



تصمیم‌گیری چندمعیاره کاربردی در مهندسی عمران: روش‌ها، حوزه‌های کاربرد و روندهای تحقیقاتی

دکتر مهدی فضیلتی^{۱،۲}، علی عدنان خضیر الزلزلی^۱

^۱گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

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

چکیده

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به عنوان ابزاری قدرتمند در مهندسی عمران، امکان ارزیابی سیستماتیک گزینه‌ها بر اساس معیارهای متعدد و اغلب متعارض را فراهم می‌کند. این مقاله با بررسی بیش از ۱۰۰ منبع علمی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، به تحلیل روش‌های رایج MCDM مانند AHP، TOPSIS، ANP و رویکردهای هیبریدی فازی می‌پردازد. حوزه‌های کاربرد اصلی شامل انتخاب پیمانکار و مواد ساختمانی، اولویت‌بندی نگهداری زیرساخت‌ها (پل‌ها، جاده‌ها و روسازی‌ها)، مدیریت ریسک پروژه، طراحی ساختمان‌های پایدار و مدیریت منابع آب شناسایی شد. روندهای نوظهور مانند ادغام MCDM با فناوری‌های GIS، BIM و هوش مصنوعی، تمرکز بر ارزیابی چرخه حیات و پایداری، و توسعه مدل‌های هیبریدی برجسته گردید. مطالعات موردی واقعی نشان‌دهنده تأثیر مثبت MCDM در کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار هستند. در نهایت، نقاط قوت، محدودیت‌ها، توصیه‌های سیاستی و جهت‌گیری‌های آینده تحقیق بحث شد که تأکید بر همکاری بین‌رشته‌ای و کاربرد در اقتصاد دایره‌ای دارد. این بررسی مرجعی جامع برای محققان و متخصصان مهندسی عمران ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تصمیم‌گیری چندمعیاره، مهندسی عمران، روش‌های هیبریدی، پایداری، نگهداری زیرساخت‌ها

۱. مقدمه

۱.۱ زمینه تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در مهندسی عمران

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به عنوان یک رویکرد سیستماتیک برای ارزیابی گزینه‌های مختلف بر اساس معیارهای متعدد، در مهندسی عمران نقش کلیدی ایفا می‌کند. این روش‌ها به مهندسان کمک می‌کنند تا در مواجهه با پیچیدگی‌های پروژه‌های عمرانی، مانند انتخاب مواد، اولویت‌بندی نگهداری زیرساخت‌ها و مدیریت ریسک، تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کنند (Zavadskas et al. 2017; Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2014). از دهه‌های گذشته، کاربرد MCDM در حوزه‌هایی مانند انتخاب پیمانکار و ارزیابی پایداری ساختمان‌ها گسترش یافته است (Al-Harbi 2001; Brauers 2008) با پیشرفت



فناوری، ادغام MCDM با ابزارهایی مانند GIS و BIM، دقت و کارایی این روش‌ها را افزایش داده است (Pathan, Agnihotri, and Patel 2022; Raval, Sarkar, and Solanki 2025).

۱.۲ اهمیت MCDM برای فرآیندهای تصمیم‌گیری پایدار و کارآمد

اهمیت MCDM در مهندسی عمران به دلیل توانایی آن در یکپارچه‌سازی جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی برجسته است، که این امر منجر به تصمیم‌گیری‌های پایدارتر می‌شود (Antucheviciene et al. 2015; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015a). برای مثال، در مدیریت زیرساخت‌ها، این روش‌ها به اولویت‌بندی تعمیرات کمک می‌کنند و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند (Dabous et al. 2020; Jaafaru and Agbelie 2022). همچنین، در شرایط عدم قطعیت، مانند پروژه‌های آبی یا ساختمانی، MCDM کارایی فرآیندها را بهبود می‌بخشد و ریسک‌ها را مدیریت می‌کند (Zarghami and Szidarovszky 2009; Zavadskas, Turskis, and Tamošaitienė 2010). در ساختمان‌های سبز و مدیریت منابع آب، به دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک شایانی کرده است (Elshafei et al. 2022; Gebre, Cattrysse, and Van Orshoven 2021).

۱.۳ اهداف و دامنه بررسی

هدف اصلی این مقاله، بررسی جامع روش‌های MCDM، حوزه‌های کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران و روندهای تحقیقاتی اخیر است. دامنه بررسی شامل مقالات منتشرشده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ می‌شود، با تمرکز بر کاربردهای عملی مانند انتخاب مواد و اولویت‌بندی پروژه‌ها (Mardani et al. 2015; Zhu, Meng, and Zhang 2021). این بررسی به دنبال شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های آینده در این حوزه است، بدون محدود شدن به یک روش خاص، بلکه با پوشش هیریدی مانند (AHP-TOPSIS) (Chen and Pan 2021; Kazimieras Zavadskas et al. 2016).

۱.۴ روش‌شناسی بررسی ادبیات و تحلیل

روش‌شناسی این بررسی بر اساس جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های داده مانند Scopus و Web of Science استوار است، با استفاده از کلمات کلیدی مانند "MCDM in Civil Engineering" و "Multi-Criteria Decision Making in Construction". مقالات انتخاب‌شده بر اساس معیارهایی مانند مرتبط بودن و کیفیت ارزیابی شدند (Jato-Espino et al. 2014; Morkūnaitė, Kalibatas, and Kalibatienė 2019). تحلیل شامل دسته‌بندی روش‌ها، کاربردها و روندها با استفاده از رویکردهای bibliometric و qualitative است (Bruen 2021; Oguntona et al. 2025). در نهایت، بیش از ۱۰۰ مقاله بررسی شد تا تصویری جامع ارائه شود.

۲. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره رایج در مهندسی عمران

۲.۱ فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP) و گونه‌های آن

فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP)، که توسط ساعتی در دهه ۱۹۸۰ معرفی شد، یکی از بنیادی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مهندسی عمران است. این روش با ساختار سلسله‌مراتبی، اهداف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها را سازماندهی کرده و از مقایسه‌های زوجی برای تعیین وزن نسبی معیارها و امتیاز گزینه‌ها استفاده می‌کند (AHP) (Al-Harbi 2001; Zayed, Amer, and Pan 2008). به دلیل قابلیت محاسبه نرخ ناسازگاری (Consistency Ratio) که اعتبار قضاوت‌های کارشناسی را بررسی می‌کند، در پروژه‌های پیچیده عمرانی مانند ارزیابی ریسک پروژه‌های بزرگراهی و انتخاب پیمانکار بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Eshtehardian, Ghodousi, and Bejanpour 2013; Taylan et al. 2014; Fawzy et al. 2024).



در سال‌های اخیر، گونه‌های توسعه‌یافته مانند فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی فازی (FAHP) برای مقابله با عدم قطعیت‌های ذاتی در داده‌های مهندسی عمران، مانند قضاوت‌های کیفی کارشناسان یا نوسانات هزینه‌ها، به کار گرفته شده‌اند. این گونه‌ها با استفاده از اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ای، دقت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهند (Bakhoum and Brown 2013; Past et al. 2023; Qian, Siriwardana, and Shahzad 2024; Yıldız and Güneş 2025; Yıldız and Güneş 2024). Yildiz and Güneş (2024) کاربردهای گسترده FAHP در انتخاب مواد ساختمانی پایدار، ارزیابی اهمیت معیارهای ساختمانی پایه و انتخاب پوشش سقف مشاهده شده است که نتایج آن با واقعیت‌های میدانی همخوانی بیشتری دارد (Kang et al. 2024; Redd et al. 2024). همچنین، ترکیب AHP با ابزارهای جغرافیایی (GIS) در اولویت‌بندی مکان‌یابی سد یا مدیریت طوفان‌های شهری، کارایی این روش را در مسائل فضایی-مکانی برجسته کرده است (Pathan, Agnihotri, and Patel 2022; Wahba et al. 2024; Hamaamin et al. 2025).

۲.۲ تکنیک ترجیح بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)

تکنیک TOPSIS که بر پایه مفهوم فاصله اقلیدسی از راه‌حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) عمل می‌کند، به دلیل سادگی محاسباتی و قابلیت رتبه‌بندی دقیق گزینه‌ها، یکی از محبوب‌ترین روش‌های MCDM در مهندسی عمران محسوب می‌شود (Ouma, Opudo, and Nyambenya 2015; Amorocho and Hartmann 2022; Pham, Dau, and Tran 2024). این روش در اولویت‌بندی نگهداری روسازی جاده‌ها، انتخاب سیستم‌های قالب‌بندی بتنی و ارزیابی تأمین کنندگان مواد ساختمانی کاربرد گسترده‌ای دارد (Cengiz et al. 2017; Marzouk and Sabbah 2021; Liu et al. 2024; Villegas-Flores et al. 2023). نسخه‌های گسترش‌یافته TOPSIS، مانند Fuzzy TOPSIS، برای مدیریت عدم قطعیت در معیارهای کیفی و کمی به کار می‌رود و در پروژه‌های بازسازی ساختمان‌های مسکونی یا انتخاب مواد سبز نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Cheng, Hu, and Wu 2025; Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024). رویکردهای هیبریدی مانند AHP-TOPSIS که ابتدا وزن معیارها را با AHP تعیین کرده و سپس رتبه‌بندی را با TOPSIS انجام می‌دهند، در مسائل پیچیده مانند نگهداری پیشگیرانه روسازی بزرگراه‌ها، انتخاب نوع روسازی و ارزیابی پایداری اجتماعی در پروژه‌های چندوجهی دقت بالایی نشان داده‌اند (Sahin and Aksoy 2025; Masih and Kar 2025; Li et al. 2022; Putri and Nusraningrum 2022). توسعه که داده‌های دقیق محدود است، کارآمد بوده و به کاهش هزینه‌های بلندمدت کمک می‌کند (Ogunnusi, Salman, and Laing 2023; Worku 2024).

۲.۳ فرآیند شبکه تحلیلی (ANP) و رویکردهای هیبریدی

فرآیند شبکه تحلیلی (ANP) به عنوان تعمیم AHP، وابستگی‌های متقابل و بازخوردهای بین معیارها و گزینه‌ها را مدلسازی می‌کند و بنابراین برای مسائل پیچیده‌تر مهندسی عمران مناسب‌تر است (Nilashi et al. 2015; Naghizadeh Vardin et al. 2021). ANP در ارزیابی عوامل موفقیت پیمانکاران، تحلیل سازگاری سازه‌ای پل‌ها و مدیریت پروژه‌های مشارکتی عمومی-خصوصی (PPP) کاربرد دارد (Naji, Gunduz, and Falamarzi 2022; Khorasani Nejad, Rashidi, and Mousavi 2025; Nejad, Mousavi, and Rashidi 2024). رویکردهای هیبریدی مانند DEMATEL-ANP برای شناسایی روابط علی-معلولی بین معیارها و Fuzzy ANP-VIKOR برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت بالا، در مدیریت پروژه‌های لاغر و پایدار و اولویت‌بندی بازسازی پس از بلايا مؤثر بوده‌اند (Jokar, Aminnejad, and Lorak 2020; Vosoughifar 2025; Mohammadnazari et al. 2022). Shokoohi and



BIM و blockchain در بخش ساخت و ساز پیشرفت چشمگیری نشان داده‌اند (Koc, Ekmekcioglu, and Işık 2023; Raval, Sarkar, and Solanki 2025; Bapat, Sarkar, and Gujar 2023). ANP با یادگیری ماشین یا بهینه‌سازی تکاملی، دقت پیش‌بینی در برنامه‌ریزی نگهداری پل‌ها را افزایش داده است (Jaafaru and Agbelie 2022; Lad et al. 2024).

۲.۴ سایر روش‌ها: MOORA, VIKOR, DEMATEL و گسترش‌های فازی

روش‌های دیگری مانند VIKOR که بر پایه تصمیم‌گیری سازشی عمل می‌کند، در رتبه‌بندی گزینه‌ها با توجه به حداکثر سود گروهی و حداقل پشیمانی فردی کاربرد دارد. MOORA برای رتبه‌بندی ساده و قوی پیمانکاران و طراحی جاده‌ها، و DEMATEL برای تحلیل ساختاری روابط بین معیارها به کار می‌رود (Brauers 2008; Brauers et al. 2008; Stojčić et al. 2019; Wang et al. 2023). گسترش‌های فازی این روش‌ها، مانند Fuzzy VIKOR یا Fuzzy DEMATEL، برای مسائل با داده‌های نادقیق ضروری هستند و در مدیریت منابع آب، ارزیابی پایداری نما و انتخاب مواد صنعتی کاربرد دارند (Chen and Pan 2021; Wen et al. 2021; Garai and Garg 2022; Gebre, Cattrysse, and Van Orshoven 2021; Gilani, Pons, and de la Fuente 2022). Evaluación Sostenible به عنوان یک چارچوب یکپارچه پایداری محور، در ارزیابی ساختمان‌های صنعتی، طراحی برای مونتاژ و تولید و ارزیابی چرخه حیات قطعات ساختمانی برجسته است (Pons, De la Fuente, and Aguado 2016; Boix-Cots et al. 2022; Medrán, Enfedaque, and Theilig et al. 2024). ELECTRE در انتخاب نوع بتن و ارزیابی سیستم‌های حمل و نقل عمومی استفاده شده است (Prasiwinigrum et al.; Nassereddine and Eskandari 2017).

۲.۵ تحلیل مقایسه‌ای روش‌های MCDM

تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که AHP و TOPSIS به دلیل سادگی محاسباتی، قابلیت پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای رایج مانند Expert Choice یا Super Decisions و تفسیرپذیری بالا، بیشترین کاربرد را در مهندسی عمران دارند، در حالی که ANP و روش‌های هیبریدی در مسائل با وابستگی‌های پیچیده برتری دارند (Jato-Espino et al. 2014; Mardani et al. 2015; Kazimieras Zavadskas et al. 2016; Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2014). روش‌های فازی و هیبریدی در مواجهه با عدم قطعیت و مسائل پایداری عملکرد بهتری نشان می‌دهند، اما محاسبات سنگین‌تری دارند (Zhu, Meng, and Zhang 2021; Wen et al. 2021; Kapliński and Vilitienė 2025; Bruen 2021). انتخاب روش مناسب به عواملی مانند تعداد معیارها و گزینه‌ها، سطح عدم قطعیت، دسترسی به داده‌ها و اهداف تصمیم‌گیری (مانند پایداری یا هزینه‌محور بودن) بستگی دارد. بررسی‌های اخیر تأکید دارند که ترکیب روش‌ها با فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، BIM و GIS، آینده MCDM در مهندسی عمران را شکل خواهد داد (Francis and Thomas 2023; Wang et al. 2023; Anbari Moghadam and Besiktepe 2025; Oguntona et al. 2025).



۳. حوزه‌های کاربرد تصمیم‌گیری چندمعیاره در مهندسی عمران

۳.۱ انتخاب پیمانکار و تأمین‌کننده

یکی از گسترده‌ترین حوزه‌های کاربرد MCDM در مهندسی عمران، انتخاب پیمانکار و تأمین‌کننده است که به دلیل تأثیر مستقیم بر کیفیت، هزینه و زمان‌بندی پروژه‌ها اهمیت بالایی دارد. روش‌های AHP و TOPSIS به طور گسترده برای ارزیابی معیارهایی مانند تجربه، قیمت پیشنهادی، قابلیت فنی و پایداری زیست‌محیطی پیمانکاران استفاده می‌شوند (Al-Harbi 2001; Eshtehardian, Ghodousi, and Bejanpour 2013; Zavadskas, Turskis, and Tamošaitiene 2008). در پروژه‌های مشارکتی عمومی-خصوصی (PPP)، رویکردهای هیبریدی فازی برای اولویت‌بندی ریسک‌ها و انتخاب پیمانکار مشارکت‌کننده کاربرد دارند (Jokar, Aminnejad, and Lorak 2020; Fawzy et al. 2024). تحقیقات اخیر بر انتخاب پیمانکار پایدار و دایره‌ای تمرکز کرده‌اند، جایی که معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی کنار معیارهای اقتصادی قرار می‌گیرند (Koc, Ekmekcioglu, and Işık 2023; Cai et al. 2023; Babalola 2025). MCDM به ارزیابی عوامل موفقیت پیمانکاران با در نظر گرفتن ارتباطات متقابل کمک کرده و دقت انتخاب را افزایش داده است (Naji, Gunduz, and Falamarzi 2022; Naghizadeh Vardin et al. 2021; Putri and Nusraningrum 2022). تحویل یکپارچه (IPD) و BIM نتایج دقیق‌تری ارائه داده است (Bapat, Sarkar, and Gujar 2023; Belay et al. 2022; Tran and Yan 2021; Soltanikarbaschi and Hammad 2021).

۳.۲ انتخاب مواد و ارزیابی پایداری

انتخاب مواد ساختمانی با توجه به معیارهای چندگانه مانند هزینه، دوام، تأثیر زیست‌محیطی و عملکرد سازه‌ای، حوزه دیگری است که MCDM در آن نقش کلیدی ایفا می‌کند. روش‌های هیبریدی AHP-TOPSIS و MIVES برای رتبه‌بندی مواد ساختاری پایدار در ساختمان‌های چندطبقه و صنعتی به کار گرفته شده‌اند (Bakhoun and Brown 2013; Alam Bhuiyan and Hammad 2023; Lee et al. 2020; Pham, Dau, and Tran 2024; Worku 2024). ارزیابی پایداری نما، پوشش سقف و مواد بازآفرینی با استفاده از FAHP و رویکردهای چرخه حیات (LCA) انجام می‌شود (Gilani 2020; Gilani, Pons, and de la Fuente 2022; Qian, Siriwardana, and Shahzad 2024; Yildiz and Güneş 2025; Soni, Das, and Kumar 2023). در ساختمان‌های پیش‌ساخته و سبز، MCDM به انتخاب مواد چوبی، بتنی و نوین با تمرکز بر کاهش کربن کمک کرده است (Cabral and Blanchet 2023; Cheng, Hu, and Wu 2025; Redd et al. 2024; Ma et al. 2024). انرژی و انتخاب مواد پایدار در زیرساخت‌های نوین روند رو به رشدی دارد (Sriram et al. 2025; Maleki 2023; Theilig et al. 2024; Medrán, Enfedaque, and Alberti 2024). این کاربردها نه تنها هزینه‌های چرخه حیات را کاهش می‌دهند، بلکه به دستیابی به استانداردهای LEED و BREEAM کمک می‌کنند (Elshafei et al. 2022; Sabhapathy 2023; Villalba Nieto, Sánchez-Garrido, and Yepes Piqueras 2024).



۳.۳ نگهداری و اولویت‌بندی زیرساخت‌ها (مانند پل‌ها، جاده‌ها و روسازی‌ها)

مدیریت نگهداری زیرساخت‌ها، به ویژه پل‌ها، جاده‌ها و روسازی‌ها، از حوزه‌های حیاتی کاربرد MCDM است که هدف آن تخصیص بهینه منابع محدود است. روش‌های چندویژگی مانند MAUT و AHP برای برنامه‌ریزی نگهداری چندساله پل‌ها و اولویت‌بندی بخش‌های روسازی استفاده می‌شوند (Allah Bukhsh, Stipanovic, and Doree 2020; Dabous et al. 2020; Jaafaru and Agbelie 2022; Lad et al. 2024; Mohamadiazar, Ebrahimiyan, and Azizinamini 2024). TOPSIS و رویکردهای فازی در اولویت‌بندی نگهداری جاده‌ها و ارزیابی وضعیت روسازی کاربرد گسترده‌ای دارند (Ouma, Opudo, and Nyambenya 2015; Liu et al. 2024; Qiu et al. 2016; Sahin and Aksoy 2025). در مدیریت پل‌ها، MCDM با مدل‌های بهینه‌سازی تکاملی و یادگیری ماشین ترکیب شده تا تاب‌آوری و اولویت‌بندی بازسازی را بهبود بخشد (Patel et al. 2020; Das and Nakano 2023; ElMarkaby et al. 2023; Khorasani Nejad, Rashidi, and Mousavi 2025). MCDM در اولویت‌بندی نگهداری جاده‌ها و مدیریت طوفان‌های شهری دقت فضایی را افزایش داده است (Mallick et al. 2022; Broniewicz and Ogrodnik 2025; Hamaamin et al. 2025; Nugraha, Muhidong, and Soma 2025). این روش‌ها هزینه‌های بلندمدت را کاهش داده و ایمنی زیرساخت‌ها را ارتقا می‌بخشند (Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2014; Bošnjak and Jajac 2023).

۳.۴ انتخاب پروژه، ارزیابی ریسک و مدیریت ساخت

ارزیابی ریسک و انتخاب پروژه‌های عمرانی از دیگر حوزه‌های کلیدی است که MCDM در آن‌ها برای مدیریت عدم قطعیت و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها به کار می‌رود. روش‌های ANP و VIKOR در ارزیابی ریسک پروژه‌های ساختمانی و انتخاب پروژه‌های پایدار کاربرد دارند (Tamošaitienė, Zavadskas, and Turskis 2010; Taylan et al. 2014; Zavadskas, Turskis, and Tamošaitienė 2010). سیستم‌های تحویل پروژه و انتخاب روش‌های اجرایی کمک می‌کند (Nassar, Thabet, and Beliveau 2003; Issa, Miky, and Abdel-Malak 2019; Hjort and De Souza Nazareth Giorgi 2024). ترکیب MCDM با مدل‌های دینامیک سیستم برای تحلیل سیاست‌های پایداری و مدیریت ریسک در محیط ساخته‌شده نتایج جامعی ارائه می‌دهد (Francis and Thomas 2023; Macchiaroli, Dolores, and De Mare 2023). MCDM اولویت‌بندی بازسازی را تسهیل کرده است (Mohammadnazar et al. 2022; Past et al. 2023). این کاربردها به ویژه در کشورهای در حال توسعه برای بهینه‌سازی منابع عمومی مؤثر بوده‌اند (Radmehr, Bozorg-Haddad, and Loáiciga 2022; Sakr et al. 2023).

۳.۵ طراحی ساختمان، بازسازی و شیوه‌های ساختمان سبز

در طراحی و بازسازی ساختمان‌ها، MCDM برای بهینه‌سازی نما، سیستم‌های سازه‌ای و انرژی به کار می‌رود. روش‌های MIVES و AHP-TOPSIS در بازسازی ساختمان‌های مسکونی و ارزیابی پایداری ساختمان‌های بلندمرتبه کاربرد دارند (Amorocho and Hartmann 2022; Das, Chew, and Poh 2025). 1010; Kang et al. 2024; Masih and Kar 2025). (Boix-Cots et al. 2022; Tan et al. 2024; Oguntola et al. 2025). ادغام MCDM با BIM برای تصمیم‌گیری در مراحل طراحی و ساخت، کارایی را افزایش داده است (Li et al. 2022; Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024). در بازسازی زیرساخت‌های متروکه، TOPSIS برای ارزیابی پتانسیل توسعه پایدار استفاده شده است (Ogunnusi, Salman, and Drogemuller 2024).



(Martínez, Albiñana, and Piqueras 2018; and Laing 2023).
(Paredes and Herrera 2020).

۳.۶ مدیریت منابع آب و محیط زیست

مدیریت منابع آب و مسائل زیست محیطی از حوزه‌های نوظهور کاربرد MCDM است. روش‌های فازی و هیبریدی برای تخصیص آب، مدیریت طوفان‌های شهری و انتخاب روش‌های ساخت کم‌تأثیر استفاده می‌شوند (Garai and Garg 2022; Fathi et al. 2025). WEAP با Topsis برای مدیریت بهینه منابع آب و GIS-AHP برای مکان‌یابی توسعه کم‌تأثیر (LID) (Hamaamin et al. 2025; Zarghami and Szidarovszky 2009; Bonakdari, Noori, and Morovati 2024). این کاربردها به ویژه در کشاورزی و مدیریت حوضه‌های آبریز برای مقابله با تغییرات اقلیمی مؤثر بوده‌اند (Radmehr, Bozorg-Haddad, and Loáiciga 2022). MCDM در ارزیابی تأثیرات زیست محیطی پروژه‌های عمرانی نیز نقش کلیدی دارد (Navarro et al. 2020; Zapolskytė, Burinskienė, and Trépanier 2020; Yannis et al. 2020).

۴. روندهای تحقیقاتی و پیشرفت‌های نوظهور

۴.۱ ادغام منطق فازی و مدل‌های هیبریدی MCDM

یکی از برجسته‌ترین روندهای تحقیقاتی در دهه اخیر، ادغام منطق فازی با روش‌های MCDM برای مدیریت عدم قطعیت‌های ذاتی در داده‌های مهندسی عمران است. منطق فازی، که عدم دقت قضاوت‌های کارشناسی و نوسانات پارامترها را مدل‌سازی می‌کند، در ترکیب با روش‌هایی مانند AHP، Topsis و ANP به طور گسترده‌ای توسعه یافته و دقت تصمیم‌گیری را در مسائل پیچیده افزایش داده است (Chen and Pan 2021; Wen et al. 2021; Taylan et al. 2020). Fuzzy AHP-Topsis در انتخاب مواد سبز، اولویت‌بندی نگهداری روسازی و ارزیابی پایداری اجتماعی پروژه‌های ساختمانی کاربردهای عملی موفق نشان داده‌اند (Cheng, Hu, and Wu 2025; Sahin and Aksoy 2025; Masih 2024; Raval, Sarkar, and Solanki 2025; and Kar 2025; Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024). این روند به ویژه در کشورهای در حال توسعه، جایی که داده‌های دقیق محدود است، گسترش یافته و به کاهش ریسک‌های پروژه کمک کرده است (Ouma, Opudo, and Nyambenya 2015; Jokar, Aminnejad, and Lorak 2020; Koc, Ekmekcioglu, and Işık 2023). توسعه مدل‌های هیبریدی پیشرفته‌تر مانند MTDA (modified trapezoidal DEMATEL-ANP) برای تحلیل حساسیت چندبعدی در ساخت‌های لاغر و پایدار تمرکز کرده‌اند (Shokoohi and Vosoughifar 2025). همچنین، ترکیب فازی با روش‌های نوین مانند neutrosophic sets در مدیریت منابع آب کشاورزی نتایج نوآورانه‌ای ارائه داده است (Garai and Garg 2022). این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده گذار از مدل‌های کلاسیک به رویکردهای انعطاف‌پذیرتر برای مقابله با پیچیدگی‌های واقعی پروژه‌های عمرانی است (Mardani et al. 2015; Kazimieras Zavadskas et al. 2016; Zhu, Meng, and Zhang 2021).



۴.۲ یکپارچه‌سازی GIS، BIM و هوش مصنوعی در چارچوب‌های MCDM

ادغام MCDM با فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و هوش مصنوعی (AI) یکی از روندهای رو به رشد است که تصمیم‌گیری را دقیق‌تر و فضایی‌تر کرده است. ترکیب GIS با AHP یا TOPSIS در مکان‌یابی سایت‌های ساختمانی، اولویت‌بندی نگهداری جاده‌ها و مدیریت طوفان‌های شهری کاربردهای گسترده‌ای داشته و دقت تحلیل‌های مکانی را افزایش داده است (Pathan, Agnihotri, and Patel 2022; Mallick et al. 2022; Wahba et al. 2024; Hamaamin et al. 2025; Broniewicz and Ogrodnik 2025; Nugraha, Muhidong, and Soma 2025).

BIM در ترکیب با MCDM برای تصمیم‌گیری در مراحل طراحی، انتخاب مواد و ارزیابی انرژی در ساختمان‌های هوشمند و چاپ سه‌بعدی استفاده شده و کارایی فرآیندهای ساخت را بهبود بخشیده است (Li et al. 2022; Bapat, Sarkar, and Gujar 2023; Sriram et al. 2025; Pouraghajan, Drogemuller, and Omrani 2021). Delphi-ANP-TOPSIS و یادگیری ماشین، در پیش‌بینی عملکرد زیرساخت‌ها و اولویت‌بندی نگهداری پل‌ها نقش کلیدی ایفا کرده است (Wang et al. 2023; Jaafaru and Agbelie 2022; Francis and Thomas 2023).

این یکپارچه‌سازی‌ها نه تنها دقت را افزایش می‌دهند، بلکه به تصمیم‌گیری واقعی‌زمان (real-time) در پروژه‌های بزرگ کمک می‌کنند (Anbari Moghadam and Besiktepe 2025; Kapliński and Vilutienė 2025). این یکپارچه‌سازی‌ها به احتمالاً بر ادغام blockchain با MCDM برای شفافیت در زنجیره تأمین ساختمانی تمرکز خواهد داشت (Raval, Sarkar, and Solanki 2025).

۴.۳ تمرکز بر پایداری و ارزیابی چرخه حیات

تمرکز فزاینده بر پایداری یکی از اصلی‌ترین روندهای تحقیقاتی MCDM در مهندسی عمران است، جایی که معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به طور یکپارچه ارزیابی می‌شوند. روش MIVES به عنوان یک چارچوب پایداری‌محور در ارزیابی ساختمان‌های صنعتی، طراحی برای مونتاژ و تولید (DfMA) و انتخاب مواد کم‌کربن برجسته شده است (Pons, De la Fuente, and Aguado 2016; Boix-Cots et al. 2022; Tan et al. 2024; Medrán, Enfedaque, and Alberti 2024; Ma et al. 2024; Theilig et al. 2024; Sabhapathy 2023).

ارزیابی چرخه حیات (LCA) در ترکیب با MCDM برای رتبه‌بندی مواد ساختمانی، مدیریت پسماند ساختمانی و ارزیابی پایداری پل‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه استفاده شده و به کاهش اثرات کربنی کمک کرده است (Navarro et al. 2020; Bakhoun and Brown 2013; Alam Bhuiyan and Hammad 2023; Soni, Das, and Kumar 2023; Past et al. 2023; Villalba Nieto, Sánchez-Garrido, and Yepes Piqueras 2024). این روند با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل همخوانی دارد و در ساختمان‌های سبز، بازسازی زیرساخت‌های متروکه و مدیریت منابع آب گسترش یافته است (Elshafei et al. 2022; Ogunnusi, Salman, and Laing 2023; Gebre, Cattrysse, and Van Orshoven 2021; Oguntona et al. 2025; Zavadskas et al. 2017). (Koc, Ekmekcioglu, and Işık 2023; Erdogan, Šaparauskas, and Turskis 2019).

۴.۴ بررسی‌های بیلیومتریک و سیستماتیک کاربردهای MCDM

بررسی‌های بیلیومتریک و سیستماتیک به عنوان ابزاری برای نقشه‌برداری روندها، روش‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی MCDM در مهندسی عمران رو به افزایش است. این بررسی‌ها کاربردهای MCDM از سال ۲۰۰۰ تا کنون را تحلیل کرده و روندهایی مانند افزایش روش‌های هیبریدی و تمرکز بر پایداری را شناسایی



کرده‌اند (Mardani et al. 2015; Jato-Espino et al. 2014; Stojčić et al. 2019; Morkūnaitė, Kalibatas, and Kalibaitienė 2019; Journal of Civil Engineering and Management Zhu, Meng, and Zhang 2021; Wen et al. 2021). در توسعه MCDM و کاربردها در مدیریت ساخت تمرکز دارند (Kapliński and Vilutienė 2025; Bruen 2021; Anbari Moghadam and Besiktepe 2025; Oguntona et al. 2025).

این مطالعات بیلیومتریک شکاف‌هایی مانند کمبود کاربرد در کشورهای در حال توسعه و نیاز به مدل‌های یکپارچه با AI را برجسته کرده‌اند (Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2014; Antucheviciene et al. 2015; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015a; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015b). همچنین، بررسی‌های سیستماتیک بر روش MIVES و کاربردهای حمل‌ونقل تأکید دارند (Boix-Cots et al. 2022; Yannis et al. 2020; Broniewicz and Ogrodnik 2025).

۴.۵ چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده در تحقیقات MCDM

علی‌رغم پیشرفت‌ها، چالش‌هایی مانند پیچیدگی محاسباتی مدل‌های هیبریدی، نیاز به داده‌های باکیفیت و کمبود استانداردسازی در انتخاب روش‌ها وجود دارد (Bruen 2021; Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2021; Zhu, Meng, and Zhang 2021). MCDM مبتنی بر هوش مصنوعی برای تصمیم‌گیری خودکار، ادغام با اینترنت اشیاء (IoT) برای نظارت واقعی‌زمان زیرساخت‌ها و تمرکز بیشتر بر تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی است (Wang et al. 2023; Jaafaru and Agbelie 2022; Lad et al. 2024; Bonakdari, Noori, and Morovati 2024).

همچنین، نیاز به مدل‌های MCDM برای اقتصاد دایره‌ای، ساخت modular و پروژه‌های هوشمند شهری احساس می‌شود (Sriram et al. 2025; Oguntona et al. 2025; Anbari Moghadam and Besiktepe 2025). تحقیقات آینده باید بر آموزش MCDM در برنامه‌های درسی مهندسی عمران و توسعه ابزارهای کاربرپسند تمرکز کند (Martínez, Albiñana, and Piqueras 2018; Paredes and Herrera 2020; Kapliński and Vilutienė 2025). این جهت‌گیری‌ها MCDM را به ابزاری ضروری برای مهندسی عمران پایدار در قرن ۲۱ تبدیل خواهند کرد (Zavadskas et al. 2017; Erdogan, Šaparauskas, and Turskis 2019).

۵. مطالعات موردی و پیاده‌سازی‌های عملی

۵.۱ مثال‌های واقعی از پروژه‌های زیرساختی

مطالعات موردی متعددی نشان‌دهنده کاربرد موفق MCDM در پروژه‌های واقعی زیرساختی هستند که نتایج عملی و قابل اندازه‌گیری ارائه داده‌اند. برای مثال، در یک پروژه بزرگراه آزادراهی در هند غربی، از MCDM برای ارزیابی شاخص‌های عملکرد کلیدی در تحویل یکپارچه پروژه (IPD) و مدل BIM استفاده شد که منجر به انتخاب بهینه پیمانکار و بهبود هماهنگی بین ذی‌نفعان گردید (Bapat, Sarkar, and Gujar 2023). در مطالعه‌ای دیگر در ایران، رویکرد هیبریدی Fuzzy AHP و Fuzzy TOPSIS برای اولویت‌بندی ریسک‌ها و انتخاب پیمانکار در پروژه آزادراه ساوه-سلفچگان به کار گرفته شد و ریسک‌های مالی و فنی را به طور قابل توجهی کاهش داد (Jokar, Aminnejad, and Lorak 2020).

در مصر، MCDM برای انتخاب پیمانکار نگهداری جاده‌ها اعمال شد و با ارزیابی معیارهایی مانند هزینه، کیفیت و زمان، کارایی نگهداری را بهبود بخشید (Fawzy et al. 2024). در نیوزیلند، فرآیند AHP برای شناسایی معیارهای حیاتی ارزیابی مواد پایدار در پروژه‌های ساختمانی استفاده شد که به انتخاب مواد



کم کربن و سازگار با محیط زیست منجر گردید. (Qian, Siriwardana, and Shahzad 2024). همچنین، در یک پروژه پل در استرالیا، مدل-Entropy-TOPSIS برای تصمیم‌گیری در ساخت بتن اعمال شد و پایداری سازه‌ای را با هزینه‌های بهینه ترکیب کرد (Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024). (2024) در اتیوپی، مدل MCDM چندمرحله‌ای برای انتخاب مواد ساختمان‌های بلندمرتبه در آدیس آبابا توسعه یافت که معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را یکپارچه کرد. (Worku 2024) این موارد نشان می‌دهند که MCDM نه تنها در مقیاس آزمایشگاهی، بلکه در پروژه‌های واقعی بزرگ، به کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت کمک کرده است. (ElMarkaby et al. 2023; Khorasani Nejad, Rashidi, and Mousavi 2025; Nejad, Mousavi, and Rashidi 2024).

۵.۲ درس‌های آموخته‌شده از کاربردهای MCDM در زمینه‌های متنوع

درس‌های آموخته‌شده از کاربردهای متنوع MCDM تأکید دارند که موفقیت این روش‌ها به کیفیت داده‌های ورودی، مشارکت ذی‌نفعان و انتخاب روش مناسب بستگی دارد. در پروژه‌های نگهداری پل در ایالات متحده و کانادا، ترکیب MCDM با یادگیری ماشین و بهینه‌سازی تکاملی نشان داد که پیش‌بینی دقیق‌تر تاب‌آوری پل‌ها ممکن است، اما نیاز به داده‌های تاریخی با کیفیت احساس می‌شود. (Jaafaru and Agbelie 2022; Lad et al. 2024; Mohamadiazar, Ebrahimian, and Azizinamini 2024; Patel et al. 2020). (2020). FAHP برای تعیین بهترین گزینه دفع استفاده شد و درس کلیدی آن، اهمیت در نظر گرفتن معیارهای اجتماعی کنار زیست‌محیطی بود (Past et al. 2023).

در پروژه‌های ساختمان سبز در کشورهای اروپایی و آسیایی، روش MIVES درس آموخته‌ای مبنی بر یکپارچه‌سازی ارزیابی چرخه حیات با تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه داد که پایداری بلندمدت را تضمین می‌کند. (Boix-Cots et al. 2022; Medrán, Enfedaque, and Alberti 2024; Tan et al. 2024; Theilig et al. 2024). در مدیریت منابع آب، ترکیب WEAP با TOPSIS در مطالعات موردی نشان داد که مشارکت محلی در تعیین وزن معیارها، پذیرش تصمیمات را افزایش می‌دهد. (Fathi et al. 2025; Radmehr, Bozorg-Haddad, and Loáiciga 2022). در کشورهای در حال توسعه مانند نیجریه و اندونزی، کاربرد TOPSIS و AHP-GIS برای بازسازی زیرساخت‌های متروکه و نگهداری جاده‌ها درس آموخته‌ای در مورد محدودیت داده‌ها ارائه داد و پیشنهاد کرد که مدل‌های فازی برای چنین زمینه‌هایی مناسب‌تر هستند. (Ogunnusi, Salman, and Laing 2023; Nugraha, Muhidong, and Soma 2025).

در پروژه‌های پس از بلایا، MCDM یکپارچه برای اولویت‌بندی بازسازی درس مهمی در مورد سرعت تصمیم‌گیری ارائه داد، جایی که روش‌های ساده‌تر مانند AHP نسبت به مدل‌های پیچیده هیبریدی ترجیح داده می‌شوند. (Mohammadnazari et al. 2022). همچنین، در ادغام BIM و blockchain، مطالعات موردی نشان دادند که MCDM می‌تواند شفافیت زنجیره تأمین را افزایش دهد، اما نیاز به آموزش نیروی کار دارد. (Raval, Sarkar, and Solanki 2025; Sriram et al. 2025). در کل، درس‌های مشترک شامل حساسیت به زمینه فرهنگی-اقتصادی، نیاز به اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های واقعی و اهمیت ترکیب MCDM با فناوری‌های دیجیتال برای نتایج پایدار است. (Issa, Miky, and Abdel-Malak 2019; Hjort and De Souza Nazareth Giorgi 2024; Francis and Thomas 2023; Macchiaroli, Dolores, and De Mare 2023; Bruen 2021).

این مطالعات موردی نه تنها اثبات‌کننده کارایی MCDM هستند، بلکه راهنمایی عملی برای مهندسان و مدیران پروژه ارائه می‌دهند تا از اشتباهات رایج اجتناب کنند و بهترین شیوه‌ها را اتخاذ نمایند. (Kabir, Sadiq, and Tesfamariam 2014; Zhu, Meng, and Zhang 2021; Anbari Moghadam 2025; Oguntona et al. 2025; Besiktepe 2025).



۶. بحث و پیامدها

۶.۱ نقاط قوت و محدودیت‌های MCDM در مهندسی عمران

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) نقاط قوت متعددی در مهندسی عمران دارند که آن‌ها را به ابزاری ضروری تبدیل کرده است. یکی از اصلی‌ترین نقاط قوت، قابلیت یکپارچه‌سازی معیارهای متنوع و گاهی متعارض مانند هزینه، پایداری زیست‌محیطی، ایمنی و عملکرد فنی است که تصمیم‌گیری را سیستماتیک و شفاف می‌سازد (Zhang 2021). این روش‌ها به ویژه در مدیریت عدم قطعیت، با استفاده از رویکردهای فازی و هیبریدی، عملکرد بالایی نشان داده‌اند و به کاهش ریسک‌های پروژه کمک کرده‌اند (Chen and Pan 2021; Wen et al. 2021; Taylan et al. 2014; Mardani et al. 2015). همچنین، قابلیت ادغام با فناوری‌های نوین مانند GIS، BIM و هوش مصنوعی، دقت و کارایی MCDM را در پروژه‌های پیچیده افزایش داده و نتایج عملی‌تری ارائه می‌دهد (Wang et al. 2023; Pathan, Agnihotri, and Patel 2022; Li et al. 2022; Francis and Thomas 2023; Anbari Moghadam and Besiktepe 2025).

با این حال، MCDM محدودیت‌هایی نیز دارد که نباید نادیده گرفته شوند. پیچیدگی محاسباتی مدل‌های هیبریدی و پیشرفته، به ویژه در پروژه‌های بزرگ با معیارهای متعدد، می‌تواند زمان‌بر باشد و نیاز به نرم‌افزارهای تخصصی داشته باشد (Bruen 2021; Kapliński and Vilutienė 2025; Kazimieras 2016). Zavadskas et al. (2016) وابستگی به قضاوت‌های کارشناسی در روش‌هایی مانند AHP، خطر ابساز ذهنی را افزایش می‌دهد و نرخ ناسازگاری بالا می‌تواند اعتبار نتایج را زیر سؤال ببرد (Al-Harbi 2001; Zayed, Amer, and Pan 2008; Nilashi et al. 2015). همچنین، در مسائل بسیار پویا مانند مدیریت بحران‌های واقعی زمان، مدل‌های MCDM سنتی ممکن است انعطاف‌پذیری کافی نداشته باشند (Jaafaru and Agbelie 2022; Mohammadnazari et al. 2022).

۶.۲ توصیه‌های سیاستی برای متخصصان

برای بهره‌برداری حداکثری از MCDM، توصیه‌های سیاستی مشخصی برای مهندسان، مدیران پروژه و سیاست‌گذاران قابل ارائه است. ابتدا، ادغام MCDM در مراحل اولیه برنامه‌ریزی پروژه‌ها، مانند مطالعات امکان‌سنجی و طراحی مفهومی، ضروری است تا تصمیمات پایدارتر اتخاذ شود (Erdogan, Šaparauskas, and Turskis 2019; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015a; Pons, De la Fuente, and Aguado 2016). باید آموزش‌های مداوم در روش‌های هیبریدی و ابزارهای نرم‌افزاری مانند Super Decisions یا Expert Choice دریافت کنند تا پیچیدگی‌ها را مدیریت نمایند (Kapliński and Vilutienė 2025; Martínez, Albiñana, and Piqueras 2018; Paredes and Herrera 2020).

در سطح سازمانی، توسعه دستورالعمل‌های استاندارد برای انتخاب روش MCDM بر اساس نوع پروژه (مانند استفاده از TOPSIS برای مسائل ساده و ANP برای مسائل پیچیده) توصیه می‌شود (Jato-Espino et al. 2014; Wen et al. 2021; Bruen 2021). داده‌های باکیفیت و پایگاه‌های داده ملی برای زیرساخت‌ها را اولویت دهند تا محدودیت‌های داده‌ای کاهش یابد (Dabous et al. 2020; Allah Bukhsh, and Doree 2020; Oguntona et al. 2025). همچنین، تشویق به استفاده از MCDM در پروژه‌های عمومی از طریق الزامات مناقصه، می‌تواند پایداری و کارایی را افزایش دهد (Macchiaroli, Dolores, and De Mare 2023; Bošnjak and Jajac 2023; Koc, Ekmekcioglu, and De Mare 2023).



(Işık and 2023) and در نهایت، همکاری بین صنعت و دانشگاه برای اعتبارسنجی مدل‌ها در پروژه‌های واقعی پیشنهاد می‌شود تا شکاف بین تئوری و عمل کاهش یابد (Anbari Moghadam and Besiktepe 2025; Hjort and De Souza Nazareth Giorgi 2024; Issa, Miky, and Abdel-Malak 2019).

۶.۳ فرصت‌های همکاری بین‌رشته‌ای

MCDM فرصت‌های گسترده‌ای برای همکاری بین‌رشته‌ای ارائه می‌دهد که می‌تواند نوآوری در مهندسی عمران را تسریع کند. ادغام با رشته‌های علوم داده و هوش مصنوعی، توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و خودکار تصمیم‌گیری را ممکن می‌سازد، مانند ترکیب MCDM با یادگیری ماشین برای نگهداری پیش‌بینی‌کننده زیرساخت‌ها (Wang et al. 2023; Jaafaru and Agbelie 2022; Sriram et al. 2025; Bonakdari, Noori, and Morovati 2024). همکاری با متخصصان محیط زیست و علوم پایداری، تقویت ارزیابی‌های چرخه حیات و شاخص‌های اقتصاد دایره‌ای را تسهیل می‌کند (Navarro et al. 2020; Theilig et al. 2024; Soni, Das, and Kumar 2023; Villalba Nieto, Sánchez-Garrido, and Yepes Piqueras 2024). در حوزه فناوری‌های دیجیتال، همکاری با مهندسان نرم‌افزار برای توسعه اپلیکیشن‌های کاربرپسند MCDM مبتنی بر BIM و GIS، دسترسی متخصصان عمران را افزایش می‌دهد (Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024; Mallick et al. 2022; Raval, Sarkar, and Solanki 2025). همچنین، همکاری با اقتصاددانان و جامعه‌شناسان برای در نظر گرفتن معیارهای اجتماعی و اقتصادی در مدل‌ها، تصمیم‌گیری‌های فراگیرتر ایجاد می‌کند (Masih 2023; Gebre, Catrysse, and Van Orshoven 2021; Past et al. 2023). توسعه یافته و در حال توسعه می‌تواند انتقال دانش در کاربرد MCDM برای مسائل محلی مانند مدیریت منابع آب در مناطق خشک را تقویت کند (Radmehr, 2025; Fathi et al. 2025; Garai and Garg 2022; Bozorg-Haddad, and Loaiciga 2022). این همکاری‌ها نه تنها چالش‌های فعلی را حل می‌کنند، بلکه به ایجاد استانداردهای جهانی برای مهندسی عمران پایدار کمک خواهند کرد (Zavadskas et al. 2017; Antucheviciene et al. 2015; Yannis et al. 2020; Broniewicz and Ogrodnik 2025).

۷. نتیجه‌گیری

۷.۱ خلاصه یافته‌های کلیدی

این مقاله به بررسی جامع تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) کاربردی در مهندسی عمران پرداخت و روش‌ها، حوزه‌های کاربرد و روندهای تحقیقاتی آن را تحلیل کرد. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند که روش‌های AHP، TOPSIS و رویکردهای هیبریدی فازی بیشترین کاربرد را دارند و در مدیریت عدم قطعیت و یکپارچه‌سازی معیارهای پایداری برتر هستند (Jato-Espino et al. 2014; Mardani et al. 2015; Wen et al. 2021; Kazimieras Zavadskas et al. 2016; Zhu, Meng, and Zhang 2021). منابع آب است که MCDM در آن‌ها به کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و دستیابی به اهداف پایداری کمک کرده است (Kabir, Sadiq, and 2025; Tesfamariam 2014; Zavadskas et al. 2017; Dabous et al. 2020; Anbari Moghadam and Besiktepe 2025; Oguntona et al. 2025).

روندهای نوظهور مانند ادغام GIS، BIM و هوش مصنوعی، تمرکز بر پایداری چرخه حیات و توسعه مدل‌های هیبریدی، آینده MCDM را روشن‌تر ساخته‌اند (Wang et al. 2023; Francis and Thomas 2023; Boix-Cots et al. 2022; Kapliński and Vilutienė 2025). مطالعات موردی واقعی



نیز اثبات کردند که کاربرد عملی MCDM در پروژه‌های بزرگ منجر به نتایج ملموس مانند کاهش ریسک و بهینه‌سازی منابع می‌شود (Jokar, Aminnejad, and Lorak 2020; Pouraghajan, Omrani, and Drogemuller 2024; Worku 2024; Fawzy et al. 2024).

۲.۲ سهم در حوزه

این بررسی با پوشش بیش از ۱۰۰ مقاله واقعی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، سهم قابل توجهی در ادبیات MCDM مهندسی عمران ارائه داد. برخلاف بررسی‌های قبلی که اغلب بر یک روش یا حوزه خاص تمرکز داشتند (مثل MIVES یا حمل‌ونقل)، این مقاله تصویری جامع از روش‌ها، کاربردها و روندها ارائه کرد و شکاف‌های موجود را برجسته نمود (Antucheviciene et al. 2015; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015a; Zavadskas, Antuchevičienė, and Kapliński 2015b; Bruen 2021; Stojčić et al. 2019). تمرکز بر پایداری است که می‌تواند به عنوان مرجعی برای محققان و متخصصان عمل کند (Bonakdari, Noori, and Morovati 2024; Oguntona et al. 2025; Kapliński and Vilutienė 2025).

همچنین، با تحلیل مطالعات موردی متنوع از کشورهای مختلف، پلی بین تئوری و عمل ایجاد کرد و درس‌های عملی برای پروژه‌های واقعی ارائه داد (Jaafaru and Agbelie 2022; Mohammadnazari et al. 2022; Past et al. 2023; Khorasani Nejad, Rashidi, and Mousavi 2025). مقاله به غنی‌سازی ادبیات فارسی در حوزه MCDM نیز کمک کرد و می‌تواند پایه‌ای برای تحقیقات بومی در ایران و کشورهای مشابه باشد.

۲.۳ پیشنهادها برای تحقیقات آینده

برای پیشرفت بیشتر، تحقیقات آینده باید بر چندین جهت کلیدی تمرکز کنند. ابتدا، توسعه مدل‌های MCDM یکپارچه با هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء برای تصمیم‌گیری واقعی‌زمان در نظارت زیرساخت‌ها ضروری است (Wang et al. 2023; Sriram et al. 2025; Jaafaru and Agbelie 2022; Bonakdari, Noori, and Morovati 2024). دوم، بررسی کاربرد MCDM در اقتصاد دایره‌ای، ساخت modular و پروژه‌های تاب‌آور در برابر تغییرات اقلیمی پیشنهاد می‌شود (Koc, Ekmekcioglu, and Işık 2023; Soni, Das, and Kumar 2023; Lad et al. 2024; Erdogan, Šaparauskas, and Turskis 2019).

سوم، نیاز به مطالعات تطبیقی در کشورهای در حال توسعه برای سازگاری مدل‌ها با محدودیت‌های داده‌ای و فرهنگی احساس می‌شود (Ogunnusi, Salman, and Laing 2023; Worku 2024; Oguntona et al. 2025). همچنین، توسعه ابزارهای کاربرپسند و اپلیکیشن‌های موبایل برای MCDM و ادغام آن در برنامه‌های درسی مهندسی عمران توصیه می‌گردد (Martínez, Albiñana, and Piqueras 2018; Paredes and Herrera 2020; Anbari, Moghadam, and Besiktepe 2025). در نهایت، تحقیقات بین‌رشته‌ای با تمرکز بر شاخص‌های اجتماعی و اخلاقی در تصمیم‌گیری‌های پایدار، می‌تواند MCDM را به ابزاری فراگیرتر تبدیل کند (Masih and Kar 2025; Gebre, Cattrysse, and Van Orshoven 2021; Zavadskas et al. 2017). این پیشنهادها، با توجه به روندهای فعلی، MCDM را به سمت کاربردی‌تر و پایدارتر هدایت خواهند کرد.

References

- Al-Harbi, K. M. A.-S. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19(1), 19–27.
- Alam Bhuiyan, M. M., & Hammad, A. (2023). A hybrid multi-criteria decision support system for selecting the most sustainable structural material for a multistory building construction. *Sustainability*, 15(4), Article 3128.



- Allah Bukhsh, Z., Stipanovic, I., & Doree, A. G. (2020). Multi-year maintenance planning framework using multi-attribute utility theory and genetic algorithms. *European Transport Research Review*, 12(1), Article 3.
- Alptekin, O., & Alptekin, N. (2017). Analysis of criteria influencing contractor selection using TOPSIS method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Amorocho, J. A. P., & Hartmann, T. (2022). A multi-criteria decision-making framework for residential building renovation using pairwise comparison and TOPSIS methods. *Journal of Building Engineering*, 53, Article 104596.
- Anbari Moghadam, M., & Besiktepe, D. (2025). Synthesis of multi-criteria decision-making applications in facilities management and building maintenance: Trends, methods, and future research directions. *Buildings*, 15(18), Article 3258.
- Antucheviciene, J., et al. (2015). Decision making methods and applications in civil engineering. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Babalola, O. G. (2025). Decision support system (DSS) for sustainability-oriented contractor selection in integrated project delivery (IPD).
- Bakhoun, E. S., & Brown, D. C. (2013). A hybrid approach using AHP–TOPSIS–entropy methods for sustainable ranking of structural materials. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(3), 212–224.
- Bapat, H., Sarkar, D., & Gujar, R. (2023). Application of multi-criteria decision making for evaluation of key performance indicators of integrated project delivery and BIM model for an infrastructure transportation project in Western India. *International Journal of Construction Management*, 23(12), 2077–2086.
- Belay, S., et al. (2022). AHP based multi criteria decision analysis of success factors to enhance decision making in infrastructure construction projects. *Cogent Engineering*, 9(1), Article 2043996.
- Boix-Cots, D., et al. (2022). A systematic review on MIVES: A sustainability-oriented multi-criteria decision-making method. *Building and Environment*, 223, Article 109515.
- Bonakdari, H., Noori, A., & Morovati, K. (2024). *Multicriteria decision-making analysis for civil engineering applications*. Elsevier.
- Bošnjak, A., & Jajac, N. (2023). Determining priorities in infrastructure management using multicriteria decision analysis. *Sustainability*, 15(20), Article 14953.
- Brauers, W. K. M. (2008). Multi-objective contractor's ranking by applying the MOORA method. *Journal of Business Economics and Management*, 4, 245–255.
- Brauers, W. K. M., et al. (2008). Multi-objective decision-making for road design. *Transport*, 23(3), 183–193.
- Broniewicz, E., & Ogrodnik, K. (2025). Application potential of MCDM/MCDA methods in transport—Literature review and case study. *Sustainability*, 17(17), Article 7671.
- Bruen, M. (2021). Uptake and dissemination of multi-criteria decision support methods in civil engineering—lessons from the literature. *Applied Sciences*, 11(7), Article 2940.
- Cabral, M. R., & Blanchet, P. (2023). Analytical hierarchical process as a multicriteria decision tool in material selection for prefabricated wood buildings. *Buildings*, 13(12), Article 2973.
- Cai, J., et al. (2023). Contractor selection for green buildings based on the fuzzy Kano model and TOPSIS: A developer satisfaction perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(10), 5073–5108.
- Cengiz, A. E., et al. (2017). A multi-criteria decision model for construction material supplier selection. *Procedia Engineering*, 196, 294–301.
- Chen, L., & Pan, W. (2021). Review fuzzy multi-criteria decision-making in construction management using a network approach. *Applied Soft Computing*, 102, Article 107103.



- 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*, 15(6), Article 129.
- Dabous, S. A., et al. (2020). Sustainability-informed multi-criteria decision support framework for ranking and prioritization of pavement sections. *Journal of Cleaner Production*, 244, Article 118755.
- Das, R., & Nakano, M. (2023). A multi-criteria decision-making model using socio-technical attributes for transportation bridge maintenance prioritisation. *International Journal of Construction Management*, 23(4), 579–585.
- Das, S., Chew, M. Y. L., & Poh, K. L. (2010). Multi-criteria decision analysis in building maintainability using analytical hierarchy process. *Construction Management and Economics*, 28(10), 1043–1056.
- Ebrahimian, A., et al. (2015). Urban stormwater construction method selection using a hybrid multi-criteria approach. *Automation in Construction*, 58, 118–128.
- ElMarkaby, A., et al. (2023). Multi-criteria decision support system for bridge construction system selection utilizing value engineering and TOPSIS. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), Article 295.
- Elshafei, G., et al. (2022). Opportunities for using analytical hierarchy process in green building optimization. *Energies*, 15(12), Article 4490.
- Erdogan, S. A., Šaparauskas, J., & Turskis, Z. (2019). A multi-criteria decision-making model to choose the best option for sustainable construction management. *Sustainability*, 11(8), Article 2239.
- Eshtehardian, E., Ghodousi, P., & Bejanpour, A. (2013). Using ANP and AHP for the supplier selection in the construction and civil engineering companies; Case study of Iranian company. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(2), 262–270.
- Fallahpour, A., et al. (2020). A fuzzy decision support system for sustainable construction project selection: An integrated FPP-FIS model. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(3), 247–258.
- Fathi, S., et al. (2025). A multi-criteria framework for water resource management: Combining WEAP and TOPSIS for optimal solutions. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, 2(1), 10–22.
- Fawzy, M. M., et al. (2024). Contractor selection by using multi-criteria decision-making for Egyptian road maintenance. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 15(6), 2351–2365.
- Francis, A., & Thomas, A. (2023). System dynamics modelling coupled with multi-criteria decision-making (MCDM) for sustainability-related policy analysis and decision-making in the built environment. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(3), 534–564.
- Garai, T., & Garg, H. (2022). Multi-criteria decision making of water resource management problem (in agriculture field, Purulia district) based on possibility measures under generalized single valued non-linear bipolar neutrosophic environment. *Expert Systems with Applications*, 205, Article 117715.
- Gebre, S. L., Cattrysse, D., & Van Orshoven, J. (2021). Multi-criteria decision-making methods to address water allocation problems: A systematic review. *Water*, 13(2), Article 125.
- Gilani, G. (2020). MCDM approach for assessing the sustainability of buildings' facades.
- Gilani, G., Pons, O., & de la Fuente, A. (2022). Sustainability-oriented approach to assist decision makers in building facade management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(1), Article 04021182.
- Hamaamin, F. A., et al. (2025). Optimizing low-impact development placement for urban stormwater management using GIS-based BMPs and AHP modeling. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, 2(2), 107–120.
- Hjort, J., & De Souza Nazareth Giorgi, R. (2024). Multi-criteria decision analysis as a supporting tool for decision-making in construction projects.



- Issa, U. H., Miky, Y. H., & Abdel-Malak, F. F. (2019). A decision support model for civil engineering projects based on multi-criteria and various data. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(2), 100–113.
- Jaafaru, H., & Agbelie, B. (2022). Bridge maintenance planning framework using machine learning, multi-attribute utility theory and evolutionary optimization models. *Automation in Construction*, 141, Article 104460.
- Jato-Espino, D., et al. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162.
- Jokar, E., Aminnejad, B., & Lorak, A. (2020). Risk prioritization and selection of contractor participating in public-private partnership (PPP) infrastructure project using hybrid fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS (case study: Saveh-Salafchegan freeway project). *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 3(1), 1–16.
- Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9), 1176–1210.
- Kang, D., et al. (2024). Deriving the importance of defects in multi-unit residential buildings using the analytic hierarchy process method. *Buildings*, 14(12), Article 4028.
- Kapliński, O., & Vilitienė, T. (2025). Journal of Civil Engineering and Management: Contribution to development and application of MCDM methods in construction management. *Journal of Civil Engineering and Management*, 31(3), 281–298.
- Kazimieras Zavadskas, E., et al. (2016). Hybrid multiple criteria decision making methods: A review of applications in engineering. *Scientia Iranica*, 23(1), 1–20.
- Khorasani Nejad, M., Rashidi, M., & Mousavi, V. (2025). Application of hybrid MCDA tools for constructability review in infrastructure projects: A bridge case study. *Applied Sciences*, 15(7), Article 3923.
- Koc, K., Ekmekcioglu, Ö., & Işık, Z. (2023). Developing a hybrid fuzzy decision-making model for sustainable circular contractor selection. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(10), Article 04023095.
- Lad, V. H., et al. (2024). Prioritisation of bridge for improving its resilience using multi-criteria decision-making techniques. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(7), 2952–2976.
- Lee, D., et al. (2020). Analytic hierarchy process-based construction material selection for performance improvement of building construction: The case of a concrete system form. *Materials*, 13(7), Article 1738.
- Lee, D., et al. (2021). Analytic hierarchy process-based construction material selection for performance improvement of. *Innovative Materials for Construction*, 109.
- Li, K., et al. (2022). Development path of construction industry internet platform: An AHP–TOPSIS integrated approach. *Buildings*, 12(4), Article 441.
- Liu, Y., et al. (2024). Multi-criteria decision-making framework (AHP-TOPSIS): Pavement preventive maintenance case study for ordinary national trunk highways. *Buildings*, 14(10), Article 3048.
- Ma, J., et al. (2024). A multi-criteria decision-making approach for assessing the sustainability of an innovative pin-connected structural system. *Buildings*, 14(7), Article 2221.
- Macchiaroli, M., Dolores, L., & De Mare, G. (2023). Multicriteria decision making and water infrastructure: An application of the analytic hierarchy process for a sustainable ranking of investments. *Applied Sciences*, 13(14), Article 8284.
- Maleki, B. (2023). MCDM approach for sustainability assessment of high-rise residential buildings.
- Mallick, J., et al. (2022). GIS-based decision support system for safe and sustainable building construction site in a mountainous region. *Sustainability*, 14(2), Article 888.
- Mardani, A., et al. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571.



- Martínez, I. N., Martí Albiñana, J. V., & Yepes Piqueras, V. (2018). Multi-criteria decision making techniques in civil engineering education for sustainability. *ICERI2018 Proceedings*.
- Marzouk, M., & Sabbah, M. (2021). AHP-TOPSIS social sustainability approach for selecting supplier in construction supply chain. *Cleaner Environmental Systems*, 2, Article 100034.
- Masih, S., & Kar, S. (2025). Assessing social sustainability for multimodal activities in construction: An FAHP-TOPSIS approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(12), Article 04025210.
- Medrán, F., Enfedaque, A., & Alberti, M. G. (2024). A sustainability assessment of industrialised housing construction using the MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible)-based multicriteria decision-making method. *Buildings*, 14(9), Article 2712.
- Mohamadiazar, N., Ebrahimian, A., & Azizinamini, A. (2024). Equitable prioritization of bridge rehabilitation projects using a spatial multi-criteria decision support framework. *Transportation Research Record*, 2678(12), 2059–2076.
- Mohammadnazari, Z., et al. (2022). Prioritizing post-disaster reconstruction projects using an integrated multi-criteria decision-making approach: A case study. *Buildings*, 12(2), Article 136.
- Morkūnaitė, Ž., Kalibatas, D., & Kalibatiene, D. (2019). A bibliometric data analysis of multi-criteria decision making methods in heritage buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(2), 76–99.
- Naghizadeh Vardin, A., et al. (2021). An integrated decision support model based on BWM and fuzzy-VIKOR techniques for contractor selection in construction projects. *Sustainability*, 13(12), Article 6933.
- Naji, K. K., Gunduz, M., & Falamarzi, M. H. (2022). Assessment of construction project contractor selection success factors considering their interconnections. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(9), 3677–3690.
- Nassar, K., Thabet, W., & Beliveau, Y. (2003). A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. *Automation in Construction*, 12(5), 543–560.
- Nassereddine, M., & Eskandari, H. (2017). An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 106, 427–439.
- Navarro, I. J., et al. (2020). Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: A review.
- Nejad, M. K., Mousavi, V., & Rashidi, M. (2024). A constructability assessment model based on multi-criteria decision analysis (MCDA) for infrastructure projects. *International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*.
- Nilashi, M., et al. (2015). MCPCM: A DEMATEL-ANP-based multi-criteria decision-making approach to evaluate the critical success factors in construction projects. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 343–361.
- Nugraha, M. A., Muhidong, J., & Soma, A. (2025). Multi-criteria decision-making in road maintenance: An AHP-GIS approach. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 17(3).
- Oguntona, O. A., et al. (2025). Current trends and future research roadmap of multi-criteria decision-making in sustainable construction studies. *Journal of Innovations and Sustainability*, 9(1), Article 12.
- Ogunnusi, M., Salman, H., & Laing, R. (2023). TOPSIS analysis for sustainable redevelopment potential of abandoned infrastructure in Nigeria. *Built Environment Project and Asset Management*, 13(1), 73–88.
- Ouma, Y. O., Opudo, J., & Nyambenya, S. (2015). Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for road pavement maintenance prioritization: Methodological exposition and case study. *Advances in Civil Engineering*, 2015(1), Article 140189.
- Paredes, G., & Herrera, R. F. (2020). Teaching multi-criteria decision making based on sustainability factors applied to road projects. *Sustainability*, 12(21), Article 8930.



- Past, V., et al. (2023). Management of the construction and demolition waste (CDW) and determination of the best disposal alternative by FAHP (fuzzy analytic hierarchy process): A case study of Tehran, Iran. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(4), 271–284.
- Patel, D. A., et al. (2020). Development of bridge resilience index using multicriteria decision-making techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 25(10), Article 04020090.
- Pathan, A. I., Agnihotri, P. G., & Patel, D. (2022). Integrated approach of AHP and TOPSIS (MCDM) techniques with GIS for dam site suitability mapping: A case study of Navsari City, Gujarat, India. *Environmental Earth Sciences*, 81(18), Article 443.
- Pham, V. H. S., Dau, T. D., & Tran, L. A. (2024). Application of multi-criteria analysis in the selection of formwork material for high-rise building construction projects. *Cogent Engineering*, 11(1), Article 2367121.
- Pons, O., De la Fuente, A., & Aguado, A. (2016). The use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications. *Sustainability*, 8(5), Article 460.
- Pouraghajan, M., Drogemuller, R., & Omrani, S. (2021). Reviewing technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) to support decision support system development in the construction industry. In *Proc. of the Conference CIB W78*.
- Pouraghajan, M., Omrani, S., & Drogemuller, R. (2024). Enhancing decision-making in Australian concrete construction: A decision support model using an Entropy-TOPSIS approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Prasiwinigrum, E., et al. (n.d.). Electre method decision support system for concrete type selection in building structures.
- Putri, C. G., & Nusraningrum, D. (2022). Subcontractors selection of building construction project using analytical hierarchy process (AHP) and technique for others reference by similarity (TOPSIS) methods. *Jurnal Manajemen Teori dan Terapan*, 15(2).
- Qian, J., Siriwardana, C., & Shahzad, W. (2024). Identifying critical criteria on assessment of sustainable materials for construction projects in New Zealand through the analytic hierarchy process (AHP) approach. *Buildings*, 14(12), Article 3854.
- Qiu, S., et al. (2016). A data-driven method for comprehensive pavement-condition ranking. *Journal of Infrastructure Systems*, 22(2), Article 04015024.
- Radmehr, A., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2022). Integrated strategic planning and multi-criteria decision-making framework with its application to agricultural water management. *Scientific Reports*, 12(1), Article 8406.
- Raval, P., Sarkar, D., & Solanki, A. (2025). A comparative analysis of the application of fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS methods for integrated building information modelling (BIM) and blockchain adoption in the construction sector. *International Journal of Construction Management*, 1–24.
- Redd, L. S., et al. (2024). Selection of building materials using fuzz analytical hierarch process.
- Rezaiean, A., & Hoseini, S. A. (2015). Selecting the optimal building system using multiple criteria decision making emphasising on three methods of TOPSIS, SAW, AHP.
- Sabhpathy, U. (2023). MIVES technique for sustainability assessment in architecture and civil engineering industries. *IIRJET*, 9(2).
- Sahin, O., & Aksoy, B. (2025). A combined AHP–TOPSIS-based decision support system for highway pavement type selection. *Sustainability*, 17, Article 9396.



- Sakr, A. M., et al. (2023). An integrated approach of travel demand modeling and decision-making tools for the assessment of transportation projects. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 149(10), Article 03123003.
- Salomão, Í. L., & Pinheiro, P. R. (2023). Multicriteria evaluation of reinforced concrete slabs using analytical hierarchy process. *Computer Science On-line Conference*.
- Shokoohi, F., & Vosoughifar, H. (2025). Multi-dimensional sensitivity analysis of lean and sustainable construction: A novel modified trapezoidal DEMATEL–ANP (MTDA) approach for integrated project management. *International Journal of Construction Management*, 1–19.
- Soltanikarbaschi, N., & Hammad, A. (2021). An integrated AHP-TOPSIS methodology for selecting suitable project delivery method for construction projects. *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference*.
- Soni, A., Das, P. K., & Kumar, S. (2023). Selection of waste plastics for incorporation in agro-waste as sustainable building construction materials concerning circular economy: An integrated MCDM approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(9), 2929–2949.
- Sriram, A. G., et al. (2025). MCDM approaches in BIM-driven decision-making models in enhancing energy efficiency for sustainable 3D-printed infrastructure in the construction industry. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(6), Article e70121.
- Stojčić, M., et al. (2019). Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 11(3), Article 350.
- Tamošaitienė, J., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2013). Multi-criteria risk assessment of a construction project. *Procedia Computer Science*, 17, 129–133.
- Tan, T. A. N., et al. (2024). MIVES multi-criteria framework to sustainability index of design for manufacture and assembly. *Journal of Civil Engineering and Management*, 30(3), 234–247.
- Taylan, O., et al. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. *Applied Soft Computing*, 17, 105–116.
- Theilig, K., et al. (2024). Life cycle assessment and multi-criteria decision-making for sustainable building parts: Criteria, methods, and application. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(11), 1965–1991.
- Tran, V. H., & Yan, H. (2021). Construction contractor selection by using AHP combined with TOPSIS. *International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*.
- Villalba Nieto, P. X., Sánchez-Garrido, A. J., & Yepes Piqueras, V. (2024). A review of multi-criteria decision-making methods for building assessment, selection, and retrofit.
- Villegas-Flores, N., et al. (2023). A multi-criteria analysis for decision-making in the selection of an asphalt mixture on pavements. *Tecnura*, 27(75), 89–112.
- Wahba, D., et al. (2024). Optimizing site selection for construction: Integrating GIS modeling, geophysical, geotechnical, and geomorphological data using the analytic hierarchy process. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1), Article 3.
- Wang, K., et al. (2023). Investigating the role of artificial intelligence technologies in the construction industry using a Delphi-ANP-TOPSIS hybrid MCDM concept under a fuzzy environment. *Sustainability*, 15(15), Article 11848.
- Wen, Z., et al. (2021). Applications of fuzzy multiple criteria decision making methods in civil engineering: A state-of-the-art survey. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 358–371.
- Worku, T. T. (2024). Multi-steps integrated mathematical MCDM model for construction material selection of Addis Ababa high-rise building infrastructure. *Urban, Planning and Transport Research*, 12(1), Article 2329201.



- Yannis, G., et al. (2020). State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(4), 413–431.
- YARDIMCI, Y., & ERBİL, Y. (n.d.). Integration of multi criteria decision-making approaches with life cycle assessment: A systematic and bibliometric analysis for sustainable material selection. *ARCHITECTURAL EPISODES* 03, 110.
- Yildiz, S., & Güneş, S. (2025). Establishing a model for the selection of building materials: An application for roof coverings. *International Journal of Construction Management*, 1–16.
- Yıldız, S., & Güneş, S. (2024). Determination of the importance level of basic criteria in building construction with AHP and FAHP methods. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 9(2), 908–927.
- Zapolskytė, S., Burinskienė, M., & Trépanier, M. (2020). Evaluation criteria of smart city mobility system using MCDM method. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(4), 196–224.
- Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2009). Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(3), 329–339.
- Zavadskas, E. K., Antuchevičienė, J., & Kapliński, O. (2015a). Multi-criteria decision making in civil engineering. Part II–applications. *Engineering Structures and Technologies*, 7(4), 151–167.
- Zavadskas, E. K., Antuchevičienė, J., & Kapliński, O. (2015b). Multi-criteria decision making in civil engineering: Part I–a state-of-the-art survey. *Engineering Structures and Technologies*, 7(3), 103–113.
- Zavadskas, E. K., et al. (2017). Sustainable decision-making in civil engineering, construction and building technology. *Sustainability*, 10(1), Article 14.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamošaitienė, J. (2008). Contractor selection of construction in a competitive environment. *Journal of Business Economics and Management*, 9(3), 181–187.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamošaitienė, J. (2010). Risk assessment of construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(1), 33–46.
- Zavadskas, E. K., et al. (2010). Contractor selection for construction works by applying SAW-G and TOPSIS grey techniques. *Journal of Business Economics and Management*, 11(1), 34–55.
- Zayed, T., Amer, M., & Pan, J. (2008). Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. *International Journal of Project Management*, 26(4), 408–419.
- Zhu, X., Meng, X., & Zhang, M. (2021). Application of multiple criteria decision making methods in construction: A systematic literature review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 372–403.