

ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و هوش مصنوعی

Risk assessment and prioritization in construction projects using multi-criteria decision-making methods and artificial intelligence

امیرمهدی قاسمی صدر^{1*}، مهدی فضیلتی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

پست الکترونیکی: hiamirmahdigeek@gmail.com

۲. عضو هیئت علمی، مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

پست الکترونیکی: fazilati2001@yahoo.com

چکیده

پروژه‌های ساختمانی به دلیل ماهیت چنددینفعی، عدم قطعیت‌های فنی و محیطی، وابستگی‌های شبکه‌ای فعالیت‌ها و محدودیت‌های زمانی/هزینه‌ای، همواره با ریسک‌های متنوع ایمنی، کیفیت، مالی، برنامه‌زمان‌بندی و حتی ریسک‌های نوپدید نظیر ریسک‌های سایبری مواجه‌اند. چالش اصلی در مدیریت ریسک این پروژه‌ها، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها به گونه‌ای است که هم از قضاوت خبرگان دانش ضمنی بهره‌برد و هم از داده‌های پروژه دانش صریح برای کاهش سوگیری و افزایش قابلیت به‌روزرسانی استفاده کند. این مقاله با اتکا به پژوهش‌های اخیر در حوزه کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و هوش مصنوعی در صنعت ساخت، یک چارچوب هیبریدی برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک پیشنهاد می‌کند. در این چارچوب، شناسایی و ساختاربندی ریسک‌ها با سازوکارهای خبرگانی، وزن‌دهی معیارها با روش‌های شبکه‌ای/بهینه و رتبه‌بندی ریسک‌ها با روش‌های فازی و فاصله‌محور انجام می‌شود. برای پوشش عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی، از مدل‌های ابر و منطق فازی استفاده شده و در نهایت، برای پیش‌بینی و به‌روزرسانی پویا، مدل‌های یادگیری ماشین نظیر جنگل تصادفی و سیستم استنتاج فازی-عصبی پیشنهاد می‌گردد. نتیجه این مطالعه، ارائه نقشه راه عملی برای انتخاب ترکیب مناسب متناسب با نوع پروژه، مرحله چرخه عمر، سطح دسترسی به داده و حساسیت ریسک‌ها است.

کلمات کلیدی: مدیریت ریسک، تصمیم‌گیری چندمعیاره، یادگیری ماشین، منطق فازی، هوش مصنوعی

۱. مقدمه

در ادبیات مدیریت پروژه، ریسک به عنوان اثر عدم قطعیت بر اهداف پروژه شناخته می شود؛ با این حال در پروژه های ساختمانی تنوع ریسک ها و وابستگی متقابل آن ها، برای مثال پیوند ریسک ایمنی با برنامه زمان بندی و هزینه، باعث می شود که رویکردهای تک معیاره یا صرفاً مبتنی بر قضاوت فردی کارایی محدودی داشته باشند. مرور کتاب سنجی و مرور نظام مند اخیر نشان می دهد که استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت ریسک پروژه های ساخت در حال رشد بوده و تمرکز پژوهش ها به سمت مدل های داده محور، پیش بینانه و ترکیبی حرکت کرده است [۱]. از سوی دیگر، تحلیل های کتاب سنجی در حوزه محیط ساخته شده نیز بیانگر گسترش استفاده از تحلیل تصمیم گیری چندمعیاره و گرایش به ادغام آن با فناوری های مکانی و داده های واقعی پروژه است [۲]. این روندها نشان می دهد که ترکیب روش های تصمیم گیری چندمعیاره با هوش مصنوعی می تواند به یک مسیر عملی برای ارزیابی و اولویت بندی ریسک تبدیل شود.

با وجود پیشرفت های یاد شده، در عمل دو شکاف اصلی دیده می شود:

- (۱) بسیاری از مدل های تصمیم گیری چندمعیاره به شدت به قضاوت خبرگان وابسته اند و در پروژه های پرریسک، سوگیری و ناسازگاری قضاوت ها می تواند رتبه بندی ریسک ها را مخدوش کند؛
- (۲) بسیاری از مدل های یادگیری ماشین نیز به داده های تاریخی کافی و باکیفیت نیاز دارند، در حالی که در پروژه های ساخت، داده ها گاهی پراکنده، محرمانه یا ناهمگن هستند.

برای کاهش این شکاف، پژوهش های اخیر به سمت رویکردهای هیبریدی حرکت کرده اند؛ برای نمونه در پروژه های عظیم ساختمانی، ترکیب روش های تصمیم گیری چندمعیاره و یادگیری ماشین برای شناسایی، ارزیابی و پیش بینی ریسک پیشنهاد شده است [۳]. هدف این مقاله، ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی و اولویت بندی ریسک در پروژه های ساختمانی با تکیه بر همین رویکردهای هیبریدی است.

۲. مرور ادبیات و مبانی

۲-۱- روش های تصمیم گیری چندمعیاره در ارزیابی و اولویت بندی ریسک

روش های تصمیم گیری چندمعیاره به دلیل توانایی در ترکیب معیارهای ناهمگن کمی/کیفی و تبدیل قضاوت های خبرگانی به خروجی قابل رتبه بندی، کاربرد گسترده ای در مدیریت ریسک ساخت یافته اند. در سطح روش شناختی، کارهای مبتنی بر فرآیند تحلیل شبکه ای برای لحاظ کردن وابستگی و بازخور میان معیارها و کارهای فاصله محور مانند تاپسیس و ویکور برای رتبه بندی گزینه ها متداول اند. برای مثال، رویکرد MABAC-ANP به عنوان یک تکنیک هیبریدی، هم وزن دهی شبکه ای را پوشش می دهد و هم با سازوکار رتبه بندی، امکان تمایز گزینه های ریسکی را فراهم می کند [۶]. همچنین در ارزیابی ریسک چرخه عمر پروژه، ترکیب ارزیابی جامع فازی و تاپسیس به منظور تجمیع قضاوت های زبانی و رتبه بندی سطح ریسک پیشنهاد شده است [۷]. در پروژه های مشارکت عمومی-خصوصی نیز به کارگیری چند روش تصمیم گیری چندمعیاره برای ارزیابی ریسک ها به منظور افزایش اطمینان تصمیم مورد توجه قرار گرفته است [۱۵].

۲-۲- رویکردهای فازی و مدل‌های ابری برای مدیریت عدم قطعیت

در محیط‌های ساخت، داده‌ها و قضاوت‌ها اغلب با عدم قطعیت شناختی (ابهام در تعریف/اندازه‌گیری) و عدم قطعیت تصادفی (نوسانات طبیعی) همراه‌اند. پژوهش‌های مبتنی بر منطق فازی تلاش می‌کنند عدم قطعیت زبانی را با اعداد فازی مدل کرده و فرآیند تصمیم‌گیری را پایدارتر کنند؛ برای نمونه در ارزیابی ریسک تحت عدم قطعیت شناختی، یک روش فازی مبتنی بر ویکور برای رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه ارائه شده است [۱۴]. علاوه بر منطق فازی، مدل ابر به‌عنوان یک سازوکار نگاشت همزمان فازی بودن و تصادفی بودن در بازنمایی دانش انسانی به کار گرفته شده است. در یک مطالعه موردی مربوط به آسیب‌های ناشی از حفاری تونل در مجاورت تونل موجود، روش مبتنی بر مدل ابر با تعریف شاخص‌ها و محاسبه همبستگی با سطوح ریسک و نیز مقایسه با تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، به‌عنوان رویکردی رقابتی‌تر برای پوشش همزمان ابهام و تصادف گزارش شده است. همچنین ارزیابی تاب‌آوری ایمنی گودهای عمیق با استفاده از مدل ابر توسعه یافته و روش MABAC نمونه‌ای از توسعه همین ایده در حوزه ژئوتکنیک است [۹].

۲-۳- هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در ارزیابی، پیش‌بینی و پایش ریسک

هوش مصنوعی با هدف کاهش اتکای صرف به قضاوت ذهنی و استخراج الگو از داده‌های پروژه، در سال‌های اخیر وارد مدیریت ریسک ساخت شده است [۱]. در پروژه‌های عظیم ساختمانی، یک چارچوب ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره-یادگیری ماشین برای شناسایی، ارزیابی و پیش‌بینی ریسک‌ها ارائه شده که نشان می‌دهد تلفیق وزن‌دهی/رتبه‌بندی چندمعیاره با پیش‌بینی داده‌محور می‌تواند تصمیم‌سازی را کامل‌تر کند [۳]. در حوزه ریسک‌های نوپدید، یک چارچوب ارزیابی ریسک سایبری برای صنعت ساخت با تکیه بر تکنیک‌های یادگیری ماشین پیشنهاد شده است [۴]. در حوزه ایمنی کارگاهی، توسعه داشبورد ارزیابی ریسک برای حوادث سقوط با رویکرد «خبره در حلقه» به کمک یادگیری ماشین نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های پیش‌بین با بازخورد انسانی، برای کاربردپذیری صنعتی اهمیت دارد [۵]. در ارزیابی ریسک ساخت پل نیز یک روش مبتنی بر جنگل تصادفی با تعریف ۲۶ عامل ریسک در ۵ دسته، رتبه‌بندی اهمیت شاخص‌ها و اعتبارسنجی در یک پل پیاده‌رو شهری ارائه شده است [۱۲]. همچنین استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار برای ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی در یک مطالعه تجربی گزارش شده و به قابلیت این مدل در یادگیری روابط غیرخطی اشاره شده است [۱۳].

۲-۴- پیوند هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری چندمعیاره با فناوری‌های دیجیتال پروژه

توسعه ارزیابی پویای ریسک نیازمند اتصال مدل‌های تصمیم‌گیری به داده‌های جاری پروژه است. در این راستا، مرورهای پژوهشی نشان می‌دهد مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و فناوری‌های مرتبط می‌توانند به‌عنوان زیرساخت داده‌ای برای مدیریت ریسک ساخت به کار روند و امکان یکپارچه‌سازی ریسک با مدل‌های سه‌بعدی، برنامه‌زمان‌بندی و اطلاعات اجرایی را فراهم کنند [۱۹]. همچنین مرور تخصصی ادغام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در کنار ابزارهای چندمعیاره می‌تواند تصمیم‌گیری را از حالت ایستا به سمت تصمیم‌گیری زمینه‌مند و قابل ردیابی حرکت دهد [۲۰]. ترکیب ابزارهای تحلیل خطر مانند مطالعه خطر و قابلیت بهره‌برداری با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و نگاشت رنگی ریسک‌ها نیز به‌عنوان نمونه‌ای از سیستم‌های پشتیبان تصمیم در حوزه ایمنی مطرح شده است [۲۱].

جدول ۱ - نمونه‌هایی از کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و هوش مصنوعی در ارزیابی/اولویت‌بندی ریسک ساخت

منبع	هدف خروجی	روش / تکنیک	حوزه / نوع پروژه
[3]	شناسایی، ارزیابی و پیش‌بینی ریسک	MCDM + ML	پروژه‌های عظیم
[4]	چارچوب ارزیابی ریسک سایبری	یادگیری ماشین	ریسک سایبری
[5]	پایش و بازنگری ریسک	ML	ایمنی سقوط
[6]	وزن‌دهی شبکه‌ای و رتبه‌بندی	D-ANP – MABAC	مدیریت ریسک عمومی ساخت
[7]	رتبه‌بندی سطح ریسک	TOPSIS	چرخه عمر پروژه
[8]	رتبه‌بندی ریسک‌های ایمنی	BWM – Fuzzy VIKOR	ساختمان بلندمرتبه
[9]	ارزیابی تاب‌آوری/ریسک	Extension Cloud Model + MCDM	گود عمیق
[10]	تخمین سطح ریسک با پوشش ابهام/تصادف	FAHP	تونل
[11]	استخراج عوامل عمده و وزن‌دهی	Delphi + FAHP	پل‌های بزرگ
[12]	رتبه‌بندی اهمیت شاخص‌ها و ارزیابی ریسک	Random Forest	ساخت پل
[13]	مدل‌سازی روابط غیرخطی ریسک	ANFIS	پروژه ساختمانی
[14]	رتبه‌بندی ریسک با اعداد فازی	VIKOR	عدم قطعیت شناختی
[15]	پوشش مقایسه‌ای ریسک‌ها	MCDM	PPP
[16]	رتبه‌بندی گزینه‌ها (ریسک/کیفیت)	BWM + Fuzzy VIKOR	انتخاب پیمانکار
[17]	اولویت‌بندی بازسازی پاساوانج	TOPSIS / VIKOR / ELECTRE	اولویت‌بندی پروژه
[18]	ارزیابی راهبردهای کنترل ریسک	چارچوب فازی – یکپارچه	راهبردهای کنترل ایمنی
[19],[20]	پشتیبانی تصمیم پویا و قابل ردیابی	BIM + MCDM	BIM

۳. چارچوب پیشنهادی: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک به روش هیبریدی تصمیم‌گیری چندمعیاره - هوش مصنوعی

با توجه به نتایج مطالعات پیشین، می‌توان یک فرآیند مرحله‌ای طراحی کرد که همزمان سه نیاز کلیدی را پوشش دهد:

(۱) ساختاربندی دانش خبرگانی برای شناسایی و وزن‌دهی

(۲) رتبه‌بندی چندمعیاره تحت عدم قطعیت

(۳) به‌روزرسانی و پیش‌بینی داده‌محور

این مقاله چارچوب پیشنهادی را در شش گام زیر ارائه می‌کند:

گام ۱: تعریف دامنه، اهداف و سطح تصمیم‌گیری: تعیین مرحله چرخه عمر (طراحی / اجرا / بهره‌برداری)، سطح تحلیل (کارگاه، پروژه، سبد پروژه) و نوع ریسک‌های هدف (ایمنی، کیفیت، مالی، برنامه‌زمان‌بندی، سایبری) [۱۰].

گام ۲: شناسایی و ساختاربندی ریسک‌ها: اجرای دلفی و تدوین ساختار شکست ریسک پروژه و پیوند با ساختار شکست کار برای تضمین پوشش کامل فعالیت‌ها. به‌کارگیری این رویکرد در مطالعات ریسک پل و نیز مطالعات مرتبط با فناوری‌های هوش مصنوعی در ساخت گزارش شده است [۱۱]، [۲۳].

گام ۳: تعریف معیارها و وابستگی‌ها: تبدیل ریسک‌های شناسایی‌شده به یک شبکه معیارها/زیرمعیارها و لحاظ کردن وابستگی‌ها؛ برای مثال اثر متقابل آموزش و رفتار نالایمن در ریسک سقوط. برای این منظور، فرآیند تحلیل شبکه‌ای و نسخه‌های ترکیبی آن مانند DANP مناسب‌اند [۶].

گام ۴: وزن‌دهی معیارها: انتخاب روش وزن‌دهی متناسب با شرایط پروژه. روش بهترین-بدترین برای کاهش تعداد مقایسات زوجی و افزایش کارایی در تصمیم‌گیری‌های خبرگانی مفید است و در ادبیات انتخاب پیمانکار/ایمنی به‌کار گرفته شده است [۸]، [۱۶].

گام ۵: ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌ها: تبدیل قضاوت‌های زبانی و داده‌های ناهمگن به مقادیر قابل مقایسه با استفاده از منطق فازی یا مدل ابری، سپس رتبه‌بندی با TOPSIS / VIKOR / MABAC نمونه‌های استفاده از تاپسیس فازی در چرخه عمر پروژه، ویکور فازی تحت عدم قطعیت شناختی [۱۴] و ماباک در مدیریت ریسک ساخت [۶] مؤید کارایی این رویکردهاست. در مسائل ژئوتکنیکی تونل نیز مدل ابری به‌عنوان ابزار پوشش همزمان ابهام و تصادف پیشنهاد شده است [۱۰].

گام ۶: لایه داده‌محور برای پیش‌بینی و به‌روزرسانی: در صورت دسترسی به داده‌های تاریخی و داده‌های جاری پروژه، آموزش مدل‌های یادگیری ماشین برای تخمین احتمال/شدت ریسک یا پیش‌بینی سطح ریسک و سپس استفاده از خروجی‌ها به‌عنوان ورودی یا عامل اصلاحی در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. رویکردهای هیبریدی در پروژه‌های عظیم [۳]، استفاده از جنگل تصادفی برای ریسک ساخت پل [۱۲] و کاربرد سیستم فازی-عصبی در ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی [۱۳] نمونه‌های عملی این ایده‌اند. برای عملیاتی‌سازی، ایجاد داشبورد «انسان در حلقه» برای بازخورد و اصلاح مدل پیشنهاد می‌شود [۵].

۴. معیارهای انتخاب و ترکیب روش‌ها

انتخاب ترکیب بهینه هوش مصنوعی-تصمیم‌گیری چندمعیاره تابعی از:

- (۱) ماهیت ریسک
- (۲) مرحله پروژه
- (۳) سطح دسترسی به داده
- (۴) نیاز به تبیین‌پذیری برای ذی‌نفعان

بر اساس مطالعات مرور شده، می‌توان چند قاعده تصمیم‌یار پیشنهاد داد:

- ۱- اگر داده‌های تاریخی محدود باشد، استفاده از رویکردهای فازی/خبرگانی با تحلیل حساسیت ارجح است؛ مانند تاپسیس فازی یا ویکور. [۱۴]

۲- اگر وابستگی میان معیارها قابل توجه باشد، برای مثال در ریسک‌های مدیریتی/رفتاری، فرآیند تحلیل شبکه یا DANP توصیه می‌شود [۶].

۳- اگر هدف یافتن راه‌حل مصالحه‌ای میان معیارهای متعارض باشد، ویکور و نسخه‌های فازی آن مناسب‌اند [۸].

۴- در پروژه‌های داده‌غنی یا دارای سیستم‌های ثبت وقایع، مانند پروژه‌های پل در محیط‌های شهری، مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی برای رتبه‌بندی اهمیت عوامل و کاهش سوگیری خبره مفید است [۱۲].

۵- در ریسک‌های نوپدید نظیر ریسک سایبری، لازم است مدل ریسک با ویژگی‌های تهدید و الگوهای نفوذ سازگار شود و استفاده از چارچوب‌های یادگیری ماشین پیشنهاد شده است [۴].

۶- برای انتقال نتایج به عمل، داشبوردهای تصمیم‌یار و حضور خبره در حلقه، به‌ویژه در حوزه ایمنی، یک الزام کاربردی محسوب می‌شود [۵].

۷- ادغام با مدل اطلاعاتی ساختمان برای ایجاد جریان داده و ردیابی تغییرات ریسک در زمان، به‌عنوان یک توانمندساز کلیدی مطرح است [۱۹]، [۲۰].

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله با اتکا به پژوهش‌های منتخب در حوزه مدیریت ریسک ساخت نشان داد که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ساختاربندی و اولویت‌بندی، و روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی و به‌روزرسانی، مکمل یکدیگرند. چارچوب پیشنهادی شش‌مرحله‌ای هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان همگرایی قضاوت خبرگانی، مدل‌سازی عدم قطعیت فازی / ابری و یادگیری از داده را فراهم می‌کند. در سطح کاربردی، توصیه می‌شود سازمان‌های پروژه‌محور (پیمانکاران، کارفرمایان و مشاوران) به‌صورت گام‌به‌گام از استقرار پایگاه داده ریسک، استانداردسازی شاخص‌ها و سپس استقرار داشبوردهای «انسان در حلقه» حرکت کنند. برای پژوهش‌های آتی، توسعه مدل‌های ترکیبی با تمرکز بر تبیین‌پذیری و قابلیت انتقال و نیز اتصال کامل به محیط مدل‌سازی اطلاعات ساختمان/دیجیتال توئین به‌عنوان مسیرهای ارزشمند پیشنهاد می‌شود.

- [1] K. Tian, Z. Zhu, J. Mbachu, A. Ghanbaripour, and M. Moorhead, "Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: A bibliometric analysis and systematic literature review," *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 10, no. 3, pp. 1–25, 2025, doi: 10.1016/j.jik.2025.100711.
- [2] K. A. Smith, R. B. Mostafiz, C. Friedland, and I. Nahmens, "Bibliometric Web of Science and Google Trends analysis of multi-criteria decision analysis within the built environment," *Frontiers in Built Environment*, vol. 11, Art. no. 1528895, 2025, doi: 10.3389/fbuil.2025.1528895.
- [3] D. B. Chattapadhyay, J. Putta, and P. R. M. Rao, "Risk Identification, Assessment, and Prediction for Mega Construction Projects Using Hybrid MCDM and Machine Learning," *Buildings*, vol. 11, no. 4, Art. no. 172, 2021, doi: 10.3390/buildings11040172.
- [4] D. Yao and B. García de Soto, "Cyber Risk Assessment Framework for the Construction Industry Using Machine Learning Techniques," *Buildings*, vol. 14, no. 6, Art. no. 1561, 2024, doi: 10.3390/buildings14061561.
- [5] M. M. Nishat, A. Rauzy, and N. O. E. Olsson, "A Prototype Risk Assessment Dashboard for the Construction Industry: Getting Experts in the Loop Thanks to Machine Learning," *Safety*, vol. 11, no. 4, Art. no. 118, 2025, doi: 10.3390/safety11040118.
- [6] K. Chatterjee, E. K. Zavadskas, J. Tamošaitienė, K. Adhikary, and S. Kar, "A Hybrid MCDM Technique for Risk Management in Construction Projects," *Symmetry*, vol. 10, no. 2, Art. no. 46, 2018, doi: 10.3390/sym10020046.
- [7] T. Gebrehiwet and H. Luo, "Risk Level Evaluation on Construction Project Lifecycle Using Fuzzy Comprehensive Evaluation and TOPSIS," *Symmetry*, vol. 11, no. 1, Art. no. 12, 2019, doi: 10.3390/sym11010012.
- [8] R. Ansari, P. Dehghani, M. Mahdikhani, and J. Jeong, "A Novel Safety Risk Assessment Based on Fuzzy Set Theory and Decision Methods in High-Rise Buildings," *Buildings*, vol. 12, no. 12, Art. no. 2126, 2022, doi: 10.3390/buildings12122126.
- [9] X. Guo, J. Mao, L. Wang, and J. Gu, "Safety Resilience Evaluation of Deep Foundation Pit Construction Based on Extension Cloud Model," *Buildings*, vol. 15, no. 17, Art. no. 3216, 2025, doi: 10.3390/buildings15173216.
- [10] T. Xu, Z. Song, D. Guo, and Y. Song, "A Cloud Model-Based Risk Assessment Methodology for Tunneling-Induced Damage to Existing Tunnel," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, Art. no. 8898362, 2020, doi: 10.1155/2020/8898362.
- [11] T. Ji, J.-W. Liu, and Q.-F. Li, "Safety Risk Evaluation of Large and Complex Bridges during Construction Based on the Delphi-Improved FAHP-Factor Analysis Method," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, Art. no. 5397032, 2022, doi: 10.1155/2022/5397032.
- [12] Y. Wu, Y. Wang, H. Liu, L. Xie, L. Jiao, and P. Lu, "Risk assessment of bridge construction investigated using random forest algorithm," *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 20964, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-72051-5.
- [13] M. Ebrat and R. Ghodsi, "Construction Project Risk Assessment by Using Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System: An Empirical Study," *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1–15, 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0139-5.

- [14] T. K. Biswas and K. Zaman, "A Fuzzy-Based Risk Assessment Methodology for Construction Projects Under Epistemic Uncertainty," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 21, pp. 1221–1240, 2019, doi: 10.1007/s40815-018-00602-w.
- [15] S. Nazir and P. Dutta, "Risk Assessment in Construction PPP Projects Using Multiple MCDM Methods," *Economies*, vol. 6, no. 4, Art. no. 80, 2018, doi: 10.3390/economies6040080.
- [16] K. Chatterjee, M. Yazdani, D. Pamucar, and S. Chakraborty, "Integrated Decision Support System for Contractor Selection in Construction Projects Using BWM and Fuzzy VIKOR Methods," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, Art. no. 6933, 2021, doi: 10.3390/su13126933.
- [17] A. A. Alqassim, H. Alnajjar, M. Elagouz, and A. Ashour, "Prioritizing Post-Disaster Reconstruction Projects Using Multiple MCDM Techniques: A Case Study of Syrian Cities," *Buildings*, vol. 12, no. 2, Art. no. 136, 2022, doi: 10.3390/buildings12020136.
- [18] H. Naderpour, M. Valipour, and H. Sadeghi, "A Fuzzy-Integrated Multi-Criteria Framework for Evaluating Safety Risk Control Strategies in Construction Projects," *Buildings*, vol. 16, no. 1, Art. no. 134, 2026, doi: 10.3390/buildings16010134.
- [19] J. Wang, Y. Ma, R. Li, and S. Zhang, "Applications of BIM and Related Technologies in Construction Risk Management: A Review," *Buildings*, vol. 15, no. 13, Art. no. 2289, 2025, doi: 10.3390/buildings15132289.
- [20] T. Tan, G. Mills, E. Papadonikolaki, and Z. Liu, "Combining BIM and MCDM Methods for Decision-Making in Construction Projects," *Automation in Construction*, vol. 121, Art. no. 103451, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103451.
- [21] P. K. Marhavidas, M. Filippidis, G. K. Koulinas, and D. E. Koulouriotis, "Safety assessment in construction projects by hybridizing AHP and HAZOP-DMRA," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 6959–6977, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.12.040.
- [22] X. Yu and H. Zuo, "Intelligent Construction Schedule Optimization Using Fuzzy Neural Networks," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Art. no. 8111504, 2022, doi: 10.1155/2022/8111504.
- [23] K. Wang, Z. Ying, S. S. Goswami, Y. Yin, and Y. Zhao, "Investigating the Role of Artificial Intelligence Technologies in the Construction Industry Using a Delphi-ANP-TOPSIS Hybrid MCDM Concept under a Fuzzy Environment," *Sustainability*, vol. 15, no. 15, Art. no. 11848, 2023, doi: 10.3390/su151511848.