

مروری نظام مند بر کاربردهای منطق فازی در مهندسی عمران

مهدی فضیلتی^۱، سجاد داودی^۳*

1- استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، Fazilati2001@iau.ac.ir

2- عضو مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، Fazilati2001@iau.ac.ir

3- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، sajjad.davoodi@iau.ac.ir

چکیده

مهندسی عمران به دلیل ماهیت فیزیکی داده‌ها و پیچیدگی سیستم‌ها، غالباً با عدم قطعیت‌های آماری، ابهام در اندازه‌گیری‌ها و اطلاعات ناقص روبرو است که مدل‌سازی آن‌ها با روش‌های سنتی و قطعی دشوار است. منطق فازی که در دهه ۱۹۶۰ توسط پروفسور لطفی زاده معرفی شد، با جایگزینی مجموعه‌های قطعی (۰ و ۱) با توابع عضویت پیوسته، ابزاری کارآمد برای مدیریت این ابهام‌ها و تبدیل مفاهیم زبانی به مدل‌های ریاضی فراهم آورده است. این مقاله به مرور نظام‌مند کاربردهای این ابزار در زیرشاخه‌های مختلف عمران می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های استنتاج فازی، به ویژه مدل‌های ممدانی به دلیل تفسیرپذیری بالا و مدل‌های تاکاگی-سوگنو (T-S) به دلیل دقت عددی و توان تقریب‌زنی، در حوزه‌هایی نظیر مدیریت خطر زمین‌لرزه، تحلیل پایداری شیب‌ها، کنترل ارتعاشات سازه‌ها و ارزیابی آسیب‌پذیری نقش کلیدی ایفا می‌کنند. همچنین در مدیریت پروژه، منطق فازی برای ارزیابی ریسک، پیش‌بینی زمان و هزینه و انتخاب پیمانکار به کار می‌رود. علی‌رغم مزایایی چون انعطاف‌پذیری و عدم نیاز به مدل‌های ریاضی پیچیده، چالش‌هایی مانند ذهنیت در تعریف توابع عضویت و انفجار تعداد قواعد در سیستم‌های بزرگ همچنان باقی است. در نهایت، روند پژوهش‌ها به سمت ترکیب منطق فازی با هوش مصنوعی، یادگیری عمیق، داده‌های بزرگ و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت دستیابی به مدل‌های دقیق‌تر و هوشمندتر در زیرساخت‌های پایدار حرکت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: منطق فازی، مهندسی عمران، مدیریت عدم قطعیت، سیستم‌های استنتاج فازی، مدل‌سازی فازی، هوش مصنوعی.

1- مقدمه

مهندسی عمران به طور ذاتی با داده‌ها و پارامترهایی سروکار دارد که به دلیل ماهیت فیزیکی پیچیده و عدم قطعیت‌های آماری در اندازه‌گیری‌ها، همواره با نوعی ابهام همراه هستند [1]. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، تخمین پارامترها به دلیل اطلاعات ناقص یا محدود با چالش مواجه است و ترکیب عوامل نامشخص و وابستگی متقابل آن‌ها، تبیین دقیق رفتار سیستم را با استفاده از روش‌های سنتی و قطعی (Deterministic) دشوار می‌سازد [1]. در چنین شرایطی، روش‌های کلاسیک که بر دقت و قطعیت صلب تأکید دارند، کارایی لازم را در مواجهه با داده‌های مبهم ندارند [2].

برای غلبه بر این چالش‌ها، منطق فازی (Fuzzy Logic) که در دهه ۱۹۶۰ توسط پروفسور لطفی زاده معرفی شد، چارچوب نوین برای مدیریت عدم قطعیت و ابهام فراهم آورد [2]. برخلاف منطق کلاسیک که در آن عضویت یک عنصر در یک مجموعه تنها با مقادیر صفر یا یک تعریف می‌شود، منطق فازی به عناصر اجازه می‌دهد با درجات مختلفی از عضویت عددی بین (۰ و ۱) در یک مجموعه قرار گیرند [3, 4, 5]. این رویکرد از طریق توابع عضویت مانند (مثلی، دوزنقه‌ای یا گوسی)، مرزهای سخت ریاضی را به مرزهای نرم تبدیل کرده و امکان مدل‌سازی روابط پیچیده بین پارامترها را فراهم می‌کند [1, 6, 7].

یکی از ویژگی‌های متمایز این ابزار، توانایی استفاده از متغیرهای کلامی (Linguistic Variables) مانند کم، متوسط یا زیاد است که اجازه می‌دهد دانش و تجربه خبرگان و زبان طبیعی مستقیماً در محاسبات ریاضی ادغام شود [9,8,6]. این ویژگی در مهندسی عمران که در آن قضاوت مهندسی نقشی کلیدی دارد، بسیار حائز اهمیت است [5]. امروزه کاربرد منطق فازی در زیرشاخه‌های مختلف عمران از جمله کنترل ارتعاشات سازه‌ها، تحلیل پایداری شیب‌ها در ژئوتکنیک، پیش‌بینی دبی در مهندسی آب و مدیریت ریسک پروژه‌ها گسترش یافته است [11,10,7,6]. مزایایی همچون انعطاف‌پذیری بالا در مواجهه با داده‌های کیفی، کاهش خطای مدل‌سازی و توانایی انطباق با شرایط واقعی محیطی، منطق فازی را به ابزاری برتر برای جایگزینی یا بهبود روش‌های سنتی تبدیل کرده است [1].

این مقاله با یک مرور نظام‌مند، به تبیین مبانی نظری و انواع سیستم‌های استنتاج فازی (مانند ممدانی و تاکاگی-سوگنو) پرداخته و سپس کاربردهای گسترده و مدل‌های پیشرفته‌ای نظیر سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) را در حوزه‌های مهندسی عمران مورد تحلیل قرار می‌دهد [9, 11]. در نهایت، چالش‌های موجود و چشم‌اندازهای آتی پژوهش، به‌ویژه در ترکیب با یادگیری عمیق و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) تبیین خواهد شد.

2- تاریخچه منطق فازی

منطق فازی یک شاخه جدید از نظریه‌های رسمی استدلال در دهه 1960 توسط پروفسور لطفی زاده معرفی شد. این نظریه به منظور مدیریت عدم قطعیت و ابهام در داده‌ها و اطلاعات توسعه یافت. در حالی که منطق کلاسیک بر دقت و قطعیت تأکید دارد، منطق فازی به ما این امکان را می‌دهد که با داده‌های مبهم و غیرقطعی کار کنیم. این رویکرد به سرعت از یک نظریه نظری به کاربردهای عملی در زمینه‌های مختلف، از جمله مهندسی، پزشکی و علوم اجتماعی گسترش یافت [3,2].

3- مبانی نظری منطق فازی

منطق فازی بر اساس مجموعه‌های فازی (Fuzzy Sets) بنا شده است. در این نظریه، به جای اینکه یک عنصر به طور قطعی متعلق به یک مجموعه باشد یا نباشد، می‌تواند با درجات مختلفی به آن مجموعه تعلق داشته باشد. این درجات تعلق به وسیله تابع عضویت (Membership Function) تعریف می‌شوند که نشان‌دهنده میزان تعلق یک عنصر به یک مجموعه فازی است. مفاهیم کلیدی در منطق فازی شامل (مجموعه‌های فازی، تابع عضویت، قوانین استنتاج، دفع ابهام) می‌باشد [5,4].

منطق فازی در زمینه‌های مختلفی از جمله کنترل سیستم‌ها، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، و بهینه‌سازی فرآیندها کاربرد دارد. به عنوان مثال، در مهندسی عمران، از منطق فازی برای ارزیابی ریسک، مدیریت پروژه و بهینه‌سازی طراحی استفاده می‌شود. همچنین، در حوزه‌های پزشکی و کشاورزی نیز به کار می‌رود تا به تصمیم‌گیری‌های پیچیده کمک کند [7,6].

برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌هایی که در آن‌ها داده‌ها مبهم یا غیرقطعی هستند، منطق فازی مفاهیم و ابزارهایی را ارائه می‌دهد که بر مبنای سه رکن اصلی یعنی مجموعه‌های فازی، متغیرهای کلامی و توابع عضویت استوارند [8].

فرآیند استنتاج فازی شامل مراحل فازی‌سازی (Fuzzification)، پایگاه قوانین (Rule Base)، موتور استنتاج (Inference Engine)، غیرفازی‌سازی (Defuzzification) [9] و خروجی نهایی است.

در سیستم‌های منطق فازی، دو نوع اصلی و پرکاربرد از سیستم‌های استنتاج فازی وجود دارد که عبارتند از سیستم‌های فازی ممدانی (Mamdani) و تاکاگی-سوگنو (Takagi-Sugeno) یا T-S. این دو نوع سیستم در نحوه تعریف بخش پیامد (consequent) قوانین فازی و در نتیجه در ویژگی‌هایی مانند تفسیرپذیری و دقت تفاوت‌های کلیدی دارند [4,2].

سیستم‌های فازی ممدانی که بر اساس کارهای پروفسور ممدانی بنا شده‌اند، یکی از اولین و رایج‌ترین انواع سیستم‌های فازی هستند که برای کنترل فرآیندها توسعه یافتند [3,1].

سیستم‌های فازی تاکاگی-سوگنو (T-S) در دهه ۱۹۸۰ توسط تاکاگی و سوگنو معرفی شدند و رویکردی متفاوت برای تعریف پیامد قوانین فازی ارائه می‌دهند به دلیل ماهیت جبری پیامدها، سیستم‌های T-S معمولاً دقت بالاتری را در مدل‌سازی

و پیش‌بینی ارائه می‌دهند، به خصوص در مسائلی که نیاز به خروجی‌های عددی دقیق دارند سیستم‌های T-S با پیامدهای خطی نشان داده‌اند که می‌توانند هر تابع پیوسته‌ای را با دقت دلخواه تقریب بزنند. [17,16,15,14,13,12,11,10]

3- کاربردهای منطق فازی در زیرشاخه‌های مهندسی عمران

مهندسی عمران با داده‌ها و شرایطی سروکار دارد که اغلب مبهم یا غیرقطعی هستند. منطق فازی به دلیل توانایی در مدل سازی داده‌های کیفی و زبانی، ابزاری مؤثر برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها است. این روش به ویژه در شرایطی که داده‌ها ناقص یا متناقض هستند، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی دارد. [20,19,18]

منطق فازی در مهندسی عمران از جمله طراحی مخلوط بتن [22,21]، کنترل ارتعاشات سازه‌ها [23]، ارزیابی املاک و مستغلات [24]، تشخیص آسیب‌های سازه‌ای [25]، تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) کاربردهای گسترده‌ای دارد. [22]

3-1- مهندسی ژئوتکنیک و پی‌سازی

3-1-1- ارزیابی خطر زمین‌لرزه و روانگرایی

منطق فازی به دلیل توانایی در مدیریت عدم قطعیت و ابهام، ابزار مؤثری برای ارزیابی خطر زمین‌لرزه و روانگرایی است. و با استفاده از داده‌های کیفی و کمی، احتمال وقوع روانگرایی را تحت شرایط مختلف زمین‌شناسی و لرزه‌ای پیش‌بینی کند. در ترکیب با روش‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های استنتاج فازی، دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد. [26]

3-1-2- تحلیل پایداری شیب‌ها و دیوارهای حائل

سیستم‌های استنتاج فازی مانند ANFIS برای پیش‌بینی پایداری دیوارهای حائل استفاده می‌شوند. و با کاهش خطاهای پیش‌بینی و افزایش دقت، جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی هستند. [27] استفاده از توابع حالت حدی فازی برای محاسبه احتمال شکست شیب‌ها، دقت و کارایی تحلیل را افزایش می‌دهد. این روش می‌تواند تأثیر عوامل مختلف مانند تغییرات سطح آب و ویژگی‌های خاک را به صورت دقیق‌تر مدل‌سازی کند. [28]

3-1-3- طبقه‌بندی خاک و سنگ

منطق فازی ویژگی‌های کیفی مانند نوع خاک، تراکم، و مقاومت را به مقادیر عددی تبدیل می‌کند. به ویژه در شرایطی که داده‌ها مبهم یا ناقص هستند، بسیار مفید است. و می‌تواند به بهبود دقت در ارزیابی ویژگی‌های خاک و سنگ کمک کند. [29]

3-1-4- پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع

منطق فازی با ترکیب داده‌های تاریخی و ویژگی‌های خاک، می‌تواند ظرفیت باربری شمع‌ها را با دقت بالا پیش‌بینی کند. همچنین، استفاده از سیستم‌های فازی تطبیقی مانند ANFIS می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی کمک کند. [30]

3-1-5- مدلسازی رفتار خاک‌های مسئله‌دار

خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های متورم‌شونده یا خاک‌های حساس به تغییرات رطوبت، رفتار پیچیده‌ای دارند. منطق فازی با استفاده از داده‌های کیفی و کمی، امکان مدلسازی دقیق‌تر رفتار این نوع خاک‌ها را فراهم می‌کند. این روش می‌تواند به پیش‌بینی تغییرات حجم، مقاومت، و پایداری خاک‌های مسئله‌دار کمک کند. [26]

3-2- کاربردهای منطق فازی در مهندسی سازه

3-2-1- ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها

منطق فازی داده‌های کیفی و کمی را ترکیب کرده و شاخص‌های آسیب‌پذیری را با دقت بیشتری محاسبه کند. به عنوان مثال، استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی برای پیش‌بینی سناریوهای آسیب در سازه‌ها و ارزیابی مقاومت آنها در برابر زلزله و سایر بارهای دینامیکی کاربرد دارد. [31]

3-2-2- کنترل ارتعاشات و سیستم‌های کنترل فعال/نیمه‌فعال

استفاده از کنترل کننده های فازی تطبیقی (ANFIS) برای تنظیم عملکرد دمپرهای مغناطیسی (MR) به منظور کاهش پاسخ های دینامیکی سازه ها. این روش ها توانسته اند ارتعاشات سازه ها را تا 20% کاهش دهند. [23,32] ترکیب منطق فازی با الگوریتم های بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک برای کنترل رفتار سازه ها تحت بارهای دینامیکی مانند زلزله. [23]

3-2-3- بهینه سازی طراحی سازه

منطق فازی در بهینه سازی طراحی سازه ها با استفاده از ترکیب داده های کیفی و کمی، به مهندسان کمک می کند تا طراحی های بهینه تری ارائه دهند. این روش می تواند پارامترهای طراحی مانند ابعاد، مصالح و مقاومت را بهینه کند و در عین حال محدودیت های اقتصادی و زیست محیطی را در نظر بگیرد. [31]

3-2-4- مدیریت سلامت سازه (SHM)

مدیریت سلامت سازه (SHM) یکی از کاربردهای مهم منطق فازی در مهندسی سازه است. می تواند داده های حسگرها را تحلیل کرده و وضعیت سلامت سازه ها را ارزیابی کند. و برای شناسایی و پیش بینی آسیب های احتمالی و همچنین ترکیب منطق فازی با یادگیری ماشین برای تحلیل داده های حسگرها و ارائه راهکارهای نگهداری پیشگیرانه کاربرد دارد. [34][33]

3-2-5- ارزیابی قابلیت اطمینان سازه ها

منطق فازی در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه ها به کار می رود تا احتمال شکست یا عملکرد نامطلوب سازه ها را تحت شرایط مختلف بررسی کند. این روش می تواند عدم قطعیت های ناشی از ویژگی های مصالح، بارگذاری و شرایط محیطی را مدل سازی کرده و شاخص های قابلیت اطمینان را با دقت بیشتری محاسبه کند. [32][31]

3-3-3- کاربرد منطق فازی در مهندسی زلزله

3-3-1- تحلیل خطرپذیری لرزه ای

منطق فازی داده های کیفی و کمی را ترکیب کرده و احتمال وقوع زلزله و تأثیر آن بر مناطق مختلف را پیش بینی می کند. مدل های پیش بینی خسارت زلزله با استفاده از منطق فازی، روابط پیچیده بین عوامل مختلف شدت زلزله، نوع خاک و ویژگی های سازه را مدل سازی می کنند. این مدل ها از قواعد "اگر-آنگاه" برای تحلیل داده ها و ارائه نتایج استفاده می کنند. [35]

3-3-2- ارزیابی عملکرد سازه ها تحت زلزله

منطق فازی می تواند رفتار سازه ها را در شرایط لرزه ای مختلف پیش بینی کرده و شاخص های عملکردی مانند تغییر شکل، پایداری و مقاومت را ارزیابی کند. به دلیل وجود عدم قطعیت در داده های لرزه ای و ویژگی های مصالح، استفاده از منطق فازی می تواند دقت تحلیل ها را افزایش دهد و به تصمیم گیری بهتر در طراحی و مقاوم سازی سازه ها کمک کند. [35,36]

3-3-3- طراحی مقاوم در برابر زلزله با در نظرگیری عدم قطعیت ها

یکی از کاربردهای مهم منطق فازی در مهندسی زلزله، طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله با در نظرگیری عدم قطعیت ها است. می تواند پارامترهای طراحی مانند ابعاد سازه، نوع مصالح و ویژگی های دینامیکی را بهینه کند. همچنین، منطق فازی به مهندسان این امکان را می دهد که تأثیر عوامل نامشخص مانند تغییرات در ویژگی های خاک یا شدت زلزله را در طراحی سازه ها لحاظ کنند. این رویکرد به ویژه در مراحل اولیه طراحی که داده ها ناقص یا مبهم هستند، بسیار مفید است. [37,38]

3-4-4- کاربرد منطق فازی در مدیریت ساخت و پروژه

3-4-1- ارزیابی ریسک پروژه های عمرانی

مدل مددانی برای ارزیابی و اولویت بندی ریسک های داخلی در پروژه های عمرانی استفاده شده است. این مدل توانسته ریسک های مهم مانند ایمنی و مدیریت مالی را شناسایی و کاهش دهد و می تواند از منطق فازی برای پیش بینی و کاهش افزایش هزینه ها در پروژه های بزرگ، به ویژه در مراحل طراحی و اجرا استفاده کرد. [39,40,41] سیستم های فازی نوع ۲ با در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی داده های بلادرنگ و آماری، ریسک زمین لغزش را با دقت بیشتری برآورد می کنند. [42] سامانه های خودکار پشتیبان تصمیم (AFDSS) ابتدا رویدادها را با خوشه بندی فازی استخراج کرده و سپس با استنتاج فازی، ریسک ها را

در محیط‌های داده سنگین (مانند بیمه) تخمین می‌زنند. [43] ادغام تحلیل حالت خرابی با منطق فازی و روش‌های MCDM AHP (برای وزن‌دهی مؤلفه‌ها و TOPSIS برای کاهش پراکندگی نتایج) به شناسایی دقیق‌تر نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی کمک می‌کند. [44] همچنین با مدل فازی می‌توان ریسک حملات پیچیده زیرساخت‌های حیاتی را در مراحل نفوذ، تشخیص و تهاجم جانبی به‌صورت منعطف و پویا ارزیابی کرد. [45] ترکیب شبکه عصبی، داده‌های IoT و منطق فازی امکان پیش‌بینی و کاهش ریسک تأخیر و هزینه پروژه‌های ساخت‌وساز را با دقت بیش از ۹۲ درصد فراهم می‌آورد. [47,46]

3-4-2- پیش‌بینی زمان و هزینه پروژه

منطق فازی در پیش‌بینی زمان و هزینه پروژه‌ها نقش کلیدی دارد. و می‌تواند عدم قطعیت‌های مرتبط با عملکرد نیروی کار، مدیریت پیمانکاران و کنترل برنامه‌ریزی را مدل‌سازی کند. مدل‌های فازی با ترکیب مفاهیم ارزش کسب‌شده و قضاوت کارشناسان، توانسته‌اند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از هزینه‌های نهایی پروژه ارائه دهند. عواملی مانند بهره‌وری نیروی کار، دسترسی به نیروی انسانی و مدیریت پیمانکاران به عنوان ورودی‌های مدل فازی برای پیش‌بینی هزینه‌ها استفاده شده‌اند. [48]

3-4-3- انتخاب پیمانکار و ارزیابی تدارکات

منطق فازی در انتخاب پیمانکاران و ارزیابی تدارکات پروژه‌ها بسیار مؤثر است. و می‌تواند معیارهای کیفی و کمی مانند تجربه پیمانکار، کیفیت خدمات و هزینه‌ها را ترکیب کرده و تصمیم‌گیری بهینه را تسهیل کند. استفاده از منطق فازی برای تحلیل کیفیت ارتباطات بین شرکت‌کنندگان پروژه، که به بهبود کارایی و کاهش مشکلات مدیریتی کمک می‌کند. [49] همچنین می‌توان از منطق فازی برای ارزیابی و رتبه‌بندی روش‌های ساخت بر اساس معیارهای مختلف استفاده کرد. [50]

3-4-4- مدیریت کیفیت و ایمنی در ساخت‌وساز

منطق فازی می‌تواند داده‌های کیفی و کمی مرتبط با ایمنی و کیفیت را تحلیل کرده و شاخص‌های عملکردی را بهبود بخشد. استفاده از منطق فازی برای ارزیابی عملکرد مدیریت ایمنی در پروژه‌های خصوصی، که توانسته است نقاط ضعف مانند آموزش ناکافی و پیشگیری از خطرات را شناسایی کند. [51]

3-4-4- کاربرد منطق فازی در مهندسی حمل‌ونقل و راه

3-4-1- ارزیابی وضعیت روسازی‌ها

منطق فازی ابزار مؤثری برای ارزیابی وضعیت روسازی‌ها است. و می‌تواند داده‌های مختلفی مانند ترک‌ها، ناهمواری‌ها و... را تحلیل کرده و وضعیت روسازی را در دسته‌بندی‌هایی مانند عالی، متوسط یا نیازمند تعمیر قرار دهد. استفاده از الگوریتم‌های فازی در این زمینه می‌تواند دقت ارزیابی‌ها را افزایش داده و به تصمیم‌گیری بهتر در برنامه‌ریزی تعمیرات کمک کند. [52]

3-4-2- مدیریت ترافیک و کنترل چراغ‌های راهنمایی

منطق فازی داده‌های حجم ترافیک، سرعت خودروها، زمان انتظار را تحلیل کرده و زمان‌بندی بهینه چراغ‌های راهنمایی را تعیین می‌کند. و باعث کاهش ازدحام ترافیکی و افزایش کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل گردد. با استفاده از منطق فازی سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) می‌تواند ارتباطات بین خودروها و زیرساخت‌ها را بهبود بخشد و ایمنی را افزایش دهد. [54,53]

3-4-3- برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه‌ها

منطق فازی می‌تواند در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری راه‌ها با تحلیل داده‌های مختلف مانند شرایط آب‌وهوایی، ترافیک عبوری، و عمر مفید روسازی‌ها به کار گرفته شود. این روش می‌تواند اولویت‌بندی تعمیرات را بر اساس معیارهای مختلف انجام دهد و به کاهش هزینه‌ها و افزایش عمر مفید زیرساخت‌ها کمک کند. به عنوان مثال، استفاده از الگوریتم‌های فازی در سیستم‌های نظارت بر سلامت پل‌ها و جاده‌ها می‌تواند هشدارهای زودهنگام برای تعمیرات ضروری ارائه دهد. [52]

3-4-4- ارزیابی ایمنی راه

منطق فازی می‌تواند داده‌های مربوط به تصادفات، شرایط جاده، و رفتار رانندگان را تحلیل کرده و شاخص‌های ایمنی را تعیین کند. استفاده از منطق فازی می‌تواند به شناسایی نقاط حادثه‌خیز و ارائه راهکارهای بهبود ایمنی کمک کند. [52]

3-4-5- کنترل سرعت و تغییر مسیر وسایل نقلیه

کنترل فازی می‌تواند تصمیماتی در مورد تنظیم سرعت، تغییر مسیر یا ترمزگیری وسایل نقلیه اتخاذ کند. ورودی‌هایی مانند فاصله تا وسایل نقلیه دیگر، سرعت نسبی و شرایط جاده برای تعیین اقدامات مناسب استفاده می‌شوند. [54] در شبکه های ادھاک وسایل نقلیه (VANETs)، منطق فازی می‌تواند برای تنظیم پروتکل‌های ارتباطی استفاده شود. این پروتکل‌ها پیام های ایمنی را بر اساس عواملی مانند تعداد وسایل نقلیه در محدوده، سرعت، قدرت سیگنال و دیدپذیری بهینه‌سازی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند بار شبکه را کاهش داده و تأخیر و نسبت تحویل پیام‌ها را بهبود بخشد. [55]

3-5- کاربرد منطق فازی در مهندسی آب و محیط زیست

3-5-1- مدیریت منابع آب

مدل‌های فازی برای تخصیص بهینه منابع آب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری بکار می‌رود که برای تخمین فاصله زهکش‌ها و تحلیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، که به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در پروژه‌های منابع آب کمک می‌کند. [56]

3-5-2- پیش‌بینی سیل

منطق فازی می‌تواند داده‌های مختلفی مانند بارش، دبی رودخانه و شرایط زمین را تحلیل کرده و احتمال وقوع سیل را پیش‌بینی کند. استفاده از مدل‌های فازی در این زمینه می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیل کمک کند. [57]

3-5-3- ارزیابی کیفیت آب

استفاده از منطق فازی برای تعیین کاربردهای بهینه پساب‌ها در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعتی و زیست محیطی کاربرد دارد. [58] در ارزیابی منابع زیرزمینی، ترکیب WQI عددی، EWQI وزنی و FWQI فازی نشان داد که FWQI با کاهش طبقه‌بندی‌های افراطی، الگوهای آلودگی را با دقت بالاتری منعکس می‌کند. [59] کنترل پمپ‌های گردش و هیتر در آکواریوم‌های زینتی با تحلیل فازی pH، دما و TDS، دقت عمومی اندازه‌گیری را تا بیش از ۹۹٪ بهبود می‌بخشد. [60] در مزرعه تیلایپا، یک سامانه IoT فازی بر پایه الگوریتم Sugeno، داده‌های دمای آب و E-201-C (pH) را بلادرنگ پردازش و محلول‌های بافر pH را بهینه تریق می‌کند؛ کارایی نگهداری پارامترها در محدوده مطلوب را تضمین می‌کند. [61] توسعه مدل های محاسباتی بر اساس قواعد فازی و استانداردهای WHO و GPCB در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی نشان داده که نتایج فازی با انحراف کمتری نسبت به شاخص‌های کلاسیک همراه است. [62] مدل Mamdani برای یکپارچه‌سازی چند شاخص (شرب، کشاورزی، صنعتی) با ایجاد یک شاخص یکتا، تناقض در طبقه‌بندی نمونه‌ها را برطرف می‌کند. [63]

3-5-4- مدیریت پسماند و آلودگی

منطق فازی می‌تواند در ارزیابی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید پاک‌تر و کاهش مصرف منابع طبیعی به کار گرفته شود. و از سیستم‌های ترکیبی فازی-ریاضی برای ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف آب و مواد شیمیایی در صنایع آلاینده استفاده کرد. [64]

3-6- کاربرد منطق فازی در مهندسی مواد و مصالح

3-6-1- ارزیابی دوام بتن و مصالح

منطق فازی برای تحلیل داده‌های مرتبط با خستگی مصالح و پیش‌بینی عمر مفید آن‌ها، به ویژه در شرایطی که داده‌ها ناقص یا مبهم هستند، می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر منحنی‌های خستگی و پیش‌بینی تغییرات دوام مصالح کمک کند. [65]

3-6-2- پیش‌بینی رفتار مصالح تحت بارگذاری

استفاده از توزیع‌های فازی برای تحلیل رفتار خستگی قطعات و پیش‌بینی عمر مفید آن‌ها در شرایط بارگذاری متغیر کاربرد دارد. [65] از منطق فازی و ترکیب آن با روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی خواص مکانیکی بتن و سایر مصالح ساختمانی استفاده می‌شود. [66]

3-6-3- کنترل کیفیت تولید مصالح

از سیستم‌های فازی برای ارزیابی کیفیت بتن تولیدی و بهینه‌سازی فرآیند تولید. [67] و همچنین از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر منطق فازی برای انتخاب مواد پایدار و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید می‌توان استفاده کرد. [68]

4- تحلیل مقایسه‌ای روش‌ها و مدل‌ها

جدول شماره 1: تفاوت‌ها و شباهت‌های کلیدی میان سیستم‌های فازی و روش‌های قطعی

معیار مقایسه	سیستم‌های فازی	روش‌های قطعی	رفرنس
تعریف	مبتنی بر منطق فازی و قواعد "اگر-آنگاه"؛ قابلیت مدل‌سازی داده‌های مبهم و غیرقطعی	مبتنی بر روابط ریاضی دقیق و داده‌های قطعی؛ نیازمند اطلاعات کامل و شفاف	[69][70][71]
مدیریت عدم قطعیت	توانایی بالا در تحلیل داده‌های مبهم، ناقص و چندمعیاره	ضعیف؛ عدم توانایی در مدیریت داده‌های مبهم یا ناقص	[70][72]
انعطاف‌پذیری	بالا؛ قابل ترکیب با روش‌های هوشمند و بهینه‌سازی برای مسائل پیچیده	محدود؛ مناسب برای مسائل با ساختار و داده‌های مشخص	[71][73][74]
کاربردها	کنترل سیستم‌های پیچیده، ارزیابی ریسک، بهینه‌سازی، تصمیم‌گیری چندمعیاره	کنترل کلاسیک (PID, LQG)، مدل‌سازی آماری، تحلیل‌های ساده	[69][72][73]
مزایا	مدیریت عدم قطعیت، انعطاف‌پذیری، بهبود تصمیم‌گیری در شرایط واقعی	سادگی، سرعت محاسباتی، مناسب برای داده‌های دقیق و محیط‌های پایدار	[70][71][73]
معایب	نیاز به تعریف توابع عضویت و قواعد خبره، پیچیدگی محاسباتی در سیستم‌های بزرگ	عدم توانایی در مواجهه با عدم قطعیت و داده‌های مبهم	[71][73][75]
دقت در شرایط واقعی	بالا در محیط‌های پویا و نامطمئن؛ بهبود عملکرد نسبت به روش‌های قطعی	کاهش دقت در شرایط عدم قطعیت یا داده‌های ناقص	[70][73][75]
نمونه کاربردی	ارزیابی ریسک لجستیک، کنترل هوشمند تهویه، بهینه‌سازی تطبیقی، مدیریت ترافیک	کنترل موقعیت موتور با PID، تحلیل آماری، مدل‌سازی کلاسیک شبکه‌های حسگر	[69][72][73]
نتایج تجربی	بهبود دقت، افزایش پایداری و پاسخگویی سریع‌تر در محیط‌های متغیر و نامطمئن	عملکرد مناسب فقط در شرایط داده‌های کامل و محیط‌های پایدار	[69][70][73]

سیستم‌های فازی در ارزیابی ریسک و مدیریت عدم قطعیت در محیط‌های پیچیده و پویا عملکرد بهتری نسبت به روش‌های قطعی دارند. [73,70] روش‌های قطعی همچنان در محیط‌های با داده‌های کامل و ساختار ساده به دلیل سادگی و سرعت محاسباتی کاربرد دارند. [72,71] ترکیب سیستم‌های فازی با روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های ژنتیک یا یادگیری تقویتی می‌تواند کارایی و دقت را بهبود بخشد. [74,71]

4-1- ترکیب منطق فازی با دیگر روش‌ها

4-1-1- شبکه‌های عصبی فازی (ANFIS)

شبکه‌های عصبی فازی Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System یا (ANFIS) ترکیبی از قابلیت‌های یادگیری شبکه‌های عصبی و استنتاج فازی است. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی، کاربردهای گسترده‌ای دارد که ترکیب یادگیری شبکه‌های عصبی با قواعد فازی برای بهبود دقت و انعطاف‌پذیری. [79,78,77,76] و همچنین قابلیت تنظیم خودکار پارامترهای فازی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری. [80] کاربردهایی همچون پیش‌بینی رفتار

سیستم‌های غیرخطی مانند دینامیک سیالات و کنترل توان [80,77] بهبود کیفیت توان در سیستم‌های الکترونیکی و کاهش هارمونیک‌ها [77] پیش‌بینی کیفیت آب و رفتار مواد [82,81] را در پی خواهد داشت.

4-1-2- الگوریتم‌های تکاملی فازی

الگوریتم‌های تکاملی فازی ترکیبی از منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) هستند. برای حل مسائل پیچیده و بهینه‌سازی در فضای جستجوی چندبعدی استفاده می‌شوند ویژگی‌های منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت در فرآیند بهینه‌سازی [79,78] و توانایی یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه در مسائل چندهدفه [84,83] و بهینه‌سازی توان واکنشی در سیستم‌های قدرت با منابع تجدیدپذیر [85] کاربرد دارد.

4-1-3- سیستم‌های فازی-احتمالاتی

سیستم‌های فازی-احتمالاتی ترکیبی از منطق فازی و روش‌های احتمالاتی هستند که برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های آماری و زبانی استفاده می‌شوند ویژگی‌های ترکیب داده‌های زبانی و آماری برای تحلیل دقیق‌تر [83,78] و استفاده از قواعد فازی برای تفسیرپذیری بهتر مدل‌های احتمالاتی [83] کاربردهای تحلیل خطرات و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده [78]، تفسیرپذیری شبکه‌های عصبی عمیق با استفاده از قواعد فازی [83] و پیش‌بینی و مدیریت عدم قطعیت در سیستم‌های قدرت و انرژی [85] را در پی خواهد داشت.

4-2- معیارهای ارزیابی عملکرد منطق فازی

در ارزیابی منطق فازی معمولاً سه معیار اصلی مدنظر قرار می‌گیرد دقت، قابلیت تفسیر و پیچیدگی محاسباتی. هر یک از این معیارها جنبه‌ای از کارایی مدل را می‌سنجد و در طراحی یک سیستم فازی باید تعادلی میان آن‌ها برقرار شود.

4-1-2- دقت (Accuracy)

خطای میانگین مربعات (MSE) در پیش‌بینی پیوسته نرخ تشخیص صحیح (True Positive Rate) در مسائل طبقه بندی که کاربرد عملی آن در چارچوب F-IND برای تشخیص خطا در محرک‌های الکترومکانیکی، دقت بالایی در مقایسه با حالت‌های بدون بهینه‌سازی گزارش شده است [86] یا در مدل‌های ترکیبی تکاملی-عصبی، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب وزن‌های اولیه و سپس الگوریتم لوبنبرگ-مارکوارت، منجر به کاهش مقدار MSE و افزایش کارایی کلی شده است [88].

4-2-2- قابلیت تفسیر (Interpretability)

شفافیت قواعد اگر-آنگاه و سهولت در درک ساختار سامانه توسط کارشناسان و همچنین تعداد و پیچیدگی توابع عضویت و قواعد فازی که اهمیت این مهم در سیستم‌های تشخیص خطا باید علاوه بر دقت، نتایج و منطق تصمیم‌گیری‌شان برای کارشناسان قابل فهم باشد تا امکان اعتبارسنجی و نگهداری فراهم گردد [88].

4-2-3- پیچیدگی محاسباتی (Computational Complexity)

زمان پردازش کل مدل یا مصرف حافظه و تعداد عملیات فازی و یا رشد نمایی تعداد قواعد با افزایش متغیرهای ورودی که به عنوان مثال در مدل تخمین حالت شارژ باتری، ترکیب منطق فازی با روش TOPSIS باعث کاهش ۳۰٪ زمان پردازش نسبت به روش‌های مرسوم شده است [87] و یا در سامانه‌های ترکیبی عصبی-فازی، خودکار سازی انتخاب پارامترهای اولیه با الگوریتم ژنتیک و سپس تنظیم دقیق با روش LM، ضمن حفظ یا بهبود دقت، پیچیدگی محاسباتی را نیز کاهش داده است [88].
تعادل میان این سه معیار از آن جهت حیاتی است که بهبود بیش از حد یکی (مثلاً افزایش بی‌رویه تعداد قواعد برای بالا بردن دقت) ممکن است به هزینه سنگین در پیچیدگی محاسباتی و کاهش قابلیت تفسیر منجر شود. بنابراین در طراحی سیستم‌های فازی باید همواره بهینه‌سازی چندمعیاره‌ای را مدنظر قرار داد.

5- مزایا و چالش‌ها

5-1- مزایا منطق فازی

5-1-1- مدل سازی عدم قطعیت و ابهام

یکی از برجسته ترین مزایای منطق فازی، توانایی آن در مدل سازی عدم قطعیت و ابهام است که در بسیاری از سیستم های دنیای واقعی وجود دارد. برخلاف منطق دودویی که تنها حالت درست یا غلط را می پذیرد، منطق فازی با استفاده از مجموعه های فازی و توابع عضویت، درجه عضویت یک عنصر را در یک مجموعه به صورت پیوسته بین ۰ و ۱ تعریف می کند. این قابلیت به سیستم های فازی اجازه می دهد تا داده های غیردقیق و مبهم (Epistemic Uncertainty) را به طور موثر مدیریت کنند و در ارزیابی سیستم های پیچیده، تخصیص قابلیت اطمینان، و بهبود تصمیم گیری کاربرد داشته باشند. [92,91,90,89]

5-1-2- انعطاف پذیری در کار با داده های کیفی

منطق فازی به طور طبیعی با متغیرهای زبانی (Linguistic Variables) سروکار دارد. [93] این به معنای آن است که می تواند مفاهیم کیفی و توصیفی مانند "کم"، "متوسط" یا "زیاد" را به مقادیر عددی قابل پردازش تبدیل کند. این انعطاف پذیری باعث می شود که منطق فازی به ویژه در حوزه هایی که اطلاعات به شکل زبانی یا ذهنی توسط متخصصان بیان می شود (مانند رژیم درمانی یا مدیریت انرژی)، بسیار کارآمد باشد. [94]

5-1-3- قابلیت تفسیر نسبتاً خوب

سیستم های فازی، به خصوص سیستم های مبتنی بر قواعد اگر-آنگاه، از قابلیت تفسیر بالایی برخوردارند. [93] این قواعد اغلب بر اساس دانش متخصصان انسانی تدوین می شوند و می توانند به زبان طبیعی بیان شوند، که درک نحوه عملکرد سیستم و تصمیم گیری های آن را برای کاربران و متخصصان آسان تر می کند. [96,95] این ویژگی در مقایسه با مدل های پیچیده دیگر مانند شبکه های عصبی عمیق، که اغلب به عنوان "جعبه سیاه" شناخته می شوند، مزیت قابل توجهی محسوب می شود. [92]

5-1-4- عدم نیاز به مدل های ریاضی پیچیده

منطق فازی می تواند بدون نیاز به یک مدل ریاضی دقیق و پیچیده از سیستم عمل کند. [91] این ویژگی به مهندسان و طراحان اجازه می دهد تا کنترل کننده ها و سیستم ها را برای فرآیندهایی که دینامیک آن ها به خوبی تعریف نشده یا مدل سازی ریاضی آن ها دشوار است، طراحی کنند. [95] منطق فازی بر دانش متخصصان و قواعد شهودی تکیه می کند. [95,93]

5-1-5- سازگاری با دانش متخصصان

قواعد فازی اغلب بر اساس تجربه و دانش خبرگان انسانی طراحی می شوند. [93,89] این امکان، پیاده سازی بینش های انسانی را در سیستم های خودکار فراهم می آورد. در واقع، منطق فازی زبان و تفکر انسانی را به فرمول های قابل فهم برای کامپیوتر ترجمه می کند، که این ویژگی در زمینه هایی کنترل رباتیک یا تخمین میزان مصرف نرم افزار بسیار مفید است. [97]

5-2- چالش ها و محدودیت ها منطق فازی

5-2-1- ذهنیت در تعریف توابع عضویت

تعریف شکل، تعداد و پارامترهای توابع عضویت عمدتاً بر مبنای تجربه و سلیقه خبرگان صورت می گیرد و فاقد روش های استاندارد و یکپارچه است؛ این امر منجر به عدم یکنواختی و دشواری در تکرارپذیری مدل ها می شود. [98]

5-2-2- انفجار تعداد قواعد (مشکل "انفجار قوانین" در سیستم های پیچیده)

با افزایش متغیرهای ورودی و سطوح زبانی (Membership Levels)، تعداد قواعد «اگر-آنگاه» به طور نمایی رشد می کند که علاوه بر پیچیدگی نگهداری، مصرف محاسباتی را نیز به شدت افزایش می دهد. [98]

5-2-3- نیاز به تنظیم دستی پارامترها

پارامترهایی مانند بازه های توابع عضویت، وزن قواعد و روش های دی فازی سازی اغلب باید به طور دستی تنظیم شوند؛ این پروسه زمان بر بوده و در عمل مستعد خطای انسانی است. [98]

5-2-4- مقیاس پذیری در مسائل بسیار بزرگ

سیستم های فازی کلاسیک در مواجهه با مسائلی که ابعاد بالایی از ورودی ها یا قواعد دارند، دچار کمبود کارایی و پاسخ گویی بلادرنگ می شوند و نیازمند منابع محاسباتی و حافظه بسیار زیاد هستند. [98]

5-2-5- اعتبارسنجی و صحت گذاری مدل ها

به دلیل فقدان معیارها و چارچوب های مرجع استاندارد برای ارزیابی صحت مدل های فازی، تأیید کارایی و تعمیم پذیری آن ها دشوار است و اغلب نیاز به آزمون های تجربی فراوان دارد. [98]

6- روندهای آینده و جهت گیری های پژوهشی

6-1- ترکیب با یادگیری عمیق و هوش مصنوعی پیشرفته

ترکیب منطق فازی با یادگیری عمیق و هوش مصنوعی به منظور بهبود دقت و قابلیت تفسیر مدل ها، یکی از مهم ترین روندهای آینده است. این ترکیب می تواند در مدل سازی داده های پیچیده و غیرقطعی، مانند سیستم های پیش بینی و تشخیص بیماری ها، بسیار مؤثر باشد. توسعه سیستم های فازی نوع ۲ و معماری های هیبریدی برای افزایش استحکام و انعطاف پذیری مدل های هوش مصنوعی نیز از اولویت های پژوهشی است. [98]

6-2- توسعه سیستم های فازی مبتنی بر داده های بزرگ

با رشد داده های بزرگ، نیاز به سیستم های فازی که بتوانند حجم عظیمی از داده ها را پردازش و تحلیل کنند، افزایش یافته است. این سیستم ها در مدیریت منابع، پیش بینی روندها و بهینه سازی فرآیندها کاربرد داشته باشند. [99] استفاده از الگوریتم های بهینه سازی و یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد سیستم های فازی در محیط های داده محور نیز مورد توجه است. [100]

6-3- کاربرد در شهرهای هوشمند و زیرساخت های پایدار

منطق فازی می تواند در مدیریت هوشمند شهرها، از جمله بهینه سازی مصرف انرژی، مدیریت ترافیک، و پایش کیفیت هوا، نقش کلیدی ایفا کند. [98, 48] در زیرساخت های پایدار، مانند سیستم های انرژی تجدیدپذیر و مدیریت منابع آب، منطق فازی به عنوان ابزاری برای تصمیم گیری در شرایط عدم قطعیت استفاده می شود. [100, 101]

6-4- توسعه چارچوب های استاندارد برای کاربرد در مهندسی عمران

نیاز به چارچوب های استاندارد برای استفاده از منطق فازی در مهندسی عمران، به ویژه در زمینه هایی مانند طراحی سازه ها، ارزیابی ریسک، و مدیریت پروژه، احساس می شود. این چارچوب ها می توانند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان مدل ها کمک کنند. ترکیب منطق فازی با روش های آماری و هوش مصنوعی در مهندسی عمران، مانند پایش سلامت سازه ها و بهینه سازی طراحی، از دیگر جهت گیری های پژوهشی است. [48]

6-5- ادغام با BIM و دیجیتالی سازی صنعت ساخت

ادغام منطق فازی با مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و فناوری های دیجیتال، مانند اینترنت اشیا (IoT)، می تواند به بهبود فرآیندهای طراحی، ساخت و مدیریت ساختمان ها کمک کند. این ادغام امکان تحلیل داده های بلادرنگ و تصمیم گیری هوشمند در پروژه های ساخت و ساز را فراهم می کند. [101]

7- نتیجه گیری

پژوهش حاضر نشان داد که منطق فازی به عنوان یک ابزار قدرتمند ریاضی، توانسته است شکاف میان داده های مبهم و تصمیم گیری های دقیق در مهندسی عمران را پر کند [1, 2]. با توجه به ماهیت فیزیکی پروژه های عمرانی که همواره با عدم قطعیت های آماری، اطلاعات ناقص و پارامترهای کیفی همراه هستند، روش های قطعی کلاسیک کارایی لازم را ندارند، در حالی که منطق فازی با استفاده از توابع عضویت و متغیرهای زبانی، امکان مدل سازی واقع گرایانه تر این پیچیدگی ها را فراهم آورده است [1, 5, 14].

یافته‌های این تحقیق بر نقش کلیدی سیستم‌های استنتاج فازی در حوزه‌های مختلف تأکید دارد؛ از کاهش ۲۰ درصدی ارتعاشات سازه‌ای در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال گرفته تا پیش‌بینی ریسک تأخیر و هزینه پروژه‌ها با دقت بیش از ۹۲ درصد در مدل‌های هیبریدی [20، 29]. همچنین، در مهندسی ژئوتکنیک و آب، منطق فازی با ارائه شاخص‌های منعطف‌تر نسبت به روش‌های سنتی، دقت ارزیابی پایداری شیب‌ها، خطر روانگرایی و کیفیت آب‌های زیرزمینی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده است [16، 17، 39]. با این حال، چالش‌هایی نظیر ذهنیت در تعریف توابع عضویت و پدیده انفجار قوانین در سیستم‌های بزرگ، همچنان از محدودیت‌های اصلی این رویکرد به شمار می‌روند [55، 56].

در نهایت، پیشنهاد می‌شود پژوهشگران و مهندسان به سمت بهره‌گیری از سیستم‌های فازی نوع ۲ جهت مدیریت بهتر عدم قطعیت‌های مرتبه بالاتر و ترکیب این منطق با تکنولوژی‌های نوظهور حرکت کنند [58، 61]. آینده مهندسی عمران در گرو ادغام منطق فازی با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا (IoT) و یادگیری عمیق است تا زیرساخت‌هایی هوشمندتر، پایدارتر و مقاوم‌تر در برابر بلایای طبیعی ایجاد گردد [57، 60، 63].

مراجع

- [1] Günal, Ayşe Yeter, and Ruya Mehdi. "Application of a new fuzzy logic model known as" SMRGT" for estimating flow coefficient rate." *Turkish Journal of Engineering* 8, no. 1 (2024): 46-55.
- [2] Portela, Óscar. "Sobre el desarrollo de la lógica borrosa." *Endoxa* 21 (2006): 93-113.
- [3] Peckol, James K. "Fuzzy Sets and Sets and More Sets." (2021): 63-99.
- [4] Azar, Adel, & Mohammad Reza Noruzi. "Fuzzy Implication in the Area of Policy and Policy Making; a Short Non- Mathematical Introduction for Policy Makers." *Journal of Public Administration and Governance* [Online], 1.2 (2011): Pages 7-16. Web. 3 Jan. 2026
- [5] Nikolaeva, Svetlana Glebova. "MODELING FUZZY SYSTEMS FOR DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY." *EKONOMIKA I UPRAVLЕНИЕ: PROBLEMY, RESHENIYA* (2025).
- [6] Webster, John G. *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering*. Vol. 24. New York: John Wiley, 1999.
- [7] Voss, Sarah. "Fuzzy logic in health care settings: Moral math for value-laden choices." *Journal of Humanistic Mathematics* 6, no. 2 (2016): 161-178.
- [8] Zadeh, Lotfi A.. "Fuzzy logic." *Computer* 21 (1988): 83-93.
- [9] Kgate, Calvinia K., Obafemi O. Olatunji, Paul A. Adedje, and Nkosinathi Madushele. "Fuzzy Inference Engine in Condition Monitoring of Industrial Equipment: An Overview." In *2023 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, pp. 262-267. IEEE, 2023.
- [10] Nguyen, Anh-Tu, Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza, Victor C. S. Campos, Reinaldo Martínez Palhares and Michio Sugeno. "Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future." *IEEE Computational Intelligence Magazine* 14 (2019): 56-68.
- [11] Alves, Kaike, Rosangela Ballini and Eduardo Aguiar. "A New Fuzzy Inference System Applied to Time Series Forecasting." *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional* (2023).
- [12] Strzelecki, Ryszard, Galina L. Demidova, Dmitry V. Lukichev, Nikolay Polyakov, Artur Abdullin and S.Yu. Lovlin. "Survey on fuzzy logic methods in control systems of electromechanical plants." *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* (2019).
- [13] Bhatia, Ashish, Renato Cordeiro de Amorim and Vito De Feo. "Hybrid Interval Type-2 Mamdani-TSK Fuzzy System for Regression Analysis." *ArXiv abs/2510.13437* (2025).
- [14] Angelov, Plamen. "Evolving Takagi-Sugeno Fuzzy Systems from Streaming Data (eTS+)." *Evolving intelligent systems: methodology and applications* (2010): 21-50.
- [15] Gadeo-Martos, Manuel-Ángel, Antonio Jesús Yuste-Delgado, Florencia Almonacid Cruz, Jose-Ángel Fernández-Prieto and Joaquin Canada-Bago. "Modeling a High Concentrator Photovoltaic Module Using

- Fuzzy Rule-Based Systems.” *Energies* (2019).
- [16] Ying, Hao. "General SISO Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent are universal approximators." *IEEE Transactions on fuzzy systems* 6, no. 4 (1998): 582-587.
- [17] Zeng, Ke, Nai-Yao Zhang, and Wen-Li Xu. "A comparative study on sufficient conditions for Takagi-Sugeno fuzzy systems as universal approximators." *IEEE Transactions on fuzzy systems* 8, no. 6 (2000): 773-780.
- [18] Gad, Ahmed, and M. Farooq. "Application of fuzzy logic in engineering problems." In *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Cat. No. 37243), vol. 3, pp. 2044-2049. IEEE, 2001.
- [19] Ishibuchi, Hisao, Ken Nozaki, Naohisa Yamamoto, and Hideo Tanaka. "Construction of fuzzy classification systems with rectangular fuzzy rules using genetic algorithms." *Fuzzy sets and systems* 65, no. 2-3 (1994): 237-253.
- [20] Surgelas, V., V. Pukite, and I. Arhipova. "Improvements in the civil engineering focused on the real estate appraisal with the use of artificial intelligence and Fuzzy Logic." *Baltic Surveying* 12 (2020): 44-52.
- [21] Neshat, Mehdi, and Ali Adeli. "Designing a fuzzy expert system to predict the concrete mix design." In *2011 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA) Proceedings*, pp. 1-6. IEEE, 2011.
- [22] Antucheviciene, Jurgita, Zdeněk Kala, Mohamed Marzouk, and Egidijus Rytas Vaidogas. "Solving civil engineering problems by means of fuzzy and stochastic MCDM methods: current state and future research." *Mathematical problems in engineering* 2015, no. 1 (2015): 362579.
- [23] Zohrabzadeh, A.M.: Fuzzy Logic application in buildings vibration control in civil engineering. *Int. J. Eng. Technol.* 11(4), 740–748 (2019). <https://doi.org/10.21817/ijet/2019/v11i4/191104066>
- [24] Vladimir Surgelas, Irina Arhipova and Vivita Pukite. "Civil Engineering Inspection for Real Estate Evaluation with the Use of Artificial Learning Algorithms and Fuzzy Logic". *Rural Sustainability Research Latvia University of Life Sciences and Technologies*, 43, no. 338 (2020): 75-82. <https://doi.org/10.2478/plua-2020-0010>
- [25] Sawyer, James P., and S. S. Rao. "Structural damage detection and identification using fuzzy logic." *AIAA journal* 38, no. 12 (2000): 2328-2335.
- [26] Kong, Xiangxing and Xiangxing Kong. "Intelligent Prediction of Foundation Deformation Using Adaptive Fuzzy Neural Systems." *2025 10th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)* (2025): 1209-1213.
- [27] Çubukçu, Esra Aslı, Esra Uray and Vahdettin Demir. "Fuzzy logic based prediction of retaining wall stability." *Challenge Journal of Structural Mechanics* (2023).
- [28] Hao, Jianing, Dan Yang, Guanxiong Ren, Ying Zhao and Rangling Cao. "A New Approach for the Calculation of Slope Failure Probability with Fuzzy Limit-State Functions." *Fluid Dynamics & Materials Processing* (2024).
- [29] Fan, Lei, Fangxue Liu and Cheng Chen. "Domain adaptation of large language models for geotechnical applications." *ArXiv abs/2507.05613* (2025).
- [30] Nyokum, Taba, and Yamem Tamut. "Artificial intelligence in civil engineering: emerging applications and opportunities." (2025).
- [31] Anjum, Asraar, M. Hrairi, Abdul Aabid Shaikh, Noorfazrina Yatim and Maisarah Ali. "Integrating AI and statistical methods for enhancing civil structural practices: current trends, practical issues, and future direction." *Frattura ed Integrità Strutturale* (2024).
- [32] César, Manuel Braz and R. C. Barros. "ANFIS optimized semi-active fuzzy logic controller for magnetorheological dampers." *Open Engineering* 6 (2016).
- [33] Anjum, Asraar, M. Hrairi, Abdul Aabid, Norfazrina Hayati Mohd Yatim and Maisarah Ali. "Civil Structural Health Monitoring and Machine Learning: A Comprehensive Review." *Frattura ed Integrità*

Strutturale (2024).

- [34] Jain, Rituraj, Sitesh Kumar Singh, Damodharan Palaniappan, Kumar Parmar and Premavathi T. "Data-Driven Civil Engineering: Applications of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning." Turkish Journal of Engineering (2025).
- [35] Mohanaselvi, Swaminathan and G. Hemapriya. "Application of fuzzy logic to earthquake damage predictions." THE 11TH NATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL TECHNIQUES AND APPLICATIONS (2019).
- [36] Mewada, Shivilal. "Perspectives of Fuzzy Logic and Their Applications." (2021).
- [37] Abdoli, Shiva. "Application of fuzzy-logic for design assessment of complex engineering systems in the early design stages." Journal of Engineering Design 33 (2022): 234 - 258.
- [38] Plebankiewicz, Edyta. "Applications of fuzzy technology in civil engineering and construction management: the special issue in the 100th anniversary of Lotfi Zadeh." Journal of Civil Engineering and Management (2021).
- [39] Souza, Gabriel Alexandre de. "The use of Fuzzy logic for risk assessment in financial investments." Brazilian Journal of Development (2025).
- [40] Djenadic, Stevan, Miloš Tanasijević, Predrag D. Jovancic, Dragan Ignjatović, Dejan Petrović and Ugljesa S. Bugaric. "Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM." Mathematics (2022).
- [41] Shameli-Sendi, Alireza, Mehdi Shajari, M. Hassanabadi, Masoume Jabbarifar, and Michel Dagenais. "Fuzzy multi-criteria decision-making for information security risk assessment." Open Cybern. Syst. J 6, no. 1 (2012): 26-37.
- [42] Pamučar, Dragan S., Darko Božanić, and Nenad Komazec. "Risk assessment of natural disasters using fuzzy logic system of type 2." Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies 21, no. 80 (2016): 23-34.
- [43] Siami, Mohammad, Mohsen Naderpour, Fahimeh Ramezani and Jie Lu. "Risk Assessment Through Big Data: An Autonomous Fuzzy Decision Support System." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 25 (2024): 9016-9027.
- [44] Chakhrit, Ammar, Imene Djelamda, Mohammed Bougofa, Islam Hadj Mohamed Guetarni, Abderraouf Bouafia and Mohammed Chennoufi. "Integrating fuzzy logic and multi-criteria decision-making in a hybrid FMECA for robust risk prioritization." Quality and Reliability Engineering International 40 (2024): 3555 - 3580.
- [45] Nakonechna, Yuliia, Bohdan Savchuk and Anna Kovalova. "Fuzzy logic in risk assessment of multi-stage cyber attacks on critical infrastructure networks." Theoretical and Applied Cybersecurity (2025).
- [46] Góes, André Luís Barbosa Gomes, Rafaqat Kazmi, Aqsa and Siddhartha Nuthakki. "A Hybrid AI-Based Risk Assessment Framework for Sustainable Construction: Integrating ANN, Fuzzy Logic, and IoT." International Journal of Advanced Computer Science and Applications (2025).
- [47] Swetha, Allapuram, M. Gopal Naik and Togiti Dhilip. "Assessment Of Construction Risk Using Mamdani Fuzzy Inference System: A Case Study Of The Construction Industry In Hyderabad City." Nanotechnology Perceptions (2024).
- [48] Alshibani, Adel, Badr Eddin Hafez, Mohammad A. Hassanain, Awsan Mohammed, Mohammed M. Al-Osta and Ashraf A. Bahraq. "Fuzzy Logic-Based Method for Forecasting Project Final Cost." Buildings (2024).
- [49] Trach, Roman, Oleksandr Khomenko, Yuliia Trach, Oleksii Kulikov, Maksym Druzhynin, Nataliia Kishchak, Galyna Ryzhakova, Hanna Petrenko, Dmytro Prykhodko and Olha Obodianska. "Application of Fuzzy Logic and SNA Tools to Assessment of Communication Quality between Construction Project Participants." Sustainability (2023).
- [50] Mehdipoor, Amir, Ivanka Iordanova and Mohamed Al-Hussein. "Application of Fuzzy Logic for Selection of Off-Site Construction Approach." Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group

for Lean Construction (IGLC31) (2023).

- [51] Rashid, Hatim A., Omar Akrm Al-juboori and Ahmed Mohammed Raoof Mahjoob. "Safety management in private construction project in Iraq." Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN) (2021).
- [52] Al-Ali, Abdul-Rahman, Salwa M. Beheiry, Ahmad Al Nabulsi, Shahed Obaid, Noor Mansoor, Nada Odeh and Alaaeldin Mostafa. "An IoT-Based Road Bridge Health Monitoring and Warning System." Sensors (Basel, Switzerland) 24 (2024).
- [53] Bhasme, Anjal, Abhay R. Kasetwar and Rahul Pethe. "Development of Intrusion detection system for VANET using Machine Learning." International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (2025).
- [54] Patankar, Prerna, Sanjay Dorle, Wani V. Patil and Swati C. Patil. "A Novel AI-based Approach for the Design of VANET Communication Protocol." 2024 International Conference on Innovations and Challenges in Emerging Technologies (ICICET) (2024): 1-7.
- [55] Pan, Bin, Hao Wu and Jin Wang. "FL-ASB: A Fuzzy Logic Based Adaptive-period Single-hop Broadcast Protocol." International Journal of Distributed Sensor Networks 14 (2018).
- [56] Fakhrrurroja, Hanif, Edi Triono Nuryatno, Aris Munandar, Muhammad Fahmi, and Novan Agung Mahardiono. "Water quality assessment monitoring system using fuzzy logic and the internet of things." Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology 14, no. 2 (2023): 198-207.
- [57] Trach, Roman, Yuliia Trach, Agnieszka Kiersnowska, Anna Markiewicz, Marzena Lendo-Siwicka and Konstantin Rusakov. "A Study of Assessment and Prediction of Water Quality Index Using Fuzzy Logic and ANN Models." Sustainability (2022).
- [58] Mustika, I Wayan, Faisal Najib and Yusriadi Yusriadi. "Fuzzy Logic-Based Automatic Water Quality Control System in Smart Aquaponics." 2023 10th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE) (2023): 425-430.
- [59] Seraiche, Lakhdar, Messaoud Ghodbane, Tahar Selmane and Mostafa Dougha. "Advanced Groundwater Quality Assessment Using Geochemical Analysis and Water Quality Indices with Fuzzy Logic." Journal of Engineering and Sustainable Development (2025).
- [60] Alfan, Rocky, Romi Wiryadinata, Fragrans Anjasmara Sobar, Imamul Muttakin, Ipick Setiawan and Alief Maulana. "Water quality control on fish aquarium using Fuzzy Logic method." Journal Industrial Servics (2023).
- [61] Prafanto, Anton, Anindita Septiarini, Novianti Puspitasari, Medi Taruk and Dicky Alvian Mahendra. "IoT-based Water Quality Control in Tilapia Aquaculture Using Fuzzy Logic." Innovation in Research of Informatics (Innovatics) (2024).
- [62] Nigam, Utkarsh, and Yadav SM. "Development of computational assessment model of fuzzy rule based evaluation of groundwater quality index: comparison and analysis with conventional index." In Proceedings of International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology and Management (SUSCOM), Amity University Rajasthan, Jaipur-India. 2019.
- [63] Loganathan, Sankar and Mahenthiran Sathiyamoorthy. "Groundwater quality assessment for drinking, irrigation purposes and fuzzy logic-based water quality index for industrial suitability in Walajapet taluk, Ranipet district, Tamil Nadu, India." AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society (2024).
- [64] Telukdarie, Arnesh. "Development of a hybrid fuzzy-mathematical cleaner production evaluation tool for surface finishing." (2007).
- [65] Gadolina, Irina. "Application of the fuzzy data theory in durability estimation." Dependability (2022).
- [66] Lim, Hwee Ling. "Handbook of Research on Recent Developments in Materials Science and Corrosion Engineering Education." (2015).
- [67] Martínez-Barrera, Gonzalo, Osman Gencel, Ahmet Beycioğlu, Serkan Subaşı and Nelly González-Rivas. "Artificial Intelligence Methods and Their Applications in Civil Engineering." (2015).
- [68] Aydeniz, Esma Gül, İlkin Güven, Nisanur Özçelik, Hakan Taha Çetin and Ekin Ünlü. "Selection of

- Sustainable Facade Materials for Buildings Using Fermatean Fuzzy AHP & WASPAS Methodology.” *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 49 (2025): 1175 - 1197.
- [69] Sharma, Yogender Kumar, Gulrej Ahmed and Dinesh Kumar Saini. “Comparative Performance Analysis of Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems for Sustainable Cluster Formation in WSNs.” *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 49 (2025): 1306 - 1332.
- [70] Dawidowicz, Jacek and Rafał Buczyński. “A Fuzzy Logic Framework for Multi-Criteria Assessment of Rainwater Drainage Infrastructure.” *Water* (2025).
- [71] Ibáñez, Óscar, and Alberte Castro. "Genetic Fuzzy Systems Applied to Ports and Coasts Engineering." In *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, edited by Juan Ramón Rabuñal Dopico, Julian Dorado, and Alejandro Pazos, 759-766. Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2009.
- [72] Montes Rivera, Martín, Ernesto Olvera-Gonzalez and Nivia Escalante-García. “UPAFuzzySystems: A Python Library for Control and Simulation with Fuzzy Inference Systems.” *Machines* (2023).
- [73] Dong, Yan and Yanjia Tian. “Fuzzy Logic-Based Risk Assessment Model for Cross-Border E-Commerce Logistics Supply Chain.” *Journal of Circuits, Systems and Computers* (2025).
- [74] Ortiz-Muñoz, Diana, David Luviano-Cruz, Luis Asunción Pérez-Domínguez, Alma G. Rodríguez-Ramírez and Francesco García-Luna. “Hybrid Fuzzy-DDPG Approach for Efficient MPPT in Partially Shaded Photovoltaic Panels.” *Applied Sciences* (2025).
- [75] Supian, Sudradjat, Subiyanto Subiyanto, Sisilia Sylviani, Tubagus Robbi Megantara, Abdul Talib Bon and Vasile Preda. “Mathematical Modeling of Ride-Hailing Matching Considering Uncertain User and Driver Preferences: Interval-Valued Fuzzy Approach.” *Mathematics* (2025).
- [76] Rafiei, Hamed and Mohammad-R. Akbarzadeh-T.. “Reliable Fuzzy Neural Networks for Systems Identification and Control.” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 31 (2023): 2251-2263.
- [77] Vargas, Oscar Sánchez, Susana Estefany de León Aldaco, Jesús Aguayo Alquicira, Luis Gerardo Vela-Valdés and Adolfo Rafael López Núñez. “Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) Applied to Inverters: A Survey.” *IEEE Transactions on Power Electronics* 39 (2024): 869-884.
- [78] Alkhayyat, Ahmed, Firas Abedi, Ashish Bagwari, Pooja Joshi, Haider Mahmood Jawad, Sarmad Nozad Mahmood and Yousif Khalaf Yousif. “Fuzzy logic, genetic algorithms, and artificial neural networks applied to cognitive radio networks: A review.” *International Journal of Distributed Sensor Networks* 18 (2022).
- [79] Yan, Xu, Han Huang, Zhi Feng Hao and Jiahai Wang. “A Graph-Based Fuzzy Evolutionary Algorithm for Solving Two-Echelon Vehicle Routing Problems.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 24 (2020): 129-141.
- [80] Göktepe Körpeoğlu, Seda and Sevda Göktepe Yıldız. “Using artificial intelligence to predict students’ STEM attitudes: an adaptive neural-network-based fuzzy logic model.” *International Journal of Science Education* 46 (2023): 1001 - 1026.
- [81] Trach, Yuliia, Roman Trach, Pavlo Kuznietsov, Alla Pryshchepa, Olha Biedunkova, Agnieszka Kiersnowska, and Ihor Statnyk. "Predicting the influence of ammonium toxicity levels in water using fuzzy logic and ANN models." *Sustainability* 16, no. 14 (2024): 5835.
- [82] Khanlou, Hossein Mohammad, Bee Chin Ang and Mohsen Marani Barzani. “Prediction, modeling and characterization of surface texturing by sulfuric etchant on non-toxic titanium bio-material using artificial neural networks and fuzzy logic systems.” *Science and Engineering of Composite Materials* 23 (2016): 423 - 433.
- [83] Aghaeipoor, Fatemeh, M. Sabokrou and Alberto Fernández. “Fuzzy Rule-Based Explainer Systems for Deep Neural Networks: From Local Explainability to Global Understanding.” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 31 (2023): 3069-3080.
- [84] Ghadiri, Hamid, Hamed Khodadadi, Hooman Eijei and Milad Ahmadi. “PSO based Takagi-Sugeno fuzzy PID controller design for speed control of permanent magnet synchronous motor.” *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics* (2021).

- [85] Ucheniya, Ravi, Amit Saraswat and Shahbaz Ahmed Siddiqui. "Decision making under wind power generation and load demand uncertainties: a two-stage stochastic optimal reactive power dispatch problem." *International Journal of Modelling and Simulation* 42 (2020): 47 - 62.
- [86] de Martini, Daniele and Tullio Facchinetti. "Fault Detection of Electromechanical Actuators via Automatic Generation of a Fuzzy Index." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25 (2020): 2197-2207.
- [87] Najafi, Amin and Masoud Masih-Tehrani. "Adaptive State of Power Estimation Using Fuzzy Logic Real Driving Patterns Recognition Based on Error-Effort Tradeoff." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 11 (2025): 11866-11877.
- [88] Plawiak, Pawel and Ryszard Tadeusiewicz. "Approximation of phenol concentration using novel hybrid computational intelligence methods." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences* (2014).
- [89] Tariq, Muhammad Imran, Shahzadi Tayyaba, Natash Ali Mian, Muhammad Shahzad Sarfraz, Akhtar Hussain, Muhammad Imran, Emil Pricop, Otilia Cangea and Nicolae Paraschiv. "An analysis of the application of fuzzy logic in cloud computing." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 38 (2020): 5933 - 5947.
- [90] Abed, Saad Abbas and Zena H. Khalil. "Reliability Allocation in Complex Systems Using Fuzzy Logic Modules." *Babylonian Journal of Mathematics* (2023).
- [91] Barbosa, Ana Márcia and Raimundo Real. "Applying Fuzzy Logic to Comparative Distribution Modelling: A Case Study with Two Sympatric Amphibians." *The Scientific World Journal* 2012 (2012).
- [92] M. -f. Lai, M. Nakano and G. -c. Hsieh, "Application of Fuzzy Logic in the Phase-Locked Loop Speed Control of Induction Motor Drive," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 6, pp. 630-639, Dec. 1996, doi: 10.1109/41.544550
- [93] Gajdoš Kljusurić, Jasenka; Rumora, Ivana; Kurtanjek, Želimir Application of Fuzzy Logic in Diet Therapy - Advantages of Application // *Fuzzy Logic: Emerging Technologies and Applications* / Elmer P. Dadios (ed.). Shanghai : Rijeka: IntechOpen, 2012. pp. 41-64
- [94] Khoi, Phan Bui. "Application of Fuzzy Logic in the Robot Control for Mechanical Processing". *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 61, no. 4, June 2023, pp. 531-69, doi:10.15625/2525-2518/18069.
- [95] Ali, Muaiz, Md Ismail Hossain, and Md Shafiullah. "Fuzzy logic for energy management in hybrid energy storage systems integrated DC microgrid." *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*. IEEE, 2022.
- [96] J. Yaqoob, Salam. "Improved Dynamic Performance of Photovoltaic Panel Using Fuzzy Logic-MPPT Algorithm." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021. doi:10.11591/IJEECS.V21.I2.PP617-624.
- [97] Tsengenes, Georgios, and Georgios Adamidis. "Shunt active power filter control using fuzzy logic controllers." In *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 365-371. IEEE, 2011.
- [98] Sheta, Alaa, David Rine, and Aladdin Ayes. "Development of software effort and schedule estimation models using soft computing techniques." In *2008 IEEE congress on evolutionary computation (IEEE world congress on computational intelligence)*, pp. 1283-1289. IEEE, 2008.
- [99] Patale, Sakshi and Aarti Sharma. "Challenges and Future Trends in Fuzzy Logic: A Comprehensive Review." *International Journal of Fuzzy Mathematical Archive* (2025).
- [100] Tang, Hooi Hung, and Nur Syazreen Ahmad. "Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances." *Systems Science & Control Engineering* 12, no. 1 (2024): 2394429.
- [101] Pérez-Briceño, Citlaly, Pedro Ponce, Qiwei Mei, and Aminah Robinson Fayek. "A Type-2 Fuzzy Logic Expert System for AI Selection in Solar Photovoltaic Applications Based on Data and Literature-Driven Decision Framework." *Processes* 13, no. 5 (2025): 1524.