

کاربردهای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی در مهندسی عمران: نگاهی به آینده تصمیم‌گیری‌های هوشمند در پروژه‌های عمرانی

رضا قربانی^{۱*}، مهدی فضیلتی^{۲،۳}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، بخش مدیریت ساخت، دانشگاه نجف آباد، Reza.ghorbani1379@gmail.com

۲- گروه مهندس عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، Fazilati2001@yahoo.com

۳- مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

چکیده

مدل‌های متنوعی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (MCDM) برای حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری پیشنهاد شده است. کاربردهای فراوانی به‌ویژه در حوزه مهندسی عمران محقق شده است. به‌منظور تحلیل پیشرفت‌های اخیر در روش‌های MCDM فازی و کاربردهای آن‌ها در مهندسی عمران، و همچنین کاوش بیشتر جهت‌گیری‌های پژوهشی آتی، این پژوهش یک بررسی در وضعیت موجود انجام می‌دهد که در آن مقالات منتشرشده در مجلات علمی، با تمرکز بر کاربرد مدل‌های MCDM فازی در مهندسی عمران طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵، مورد مرور قرار گرفته‌اند. این مقالات به‌ترتیب بر اساس مسائل پژوهشی و روش‌های پژوهشی طبقه‌بندی شده‌اند. از طریق مرور ادبیات، یافته‌هایی در خصوص مسئله تصمیم‌گیری، پرکاربردترین معیار ارزیابی، و محبوب‌ترین مدل MCDM فازی به‌دست آمده است. علاوه بر این، چهار جنبه از چالش‌های پژوهشی و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده مرتبط در حوزه مهندسی عمران ارائه شده است که می‌تواند برای پژوهشگران و متخصصان در تحقیقات آتی مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: مهندسی عمران، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مجموعه فازی، تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی

۱- مقدمه

مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در حوزه مهندسی عمران به دلیل وجود تعداد زیادی معیار ارزیابی و ماهیت تعارض میان معیارهای مختلف پیچیده هستند، مانند تعارض بین کیفیت بالا و هزینه پایین. روش‌های MCDM ابزارهای مفیدی برای حل مسائل تصمیم‌گیری در حوزه مهندسی عمران شناخته شده‌اند [۱]. نظریه مجموعه‌های فازی (زاده، ۱۹۶۵) یک نظریه ریاضی برای نشان دادن فازی بودن موجود در سیستم‌های پیچیده است. به دلیل فازی بودن و عدم قطعیت ترجیحات انسانی نسبت به موضوعات ارزیابی (بلمن و زاده، ۱۹۷۰) نظریه مجموعه‌های فازی را برای حل مسائل تصمیم‌گیری معرفی کردند. از آن پس، بسیاری از روش‌های MCDM به محیط فازی وارد شدند تا مسائل تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف را حل کنند که مهندسی عمران نیز از این قاعده مستثنی نیست. در سال‌های اخیر، مدل‌های مختلف MCDM فازی برای حل مسائل پیچیده MCDM در حوزه مهندسی عمران بهبود یافته‌اند [۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸].

اگرچه مدل‌های متنوعی از MCDM فازی برای حل مسائل مهندسی عمران به کار گرفته شده‌اند، اما مرورهای ادبیاتی اندکی بر این مقالات وجود دارد [۹]. مقالات ژورنالی مربوط به تصمیم‌گیری پایدار در مهندسی عمران، ساخت‌وساز و فناوری ساختمان از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ را مرور کردند. برخلاف مرور تصمیم‌گیری پایدار، این مقاله بر انجام یک بررسی وضعیت موجود از کاربردهای اخیر روش‌های MCDM فازی در مهندسی عمران و کاوش بیشتر جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده تمرکز دارد.

استراتژی جستجوی ما تنظیم کلیدواژه «civil engineering» در پایگاه داده Web of Science و سپس استفاده از کلیدواژه «fuzzy decision-making» برای پالایش بیشتر نتایج جستجو بود. در دی ۱۴۰۴ (دسامبر ۲۰۲۵)، ۱۵۲ رکورد جستجو از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ به دست آوردیم. از میان این ۱۵۲ انتشار، بسیاری با موضوع تحقیق این مقاله همخوانی نداشتند. برخی مقالات تنها به مهندسی عمران مربوط بودند، برخی تنها از نظریه مجموعه فازی استفاده کرده بودند و برخی تنها از روش MCDM بهره برده بودند. در نتیجه، ۶۰ مقاله مرتبط را که همزمان بر روش‌های MCDM فازی و کاربردهای آن‌ها در مهندسی عمران تمرکز داشتند، با دقت از نتایج جستجو انتخاب کردیم تا مرور شوند. در این مقاله، به مرور این مقالات ژورنالی منتشرشده در مورد کاربرد مدل‌های MCDM فازی در مهندسی عمران اختصاص داریم.

این ادبیات را بر اساس مسائل تصمیم‌گیری در مهندسی عمران و معیارهای مرتبط با این مسائل تصمیم‌گیری طبقه‌بندی کردیم و مدل‌های MCDM فازی به‌کاررفته در این ادبیات را به مدل‌های MCDM فازی فردی و مدل‌های MCDM فازی ترکیبی تقسیم نمودیم. از طریق مرور ادبیات و تحلیل آماری، برخی یافته‌ها در خصوص پربسامدترین مسئله تصمیم‌گیری، پرکاربردترین معیار ارزیابی و محبوب‌ترین مدل MCDM فازی به دست آوردیم. علاوه بر این، چهار جنبه از چالش‌های پژوهشی و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده مرتبط در حوزه مهندسی عمران ارائه می‌شود که ممکن است برای پژوهشگران و متخصصان در تحقیقات بیشتر مفید باشد.

۲- طبقه‌بندی مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره در مهندسی عمران

(کاظمیان و همکاران، ۲۰۲۵) روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به‌طور گسترده برای ارزیابی گزینه‌ها با معیارهای متعدد و اغلب متعارض در زمینه‌های مختلف به کار گرفته می‌شوند. گسترش‌های فازی شهودی این روش‌ها کیفیت تصمیم‌گیری را با در نظر گرفتن مؤثرتر عدم قطعیت و تردید بهبود می‌بخشند [۱۰]. تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به طراحی مدل‌های ریاضی برای حمایت از ارزیابی‌های ذهنی تصمیم‌گیرندگان نسبت به گزینه‌ها تحت معیارهای متعدد اشاره دارد [۱۱]. مسائل MCDM نوعی از مسائل تصمیم‌گیری هستند که در آن‌ها باید گزینه بهینه از میان مجموعه‌ای از گزینه‌ها پیدا شود یا گزینه‌های ممکن با توجه به معیارهای متعدد غیرقابل مقایسه که ممکن است با یکدیگر تعارض داشته باشند، رتبه‌بندی شوند. بر اساس نوع اطلاعات ارزیابی موجود برای گزینه‌ها، مسائل MCDM به دو دسته تقسیم می‌شوند: مسائل چندمعیاره با گزینه‌های گسسته و مسائل بهینه‌سازی چندمعیاره [۱۲]. اطلاعات ارزیابی در دسته اول معمولاً عملکرد هر گزینه تحت معیارهای

مختلف است، در حالی که در دسته دوم معمولاً ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها تحت هر معیار است. دسته دوم معمولاً گزینه‌های بیشتر و منابع محاسباتی بیشتری نسبت به دسته اول دارد [۱۲]. روش‌های MCDM متناظر برای حل این دو نوع مسئله نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند: یکی مبتنی بر مقادیر سودمندی مانند TOPSIS (تکنیک ترجیح ترتیب بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل)، VIKOR (به معنای بهینه‌سازی و راه‌حل سازشی چندمعیاره به زبان صربی)، و WSM (مدل جمع وزنی)، و دیگری مبتنی بر مقایسه‌های زوجی مانند AHP (فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی)، ANP (فرایند شبکه تحلیلی)، و PROMETHEE (روش سازمان‌دهی رتبه‌بندی ترجیحات برای غنی‌سازی ارزیابی‌ها) [۱۳].

انواع مختلفی از مسائل MCDM در حوزه مهندسی عمران وجود دارد. پس از یک غربالگری اولیه، این مسائل عملی MCDM در مهندسی عمران را به دسته‌های انتخاب پروژه ساختمانی، انتخاب پیمانکار/تأمین‌کننده، انتخاب پرسنل، انتخاب مواد، انتخاب فناوری، انتخاب مکان، ارزیابی ریسک، انتخاب استراتژی و سایر موارد طبقه‌بندی کردیم. مسائل خاص و معیارهای ارزیابی مربوطه به شرح زیر خلاصه شده است.

۲-۱- انتخاب پروژه ساختمانی

(شیاو و ژانگ، ۲۰۱۶) پروژه‌های عمومی مهندسی عمران را انتخاب کردند و معیارها شامل هزینه ساخت، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه حیات برای عموم مردم بود [۱۴]. (اوسی-کیئی و چان، ۲۰۱۷) سطوح موفقیت پروژه‌های مشارکت عمومی-خصوصی را تخمین زدند و معیارهای تخمین شامل هزینه و مشخصات فنی، سود، مدیریت ریسک مؤثر، عملیات خدمات قابل اطمینان و با کیفیت، کاهش دعاوی حقوقی و اختلافات، عملکرد زیست‌محیطی و توسعه اقتصادی محلی بود [۱۵]. (داهویی و همکاران، ۲۰۱۸) پروژه‌های حفاری چاه نفت و گاز را بر اساس معیارهای ارزیابی شامل منابع انسانی، برنامه‌ریزی، کیفیت، مواد و تجهیزات، تعداد چاه‌های برنامه‌ریزی شده و تعداد چاه‌های حفاری شده انتخاب کردند [۱۶]. (اوتاما و همکاران، ۲۰۱۹) پروژه‌های ساختمانی بین‌المللی را ارزیابی کردند و معیارهای اصلی شامل پروژه، مشتری، قرارداد، کسب‌وکار و کشور میزبان بود [۱۷].

۲-۲- انتخاب پیمانکار/تأمین‌کننده

(افراسیابی و همکاران، ۲۰۲۲) رسمی‌سازی و حل مسائل انتخاب تأمین‌کننده (SSPs) بر اساس شاخص‌های پایدار (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) به ابزاری اساسی برای انجام تحلیل استراتژیک کل فرایند زنجیره تأمین و حداکثرسازی مزیت رقابتی شرکت‌ها تبدیل شده است. در دهه گذشته، مسائل پایداری اغلب همراه با شاخص‌های تاب‌آوری در نظر گرفته شده‌اند که به مطالعه مسائل انتخاب تأمین‌کننده پایدار-تاب‌آور (SRSSPs) منجر گردیده است. تحقیقات فعلی در زمینه توسعه پایدار، به‌ویژه با توجه به تأثیر شدید پاندمی اخیر کووید-۱۹ بر زنجیره‌های تأمین، توجه فزاینده‌ای به مفهوم تاب‌آوری و نقش آن در مسائل SSPs معطوف کرده است. ابتدا از روش بهترین-بدترین فازی برای تعیین وزن اهمیت معیارهای انتخاب استفاده می‌شود. سپس از ترکیب تحلیل روابط خاکستری و روش تکنیک ترجیح ترتیب بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) برای ارزیابی تأمین‌کنندگان در محیط فازی بهره برده می‌شود. اعداد فازی مثلثی (TFNs) برای بیان وزن معیارها و گزینه‌ها به کار گرفته می‌شوند تا ابهام و عدم قطعیت ذاتی ارزیابی‌های ذهنی را در نظر بگیرند. با این حال، روش پیشنهادی به‌راحتی می‌تواند به سایر تنظیمات فازی بسته به عدم قطعیتی که مدیران و تصمیم‌گیرندگان با آن مواجه هستند، گسترش یابد. یک کاربرد واقعی برای نشان دادن قابلیت اعمال و کارایی مدل پیشنهادی ارائه شده است. شانزده معیار ارزیابی شناسایی و به دسته‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی یا تاب‌آوری طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه موردی نشان می‌دهد که «کنترل آلودگی»، «سیستم مدیریت زیست‌محیطی» و «آگاهی از ریسک» تأثیرگذارترین معیارها در مطالعه SRSSPs مرتبط با صنعت تولید هستند. در نهایت، سه روش مختلف تحلیل حساسیت برای اعتبارسنجی استحکام چارچوب پیشنهادی اعمال شده است، یعنی تغییر وزن معیارها، مقایسه نتایج با نتایج روش‌های رایج دیگر MCDM فازی، و تغییر اجزای ماتریس تصمیم اصلی [۱۸]. (کشاوری-غریابی و همکاران، ۲۰۱۸) پیمانکاران فرعی را برای بهبود کیفیت پروژه‌های ساختمانی بر اساس معیارهای ارزیابی مانند قابلیت اطمینان، توانایی کنترل زمان‌بندی، توانایی مدیریت و کیفیت نیروی کار ارزیابی و انتخاب کردند [۱۹].

(مهمادو و همکاران، ۲۰۱۹) سازمان‌های دارای قابلیت مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در پروژه‌های ساختمانی را انتخاب کردند و معیارها شامل هزینه، ساختار سازمانی، تجربه سازمان، آمادگی فناوری، شهرت، روش پیشنهادی، ظرفیت مدل‌سازی خاص، منابع فنی، ظرفیت اداری و استراتژیک، تجربه و صلاحیت کارکنان بود [۲۰].

۲-۳- انتخاب پرسنل / نیروی کار

(افشاری، ۲۰۱۷) مدیر پروژه ساختمانی را با توجه به معیارهایی شامل تجربه گذشته، تحصیلات، مهارت‌های ارتباطی، مهارت‌های کامپیوتری، مهارت‌های مدیریت زمان، مهارت‌های مدیریت هزینه، مهارت‌های مدیریت منابع، مهارت‌های مدیریت کیفیت، مهارت‌های برنامه‌ریزی، مهارت‌های سازماندهی، مهارت‌های کنترل، حل مسئله، تصمیم‌گیری و توسعه تیم انتخاب کرد [۲۱]. (وو و همکاران، ۲۰۱۸) عملکرد مهندسان عمران در محیط ساخت‌وساز را اندازه‌گیری کردند و معیارهای شناسایی‌شده شامل مهارت‌های اجرای کار، مهارت‌های همکاری، مهارت‌های ارتباطی، مهارت‌های برنامه‌ریزی و سطح دانش است [۲۲].

۲-۴- انتخاب مواد

(حسینی و همکاران، ۲۰۱۶) بهترین دیوار خارجی را برای بازسازی ساختمان در مناطق زلزله‌خیز انتخاب کردند و معیارهای مورد استفاده آن‌ها شامل پتانسیل پاکسازی آوار، پیچیدگی ساخت، سرعت ساخت، هزینه عملکرد و پتانسیل مقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای بود [۲۳]. (جاتو-اسپینو و همکاران، ۲۰۱۸) مواد تشکیل‌دهنده لایه رویه در جاده‌های پرتراфик را انتخاب کردند و معیارهای تصمیم‌گیری شامل مقاومت مکانیکی، ایمنی، راحتی، انتشارات، مصرف‌ها، کارایی منابع و هزینه‌ها بود [۲۴]. (حافظ‌الکوتوب و همکاران، ۲۰۲۰) انتخاب مهندسی موتورهای خودروهای هیبریدی را بررسی کردند و معیارهای مورد نظر شامل انتشار اکسیدهای نیتروژن، انتشار کل هیدروکربن‌ها، انتشار مونوکسید کربن، شاخص ایجاد شغل، صندوق خارجی مورد نیاز نسبی، قیمت نسبی، شاخص دوام و نگهداری، مصرف سوخت، گشتاور نهایی ترکیبی و قدرت نهایی ترکیبی بود [۲۵].

۲-۵- انتخاب نوع فناوری

(جانگ و همکاران، ۲۰۱۸) فناوری‌های سبز مرتبط با زیرساخت‌های شهری را در مراحل اولیه چرخه حیات پروژه ارزیابی کردند و معیارهای ارزیابی شامل هزینه اضافی ساخت، هزینه اولیه ساخت، نرخ بهره‌برداری از کاهش تجهیزات ساختمانی، نرخ بهره‌برداری از مواد بازیافتی، نرخ بهره‌برداری از مواد ساختمانی دوستدار محیط زیست، نرخ کاهش انتشارات، عامل موفقیت پروژه ساختمانی و سطح سرمایه انسانی بود [۲۶]. (عیسی و همکاران، ۲۰۱۹) بهترین تکنیک نقشه‌برداری را برای پروژه‌های انرژی خورشیدی انتخاب کردند و پنج معیار شناسایی‌شده شامل صرفه‌جویی در هزینه‌ها، سهولت استفاده، نرخ ثبت داده، قابلیت کاربرد و کیفیت داده‌ها بود [۲۷].

۲-۶- انتخاب مکان

(بوستانی و همکاران، ۲۰۱۸) سایت بهینه برای ساخت پناهگاه‌های موقت را انتخاب کردند و معیارهای شناسایی‌شده شامل پایداری سیاسی، جنبه‌های زیست‌محیطی، جنبه‌های اجتماعی، عوامل اقتصادی، دسترسی به منابع انرژی، دسترسی به شبکه‌های ارتباطی، مراکز و سایر مراکز خدماتی، نزدیکی به توزیع امداد، نزدیکی به مناطق آسیب‌دیده، امکانات مخابراتی، مناسب بودن زمین و امکانات زیرساختی بود [۲۸]. (حسینه و همکاران، ۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی هدف چندانتخابی فازی-زنی-اضافی برای انتخاب سایت مناسب انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد کردند و معیارهای مورد نظر شامل پذیرش اجتماعی، توپوگرافی و تولید انرژی زیرساختی و هزینه واحد انرژی بود [۲۹].

۲-۷- ارزیابی ریسک

(ساتاپاتی و همکاران ۲۰۱۸) عامل ریسک اختلالات فیزیکی کارگران ساختمانی را برای بهبود وضعیت سلامت کارگران تحلیل کردند و معیارهای ارزیابی عمدتاً به حرکت بدن و اجزای بدن تقسیم می‌شود [۳۰]. (یو و همکاران ۲۰۱۸) عوامل ریسک در پروژه‌های مشارکت عمومی-خصوصی فراملی را ارزیابی کردند و چهار دسته ارزیابی ریسک شامل ریسک شراکت، ریسک فنی و طبیعی، ریسک قانونی و اجتماعی-سیاسی و ریسک مالی و تجاری بود [۳۱]. (چاترجی و همکاران ۲۰۱۸) ریسک پروژه‌های ساختمانی را ارزیابی کردند و معیارهای ریسک شامل ناپایداری سیاسی، ریسک اقتصادی، ریسک اجتماعی، ریسک فناوری، ریسک کیفیت کار، ریسک زمان و هزینه، ریسک منابع، ریسک اسناد و اطلاعات و ریسک ذی‌نفعان بود [۳۲]. (زلفقاری و موسوی ۲۰۱۸) ریسک‌ها را در چرخه حیات اجرای پروژه‌های ساخت بزرگراه اولویت‌بندی کردند و معیارهای مورد نظر شامل شدت تشخیص، شدت شدت و وقوع بود [۳۳]. (مظهر و همکاران ۲۰۱۸) ریسک‌های پروژه‌های مشارکت عمومی-خصوصی زیرساخت‌های برق و حمل‌ونقل را ارزیابی کردند و عوامل ریسک بحرانی شامل برنامه‌ریزی و اجرای پروژه، درآمد پروژه، تأمین مالی پروژه، بلوغ بخش عمومی، پایداری سیاسی، اقتصاد کشور و دخالت دولت بود [۳۴]. (ایلپهار و همکاران ۲۰۱۸) ریسک‌های حفاری محوطه ساختمانی را ارزیابی کردند و معیارهای ارزیابی عمدتاً از پنج جنبه مدیریت محوطه ساختمانی، تجهیزات سنگین، رفتارهای ناامن، مدیریت کارکنان و عوامل زیست‌محیطی بود [۳۵]. (رضاخانی و مغیار ۲۰۱۹) درجه مدت فعالیت‌های ریسکی را در یک پروژه پل شبیه‌سازی شده تخمین زدند و معیارهای مورد نظر شامل تدارکات، کیفیت، هزینه و زمان‌بندی بود [۳۶].

۲-۸- انتخاب استراتژی

(ابراهیمی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۸) روش ساخت مناسب را برای عناصر مختلف ساختمانی انتخاب کردند و معیارهای تصمیم‌گیری شامل زمان، هزینه، کیفیت، انتشار دی‌اکسید کربن، محدودیت‌های قانونی، سرمایه اولیه مورد نیاز و قابلیت طراحی بود [۳۷]. (امینی و همکاران ۲۰۱۸) طرح‌های ساختمانی با پایداری و تاب‌آوری را انتخاب کردند و معیارهای مورد نظر شامل شکل‌پذیری، بادبرده، امتیازات رهبری در طراحی انرژی و محیط زیست، تحلیل چرخه حیات، دریافت طبقات، تحلیل امان محدود شکنندگی، استفاده از مواد و انرژی نهفته بود [۳۸]. (سونگ و همکاران ۲۰۱۸) بهترین چیدمان تأسیسات موقت ساختمانی را از دیدگاه حداقل‌سازی تعارض جهانی انتخاب کردند و معیارهای تخمین شامل تأثیرات زیست‌محیطی، کیفیت، مدت و هزینه بود [۳۹]. (یون و چا ۲۰۱۸) الگوریتم سیستماتیک برای ارائه استراتژی مدیریت بهینه تأسیسات برای ساخت‌های اداری تجاری پیشنهاد کردند و معیارهای بحرانی شامل ارتقای شایستگی کارکنان، امنیت مستأجر، تجهیزات و تأسیسات به‌روز، کفایت و مناسب‌بودن اجزای جایگزین، کنترل اجرای کار، قابلیت اطمینان خدمات، پاسخگویی به‌موقع، کیفیت خدمات، رضایت مشتری و مدیریت هزینه بود [۴۰]. (وانگ و پیائو ۲۰۱۹) استراتژی‌های نگهداری تجهیزات تک را انتخاب کردند و اولویت نگهداری اجزای تجهیزات را در مرحله اولیه عملیات تعیین کردند و استراتژی‌های نگهداری اصلی شامل قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری، اقتصادی و قابلیت تشخیص بود [۴۱].

۲-۹- سایر مسائل

(هو و همکاران ۲۰۲۴) پژوهشی یک مطالعه جامع در مورد بهینه‌سازی عوامل کلیدی هوش مصنوعی (AI) مؤثر بر مدیریت هزینه در پروژه‌های مهندسی عمران با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) ارائه می‌دهد. مسئله اصلی، نیاز به مدیریت مؤثر هزینه‌ها در پروژه‌های پیچیده عمرانی با ادغام فزاینده فناوری‌های AI است. روش‌شناسی شامل استفاده از سه ابزار MCDM یعنی دلفی، مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) و MICMAC است. در مجموع ۱۷ عامل AI شناسایی و به هشت گروه گسترده طبقه‌بندی شده‌اند. با اعمال تکنیک‌های MICMAC مختلف، اهمیت نسبی و روابط متقابل این عوامل تعیین گردید. یافته‌های کلیدی نقش حیاتی عواملی مانند کاهش ریسک و اجزای هزینه را در بهینه‌سازی فرآیند مدیریت هزینه نشان می‌دهد. همچنین، ساختار سلسله‌مراتبی حاصل از ISM و عوامل تأثیرگذار شناسایی شده توسط MICMAC، بینش‌هایی برای اولویت‌بندی مداخلات استراتژیک فراهم می‌کند. پیامدهای این مطالعه، راهنمایی تصمیم‌گیرندگان حوزه مهندسی

عمران برای بهره‌برداری مؤثر از AI در مدیریت هزینه است. با اتخاذ رویکرد MCDM سیستماتیک، ذی‌نفعان می‌توانند نتایج پروژه را بهبود بخشند، تخصیص منابع را بهینه کنند و ریسک‌های مالی را کاهش دهند [۴۲]. (مقصودی و خلیل‌زاده، ۲۰۱۷) بحرانی‌ترین عامل موفقیت پروژه‌های ساختمانی را برای جلوگیری از هزینه احتمالی شکست پروژه برای توسعه اقتصادی و صنعتی شناسایی کردند و معیارهای اصلی مورد استفاده آن‌ها شامل کیفیت، هزینه، زمان و ایمنی بود [۴۳]. (گالنده-هراندز و همکاران، ۲۰۱۸) رتبه‌بندی توده سنگ را قبل از حفاری تونل برای حمایت از ساخت تونل بر اساس داده‌های نظارت حین حفاری ارزیابی کردند و معیارها شامل زمان، فشار آب، جریان آب، فشار چرخش، سرعت چرخش، فشار دمپر، فشار تغذیه، فشار چکش، نرخ نفوذ و عمق سوراخ بود [۴۴]. (علیرضا و ابیمبولا، ۲۰۱۹) رویدادهای نامطمئن با بیشترین تأثیر بر دوره ساخت پروژه‌های ساخت بزرگراه را ارزیابی کردند و معیارها شامل عوامل فنی، اجتماعی، سیاسی، قانونی، مالی، زیست‌محیطی و اقتصادی بود [۴۵].

۳- طبقه‌بندی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای حل مسائل مهندسی عمران

مدل‌های متنوعی از MCDM فازی برای حل مسائل تصمیم‌گیری در حوزه مهندسی عمران ارائه شده است. بر اساس تعداد روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده، این مدل‌ها به مدل‌های MCDM فازی فردی و مدل‌های MCDM فازی ترکیبی تقسیم می‌شوند.

۳-۱- AHP فازی

(ساتاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸) از روش AHP فازی برای تحلیل اختلالات فیزیکی کارگران ساختمانی استفاده کردند. آن‌ها از مجموعه‌های فازی برای بیان اطلاعات ارزیابی انواع مختلف کارگران ساختمانی بهره بردند و روش AHP فازی را برای استنتاج وزن هر معیار به کار گرفتند تا رتبه‌بندی تأثیر هر معیار ارزیابی بر اختلالات عضلانی-اسکلتی کارگران به دست آید [۳۰]. (وو و همکاران، ۲۰۱۸) از روش AHP مبتنی بر منطق فازی برای شناسایی عوامل بحرانی در اندازه‌گیری عملکرد مهندسان عمران در محیط ساخت‌وساز استفاده کردند. اطلاعات ارزیابی از طریق مقایسه‌های زوجی نیمه‌کیفی بیان شد. در فرآیند استنتاج وزن عوامل عملکرد با روش AHP فازی، از منطق فازی برای تبدیل وزن‌های فازی به دست‌آمده به وزن‌های کریسپ استفاده شد [۲۲]. (نیونگسا و همکاران، ۲۰۱۷) مسئله ارزیابی و انتخاب شریک enterprise مجازی مرتبط با پروژه ساختمانی را بر اساس روش AHP فازی حل کردند. روش AHP برای پردازش اطلاعات قضاوت قطعی استفاده شد و روش AHP فازی گروهی کاهش‌یافته برای پردازش اطلاعات قضاوت نامطمئن به کار رفت. نتایج نشان داد که روش AHP فازی گروهی کاهش‌یافته پیشنهادی، نقص روش AHP کلاسیک در تحلیل داده‌های غیردقیق را برطرف می‌کند و برخلاف AHP فازی، نیاز به مراحل زیادی برای رسیدن به نتیجه نهایی ندارد [۴۶]. (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶) بهترین دیوار خارجی را برای بازسازی ساختمان در مناطق زلزله‌خیز بر اساس روش AHP و منطق فازی انتخاب کردند. روش AHP برای استنتاج وزن معیارها استفاده شد و وزن هر گزینه تحت هر معیار به دست آمد. منطق فازی برای خروجی تابع عضویت هر گزینه از چهار بخش (فازی‌سازی، تداخل، پایگاه قواعد و دیفازی‌سازی) به کار گرفته شد [۲۳].

۳-۲- ANP فازی

(الچناتی و همکاران، ۲۰۱۶) به ترتیب از روش‌های AHP، ANP و ANP فازی برای ارزیابی عملکرد خطوط لوله آب استفاده کردند. این چهار روش به‌طور جداگانه برای به‌دست آوردن وزن هر معیار ارزیابی اعمال شدند. نتایج نشان داد که روش ANP فازی، تعاملات میان معیارها و عدم قطعیت اطلاعات ارزیابی را در نظر می‌گیرد و دقیق‌ترین روش میان چهار روش بود [۴۷].

۳-۳- AHP فازی شهودی (Intuitionistic fuzzy AHP)

(یو و همکاران ۲۰۲۲) از روش AHP فازی شهودی برای شناسایی و ارزیابی عوامل ریسک در پروژه‌های مشارکت عمومی-خصوصی فراملی استفاده کردند. مجموعه‌های فازی شهودی برای ارزیابی احتمال وقوع و شدت عوامل ریسک به کار گرفته شد که ابهام قضاوت‌ها را مدیریت کرده و دقت ارزیابی را بهبود بخشید. روش AHP فازی شهودی برای تعیین درجه اهمیت عوامل ریسک و رتبه‌بندی آن‌ها استفاده شد [۳۱].

۳-۴- AHP فازی پیتاگورسی (Pythagorean fuzzy AHP)

(ایلپهار و همکاران ۲۰۱۸) ریسک‌های حفاری محوطه ساختمانی را با روش AHP فازی پیتاگورسی فاصله‌دار ارزیابی کردند. استفاده از اصطلاحات زبانی و مجموعه‌های فازی پیتاگورسی، آزادی زیادی به کارشناسان برای بیان شناخت‌شان فراهم کرد. روش AHP فازی پیتاگورسی فاصله‌دار همراه با سیستم استنتاج فازی و روش Fine Kinney، به انجام ارزیابی ریسک دقیق کمک می‌کند [۳۵].

۳-۵- مدل ابری فازی (Fuzzy cloud model)

(مارتین و همکاران ۲۰۱۷) یک مدل ابری نرمال رو به جلو با تابع عضویت توزیع نرمال برای انتخاب روش‌های تحویل پروژه ساختمانی برقرار کردند. این مدل گزینه‌ها را بر اساس ترجیحات چندین تصمیم‌گیرنده رتبه‌بندی می‌کند که به کاهش تعارضات میان تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند و نسبت به روش AHP فاصله‌ای در فازی بودن و تصادفی بودن انعطاف‌پذیرتر است [۴۸].

۳-۶- PROMETHEE فازی

(چن و پان ۲۰۱۶) از روش PROMETHEE فازی متغیر برای انتخاب بهترین اقدام ساختمان کم‌کربن استفاده کردند. فرآیند تصمیم‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به عنوان ابزار کمکی برای تجسم و هماهنگی ساخت بهره برد و تخصیص وزن پویا بر اساس اهمیت نسبی معیارها و درجه تأثیر بر معیارها انجام شد. روش PROMETHEE فازی برای تعیین درجه ترجیح یک اقدام بر دیگری تحت هر معیار با شش تابع ترجیح به کار گرفته شد [۴۹].

۳-۷- SAW فازی (Fuzzy SAW)

(افشاری ۲۰۱۷) مدیران پروژه ساختمانی را بر اساس روش SAW فازی (جمع وزنی ساده) انتخاب کرد. ابتدا با مرور ادبیات معیارها جمع‌آوری شدند و از روش دلفی برای شناسایی معیارهای ارزیابی استفاده شد. اصطلاحات زبانی فازی برای ارزیابی عملکرد نامزدها به کار رفت. سپس روش SAW فازی برای تجمیع عملکرد نامزدها و به‌دست آوردن رتبه‌بندی آن‌ها اعمال گردید [۲۱].

۳-۸- WSM فازی (Fuzzy WSM)

(ابراهیمی‌نژاد و همکاران ۱۳۹۹) روش ساخت مناسب را بر اساس روش WSM فازی انتخاب کردند. نویسندگان از اعداد فازی مثلثی برای ثبت عدم قطعیت و فازی‌بودن دانش کارشناسان برای هر روش ساخت استفاده کردند. تابع عضویت برای هر معیار برقرار شد تا مقادیر عملکرد روش‌های ساخت به دست آید. روش WSM برای تجمیع مقادیر عملکرد و رتبه‌بندی روش‌های ساخت اعمال شد [۳۷].

۳-۹- TOPSIS فازی (Fuzzy TOPSIS)

(لیانگ و همکاران ۲۰۱۷) از روش TOPSIS فازی برای انتخاب بهترین مسیر پل در پروژه زیرساختی بزرگ‌مقیاس استفاده کردند. نویسندگان هم معیارهای فردی و هم معیارهای مشارکتی را برای ارزیابی گزینه‌ها در نظر گرفتند و از مقیاس‌های زبانی متفاوت برای دو نوع معیار بهره بردند.

روش TOPSIS فازی همراه با وزن‌های معیارهای داده‌شده توسط کارشناسان برای رتبه‌بندی گزینه‌ها ترکیب شد [۵۰]. (مهامادو و همکاران ۲۰۱۹) قابلیت‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان سازمان‌ها در پروژه‌های ساختمانی را با روش TOPSIS فازی ارزیابی کردند. معیارهای ارزیابی با روش دلفی شناسایی شدند و وزن معیارها از طریق نظرسنجی تولید شد. عدد فازی مثلی برای پردازش اطلاعات ارزیابی زبانی استفاده شد و روش TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی سازمان‌ها اعمال گردید [۵۱].

۳-۱۰- TOPSIS فازی شهودی (Intuitionistic fuzzy TOPSIS)

(سونگ و همکاران ۲۰۱۸) روش TOPSIS فازی شهودی را برای انتخاب بهترین چیدمان تأسیسات موقت ساختمانی از دیدگاه حداقل‌سازی تعارض جهانی معرفی کردند. نویسندگان چارچوبی مبتنی بر حداقل‌سازی تعارض چنددلی‌نفعی پیشنهاد کردند تا تعارضات میان برنامه‌ریز چیدمان تأسیسات و سایر ذی‌نفعان را حداقل کند. روش حذف برای حذف گزینه‌های غیرقابل اجرا اجرا شد. روش TOPSIS فازی شهودی برای به‌دست آوردن راه‌حل متعادل استفاده شد [۳۹].

۳-۱۱- روش ارزیابی ترکیبی فازی (Fuzzy synthetic evaluation method)

(اووسو و همکاران ۲۰۲۰) بحرانی‌ترین بی‌نظمی تدارکات در زنجیره تأمین پروژه ساختمانی را بر اساس روش ارزیابی ترکیبی فازی شناسایی کردند. نظرسنجی و روش گلوله‌برفی برای جمع‌آوری فهرست معیارها انجام شد و تحلیل شاخص میانگین برای تولید اهمیت نسبی معیارها استفاده گردید. ماتریس ارزیابی فازی با تابع عضویت و تابع وزنی تشکیل شد. شاخص بحرانی کلی برای تعیین بحرانی‌ترین بی‌نظمی‌ها محاسبه شد [۵۲].

۳-۱۲- برنامه‌ریزی فازی (Fuzzy programming)

(حسینه و همکاران ۲۰۲۲) یک مدل برنامه‌ریزی هدف چندانتخابی فازی وزنی-اضافی برای انتخاب سایت مناسب انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد کردند. نویسندگان تابع هدفی برای حداقل کردن مجموع وزنی انحرافات نرمال‌شده ارائه کردند تا مدل بتواند از هر فرآیند حداقل‌سازی هر متغیر برنامه‌ریزی هدف استفاده کند. به دلیل عدم قطعیت مسئله MCDM، نویسندگان از توابع عضویت برای بیان فازی بودن در مدل بهره بردند [۲۹].

۳-۱۳- روش EDAS فازی (Fuzzy EDAS method)

(کشاورز-غربایی و همکاران ۲۰۱۸) یک رویکرد MCDM گروهی پویا فازی را برای ارزیابی پیمانکاران فرعی به منظور بهبود کیفیت پروژه‌های ساختمانی معرفی کردند. این رویکرد عملکرد کلی گزینه‌ها را بر اساس روش EDAS فازی پویا (ارزیابی مبتنی بر فاصله از راه‌حل میانگین) تعیین می‌کند. در این رویکرد، مجموعه تصمیم‌گیرندگان، گزینه‌ها و معیارها می‌توانند در دوره‌های زمانی مختلف تغییر کنند [۱۹].

۳-۱۴- مدل ANFIS

(اوتاما و همکاران ۲۰۱۹) یک مدل ANFIS (سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی) را برای ارزیابی پروژه‌های ساختمانی بین‌المللی معرفی کردند. این مدل بر پایه تکنیک‌های منطق فازی و ANN (شبکه عصبی مصنوعی) بود و از روش دلفی برای جمع‌آوری معیارهای ارزیابی ارائه‌شده توسط کارشناسان استفاده شد. خطای میانگین مربعات ریشه و ضریب همبستگی برای اندازه‌گیری عملکرد مدل ANFIS به کار گرفته شد [۱۷]. همزمان، (علیرضا و ابیمبولا ۲۰۱۹) از مدل ANFIS برای تخمین رویداد نامطمئن با بیشترین تأثیر بر دوره ساخت پروژه‌های ساخت بزرگراه استفاده کردند. این روش با روش ماتریس اندازه ترکیب شد تا شناخت انسانی را یاد بگیرد، مدل‌سازی کند و پیش‌بینی نماید که می‌تواند تأثیر رویدادهای نامطمئن را به‌طور دقیق ارزیابی و پیش‌بینی کند [۴۵].

۳-۱۵- روش تجمیع فازی (Fuzzy aggregation method):

علاوه بر روش‌های MCDM فوق، چندین مقاله از عملگرهای تجمیع فازی برای حل مسائل MCDM در حوزه مهندسی عمران استفاده کرده‌اند. (شیاو و ژانگ، ۲۰۱۶) مسئله انتخاب پروژه عمومی مهندسی عمران را با یک عملگر فاصله میانگین وزنی مرتب‌شده زبانی شهودی القایی حل کردند که ویژگی نگرش تصمیم‌گیرنده را در نظر می‌گیرد [۱۴]. (رضوی‌علاوی و ابوریزک، ۲۰۱۷) مطلوب‌ترین برنامه‌ریزی چیدمان سایت را بر اساس یک تابع فاصله وزنی برای پروژه‌های ساختمانی انتخاب کردند [۵۳].

۴- مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی ترکیبی

(وی چن و همکاران، ۲۰۲۵) انتخاب مواد پایدار برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، مصرف منابع و انرژی در ساخت‌وساز ضروری است. ما یک مدل ترکیبی fuzzy AHP-TOPSIS برای ارزیابی و رتبه‌بندی چهار گزینه ماده بر اساس نه معیار پایداری در سه بعد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی پیشنهاد می‌کنیم. روش fuzzy AHP وزن معیارها را بر اساس قضاوت کارشناسان تعیین می‌کند و TOPSIS مواد را بر اساس نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل پایدار رتبه‌بندی می‌نماید. نتایج نشان داد که بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی (GPC) رتبه اول را کسب کرد (به دلیل ردپای کربن پایین و قابلیت بازیافت بالا)، پس از آن چوب لایه‌ای متقاطع (CLT)، بتن هوادهی اتوکلاو (AAC) و بتن بازیافتی (RCA) ب قرار گرفتند. تحلیل حساسیت استحکام رتبه‌بندی‌ها را تأیید کرد و مدل را برای اولویت‌های پایداری مختلف سازگار نشان داد. با این حال، قضاوت کارشناسان subjectivity ایجاد می‌کند و ادغام داده‌های واقعی‌زمان پایداری (مانند انتشارات چرخه حیات و دسترسی منابع) می‌تواند دقت تصمیم‌گیری را افزایش دهد. این مدل ترکیبی چارچوبی ساخت‌یافته، شفاف و سازگار برای انتخاب مواد پایدار در ساختمان‌های سبز فراهم می‌کند و شفافیت در وزن‌دهی، رتبه‌بندی و روش انتخاب کلی را تضمین می‌نماید [۵۴]. (عیسی و همکاران، ۲۰۱۹) روش AHP را با TOPSIS فازی ترکیب کردند تا بهترین تکنیک نقشه‌برداری برای پروژه‌های انرژی خورشیدی انتخاب شود. روش AHP برای پردازش داده‌های دقیق، کیفی و کمی و تولید وزن‌های نسبی معیارها استفاده شد، در حالی که روش TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به کار گرفته شد. تکنیک مدل‌سازی مبتنی بر عامل فازی برای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی انتخاب گردید [۲۷]. (وانگ و پیائو، ۲۰۱۹) یک مدل سیستم ارزیابی ریسک تأسیسات و نگهداری را برای انتخاب استراتژی‌های نگهداری یک تجهیز تک توسعه دادند که بر اساس روش‌های AHP و TOPSIS فازی بود. نویسندگان از روش AHP برای انتخاب معیارهای نگهداری و تعیین وزن این معیارها استفاده کردند و روش TOPSIS فازی را برای تجمیع امتیازهای گزینه‌ها اعمال نمودند. در فرآیند تصمیم‌گیری، روش FMEA (تحلیل حالت خرابی و اثرات آن) برای برقراری ماتریس تصمیم استفاده شد. همچنین فرآیندهای نگهداری با تکنیک مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و واقعیت افزوده هدایت گردید [۴۱]. (پاتل و جها، ۲۰۱۷) از اندازه‌های فازی، انتگرال‌های فازی، AHP فازی و WSM برای ارزیابی شاخص خطر پروژه که نماینده سطح خطر پروژه ساختمانی است استفاده کردند. روش دلفی برای جمع‌آوری و شناسایی گزینه‌ها و معیارهای اندازه‌گیری به کار گرفته شد. نظرسنجی برای تعیین وزن معیارهای جمع‌آوری شده و حذف معیارهای جزئی غیرمهم بر اساس اطلاعات وزن انجام گردید. اندازه‌های فازی و انتگرال‌های فازی برای تعیین اهمیت نسبی معیارها اتخاذ شد. AHP فازی برای استنتاج وزن گزینه‌ها استفاده گردید و WSM برای محاسبه شاخص خطر پروژه به منظور تعیین خطرناک‌ترین گزینه به کار گرفته شد [۵۵].

۵- مسائل تصمیم‌گیری محبوب و معیارهای ارزیابی رایج

در مجموعه داده ما، (۲۳.۰۸٪) مقالات مرتبط با مسائل ارزیابی ریسک بودند. در خصوص ارزیابی ریسک سازه‌ها و مواد ساختمانی، معیارهای رایج مورد استفاده شامل سن، طراحی، بلایای طبیعی، نرخ شکستگی و شرایط است. در زمینه ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی، معیارهای رایج شامل ریسک فعالیت‌های کاری، ریسک اقتصادی، ریسک کیفیت، ریسک هزینه و ریسک برنامه‌ریزی است. (۱۹.۲۳٪) مقالات در مورد

مسائل انتخاب استراتژی بودند. معیارهای رایج مورد استفاده شامل پتانسیل، قابلیت اطمینان، هزینه‌ها، سهولت عملیات و نگهداری، ریسک، تجربه، کیفیت و تأثیرات زیست‌محیطی است. (۱۳.۴۶٪) مقالات به مسائل انتخاب پیمانکار/تأمین‌کننده پرداخته بودند. معیارهای رایج شامل کیفیت، ایمنی، شهرت، پایداری مالی، هزینه‌ها، قیمت مناقصه، فنی، توانایی مدیریت، قابلیت اطمینان، تجربه و فنی است. (۷.۶۹٪) مقالات مسائل انتخاب فناوری را حل کرده بودند. معیارهای رایج شامل هزینه‌ها، سرعت و سادگی است. (۷.۶۹٪) مقالات مسائل انتخاب مواد را مدیریت کرده بودند. معیارهای رایج شامل کارایی، هزینه‌ها، انتشارات، مصرف و مقاومت است. (۷.۶۹٪) مقالات مرتبط با مسائل انتخاب پروژه ساختمانی بودند و معیارهای ارزیابی رایج شامل هزینه، کیفیت، سود و قابلیت اطمینان است. (۷.۶۹٪) مقالات به مسائل انتخاب مکان پرداخته بودند. معیارهای رایج شامل اقتصادی، ایمنی و پذیرش اجتماعی است. (۳.۸۵٪) مقالات در مورد مسائل انتخاب پرسنل بودند. معیارهای رایج شامل مهارت‌های همکاری، مهارت‌های ارتباطی، مهارت‌های برنامه‌ریزی و سطح دانش است و اگر در مورد انتخاب مدیر باشد، مهارت‌های مختلف مدیریتی باید در نظر گرفته شود. (۹.۶۲٪) مقالات سایر مسائل تصمیم‌گیری در مهندسی عمران را حل کرده بودند و معیارهای مورد استفاده متنوع است. بر اساس تحلیل آماری فوق، می‌توان مشاهده کرد که ارزیابی ریسک محبوب‌ترین مسئله تصمیم‌گیری و هزینه رایج‌ترین معیار در نظر گرفته‌شده در مهندسی عمران است.

۵-۱- روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی محبوب

در مجموعه داده ما، (۴۴.۲۳٪) از روش AHP فازی برای استنتاج اهمیت نسبی گزینه‌ها یا وزن معیارها استفاده کرده‌اند. (۲۳.۰۸٪) از روش TOPSIS فازی برای به‌دست آوردن ضرایب نزدیکی نسبی گزینه‌ها بهره برده‌اند. (۷.۶۹٪) از روش ANP فازی برای در نظر گرفتن تعاملات میان معیارها و استنتاج وزن معیارها استفاده کرده‌اند. (۵.۷۷٪) از روش ارزیابی ترکیبی فازی برای تخمین عملکرد جامع گزینه‌ها اتخاذ نموده‌اند. (۳.۸۵٪) از روش WSM فازی برای تعیین رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده کرده‌اند.

در مدل‌های MCDM فازی، (۲۵٪) از روش AHP فازی استفاده کرده‌اند، (۹.۶۲٪) از روش TOPSIS فازی بهره برده‌اند، (۱.۹۲٪) از روش ANP فازی استفاده نموده و (۵.۷۷٪) از روش ارزیابی ترکیبی فازی اعمال کرده‌اند. علاوه بر این، (۷.۶۹٪) از عملگرهای تجمیع وزنی برای تجمیع وزن معیارها و عملکرد گزینه‌ها به منظور به‌دست آوردن رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده کرده‌اند. (۳.۸۵٪) از روش ارزیابی ترکیبی فازی برای تخمین عملکرد جامع گزینه‌ها بهره برده‌اند. (۳.۸۵٪) از مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای دستیابی به نتایج تصمیم‌گیری مطابق با شناخت تصمیم‌گیرنده استفاده کرده‌اند. در مدل‌های MCDM فازی ترکیبی، (۷.۶۹٪) از روش AHP فازی استفاده کرده‌اند، (۱۳.۴۶٪) از روش TOPSIS فازی بهره برده‌اند، (۵.۷۷٪) از روش ANP فازی اعمال کرده‌اند و (۱۱.۵۴٪) روش AHP یا AHP فازی را با روش TOPSIS فازی ترکیب نموده‌اند. علاوه بر این، به‌ترتیب از روش DEMATEL فازی، روش SWARA فازی، BWM فاصله‌ای و رویکرد انتگرال فازی شوکه برای استنتاج وزن معیارها استفاده کرده‌اند بر اساس تحلیل آماری فوق، می‌توان دریافت که محبوب‌ترین مدل MCDM فازی فردی مبتنی بر روش AHP فازی بوده و روش AHP فازی اغلب با روش TOPSIS فازی به عنوان یک مدل MCDM فازی ترکیبی ترکیب می‌شود.

۶- چالش‌ها و مسیرهای تحقیقاتی آینده در زمینه تصمیم‌گیری در حوزه مهندسی عمران

از مرور انجام‌شده، می‌توان دریافت که همچنان چالش‌هایی در کاربرد مدل‌های MCDM فازی در مهندسی عمران وجود دارد:

ابزارهای بیان اطلاعات ارزیابی فازی نیاز به تنوع بیشتری دارند. به‌طور کلی، نتایج تصمیم‌گیری از عملیات بر روی اطلاعات ارزیابی به دست می‌آیند. از آنجایی که در مسائل تصمیم‌گیری مهندسی عمران معیارهای متنوعی وجود دارد، استفاده از ابزارهای ارزیابی متنوع هنگام ارزیابی گزینه‌ها تحت معیارهای مختلف می‌تواند به بهبود کیفیت نتایج تصمیم‌گیری کمک کند. در بسیاری از ادبیات مرور شده، اطلاعات ارزیابی محدود به بیان اصطلاحات زبانی تک یا اصطلاحات زبانی فاصله‌ای بود که ممکن است ارزیابی‌کنندگان را در بیان شناخت خود محدود کند.

– تعاملات میان معیارهای ارزیابی به ندرت در فرآیند تعیین وزن معیارها در نظر گرفته شده است. در مسائل تصمیم‌گیری مهندسی عمران معیارهای ارزیابی زیادی دخیل هستند. این معیارها ممکن است روابط تعاملی داشته باشند که بر تخصیص وزن معیارها تأثیر می‌گذارد (مظهر و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، در مقالات مرور شده، بیشتر مدل‌های MCDM فازی به‌طور پیش‌فرض فرض می‌کنند که معیارها مستقل از یکدیگر هستند که ممکن است به نتایج تصمیم‌گیری نامعقول منجر شود.

– روش‌های MCDM فازی نیاز به بررسی بیشتر دارند تا الزامات گسترده‌تری را برآورده کنند. روش‌های AHP و TOPSIS روش‌های کلاسیک و محبوب MCDM هستند که بیش از نیمی از مسائل تصمیم‌گیری مهندسی عمران در ادبیات مرور شده را حل کرده‌اند. با این وجود، با توسعه روش‌های تصمیم‌گیری جدید مختلف در سال‌های اخیر، بسیاری از روش‌های MCDM با دقت بالاتر از این دو روش می‌توانند بیشتر گسترش یابند و در حل مسائل مهندسی عمران پیاده‌سازی شوند.

– توسعه و کاربرد مدل‌های MCDM فازی ترکیبی نسبتاً کم است. مسائل تصمیم‌گیری دخیل در مهندسی عمران معمولاً پیچیده هستند و مدل‌های MCDM فازی ترکیبی نسبت به مدل‌های MCDM فازی فردی مناسب‌تر برای حل چنین مسائلی هستند، زیرا مدل‌های ترکیبی ترکیب چندین مدل فردی هستند و دقت نتایج تصمیم‌گیری به‌دست‌آمده از مدل‌های MCDM فازی ترکیبی تا حدی بالاتر از نتایج حاصل از مدل‌های MCDM فازی فردی است. با این حال، از مرور مشخص می‌شود که مدل‌های MCDM فازی ترکیبی کمتر از مدل‌های MCDM فازی فردی در مهندسی عمران به کار گرفته شده‌اند.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله بر مرور منابع تخصصی در مورد کاربرد مدل‌های MCDM فازی در مهندسی عمران از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ تمرکز داشته است. ابتدا، ادبیات را بر اساس مسائل تصمیم‌گیری در مهندسی عمران طبقه‌بندی کردیم و معیارهای مرتبط با این مسائل تصمیم‌گیری را استخراج نمودیم. سپس، مدل‌های MCDM فازی مورد استفاده در مهندسی عمران را به مدل‌های MCDM فازی فردی و مدل‌های MCDM فازی ترکیبی تقسیم کردیم. بر اساس مرور ادبیات و تحلیل آماری، دریافتیم که پربسامدترین مسئله تصمیم‌گیری ارزیابی ریسک است، پرکاربردترین معیار ارزیابی هزینه است، محبوب‌ترین مدل MCDM فازی فردی AHP فازی است و محبوب‌ترین مدل MCDM فازی ترکیبی ترکیب AHP فازی و TOPSIS فازی می‌باشد. چهار چالش

مراجع

- [1] Abdel-malak, Fam F., Usama H. Issa, Yehia H. Miky, and Emad A. Osman. "Applying decision-making techniques to Civil Engineering Projects." *Beni-Suef University journal of basic and applied sciences* 6, no. 4 (2017): 326-331.
- [2] Leśniak, Agnieszka, Daniel Kubek, Edyta Plebankiewicz, Krzysztof Zima, and Stanisław Belniak. "Fuzzy AHP application for supporting contractors' bidding decision." *Symmetry* 10, no. 11 (2018): 642.
- [3] Wieczorek, Damian, Edyta Plebankiewicz, and Krzysztof Zima. "Model estimation of the whole life cost of a building with respect to risk factors." *Technological and Economic Development of Economy* 25, no. 1 (2019): 20-38.



- [4] Hatefi, Seyed Morteza, and Jolanta Tamošaitienė. "An integrated fuzzy DEMATEL-fuzzy ANP model for evaluating construction projects by considering interrelationships among risk factors." *Journal of Civil Engineering and Management* 25, no. 2 (2019): 114-131.
- [5] Plebankiewicz, Edyta, Wiesław Meszek, Krzysztof Zima, and Damian Wieczorek. "Probabilistic and fuzzy approaches for estimating the life cycle costs of buildings under conditions of exposure to risk." *Sustainability* 12, no. 1 (2020): 226.
- [6] Huang, Min, Xinli Zhang, Huchang Liao, Edmundas Kazimieras Zavadskas, and Jurgita Antuchevičienė. "Energy-saving building program evaluation with an integrated method under linguistic environment." *Journal of civil engineering and management*. 26, no. 5 (2020): 447-458.
- [7] Fallahpour, Alireza, Kuan Yew Wong, Srithar Rajoo, Ezutah Udony Olugu, Mehrbakhsh Nilashi, and Zenonas Turskis. "A fuzzy decision support system for sustainable construction project selection: an integrated FPP-FIS model." *Journal of civil engineering and management* 26, no. 3 (2020): 247-258.
- [8] Mohandes, Saeed Reza, Haleh Sadeghi, Amir Mahdiyar, Serdar Durdyev, Audrius Banaitis, Khairulzan Yahya, and Syuhaida Ismail. "Assessing construction labours' safety level: A fuzzy MCDM approach." *Journal of Civil Engineering and Management* 26, no. 2 (2020): 175-188.
- [9] Zavadskas, Edmundas Kazimieras, Jurgita Antucheviciene, Tatjana Vilutiene, and Hojjat Adeli. "Sustainable decision-making in civil engineering, construction and building technology." *Sustainability* 10, no. 1 (2017): 14.
- [10] Kazemian, Gholamreza, Alireza Koushkie Jahromi, and Behnoush Habibi Nejad. "Getting to environmental sustainability: drivers of urban entrepreneurship by interpretive ranking process." *Journal of Advances in Management Research* (2025).
- [11] Mardani, Abbas, Ahmad Jusoh, and Edmundas Kazimieras Zavadskas. "Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014." *Expert systems with Applications* 42, no. 8 (2015): 4126-4148.
- [12] Wallenius, Jyrki, James S. Dyer, Peter C. Fishburn, Ralph E. Steuer, Stanley Zionts, and Kalyanmoy Deb. "Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead." *Management science* 54, no. 7 (2008): 1336-1349.
- [13] Wu, Xingli, and Huchang Liao. "A consensus-based probabilistic linguistic gained and lost dominance score method." *European Journal of Operational Research* 272, no. 3 (2019): 1017-1027.
- [14] Xiao, Yao, and Chonghui Zhang. "A NEW METHOD FOR FINANCIAL DECISION MAKING UNDER INTUITIONISTIC LINGUISTIC ENVIRONMENT." *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research* 50, no. 3 (2016).
- [15] Osei-Kyei, Robert, and Albert PC Chan. "Developing a project success index for public-private partnership projects in developing countries." *Journal of Infrastructure Systems* 23, no. 4 (2017): 04017028.



- [16] Heidary Dahooie, Jalil, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Mahdi Abolhasani, Amirsalar Vanaki, and Zenonas Turskis. "A novel approach for evaluation of projects using an interval-valued fuzzy additive ratio assessment (ARAS) method: a case study of oil and gas well drilling projects." *Symmetry* 10, no. 2 (2018): 45.
- [17] Utama, Wahyudi P., Albert PC Chan, Hafiz Zahoor, Ran Gao, and Dwifitra Y. Jumas. "Making decision toward overseas construction projects: An application based on adaptive neuro fuzzy system." *Engineering, construction and architectural management* 26, no. 2 (2019): 285-302.
- [18] Afrasiabi, A., Tavana, M., & Di Caprio, D. (2022). An extended hybrid fuzzy multi-criteria decision model for sustainable and resilient supplier selection. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 37291-37314.
- [19] Keshavarz-Ghorabae, Mehdi, Maghsoud Amiri, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Zenonas Turskis, and Jurgita Antucheviciene. "A dynamic fuzzy approach based on the EDAS method for multi-criteria subcontractor evaluation." *Information* 9, no. 3 (2018): 68.
- [20] Mahamadu, Abdul-Majeed, Patrick Manu, Lamine Mahdjoubi, Colin Booth, Clinton Aigbavboa, and F. H. Abanda. "The importance of BIM capability assessment: An evaluation of post-selection performance of organisations on construction projects." *Engineering, Construction and Architectural Management* 27, no. 1 (2020): 24-48.
- [21] Afshari, Ali Reza. "Methods for selection of construction project manager: Case study." *Journal of Construction Engineering and Management* 143, no. 12 (2017): 06017003.
- [22] Vo, Khoa Dang, Phong Thanh Nguyen, and Phuong Thanh Phan. "Job performance factors of civil engineers in Vietnam." *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences* 14, no. 5 (2018): 571-575.
- [23] Hosseini, Seyed Teimor, Shahin Lale Arefi, Mahdi Bitarafan, Sajjad Abazarlou, and Edmundas Kazimieras Zavadskas. "Evaluation types of exterior walls to reconstruct Iran earthquake areas (Ahar Heris Varzeqan) by using AHP and fuzzy methods." *International Journal of Strategic Property Management* 20, no. 3 (2016): 328-340.
- [24] Jato-Espino, Daniel, Irune Indacoechea-Vega, László Gáspár, and Daniel Castro-Fresno. "Decision support model for the selection of asphalt wearing courses in highly trafficked roads." *Soft Computing* 22, no. 22 (2018): 7407-7421.
- [25] Hafezalkotob, Arian, Ashkan Hafezalkotob, Huchang Liao, and Francisco Herrera. "Interval MULTIMOORA method integrating interval Borda rule and interval best-worst-method-based weighting model: case study on hybrid vehicle engine selection." *IEEE transactions on cybernetics* 50, no. 3 (2019): 1157-1169.
- [26] Jang, Woosik, Sang Ku Lee, and Seung Heon Han. "Sustainable performance index for assessing the green technologies in urban infrastructure projects." *Journal of Management in Engineering* 34, no. 2 (2018): 04017056.



- [27] Issa, Usama H., Yehia H. Miky, and Fam F. Abdel-Malak. "A decision support model for civil engineering projects based on multi-criteria and various data." *Journal of Civil Engineering and Management* 25, no. 2 (2019): 100-113.
- [28] Boostani, Abtin, Fariborz Jolai, and Ali Bozorgi-Amiri. "Optimal location selection of temporary accommodation sites in Iran via a hybrid fuzzy multiple-criteria decision making approach." *Journal of urban planning and development* 144, no. 4 (2018): 04018039.
- [29] Hocine, Amin, Zheng-Yun Zhuang, Nouredine Kouaissah, and Der-Chiang Li. "Weighted-additive fuzzy multi-choice goal programming (WA-FMCGP) for supporting renewable energy site selection decisions." *European Journal of Operational Research* 285, no. 2 (2020): 642-654.
- [30] Satapathy, Suchismita, Swarn Kumar, Anshuman Garanayak, and Ashrant Pani. "An analysis of physical disorders of workers at construction site: a fuzzy-AHP ranking." *International Journal of Business Excellence* 14, no. 2 (2018): 212-239.
- [31] Yu, Yao, Amos Darko, Albert PC Chan, Chuan Chen, and Fengyu Bao. "Evaluation and ranking of risk factors in transnational public-private partnerships projects: case study based on the intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process." *Journal of Infrastructure Systems* 24, no. 4 (2018): 04018028.
- [32] Chatterjee, Kajal, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Jolanta Tamošaitienė, Krishnendu Adhikary, and Samarjit Kar. "A hybrid MCDM technique for risk management in construction projects." *Symmetry* 10, no. 2 (2018): 46.
- [33] Zolfaghari, Samaneh, and S. Meysam Mousavi. "RETRACTED: Construction-project risk assessment by a new decision model based on De-Novo multi-approaches analysis and hesitant fuzzy sets under uncertainty." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 35, no. 1 (2018): 639-649.
- [34] Mazher, Khwaja Mateen, Albert PC Chan, Hafiz Zahoor, Mohsen Islam Khan, and Ernest Effah Ameyaw. "Fuzzy integral-based risk-assessment approach for public-private partnership infrastructure projects." *Journal of Construction engineering and Management* 144, no. 12 (2018): 04018111.
- [35] Ilbahar, Esra, Ali Karaşan, Selcuk Cebi, and Cengiz Kahraman. "A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system." *Safety science* 103 (2018): 124-136.
- [36] Rezakhani, Pejman, and Marcel Maghiar. "Fuzzy analytical solution for activity duration estimation under uncertainty." *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering* 5, no. 4 (2019): 04019014.
- [37] Ebrahiminejad, Meysam, Eghbal Shakeri, Abdollah Ardeshtir, and MH Fazel Zarandi. "An object-oriented model for construction method selection in buildings using fuzzy information." *Energy and Buildings* 178 (2018): 228-241.
- [38] Amini, M., B. Zhang, and aS Chang. "Selecting building designs with consideration of sustainability and resiliency." *Journal of Architectural Engineering* 24, no. 1 (2018): 04018001.



- [39] Song, Xiaoling, Lin Zhong, Zhe Zhang, Jiuping Xu, Charles Shen, and Feniosky Peña-Mora. "Multistakeholder conflict minimization-based layout planning of construction temporary facilities." *Journal of Computing in Civil Engineering* 32, no. 2 (2018): 04017080.
- [40] Yoon, Jong Han, and Hee Sung Cha. "Optimal FM strategy for commercial office buildings using fuzzy synthetic evaluation." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 32, no. 3 (2018): 04018025.
- [41] Wang, Ting-Kwei, and Yanmei Piao. "Development of BIM-AR-based facility risk assessment and maintenance system." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 33, no. 6 (2019): 04019068.
- [42] Hu, Hongxia, Shouguo Jiang, Shankha Shubhra Goswami, and Yafei Zhao. "Fuzzy integrated Delphi-ISM-MICMAC hybrid multi-criteria approach to optimize the artificial intelligence (AI) factors influencing cost management in civil engineering." *Information* 15, no. 5 (2024): 280.
- [43] Maghsoodi, Abteen Ijadi, and Mohammad Khalilzadeh. "Identification and evaluation of construction projects' critical success factors employing fuzzy-TOPSIS approach." *KSCE Journal of Civil Engineering* 22, no. 5 (2018): 1593-1605.
- [44] Galende-Hernández, Marta, Manuel Menéndez, M. J. Fuente, and G. I. Sainz-Palmero. "Monitor-While-Drilling-based estimation of rock mass rating with computational intelligence: The case of tunnel excavation front." *Automation in Construction* 93 (2018): 325-338.
- [45] Moghayed, Alireza, and Abimbola Windapo. "Key uncertainty events impacting on the completion time of highway construction projects." *Frontiers of Engineering Management* 6, no. 2 (2019): 275-298.
- [46] Nyongesa, Henry O., George Wamamu Musumba, and Nicholas Chileshe. "Partner selection and performance evaluation framework for a construction-related virtual enterprise: a multi-agent systems approach." *Architectural Engineering and Design Management* 13, no. 5 (2017): 344-364.
- [47] El Chanati, Hisham, Mohammed S. El-Abbasy, Fadi Mosleh, Ahmed Senouci, Mona Abouhamad, Iason Gkountis, Tarek Zayed, and Hassan Al-Derham. "Multi-criteria decision making models for water pipelines." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30, no. 4 (2016): 04015090.
- [48] Martin, Hector, Timothy M. Lewis, Andrew Petersen, and Everson Peters. "Cloudy with a chance of fuzzy: Building a multicriteria uncertainty model for construction project delivery selection." *Journal of Computing in Civil Engineering* 31, no. 1 (2017): 04016046.
- [49] Chen, L., and W. Pan. "BIM-aided variable fuzzy multi-criteria decision making of low-carbon building measures selection." *Sustainable Cities and Society* 27 (2016): 222-232.
- [50] Liang, Ru, Zhijie Dong, Zhaohan Sheng, Xiangyu Wang, and Changzhi Wu. "Case study of selecting decision-making schemes in large-scale infrastructure projects." *Journal of Infrastructure Systems* 23, no. 4 (2017): 06017001.
- [51] Mahamadu, Abdul-Majeed, Patrick Manu, Lamine Mahdjoubi, Colin Booth, Clinton Aigbavboa, and F. H. Abanda. "The importance of BIM capability assessment: An evaluation of post-selection performance of organisations on construction projects." *Engineering, Construction and Architectural Management* 27, no. 1 (2020): 24-48.



- [52] Owusu, Emmanuel Kingsford, Albert PC Chan, M. Reza Hosseini, and Bahareh Nikmehr. "Assessing procurement irregularities in the supply-chain of Ghanaian construction projects: a soft-computing approach." *Journal of Civil Engineering and Management* 26, no. 1 (2020): 66-82.
- [53] RazaviAlavi, SeyedReza, and Simaan AbouRizk. "Genetic algorithm–simulation framework for decision making in construction site layout planning." *Journal of Construction Engineering and Management* 143, no. 1 (2017): 04016084.
- [54] Cheng, Weiran, Manting Hu, and Chaonan Wu. "Enhancing green building decision-making with a hybrid fuzzy AHP-TOPSIS model for material selection." *Applied Water Science* 15, no. 6 (2025): 129.
- [55] Patel, D. A., and K. N. Jha. "Developing a process to evaluate construction project safety hazard index using the possibility approach in India." *Journal of Construction Engineering and Management* 143, no. 1 (2017): 04016081.