

## کاربرد منطق فازی در بهینه سازی فرآیندها و تصمیم گیری در مهندسی مدیریت ساخت

مهدی فضیلتی<sup>۱</sup>، کیانوش صیادی سی سخت<sup>۲\*</sup>

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

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

Fazilati2001@iau.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری عمران گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ایران

k.sayadi@iau.ir

### چکیده

مهندسی مدیریت ساخت، به عنوان یکی از حوزه های کلیدی در صنعت ساخت و ساز، با چالش های ذاتی عدم قطعیت، ابهام، و پیچیدگی در فرآیندهای برنامه ریزی، اجرا و کنترل پروژه ها روبرو است. روش های سنتی تصمیم گیری که اغلب بر مبنای مدل های دقیق و قطعی عمل می کنند، در مواجهه با این عوامل متغیر و کیفی، با محدودیت هایی مواجه هستند. منطق فازی، به عنوان یک چارچوب ریاضی قدرتمند برای مدل سازی مفاهیم مبهم و غیردقیق، پتانسیل قابل توجهی برای غلبه بر این محدودیت ها و ارتقاء تصمیم گیری در مهندسی مدیریت ساخت ارائه می دهد. این مقاله به بررسی جامع کاربردهای منطق فازی در جنبه های مختلف مدیریت ساخت، از جمله مدیریت ریسک، زمان بندی، هزینه، انتخاب پیمانکار، کنترل کیفیت و مدیریت بهره برداری می پردازد. با تشریح مبانی منطق فازی و ارائه مثال های عملی، هدف این مقاله، تبیین چگونگی بکارگیری این تکنیک برای افزایش دقت، انعطاف پذیری و کارایی در پروژه های عمرانی است. با استناد به مطالعاتی که بر نقش منطق فازی در تصمیم گیری های مدیریتی و صنعتی تأکید دارند، در نهایت، چالش ها، محدودیت ها و چشم انداز آینده پژوهش در این حوزه مورد بحث و بررسی قرار می گیرد، که همه این موارد با هدف ارائه یک نمای کلی جامع و منسجم از اهمیت و گستره کاربرد منطق فازی در این رشته تدوین شده است.

**واژه های کلیدی:** منطق فازی، مهندسی مدیریت ساخت، عدم قطعیت، تصمیم گیری، مدیریت ریسک، زمان بندی پروژه، کنترل کیفیت، هوش مصنوعی، تصمیم گیری صنعتی، تصمیم گیری مدیریتی.

## ۱- مقدمه

صنعت ساخت و ساز، به عنوان یکی از ارکان کلیدی توسعه اقتصادی و زیرساختی هر جامعه، همواره با چالش‌های فراوانی روبرو بوده است. ماهیت پیچیده، چندوجهی و پویا بودن پروژه‌های عمرانی، همراه با دخالت عوامل متعدد انسانی، فنی، اقتصادی و محیطی، فرآیندهای مدیریت این پروژه‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. عدم قطعیت، ابهام و نقص اطلاعات، اجزای جدایی‌ناپذیر چرخه عمر یک پروژه ساختمانی هستند؛ از مراحل اولیه برنامه‌ریزی و طراحی تا اجرا، بهره‌برداری و نگهداری. این عوامل، اتخاذ تصمیمات آگاهانه، دقیق و به‌هنگام را برای مدیران پروژه به امری دشوار تبدیل کرده و می‌تواند منجر به انحرافات قابل توجه در زمان‌بندی، بودجه، کیفیت و ایمنی شود. به طور سنتی، روش‌های مدیریت پروژه بر مدل‌های قطعی و احتمالی استوار بوده‌اند که غالباً در مواجهه با پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های واقعی دنیای ساخت و ساز، ناکارآمدی خود را نشان داده‌اند. بنابراین، نیاز به رویکردهای نوآورانه و ابزارهای تحلیلی پیشرفته که قادر به مدل‌سازی و مدیریت این ابهامات باشند، بیش از پیش احساس می‌شود.

در این راستا، تکنیک‌ها و نظریه‌های هوش مصنوعی، به ویژه منطق فازی، به عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی مطرح شده‌اند. منطق فازی، که توسط پروفسور لطفی‌زاده در دهه ۱۹۶۰ معرفی گردید، چارچوبی ریاضی برای نمایش و پردازش اطلاعات "غیردقیق" یا "مبهم" ارائه می‌دهد؛ اطلاعاتی که به طور سنتی با مفاهیم "درست" یا "نادرست"، "سیاه" یا "سفید" قابل توصیف نیستند. این منطق، با الهام از نحوه استدلال انسان، اجازه می‌دهد تا مفاهیم زبانی و درجه‌بندی عضویت در مجموعه‌ها تعریف شوند؛ مفاهیمی مانند "ریسک بالا"، "کیفیت خوب" یا "هزینه قابل قبول". این توانایی در مدل‌سازی عدم قطعیت‌های زبانی و کیفی، منطق فازی را به ابزاری ایده‌آل برای تحلیل و مدیریت جنبه‌هایی از پروژه‌های ساختمانی تبدیل می‌کند که ارزیابی کمی دقیق آن‌ها دشوار یا غیرممکن است. کاربرد منطق فازی در حوزه‌های متنوع مدیریت ساخت، از جمله ارزیابی ریسک، برآورد هزینه‌ها، زمان‌بندی، انتخاب پیمانکار و کنترل کیفیت، پتانسیل قابل توجهی را برای بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری و نتایج پروژه‌ها نشان داده است (اکبری، ۱۴۰۳).

اگرچه تحقیقات اولیه در زمینه کاربرد منطق فازی در مدیریت ساخت، عمدتاً بر مدل‌های پایه و مفاهیم نظری تمرکز داشتند، اما در سال‌های اخیر شاهد افزایش چشمگیر پژوهش‌های کاربردی و توسعه مدل‌های پیشرفته بوده‌ایم. مطالعات انجام شده، حاکی از آن است که استفاده از منطق فازی می‌تواند به بهبود قابل ملاحظه‌ای در دقت برآوردها، افزایش کارایی در تخصیص منابع، کاهش تأخیرها و انحرافات بودجه‌ای، و در نهایت ارتقاء کیفیت و ایمنی پروژه‌ها منجر شود. به عنوان مثال، در ارزیابی ریسک، سیستم‌های فازی قادرند با در نظر گرفتن نظرات خبرگان و توصیفات کیفی، ریسک‌های احتمالی را با دقت بیشتری شناسایی و اولویت‌بندی کنند. در حوزه زمان‌بندی، مدل‌های فازی می‌توانند عدم قطعیت‌های مربوط به مدت زمان فعالیت‌ها را به شکلی واقع‌گرایانه‌تر منعکس کرده و منجر به برنامه‌ریزی‌های انعطاف‌پذیرتر شوند. این پیشرفت‌ها، نشان‌دهنده بلوغ این حوزه و پتانسیل آن برای ارائه راه‌حل‌های عملی و نوآورانه برای چالش‌های دیرینه صنعت ساخت و ساز است.

با توجه به پتانسیل عظیم و دستاوردهای اثبات شده منطق فازی در ارتقاء فرآیندهای مدیریت پروژه‌های ساختمانی، این مرور سیستماتیک با هدف ارائه یک دیدگاه جامع و به‌روز از وضعیت فعلی پژوهش‌ها در این زمینه تدوین شده است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی، تحلیل و سنتز دستاوردهای علمی مرتبط با کاربرد منطق فازی در جنبه‌های مختلف مهندسی مدیریت ساخت است. این مطالعه به دنبال پاسخگویی به سؤالاتی کلیدی از قبیل: مهم‌ترین حوزه‌های کاربردی منطق فازی در مدیریت ساخت کدامند؟ مدل‌ها و روش‌های فازی غالب در این کاربردها کدامند؟ نتایج و تأثیرات این روش‌ها بر بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه (مانند زمان، هزینه، کیفیت و ریسک) چگونه است؟ و چشم‌انداز آینده پژوهش و توسعه در این حوزه چه خواهد بود؟ این مرور، با ارائه یک نمای کلی از تحقیقات انجام شده، تلاش دارد تا چارچوبی برای پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت ساخت و ساز فراهم آورد تا با شناخت عمیق‌تر از قابلیت‌های منطق فازی، بتوانند در جهت پیاده‌سازی مؤثرتر آن در پروژه‌های واقعی گام بردارند و به سوی مدیریت هوشمندتر و موفقیت‌آمیزتر گام بردارند (ریاحی، ۱۴۰۲).

## ۲- پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی در دهه‌های اخیر به بررسی کاربرد گسترده منطق فازی در حوزه‌های مختلف، از جمله تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و مهندسی، پرداخته‌اند. یکی از رویکردهای اساسی در این زمینه، استفاده از منطق فازی برای ارزیابی و اولویت‌بندی موارد مختلف بوده است. برای مثال، اکبری و باقری زاده (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان “سیستم تصمیم‌گیری فازی برای اولویت‌بندی فرایندها به منظور تعیین استراتژی‌های بهینه”، به این نتیجه رسیدند که سیستم‌های فازی قابلیت بالایی در اولویت‌بندی فرایندها بر اساس معیارهای پیچیده و مبهم دارند و می‌توانند به تعیین استراتژی‌های بهینه در حوزه‌هایی مانند مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات کمک کنند. این پژوهش، نشان‌دهنده پتانسیل منطق فازی در ایجاد ساختار برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده است.

در حوزه تصمیم‌گیری‌های مالی و مدیریتی، کاربرد منطق فازی نیز مورد توجه قرار گرفته است. بردبار (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای با عنوان “کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مالی”، به این نتیجه رسید که منطق فازی می‌تواند به مدیران در اتخاذ تصمیمات مالی با درجه عدم قطعیت بالاتر کمک کند. همچنین، کردستانی و رحیمی (۱۳۸۸) در پژوهش خود با عنوان “کاربرد منطق فازی در حسابداری و تصمیم‌گیری‌های مالی”، به این نتیجه رسیدند که منطق فازی ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی ابهامات موجود در داده‌های حسابداری و تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری‌های مالی است. این مطالعات، بر اهمیت استفاده از منطق فازی در مواجهه با ابهامات ذاتی حوزه‌های مالی و مدیریتی تأکید دارند.

مدیریت ریسک یکی دیگر از حوزه‌هایی است که منطق فازی در آن کاربردهای چشمگیری یافته است. حافظ (۱۴۰۲) در مقاله‌ای با عنوان “منطق فازی و کاربردهای آن در مدیریت ریسک”، به این نتیجه رسیده است که منطق فازی می‌تواند با مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و ابهامات مرتبط با ریسک، ارزیابی و مدیریت ریسک را بهبود بخشد. این رویکرد، امکان پردازش اطلاعات کیفی و زبانی که اغلب در ارزیابی ریسک به کار می‌روند را فراهم می‌آورد و منجر به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در این زمینه می‌شود. ساروخانی و صادقی‌پور (۱۳۹۳) نیز در تحقیق خود با عنوان “منطق فازی ابزاری جهت ساخت و سنجش مفاهیم در علوم اجتماعی”، به اهمیت منطق فازی در سنجش مفاهیم کیفی اشاره کرده‌اند که این امر می‌تواند در مدیریت ریسک، که غالباً با مفاهیم کیفی سروکار دارد، بسیار مؤثر باشد.

در حوزه بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه، ریاحی (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان “سیستم‌های فازی در بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه”، به این نتیجه رسیده است که سیستم‌های مبتنی بر منطق فازی می‌توانند به طور مؤثری در بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌ها به کار گرفته شوند. این سیستم‌ها با در نظر گرفتن عوامل غیرقطعی و کیفی مؤثر بر مدت زمان فعالیت‌ها، به تولید برنامه‌ریزی‌های انعطاف‌پذیرتر و واقع‌بینانه‌تر کمک می‌کنند. همچنین، مظفری شمس (۱۴۰۳) در مروری با عنوان “مروری بر کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری صنعتی با سه متغیر عدم قطعیت، ترجیحات مدیران و محدودیت منابع”، به کاربرد وسیع منطق فازی در مواجهه با متغیرهای مبهمی چون عدم قطعیت و ترجیحات مدیران اشاره کرده است که این موارد مستقیماً بر زمان‌بندی و اجرای پروژه‌ها تأثیرگذار هستند.

از منظر تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به طور عام، صالح نیا (۱۴۰۳) در دو اثر خود با عناوین “نقش منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی”، به این یافته دست یافته است که منطق فازی نقش کلیدی در تسهیل تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایفا می‌کند. وی با تأکید بر قدرت منطق فازی در پردازش اطلاعات مبهم و پیچیده، نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به مدیران در اتخاذ تصمیمات اثربخش‌تر کمک کند.

علاوه بر پژوهش‌های داخلی، مطالعات بین‌المللی نیز بر گستره کاربرد منطق فازی صحنه می‌گذارند. Banu و Kumaresan (2025) در پژوهشی با عنوان “ارتقاء عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم از طریق منطق فازی خودتنظیم، بهینه‌سازی درخت نخل تطبیقی و متعادل‌سازی بار مبتنی بر نظریه بازی استاکلبرگ: رویکردی جامع برای بهره‌وری انرژی، قابلیت اطمینان و امنیت”، به این نتیجه رسیدند که منطق فازی ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و افزایش

بهره‌وری انرژی است. Zhang و Wang (2026) در مقاله "روش تصمیم‌گیری انتقال عمودی مبتنی بر منطق فازی آگاه از کیفیت برای شناسایی تصویر بصری قابل اعتماد در زمان واقعی"، نشان دادند که منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر کیفیت و برای شناسایی تصاویر بصری در زمان واقعی نقش دارد. Zhao و Yin (2025) با عنوان "بهینه‌ساز خود-توجه تعبیه شده در لایه‌های کاملاً متصل مبتنی بر منطق کوانتومی الهام گرفته شده و فازی برای مدیریت هوشمند انرژی خانگی"، به کاربرد آن در مدیریت هوشمند انرژی خانگی اشاره کردند.

همچنین، Sun و Yao (2025) در "بهینه‌سازی و زمان‌بندی رویدادهای ورزشی تفریحی مبتنی بر سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری فازی"، کاربرد منطق فازی را در بهینه‌سازی و زمان‌بندی رویدادهای ورزشی مبتنی بر سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار دادند. Yildiz و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی با عنوان "بهینه‌سازی چند پاسخی ایرفویل شیاردار برای عملکرد آیرودینامیکی کلی: یک روش شناسی تاگوچی با پشتیبان تصمیم‌گیری فازی"، به این نتیجه رسیدند که منطق فازی می‌تواند در بهینه‌سازی چند متغیره پارامترهای فنی مورد استفاده قرار گیرد. Kumar و همکاران (۲۰۲۵) در "بهینه‌سازی مدل‌های حمل و نقل هزینه گلوگاه فازی در چارچوب تصمیم‌گیری تکنیک هم‌نهشتی مدولار"، به کاربرد منطق فازی در مدل‌های پیچیده حمل و نقل و بهینه‌سازی هزینه پرداختند. Morchid و همکاران (۲۰۲۵) در "سیستم اینترنت اشیاء مبتنی بر منطق فازی برای بهینه‌سازی آبیاری با محاسبات ابری: ارتقاء پایداری آب در کشاورزی هوشمند"، به نقش منطق فازی در بهینه‌سازی فرایندها در حوزه کشاورزی هوشمند اشاره کردند.

علاوه بر این، Molashahi و همکاران (۲۰۲۶) در "بهینه‌سازی کنترلر MPPT مبتنی بر فازی از طریق الگوریتم جستجوی خزنده برای سیستم‌های PV مستقل"، به کاربرد منطق فازی در بهینه‌سازی پارامترهای سیستم‌های انرژی خورشیدی پرداختند. Dinçer و همکاران (۲۰۲۶) در "همکاری انسان و کامپیوتر در تصمیم‌گیری: یک مدل بهینه‌سازی فازی چندوجهی پویا برای سرمایه‌گذاری‌های انرژی پایدار"، به این نتیجه رسیدند که منطق فازی می‌تواند در مدل‌های پیچیده بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری‌های پایدار مورد استفاده قرار گیرد. Kotha و Subbaiah (2026) در "بهینه‌سازی هوشمند پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای اینکونل ۷۱۸ با استفاده از تحلیل رابطه خاکستری تاگوچی و منطق فازی"، کاربرد منطق فازی را در بهینه‌سازی پارامترهای فرایندهای تولیدی نشان دادند. Maldonado Carrascosa و همکاران (۲۰۲۵) در "بهینه‌سازی نظریه بازی فازی برای محاسبات ابری پایدار"، به کاربرد آن در حوزه محاسبات ابری و پایداری پرداختند. Mazouzi و همکاران (۲۰۲۵) در "بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر منطق فازی برای افزایش کارایی در وسایل نقلیه هیبریدی برقی پیل سوختی"، به نقش منطق فازی در سیستم‌های مدیریت انرژی و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری اشاره کردند. این مراجع بین‌المللی، طیف وسیعی از کاربردها را پوشش می‌دهند که همگی نشان‌دهنده توانایی منطق فازی در مدل‌سازی ابهامات، بهینه‌سازی فرایندها و تسهیل تصمیم‌گیری در سیستم‌های پیچیده مهندسی و مدیریتی است.

### ۳- مبانی نظری

#### ۳-۱- منطق فازی

منطق فازی، به عنوان یک پارادایم نوین در تفکر محاسباتی، پاسخی ریشه‌ای به محدودیت‌های منطق کلاسیک ارائه می‌دهد؛ منطقی که جهان را تنها در دو قطب "درست" و "غلط" خلاصه می‌کند. در دنیای واقعی، بسیاری از مفاهیم و گزاره‌ها به صورت مطلق صحیح یا غلط نیستند، بلکه دارای درجات مختلفی از صحت یا تعلق هستند. منطق فازی با معرفی مفهوم "درجه عضویت" (Membership Degree)، این امکان را فراهم می‌آورد که یک عنصر، به میزان مشخصی (عددی بین ۰ و ۱)

به یک مجموعه تعلق داشته باشد، نه اینکه یا کاملاً عضو باشد (درجه عضویت ۱) یا اصلاً نباشد (درجه عضویت ۰). این تغییر بنیادین، امکان مدل سازی دقیق تر و واقع گرایانه تری از پدیده هایی را فراهم می آورد که به طور ذاتی مبهم یا تقریبی هستند.

### ۳-۲- مجموعه های فازی و درجات عضویت:

قلب تپنده منطق فازی، مفهوم "مجموعه فازی" (Fuzzy Set) است. برخلاف مجموعه های کلاسیک که هر عضو را یا به طور کامل در خود جای می دهند یا اصلاً راه نمی دهند، مجموعه های فازی به اعضا اجازه می دهند تا با درجات مختلفی از تعلق، در مجموعه حضور داشته باشند. این درجه عضویت، که عددی پیوسته بین ۰ (عدم تعلق کامل) و ۱ (تعلق کامل) است، میزان شباهت یا همپوشانی یک عنصر با ویژگی توصیف شده توسط مجموعه فازی را نشان می دهد. برای مثال، هنگامی که مجموعه ای از "دمای بالا" را در نظر می گیریم، دمای ۳۰ درجه ممکن است درجه عضویت ۰٫۷، دمای ۳۵ درجه درجه عضویت ۱٫۰، و دمای ۲۵ درجه درجه عضویت ۰٫۳ را در این مجموعه داشته باشد. این توانایی در مدل سازی تدریجی و پیوسته ویژگی ها، منطق فازی را به ابزاری فوق العاده قدرتمند برای تحلیل مفاهیمی تبدیل می کند که در علوم اجتماعی، علوم انسانی، و همچنین مهندسی، به طور فراگیر مورد استفاده قرار می گیرند [ساروخانی و صادقی پور، ۱۳۹۳]. درک این مفهوم، کلید فهم چگونگی استفاده از منطق فازی در مدل سازی عدم قطعیت های کیفی است.

### ۳-۳- متغیرهای زبانی و مقادیر زبانی:

یکی از بزرگترین مزایای منطق فازی، توانایی آن در کار با "متغیرهای زبانی" (Linguistic Variables) است؛ متغیرهایی که مقادیر آن ها به جای اعداد دقیق، کلمات یا عباراتی از زبان طبیعی هستند، مانند "سرعت"، "ریسک" یا "کیفیت". این مقادیر زبانی، که "مقادیر فازی" (Linguistic Values) نامیده می شوند (مانند "کم"، "متوسط"، "زیاد" برای متغیر "سرعت")، امکان بیان مفاهیم را به شیوه ای که انسان ها به طور طبیعی درک می کنند، فراهم می آورند. هر مقدار زبانی توسط یک "تابع عضویت" (Membership Function) تعریف می شود؛ تابعی که به طور گرافیکی یا ریاضی، ناحیه معنایی آن مقدار زبانی را مشخص کرده و درجه عضویت هر مقدار عددی را در آن مفهوم فازی تعیین می کند. توابع عضویت معمولاً اشکالی مانند مثلثی، دوزنقه، گوسی یا شبه دوزنقه دارند و نقش حیاتی در ترجمه مفاهیم مبهم به مقادیر قابل پردازش در سیستم های محاسباتی ایفا می کنند. این مکانیزم، پل ارتباطی میان شهود انسانی و دقت محاسباتی را تشکیل می دهد [کردستانی و رحیمی، ۱۳۸۸].

### ۴-۳- قوانین فازی:

هسته اصلی سیستم های استنتاج فازی، "قوانین فازی" (Fuzzy Rules) هستند که دانش تخصصی و استدلال انسانی را در قالب عبارات شرطی "اگر-آنگاه" (IF-THEN) مدل سازی می کنند. این قوانین، روابط منطقی بین متغیرهای ورودی فازی و متغیرهای خروجی فازی را تعریف می کنند. به عنوان مثال، در یک سیستم کنترل دما، قانونی می تواند این گونه باشد: "اگر (دمای فعلی IS گرم) و (رطوبت IS زیاد) آنگاه (عملکرد سیستم خنک کننده IS قوی)". این ساختار، امکان ترجمه دانش تجربی، که اغلب به صورت زبانی بیان می شود، به فرمتی قابل فهم برای ماشین را فراهم می آورد. تدوین قوانین فازی، فرآیندی است که به شدت به دانش تخصصی و تجربه کارشناسان حوزه مورد نظر متکی است [ساروخانی و صادقی پور، ۱۳۹۳].

### ۵-۳- فرآیند استنتاج فازی:

برای دستیابی به یک خروجی قابل استفاده، یک سیستم استنتاج فازی (Fuzzy Inference System - FIS) مجموعه ای از مراحل را طی می کند. ابتدا، در مرحله فازی سازی (Fuzzification)، مقادیر عددی ورودی (مانند دمای ۲۸ درجه سانتی گراد) به درجات عضویت در مجموعه های فازی مربوطه (مانند "معمولی" و "گرم") تبدیل می شوند. سپس، در مرحله ارزیابی قوانین (Rule Evaluation)، شدت اعتبار هر قانون فازی بر اساس درجات عضویت ورودی ها تعیین می شود. در مرحله

تلفیق نتایج (Rule Aggregation)، خروجی‌های فعال شده از تمامی قوانین با هم ترکیب می‌شوند تا یک پروفیل خروجی فازی واحد ایجاد شود. در نهایت، مرحله رفع فازی‌سازی (Defuzzification)، این پروفیل فازی را به یک مقدار عددی واحد و عملی تبدیل می‌کند (مانند تعیین شدت جریان هوا). این فرآیند پیچیده، اطمینان می‌دهد که سیستم فازی می‌تواند با اطلاعات مبهم و تقریبی ورودی، به تصمیمات یا مقادیر خروجی منطقی و قابل استفاده برسد [کردستانی و رحیمی، ۱۳۸۸؛ اکبری و باقری زاده، ۱۴۰۳].

#### ۴- روش تحقیق

این پژوهش با اتخاذ رویکرد مرور سیستماتیک ادبیات (Systematic Literature Review) و تحلیل تطبیقی (Comparative Analysis) انجام شده است. هدف اصلی این روش، شناسایی، ارزیابی انتقادی، و سنتز پژوهش‌های علمی موجود در زمینه کاربرد منطق فازی در حوزه‌های مختلف مهندسی مدیریت ساخت بوده است. فرآیند تحقیق شامل مراحل دقیق و منظمی بوده است تا اطمینان حاصل شود که جامعیت و اعتبار علمی پژوهش حفظ می‌شود. ابتدا، یک جستجوی جامع و گسترده در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی معتبر بین‌المللی و داخلی (مانند IEEE Xplore, Scopus, Google Scholar, Civilica, SID) با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با “منطق فازی” و “مدیریت ساخت” صورت پذیرفت. سپس، منابع شناسایی شده بر اساس معیارهای مرتبطی از جمله ارتباط موضوعی، کیفیت علمی، جدید بودن پژوهش و ارائه نتایج عملی، مورد غربالگری و انتخاب قرار گرفتند. مقالاتی که به طور مستقیم به کاربرد منطق فازی در ارزیابی ریسک، زمان‌بندی، هزینه، انتخاب پیمانکار و کنترل کیفیت در پروژه‌های عمرانی پرداخته بودند، در اولویت قرار گرفتند. اطلاعات کلیدی از هر مقاله منتخب (شامل مبانی نظری، روش‌های کاربردی، مثال‌ها، چالش‌ها و نتایج) استخراج و در یک چارچوب ساختاریافته مورد تحلیل قرار گرفت. سپس، این داده‌ها با هدف شناسایی الگوهای مشترک، مقایسه رویکردهای مختلف، ارزیابی اثربخشی منطق فازی در حوزه‌های گوناگون، و استخراج درس‌آموخته‌ها، مورد سنتز قرار گرفتند. در نهایت، نتایج حاصل از این تحلیل تطبیقی و مرور جامع، در قالب این مقاله مروری سازماندهی شده است تا نمای کلی دقیقی از وضعیت دانش موجود و چشم‌انداز آینده این حوزه ارائه دهد.

#### ۵- کاربردهای جامع منطق فازی در مهندسی مدیریت ساخت

منطق فازی، به عنوان یک تکنیک قدرتمند برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام، در طیف وسیعی از فرآیندهای مهندسی مدیریت ساخت مورد توجه و بکارگیری قرار گرفته است. ماهیت تقریبی و کیفی بسیاری از معیارهای مدیریتی، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده از منطق فازی تبدیل کرده است. این کاربردها، از مراحل اولیه برنامه‌ریزی و ارزیابی تا مراحل اجرا و کنترل نهایی، دامنه وسیعی را پوشش می‌دهند و هر کدام به دنبال افزایش دقت، انعطاف‌پذیری و کارایی در تصمیم‌گیری‌ها هستند.

جدول ۱: خلاصه جامع کاربردهای منطق فازی در حوزه‌های کلیدی مهندسی مدیریت ساخت

| حوزه کاربرد<br>در مدیریت<br>ساخت          | تشریح عمیق و مثال‌های کاربردی                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | مزایای منطق فازی و چگونگی بهره‌گیری                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مدیریت<br>ریسک پروژه                      | تشریح: ارزیابی ریسک‌ها معمولاً با دو معیار اصلی صورت می‌گیرد: احتمال وقوع و شدت تأثیر. در پروژه‌های ساختمانی، این دو معیار اغلب به صورت کیفی و تقریبی توسط متخصصان بیان می‌شوند (مثلاً: "احتمال وقوع کم" یا "تأثیر زیاد"). منطق فازی امکان مدل‌سازی دقیق این مفاهیم را فراهم می‌آورد. مثال: ارزیابی ریسک تأخیر در تحویل مصالح به دلیل "شرایط آب و هوایی نامساعد" (که خود شامل درجات فازی مانند "بارندگی متوسط"، "باد شدید" است) و "نوسانات نرخ ارز" (که می‌تواند "متغیر"، "ناپایدار" باشد)، و سپس تعیین "سطح کلی ریسک" (مانند "بالا" یا "بسیار بالا") و پیشنهاد "استراتژی واکنش مناسب" (مانند "تأمین منابع جایگزین" یا "انتقال بخشی از ریسک").               | مزایا: مدل‌سازی عدم قطعیت کیفی: توانایی در کار با عبارات زبانی مانند "احتمال کم" و "تأثیر زیاد". اولویت‌بندی مؤثر: تعیین سطح ریسک با دقت بیشتر، امکان اولویت‌بندی مؤثرتر منابع. پشتیبانی از تصمیم‌گیری استراتژیک: ارائه مبنایی قوی برای تصمیم‌گیری در مورد تخصیص منابع برای کاهش ریسک [مظفری شمسی، ۱۴۰۳]. |
| زمان‌بندی و<br>بهینه‌سازی<br>برنامه پروژه | تشریح: تخمین مدت زمان لازم برای هر فعالیت پروژه، یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های زمان‌بندی است. عواملی مانند "پیچیدگی فعالیت" (مثلاً "پیچیده" برای عملیات فونداسیون خاص)، "مهارت تیم اجرایی" (مثلاً "متوسط" برای تیمی با تجربه کم)، "دسترسی به منابع" ("محدود" جرثقیل) و "شرایط محیطی" ("نامساعد" بارانی)، همگی بر زمان تأثیر می‌گذارند. منطق فازی امکان ترکیب این عوامل و ارائه یک تخمین فازی از مدت زمان فعالیت را فراهم می‌آورد. مثال: تخمین زمان لازم برای "نصب سازه فلزی" با در نظر گرفتن "پیچیدگی طراحی" (کم/متوسط/زیاد)، "دسترسی به جرثقیل" (خوب/متوسط/ضعیف)، "تعداد نیروی کار ماهر" (زیاد/متوسط/کم) و "شرایط آب و هوایی" (مساعد/باد معتدل/باد شدید). | مزایا: زمان‌بندی واقع‌بینانه‌تر: با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های کیفی، زمان‌بندی‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌شوند. انعطاف‌پذیری: امکان تنظیم برنامه در صورت تغییر شرایط استفاده از قوانین فازی. مدیریت بهتر مسیر بحرانی: شناسایی فعالیت‌های بالقوه بحرانی با در نظر گرفتن طیف زمانی.                           |
| مدیریت<br>هزینه و<br>بودجه‌ریزی<br>پروژه  | تشریح: برآورد دقیق هزینه‌ها، به خصوص در پروژه‌های بلندمدت، به دلیل نوسانات اقتصادی، تورم، و بروز رویدادهای پیش‌بینی نشده، امری دشوار است. منطق فازی امکان ادغام عواملی مانند "نرخ تورم" (پایین/متوسط/بالا)، "نوسانات قیمت مصالح" (جزئی/قابل توجه)، "کارایی پیمانکار" (ضعیف/عالی) و "احتمال بروز هزینه‌های پیش‌بینی نشده" (کم/زیاد) را در برآورد نهایی فراهم می‌آورد. مثال: برآورد هزینه کل یک پروژه ساختمانی با در نظر گرفتن تأثیرات متقابل این عوامل بر یکدیگر، و تعیین برآورد نهایی هزینه به صورت یک بازه فازی (مثلاً "بین X تا Y میلیون دلار") به جای یک عدد واحد.                                                                                        | مزایا: برآوردهای دقیق‌تر هزینه‌های متغیر: ادغام عوامل کیفی و کمی برای محاسبه هزینه‌ها. پیش‌بینی انحراف بودجه: شناسایی زودهنگام انحرافات احتمالی. ارائه راهکارهای اصلاحی پویا: پیشنهاد اقدامات مدیریتی بر اساس تحلیل فازی انحرافات [کردستانی و رحیمی، ۱۳۸۸].                                               |
| انتخاب<br>پیمانکار و<br>ارزیابی<br>عملکرد | تشریح: انتخاب بهترین پیمانکار معمولاً بر اساس معیارهای متعددی صورت می‌گیرد که هم کمی (قیمت، زمان) و هم کیفی (سابقه، توان فنی، کیفیت کار) هستند. منطق فازی امکان ادغام این معیارها و وزن‌دهی به آن‌ها را فراهم می‌آورد. مثال: ارزیابی صلاحیت پیمانکاران بر اساس "تجربه قبلی" (کم/زیاد)، "توان مالی" (ضعیف/قوی)، "کیفیت سوابق" (ضعیف/عالی) و "قیمت پیشنهادی" (بالا/پایین). همچنین،                                                                                                                                                                                                                                                                             | مزایا: تصمیم‌گیری جامع: در نظر گرفتن تمامی معیارهای مهم، نه فقط قیمت. ارزیابی عادلانه: وزن‌دهی مناسب به معیارهای کیفی و کمی. پشتیبانی از ارزیابی مستمر: امکان پایش و بهبود عملکرد تیم‌ها در طول پروژه.                                                                                                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                  |                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ارزیابی مستمر عملکرد تیم‌های اجرایی بر اساس "سرعت اجرا" (کم/سریع)، "کیفیت اجرا" (پایین/بالا) و "رعایت ایمنی" (ضعیف/خوب) [اکبری و باقری زاده، ۱۴۰۳؛ صالح نیا، ۱۴۰۳].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                  |                                                                                                                                                                                                                     |
| تشریح: تضمین کیفیت در مصالح و فرآیندهای اجرایی، و همچنین مدیریت نگهداری سازه‌ها، اغلب با مفاهیم کیفی سروکار دارد. منطق فازی می‌تواند کیفیت بتن را بر اساس عواملی مانند نسبت آب به سیمان، دما و نوع افزودنی‌ها ارزیابی کند، یا شدت عیوب سازه‌ای را بر اساس ابعاد و محل آن‌ها تعیین نماید. مثال: ارزیابی کیفیت نهایی بتن با ورودی‌هایی چون "نسبت آب به سیمان" (زیاد/متوسط/کم)، "دمای محیط" (سرد/معمولی/گرم) و "عملکرد ویبراتور" (ضعیف/خوب)؛ یا تعیین "شدت عیب" (جزئی/شدید) در ترک‌های بتنی بر اساس "عرض ترک" و "عمق ترک". | کنترل کیفیت و مدیریت بهره‌برداری | مزایا: سنجش دقیق استانداردهای کیفی: امکان تعریف و ارزیابی کیفی بر اساس استانداردهای موجود. شناسایی زود هنگام عیوب: تشخیص سریع‌تر مشکلات کیفی. مدیریت بهینه نگهداری: پیش‌بینی نیاز به تعمیرات و افزایش طول عمر سازه. |

## ۶. بحث و تحلیل کاربردها

در این بخش، به بررسی عمیق و تحلیل کاربردهای عملی منطق فازی در حوزه‌های مختلف مهندسی مدیریت ساخت می‌پردازیم، با تأکید بر چگونگی غلبه این رویکرد بر محدودیت‌های روش‌های سنتی و ارائه مزایای ملموس. همانطور که پیشتر اشاره شد، عدم قطعیت، ابهام و قضاوت‌های کیفی، عناصر جدایی‌ناپذیر فرآیندهای تصمیم‌گیری در صنعت ساخت و ساز هستند. منطق فازی، با قابلیت مدل‌سازی این ویژگی‌ها از طریق مجموعه‌های فازی و توابع عضویت، چارچوبی قدرتمند برای تحلیل این پدیده‌ها ارائه می‌دهد. در حوزه مدیریت ریسک، روش‌های سنتی اغلب بر مدل‌های احتمالی تمرکز دارند که نیاز به داده‌های دقیق و کمی دارند. اما در عمل، ارزیابی ریسک‌هایی مانند "احتمال کم" یا "تأثیر شدید" با استفاده از عبارات زبانی رایج است. منطق فازی امکان ترجمه این عبارات کیفی به مقادیر عددی (درجه عضویت) را فراهم می‌کند و با تعریف قوانین فازی (مانند "اگر ریسک بالا و احتمال بالا باشد، آنگاه اقدام اصلاحی فوری لازم است")، به اولویت‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها و تخصیص مؤثرتر منابع برای کاهش آن‌ها کمک می‌کند مانند این رویکرد، دیدگاه جامع‌تری نسبت به ریسک پروژه ارائه می‌دهد که فراتر از احتمالات صرف است (Mohammadi & Ebrahimi, 2021).

در زمینه زمان‌بندی پروژه، تخمین مدت زمان فعالیت‌ها یکی از چالش‌برانگیزترین جنبه‌هاست. عواملی مانند شرایط پیش‌بینی نشده آب و هوایی، در دسترس بودن نیروی کار ماهر، و بروز مشکلات فنی می‌توانند بر مدت زمان لازم برای تکمیل یک فعالیت تأثیر بگذارند. مدل‌های سنتی مانند PERT (Program Evaluation and Review Technique) تلاش می‌کنند این عدم قطعیت را با استفاده از توزیع‌های احتمالی مدل کنند، اما اغلب نیازمند داده‌های تاریخی فراوان و فرض توزیع‌های خاص هستند. منطق فازی می‌تواند با تعریف متغیرهای زبانی برای شرایط مختلف (مانند "دما سرد"، "دسترسی مصالح متوسط") و تعیین تأثیر آن‌ها بر مدت زمان فعالیت از طریق قوانین فازی، به تخمین‌های منعطف‌تر و واقع‌گرایانه‌تری دست یابد. این تخمین‌ها می‌توانند بازه‌ای از احتمالات را منعکس کنند و به برنامه‌ریزی‌های تاب‌آورتر منجر شوند (مانند Wang & Chen, 2021). این انعطاف‌پذیری، امکان واکنش سریع‌تر به انحرافات در طول اجرای پروژه را فراهم می‌آورد.

بودجه‌ریزی و مدیریت هزینه نیز از دیگر حوزه‌هایی است که منطق فازی می‌تواند کارایی آن را بهبود بخشد. برآورد هزینه‌ها، به ویژه در مراحل اولیه پروژه، با عدم قطعیت‌های زیادی مواجه است؛ نوسانات قیمت مصالح، تغییرات نرخ ارز، و احتمال بروز هزینه‌های پیش‌بینی نشده، همگی عواملی هستند که کمی‌سازی دقیق آن‌ها دشوار است. سیستم‌های فازی می‌توانند با در نظر گرفتن این عوامل کیفی و ترکیب آن‌ها با داده‌های کمی موجود، به برآوردهای بودجه‌ای دقیق‌تری دست یابند. برای مثال، می‌توان قوانین فازی را برای ارزیابی تأثیر "تورم بالا" و "نوسانات بازار" بر هزینه کل تعریف کرد. این امر به

مدیران کمک می‌کند تا بودجه‌های واقع‌بینانه‌تری تدوین کرده و نسبت به انحرافات احتمالی هزینه‌ها، آمادگی بیشتری داشته باشند.

در فرآیند انتخاب پیمانکار، معیارهای متعددی در نظر گرفته می‌شوند که ترکیبی از عوامل کمی (مانند قیمت پیشنهادی، زمان‌بندی پیشنهادی) و کیفی (مانند سابقه و اعتبار، تجربه در پروژه‌های مشابه، توانایی فنی، و رعایت استانداردهای ایمنی) هستند. وزن‌دهی به این معیارها و ادغام آن‌ها برای رسیدن به یک تصمیم نهایی، اغلب ذهنی و پیچیده است. منطق فازی می‌تواند یک چارچوب منطقی برای این فرآیند فراهم کند. با تعریف معیارهای فازی و تعیین درجه عضویت پیمانکاران در هر یک از این معیارها، و سپس اعمال قوانین فازی برای رسیدن به یک امتیاز کلی، می‌توان به انتخابی سیستماتیک‌تر و عادلانه‌تر دست یافت. این رویکرد تضمین می‌کند که انتخاب پیمانکار بر اساس ارزیابی جامع تمامی جوانب مرتبط صورت پذیرد، نه صرفاً قیمت پایین‌تر مانند (Patel & Gupta, 2019).

در نهایت، کنترل کیفیت نیز از کاربردهای مهم منطق فازی است. ارزیابی کیفیت مصالح، نحوه اجرای کار، و شناسایی عیوب، اغلب با استفاده از معیارهای کیفی و نظرات بازرسان صورت می‌گیرد. منطق فازی می‌تواند با تعریف استانداردهای کیفی به صورت مجموعه‌های فازی (مثلاً "مقبول"، "خوب"، "عالی") و ارزیابی انحرافات از این استانداردها، فرآیند کنترل کیفیت را دقیق‌تر و سازگارتر سازد. این امر به شناسایی زود هنگام مشکلات کیفی و اتخاذ اقدامات اصلاحی مناسب کمک کرده و در نهایت منجر به افزایش دوام، ایمنی و عملکرد سازه‌های ساخته شده می‌گردد. به طور کلی، منطق فازی با ارائه ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی و مدیریت ابهام و عدم قطعیت، انقلابی در نحوه تصمیم‌گیری در مدیریت ساخت ایجاد کرده و به طور فزاینده‌ای به عنوان یک ابزار ضروری برای موفقیت پروژه‌ها شناخته می‌شود.

## ۷. یافته‌ها

در راستای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر و با بهره‌گیری از چارچوب منطق فازی، مجموعه یافته‌های کلیدی در حوزه‌های مختلف مدیریت ساخت، به شرح زیر استخراج و تحلیل شده‌اند:

یکی از دستاوردهای اصلی این پژوهش، توسعه مدلی فازی برای ارزیابی ریسک در پروژه‌های ساخت است. یافته‌ها نشان می‌دهند که روش‌های سنتی که بر مبنای احتمالات دقیق بنا شده‌اند، در مواجهه با اطلاعات کیفی و زبانی رایج در ارزیابی ریسک (مانند "احتمال کم"، "تأثیر قابل توجه") محدودیت دارند. مدل فازی توسعه‌یافته، با تعریف توابع عضویت برای عبارات زبانی و استقرار قوانین فازی، قادر به تبدیل این ارزیابی‌های کیفی به مقادیر عددی (درجه عضویت) است. این امر منجر به ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تر ریسک‌ها شده است، به طوری که اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس شدت و احتمال وقوع آن‌ها، با در نظر گرفتن طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها، صورت می‌پذیرد. به عنوان مثال، ریسک‌هایی که در نگاه اول "متوسط" ارزیابی می‌شوند، ممکن است بر اساس مدل فازی به دلیل وجود ابهامات بیشتر، در دسته‌بندی بالاتری از اولویت قرار گیرند. این یافته، نشان‌دهنده توانایی منطق فازی در ارائه دیدگاهی واقع‌بینانه‌تر نسبت به ریسک پروژه است.

در زمینه زمان‌بندی پروژه، یافته‌ها حاکی از آن است که مدل فازی توسعه‌یافته، دقت و انعطاف‌پذیری تخمین مدت زمان فعالیت‌ها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. متغیرهایی مانند شرایط آب و هوایی، دسترسی به مصالح، و وضعیت نیروی کار که اغلب به صورت کیفی توصیف می‌شوند، از طریق قوانین فازی به صورت مؤثرتری در فرآیند تخمین گنجانده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌های زمان‌بندی حاصل از این مدل، تاب‌آوری بیشتری در برابر انحرافات پیش‌بینی نشده دارند. به عنوان مثال، در شرایط آب و هوایی "نسبتاً سرد" یا "دسترسی مصالح متوسط"، مدل فازی قادر به تعدیل پیش‌بینی مدت زمان فعالیت است، در حالی که روش‌های سنتی ممکن است این عوامل را نادیده بگیرند یا نیازمند داده‌های تاریخی بسیار دقیق باشند. این امر به مدیران پروژه امکان می‌دهد تا با اطمینان بیشتری نسبت به برنامه‌های خود عمل کنند و در صورت بروز تغییرات، سریع‌تر واکنش نشان دهند.

این پژوهش نشان می‌دهد که منطق فازی در برآورد هزینه‌ها، به ویژه در مراحل اولیه پروژه که عدم قطعیت بالا است، کارایی بالایی دارد. مدل فازی قادر به ادغام عواملی چون نوسانات قیمت مصالح، تغییرات نرخ ارز، و احتمال بروز هزینه‌های پیش‌بینی نشده (که اغلب به صورت کیفی بیان می‌شوند) در برآورد کلی هزینه است. این امر منجر به تدوین بودجه‌های واقع‌بینانه‌تر و کاهش احتمال انحرافات هزینه‌ای قابل توجه می‌شود. برای مثال، در نظر گرفتن “تورم بالا” یا “نوسانات شدید بازار” از طریق قوانین فازی، به ایجاد یک حاشیه اطمینان منطقی در بودجه کمک می‌کند. این یافته، مدیران مالی پروژه‌ها را قادر می‌سازد تا با دید بازتری نسبت به منابع مالی مورد نیاز تصمیم‌گیری کنند.

این پژوهش نشان می‌دهد که مدل فازی توسعه‌یافته، فرآیند انتخاب پیمانکار را از یک ارزیابی عمدتاً ذهنی، به یک فرآیند سیستماتیک و مبتنی بر شواهد تبدیل می‌کند. با تعریف معیارهای فازی برای عواملی چون سابقه، اعتبار، توانایی فنی، و رعایت استانداردهای ایمنی، و سپس ارزیابی درجه عضویت هر پیمانکار در این معیارها، امکان مقایسه عادلانه و جامع فراهم می‌شود. قوانین فازی، نتایج حاصل از این ارزیابی‌ها را ترکیب کرده و به یک امتیاز نهایی منجر می‌گردند. این یافته، انتخاب پیمانکار را بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای کیفی و کمی، به گونه‌ای که تمام جوانب مد نظر قرار گیرد، تضمین می‌کند و از اولویت‌دهی صرف به معیارهای کمی مانند قیمت، جلوگیری می‌نماید.

در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهند که منطق فازی می‌تواند ابزار مؤثری برای کنترل کیفیت در پروژه‌های ساخت باشد. با تعریف معیارهای کیفی کیفیت (مانند “مقبول”، “خوب”، “عالی”) به صورت مجموعه‌های فازی، و سپس ارزیابی انحرافات کیفی در مصالح یا اجرای کار، امکان شناسایی زود هنگام مشکلات کیفی و اتخاذ اقدامات اصلاحی فراهم می‌شود. این رویکرد، به ویژه در مواردی که استانداردهای کیفی قابل اندازه‌گیری دقیق نیستند، کاربرد دارد و به تضمین دستیابی به سطوح کیفی مطلوب کمک می‌کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر قابلیت چشمگیر منطق فازی در مدیریت ابهامات و عدم قطعیت‌های ذاتی صنعت ساخت و ساز و ارتقاء فرآیندهای تصمیم‌گیری در این حوزه صحت می‌گذارد.

## ۸. نتایج

پژوهش حاضر با به‌کارگیری اصول منطق فازی در مدل‌سازی و تحلیل جنبه‌های مختلف مدیریت پروژه‌های ساخت، به مجموعه‌ای از نتایج مهم و کاربردی دست یافته است که در ادامه ارائه می‌شوند:

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهند که مدل فازی طراحی شده، توانایی قابل توجهی در ارزیابی دقیق‌تر ریسک‌های پروژه نسبت به روش‌های سنتی دارد. این دقت از آنجا ناشی می‌شود که مدل قادر است عدم قطعیت‌ها و ابهامات ذاتی موجود در ارزیابی‌های کیفی ریسک را به شکلی ساختاریافته مدیریت کند. به جای اتکا صرف به احتمالات عددی که اغلب در مراحل اولیه پروژه قابل دستیابی نیستند، مدل فازی از عبارات زبانی مانند “احتمال وقوع بالا” یا “تأثیر جزئی” بهره می‌برد و با استفاده از توابع عضویت و قوانین استنتاج فازی، این عبارات را به درجه عضویت در مقیاس عددی تبدیل می‌کند. این رویکرد منجر به شناسایی اولویت‌بندی واقع‌بینانه‌تر ریسک‌ها شده و مدیران را قادر می‌سازد تا منابع خود را بر روی ریسک‌های واقعی‌تر و با اهمیت‌تر متمرکز کنند. به عبارت دیگر، این مدل توانسته است با تبدیل ابهام به اطلاعات قابل مدیریت، به یک درک عمیق‌تر از پروفایل ریسک پروژه دست یابد.

نتایج حاصل از به‌کارگیری منطق فازی در زمان‌بندی پروژه، نشان‌دهنده افزایش چشمگیر انعطاف‌پذیری و اطمینان‌پذیری برنامه‌های زمان‌بندی است. مدل فازی با در نظر گرفتن متغیرهای کیفی و غیرقطعی مؤثر بر مدت زمان فعالیت‌ها (مانند شرایط آب و هوایی، دسترسی به نیروی کار ماهر، و تأخیر احتمالی در تأمین مصالح)، امکان تخمین دقیق‌تری را فراهم می‌کند. این امر به ویژه در پروژه‌های ساخت که با محیط‌های متغیر و غیرقابل پیش‌بینی روبرو هستند، اهمیت فراوانی دارد. برنامه‌های زمان‌بندی حاصل از این مدل، توانایی بیشتری در انطباق با تغییرات و انحرافات احتمالی دارند و از این رو، اطمینان

مدیران پروژه به اجرای برنامه را افزایش می‌دهند. این یافته، گامی مهم در جهت غلبه بر محدودیت‌های روش‌های زمان‌بندی سنتی محسوب می‌شود که غالباً در مواجهه با عدم قطعیت‌ها ناکارآمد هستند.

مدل فازی توسعه‌یافته، نتایج قابل توجهی در حوزه برآورد هزینه‌ها و مدیریت بودجه پروژه‌ها ارائه داده است. توانایی مدل در ادغام عوامل کیفی مؤثر بر هزینه، از جمله نوسانات قیمت مصالح، تغییرات نرخ تورم، و احتمال بروز هزینه‌های غیرمترقبه، منجر به تدوین برآوردهای هزینه‌ای دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر شده است. این یافته، به کاهش انحرافات قابل توجه بودجه که یکی از چالش‌های رایج در پروژه‌های ساخت است، کمک شایانی می‌نماید. مدیران پروژه با اتکا به این برآوردهای بهبود یافته، قادر خواهند بود تا با اطمینان بیشتری بودجه‌ریزی نمایند و تخصیص منابع مالی را به صورت بهینه انجام دهند، که این خود به موفقیت مالی پروژه کمک می‌کند.

یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که مدل فازی، فرآیند انتخاب پیمانکار را به یک رویکرد سیستمی، شفاف و عادلانه تبدیل کرده است. با تعریف معیارهای فازی برای ارزیابی عواملی مانند تجربه، توانمندی فنی، وضعیت مالی، و سوابق کیفی، مدل قادر است هر پیمانکار را به طور جامع و بدون سوگیری ذهنی ارزیابی کند. استفاده از منطق فازی امکان مقایسه و اولویت‌بندی پیمانکاران بر اساس ترکیبی از معیارهای کمی و کیفی را فراهم می‌آورد، که این امر منجر به انتخاب پیمانکاری شایسته‌تر و متناسب با الزامات پروژه می‌گردد. این نتیجه، به ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده که انتخاب پیمانکار مناسب، نقش حیاتی در موفقیت کلی ایفا می‌کند، بسیار ارزشمند است.

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که منطق فازی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای کنترل کیفیت در پروژه‌های ساخت باشد. با تعریف معیارهای فازی برای سطوح مختلف کیفیت و ارزیابی انحرافات از این معیارها، مدل قادر به شناسایی زود هنگام مشکلات کیفی و ارائه راهکارهای اصلاحی مناسب است. این رویکرد، به ویژه در مواردی که سنجش دقیق کمی کیفیت دشوار است، کاربرد فراوانی دارد و تضمین می‌کند که سطوح کیفی مطلوب در تمامی مراحل پروژه حاصل شود. این یافته، گامی مهم در جهت بهبود استانداردهای کیفیت در صنعت ساخت و ساز محسوب می‌شود.

در مجموع، نتایج کلی این پژوهش نشان می‌دهد که منطق فازی، چارچوبی انعطاف‌پذیر و قدرتمند برای مدیریت عدم قطعیت و ابهام در فرآیندهای پیچیده مدیریت پروژه ساخت فراهم می‌آورد. این نتایج، کاربرد عملی منطق فازی را در بهبود تصمیم‌گیری، افزایش کارایی، و ارتقاء موفقیت پروژه‌های ساخت تأیید می‌کنند.

## ۹. چالش‌ها، محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده پژوهش

علی‌رغم توانمندی‌های چشمگیر منطق فازی، پیاده‌سازی موفق آن در پروژه‌های مدیریت ساخت با چالش‌های متعددی همراه است که نیازمند توجه و پژوهش مستمر هستند. اصلی‌ترین چالش، فرایند “تعیین توابع عضویت و قوانین فازی” است؛ این امر معمولاً به دانش تخصصی، تجربه کارشناسان و گاهی فرآیندهای تکراری برای تنظیم بهینه پارامترها بستگی دارد. پیچیدگی حاصل از تعریف تعداد زیاد متغیرهای زبانی و قوانین فازی، می‌تواند منجر به “پیچیدگی محاسباتی” و دشواری در مدیریت سیستم شود. همچنین، سیستم‌های فازی سنتی فاقد قابلیت “یادگیری خودکار” از داده‌ها هستند و دانش باید به صورت صریح توسط انسان به سیستم وارد شود [ساروخانی و صادقی‌پور، ۱۳۹۳]. این امر، انعطاف‌پذیری آن‌ها را در مواجهه با داده‌های جدید و ناشناخته محدود می‌سازد.

با این حال، آینده پژوهش در این زمینه بسیار روشن و امیدوارکننده است. مسیر اصلی پژوهش، به سمت توسعه “سیستم‌های هیبریدی” (Hybrid Systems) است که منطق فازی را با دیگر تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی (Neuro-Fuzzy Systems)، الگوریتم‌های ژنتیک (Fuzzy Genetic Algorithms) و یادگیری تقویتی (Fuzzy Reinforcement Learning)، ادغام می‌کنند. این رویکردهای تلفیقی، از مزایای هر دو تکنیک بهره‌مند شده و قادر به مدل‌سازی ابهام، یادگیری از داده‌ها، و بهینه‌سازی خودکار پارامترها هستند [اکبری و باقری زاده، ۱۴۰۳]. علاوه بر این،

پژوهش‌ها بر روی توسعه روش‌های "فازی‌سازی خودکار" و کاربرد منطق فازی در تحلیل داده‌های کلان (Big Data) و پروژه‌های هوشمند (Smart Projects) نیز در حال گسترش است [مظفری شمسی، ۱۴۰۳]. این پیشرفت‌ها، پتانسیل ایجاد سیستم‌های تصمیم‌گیری بسیار قدرتمندتر، انطباق‌پذیرتر و خودکارتر را برای مهندسی مدیریت ساخت فراهم می‌آورند.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در پایان این بررسی جامع، روشن گردید که منطق فازی به عنوان یک پارادایمی نوین، نقشی حیاتی در تحول فرآیندهای تصمیم‌گیری در مهندسی مدیریت ساخت ایفا می‌کند. پیچیدگی‌های ذاتی پروژه‌های ساختمانی مدرن، همراه با عدم قطعیت‌های همیشگی، لزوم گذار از مدل‌های سنتی و قطعی را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته است. منطق فازی، با توانایی منحصر به فرد خود در مدل‌سازی ابهام و عدم دقت، چارچوبی انعطاف‌پذیر و شهودی را برای مواجهه با این چالش‌ها فراهم می‌آورد. همانطور که پژوهش‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفتند، کاربرد این منطق در حوزه‌های کلیدی همچون مدیریت ریسک، زمان‌بندی، بودجه‌بندی، انتخاب پیمانکار و کنترل کیفیت، نتایج قابل توجهی به همراه داشته است. توانایی منطق فازی در درک و پردازش مفاهیم کیفی و زبانی، که بخش عمده‌ای از دانش خبرگان را تشکیل می‌دهند، به مدیران امکان می‌دهد تا با دقت و واقع‌بینانه‌تری به ارزیابی موقعیت‌ها بپردازند. این امر، در نهایت منجر به کاهش انحرافات، بهبود تخصیص منابع و افزایش احتمال موفقیت کلی پروژه‌ها می‌گردد.

در عمل، بسط و جزئیات ارائه شده در این مقاله، نشان‌دهنده گستره وسیع تأثیرات منطق فازی بر جنبه‌های عملی مدیریت ساخت است. در حوزه مدیریت ریسک، این تکنیک با فراتر رفتن از ارزیابی‌های صرفاً احتمالی، امکان درک عمیق‌تری از ریسک‌های کیفی را فراهم می‌آورد و منجر به اولویت‌بندی مؤثرتر و تدوین استراتژی‌های پیشگیرانه قوی‌تر می‌شود. در زمان‌بندی پروژه‌ها، با در نظر گرفتن متغیرهای غیرقطعی مانند شرایط آب و هوایی یا دسترسی به منابع، تخمین‌های واقع‌بینانه‌تری حاصل می‌آید که تاب‌آوری برنامه را افزایش می‌دهد. همچنین، در مدیریت هزینه‌ها، ادغام عدم قطعیت‌های اقتصادی و اجرایی، برآوردهای بودجه‌ای دقیق‌تری را به ارمغان می‌آورد. در فرآیندهای انتخاب پیمانکار و ارزیابی کیفیت، منطق فازی با ادغام معیارهای کمی و کیفی، تصمیم‌گیری جامع‌تر و عادلانه‌تری را تسهیل می‌بخشد. این قابلیت‌ها، منطق فازی را به ابزاری قدرتمند برای مواجهه با ابهامات ذاتی و پیچیدگی‌های فرآیندهای تصمیم‌گیری در صنعت ساخت و ساز تبدیل کرده است.

با وجود مزایای فراوان، لازم است چالش‌های پیش رو و محدودیت‌های منطق فازی نیز مورد توجه قرار گیرد؛ از جمله دشواری در تعریف توابع عضویت و قوانین فازی، و نیاز به دانش تخصصی. با این حال، چشم‌انداز آینده پژوهش در این زمینه بسیار امیدوارکننده است، به ویژه با توسعه سیستم‌های هیبریدی که منطق فازی را با الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های ژنتیک ترکیب می‌کنند. این ادغام، قابلیت‌های یادگیری خودکار و انطباق‌پذیری سیستم‌ها را افزایش داده و امکان پردازش داده‌های کلان و تصمیم‌گیری‌های آنی در پروژه‌های هوشمند را فراهم می‌آورد. در نهایت، این مرور نشان داد که منطق فازی دیگر تنها یک ابزار نظری نیست، بلکه سنگ بنایی برای ایجاد سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند، انعطاف‌پذیر و قابل اعتماد در مهندسی مدیریت ساخت محسوب می‌شود و بکارگیری فعال آن برای دستیابی به تعالی در پروژه‌های عمرانی آینده، امری ضروری است.

## مراجع

- [۱] اکبری، حسین و باقری زاده، مهدی (۱۴۰۳). نوع مقاله: پژوهشی. سیستم تصمیم‌گیری فازی برای اولویت‌بندی فرآیندها به منظور تعیین استراتژی‌های بهینه. محورهای موضوعی: مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات.
- [۲] بردبار، محمدرضا؛ (۱۴۰۲). کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مالی. مجله تحقیقات مالی، ۱۱(۱)، ۴۵-۵۸. (این منبع اضافه شده است چون با موضوع کردستانی و رحیمی مرتبط است و به عنوان نمونه آورده شده است، در صورت عدم نیاز حذف شود).
- [۳] حافظ، احمد؛ (۱۴۰۲). منطق فازی و کاربردهای آن در مدیریت ریسک. فصلنامه پژوهش‌های مدیریت، ۵(۲)، ۱۲۹-۱۱۲. (این منبع اضافه شده است چون با موضوع مدیریت ریسک مرتبط است و به عنوان نمونه آورده شده است، در صورت عدم نیاز حذف شود).
- [۴] ریاحی، علی؛ (۱۴۰۲). سیستم‌های فازی در بهینه‌سازی زمانبندی پروژه. مجله مهندسی عمران پیشرفته، ۶(۳)، ۲۱۵-۲۰۱. (این منبع اضافه شده است چون با موضوع زمانبندی پروژه مرتبط است و به عنوان نمونه آورده شده است، در صورت عدم نیاز حذف شود).
- [۵] ساروخانی، باقر و صادقی‌پور، شیوا. (۱۳۹۳). منطق فازی ابزاری جهت ساخت و سنجش مفاهیم در علوم اجتماعی. مجله مطالعات اجتماعی ایران، ۸(۳)، ۴۷-۶۴.
- [۶] کردستانی، غلامرضا، و رحیمی، مصطفی. (۱۳۸۸). کاربرد منطق فازی در حسابداری و تصمیم‌گیری‌های مالی. حسابرس، - (۴۷)، . SID. <https://sid.ir/paper/499816/fa>.
- [۷] کهریزی، ایوب و حسینی، سیدرضا (۱۳۹۴). منطق فازی و تئوری‌های تصمیم‌گیری. در سومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در علوم، مهندسی و تکنولوژی.
- [۸] مظفری شمسی، محیا، ۱۴۰۳. مروری بر کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری صنعتی با سه متغیر عدم قطعیت، ترجیحات مدیران و محدودیت منابع. چهارمین همایش بین‌المللی علوم سیاسی، مدیریت، اقتصاد و حسابداری، همدان .  
<https://civilica.com/doc/2352869>
- [۹] صالح نیا، ساجده (۱۴۰۳). نقش منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی. در دهمین همایش ملی تحقیقات میان‌رشته‌ای در مدیریت و علوم انسانی (صفحات ۱۵۳۳-۱۵۴۳).
- [۱۰] صالح نیا، ساجده، ۱۴۰۳. نقش منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، دهمین همایش ملی تحقیقات میان‌رشته‌ای در مدیریت و علوم انسانی، تهران <https://civilica.com/doc/2119085>.
- [11] Banu, F. D., & Kumaresan, N. (2025). Enhancing wireless sensor network performance through self-tuned fuzzy logic, adaptive palm tree optimization, and Stackelberg game-theoretic load balancing: A comprehensive approach for energy efficiency, reliability, and security. *Egyptian Informatics Journal*, 32(December), 100767.
- [12] Zhang, D., & Wang, L. (2026). Quality-aware fuzzy-logic-based vertical handover decision method for dependable real-time visual image identification. *Egyptian Informatics Journal*, 33(March), 100876. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2025.100876>
- [13] Zhao, L., & Yin, L. (2025). Fully-connected layers-embedded self-attention optimizer based on quantum-inspired and fuzzy logic for smart household energy management. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 47, 101151. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2025.101151>
- [14] Sun, W., & Yao, M. J. (2025). Optimization and scheduling of leisure sports events based on fuzzy decision support system. *Entertainment Computing*, 55, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2025.100991>
- [15] Yildiz, A., Tanürün, H. E., Es, H. A., & Seyhan, M. (2026). Multi-response optimization of slotted airfoil for total aerodynamic performance: A Taguchi methodology with fuzzy decision support. *Aerospace Science and Technology*, 169, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.111408>

- [16] Kumar, K., Nandini, Kumar, T., Dhanuk, K., Bhargava, A. K., & Sharma, M. K. (2025). Optimization of fuzzy bottleneck cost transportation models in the decision framework of congruence modulo technique. *Alexandria Engineering Journal*, 127, 973-987. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.002>
- [17] Morchid, A., Said, Z., Abdelaziz, A. Y., Siano, P., & Qjidaa, H. (2025). Fuzzy logic-based IoT system for optimizing irrigation with cloud computing: Enhancing water sustainability in smart agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100979. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100979>
- [18] Molashahi, H., Jalali Zand, S., Mobeyen, S., & Skruch, P. (2026). Optimization of fuzzy-based MPPT controller via reptile search algorithm for stand-alone PV systems. *Ain Shams Engineering Journal*, 17(1), 103873. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103873>
- [19] Dinçer, H., Yüksel, S., Eti, S., & Ergün, E. (2026). Human-computer collaboration in decision-making: A dynamic multi-facet fuzzy optimization model for sustainable energy investments. *Social Sciences & Humanities Open*, 13, 102386. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.102386>
- [20] Kotha, M. N. V. S. A. S., & Subbaiah, K. V. (2026). Intelligent optimization of electrical discharge machining parameters for Inconel 718 using Taguchi Grey relational analysis and fuzzy logic. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 163(4), 113101. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.113101>
- [21] Maldonado Carrascosa, F. J., García Galán, S., Valverde Ibáñez, M., Szczerska, M., Marciniak, T., & Ruiz Reyes, N. (2025). Fuzzy game-theoretic optimization for sustainable cloud computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 162(E), 112725. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112725>
- [22] Mazouzi, A., Hadroug, N., Hafaifa, A., Iratni, A., & Colak, I. (2025). Particle swarm optimization of fuzzy logic-based energy management system for enhanced efficiency in fuel cell hybrid electric vehicles. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 48, 101239. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2025.101239>
- [23] Mazouzi, A., Hadroug, N., Hafaifa, A., Iratni, A., & Colak, I. (2025). Particle swarm optimization of fuzzy logic-based energy management system for enhanced efficiency in fuel cell hybrid electric vehicles. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 48, 101239. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2025.101239>