Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Semi-Automated Lifecycle Safety Risk Assessment of Construction Projects: A Preventive Approach Based on Building Information Modeling

Amirhossein Ostovari[1], Sayyed Vahid Faghihi[2] and Seyed Hossein Hosseini Nourzad[1*]

[1]School of Architecture, Department of Construction and Project Management, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* corresponding author:(ahnourzad@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 23 November 2024

Revised: 28 February 2025

Accepted: 8 March 2025

Keywords:

Safety management,
risk assessment,
project lifecycle,
semi-automation,
building information modeling (BIM).

Abstract

Due to its complex and multifaceted nature, the construction industry has always faced many safety challenges. Safety management is critical in countries like Iran, which face limitations regarding training, equipment, and regulations. This article aims to provide a comprehensive review of safety management in the construction industry and provide new approaches to improve it. For this purpose, first, the existing literature in the field of safety management in construction projects is reviewed, and then the challenges in this field are identified and analyzed. In this research, using historical accident database data and in the framework of building information modeling, a semi-automatic approach to identify and evaluate safety risks in the design phase has been developed. To achieve this goal, a plugin was developed for Autodesk Revit, which, by analyzing building components in 3D models, identifies different risks and classifies them based on the severity of the results they create in varying levels of risk (high, medium, and low). Also, the plugin automatically suggests appropriate preventive measures by leveraging OSHA standards and helps users manage risks and prevent them from occurring. In this way, a comprehensive risk assessment process is implemented from the stage of identification and evaluation to the provision of control measures and documentation on these incidents. The results of this research show that by using new technologies, such as building information modeling and implementing preventive strategies in the design phase, it is possible to improve the safety level in construction projects significantly.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Ostovari, A.H, Faghihi, S.V. and Hosseini Nourzad, S.H. 2026. Semi-Automated lifecycle safety risk assessment of construction projects: a preventive approach based on building information modeling, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 85-96. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65673.3388

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

ارزیابی نیمه‌خودکار ریسک‌های ایمنی چرخه‌ی عمر پروژه‌های ساخت با رویکردی پیشگیرانه مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

امیرحسین استواری[۱]، سیدوحید فقیهی[۲] و سیدحسین حسینی نورزاد*[۱]

[۱] گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده‌ی معماری، دانشگاه تهران

[۲] گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

*نویسنده مسئول (hnourzad@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

واژگان کلیدی:

مدیریت ایمنی،

ارزیابی ریسک،

چرخه‌ی عمر پروژه،

نیمه‌خودکارسازی،

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان.

چکیده

صنعت ساخت‌وساز، به‌دلیل پیچیدگی‌های خاص خود، سبب اهمیت ویژه‌ی مدیریت ایمنی است. پژوهش حاضر، به بررسی مدیریت ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز و ارائه‌ی رویکردهای بهبود پرداخته است. نوشتار حاضر، با هدف توسعه‌ی یک افزونه‌ی نرم‌افزاری در بستر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به‌منظور شناسایی و ارزیابی خودکار ریسک‌های ایمنی در مدل‌های سه‌بُعدی ساختمان انجام شده است. در ابتدا، داده‌های مربوط به حوادث ساختمانی و عمدتاً با کاربری‌های مسکونی و عمومی طی چند سال اخیر جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. سپس، براساس استاندارد OSHA و مفاهیم پیشگیری در زمان طراحی، الگوریتم‌های لازم برای شناسایی خطرها و طبقه‌بندی آن‌ها براساس شدت نتایج ریسک توسعه یافته‌اند. افزونه‌ی توسعه‌یافته با استفاده از یک نمونه‌ی موردی آزمایش و ارزیابی شده و نتایج نشان داده است که ابزار مذکور قادر است تا حد دقیقی خطرهای مختلف را شناسایی کند و پیشنهادهای پیشگیرانه ارائه دهد. پژوهش حاضر می‌تواند به بهبود ایمنی در پروژه‌های ساختمانی و کاهش حوادث کمک کند.

۱. مقدمه

به رغم پیشرفت‌های گسترده در زمینه‌ی ساخت‌وساز و همچنین ظهور تکنولوژی‌های جدید، صنعت ساخت‌وساز هنوز هم از جمله صنایع پر خطر با میزان تلفات بالاست.[۱] به‌علاوه، یکی از مهم‌ترین معیارها در مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز، مدیریت ایمنی پروژه است و عمده‌ی تلاش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، برای افزایش ایمنی کارگران و همچنین ساکنان ساختمان‌ها بوده است.[۲] اما کماکان نرخ حوادث رخ داده در فازهای مختلف چرخه‌ی عمر پروژه‌ها بالاست و حوادث مذکور بار اجتماعی- اقتصادی قابل‌توجهی را برای کارفرمایان، کارکنان، و کل جامعه به همراه دارد. علی‌رغم اینکه دولت‌ها و سازمان‌ها در سراسر جهان توجه مستمری نسبت به ایجاد یک محیط کاری عاری از آسیب و بیماری و همچنین نسبت به محیط و ساختمان‌های ساخته‌شده دارند، حوادث ساختمانی بسیاری همچنان رخ می‌دهند.[۳]

می‌توان گفت شناسایی و ارزیابی خطرها پیش از وقوع آن‌ها، یکی از فرآیندهای کلیدی در مدیریت ایمنی سایت‌های ساخت‌وساز محسوب می‌شود.[۴] از طرفی، طراحان فقط براساس داده‌های امکان‌سنجی و نیازهای مالک، ساختمان را طراحی می‌کنند و اهمیت ساخت‌وساز ایمن را نادیده می‌گیرند یا بندرت انجام می‌دهند، که این امر روند ساخت‌وساز را پیچیده می‌کند و خطر وقوع حوادث ایمنی را افزایش می‌دهد.[۵] به همین منظور برای استفاده‌ی مؤثرتر، مفهوم پیشگیری در زمان طراحی[۱] توصیه شده است، که ضمن شناسایی و ارائه‌ی اقدام‌های پیشگیرانه‌ی مؤثر، ارزیابی آثار تصمیم‌های طراحی در مبحث ایمنی نیز دیده شود، که این امر نیز با مطالعه و انجام پژوهش روی داده‌های تجربی می‌تواند صورت گیرد.[۶] همچنین استفاده از رویکرد خودکارسازی و بهره‌گیری از آن در فاز طراحی برای شناسایی خطرها و درک اثر آن‌ها، می‌تواند هم دقت فرایند مذکور را افزایش دهد و هم می‌تواند کاستی‌های موجود در روش‌های سنتی را شناسایی و ارزیابی خطرها، که عمدتاً متکی به تجربیات فرد مسئول در این امر است، را پوشش دهد و باعث سرعت‌بخشیدن به روند شناسایی و ارزیابی برای طراح یا فرد مسئول در این زمینه شود. به‌طورکلی با این رویکرد می‌توان روشی هدفمند برای فرایند ارزیابی ریسک‌های حوادث در حین طراحی ارائه کرد.[۷]

با پیشرفت مفهوم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، پژوهش‌های متعددی به بررسی مدیریت ایمنی در پروژه‌های ساخت‌وساز پرداخته و نشان داده‌اند که تصمیم‌های اتخاذشده در مراحل طراحی، آثار مستقیمی در ایمنی پروژه‌های

[1] Prevention Through Design

استناد به این مقاله:

استواری، امیرحسین، فقیهی، سیدوحید و حسینی نورزاد، سیدحسین، ۱۴۰۴. ارزیابی نیمه‌خودکار ریسک‌های ایمنی چرخه‌ی عمر پروژه‌های ساخت با رویکردی پیشگیرانه مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۸۵-۹۶. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65673.3388

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

ساخت‌وساز دارند. از سال ۲۰۱۷ میلادی، روند پژوهش‌های مرتبط با مدیریت ایمنی و روش‌های جدید برای به‌کارگیری آن شتاب بیشتری به خود گرفته است و می‌توان گفت که از مسائل مهم حوزه‌ی مدیریت ساخت محسوب می‌شود و لزوم پژوهش بیشتر و نتایج مطمئن‌تر را یادآور می‌شود.[۸]

با وجود مطالعات گسترده در حوزه‌ی مدیریت ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز، ارزیابی و شناسایی ریسک‌های ایمنی در فاز طراحی همچنان نیازمند توجه و تلاش‌های بیشتری است. بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه‌ی مذکور بر استفاده از نظرهای متخصصان یا روش‌های پرسشنامه‌ای برای جمع‌آوری داده‌ها متمرکز بوده‌اند. در پژوهش حاضر، تلاش بر آن است که با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی مرتبط با حوادث ساختمانی، یک فرآیند جامع‌تر و کارآمدتر برای ارزیابی و شناسایی ریسک‌های ایمنی ارائه شود. همچنین بیشتر پژوهش‌های پیشین به یک نوع خاص از خطرهای ایمنی پرداخته و رویکرد جامعی ارائه نکرده‌اند. به‌علاوه، ابزارهای توسعه داده‌شده‌ی موجود نیز غالباً انعطاف‌پذیری کافی ندارند و نیاز به کدها یا تنظیم‌های اضافی دیگر دارند. خلأ دیگر موجود در مطالعات پیشین نیز این است که یا اشاره‌ای به پیشنهادهای پیشگیرانه‌ی قابل‌اعمال در مراحل اولیه‌ی طراحی نکرده یا در صورت وجود، اغلب عمومی بوده و به موارد موردتوجه در استانداردهای بین‌المللی توجهی نداشته‌اند. با توجه به خلأ موجود، هدف اصلی از تعریف و پیشبرد پژوهش حاضر، پیشنهاد یک رویکرد مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان است، که با نیمه‌خودکارسازی فرایند ارزیابی و شناسایی خطرهای ایمنی، نه فقط از منظر شناسایی خود حادثه و خطر، بلکه با درنظرگرفتن اقدام‌های پیشگیرانه و کنترلی حوادث ثبت‌شده به طراح در ارائه‌ی طراحی مناسب و هوشمندانه‌تر از منظر ایمنی چرخه‌ی عمر پروژه‌های ساخت کمک کند و بتواند از این طریق اثر ریسک‌ها را کاهش دهد. نوآوری پژوهش حاضر در ارائه‌ی ابزاری جامع و یکپارچه بوده است، که علاوه‌بر شناسایی خطرها، اقدام‌های پیشگیرانه‌ی کاربردی و استاندارد را نیز ارائه داده است. این رویکرد نه فقط امکان مدیریت بهتر ایمنی در پروژه‌های ساختمانی را فراهم می‌کند، بلکه وابستگی به تحلیل‌های دستی را به میزان کمینه می‌رساند.

۲. مرور ادبیات پیشین

به‌طورکلی، مفهوم کمینه‌سازی ریسک‌های ایمنی پروژه‌های ساخت‌وساز در مراحل اولیه‌ی یک پروژه به‌خصوص در فاز طراحی در دو دهه‌ی گذشته بسیار موردتوجه قرار گرفته و مشخصاً از سال ۲۰۰۷، با ابداع مفهومی به نام پیشگیری از طریق طراحی توسط NIOSH[1] بسیار معروف‌تر نیز شده است.[۹] مطالعات متعددی تلاش کرده‌اند تا رابطه‌ی بین ایمنی ساخت‌وساز و طراحی را کمّی‌سازی کنند. برای مثال، بهم[2] (۲۰۰۵)، عنوان کرده است که اگر ایمنی سایت در طول طراحی در نظر گرفته می‌شد، می‌توانست از ۴۲٪ از حوادث مرگبار بررسی‌شده جلوگیری کند یا از شدت صدمات کاسته شود.[۱۰] همچنین استفاده از فناوری‌های نوین نیز روند افزایشی در مطالعات داشته است. از منظر برنامه‌ریزی ایمنی سایت، استفاده از داده‌های اسکن لیزری به شناسایی نزدیکی خطر از جمله اندازه‌گیری نقاط کور برای اپراتورهای لودر،[۱۱] و همچنین جرثقیل‌ها،[۱۲] کمک می‌کند. علاوه‌بر این، از دستگاه‌های پوشیدنی برای درک و نظارت بر وضعیت بدن کارگران ساختمانی استفاده و مشخص شد که دستگاه‌های پوشیدنی، پتانسیل بالایی برای جلوگیری از اختلال‌های عضلانی مرتبط با کار و همچنین خطر سقوط از ارتفاع دارند.[۱۳] از سوی دیگر، توسعه‌ی نرم‌افزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، نظیر نرم‌افزار رویت، امکان ایجاد طراحی دقیق، و تجسم پروژه‌های ساختمانی را فراهم کرد. امروزه، فرآیند دیجیتالی‌سازی پروژه‌ها به شدت با توسعه‌ی مفهوم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مرتبط است.[۱۴] سورمن و ایسا[3] (۲۰۰۹)، به بررسی شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI)[4] و تأثیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان روی آن‌ها پرداخته‌اند، که استفاده از آن در حوزه‌ی ایمنی و هزینه‌ها مهم‌ترین بوده و نتایج نشان داده است که برخی از مالکان و ذینفعان، مزایای ایمنی یا از دست‌دادن ساعت‌های کار در پروژه‌های ساختمانی را درک نمی‌کنند.[۱۵] مارتینز[5] و همکاران (۲۰۱۸)، به‌طورکلی پنج حوزه‌ای را که مدیران ایمنی برای ارتقاء ایمنی پروژه‌ها از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌توانند استفاده کنند، شامل طراحی ایمن‌تر پروژه‌ها، برنامه‌ریزی ایمنی پروژه‌ها، شامل: تحلیل خطر فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی‌های پیش از اجرای هر فعالیت، آموزش نکات و مسائل ایمنی به کارگران، بررسی نحوه‌ی وقوع حوادث در پروژه‌ها، و بهره‌برداری و نگهداشت ایمن‌تر پروژه‌ها بررسی کرده‌اند.[۱۶]

از آنجایی که مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، یک فناوری غنی از اطلاعات است، که در فرایند طراحی استفاده می‌شود، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای مدیریت ایمنی در مرحله‌ی برنامه‌ریزی پیش از شروع فعالیت و همچنین در امر نظارت بر اجرای صحیح فعالیت در جهت کاهش ریسک‌های ایمنی در مرحله‌ی ساخت استفاده شود. برای مثال، کولینز[6] و همکاران (۲۰۱۴)، در بررسی تأثیر مدل‌سازی چهاربُعدی در کمک به مدیران ایمنی برای اجرای اقدام‌های پیشگیرانه در اجرای فعالیت‌های مرتبط با اجرای داربست پروژه‌های عمرانی از نظرهای خبرگان و عوامل خطرهای ایمنی همراه با مدل اطلاعات ساخت، که علاوه‌بر مدل سه‌بُعدی شامل زمان و توالی اجرای فعالیت‌هاست، استفاده کرده‌اند.[۱۷] همچنین ملکی‌تبار و همکاران (۲۰۱۶)، روشی را برای استفاده از قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در جهت شناسایی عوامل ایجادکننده‌ی خطرها و ریسک‌های ایمنی در مرحله‌ی طراحی و پیش از شروع فرایند ساخت پیشنهاد کرده و بیان کرده‌اند که ۴۰٪ از حوادث ایمنی منجر به مرگ و میر در صنعت ساخت را می‌توان در مرحله‌ی طراحی پیشگیری و عوامل خطرآفرین را در این مرحله شناسایی کرد. همچنین ایشان با مطالعه‌ی گزارش حادثه از سه منبع مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که رعایت‌نکردن قوانین و مقررات ایمنی یگانه عامل ایجادکننده‌ی خطر نیست.[۱۸] شرایط کارگاه و محیط و همچنین پارامترهای طراحی، اطلاعات ارزشمندی را از چگونگی تغییر ریسک‌ها به‌دست می‌دهند؛ که می‌توان از آن‌ها برای شناسایی ریسک‌ها و عوامل ایجادکننده‌ی خطر استفاده کرد تا با درنظرداشتن عوامل مذکور، راهکار درستی را برای حذف و یا کاهش تأثیر عوامل خطر اتخاذ کرد. طی‌کردن این فرایند باعث کاهش حوادث ایمنی در پروژه‌های عمرانی خواهد شد. برای غلبه بر معایب قابل‌توجه نظارت ایمنی دستی، چند فناوری ارزیابی پیشنهاد شده است. هدف از به‌کارگیری فناوری‌های ارزیابی ایمنی، فعال‌کردن مشاهده‌های خودکار، مستمر، و دقیق از شرایط سایت ساخت‌وساز از طریق ارتباط بی‌درنگ اطلاعات زمینه‌ای است.[۱۹]

[1] National Institute for Occupational Safety and Health
[2] Behm
[3] Suermann & Issa
[4] Key Performance Indicators
[5] Martínez
[6] Collins

جدول ۱. خلاصه‌ی مهم‌ترین مطالعات پیشین در ارزیابی خودکار ریسک‌های ایمنی.

Objectives and Methods of Automated Risk Assessment	Previous Studies
Development of an automated rule-checking system in BIM focusing on fall hazards in the early design phase.	Zhang et al. [26]
Development of a BIM-based plugin for automated quantitative safety risk assessment to assist designers in selecting safer design alternatives.	Lu et al. [23]
Automated risk assessment in underground foundation operations by developing a BIM-based plugin using logical relationships between safety incidents and the design process.	Xiao et al. [24]
Automated identification and analysis of construction-related incidents using BIM for safety planning.	Singh et al. [25]
Evaluating the impact of height increase and surface material type for automated fall hazard assessment using BIM and image processing.	Rasoulimanesh et al. [22]
Development of an automated BIM-based system for identifying collision-related safety hazards.	Heidari et al. [27]

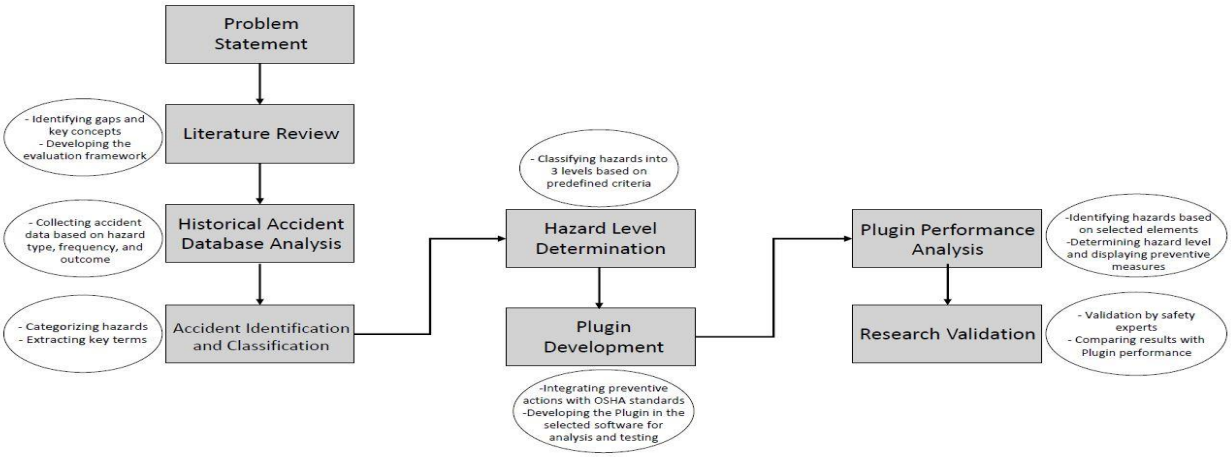
یکی از چالش‌های اساسی در پیاده‌سازی اتوماسیون، نیاز به اطلاعات دقیق برای دستیابی به نتایج بهینه است؛ که موجب شده است پذیرش اتوماسیون در صنعت ساخت‌وساز به کُندی پیش برود.[۲۰] با این حال، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند بر محدودیت‌های اخیر غلبه کند و با ارائه‌ی داده‌های دقیق و جامع به‌عنوان ورودی برای فناوری‌های اتوماسیون، آن‌ها را در حوزه‌ی ساخت‌وساز فعال کند. اتوماسیون فرآیندهای مرتبط با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به معنای استفاده از برنامه‌نویسی برای بازتولید جریان‌های کاری در ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان است، به گونه‌ای که بدون نیاز به مداخله‌ی کاربر، کارهای تکراری صورت گیرد و کیفیت فرآیندها از طریق کاهش خطاهای انسانی در حین ساده‌سازی فرآیندهای ذکرشده تضمین شود.[۲۱] رسولی‌منش و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر عامل افزایش ارتفاع و جنس سطح زیرین را برای ارزیابی خودکار خطر سقوط از ارتفاع با استفاده از محیط مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و روش پردازش تصویر بررسی کرده‌اند، تا پیش‌بینی خطرها و ریسک‌های حادثه‌ی سقوط از ارتفاع دقیق‌تر صورت گیرد و تمامی نقاط حادثه‌خیز شناسایی و رتبه‌بندی شوند.[۲۲] با این حال، اگرچه با جمع‌آوری یک مجموعه داده‌ی مناسب و اعمال الگوریتم توانسته‌اند پیش‌بینی انجام دهند؛ اما فقط به یک نوع خاص حادثه بسنده شده است.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران توانسته‌اند با توسعه‌ی افزونه‌های مختلف مرتبط با ایمنی و مدیریت آن، پیشرفت‌های زیادی را برای پیشگیری و یا حذف ریسک‌ها در مرحله‌ی طراحی به‌دست آورند. برای مثال، در پژوهشی از پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی برای تشخیص خطرهای مرتبط استفاده شده و افزونه‌ای که مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را با داده‌های ریسک ایمنی مرتبط می‌کند، در نرم‌افزار رویت ایجاد کرده‌اند، که می‌تواند به‌طورخودکار ریسک ایمنی ساخت‌وساز را محاسبه کند تا به معماران و طراحان سازه کمک کند تا جایگزین‌های طراحی را سریع انتخاب کنند؛ اما در پژوهش مذکور، نیز راهکار یا پیشنهاد پیشگیرانه ارائه نشده و فقط محاسبه‌ی کمّی ریسک مدنظر بوده است.[۲۳] در پژوهشی دیگر، خطرهایی برای پروژه‌های زیرزمینی استخراج شده است. سپس براساس قوانین طراحی و بازنگری در پایگاه دانش و بهبود روش کمّی‌سازی ریسک‌ها، خطرهای ایمنی ساخت‌وساز زیرزمینی را کمّی ساخته و درنهایت، از فناوری توسعه‌ی افزونه‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای تحقق بررسی خودکار و تجسم خطرهای ایمنی استفاده کرده‌اند، اما تحلیل‌ها و بررسی‌های مذکور نیز فقط برای یک نوع عملیات بسیار خاص طراحی و اجرا شده‌اند.[۲۴] در همین زمینه در کشور هند، طبق پایگاه داده‌های خطرهای ساخت‌و ساز آن، ارزیابی ریسک با استفاده از روش تحلیل حالت و اثر شکست برای شناسایی و رتبه‌بندی خطرهای عمده و ریسک‌های مرتبط استفاده و افزونه‌ی توسعه‌یافته در پژوهش مذکور برای ایجاد برنامه‌ی ایمنی همراه با اقدام‌های ایمنی توسعه داده شده است.[۲۵] عمده‌ی پژوهش‌ها در سال‌های قبل‌تر نیز بیشتر بر تجزیه‌وتحلیل یک خطر خاص متمرکز بوده‌اند. برای مثال ژانگ[۷] و همکاران (۲۰۱۳)، الگوریتم‌هایی ارائه کرده‌اند که به‌طورخودکار یک مدل ساختمان را برای شناسایی تجزیه‌وتحلیل می‌کند و خطرهای ایمنی و اقدام‌های پیشگیرانه را به کاربران برای خطرهای مرتبط با سقوط پیشنهاد می‌دهند.[۲۶] همچنین در همین زمینه، حیدری و همکاران (۲۰۲۱)، یک سیستم خودکار مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای شناسایی عوامل خطرآفرین مربوط به حادثه‌ی برخورد توسعه داده‌اند.[۲۷] خلاصه‌ی مهم‌ترین مطالعات پیشین در ارزیابی خودکار ریسک‌های ایمنی در جدول ۱ ارائه شده است.

۳. روش‌شناسی

در مرحله‌ی اول پژوهش حاضر از یک پایگاه داده‌ی تاریخی و نتایج حاصل از تحلیل آن در پژوهش کاشانی و نورزاد (۲۰۲۱)،[۲۸] استفاده شده است؛ که ایشان برای دستیابی به اطلاعات موردنیاز به بیمه‌ی مرکزی ایران در شهر تهران مراجعه کرده و به مطالعه‌ی پرونده‌های حوادث مرتبط با ساختمان پرداخته و به ویژگی‌ها و ابعاد مختلف هر حادثه دست یافته‌اند. برای هر حادثه توضیحاتی ثبت شده و اطلاعات موردنیازی که جمع‌آوری شده است، شامل مواردی چون نوع حادثه، نوع فعالیت در هنگام وقوع حادثه، عوامل فردی یا محیطی ایجادکننده‌ی حادثه، و نتیجه‌ی حادثه بوده است. جامعه‌ی آماری پژوهش حاضر نیز شامل حوادث اتفاق افتاده در پروژه‌های ساختمانی در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ در کشور ایران بوده و ۵۱۰ حادثه‌ی ثبت‌شده در بیمه‌ی مرکزی بررسی شده است. در شکل ۱، ساختار پژوهش مشاهده می‌شود.

[7] Zhang



شکل ۱. ساختار کلی پژوهش حاضر.



شکل ۲. فرایند ارزیابی ریسک.

در مرحله‌ی دوم، پیشینه‌ی مفاهیم اصلی مرتبط با موضوع پژوهشی، در پژوهش‌های پیشین بررسی و با عنوان مرور ادبیات پیشین ارائه شده است. این مرحله به‌عنوان پیش‌نیاز سایر مراحل و برای آشنایی با مفاهیم و بیان شفاف‌تر مسئله و روشن‌ترساختن شکاف پژوهشی ضروری است.

در مرحله‌ی سوم، براساس نتایج مرحله‌ی قبل، چارچوب و راهبرد کلی برای توسعه‌ی یک افزونه در بستر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان تعیین شده است؛ که شامل تحلیل فعالیت‌های منجر به هر حادثه و مرتبط‌ساختن آن با اجزاء سازه‌ای شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار و همچنین استخراج مؤثرترین اقدام‌های پیشگیرانه برای هر حادثه طبق استانداردهای بین المللی بوده است.

در مرحله‌ی چهارم، نیز افزونه‌ی توسعه داده‌شده روی یک نمونه‌ی موردی اجرا شده است، تا طبق معیارهای تعیین‌شده، چگونگی عملکرد آن مشاهده و جمع‌بندی شود و همچنین با استفاده از نظرهای متخصصان ایمنی و مقایسه‌ی نتایج تحلیل آن‌ها با عملکردی که افزونه در فرایند ارزیابی دارد، پژوهش حاضر اعتبارسنجی شده است. در شکل ۲، فرایند ارزیابی ریسک، که پژوهش نیز بر مبنای آن متناسب‌سازی شده است، را می‌توان مشاهده کرد.

در پژوهش حیدری و همکاران،[۲۷] جهت تجزیه‌وتحلیل حوادث رخ داده، متناسب با نوع حادثه به دسته‌بندی حوادث پرداخته شده است. به این صورت که تمامی حوادث رخ داده از یک جنس در یک گروه قرار گرفته و نام‌گذاری شده‌اند. دسته‌بندی حوادث طبق فراوانی آن‌ها بیانگر این موضوع است که بیشترین آمار حوادث اتفاق‌افتاده در رتبه‌ی اول مربوط به حادثه‌ی سقوط و

Hazards	Frequency
Fall from height	161
Falling objects	105
Exposure to lethal gases	60
Caught-in/between	47
Fire	35
Elevator and lift accidents	34
Slip and trip	25
Struck-by	17
electrocution	16
Machinery-related accidents	6
handtool accidents	4

شکل ۳. دسته‌بندی حوادث به تفکیک فراوانی.

پس از آن ریزش آوار و مصالح یا همان برخورد بوده است. نتایج آنالیز و دسته‌بندی حوادث به تفکیک فراوانی در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

اکنون در این گام نیاز است تا با بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر حوادث مذکور و فعالیت مرتبط با آن، نوعی رابطه‌ی نسبی با اجزاء سازه‌ای درگیر در آن مورد استخراج شود. برای دستیابی به هدف مذکور، سعی بر آن شده است تا مجموعه‌ای از واژگان کلیدی موجود در توصیف فعالیت مرتبط به هر حادثه استخراج شود. برای مثال، در خطر سقوط از ارتفاع، کلماتی مانند لبه، بتن‌ریزی سقف، نما، پنجره، و اجرای اسکلت پرتکرارترین بوده‌اند، که می‌توان از آن‌ها استفاده و تا حد زیادی اجزاء ساختمانی مرتبط با آن‌ها را مشخص کرد.

از خطرهای دیگر نیز واژگان کلیدی مشابه و یا مختلفی استخراج شده است. برای حادثه‌ی برخورد، کلماتی همچون دیوار، بازشوها، تأسیسات مکانیکی، عملیات نما، و سقف‌ها بیشترین کلمات بوده‌اند. البته برای حوادثی مانند سقوط از ارتفاع و برخورد، نیاز است تا معیار ارتفاع نیز علاوه‌بر موارد ذکرشده، تشریح شود که چه ارتفاعی نیاز به لحاظ‌کردن اقدام‌های پیشگیرانه دارد.

با استخراج واژگان کلیدی از تحلیل جزئی توصیف حادثه، یک جمع‌بندی انجام شده است، که به ارتباط‌دادن و یافتن مرتبط‌ترین عناصر ساختمان در نرم‌افزار کمک می‌کند. به این صورت که از ابزارها و فرمول‌های موجود در نرم‌افزار

	Hazard	Activity	Wall	Floor	Roof	Stairs	Window	Door	Guardrails	Lighting fixtures
1	Falling down from height	Mounting/ dismounting stairs	No	No	No	Yes	No	No	No	No
2	Falling down from height	Execution of façade wall	Yes	No	No	No	No	No	No	No
3	Falling down from height	Roof Rebar installation	No	No	Yes	No	No	No	No	No
4	Falling down from height	Work on edge of Roof	No	No	Yes	No	No	No	No	No
5	Falling down from height	Roof covering	No	No	Yes	No	No	No	No	No
6	Falling down from height	Unprotected edge on second	No	Yes	No	No	No	No	No	No
7	Falling down from height	Window installation	No	No	No	No	Yes	No	No	No
8	Falling down from height	Roof works	No	No	Yes	No	No	No	No	No
9	Falling down from height	Concreting Roof	No	No	Yes	No	No	No	No	No
10	Falling material/ debris	Walking on floor	No	Yes	No	No	No	No	No	No
11	Falling material/ debris	Struck from window	No	No	No	No	Yes	No	No	No

شکل ۴. بخشی از خروجی تحلیل فعالیت حوادث.

اکسل[8] استفاده شده است تا وجود یا نبود اجزاء سازه در توصیف فعالیت منجر به حادثه مشخص شود. به‌طورخاص از کاربردهای تابع اگر[9] برای بررسی وجود یا نبود کلیدواژگان مرتبط و درنهایت از عملگرهای شمارش تعداد و رتبه‌بندی استفاده شده است. درنهایت نیز با بررسی نتایج تحلیل و تشکیل نسبت‌ها، در مرتبط‌ساختن اجزاء سازه با محتمل‌ترین حادثه‌ی مرتبط با آن‌ها موفقیت حاصل شده است.. نمونه‌ای از تحلیل اخیر در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

نرم‌افزار استفاده‌شده‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، نرم‌افزار رویت است؛ که در آن عناصر[10] مختلفی وجود دارند، که برای درک بهتر و ارتباط مؤثر به آن‌ها پرداخته شده است. اجزاء ساختمان، قلب ایجاد مدل‌سازی یک ساختمان مجازی در نرم‌افزار رویت هستند. آن‌ها ساختار فیزیکی را نشان می‌دهند و به‌عنوان عناصر سه‌بُعدی در مدل عمل می‌کنند. اجزاء ساختمان نه فقط نمایش بصری را ارائه می‌دهند، بلکه اطلاعات ارزشمندی در مورد ساختمان نیز در خود دارند.

پس از شناسایی حوادث و میزان مرتبط‌بودن آن‌ها با اجزاء ساختمانی، در چارچوب فرایند کلی ارزیابی ریسک، نوبت به تعیین سطوح خطرها می‌رسد. در مرحله‌ی کنونی، برای دستیابی به مرحله‌ی بعدی فرایند ارزیابی ریسک، به تعیین سطوح خطرها برای هر حادثه پرداخته شده است. روش کار این‌گونه بوده است که سه سطح برای حوادث (بالا، متوسط، و کم) و سپس معیارهایی پیش‌فرض برای هر حادثه با توجه به ماهیت آن‌ها تعریف شده است. برای مثال در خطر سقوط، سه ارتفاع متفاوت، آثار متفاوتی نیز در صورت وقوع خطر دارند. همچنین برای خطرهایی مثل آتش‌سوزی، برق‌گرفتگی، لغزش، و افتادن، متغیر نوع و جنس مصالح نیز اهمیت دارد و به نسبت آسیب‌پذیری در مدل شناسایی و دسته‌بندی شده‌اند.[۲۹] به همین منظور، افزونه‌ی پیشنهادی با گرفتن اطلاعات اجزاء سازه‌ی مرتبط با خطرهای مذکور، آن‌ها را در نظر می‌گیرد و به‌صورت خودکار در یکی از این سه دسته جای می‌دهد:

۱) حوادث با شدت نتیجه‌ی بالا، یعنی حوادثی که منجر به آسیب‌های جدی، مانند معلولیت دائمی، سوختگی‌های شدید، از دست‌دادن بینایی، یا مرگ می‌شوند، در این دسته قرار می‌گیرند. حوادث با شدت نتیجه‌ی بالا، معمولاً نیازمند توجه فوری و اقدام‌های پیشگیرانه‌ی مؤثر هستند، تا احتمال وقوع آن‌ها به میزان کمینه برسد.

۲) حوادث با شدت نتیجه‌ی متوسط، یعنی حوادثی که منجر به آسیب‌های جدی و قابل‌درمان می‌شوند، اما تهدید فوری نیستند. حوادثی که در این دسته قرار می‌گیرند، همچنان نیازمند مدیریت و نظارت دقیق هستند، اما شدت کمتری نسبت به حوادث سطح بالا دارند. برای مثال، حوادثی که منجر به شکستگی‌ها و یا مصدومیت می‌شوند.

۳) حوادث با شدت نتیجه‌ی کم، نیز یعنی حوادثی که منجر به آسیب‌های جزئی و قابل درمان می‌شوند و تأثیر طولانی‌مدتی در سلامت و ایمنی کارکنان ندارند. این دسته شامل حوادثی است که مدیریت آن‌ها با روش‌های ساده‌تر ممکن است و معمولاً تأثیر کمی در پروژه دارند. برای مثال، حوادثی که ممکن است منجر به جراحت‌های سطحی یا کبودی شوند.[۲۹]

بدین ترتیب، پس از استخراج خطرها و ریسک‌های پرتکرار موجود در پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی و همچنین تحلیل دقیق فعالیت منجر به هر حادثه با استفاده از واژگان کلیدی، مبنای اولیه‌ای برای تشخیص خطرها ایجاد شده است؛ که امکان شناسایی و تخصیص اجزاء ساختمانی مرتبط به هر حادثه را فراهم کرده است. در مرحله‌ی بعد، به‌منظور تکمیل چارچوب پیشنهادی و براساس تعریف موجود از ارزیابی ریسک کامل، لازم است تا اقدام‌های پیشگیرانه‌ی مرتبط با حوادث نیز مشخص شوند. اقدام‌های مذکور باید به گونه‌ای تعریف شوند که توجه طراحان را در مرحله‌ی طراحی به موارد ایمنی جلب کنند و در نرم‌افزار پیاده‌سازی شوند. با توجه به اینکه طراحان معمولاً آنچنان در حوزه‌ی ملاحظات مربوط به ریسک و حوادث ایمنی تخصص ندارند، پیشنهاد خودکار اقدام‌های مذکور می‌تواند به‌طورمؤثری آگاهی آنان را افزایش دهد و به ارائه‌ی طراحی ایمن‌تر کمک شایانی کند. لذا یک مقایسه‌ی تطبیقی بین سازمان‌های نظارتی بین‌المللی و استانداردهای موجود در آن‌ها انجام شده است، تا بهترین منبعی که قابل اتکا باشد، انتخاب و در توسعه‌ی گام کنونی از پژوهش استفاده شود. پس از جستجوی گسترده در پایگاه‌ها و منابع، استانداردهای ایزو و همچنین OSHA[11] انتخاب شده‌اند، که از بین آن‌ها، نرم‌افزار OSHA به‌دلیل گستردگی و کامل‌بودن استانداردها و راهنماهای آن با اهداف پژوهش حاضر، هم‌راستا شناخته شد و اطلاعات تکمیلی موردنیاز بخش حاضر از آن استخراج شد، که در ادامه به آن پرداخته شده است. در زمینه‌ی ایمنی و بهداشت شغلی، دو استاندارد OSHA و ISO 45001:2018 به‌عنوان معتبرترین و گسترده‌ترین مراجع برای مدیریت ایمنی

[8] Microsoft Excel
[9] IF
[10] Elements
[11] Occupational Safety and Health Administration

جدول ۲. مقایسه‌ی تطبیقی استانداردها.

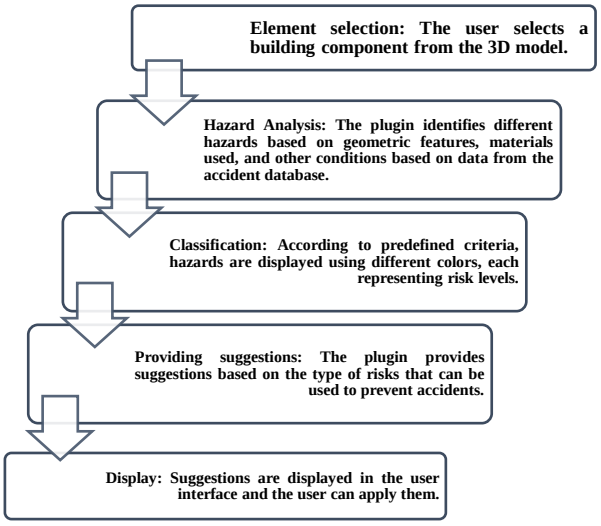
Comparison Criteria	OSHA	ISO
Comprehensiveness	Provides specialized guidelines for various fields, including construction, with a focus on practical and legal aspects.	A comprehensive standard that provides a framework for occupational safety across industries, focusing on systematic process improvement.
Focus on Construction Industry	Strong focus on construction safety with separate guidelines (e.g., Subpart C & Subpart K), covering specific industry risks in detail.	Generalized focus across all industries with limited specific details for construction risks.
Details and Guidelines for Risk Assessment	Provides detailed, operational guidelines for risk assessment in various domains (e.g., working at heights, electrical work, etc.).	Focuses on general frameworks for risk assessment with fewer specific details compared to OSHA.

و کاهش ریسک در محیط‌های کاری شناخته می‌شوند، که انتخاب آن‌ها به‌عنوان دو استاندارد مقایسه‌شده، منطقی‌ترین انتخاب برای ارائه‌ی تحلیلی کاربردی در زمینه‌ی ارزیابی ریسک‌های ایمنی در صنعت ساخت‌وساز است؛ که بر پایه‌ی جامعیت، تناسب با صنعت، و گستردگی استفاده‌ی جهانی استوار است و می‌تواند به وضوح شکاف‌ها و نوآوری‌های پژوهش را آشکار سازد. دو استاندارد اخیر، رویکردهای متفاوتی به ایمنی دارند که این تفاوت در رویکردها، مقایسه‌ی بین دو استاندارد مذکور را ارزشمند می‌سازد و می‌تواند شکاف‌ها و مزایای هر کدام را در زمینه‌ی ساخت‌وساز آشکار کند؛ لذا خلاصه‌ی مقایسه‌ی آن‌ها درجدول ۲ ارائه شده است

در منابع OSHA، توجه زیادی به مفهوم پیشگیری از طریق طراحی شده و توصیه بر آن بوده است که تا حد امکان، موارد کنترلی یا پیشگیرانه در فاز طراحی و اولیه‌ی پروژه‌ها در نظر گرفته شود، که این مورد نیز هم‌راستایی استاندارد OSHA با پژوهش حاضر را بیش از پیش روشن می‌سازد.

درنهایت، پس از اجرای گام‌های ذکرشده و توسعه‌ی افزونه، برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر، از پنج متخصص با سابقه و با صلاحیت علمی و عملی در حوزه‌ی مدیریت ایمنی در پروژه‌های ساختمانی دعوت به همکاری شده است. آن‌ها دست‌کم ۱۰ سال سابقه‌ی حرفه‌ای در پروژه‌های ساختمانی بزرگ‌مقیاس یا مدیریت ایمنی با مدرک کارشناسی ارشد یا دکتری در رشته‌های مرتبط نظیر مدیریت ساخت، مهندسی عمران، یا ایمنی داشته‌اند. حوزه‌ی فعالیت ایشان، شامل: مدیریت ساخت، ایمنی پروژه‌های ساختمانی، و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با میانگین سنی بین ۳۵ تا ۵۰ سال بوده است، که نشانگر توازن بین تجربه و تخصص است. آن‌ها از شرکت‌های مهندسی مشاور، پیمانکاران ساختمانی بزرگ، و نیز نهادهای نظارتی ایمنی در ایران انتخاب شده‌اند. معیارهای انتخاب ایشان شامل ارتباط مستقیم حوزه‌ی کاری با موضوع پژوهش و تجربه‌ی کافی در زمینه‌ی مدیریت ریسک ایمنی بوده است. این ویژگی‌ها اطمینان می‌دهد که ارزیابی‌ها بر مبنای دانش و تجربه‌ی تخصصی صورت گرفته است.

در انتخاب تعداد متخصصان، معمولاً تلاش بر این بوده است که تعادلی بین کارآمدی فرآیند و دقت نتایج ایجاد شود. مطالعات نشان داده‌اند که برای ارزیابی‌های تخصصی، به‌خصوص در حوزه‌های مهندسی، معمولاً ۲ تا ۵ متخصص کافی است.[۳۰] استفاده از سه متخصص امکان دستیابی به توافق نسبی میان ارزیابی‌ها را فراهم می‌آورد و می‌تواند به شناسایی تناقض‌ها یا اعتبارسنجی نقاط ضعف کمک کند.

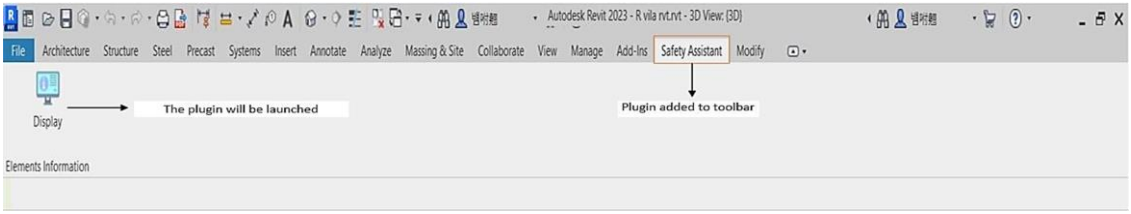


شکل ۵. جریان کلی فرایند ارزیابی ریسک افزونه‌ی توسعه‌یافته.

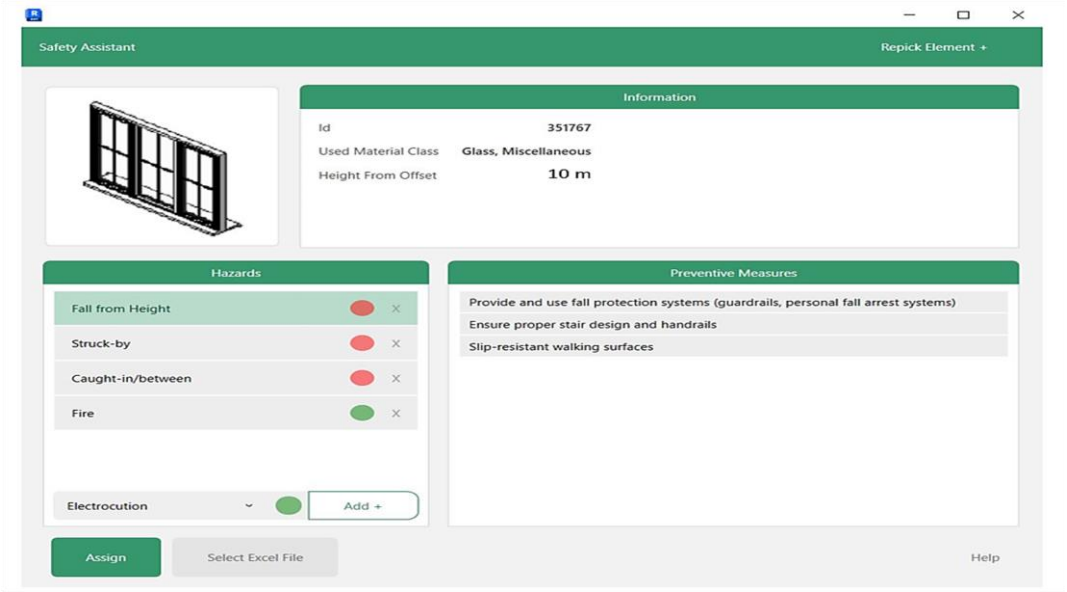
درنهایت، روند اجرای فرایند اعتبارسنجی بدین صورت بوده است که ابتدا برای یکی از اجزاء مدل، برای مثال یک بازشو در ارتفاع مشخص و با مصالح استفاده‌شده در آن در نمونه‌ی موردی، افزونه اجرا و عملکرد آن در شناسایی و ارزیابی و ارائه‌ی اقدام‌های پیشنهادی مشاهده شده است. از سوی دیگر، اجزاء اخیر به متخصصان داده شده‌اند تا آن‌ها فرایند مذکور را طبق یک چک لیست به‌صورت دستی انجام دهند. درنهایت، عملکرد ابزار پیشنهادی با خروجی نتایج خبرگان مقایسه و تحلیل شده است، تا از دقت و کامل‌بودن عملکرد آن اطمینان حاصل شود.

۴. پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

در بخش کنونی، تمرکز بر روی توسعه‌ی نهایی چارچوب فرایند ارزیابی و ابزار ذکرشده در بستر نرم‌افزار بوده است. همان‌طور که در قسمت روش‌شناسی تشریح شده است، فرایند ارزیابی ریسک، شامل ۴ مرحله از شناسایی و ارزیابی تا اقدام‌های پیشگیرانه و مستندسازی بوده است. بر همین مبنا، روند پژوهش نیز متناسب‌سازی شده است، تا در قالب همین فرایند، بتوان گام‌های پژوهش را پیش برد، که شامل استفاده از پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی و تجزیه‌وتحلیل آن تا دسته‌بندی سطح خطرها و ارائه‌ی اقدام‌های پیشگیرانه‌ی مناسب در مرحله‌ی طراحی بوده است، تا بتوان به بستر توسعه‌ی یک افزونه در نرم‌افزار رویت دسترسی پیدا کرد. جریان کلی فرآیند افزونه‌ی توسعه‌یافته برای نرم‌افزار رویت، که حاصل گام‌های قبلی پژوهش است، در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. نمایش افزونه‌ی در نرم‌افزار رویت.



شکل ۷. عملکرد افزونه در ارزیابی ریسک عنصر پنجره‌ی ساختمان.

افزونه‌ی توسعه‌یافته به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی خطرهای ایمنی در مرحله‌ی طراحی ساختمان عمل می‌کند؛ که هدف اصلی آن، بهبود دقت و سرعت در شناسایی و ارزیابی خطرهای بالقوه و ارائه‌ی پیشنهادهای پیشگیرانه است. افزونه‌ی مذکور با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی حوادث و اطلاعات مدل‌های سه‌بُعدی، خطرهای مرتبط با اجزاء مختلف ساختمانی را شناسایی و به طراحان کمک می‌کند تا تصمیم‌های ایمنی‌محور و اصلاحات طراحی را به‌موقع اجرا کنند.

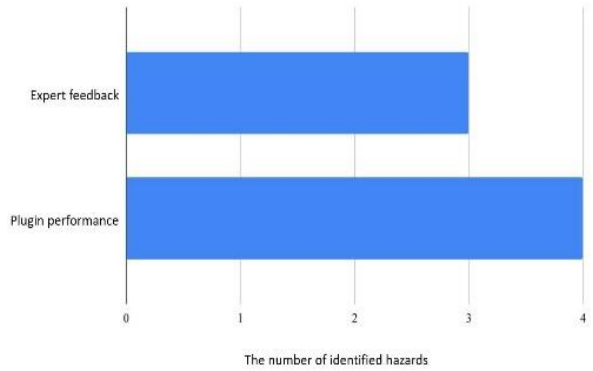
انتخاب زبان برنامه‌نویسی و ابزارهای توسعه، یکی از اولین و مهم‌ترین مراحل در توسعه‌ی افزونه بوده است. پس از بررسی نیازمندی‌ها و ارزیابی گزینه‌های مختلف، زبان برنامه‌نویسی سی‌شارپ و چارچوب دات نت به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه‌ها انتخاب شده‌اند. انتخاب اخیر به‌دلیل سازگاری بالای سی‌شارپ با محیط توسعه‌ی افزونه‌های رویت و توانمندی‌های چارچوب دات‌نت در ارائه‌ی امکانات توسعه‌ی نرم‌افزارهای کاربردی انجام شده است.

زبان سی‌شارپ به‌دلیل امکانات مدرن و کاربرپسند، مدیریت کارای حافظه، و پشتیبانی قوی از توسعه‌ی افزونه‌ها و ابزارهای کاربردی در محیط‌های مختلف و چارچوب دات‌نت نیز به‌دلیل اکوسیستم گسترده، پشتیبانی کامل از سی‌شارپ، و امکانات غنی برای توسعه‌ی نرم‌افزارهای پیچیده، به‌عنوان بستر اصلی توسعه انتخاب شده‌اند. همچنین برای کدنویسی و اشکال‌زدایی افزونه، محیط توسعه‌ی ویژوال استودیو به‌دلیل ویژگی‌های قدرتمند آن در مدیریت پروژه‌های سی‌شارپ و دات نت انتخاب شده است. همچنین فرآیند طراحی و پیاده‌سازی افزونه، شامل چندین مرحله‌ی کلیدی بوده است، که از تحلیل نیازمندی‌ها تا توسعه و آزمون افزونه را در بر می‌گرفت. در شکل ۶، نمایی از اضافه‌شدن افزونه‌ی توسعه‌یافته به نرم‌افزار رویت مشاهده می‌شود.

۵. نمونه‌ی موردی

در بخش کنونی، یک مثال عملی برای نمایش کاربرد افزونه‌ی توسعه‌یافته جهت مدیریت ایمنی در پروژه‌های ساختمانی ارائه شده است. نمونه‌ی انتخاب‌شده، یک ساختمان ۴ طبقه واقع در تهران بوده است، که در مرحله‌ی در حال ساخت قرار داشت. کاربری ساختمان مذکور، مسکونی بوده و مساحت زیر بنای کل پروژه برابر با ۲۰۰۰ مترمربع و. سیستم سازه‌ای آن، اسکلت بتنی بوده است، که با توجه به الزامات فنی و موقعیت جغرافیایی انتخاب شده است. در این مثال، افزونه روی یکی از اجزاء مدل سه‌بُعدی ساختمان مذکور اجرا و نتایج تحلیل ایمنی آن بررسی و گزارش شده است. این مثال، فرآیند کامل از انتخاب عناصر ساختمانی در نرم‌افزار رویت، شناسایی و ارزیابی خطرها با استفاده از پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی، تا ارائه‌ی اقدام‌های پیشگیرانه‌ی مبتنی بر استانداردهای OSHA را به‌طورجامع تشریح می‌کند. هدف از ارائه‌ی مثال کنونی، نمایش توانایی افزونه در تحلیل دقیق خطرها و بهبود ایمنی در محیط‌های ساختمانی از طریق ابزارهای خودکار و یکپارچه است. با استفاده از مثال مذکور، کاربران قادر خواهند بود به‌صورت عملی و ملموس، چگونگی عملکرد افزونه و آثار آن در بهبود مدیریت ایمنی را مشاهده کنند، که می‌تواند در فرآیند تصمیم‌گیری و پیاده‌سازی سیستم‌های مشابه در پروژه‌های ایشان نیز مفید واقع شود. مثال حاضر بر تحلیل خطرهای مرتبط با یک جزء متمرکز بوده و جزئیات دقیقی از نحوه‌ی شناسایی خطر، طبقه‌بندی، و ارائه‌ی پیشنهادهای پیشگیرانه برای کاهش ریسک ارائه کرده است.

در شکل ۷، عملکرد افزونه مشاهده می‌شود؛ که برای یک جزء ساختمانی انتخابی، مثل پنجره، فرایند شناسایی و ارزیابی و پاسخ به ریسک‌های حوادث را انجام و خروجی را نمایش می‌دهد. رنگ‌های موجود در مقابل هر خطر بیانگر



شکل ۸. مقایسه‌ی تعداد حوادث شناسایی‌شده‌ی پنجره.

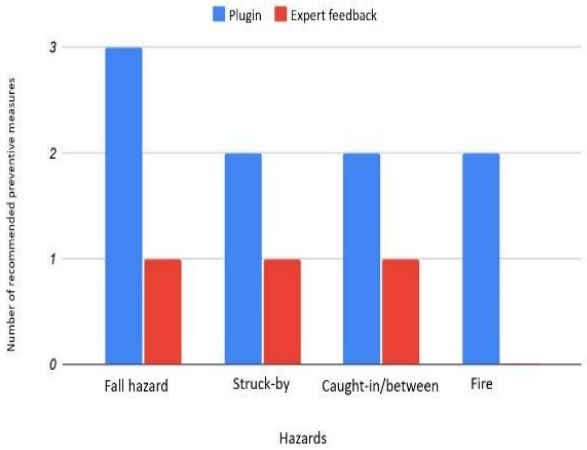
سطح ریسک آن است: رنگ سبز، نشانه‌ی حادثه با شدت نتیجه‌ی پایین؛ رنگ زرد، بیانگر حادثه با شدت نتیجه‌ی متوسط؛ و رنگ قرمز، نشانگر حادثه با شدت نتیجه‌ی بالاست. با انتخاب هر حادثه نیز پیشنهادهای مربوط به کاهش یا حذف ریسک در مرحله‌ی طراحی به کاربر نمایش داده می‌شوند.

از طرفی، باید بازخورد متخصصان حوزه‌ی ایمنی ساختمان نیز در عنصر ساختمانی مذکور گرفته شود و طبق توضیحات بخش روش‌شناسی مقایسه انجام شود. با اجرای این مرحله و دریافت بازخورد، می‌توان عملکرد رویکرد پیشنهادی را که بر بستر توسعه‌ی افزونه انجام شده است، بهتر تحلیل کرد. در شکل‌های ۸ الی ۱۰ می‌توان نتیجه‌ی مقایسه‌های انجام‌شده را در قالب نمودار مشاهده کرد.

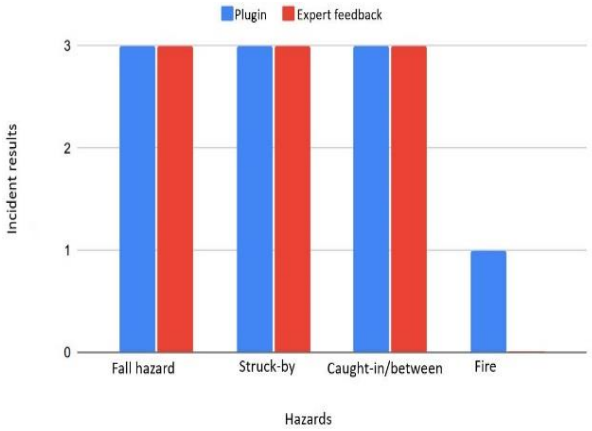
مطابق نتایج به‌دست‌آمده، افزونه توانسته است هم حوادث بالقوه‌ی بیشتری را شناسایی کند و هم در ارائه‌ی اقدام‌های پیشگیرانه‌ی جامع‌تر بهتر عمل کند. در تعیین شدت نتایج نیز تطابق بالایی با نظر متخصصان ملاحظه می‌شود. در ادامه، اجزاء بیشتری از نمونه‌ی مذکور بررسی شده‌اند، که در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ مشاهده می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با توسعه و پیاده‌سازی یک ابزار نوآورانه، به بهبود سطح ایمنی در طراحی پروژه‌های ساختمانی کمک می‌کند. ابزار مذکور می‌تواند علاوه‌بر کاهش حوادث، بهبود فرآیندهای طراحی، و افزایش بهره‌وری پروژه‌های

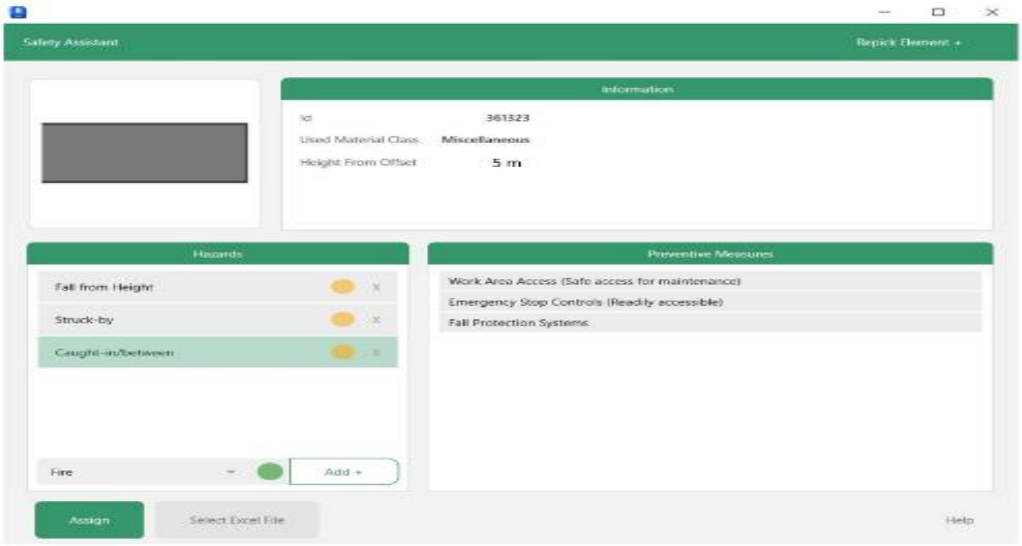


شکل ۹. مقایسه‌ی تعداد اقدام‌های پیشنهادی برای عنصر پنجره.

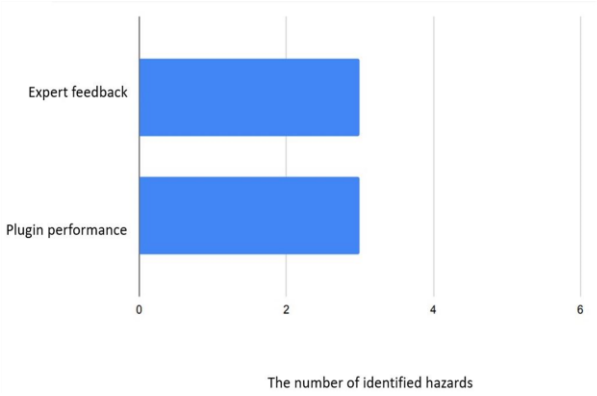


شکل ۱۰. مقایسه‌ی شدت نتایج ارائه‌شده برای عنصر پنجره.

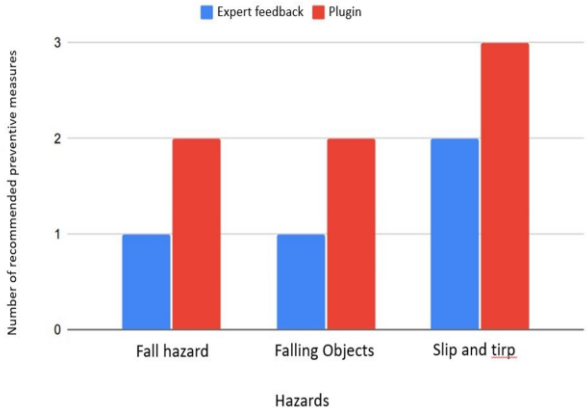
ساختمانی، نقش مؤثری در ارائه‌ی یک روش هدفمند برای ارزیابی ریسک‌ها و خطرها در مرحله‌ی طراحی ایفا کند. توسعه‌های آینده و یکپارچه‌سازی‌های پیشرفته‌تر می‌تواند ابزار اخیر را به یک استاندارد در صنعت ساخت‌وساز تبدیل کند. در پژوهش حاضر، پس از شناسایی و تعریف یک مسئله و مرور ادبیات مرتبط با آن، یک تحلیل روی پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی موجود انجام و حوادث رخ داده شناسایی شده‌اند. سپس با تعریف برخی معیارهای پیش‌فرض، شدت نتایج خطرها در شرایط مختلف تعریف و همزمان اقدام‌های پیشگیرانه و



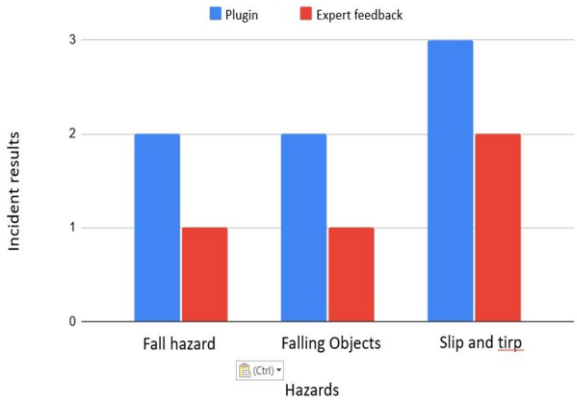
شکل ۱۱. عملکرد افزونه در ارزیابی ریسک عنصر سقف ساختمان.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی تعداد حوادث شناسایی‌شده‌ی سقف.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی تعداد اقدام‌های پیشنهادی برای عنصر سقف.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی شدت نتایج ارائه‌شده برای عنصر سقف.

کنترلی مناسب برای هر خطر در مرحله‌ی طراحی از استاندارد OSHA استخراج شده‌اند. درنهایت، نیز با توسعه‌ی یک افزونه، فرایند ارزیابی ریسک، که شامل چهار مرحله‌ی: شناسایی، ارزیابی، اقدام‌های کنترلی، و مستندسازی بوده است، کامل شده است. در انتها، نیز با پیاده‌سازی افزونه روی یک مدل سه‌بُعدی و بهره‌گیری از نظرهای متخصصان با تجربه در صنعت ساختمان، اعتبارسنجی پژوهش انجام شده است. با وجود این، همچنان برخی محدودیت‌ها نیز برای پژوهش فعلی وجود داشته است. از جمله اینکه کیفیت و دقت تحلیل خطرها بستگی به جامعیت و دقت پایگاه داده‌ی حوادث تاریخی دارد. داده‌های ناقص یا نامعتبر می‌توانند منجر به شناسایی نادرست خطرها شوند. از سوی دیگر، بخش زیادی از خطرهای ایمنی پروژه‌های ساختمانی مربوط به تجهیزات، شرایط خاص پروژه، و رفتارهای ناایمن کارگران هستند. با این حال، پژوهش حاضر به‌طورخاص به مرحله‌ی طراحی و اجزاء مدل سه‌بُعدی در چارچوب مدل‌سازی اطلاعات ساختمان محدود شده است. در حالی که شرایط و تجهیزات عملیاتی (مانند داربست، نردبان، جرثقیل، و ...) و رفتارهای انسانی، بخش مهمی از ایمنی پروژه را تشکیل می‌دهند. هدف پژوهش حاضر، طراحی ابزاری برای تحلیل و کاهش ریسک‌هایی بوده است، که در فاز طراحی قابل پیش‌بینی و کنترل هستند. همچنین در موارد منحصر به فرد یا خاص برای یک پروژه، افزونه ممکن است نیاز به تنظیم‌ها یا توسعه‌های خاص برای پروژه‌های پیچیده‌تر داشته باشد. پیاده‌سازی و استفاده‌ی مؤثر از افزونه نیز نیازمند منابع مالی برای نرم‌افزار و سخت‌افزار، و همچنین آموزش کافی برای کاربران است. نیازهای ذکرشده می‌توانند به‌عنوان موانع برای شرکت‌های کوچک‌تر یا پروژه‌هایی با بودجه‌ی محدود باشند. از طرفی، سیستم نیاز به نگهداری و بروزرسانی منظم دارد، تا با تغییرات در استانداردها و فناوری‌ها همگام باشد، که این امر نیز می‌تواند هزینه‌بر باشد.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

- به کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند دقت و سرعت شناسایی خطرها را افزایش دهند و به افزونه کمک کنند تا بهتر به شرایط مختلف پروژه‌ها پاسخ دهد.
- استفاده از داده‌های بزرگ[12] و تحلیل‌های پیشرفته‌تر برای پوشش خطرهای جدید و نادر می‌تواند به بهبود کارایی سیستم در شناسایی خطرها کمک کند.
- به‌کارگیری حس‌گرهای اینترنت اشیاء[13] برای جمع‌آوری داده‌های به‌روز از سایت‌های ساختمانی و استفاده از داده‌های مذکور برای بهبود دقت و کارایی افزونه.
- توسعه‌ی یک استاندارد اطلاعاتی برای تبادل داده‌ها بین نرم‌افزارهای مختلف مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند تعامل بین نرم‌افزاری را بهبود بخشد و کاربردپذیری افزونه را در محیط‌های نرم‌افزاری مختلف افزایش دهد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

References- منابع

1. Gambatese, J.A., Behm, M. and Rajendran, S., 2008. Design's role in construction accident causality and prevention: Perspectives from an expert panel. *Safety science*, *46*(4), pp.675-691. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.010

[12] Big Data

[13] Internet of Things

2. Li, J., Chen, F. and Li, S., 2022. Correlation analysis and prevention of electrocution risk factors in the construction industry. *Archives of Civil Engineering*, *68*(4), pp.537-554. https://doi.org/10.24425/ace.2022.143053

3. Haupt, T.C. and Pillay, K., 2016. Investigating the true costs of construction accidents. *Journal of Engineering, Design and Technology*, *14*(2), pp.373-419. https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2014-0041

4. Lu, Y., Li, Q., Zhou, Z. and Deng, Y., 2015. Ontology-based knowledge modeling for automated construction safety checking. *Safety science*, *79*, pp.11-18. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.05.008

5. Araújo, L.L.F., Saldanha, M.C.W., Gohr, C.F. and Nascimento, G.H.P., 2022. Improvement factors of constructability and occupational safety on project life cycle phases. *Automation in Construction*, *138*, p.104227. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104227

6. Gangolells, M., Casals, M., Forcada, N., Roca, X. and Fuertes, A., 2010. Mitigating construction safety risks using prevention through design. *Journal of safety research*, *41*(2), pp.107-122. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2009.10.007

7. Lu, Y., Yin, L., Deng, Y., Wu, G. and Li, C., 2023. Using cased based reasoning for automated safety risk management in construction industry. *Safety science*, *163*, p.106113. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106113

8. Sidani, A., Martins, J.P. and Soeiro, A., 2022. BIM approaches for enhanced health and safety status in construction-protocol for a systematic review: Protocol. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, *6*(1), pp.1-8. https://doi.org/10.24840/2184-0954_006.001_0001

9. Lingard, H., Saunders, L., Pirzadeh, P., Blismas, N., Kleiner, B. and Wakefield, R., 2015. The relationship between pre-construction decision-making and the effectiveness of risk control: Testing the time-safety influence curve. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *22*(1), pp.108-124. https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2013-0074

10. Behm, M., 2005. Linking construction fatalities to the design for construction safety concept. *Safety science*, *43*(8), pp.589-611. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.002

11. Marks, E.D., Cheng, T. and Teizer, J., 2013. Laser scanning for safe equipment design that increases operator visibility by measuring blind spots. *Journal of construction engineering and management*, *139*(8), pp.1006-1014. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000690

12. Cheng, T. and Teizer, J., 2014. Modeling tower crane operator visibility to minimize the risk of limited situational awareness. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *28*(3), p.04014004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000282

13. Antwi-Afari, M.F., Li, H., Yu, Y. and Kong, L., 2018. Wearable insole pressure system for automated detection and classification of awkward working postures in construction workers. *Automation in construction*, *96*, pp.433-441. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.004

14. Jiang, S., Jiang, L., Han, Y., Wu, Z. and Wang, N., 2019. OpenBIM: An enabling solution for information interoperability. *Applied Sciences*, *9*(24), p.5358. https://doi.org/10.3390/app9245358

15. Suermann, P.C. and Issa, R.R., 2009. Evaluating industry perceptions of building information modelling (BIM) impact on construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *14*(37), pp.574-594. https://www.itcon.org/2009/37

16. Martínez-Aires, M.D., López-Alonso, M. and Martínez-Rojas, M., 2018. Building information modeling and safety management: A systematic review. *Safety science*, *101*, pp.11-18. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.015

17. Collins, R., Zhang, S., Kim, K. and Teizer, J., 2014. Integration of safety risk factors in BIM for scaffolding construction. In *Computing in Civil and Building Engineering (2014)* (pp. 307-314). https://doi.org/10.1061/9780784413616.039

18. Malekitabar, H., Ardeshir, A., Sebt, M.H. and Stouffs, R., 2016. Construction safety risk drivers: A BIM approach. *Safety science*, *82*, pp.445-455. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.002

19. Park, J., Kim, K. and Cho, Y.K., 2017. Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors. *Journal of Construction Engineering and Management*, *143*(2), p.05016019. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001223

20. Chen, Q., de Soto, B.G. and Adey, B.T., 2018. Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement. *Automation in construction*, *94*, pp.22-38. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.028

21. Ding, L., Wei, R. and Che, H., 2014. Development of a BIM-based automated construction system. *Procedia Engineering*, *85*, pp.123-131. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.536

22. Rasoulimanesh, M., Taghaddos, H., Chokan, F., Dadashi Haji, M. and Tamanaeifar, M.H., 2021. Aut omated assessment of fall hazard risk using building i nformation modeling and image processing. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *36*(4.1), pp.39-47.[In

Persian] https://doi.org/10.24200/j30.2020.53198.2539

23. Lu, Y., Gong, P., Tang, Y., Sun, S. and Li, Q., 2021. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*, *124*, p.103553. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103553

24. Xiahou, X., Li, K., Li, F., Zhang, Z., Li, Q. and Gao, Y., 2022. Automatic identification and quantification of safety risks embedded in design stage: a BIM-enhanced approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, *28*(4), pp.278-291. https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16560

25. Singh, S.P., Patel, D.A. and Chauhan, S., 2022. Harnessing BIM-Based Technology with Risk Assessment to Identify Hazards and Generate Automated Safety Schedule. *Transforming Construction with Reality Capture Technologies*. https://doi.org/10.57922/tcrc.622

26. Zhang, S., Teizer, J., Lee, J.K., Eastman, C.M. and Venugopal, M., 2013. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in construction*, *29*, pp.183-195. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006

27. Heidary, M.S., Mousavi, M., Alvanchi, A., Barati, K. and Karimi, H., 2021. Semi-automatic construction hazard identification method using 4D BIM. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 38, pp. 590-597). IAARC Publications] http://dx.doi.org/10.22260/ISARC2021/0080

28. Kashani K, Nourzad SHH. Assessing the safety hazards of construction projects using a whole life cycle approach: University of Tehran; 2021.[In Persian]

29. OSHA. Construction Industry [Available from: https://www.osha.gov/construction-industry.]

30. Guest, G., Bunce, A. and Johnson, L., 2006. How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability. *Field methods*, *18*(1), pp.59-82. https://doi.org/10.1177/1525822X05279903