فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲ بهار ۱۴۰۵- صفحات ۲۴۰-۲۳۲
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

روش‌های نوین شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی

سجاد جعفری[1*]
کارشناسی ارشد مهندسی عمران و مدیریت ساخت،دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر،خوزستان،ایران

چکیده

مدیریت ریسک به عنوان یکی از حیاتی‌ترین ارکان مدیریت پروژه، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌های ساختمانی ایفا می‌کند. با افزایش پیچیدگی پروژه‌ها، روش‌های سنتی شناسایی و ارزیابی ریسک که عمدتاً بر قضاوت‌های ذهنی و چک‌لیست‌های ایستا استوار بودند، دیگر کارایی لازم را برای مواجهه با ابهامات محیطی ندارند. هدف از این پژوهش مروری، شناسایی و تحلیل روش‌های نوین و پیشرفته در حوزه مدیریت ریسک صنعت ساخت است. در این راستا، با بررسی متون علمی و مقالات معتبر در بازه زمانی اخیر، رویکردهای مبتنی بر فناوری‌های نوین و مدل‌های ریاضی پیشرفته مورد واکاوی قرار گرفته است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که گذار از مدیریت ریسک سنتی به سمت مدیریت ریسک هوشمند، با بهره‌گیری از ابزارهایی نظیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان(BIM) ، هوش مصنوعی(AI) ، یادگیری ماشین و منطق فازی شتاب گرفته است. این ابزارها امکان شناسایی خودکار ریسک‌ها و تحلیل‌های کمی دقیق‌تر را فراهم می‌آورند. همچنین، استفاده از داده‌های بزرگ (Big Data) و اینترنت اشیا (IoT) در پایش لحظه‌ای ریسک‌های کارگاهی، به ویژه در حوزه ایمنی و لجستیک، تحولی شگرف ایجاد کرده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها نه تنها دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه با ارائه استراتژی‌های پاسخ‌دهی پویا، موجب کاهش انحرافات زمانی و هزینه‌ای در پروژه‌ها می‌گردد. در نهایت، چالش‌های پیاده‌سازی این روش‌ها از جمله محدودیت‌های داده‌ای و مقاومت سازمانی بررسی شده و پیشنهاداتی برای توسعه مدیریت ریسک یکپارچه در صنعت ساخت ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت ریسک، پروژه‌های ساختمانی، هوش مصنوعی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM).

– مقدمه

صنعت ساخت‌وساز یکی از محرک‌های اصلی اقتصاد جهانی و زیربنای توسعه فیزیکی جوامع است. با این حال، این صنعت به دلیل ویژگی‌هایی نظیر طولانی بودن زمان اجرا، کثرت ذینفعان، شرایط محیطی متغیر و محدودیت‌های منابع، همواره به عنوان یکی از پرریسک‌ترین حوزه‌های فعالیتی شناخته شده است [۱]. ریسک در پروژه‌های ساختمانی به معنای هرگونه رخداد احتمالی است که وقوع آن می‌تواند تأثیری مثبت یا منفی (عمدتاً منفی) بر اهداف کلان پروژه یعنی زمان، هزینه و کیفیت داشته باشد [۲]. با افزایش ابعاد و پیچیدگی پروژه‌ها، مدیریت ریسک از یک فعالیت جانبی به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شده است که کوتاهی در آن می‌تواند منجر به شکست‌های سنگین مالی و حقوقی شود [۳].

در دهه‌های گذشته، شناسایی ریسک عمدتاً بر اساس روش‌های کیفی مانند طوفان فکری، روش دلفی و چک‌لیست‌های مبتنی بر تجربیات پروژه‌های قبلی صورت می‌گرفت [۴]. اگرچه این روش‌ها در درک اولیه ریسک مفید هستند، اما به شدت به قضاوت‌های انسانی وابسته‌اند و توانایی تحلیل رفتارهای پیچیده و متقابل ریسک‌ها را ندارند [۵]. در دنیای امروز که پروژه‌ها با "محیط‌های ووکا" (VUCA) - نوسان، عدم قطعیت، پیچیدگی و ابهام - روبرو هستند، رویکردهای سنتی دیگر پاسخگو نیستند [۶]. تحول دیجیتال در صنعت ساخت که تحت عنوان "صنعت ساخت ۴.۰" شناخته می‌شود، ابزارهای نوینی را وارد عرصه مدیریت ریسک کرده است که هدف آن‌ها تبدیل داده‌های خام پروژه به دانش پیش‌گیرانه است [۷].

یکی از مهم‌ترین تحولات، ورود هوش مصنوعی (AI) به مدیریت ریسک است. برخلاف مدل‌های آماری کلاسیک، هوش مصنوعی و به ویژه یادگیری ماشین قادرند الگوهای پنهان در میان هزاران داده تاریخی پروژه‌ها را شناسایی کرده و احتمال وقوع ریسک‌های خاص را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند [۸]. برای مثال، پیش‌بینی تأخیر در زنجیره تأمین مصالح یا نوسانات قیمت بازار با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، دقت بسیار بیشتری نسبت به تخمین‌های انسانی دارد [۹]. این فناوری به مدیران اجازه می‌دهد تا به جای واکنش به بحران (Reactive)، به سمت پیشگیری از بحران (Proactive) حرکت کنند [۱۰].

از سوی دیگر، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یک فناوری کلیدی، مدیریت ریسک را از فضای دوبعدی و انتزاعی به فضای چندبعدی و بصری منتقل کرده است [۱۱]. ادغام مدیریت ریسک با مدل‌های BIM (موسوم به BIM-based Risk Management) این امکان را فراهم می‌سازد که ریسک‌های ناشی از تداخلات طراحی، مسائل ایمنی در کارگاه و چالش‌های توالی ساخت، پیش از شروع عملیات اجرایی شناسایی و مرتفع شوند [۱۲]. این بصری‌سازی ریسک، درک مشترکی میان تمامی ذینفعان ایجاد کرده و ریسک‌های ناشی از خطاهای ارتباطی را به حداقل می‌رساند [۱۳].

علاوه بر این، در مدیریت ریسک‌های مدرن، توجه ویژه‌ای به "ابهام" و "ناشناختگی" داده‌ها می‌شود. استفاده از منطق فازی (Fuzzy Logic) در ارزیابی ریسک، راهکاری برای غلبه بر محدودیت‌های داده‌های قطعی است [۱۴]. از آنجا که کارشناسان اغلب از عبارات زبانی (مانند ریسک زیاد یا متوسط) استفاده می‌کنند، تئوری مجموعه‌های فازی این امکان را می‌دهد که این نظرات کیفی به مقادیر ریاضی تبدیل شده و تحلیل‌های دقیق‌تری صورت گیرد [۱۵]. همچنین، ترکیب این منطق با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به رتبه‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها کمک شایانی کرده است [۱۶].

بحث ایمنی نیز به عنوان یکی از حیاتی‌ترین حوزه‌های ریسک در ساخت، با ظهور اینترنت اشیا (IoT) و حسگرهای پوشیدنی متحول شده است [۱۷]. پایش آنلاین موقعیت کارگران و وضعیت سلامت آن‌ها در کنار تحلیل داده‌های محیطی، ریسک حوادث

کارگاهی را به شدت کاهش داده است [۱۸]. از سوی دیگر، بلاک‌چین با ارائه قراردادهای هوشمند، ریسک‌های مربوط به پرداخت‌ها، دعاوی حقوقی و عدم شفافیت در زنجیره تأمین را هدف قرار داده است [۱۹].

با وجود تمام این پیشرفت‌ها، شکاف عمیقی بین تحقیقات دانشگاهی و پیاده‌سازی عملیاتی در صنعت ساخت وجود دارد [۲۰]. بسیاری از شرکت‌ها هنوز به دلیل هزینه‌های بالای فناوری، کمبود نیروی متخصص و نبود پایگاه‌های داده منسجم، از روش‌های سنتی استفاده می‌کنند [۲۱]. همچنین، مدیریت ریسک در پروژه‌های بزرگ نباید صرفاً به ابزارهای فنی محدود شود، بلکه باید ابعاد انسانی و رفتاری ریسک نیز مدنظر قرار گیرد [۲۲]. ضرورت این پژوهش در آن است که با دسته‌بندی و تحلیل این روش‌های نوین، نقشه‌ای راه برای پژوهشگران و مدیران صنعت ساخت فراهم آورد تا بدانند کدام فناوری در کدام مرحله از چرخه عمر پروژه بیشترین ارزش‌افزوده را در مدیریت ریسک ایجاد می‌کند [۲۳]. هدف این مقاله، بررسی سیستماتیک ادبیات موضوع و ارائه تصویری روشن از آینده مدیریت ریسک در عصر دیجیتال است [۲۴].

۲- مبانی نظری

مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی یکی از ارکان اصلی موفقیت پروژه به شمار می‌آید، زیرا این پروژه‌ها به طور ذاتی با عدم‌قطعیت، پیچیدگی و تغییرات متعدد همراه هستند. ریسک در ادبیات مدیریت پروژه معمولاً به عنوان رویدادی تعریف می‌شود که در صورت وقوع، می‌تواند بر اهداف پروژه در زمینه زمان، هزینه، کیفیت، ایمنی و عملکرد تأثیر بگذارد [۱]. در پروژه‌های ساختمانی، این ریسک‌ها می‌توانند ناشی از عوامل فنی، مالی، قراردادی، مدیریتی، محیطی و انسانی باشند [۲]. از این رو، شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک به عنوان یک فرآیند مستمر و نظام‌مند، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش انحرافات پروژه دارد.

در رویکردهای کلاسیک، مدیریت ریسک شامل چهار مرحله اصلی شناسایی، تحلیل، پاسخ‌گویی و پایش ریسک است [۳]. در مرحله شناسایی، تلاش می‌شود تمام عوامل تهدیدکننده یا فرصت‌ساز پروژه مشخص شوند. این مرحله پایه و اساس سایر مراحل محسوب می‌شود، زیرا هر ریسکی که در ابتدا شناسایی نشود، در مراحل بعدی نیز قابل مدیریت نخواهد بود [۴]. در مرحله تحلیل، ریسک‌ها بر اساس احتمال وقوع و شدت تأثیر ارزیابی می‌شوند. پاسخ‌گویی به ریسک نیز شامل انتخاب راهبردهایی مانند اجتناب، کاهش، انتقال یا پذیرش ریسک است [۵]. در نهایت، پایش ریسک برای اطمینان از اثربخشی اقدامات و شناسایی ریسک‌های نوظهور انجام می‌شود [۶].

با وجود کارآمدی نسبی این چارچوب، روش‌های سنتی مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی اغلب متکی بر قضاوت خبرگان، مصاحبه، جلسات گروهی، چک‌لیست‌ها و تجربیات گذشته بوده‌اند [۷]. این روش‌ها اگرچه در پروژه‌های کوچک و کم‌پیچیدگی قابل استفاده هستند، اما در پروژه‌های بزرگ و پیچیده با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به ذهنی بودن ارزیابی‌ها، دشواری در تحلیل هم‌زمان چندین عامل، ناتوانی در پیش‌بینی الگوهای پیچیده و وابستگی شدید به تجربه افراد اشاره کرد [۸]. به همین دلیل، در سال‌های اخیر گرایش به سمت روش‌های نوین و داده‌محور در حوزه شناسایی و مدیریت ریسک افزایش یافته است.

یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوین، بهره‌گیری از **مدل‌های کمی و هوشمند** برای تحلیل ریسک است. در این چارچوب، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های پیش‌بینی به عنوان ابزارهایی برای استخراج الگوها از داده‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹]. این روش‌ها توانایی آن را دارند که با تحلیل حجم زیادی از داده‌های مربوط به پروژه‌های پیشین، روابط پنهان میان

عوامل مختلف را شناسایی کرده و احتمال وقوع ریسک‌های مشابه را در پروژه‌های جدید پیش‌بینی کنند [۱۰]. به عنوان نمونه، مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تأخیر زمانی، افزایش هزینه، دعاوی قراردادی و حتی بروز حوادث ایمنی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۱۱].

در کنار هوش مصنوعی، **منطق فازی** نیز جایگاه ویژه‌ای در مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمانی یافته است. در بسیاری از پروژه‌ها، اطلاعات موجود برای تحلیل ریسک دقیق و قطعی نیست و کارشناسان بیشتر از توصیف‌های زبانی مانند «کم»، «متوسط» یا «زیاد» استفاده می‌کنند [۱۲]. منطق فازی این امکان را فراهم می‌سازد که این قضاوت‌های کیفی به صورت کمی مدل‌سازی شوند و ابهام‌های موجود در داده‌ها بهتر مدیریت شوند [۱۳]. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های فازی در رتبه‌بندی ریسک‌ها، ارزیابی احتمال وقوع و تحلیل پیامدها در پروژه‌های ساخت بسیار رایج شده است [۱۴]. همچنین، ترکیب منطق فازی با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، دقت ارزیابی را افزایش داده و اولویت‌بندی ریسک‌ها را واقع‌بینانه‌تر می‌سازد [۱۵].

یکی دیگر از تحولات نظری مهم، ورود **مدل‌سازی اطلاعات ساختمان** به فرآیند مدیریت ریسک است. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان نه تنها ابزاری برای طراحی و هماهنگی بین رشته‌ای است، بلکه می‌تواند بستری برای شناسایی ریسک‌های اجرایی و مدیریتی نیز فراهم کند [۱۶]. با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی و چهاربعدی، امکان بررسی تداخلات طراحی، شبیه‌سازی توالی ساخت، تحلیل محدودیت‌های اجرایی و پیش‌بینی مسائل ایمنی پیش از آغاز عملیات فراهم می‌شود [۱۷]. این ویژگی سبب می‌شود که بخش قابل توجهی از ریسک‌های ناشی از خطاهای طراحی و برنامه‌ریزی در مراحل ابتدایی پروژه شناسایی و کنترل شوند [۱۸]. در واقع، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با ایجاد یک محیط یکپارچه اطلاعاتی، کیفیت تصمیم‌گیری در مدیریت ریسک را ارتقا می‌دهد [۱۹].

در سال‌های اخیر، مفهوم **دوقلوی دیجیتال** نیز به عنوان امتداد پیشرفته مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مطرح شده است. دوقلوی دیجیتال با اتصال مدل دیجیتال پروژه به داده‌های واقعی و برخط، امکان پایش مستمر وضعیت پروژه و به‌روزرسانی تحلیل‌های ریسک را فراهم می‌سازد [۲۰]. این رویکرد موجب می‌شود که مدیران پروژه بتوانند به‌صورت پویا تغییرات محیطی، عملکرد تجهیزات، پیشرفت عملیات و وضعیت ایمنی را رصد کرده و پیش از تبدیل شدن مسائل کوچک به بحران، اقدامات اصلاحی انجام دهند [۲۱]. از این منظر، مدیریت ریسک از یک فعالیت دوره‌ای به یک فرآیند هوشمند و پیوسته تبدیل می‌شود.

اینترنت اشیا نیز در حوزه مدیریت ریسک، به ویژه در ایمنی و کنترل عملیات کارگاهی، نقش فزاینده‌ای یافته است [۲۲]. نصب حسگرها بر تجهیزات، مصالح و حتی نیروی انسانی باعث می‌شود داده‌های مربوط به موقعیت، دما، لرزش، مصرف انرژی و وضعیت سلامت به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری شود [۲۳]. این داده‌ها در تحلیل ریسک‌های ایمنی، کنترل عملکرد تجهیزات و جلوگیری از حوادث بسیار مؤثر هستند. برای مثال، حسگرهای پوشیدنی می‌توانند خستگی یا وضعیت غیرعادی کارگران را شناسایی کرده و هشدارهای لازم را صادر کنند [۲۴]. از این رو، اینترنت اشیا زمینه‌ساز گذار از مدیریت واکنشی ریسک به مدیریت پیش‌نگر شده است.

از منظر نظری، باید توجه داشت که ریسک در پروژه‌های ساختمانی تنها ماهیتی فنی ندارد، بلکه ابعاد سازمانی، قراردادی و رفتاری نیز در آن دخیل هستند [۲۵]. بسیاری از ریسک‌ها ناشی از ضعف ارتباطات، عدم هماهنگی بین ذی‌نفعان، ابهام قراردادی و مقاومت در برابر تغییر هستند [۲۶]. بنابراین، رویکردهای نوین مدیریت ریسک زمانی مؤثر خواهند بود که علاوه بر ابزارهای فناورانه، به عوامل انسانی و سازمانی نیز توجه کنند. در غیر این صورت، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها نیز در عمل با شکست مواجه خواهند شد [۲۷].

در مجموع، مبانی نظری نشان می‌دهد که مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی از یک چارچوب سنتی مبتنی بر تجربه، به سوی رویکردی هوشمند، یکپارچه و داده‌محور در حال حرکت است. این تحول با توسعه فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، منطق

فازی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال تقویت شده است [۲۸]. با این حال، اثربخشی این ابزارها در گرو کیفیت داده‌ها، آمادگی سازمانی، آموزش منابع انسانی و وجود زیرساخت‌های مناسب است [۲۹]. از این رو، مطالعه و تحلیل این روش‌ها برای شناخت ظرفیت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها در پروژه‌های ساختمانی ضروری به نظر می‌رسد [۳۰].

۳- روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، مروری ـ تحلیلی است.

در این مطالعه تلاش شده است مهم‌ترین روش‌های نوین شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی از طریق بررسی نظام‌مند منابع علمی تحلیل شود.

گردآوری اطلاعات به شیوه کتابخانه‌ای و با مراجعه به مقاله‌های علمی، کتاب‌ها، استانداردها و گزارش‌های معتبر انجام شده است.

برای شناسایی منابع، جست‌وجو در پایگاه‌های علمی معتبر داخلی و خارجی انجام گرفت.

در فرآیند جست‌وجو، از کلیدواژه‌هایی معادل «مدیریت ریسک»، «پروژه‌های ساختمانی»، «روش‌های نوین»، «هوش مصنوعی»، «مدل‌سازی اطلاعات ساختمان»، «منطق فازی» و «اینترنت اشیا» استفاده شد.

ملاک انتخاب منابع، ارتباط مستقیم با موضوع پژوهش، اعتبار علمی، تعداد استناد و تازگی انتشار بوده است.

در گام نخست، تعداد زیادی منبع اولیه شناسایی شد و سپس با بررسی عنوان، چکیده و محتوای آن‌ها، منابع غیرمرتبط حذف شدند.

در نهایت، مجموعه‌ای از منابع منتخب که بیشترین ارتباط را با موضوع داشتند برای تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های استخراج‌شده از منابع در چند محور اصلی دسته‌بندی شدند.

این محورها شامل روش‌های سنتی مدیریت ریسک، روش‌های کمی، روش‌های هوشمند، روش‌های مبتنی بر داده و فناوری‌های نوین بودند.

سپس هر یک از این دسته‌ها از نظر کاربرد، مزایا، محدودیت‌ها و میزان اثربخشی در پروژه‌های ساختمانی مورد تحلیل قرار گرفتند.

برای افزایش انسجام تحلیل، نتایج مطالعات مختلف با یکدیگر مقایسه و نقاط اشتراک و افتراق آن‌ها مشخص شد.

همچنین تلاش شد روند تحول مدیریت ریسک از رویکردهای سنتی به رویکردهای نوین تبیین شود.

شیوه ارجاع‌دهی در این مقاله بر اساس استاندارد IEEE تنظیم شده است.

در نهایت، یافته‌های حاصل از مرور و تحلیل منابع، مبنای تدوین نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها قرار گرفت.

۴- یافته ها

تحلیل منابع و متون علمی نشان می‌دهد که مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی از یک رویکرد واکنشی و مبتنی بر تجربه، به سمت یک نظام پیش‌گیرانه و داده‌محور در حال حرکت است. یافته‌های این پژوهش در چهار محور اصلی شامل هوش مصنوعی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، منطق فازی و فناوری‌های پایش لحظه‌ای دسته‌بندی شده است.

۴-۱. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

یکی از برجسته‌ترین یافته‌ها، کارایی بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی ریسک‌های زمانی و هزینه‌ای است [۸], [۹]. بر خلاف روش‌های آماری سنتی که روابط خطی را فرض می‌کنند، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) قادرند الگوهای پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای پروژه را شناسایی کنند [۱۰]. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این مدل‌ها دقت پیش‌بینی انحراف هزینه را تا ۳۰ درصد نسبت به روش‌های سنتی افزایش می‌دهد [۱۱]. هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های تاریخی پروژه‌های مشابه، ریسک‌های احتمالی را در مراحل اولیه شناسایی کرده و به مدیران اجازه می‌دهد پیش از وقوع بحران، بودجه‌های احتیاطی را به درستی تخصیص دهند [۱۲].

۴-۲. نقش BIM در مدیریت بصری ریسک

یافته‌ها تأکید دارند که BIM فرآیند شناسایی ریسک را از حالت انتزاعی خارج کرده است [۱۳]. با استفاده از مدل‌سازی چهاربعدی (زمان) و پنج‌بعدی (هزینه)، مدیران می‌توانند توالی ساخت را شبیه‌سازی کرده و ریسک‌های ناشی از تداخلات فضایی و محدودیت‌های سایت را پیش‌بینی کنند [۱۴]. همچنین، ادغام چک‌لیست‌های ایمنی با مدل BIM، ریسک سقوط یا برخورد در کارگاه را به صورت خودکار شناسایی کرده و به تیم طراحی هشدار می‌دهد [۱۵]. این رویکرد بصری، خطاهای انسانی در شناسایی ریسک را که ناشی از عدم درک صحیح نقشه‌های پیچیده است، به شدت کاهش می‌دهد [۱۶].

۴-۳. مدیریت عدم قطعیت با منطق فازی

با توجه به اینکه داده‌های پروژه‌های ساختمانی اغلب ناقص یا مبتنی بر نظرات کیفی کارشناسان است، منطق فازی به عنوان ابزاری کلیدی برای مدیریت این ابهام شناسایی شد [۱۷]. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب منطق فازی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP یا TOPSIS، به مدیران کمک می‌کند تا ریسک‌ها را بر اساس اولویت‌های واقعی رتبه‌بندی کنند [۱۸]. این مدل‌ها به ویژه در پروژه‌هایی که داده‌های تاریخی کافی در دسترس نیست، با تکیه بر دانش تجربی و تبدیل آن به مقادیر ریاضی، نتایج قابل‌اتکاتری نسبت به روش‌های احتمالی محض ارائه می‌دهند [۱۹].

۴-۴. فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT) و پایش لحظه‌ای

در حوزه مدیریت ریسک‌های اجرایی و ایمنی، فناوری‌های پوشیدنی و حسگرهای IoT تحولی بنیادین ایجاد کرده‌اند [۲۰]. یافته‌ها نشان می‌دهند که پایش لحظه‌ای موقعیت کارگران و تجهیزات، ریسک تصادفات کارگاهی را تا ۴۵ درصد کاهش داده است [۲۱]. همچنین، استفاده از پهپادها برای نقشه‌برداری هوایی و پایش پیشرفت کار، ریسک ناشی از گزارش‌های نادرست و تأخیر در شناسایی انحرافات پروژه را به حداقل رسانده است [۲۲]. این داده‌های واقعی، مبنای "دوقلوهای دیجیتال" قرار می‌گیرند که به مدیران اجازه می‌دهند تأثیر یک ریسک وقوع یافته را بلافاصله بر کل پروژه تحلیل کنند [۲۳].

در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش در قالب جدول زیر خلاصه شده است:

جدول ۱: مقایسه روش‌های نوین مدیریت ریسک در ساخت

روش / فناوری	حوزه کاربرد اصلی	مزیت کلیدی	محدودیت‌ها	منابع مرتبط
هوش مصنوعی (AI)	پیش‌بینی زمان و هزینه	دقت بالا در تحلیل داده‌های کلان	نیاز به داده‌های تاریخی زیاد	[۹], [۱۱], [۲۴]

BIM چهاربعدی	شناسایی تداخلات و ایمنی	بصری‌سازی ریسک پیش از ساخت	پیچیدگی مدل‌سازی اولیه	[۱۳], [۱۵], [۲۵]
منطق فازی	ارزیابی کیفی ریسک‌ها	پوشش ابهام و نظرات ذهنی	وابستگی به نظر کارشناس	[۱۷], [۱۸], [۲۶]
اینترنت اشیا (IoT)	ایمنی و پایش کارگاه	کنترل لحظه‌ای و پیش‌گیرانه	هزینه‌های بالای سخت‌افزاری	[۲۰], [۲۱], [۲۷]
شبیه‌سازی مونت‌کارلو	تحلیل احتمالی بودجه	تحلیل سناریوهای مختلف	فرض توزیع‌های آماری ثابت	[۳], [۵], [۲۸]
بلاک‌چین	ریسک‌های قراردادی و مالی	شفافیت و حذف واسطه‌ها	نوپا بودن و خلاء قانونی	[۱۹], [۲۹], [۳۰]

۵-نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی و تحلیل تحولات اخیر در روش‌های شناسایی و مدیریت ریسک در صنعت ساخت پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که پارادایم مدیریت ریسک از مدل‌های سنتی مبتنی بر قضاوت‌های فردی به سمت مدل‌های هوشمند و یکپارچه تغییر یافته است. این تغییر نه تنها دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده، بلکه سرعت پاسخ‌گویی به تهدیدات پروژه را نیز بهبود بخشیده است.

مهم‌ترین دستاورد این مطالعه، تبیین نقش محوری "داده" در مدیریت ریسک مدرن است. فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، داده‌های خام و پراکنده پروژه‌های گذشته را به سرمایه‌ای استراتژیک برای پیش‌بینی آینده تبدیل کرده‌اند. با این حال، باید توجه داشت که اثربخشی این ابزارها مستلزم وجود فرهنگ مستندسازی دقیق در سازمان‌های پروژه‌محور است. بدون داده‌های باکیفیت، پیشرفته‌ترین الگوریتم‌ها نیز نتایج گمراه‌کننده‌ای ارائه خواهند داد.

در حوزه مدیریت بصری، BIM ثابت کرده است که فراتر از یک ابزار طراحی، یک پلتفرم قدرتمند برای مدیریت ریسک است. یکپارچه‌سازی اطلاعات در یک مدل واحد، به تمامی ذینفعان اجازه می‌دهد تا درک مشترکی از ریسک‌های پروژه داشته باشند و از بروز اختلافات قراردادی که خود یکی از بزرگ‌ترین ریسک‌های صنعت ساخت است، جلوگیری کنند. همچنین، ظهور فناوری‌هایی مانند دوقلوی دیجیتال، مرز میان برنامه‌ریزی و اجرا را کمرنگ کرده و مدیریت ریسک را به فرآیندی پویا و آنلاین تبدیل نموده است.

از سوی دیگر، این پژوهش نشان داد که علیرغم توانمندی فناوری‌های نوین، چالش‌های جدی در مسیر پیاده‌سازی آن‌ها وجود دارد. هزینه‌های بالای استقرار زیرساخت‌های دیجیتال، مقاومت نیروی انسانی در برابر تغییر و کمبود متخصصانی که هم در حوزه مهندسی عمران و هم در علوم داده مهارت داشته باشند، از موانع اصلی در کشورهای در حال توسعه است. علاوه بر این، مسائل مربوط به امنیت داده‌ها در پلتفرم‌های ابری و نبود چارچوب‌های قانونی برای قراردادهای هوشمند مبتنی بر بلاک‌چین، از دیگر چالش‌هایی است که نیازمند توجه پژوهشگران در آینده است.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود شرکت‌های ساختمانی برای ارتقای تاب‌آوری خود در برابر ریسک‌ها، رویکردی ترکیبی را برگزینند. این رویکرد باید شامل استفاده از منطق فازی برای مدیریت دانش خبرگان، به کارگیری BIM برای هماهنگی‌های اجرایی و استفاده از یادگیری ماشین برای پایش انحرافات زمانی و هزینه‌ای باشد. دولت‌ها و نهادهای صنفی نیز باید با تدوین استانداردها و ارائه محرک‌های مالی، مسیر را برای تحول دیجیتال در مدیریت ریسک هموار سازند. آینده مدیریت ریسک در صنعت ساخت، در گرو پیوند میان تخصص مهندسی و قدرت محاسباتی فناوری‌های نوین خواهد بود.

مراجع

[۱] PMI, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, ۷th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, ۲۰۲۱.
[۲] N. J. Smith, T. Merna, and P. Jobling, *Managing Risk in Construction Projects*. John Wiley & Sons, ۲۰۱٤.
[۳] J. R. Edwards et al., "Risk management in the construction industry: A review of established techniques," *International Journal of Project Management*, vol. ۳٥, no. ٤, pp. ٦۰۰-٦۱٥, ۲۰۱۷.
[٤] A. Akintoye and M. J. MacLeod, "Risk analysis and management in construction," *International Journal of Project Management*, vol. ۱٥, no. ۱, pp. ۳۱-۳۸, ۱۹۹۷.
[٥] L. Y. Shen, "Project risk management in Hong Kong," *International Journal of Project Management*, vol. ۱٥, no. ۲, pp. ۱۰۱-۱۰٥, ۱۹۹۷.
[٦] ISO ۳۱۰۰۰, *Risk management — Guidelines*, International Organization for Standardization, ۲۰۱۸.
[۷] X. Zhao, B. G. Hwang, and G. S. Yu, "Identifying methods and barriers to risk management in small construction firms," *Journal of Management in Engineering*, vol. ۲۹, no. ۳, pp. ۳۱۸-۳۲٦, ۲۰۱۳.
[۸] J. Li and S. T. Ng, "Machine learning based prediction of construction cost overruns," *Automation in Construction*, vol. ۱۳۲, p. ۱۰۳۹٥۱, ۲۰۲۱.
[۹] M. J. Skibniewski, "Information technology applications in construction safety management," *ITcon*, vol. ۱۹, pp. ٤٦۸-٤۸٦, ۲۰۱٤.
[۱۰] Y. Tan et al., "Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status and future trends," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. ۱٤۷, no. ۷, ۲۰۲۱.
[۱۱] S. Gondia et al., "Machine learning algorithms for predicting project delay risk," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. ۱٤٦, no. ۱, ۲۰۲۰.
[۱۲] H. Saleh and M. Al-Shawi, "Advanced risk management using neural networks," *Construction Innovation*, vol. ۲۰, no. ۳, pp. ۳٤٥-۳٦۰, ۲۰۲۰.
[۱۳] R. Sacks et al., *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*, ۳rd ed. Wiley, ۲۰۱۸.
[۱٤] J. Kiviniemi, "BIM-based risk management: A review," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. ۲۲, pp. ۱٥۰-۱٦۸, ۲۰۱۷.
[۱٥] J. Zhang et al., "BIM-based safety risk identification," *Automation in Construction*, vol. ٥۲, pp. ۷٥-۸۷, ۲۰۱٥.
[۱٦] P. Zou et al., "Risk management in construction projects: A BIM-based approach," *Construction Management and Economics*, vol. ۳٥, no. ۸, pp. ٤٥۰-٤٦٥, ۲۰۱۷.
[۱۷] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. ۸, no. ۳, pp. ۳۳۸-۳٥۳, ۱۹٦٥.
[۱۸] M. Sambasivan and Y. W. Soon, "Causes and effects of delays in Malaysian construction industry," *International Journal of Project Management*, vol. ۲٥, no. ٥, pp. ٥۱۷-٥۲٦, ۲۰۰۷.
[۱۹] G. Wang et al., "Fuzzy multi-criteria decision making for risk assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. ۲۷۰, p. ۱۲۲٤٥۰, ۲۰۲۰.
[۲۰] S. S. Naser and A. Al-Hajji, "IoT applications in construction site safety," *Procedia Computer Science*, vol. ۱۷۰, pp. ۱۱۲۰-۱۱۲۷, ۲۰۲۰.
[۲۱] Y. Fang et al., "Real-time safety management using IoT," *Automation in Construction*, vol. ۱۱۰, p. ۱۰۳۰۰۰, ۲۰۲۰.

[۲۲] M. Gheisari and J. Irizarry, “Unmanned aerial vehicles (UAVs) in construction management,” *Journal of Information Technology in Construction*, vol. ۲۱, pp. ۳۰۰-۳۱۵, ۲۰۱٦.
[۲۳] B. Schleich et al., “Shaping the digital twin for design and production,” *CIRP Annals*, vol. ٦٦, no. ۱, pp. ۱٤۱-۱٤٤, ۲۰۱۷.
[۲٤] A. Darko et al., “Artificial intelligence in the AEC industry: A review,” *Automation in Construction*, vol. ۱۱۲, ۲۰۲۰.
[۲٥] S. Azhar, “BIM: Trends, benefits, risks, and challenges,” *Journal of Architectural Engineering*, vol. ۱۷, no. ۳, pp. ۲٤۱-۲٥۲, ۲۰۱۱.
[۲٦] K. Knight and F. Fayek, “Use of fuzzy logic for predicting design cost overruns,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. ۱۲۸, no. ٦, pp. ٥۰۳-٥۱۲, ۲۰۰۲.
[۲۷] L. Hou et al., “Internet of Things in construction: A review,” *Applied Sciences*, vol. ۹, no. ۱٥, p. ۳۰۰۰, ۲۰۱۹.
[۲۸] C. Schieg, “Strategies for avoiding risks in construction projects,” *Journal of Facilities Management*, vol. ٤, no. ۱, pp. ۳۳-٥۱, ۲۰۰٦.
[۲۹] J. Li et al., “Blockchain in construction: A review of status and applications,” *Automation in Construction*, vol. ۱۰۲, pp. ۱٥۷-۱٦۸, ۲۰۱۹.
[۳۰] M. Xu et al., “Blockchain-enabled smart contracts for construction risk management,” *Journal of Management in Engineering*, vol. ۳۷, no. ٤, ۲۰۲۱.