

منطق فازی برای قضاوت مهندسی در تصمیمات پذیرش بتن و تحلیل ریسک مسئولیت در پروژه های عمرانی

رامین عبداللہی^{۱*}، مهدی فضیلتی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، Ramin.Abdollahi@iau.ac.ir

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

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

چکیده

تصمیم گیری مهندس پروژه، به عنوان تصمیم گیرنده درباره پذیرش یا رد بتن در پروژه های عمرانی، یکی از چالش های عملی و حیاتی کارگاهی است که اغلب بر پایه تجربه، قضاوت ذهنی و داده های ناقص انجام می شود. رویکردهای متداول مانند پیش بینی مقاومت یا مدل های هوش مصنوعی، اگرچه توانایی تحلیل داده های عددی را دارند، اما قادر به رسمی سازی قضاوت مهندسی و تحلیل مسئولیت تصمیم نیستند. در این پژوهش، یک چهارچوب فازی برای قضاوت مهندسی در پذیرش بتن ارائه می شود که امکان مدل سازی تصمیمات اجرایی تحت شرایط عدم قطعیت را فراهم می سازد. چهارچوب پیشنهادی با تعریف سطوح مختلف پذیرش شامل پذیرش ایمن، پذیرش مشروط و عدم پذیرش و با معرفی شاخص ریسک مسئولیت تصمیم، فرآیند تصمیم گیری مهندس تصمیم گیرنده را شفاف، قابل تفسیر و مستند می کند. نتایج نشان می دهد که رویکرد فازی پیشنهادی می تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت پروژه های عمرانی، به بهبود کیفیت تصمیمات اجرایی، کاهش ریسک و افزایش قابلیت دفاع فنی و مدیریتی تصمیمات مرتبط با پذیرش بتن کمک کند. این مطالعه با رسمی سازی قضاوت مهندسی به صورت قواعد تصمیم فازی، مسیر جدیدی را برای پژوهش های آینده در حوزه مدیریت ساخت و مهندسی عمران ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: منطق فازی، پذیرش بتن، ریسک مسئولیت، عدم قطعیت، تصمیم گیری چندمعیاره.



۱- مقدمه

تصمیمات اجرایی مرتبط با بتن، به ویژه تصمیم گیری در خصوص پذیرش یا رد بتن در کارگاه، از مهم ترین و حساس ترین وظایف مهندس ناظر در پروژه های عمرانی به شمار می روند. این تصمیمات مستقیماً بر ایمنی سازه، کیفیت اجرا، هزینه ها و زمان بندی پروژه اثرگذارند و معمولاً در شرایطی اتخاذ می شوند که اطلاعات موجود ناقص، متغیر و همراه با عدم قطعیت است. در عمل، مهندس ناظر ناگزیر است بر اساس ترکیبی از نتایج آزمایشگاهی، شرایط اجرایی، تجربه شخصی و ارزیابی پیامدهای احتمالی، قضاوتی انجام دهد که اغلب ماهیتی خاکستری و غیرقطعی دارد.

با وجود پیشرفت های قابل توجه در مدل سازی عددی و استفاده از روش های هوش مصنوعی برای پیش بینی مقاومت بتن، این رویکردها عمدتاً بر ارائه خروجی های عددی متمرکز هستند و توانایی مدل سازی قضاوت مهندسی و تحلیل مسئولیت تصمیم را ندارند. شبکه های عصبی و مدل های یادگیری ماشین، هرچند قادر به یادگیری الگوهای پیچیده داده ها هستند، اما به دلیل ماهیت جعبه سیاه خود، امکان تفسیر تصمیم و انتقال منطق مهندسی را فراهم نمی کنند. در نتیجه، شکاف معناداری میان پیش بینی های عددی و تصمیمات اجرایی واقعی در کارگاه وجود دارد.

در این پژوهش، با هدف پر کردن این شکاف، یک چهارچوب فازی برای قضاوت مهندسی در پذیرش بتن پروژه های عمرانی ارائه می شود. این چارچوب با استفاده از منطق فازی، قضاوت مهندس ناظر را به عنوان یک فرآیند قابل مدل سازی و قابل تفسیر در نظر می گیرد و با تعریف سطوح مختلف پذیرش بتن و تحلیل ریسک مسئولیت تصمیم، امکان پشتیبانی علمی از تصمیمات اجرایی را فراهم می سازد. رویکرد پیشنهادی، گامی در جهت رسمی سازی تصمیمات مبتنی بر تجربه و تبدیل آن ها به قواعد تصمیم شفاف و قابل دفاع است که می تواند نقش مؤثری در بهبود مدیریت ساخت و کنترل کیفیت بتن در پروژه های عمرانی ایفا کند.

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

در پروژه های عمرانی، بسیاری از تصمیمات کلیدی، از جمله تصمیم به پذیرش یا رد بتن در کارگاه، در شرایطی اتخاذ می شود که اطلاعات کامل، دقیق و قطعی در دسترس نیست و با عدم قطعیت های زیادی مواجه است. این عدم قطعیت ها می تواند ناشی از عوامل متنوعی مانند متغیرهای محیطی، تجربه فردی کارشناسان، کیفیت داده های آزمایشگاهی و سایر عوامل موثر باشد و می تواند منجر به خطاهای عملیاتی و ریسک هایی با هزینه های گزافی شود. ابزارهای سنتی و حتی مدرنی که مبتنی بر منطق باینری هستند هم نمی توانند این ابهام ها را به درستی مدل کنند، زیرا آن ها تنها به دو حالت «درست/ نادرست» یا «قبول/ رد» محدود هستند. که این صفر و یک بودن در بسیاری از تصمیم گیری های مهندسی و حل مسائل پیچیده، ناکام و ناکارآمد است. برای حل این دست از مسائل، منطق فازی به عنوان یک چهارچوب تصمیم گیری تحت عدم قطعیت مطرح شده است، که می تواند درجات مختلفی از حقیقت و عضویت را بین صفر و یک به صورت پیوسته نمایش دهد و از این طریق ابهام و عدم قطعیت فازی را به طور مستقیم در مدل ها وارد نماید [۱].

منطق فازی مبتنی بر نظریه مجموعه های فازی است که درجه ای تعلق یک پدیده به یک مجموعه را نه به صورت باینری (صفر یا یک)، بلکه به صورت یک تابع عضویت پیوسته در دامنه صفر و یک تعریف می کند. این ویژگی به منطق فازی امکان می دهد تا مفاهیم زبانی و کیفی، مانند «مقاومت قابل قبول» یا «کیفیت نسبتاً خوب» را در قالب توابع ریاضی مدل کند، حال آنکه منطق کلاسیک تنها می تواند حالات قطعی و دوارزشی را نمایش دهد. این توانایی در مدل سازی ابهام و عدم قطعیت ذاتی در ورودی ها، منطق فازی را برای



ساخت مدل های تصمیم گیری در شرایطی که مرز بین حالات واضح نیست یا اطلاعات ناقص است، به طور قابل توجهی کارآمد می سازد. چنین رویکردی در بسیاری از زمینه های تصمیم سازی مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است، چراکه می تواند به طور مستقیم عدم قطعیت تجربی را در فرآیند تصمیم سازی درگیر سازد [۳].

در حوزه مهندسی عمران و مدیریت ساخت، مطالعات نشان داده اند که منطق فازی توانایی بالایی در مدل سازی تصمیم گیری های پیچیده تحت شرایط عدم قطعیت دارد. به ویژه در فرآیندهای تصمیم گیری چندمعیاره که نیازمند ارزیابی همزمان معیارهایی مانند هزینه، زمان، کیفیت و ریسک هستند، تکنیک های فازی امکان می دهند تا ورودی های کیفی و تجربی کارشناسان در قالب قواعد زبانی به مدل وارد شوند و خروجی های قابل تفسیر برای تصمیم گیرنده فراهم گردد. بررسی های اخیر نشان داده اند که روش های مختلف فازی، از جمله Fuzzy TOPSIS، Fuzzy AHP و مدل های هیبریدی فازی، در مدیریت پروژه های عمرانی به طور مؤثر به کار گرفته شده اند و توانسته اند دقت و کارایی تصمیم گیری را به طور قابل توجهی افزایش دهند [۴].

علاوه بر این، تکنیک های فازی نه تنها در ارزیابی پروژه ها در مراحل اولیه برنامه ریزی و طراحی کاربرد داشته اند، بلکه در تحلیل ریسک پروژه، رتبه بندی عملکرد پیمانکاران و اولویت بندی اقدامات اصلاحی نیز مورد استفاده قرار گرفته اند. علاوه بر این، مطالعات اخیر بر توسعه روش های هیبریدی فازی تمرکز کرده اند که در آن ها مزایای منطق فازی با تکنیک های دیگر، مانند شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) یا روش های تصمیم گیری چندمعیاره ترکیب شده اند تا دقت و کارایی تصمیم گیری در پروژه های عمرانی بهبود یابد [۵].

یکی از حوزه های تحقیقاتی بسیار فعال، کاربرد منطق فازی در تحلیل ریسک پروژه های عمرانی است. در این زمینه، پژوهشگران تلاش کرده اند تا محدودیت های روش های سنتی تحلیل ریسک، به ویژه در شرایطی که داده های ورودی کیفی و یا نامطمئن هستند، را با چهارچوب های فازی بهبود بخشند.

در پژوهش های اخیر، ترکیب منطق فازی با روش های تحلیلی دیگر مانند فازی - AHP (Analytic Hierarchy Process) برای تعیین اولویت ریسک ها و رتبه بندی آن ها استفاده شده است. این رویکردها توانسته اند با ترکیب دانش و تجربه متخصصین و ارزیابی های کیفی، نمایه های ریسک دقیق تر و قابل دفاع تری ارائه دهند [۶].

همچنین، برخی مطالعات کاربردی نشان داده اند که منطق فازی می تواند در مدل سازی خطرات ناشی از زلزله در سازه های بتن آرمه به کار گرفته شود، به طوری که با بهره گیری از دانش تخصصی مهندسی و در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود، قادر به ارائه دسته بندی ها و ارزیابی های سریع، شفاف و قابل تفسیر برای تصمیم گیری مهندسی می باشد [۷].

برخلاف روش های داده محور مثل شبکه های عصبی مصنوعی، منطق فازی می تواند قضاوت انسانی، دانش و تجربه متخصصان و تحلیل ریسک را در یک چهارچوب واحد مدل کند. مدل های فازی براساس قواعد (IF-THEN) طراحی می شوند که می توانند مفاهیم زبانی و تجربی را به پشتیبانی تصمیم گیری تبدیل کنند. در زمینه ساخت و ساز، این رویکرد به طور گسترده در تصمیم گیری چندمعیاره، اولویت بندی ریسک ها و تحلیل های پیچیده مدیریت پروژه مورد استفاده قرار گرفته است، به گونه ای که نتایج تولید شده مشخص، قابل تفسیر و قابل دفاع می باشند [۴]، [۵].

چنین مدلی به خصوص در تصمیمات پذیرش بتن که مستقیماً با مسئولیت حرفه ای مهندس و پیامدهای اقتصادی و حقوقی مرتبط است، دارای پتانسیل بسیار بیشتری نسبت به روش های صرفاً عددی یا پیش بینی محور است. زیرا در این تصمیمات، نه تنها مقدار مقاومت اهمیت دارد، بلکه تحلیل و تفسیر نتایج در چهارچوب قضاوت مهندسی نیز ضروری است، چیزی که منطق فازی به طور ذاتی

برای آن طراحی شده است. هرچند پژوهش‌های متعددی به کاربرد منطق فازی در عمران و مدیریت ساخت پرداخته‌اند، اما اکثراً بر پیش‌بینی مقاومت مصالح، تحلیل ریسک به‌صورت جزئی و مسائلی ازین دست تمرکز داشته‌اند و کمتر به تصمیم‌گیری اجرایی و قضاوت مهندسی در پذیرش بتن و تحلیل پیامدهای مسئولیت حرفه‌ای پرداخته‌اند. این فقدان‌ها نشان می‌دهد که دانش مهندسی، برای گیر نکردن در این مسائل نیازمند ارائه یک مدل منطق فازی است که بتواند به‌طور صریح قضاوت مهندسی، عدم قطعیت داده‌ها و تحلیل ریسک مسئولیت را در کنار هم در تصمیم‌های کارگاهی مدل کند.

تحقیق حاضر با تمرکز بر این شکاف، تلاش دارد تا با بهره‌گیری از منطق فازی یک چهارچوب تصمیم‌گیری قابل تفسیر، قابل دفاع و عملیاتی برای این نوع تصمیمات ارائه دهد، موضوعی که از نظر کاربردی می‌تواند به کاهش خطاها و افزایش اعتماد در تصمیمات پروژه‌های عمرانی منجر شود. همان‌طور که بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، منطق فازی یک رویکرد ضروری و اجتناب‌ناپذیر برای رسمی‌سازی و پشتیبانی از تصمیمات مهندسی در شرایط عدم قطعیت و مسئولیت‌پذیری است، خصوصاً در حوزه‌هایی که پیش‌بینی عددی کفایت نمی‌کند و قضاوت انسانی با اثرات فنی و طبقات حقوقی باید مدل شود.

۳- روش تحقیق

تصمیم‌گیری در خصوص پذیرش یا رد بتن در پروژه‌های عمرانی، یک مسئله صرفاً عددی یا آزمایشگاهی نیست، بلکه یک فرآیند چندلایه است که در آن داده‌های کمی، برداشت‌های کیفی، تجربه حرفه‌ای و ارزیابی ریسک به‌صورت همزمان دخیل هستند. در عمل، مهندس ناظر با وضعیتی مواجه است که نتایج آزمایش مقاومت ممکن است در ناحیه مرزی قرار داشته باشد و تصمیم نهایی مستقیماً با مسئولیت فنی و حقوقی او پیوند بخورد. ازاین‌رو، روش تحقیق حاضر به‌گونه‌ای طراحی شده است که این پیچیدگی تصمیم‌گیری را به‌صورت ساخت‌یافته و قابل دفاع مدل کند. در این پژوهش، یک سیستم استنتاج فازی از نوع مامدانی به‌کار گرفته شده است. انتخاب این نوع سیستم به‌دلیل قابلیت بالای آن در بازنمایی قواعد زبانی، شفافیت فرآیند تصمیم‌سازی و امکان تفسیر نتایج صورت گرفته است؛ ویژگی‌هایی که برای تصمیمات اجرایی و مسئولیت‌پذیر در کارگاه ضروری هستند.

در گام نخست، متغیرهای تصمیم‌ساز شناسایی و تعریف شده‌اند. این متغیرها نه‌تنها شاخص‌های متداول کنترل کیفیت بتن، بلکه عوامل مؤثر بر قضاوت مهندسی را نیز در بر می‌گیرند. متغیر اول، نسبت مقاومت فشاری اندازه‌گیری‌شده به مقاومت مشخصه طرح است که به‌عنوان اصلی‌ترین شاخص فنی پذیرش بتن شناخته می‌شود. متغیر دوم، میزان پراکندگی نتایج آزمایشگاهی است که نمایانگر قابلیت اعتماد به نتایج و یکنواختی کیفیت بتن می‌باشد. متغیر سوم، شرایط اجرا و عمل‌آوری بتن است که می‌تواند انحرافات اجرایی را که در آزمایش‌ها منعکس نمی‌شوند، پوشش دهد. متغیر چهارم، سطح اهمیت و حساسیت سازه‌ای عضو مورد بررسی است که مستقیماً بر میزان ریسک قابل قبول در تصمیم اثر می‌گذارد.

برای هر یک از این متغیرها، مجموعه‌های فازی زبانی تعریف شده‌اند. این مجموعه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که رفتار تصمیم‌گیری مهندسی در نواحی مرزی را به‌درستی منعکس کنند. به‌عنوان مثال، مقاومت بتن به‌جای تفکیک صرف به «قبول» یا «رد»، در قالب حالات میانی مانند «تزدیک به حد مجاز» یا «قابل قبول با اطمینان متوسط» مدل شده است. توابع عضویت به‌صورت پیوسته در بازه صفر تا یک تعریف شده‌اند تا انتقال تدریجی بین حالات مختلف امکان‌پذیر باشد و از پرش‌های ناگهانی تصمیم جلوگیری شود.



در گام بعد، پایگاه قواعد فازی تدوین شده است. این قواعد بیانگر منطق تصمیم گیری مهندسی در شرایط واقعی کارگاهی هستند و بر مبنای ترکیب همزمان شرایط فنی و سطح ریسک تنظیم شده اند. هر قاعده فازی نشان می دهد که چگونه ترکیب خاصی از وضعیت مقاومت، پراکندگی نتایج، شرایط اجرا و اهمیت سازه ای، به یک سطح مشخص از پذیرش یا عدم پذیرش بتن منجر می شود. بدین ترتیب، قضاوت حرفه ای مهندس به جای آنکه به صورت ضمنی و غیرقابل دفاع باقی بماند، به صورت صریح و قابل پیگیری در ساختار مدل ثبت می شود.

فرآیند استنتاج فازی با استفاده از عملگرهای استاندارد انجام شده و خروجی سیستم به صورت یک متغیر زبانی تعریف شده است که بیانگر وضعیت تصمیم گیری نهایی می باشد. این خروجی می تواند حالات مختلفی از پذیرش کامل، پذیرش مشروط همراه با ریسک، یا عدم پذیرش بتن را نشان دهد. در مرحله نهایی، خروجی فازی با استفاده از روش مرکز ثقل به مقدار قطعی تبدیل شده است تا امکان استفاده عملی از نتایج در محیط کارگاهی فراهم شود.

برای ارزیابی عملکرد مدل، تصمیمات حاصل از سیستم فازی با رویکردهای متداول مبتنی بر آستانه های عددی و همچنین قضاوت های سنتی مهندسی مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که مدل فازی، به ویژه در نواحی مرزی که بیشترین چالش تصمیم گیری وجود دارد، قادر است تصمیماتی واقع بینانه تر، محافظه کارانه تر و در عین حال قابل دفاع ارائه دهد. این ویژگی باعث می شود که مدل پیشنهادی نه تنها از منظر فنی، بلکه از منظر مدیریت ریسک مسئولیت حرفه ای نیز ارزشمند باشد.

در مجموع، روش تحقیق حاضر نشان می دهد که منطق فازی می تواند شکاف موجود میان داده های آزمایشگاهی و قضاوت مهندسی را پر کرده و یک چارچوب تصمیم گیری ساخت یافته، شفاف و قابل استناد برای پذیرش بتن در پروژه های عمرانی فراهم آورد.

۴- تحلیل فرآیند فازی و تفسیر تصمیم گیری مهندس

یکی از مهم ترین مزایای استفاده از منطق فازی در تصمیم گیری های اجرایی، امکان ردیابی و تفسیر فرآیند تصمیم سازی است. برخلاف بسیاری از روش های داده محور که خروجی آن ها صرفاً یک مقدار عددی غیرقابل تفسیر است، سیستم فازی به گونه ای طراحی می شود که مسیر تبدیل داده ها و قضاوت های کیفی به تصمیم نهایی به صورت شفاف و قابل پیگیری قابل مشاهده باشد. در این پژوهش، فرآیند تصمیم گیری پذیرش بتن از طریق یک سیستم استنتاج فازی ممدانی به صورت گام به گام مدل سازی شده است تا منطق مهندسی نهفته در تصمیمات کارگاهی به طور صریح نمایش داده شود. در مرحله نخست، مقادیر ورودی شامل نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار، ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی، اهمیت سازه ای عضو و کیفیت اجرا و عمل آوری بتن، وارد فرآیند فازی سازی می شوند. در این مرحله، هر مقدار عددی به درجات تعلق متفاوتی در مجموعه های فازی متناظر نگاشته می شود. به این معنا که یک مقدار ورودی می تواند به طور هم زمان به بیش از یک مجموعه زبانی تعلق داشته باشد. این ویژگی امکان مدل سازی نواحی مرزی تصمیم گیری را فراهم می کند؛ نواحی ای که در آن ها تصمیم مهندسی معمولاً قطعی نیست و نیازمند قضاوت دقیق تری است. به عنوان مثال، یک نسبت مقاومت نزدیک به حد مجاز می تواند به صورت هم زمان دارای درجات تعلق در مجموعه های «قابل قبول» و «نزدیک به حد» باشد، امری که به خوبی ماهیت غیرقطعی تصمیمات واقعی کارگاهی را بازتاب می دهد. پس از فازی سازی، فرآیند استنتاج قواعد فازی آغاز می شود. در این مرحله، پایگاه قواعد طراحی شده که مبتنی بر منطق تصمیم گیری مهندسی است، فعال می شود. هر قاعده فازی بیانگر یک سناریوی تصمیم گیری واقعی در کارگاه است که در آن ترکیب مشخصی از شرایط فنی و اجرایی به یک سطح خاص از پذیرش یا عدم پذیرش بتن منجر می شود. فعال سازی هر قاعده بر اساس درجات تعلق ورودی ها انجام شده و شدت اثر آن قاعده متناسب با میزان



انطباق شرایط واقعی با پیش فرض های قاعده تعیین می گردد. بدین ترتیب، تصمیم نهایی حاصل تأثیر هم زمان چندین قاعده است، نه نتیجه یک شرط قطعی و منفرد.

در ادامه، خروجی های حاصل از قواعد فعال شده در مرحله تجمیع با یکدیگر ترکیب می شوند. این مرحله نقش مهمی در انعکاس تأثیر هم زمان عوامل مختلف بر تصمیم نهایی ایفا می کند. به جای آنکه تنها غالب ترین قاعده تعیین کننده تصمیم باشد، اثر تمامی قواعد مرتبط در خروجی لحاظ می شود و یک مجموعه فازی واحد برای متغیر خروجی «تصمیم مهندس» شکل می گیرد. این فرآیند باعث می شود تصمیم نهایی حاصل یک ارزیابی جامع و متوازن از تمامی شرایط موجود باشد.

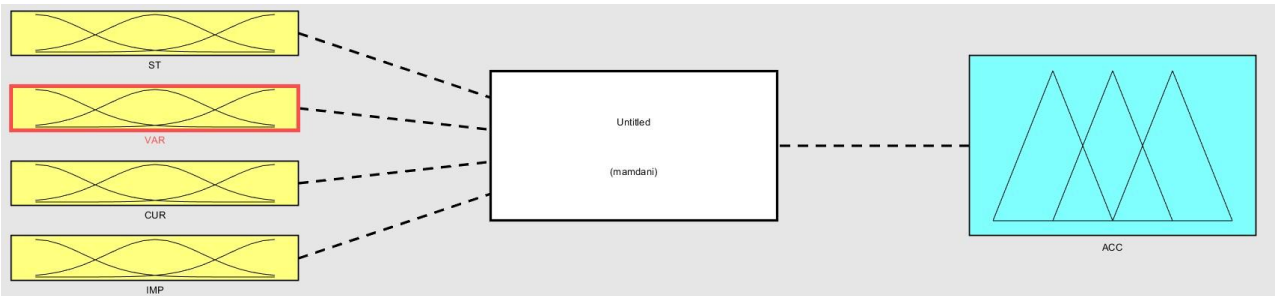
در گام نهایی، خروجی فازی به دست آمده از طریق فرآیند دیفازی سازی به یک مقدار قطعی تبدیل می شود. در این پژوهش، روش مرکز ثقل به عنوان روش دیفازی سازی انتخاب شده است، زیرا این روش قادر است توزیع کلی خروجی فازی را به صورت متوازن در نظر بگیرد و یک مقدار نماینده پایدار و قابل تفسیر ارائه دهد. مقدار دیفازی شده، بیانگر موقعیت تصمیم در طیف پذیرش تا عدم پذیرش بوده و به صورت مستقیم به یکی از سطوح تعریف شده تصمیم گیری نگاشته می شود. این مقدار نه تنها تصمیم نهایی را مشخص می کند، بلکه شدت اطمینان یا محافظه کاری تصمیم را نیز به طور ضمنی منعکس می سازد. تحلیل فرآیند فازی نشان می دهد که تصمیم نهایی سیستم، نتیجه یک منطق تدریجی و چندمرحله ای است که در آن عدم قطعیت داده ها، قضاوت مهندسی و ارزیابی ریسک به صورت هم زمان درگیر شده اند. این ویژگی باعث می شود تصمیمات حاصل از مدل فازی، به ویژه در نواحی مرزی که بیشترین چالش و مسئولیت حرفه ای وجود دارد، منطقی تر، محافظه کارانه تر و از نظر فنی و مدیریتی قابل دفاع تر از تصمیمات مبتنی بر آستانه های عددی صرف باشند.

برای پیاده سازی منطق فازی در تصمیم گیری پذیرش بتن و تحلیل ریسک مسئولیت پروژه های عمرانی، یک سیستم استنتاج فازی از نوع Mamdani FIS طراحی شد. این سیستم شامل چهار ورودی و یک خروجی است. ورودی ها شامل نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار (Strength Ratio)، ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی بر حسب درصد (Variability_COV)، اهمیت سازه ای عضو (Structural Importance) و کیفیت اجرا و عمل آوری بتن (Curing Quality) در نظر گرفته شدند و خروجی هم تصمیم مهندس در سه سطح (Decision) تعریف شد. این طراحی امکان مدل سازی تصمیم گیری تحت شرایط عدم قطعیت و تفسیر مهندسی را فراهم می سازد و بر اساس اصول منطق فازی، ورودی های کیفی و کمی را ترکیب می کند. برای هر ورودی و خروجی، توابع عضویت به صورت نشان داده شده در جدول ۱ تعریف شدند:

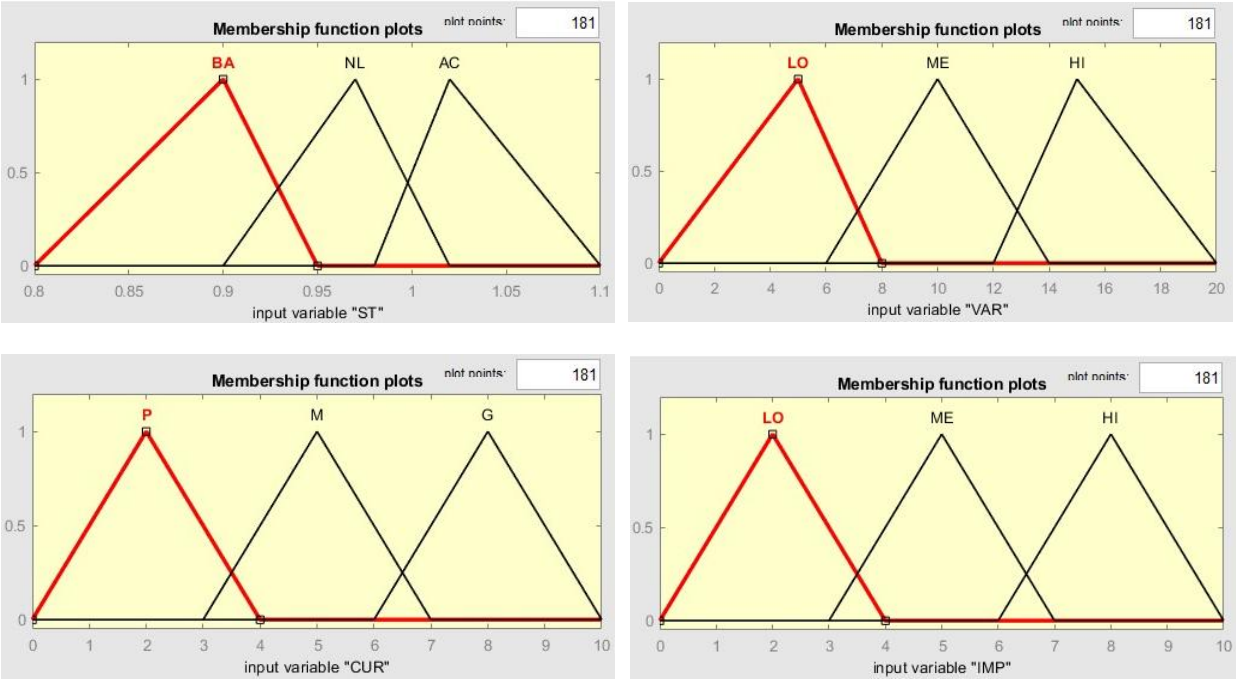
جدول ۱: توابع عضویت در سیستم استنتاج ممدانی

متغیرها	جایگاه متغیر	نام گذاری	برچسب ها	دامنه
نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار	ورودی ۱	ST	قابل قبول / نزدیک حد / غیر قابل قبول	۱/۱ - ۰/۸
ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی	ورودی ۲	VAR	بالا / متوسط / کم	۲۰ - ۰
اهمیت سازه ای عضو	ورودی ۳	CUR	بالا / متوسط / کم	۱۰ - ۰
کیفیت اجرا و عمل آوری بتن	ورودی ۴	IMP	خوب / متوسط / ضعیف	۱۰ - ۰
تصمیم مهندس	خروجی (تصمیم)	ACC	پذیرش / مشروط / عدم پذیرش	۱ - ۰

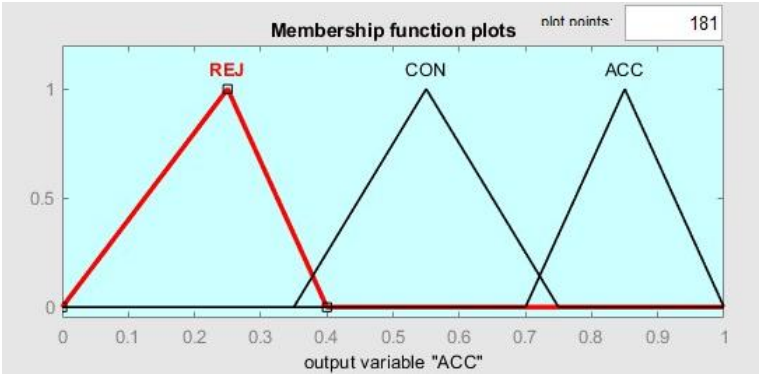
شکل ۱: سیستم استنتاج ممدانی



شکل ۲: متغیرهای ورودی در سیستم استنتاج مدانی



شکل ۳: متغیر خروجی در سیستم استنتاج مدانی (تصمیم)



جدول قوانین و نقش ها نیز با ۹ قانون فازی، طبق جدول ۲ طراحی شده است تا تمامی حالات بحرانی و ایمنی پوشش داده شود.

جدول ۲: نقش ها و قوانین سیستم فازی ممدانی

نقش	نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار	نشانه	ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی	نشانه	اهمیت سازه ای عضو	کیفیت اجرا و عمل آوری بتن	نشانه	تصمیم مهندس	نشانه
۱	قابل قبول	AC	کم	LO	کم	-	-	پذیرش	ACC
۲	نزدیک حد	NL	متوسط	ME	متوسط	-	-	مشروط	CON
۳	نزدیک حد	NL	بالا	HI	-	-	-	مشروط	CON
۴	غیر قابل قبول	BA	-	-	-	-	-	عدم پذیرش	REJ
۵	قابل قبول	AC	بالا	HI	بالا	-	-	مشروط	CON
۶	-	-	-	-	بالا	ضعیف	P	عدم پذیرش	REJ
۷	نزدیک حد	NL	-	-	-	متوسط	M	پذیرش	ACC
۸	قابل قبول	AC	کم	LO	بالا	-	-	پذیرش	ACC
۹	قابل قبول	AC	-	-	-	خوب	G	پذیرش	ACC

۵- تفسیر عددی سیستم فازی پذیرش بتن

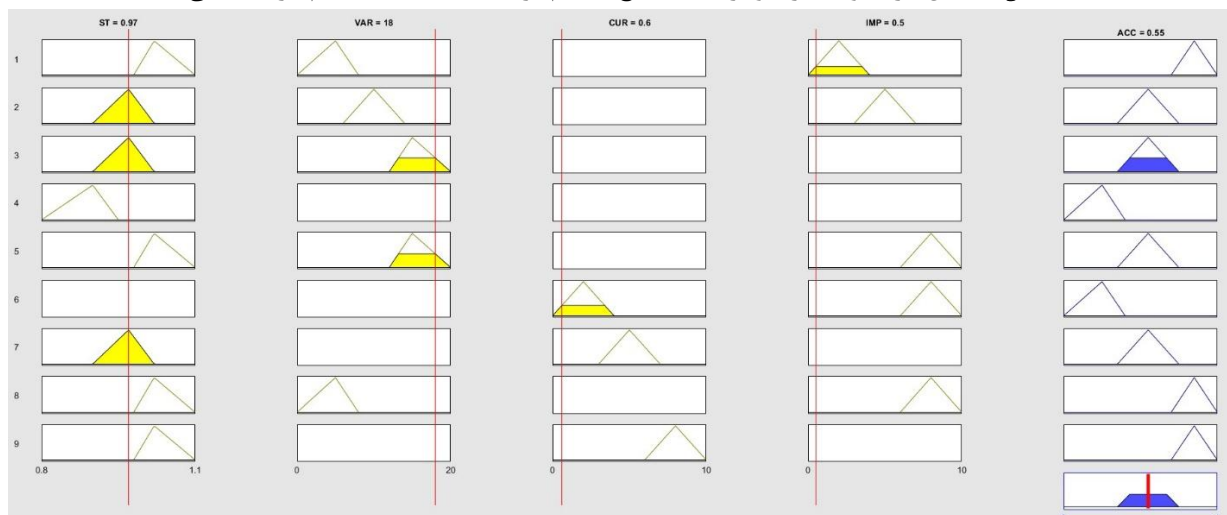
پس از طراحی سیستم استنتاج فازی از نوع ممدانی، فرآیند تصمیم گیری پذیرش بتن به صورت ساخت یافته و مبتنی بر شرایط واقعی پروژه اجرا شد. به منظور افزایش شفافیت و قابلیت تفسیر نتایج برای مهندسين اجرايي، عملکرد سیستم فازی با استفاده از یک مثال عددی مبتنی بر داده های کارگاهی تشریح می شود.

فرض شود در یک پروژه سازه بتن آرمه، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتن یک عضو سازه ای حیاتی، مقدار میانگین مقاومت را معادل 0.97 مقاومت مشخصه طرح نشان می دهد. این مقدار اگرچه به طور کامل کمتر از حد آیین نامه ای نیست، اما در ناحیه مرزی پذیرش قرار دارد. در همین حال، ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی برابر با 18 درصد گزارش شده است که نشان دهنده یکنواختی متوسط تا ضعیف کیفیت بتن می باشد. عضو مورد بررسی بخشی از سیستم باربر اصلی سازه است و از این رو سطح اهمیت سازه ای آن بالا در نظر گرفته می شود. همچنین، بر اساس گزارش های اجرایی، کیفیت عمل آوری بتن در روزهای ابتدایی پس از بتن ریزی در سطح متوسط ارزیابی شده است. در چنین شرایطی، تصمیم گیری صرفاً بر مبنای مقایسه عدد مقاومت با حد آیین نامه ای، نمی تواند تصویر کاملی از ریسک واقعی تصمیم ارائه دهد. از این رو، مقادیر فوق به عنوان ورودی به سیستم فازی وارد شدند. در مرحله فازی سازی، نسبت مقاومت همزمان دارای درجاتی از تعلق به مجموعه های «قابل قبول» و «نزدیک به حد مجاز» گردید، در حالی که ضریب پراکندگی در ناحیه «متوسط رو به بالا» و اهمیت سازه ای در ناحیه «بالا» قرار گرفت. کیفیت عمل آوری نیز عمدتاً به مجموعه فازی «متوسط» تعلق یافت. با فعال سازی پایگاه قواعد فازی، چندین قاعده به طور همزمان در فرآیند تصمیم سازی مشارکت کردند. به عنوان مثال، قاعده ای که بیان می کند «اگر نسبت مقاومت نزدیک به حد و پراکندگی متوسط و اهمیت سازه ای بالا باشد، آنگاه تصمیم پذیرش مشروط است» با شدت بالایی فعال شد. همزمان، قواعدی که به تأثیر کیفیت متوسط عمل آوری در کنار شرایط مرزی مقاومت اشاره دارند نیز در خروجی نقش داشتند. این هم پوشانی قواعد، بازتاب دهنده واقعیت تصمیم گیری کارگاهی است که در آن هیچ عامل منفردی به تنهایی تعیین کننده نیست.



پس از انجام فرآیند استنتاج فازی، خروجی سیستم به صورت یک مجموعه فازی برای متغیر «تصمیم مهندس» به دست آمد. در مرحله دیفازی سازی با استفاده از روش مرکز ثقل، مقدار قطعی خروجی برابر با $0/55$ محاسبه شد. این مقدار در دامنه تعریف شده برای خروجی، به طور واضح در ناحیه «پذیرش مشروط» قرار می گیرد. از منظر مهندسی، این نتیجه بیانگر آن است که بتن مورد بررسی نه به طور کامل مردود است و نه واجد شرایط پذیرش ایمن بدون ملاحظه ریسک می باشد. مقدار $0/55$ نشان می دهد که تصمیم پذیرش تنها در صورتی قابل دفاع است که با اقدامات کنترلی تکمیلی مانند افزایش تعداد نمونه ها، اعمال محدودیت بهره برداری، یا تقویت نظارت اجرایی همراه گردد. این نوع خروجی، دقیقاً همان سطح از تصمیم سازی را منعکس می کند که مهندس ناظر در عمل و تحت مسئولیت حرفه ای اتخاذ می نماید، اما در چارچوب آیین نامه های سنتی به صورت صریح قابل بیان نیست.

شکل ۴: فعال سازی قواعد فازی و فرآیند استنتاج تصمیم در Rule Viewer سیستم فازی مدانی



نکته حائز اهمیت آن است که در صورت استفاده از یک معیار باینری آیین نامه ای، این بتن ممکن بود صرفاً بر اساس عبور یا عدم عبور از یک حد عددی، پذیرفته یا رد شود؛ در حالی که سیستم فازی با در نظر گرفتن همزمان شرایط فنی، اجرایی و سطح ریسک سازه ای، تصمیمی واقع گرایانه تر و قابل دفاع تر ارائه می دهد. بدین ترتیب، خروجی عددی سیستم فازی نه تنها یک شاخص کمی، بلکه بازنمایی مستند شده ای از قضاوت مهندسی تحت عدم قطعیت است که می تواند به عنوان پشتوانه فنی تصمیم مهندس در مواجهه با پیامدهای اجرایی و حقوقی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مقایسه تصمیم آیین نامه ای و تصمیم فازی

یکی از نقاط قوت اصلی چارچوب پیشنهادی، تفاوت ماهیتی آن با رویکردهای سنتی مبتنی بر آستانه های عددی است. برای تبیین این تفاوت، تصمیم حاصل از سیستم فازی با تصمیم مبتنی بر معیار آیین نامه ای صرف، برای مثال عددی ارائه شده در بخش ۵ مقایسه شده است. در رویکرد آیین نامه ای، تصمیم نهایی در ناحیه مرزی کاملاً وابسته به برداشت شخصی مهندس است و مستند رسمی برای دفاع از تصمیم وجود ندارد. در مقابل، سیستم فازی با تولید یک خروجی عددی ($0/55$) و نگاشت آن به سطح «پذیرش مشروط»، منطق تصمیم را شفاف و قابل پیگیری می سازد. جدول ۳ خلاصه این مقایسه را نشان می دهد.



جدول ۳: مقایسه تصمیم آیین نامه ای و تصمیم فازی در پذیرش بتن

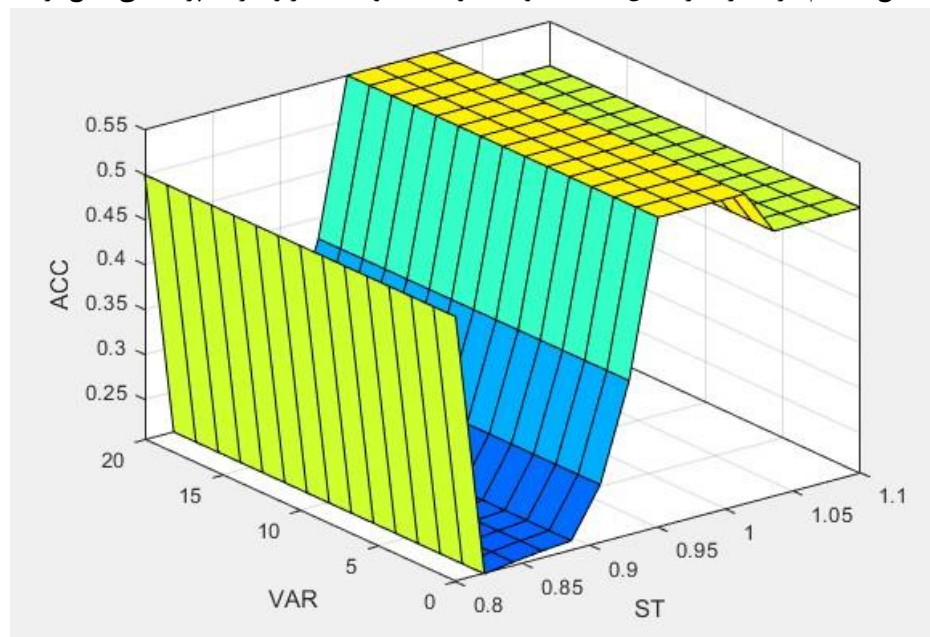
معیار تصمیم گیری	رویکرد آیین نامه ای	رویکرد فازی پیشنهادی
در نظر گرفتن نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار	بلی	بلی
در نظر گرفتن پراکندگی نتایج آزمایشگاهی	خیر	بلی
در نظر گرفتن اهمیت سازه ای عضو	خیر	بلی
در نظر گرفتن کیفیت اجرا و عمل آوری بتن	خیر	بلی
تحلیل ریسک مسئولیت مهندس	ندارد	دارد
قابلیت دفاع فنی تصمیم	محدود	بالا
تفسیر پذیری برای تصمیم گیرنده	پائین	بالا

۷- تحلیل سطوح تصمیم گیری با Surface Viewer

برای بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر تصمیم نهایی مهندس در پذیرش بتن، از Surface Viewer در MATLAB استفاده شد. این تحلیل به صورت تصویری، نحوه تغییر تصمیم (خروجی فازی) را نسبت به تغییر همزمان دو متغیر ورودی نمایش می دهد، در حالی که سایر متغیرها در سطح میانی یا ثابت قرار دارند. این رویکرد امکان درک رابطه میان ورودی ها و خروجی را به طور بصری فراهم می کند و فرآیند تصمیم گیری فازی را ملموس می سازد.

در شکل ۵ سطوح تصمیم گیری متغیرهای نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار (ST) با ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی (VAR) ارائه شده است. این سطح نشان می دهد که چگونه تغییر نسبت مقاومت و میزان پراکندگی نتایج آزمایشگاهی، تصمیم مهندس (ACC) را به سمت پذیرش کامل، پذیرش مشروط یا عدم پذیرش هدایت می کند. نتایج نشان می دهد که در نواحی مرزی که نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار نزدیک حد مجاز و ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی بالا است، خروجی به پذیرش مشروط متمایل می شود، که این با قضاوت عملی مهندسین در کارگاه همخوانی دارد.

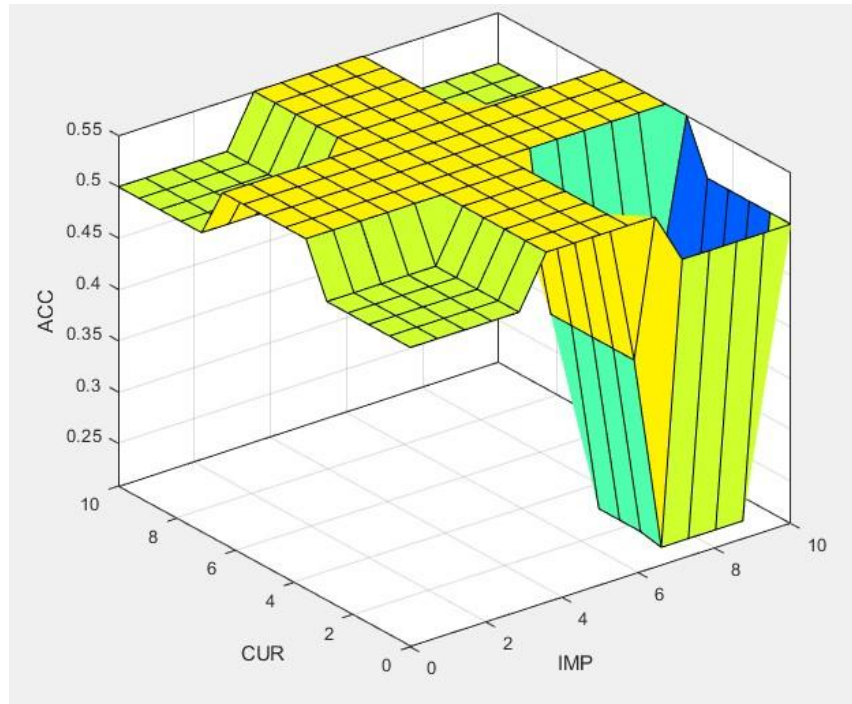
شکل ۵: سطح تصمیم گیری فازی بر اساس نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار و ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی





در شکل ۶ سطوح تصمیم گیری اهمیت سازه ای عضو (IMP) با کیفیت اجرا و عمل آوری بتن (CUR) ارائه شده است. این سطح تأثیر ابعاد ریسک و حساسیت سازه را بر تصمیم گیری (ACC) نشان می دهد. در شرایطی که اهمیت سازه ای بالا و کیفیت عمل آوری پایین است، حتی اگر مقاومت بتن کافی باشد، سیستم فازی تصمیم به پذیرش مشروط یا رد بتن می گیرد، که بازتاب دهنده تأکید مهندس بر مسئولیت حرفه ای و ریسک پروژه است.

شکل ۶: سطح تصمیم گیری فازی بر اساس اهمیت سازه ای عضو و کیفیت اجرا و عمل آوری بتن



این تحلیل های سطحی به طور واضح، قابلیت تفسیر تصمیم فازی را برای تصمیمات پیچیده مهندسی نشان می دهد و امکان شفاف سازی روابط میان ورودی ها و خروجی را فراهم می کند. به علاوه، این سطوح تصویری می توانند کمک کنند تا منطق مدل فازی و تأثیر هر عامل را بر تصمیم نهایی به راحتی قابل درک باشد.

۸- بحث و تحلیل نتایج

یکی از چالش برانگیزترین شرایط تصمیم گیری مهندسی، زمانی رخ می دهد که نسبت مقاومت نمونه به مقاومت معیار در نزدیکی حد مجاز قرار دارد. در این ناحیه، روش های سنتی مبتنی بر معیارهای قطعی، بتن را صرفاً بر اساس عبور یا عدم عبور از یک آستانه مشخص، به طور کامل می پذیرند یا رد می کنند. این رویکرد، ماهیت تدریجی و خاکستری تصمیم مهندسی را نادیده می گیرد و می تواند منجر به تصمیمات پرریسک یا بیش از حد محافظه کارانه شود. مدل فازی ارائه شده با تعریف مجموعه های زبانی پیوسته و قواعد تصمیم مبتنی بر قضاوت مهندسی، امکان انتقال تدریجی بین حالات «پذیرش»، «پذیرش مشروط» و «عدم پذیرش» را فراهم می سازد. به این ترتیب، تصمیم نهایی به صورت یک فرآیند پیوسته و قابل تفسیر شکل می گیرد، نه یک انتخاب ناگهانی صفر و یک. این رفتار مدل به ویژه در نواحی مرزی مقاومت، که بیشترین فشار تصمیم گیری و مسئولیت حرفه ای بر مهندس ناظر وارد می شود، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای نشان دادن عملکرد عملی مدل، یک سناریوی واقعی تصمیم گیری مورد بررسی قرار گرفت که در آن نسبت مقاومت



نمونه به مقاومت معیار در محدوده نزدیک به حد مجاز قرار داشته، ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی مقدار متوسطی داشته و اهمیت سازه‌ای عضو در سطح متوسط تا بالا ارزیابی شده است. در این حالت، خروجی سیستم فازی مقدار عددی ۰/۵۵ را نشان می‌دهد. این مقدار که پس از فرآیند دی‌فازی‌سازی با روش مرکز ثقل به دست آمده است، در ناحیه «پذیرش مشروط» قرار می‌گیرد. تفسیر مهندسی این خروجی بیانگر آن است که بتن از نظر فنی به طور کامل مردود نیست، اما پذیرش آن بدون در نظر گرفتن ریسک‌های اجرایی و مسئولیت حرفه‌ای نیز قابل دفاع نمی‌باشد. برخلاف روش‌های سنتی که ممکن است در چنین شرایطی تصمیمی قطعی و غیرقابل بازگشت اتخاذ کنند، مدل فازی پیشنهاد می‌دهد که پذیرش بتن باید همراه با اقدامات کنترلی، مستندسازی تصمیم و کاهش ریسک‌های بالقوه صورت گیرد. این نوع خروجی، ماهیت واقعی قضاوت مهندسی در کارگاه را به خوبی منعکس می‌کند.

نمودارهای سطح تصمیم‌گیری (Surface Viewer) ارائه شده در این پژوهش، نقش کلیدی در شفاف‌سازی منطق تصمیم‌سازی مدل ایفا می‌کنند. این سطوح نشان می‌دهند که تصمیم نهایی صرفاً تابع یک متغیر مانند مقاومت فشاری نیست، بلکه نتیجه برهم‌کنش همزمان چند عامل فنی و مدیریتی است. به عنوان مثال، سطح تصمیم‌گیری مربوط به نسبت مقاومت و ضریب پراکندگی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که حتی در صورت قرار داشتن مقاومت در محدوده قابل قبول، افزایش پراکندگی می‌تواند تصمیم را از «پذیرش» به «پذیرش مشروط» سوق دهد. همچنین، سطوح تصمیم‌گیری مربوط به نسبت مقاومت و اهمیت سازه‌ای عضو بیانگر آن است که با افزایش حساسیت سازه‌ای، مدل به طور محافظه کارانه تری عمل می‌کند و سطح پذیرش بتن کاهش می‌یابد. این رفتار دقیقاً با منطق مهندسی و اصول مدیریت ریسک همخوانی دارد و نشان می‌دهد که مدل فازی توانسته است قضاوت انسانی را به صورت ساخت یافته و قابل تفسیر بازنمایی کند.

مقایسه مفهومی نتایج مدل فازی با روش‌های سنتی کنترل کیفیت بتن نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی فراتر از یک ابزار پیش‌بینی عددی عمل می‌کند. در حالی که روش‌های مبتنی بر آستانه‌های ثابت تنها قادر به ارائه تصمیمات دوحالته هستند، مدل فازی امکان تحلیل تدریجی ریسک، تفسیر منطقی تصمیم و مستندسازی قضاوت مهندسی را فراهم می‌سازد. این ویژگی به ویژه در تصمیماتی که پیامدهای فنی، اقتصادی و حقوقی دارند، اهمیت بالایی دارد.

از نگاه مدیر پروژه، استفاده از چنین مدلی می‌تواند به کاهش اختلاف نظرها و افزایش شفافیت فرآیند تصمیم‌گیری مهندسی منجر شود. بدین ترتیب، مدل فازی ارائه شده نه تنها یک ابزار تحلیلی، بلکه یک فرآیند تصمیم‌گیری مسئولیت‌محور برای پذیرش بتن در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود.

۹- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تصمیم‌گیری در خصوص پذیرش یا رد بتن در پروژه‌های عمرانی، فراتر از یک مسئله صرفاً آزمایشگاهی یا عددی است و ماهیتی چندبعدی، غیرقطعی و مسئولیت‌محور دارد. در این پژوهش، با هدف رسمی‌سازی قضاوت مهندسی و پشتیبانی از تصمیمات اجرایی تحت شرایط عدم قطعیت، یک چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر منطق فازی ارائه شد که توانایی مدل‌سازی همزمان داده‌های کمی، ارزیابی‌های کیفی و ملاحظات ریسک را داراست. نتایج نشان داد که سیستم استنتاج فازی از نوع مددانی می‌تواند رفتار واقعی تصمیم‌گیری مهندس ناظر را، به ویژه در نواحی مرزی مقاومت بتن، به صورت پیوسته و قابل تفسیر بازنمایی کند. برخلاف روش‌های متداول مبتنی بر آستانه‌های قطعی، رویکرد پیشنهادی امکان تفکیک سطوح مختلف تصمیم شامل پذیرش کامل، پذیرش مشروط و عدم پذیرش را فراهم می‌سازد و از اتخاذ تصمیمات ناگهانی و غیرقابل دفاع جلوگیری می‌کند. خروجی‌های عددی حاصل از فرآیند دی‌فازی‌سازی، در کنار قواعد زبانی مدل، این امکان را ایجاد می‌کنند که تصمیم نهایی نه تنها از منظر فنی، بلکه از دیدگاه مدیریت



ریسک و مسئولیت حرفه‌ای نیز قابل تحلیل و مستندسازی باشد. تحلیل سطوح تصمیم‌گیری نشان داد که متغیرهایی نظیر پراکندگی نتایج آزمایشگاهی، کیفیت اجرا و اهمیت سازه‌ای عضو، نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل تصمیم پذیرش بتن دارند؛ به‌گونه‌ای که حتی در شرایطی که مقاومت فشاری در محدوده قابل قبول قرار دارد، افزایش عدم قطعیت یا حساسیت سازه‌ای می‌تواند منجر به تغییر سطح تصمیم به پذیرش مشروط یا عدم پذیرش شود. این یافته‌ها تأیید می‌کند که تصمیم‌گیری مهندسی در عمل، حاصل برهم‌کنش چند عامل همزمان است و نمی‌توان آن را به یک شاخص عددی تقلیل داد. از منظر کاربردی، چهارچوب فازی ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار عملی در محیط‌های کارگاهی مورد استفاده قرار گیرد و به مهندس ناظر کمک کند تا تصمیمات خود را به‌صورت شفاف، قابل تفسیر و قابل دفاع مستند نماید. این ویژگی به‌ویژه در شرایطی که تصمیمات اجرایی با پیامدهای اقتصادی، ایمنی و حقوقی همراه هستند، اهمیت دوچندان دارد و می‌تواند به کاهش ریسک اختلافات فنی و مسئولیت‌های حرفه‌ای منجر شود. هم‌چنین خروجی فازی می‌تواند به‌عنوان سند تصمیم مهندسی در گزارشات نظارت، مکاتبات کارگاهی و دفاع فنی در اختلافات قراردادی استفاده شود.

با وجود نتایج امیدوارکننده، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها نیز همراه است. ساختار قواعد فازی و شکل توابع عضویت تا حدی متکی بر قضاوت مهندسی و دانش تخصصی بوده و ممکن است با شرایط پروژه، آیین‌نامه‌ها و فرهنگ اجرایی مناطق مختلف نیاز به تنظیم و کالیبراسیون داشته باشد. هم‌چنین، مدل ارائه‌شده بر داده‌های لحظه‌ای تصمیم‌گیری متمرکز بوده و جنبه‌های زمانی تغییر کیفیت بتن را به‌طور مستقیم لحاظ نمی‌کند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، چارچوب ارائه‌شده با داده‌های میدانی گسترده‌تر و پروژه‌های واقعی کالیبره و اعتبارسنجی شود. ترکیب منطق فازی با رویکردهای یادگیری ماشین قابل تفسیر، توسعه مدل‌های پویا مبتنی بر زمان، و گسترش شاخص‌های ریسک مسئولیت حرفه‌ای از دیگر مسیرهای پژوهشی ارزشمند در این حوزه به شمار می‌روند. هم‌چنین، تعمیم این چارچوب به سایر تصمیمات اجرایی حساس در پروژه‌های عمرانی می‌تواند گامی مؤثر در جهت ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری مهندسی و مدیریت ریسک در صنعت ساخت باشد.

مراجع

- [1] Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*; 1965; 8(3): 338–353.
- [2] Mamdani E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*; 1974; 121(12): 1585–1588.
- [3] Ross T J. *Fuzzy logic with engineering applications*. 3rd ed.; John Wiley & Sons; 2010.
- [4] Wen Q, Qiang M, Liu Y. A fuzzy-based decision-making framework for construction management under uncertainty. *Automation in Construction*; 2021; 124: 103565.
- [5] Nguyen L D, Fayek A R. Fuzzy logic approach for construction decision-making under uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*; 2021; 147(3): 04020175.
- [6] Kareem M A. Fuzzy multi-criteria decision-making methods for construction risk assessment: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management*; 2023; 30(5): 1901–1924.
- [7] Chakraborty S, Roy T, Ghosh S. Fuzzy logic-based seismic risk assessment of reinforced concrete structures under uncertainty. *Structures*; 2023; 48: 1895–1908.
- [8] Saaty T L. *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill; 1980.
- [9] Klir G J, Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Prentice Hall; 1995.
- [10] Zimmermann H J. *Fuzzy set theory and its applications*. 4th ed.; Springer; 2001.
- [11] Tah J H M, Carr V. A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic. *Construction Management and Economics*; 2000; 18(4): 491–500.
- [12] Chen S J, Hwang C L. *Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications*. Springer; 1992.
- [13] Dubois D, Prade H. *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. Academic Press; 1980.
- [14] Ayyub B M. *Risk analysis in engineering and economics*. Chapman & Hall/CRC; 2003.
- [15] Tah J H M, Thorpe A, McCaffer R. Contractor project risks contingency allocation using fuzzy logic. *Construction Management and Economics*; 1993; 11(2): 113–121.