



Research Paper

## **Artificial intelligence-based risk management in construction projects: A framework for project-oriented organizations**

**Vali Zivari Afzal <sup>\*1</sup> Mehrdad Karimimoshaver <sup>2</sup>**

1 Master of Architectural Technology, Digital Architectur, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

2 Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

### **Keywords**

Risk management artificial intelligence construction projects project-based organizations Modeling



### **A B S T R A C T**

In the era of new technologies, the challenges of risk management in construction projects have gained special importance due to the complexity and multidimensionality of risks. Therefore, this research was conducted using a developmental-applied method with a qualitative approach and based on the Delphi method with the aim of designing a comprehensive framework for risk management in construction projects using artificial intelligence (AI) in project-oriented organizations. In the first step, the initial components were extracted through a systematic literature review and content analysis of previous studies, and were modified and finalized by collecting the views of 15 experts in the field of project management and information technology. The final results of the research led to the presentation of a conceptual model with 54 main components in three important layers, in the final core (central) of which the four main risk management processes are located, in the middle layer the three supporting dimensions (technological, organizational, legal) and in the outer layer the two interactive components (stakeholder culture and supply chain management). This framework, by integrating artificial intelligence algorithms, enables real-time analysis, intelligent prediction, and adaptive response to various risks. Research findings show that the use of artificial intelligence in risk management, in addition to increasing decision-making accuracy, will lead to a strategic, systemic, and integrated improvement of risk management processes and will significantly reduce project delays and unexpected costs.

\*Corresponding Author.

Email Adresses: [v.zivari2022@gmail.com](mailto:v.zivari2022@gmail.com).

Zivari Afzal,V. and Karimimoshaver,M. (2025). Artificial intelligence-based risk management in construction projects: A framework for project-oriented organizations.. *Human Ecology*, 4(12), 1183-1194.



Doi:<https://doi.org/10.22034/he.2025.526968.1110>



## مدیریت ریسک مبتنی بر هوش مصنوعی در پروژه‌های ساخت‌وساز: یک چارچوب برای سازمان‌های پروژه‌محور

ولی زیوری افضل\*<sup>۱</sup> مهرداد کریمی مشاور<sup>۲</sup>

۱ کارشناسی ارشد فناوری معماری گرایش معماری دیجیتال، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.  
۲ گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

### واژگان کلیدی

مدیریت ریسک هوش  
مصنوعی پروژه‌های  
ساخت‌وساز سازمان‌های  
پروژه محور مدل سازی



### چکیده

در عصر فناوری‌های نوین، چالش‌های مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت‌وساز به دلیل پیچیدگی و چندبعدی بودن ریسک‌ها، اهمیت ویژه‌ای یافته است. از اینرو این پژوهش با استفاده از یک روش توسعه‌ای — کاربردی و با رویکرد کیفی و مبتنی بر روش دلفی با هدف طراحی چارچوبی جامع برای مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت‌وساز با بهره‌گیری از هوش مصنوعی (AI) در سازمان‌های پروژه‌محور اجرا گردید که طی آن در گام نخست، مؤلفه‌های اولیه از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و تحلیل محتوای مطالعات پیشین استخراج شده و با جمع‌آوری دیدگاه‌های ۱۵ نفر از خبرگان حوزه مدیریت پروژه و فناوری اطلاعات، اصلاح و نهایی گردید. نتایج نهایی پژوهش منجر به ارائه مدل مفهومی با ۵۴ مؤلفه اصلی در سه لایه مهم شد که در هسته پایانی (مرکزی) آن چهار فرآیند اصلی مدیریت ریسک، در لایه میانی سه بُعد پشتیبان (فناورانه، سازمانی، حقوقی) و در لایه بیرونی دو مؤلفه تعاملی (فرهنگ‌ذی‌نفعان و مدیریت زنجیره تأمین) جای گرفته‌اند. این چارچوب با ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان تحلیل بلادرنگ، پیش‌بینی هوشمندانه و واکنش تطبیقی در برابر انواع ریسک‌ها را فراهم می‌کند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت ریسک، علاوه بر افزایش دقت تصمیم‌گیری، موجب ارتقای راهبردی، سیستمی و یکپارچه‌فراآیندهای مدیریت ریسک شده و کاهش قابل توجهی در تاخیرات و هزینه‌های غیرمترقبه پروژه‌ها به همراه خواهد داشت.

## ۱. مقدمه

اصولاً ریسک‌ها ویا همان خطرات همواره در هر جنبه‌ای از زندگی ما وجود دارند و می‌توانند برای افراد مختلف معانی متفاوتی داشته باشند، در حالی که به طور کلی، همیشه به طور منفی باعث آسیب و ناراحتی بالقوه زیادی برای ذینفعان می‌شوند. در همین راستاست که مشاهده می‌شود که صنعت ساخت و ساز هم همیشه با مشکلاتی مثل بالا بودن نرخ حوادث و تلفات، تاخیرها و افزایش هزینه‌ها دست و پنجه نرم کرده است. ریشه اصلی این مشکلات، ریسک‌های کنترل‌نشده‌ای هستند که در سطوح مختلف عملیاتی، پروژه‌ای، سبد سرمایه‌گذاری، استراتژیک، و حتی در سطح کل کسب‌وکار و سازمان بروز می‌نمایند که مجموعاً از عوامل داخلی و خارجی نشأت می‌گیرند و به دو دسته کلی: (الف) ریسک‌های محیطی که شامل مسائل مالی، نوسانات بازار، مشکلات عملیاتی، ریسک‌های سیاسی، اعتباری و بلایا می‌شوند؛ و (ب) ریسک‌های ذاتی پروژه که شامل عدم قطعیت، پویایی، وابستگی متقابل و پیچیدگی تقسیم می‌شوند (وو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴: ۲).

برای مقابله و تعدیل این ریسک‌ها، مفهومی بنام مدیریت ریسک<sup>۲</sup> (RM) مطرح شده است که در بهترین شیوه‌ها و استانداردهای مدیریت پروژه ترسیم می‌شوند. مدیریت ریسک در پروژه‌ها، رویکردی پیشگیرانه محسوب می‌شود که شامل مراحل مختلف و پیوسته‌ای است که هدف از آن، بهره‌برداری یا تقویت ریسک‌های مثبت (فرصت‌ها) و در عین حال اجتناب یا کاهش ریسک‌های منفی (تهدیدها) است تا موفقیت پروژه، برآورده شدن اهداف و محدودیت‌های آن، و تضمین ایمنی پروژه محقق شود (موسسه مدیریت پروژه<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷: ۳۸۹). اما علیرغم این رویکرد و اتفاق بسیار مهم، مدیریت ریسک همچنان با چالش‌های اساسی روبرو است. در حال حاضر، این فرآیند به دلیل «عدم قطعیت» خود، که ویژگی اصلی ریسک است، اغلب به صورت دستی، زمان‌بر، سطحی و بعضاً ناکارآمد انجام می‌شود که در آنها، مراحل شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها عمدتاً بر پایه قضاوت‌های فردی و تجربه محور متخصصان استوار است که به همین دلیل، آن را بسیار شخصی و وابسته به شرایط خاص هر پروژه می‌نمایند (خدابخشیان، کیکونی<sup>۴</sup>، ۲۰۲۲: ۱؛ لی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸: ۳-۲). همین مسئله باعث می‌شود انتقال دانش و تعمیم مدل‌های ریسک به پروژه‌های آتی به یک دغدغه مهم تبدیل شود و لزوم بکارگیری رویکردهای بهتر با خطاهای کمتر، مد نظر قرار گرفته و استفاده از رویکردهای کارا تر مورد اقبال قرار گیرد.

از اینرو در سالهای اخیر برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده و بهبود چشمگیر فرآیند مدیریت ریسک، هوش مصنوعی (AI) و زیرشاخه‌های آن نظیر یادگیری ماشین<sup>۶</sup>، یادگیری عمیق<sup>۷</sup>، و پردازش زبان طبیعی<sup>۸</sup>، فرصت‌های بی‌نظیری را برای کاهش ریسک‌ها، پیش‌بینی و نهایتاً بهبود فرآیندهای کسب‌وکار در صنایع مختلف و از جمله صنعت ساخت و ساز فراهم آورده است. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که هوش مصنوعی با قابلیت‌های خود در تحلیل داده‌های حجیم، شناسایی الگوها و پیش‌بینی دقیق‌تر، می‌تواند رویکرد سنتی و شهودی را متحول کرده و به یک سیستم کارآمدتر، دقیق‌تر و کمتر وابسته به خطای انسانی تبدیل نماید و در عین حال، جزئیات و عمق بالایی از تحلیل پیش‌بینی را ارائه دهند (گوزمن-اوربنا و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۸: ۹۷-۹۸).

اما با وجود پتانسیل بالایی هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های بزرگ و پیچیده، کاربرد آن در تمامی مراحل مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت‌وساز هنوز به صورت جامع و یکپارچه توسعه نیافته است. تحقیقات موجود غالباً به صورت پراکنده بر روی جنبه‌های خاصی از کاربرد هوش مصنوعی، مانند پیش‌بینی هزینه یا زمان، متمرکز شده‌اند و کمتر به ارائه یک چارچوب عملیاتی و سیستمی پرداخته‌اند که بتواند هوش مصنوعی را در کل چرخه مدیریت ریسک (از شناسایی و تحلیل تا پاسخ‌دهی و پایش) در سازمان‌های پروژه‌محور ادغام کند. لذا فقدان یک رویکرد جامع و چارچوب‌مند، مانعی جدی بر سر راه پیاده‌سازی مؤثر راهکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز است که بایستی برای تدوین آن نیز اقدام نمود. از اینرو در این مطالعه سعی می‌شود تا با کاربرد هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) برای تبدیل مدیریت ریسک در ساخت و ساز از یک پارادایم واکنش‌گرا به چارچوب پیشگیرانه، ضمن ارائه یک چارچوب علمی، مزایای عملی بالقوه هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه‌ها را که شامل مولفه‌های مختلفی است را نیز نشان دهد.

لذا سوال اصلی که در این مطالعه سعی میشود تا پاسخ مناسبی به آن ارائه شود آن است که: چگونه می‌توان یک چارچوب جامع و عملیاتی مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت‌وساز تدوین و اعتبارسنجی کرد که نیازهای خاص سازمان‌های پروژه‌محور را برآورده سازد و کارایی و اثربخشی فرآیندهای مدیریت ریسک را به طور قابل توجهی ارتقاء بخشد؟

1 Wu et al., 2014

2 Risk Management

3 Project Management Institute (PMI), 2017

4 Khodabakhshian, Cecconi., 2022

5 Li et al., 2018

6 Machine Learning

7 Deep Learning

8 Natural Language Processing

9 Guzman-Urbina et al., 2018

## ۲- مروری بر مفاهیم و چارچوب نظری تحقیق:

### ۲.۱. ریسک، عناصر و ویژگی‌های آن:

از منظر علمی، ریسک عبارتست از احتمالی که مخاطره باعث صدمه و خسارت شود ضربدر شدت آن صدمه یا خسارت. بنابراین ریسک احتمال بالفعل شدن یک خطر است. بصورت ریاضی ریسک را از حاصلضرب احتمال یک واقعه نامطلوب خاص (مانند صدمه جسمانی، حریق و غیره) در پیامد آن واقعه می‌باشد.

با توجه به مبانی نظری موجود، ریسک از سه جزء اساسی: فراوانی، شدت و میزان مواجهه تشکیل شده است. (اسماعیلی و هالول<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵: ۱۶). آن‌ها معتقدند که ارزیابی ریسک می‌تواند هم برداشتی (ذهنی) باشد، که بر پایه تجربه و دانش متخصصان شکل می‌گیرد، و هم عینی (بر اساس واقعیت)، که به حجم زیادی از داده‌های تاریخی نیاز دارد. پاره‌ای از محققین این حوزه استدلال می‌کنند که برای کاهش استفاده نادرست از مفاهیم ریسک در ارزیابی و مدیریت ایمنی، ابتدا باید سوء تفاهم‌های موجود بین سازمان‌ها و پژوهشگران در مورد ریسک و مفاهیم مرتبط با آن برطرف شود. خوشبختانه، مدیریت ریسک در حال حاضر در مسیر توسعه‌ای پیوسته قرار دارد. این پیشرفت به خلق تعداد زیادی از نوآوری‌های ایمنی منجر شده است که صنعت ساخت‌وساز با بهره‌گیری از آن‌ها، به طور مداوم در حال بهبود عملکرد ایمنی خود است. (آون و زیو، ۲۰۱۳: ؟).

ادبیات نظری موجود این حوزه مواید آن است که عدم قطعیت<sup>۲</sup>، جوهر اصلی ریسک است. برای درک این عدم قطعیت، می‌توانیم به تحلیل حوادث، رخدادها و اتفاقات نزدیک به فاجعه بپردازیم. این تحلیل‌ها به ما کمک می‌کنند تا انواع ریسک‌ها و احتمال وقوع آن‌ها را شناسایی کنیم. به طور کلی، تحلیل ریسک ایمنی بر پایه‌ی نظریه‌های علت‌یابی حوادث نظیر؛ نظریه‌هایی مانند "تئوری علل حوادث هاینریش"<sup>۳</sup> یا "مدل پنیر سوئیسی ریزن"<sup>۴</sup> استوار است. وجه مشترک این نظریه‌ها در این است که همگی حوادث را نتیجه‌ی ترکیبی از عوامل ریسک زمینه‌ای، غیرمستقیم و مستقیم می‌دانند (لی و همکاران، ۲۰۱۸: ۲). عوامل ریسک زمینه‌ای به آن دسته از فاکتورها اشاره دارند که در کوتاه‌مدت قابل تغییر نیستند. این عوامل، مسائلی مانند شرایط اقتصادی، محیط امنیتی کلی، یا چارچوب‌های قانونی موجود را شامل می‌شود. در مقابل، عوامل ریسک غیرمستقیم عمدتاً به ضعف‌ها و نقص‌های مدیریتی بازمی‌گردند. در نهایت، عوامل ریسک مستقیم اغلب شامل رفتارهای نایمن افراد و شرایط نایمن تجهیزات یا محیط کار می‌شوند. هدف نهایی از انجام تحلیل ریسک، شناسایی دقیق و کمی‌سازی تمامی این عوامل ریسک است تا بتوانیم آن‌ها را به درستی مدیریت کنیم (هولا و سزوستاک<sup>۵</sup>، ۲۰۱۷: ۳۵۷). بنابراین، واضح است که شناسایی این عوامل می‌تواند تا حدی حوادث و شبه حوادث را کنترل کند تا از قبل، حوادث را کنترل کرده و خسارات ناشی از آنها را کاهش دهد.

### ۲.۲. مدیریت ریسک پروژه و فرآیندهای آن

مدیریت ریسک پروژه مجموعه‌ای از فرآیندها را دربرمی‌گیرد که شامل برنامه‌ریزی، شناسایی، تحلیل، برنامه‌ریزی پاسخ، اجرای پاسخ‌ها و نظارت بر ریسک در طول عمر پروژه است. هدف غایی مدیریت ریسک پروژه این است که با افزایش احتمال و/یا تأثیر ریسک‌های مثبت (فرصت‌ها) و کاهش احتمال و/یا تأثیر ریسک‌های منفی (تهدیدها)، شانس موفقیت پروژه را به حداکثر برساند. بر اساس استانداردهایی مانند PMBOK و ISO 31000، فرآیندهای کلیدی و اصلی مدیریت ریسک پروژه را می‌توان به شرح زیر معرفی نمود (موسسه مدیریت پروژه<sup>۶</sup>، ۲۰۱۷: ۳۸۹):

۱. برنامه‌ریزی مدیریت ریسک: این گام به تعریف چگونگی انجام کلیه فعالیت‌های مربوط به مدیریت ریسک در پروژه اختصاص دارد.

۲. شناسایی ریسک‌ها: در این مرحله، ریسک‌های خاص پروژه و همچنین منابع کلی ریسک که بر پروژه تأثیر می‌گذارند، شناسایی شده و ویژگی‌های آن‌ها به دقت مستند می‌شوند

۳. انجام تحلیل کیفی ریسک: این فرآیند با ارزیابی احتمال وقوع و تأثیر ریسک‌های منفرد پروژه، در کنار سایر ویژگی‌ها، به اولویت‌بندی آن‌ها برای تحلیل‌های عمیق‌تر یا اقدامات آتی می‌پردازد

۴. انجام تحلیل کمی ریسک: در این گام، تأثیر ترکیبی ریسک‌های شناسایی‌شده و سایر عوامل عدم قطعیت بر اهداف کلی پروژه، به صورت عددی و کمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup> Esmaeili, Hallowell., 2015

<sup>2</sup> Uncertainty

<sup>3</sup> Heinrich

<sup>4</sup> Reason

<sup>5</sup> Hola ; Szostak., 2017

<sup>6</sup> Project Management Institute (PMI)., 2017

۵. برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک: این فرآیند شامل تدوین گزینه‌ها، انتخاب استراتژی‌های مناسب و توافق بر سر اقداماتی است که برای مدیریت کلی ریسک پروژه و همچنین مقابله با هر یک از ریسک‌های خاص، باید انجام شوند.

۶. اجرای پاسخ‌های ریسک: در این مرحله، برنامه‌های مدیریت ریسک که بر سر آن‌ها توافق شده است، به مرحله عمل درمی‌آیند.

۷. نظارت بر ریسک‌ها: این فرآیند شامل پایش مستمر اجرای برنامه‌های پاسخ به ریسک، پیگیری ریسک‌های شناسایی‌شده، کشف و تحلیل ریسک‌های جدید و ارزیابی اثربخشی کلی فرآیند مدیریت ریسک در تمام مراحل پروژه است.

### ۲.۳ انواع ریسک در صنعت ساخت‌وساز

با توجه به اینکه تعریف واحدی از اصطلاح «ریسک» در مطالعات تحقیقاتی ارائه نشده است، از اینرو طبقه‌بندی‌های ریسک و روش‌های مدیریت ریسک بسیار متنوعی هم‌ارایه شده است، با این حال عنصر مشترک ریسک در همه تعاریف، عدم قطعیت و احتمال موفقیت یا متحمل شدن ضرر است. از آنجایی که صنعت ساخت و ساز با خطرات متعددی روبرو است، از اینرو به مدیریت دقیق و کنترل بیشتری از ریسک نیاز دارد. ادبیات نظری موجود نشان می‌دهد که خطرات مرتبط با سرمایه انسانی به عنوان مهمترین و ضروری ترین استراتژی‌های کاهش موثر شناسایی شده اند (سارتاپوتنا، زویگزن<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸: ۱۲۲). حوادث محل کار تهدیدات قابل توجه دیگری را در این صنعت ایجاد می‌کند که بر نیاز به مقررات ایمنی شفاف، آموزش کافی و سیاست‌های سختگیرانه تأکید می‌نمایند (تابیت، یونوس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸: ۶۸).

این صنعت همچنین در برابر خطرات سیاسی، ژئوپلیتیکی، اپیدمیولوژیکی و نظارتی آسیب پذیر است که می‌تواند تأثیرات اقتصادی قابل توجهی داشته باشد سایر خطرات رایج شامل موارد مربوط به تولید، فصلی بودن، اتفاقات طبیعی همچون سیل، زلزله و...، لجستیک و حمل و نقل، مالی، مدیریتی، سفارشات غیرقابل پیش بینی و چالش‌های فنی است. صنعت ساخت و ساز با انواع مختلف دیگری از ریسک‌ها هم‌رواچه است که می‌توانند به طور قابل توجهی بر نتایج پروژه تأثیر بگذارند. این ریسک‌ها به ریسک‌های دولتی و سیاسی، مالی و اقتصادی، مدیریتی و فناوری، اجتماعی و فرهنگی و طبیعی و زیست‌محیطی طبقه‌بندی می‌شوند. معمولاً ریسک‌های اقتصادی و مالی به ویژه در صنعت ساخت و ساز بیشتر تأثیرگذار بوده و برجسته می‌باشند (سارتاپوتنا، زویگزن، ۲۰۱۸: ۱۲۳-۱۲۴؛ نراج، باراسوبارمانیان<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵: ۷۰).

البته به شکل‌های دیگری نیز می‌توان ریسک‌ها را بررسی نمود. ریسک‌ها را می‌توان بر اساس ماهیتشان به سه گروه اصلی: ریسک‌های تجاری، ریسک‌های فنی و ریسک‌های عملیاتی تقسیم نمود. ریسک فنی به معنای عدم توانایی در توسعه محصولی است که الزامات مشخص‌شده را برآورده سازد. در مقابل، ریسک عملیاتی به چالش‌هایی اشاره دارد که در همکاری و تعامل مشتری با اعضای اصلی تیم پروژه بروز می‌کند. از منظر پذیرش هم، ریسک‌ها به دو دسته قابل قبول و غیرقابل قبول طبقه‌بندی می‌شوند. ریسک قابل قبول، ریسکی است که تأثیر منفی آن صرفاً بر یک وظیفه‌ی واقع در مسیر غیربحرانی<sup>۴</sup> پروژه محدود می‌شود. در مقابل، ریسک غیرقابل قبول، ریسکی است که پیامدهای منفی آن می‌تواند کلیت پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. ریسک‌ها همچنین از نظر افق زمانی تأثیرگذاری به دو گروه کوتاه‌مدت و بلندمدت تفکیک می‌شوند. ریسک کوتاه‌مدت دارای اثری فوری است، نظیر تغییر ناگهانی در الزامات مربوط به یک خروجی قابل تحویل. این در حالی است که ریسک بلندمدت، تأثیر خود را در آینده‌ای دورتر نمایان می‌سازد؛ به عنوان مثال، انتشار محصولی بدون انجام آزمایشات کافی. در نهایت، از حیث امکان مدیریت، ریسک‌ها به دو دسته قابل مدیریت و غیرقابل مدیریت تقسیم‌بندی می‌شوند. ریسک قابل مدیریت، ریسکی است که می‌توان با آن سازگار شد، مانند یک تغییر جزئی در الزامات پروژه. اما ریسک غیرقابل مدیریت، ریسکی است که امکان تطبیق با آن وجود ندارد؛ به طور نمونه، جابجایی گسترده و ناگهانی اعضای کلیدی تیم پروژه (تابیت، یونوس<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸: ۶۹).

### ۲.۴ هوش مصنوعی و زیرشاخه‌های آن

هوش مصنوعی (AI) به شاخه‌ای از علوم کامپیوتر اطلاق می‌شود که به توسعه سیستم‌هایی می‌پردازد که قادر به انجام وظایفی هستند که به طور معمول به هوش انسانی، مانند یادگیری، حل مسئله، درک زبان و تصمیم‌گیری. نیاز دارند. اصولاً هوش مصنوعی چتری وسیع است که فناوری‌ها، کاربردها، انواع و زیرشاخه‌های گوناگونی را در بر می‌گیرد. طبق یکی از دسته‌بندی‌های موجود، هوش مصنوعی را می‌توان به سه دسته‌ی اصلی: هوش مصنوعی محدود<sup>۶</sup>، هوش عمومی مصنوعی<sup>۷</sup> و ابرهوش مصنوعی<sup>۸</sup> (بائوم و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۷: ۴۲۰) تقسیم می‌شود.

1 Sārtaputna & Zvaigzne, 2018

2 Thabit & Younus, 2018

3 Neeraj & Balasubramanian, 2015

4 Non-critical path

5 Thabit & Younus, 2018

6 Artificial Narrow Intelligence - ANI

7 Artificial General Intelligence - AGI

8 Artificial Superintelligence - ASI

9 Baum et al., 2017

هوش مصنوعی محدود (ANI)، که گاهی اوقات به آن هوش مصنوعی ضعیف (Weak AI) نیز گفته می‌شود، نوعی از هوش مصنوعی است که در آن ماشین‌ها توانایی انجام وظایف خاصی را با مهارت بالا نشان می‌دهند. نمونه‌های بارز این نوع هوش مصنوعی شامل بازی شطرنج، پیش‌بینی فروش، پیشنهاد فیلم، ترجمه زبان و پیش‌بینی آب و هوا می‌شود. هوش عمومی مصنوعی (AGI)، که گاهی اوقات به آن هوش مصنوعی قوی (Strong AI) نیز می‌گویند، به تلاش برای ساخت ماشین‌هایی می‌پردازد که بتوانند در سطحی مشابه با انسان‌ها عمل کنند. به گفته پنچین (۲۰۰۷)، AGI به ماشین‌هایی اشاره دارد که قادرند طیف وسیعی از مسائل پیچیده را در حوزه‌های مختلف حل کنند و به صورت خودمختار، با افکار، نگرانی‌ها، احساسات، نقاط قوت، ضعف‌ها و حتی خلق و خوی خود، عمل نمایند. دستیابی به این نوع هوش مصنوعی همچنان یک هدف اصلی در تحقیقات هوش مصنوعی است، اما تاکنون چالش‌برانگیز و دور از دسترس باقی مانده است (گوئرزل، وانگ؛ ۲۰۰۷: ۲۶). در نهایت، ابرهوش مصنوعی (ASI) به ساخت ماشین‌هایی مربوط می‌شود که قابلیت‌هایشان در چندین حوزه، فراتر از توانایی‌های انسانی است (باتوم و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۲۱)

بر اساس یکی از دسته‌بندی‌های موجود، زیرشاخه‌های متعددی برای هوش مصنوعی تعریف شده است که شامل مواردی همچون: الف: یادگیری ماشین<sup>۴</sup>، ب: سیستم‌های مبتنی بر دانش<sup>۵</sup>، پ: بینایی کامپیوتر<sup>۶</sup>، ت: رباتیک<sup>۷</sup>، ث: پردازش زبان طبیعی<sup>۸</sup>، ج: برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار<sup>۹</sup>، و چ: بهینه‌سازی<sup>۱۰</sup> می‌باشند (ابیویه و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۲۱: ۳-۲). اصولاً الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند از حجم وسیعی از داده‌های بلادرنگ که توسط فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر اینترنت اشیا (IoT)، حسگرها، سیستم‌های سایبر-فیزیکی (CPS)، رایانش ابری (Cloud Computing)، تحلیل کلان‌داده‌ها (Big Data Analytics - BDA)، داده‌کاوی متنی (Text Mining) و فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) تولید می‌شوند، بهره‌برداری کنند. این قابلیت، مسیر را برای مدیریت هوشمندتر و قابل‌اتکاتر، و همچنین تصمیم‌گیری‌های کارآمدتر در پروژه‌های ساخت‌وساز هموار می‌سازد (زانگ و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۷: ۶۱۸). زمانی که این داده‌ها به فرمی ساختاریافته و قابل فهم تبدیل شوند، می‌توانند مبنایی قدرتمند برای تحلیل‌های داده‌محور بعدی قرار گیرند؛ تحلیل‌هایی که بینش‌های ارزشمندی را برای مدیریت دانش در پروژه‌ها و در نهایت، توسعه اقتصادی و اجتماعی صنعت فراهم می‌آورند.

فرآیندهای یادگیری ماشین بر پایه‌ی سوابق داده‌های تاریخی عمل می‌کنند. در این فرآیند، ماشین تلاش می‌کند تا از طریق وزن‌دهی و تصحیح مداوم، روابط پنهان میان داده‌های ورودی و خروجی را کشف کند (ابیویه و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۲۱: ۳). به این ترتیب، الگوریتم‌های ML می‌توانند حجم بالایی از داده‌ها را تحلیل کرده تا از تجربیات گذشته درس بگیرند، الگوهای موجود در داده‌ها را شناسایی کنند، قواعد کلی را استخراج نمایند و در مسائل پیچیده، غیرخطی و نامطمئن، پیش‌بینی‌هایی دقیق برای ورودی‌های آتی ارائه دهند (ملیت، کالوجیرو<sup>۱۴</sup>؛ ۲۰۰۸: ۵۷۶)

## ۲.۵. کاربرد هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز

صنعت ساخت‌وساز در حال تجربه یک انقلاب دیجیتالی عمیق است. این تحول چشمگیر، نتیجه‌ی تولید انبوه داده‌ها و پیشرفت خیره‌کننده‌ی ابزارهای دیجیتال و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، نظیر هوش مصنوعی (AI)، دوقلوهای دیجیتال (Digital Twins) و اینترنت اشیا (IoT) است. این فناوری‌ها، زیربنای فنی لازم را برای ظهور صنعتی هوشمند و پویا فراهم می‌کنند که همواره در حال بهبود است. هوش مصنوعی به عنوان یکی از ستون‌های اصلی انقلاب صنعتی و عصر دیجیتال شناخته می‌شود و نقشی محوری در ایجاد ارتباط فعال میان دنیای فیزیکی و دیجیتال ایفا می‌کند. این حوزه شامل مجموعه‌ای از علوم و تکنیک‌های مهندسی است که هدف آن‌ها، شبیه‌سازی فرآیندهای شناختی انسان در ماشین‌ها، از جمله یادگیری، استدلال، ادراک، برنامه‌ریزی و قابلیت خوداصلاحی است (زانگ و همکاران<sup>۱۵</sup>، ۲۰۱۷: ۲۰۱۷)

1 Pennachin

2 Goertzel, Wang., 2007

3 Baum et al., 2017

4 Machine Learning

5 Knowledge-based systems

6 Computer Vision

7 Robotics

8 Natural Language Processing

9 Automated Planning and Scheduling

10 Optimization

11 Abioye et al., 2021

12 Zhong et al. 2017

13 Abioye et al., 2021

14 Mellit, Kalogirou., 2008

15 Zhong et al., 2017

۶۱۷). هوش مصنوعی در حال حاضر کاربردهای گسترده‌ای را برای تقویت، بهینه‌سازی و خودکارسازی فرآیندها در سراسر چرخه عمر پروژه‌های ساخت‌وساز پیدا کرده است که همگی به سمت "مدیریت هوشمند" پروژه‌ها سوق می‌یابند. امروزه تحقیقات انجام یافته در این حوزه نش می‌دهند که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند قابلیت‌های تحلیلی را در حوزه مدیریت ریسک (RM) به طرز چشمگیری ارتقا بخشند و در عین حال، سطح بالایی از جزئیات و عمق را در تحلیل‌های پیش‌بینانه ارائه دهند. گوزمن-اوربینا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸: ۹۹). هوش مصنوعی، با بهره‌گیری از تکنیک‌های متنوع یادگیری ماشین و تحلیل داده، در طیف وسیعی از فرآیندهای مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت و ساز قابل پیاده‌سازی است. از جمله مهمترین این کاربردها می‌توان به مواردی همچون: پیش‌بینی ریسک مبتنی بر داده؛ شناسایی زود هنگام نشانه‌های ریسک<sup>۲</sup>؛ ارزیابی کمی و اولویت بندی ریسک از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تکنیک‌های تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)؛ پیشگیری فعالانه از ریسک<sup>۳</sup>؛ بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت از طریق سیستم‌های پشتیبانی تصمیم (DSS) اشاره نمود. با این حال، با وجود نقش حیاتی هوش مصنوعی در تضمین موفقیت پروژه‌ها و پتانسیل آن برای رفع کاستی‌های روش‌های سنتی مدیریت ریسک، کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت ریسک صنعت ساخت‌وساز هنوز محدود و نسبت به سایر صنایع عقب‌تر است. در حال حاضر، چارچوب‌های قوی مدیریت ریسک مبتنی بر هوش مصنوعی به طور کامل توسعه نیافته‌اند و جا دارد که به شکل ویژه‌تری مورد بررسی قرار گیرد. لذا مواردی همچون: توسعه پلتفرم مدیریت دیجیتال برای مدیریت هوشمند ساخت و ساز و مدیریت ریسک؛ ساخت یک سیستم تصمیم‌گیری برای مدیریت ریسک برای یافتن یک راه‌حل بهینه؛ اصلاح مدل‌های دیجیتال ساخت که اساس پلتفرم مدیریت دیجیتال خواهند بود؛ شناسایی و دسته‌بندی عوامل ریسک ساخت و ساز مشخصه با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، ساخت یک API برای جاسازی سیستم تصمیم‌گیری در پلتفرم مدیریت دیجیتال و... می‌تواند به عنوان چالش‌هایی باشد که بایستی مورد توجه قرار گیرد (چنیا<sup>۴</sup>، ۲۰۲۲: ۷۲۹۳۶).

### ۳. روش شناسی تحقیق:

این تحقیق از نوع توسعه‌ای - کاربردی بوده و با رویکرد کیفی و مبتنی بر روش دلفی طراحی شده است. هدف از این بخش، تدوین یک چارچوب مفهومی برای به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت‌وساز در سازمان‌های پروژه‌محور است. به منظور گردآوری داده‌های مورد نیاز، از روش دلفی در دو مرحله استفاده شد. در گام اول، با استفاده از تحلیل محتوای مطالعات پیشین، گزارش‌های صنعتی و یافته‌های حاصل از مرور نظام‌مند ادبیات، فهرستی اولیه از مؤلفه‌ها و زیرمؤلفه‌های مؤثر در چارچوب مدیریت ریسک مبتنی بر هوش مصنوعی استخراج گردید. این فهرست به عنوان ورودی مرحله اول روش دلفی مورد استفاده قرار گرفت.

برای اجرای فرایند دلفی، پانلی از ۱۵ نفر از خبرگان به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند. این خبرگان شامل اساتید دانشگاه در حوزه مهندسی عمران و مدیریت ساخت، مدیران ارشد پروژه در شرکت‌های ساختمانی بزرگ، و متخصصان هوش مصنوعی دارای تجربه اجرایی در صنعت ساخت‌وساز بودند. معیارهای انتخاب شامل: داشتن حداقل ۱۰ سال سابقه کار حرفه‌ای یا تحقیقاتی مرتبط، داشتن حداقل مدرک کارشناسی ارشد، و تجربه مشخص در پروژه‌های ساختمانی دارای مؤلفه‌های فناورانه بود.

گردآوری داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های باز در مرحله اول دلفی و پرسشنامه بسته در مرحله دوم انجام گرفت. در مرحله اول، مشارکت‌کنندگان به بررسی و اصلاح فهرست اولیه مؤلفه‌ها پرداختند و مؤلفه‌های پیشنهادی خود را نیز اضافه نمودند. در مرحله دوم، از خبرگان خواسته شد تا میزان اهمیت هر مؤلفه را در مقیاس لیکرت ۵ درجه‌ای ارزیابی کنند. تحلیل داده‌های حاصل با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی و شاخص میانه برای اجماع، انجام گرفت. مؤلفه‌هایی که دارای میانه برابر یا بیشتر از ۴ و انحراف معیار کمتر از ۱ بودند، به عنوان اجزای نهایی چارچوب پذیرفته شدند. نتیجه این فرایند، دستیابی به مجموعه‌ای از ابعاد کلیدی و مؤلفه‌های علمی-کاربردی در زمینه استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای مدیریت ریسک ساخت‌وساز خواهد بود، که زمینه‌ساز ارائه چارچوب نهایی این مقاله خواهد بود. پایایی سوالات طراحی شده توسط ۳ تن از اساتید مورد تایید قرار گرفته و روایی آنها نیز با محاسبه آلفای کرونباخ به میزان ۰/۹۱ مورد تایید قرار گرفت.

### ۴- یافته‌های تحقیق:

#### ۴-۱. یافته‌های توصیفی تحقیق

در اولین بخش از یافته‌های تحقیق، نتایج حاصل از ویژگی‌های دموگرافی خبرگان مورد بررسی طی جدول ۲ به شرح زیر ارائه می‌شود.

<sup>1</sup> Guzman-Urbina et al., 2018

<sup>2</sup> Early Risk Warning

<sup>3</sup> Proactive Risk Mitigation

<sup>4</sup> Chenya., 2022

جدول ۲. ویژگی‌های دموگرافی خبرگان

متغیر	گروه‌بندی	فراوانی	درصد
جنسیت	مرد	۱۲	۸۰٪
	زن	۳	۲۰٪
سن	۳۰-۳۹ سال	۵	۳۳.۳٪
	۴۰-۴۹ سال	۶	۴۰٪
	۵۰ سال و بالاتر	۴	۲۶.۷٪
تحصیلات	کارشناسی ارشد	۷	۴۶.۷٪
	دکتری	۸	۵۳.۳٪
زمینه تخصصی	مدیریت پروژه/ساخت	۶	۴۰٪
	هوش مصنوعی/فناوری اطلاعات	۵	۳۳.۳٪
	مهندسی عمران	۴	۲۶.۷٪
سابقه کار	۱۰ تا ۱۵ سال	۶	۴۰٪
	بیشتر از ۱۵ سال	۹	۶۰٪

نتایج توصیفی جدول فوق نشان می‌دهد که اکثر خبرگان شرکت‌کننده در این تحقیق دارای تحصیلات دکتری (۵۳.۳٪) و عمدتاً سابقه کاری بیش از ۱۵ سال (۶۰٪) داشته‌اند که نشان‌دهنده اعتبار بالای نظرات جمع‌آوری شده است. بعلاوه ترکیب متعادلی از تخصص‌ها در حوزه‌های مرتبط با پروژه‌های ساخت‌وساز و هوش مصنوعی لحاظ شده که به جامعیت دیدگاه‌ها در طراحی چارچوب کمک شایانی نموده است.

#### ۴.۲. یافته‌های مرحله اول دلفی:

در مرحله اول روش دلفی، فهرستی از مؤلفه‌ها بر اساس مرور پیشینه و بررسی‌های اولیه ارائه گردید که توسط خبرگان بررسی، اصلاح و تکمیل شد. جدول زیر فهرست تجمیعی از مؤلفه‌های اولیه را نشان می‌دهد که به عنوان ورودی مرحله دوم مورد استفاده قرار گرفت:

جدول ۲. مؤلفه‌های اولیه پیشنهادی بر اساس مرور ادبیات و بازخورد خبرگان در مرحله اول دلفی

بُعد مفهومی پیشنهادی	مؤلفه‌های اولیه استخراج‌شده
شناسایی ریسک هوشمند	داده‌کاوی گزارش‌های حادثه؛ تحلیل مستندات طراحی و پیمان؛ استخراج داده از حسگرهای سلامت نیروی کار؛ تحلیل ویدئویی بلادرنگ از سایت با AI؛ پردازش زبان طبیعی در مستندات؛ تحلیل پویای داده‌های موقعیت مکانی کارکنان؛ شناسایی شبه‌حادثه‌ها از طریق متن‌کاوی پیام‌ها
ارزیابی و تحلیل ریسک	الگوریتم‌های پیش‌بینی ریسک (ANN, SVM)؛ مدل‌سازی زنجیره‌های علی با شبکه بی‌زی؛ سناریوپردازی آینده‌نگر؛ تحلیل حساسیت پویا؛ تکنیک‌های فازی و احتمال مشروط؛ استخراج روابط پنهان از طریق Process Mining؛ مدل‌سازی چندلایه ریسک با داده‌های مالی و عملیاتی
پاسخ و کنترل ریسک	بهینه‌سازی پاسخ با DSS؛ یادگیری تقویتی؛ طراحی پاسخ‌های چندمرحله‌ای؛ مشارکت سیستم خبره برای سناریوسازی؛ تخصیص خودکار منابع برای پاسخ‌دهی؛ سیستم پیشنهادگر اقدامات فوری؛ تحلیل هزینه-منفعت پاسخ‌های مختلف
پایش و بازبینی ریسک	داشبوردهای تحلیلی بلادرنگ؛ سیستم هشدار زودهنگام؛ تحلیل تغییرات ریسک در چرخه پروژه؛ یادگیری تطبیقی برای بهبود مداوم؛ اتصال بلاک‌چین برای ثبت پاسخ‌ها؛ تلفیق داده‌های محیطی و کلان اقتصادی برای پایش پیشرفته؛ تحلیل جریان ریسک در زنجیره تأمین
الزامات فناورانه	یکپارچگی سیستم‌های مدیریت داده؛ پیاده‌سازی معماری باز برای استقرار AI؛ الزامات امنیت سایبری و حریم خصوصی؛ زیرساخت پردازش داده حجیم (Big Data)؛ الزامات اتصال API برای تبادل میان‌سازمانی؛ اتوماسیون فرایندهای داده‌محور
الزامات سازمانی	آموزش تخصصی و توسعه مهارت دیجیتال؛ سیاست‌گذاری پذیرش فناوری در ساخت؛ ایجاد تیم میان‌رشته‌ای AI + PM؛ تدوین قوانین رفتار اخلاقی در تصمیم‌گیری ماشینی؛ تعریف نقش‌های جدید سازمانی؛ ساختاردهی به مدیریت تغییر دیجیتال
حاکمیت و چارچوب‌های حقوقی	تطابق با مقررات ملی و بین‌المللی (AI Act, GDPR)؛ طراحی مکانیسم پاسخگویی داده‌محور؛ چارچوب حقوقی تخصیص مسئولیت در خطاهای AI؛ مدیریت ریسک‌های اخلاقی؛ شفافیت در الگوریتم و منطق تصمیم‌گیری
یکپارچه‌سازی ریسک در زنجیره تأمین	تحلیل ریسک تأمین‌کنندگان با داده‌های گذشته؛ شناسایی گلوگاه‌های زنجیره با AI؛ تحلیل تاخیرات و پیامدهای سیستمی در لجستیک؛ رتبه‌بندی ریسک‌پذیری تأمین‌کنندگان؛ مدل‌سازی ریسک سیستمی زنجیره تأمین
فرهنگ و مشارکت ذی‌نفعان	تحلیل شبکه تعاملات اجتماعی پروژه؛ سنجش نگرش ذی‌نفعان به پذیرش فناوری؛ استخراج احساسات و ادراکات از نظرسنجی‌ها با NLP؛ ارزیابی مشارکت‌پذیری در مواجهه با ریسک؛ مدل‌سازی رفتار جمعی در شرایط بحرانی

دیدگاه‌های استخراج‌شده از پانل خبرگان در گام اول این پژوهش، منعکس‌کننده درک عمیق و تجربه میدانی آن‌ها از ریسک‌های متنوع و پیچیده صنعت ساخت‌وساز در ایران است که مجموعاً تعداد ۵۴ مؤلفه اصلی را در بر می‌گیرد که در ۹ بعد مفهومی قابل طبقه‌بندی می‌باشند. در اولین بعد مفهومی بدست آمده، یعنی شناسایی ریسک هوشمند، اکثر خبرگان تأکید داشتند که ریسک‌های نیروی انسانی و ایمنی محل کار از جمله پرتکرارترین و پرهزینه‌ترین مخاطرات پروژه‌های عمرانی هستند. به همین سبب، پیشنهادات آن‌ها به‌طور جدی معطوف به

تقویت مؤلفه‌هایی همچون تحلیل داده‌های سلامت کارگران، آموزش تخصصی کارکنان، تحلیل تصویری محل کار و هشدارهای زود هنگام شده است؛ مؤلفه‌هایی که به‌روشنی با ریسک‌های انسانی و ایمنی شناسایی شده در ادبیات کلاسیک هم مطابقت دارد.

در بعد مفهومی دوم، یعنی ارزیابی و تحلیل ریسک با هوش مصنوعی نیز بخش قابل توجهی از خبرگان بر ضرورت دقت در ارزیابی و تحلیل ریسک‌ها در پروژه‌های ساخت‌وساز تأکید داشتند. از دیدگاه آن‌ها، ارزیابی صرفاً شهودی و تجربی ریسک دیگر پاسخگوی پیچیدگی‌های پروژه‌های بزرگ نیست و بایستی از ظرفیت‌های تحلیل داده، مدل‌سازی پیش‌بین و تحلیل شبکه‌ای استفاده شود. در همین راستا، مؤلفه‌هایی نظیر الگوریتم‌های پیش‌بینی با شبکه‌های عصبی و SVM، تحلیل‌های فازی، مدل‌سازی روابط علی با شبکه‌های بی‌زی، و بهره‌گیری از فرایند استخراج فرایند (process mining) برای تحلیل تعاملات چندبعدی پیشنهاد گردید.

از دیدگاه خبرگان، بعد مفهومی سوم، یعنی پاسخ و کنترل ریسک حاکی از آن بود که اغلب پاسخ‌های سازمانی به ریسک در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ، از یک الگوی واکنشی و مقطعی تبعیت می‌کنند. در پاسخ به این کاستی، خبرگان به کارگیری سامانه‌های تصمیم‌یار (DSS)، یادگیری تقویتی برای تولید پاسخ‌های تطبیقی، شبیه‌سازی واکنش‌های محتمل و سیستم‌های پیشنهادگر اقدام را توصیه نمودند. این مؤلفه‌ها به‌ویژه در مواجهه با ریسک‌های عملیاتی، مدیریتی، زمان‌بندی، و حتی رفتاری در پروژه‌ها، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. این دسته از ریسک‌ها که در ادبیات مدیریت پروژه با عنوان ریسک‌های «غیرقابل پیش‌بینی» و «پویای اجرایی» طبقه‌بندی می‌شوند، می‌توانند از طریق طراحی اقدامات چندمرحله‌ای و انطباق‌پذیر با داده‌های زنده پروژه، به شکلی مؤثر کنترل شوند. هوش مصنوعی در این زمینه نه تنها به تصمیم‌گیری سریع‌تر کمک می‌کند، بلکه با تحلیل گذشته‌نگر سناریوهای مشابه، گزینه‌هایی بهینه را نیز در زمان واقعی پیشنهاد می‌دهد.

در بعد مفهومی چهارم، یعنی پایش و بازبینی ریسک، اکثر خبرگان اذعان داشته‌اند که پس از شناسایی و ارزیابی ریسک، مهم‌ترین شکاف در مدیریت پروژه، فقدان سیستم‌های پایش هوشمند و بازخورد مؤثر است. آن‌ها بر مؤلفه‌هایی مانند داشبوردهای تحلیلی لحظه‌ای، تحلیل تغییرات روند ریسک، سیستم هشدار سریع، یادگیری تطبیقی، و به‌ویژه ادغام فناوری بلاک‌چین برای ثبت غیرقابل تغییر تصمیمات و اقدامات تأکید کردند. این ابزارها در مواجهه با ریسک‌های در حال تحول، ریسک‌های غیرقابل پیش‌بینی، و ریسک‌های عملیاتی بلندمدت، مؤثر تلقی می‌شوند. ریسک‌هایی نظیر تأخیرات زنجیره‌ای، تغییرات ناگهانی در عوامل محیطی یا نهادی، و خطاهای انسانی در تصمیم‌گیری، از جمله چالش‌هایی هستند که پایش هوشمند می‌تواند آن‌ها را در لحظه شناسایی و مدیریت کند. این بخش از چارچوب با ادبیات نظری مرتبط با مدیریت ریسک مستمر، مدیریت چرخه عمر پروژه و مدیریت تغییر کاملاً هم‌راستا است.

در بعد مفهومی پنجم، یعنی الزامات فناورانه، دیدگاه اغلب خبرگان نشان می‌داد که موفقیت چارچوب‌های هوش مصنوعی بدون زیرساخت‌های فناورانه مناسب غیرممکن است. بنابراین، توصیه‌های آنان شامل مؤلفه‌هایی نظیر معماری باز سامانه‌ها، امنیت داده، قابلیت اتصال میان سازمانی (API)، و زیرساخت‌های پردازش کلان‌داده بود. این الزامات به‌ویژه در مواجهه با ریسک‌های فناورانه، امنیتی و عملیاتی ناشی از عدم هماهنگی زیرساختی یا حملات سایبری در پروژه‌های ساختمانی بزرگ، نقش اساسی دارند. ادبیات پژوهش‌های نوین نیز بر همین نکته تأکید دارد که فناوری بدون معماری یکپارچه و ظرفیت مقیاس‌پذیر، توانایی مواجهه با پیچیدگی‌های ریسک‌های مدرن را نخواهد داشت.

بسیاری از خبرگان در بعد مفهومی ششم، یعنی الزامات سازمانی، ریشه ناکامی در مدیریت ریسک‌های فناورانه را در ساختارهای سخت‌گیرانه، عدم آمادگی کارکنان و نبود فرهنگ سازمانی پذیرنده فناوری می‌دانستند. در همین راستا، مؤلفه‌هایی چون آموزش تخصصی، ایجاد نقش‌های نوین سازمانی، تیم‌های میان‌رشته‌ای، و مدیریت تغییر دیجیتال، به‌طور مکرر در پیشنهادات آنان تکرار شد. این مؤلفه‌ها نیز مستقیماً با ریسک‌های نهادی، رفتاری، فرهنگی و مدیریتی مرتبط هستند که مانع پذیرش و اجرای مؤثر فناوری‌های جدید در سازمان‌های پروژه‌محور می‌شوند. به‌ویژه در کشورهایی با ساختارهای سنتی، این مؤلفه‌ها نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌های نوآورانه خواهند داشت. حاکمیت و چارچوب‌های حقوقی، بعد مفهومی دیگری است که خبرگان آگاه از حوزه‌های حقوق فناوری، بر ضرورت ایجاد شفافیت، مسئولیت‌پذیری، و رعایت اصول اخلاقی در استفاده از AI در تصمیم‌گیری‌های پروژه تأکید داشتند. مؤلفه‌هایی مانند تبعیت از مقررات بین‌المللی، طراحی مکانیسم پاسخگویی، و شفاف‌سازی منطق الگوریتمی در این بخش گنجانده شد. این بعد برای مواجهه با ریسک‌های حقوقی، قانونی، اجتماعی و اخلاقی کاربرد دارد و بر هم‌راستاسازی بین حوزه حقوقی و مهندسی در پروژه‌های پیچیده تأکید دارد. مفاهیمی نظیر «AI Ethics» و «Explainable AI» نیز پشتوانه نظری این مؤلفه‌ها هستند.

دیدگاه‌های تخصصی برخی از خبرگان در بعد مفهومی هشتم، یعنی یکپارچه‌سازی ریسک در زنجیره تأمین نشان می‌داد که عمده ریسک‌های پنهان پروژه، در لایه‌های تأمین‌کننده و لجستیک نهفته‌اند. از این رو، تحلیل داده‌های تأمین‌کنندگان، رتبه‌بندی ریسک‌پذیری آن‌ها، و تحلیل

پیامدهای سیستمی در زنجیره تأمین به‌عنوان مؤلفه‌هایی کلیدی پیشنهاد شد. این بعد مفهومی در پاسخ به ریسک‌های سیستماتیک، لجستیکی، وابستگی بیش‌ازحد به تأمین‌کنندگان خاص، و مخاطرات ناشی از وقفه‌های بین‌المللی (نظیر کووید-۱۹) طراحی شده است. نهایتاً در بعد مفهومی نهم که فرهنگ و مشارکت ذی‌نفعان است نیز خبرگان حوزه منابع انسانی و ذی‌نفعان بر این باور بودند که هرگونه نوآوری فناورانه بدون درک درست از پذیرش آن توسط ذی‌نفعان با شکست مواجه خواهد شد. بنابراین، مؤلفه‌هایی مانند سنجش نگرش ذی‌نفعان، استخراج ادراکات با NLP، و تحلیل شبکه مشارکت اجتماعی پروژه در این بخش گنجانده شد. این مؤلفه‌ها مستقیماً به ریسک‌های اجتماعی، فرهنگی و رفتاری اشاره دارند و با نظریه‌های پذیرش فناوری (TAM)، رفتار برنامه‌ریزی‌شده و روان‌شناسی سازمانی همخوانی دارند.

## ۵.۲. یافته‌های مرحله دوم دلفی:

پس از استخراج و اصلاح مؤلفه‌های اولیه در مرحله اول دلفی، پرسشنامه‌ای بسته با استفاده از طیف لیکرت ۵ درجه‌ای طراحی گردید و در اختیار خبرگان قرار گرفت و از آن‌ها خواسته شد تا هر مؤلفه را از نظر اهمیت و ضرورت در چارچوب نهایی مدیریت ریسک مبتنی بر هوش مصنوعی ارزیابی نمایند. بعد از جمع‌آوری داده‌ها، شاخص‌های میانه و انحراف معیار پاسخ‌ها محاسبه گردید و مؤلفه‌هایی که دارای میانه برابر یا بیشتر از ۴ و انحراف معیار کمتر از ۱ بودند، به عنوان مؤلفه‌های قطعی چارچوب مورد نظر پذیرفته شدند. نتایج این بخش از تحلیل نشان داد که تقریباً تمامی مؤلفه‌های پیشنهادی به جز ۷ مورد از سه بعد مفهومی پایش و بازبینی ریسک، شناسایی ریسک هوشمند و نهایتاً فرهنگ و مشارکت ذی‌نفعان، بقیه با درصد بالایی از اجماع مورد تأیید قرار گرفتند، که این امر بیانگر انسجام نظری و درک میدانی مشترک میان خبرگان از نیازهای واقعی صنعت ساخت‌وساز در حوزه مدیریت ریسک و هوش مصنوعی می‌باشد. مؤلفه‌های بدست آمده در این مرحله از تحلیل، مشخص ساخت که ابعاد مفهومی و مؤلفه‌های پیشنهادی توانایی پوشش جامع انواع ریسک‌های فنی، مالی، انسانی، فرهنگی، سیاسی و زیست‌محیطی را دارند و از پشتوانه نظری قوی و همچنین اعتبار میدانی برخوردارند.

اکنون با توجه به مؤلفه‌های حاصله در نه بعد اصلی، مدل مفهومی پیشنهادی این پژوهش به‌عنوان چارچوبی سیستماتیک برای ادغام هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت‌وساز طراحی و پیشنهاد می‌شود. این مدل، ساختاری لایه‌ای دارد که ارتباط علی و سیستمی بین ابعاد مختلف آن را نمایش می‌دهد. در این چارچوب:

- هسته مرکزی و نهایی مدل شامل چهار فرآیند کلیدی مدیریت ریسک است که شامل فرآیندهای شناسایی، ارزیابی، پاسخ و پایش می‌باشد.
- این فرآیندها از طریق سه لایه پشتیبان شامل: الزامات فناورانه، الزامات سازمانی، و چارچوب‌های حقوقی پشتیبانی می‌شوند.
- لایه خارجی مدل، شامل دو بعد تعاملی و سیستمی است که شامل فرهنگ و مشارکت ذی‌نفعان، و یکپارچه سازی زنجیره تأمین می‌باشد.

ادغام هوش مصنوعی در مدیریت ریسک ساخت و ساز



Made with Nmapin

### شکل ۱. چارچوب مفهومی پیشنهادی مدیریت ریسک مبتنی بر هوش مصنوعی در پروژه‌های ساخت‌وساز

این چارچوب پیشنهادی، هوش مصنوعی را به‌عنوان موتور محرک در تمامی سطوح فرآیندهای مدیریت ریسک تلقی می‌کند. داده‌ها از حسگرها، اسناد، منابع انسانی و شبکه‌های تأمین گردآوری شده، توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین تحلیل می‌شوند و خروجی این تحلیل‌ها در تصمیم‌سازی، پیش‌بینی و پاسخ‌های تطبیقی به‌کار گرفته می‌شوند. بخش مرکزی و یا همان نهایی مدل که شامل چرخه شناسایی، ارزیابی، پاسخ‌دهی و پایش ریسک‌هاست، به‌عنوان «مغز هوشمند پروژه» عمل می‌کند و با بهره‌گیری از AI، فراتر از واکنش‌های سنتی، وارد فاز پیش‌بینی و اقدام پیشگیرانه می‌شود. این چرخه بدون وجود زیرساخت‌های فناورانه، ساختارهای سازمانی پذیرنده فناوری و چارچوب‌های حقوقی قابل اتکا، دچار شکست خواهد شد؛ از این‌رو لایه پشتیبان مدل، نقش اساسی در تضمین عملکرد دارد. از سوی دیگر، مدل از منظر سیستم‌های باز طراحی شده تا تعامل با محیط خارجی را نیز پوشش دهد. لایه‌های بیرونی مدل، یعنی فرهنگ و زنجیره تأمین، به مدیریت ریسک‌های نهادی، اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی کمک می‌کنند و انعطاف‌پذیری سیستم در برابر شوک‌های بیرونی را ارتقاء می‌بخشند. در مجموع، این مدل مفهومی با ترکیب تحلیل داده‌محور، پشتیبانی سیستمی و تعامل اجتماعی، ابزاری نوین برای سازمان‌های پروژه‌محور فراهم می‌آورد تا مدیریت ریسک را از یک وظیفه واکنشی به یک قابلیت راهبردی، یکپارچه و هوشمند ارتقاء دهند. لذا چارچوب پیشنهادی نه تنها بازتاب دیدگاه‌های خبرگان است، بلکه به‌طور مستقیم با طبقه‌بندی علمی ریسک‌های رایج در صنعت ساخت‌وساز نیز مرتبط است. این چارچوب در عین اتکا بر هوش مصنوعی، از منظر کاربردی نیز به نحوی طراحی شده که قابلیت پاسخ‌گویی به انواع ریسک‌های انسانی، فنی، مالی، سیاسی، فرهنگی و محیطی را در سطوح مختلف سازمان‌های پروژه‌محور را داشته باشد.

### ۶. نتیجه‌گیری

امروزه تحولات پرشتاب فناورانه، پیچیدگی روزافزون پروژه‌های ساخت‌وساز و افزایش ریسک‌های چندلایه ناشی از عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی، لزوم بازنگری در رویکردهای سنتی مدیریت ریسک را برجسته ساخته است. در چنین فضایی، بهره‌گیری از ظرفیت‌های هوش مصنوعی به‌عنوان یک فناوری تحول‌آفرین می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی توان سازمان‌ها را در شناسایی، تحلیل و مواجهه با ریسک‌های پیچیده ارتقاء دهد. چارچوب پیشنهادی این مطالعه نیز در راستای پاسخ به همین ضرورت طراحی شده است؛ چارچوبی که از نه بعد مفهومی اصلی و ۵۴ مؤلفه کلیدی تشکیل شده و فرآیندهای مدیریت ریسک شامل شناسایی، ارزیابی، پاسخ‌دهی و پایش را در هسته

مرکزی خود قرار داده است. این چارچوب از طریق لایه‌های پشتیبان شامل الزامات فناوریانه، سازمانی و حقوقی حمایت می‌شود و با ابعاد محیطی فرهنگ ذی‌نفعان و زنجیره تأمین تعامل دارد. ساختار چندلایه و تعاملی این مدل، ضمن افزایش دقت شناسایی و تحلیل ریسک‌ها، امکان واکنش هوشمندانه و پیش‌نگرانه را در شرایط واقعی پروژه‌ها فراهم می‌سازد. به طور خاص، تأکید بر تحلیل بلادرنگ، یادگیری تطبیقی، و شفافیت تصمیم‌گیری ماشینی، چارچوب حاضر را به ابزاری علمی و قابل پیاده‌سازی برای مدیریت پیچیدگی‌ها در سازمان‌های پروژه‌محور تبدیل می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت‌وساز نیازمند عبور از الگوهای سنتی و حرکت به سوی نظام‌های پیش‌بینی‌گر و داده‌محور است. چارچوب مفهومی نهایی این تحقیق که مبتنی بر دیدگاه‌های خبرگان، تحلیل نظری، و اعتبارسنجی تجربی طراحی شده است، از یک سو به سازمان‌های پروژه‌محور کمک می‌کند تا به شکلی ساختاریافته فرآیندهای مدیریت ریسک را بازتعریف کنند و از سوی دیگر، تعاملات سازمانی، فناوریانه و نهادی را در مواجهه با انواع ریسک‌ها تقویت نمایند. لذا با توجه به مؤلفه‌های احصاشده و قابلیت انطباق بالای چارچوب ارائه شده، پیشنهاد می‌شود سازمان‌ها در گام اول، به ارزیابی بلوغ فناوریانه و ساختاری خود پرداخته و سپس با الگوبرداری از این مدل، به تدریج مسیر پیاده‌سازی آن را در مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز برنامه‌ریزی نمایند. چارچوبی که با تلفیق تحلیل داده‌محور، پشتیبانی سیستمی و تعامل اجتماعی، ابزاری نوین برای سازمان‌های پروژه‌محور فراهم می‌آورد تا مدیریت ریسک را از یک وظیفه واکنشی به یک قابلیت راهبردی و هوشمند تبدیل نمایند.

### منابع:

1. Abioye, S.O.; Oyedele, L.O.; Akanbi, L.; Ajayi, A.; Manuel, J.; Delgado, D.; Bilal, M.; Akinade, O.O.; Ahmed, A.(2021). Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges. J. Journal of Building Engineering., Volume 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>.
2. Baum, S., Barrett, S., Yampolskiy, R.V.(2017). Modeling and interpreting expert disagreement about artificial superintelligence, *Informatica* 41 (7) ., PP 419–428.
3. Chenya, L., Aminudin, E., Mohd., S., and Yap, L. S. (2022) *Intelligent risk management in construction projects: Systematic literature review*. IEEE Access, 10 (NA). pp. 72936-72954. ISSN 2169-3536 .
4. Esmacili, B.; Hallowell, M. Attribute-Based Safety Risk Assessment I: Analysis at the Fundamental Level. J. Constr. Eng. Manag. Vol 14. Issue 8, 141, 15–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000980](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000980).
5. Goertzel, B., Wang, P.,(2007). A foundational architecture for artificial general intelligence, *Advances in Artificial General Intelligence: Concepts, Architect. Algorithms* 6 , 36. PP 22-36.
6. Guzman-Urbina , A., Aoyama, A., Choi, E.A (2018). Polynomial Neural Network Approach for Improving Risk Assessment and Industrial Safety. *ICIC Express Lett.*, 12, 97–107.
7. Hola, B.; Szostak, M.( 2017). Methodology of Analysing the Accident Rate in the Construction Industry. *Procedia Engineering.*, Vol 172, PP 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.040>.
8. Khodabakhshian, A., & Re Cecconi, F. (2022). Data-driven process mining framework for risk management in construction projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101. DOI 10.1088/1755-1315/1101/3/032023.
9. Li, J.; Wang, J.; Xu, N.; Hu, Y.; Cui, C. Importance Degree Research of Safety Risk Management Processes of Urban Rail Transit Based on Text Mining Method. *Information* 2018, 9, 26. [doi:10.3390/info9020026](https://doi.org/10.3390/info9020026).
10. Mellit, A.; Kalogirou, S.A.(2008). Artificial Intelligence Techniques for Photovoltaic Applications: A Review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2008, 34, 574–632.
11. Neeraj, S., & Balasubramanian, M. (2015). Assessment of Risk in Construction Industry. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 02 Issue: 01. PP 68-72.
12. Project Management Institute (PMI).(2017). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 6th ed.; Project Management Institute, Inc.: Newtown Square, PA, USA.
13. Sārtaputna, S., & Zvaigzne, A. (2018). Risks and Risk Management Alternatives for Building Construction industry enterprises in latvia: The results of an expert survey. *Latgale National Economy Research*. Vol. 1 No. 10. DOI: <https://doi.org/10.17770/lnr2018vol1.10.3599>.
14. Thabit, T.H., & Younus, S.Q. (2018). Risk Assessment and Management in Construction Industries. *International Journal of Research and Engineering*, 5(2), PP 315-320. DOI:10.21276/ijre.2018.5.2.3.
15. Wu, D.D.; Chen, S.H.; Olson, D.L.(2014). Business Intelligence in Risk Management: Some Recent Progresses. *Information Sciences.*, vol 256, pp 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.10.008>.
16. Zhong, R.Y.; Xu, X.; Klotz, E.; Newman, S.T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3, 616–630.