



کد اختصاصی:

۰۴۲۵-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



مروری تحلیلی بر کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن

بهروز فروغی^۱، مهدی فضیلتی^{۲*}

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده صنعت ساختمان و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران؛ b.foroughi@iau.ac.ir

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

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

*نویسنده مسؤول: مهدی فضیلتی

چکیده

رفتار بتن به دلیل ماهیت غیرخطی و وابستگی به عوامل متعدد نظیر ترکیب مصالح، شرایط عمل‌آوری و فرآیند اجرا، همواره با عدم قطعیت همراه بوده است. این ویژگی موجب شده است که روش‌های کلاسیک پیش‌بینی خواص بتن در بسیاری از موارد دقت و قابلیت تعمیم محدودی داشته باشند. در سال‌های اخیر، منطق فازی به عنوان یکی از روش‌های هوشمند، به طور گسترده در پیش‌بینی خواص بتن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هدف این مقاله، ارائه یک مرور تحلیلی بر کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن است. در این راستا، مبانی منطق فازی، انواع سیستم‌های استنتاج و نحوه طراحی توابع عضویت مورد بررسی قرار گرفته و کاربرد آن‌ها در پیش‌بینی خواص بتن تازه نظیر کارایی و اسلامپ، و خواص بتن سخت‌شده به ویژه مقاومت فشاری، تحلیل شده است. همچنین، مطالعات شاخص این حوزه معرفی شده و مزایا و محدودیت‌های رویکردهای مختلف به صورت مقایسه‌ای مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این مرور نشان می‌دهد که منطق فازی توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و مدیریت عدم قطعیت در رفتار بتن دارد. با این حال، چالش‌هایی نظیر وابستگی به کیفیت داده‌ها و طراحی ذهنی قواعد فازی همچنان پابرجاست. در پایان، مسیرهای پژوهشی آینده برای توسعه مدل‌های دقیق‌تر و کاربردپذیرتر پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: منطق فازی، پیش‌بینی خواص بتن، مقاومت فشاری، بتن تازه، مدل‌سازی هوشمند

A Critical Review on Fuzzy Logic Applications in Concrete Property Prediction

Behrooz Foroughi¹, Mehdey Fazilat^{2,3*}

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

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

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

*Corresponding author: Mehdey Fazilat

ABSTRACT

The behavior of concrete is inherently complex due to its nonlinear nature and dependence on multiple factors such as mix composition, curing conditions, and construction practices. As a result, conventional prediction methods often suffer from limited accuracy and generalization capability. In recent years, fuzzy logic has attracted significant attention as an intelligent approach for predicting concrete properties. The objective of this paper is to present a critical review of fuzzy logic applications in the prediction of concrete properties. The fundamentals of fuzzy logic, different fuzzy inference systems, and the design of membership functions are first reviewed. Subsequently, the application of fuzzy logic in predicting fresh concrete properties such as workability and slump, as well as hardened concrete properties, particularly compressive strength, is analyzed. Representative studies are discussed, and the advantages and limitations of various modeling approaches are comparatively evaluated. The review indicates that fuzzy logic models are capable of effectively capturing complex relationships and managing uncertainties associated with concrete behavior. However, challenges related to data quality, subjectivity in rule base design, and model complexity remain. Finally, future research directions are outlined to enhance the accuracy, robustness, and practical applicability of fuzzy logic-based models in concrete engineering.

Keywords: Fuzzy Logic, Concrete Property Prediction, Compressive Strength, Fresh Concrete, Intelligent Modeling



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۱- مقدمه

بتن به‌عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی در پروژه‌های عمرانی، به‌دلیل دسترسی مناسب به مواد اولیه و عملکرد مکانیکی قابل قبول، نقش مهمی در توسعه زیرساخت‌های شهری و صنعتی ایفا می‌کند [۵-۱]. عملکرد بتن، چه در حالت تازه و چه در حالت سخت‌شده، تحت تأثیر مجموعه‌ای از پارامترهای به‌هم‌پیوسته نظیر ترکیب مصالح، شرایط اختلاط، عمل‌آوری و محیط بهره‌برداری قرار دارد [۷]. این وابستگی چندعامله موجب شده است که رفتار بتن ماهیتی غیرخطی، متغیر و همراه با عدم قطعیت داشته باشد [۸]. از این‌رو، پیش‌بینی دقیق خواص بتن همواره یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی بتن محسوب می‌شود.

روش‌های تجربی و آماری متداول که سال‌ها به‌عنوان ابزار اصلی پیش‌بینی خواص بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عموماً مبتنی بر روابط ساده‌سازی شده هستند و توانایی محدودی در مدل‌سازی تعاملات پیچیده میان متغیرهای مؤثر دارند [۹-۱۲]. افزون بر این، این روش‌ها اغلب نسبت به نوسانات داده‌های آزمایشگاهی و عدم قطعیت‌های ذاتی فرآیند تولید بتن حساس بوده و در شرایط عملی، دقت پیش‌بینی آن‌ها کاهش می‌یابد [۱۳]. این محدودیت‌ها، پژوهشگران را به سمت استفاده از روش‌های هوشمند و داده‌محور سوق داده است. در میان رویکردهای هوشمند، منطق فازی به‌دلیل توانایی در ترکیب دانش انسانی با داده‌های عددی و مدیریت ابهام، جایگاه ویژه‌ای در مدل‌سازی سیستم‌های مهندسی پیچیده یافته است [۱۴]. منطق فازی با بهره‌گیری از متغیرهای زبانی و درجات عضویت، امکان توصیف مفاهیمی را فراهم می‌کند که تعریف دقیق ریاضی برای آن‌ها دشوار است؛ مفاهیمی که در مهندسی بتن به‌وفور مشاهده می‌شوند [۲۰-۱۵]. به همین دلیل، طی دو دهه گذشته، کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص مختلف بتن به‌طور قابل توجهی گسترش یافته است.

مطالعات منتشرشده در این حوزه نشان می‌دهد که منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن تازه نظیر کارایی و اسلامپ، و همچنین خواص بتن سخت‌شده از جمله مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است. با این حال، تنوع در انتخاب پارامترهای ورودی، نوع سیستم استنتاج، شکل توابع عضویت و معیارهای ارزیابی، مقایسه مستقیم نتایج مطالعات مختلف را با چالش مواجه ساخته است. از سوی دیگر، بسیاری از پژوهش‌ها تمرکز خود را بر یک نوع بتن یا یک رده مقاومتی خاص محدود کرده‌اند. بر این اساس، نیاز به یک بررسی مروری و تحلیلی جامع که بتواند رویکردهای مختلف به‌کاررفته در کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن را دسته‌بندی، مقایسه و نقد کند، به‌طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. هدف این مقاله ارائه یک مرور تحلیلی بر مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن است. در این راستا، چارچوب‌های رایج مدل‌سازی فازی معرفی شده، مطالعات شاخص مورد بررسی قرار می‌گیرند و در نهایت، چالش‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده در این حوزه تبیین می‌شود.

۲- چارچوب کلی منطق فازی در مهندسی بتن

منطق فازی به‌عنوان یکی از روش‌های هوشمند مبتنی بر دانش، نقش مهمی در مدل‌سازی سیستم‌هایی ایفا می‌کند که رفتار آن‌ها پیچیده، غیرخطی و همراه با عدم قطعیت است [۲۱ و ۲۲]. در مهندسی بتن، بسیاری از پارامترهای مؤثر بر عملکرد مصالح، نظیر کیفیت مصالح اولیه، شرایط اختلاط و عمل‌آوری، به‌صورت دقیق قابل اندازه‌گیری یا پیش‌بینی نیستند. از این‌رو، استفاده از چارچوب‌های فازی امکان تحلیل این عدم قطعیت‌ها را فراهم می‌سازد.

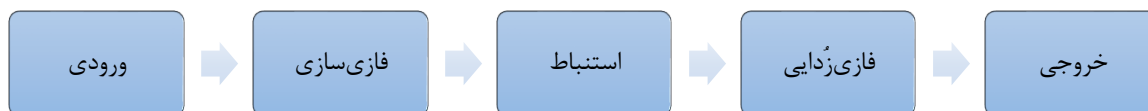
در مطالعات انجام‌شده، چارچوب کلی منطق فازی معمولاً شامل تعریف متغیرهای ورودی و خروجی، تعیین توابع عضویت، تدوین پایگاه قواعد فازی و اجرای فرآیند استنتاج و غیرفازی‌سازی است. این مراحل به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوانند روابط پیچیده میان پارامترهای مؤثر بر خواص بتن را شبیه‌سازی کنند [۲۳-۲۵].

۲-۱- مفاهیم پایه منطق فازی در کاربردهای بتن

۲-۱-۱- مجموعه‌های فازی و درجات عضویت

در نظریه مجموعه‌های فازی، هر عنصر می‌تواند با درجه‌ای بین صفر و یک به یک مجموعه تعلق داشته باشد. این درجه عضویت، میزان انطباق عنصر با مفهوم مورد نظر را بیان می‌کند [۲۶]. در مهندسی بتن، مفاهیمی مانند «نسبت آب به سیمان کم»، «مقدار سیمان متوسط» یا «مقاومت فشاری بالا» را نمی‌توان با مرزهای صریح تعریف کرد. مجموعه‌های فازی این امکان را فراهم می‌کنند که چنین مفاهیمی به‌صورت تدریجی و واقع‌گرایانه مدل‌سازی شوند [۲۷]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از درجات عضویت فازی می‌تواند رفتار بتن را دقیق‌تر از روش‌های دودویی کلاسیک نمایش دهد، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های ورودی دارای پراکندگی و عدم قطعیت هستند [۲۸].

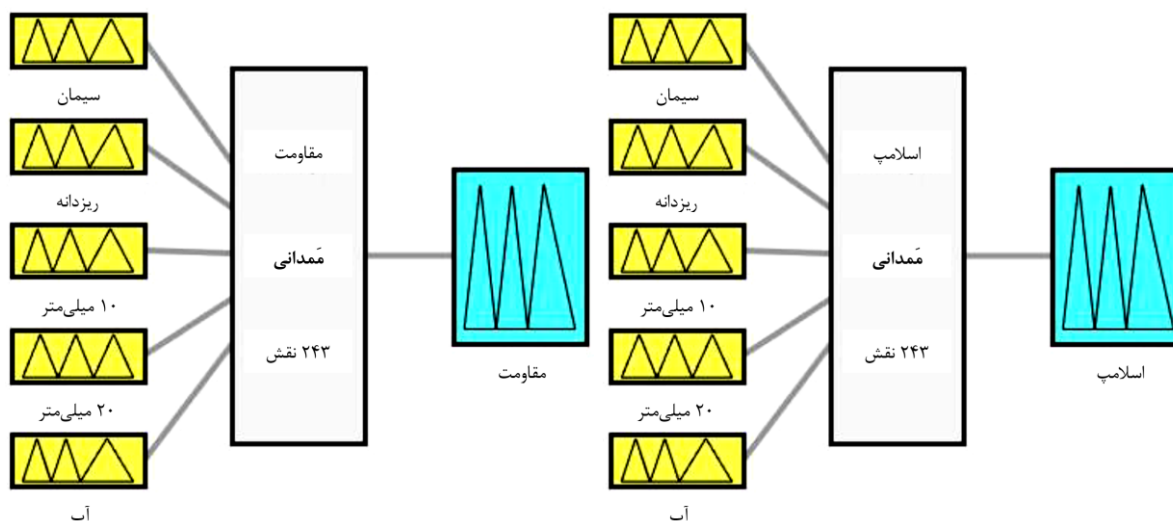
شکل (۱)، ساختار کلی سیستم منطق فازی در مدل‌سازی خواص بتن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار کلی سیستم منطق فازی در مدل‌سازی خواص بتن [۲۹ و ۳۰]

۲-۱-۲- متغیرهای زبانی و توابع عضویت

متغیرهای زبانی یکی از ارکان اصلی سیستم‌های فازی هستند که مقادیر آن‌ها به صورت عبارات زبانی مانند «کم»، «متوسط» و «زیاد» بیان می‌شود. این متغیرها با استفاده از توابع عضویت کمی‌سازی می‌شوند تا امکان پردازش ریاضی فراهم شود [۳۱]. در کاربردهای مهندسی بتن، متغیرهایی نظیر مقدار سیمان، مقدار آب، نسبت آب به سیمان، سن بتن و مقاومت فشاری اغلب به صورت متغیر زبانی تعریف می‌شوند [۳۲]. توابع عضویت به اشکال مختلفی از جمله مثلثی، دوزنقه‌ای و گاوسی تعریف می‌شوند [۳۳]. مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه توابع گاوسی در برخی مطالعات دقت بالاتری ارائه داده‌اند، اما به دلیل سادگی و سهولت تنظیم، توابع عضویت مثلثی همچنان پرکاربردترین گزینه در مدل‌های فازی مهندسی بتن محسوب می‌شوند [۳۴ و ۳۵]. شکل (۲)، نمونه توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی در مدل‌های پیش‌بینی خواص بتن را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی در مدل‌های پیش‌بینی خواص بتن [۱۵]

شکل (۲)، نمونه‌ای از توابع عضویت فازی مورد استفاده برای متغیرهای ورودی و خروجی در مدل‌های پیش‌بینی خواص بتن را نشان می‌دهد. این توابع نقش اساسی در تبدیل داده‌های عددی مربوط به پارامترهای طرح اختلاط و خواص بتن به متغیرهای زبانی ایفا می‌کنند و به عنوان پل ارتباطی میان داده‌های آزمایشگاهی و دانش خبره مهندسی عمل می‌نمایند. در متغیرهای ورودی، پارامترهایی نظیر نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و درصد افزودنی‌ها معمولاً با استفاده از توابع عضویت ساده و پیوسته نظیر مثلثی یا دوزنقه‌ای مدل‌سازی می‌شوند. این انتخاب به دلیل سادگی محاسباتی، سهولت تنظیم و قابلیت تفسیر مناسب آن‌ها در بسیاری از مطالعات گزارش شده است. دسته‌بندی ورودی‌ها به سطوح زبانی نظیر «کم»، «متوسط» و «زیاد» امکان بیان عدم قطعیت و تغییرپذیری ذاتی پارامترهای طرح اختلاط را فراهم می‌کند. در مورد متغیرهای خروجی، از جمله مقاومت فشاری یا شاخص‌های کارایی بتن، توابع عضویت به گونه‌ای تعریف می‌شوند که قادر به نمایش بازه‌های مختلف عملکرد بتن باشند. شکل توابع عضویت خروجی معمولاً به صورت همپوشان تعریف می‌شود تا انتقال نرم بین سطوح عملکردی مختلف بتن تضمین گردد. این همپوشانی نقش مهمی در جلوگیری از ایجاد ناپیوستگی در فرآیند استنتاج فازی و افزایش پایداری پیش‌بینی ایفا می‌کند.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



مرور ادبیات نشان می‌دهد که انتخاب تعداد و شکل توابع عضویت تأثیر مستقیمی بر دقت پیش‌بینی مدل‌های فازی دارد. افزایش تعداد توابع عضویت می‌تواند جزئیات بیش‌تری از رفتار سیستم را مدل‌سازی کند، اما در عین حال منجر به افزایش تعداد قواعد فازی و پیچیدگی محاسباتی می‌شود. از این رو، بسیاری از پژوهش‌ها به استفاده از تعداد محدودی تابع عضویت با توزیع مناسب در دامنه متغیرها بسنده کرده‌اند.

۲-۱-۳- پایگاه قواعد فازی و فرآیند استنتاج

پایگاه قواعد فازی شامل مجموعه‌ای از قواعد زبانی از نوع «اگر- آنگاه» است که روابط علی میان متغیرهای ورودی و خروجی را توصیف می‌کند. این قواعد معمولاً بر اساس دانش خبره، تجربه مهندسی و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی تدوین می‌شوند [۳۶-۳۸]. برای مثال، قاعده‌ای مانند «اگر نسبت آب به سیمان کم و سن بتن زیاد باشد، آنگاه مقاومت فشاری بالا است» نمونه‌ای از قواعد رایج در مدل‌های فازی بتن محسوب می‌شود. فرآیند استنتاج فازی شامل مراحل فازی‌سازی ورودی‌ها، اعمال قواعد فازی و در نهایت غیرفازی‌سازی خروجی‌ها است [۳۹ و ۴۰]. این فرآیند امکان تبدیل اطلاعات کیفی و زبانی به نتایج عددی قابل استفاده در تحلیل‌های مهندسی را فراهم می‌کند. شکل (۳)، مراحل فازی‌سازی، استنتاج و غیرفازی‌سازی در سیستم فازی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- اجزای سیستم استنتاج فازی و نقش هر یک در پیش‌بینی خواص بتن

جزء سیستم فازی	نقش در پیش‌بینی خواص بتن
فازی‌سازی	تبدیل داده‌های عددی به متغیرهای زبانی
پایگاه قواعد	مدل‌سازی دانش تجربی مهندسی
استنتاج	ترکیب قواعد و تولید خروجی فازی
غیرفازی‌سازی	استخراج مقدار عددی نهایی

۲-۲- سیستم‌های استنتاج فازی در مهندسی عمران

۲-۲-۱- سیستم استنتاج فازی ممدانی^۱ و سوگنو^۲

سیستم استنتاج ممدانی یکی از رایج‌ترین انواع سیستم‌های فازی در مهندسی عمران است. در این سیستم، خروجی قواعد فازی به‌صورت مجموعه‌های فازی تعریف شده و مقدار نهایی خروجی از طریق روش‌های غیرفازی‌سازی، نظیر روش مرکز سطح، محاسبه می‌شود [۴۱]. سادگی ساختار و تفسیرپذیری بالای این سیستم باعث شده است که در بسیاری از مطالعات مرتبط با پیش‌بینی خواص بتن مورد استفاده قرار گیرد. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که سیستم ممدانی به‌ویژه در مدل‌هایی که هدف آن‌ها تحلیل مفهومی رفتار بتن و نه صرفاً دقت عددی است، عملکرد مناسبی ارائه می‌دهد [۱۲-۱۴].

در سیستم استنتاج سوگنو، خروجی قواعد فازی معمولاً به‌صورت توابع ریاضی یا مقادیر عددی ثابت تعریف می‌شود. این ویژگی موجب کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش قابلیت ترکیب این سیستم با سایر روش‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌شود [۵]. مرور ادبیات نشان می‌دهد که سیستم سوگنو بیش‌تر در مطالعاتی به‌کار رفته است که هدف آن‌ها دستیابی به دقت بالاتر در پیش‌بینی عددی خواص بتن بوده است [۴۲ و ۴۳].

۲-۲-۳- مزایا و محدودیت‌های رویکردهای فازی در مهندسی بتن

مرور مطالعات نشان می‌دهد که مهم‌ترین مزایای استفاده از منطق فازی در مهندسی بتن شامل توانایی مدیریت عدم قطعیت، استفاده هم‌زمان از داده‌های کمی و کیفی و تفسیرپذیری مناسب نتایج است [۴۴]. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر وابستگی به دانش خبره در تدوین قواعد فازی، حساسیت به انتخاب توابع عضویت و چالش‌های مربوط به تعمیم‌پذیری مدل‌ها نیز گزارش شده است [۴۵]. در جدول (۲)، مقایسه مزایا و محدودیت‌های سیستم‌های ممدانی و سوگنو انجام گرفته است.

^۱ Mamdani

^۲ Sugeno



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



جدول ۲- مقایسه مزایا و محدودیت‌های سیستم‌های ممدانی و سوگنو [۴۴ و ۴۵]

ویژگی	سیستم ممدانی	سیستم سوگنو
نوع خروجی	مجموعه‌های فازی	توابع ریاضی یا مقادیر عددی ثابت
تفسیرپذیری	بسیار بالا و مشابه استدلال انسانی	کمتر از ممدانی
پیچیدگی محاسباتی	متوسط تا بالا	کم‌تر و کارا تر
نیاز به غیرفازی‌سازی	دارد (مانند روش مرکز سطح)	معمولاً ندارد یا ساده است
مناسب برای تحلیل مفهومی	بسیار مناسب	نسبتاً محدود
دقت عددی پیش‌بینی	متوسط تا خوب	خوب تا بسیار خوب
وابستگی به دانش خبره	بالا (در تعریف قواعد)	متوسط
قابلیت ترکیب با روش‌های یادگیرنده	محدود	بسیار مناسب (مانند ANFIS)
کاربرد رایج در مهندسی بتن	تحلیل رفتاری و مفهومی بتن	پیش‌بینی عددی دقیق خواص بتن
محدودیت اصلی	افزایش حجم محاسبات با افزایش قواعد	کاهش شفافیت مفهومی مدل

۳- کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن

با توجه به ماهیت غیرخطی و چندعامله رفتار بتن، پیش‌بینی دقیق خواص آن همواره با عدم قطعیت همراه بوده است [۴۶]. در سال‌های اخیر، منطق فازی به‌عنوان ابزاری توانمند برای مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی، در مطالعات متعددی به‌منظور پیش‌بینی خواص بتن مورد استفاده قرار گرفته است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که این رویکرد توانسته است در هر دو حوزه بتن تازه و بتن سخت‌شده، عملکرد قابل قبولی ارائه دهد.

۳-۱- کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن تازه

خواص بتن تازه، از جمله کارایی، اسلامپ و پارامترهای مرتبط با روانی مخلوط، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت اجرا و عملکرد نهایی سازه دارند [۲۴-۲۱]. پیش‌بینی این خواص پیش از بتن‌ریزی، به مهندسان کمک می‌کند تا از بروز مشکلات اجرایی نظیر جداشدگی، تراکم نامناسب و کاهش دوام جلوگیری کنند [۱۴]. با این حال، این خواص به‌شدت تحت تأثیر ترکیب مصالح، نسبت آب به سیمان و استفاده از افزودنی‌ها قرار دارند و به‌صورت دقیق قابل پیش‌بینی نیستند [۴۷].

جدول ۳- نمونه مطالعات شاخص در کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن تازه [۳۷-۳۳]

مرجع پژوهش	نوع بتن	متغیرهای ورودی اصلی	متغیرهای خروجی	نوع سیستم فازی	نکات شاخص
[۳۳]	بتن معمولی	مقدار سیمان، آب، سنگدانه ریز و درشت، نسبت آب به سیمان	اسلامپ	پیش‌بینی مناسب اسلامپ با استفاده از متغیرهای زبانی	
[۳۴]	بتن خودتراکم	سیمان، خاکستر بادی، سرباره، مواد افزودنی	قطر جریان اسلامپ، زمان قیف V	ممدانی	کاربرد موفق فازی در تحلیل کارایی بتن‌های ویژه
[۳۵]		نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، روان‌کننده	اسلامپ		عملکرد بهتر فازی در مقایسه با مدل‌های کلاسیک
[۳۶]	بتن معمولی	پارامترهای طرح اختلاط		ممدانی و سوگنو	کاهش عدم قطعیت ورودی‌ها با خوشه‌بندی داده‌ها
[۳۷]	بتن معمولی و خودتراکم	پارامترهای طرح اختلاط و افزودنی‌ها	شاخص‌های کارایی	ANFIS	افزایش دقت پیش‌بینی با ترکیب فازی و یادگیری ماشینی

مطابق با جدول (۳)، مطالعات مروری نشان می‌دهد که منطق فازی به‌طور گسترده برای پیش‌بینی کارایی بتن تازه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعات، متغیرهایی نظیر مقدار سیمان، آب، سنگدانه‌های ریز و درشت، مواد افزودنی و نسبت آب به سیمان به‌عنوان

ورودی سیستم فازی در نظر گرفته شده و خروجی مدل معمولاً به صورت اسلامپ یا شاخص‌های جریان بتن تعریف شده است. استفاده از متغیرهای زبانی در این مدل‌ها امکان بیان مفاهیمی مانند «اسلامپ کم»، «اسلامپ متوسط» و «اسلامپ زیاد» را فراهم کرده است. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مدل‌های فازی قادرند روند تغییرات اسلامپ را با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند و در بسیاری از موارد، عملکردی قابل مقایسه یا بهتر از روش‌های رگرسیونی کلاسیک ارائه دهند. این مزیت به ویژه در شرایطی که داده‌های آزمایشگاهی دارای پراکندگی و عدم قطعیت هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

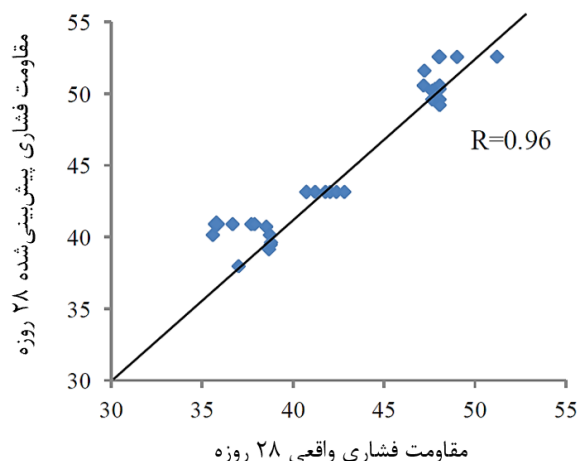
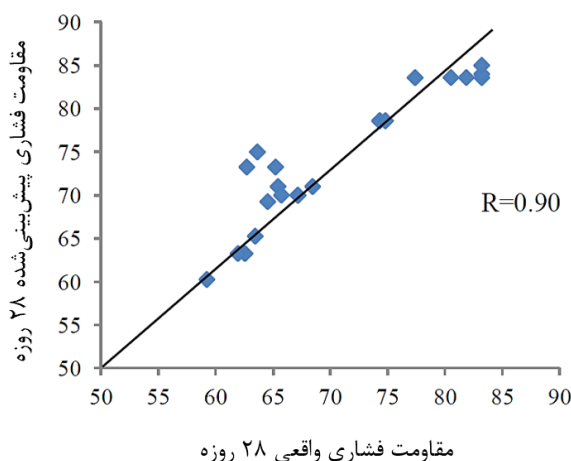
در حوزه بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم، کاربرد منطق فازی نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعات، پارامترهایی مانند قطر جریان اسلامپ، زمان عبور از قیف V و نسبت عبور از حلقه J به عنوان خروجی مدل‌های فازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج مرور این پژوهش‌ها حاکی از آن است که منطق فازی می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی کارایی بتن‌های با رفتار پیچیده باشد.

۳-۲- کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن سخت‌شده

خواص بتن سخت‌شده، به ویژه مقاومت فشاری، به عنوان مهم‌ترین معیار ارزیابی کیفیت بتن در طراحی و بهره‌برداری سازه‌ها شناخته می‌شود [۴۰]. پیش‌بینی مقاومت فشاری در سنین مختلف، به مهندسان این امکان را می‌دهد که تصمیمات بهینه‌تری در زمینه طراحی مخلوط، کنترل کیفیت و برنامه‌ریزی اجرایی اتخاذ کنند. با این حال، مقاومت فشاری بتن تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر ترکیب مصالح، سن بتن، شرایط عمل‌آوری و محیط قرار دارد که پیش‌بینی دقیق آن را دشوار می‌سازد [۳ و ۲].

مرور ادبیات نشان می‌دهد که بیش‌ترین کاربرد منطق فازی در حوزه بتن، به پیش‌بینی مقاومت فشاری اختصاص دارد [۱۶]. در این مطالعات، پارامترهایی نظیر مقدار سیمان، آب، نسبت آب به سیمان، نوع افزودنی‌ها و سن بتن به عنوان ورودی سیستم فازی در نظر گرفته شده و مقاومت فشاری به عنوان خروجی مدل تعریف شده است. نتایج گزارش‌شده نشان می‌دهد که مدل‌های فازی قادرند مقاومت فشاری بتن را در سنین مختلف با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند [۴۸].

برخی مطالعات، با مقایسه سیستم‌های ممدانی و سوگنو، گزارش کرده‌اند که اگرچه سیستم ممدانی از نظر تفسیرپذیری عملکرد بهتری دارد، اما سیستم سوگنو معمولاً دقت عددی بالاتری در پیش‌بینی مقاومت فشاری ارائه می‌دهد [۴۹-۵۱]. افزون بر این، در برخی پژوهش‌ها، استفاده از مدل‌های ترکیبی نظیر سیستم‌های عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) نیز مورد توجه قرار گرفته است که توانسته‌اند دقت پیش‌بینی را نسبت به مدل‌های فازی ساده بهبود بخشند [۳۹]. در میان مطالعات شاخص، برخی پژوهش‌ها به بررسی پیش‌بینی هم‌زمان مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن در رده‌های مقاومتی مختلف پرداخته‌اند [۱۵]. این رویکرد امکان ارزیابی عملکرد بتن در مراحل مختلف عمر را فراهم کرده و از نظر کاربرد صنعتی حائز اهمیت است. شکل (۳)، مقایسه کلی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری بتن در مطالعات مبتنی بر منطق فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه کلی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری بتن در مطالعات مبتنی بر منطق فازی [۱۵]

شکل (۳)، انطباق کلی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری بتن را در مطالعات مبتنی بر منطق فازی نشان می‌دهد.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



تمرکز نقاط داده در مجاورت خط ایده‌آل پیش‌بینی ($y=x$) بیانگر توانایی مناسب مدل‌های فازی در بازتولید روند کلی تغییرات مقاومت فشاری بتن است. این انطباق نشان می‌دهد که منطق فازی قادر است روابط غیرخطی و پیچیده میان پارامترهای طرح اختلاط و مقاومت فشاری را به‌صورت مؤثر مدل‌سازی کند. پراکندگی محدود نقاط در اطراف خط ایده‌آل، به‌ویژه در بازه‌های متداول مقاومت فشاری، حاکی از آن است که مدل‌های فازی در پیش‌بینی مقادیر میانی مقاومت عملکرد قابل قبولی دارند. با این حال، در برخی نواحی مربوط به مقادیر بسیار کم یا بسیار زیاد مقاومت فشاری، افزایش نسبی پراکندگی داده‌ها مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های آموزشی، تنوع ترکیب مصالح و تأثیر عوامل اجرایی باشد. این موضوع نشان می‌دهد که دقت پیش‌بینی مدل‌های فازی به کیفیت و گستره داده‌های ورودی وابسته است.

مرور مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی، به‌ویژه در مقایسه با روش‌های رگرسیونی کلاسیک، منجر به بهبود انطباق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری شده است. این بهبود عمدتاً به توانایی منطق فازی در مدیریت عدم قطعیت و استفاده از دانش خبره در قالب قواعد زبانی نسبت داده می‌شود. افزون بر این، انتخاب نوع سیستم استنتاج (ممدانی یا سوگنو) و شکل توابع عضویت نقش مهمی در میزان پراکندگی نقاط و دقت نهایی پیش‌بینی ایفا می‌کند.

۴- معرفی مطالعه شاخص و تحلیل رویکرد آن

در میان مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن، برخی پژوهش‌ها به‌دلیل جامعیت چارچوب مدل‌سازی، تنوع متغیرهای ورودی و ارزیابی هم‌زمان چند خاصیت بتن، به‌عنوان مطالعات شاخص شناخته می‌شوند. این مطالعات نقش مهمی در شکل‌گیری رویکردهای بعدی داشته و به‌عنوان مبنایی برای توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این بخش، یکی از این مطالعات شاخص که به‌طور گسترده در ادبیات مورد استناد قرار گرفته است، معرفی و از منظر مروری مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مطالعه شاخص مورد بررسی، یک چارچوب مبتنی بر منطق فازی را برای پیش‌بینی خواص مختلف بتن ارائه می‌دهد [۱۵]. در این چارچوب، متغیرهای مرتبط با طرح اختلاط بتن به‌عنوان ورودی سیستم فازی در نظر گرفته شده و خواص بتن در حالت تازه و سخت‌شده به‌عنوان خروجی‌های مدل تعریف شده‌اند. ساختار کلی مدل مبتنی بر سیستم استنتاج فازی بوده و شامل مراحل فازی‌سازی، تعریف پایگاه قواعد، استنتاج و غیرفازی‌سازی است. یکی از ویژگی‌های قابل توجه این مطالعه، استفاده هم‌زمان از چند متغیر ورودی اصلی است که امکان مدل‌سازی تأثیر متقابل پارامترهای طرح اختلاط بر خواص بتن را فراهم کرده است. این رویکرد، نسبت به مدل‌های تک‌پارامتری یا ساده‌سازی‌شده، توانایی بیش‌تری در بازنمایی رفتار واقعی بتن دارد و از این منظر، به‌عنوان یک نمونه شاخص در ادبیات شناخته می‌شود.

در مطالعه شاخص، متغیرهای ورودی عمدتاً شامل پارامترهای اصلی طرح اختلاط بتن نظیر مقدار سیمان، آب، سنگدانه‌های ریز و درشت و نسبت آب به سیمان بوده‌اند. این انتخاب با هدف پوشش عوامل مؤثر اصلی بر رفتار بتن انجام شده و از نظر مهندسی منطقی و قابل توجیه است. استفاده از این متغیرها در قالب متغیرهای زبانی فازی، امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تولید بتن را فراهم کرده است. در بخش خروجی، خواصی نظیر اسلامپ به‌عنوان شاخص رفتار بتن تازه و مقاومت فشاری به‌عنوان مهم‌ترین خاصیت مکانیکی بتن سخت‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انتخاب این خروجی‌ها موجب شده است که چارچوب پیشنهادی قابلیت کاربرد در هر دو مرحله تولید و بهره‌برداری از بتن را داشته باشد و از این منظر، دامنه کاربرد آن نسبت به برخی مطالعات محدودتر، گسترده‌تر باشد.

تحلیل چارچوب ارائه‌شده در مطالعه شاخص نشان می‌دهد که طراحی سیستم استنتاج فازی نقش کلیدی در عملکرد مدل ایفا می‌کند. استفاده از توابع عضویت ساده و قابل تفسیر برای متغیرهای ورودی و خروجی، موجب شده است که قواعد فازی تعریف‌شده با منطق مهندسی بتن هم‌خوانی داشته باشند. این موضوع، تفسیرپذیری مدل را افزایش داده و امکان تحلیل رفتار سیستم را برای کاربران فراهم کرده است. پایگاه قواعد فازی در این مطالعه به‌گونه‌ای تدوین شده است که اثر هم‌زمان چند پارامتر ورودی بر خواص بتن را در نظر بگیرد. این ویژگی موجب شده است که مدل بتواند رفتار غیرخطی بتن را بهتر از روش‌های خطی یا شبه‌خطی بازنمایی کند. با این حال، افزایش تعداد متغیرهای ورودی منجر به افزایش تعداد قواعد شده که می‌تواند پیچیدگی محاسباتی مدل را افزایش دهد.

بررسی نتایج گزارش‌شده در مطالعه شاخص نشان می‌دهد که چارچوب فازی ارائه‌شده توانسته است انطباق مناسبی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده خواص بتن ایجاد کند. این موضوع بیانگر قابلیت منطق فازی در مدل‌سازی رفتار پیچیده بتن است. با این حال، مرور انتقادی این مطالعه نشان می‌دهد که عملکرد مدل تا حد زیادی به کیفیت داده‌های آموزشی و دامنه تغییرات متغیرهای ورودی وابسته است. از منظر قابلیت تعمیم، چارچوب پیشنهادی در این مطالعه به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان توسعه و انطباق با انواع دیگر بتن و شرایط اجرایی مختلف را دارد. با این حال، برای کاربرد در بتن‌های ویژه یا شرایط محیطی متفاوت، بازنگری در دامنه متغیرها و پایگاه قواعد



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



ضروری به نظر می‌رسد. این موضوع به‌عنوان یکی از چالش‌های رایج در کاربرد مدل‌های فازی در مهندسی بتن مطرح می‌شود. در مجموع، مطالعه شاخص مورد بررسی به‌عنوان یکی از پژوهش‌های پایه در کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن، چارچوبی منسجم، قابل تفسیر و کاربردی ارائه داده است. این مطالعه نشان می‌دهد که منطق فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت عدم قطعیت و مدل‌سازی روابط غیرخطی در مهندسی بتن مورد استفاده قرار گیرد. در عین حال، تحلیل مروری آن بیانگر ضرورت توسعه رویکردهای ترکیبی و داده‌محور برای بهبود دقت و قابلیت تعمیم مدل‌ها در پژوهش‌های آینده است.

۵- مقایسه تحلیلی رویکردها، مزایا و محدودیت‌های کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن

مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن، از نظر ساختار مدل، نوع سیستم استنتاج، انتخاب متغیرها و معیارهای ارزیابی تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. این تنوع رویکردها موجب شده است که عملکرد مدل‌های فازی در شرایط مختلف متفاوت باشد. از این‌رو، مقایسه تحلیلی این رویکردها می‌تواند به شناسایی نقاط قوت، محدودیت‌ها و زمینه‌های بهبود در پژوهش‌های آینده کمک کند.

یکی از تفاوت‌های اساسی میان مطالعات مختلف، انتخاب نوع سیستم استنتاج فازی است. سیستم ممدانی به دلیل تفسیرپذیری بالا و شباهت به استدلال انسانی، در بسیاری از مطالعات اولیه کاربرد گسترده‌ای داشته است. این سیستم امکان تحلیل مفهومی رفتار بتن را فراهم کرده و برای بررسی کیفی تأثیر پارامترهای طرح اختلاط مناسب است. با این حال، افزایش تعداد متغیرهای ورودی در سیستم ممدانی منجر به رشد سریع تعداد قواعد و افزایش پیچیدگی محاسباتی می‌شود. در مقابل، سیستم سوگنو به دلیل ساختار ساده‌تر خروجی و کارایی محاسباتی بالاتر، در مطالعاتی که تمرکز بر پیش‌بینی عددی دقیق خواص بتن دارند، بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم به‌ویژه در ترکیب با روش‌های یادگیرنده نظیر شبکه‌های عصبی، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. با این حال، کاهش تفسیرپذیری نسبت به سیستم ممدانی، از جمله محدودیت‌های این رویکرد محسوب می‌شود.

انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر عملکرد مدل‌های فازی در پیش‌بینی خواص بتن است. برخی مطالعات با تمرکز بر تعداد محدودی از پارامترهای کلیدی نظیر نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان، سعی در ساده‌سازی مدل داشته‌اند. این رویکرد موجب کاهش پیچیدگی مدل و سهولت پیاده‌سازی شده، اما ممکن است بخشی از رفتار واقعی بتن را نادیده بگیرد. در مقابل، مطالعاتی که از مجموعه گسترده‌تری از متغیرهای ورودی استفاده کرده‌اند، توانسته‌اند رفتار غیرخطی و تعاملات پیچیده میان پارامترها را بهتر مدل‌سازی کنند. با این حال، افزایش تعداد ورودی‌ها مستلزم طراحی پایگاه قواعد بزرگ‌تر و مدیریت پیچیدگی بیش‌تر است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که ایجاد تعادل میان جامعیت ورودی‌ها و سادگی مدل، یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد منطق فازی در مهندسی بتن محسوب می‌شود. مطالعات مختلف از معیارهای متنوعی برای ارزیابی عملکرد مدل‌های فازی استفاده کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به ضریب همبستگی، خطای میانگین مربعات و انحراف مطلق اشاره کرد. اگرچه بسیاری از پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که مدل‌های فازی دقت مناسبی در پیش‌بینی خواص بتن دارند، اما تفاوت در معیارهای ارزیابی، مقایسه مستقیم نتایج را با دشواری مواجه ساخته است. در برخی مطالعات، مدل‌های فازی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های رگرسیونی کلاسیک نشان داده‌اند، به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها دارای پراکندگی و عدم قطعیت بالا بوده‌اند. با این حال، در مواردی که داده‌های آموزشی محدود یا نامتوازن بوده‌اند، دقت پیش‌بینی کاهش یافته است. این موضوع اهمیت کیفیت داده‌ها و روش‌های پیش‌پردازش را در کنار انتخاب چارچوب فازی برجسته می‌کند.

از نظر کاربرد عملی، مدل‌های فازی به دلیل قابلیت ترکیب دانش خبره و داده‌های تجربی، پتانسیل بالایی برای استفاده در مراحل طراحی مخلوط، کنترل کیفیت و تصمیم‌گیری اجرایی دارند. با این حال، پیچیدگی طراحی پایگاه قواعد و نیاز به تنظیم مناسب توابع عضویت می‌تواند مانعی برای کاربرد گسترده آن‌ها در محیط‌های صنعتی باشد. برخی مطالعات با هدف افزایش کاربردپذیری، به توسعه ابزارهای ساده‌تر و یا استفاده از مدل‌های ترکیبی پرداخته‌اند. این رویکردها تلاش کرده‌اند تا ضمن حفظ دقت پیش‌بینی، فرآیند طراحی و استفاده از مدل‌های فازی را برای کاربران غیرمتخصص نیز تسهیل کنند.

در مجموع، مقایسه تحلیلی رویکردهای مختلف نشان می‌دهد که منطق فازی به‌عنوان ابزاری انعطاف‌پذیر و قدرتمند، توانایی بالایی در پیش‌بینی خواص بتن دارد. با این حال، عملکرد این مدل‌ها به شدت به انتخاب نوع سیستم استنتاج، طراحی توابع عضویت، کیفیت داده‌ها و دامنه کاربرد وابسته است. ایجاد تعادل میان دقت پیش‌بینی، تفسیرپذیری و کاربردپذیری عملی، چالش اصلی در توسعه مدل‌های فازی در مهندسی بتن به‌شمار می‌رود.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۶- چالش‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده در کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در کاربرد منطق فازی برای پیش‌بینی خواص بتن، مرور ادبیات نشان می‌دهد که این رویکرد همچنان با چالش‌ها و محدودیت‌هایی مواجه است. شناسایی این چالش‌ها و تبیین مسیرهای پژوهشی آینده می‌تواند نقش مهمی در توسعه مدل‌های دقیق‌تر، کاراتر و کاربردی‌تر ایفا کند.

۱- چالش؛ وابستگی به کیفیت و گستره داده‌ها: یکی از چالش‌های اصلی در توسعه مدل‌های فازی، وابستگی شدید عملکرد آن‌ها به کیفیت داده‌های آموزشی است. بسیاری از مطالعات موجود بر داده‌های آزمایشگاهی محدود یا داده‌های تولیدشده در شرایط کنترل‌شده تکیه دارند. این موضوع می‌تواند قابلیت تعمیم مدل‌های فازی را به شرایط اجرایی واقعی کاهش دهد، به‌ویژه زمانی که تغییرات قابل توجهی در مصالح، شرایط محیطی و فرآیند تولید بتن وجود دارد.

۲- چالش؛ طراحی ذهنی توابع عضویت و قواعد فازی: در بسیاری از پژوهش‌ها، طراحی توابع عضویت و تدوین پایگاه قواعد فازی بر اساس تجربه و قضاوت پژوهشگر انجام شده است. این رویکرد اگرچه انعطاف‌پذیر است، اما می‌تواند منجر به نتایج وابسته به کاربر و کاهش قابلیت بازتولید مدل‌ها شود. نبود یک چارچوب استاندارد برای طراحی سیستم‌های فازی در مهندسی بتن، از جمله چالش‌های اساسی در این حوزه به‌شمار می‌رود.

۳- چالش؛ افزایش پیچیدگی مدل با افزایش متغیرها: افزایش تعداد متغیرهای ورودی، اگرچه می‌تواند دقت پیش‌بینی را بهبود بخشد، اما منجر به افزایش تعداد قواعد فازی و پیچیدگی محاسباتی مدل می‌شود. این موضوع به‌ویژه در سیستم‌های ممدانی نمود بیش‌تری دارد و می‌تواند کاربرد مدل‌ها را در مسائل عملی و صنعتی با محدودیت مواجه سازد.

۴- چالش؛ محدودیت در پوشش بتن‌های ویژه: بخش قابل توجهی از مطالعات موجود بر بتن‌های معمولی متمرکز بوده‌اند و کاربرد منطق فازی در بتن‌های ویژه نظیر بتن‌های ژئوپلیمری، بتن‌های توانمند و بتن‌های دوستدار محیط‌زیست کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی، فرصت‌های قابل توجهی برای توسعه مطالعات آینده فراهم می‌کند.

۵- مسیر پژوهشی؛ توسعه مدل‌های ترکیبی و هوشمند: یکی از مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی آینده، توسعه مدل‌های ترکیبی مبتنی بر منطق فازی و روش‌های یادگیری ماشین نظیر شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های تکاملی و سیستم‌های عصبی-فازی تطبیقی است. این رویکردها می‌توانند ضمن حفظ قابلیت تفسیر منطق فازی، دقت پیش‌بینی مدل‌ها را بهبود بخشند.

۶- مسیر پژوهشی؛ استانداردسازی طراحی سیستم‌های فازی: تدوین دستورالعمل‌ها و چارچوب‌های استاندارد برای انتخاب متغیرها، طراحی توابع عضویت و تدوین پایگاه قواعد فازی، می‌تواند به افزایش قابلیت بازتولید و مقایسه‌پذیری مطالعات کمک کند. این امر به‌ویژه برای کاربردهای صنعتی و پذیرش گسترده‌تر مدل‌های فازی اهمیت دارد.

۷- مسیر پژوهشی؛ تمرکز بر بتن‌های نوین و پایدار: با توجه به گرایش روزافزون صنعت ساخت‌وساز به استفاده از بتن‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست، کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن‌های ژئوپلیمری، بتن‌های حاوی مواد بازیافتی و بتن‌های کم‌کربن می‌تواند به‌عنوان یک حوزه پژوهشی نوظهور مورد توجه قرار گیرد.

۸- مسیر پژوهشی؛ یکپارچه‌سازی با سامانه‌های تصمیم‌یار: استفاده از مدل‌های فازی به‌عنوان بخشی از سامانه‌های تصمیم‌یار در طراحی مخلوط، کنترل کیفیت و مدیریت پروژه‌های عمرانی، می‌تواند کاربرد عملی این رویکرد را افزایش دهد. توسعه نرم‌افزارهای کاربرپسند و ابزارهای تصمیم‌گیری مبتنی بر منطق فازی، از جمله مسیرهای مهم در این زمینه است.

در مجموع، اگرچه منطق فازی توانایی بالایی در مدل‌سازی رفتار پیچیده و غیرقطعی بتن دارد، اما بهره‌برداری کامل از این ظرفیت مستلزم غلبه بر چالش‌های موجود و توسعه رویکردهای نوین است. تمرکز بر مدل‌های ترکیبی، استانداردسازی فرآیند طراحی سیستم‌های فازی و گسترش دامنه کاربرد به بتن‌های نوین، می‌تواند مسیر آینده پژوهش‌ها در این حوزه را به‌طور مؤثری هدایت کند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کاربرد منطق فازی در پیش‌بینی خواص بتن به‌صورت مروری و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. مرور ادبیات نشان داد که رفتار بتن به‌دلیل ماهیت غیرخطی و وابستگی به عوامل متعدد، همواره با عدم قطعیت همراه بوده و روش‌های کلاسیک پیش‌بینی در بسیاری از موارد با محدودیت مواجه هستند. در این راستا، منطق فازی به‌عنوان ابزاری توانمند در مدیریت ابهام و مدل‌سازی روابط پیچیده، توجه پژوهشگران حوزه مهندسی بتن را به خود جلب کرده است.

نتایج مرور مطالعات نشان داد که مدل‌های فازی توانسته‌اند در پیش‌بینی خواص بتن تازه نظیر کارایی و اسلامپ، و همچنین خواص



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



بتن سخت‌شده به‌ویژه مقاومت فشاری، عملکرد قابل قبولی ارائه دهند. استفاده از متغیرهای زبانی و پایگاه قواعد فازی این امکان را فراهم کرده است که دانش خبره مهندسی در کنار داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت هم‌زمان در فرآیند پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد. در مقایسه با روش‌های رگرسیونی کلاسیک، بسیاری از مطالعات بهبود دقت پیش‌بینی و پایداری نتایج را گزارش کرده‌اند. با این حال، تحلیل انتقادی مطالعات موجود نشان داد که عملکرد مدل‌های فازی به‌شدت به کیفیت داده‌های ورودی، طراحی توابع عضویت و انتخاب نوع سیستم استنتاج وابسته است. افزایش تعداد متغیرهای ورودی، اگرچه می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد، اما منجر به پیچیدگی بیشتر مدل و کاهش کاربردپذیری عملی آن می‌شود. همچنین، وابستگی به قضاوت انسانی در طراحی پایگاه قواعد فازی، یکی از چالش‌های اساسی در توسعه مدل‌های قابل تعمیم به‌شمار می‌رود.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که منطق فازی همچنان ظرفیت بالایی برای توسعه در حوزه مهندسی بتن دارد. حرکت به‌سوی مدل‌های ترکیبی هوشمند، استانداردسازی فرآیند طراحی سیستم‌های فازی و گسترش کاربرد این رویکرد به بتن‌های نوین و پایدار، می‌تواند مسیر پژوهش‌های آینده را شکل دهد. با توجه به نتایج این مرور تحلیلی، منطق فازی می‌تواند به‌عنوان بخشی از ابزارهای تصمیم‌یار در طراحی مخلوط و کنترل کیفیت بتن مورد استفاده قرار گیرد و نقش مؤثری در بهبود عملکرد و پایداری سازه‌های بتنی ایفا کند.

تقدیر و تشکر

نویسنده بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس صمیمانه خود را از حمایت‌های علمی و راهنمایی‌های ارزشمند استاد راهنما، جناب آقای دکتر مهدی فضیلتی، ابراز می‌دارد که نقش مؤثری در شکل‌گیری و ارتقای کیفیت این مطالعه مروری ایفا نموده‌اند. همچنین از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به‌دلیل فراهم‌سازی بستر علمی و پژوهشی مناسب برای انجام این پژوهش صمیمانه تشکر می‌شود. این مقاله حاصل یک مطالعه مروری و تحلیلی بوده و از هیچ‌گونه حمایت مالی مستقیم از سوی نهاد یا سازمان خاصی برخوردار نبوده است.

مراجع

- [1] Li, Q. (2025). Evaluation of high-performance concrete hardness properties using fuzzy logic-based modeling. *Scientific Reports*, 15(1), 33381.
- [2] Tayfur, G., Erdem, T. K., & Kirca, Ö. (2014). Strength prediction of high-strength concrete by fuzzy logic and artificial neural networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014079.
- [3] Topçu, İ. B., & Saridemir, M. (2008). Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural network and fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 22(4), 532-540.
- [4] Saridemir, M., Topçu, İ. B., Özcan, F., & Severcan, M. H. (2009). Prediction of long-term effects of GGBFS on compressive strength of concrete by artificial neural networks and fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1279-1286.
- [5] Akkurt, S., Tayfur, G., & Can, S. (2004). Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength. *Cement and concrete research*, 34(8), 1429-1433.
- [6] Topcu, I. B., & Saridemir, M. (2008). Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science*, 41(3), 305-311.
- [7] Tanyildizi, H. (2009). Fuzzy logic model for prediction of mechanical properties of lightweight concrete exposed to high temperature. *Materials & Design*, 30(6), 2205-2210.
- [8] Abolpour, B., Abolpour, B., Abolpour, R., & Bakhshi, H. (2013). Estimation of concrete compressive strength by a fuzzy logic model. *Research on Chemical Intermediates*, 39(2), 707-719.
- [9] Smith, J. M. (1994). *Fuzzy logic with engineering applications* (2nd ed.). Wiley.
- [10] Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). Wiley.
- [11] Kumar, R., Rai, B., & Samui, P. (2025). Prediction of mechanical properties of high-performance concrete and ultrahigh-performance concrete using soft computing techniques: a critical review. *Structural Concrete*, 26(2), 1309-1337.
- [12] Kazemi, F., Shafighfard, T., & Yoo, D. Y. (2024). Data-driven modeling of mechanical properties of fiber-reinforced concrete: a critical review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(4), 2049-2078.
- [13] Alaneme, G. U., & Mbadike, E. M. (2021). Optimisation of strength development of bentonite and palm bunch ash concrete using fuzzy logic. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(4), 835-851.
- [14] Alaneme, G. U., Olonade, K. A., & Esenogho, E. (2023). Critical review on the application of artificial intelligence techniques in the production of geopolymer-concrete. *SN Applied Sciences*, 5(8), 217.
- [15] Charhate, S., Subhedar, M., & Adsul, N. (2018). Prediction of Concrete Properties Using Fuzzy Logic.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- Journal of Advances in Civil Engineering, 4(1), 45-56. DOI:10.18831/djcivil.org/2018011009.
- [16] Onyelowe, K. C., Alaneme, G. U., Onyia, M. E., Bui Van, D., Diomonyeka, M. U., Nnadi, E., ... & Onukwugha, E. (2021). Comparative modeling of strength properties of hydrated-lime activated rice-husk-ash (HARHA) modified soft soil for pavement construction purposes by artificial neural network (ANN) and fuzzy logic (FL). *Jurnal Kejuruteraan*, 33(2), 365-384.
 - [17] Feng, Y., Mohammadi, M., Wang, L., Rashidi, M., & Mehrabi, P. (2021). Application of artificial intelligence to evaluate the fresh properties of self-consolidating concrete. *Materials*, 14(17), 4885.
 - [18] Bilgehan, M. (2011). A comparative study for the concrete compressive strength estimation using neural network and neuro-fuzzy modelling approaches. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 26(01), 35-55.
 - [19] D'Aniello, G. (2023). Fuzzy logic for situation awareness: a systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(4), 4419-4438.
 - [20] Chong, B. W., Othman, R., Putra Jaya, R., Mohd Hasan, M. R., Sandu, A. V., Nabiałek, M., ... & Abdullah, M. M. A. B. (2021). Design of experiment on concrete mechanical properties prediction: a critical review. *Materials*, 14(8), 1866.
 - [21] Pezeshki, Z., & Mazinani, S. M. (2019). Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 495-525.
 - [22] Cheng, M. Y., Chou, J. S., Roy, A. F., & Wu, Y. W. (2012). High-performance concrete compressive strength prediction using time-weighted evolutionary fuzzy support vector machines inference model. *Automation in Construction*, 28, 106-115.
 - [23] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
 - [24] Terlun, S., Onyia, M. E., & Okafor, F. O. (2024). Predicting the compressive strength of self-compacting concrete using artificial intelligence techniques: A review. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 14.
 - [25] Mandal, S., Shiuly, A., Sau, D., Mondal, A. K., & Sarkar, K. (2024). Study on the use of different machine learning techniques for prediction of concrete properties from their mixture proportions with their deterministic and robust optimisation. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 7.
 - [26] Abdi, K., Sahraoui, Y., Kebaili, N., Nahal, M., & Djouhri, M. (2025). Self-Compacting Concrete Durability Assessment via Fuzzy-Logic and Bayesian Networks. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49(3), 2345-2365.
 - [27] Barbhuiya, S., & Sharif, M. S. (2023, November). Artificial intelligence in concrete mix design: advances, applications and challenges. In *2023 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)* (pp. 32-37). IEEE.
 - [28] Akintunde, O. P., Snyman, J., Ackerman, C., & Kupolati, W. K. (2025). Advances in artificial intelligence modelling for predicting the properties of high-performance recycled aggregate concrete: A critical review.
 - [29] Mohtasham Moein, M., Rahmati, K., Mohtasham Moein, A., Saradar, A., Rigby, S. E., & Akhavan Tabassi, A. (2024). Employing neural networks, fuzzy logic, and Weibull analysis for the evaluation of recycled brick powder in concrete compositions. *Buildings*, 14(12).
 - [30] Alaneme, G. U., Olonade, K. A., Esenogho, E., Lawan, M. M., & Dintwa, E. (2024). Artificial intelligence prediction of the mechanical properties of banana peel-ash and bagasse blended geopolymer concrete. *Scientific Reports*, 14(1), 26151.
 - [31] Otieno, M. B., Beushausen, H. D., & Alexander, M. G. (2011). Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures—A critical review. *Cement and Concrete composites*, 33(2), 240-245.
 - [32] Timur Cihan, M. (2019). Prediction of concrete compressive strength and slump by machine learning methods. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 3069046.
 - [33] Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2018). Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models. *Neurocomputing*, 280, 13-22.
 - [34] Dinesh, A., Kamal, B., Akash, M., & Surthik, K. R. (2023). Implementation of artificial intelligence to the prediction of the mechanical properties of concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*.
 - [35] Verma, R., Singh, B. K., Verma, S., & Khan, U. (2023, December). A Critical Review on AI Methods on Self Compacting Concrete. In *International Conference on Cyber Intelligence and Information Retrieval* (pp. 371-383). Singapore: Springer Nature Singapore.
 - [36] Mahmoud, A. A., El-Sayed, A. A., Aboraya, A. M., N. Fathy, I., & Nabil, I. M. (2025). Enhancing predictive accuracy of nano-additive concrete gamma ray attenuation at high temperatures using AI-based models. *Neural Computing and Applications*, 37(26), 21833-21866.
 - [37] Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K., Gopalakrishnan, S., & Lakshmanan, N. (2006). Fuzzy logic-based condition rating of existing reinforced concrete bridges. *Journal of Performance of Constructed facilities*, 20(3), 261-273.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- [38] Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications. Prentice Hall.
- [39] Kandavalli, S. R., Sundramurthy, V. P., Krishnasamy, V. D., Prasad, G. N. R., Kasi, U. K., Rajesh, S., ... & Khaled, J. M. (2025). Bioresin based hybrid green composite preparation using *Holoptelea integrifolia* fibers reinforced by *Ziziphus jujuba* seed particles: a fuzzy logic assisted optimization of mechanical behaviour. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 239(5), 747-772.
- [40] Ulkir, O., & Akgun, G. (2025). Fuzzy logic and taguchi approach for compressive strength prediction of ABS components fabricated by AM. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057251344197.
- [41] Ghani, S., Kumar, N., Gupta, M., & Saharan, S. (2024). Machine learning approaches for real-time prediction of compressive strength in self-compacting concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(3), 2743-2760.
- [42] Terrones-Saeta, J. M., Fortes, J. C., Luis, A. T., Aroba, J., Díaz-Curiel, J., Romero, E., & Grande, J. A. (2022). Fuzzy Logic Tools Application to the Characterization of Stress-Strain Processes in Waste Construction Dam Geopolymers: A New Circular Mining. *Materials*, 15(24), 8793.
- [43] Sathiparan, N., Jeyanthan, P., & Subramaniam, D. N. (2025). A machine learning approach to predicting pervious concrete properties: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(2), 55.
- [44] Bhuva, P., & Bhogayata, A. (2022). A review on the application of artificial intelligence in the mix design optimization and development of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 65, 603-608.
- [45] Tabatabaei Mirhosseini, R., & Zarandi Baghini, A. (2025). Fuzzy Hypergraph-Based Prediction of Fly Ash Concrete Strength Considering Chemical Composition, PSD, and Morphology. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-26.
- [46] Özcan, F., & Erdoğan, M. (2021). Fuzzy modeling of concrete elastic modulus. *Measurement*, 177, 109209.
- [47] Joseph, H. S., Pachiappan, T., Avudaiappan, S., & Guindos, P. (2023). Prediction of the mechanical properties of concrete incorporating simultaneous utilization of fine and coarse recycled aggregate. *Revista de la construcción*, 22(1), 178-191.
- [48] Biswas, R., Kumar, M., Kumar, D. R., Samui, P., T, P., Rajak, M. K., ... & Singh, S. (2025). Application of novel deep neural network on prediction of compressive strength of fly ash-based concrete. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 40(10), 4638-4668.
- [49] Sharma, P., Said, Z., Memon, S., Elavarasan, R. M., Khalid, M., Nguyen, X. P., ... & Nguyen, L. H. (2022). Comparative evaluation of AI-based intelligent GEP and ANFIS models in prediction of thermophysical properties of Fe₃O₄-coated MWCNT hybrid nanofluids for potential application in energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(13), 19242-19257.
- [50] Senić, A., Dobrodolac, M., & Stojadinović, Z. (2024). Predicting extension of time and increasing contract price in road infrastructure projects using a sugeno fuzzy logic model. *Mathematics*, 12.
- [51] Baykasoğlu, A., Dereli, T., & Taniş, S. (2004). Prediction of cement strength using soft computing techniques. *Cement and concrete research*, 34(11), 2083-2090.