عنوان یک سازه چندبعدی روان‌شناختی-رفتاری-سازمانی اثر می‌گذارد (Fang & Wu, 2013; Choudhry et al., 2007; Cooper, 2000).

با توجه به آن که عملکرد ایمنی پایدار، بیش از آن که حاصل رویه‌ها و ابزارهای منفرد باشد، وابسته به شکل‌گیری یک فرهنگ ایمنی مثبت و ریشه‌دار در سازمان است (Reason, 1997; Guldenmund, 2000)، ادبیات نظری این پژوهش ابتدا ابعاد و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز را مرور می‌کند و سپس مزایای ادغام BIM-IoT در مدیریت ایمنی را در پرتو همین چارچوب فرهنگی تحلیل می‌نماید. به طور مشخص، این بخش بر سه محور اصلی متمرکز است: (۱) تبیین مفهوم و ویژگی‌های

فرهنگ ایمنی در صنعت ساخت‌وساز، (۲) تشریح ابعاد کلیدی فرهنگ ایمنی با اتکا بر مدل‌های سه‌گانه، و (۳) تبیین چگونگی پشتیبانی ادغام BIM-IoT از توسعه و تقویت این ابعاد.

۲-۱- فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز (Construction Safety Culture)

فرهنگ ایمنی در ادبیات ایمنی و بهداشت شغلی به‌عنوان مجموعه‌ای از نگرش‌ها، باورها، ارزش‌ها، ادراکات و الگوهای رفتاری مشترک تعریف می‌شود که در ارتباط با ایمنی و سلامت شغلی بین افراد و گروه‌های سازمانی شکل می‌گیرد (Cooper, 2000; Guldenmund, 2000). این فرهنگ، بازتابی از نحوه ادراک کارکنان از اولویت داشتن ایمنی در سازمان، کیفیت تصمیم‌گیری مدیریتی در حوزه ایمنی، و میزان حمایت از رفتارهای ایمن در سطح فردی و گروهی است و مستقیماً بر نحوه مواجهه افراد با خطر، رعایت رویه‌های ایمنی، گزارش‌دهی حوادث و مشارکت در برنامه‌های ایمنی اثر می‌گذارد (Geller, 1994; Choudhry et al., 2007).

صنعت ساخت‌وساز، به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر ماهیت پروژه‌ای فعالیت‌ها، ساختارهای سازمانی موقت، ترکیب نیروی کار چند سازمانی، و حضور پیمانکاران و زیربخش‌های متعدد، نیازمند یک فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز اختصاصی است که بتواند پیچیدگی‌ها و سیالیت محیط کارگاهی را در نظر بگیرد (Wu, 2013; Choudhry et al., 2007 & Fang). در چنین بستری، فرهنگ ایمنی نه تنها بخشی از فرهنگ کلی سازمان، بلکه مؤلفه‌ای حیاتی در موفقیت پروژه و حفاظت از جان کارگران، مدیران و حتی افراد جامعه‌ای است که در مجاورت پروژه‌های ساخت‌وسازی قرار دارند (Reason, 1997).

فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز، ترکیبی از باورها و هنجارهای مشترک درباره اهمیت ایمنی، رویه‌های فنی و مدیریتی برای کنترل خطر و کاهش ریسک، و رفتارهای روزمره کارگران و سرپرستان در مواجهه با شرایط ناایمن است (Cooper, 2000). این سازه، به طور مستمر تحت تأثیر متغیرهای مختلف مدیریت ایمنی - مانند سیاست‌ها و رویه‌های ایمنی، منابع اختصاص یافته، آموزش و نظارت - و نیز رفتارهای ایمنی طرف‌های مختلف پروژه - از کارگران خط تولید تا مدیران ارشد و مشاوران - قرار دارد (Geller, 1994; Wu, 2013 & Fang). از این‌رو، فرهنگ ایمنی پدیده‌ای پویا و در حال تحول است که با تغییر در ساختار سازمانی، فناوری‌های مورد استفاده و فشارهای زمانی و اقتصادی پروژه، دستخوش بازتعریف و بازتفسیر می‌شود (Guldenmund, 2000).

۲-۲- ابعاد کلیدی فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز (Key Dimensions of Construction Safety Culture)

ادبیات نظری فرهنگ ایمنی در ابتدا با مدل‌های لایه‌ای شکل گرفت که فرهنگ سازمانی و زیرلایه‌های آن را در قالب سطوح مختلف نمادین، هنجاری و بنیادی مفهوم‌سازی می‌کردند (Guldenmund, 2000; Reason, 1997). این مدل‌ها در شکل‌دهی به گفتمان اولیه فرهنگ ایمنی نقش مهمی ایفا کردند، اما بعدها به دلیل محدودیت در «عینیت‌پذیری» و سنجش‌پذیری ویژگی‌های فرهنگی مرتبط با ایمنی و ناتوانی در تبیین پویایی و تغییرات مستمر فرهنگ سازمانی، مورد نقد قرار گرفتند (Guldenmund, 2000).

در واکنش به این چالش‌ها، رویکرد مدل‌های سه‌گانه توسعه یافت که فرهنگ ایمنی را به‌صورت یک سازه چندبعدی و قابل‌سنجش، متشکل از ابعاد روان‌شناختی، رفتاری و زمینه‌ای سازمانی مفهوم‌سازی می‌کند (Geller, 1994; Cooper, 2000). در این رویکرد، فرهنگ ایمنی حاصل تعامل مستمر بین ادراکات و نگرش‌های ایمنی (بعد روان‌شناختی)، رفتارهای مشاهده‌پذیر ایمنی (بعد رفتاری) و ساختارها، سیاست‌ها و رویه‌های مدیریت ایمنی (بعد سازمانی/زمینه‌ای) است.

Geller (۱۹۹۴) با ارائه مدل فرهنگ ایمنی جامع (Total Safety Culture)، تعامل میان فرد، محیط و رفتار را برجسته کرده و نشان داد که ایمنی، زمانی به‌صورت فرهنگ نهادینه می‌شود که افراد انگیزه و تعهد درونی برای رفتار ایمن داشته باشند، محیط از طریق طراحی، چیدمان و فناوری از رفتار ایمن حمایت کند، و سازمان، نظام‌های تشویق و تنبیه و ساختارهای مدیریتی مناسب برای تقویت این رفتارها فراهم کرده باشد. Cooper (۲۰۰۰) نیز با توسعه مدل سه‌بعدی متقابل، ادراکات و نگرش‌های درونی کارکنان، رفتارهای واقعی آنان در محیط کار، و عوامل سازمانی/موقعیتی را در یک چارچوب منسجم به هم پیوند داد و فرهنگ ایمنی را حاصل برهم‌کنش این سه بُعد معرفی کرد.

در حوزه ساخت‌وساز، Choudhry et al. (۲۰۰۷) مدل Geller و Cooper را بومی‌سازی کرده و سازه‌های «محیط» در مدل Geller و وضعیت در مدل Cooper را در یک بُعد واحد با عنوان وضعیت-محیط (Situation/Environment) ادغام کردند تا بتوانند حساسیت محیط کارگاهی ساخت‌وساز و تغییرات سریع آن را بهتر بازنمایی کنند. Wu و Fang (۲۰۱۳) این رویکرد را توسعه داده و برای صنعت ساخت‌وساز، مجموعه‌ای از مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی را در سه دسته اصلی روان‌شناختی، رفتاری و سازمانی طبقه‌بندی کردند.

در این پژوهش، با اتکا به مدل‌های (Cooper (2000)، Choudhry et al. (۲۰۰۷) و Wu & Fang (۲۰۱۳)، فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز در سه بُعد روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)، سازمانی (مدیریت ایمنی) و رفتاری (رفتار ایمنی) مفهوم‌سازی شده است. هر یک از این ابعاد شامل مجموعه‌ای از مؤلفه‌ها (مانند انگیزش ایمنی، انطباق با قواعد، دانش و آگاهی، آمادگی ایمنی، حمایت مدیریتی، رویه‌های ایمنی، نظارت، مشارکت کارگران و غیره) است که در جدول ۱ به صورت نظام‌مند طبقه‌بندی شده‌اند (Fang & Wu, 2013).

نکته مهم در این طبقه‌بندی آن است که برخی مؤلفه‌ها فناوری‌محور یا فناوری پذیر هستند؛ یعنی قابلیت آن را دارند که از طریق ابزارهای دیجیتال، سامانه‌های پایش و مدل‌های اطلاعاتی به طور مستقیم تقویت و مدیریت شوند (برای مثال، شناسایی مخاطرات، رویه‌های کار ایمن، انطباق با مقررات و مستندسازی حوادث)؛ درحالی‌که برخی مؤلفه‌ها «انسان‌محور» هستند و بیشتر به ویژگی‌های شخصی، تعاملات اجتماعی، انگیزش درونی و فرآیندهای یادگیری جمعی وابسته‌اند (مانند ویژگی‌های شخصیتی کارکنان، جلسات ایمنی و فرهنگ گفت‌وگو درباره خطا) (Wu, 2013 & Choudhry et al., 2007; Fang). این تمایز برای طراحی راهبردهای ادغام BIM-IoT اهمیت دارد؛ زیرا نشان می‌دهد که فناوری می‌تواند بر کدام مؤلفه‌ها اثر مستقیم‌تر و بر کدام مؤلفه‌ها اثر غیرمستقیم‌تر، از طریق تقویت نظام‌های سازمانی و محیط ایمنی، داشته باشد.

بر این اساس، طبقه‌بندی سه‌بعدی فرهنگ ایمنی (روان‌شناختی، سازمانی و رفتاری) در این مطالعه نه تنها به عنوان چارچوبی نظام‌مند برای ارزیابی شیوه‌ها و رویه‌های ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز به کار گرفته می‌شود، بلکه پایه‌ای مفهومی برای تحلیل مزایای ادغام BIM-IoT در ایجاد و تقویت فرهنگ ایمنی مثبت فراهم می‌آورد (Wu, 2013 & Cooper, 2000; Fang).

۲-۳- مزایای ادغام BIM-IoT در مدیریت ایمنی

ادغام فناوری‌های BIM و IoT در پروژه‌های ساخت‌وساز، چارچوبی قدرتمند برای بهبود مدیریت ایمنی ایجاد می‌کند که از طریق ترکیب مدل‌های اطلاعاتی غنی و بصری BIM با داده‌های لحظه‌ای و قابل ثبت IoT امکان‌پذیر است (Tang et al., 2019). مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با فراهم کردن مدل‌های سه‌بعدی دقیق از سازه، فرآیند ساخت و توالی فعالیت‌ها، بستر مناسبی برای شبیه‌سازی سناریوهای ایمنی، طراحی رویه‌های کار ایمن و پیش‌بینی نقاط پرخطر فراهم می‌آورد؛ درحالی‌که IoT با استفاده از حسگرها، برچسب‌های RFID و سامانه‌های ردیابی، داده‌های لحظه‌ای در مورد موقعیت کارگران و تجهیزات، شرایط محیطی (مانند دما، گازها، ارتعاش)، و وضعیت تجهیزات ایمنی را به طور مستمر جمع‌آوری و ارسال می‌کند (Teizer et al., 2013; Li et al., 2015).

Tang et al. (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که دو حوزه اصلی کاربرد ادغام BIM-IoT در ایمنی و سلامت (S&H) عبارت‌اند از: آموزش ایمنی و سلامت (S Training&H) و پایش ایمنی و سلامت در محل کارگاه (S Monitoring&On-site H). در حوزه آموزش، تلفیق تصویرسازی سه‌بعدی BIM با داده‌های واقعی IoT می‌تواند سناریوهای آموزشی بسیار واقع‌گرایانه برای کارگران ایجاد کند، به گونه‌ای که آنان بتوانند پیامدهای رفتارهای نایمن و مزایای رفتارهای ایمن را در یک محیط مجازی اما مبتنی بر داده‌های واقعی تجربه کنند (Teizer et al., 2013). در حوزه پایش کارگاهی، ادغام داده‌های حسگرها و سامانه‌های ردیابی با مدل BIM، امکان شناسایی الگوهای خطر و هشداردهی زودهنگام را فراهم می‌کند (Li et al., 2015).

Teizer et al. (۲۰۱۳) یک روش آموزشی نوآورانه برای کارگران ساختمانی معرفی کردند که در آن، ردیابی موقعیت مکانی لحظه‌ای با تصویرسازی سه‌بعدی BIM ترکیب می‌شد. این روش در زمینه نصب سازه‌های فولادی آزموده شد و نتایج نشان داد که استفاده از چنین سامانه‌ای موجب افزایش آگاهی ایمنی، ارتقای مشارکت کارگران در جلسات آموزشی، بهبود ارزیابی عملکرد ایمنی و کاهش خطرات ناشی از محدودیت دید و اشتباهات موقعیتی می‌شود. Li et al. (۲۰۱۵) نیز سامانه مدیریت پیش‌فعال ساخت‌وساز (Proactive Construction Management System – PCMS) را توسعه دادند که ردیابی لحظه‌ای موقعیت کارگران و تجهیزات را با تصویرسازی داده‌ها ترکیب می‌کرد. آزمایش این سامانه در پروژه‌های ساختمانی در هنگ‌کنگ نشان داد که PCMS می‌تواند آگاهی ایمنی را افزایش داده، بهره‌وری را ارتقا دهد و مدیریت پیش‌گیرانه ریسک را تقویت نماید.

این شواهد تجربی نشان می‌دهد که ادغام BIM-IoT صرفاً یک نوآوری فناورانه در سطح ابزار نیست، بلکه می‌تواند به‌صورت ساختاری، ابعاد مختلف فرهنگ ایمنی را تحت‌تأثیر قرار دهد. در بعد روان‌شناختی، استفاده از مدل‌های بصری و داده‌های لحظه‌ای می‌تواند آگاهی، ادراک خطر و انگیزش ایمنی کارگران را ارتقا دهد؛ در بعد رفتاری، سامانه‌های پایش و بازخورد لحظه‌ای می‌توانند رفتارهای ایمن را تقویت و رفتارهای نایمن را کاهش دهند؛ و در بعد سازمانی، ادغام BIM-IoT می‌تواند به بهبود رویه‌های ایمنی، افزایش شفافیت اطلاعات، تقویت پاسخگویی و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری مدیریتی در حوزه ایمنی منجر شود (Wu, 2013 & Tang et al., 2019; Fang).

بر همین مبنا، ادبیات نظری موجود حاکی از آن است که بهره‌گیری هدفمند از ادغام BIM-IoT، در صورت هم‌تراز شدن با ابعاد و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی، می‌تواند به شکل‌گیری یک فرهنگ ایمنی پیش‌فعال، یادگیرنده و پایدار در پروژه‌های ساخت‌وساز کمک کند؛ هرچند هنوز شکاف‌هایی در فهم دقیق سازوکارهای این تأثیرگذاری، به‌ویژه در سطح فرهنگ سازمانی و رفتارهای روزمره کارگران، وجود دارد که این مطالعه در پی کاوش آنهاست (Wu, & Cooper, 2000; Choudhry et al., 2007; Fang, 2013).

جدول ۱. ابعاد و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز

قدرت ارتباط با مزایای BIM-IoT	نوع مؤلفه (فناوری محور / انسان محور)	عنوان مؤلفه	کد مؤلفه	بعد فرهنگ ایمنی
متوسط	فناوری محور	انگیزش ایمنی	C1	روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)
زیاد	فناوری محور	انطباق ایمنی	C2	روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)
زیاد	فناوری محور	دانش و آگاهی ایمنی	C3	روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)
متوسط	فناوری محور	آمادگی ایمنی	C4	روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)
زیاد	فناوری محور	ادراک خطر	C5	روان‌شناختی (اقلیم ایمنی)
کم	انسان محور	ویژگی‌های شخصیتی کارکنان	C6	سازمانی (مدیریت ایمنی)
زیاد	فناوری محور	سیاست‌ها و رویه‌های ایمنی	C7	سازمانی (مدیریت ایمنی)
متوسط	انسان محور	حمایت و تعهد مدیریتی به ایمنی	C8	سازمانی (مدیریت ایمنی)
کم	انسان محور	جلسات و ارتباطات ایمنی	C9	سازمانی (مدیریت ایمنی)
متوسط	انسان محور	مشارکت در برنامه‌های ایمنی	C10	رفتاری (رفتار ایمنی)
زیاد	فناوری محور	گزارش‌دهی حوادث و شبه‌حوادث	C11	رفتاری (رفتار ایمنی)
زیاد	فناوری محور	رعایت رویه‌های کار ایمن	C12	رفتاری (رفتار ایمنی)

ترکیب مدل‌های بصری دقیق BIM با داده‌های لحظه‌ای و قابل ثبت IoT، هم‌افزایی‌ای ایجاد می‌کند که محدودیت‌های هر یک از این دو فناوری را به تنهایی برطرف کرده و در نتیجه، شناسایی مخاطرات، ارزیابی ریسک و انطباق با الزامات ایمنی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد (Mohammed et al., 2020, 2022). مطابق با یافته‌های Tang et al (۲۰۱۹)، کاربردهای کلیدی ادغام BIM-IoT در مدیریت ایمنی و سلامت (S&H) عمدتاً در دو حوزه اصلی متمرکز می‌شوند:

(۱) آموزش ایمنی و سلامت (S Training&H)، و

(۲) پایش ایمنی و سلامت در محل کارگاه (S Monitoring&On-site H).

مطالعات متعددی به نحوه کاربرد و مزایای ادغام BIM-IoT در مدیریت S&H اشاره کرده‌اند. برای نمونه، Teizer et al (۲۰۱۳) یک روش آموزشی نوآورانه برای کارگران ساختمانی معرفی کردند که در آن، ردیابی لحظه‌ای موقعیت مکانی با تصویرسازی سه‌بعدی ترکیب می‌شد تا آموزش ایمنی و بهره‌وری را تقویت کند. این سامانه در فعالیت‌های نصب سازه‌های فولادی مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از آن موجب افزایش آگاهی ایمنی، ارتقای درگیرشدن کارگران در فرایند آموزش، بهبود ارزیابی عملکرد، و کاهش خطرات مرتبط با محدودیت دید می‌شود.

در مطالعه‌ای دیگر، Li et al (۲۰۱۵) سامانه مدیریت پیش‌فعال ساخت‌وساز (Proactive Construction Management System – PCMS) را توسعه دادند که ردیابی لحظه‌ای موقعیت و تصویرسازی داده‌ها را با هدف ارتقای آموزش کارگران ترکیب می‌کرد. آزمون این سامانه در پروژه‌های ساختمانی در هنگ‌کنگ نشان داد که PCMS می‌تواند آگاهی ایمنی و کارایی را افزایش داده و مدیریت پیش‌گیرانه ریسک را تقویت کند؛ ضمن آن‌که ظرفیت بالقوه‌ای برای به‌کارگیری در سطح جهانی، به‌منظور مقابله با چالش‌های مرتبط با نیروی انسانی در صنعت ساخت‌وساز دارد.

۳- روش تحقیق

هدف این مطالعه، مفهوم‌سازی و تحلیل نظام‌مند روابط متقابل پویا بین مزایای ادغام BIM-IoT و تأثیر علی آن‌ها بر مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز از طریق تکنیک‌های مدل‌سازی پویا است.

این پژوهش رویکردی تحلیلی اتخاذ می‌کند تا درک کند که مزایای مبتنی بر فناوری چگونه به‌صورت نظام‌مند ابعاد فرهنگ ایمنی را در سطوح روان‌شناختی، سازمانی و رفتاری تقویت و متحول می‌سازند.

جدول ۲: مزایای استفاده از ادغام BIM-IoT در مدیریت ایمنی

منابع	تمرکز فناوری / توضیح	عنوان مزیت	کد	بخش / دسته
Li et al. (2015), Riaz et al. (2014), Kiani et al. (2014), Cheng and Teizer (2013), Ding et al. (2022), Chen et al. (2021), Fan et al. (2021), Ding et al. (2013)	افزایش آگاهی و درک خطرات ایمنی در بین کارگران از طریق تجسم و پایش مبتنی بر BIM-IoT	افزایش آگاهی ایمنی کارگران	A1	مدیریت ایمنی پیشگیرانه
Ding et al. (2022), Hu et al. (2024)	شناسایی و حذف خطرات ایمنی در مرحله طراحی با کمک مدل سازی اطلاعات ساختمان و داده های IoT	حذف خطرات در مرحله طراحی	A2	مدیریت ایمنی پیشگیرانه
Scianna et al. (2022), Fan et al. (2021), Pang et al. (2024)	بهبود برنامه ریزی ایمنی پروژه با استفاده از شبیه سازی های BIM و داده های حسگرهای IoT	بهبود برنامه ریزی ایمنی	A3	مدیریت ایمنی پیشگیرانه
Li et al. (2015), Riaz et al. (2014), Kiani et al. (2014), Qian (2021), Zhang and Bai (2015), Scianna et al. (2022), Liang and Liu (2022), Chen et al. (2021), Fan et al. (2021), Ding et al. (2013), Hu et al. (2024), Pang et al. (2024), Cheung et al. (2018), Riaz et al. (2017), Jiang and Jiang (2024)	شناسایی خطرات و تولید هشدارهای لحظه ای بر اساس ادغام داده های IoT با مدل BIM	تقویت شناسایی خطر و هشدارهای لحظه ای	A4	مدیریت ایمنی پیشگیرانه
Teizer et al. (2013), Li et al. (2015), Cheng and Teizer (2013), Fan et al. (2021)	استفاده از مدل BIM و داده های IoT برای طراحی آموزش های تعاملی و مؤثر ایمنی	بهبود اثربخشی آموزش ایمنی	A5	ارتباط و یادگیری ایمنی
Li et al. (2015), Riaz et al. (2014), Kiani et al. (2014), Cheng and Teizer (2013), Zhang and Bai (2015), Sakr and Sadhu (2023), Scianna et al. (2022), Fan et al. (2021), Ding et al. (2013), Hu et al. (2024)	کمک به تجسم فضایی خطرات ایمنی از طریق نمایش آن ها در مدل BIM همراه با اطلاعات حسگرها	کمک به تجسم خطرات	A6	ارتباط و یادگیری ایمنی
Li et al. (2015)	تسهیل ثبت و گزارش دهی حوادث و شبه حوادث با استفاده از سیستم های مبتنی بر BIM-IoT	تقویت گزارش دهی حوادث و نزدیک به حادثه	A7	ارتباط و یادگیری ایمنی
Li et al. (2015), Ding et al. (2022), Scianna et al. (2022)	امکان تحلیل دقیق تر حوادث با بازپخش سناریوها در مدل BIM و داده های ثبت شده حسگرها	بهبود تحقیق و تحلیل حوادث	A8	تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم
Li et al. (2015), Riaz et al. (2014), Cheng and Teizer (2013), Qian (2021), Zhang and Bai (2015), Sakr and Sadhu (2023), Chen et al. (2021), Ding et al. (2013), Pang et al. (2024), Cheung et al. (2018), Wang et al. (2024)	تسهیل تصمیم گیری سریع در شرایط خطر با استفاده از اطلاعات لحظه ای ادغام شده در محیط BIM	تسهیل تصمیم گیری لحظه ای	A9	تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم
Li et al. (2015), Kiani et al. (2014), Cheng and Teizer (2013), Ding et al. (2022), Qian (2021), Zhang and Bai (2015), Sakr and Sadhu (2023), Scianna et al. (2022), Liang and Liu (2022), Chen et al. (2021), Fan et al. (2021), Hu et al. (2024), Cheung et al. (2018), Riaz et al. (2017), Jiang and Jiang (2024), Wang et al. (2024)	تقویت پایش مستمر وضعیت ایمنی سایت با شبکه حسگرهای IoT و نمایش آن در محیط BIM	تقویت پایش ایمنی	A10	پایش ایمنی و انطباق
Ding et al. (2022), Liang and Liu (2022), Wang et al. (2024)	کمک به رعایت الزامات و مقررات ایمنی از طریق مستندسازی و پایش خودکار مبتنی بر BIM-IoT	حمایت از انطباق با مقررات ایمنی	A11	پایش ایمنی و انطباق
Li et al. (2015), Riaz et al. (2014), Sakr and Sadhu (2023), Scianna et al. (2022), Fan et al. (2021), Ying et al. (2021)	بهبود کیفیت بازرسی ها و تحلیل ایمنی با ادغام چک لیست ها و داده های پایش در مدل BIM	بهبود بازرسی ها و تحلیل ایمنی	A12	پایش ایمنی و انطباق
Scianna et al. (2022)	کاهش هزینه های سیستم مدیریت ایمنی نسبت به رویکردهای سنتی به دلیل خودکار سازی و ادغام فناوری ها	کاهش هزینه ها نسبت به سیستم های سنتی	A13	کارایی و پایداری ایمنی
Amiri et al. (2024), Ding et al. (2022), Teizer et al. (2017)	بهبود عملکرد ایمنی در بلندمدت از طریق پایش مداوم، تحلیل داده ها و بازخورد مبتنی بر BIM-IoT	تقویت عملکرد ایمنی بلندمدت	A14	کارایی و پایداری ایمنی

برای دستیابی به این هدف پژوهش، از رویکرد مدل‌سازی پویا نقشه‌های شناختی فاز (FCM) به‌عنوان چارچوب تحلیلی استفاده می‌شود. روش FCM به طور خاص به این دلیل انتخاب شده است که:

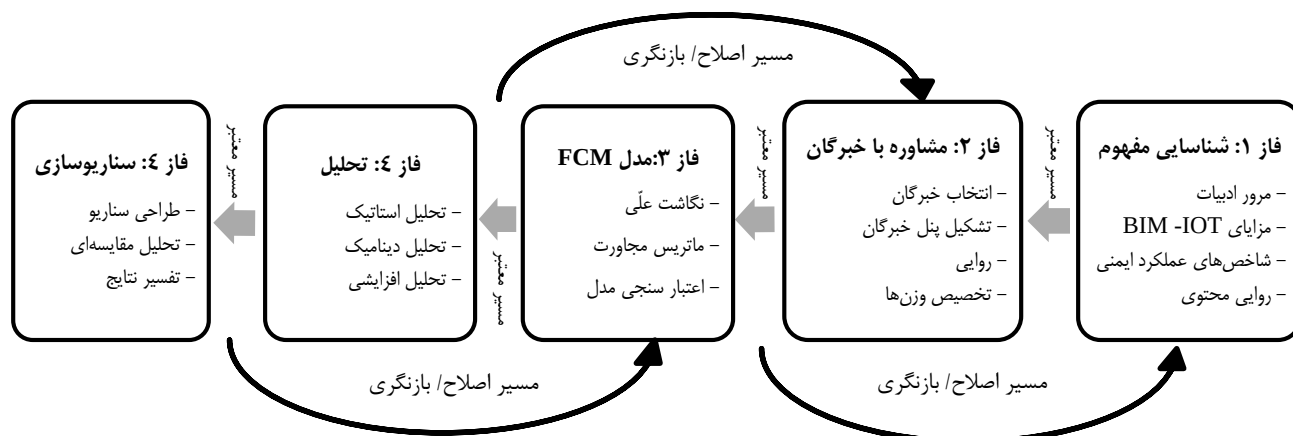
(۱) پیچیدگی ذاتی و علیت متقابل درون سیستم‌های فرهنگ ایمنی را، که در آن‌ها چندین عامل به‌صورت پویا با هم تعامل دارند، در خود جای می‌دهد؛

(۲) دانش خبرگان را ادغام می‌کند تا روابط علی کیفی را در کنار شدت روابط کمی ثبت کند؛

(۳) امکان پیش‌بینی پویا مبتنی بر سناریو را برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در برنامه‌ریزی پیاده‌سازی فناوری فراهم می‌سازد؛ و

(۴) هم مسیرهای علی مستقیم و هم حلقه‌های بازخورد تقویتی غیرمستقیم را آشکار می‌کند؛ حلقه‌هایی که مدل‌های تحلیلی ایستا قادر به ثبت آن‌ها نیستند، و بدین ترتیب درک جامع‌تری از این‌که چگونه مزایای BIM-IoT به‌طور جمعی بر نتایج ایمنی اثر می‌گذارند، ارائه می‌دهد.

روش FCM به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای فهم و تحلیل سیستم‌های پیچیده با مفاهیم متعدد به‌هم‌وابسته عمل می‌کند؛ به این صورت که باورهای خبرگان را ثبت کرده و حتی در شرایط اطلاعات محدود نیز امکان تحلیل را فراهم می‌آورد (Glykas, 2010). نقشه‌های شناختی فاز (FCMs) در پژوهش به‌خوبی شناخته‌شده‌اند و در حوزه‌های مختلفی از جمله کسب‌وکار، فناوری اطلاعات، مهندسی و علوم محیط‌زیست کاربرد دارند.



شکل ۱: چارچوب جامع روش‌شناسی پژوهش

و علوم اجتماعی. این روش به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد روابط علی را تحلیل کنند، در حالی که درجات مبهم علیت میان مفاهیم را نیز در نظر می‌گیرد؛ امری که آن را برای مدل‌سازی تعاملات میان فناوری‌های نوظهور و فرهنگ - در شرایطی که روابط هنوز به طور کامل فهم نشده‌اند - به‌ویژه مناسب می‌سازد.

شکل ۱، چارچوب جامع پژوهش را نمایش می‌دهد که رویه‌های کامل را برای موارد زیر تشریح می‌کند:

(۱) مفهوم‌سازی و پالایش مدل از طریق مرور ادبیات و اعتبارسنجی خبرگان؛

(۲) استخراج روابط علی بر اساس پنل‌های خبرگی ناهمگن؛

(۳) تحلیل ایستا برای ارزیابی اثرات تجمعی مستقیم و غیرمستقیم؛

(۴) تحلیل پویا از طریق شبیه‌سازی تکراری سناریوها؛ و

(۵) رویه‌های اعتبارسنجی به منظور اطمینان از قابلیت اعتماد و مناسب‌بودن مدل به‌عنوان بازنمایی پدیده مورد مطالعه (Kleijnen, 1995).

۳-۱- نقشه‌های شناختی فازی (Fuzzy Cognitive Maps - FCMs)

روش FCM که به‌عنوان بسطی بر نقشه‌های شناختی معرفی شده است، به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای فهم و تحلیل سیستم‌های پیچیده با مفاهیم چندگانه و به‌هم‌وابسته مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kosko, 1986).

مدل FCM، با مفاهیم به‌هم‌وابسته خود، امکان نمایش ساختارهای علی پیچیده را فراهم می‌سازد؛ به‌طوری که هر مفهوم می‌تواند هم بر دیگر مفاهیم تأثیر بگذارد و هم از آن‌ها تأثیر بپذیرد. این ویژگی، FCM را به روشی کارآمد برای مدل‌سازی حوزه‌هایی تبدیل می‌کند که در آن‌ها روابط میان متغیرها غیرخطی، مبهم و به‌طور کامل شناخته‌شده نیستند، از جمله حوزه‌های مدیریت ایمنی ساخت‌وساز و تعاملات میان فناوری‌های نوظهور و فرهنگ سازمانی.

۳-۱- نقشه‌های شناختی فازی (Fuzzy Cognitive Maps - FCMs)

روش نقشه‌های شناختی فازی (FCM) که به‌عنوان بسطی بر نقشه‌های شناختی معرفی شده است، به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای فهم و تحلیل سیستم‌های پیچیده با چندین مفهوم به‌هم‌وابسته عمل می‌کند (Kosko, 1986).

مدل FCM، با مفاهیم درهم‌تنیده خود، به‌مثابه یک ابزار پویایی سیستم عمل می‌کند که در آن، مقادیر مفاهیم به‌صورت تکراری در طول زمان تحول می‌یابند. در حالی که FCM ها شباهت‌هایی با شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) دارند، رفتار آن‌ها متمایز است و بنابراین به رویکردهای تحلیلی متفاوتی نیاز دارد (Yegnanarayana, 2009).

FCM برای مدل‌سازی مسائل واقعی بسیار مؤثرند و مزایایی همچون سادگی، نیاز حداقلی به منابع، پاسخ‌دهی آنی، و سهولت درک را فراهم می‌کنند (Andreou, 2016 & Christoforou). این نقشه‌ها باورهای خبرگان و ادراکات انسانی را ثبت می‌کنند، به مسئله عدم قطعیت در پروژه‌های ساخت‌وساز می‌پردازند و امکان تحلیل را حتی در شرایط اطلاعات محدود یا اندازه نمونه کوچک فراهم می‌کنند؛ به‌طوری که می‌توان مدل را بر پایه‌ی یک خبره منفرد یا پانلی از خبرگان حوزه موردنظر بنا کرد (Lopez & Salmeron, 2014).

یک مدل FCM از گره‌های مفهومی (C_i) (C_{-i}) (C_i) تشکیل می‌شود که نمایانگر ویژگی‌ها یا مؤلفه‌های اصلی هستند، و کمان‌های وزندار (W_{ij}) (W_{-ij}) (W_{ij}) که روابط علی میان این گره‌ها را تعریف می‌کنند (Salmeron et al., 2019).

این روابط به سه دسته تقسیم می‌شوند:

علیت مثبت، $(W_{ij} > 0)$ $(W_{-ij} > 0)$ $(W_{ij} > 0)$

علیت منفی، $(W_{ij} < 0)$ $(W_{-ij} < 0)$ $(W_{ij} < 0)$

نبود علیت. $(W_{ij} = 0)$ $(W_{-ij} = 0)$ $(W_{ij} = 0)$

بزرگی مقدار W_{ij} W_{-ij} W_{ij} نشان‌دهنده‌ی شدت تأثیری است که مفهوم C_i بر مفهوم C_j اعمال می‌کند. این بخش، دو نوع تحلیل قابل انجام با FCM را توضیح می‌دهد: تحلیل ایستا و تحلیل پویا.

تحلیل ایستا، تأثیر کلی مفاهیم ورودی و میانی را بر مفاهیم خروجی در درون مدل ارزیابی می‌کند.

برای انجام تحلیل ایستا، ابتدا یک مسیر علی از یک گره مفهومی (C_i) (C_i) به گره دیگر (C_j) (C_j) شناسایی می‌شود؛ این مسیر به‌صورت یک دنباله مانند زیر تعریف می‌گردد:

$$C_i \rightarrow C_{k1}, C_{k1} \rightarrow C_{kn}, C_{kn} \rightarrow C_j$$

$$C_i \rightarrow C_{k1}, C_{k1} \rightarrow C_{kn}, C_{kn} \rightarrow C_j$$

اثر غیرمستقیم مفهوم C_i بر C_j ، بر اساس علیتی که C_i از طریق این مسیر بر C_j اعمال می‌کند، تعیین می‌شود. سپس اثر کلی C_i بر C_j ، با ترکیب تمام علیت‌های غیرمستقیمی که از طریق مسیرهای مختلف بر C_j وارد می‌شوند محاسبه می‌گردد (Kosko, 1986).

برای این منظور، یک جبر علی فازی ساده به کار گرفته می‌شود؛ در آن، عملگر اثر غیرمستقیم (I)(I) به‌عنوان عملگر مینیمم (t-norm) و عملگر «اثر کلی» (T)(T) به‌عنوان عملگر ماکسیمم (s-norm) روی یک مجموعه جزئاً مرتب از مقادیر علی تفسیر می‌شود (Peláez & Bowles, 1996).

به‌صورت رسمی، فرض کنید $\sim$ یک فضای مفهومی علی باشد و تابع $P e: \sim x \sim \rightarrow P$ به‌عنوان یک تابع کمان علی فازی تعریف شود.

فرض کنید از $CiCi$ به $CjCj$ ، mm مسیر علی وجود دارد که به‌صورت $(i, k1, \dots, kr, j)$ ، kr, j برای $1 \leq r \leq m$ نمایش داده می‌شوند.

اثر غیرمستقیم $CiCi$ بر $CjCj$ از طریق مسیر علی $rr - am$ با $Ir(Ci, Cj)Ir(Ci, Cj)$ نمایش داده می‌شود و اثر کلی روی تمام مسیرهای $mm -$ گانه، با $T(Ci, Cj)T(Ci, Cj)$ نشان داده می‌شود. این روابط به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I(Ci, Cj) = \min (w(Cp, Cp + 1): (p, p + 1) \in (i, k1, \dots, kr, j)) \quad (1)$$

$$I(Ci, Cj) = \min(w(Cp, Cp + 1): (p, p + 1) \in (i, k1, \dots, kr, j)) \quad (2)$$

$$T(Ci, Cj) = \max (Ir(Ci, Cj)), \text{ که } 1 \leq r \leq m \quad (3)$$

$$T(Ci, Cj) = \max(Ir(Ci, Cj)), \text{ که } 1 \leq r \leq m \quad (4)$$

در این روابط، pp و $p + 1p + 1$ اندیس‌های متوالی مسیر از چپ به راست هستند (Papageorgiou, 2010).

برای نشان دادن کاربرد روابط (۱) و (۲)، یک مثال ارائه شده است که در آن اثر غیرمستقیم مفهوم $A1$ (آگاهی ایمنی) بر مفهوم $C1$ (انگیزش ایمنی) محاسبه می‌شود.

در مقابل تحلیل ایستا، تحلیل پویا با یک مدل استخراج‌شده (همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد) و یک حالت اولیه برای سیستم متناظر آغاز می‌شود. این حالت اولیه توسط ماتریس وزن‌ها WW و بردار اولیه $A0A0$ نمایش داده می‌شود که در آن، $A0A0$ وضعیت کنونی هر مفهوم را در سیستم مدل‌شده منعکس می‌کند.

هدف اصلی تحلیل پویا، برآورد حالت نهایی مفاهیم با در نظر گرفتن روابط علی و شدت اثر درون مدل است. برای دستیابی به این هدف، یک فرآیند تکراری آغاز می‌شود و در هر گام، مقادیر به‌روز شده‌ی مفاهیم طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد (Groumpos, 2010):

$$Ait = f(\sum j = 1j \neq inAjt - 1Wji + Ait - 1) \quad (3)$$

$$Ait = \mathbb{R}$$

$$j = 1j = i \sum n Ajt - 1 Wji + Ait - 1 \quad (3)$$

فرآیند تکرار تا زمانی ادامه می‌یابد که سیستم به همگرایی برسد؛ این وضعیت با معیار زیر تعریف می‌شود:

$$|A(t) - A(t - 1)| < \varepsilon$$

$$|A(t) - A(t - 1)| < \varepsilon$$

که در آن، $\varepsilon = 0.001$ آستانه همگرایی است و $||\cdot||_0$ نشان‌دهنده‌ی بیشترین اختلاف قدرمطلق میان مقادیر مفاهیم در دو تکرار پیاپی است.

سیستم زمانی در حالت تعادل در نظر گرفته می‌شود که تغییر کلیه‌ی مقادیر مفاهیم بین دو تکرار متوالی، کمتر از این آستانه باشد. علاوه بر این، به‌منظور جلوگیری از بروز حلقه‌های بی‌نهایت در شرایطی که همگرایی کامل به‌دست نمی‌آید، یک سقف حداکثری برابر با ۱۰۰ تکرار تعیین شده است.

در عمل، تمامی سناریوهای این مطالعه در بازه ۱۵ تا ۲۵ تکرار به همگرایی رسیدند که پایداری و قابلیت اعتماد مدل FCM را تأیید می‌کند.

در رابطه (۳):

$AitAit$ مقدار مفهوم $CiCi$ در زمان tt .

$t - 1$ مقدار همان مفهوم در زمان $t - 1$.

$t - 1$ مقدار مفهوم $CjCj$ در زمان $t - 1$.

و وزن ارتباط از مفهوم $CjCj$ به مفهوم $CiCi$ را نشان می‌دهد.

تابع ff یک تابع آستانه‌ای است که نتیجه را در یک بازه‌ی مشخص فشرده می‌کند، همان‌گونه که Glaser (۱۹۷۸) آن را تشریح کرده است. این مقدار، سطح فعال‌سازی مفهوم را نشان می‌دهد (Hobbs et al., 2002).

سطح فعال‌سازی می‌تواند بیانگر درجه عضویت در یک مجموعه فازی باشد که مقیاس‌های زبانی فراوانی نسبتی را تعریف می‌کند (برای مثال: پایین، متوسط، بالا)، همان‌طور که Kosko (۱۹۸۶) بحث کرده است.

افزون بر این، برای فعال‌سازی مقدار هر مفهوم، از تابع سیگموئید لگاریتمی استفاده می‌شود که در آن $\omega > 0$ شیب تابع پیوسته ff را کنترل می‌کند؛ این تابع مطابق رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$f(x) = 11 + e - \omega x(4)$$

$$f(x) = 1 + e - \omega x1 (4)$$

در این مطالعه، پارامتر $\omega = 1$ بر اساس توصیه‌های مطرح‌شده در ادبیات (Groumpos, 2010) و نیز بر مبنای آزمون‌های پایلوت انجام‌شده با پانل خبرگان انتخاب شده است. این مقدار، توازن بهینه‌ای بین حساسیت و پایداری را برای کاربرد حاضر فراهم می‌سازد. به‌منظور تضمین استحکام نتایج، یک تحلیل حساسیت جامع انجام شد که جزئیات آن در بخش ۴،۳ تشریح شده است.

۲-۳ - انتخاب خبرگان و تشکیل پانل

مدل‌های نقشه‌های شناختی فازی (FCM) معمولاً بر پایه‌ی دانش خبرگان توسعه می‌یابند تا بتوانند روابط علی پیچیده میان اجزای سیستم را ثبت و بازنمایی کنند (Rodriguez-Repiso et al., 2007).

از آنجا که پایایی و روایی گراف نهایی FCM به طور قابل‌ملاحظه‌ای به کیفیت داده‌های خبرگان وابسته است، تشکیل پانلی از افراد آگاه و دارای تجربه مرتبط، به‌شدت توصیه می‌شود (Polat, 2009 & Yaman).

در این مطالعه، پانل خبرگان به‌منظور مدل‌سازی روابط پویای میان ادغام BIM-IoT و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز تشکیل شد.

برای این منظور، یک پانل ناهمگن از خبرگان - که به‌عنوان گروهی از متخصصان با دانش مشترک در یک حوزه، اما با نقش‌ها، دیدگاه‌ها یا وابستگی‌های سازمانی متفاوت تعریف می‌شود (Mansouri, 2014 & Ravasan) - به طور هدفمند گردآوری شد.

تعداد ایده‌آل مشارکت‌کنندگان بسته به ویژگی‌های پژوهش متفاوت است؛ با این حال، هرچه سطح ناهمگنی پانل بالاتر باشد، می‌توان از تعداد کوچک‌تری از شرکت‌کنندگان استفاده کرد.

در این مطالعه، پانل شامل متخصصانی از بخش‌های مختلف صنعت ساخت‌وساز بود؛ از جمله:

- مدیران پروژه،

- کارفرمایان،
- طراحان،
- مشاوران ایمنی،
- و پیمانکاران.

با توجه به تنوع پیشینه‌ی حرفه‌ای خبرگان و دامنه‌ی وسیع تجربه موردنیاز برای پوشش هم‌زمان موضوعات ادغام فناوری‌های نوین و ابعاد فرهنگی ایمنی، هدف‌گذاری روی یک پانل با اندازه بسیار بزرگ مدنظر قرار نگرفت (مشخصات جمعیت‌شناختی خبرگان در جدول ۳ ارائه شده است).

در عوض، با تکیه بر سوابق مطالعات پیشین FCM و توصیه‌های روش‌شناختی برای پانل‌های ناهمگن (Salmeron, & Lopez, 2014)، انتخاب حجم نمونه پنج‌نفره برای پانل خبرگان توجیه شد.

خبرگان بر اساس مشارکت مستقیم در پروژه‌های ساخت‌وساز انتخاب شدند؛ پروژه‌هایی که در آن‌ها فناوری‌های BIM و IoT در فرایندهای مرتبط با ایمنی به کار گرفته شده بود. این معیار انتخاب تضمین می‌کرد که آن‌ها درک عمیقی از هر دو جنبه‌ی فناوری و فرهنگ/مدیریت ایمنی داشته باشند و بتوانند روابط علی میان ادغام BIM-IoT و فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز را به طور واقع‌بینانه ترسیم کنند.

جدول ۳: ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان پانل

ویژگی‌ها	حوزه سازمانی	نقش	شناسه
۲۲ سال سابقه؛ دارای مدرک تحصیلات تکمیلی در مدیریت ساخت؛ مشارکت مستقیم در سامانه‌های پایش ایمنی مبتنی بر BIM	پیمانکار	رئیس واحد ایمنی	کارشناس ۱
۲۰ سال سابقه؛ دارای مدرک کارشناسی در مهندسی عمران؛ دارای تجربه در پیاده‌سازی اینترنت اشیاء (IoT) برای کنترل و گزارش‌دهی برخط ایمنی	کارفرما	مدیر ارشد پروژه	کارشناس ۲
۱۶ سال سابقه؛ دارای مدرک تحصیلات تکمیلی در مهندسی سازه؛ مشارکت در هر دو حوزه پژوهش و پیاده‌سازی مدیریت ایمنی مبتنی بر فناوری	مشاور	کارشناس ادغام BIM و ایمنی	کارشناس ۳
۱۴ سال سابقه؛ دارای مدرک کارشناسی در مهندسی ایمنی حرفه‌ای/شغلی؛ سابقه کار در پروژه‌های زیرساختی با استفاده از سامانه‌های تشخیص مخاطرات مبتنی بر IoT	پیمانکار	افسر HSE (ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست)	کارشناس ۴
۱۷ سال سابقه؛ دارای مدرک تحصیلات تکمیلی در معماری؛ دارای تجربه در ادغام پروتکل‌های ایمنی در جریان‌های کاری طراحی مبتنی بر BIM	مشاور	هماهنگ‌کننده طراحی و ایمنی	کارشناس ۵

جنبه‌های سازمانی ادغام BIM-IoT، همچنین بینش نسبت به برنامه‌ریزی، پایش، آموزش و تحول فرهنگی ایمنی را پوشش می‌دادند. برای آنکه ماهیت چندبعدی فرهنگ ایمنی به طور جامع در نظر گرفته شود، مشارکت‌کنندگان به گونه‌ای انتخاب شدند که طیفی از نقش‌های کارکردی در حوزه‌های برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا و مدیریت ایمنی را نمایندگی کنند. خبرگان منتخب همچنین دارای سابقه حرفه‌ای چشمگیری بودند؛ به‌طوری که هر یک دست‌کم ۱۴ سال سابقه فعالیت در این حوزه داشت و اغلب آن‌ها از ترکیب شایستگی‌های آکادمیک و تجربیات حرفه‌ای برخوردار بودند. این ترکیب دیدگاه‌ها، تفسیر معنادار روش‌شناسی FCM و ارزیابی دقیق وزن‌های علی میان متغیرها را تسهیل کرد.

۳-۳- ایجاد مدل FCM

فرایند با انجام یک مرور نظام‌مند ادبیات آغاز شد تا مفاهیم کلیدی مؤثر بر رابطه بین ادغام BIM-IoT و فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز شناسایی شوند. این مرحله اولیه منجر به استخراج ۱۶ مفهوم مرتبط شد که همگی به‌عنوان مزایای ادغام BIM-IoT شناخته شدند و در جدول ۲ به‌تفصیل ارائه شده‌اند. برای پالایش این مفاهیم، از فرایند دلفی استفاده شد تا پنج کارشناس ما بتوانند به‌صورت نظام‌مند اهمیت هر مفهوم را ارزیابی کرده و به اجماع برسند. هدف این مرحله، اعتبارسنجی، اصلاح و

اولویت‌بندی مفاهیم منتخب پیش از ادغام آن‌ها در چارچوب FCM بود. این فرایند تکرارشونده شامل چندین دور مشاوره با خبرگان بود تا وضوح مفهومی و تناسب هر مفهوم تضمین شود. در این فرایند، تمامی مفاهیم استخراج‌شده بر اساس سه بُعد مدل فرهنگ ایمنی، یعنی ابعاد روان‌شناختی، سازمانی و رفتاری، دسته‌بندی شدند.

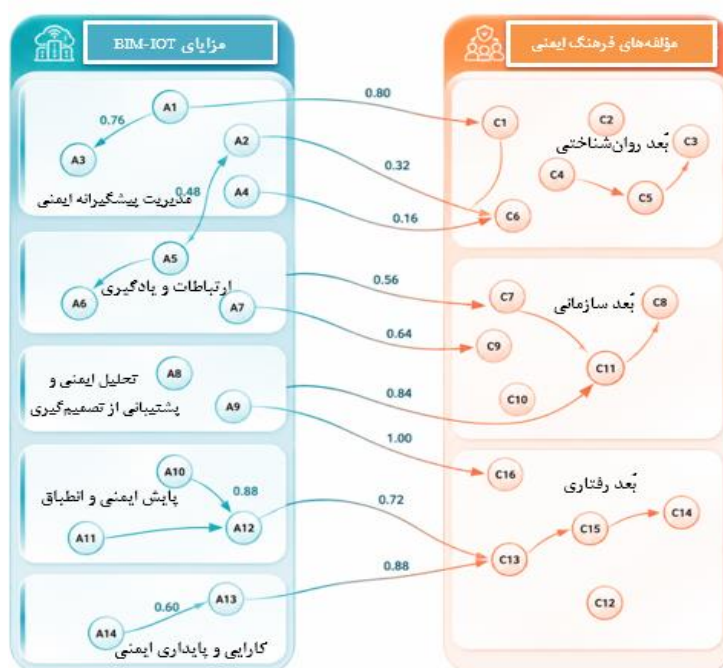
مفاهیم در ابتدا در قالب سه بُعد سازماندهی شدند که هر یک نمایانگر جنبه‌ای متمایز از فرهنگ ایمنی بود. بعد روان‌شناختی بر ادراکات فردی، آگاهی و آمادگی برای ایمنی تمرکز داشت. بعد سازمانی ساختارهای رسمی، سیاست‌ها و سازوکارهای مدیریتی را دربر می‌گرفت. بعد رفتاری به رویه‌های واقعی ایمنی، رعایت مقررات و عملکرد ایمنی مرتبط بود. پنل خبرگان این دسته‌بندی‌ها را مورد بازبینی قرار داد و برای اطمینان از هم‌ترازی دقیق هر مفهوم با بعد مناسب (با توجه به نقش کارکردی آن در سیستم)، اصلاحات جزئی‌ای پیشنهاد کرد.

مدل نهایی FCM سپس از طریق برقراری روابط علی میان ابعاد و مفاهیم، و با راهنمایی بینش‌های ارائه‌شده توسط پنل خبرگان ساخته شد. این روابط به‌وسیله یال‌های جهت‌دار وزن‌دار نمایش داده شدند که هم شدت و هم جهت نفوذ متغیرها بر یکدیگر را ثبت می‌کردند. گراف حاصل، یک بازنمایی ساختاریافته از این موضوع فراهم کرد که ادغام BIM-IoT چگونه می‌تواند پویایی‌های فرهنگ ایمنی را از طریق سازوکارهای درهم‌تنیده آگاهی، تبعیت، برنامه‌ریزی، پایش و عملکرد، شکل دهد.

ایجاد مدل FCM همچنین مستلزم شناسایی مفاهیم ورودی، میانی و خروجی بود. مفاهیم ورودی، مزایای اصلی ادغام BIM-IoT را نمایندگی می‌کردند؛ مفاهیم میانی، عوامل میانجی در درون سیستم فرهنگ ایمنی را به تصویر می‌کشیدند؛ و مفاهیم خروجی، پیامدهای بلندمدت بر فرهنگ ایمنی و عملکرد ایمنی را بازتاب می‌دادند. این ساختار، انجام تحلیل‌های ایستای (static) و پویا (dynamic) بعدی را ممکن ساخت که هدف آن‌ها درک اثرات مستقیم و غیرمستقیم میان مفاهیم بود.

۴- یافته‌های تحقیق

این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل FCM را ارائه می‌کند؛ از جمله شناسایی روابط علی کلیدی، میزان تأثیر نسبی مزایای ادغام BIM-IoT بر فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز، و رفتار پویای مدل تحت سناریوهای مختلف. نتایج در قالب تحلیل ایستا، تحلیل پویا و تحلیل حساسیت سازمان‌دهی شده‌اند تا چارچوب پیشنهادی به‌صورت جامع ارزیابی شود. در زیربخش‌های آتی، ماتریس روابط علی استخراج‌شده و یافته‌های حاصل از اعتبارسنجی توسط خبرگان به‌صورت تفصیلی مورد بحث قرار می‌گیرند.



شکل ۲: مزایای یکپارچه‌سازی BIM-IoT و مدهای مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی

۴-۱- تحلیل ایستا (Static Analysis)

شکل ۲ ساختار گرافیکی مدل پیشنهادی FCM را نشان می‌دهد که روابط ایستای بین مزیت‌های شناسایی شده و مؤلفه‌های مختلف فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز را ثبت می‌کند. برای افزایش وضوح و تسهیل یکپارچه‌سازی با تحلیل پویا که بعداً در متن بحث می‌شود، این مزیت‌ها در قالب پنج گروه موضوعی دسته‌بندی شده‌اند:

مدیریت پیشگیرانه ایمنی، ارتباطات و یادگیری ایمنی، تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم، پایش و انطباق ایمنی، و کارایی و پایداری ایمنی.

مدل FCM شامل سه لایه متمایز از روابط علی است:

۱- لایه ۱- روابط مستقیم بین مزیت‌های ادغام BIM-IoT (برهم‌کنش‌های A-A)، که وابستگی‌های فناورانه و سازمانی درون مجموعه مزیت‌ها را نشان می‌دهد.

۲- لایه ۲- پیوندهای علی مستقیم از مزیت‌های ادغام BIM-IoT به مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز (برهم‌کنش‌های A-C)، که نشان می‌دهد هر مزیت چگونه به‌طور مستقیم بر ابعاد مشخصی از فرهنگ ایمنی در سطوح روان‌شناختی، سازمانی و رفتاری تأثیر می‌گذارد.

۳- لایه ۳- روابط مستقیم بین خود مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی (برهم‌کنش‌های C-C)، که حلقه‌های بازخورد سیستماتیک و وابستگی‌های متقابل درون ابعاد فرهنگ ایمنی را نشان می‌دهد.

جدول ۴: اثرات غیرمستقیم بر اساس روابط حداکثر-حداقل در (FCM)

ردیف	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
A1	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A2	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A3	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A4	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A5	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A6	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A7	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A8	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A9	17.2	19	19	17.2	14.4	8	20	19	16.2	20	18.2	19	19	20	19	20
A10	17.2	19	20	17.2	16	7.6	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A11	16	19	20	16	16	8	20	19	15	20	18.2	20	18	19	18	19
A12	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	19	18.2	20	19	20	19	20
A13	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
A14	17.2	19	20	17.2	16	8	20	19	16.2	20	18.2	20	19	20	19	20
افزایش FCM																
میانگین اثرات اولیه									میانگین اثرات غیر مستقیم							
10.35									18.05							
14.55									18.05							
11.5									18.05							
9.6125									18.05							
10.05									18.05							
13.9375									18.05							
14.2625									18.05							
15.1									18.05							
16.4625									17.825							
12.9125									18.025							
17.7375									17.575							
16.3875									17.9875							
15.5875									18.05							
16.2375									18.05							

* 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- فراتر از این روابط مستقیم، مدل به‌طور ذاتی مسیرهای علی غیرمستقیم را نیز دربر می‌گیرد. این اثرات غیرمستقیم از طریق انتشار در شبکه (network propagation) ایجاد می‌شوند، حتی در شرایطی که میان دو مفهوم، ارتباط مستقیم وجود نداشته باشد. برای مثال، اگرچه ممکن است هیچ پیوند مستقیمی بین مزیت A1 و مؤلفه C8 وجود نداشته باشد، اما یک مسیر غیرمستقیم از طریق گره‌های واسطه قابل مشاهده است؛ مانند:

- $A1 \rightarrow A5 \rightarrow C8$
- $A1 \rightarrow A3 \rightarrow C7 \rightarrow C8$

چنین مسیرهای چندمرحله‌ای، ماهیت سیستمیک فرهنگ ایمنی در صنعت ساخت‌وساز را منعکس می‌کنند؛ جایی که مزیت‌های فناورانه، اثرات خود را از طریق تأثیرات آبشاری (cascading influences) در ابعاد سازمانی و رفتاری تقویت و گسترش می‌دهند.

بر اساس تعاملات مشاهده‌شده میان مزیت‌های ادغام BIM-IoT (Ai) و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز (Ci) اثرات تجمعی مزیت‌های BIM-IoT بر مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ($Ai \rightarrow Cj$) می‌تواند با استفاده از معادلات ۱ تا ۴ محاسبه شود که چارچوب تحلیل ایستای پژوهش را تشکیل می‌دهند. این محاسبات با استفاده از روش ترکیب بیشینه-کمینه (Max-Min Composition) انجام می‌شود تا بیشترین شدت تأثیر در میان تمامی مسیرهای علی ممکن در شبکه شناسایی گردد.

خروجی اصلی تحلیل ایستا، اثرات غیرمستقیم مزیت‌های ادغام BIM-IoT بر مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز است (نگاه کنید به جدول ۴). مسیرهای علی میان این مفاهیم از طریق به‌کارگیری روش تحلیلی بیشینه-کمینه (معادلات ۱ و ۲) تعیین شدند؛ در این فرآیند، تمامی مزیت‌ها به‌طور هم‌زمان به‌عنوان گره‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته شدند تا تأثیرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر به‌طور کامل لحاظ شود.

بر مبنای نتایج این تحلیل، تفسیرهای زیر ارائه می‌شود.

۴-۱-۱- یافته‌های کلیدی حاصل از تحلیل ایستا

تحلیل ایستا، بینش‌های اساسی درباره میزان اثربخشی مزیت‌های ادغام BIM-IoT و اثرات تقویتی آن‌ها بر فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز ارائه می‌دهد. بررسی نظام‌مند مقادیر افزایش FCM (تفاوت میان اثرات غیرمستقیم و مستقیم) اولویت‌های مداخله‌ای متمایز و مسیرهای راهبردی مشخصی را برای تحول فرهنگی شناسایی می‌کند. شکل ۳ مقایسه‌ای از اثرات مستقیم، غیرمستقیم و تقویتی مزیت‌های ادغام BIM-IoT بر فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز را نشان می‌دهد.

در میان مزیت‌های مختلف ادغام BIM-IoT، A11 (حمایت از انطباق با مقررات ایمنی) بالاترین مقدار میانگین اثر اولیه (مستقیم) را با مقدار ۱۷,۷۳۷۵ نشان می‌دهد که نقش تعیین‌کننده آن را در شکل‌دهی به مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی برجسته می‌سازد. این یافته با پژوهش‌های پیشین همسو است که انطباق مقرراتی را به‌عنوان سنگ‌بنای نظام‌های اثربخش مدیریت ایمنی و یکی از محرک‌های کلیدی بلوغ فرهنگ ایمنی معرفی می‌کنند (Salguero-Caparrós و همکاران، ۲۰۲۰). پس از A11، مزیت‌های A9 (تسهیل تصمیم‌گیری بدون وقفه) و A12 (بهبود بازرسی‌ها و تحلیل ایمنی) نیز اثرات قابل توجهی نشان می‌دهند؛ به‌ویژه A12 که سطح بالاتری از تأثیر غیرمستقیم را در میان عناصر فرهنگ ایمنی اعمال می‌کند.

با این حال، تحلیل افزایش FCM تمایز مهمی را میان مزیت‌هایی که منافع فنی فوری ایجاد می‌کنند و آن‌هایی که منجر به تحول فرهنگی بلندمدت می‌شوند آشکار می‌سازد. مزیت A4 (تقویت شناسایی خطر و هشدارهای لحظه‌ای) بالاترین مقدار افزایش FCM را با عدد ۸,۴۴ نشان می‌دهد که بیانگر تقویت قدرتمند از طریق حلقه‌های بازخورد سیستماتیک است؛ تقویتی که

بسیار فراتر از قابلیت‌های مستقیم شناسایی خطر گسترش می‌یابد. به‌طور مشابه، A5 (بهبود اثربخشی آموزش ایمنی) نیز افزایش قابل توجهی برابر با ۸,۰ نشان می‌دهد که حاکی از تعاملات برجسته آن با فرهنگ یادگیری است. همچنین A1 (آگاهی ایمنی) تقویت غیرمستقیم چشمگیری (۷,۷) را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که فناوری‌های ارتقای آگاهی چگونه از طریق افزایش مشارکت و رفتارهای پیش‌نگرانه ایمنی، منافع چندبرابری ایجاد می‌کنند.

این مزیت‌ها، با وجود داشتن اثرات مستقیم نسبتاً متوسط، اما برخورداری از مقادیر بالای افزایش FCM (در بازه ۳,۵ تا ۸,۴۴) نشان می‌دهند که اثرات غیرمستقیم آن‌ها که از طریق مسیرهای علی پیچیده در شبکه فرهنگ ایمنی میانجی‌گری می‌شود نفوذ کلی آن‌ها را به‌طور چشمگیری تقویت می‌کند. این یافته‌ها با نظریه‌های فرهنگ ایمنی همخوانی دارد که بر تعامل پویا میان آگاهی، ارتباطات، آموزش و گزارش‌دهی به‌عنوان توانمندسازهای کلیدی بهبود عملکرد ایمنی تأکید می‌کنند (Naji و همکاران، ۲۰۲۲). این دیدگاه سیستم‌محور با مدل تعاملی فرهنگ ایمنی کوپر نیز سازگار است؛ مدلی که بیان می‌کند عوامل روان‌شناختی، رفتاری و سازمانی به‌صورت پویا با یکدیگر تعامل داشته و پیامدهای ایمنی را شکل می‌دهند (Cooper, 2000).

سطوح بالای اثرات غیرمستقیم مشاهده‌شده برای این مزیت‌ها حاکی از وجود حلقه‌های بازخورد تقویتی در سیستم فرهنگ ایمنی است. برای مثال، بهبود شناسایی خطر (A4) می‌تواند به افزایش اثربخشی آموزش (A5) منجر شود که به نوبه خود رفتارهای گزارش‌دهی (A7) را تقویت می‌کند؛ مجموعه این تعاملات، جو ایمنی و میزان انطباق رفتاری در سطح پروژه را تحکیم می‌بخشد.

در مقابل، A11 (انطباق مقرراتی) علی‌رغم داشتن بالاترین اثر مستقیم، مقدار افزایش منفی (۰,۱۶-) را نشان می‌دهد؛ این امر بیانگر آن است که منافع آن ممکن است در غیاب مداخلات حمایتی تکمیلی به حالت اشباع برسد. بنابراین، رویکردهای صرفاً مبتنی بر انطباق مقرراتی برای تحقق تحول پایدار فرهنگ ایمنی کافی نخواهند بود.

تحلیل اثرات بُعدی (Dimensional Effects Analysis) تحلیل ایستا الگوهای متمایزی را در سه بُعد بنیادین فرهنگ ایمنی آشکار می‌کند:

بُعد روان‌شناختی (Psychological Dimension) مزیت A11 قوی‌ترین اثرات مستقیم را بر C2 (انطباق ایمنی: ۱۹,۰) و C3 (دانش ایمنی: ۲۰,۰) نشان می‌دهد. این امر بیانگر آن است که سامانه‌های انطباق مقرراتی به‌طور مستقیم تعهد درونی کارگران نسبت به رعایت قوانین و دستورالعمل‌های ایمنی را تقویت می‌کنند (Salguero-Caparrós و همکاران، ۲۰۲۰).

با این حال، مزیت‌های A1 و A5 تقویت غیرمستقیم قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که از طریق بهبود ادراک ریسک، موجب تقویت C1 (انگیزش ایمنی) و C4 (آمادگی ایمنی) می‌شوند.

در این میان، C6 (ویژگی‌های شخصیتی: ۰,۵۰) کمترین میزان تأثیرپذیری را نشان می‌دهد که این موضوع تأیید می‌کند ویژگی‌های درونی و شخصیتی افراد برای بهبود نیازمند راهبردهای مکمل و مداخلات غیر فناورانه هستند (Laurent و همکاران، ۲۰۲۰).

بُعد سازمانی (Organizational Dimension) ادغام BIM-IoT اثربخشی قابل‌توجهی در تحول سازمانی نشان می‌دهد. مزیت‌های A11 و A12 ساختارهای رسمی سازمانی را به‌طور مستقیم تقویت می‌کنند؛ از جمله:

• C7 (مدیریت ایمنی: ۲۰,۰)

• C8 (شناسایی ریسک: ۱۹,۰)

• C10 (سیاست‌های ایمنی: ۲۰,۰)

این نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های دیجیتال در تقویت ساختارهای رسمی سازمانی عملکرد بسیار مؤثری دارند.

در این میان، A4 بالاترین مقدار افزایش FCM (۸,۴۴) را نشان می‌دهد و با ایجاد چرخه‌های یادگیری سازمانی موجب بهبود مستمر C11 (بازرسی ایمنی) و C7 (طرح یا برنامه مدیریت ایمنی) می‌شود.

در مقابل، C9 (جلسات ایمنی: ۰,۷۹) پاسخ‌پذیری محدودی نسبت به مداخلات فناورانه نشان می‌دهد؛ موضوعی که اهمیت استفاده از رویکردهای ارتباطی انسان‌محور در کنار فناوری را برجسته می‌کند (Quercia, 2022 & Constantinides).

بعد رفتاری (Behavioral Dimension) مزیت‌های A5 و A7 اثرات قابل‌توجهی بر مؤلفه‌های رفتاری دارند و به‌طور چشمگیری بر موارد زیر تأثیر می‌گذارند:

• C12 (آموزش ایمنی: ۲۰,۰)

• C13 (روش‌ها و رویه‌های ایمن: ۱۹,۰)

• C15 (بررسی و تحلیل حوادث: ۱۹,۰)

این نتایج نشان می‌دهد که ادغام BIM-IoT می‌تواند از طریق آموزش‌های غوطه‌ور (immersive training) و سامانه‌های گزارش‌دهی کارآمد، رفتارهای یادگیری و عملکرد ایمنی را به‌طور مؤثری متحول کند.

همچنین A11 اثرات مستقیم قدرتمندی بر C14 (تعهد مدیریت: ۱۹,۰) و C16 (عملکرد ایمنی: ۱۹,۰) نشان می‌دهد؛ با این حال، مقدار افزایش منفی FCM (-۰,۱۶) برای این مزیت نشان می‌دهد که رویکردهای صرفاً مبتنی بر انطباق مقرراتی ممکن است بدون تقویت‌های رفتاری تکمیلی به نقطه اشباع برسند.

اولویت‌های راهبردی برای پیاده‌سازی (Strategic Implementation Priorities) بر اساس نتایج تحلیل بُعدی و تحلیل افزایش FCM، سه فاز اجرایی برای دستیابی به حداکثر تحول در فرهنگ ایمنی قابل شناسایی است:

فاز ۱ - ایجاد زیرساخت و بنیان (Foundation Building) در این مرحله، اولویت با مزیت‌های A4، A5 و A1 است که دارای مقادیر بالای افزایش FCM (بیش از ۵,۰) هستند. این مزیت‌ها بیشترین ظرفیت را برای ایجاد تحول فرهنگی دارند، زیرا از طریق اثرات تقویتی چندبُعدی، به‌طور هم‌زمان سه حوزه کلیدی را تقویت می‌کنند:

• مدیریت ریسک سازمانی

• آموزش رفتاری ایمنی

• آمادگی روان‌شناختی کارکنان

در نتیجه، این مزیت‌ها به‌عنوان پیشران‌های اولیه تحول فرهنگ ایمنی در مراحل آغازین پیاده‌سازی فناوری BIM-IoT در نظر گرفته می‌شوند.

فاز ۲ - تقویت چارچوب‌های مقرراتی (Regulatory Strengthening) در این مرحله، مزیت‌های A9، A11 و A12 به‌منظور دستیابی به منافع فوری در حوزه انطباق با مقررات ایمنی پیاده‌سازی می‌شوند. با این حال، نتایج تحلیل نشان می‌دهد که برای دستیابی به تغییر فرهنگی پایدار، این اقدامات باید با مداخلات مکمل همراه شوند؛ از جمله:

• برنامه‌های افزایش آگاهی ایمنی

• ابتکارات آموزشی و توسعه مهارت‌های ایمنی

این رویکرد ترکیبی کمک می‌کند تا اثرات مقرراتی صرف به تغییرات عمیق‌تر در فرهنگ سازمانی منجر شود.

فاز ۳ - ادغام انسان‌محور (Human-Centered Integration) در این فاز، تمرکز بر مؤلفه‌هایی است که مقاومت بیشتری در برابر مداخلات فناورانه دارند، از جمله:

• C6 (ویژگی‌های شخصیتی)

• C9 (جلسات ایمنی)

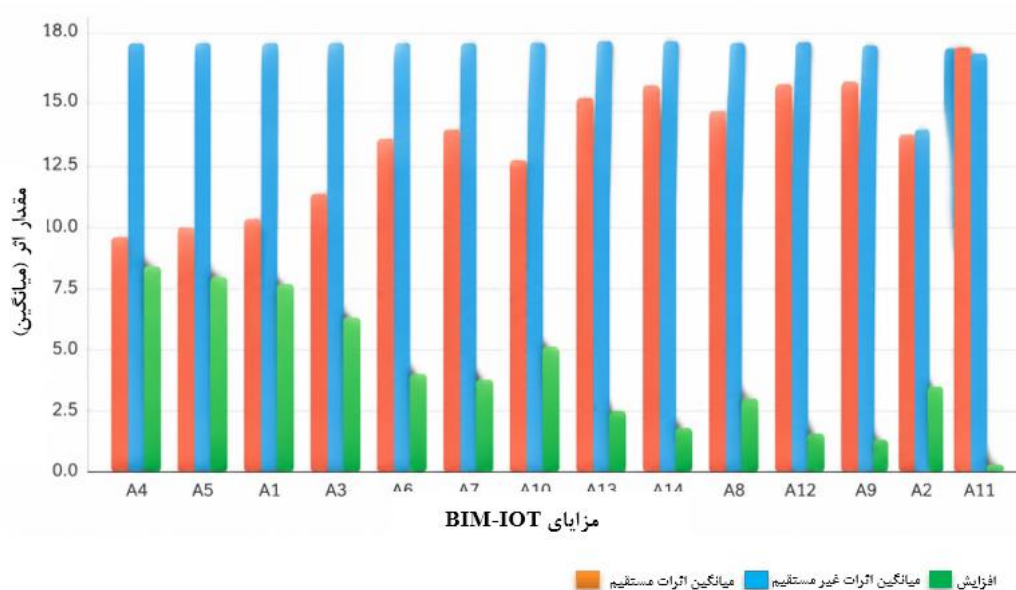
برای بهبود این مؤلفه‌ها، استفاده از راهبردهای بین‌فردی و ارتباطی ضروری است. در این چارچوب، میان دو دسته از مؤلفه‌ها تمایز قائل می‌شود:

- مؤلفه‌های پاسخ‌پذیر به فناوری:

C2, C3, C7, C8, C10 تا C12, C15 تا C16

- مؤلفه‌های انسان‌محور که نیازمند رویکردهای اصلاح رفتار و تعامل انسانی هستند.

اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری: مزایایی با افزایش بیش از ۵,۰ (A4, A5, A1, A3, A10) بالاترین بازگشت سرمایه را از طریق اثرات آشنایی در ابعاد فرهنگ ایمنی فراهم می‌کنند. تمرکز اصلی را بر شبکه‌های حسگر اینترنت اشیا و سامانه‌های شناسایی لحظه‌ای مخاطرات (A4) به‌عنوان مداخلات فناورانه اصلی قرار دهید؛ این مداخلات با پلتفرم‌های آموزش واقعیت مجازی/افزوده (A5) و فناوری‌های تعامل و درگیری کارکنان (A1) پشتیبانی شوند.



شکل ۳: اثرات مستقیم، غیرمستقیم و تقویتی مزیت‌های ادغام BIM-IoT بر فرهنگ ایمنی.

۴-۲- تحلیل پویا با FCM

روش FCM یک چارچوب قدرتمند برای انجام پیش‌بینی و تحلیل سناریوهای «اگر ... آنگاه ...» ارائه می‌کند. در این مطالعه، سطوح کمی‌شده‌ی نفوذ مزایای یکپارچه‌سازی BIM-IoT (A1-A14) بر مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز (C1-C16)، امکان تحلیل پویا را فراهم می‌کند که از تصمیم‌گیری راهبردی پشتیبانی می‌کند. این رویکرد به دست‌اندرکاران اجازه می‌دهد نتایج بالقوه را تحت سناریوهای مختلف پیش‌بینی کنند و تعدیلات لازم را برای بهینه‌سازی فرهنگ ایمنی در پروژه‌های ساختمانی شناسایی نمایند.

در این مطالعه، شش سناریوی متمایز بر اساس فعال‌سازی گروه‌های مشخصی از مزایای BIM-IoT توسعه داده شد که بازتاب‌دهنده‌ی خوشه‌های واقع‌گرایانه و مرتبطی از منافع هستند:

سناریو ۱: مدیریت پیشگیرانه ایمنی (A1-A4)

سناریو ۲: ارتباطات و یادگیری ایمنی (A5-A7)

سناریو ۳: تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم (A8-A9)

سناریو ۴: پایش ایمنی و انطباق (A10-A12)

سناریو ۵: کارایی و پایداری ایمنی (A13-A14)

سناریو ۶: سناریوی ترکیبی مبتنی بر نظر خبرگان (فعال سازی بر اساس داده های ورودی خبرگان)

هر سناریو یک وضعیت اولیه ی پیشنهادی را نشان می دهد که در آن تنها مزایای درون گروه تعیین شده فعال هستند و سایر مزایا غیر فعال می مانند. بردارهای وضعیت اولیه برای این سناریوها با استفاده از توابع فعال سازی FCM (مطابق تعریف در روابط ۳ و ۴) به صورت تکراری به روزرسانی می شوند تا زمانی که سیستم به یک حالت تعادل پایدار برسد. در این نقطه، تفاوت میان تکرارهای متوالی ناچیز می شود که نشان دهنده ی همگرایی است.

در چارچوب پویای FCM، همه ی گره ها شامل گره های مزیت (A1-A14) و گره های مؤلفه های فرهنگ ایمنی (C1-C16) در فرایندهای بازخورد تکرارشونده مشارکت دارند. ساختار شبکه ی کامل سه لایه ی علی را در بر می گیرد:

روابط درون مزیت (A-A)، که امکان تقویت متقابل میان منافع فناورانه را فراهم می کند؛

تأثیرات مزیت بر مؤلفه (A-C)، که تأثیرات مستقیم فناورانه بر فرهنگ ایمنی را نشان می دهد؛

روابط درون مؤلفه (C-C)، که حلقه های بازخورد درون ابعاد فرهنگ ایمنی را ثبت می کند.

در طول شبیه سازی پویا (رابطه ۳)، مقادیر گره های مزیت از طریق انتشار تکراری تأثیرات از سوی سایر مزایا و مؤلفه ها تکامل می یابند؛ این امر بازتاب دهنده ی اثرات تقویت سیستمی است تا زمانی که شبکه به تعادل برسد.

جدول ۵ شرایط اولیه و مقادیر تعادل را برای هر سناریو ارائه می کند. پس از آن، یک تحلیل تفصیلی از نتایج پویا انجام خواهد شد تا نفوذ نسبی هر گروه مزایا بر مؤلفه های مختلف فرهنگ ایمنی را کمی سازی کند. این امر امکان شناسایی اثرگذارترین مزایای BIM-IoT را فراهم می سازد و راهبردهای اولویت بندی برای ارتقای فرهنگ ایمنی در ساخت و ساز را اطلاع رسانی می کند.

نتایج شبیه سازی پویا با FCM در جدول ۵، اثرات متمایز مزایای یکپارچه سازی BIM-IoT بر مؤلفه های فرهنگ ایمنی در ساخت و ساز را در شش سناریو نشان می دهند؛ که بازتاب دهنده ی ابعاد روان شناختی، سازمانی و رفتاری هستند. با این حال، بررسی انتقادی محدودیت ها و قیود مهمی را آشکار می کند که باید به طور صریح مورد توجه قرار گیرند.

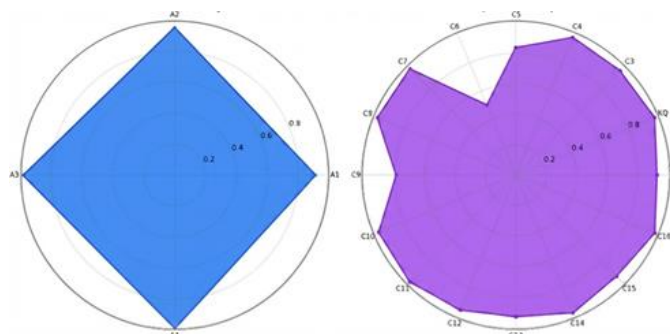
تحلیل سناریو محور همراه با محدودیت های انتقادی.

سناریو ۱ (تمرکز بر مدیریت پیشگیرانه ایمنی): فعال سازی مزایای پیشگیرانه (A1-A4) تأثیر مثبت قابل توجهی بر انطباق ایمنی (C2: 0.99) و شناسایی ریسک ایجاد می کند.

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی سناریوهای پیشنهادی

ردیف	سناریو ۱ وضعیت اولیه مدیریت پیشگیرانه ایمنی	سناریو ۲ وضعیت نهایی مدیریت پیشگیرانه ایمنی	سناریو ۲ وضعیت اولیه ارتباطات و آموزش ایمنی	سناریو ۲ وضعیت نهایی ارتباطات و آموزش ایمنی	سناریو ۳ وضعیت اولیه تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم	سناریو ۳ وضعیت نهایی تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم
A1	1	0.91	0	0.91	0	0.91
A2	1	0.95	0	0.95	0	0.95
A3	1	0.98	0	0.98	0	0.98
A4	1	0.99	0	0.99	0	0.99
A5	0	0.89	1	0.89	0	0.89
A6	0	0.94	1	0.94	0	0.94
A7	0	0.91	1	0.91	0	0.91
A8	0	0.94	0	0.94	1	0.94
A9	0	0.94	0	0.94	1	0.94
A10	0	0.99	0	0.99	0	0.99
A11	0	0.93	0	0.93	0	0.93
A12	0	0.98	0	0.98	0	0.98
A13	0	0.67	0	0.67	0	0.67
A14	0	0.99	0	0.99	0	0.99
C1	0	0.93	0	0.93	0	0.93
C2	0	0.99	0	0.99	0	0.99
C3	0	0.97	0	0.97	0	0.97
C4	0	0.98	0	0.98	0	0.98
C5	0	0.84	0	0.84	0	0.84
C6	0	0.5	0	0.5	0	0.5
C7	0	0.99	0	0.99	0	0.99
C8	0	0.99	0	0.99	0	0.99
C9	0	0.79	0	0.79	0	0.79
C10	0	0.98	0	0.98	0	0.98
C11	0	0.99	0	0.99	0	0.99
C12	0	0.96	0	0.96	0	0.96
C13	0	0.93	0	0.93	0	0.93
C14	0	0.98	0	0.98	0	0.98
C15	0	0.94	0	0.94	0	0.94
C16	0	0.99	0	0.99	0	0.99

سناریو ۴ وضعیت اولیه پایش ایمنی و انطباق	سناریو ۴ وضعیت نهایی پایش ایمنی و انطباق	سناریو ۵ وضعیت اولیه کارایی و پایداری ایمنی	سناریو ۵ وضعیت نهایی کارایی و پایداری ایمنی	سناریو ۶ وضعیت اولیه مطالعه ما	سناریو ۶ وضعیت نهایی مطالعه ما
0	0.91	0	0.91	1	0.91
0	0.95	0	0.95	1	0.95
0	0.98	0	0.98	1	0.98
0	0.99	0	0.99	1	0.99
0	0.89	0	0.89	1	0.89
0	0.94	0	0.94	1	0.94
0	0.91	0	0.91	1	0.91
0	0.94	0	0.94	1	0.94
0	0.94	0	0.94	1	0.94
1	0.99	0	0.99	1	0.99
1	0.93	0	0.93	1	0.93
1	0.98	0	0.98	1	0.98
0	0.67	1	0.67	1	0.67
0	0.99	1	0.99	1	0.99
0	0.93	0	0.93	0	0.93
0	0.99	0	0.99	0	0.99
0	0.97	0	0.97	0	0.97
0	0.98	0	0.98	0	0.98
0	0.84	0	0.84	0	0.84
0	0.5	0	0.5	0	0.5
0	0.99	0	0.99	0	0.99
0	0.99	0	0.99	0	0.99
0	0.79	0	0.79	0	0.79
0	0.98	0	0.98	0	0.98
0	0.99	0	0.99	0	0.99
0	0.96	0	0.96	0	0.96
0	0.93	0	0.93	0	0.93
0	0.98	0	0.98	0	0.98
0	0.94	0	0.94	0	0.94
0	0.99	0	0.99	0	0.99



شکل ۴. نمودارهای رادار در سناریو ۱ (مدیریت پیشگیرانه ایمنی): A3 و A4 غالب هستند، A1 و A2 همچنان قوی باقی می‌مانند، بیشتر مؤلفه‌ها در سطح بالا (≥ 0.9) قرار دارند، اما جنبه‌های روان‌شناختی (C6، C5، C9) ضعیف‌ترند.

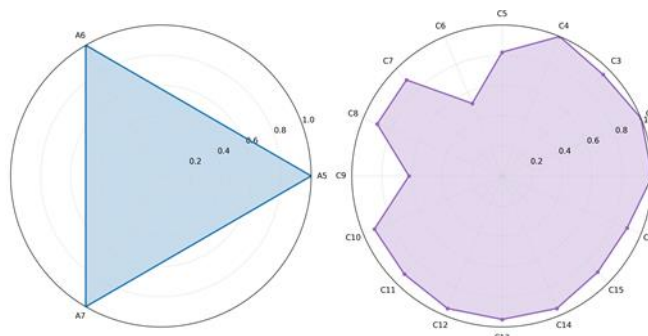


شکل ۵. نمودار رادار برای سناریوی ۲ (ارتباطات و یادگیری ایمنی): A6 قوی‌ترین، A7 در سطح متوسط و A5 ضعیف‌تر است؛ مؤلفه‌های سازمانی و رفتاری قدرتمند هستند، اما جنبه‌های روان‌شناختی (C6، C5، C9) همچنان واکنش‌پذیری کمتری نسبت به مداخلات فناورانه دارند.

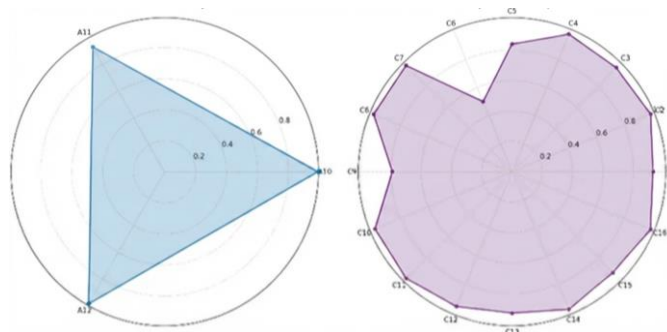
(C8: 0.99) و آمادگی ایمنی (C4: 0.98) نشان می‌دهند که مداخلات در مراحل اولیه، شیوه‌های پیش‌بینانه و پایبندی به سیاست‌ها را تقویت می‌کنند (Zhou و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، تأثیر بسیار اندک بر ویژگی‌های شخصیتی (C6: 0.50) یک محدودیت بنیادی را آشکار می‌کند که باید به‌طور صریح مورد اشاره قرار گیرد. سامانه‌های مدیریت پیشگیرانه ایمنی، علیرغم پیشرفت فناورانه، نمی‌توانند ویژگی‌های عمیق فردی مانند میزان تحمل ریسک، وجدان کاری و انگیزش درونی برای ایمنی را که بر نحوه ادراک و پاسخ افراد به مداخلات تأثیر می‌گذارد، برطرف کنند (Laurent و همکاران، ۲۰۲۰). این محدودیت نشان می‌دهد که دگرگونی جامع فرهنگ ایمنی مستلزم راهبردهای مکمل اصلاح رفتار فراتر از راه‌حل‌های دیجیتال است (شکل ۴).

سناریو ۲ (تمرکز بر ارتباطات ایمنی): بهره‌گیری از مزایای ارتباطی (A5–A7) منجر به فعال‌سازی بالایی در انطباق ایمنی (C2: 0.99)، برنامه‌های مدیریتی (C7: 0.99)، شناسایی ریسک و مخاطرات (C8: 0.99) و گزارش‌دهی شبه‌حادثه‌ها (C16: 0.99) می‌شود. مطالعات اخیر تأیید می‌کنند که ارتباطات لحظه‌ای، آموزش تعاملی و تصویرسازی حوادث که توسط فناوری‌های BIM-IoT امکان‌پذیر شده‌اند، نقشی محوری در تقویت یادگیری سازمانی و مدیریت پیشگیرانه ریسک ایفا می‌کنند (Awolusi و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج ضعیف برای جلسات ایمنی (C9: 0.79) محدودیت‌های بحرانی در راهبردهای ارتباطی مبتنی بر فناوری را آشکار می‌سازد. علی‌رغم ابزارهای پیشرفته‌ی ارتباط دیجیتال، تعاملات چهره‌به‌چهره، اعتمادسازی و انتقال دانش ضمنی همچنان غیرقابل جایگزین هستند (Constantinides و Quercia، ۲۰۲۲). پیامدها قابل توجه‌اند: در حالی که سامانه‌های BIM-IoT به اشتراک‌گذاری اطلاعات و مستندسازی کمک می‌کنند، ممکن است ناخواسته گفت‌وگوهای خودجوش ایمنی و حل مسئله‌ی

مشارکتی را که به طور طبیعی در جلسات سنتی رخ می‌دهند کاهش دهند و در نتیجه، «پارادوکس تقویت ارتباطات» را ایجاد کنند (شکل ۵).



شکل ۶. نمودار رادار برای سناریوی ۳ (تحلیل ایمنی و پشتیبانی تصمیم‌گیری): A8 و A9 به طور برابر قوی هستند (۰.۹۴); نتایج کلی در سطح بالایی قرار دارند، اما مؤلفه‌های روان‌شناختی (C6, C5, C9) ضعیف‌ترند.

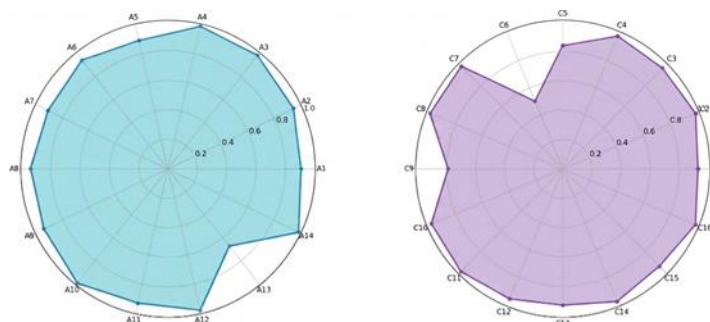


شکل ۷. نمودار رادار برای سناریوی ۴ (پایش ایمنی و انطباق): A10 و A12 نزدیک به مقدار حداکثری هستند و A11 اندکی پایین‌تر قرار دارد؛ مؤلفه‌های سازمانی و رفتاری قوی‌اند، در حالی که مؤلفه‌های روان‌شناختی (C6, C5, C9) ضعیف‌تر هستند.

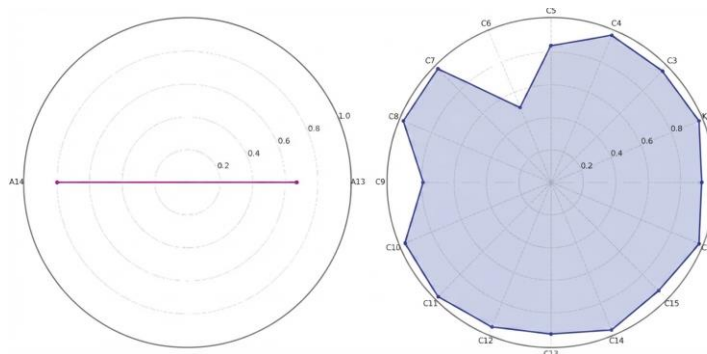
سناریو ۳ (تمرکز بر پشتیبانی تصمیم‌گیری): فعال‌سازی مزیت‌های تحلیلی (A8–A9) به طور مؤثر فرایندهای نظام‌مند را با سطح فعال‌سازی بالا در شناسایی ریسک (C8: 0.99) و برنامه‌های مدیریتی (C7: 0.99) تقویت می‌کند و بر اهمیت مشترک آن‌ها در زمینه‌های تحلیلی و پشتیبانی تصمیم‌گیری تأکید دارد. با این حال، باید ریسک‌های اتکای بیش از حد به سامانه‌های خودکار را مدنظر قرار داد. اتکای افراطی به پشتیبانی تصمیم‌گیری دیجیتال می‌تواند در هنگام بروز نقص سامانه یا مواجهه با موقعیت‌های بی‌سابقه‌ای که به قضاوت انسانی نیاز دارند، آسیب‌پذیری‌هایی ایجاد کند و به طور بالقوه توانایی‌های تفکر انتقادی و آگاهی موقعیتی را تضعیف نماید (Zhao و Chen, ۲۰۲۴). این تحلیل بدون پرداختن به این ریسک‌های ناشی از خودکارسازی ناقص باقی می‌ماند (شکل ۶).

سناریو ۴ (تأکید بر انطباق و بازرسی): این سناریو قوی‌ترین تأکید را بر اجزای مقرراتی نشان می‌دهد؛ با فعال‌سازی حداکثری در «انطباق ایمنی» (C2: 0.99) و کنترل بازرسی (C11: 0.99). با این حال، این الگو ممکن است بازتاب‌دهنده سوگیری احتمالی در پانل خبرگان به سوی ابعاد رسمی و قابل اندازه‌گیری ایمنی، در مقایسه با ابعاد فرهنگی و رفتاری باشد. چنین سوگیری‌ای می‌تواند ناشی از پیش‌زمینه حرفه‌ای خبرگان در حوزه‌های تضمین کیفیت یا امور مقرراتی باشد که پیامدهای قابل سنجش را در اولویت قرار می‌دهند و در عین حال، رویه‌های غیررسمی ایمنی و رفتارهای تطبیقی را که برای فرهنگ ایمنی تاب‌آور حیاتی‌اند، دست‌کم می‌گیرند (Mewomo و Olubukola, ۲۰۲۲) (شکل ۷).

سناریو ۵ (تمرکز بر هزینه و پایداری): این سناریو در حالی به سطح فعال سازی بالا در عملکرد ایمنی (C16: 0.99) و تعهد مدیریت (C14: 0.98) دست می یابد که همزمان عدم توازن قابل توجهی با نادیده گرفتن ابعاد اجتماعی و رفتاری فرهنگ ایمنی ایجاد می کند. بهبودهای متوسط در مهارت های مرتبط با ایمنی (C5: 0.84) و جلسات ایمنی (C9: 0.79) نشان می دهد که پیاده سازی های مبتنی بر هزینه، ملاحظات اقتصادی را بر مشارکت کارگران و فرایندهای یادگیری اجتماعی ترجیح می دهند. این عدم توازن حاکی از آن است که رویکردهای مبتنی بر پایداری ممکن است در کوتاه مدت به انطباق دست یابند.



شکل ۸. نمودار رادار برای سناریوی ۵ (کارایی ایمنی و پایداری): A14 نزدیک به مقدار حداکثری است و A13 ضعیف تر؛ مؤلفه های سازمانی و رفتاری قوی اند، در حالی که ابعاد روان شناختی (C9, C5, C6) فعال سازی اندکی دارند.



شکل ۹. نمودار رادار برای سناریوی ۶ (ترکیبی مبتنی بر نظر خبرگان): A4, A10, A12 و A14 نزدیک به مقدار حداکثری هستند و A13 ضعیف است؛ مؤلفه های سازمانی و رفتاری قوی اند، در حالی که مؤلفه های روان شناختی (C9, C5, C6) واکنش پذیری کمتری نشان می دهند.

سناریو ۶ (پیاده سازی همزمان): بر اساس ورودی خبرگان و فعال سازی همزمان همه مزایا، این سناریو بالاترین تأثیر تجمعی را ایجاد می کند؛ به طوری که بیشتر مؤلفه ها به سطوح فعال سازی ۰.۹۳ تا ۰.۹۹ می رسند. مزایایی مانند هشدار و شناسایی لحظه ای مخاطرات (A4)، پایش ایمنی (A10)، بازرسی و تحلیل ایمنی (A12) و ارتقای عملکرد بلندمدت ایمنی (A14) به ویژه اثرگذارند و مقادیر تعادلی نزدیک به ۰.۹۹ دارند. این یافته ها با پژوهش های پیشین (Wang و همکاران، ۲۰۲۱) سازگار است که نشان می دهند یک رویکرد ترکیبی و یکپارچه، نسبت به مداخلات فناوریانه منفرد اثربخش تر است. با این حال، فرض فعال سازی همزمان در عمل واقع بینانه نیست؛ با توجه به محدودیت هایی مانند محدودیت بودجه، ظرفیت سازمانی، آمادگی فناوری و توانمندی های مدیریت تغییر. پیاده سازی های دنیای واقعی با محدودیت منابع و الزامات اجرای مرحله ای مواجه اند که «استقرار جامع و همزمان» را غیر عملی می کند و ممکن است متخصصان را درباره نتایج قابل دستیابی و زمان بندی اجرای پروژه گمراه کند (شکل ۹).

تحلیل مؤلفه‌های «فناوری پاسخ» در برابر «انسان‌محور». نتایج، تمایز روشنی را میان مؤلفه‌های فناوری پاسخ (C2، C3، C7، C8، C10-C12، C15-C16) که فعال‌سازی بالایی (۰٫۹۳-۰٫۹۹) نشان می‌دهند و مؤلفه‌های انسان‌محور نیازمند مداخلات بین‌فردی آشکار می‌کنند. C6 (ویژگی‌های شخصیتی: ۰٫۵۰) در همه سناریوها تنها به میزان اندک تحت تأثیر قرار می‌گیرد و تأیید می‌کند که صفات روان‌شناختی درونی، اساساً در برابر مداخله فناورانه مقاوم‌اند. C9 (جلسات ایمنی: ۰٫۷۹) به‌طور مستمر نتایج ضعیفی نشان می‌دهد و آشکار می‌سازد که ارتباطات بین‌فردی و فرایندهای تصمیم‌گیری مشارکتی را نمی‌توان صرفاً از طریق پلتفرم‌های دیجیتال به‌طور مؤثر ارتقا داد.

رویداد	$\omega = 0.5$	$\omega = 1.0^*$	$\omega = 1.5$	$\omega = 2.0$	حداکثر انحراف	پایداری
A1	0.87	0.91	0.92	0.94	± 0.04	Stable
A4	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable
A5	0.85	0.89	0.9	0.92	± 0.04	Stable
A10	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable
A11	0.89	0.93	0.94	0.96	± 0.04	Stable
C1	0.89	0.93	0.94	0.96	± 0.04	Stable
C2	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable
C3	0.93	0.97	0.98	0.99	± 0.04	Stable
C6	0.49	0.5	0.51	0.52	± 0.02	Stable
C8	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable
C9	0.78	0.79	0.8	0.81	± 0.02	Stable
C11	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable
C16	0.95	0.99	0.99	0.99	± 0.04	Stable

پیکربندی پایه ($\omega = 1.0$) در تحلیل اصلی استفاده شده است.

جدول ۶. تحلیل حساسیت: مقادیر نهایی تعادلی تحت پارامترهای مختلف سیگموئید (ω)

دلالت‌های الگوی همگرایی و محدودیت‌های مدل‌سازی. یکسان بودن حالت‌های نهایی در تمامی سناریوها، هم نشان‌دهنده‌ی نقاط قوت و هم محدودیت‌های نگران‌کننده در رویکرد مدل‌سازی است. در حالی که همگرایی، وجود اثرات تقویت سیستماتیکِ مقاوم در شبکه‌ی فرهنگ ایمنی را نشان می‌دهد، در عین حال حاکی از آن است که مدل FCM ممکن است پویایی‌های سازمانی پیچیده و عوامل زمینه‌ای را که در پیاده‌سازی‌های واقعی، نتایج خاص هر سناریو را شکل می‌دهند، بیش از حد ساده‌سازی کند. این الگوی همگرایی دلالت می‌کند که فارغ از رویکرد پیاده‌سازی، یکپارچه‌سازی BIM-IoT سیستم را به‌سوی یک حالت تعادلی از پیش تعیین‌شده سوق می‌دهد؛ حالتی که می‌تواند اثرات افتراقی مهم، فرایندهای انطباق و پیامدهای ناخواسته را پنهان کند.

چارچوب راهبردی پیاده‌سازی با ملاحظات انتقادی.

بر اساس تحلیل جامع که هم توانمندی‌ها و هم محدودیت‌ها را در بر می‌گیرد:

فاز ۱ – بنیان فناوری پاسخ:

اجزای C2، C7، C8، C11، C16 را برای دستیابی به منافع فوری در اولویت قرار دهید، در عین حال این نکته را به رسمیت بشناسید که این اجزا می‌توانند به جای بهبود فرهنگ‌محور ایمنی، به بهبودهایی متمایل به انطباق (Compliance-focused) منجر شوند.

فاز ۲ – ادغام انسان-فناوری:

اجزای با پاسخ‌دهی متوسط (C1، C12-C15) را از طریق رویکردهای متوازن دیجیتال-انسانی تقویت کنید و هم‌زمان، محدودیت‌های C6 و C9 را با مداخلات اختصاصی به‌طور صریح هدف قرار دهید:

- راهبردهای مبتنی بر ویژگی‌های شخصیتی: مربی‌گری فردی ایمنی، پروفایل‌سازی روان‌شناختی، و برنامه‌های شخصی‌سازی‌شده‌ی اصلاح رفتار.
- بهبود ارتباطات: منتورینگ ساختارمند همتایان، تقویت پروتکل‌های رویکرد چهره‌به‌چهره، و قالب‌های ترکیبی نشست‌های دیجیتال-حضور.
- فاز ۳ - توسعه‌ی جامع فرهنگ ایمنی:
مداخلات مکمل انسان‌محور را اجرا کنید که محدودیت‌های فناوری را به رسمیت می‌شناسند و بر ابعادی تمرکز دارند که فراتر از ارتقای دیجیتال، نیازمند راهبردهای بین‌فردی هستند.
- واقع‌گرایی در پیاده‌سازی:

عمل‌پیشگان (Practitioners) باید بپذیرند که پیاده‌سازی جامع و هم‌زمان، غیرقابل تحقق است و به‌جای دنبال‌کردن فعال‌سازی جامع ایده‌آل، باید مداخلات را بر اساس میزان آمادگی سازمان، دسترسی به منابع و سطح بلوغ فرهنگ ایمنی مشخص، اولویت‌بندی کنند.

این تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که در حالی که یکپارچه‌سازی BIM-IoT منافع قابل توجهی برای ابعاد سیستماتیک و سازمانی فرهنگ ایمنی فراهم می‌کند، محدودیت‌های بنیادینی در پرداختن به ابعاد روان‌شناختی و اجتماعی انسان‌محور وجود دارد که همچنان برای تحول جامع فرهنگ ایمنی ضروری‌اند. موفقیت، مستلزم به‌رسمیت‌شناختن صریح این قیود و ادغام راهبردهای مکمل انسان‌محور در کنار مداخلات فناورانه است.

۴-۳- تحلیل حساسیت

برای اثبات استحکام نتایج مدل FCM، یک تحلیل حساسیت جامع با آزمون مقادیر مختلف پارامتر سیگموئید w (۰.۰۵، ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۵) در تمامی شش سناریو انجام شد؛ به‌طوری‌که هر سناریو تا نقطه‌ی همگرایی ($\epsilon = 0.001$)، حداکثر ۱۰۰ تکرار) اجرا گردید. جدول ۶ نتایج کمی این تحلیل را برای مفاهیم کلیدی منتخب از سناریوی ۶ (سناریوی ترکیبی مبتنی بر نظر خبرگان) ارائه می‌کند.

یافته‌های کلیدی:

- رتبه‌بندی سازگار: رتبه‌بندی تأثیر نسبی مزایا ($A5, A1 < A11 < A10, A4$) و مؤلفه‌های فرهنگ ایمنی ($C8, C2$) ($C6 < C9 < C1 < C3 < C16, C11$) در تمامی مقادیر w پایدار باقی ماند؛ همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است.
- پایداری همگرایی: همه سناریوها، مستقل از مقدار w ، در بازه‌ی ۱۵ تا ۲۵ تکرار به همگرایی رسیدند.
- حفظ الگو: الگوهای اصلی فعال‌سازی فرهنگ ایمنی (سطح بالا: $C11, C8, C2$; سطح پایین: $C6$) در تمام آزمون‌ها حفظ شدند. مؤلفه‌های مقاوم در برابر فناوری ($C6$: ویژگی‌های شخصیتی، $C9$: جلسات ایمنی) حساسیت حداقلی نسبت به تغییر پارامتر (± 0.2) نشان دادند؛ امری که مقاومت آن‌ها در برابر مداخله‌ی فناورانه را، مطابق با تحلیل پویا، تأیید می‌کند.
- بیشینه انحراف: مقادیر نهایی مفاهیم، بیشینه انحرافی در حد ± 0.4 را در برابر تغییرات w (جدول ۶) نشان دادند که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از آستانه‌ی محافظه‌کارانه‌ی ± 0.8 است و پایداری بالای مدل را اثبات می‌کند.

این نتایج کمی، استحکام رفتار مدل را تأیید کرده و انتخاب $\omega = 1.0$ را برای این کاربرد، معتبر می‌سازد. حفظ رتبه‌بندی سازگار در برابر تغییر چهاربرابری پارامتر ($\omega: 0.5 \rightarrow 2.0$) تضمین می‌کند که توصیه‌های راهبردی استخراج‌شده از تحلیل FCM، مصنوع انتخاب پارامتر نیستند.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با به‌کارگیری یک مدل پویا مبتنی بر FCM، به‌صورت نظام‌مند تأثیر یکپارچه‌سازی BIM و IoT بر فرهنگ ایمنی در ساخت‌وساز را بررسی کرد. با اتکا بر ادبیات علمی، مدل، ۱۴ مزیت اصلی یکپارچه‌سازی BIM-IoT را شناسایی کرده و روابط علی آن‌ها را با ۱۶ مؤلفه‌ی بحرانی فرهنگ ایمنی نقشه‌برداری نمود. با استفاده از هر دو نوع تحلیل FCM ایستا و پویا، این مطالعه پیکربندی ساختاری و تکامل زمانی سیستم را تحت سناریوهای مختلف پیاده‌سازی ثبت و تحلیل کرد.

یافته‌ها نشان می‌دهند که مزایایی مانند پشتیبانی از انطباق با مقررات ایمنی، تسهیل تصمیم‌گیری بدون وقفه، و بهبود بازرسی‌های ایمنی، بیشترین تأثیر مستقیم را بر مؤلفه‌های کلیدی فرهنگ ایمنی ساخت‌وساز اعمال می‌کنند. در مقابل، سایر مزایا - از جمله ارتقای شناسایی مخاطرات، بهبود اثربخشی آموزش ایمنی، تصویرسازی مخاطرات، و گزارش‌دهی حوادث و شبه‌حوادث - اثرات غیرمستقیم قوی‌ای را نشان دادند؛ به‌طوری‌که تأثیر خود را از طریق مسیرهای علی پیچیده و حلقه‌های بازخورد تقویتی درون سیستم فرهنگ ایمنی تقویت کردند.

شبیه‌سازی‌های پویا مبتنی بر سناریو نشان داد که فعال‌سازی هدفمند خوشه‌های مزایای BIM-IoT می‌تواند مؤلفه‌های کلیدی فرهنگ ایمنی، از جمله انطباق مقرراتی، شناسایی مخاطرات، آمادگی ایمنی، و تعهد مدیریت را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای ارتقا دهد. با این حال، نتایج همچنین نشان می‌دهند که برخی عوامل روان‌شناختی و مرتبط با ویژگی‌های شخصیتی، صرفاً از طریق مداخلات فناورانه کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ موضوعی که ضرورت ادغام راهبردهای رفتاری و فرهنگی در کنار نوآوری‌های دیجیتال را برجسته می‌سازد. نتایج بر لزوم اتخاذ یک راهبرد کل‌نگر و چندبُعدی تأکید می‌کنند؛ راهبردی که مداخلات فناورانه، سازمانی و رفتاری را با هم ادغام کند تا ارتقای پایدار فرهنگ ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز محقق شود.

مراجع

- Adaku, E., Ankrah, N. A., & Ndekugri, I. E. (2021). Design for occupational safety and health: A theoretical framework for organisational capability. *Safety Science*, 133, 105005. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105005>
- Amiri, M., Saghatforoush, E., & Laryea, S. (2024). Using dynamic BIM to improve construction safety culture. In Proceedings of the WABER SuDBE 2024 Conference (pp. 1205–1217).
- Andi, A. (2008). Construction workers perceptions toward safety culture. *Civil Engineering Dimension*, 10(1), 1–6.
- 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.
- Azhar, S. (2017). Role of visualization technologies in safety planning and management at construction jobsites. *Procedia Engineering*, 171, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.329>
- Bansal, V. K. (2011). Application of geographic information systems in construction safety planning. *International Journal of Project Management*, 29(1), 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.01.007>

- Bisbey, T. M., Kilcullen, M. P., Thomas, E. J., Ottosen, M. J., Tsao, K., & Salas, E. (2021). Safety culture: An integration of existing models and a framework for understanding its development. *Human Factors*, 63(1), 88–110.
- Blockley, P. D. (1996). Process re-engineering for safety. In *Risk management in civil, mechanical and structural engineering: Proceedings of the conference organized by the health and safety executive in co-operation with the institution of civil engineers and held in London on 22 February 1995* (pp. 51–66). Thomas Telford.
- Breckenridge, J., & Jones, D. (2009). Demystifying theoretical sampling in grounded theory research. *Grounded Theory Review*, 8(2), 113–126.
- 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.
- Chen, L., & Zhao, X. (2024). The impact of digital leadership on safety performance: A moderated mediation model. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 30(4), 1179–1187.
- 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.
- Cheung, W. F., Lin, T. H., & Lin, Y. C. (2018). A real-time construction safety monitoring system for hazardous gas integrating wireless sensor network and building information modelling technologies. *Sensors*, 18(2), 436.
- Choudhry, R. M., Fang, D., & Mohamed, S. (2007). The nature of safety culture: A survey of the state-of-the-art. *Safety Science*, 45(10), 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.09.003>
- Choudhry, R. M., & Masood, R. (2011, August). Assessment of multi-level of safety climates of working groups to drive perceptual unification. In *CIB W99 International Conference on Prevention: Means to the End of Injuries, Illnesses, and Fatalities*, August (pp. 24–26).
- Christoforou, A., & Andreou, A. (2016). A framework for static and dynamic analysis of multi-layer fuzzy cognitive maps. *Neurocomputing*, 232, 177–192.
- Constantinides, M., & Quercia, D. (2022, June). The future of hybrid meetings. In *Proceedings of the 1st Annual Meeting of the Symposium on Human-Computer Interaction for Work* (pp. 1–6).
- Cooper, M. (2000). Towards a model of safety culture. *Safety Science*, 36(2), 111–136. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00035-7)
- 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.
- Ding, L. Y., Zhou, C., Deng, Q. X., Luo, H. B., Ye, X. W., Ni, Y. Q., et al. (2013). Real-time safety early warning system for cross

passage construction in Yangtze riverbed metro tunnel based on the internet of things. *Automation in Construction*, 36, 25–37.

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, 5539796.

Fang, D., Chen, Y., & Wong, L. (2006). Safety climate in construction industry: A case study in Hong Kong. *Journal of Construction*

Engineering and Management, 132(5), 573. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:6\(573\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:6(573))

Fang, D., & Wu, H. (2013). Development of a safety culture interaction (SCI) model for construction projects. *Safety Science*, 57,

138–149. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.02.003>

Forteza, F. J., Carretero-Gómez, J. M., & Sesé, A. (2020). Safety in the construction industry: Accidents and precursors. *REV*

Construction, 19(2), 271–281.

Geller, E. S. (1994). Ten principles for achieving a total safety culture. *Professional Safety*, 39(9), 18.

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

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

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).

Guldenmund, F. (2000). The nature of safety culture: A review of theory and research. *Safety Science*, 34(1-3), 215–257.

[https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00014-X)

Hale, A. (2000). Culture's confusions. *Safety Science*, 34, 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00003-5)

Hobbs, B. F., Ludsins, 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.

Hong, Y., & Guo, F. (2025). A framework of BIM-IoT application in construction projects through multiple case study approach.

Journal of Building Design and Environment, 3(1), 202438–202438.

Hu, X., Olgun, G., & Assaad, R. H. (2024). An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring

using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis. *Expert Systems With Applications*, 252, 124204.

Jiang, H., & Jiang, A. (2024). An integrated system for tunnel construction safety control based on BIM-IoT-PSO. *Journal of Civil*

Structural Health Monitoring, 14(2), 269–284.

Khalid, U., Sagoo, A., & Benachir, M. (2021). Safety management system (SMS) framework development: Mitigating

the critical safety factors affecting health and safety performance in construction projects. *Safety Science*, 143, 105402.

<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105402>

- 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.
- Kleijnen, J. P. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1), 145–162.
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *Int J Man Mach Stud*, 24(1), 65–75.
- Laurent, J., Chmiel, N., & Hansez, I. (2020). Personality and safety citizenship: Safety motivation, safety knowledge, or neither? Institute of Work Psychology (IWP) International Conference.
- Li, H., Lu, M., Chan, G., & Skitmore, M. (2015). Proactive training system for safe and efficient precast installation. *Automation in Construction*, 49, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.010>
- Liang, Y., & Liu, Q. (2022). Early warning and real-time control of construction safety risk of underground engineering based on building information modelling and internet of things. *Neural Computing & Applications*, 1–10.
- Lingard, H., & Rowlinson, S. (2005). *Occupational health and safety in construction management*.
- Lopez, C., & Salmeron, J. L. (2014). Dynamic risks modelling in ERP maintenance projects with FCM. *Information Science*, 256, 25–45.
- Manzoor, B., Charef, R., Antwi-Afari, M. F., Alotaibi, K. S., & Harirchian, E. (2025). Revolutionizing construction safety: Unveiling the digital potential of building information modeling (BIM). *Buildings*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/buildings15050828>
- Mohammed, B. H., Safie, N., Sallehuddin, H., & Hussain, A. H. B. (2020). Building information modelling (BIM) and the internet-ofthings (IoT): A systematic mapping study. *IEEE Access*, 8, 155171–83. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016919>
- Mohammed, B. H., Sallehuddin, H., Yadegaridehkordi, E., Safie Mohd Satar, N., & Hussain, A. H. B., & Abdelghany Mohamed, S. (2022). Nexus between building information modeling and internet of things in the construction industries. *Applied Sciences*, 12(20), 10629.
- Mohandes, S. R., Sadeghi, H., Mahdiyar, A., Durdyev, S., Banaitis, A., Yahya, K., et al. (2020). Assessing construction labours' safety level: A fuzzy MCDM approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(2), 175–188. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.11926>
- Naji, G. M. A., Isha, A. S. N., Alazzani, A., Saleem, M. S., & Alzoraiki, M. (2022). Assessing the mediating role of safety communication between safety culture and employee's safety performance. *Frontiers in Public Health*, 10, 840281.
- Olubukola, C. I., & Mewomo, M. C. (2022). Enhancing digital transformation in construction health and safety: A systematic review of the current state of the art. In *Thirty-Eighth Annual Conference* (p. 266).

- Olugboyega, O., & Windapo, A. (2019). Building information modeling—enabled construction safety culture and maturity model: A grounded theory approach. *Frontiers in Built Environment*, 5, 35. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00035>
- 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, 8839865.
- 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).
- Peláez, C. E., & Bowles, J. B. (1996). Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. *Information Science*, 88(1-4), 177–199.
- Qian, H. (2021). Design of tunnel automatic monitoring system based on BIM and IoT. *Journal of Physics: Conference Series*, 1982(1), 012073.
- Ravasan, A. Z., & Mansouri, T. (2014). A FCM-based dynamic modelling of ERP implementation critical failure factors. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 10(1), 32–52.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents* (Vol. 6). Ashgate.
- Riaz, Z., Arslan, M., Kiani, A. K., & Azhar, S. (2014). CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces. *Automation in Construction*, 45, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.010>
- Riaz, Z., Parn, E. A., Edwards, D. J., Arslan, M., Shen, C., & Pena-Mora, F. (2017). BIM And sensor-based data management system for construction safety monitoring. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 15(6), 738–753.
- Rodriguez-Repiso, L., Setchi, R., & Salmeron, J. L. (2007). Modelling IT projects success: Emerging methodologies reviewed. *Technovation*, 27(10), 582–594.
- Sakr, M., & Sadhu, A. (2023). Visualization of structural health monitoring information using internet-of-things integrated with building information modelling. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(3), 100053.
- Salguero-Caparrós, F., Pardo-Ferreira, M. D. C., Martínez-Rojas, M., & Rubio-Romero, J. C. (2020). Management of legal compliance in occupational health and safety: A literature review. *Safety Science*, 121, 111–118.
- 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.
- Scianna, A., Gaglio, G. F., & La Guardia, M. (2022). Structure monitoring with BIM and IoT: The case study of a bridge beam model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(3), 173.
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, 101, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>

- Teizer, J., Cheng, T., & Fang, Y. (2013). Location tracking and data visualization technology to advance construction ironworkers' education and training in safety and productivity. *Automation in Construction*, 35, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.03.004>
- Teizer, J., Wolf, M., Golovina, O., Perschewski, M., Propach, M., Neges, M., & König, M. (2017). Internet of things (IoT) for integrating environmental and localization data in building information modelling (BIM). ISARC Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 34).
- Wang, J., Lim, M. K., Wang, C., & Tseng, M. L. (2021). The evolution of the internet of things (IoT) over the past 20 years. *Computers & Industrial Engineering*, 155, 107174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107174>
- 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.
- Yaman, D., & Polat, S. (2009). A fuzzy cognitive map approach for effect-based operations: An illustrative case. *Information Science*, 179(4), 382–403.
- Yegnanarayana, B. (2009). *Artificial neural networks*. PHI Learning.
- Ying, D., Cheong, C. B., & Zou, Y. (2021). Engineering safety early warning platform based on BIM and internet of things. *Journal of Physics: Conference Series*, 1744(2), 022002.
- Zhang, M., Cao, T., & Zhao, X. (2017). Applying sensor-based technology to improve construction safety management. *Sensors*, 17(8), 1841. <https://doi.org/10.3390/s17081841>
- Zhang, Y., & Bai, L. (2015). Rapid structural condition assessment using radio frequency identification (RFID) based wireless strain sensor. *Automation in Construction*, 54, 1–11.
- 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.
- Zou, P. X. W., Hinze, J., & Mahmud, S. H. (2007, August). Shaping a zero-incident construction safety culture. In Proceedings of the 12th International Research Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate (pp. 8–13).