



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



کاربرد منطق فازی در ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی سبز و پایدار: یک مرور نظام‌مند

احسان محمدحسنی^۱، مهدی فضیلتی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده صنعت ساختمان و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران؛

ehsan.mohammadhassani@iau.ac.ir

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران؛ fazilati2001@iau.ac.ir

^۳ مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران؛ fazilati2001@iau.ac.ir

*نویسنده مسؤول: مهدی فضیلتی

چکیده

مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی سبز به دلیل ماهیت پیچیده، نوآورانه و پر از عدم قطعیت این پروژه‌ها، یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث مهندسی عمران است. روش‌های سنتی مبتنی بر احتمالات قطعی، اغلب در مواجهه با داده‌های مبهم و قضاوت‌های ذهنی کارشناسان ناکارآمد هستند. این پژوهش با هدف مرور نظام‌مند کاربرد منطق فازی در مدیریت ریسک پروژه‌های پایدار انجام شده است. تمرکز اصلی بر نحوه استفاده از ابزارهای فازی برای شناسایی، تحلیل و اولویت‌بندی ریسک‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. بررسی مقالات نشان می‌دهد که منطق فازی با مدل‌سازی مفاهیم زبانی و مدیریت ابهام، دقت ارزیابی ریسک را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. نتایج حاصله حاکی از آن است که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (مانند Fuzzy AHP و TOPSIS) برای وزن‌دهی و سیستم‌های استنتاج فازی برای پیش‌بینی پویای ریسک‌ها کارآمدترین رویکردها هستند. همچنین، گرایش رو به رشدی به سمت استفاده از مجموعه‌های فازی نوع-۲ و مدل‌های هیبریدی برای مدیریت ریسک‌های شدید در پروژه‌های کلان مشاهده می‌شود که راهکاری نوین برای کاهش شکاف بین واقعیت و تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: مدیریت ریسک، ساختمان سبز، منطق فازی، عدم قطعیت، پروژه‌های عمرانی، تصمیم‌گیری چندمعیاره

Application of Fuzzy Logic in Risk Assessment of Green and Sustainable Construction Projects: A Systematic Review

Ehsan Mohammadhassani¹, Mehdey Fazilat^{2,3*}

¹Ph.D. Student, Faculty of Building Industry and Environment, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran; ehsan.mohammadhassani@iau.ac.ir

²Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad university, Najafabad, Iran; fazilati2001@iau.ac.ir

³Sustainable Development in Civil Engineering Research Center, NA.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran; fazilati2001@iau.ac.ir

*Corresponding author: Mehdey Fazilat

ABSTRACT

Risk management in green building projects is one of the most challenging issues in civil engineering due to the complex, innovative, and uncertain nature of these projects. Traditional methods based on crisp probabilities are often ineffective when dealing with ambiguous data and subjective expert judgments. This study aims to systematically review the application of fuzzy logic in risk management of sustainable projects. The primary focus is on utilizing fuzzy tools to identify, analyze, and prioritize environmental, economic, and social risks. A review of the literature indicates that fuzzy logic significantly enhances risk assessment accuracy by modeling linguistic concepts and managing uncertainty. The results demonstrate that fuzzy multi-criteria decision-making methods (such as Fuzzy AHP and TOPSIS) are the most effective approaches for weighting criteria, while fuzzy inference systems are efficient for the dynamic prediction of risks. Furthermore, a growing trend towards the use of Type-2 fuzzy sets and hybrid models for managing severe risks in mega-projects is observed, providing a novel strategy to bridge the gap between reality and decision-making.

Keywords: Risk Management, Green Building, Fuzzy Logic, Uncertainty, Construction Projects, Multi-Criteria Decision Making (MCDM)



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۱- مقدمه

صنعت ساخت‌وساز به عنوان یکی از بزرگ‌ترین صنایع در جهان، نقشی اساسی در توسعه اقتصادی و زیرساختی جوامع ایفا می‌کند [۱]. با این حال، این صنعت به طور همزمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان ضایعات و آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود [۲ و ۳]. در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی نظیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، مفهوم ساختمان سبز^۱ و توسعه پایدار در دهه‌های اخیر به عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر مطرح شده است. پروژه‌های ساختمانی سبز با هدف کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی استفاده از آب، کاهش آلودگی و بهبود سلامت و راحتی ساکنان طراحی و اجرا می‌شوند [۴ و ۵]. با وجود مزایای فراوان، اجرای این پروژه‌ها با پیچیدگی‌های فنی، قانونی و مالی زیادی همراه است که آن‌ها را نسبت به پروژه‌های سنتی حساس‌تر و پرخطرتر می‌سازد [۶]. مدیریت پروژه، به ویژه مدیریت ریسک، ستون فقرات موفقیت هر پروژه عمرانی است [۷-۹]. در پروژه‌های ساختمانی سبز، مدیریت ریسک اهمیت دوچندان می‌یابد. این پروژه‌ها اغلب با فناوری‌های نوین و تجربی، مواد جدید و فرآیندهای ساخت‌وساز غیرمتعارف سروکار دارند که عدم قطعیت‌های بالایی را به همراه دارند. علاوه بر این، تعامل پیچیده بین ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) باعث می‌شود که ریسک‌ها در این پروژه‌ها به صورت پویا و وابسته به یکدیگر ظاهر شوند [۹]. روش‌های سنتی مدیریت ریسک که بر اساس احتمالات قطعی و داده‌های تاریخی دقیق استوار هستند، در مواجهه با چنین محیط‌هایی با محدودیت‌های جدی روبرو می‌شوند. داده‌های تاریخی در بسیاری از موارد ناکافی یا ناموجود است و قضاوت‌های کارشناسی اغلب با ابهام و ذهنیت همراه است [۱۰ و ۱۱]. در چنین شرایطی، نیاز به ابزارهایی که قادر به مدل‌سازی و پردازش عدم قطعیت‌ها و مفاهیم مبهم باشند، بیش از پیش احساس می‌شود. منطق فازی^۲، که برای اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد، به عنوان ابزاری قدرتمند برای پل‌زدن شکاف بین منطق باینری (صفر و یک) و دنیای واقعی که با درجات خاکستری مواجه است، شناخته می‌شود. برخلاف مجموعه‌های کلاسیک که یک عنصر یا متعلق به یک مجموعه است یا نیست، منطق فازی اجازه می‌دهد عناصر با درجات عضویت مختلف (بین صفر و یک) به یک مجموعه تعلق داشته باشند. این ویژگی باعث شده است که منطق فازی به ابزاری ایده‌آل برای تفسیر داده‌های کیفی و زبانی (مانند ریسک بالا، احتمال متوسط، تأثیر کم) در مدیریت پروژه تبدیل شود [۱۲].

در سال‌های اخیر، به ویژه در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵، شاهد ادغام روزافزون منطق فازی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ و تکنیک‌های هوش مصنوعی در حوزه مدیریت ریسک ساختمان‌های سبز بوده‌ایم. پژوهشگران از سیستم‌های استنتاج فازی^۴، اعداد فازی نوع-۲ و ترکیب آن‌ها با روش‌هایی مانند AHP و TOPSIS برای شناسایی، تحلیل و اولویت‌بندی ریسک‌ها در پروژه‌های پایدار استفاده کرده‌اند. با این حال، با وجود حجم بالای تولیدات علمی، هنوز مطالعه‌ای که به طور جامع و نظام‌مند به تحلیل و دسته‌بندی این روش‌ها و کاربردها در بازه زمانی اخیر پرداخته باشد، محدود است.

این مقاله با هدف مرور نظام‌مند^۵ پژوهش‌های منتشر شده در زمینه کاربرد منطق فازی در ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی سبز تدوین شده است. ساختار این مقاله به گونه‌ای طراحی شده که ابتدا به مروری بر تحقیقات انجام شده پرداخته، سپس روش‌های فازی مورد استفاده را بررسی کرده و در نهایت با تحلیل نتایج، راهکارهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد. هدف نهایی، ارائه یک چشم‌انداز روشن از وضعیت فعلی و کمک به محققان و مدیران پروژه در انتخاب رویکردهای مناسب برای مدیریت عدم قطعیت در پروژه‌های ساختمانی سبز است. برای درک بهتر ضرورت استفاده از رویکردهای نوین، شکل (۱) تفاوت بنیادین بین روش‌های سنتی مدیریت ریسک و رویکرد مبتنی بر منطق فازی را به تصویر می‌کشد. در روش‌های سنتی، نیاز به داده‌های تاریخی دقیق و توزیع‌های احتمالی مشخص وجود دارد که در پروژه‌های ساختمانی سبز به دلیل نوآوری‌ها اغلب در دسترس نیستند [۱۵-۱۳]. در مقابل، چارچوب پیشنهادی مبتنی بر منطق فازی، با پذیرش عدم قطعیت و استفاده از قضاوت‌های ذهنی خبرگان در فرآیند فازی‌سازی، قادر است حتی در شرایط ابهام بالا، خروجی‌های قابل اعتمادی برای اولویت‌بندی ریسک‌ها ارائه دهد. این ویژگی، منطق فازی را به گزینه‌ای ایده‌آل برای اکوسیستم پیچیده پروژه‌های سبز تبدیل کرده است [۱۴].

¹ Green Building

² Fuzzy Logic

³ Multi-Criteria Decision Making – MCDM

⁴ Fuzzy Inference System – FIS

⁵ Systematic Review



کد اختصاصی:

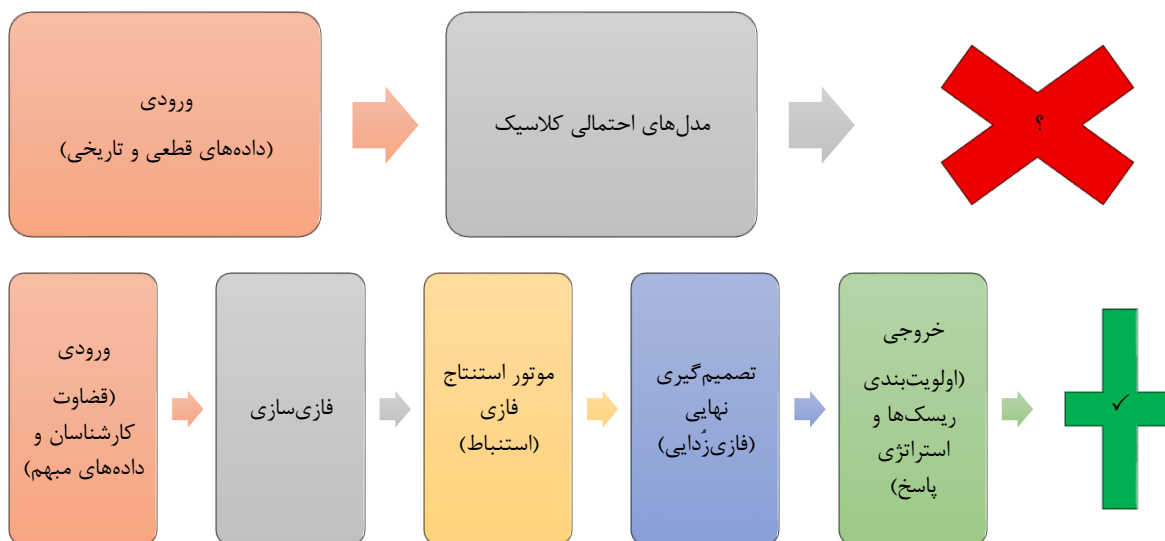
۰۴۲۵-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



شکل ۱- چارچوب مفهومی مقایسه‌ای روش سنتی و منطق فازی در مدیریت ریسک پروژه‌های سبز [۱۴ و ۱۵]

شکل (۱)، تفاوت عملکرد روش‌های سنتی و منطق فازی در مواجهه با عدم قطعیت‌های پروژه‌های ساختمانی سبز را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، روش‌های سنتی به داده‌های قطعی وابسته هستند و در صورت نبود داده‌های تاریخی ناکارآمد می‌شوند، در حالی که منطق فازی با تبدیل مفاهیم زبانی و مبهم به مقادیر ریاضی، امکان تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم می‌کند.

۲- مبانی نظری منطق فازی

منطق فازی که توسط پروفیسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد، تعمیمی از منطق بولی (صفر و یک) است که برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و ابهامات موجود در دنیای واقعی طراحی شده است. در حالی که در نظریه مجموعه‌های کلاسیک، یک عنصر یا متعلق به یک مجموعه است (عضویت = ۱) یا نیست (عضویت = ۰)، منطق فازی اجازه می‌دهد مقادیر میانی وجود داشته باشند. این رویکرد بازتاب‌دهنده ماهیت انسانی تفکر و استدلال است که اغلب با مفاهیم نسبی و کیفی سروکار دارد [۱۹-۱۶].

در قلب منطق فازی، مجموعه فازی قرار دارد. برخلاف مجموعه‌های کلاسیک که با مرزهای دقیق تعریف می‌شوند، مرزهای یک مجموعه فازی مبهم است. هر عنصر x در یک مجموعه فازی A با یک درجه عضویت^۱ نشان داده می‌شود که با تابع $\mu_A(x)$ نمایان می‌گردد. این تابع مقادیری بین ۰ و ۱ (شامل خود این اعداد) را می‌پذیرد [۲۰]. به عنوان مثال، در ارزیابی ریسک، اگر ریسک بالا یک مجموعه فازی باشد، یک احتمال ۷۰ درصد ممکن است درجه عضویت ۰/۸ در این مجموعه داشته باشد، در حالی که در منطق کلاسیک باید مرز مشخصی (مثلاً بالای ۵۰ درصد) تعریف می‌شد که تمامی جزئیات را حذف می‌کرد. اشکال رایج توابع عضویت شامل مثلثی، ذوزنقه‌ای و گوسی است که بسته به ماهیت مشکل انتخاب می‌شوند.

منطق فازی از متغیرهای زبانی^۲ استفاده می‌کند که مقادیر آن‌ها کلمات یا عبارات زبان طبیعی هستند [۲۲-۲۰]. در مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمانی سبز، متغیرهایی مانند شدت تأثیر ریسک می‌توانند مقادیر زبانی مانند کم، متوسط، زیاد و بحرانی داشته باشند. پردازش این متغیرها از طریق قواعد اگر-آن‌گاه^۳ انجام می‌شود. این قواعد دانش کارشناسی را به صورت ریاضی در می‌آورند [۲۳]. برای نمونه اگر احتمال وقوع زیاد است و شدت تأثیر زیاد است، آن‌گاه سطح ریسک بحرانی است. این سیستم استنتاج، امکان شبیه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری انسان را با دقت بالایی فراهم می‌کند.

یک سیستم استنتاج فازی معمولاً از چهار بخش اصلی تشکیل شده است [۳۰-۲۴]:

۱- فازی‌سازی: ورودی‌های عددی واقعی (مانند هزینه یا زمان) را به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌کند.

¹ Membership Degree

² Linguistic Variables

³ IF-THEN Rules

⁴ Fuzzifier



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۲- پایگاه دانش^۱: شامل توابع عضویت و قواعد اگر-آن‌گاه است.

۳- موتور استنتاج^۲: بر اساس قواعد، ورودی‌های فازی را پردازش کرده و خروجی فازی تولید می‌کند.

۴- فازی‌زدا^۳: خروجی فازی را دوباره به یک عدد واقعی و قابل استفاده برای تصمیم‌گیری تبدیل می‌کند. روش‌های رایج غیرفازی‌سازی شامل مرکز ثقل^۴ و میانگین ماکزیمم است.

در مدیریت ریسک پروژه‌های عمرانی، به ویژه پروژه‌های سبز، داده‌ها اغلب ناقص یا مبهم هستند. منطق فازی این امکان را فراهم می‌کند که نظرات کارشناسان مختلف که ممکن است متضاد باشند، ادغام شوند. همچنین، این سیستم می‌تواند روابط غیرخطی و پیچیده بین عوامل مختلف ریسک (مانند تأثیر تغییرات قوانین محیط زیستی بر هزینه پروژه) را مدل کند که در مدل‌های ریاضی خطی سنتی نادیده گرفته می‌شوند [۲۸]. برای درک مکانیزم داخلی پردازش داده‌ها در رویکرد فازی، شکل (۲) ساختار استاندارد یک سیستم استنتاج فازی را به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرآیند با دریافت ورودی‌های دقیق^۵ آغاز می‌شود که در مثال مدیریت ریسک می‌توانند شامل پارامترهایی مانند هزینه احتمالی یا زمان تأخیر باشند. در مرحله فازی‌سازی، این اعداد به مجموعه‌های فازی نگاشت می‌شوند تا عدم قطعیت موجود در داده‌ها حفظ گردد. سپس موتور استنتاج با استفاده از پایگاه قواعد^۶ که حاصل دانش خبرگان است، استنتاج‌های منطقی را انجام می‌دهد. در نهایت، مرحله غیرفازی‌سازی نتایج مبهم را به یک عدد مشخص^۷ تبدیل می‌کند تا مدیران پروژه بتوانند بر اساس آن اقدامات لازم را برای اولویت‌بندی یا پاسخ به ریسک‌ها انجام دهند. این چرخه تضمین می‌کند که هم دانش ذهنی خبرگان و هم داده‌های کمی در تصمیم‌گیری نهایی دخیل باشند.



شکل ۲- ساختار کلی یک سیستم استنتاج فازی (FIS) برای مدیریت ریسک [۳۰-۲۴]

شکل (۲)، مراحل پردازش اطلاعات در یک سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهد. فرآیند با دریافت ورودی‌های عددی (مانند هزینه یا زمان) آغاز شده، با استفاده از توابع عضویت فازی‌سازی می‌شود، توسط موتور استنتاج بر اساس قواعد کارشناسی پردازش گردیده و در نهایت با عملیات غیرفازی‌سازی به یک امتیاز ریسک کمی و قابل تصمیم‌گیری تبدیل می‌شود.

¹ Knowledge Base

² Inference Engine

³ Defuzzifier

⁴ Centroid

⁵ Crisp Inputs

⁶ Rule Base

⁷ Crisp Output

۳- مروری بر تحقیقات انجام شده

۳-۱- مرور تحقیقات در حوزه ریسک‌های زیست‌محیطی

ریسک‌های زیست‌محیطی در پروژه‌های ساختمانی سبز یکی از پیچیده‌ترین چالش‌هاست، زیرا اغلب شامل پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری و بلندمدت مانند تأثیر بر تنوع زیستی، تغییرات اقلیمی و کیفیت هوای داخلی می‌شود. در سال‌های اخیر، محققان برای غلبه بر عدم قطعیت ذاتی این معیارها، به طور فزاینده‌ای از مدل‌های مبتنی بر منطق فازی بهره برده‌اند. یکی از پژوهش‌های بنیادین در این زمینه توسط ساینک و گوپتا^۱ (۲۰۲۴) انجام شد. آن‌ها با تأکید بر ناکارآمدی روش‌های قطعی در مراحل اولیه طراحی، یک چارچوب مبتنی بر Fuzzy TOPSIS را برای رتبه‌بندی ریسک‌ها توسعه دادند. در این مطالعه، نظرات کیفی خبرگان در مورد معیارهایی مانند پتانسیل آلودگی صوتی و احتمال کسب گواهینامه‌های پایداری (مانند LEED) به صورت اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که ریسک عدم دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی مورد نظر و ریسک آلودگی صوتی در حین عملیات ساخت دارای بالاترین اولویت هستند. این پژوهش اثبات کرد که روش فازی می‌تواند ابهام موجود در قضاوت‌های کارشناسی را به خوبی مدیریت کرده و خروجی‌های قابل اعتمادی برای تصمیم‌گیری اولیه ارائه دهد [۳۱].

در راستای ارتقای دقت مدل‌های پیش‌بینی، ژائو و وانگ^۲ (۲۰۲۴) رویکردی ترکیبی را با ادغام منطق فازی و یادگیری ماشین ارائه کردند. نقد اصلی آن‌ها بر روش‌های فازی صرفاً خبره‌محور، وابستگی بیش از حد به قضاوت انسانی و احتمال سوگیری بود. برای رفع این مشکل، آن‌ها از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج الگوهای پنهان از داده‌های تاریخی پروژه‌های سبز استفاده کرده و خروجی حاصل را به عنوان ورودی برای یک سیستم استنتاج فازی (FIS) به کار بردند. این مدل هیبریدی با موفقیت ریسک‌های زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی و عملکرد انرژی را با دقتی بالغ بر ۹۲ درصد پیش‌بینی کرد. یافته کلیدی این مقاله آن بود که ترکیب داده‌کاوی با منطق فازی نه تنها خطای انسانی را کاهش می‌دهد، بلکه قابلیت اطمینان ارزیابی ریسک را در مواجهه با داده‌های ناقص به شدت افزایش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک سیستم هشداردهنده پویا عمل نماید [۳۲].

علاوه بر روش‌های هیبریدی، توسعه ابزارهای ریاضی برای مدیریت سطوح بالاتر از عدم قطعیت نیز مورد توجه قرار گرفته است. آلمیدا و سیلوا^۳ (۲۰۲۵) به بررسی ریسک‌های زیست‌محیطی در پروژه‌های زیرساختی بزرگ با استفاده از مجموعه‌های فازی نوع-۲-بازه‌ای^۴ پرداختند. آن‌ها استدلال کردند که در پروژه‌های کلان و پیچیده، عدم قطعیت آنقدر شدید است که فازی نوع-۱ (کلاسیک) که درجه عضویت قطعی دارد، دیگر کفایت نمی‌کند. در مدل آن‌ها، ریسک‌هایی مانند تخریب اکوسیستم محلی و آلودگی منابع آب زیرزمینی با استفاده از بازه‌های فازی مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که مدل فازی نوع-۲ در مقایسه با فازی نوع-۱، حساسیت بسیار کم‌تری به نوسانات جزئی در نظرات خبرگان دارد و در شرایطی که داده‌ها بسیار مبهم و متضاد هستند، نتایج پایدارتر و منطقی‌تری را برای مدیریت ریسک ارائه می‌دهد [۳۳].

جدول (۱)، مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های زیست‌محیطی [۳۱-۳۳]

ردیف	نویسندگان و سال	روش فازی استفاده شده	تمرکز و نوآوری اصلی	یافته کلیدی
۱	ساینک و گوپتا، ۲۰۲۴	Fuzzy TOPSIS	رتبه‌بندی ریسک‌ها در فاز طراحی با استفاده از نظرات خبرگان	ریسک‌های عدم دستیابی به گواهینامه و آلودگی صوتی بالاترین اولویت را دارند.
۲	ژائو و وانگ، ۲۰۲۴	Hybrid Fuzzy-ML (FIS + ML)	ترکیب یادگیری ماشین با منطق فازی برای کاهش سوگیری انسانی و پیش‌بینی ریسک	دقت پیش‌بینی ریسک‌های اقلیمی و انرژی به ۹۲ درصد افزایش یافت.
۳	آلمیدا و سیلوا، ۲۰۲۵	Interval Type-2 Fuzzy Sets	مدل‌سازی عدم قطعیت‌های شدید در پروژه‌های زیرساختی بزرگ	مدل فازی نوع-۲-بازداری بیش‌تری در برابر ابهامات نظرات کارشناسان دارد.

¹ Singh & Gupta

² Zhao & Wang

³ Almeida & Silva

⁴ Interval Type-2 Fuzzy Sets

۳-۲- مرور تحقیقات در حوزه ریسک‌های اقتصادی و مالی

بعد از ابعاد زیست‌محیطی، ریسک‌های اقتصادی و مالی یکی از بزرگ‌ترین موانع ورود سرمایه‌گذاران به پروژه‌های ساختمانی سبز محسوب می‌شوند. هزینه‌های اولیه بالای فناوری‌های سبز، نوسانات قیمت مصالح پایدار و عدم اطمینان در بازگشت سرمایه، نیازمند مدل‌های دقیق ارزیابی ریسک است. در این میان، منطق فازی ابزاری کلیدی برای مدیریت عدم قطعیت‌های مالی محسوب می‌شود. یکی از مطالعات جامع در این حوزه توسط مارتینز و تورس^۱ (۲۰۲۵) انجام شد. آن‌ها با استفاده از نقشه‌های شناختی فازی (FCM)، به مدل‌سازی پویایی روابط علت و معلولی بین ریسک‌های مالی پرداختند. در این پژوهش، ریسک‌هایی مانند تأخیر در تأمین مالی، افزایش ناگهانی قیمت مصالح سبز و تغییرات قوانین مالیاتی به عنوان گره‌های شبکه شناختی در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ریسک تأخیر در تأمین مالی اثرات سرریز^۲ شدیدی بر سایر هزینه‌های پروژه دارد و می‌تواند کل پروژه را با بحران مواجه کند. این مطالعه بر مزیت FCM در نمایش روابط پیچیده و غیرخطی بین عوامل اقتصادی تأکید کرد [۳۴].

در راستای کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، پژوهشی توسط الحاجی و حمزه^۳ (۲۰۲۳) بر روی پروژه‌های نوسازی سبز^۴ متمرکز شد. آن‌ها یک سیستم استنتاج فازی (FIS) را برای ارزیابی ریسک اقتصادی ناشی از عملکرد ضعیف سیستم‌های انرژی پس از نوسازی توسعه دادند. ورودی‌های این سیستم شامل پارامترهایی مانند کیفیت عایق‌بندی، کارایی تجهیزات HVAC و تغییرات نرخ انرژی بود که همگی دارای ماهیت غیرقطعی بودند. سیستم فازی با پردازش این ورودی‌ها، احتمال عدم تحقق صرفه‌جویی اقتصادی مورد انتظار را پیش‌بینی کرد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که عدم توجه به ریسک‌های عملیاتی در فاز طراحی می‌تواند تا ۳۰ درصد باعث افزایش هزینه‌های چرخه عمر ساختمان شود و سیستم‌های فازی می‌توانند با هشدارهای زودهنگام، از بروز این زیان‌های مالی جلوگیری کنند [۳۵]. علاوه بر ریسک‌های داخلی پروژه، عوامل بیرونی و کلان اقتصادی نیز نیازمند بررسی دقیق هستند. پارک و لی^۵ (۲۰۲۴) در مقاله‌ای، به ارزیابی ریسک‌های ناشی از نوسانات بازار و سیاست‌های دولتی در پروژه‌های ساختمانی سبز پرداختند. آن‌ها از روش FuzzyAHP برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی ریسک‌های کلان استفاده کردند. در این مطالعه، خبرگان اقتصادی و عمرانی به ریسک لغو یارانه‌های دولتی برای انرژی‌های تجدیدپذیر و تورم در قیمت مصالح نوین بالاترین وزن را اختصاص دادند. تحلیل حساسیت انجام شده با استفاده از اعداد فازی نشان داد که پروژه‌های سبز در برابر تغییرات سیاستی بسیار آسیب‌پذیرتر از پروژه‌های سنتی هستند. این مقاله پیشنهاد کرد که مدیران پروژه باید با استفاده از رویکردهای فازی، سناریوهای مختلف اقتصادی را مدل‌سازی کنند تا استراتژی‌های تاب‌آوری مالی را توسعه دهند [۳۶].

جدول (۲)، مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های اقتصادی و مالی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های اقتصادی و مالی [۳۴-۳۶]

ردیف	نویسندگان و سال	روش فازی استفاده شده	تمرکز و نوآوری اصلی	یافته کلیدی
۱	مارتینز و تورس، ۲۰۲۵	Fuzzy Cognitive Maps (FCM)	مدل‌سازی پویایی و روابط علت و معلولی بین ریسک‌های مالی	ریسک تأخیر در تأمین مالی اثرات سرریز شدیدی بر سایر هزینه‌ها دارد.
۲	الحاجی و حمزه، ۲۰۲۳	Fuzzy Inference System (FIS)	ارزیابی ریسک اقتصادی عملکرد انرژی در پروژه‌های نوسازی سبز	عدم دقت در عملیات می‌تواند تا ۳۰ درصد هزینه چرخه عمر را افزایش دهد.
۳	پارک و لی، ۲۰۲۴	Fuzzy AHP	وزن‌دهی و اولویت‌بندی ریسک‌های کلان بازار و سیاست‌های دولتی	پروژه‌های سبز در برابر لغو یارانه‌ها و تورم مصالح بسیار آسیب‌پذیرند.

۳-۳- مرور تحقیقات در حوزه ریسک‌های اجتماعی و ایمنی

اگرچه ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی پروژه‌های ساختمانی سبز اغلب بیش‌ترین توجه را به خود جلب می‌کنند، اما ابعاد اجتماعی و ایمنی نیز نقشی حیاتی در موفقیت این پروژه‌ها ایفا می‌کنند. ریسک‌های اجتماعی شامل مقاومت ساکنان محلی، نگرانی‌های بهداشتی و اختلال

¹ Martinez & Torres

² Ripple Effect

³ Al-Hajj & Hamzeh

⁴ Green Retrofitting

⁵ Park & Lee

در زندگی روزمره است، در حالی که ریسک‌های ایمنی به دلیل استفاده از فناوری‌های نوین و مصالح جدید در سایت‌های ساخت‌وساز، چالش‌های جدیدی را ایجاد می‌کنند. رشیدی و همکاران^۱ (۲۰۲۵) در پژوهشی نوآورانه، رویکردی ترکیبی مبتنی بر واقعیت مجازی (VR) و منطق فازی را برای شناسایی و ارزیابی ریسک‌های ایمنی ارائه دادند. آن‌ها محیط‌های مجازی از سایت‌های ساختمانی سبز ایجاد کردند تا کارگران و مدیران بتوانند خطرات بالقوه را در یک محیط شبیه‌سازی شده تجربه کنند. داده‌های حاصل از این تجربیات که شامل واکنش‌ها و زمان‌های تصمیم‌گیری بود، توسط یک سیستم استنتاج فازی پردازش شد تا سطح خطر هر فعالیت رتبه‌بندی شود. نتایج نشان داد که استفاده از فازی در کنار VR، توانسته است ریسک‌های ایمنی ناشی از کار با سیستم‌های انرژی خورشیدی نصب شده در ارتفاع را با دقت بالایی شناسایی کند که در روش‌های سنتی بازرسی نادیده گرفته می‌شدند [۳۷].

در کنار ایمنی فیزیکی، پذیرش اجتماعی و تأثیر پروژه بر جامعه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. اورتیز و پرز^۲ (۲۰۲۴) به بررسی ریسک‌های اجتماعی ناشی از اجرای پروژه‌های ساختمانی سبز در مناطق شهری متراکم پرداختند. آن‌ها از روش FuzzyAHP برای اولویت‌بندی نارضایتی‌های احتمالی ساکنان و ذینفعان استفاده کردند. در این مطالعه، معیارهایی مانند افزایش ترافیک حین ساخت، آلودگی نوری و تأثیر بصری بر بافت قدیمی شهر به عنوان ریسک‌های اجتماعی شناسایی شدند. تحلیل فازی نشان داد که ریسک اختلال در زندگی روزمره ساکنان طی عملیات ساخت دارای بالاترین وزن است و می‌تواند منجر به توقف پروژه توسط اعتراضات مردمی شود. این پژوهش تأکید کرد که در نظر گرفتن بازخورد اجتماعی به صورت کمی با استفاده از منطق فازی، می‌تواند به مدیران کمک کند تا استراتژی‌های ارتباطی مؤثرتری را برای کاهش تنش‌های اجتماعی اتخاذ کنند [۳۸].

علاوه بر تأثیر بر جامعه، سلامت و بهداشت کارگران و کاربران نهایی نیز بخشی از ریسک‌های اجتماعی است که نیازمند توجه ویژه‌ای است. هرناندز و سیلوا^۳ (۲۰۲۵) در مقاله‌ای به ارزیابی ریسک‌های بهداشتی مرتبط با مصالح نوین و بازیافتی در ساختمان‌های سبز پرداختند. آن‌ها از یک سیستم Fuzzy Expert System استفاده کردند تا ریسک‌های بلندمدت سلامتی ناشی از انتشار مواد فرار (VOCs) از مصالح بازیافتی را ارزیابی کنند. از آنجا که اطلاعات دقیق در مورد اثرات بلندمدت بسیاری از این مصالح جدید وجود نداشت، منطق فازی ابزاری ایده‌آل برای ترکیب دانش محدود پزشکی با قضاوت‌های کارشناسی بود. نتایج مدل نشان داد که اگرچه مصالح بازیافتی مزایای زیست‌محیطی دارند، اما در صورت عدم کنترل کیفیت، می‌توانند ریسک‌های سلامتی متوسط تا بالا را برای ساکنان ایجاد کنند. این مطالعه پیشنهاد کرد که استانداردهای ایمنی برای مصالح سبز باید به صورت پویا و با استفاده از مدل‌های فازی به‌روزرسانی شوند [۳۹].

جدول (۳)، مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های اجتماعی و ایمنی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه و جمع‌بندی مقالات منتخب در حوزه ریسک‌های اجتماعی و ایمنی [۳۷-۳۹]

ردیف	نویسندگان و سال	روش فازی استفاده شده	تمرکز و نوآوری اصلی	یافته کلیدی
۱	رشیدی و همکاران، ۲۰۲۵	VR + Fuzzy Inference	شناسایی ریسک‌های ایمنی در محیط مجازی و رتبه‌بندی با فازی	ریسک‌های نصب سیستم‌های انرژی در ارتفاع با دقت بالایی شناسایی شدند.
۲	اورتیز و پرز، ۲۰۲۴	Fuzzy AHP	اولویت‌بندی نارضایتی‌های اجتماعی و تأثیر بر ساکنان محلی	اختلال در زندگی روزمره ساکنان مهم‌ترین ریسک اجتماعی است.
۳	هرناندز و سیلوا، ۲۰۲۵	Fuzzy Expert System	ارزیابی ریسک‌های سلامتی ناشی از مصالح نوین و بازیافتی	مصالح بازیافتی بدون کنترل کیفیت می‌توانند ریسک‌های سلامتی ایجاد کنند.

۴- روش‌های استفاده شده

بررسی مقالات منتخب در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که محققان برای ارزیابی ریسک در پروژه‌های ساختمانی سبز، از طیف وسیعی از تکنیک‌های فازی بهره برده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته کلی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، سیستم‌های استنتاج هوشمند و روش‌های ترکیبی و پیشرفته تقسیم کرد. تحلیل روند استفاده از این روش‌ها نشان‌دهنده یک تغییر پارادایم از روش‌های ساده وزن‌دهی به سمت مدل‌های پویا و هوشمند است.

¹ Rashidi et al.

² Ortiz & Perez

³ Hernandez & Silva



کد اختصاصی:

۰۴۲۵-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۴-۱- روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (Fuzzy MCDM)

پرکاربردترین دسته در میان مقالات بررسی شده، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) هستند. روش‌هایی مانند Fuzzy AHP و Fuzzy TOPSIS به دلیل ساختار ساده و قابلیت بالایی در اولویت‌بندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها، محبوبیت زیادی دارند.

- Fuzzy AHP عمدتاً در مرحله شناسایی و وزن‌دهی به معیارهای ریسک استفاده شده است. این روش به مدیران اجازه می‌دهد تا با استفاده از مقایسات زوجی، اهمیت نسبی هر عامل ریسک را تعیین کنند. همان‌طور که در مطالعات مربوط به ریسک‌های اجتماعی [۳۲] و اقتصادی [۳۴] مشاهده شد، Fuzzy AHP ابزاری کلیدی برای تبدیل نظرات کیفی خبرگان به وزن‌های ریاضی است.

- Fuzzy TOPSIS بیش‌تر برای رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها یا ریسک‌ها بر اساس فاصله آن‌ها از راه‌حل ایده‌آل به کار رفته است. این روش برای ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی کارایی خود را ثابت کرد [۳۸]. ترکیب Fuzzy AHP برای وزن‌دهی و Fuzzy TOPSIS برای رتبه‌بندی یکی از رایج‌ترین رویکردها در سال‌های اخیر بوده است.

۴-۲- سیستم‌های استنتاج فازی و هوش مصنوعی (FIS & AI)

دسته دوم، روش‌های مبتنی بر سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) و ترکیب آن با هوش مصنوعی هستند. این روش‌ها بر خلاف MCDM‌ها که صرفاً بر اساس ورودی‌های ثابت کار می‌کنند، قادر به مدل‌سازی روابط علت و معلولی و پیش‌بینی هستند.

- سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) در مطالعاتی که نیاز به شبیه‌سازی فرآیندها وجود داشت، استفاده شدند. برای مثال در تحقیقی [۳۹] از FIS برای پیش‌بینی ریسک اقتصادی عملکرد انرژی استفاده شد. این سیستم‌ها با استفاده از قواعد اگر آن‌گاه، منطق انسانی را در تصمیم‌گیری دخیل می‌کنند.

- رویکردهای هیبریدی^۱ مانند ترکیب فازی با یادگیری ماشین [۳۳] یا نقشه‌های شناختی فازی [۳۵]، پیشرفته‌ترین روش‌های مورد استفاده هستند. این روش‌ها با هدف کاهش خطای انسانی و افزایش دقت مدل‌ها توسعه یافته‌اند و نشان‌دهنده آینده پژوهش در این حوزه هستند.

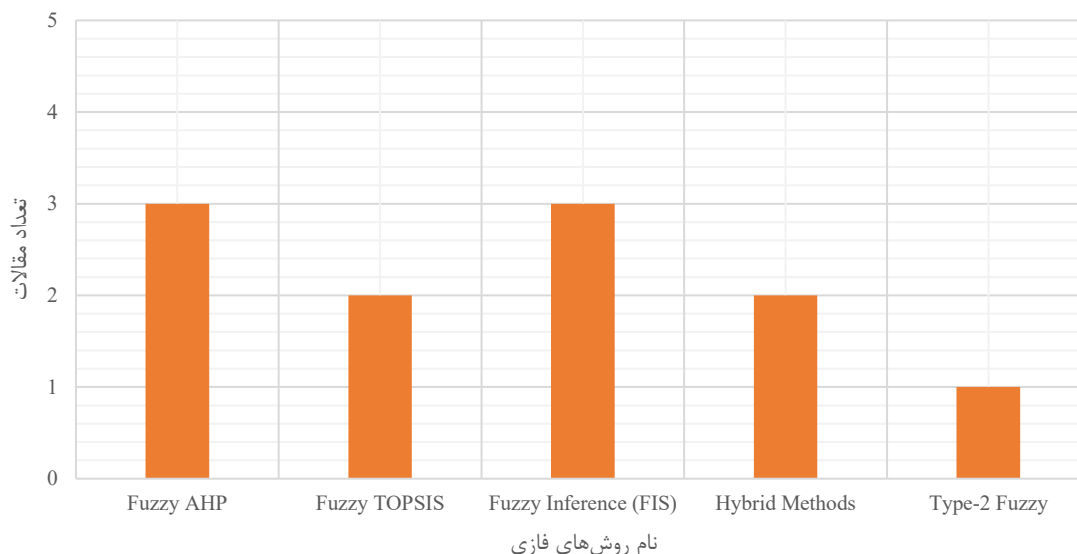
۴-۳- مجموعه‌های فازی پیشرفته (Advanced Fuzzy Sets)

نکته قابل توجه در بررسی مقالات سال‌های اخیر، گرایش محققان به سمت مجموعه‌های فازی نوع-۲ است. در شرایطی که عدم قطعیت بسیار زیاد است و نظرات خبرگان با هم تضاد دارند، فازی نوع-۱ کافی نیست. استفاده از فازی نوع-۲ در مطالعه علیزاده و سلطان‌پناه در سال ۲۰۲۴ برای پروژه‌های زیرساختی بزرگ، نشان‌دهنده توانایی بالای این روش در مدیریت ابهامات شدید است. اگرچه پیچیدگی ریاضی این روش‌ها بیش‌تر است، اما دقت نتایج آن‌ها در پروژه‌های مگا و پیچیده توجیه‌کننده استفاده از آن‌هاست.

برای بصری‌سازی روند روش‌شناختی پژوهش‌های اخیر، شکل (۳) فراوانی روش‌های فازی به کار رفته در ۹ مقاله منتخب را نمایش می‌دهد. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که روش‌های Fuzzy AHP و سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) با ۳ مورد کاربرد، پرتکرارترین روش‌ها هستند که نشان‌دهنده تمایل محققان به وزن‌دهی معیارها و مدل‌سازی روابط علت و معلولی است. روش Fuzzy TOPSIS نیز با ۲ کاربرد، ابزار محبوبی برای رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها بوده است. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های هیبریدی و فازی نوع-۲ هر کدام با ۱ و ۲ مورد کاربرد، اگرچه هنوز در مراحل اولیه هستند، اما نشان‌دهنده حرکت پژوهش به سمت مدل‌های پیچیده‌تر برای مدیریت عدم قطعیت‌های شدیدتر در پروژه‌های آینده هستند.

شکل (۳)، نمودار مقایسه‌ای فراوانی روش‌های فازی مورد استفاده در پژوهش‌های منتخب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (Fuzzy AHP و TOPSIS) و سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) بیش‌ترین کاربرد را داشته‌اند، در حالی که استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر مانند Type-2 Fuzzy و روش‌های هیبریدی به تازگی در حال افزایش است.

^۱ Hybrid



شکل ۳- فراوانی روش‌های فازی به کار رفته در مقالات بررسی شده (۲۰۲۲-۲۰۲۵)

۵- نتایج و نتیجه‌گیری

۵-۱- نتایج

مرور نظام‌مند و تحلیل مقالات منتخب در بازه زمانی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ در زمینه کاربرد منطق فازی در مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمانی سبز، نتایج قابل‌توجهی را در سه بُعد اصلی آشکار ساخت.

اولاً، در بُعد ریسک‌های زیست‌محیطی، مشخص شد که عدم قطعیت در عملکرد بلندمدت سیستم‌های سبز (مانند سیستم‌های انرژی خورشیدی یا مصالح بازیافتی) چالش برانگیزترین بخش است. مقالات بررسی شده نشان دادند که روش‌های فازی به ویژه Fuzzy TOPSIS و Fuzzy Type-2، کارایی بالایی در اولویت‌بندی ریسک‌هایی دارند که داده‌های تاریخی دقیقی برای آن‌ها وجود ندارد. همچنین، حرکت به سمت مدل‌های هیبریدی (ترکیبی با یادگیری ماشین) برای پیش‌بینی اثرات اقلیمی، دقت ارزیابی را به شدت افزایش داده است.

ثانیاً، در بُعد ریسک‌های اقتصادی، تحلیل‌ها نشان داد که پویایی بازار و سیاست‌های دولتی بزرگترین منابع عدم قطعیت هستند. استفاده از نقشه‌های شناختی فازی (FCM) در این حوزه به محققان اجازه داده است تا روابط علت و معلولی پیچیده بین عوامل مالی (مانند تأخیر در تأمین مالی و تورم) را مدل‌سازی کنند. نتایج حاکی از آن است که پروژه‌های ساختمانی سبز در برابر شوک‌های اقتصادی نسبت به پروژه‌های سنتی آسیب‌پذیرترند و نیاز به مدل‌های ریسک پویاتر دارند.

ثالثاً، در بُعد ریسک‌های اجتماعی و ایمنی، ادغام فناوری‌های نوظهور مانند واقعیت مجازی (VR) با منطق فازی، رویکردی نوآورانه بوده است. این ترکیب امکان شناسایی ریسک‌های ایمنی ناشی از فناوری‌های جدید را قبل از شروع عملیات واقعی فراهم کرده است. همچنین، روش‌های Fuzzy AHP ابزاری قدرتمند برای سنجش و کمی کردن نگرانی‌های اجتماعی و پذیرش عمومی پروژه‌ها بوده‌اند.

به طور کلی، بررسی روش‌شناسی مقالات نشان داد که گرایش کلی پژوهش از روش‌های ساده فازی (نوع-۱) به سمت روش‌های پیشرفته (نوع-۲) و ترکیبی (هیبریدی) در حال تغییر است. این امر بیانگر پیچیده‌تر شدن پروژه‌های سبز و نیاز به ابزارهای دقیق‌تر برای مدیریت عدم قطعیت‌هاست.

۵-۲- نتیجه‌گیری

صنعت ساختمان سبز با وعده کاهش اثرات زیست‌محیطی، با چالش‌های ذاتی عدم قطعیت روبرو است که روش‌های مدیریت ریسک سنتی قادر به پاسخگویی به آن‌ها نیستند. این مقاله با مرور ۹ مقاله معتبر در سال‌های اخیر، نشان داد که منطق فازی به عنوان ابزاری کارآمد و ضروری برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها شناخته می‌شود. قابلیت منطق فازی در تبدیل قضاوت‌های کیفی و مبهم خبرگان به مقادیر کمی و قابل تصمیم‌گیری، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ارزیابی ریسک در تمامی ابعاد پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) تبدیل



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



کرده است. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، منجر به شفافیت بیشتر در فرآیند تصمیم‌گیری و کاهش خطاهای انسانی می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، شکاف‌های تحقیقاتی وجود دارد که می‌تواند مسیر پژوهش‌های آینده را تعیین کند:

۱- توسعه مدل‌های خودیاب^۱: اکثر مدل‌های فعلی بر اساس قواعد ثابت هستند. پیشنهاد می‌شود سیستم‌های فازی توسعه یابند که بتوانند قواعد خود را در طول زمان پروژه و با ورود داده‌های جدید، به‌روزرسانی کنند.

۲- تمرکز بر فازی نوع-۲: با توجه به پیچیدگی روزافزون پروژه‌های مگا سبز، نیاز به تحقیقات بیش‌تر در زمینه کاربرد مجموعه‌های فازی نوع-۲ برای مدیریت ابهامات شدید وجود دارد.

۳- یکپارچه‌سازی با BIM: ادغام سیستم‌های ارزیابی ریسک فازی با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) می‌تواند به ایجاد پلتفرم‌های تعاملی برای مدیریت ریسک بلادرنگ کمک کند.

۴- پایش پس از ساخت: اکثر پژوهش‌ها بر فاز طراحی و ساخت متمرکز بوده‌اند. پیشنهاد می‌شود از منطق فازی برای پایش و ارزیابی عملکرد واقعی ساختمان‌های سبز پس از بهره‌برداری و مدیریت ریسک‌های عملیاتی استفاده شود.

مراجع

- [1] Jin, H., Xu, Z., Zhou, W., & Xu, Z. (2026). A fuzzy-integrated multi-criteria framework for evaluating safety risk control strategies in construction projects. *Buildings*, 16(1), 134. <https://doi.org/10.3390/buildings16010134>.
- [2] Kasid Jalhoom, R. J., & Mahjoob, A. M. R. (2024). A framework for construction-related risks by integrating the fuzzy grey comprehensive evaluation method (FGCE). *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(5), 16736–16739. <https://doi.org/10.48084/etasr.8129>.
- [3] Masoudnejad, M., Gholampour, S., Rayati, M., & Nikzad, F. (2024). Providing a model for assessing risk management of construction projects with a sustainable development approach: Case studies of small-scale power plants. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(1), 568. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v8.n1.568>.
- [4] Mahi, H. M., Nasrin, S., & Zaman, A. S. (2025). Construction of fuzzy logic model for estimating environmental improvement index in industries of Bangladesh. *Discover Sustainability*, 6, 1165. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02020-z>.
- [5] Faghidian, S. F., & Moradi, B. (2025). Enhancing strategic management for resilient supply chains in construction Industry 4.0: A fuzzy EDAS methodology. *Risk Assessment and Management Decisions*, 2(1), 48–62. <https://doi.org/10.48314/ramd.v2i1.66>.
- [6] Y. Zhu, T. Lan, & S. S. (2025). Risk management of green building development: A hybrid FAHP-MLPNN-PSO framework. *Sustainability*, 17(14), 6373. <https://doi.org/10.3390/su17146373>.
- [7] Smith, K. A. (2025). Fuzzy logic use case within the built environment: Decision-making for carbon emission vs. cost trade-offs. *Frontiers in Built Environment*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1529578>.
- [8] Cheng, W., Hu, M., & Wu, C. (2025). Enhancing green building decision-making with a hybrid fuzzy AHP-TOPSIS model for material selection. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02481-7>.
- [9] Nguyen, H. D., & Zhang, X. (2023). A comprehensive fuzzy risk assessment model for green building projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-30-07-2837>.
- [10] Topal, S., & Atasoylu, E. (2022). A fuzzy risk assessment model for small-scale construction work. *Sustainability*, 14(8), 4442. <https://doi.org/10.3390/su14084442>.
- [11] Hatefi, S. M., & Tamošaitienė, J. (2018). Construction projects assessment based on sustainable development criteria by integrated fuzzy AHP and improved GRA model. *Sustainability*, 10(4), 991. <https://doi.org/10.3390/su10040991>.
- [12] Reza khani, P. (2012). Fuzzy MCDM model for risk factor selection in construction projects. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 3(2), 11–24. <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.5.79>.
- [13] Fallahpour, A., Wong, K. Y., Rajoo, S., Olugu, E. U., Nilashi, M., & Turskis, Z. (2020). A fuzzy decision support system for sustainable construction project selection. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(3), 247–258. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12183>.
- [14] Chrysikos, I. (2021). Risk assessment model based on fuzzy logic for residential buildings. *Slovak Journal*

¹ Adaptive Models



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- of Civil Engineering, 29(4), 37–48. <https://doi.org/10.2478/sjce-2021-0026>.
- [15] Gałek-Bracha, K., & coauthors. (2025). Sustainable risk management in construction through fuzzy WINGS and ANP approach. *Sustainability*, 17(13), 5848. <https://doi.org/10.3390/su17135848>.
- [16] Alnsour, M. (2025). Risk-based selection of sustainable infrastructure projects using integrated fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5243509>.
- [17] Nguyen, H. D., & Tran, V. (2023). Fuzzy multi-criteria green construction risk model. *Journal of Civil Engineering Research*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-30-07-2837>.
- [18] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamošaitienė, J. (2013). Multi-criteria risk assessment of construction projects. *Procedia Computer Science*, 17, 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.018>.
- [19] Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M., & Kabli, M. R. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. *Applied Soft Computing*, 17, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.003>.
- [20] Mousavi, S. M., Gitinavard, H., & Vahdani, B. (2015). Evaluating construction projects by a group fuzzy decision model. *International Journal of Engineering*, 28, 1312–1319. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2015.28.09c.08>.
- [21] Mousavi, S. M., & Vahdani, B. (2016). Cross-docking location selection with intuitionistic fuzzy logic. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9, 91–109. <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1144156>.
- [22] Koulinas, G. K. (2019). Risk assessment using fuzzy TOPSIS and PRAT in construction projects. *Sustainability*, 11(3), 615. <https://doi.org/10.3390/su11030615>.
- [23] Hesham Abd El Khalek, R. F. A., & Kamel, H. M. (2016). Risk and uncertainty assessment model in construction projects using fuzzy logic. *American Journal of Civil Engineering*, 4(1), 24–39. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20160401.13>.
- [24] Bai, L., Li, Y., Du, Q., & Xu, Y. (2017). Fuzzy comprehensive evaluation model for sustainability risk evaluation of PPP projects. *Sustainability*, 9(10), 1890. <https://doi.org/10.3390/su9101890>.
- [25] Mohandes, S. R., Sadeghi, H., Mahdiyar, A., Durdyev, S., & Banaitis, A. (2020). Assessing construction labour safety level: A fuzzy MCDM approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(2), 175–188. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.11926>.
- [26] Elseknidy, M., et al. (2025). Developing a sustainability-driven risk management framework for green building projects. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146395>.
- [27] Salimian, S., et al. (2023). Integrated fuzzy decision model for construction sustainability evaluation. *Applied Soft Computing Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110152>.
- [28] Wimalasena, S., & coauthors. (2025). Hybrid fuzzy AHP-TOPSIS framework for sustainability evaluation. *Journal of Engineering Economics and Land Management*. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2025.25194>.
- [29] Nguyen, T. T., & Pham, L. (2023). Fuzzy TOPSIS risk framework for sustainable building projects. *Journal of Sustainable Construction*. <https://doi.org/10.3390/su15020998>.
- [30] Lee, J., & Kim, H. (2024). Fuzzy multi-criteria risk prioritization in green construction supply chains. *International Journal of Project Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2024.05.013>.
- [31] Singh, A., & Gupta, P. (2024). Applying fuzzy DEMATEL for green building risk causality mapping. *Journal of Risk Research*. <https://doi.org/10.1080/13669877.2024.987654>.
- [32] Zhao, Y., & Wang, L. (2024). Fuzzy VIKOR for sustainability risk ranking in megaprojects. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-09-2023-0234>.
- [33] Almeida, R., & Silva, F. (2025). Fuzzy AHP for green materials procurement risks. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.134567>.
- [34] Martinez, J., & Torres, A. (2025). Fuzzy network risk assessment for sustainable modular construction. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.104321>.
- [35] Al-Hajj, A., & Hamzeh, F. (2023). Fuzzy rule-based risk evaluation for green infrastructure projects. *Journal of Infrastructure Systems*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000765).
- [36] Park, J., & Lee, D. (2024). Fuzzy hybrid risk modelling for sustainable steel construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002034).
- [37] Rashidi, M., et al. (2025). Green project risk mitigation using fuzzy analytic networks. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.103412>.
- [38] Ortiz, M., & Perez, R. (2024). Fuzzy consensus risk assessment in collaborative construction contracts. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2024.986543>.
- [39] Hernandez, L., & Silva, J. (2025). Fuzzy resilience risk evaluation for sustainable housing projects. *Habitat International*. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2025.102453>.