

## ارزیابی مؤلفه‌های ساخت‌وساز با بتن بازیافتی سازگار با محیط‌زیست با رویکرد مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی بهینه شده با الگوریتم فراابتکاری

مهیار عزیز خانی

دانشجوی دکترا مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد رودهن، رودهن، ایران.

علی اصغر امیر کاردوست \*

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد رودهن، رودهن، ایران.

داود صداقت شایگان

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد رودهن، رودهن، ایران.

### چکیده

در این مطالعه، مدل‌سازی با مؤلفه‌های ساخت‌وساز با بتن بازیافتی سازگار با محیط‌زیست بررسی شده است. برای مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن بازیافتی از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی استفاده شد. سپس برای افزایش عملکرد روش‌های هوشمند و جلوگیری از رویکرد سعی و خطا برای دستیابی به بهینه‌ترین مقادیر پارامترهای هر مدل، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شد. داده‌های طرح اختلاط از پیشینه تحقیق برای ایجاد مدل‌های پیشنهادی، ۲۰۱ داده آزمایشگاهی بود که در جهت برآورد مقاومت فشاری بتن بازیافتی جمع‌آوری شد. سپس برای تعیین بهترین پارامترهای ورودی به مدل، چهار سناریو تعریف گردید که از میان آنها، سناریو برتر انتخاب شد. همچنین برای این شاخص روش ANFIS-FCM نسبت به باقی روش‌های بر پایه نروفازی، از دقت بالاتری برخوردار بوده است. در مرحله تست نیز، روش شبکه عصبی مصنوعی بر پایه الگوریتم ازدحام ذرات، از عملکرد بهتری نسبت به روش ANN برخوردار بود. اما روش ANFIS-FCM-PSO بر خلاف اینکه در مرحله آموزش کمی از روش ANFIS-FCM ضعیف‌تر عمل نموده است، اما در مرحله تست بر اساس سه شاخص ارائه شده عملکردی بهتر از باقی روش‌های پیشنهادی داشته است. نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت نشانگر آن بود که روش پیشنهادی با فاصله بسیار کمی در ترم خطای میانگین پیش‌بینی داشته‌اند. همچنین در میان روش‌های هوشمند پیشنهادی، روش ANFIS-FCM-PSO با اختلاف اندکی نسبت به دیگر مدل‌ها دارای عملکرد بهتری است.

**واژه‌های کلیدی:** توسعه پایدار، بتن بازیافتی، پیش‌بینی مقاومت فشاری، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

\* نویسنده مسئول: al.amirkardoust@iaui.ac.ir

## ۱- مقدمه

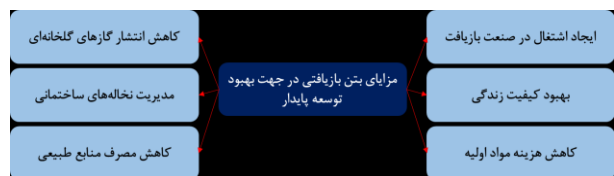
باتوجه به زنده بودن بتن و ادامه واکنش‌های سیمان در بتن به‌مرور زمان، تأثیرات محیطی وارده بر بتن و تغییرات خواص آن باگذشت زمان، شناخت واقعی این ماده نیاز به نگرشی عمیق و وسیع دارد. بیشتر این ماده به ریزساختار آن وابسته است و این ساختار باگذشت زمان و بر اثر عوامل مختلف تغییر می‌یابد [۳].

پیشرفت علم و تکنولوژی در زمینه بتن و کاربرد مواد و مصالح مختلف در آن، از جمله افزودنی‌ها و مواد زائد و آلوده‌کننده محیط‌زیست و نیز تکنیک‌های جدید و پیشرفته ساخت موجب آن شده است که در سال‌های اخیر بتن‌هایی بادوام زیاد در محیط‌های مختلف به میزان بسیار چشمگیری تولید شود. محدود بودن منابع و حفظ محیط‌زیست، لزوم بازیافت مواد و مصالح را اجتناب‌ناپذیر ساخته است [۴]. یکی از مصالحی که پتانسیل خوبی در استفاده از ضایعات به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده را داراست، بتن است. بتن بازیافتی نوعی از بتن است که در آن از سنگ‌دانه‌های بتنی بازیافتی و مواد ضایعاتی معدنی به‌جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در بتن استفاده می‌شود که مهم‌ترین منابع آن ضایعات مربوط به ساخت و تخریب می‌باشد [۵]. بکارگیری بتن بازیافتی مزیت‌های فراوان از جمله

جلوگیری از آلودگی محیط (آب، خاک، سنگ)، بازیافت مصالح قابل مصرف، پایداری صنعت ساختمان و تعیین تکلیف نخاله‌های ساختمانی را برای محیط پیرامون در بر دارد. توجه به این نکته ضروری است که در صورت استفاده از مواد بازیافتی، خصوصیات رفتاری بتن تغییر کرده و مصالحی با مشخصات مکانیکی جدید حاصل خواهد شد. مزیت‌ها و معایب استفاده از مواد بازیافتی در بتن به‌صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲]. بر اساس مطالعات انجام شده، با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی توسط مصالح بازیافتی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن تولید شده افت پیدا خواهد کرد و بتن ضعیف‌تری نسبت به بتن معمولی حاصل می‌گردد [۵].

بااین حال، پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی بتن بازیافتی به دلیل وجود تنوع در ترکیبات مواد بازیافتی و تأثیر متقابل عوامل مختلف، چالشی پیچیده است. در این راستا، روش‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده، به‌عنوان ابزارهایی کارآمد شناخته شده‌اند. علاوه بر این، بهینه‌سازی این مدل‌ها با استفاده از

توسعه پایدار به معنای تأمین نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خود تعریف می‌شود. این مفهوم سه بُعد اصلی دارد: اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی. صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه تولید بتن، تأثیر عمده‌ای بر هر سه بُعد توسعه پایدار دارد. بتن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد ساختمانی جهان، نقشی کلیدی در این صنعت ایفا می‌کند؛ اما تولید آن مستلزم مصرف قابل توجه منابع طبیعی و تولید گازهای گلخانه‌ای است. استفاده از بتن بازیافتی به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای بتن سنتی، فرصت‌های زیادی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار فراهم می‌آورد [۱]. بتن بازیافتی از نخاله‌های ساختمانی تولید می‌شود که شامل بتن تخریب‌شده، آجر، آسفالت و سایر مصالح ساختمانی است. این فرایند نه تنها به کاهش زباله‌های ساختمانی و کاهش فشار بر محل‌های دفن زباله کمک می‌کند، بلکه باعث صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی نظیر شن و ماسه نیز می‌شود. شکل (۱) مزایای زیستی-اقتصادی بتن بازیافتی را نشان داده است.



شکل ۱- مزایای زیستی-اقتصادی بتن بازیافتی

وجود مواد زائد حاصل از فرایندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی، یکی از معضلات مهم کشورهای صنعتی و در حال توسعه است. به‌طوری که تحقیقات وسیعی برای روش‌های بازیافت یا دفع آنها برای به حداقل رساندن آسیب‌های وارده به محیط‌زیست در حال اجرا است. در این راستا محققان ساختمان نیز مانند سایر صنایع تولیدی و بازیافت، در جهت استحصال مواد و مصالح زائد به پیشرفت‌هایی نایل شده‌اند [۲]. از آن جمله می‌توان استفاده از خاک‌اره در تولید آجر سبک، کاربرد سرباره‌های صنعتی و سرباره‌های حاصل از عملیات متالورژیکی و بسیاری از مواد دیگر را نام برد. از طرفی، باوجود سادگی تهیه و ساخت بتن، به علت وجود مواد مختلف در آن و نیز اندرکنش این مواد به‌ویژه در ناحیه بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر، هنوز در این ماده و محصول نهایی از ساخت اجزای آن پیچیدگی‌ها و نادانسته‌های فراوانی وجود دارد.

چند شاخص آماری خطا نظیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا استفاده نمودند. از نتایج مدل‌سازی تحقیق آنها نشان داد که روش مارس نسبت به روش مدل درخت از عملکرد بهتری برخوردار بوده است.

شاهرخی شهرکی و همکاران در تحقیقی ابتدا مقاومت فشاری ۹۰ و ۲۸ روزه بتن را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی مدل سازی نمود تا از تابع به‌دست آمده از مدل‌سازی، در جهت بهینه سازی مخلوط بتنی با رویکرد کاهش کربن تولید شده استفاده نماید. ایشان با استفاده از الگوریتم بهینه ساز این فرایند را اجرا و در نهایت با معرفی مخلوط بهینه به ۱۰٪ کاهش در کربن تولیدی رسیده است [۱۰]. ژانگ و همکاران جهت مدل‌سازی بتن بازیافتی تسلیح شده با الیاف فولادی از ۴۵۶ داده جمع‌آوری شده از مقالات جهت پیاده سازی مدل‌های محاسباتی استفاده نموده است. در این مطالعه از روش‌های شبکه عصبی، ماشین‌های بردار پشتیبان و روش تجمعی تقویت شده استفاده گردید. نتایج مطالعه ایشان نشان داد مدل‌های توسعه‌یافته برای مطالعه رابطه بین ویژگی‌ها و استحکام کششی فشاری/کشافی را به دقت مناسبی مورد تجزیه و تحلیل کمی قرار داده و از اعتبار لازم برخوردار بوده اند [۱۱]. در مطالعه ای دیگر دینش و پراساد با تمرکز بر روش‌های یادگیری ماشین به شبیه سازی مقادیر خواص مکانیکی در بتن پرداختند. ایشان با بررسی ارزیابی چرخه حیات موارد اثرگذار زیستی را شناسایی کرده و سپس با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ارتباطی بین این پارامترها ایجاد تا جهت ارزیابی مکانیکال بتن مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. پاول و همکاران در تحقیقی متشکل از ۱۲۱۲ داده و ۷ متغیر مدل‌سازی به بررسی خواص بتن سازگار با محیط زیست حاوی خاکستر پوسته برنج پرداختند. در این مطالعه از دو غالب در مدل‌سازی یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد دقت در مدل‌های یادگیری ماشینی ۹۷/۵٪ و در یادگیری عمیق ۹۲/۵٪ بوده است. اساساً با توجه به نتایج مشهود است استفاده از روش‌های یادگیری عمیق در تعداد داده‌های بسیار زیاد نتایج بهتری حاصل می‌نماید که در این مطالعه تعداد داده‌ها در محدوده متوسطی است [۱۳].

باتوجه به مواردی که بررسی گردیده است دغدغه جدی برای استفاده از فرایند بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری مشاهده گردیده است [۱۴-۱۷]. همچنین باتوجه به

الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) می‌تواند دقت و کارایی پیش‌بینی را افزایش دهد. در این زمینه مطالعات متنوعی در سالیان اخیر در حوزه بتن انجام شده است.

عبد و عبد [۶] در پژوهشی بر روی مقاومت فشاری بتن فوم (بتن سبک) با استفاده از روش‌های کامپیوتری نرم پرداختند. ایشان از روش ماشین‌های بردار پشتیبان با چهار تابع خطی، سیگموئید، شعاعی پایه و چندجمله‌ای برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بیست و هشت‌روزه در این نوع بتن استفاده نمودند. ۱۵۰ داده آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان ۰/۳ تا ۰/۴۵ برای توسعه مدل SVM بهره گرفته شد. نتایج تحلیلی مؤلفه‌های خطا در هر چهار تابع مورد بررسی شده نشان می‌دهد ارائه مدل مبتنی بر تابع شعاعی و چندجمله‌ای SVM با شاخص همبستگی به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷ نسبت به تابع خطی و سیگموئید عملکرد موفق‌تری را نشان داده‌اند. غلام‌پور و همکاران [۷] خواص مکانیکی بتن بازیافتی را با استفاده از روش GEP مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه از پایگاه داده‌ای شامل ۶۵۰ نتیجه برای آزمایش مقاومت فشاری، ۴۲۱ نمونه مدول الاستیسیته، ۱۵۲ نمونه مقاومت خمشی و ۳۴۶ نمونه مقاومت کششی برای مرحله آزمون مدل مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل نتایج این پژوهش در دو حالت نمونه مکعبی و سیلندری مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه سیلندری دارای همبستگی متغیرهای بهتری در مقایسه با نمونه مکعبی است. اشریان و همکاران [۸] با استفاده از پنج روش هوشمند مصنوعی یعنی مدل درخت، مارس، ماشین‌های بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه، به پیش‌بینی مقاومت فشاری و سرعت اولتراسونیک بتن‌های الیافی پرداختند. داده‌های آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و تست اولتراسونیک به ترتیب ۱۷۵ و ۱۳۲ بوده است. نتایج نشان داد که روش مارس برای هر دو پارامتر خروجی یعنی مقاومت فشاری و سرعت تست التراسونیک عملکرد بهتری داشته است. آستریس و همکاران [۹] مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن خود متراکم حاوی متاکائولن را با استفاده از دو روش مارس و مدل درخت پیش‌بینی کردند و در آخر برای مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه پیشنهادی، روابطی را ارائه دادند. در این تحقیق، سیمان، متاکائولن، خمیر سیمان، فوق‌روان‌کننده، درشت‌دانه، ریزدانه و بزرگ‌ترین قطر سنگ‌دانه به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. آنها برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی خود از

داده‌ها به خوشه‌های همگن، زمینه‌ساز تعریف قواعد فازی دقیق‌تر شده و سیستم انفیس نیز با توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان پارامترهای مؤثر، پیش‌بینی‌های قابل اعتمادی ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی پارامترهای مدل با الگوریتم PSO نیز موجب افزایش دقت، همگرایی سریع‌تر و جلوگیری از گرفتار شدن مدل در کمینه‌های محلی می‌شود. نتیجه این رویکرد، مدلی با دقت بالا، پایداری مناسب و قابلیت تعمیم‌پذیری بالا است که نه تنها از نظر آماری قابل اتکا است، بلکه از دیدگاه مهندسی نیز منجر به تصمیم‌گیری‌های مؤثرتر در طراحی و ارزیابی بتن بازیافتی، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و تسریع فرایندهای کنترل کیفیت مصالح می‌شود.

## ۲-۱- مجموعه داده‌های استفاده شده در این تحقیق

به علت دشواری جمع‌آوری و ساخت پایگاه داده با انواع مختلف هندسه نمونه، تاکنون تحقیقی در زمینه پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی با استفاده از تکنیک‌های ترکیبی ANN-PSO و ANFIS-PSO انجام نشده است. لذا در این تحقیق سعی شد تا با بررسی بیش از ۲۰۰ منبع اعم از مقالات داخلی و خارجی، مجموعه‌ای جامع و با پراکندگی مناسب تهیه شود. با توجه به نتایج حاصل از بخش آزمایشگاهی که با هدف اصلاح خلأهای موجود در پایگاه داده طرح‌ریزی شده بودند و داده‌های جمع‌آوری شده از پیشینه تحقیق و پس از اعمال غربالگری به منظور حذف داده‌هایی که خطای زیادی را در مدل ایجاد می‌کردند، در نهایت ۲۰۱ داده آزمایشگاهی در جهت برآورد مقاومت فشاری بتن تحت عمل‌آوری در آب در سن ۷-۱۸۰ روز با استفاده از مدل‌های مذکور جمع‌آوری شد که محدوده آماری آن در جدول (۱) گزارش گردیده است. بدین منظور ۲۰۱ سری داده آزمایشگاهی جهت مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن بازیافتی از تحقیقات جاکوب [۱۸]، کاسوکی و همکاران [۱۹]، اکسبریا و همکاران [۲۰]، راو و همکاران [۲۱]، یانگ و همکاران [۲۲]، کو و پون [۲۳]، ژنگ و همکاران [۲۴]، ویرا و همکاران [۲۵]، آلنگرام و همکاران [۲۳]، دوان . پون [۲۴]، فولینو و ژارگای [۲۶]، کوتراپوتر [۲۷]، تونا و همکاران [۲۸] و زگا و همکاران [۲۹] و توماس و همکاران [۳۰] جمع‌آوری شده است.

که از کل داده‌ها به ترتیب ۷۰٪ و ۳۰٪ برای اجرای مراحل آموزش

مطالعات صورت گرفته از تحقیقات پیشین، این گونه به نظر می‌رسد که تا کنون مطالعه‌ای برای پیش‌بینی و مدل‌سازی خواص سخت‌شده بتن بازیافتی (مقاومت فشاری) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و روش عصبی استنتاجی فازی بهبود یافته شده با الگوریتم ازدحام ذرات صورت نگرفته است. به علت ضعف‌ها و نقایص بتن بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی، فهم رابطه بین خصوصیات مکانیکی و طرح‌های مختلف اختلاط این نوع بتن قبل از استفاده فراگیر و گسترده آن در پروژه‌های کاربردی و صنعتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. روابط و مدل‌های مختلف جهت بررسی و ارزیابی رفتار بتن در گذشته ارائه شده است که همگی مربوط به بتن‌های متداول بوده است و به همین دلیل در مورد بتن بازیافتی از دقت و قابلیت اعتماد کافی برخوردار نیستند. لذا جهت پیش‌بینی رفتار بتن بازیافتی، استفاده از مدل‌های جدیدتر بهبود یافته با الگوریتم‌های فراابتکاری متناسب با خصوصیات و پارامترهای این نوع بتن ضروری می‌باشد.

## ۲- تعریف مسئله

در این بخش ابتدا به بررسی مجموعه داده‌های استفاده شده در این پژوهش پرداخته می‌شود. سپس، برای تعیین بهترین پارامترهای ورودی، چند حالت از سری پارامترهای ورودی برای مدل‌های ANN، ANN-PSO، ANFIS، ANFIS-PSO معرفی می‌شوند. در ادامه، به ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی پرداخته و برای هر روش، مدلی که بهترین نتایج را داشته به عنوان مدل برگزیده انتخاب و مقایسه شده است تا بهترین روش برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی مشخص گردد. لازم به ذکر است که هدف از مدل‌سازی، امکان‌سنجی توانایی روش‌های مذکور، در پیش‌بینی مناسب مقاومت فشاری بتن بازیافتی است.

از این رو، روش ترکیبی انفیس با خوشه بندی فازی (ANFIS-FCM) جهت اجرای مدل‌سازی استفاده گردیده است. در ادامه نیز با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) پارامترهای بهینه ساز تنظیمی در این روش مورد بهینه یابی قرار گرفته است. روش توسعه داده استفاده از مدل ترکیبی ANFIS-FCM بهینه شده با PSO در تخمین مقاومت فشاری بتن بازیافتی، به عنوان رویکردی هوشمند و دقیق، اهمیت بالایی در حوزه مهندسی عمران دارد. در این مدل، الگوریتم خوشه بندی فازی با تفکیک بهینه

و تست در نظر گرفته شده است. مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، شامل آب، سیمان، درشت‌دانه، ریزدانه، افزودنی‌های شیمیایی، مواد بازیافتی می‌باشد. برای هر طرح اختلاط، تعدادی نمونه آزمایشی ساخته شده و مقاومت فشاری از بتن مذکور، اندازه‌گیری شده است. همچنین، در جدول ۱ محدوده داده‌های مورد استفاده، در این تحقیق ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده

| متغیرها      | سیمان | آب  | افزودنی شیمیایی | درشت دانه | ریزدانه | مواد بازیافتی | سن نمونه | مقاومت فشاری |
|--------------|-------|-----|-----------------|-----------|---------|---------------|----------|--------------|
| حداکثر مقدار | ۷۵۰   | ۲۴۴ | ۱۳۰             | ۱۳۶۶      | ۱۰۲۰    | ۱۲۵۹          | ۱۸۰      | ۸۸/۳         |
| حداقل مقدار  | ۲۲۰   | ۱۲۰ | ۰               | ۰         | ۳۶۵     | ۰             | ۷        | ۱۳           |

## ۲-۲- مقایسه و ارزیابی مدل‌های پیشنهادی

برای مقایسه عملکرد مدل‌های ارائه شده در مراحل آموزش و آزمایش، شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی ( $R$ ) در محدوده قابل قبول  $R \geq 0.8$ ، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> ( $RMSE$ ) و میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> ( $MAE$ ) در محدوده صفر تا مثبت بی‌نهایت استفاده گردیده است.

## ۳-۲- تعیین بهترین حالت پارامترهای ورودی برای مدل

در این تحقیق برای دستیابی به بهترین پارامترهای ورودی برای توسعه مدل‌های پیشنهادی، ۴ نوع چینش مختلف از پارامترهای ورودی پیشنهاد شده است که شامل پارامترها به صورت با بعد و بی بعد به صورت وزنی حجمی، نسبتی و درصدی بوده است. باید گفته شود که در نظر گرفتن این نوع چینش، با مطالعه متعدد در مقالات مدل‌سازی بتن‌ها حاوی هرگونه پوزولان، مواد افزودنی، سنگدانه، پلیمرها و الیاف بدست آمده است. از همین رو، ۴ حالت پیشنهادی به صورت زیر معرفی می‌گردند:

- (۱) **مقاومت فشاری** = آب، سیمان، ریزدانه، درشت‌دانه، آب به مواد بازیافتی، درصد افزودنی‌های شیمیایی.
- (۲) **مقاومت فشاری** = ریزدانه، درشت‌دانه، سیمان، نسبت آب سیمان، نسبت درشت‌دانه به ریزدانه، آب، مواد بازیافتی.

- (۳) **مقاومت فشاری** = آب، سیمان، ریزدانه، درشت‌دانه، مواد بازیافتی، افزودنی‌های شیمیایی.

## ۴- مقاومت فشاری = نسبت آب به سیمان، نسبت ریزدانه

به آب، نسبت درشت‌دانه به آب، نسبت آب به مواد بازیافتی، درصد افزودنی‌های شیمیایی.

در این تحقیق از روش شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین بهترین حالت پارامترهای ورودی برای پیاده‌سازی مدل‌های پیشنهادی استفاده شده است. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت‌های سنین مختلف بتن بازیافتی حاوی افزودنی‌های شیمیایی، مستلزم آموزش و تست شبکه با استفاده از داده‌های واقعی است. خطاهای بسیار کم حاصل از این روش، نشان می‌دهد که استفاده از ANN، برای طرح اختلاط بتن بازیافتی، می‌تواند بسیار مفید باشد و تعداد آزمایش‌ها لازم برای رسیدن به یک طرح اختلاط بهینه را به حداقل برساند. نتایج این ارزیابی در جدول ۲ گزارش گردیده است.

جدول ۲- ارزیابی روش‌های پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

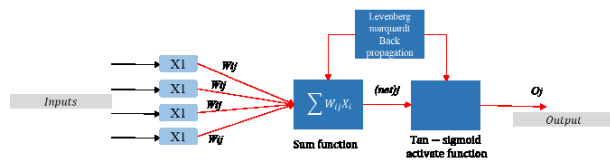
| حالت‌های ورودی | شاخص‌های آماری خطا |       |      |
|----------------|--------------------|-------|------|
|                | MAE                | RMSE  | R    |
| حالت اول       | ۹۶۸/۷              | ۵۲۴/۷ | ۰/۷۳ |
| حالت دوم       | ۶۲۴/۷              | ۲۷۵/۹ | ۰/۸۳ |
| حالت سوم       | ۵۹۶/۹              | ۱۳۶/۹ | ۰/۸۵ |
| حالت چهارم     | ۷۶۲/۷              | ۳۶۴/۶ | ۰/۷۸ |

باتوجه به جدول بالا که ۴ حالت از پارامترهای ورودی مختلف و عملکردشان را نشان می‌دهد، حالت سوم از این حالات دارای

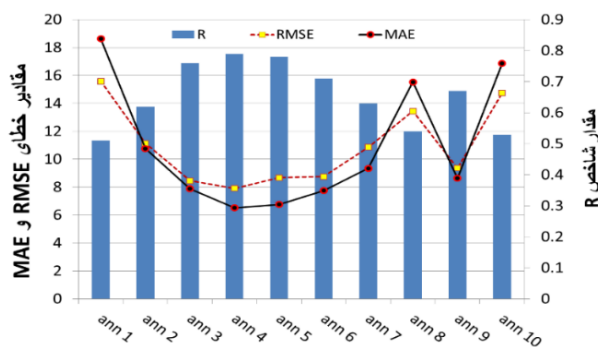
<sup>2</sup> Mean Absolute Error

<sup>1</sup> Root Mean Square Error

عملکرد آن در آزمایش می‌باشد. لازم به ذکر است که با هر بار آنالیز مدل شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار متلب، وزن‌های متفاوتی به شبکه اختصاص داده می‌شود؛ در نتیجه با هر بار آنالیز جواب متفاوتی حاصل می‌گردد. برای مرتفع کردن این مسئله برای هر مدل شبکه عصبی مصنوعی حدود ۵۰ بار آنالیز شده است و ۱۰ جواب منتخب به عنوان مدل نهایی ارائه و مقایسه شده است. همان‌گونه که از جدول‌های ارائه شده قابل استنباط است، ۴ عصب در لایه پنهان بهترین نتایج را در برداشته است؛ و مدل ann4 بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. شکل ۳ معیارهای ارزیابی در هر مدل شبکه عصبی مصنوعی را در قالب نمودار نشان می‌دهد.



شکل ۲- ساختار کلی شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۳- معیارهای ارزیابی مدل های شبکه عصبی مصنوعی

### ۳-۲- توسعه مدل ترکیبی ANN-PSO جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

همان‌گونه که در بخش قبل گفته شد، داده‌ها برای مراحل آموزش و تست به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شدند. به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی از نرم‌افزار متلب برای کدنویسی استفاده شده است. اختصاص مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار بر میزان عملکرد آموزش شبکه عصبی مصنوعی حتی با فرض ثابت بودن معماری و سایر پارامترهای شبکه عصبی است. در این تحقیق از روش سعی و خطا به منظور تعیین معماری بهینه شبکه عصبی استفاده شد. برای این منظور،

بهترین عملکرد را داشته است. در این حالت ضریب همبستگی با داشتن ۸۵٪ و ریشه میانگین مربعات خطا ۱۳۶/۹ بهترین دقت از پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی را از میان دیگر حالت‌های تعریف شده، داشته است.

### ۳- توسعه مدل

#### ۳-۱- توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

پس از تعیین بهترین حالت پارامترهای ورودی، حال به مدل‌سازی بتن بازیافتی پرداخته می‌شود. از آنجاکه هدف در این تحقیق، دستیابی به شبکه‌هایی است که بتوانند با داشتن نسبت‌های اختلاط مختلف، مقاومت سنین مختلف بتن بازیافتی را با کمترین خطای ممکن پیش‌بینی کنند، در ابتدا برای تعیین بهترین شبکه‌ها، برنامه به تعداد دفعات زیاد برای تعیین بهترین سیستم پس انتشار خطا، بهترین مقدار مومنتم و همچنین بهترین تعداد نرون‌ها و لایه‌ها، اجرا شده است. البته لازم به ذکر است که با هر بار اجرا، پارامترهای مدل شبکه عصبی مصنوعی که شامل وزن‌ها و بایاس‌ها هستند، دچار تغییر می‌شوند تا بهینه‌ترین مقادیر از این پارامترها به دست آید. در این تحقیق از شبکه عصبی چندلایه پرسپترون استفاده شده است. این شبکه دارای دولایه پنهان می‌باشد. برای تعیین تعداد عصب بهینه در لایه‌های پنهان، ۱۰ مدل شبکه عصبی ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام این مهم بر تعداد عصب‌ها در لایه اول پنهان تک‌تک افزوده شد (۱۰-۱ عدد) و عملکرد هر مدل بررسی گردید. برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم لونبرگ - مارکوارد استفاده شد. این الگوریتم اغلب سریع‌ترین الگوریتم پس انتشار خطا است و قویاً به عنوان اولین انتخاب در الگوریتم‌های آموزش نظارت شده توصیه می‌شود. برای تعیین تابع تحریک مناسب در لایه پنهان و خروجی از توابع تانژانت سیگموئیدال، لگاریتم سیگموئیدال و خطی استفاده شد که بهترین نتیجه را تابع تانژانت سیگموئیدال در لایه پنهان و تابع خطی در لایه خروجی داده است. شکل ۲ ساختار شبکه عصبی مصنوعی توسعه داده با الگوریتم آموزش لونبرگ - مارکوارد با تابع تحریک تانژانت سیگموئیدال را در این مطالعه نشان می‌دهد.

برای آموزش و آزمایش شبکه‌ها به ترتیب از ۷۰ درصد و ۳۰ درصد اطلاعات استفاده شده است. ملاک تعیین مدل نهایی،

برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب نوشته شد که فرایند سعی و خطا را به صورت خودکار و با هدف تعیین بهترین معماری شبکه انجام می‌داد. برنامه فوق با ارزیابی تعداد مختلف نرون‌ها و لایه‌های پنهان، بهترین معماری را با توجه به شرط کمینه‌سازی میزان جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) داده‌های آزمون پیدا می‌کند. همچنین در این معماری از توابع و الگوریتم یادگیری در روش ANN که در بخش قبل توضیح داده شد، استفاده شده است. در نهایت از الگوریتم PSO به منظور بهینه‌سازی وزن‌ها و بایاس‌های شبکه استفاده شد. در این مطالعه مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم PSO شامل تعداد ذرات در نظر گرفته شده ۳۰، تعداد تکرار ۱۰۰، شاب شناسایی ۱، شتاب جمعی ۱ و نسبت میرایی وزن اینرسی ۰/۱۹۹ بوده است. ارزیابی‌های انجام شده نشان داد که شبکه بهینه دارای معماری ۱-۶-۶ است که در آن ۶ نرون در لایه پنهان، ۶ نرون در لایه ورودی و ۱ نرون در لایه خروجی قرار گرفته است.

واژه‌های فازی متغیرهای ورودی و همچنین متغیر خروجی را یک فرد خبره تعیین کند، از داده‌های موجود در فرایند مورد مطالعه تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر موارد مذکور (توابع عضویت و پارامترها) همانند شبکه عصبی به نحوی تنظیم می‌شوند که برای مجموعه داده‌های موجود (داده‌های آموزشی) مقادیر برآورد شده توسط ANFIS با مقادیر خروجی مشاهداتی داده‌ها تطبیق بیشتری داشته باشد (خطای کمتری داشته باشد). برای انجام مدل‌سازی به روش ANFIS از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد و در این مدل‌سازی همانند شبکه عصبی مصنوعی با دو مجموعه داده سروکار خواهیم داشت. مدل انفیس فقط در مورد سیستم‌های استنتاجی سوگنو به کار می‌رود و در این راستا برای انجام مدل‌سازی پس از بارگذاری داده‌های آموزشی، چک در نرم‌افزار، یک ساختار FIS اولیه برای انجام مدل‌سازی ایجاد و بارگذاری می‌شود. معماری در سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی شامل تعیین تعداد تابع عضویت ورودی، نوع تابع عضویت ورودی، نوع تابع عضویت خروجی، نوع الگوریتم آموزشی و تعداد تکرار است که در یادگیری شبکه تأثیر بسزایی دارند. هر کدام از اجزاء فوق بر اساس ارزیابی دقت مدل‌های متعدد ساخته شده و بر اساس سعی و خطا تعیین شدند.

### الف- تعداد عضویت ورودی

تعداد تابع عضویت برای هر لایه ورودی به طور پیش‌فرض نرم-افزار برابر با ۳ انتخاب شد.

### ب) تابع عضویت ورودی

تابع‌های عضویت ورودی انتخاب شده در این پژوهش بر اساس انتخاب روش‌های فازی FCM clustering و subtractive clustering کوسی در نظر گرفته شد.

### پ) تابع عضویت خروجی

تابع عضویت خروجی در این پژوهش از نوع خطی انتخاب شد.

### ت) الگوریتم آموزشی

الگوریتم آموزشی در این پژوهش از نوع ترکیبی انتخاب شد و ویژگی متمایزکننده ANFIS، فراهم کردند الگوریتم ترکیبی، ترکیبی از روش کاهش گرادیان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد. روش شیب گرادیان به منظور تنظیم پارامترهای غیرخطی مقدماتی به کار گرفته می‌شود، درحالی که روش حداقل مربعات برای معین کردن پارامترهای خطی بخش

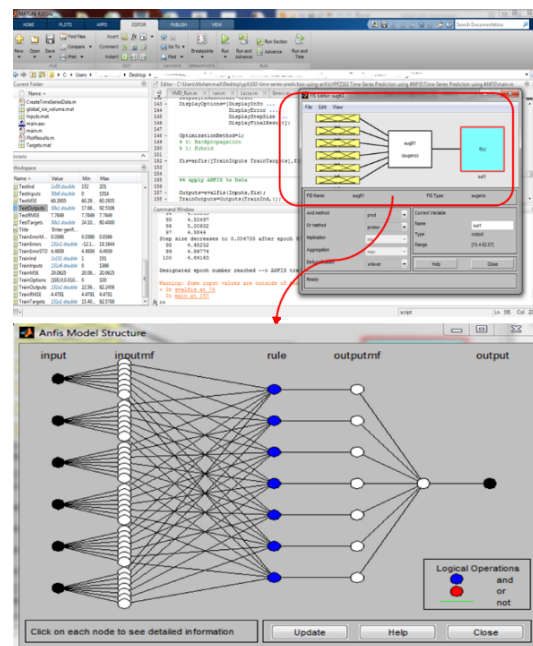
## ۳-۳- توسعه مدل ANFIS جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

حجم زیادی از اطلاعات بعلاوه مقدار زیادی عدم قطعیت، زمینه اصلی بسیاری از مشکلات امروزه یعنی پیچیدگی را تشکیل می‌دهند. مطلب مهم این است که با پیچیدگی چگونه برخورد کرد. یک راه این است که مقدار عدم قطعیت مجاز در بیان و حل مسئله افزایش داده شود. برای این کار کافی است قسمتی از اطلاعات دقیق را حذف کرده و بحای آن از یک خلاصه غیردقیق استفاده شود. این مطلب دقیقاً ایده اساسی مجموعه‌های فازی می‌باشد که در عین سادگی از نظر شهودی رضایت‌بخش است؛ بنابراین در این بخش از پژوهش سعی بر آن شده است که مقاومت فشاری بتن را با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی مدل‌سازی کنیم. مهمترین ویژگی منطق فازی در مقایسه با منطق کلاسیک این است که دانش و تجربه بشر را می‌تواند در قالب روابط ریاضی بیان نماید. این مهم باعث گردیده است که مسائل موجود در فضای واقعی را به خوبی بتوان با استفاده از آن مدل‌سازی نمود. در این پژوهش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی یک سیستم استنتاج فازی از نوع تاکاگی- سوگنو- کانگ است که در این سیستم قسمت مقدم هر قاعده فازی است و قسمت تالی، عددی ثابت و تابعی خطی از متغیرهای ورودی است، به جای آنکه توابع عضویت

تالی به کار می‌رود.

## ۵) تعداد تکرار (Epoch)

تعداد تکرار نیز به روش آزمون و خطا و باتوجه به میزان کاهش خطای آموزشی شبکه انتخاب شد و در نهایت تعداد ۲۰ تکرار به عنوان تکرار مناسب انتخاب شد. با افزایش تعداد تکرارها مقدار خطای شبکه، روش داده‌های آموزشی کم می‌شود. در شکل (۴)، محیط نرم‌افزار MATLAB در اجرای سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی نمایش داده شده است و در شکل ساختار یک سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی نشان داده شده است.



شکل ۴- ساختار شماتیک سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است، بعد از اینکه داده وارد سیستم استنتاج فازی شده‌اند، تعداد قوانین با استفاده از سعی و خطا برابر ۷ بدست آمد.

## ۳-۴- توسعه مدل ترکیبی ANIFS-PSO جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

در این بخش به توضیح و نحوه توسعه مدل ANFIS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO می‌پردازیم. از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای به‌دست‌آوردن قواعد اگر - آنگاه فازی (یادگیری) و همچنین تنظیم و بهینه‌سازی پارامترهای سیستم ANFIS استفاده می‌شود. الگوریتم ANFIS یکی از قدرتمندترین روش‌های مدل‌سازی داده - مبنای موجود است که

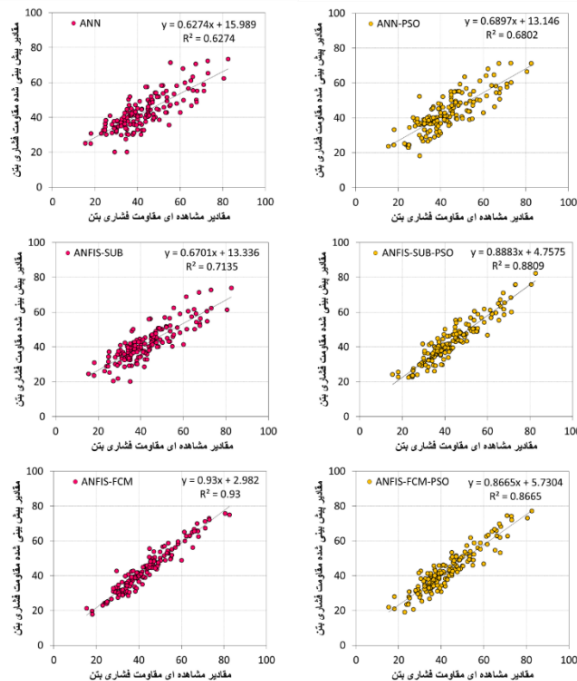
قدرت پیش‌گویی بالایی دارد. از آنجایی که ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی یا همان تشکیل مدل نروفازی می‌تواند ضعف‌های هر دو مدل را تا حدودی پوشش دهد، در این پژوهش این نوع از شبکه عصبی انتخاب شد. یکی از ضعف‌های این روش مستعد بودن آن در بیش‌برازش مدل در بخش آموزش مدل است. همچنین دارای پارامترهایی در بخش یادگیری مدل است که بایستی به‌خوبی تنظیم شوند تا مدل در بهینه محلی نیفتد. ضرایب وزنی، ضرایبی هستند که ورودی‌های سیستم فازی، پیش از آنکه وارد سیستم شوند و یا در خروجی‌ها ضرب شوند، نرمال‌سازی می‌کنند. یکی از روش‌های تنظیم سیستم‌های فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، تنظیم این ضرایب وزنی برای عملکرد بهینه سیستم است. روند دیگری که در بهینه‌سازی سیستم‌های فازی با استفاده از الگوریتم PSO مورد استفاده قرار می‌گیرد، تنظیم توابع عضویت است. به این منظور توابع عضویت پارامتری استفاده می‌شود که پارامترهای آنها شکل و محل تابع عضویت را تعیین می‌کند. در این روش معمولاً ابتدا ورودی‌ها و خروجی تعیین می‌شوند و مقادیر کلامی مربوط به آنگاه، مانند «کم» و «زیاد» ... مشخص می‌شوند و با استفاده از دانش شخص خبره پایگاه قواعد فازی طراحی می‌شود. در این فرایند مدل‌سازی مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم PSO شامل تعداد ذرات در نظر گرفته شده ۴۵، تعداد تکرار ۱۰۰۰، شتاب شناسایی ۱، شتاب جمعی ۱ و نسبت میرایی وزن اینرسی ۰/۱۹۹ بوده است.

## ۴-۱- مقایسه روش‌های پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

### ۴-۱-۱- بررسی کیفیت مدل‌ها

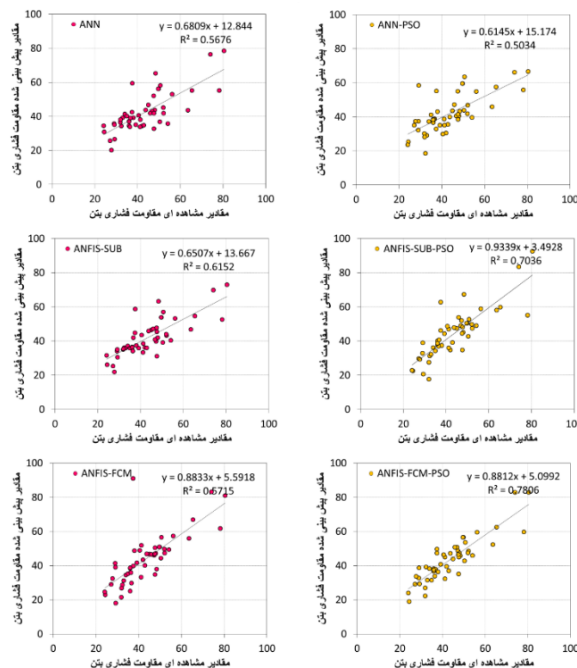
همان‌طور که جدول ۳ نشان داده شده است، ضریب همبستگی در مرحله آموزش برای روش ANN و ANN بر پایه الگوریتم PSO به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۲ می‌باشد. همچنین برای این شاخص روش ANFIS-FCM نسبت به باقی روش‌های بر پایه نروفازی، از دقت بالاتری برخوردار بوده است. مقدار شاخص آماری RMSE برای مدل پیشنهادی ANN، ANN-PSO، ANFIS-SUB-PSO، ANFIS-FCM، ANFIS-SUB و ANFIS-SUB-PSO در این مرحله به ترتیب ۰/۷۳۳، ۰/۷۱۸، ۰/۷۰۲۴، ۰/۴۳۲، ۰/۴۷۹ و ۰/۶۵۸ حاصل گردیده است. همچنین

خوشه‌بندی C میانگین در شکل ۷ بر روی خط نیمساز متمرکز هستند و فقط تعداد اندکی از این نقاط خارج از منطقه تمرکز می‌باشند، اما تقریباً می‌توان گفت که در باقی روش‌ها پراکندگی داده‌ها از خط نیمساز مشخص‌تر می‌باشد و فاصله بیشتری دارد.



شکل ۵- نمودار پراکندگی مقادیر مقاومت فشاری در مرحله

آموزش برای مدل‌های پیشنهادی



شکل ۶- نمودار پراکندگی مقادیر مقاومت فشاری در مرحله

تست برای مدل‌های پیشنهادی

شاخص‌های آماری MAE برای روش ANFIS-FCM (۲/۴۷۱) به مراتب بهتر از روش‌های ANFIS-SUB-PSO و (۳/۳۹۶) ANFIS-FCM-PSO (۲/۶۹۵) بوده است. بدین ترتیب، شاخص‌های آماری نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی ANFIS-SUB از عملکرد خوب و دقت بالایی در مرحله آموزش برخوردار بوده است

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی با مقایسه

| شاخص‌های آماری خطا |       |       |               |
|--------------------|-------|-------|---------------|
| مرحله آموزش        |       |       | مدل‌ها        |
| MAE                | RMSE  | R     |               |
| 6.522              | 7.918 | 0.79  | ANN           |
| 5.91               | 7.339 | 0.82  | ANN-PSO       |
| 5.54               | 7.024 | 0.84  | ANFIS-SUB     |
| 2.471              | 3.432 | 0.96  | ANFIS-FCM     |
| 3.396              | 4.479 | 0.938 | ANFIS-SUB-PSO |
| 2.695              | 4.658 | 0.94  | ANFIS-FCM-PSO |
| مرحله آزمایش       |       |       | مدل‌ها        |
| 6.626              | 8.624 | 0.75  | ANN           |
| 6.323              | 8.31  | 0.77  | ANN-PSO       |
| 5.93               | 8.041 | 0.78  | ANFIS-SUB     |
| 5.711              | 9.834 | 0.76  | ANFIS-FCM     |
| 5.538              | 7.76  | 0.83  | ANFIS-SUB-PSO |
| 4.807              | 6.119 | 0.88  | ANFIS-FCM-PSO |

از طرف دیگر، در این تحقیق شاخص آماری R برای روش شبکه عصبی مصنوعی و این روش بر پایه PSO در مرحله تست به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۵ و پارامتر خطای RMSE برای مدل‌های مذکور به ترتیب ۸/۶۲۴ و ۸/۳۱ تعیین گردید. به این ترتیب، روش شبکه عصبی مصنوعی بر پایه الگوریتم ازدحام ذرات در مرحله تست نیز، از عملکرد بهتری نسبت به روش ANN داشته است. اما روش ANFIS-FCM-PSO بر خلاف اینکه در مرحله آموزش کمی از روش ANFIS-FCM ضعیف‌تر عمل کرد، اما در مرحله تست بر اساس سه شاخص ارائه شده عملکردی بهتر از باقی روش‌های پیشنهادی داشته است. در این تحقیق، شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر مقاومت فشاری واقعی و پیش‌بینی شده نظیر آن توسط مدل پیشنهادی ANN، ANN-PSO، ANFIS-SUB، ANFIS-FCM، ANFIS-SUB-PSO و ANFIS-FCM-PSO را بصورت تفکیک شده به ترتیب برای مراحل آموزش و آزمون نشان می‌دهد. در یک مقایسه‌ی کیفی، بیشتر مقاومت فشاری‌ها در روش نروفازی با استفاده از تکنیک

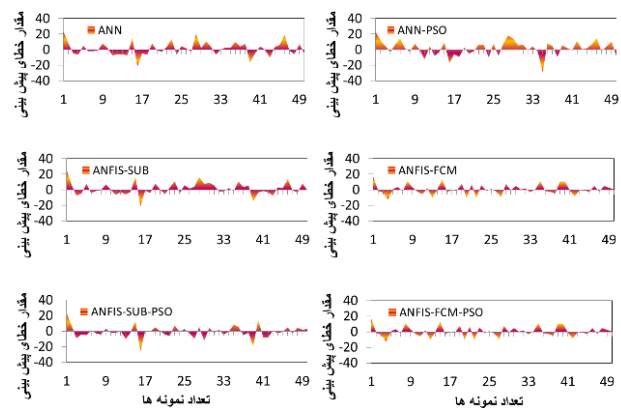
در این شکل که بر اساس مساحت زیر نمودار تعریف می‌شود، هر چه میزان خطا برای پیش‌بینی مقاومت فشاری برای هر طرح اختلاط از بتن بازیافتی بیشتر باشد، پس مساحت زیر نمودار نیز بزرگتر می‌باشد. همانطور که در شکل پیداست، روش‌های بر پایه شبکه عصبی مصنوعی (یعنی ANN و ANN-PSO) دارای میزان مساحت بالاتری نسبت به باقی روش‌ها می‌باشد. از سوی دیگر نیز، روش ANFIS-FCM-PSO نیز برای میزان خطا، مساحت بسیاری کمی را در زیر نمودار تشکیل داده به طوری که مقادیری از خطا بالا و یا پایین ۲۰ مگاپاسکال دیده نمی‌شود و عملکرد به مراتب قوی‌تری داشته است.

شکل ۸، نمودار خطی داده‌های مقاومت فشاری محاسباتی مدل‌های پیشنهادی را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. بررسی دقیق‌تر بر روی شکل‌ها نشان می‌دهد در شکل (۸) مدل ANN در مرحله تست در پیش‌بینی بیشینه و کمینه‌های محلی داده‌ها نسبت به دیگر روش‌های پیشنهادی دارای دقت ضعیف‌تری در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه بازیافتی می‌باشد.

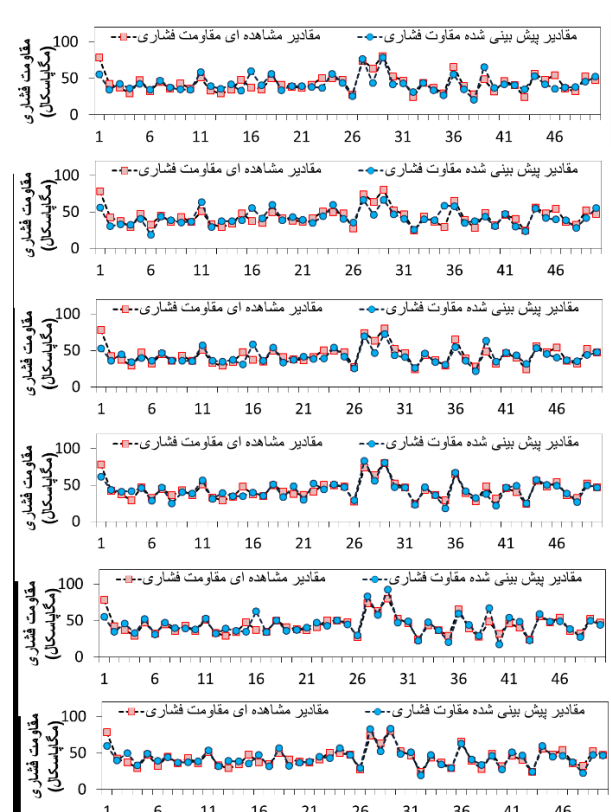
در یک نتیجه‌گیری کلی از روند مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر مقاومت فشاری بتن بازیافتی، می‌توان یافت که هر یک از روش‌های پیشنهادی (ANN، ANN-PSO، ANFIS-SUB، ANFIS-FCM و ANFIS-SUB-PSO) می‌توانند ابزاری مناسب و جایگزین روش‌های تجربی و دستی محاسبات مقاومت فشاری بتن شوند. همچنین، ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌تواند با ارائه مقادیر بهینه از پارامترهای موجود در هر یک از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی، عملکرد و دقت مدل‌ها را در فرایند مدل‌سازی بهبود ببخشد و میزان خطای ایجاد شده را تا حد مطلوبی کاهش دهد. همان‌طور که در نمودار پراکندگی نشان داده شده است توانایی مدل بهینه‌شده در تعمیم‌پذیری بهتر در داده‌های تست از جمله مزایای مهم در این روش بوده که به دلایل زیر اتفاق افتاده است:

- ترکیب مزایای شبکه عصبی و منطق فازی
- انفیس از ترکیب شبکه عصبی (برای یادگیری) و سیستم فازی (برای استنتاج) استفاده می‌کند. این ترکیب باعث می‌شود که:
- شبکه عصبی پارامترهای سیستم فازی (مثل توابع عضویت) را به صورت خودکار و بهینه تنظیم کند.

اما در شکل ۸ می‌توان دریافت که روش ANFIS-FCM-PSO که در مرحله آموزش، کمی از روش ساده خود یعنی ANFIS-FCM عملکرد و دقت ضعیف‌تری داشت، در مرحله تست که مهمترین مرحله برای انتخاب مدل برتر می‌باشد، عملکرد قابل قبولی نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی را دارا بوده است.



شکل ۷- مقادیر خطای هر یک از روش‌های هوشمند مصنوعی بر حسب میزان مساحت زیر نمودار



شکل ۸- نمودار خطی مربوط به مدل‌های پیشنهادی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی

شده است. تحلیل عدم قطعیت برای ۲۰۱ داده آزمایشگاهی که در این پایان‌نامه استفاده شده‌اند، انجام گرفته است. همچنین این تحلیل می‌تواند به مزیت‌های روش‌های پیشنهادی هوشمند در مقایسه با روابط تجربی بیافزاید. تحلیل عدم قطعیت خطای پیش‌بینی هر یک از داده‌ها را به صورت  $e_j = P_j - T_j$  تعریف می‌کند. با استفاده از خطاهای پیش‌بینی محاسباتی می‌توان میانگین و انحراف معیار خطای پیش‌بینی شده را به ترتیب با فرمول‌های  $e_j$  و  $\bar{e} = \sum_{j=1}^n e_j$

و  $S_e = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e_j - \bar{e})^2 / n - 1}$  محاسبه نمود که در آن  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. با استفاده از مقادیر  $\bar{e}$  و  $S_e$ ، یک محدوده اطمینان حول خطای مقادیر پیش‌بینی شده تعریف می‌گردد. همچنین، با استفاده از رابطه  $\pm 0.96 S_e$  یک محدوده اطمینان ۹۵ درصد فراهم می‌آید. جدول ۴ نتایج تحلیل عدم قطعیت را برای میانگین خطای پیش‌بینی<sup>۱</sup> روش‌های پیشنهادی، میزان محدوده عدم قطعیت مدل‌ها و ۹۵٪ فاصله خطای پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد که ANFIS-FCM-PSO با داشتن فاصله خطای پیش‌بینی شده کمتر (۶/۴۲ تا ۷/۷۲- ) نسبت به روش‌های دیگر با عدم قطعیت کمتری برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بازیافتی همراه می‌باشد.

در آخر به‌عنوان یک جمع‌بندی، این‌گونه عنوان می‌شود که در ابتدا هر یک از روش‌های هوشمند مصنوعی ANN و ANFIS برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بازیافتی از عملکرد نسبتاً خوبی برخوردار بوده‌اند. سپس برای افزایش قابلیت هر یک از مدل‌ها و جلوگیری از اتلاف زمان، از الگوریتم PSO برای بهینه‌یابی مقادیر هر یک از روش‌های هوشمند مصنوعی استفاده شد. نتایج به این صورت بوده است که اگر چه روش ANFIS-FCM دارای عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌های مستقل و ترکیبی بوده است، اما این روش ANFIS-FCM-PSO می‌باشد که در مرحله آزمایش و یا تست، دقت بالاتری در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی داشته است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در ابتدای این پژوهش مطالعه روی تکنولوژی بتن، پارامترهای مختلف مؤثر برای تعیین مقاومت فشاری بتن انجام شد. سپس

• سیستم فازی، دانش تقریبی و قواعد زبانی را به شکل قابل تفسیر نگه دارد.

- توانایی مدل در مدل‌سازی روابط غیرخطی

انفیس می‌تواند روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی و خروجی را یاد بگیرد و مدل کند. این قابلیت باعث می‌شود مدل بتواند روی داده‌هایی که در آموزش دیده نشده (داده تست)، عملکرد خوبی داشته باشد.

- قواعد فازی تعمیم‌یافته

قواعد فازی در انفیس به صورت تعمیم‌یافته‌ای از دانش سیستم تعریف می‌شوند که امکان یادگیری الگوهای کلی (نه فقط جزئیات آموزش داده‌شده) را فراهم می‌کند.

- تنظیم بهینه پارامترها

در فرایند آموزش انفیس (مثلاً با الگوریتم‌هایی مثل *hybrid learning* یا *backpropagation*)، پارامترهای مدل (مثل مراکز و پهنای توابع عضویت) به گونه‌ای بهینه می‌شوند که مدل روی داده آموزش بیش از حد تنظیم نشود. این باعث بهبود **generalization** یا همان تعمیم‌پذیری می‌شود.

- انعطاف‌پذیری بالا

مدل انفیس انعطاف‌پذیری بالایی در ساختار خود دارد، به گونه‌ای که می‌تواند با افزایش قواعد یا تغییر شکل توابع عضویت، دقت و قدرت تعمیم خود را بهبود دهد، بدون اینکه پیچیدگی بیش‌ازحد ایجاد شود.

## ۴-۲- تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت‌ها از ساده‌سازی در مدل‌های ریاضی و توصیف پدیده‌های فیزیکی و طبیعی در مهندسی، اجرای غیر ایده‌آل سازه-ای نشأت می‌گیرد. مشکل اصلی در شناخت فرایندهای طبیعی، وجود عامل احتمال و برخی عوامل غیرقابل کنترل است که در این راستا تحلیل عدم قطعیت برای هر پدیده درکی واقعی از پارامترهای آن را مشخص کرده و شناختی درست از نقش عوامل تأثیرگذار بر پدیده را میسر می‌سازد [۳۱، ۳۲].

در این بخش، یک ارزیابی کمی از عدم قطعیت با استفاده از مدل‌های هوشمند برای تخمین مقاومت فشاری بتن بازیافتی ارائه

<sup>1</sup> Mean prediction error

مهمترین پارامترهای اثرگذار در تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بازیافتی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس برای مدل سازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی - عصبی استفاده شد. سپس برای افزایش عملکرد روش های هوشمند و جلوگیری از رویکرد سعی و خطا برای دستیابی به بهینه ترین مقادیر پارامترهای هر مدل، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شد. از تحقیق حاضر نتایج زیر را می توان استخراج نمود:

جدول ۴- نتایج تحلیل عدم قطعیت برای مدل های پیشنهادی

| مدلها         | میانگین خطای پیش بینی شده | محدوده باند عدم قطعیت | ۹۵٪ فاصله خطای پیش بینی شده |
|---------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ANN           | -۰/۲۵۷                    | ۸/۱۱۶±                | -۱۶/۱۶ تا ۱۵/۶۵             |
| ANN-PSO       | -۰/۵۲۲                    | ۷/۸۷۵±                | -۱۵/۹۵ تا ۱۴/۹۱             |
| ANFIS-SUB     | -۰/۹۹                     | ۷/۲۳۹±                | -۱۵/۱۸ تا ۱۳/۱۹             |
| ANFIS-FCM     | -۰/۱۳                     | ۴/۳۳±                 | -۸/۶۲ تا ۸/۳۵               |
| ANFIS-SUB-PSO | +۰/۱۲                     | ۵/۴۹۵±                | -۱۰/۶۴ تا ۱۰/۸۹             |
| ANFIS-FCM-PSO | +۰/۰۱۷                    | ۳/۰۸۱±                | -۷/۷۲ تا ۶/۴۲               |

- همان گونه که بیان شد در این پژوهش از دو روش رایج داده کاوی یعنی ANN و ANFIS برای تخمین مقاومت فشاری بتن به عنوان یکی از مهم ترین خواص سخت شده استفاده شد؛ لذا در این تحقیق سعی شد تا با بررسی مقالات داخلی و خارجی، مجموعه ای جامع و با پراکندگی مناسب باهدف اصلاح خلأهای موجود در پایگاه داده در نظر گرفته شود. داده های جمع آوری شده از پیشینه تحقیق برای ایجاد مدل های پیشنهادی ۲۰۱ داده آزمایشگاهی بود که در جهت برآورد مقاومت فشاری بتن بازیافتی با استفاده از مدل های مذکور جمع آوری شد. سپس برای تعیین بهترین پارامترهای ورودی به مدل، چهار سناریو تعریف شد که از میان آنها، سناریویی که شامل آب، سیمان، ریزدانه، درشت دانه، مواد بازیافتی، افزودنی های شیمیایی بود، بر اساس سه شاخص آماری شامل ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به عنوان سناریو برتر انتخاب گردید.

- برای روش نرو فازی نیز، برای دستیابی به بهترین مدل، از دو رویکرد آموزشی Subtractive و FCM استفاده گردید و هر یک از این روش ها که در این پژوهش به نام های ANFIS-SUB و ANFIS-FCM معرفی گردیدند، ارزیابی شد. سپس برای جلوگیری از روش های سعی و خطا، از الگوریتم بهینه سازی PSO برای تعیین بهینه ترین حالت پارامترهای مدل استفاده گردید. - در این پژوهش، برای تعیین بهترین مدل برای تخمین مقاومت فشاری بتن بازیافتی از طریق شاخص های آماری خطا، مشخص گردید که ضریب همبستگی (R) در مرحله آموزش برای روش ANN و ANN بر پایه الگوریتم PSO به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۲ می باشد. همچنین برای این شاخص روش ANFIS-FCM نسبت به باقی روش های بر پایه نرو فازی، از دقت بالاتری برخوردار بوده است. مقدار شاخص آماری RMSE برای مدل پیشنهادی ANN، ANN-PSO، ANFIS-SUB، ANFIS-FCM،

- پس از تعیین بهترین سناریوی اثرگذار بر خروجی مدل ها، داده های جمع آوری شده به ترتیب به ۷۵٪ برای آموزش مدل ها و ۲۵٪ برای تست آنها در نظر گرفته شدند. در این پژوهش، ابتدا سعی شد که برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل از رویکرد سعی و خطا استفاده شود. پس به عنوان مثال برای تعیین بهترین تعداد نرون در

روش‌های پیشنهادی از دقت بالاتری برخوردار بوده است.  
- معیار انتخاب بر پایه اندازه‌گیری‌های مختلف آماری و تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل برای انتخاب بهترین مدل که دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی مقاومت فشاری و کمترین عدم قطعیت را دارا باشد، استفاده شدند. نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت نشانگر آن بود که روش پیشنهادی بافاصله بسیار کمی در ترم خطای میانگین پیش‌بینی داشته‌اند. همچنین در میان روش‌های هوشمند پیشنهادی، روش ANFIS-FCM-PSO با اختلاف اندکی نسبت به دیگر مدل‌ها دارای عملکرد بهتری می‌باشد

## ۶- مراجع

- [1] Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical properties and durability of geopolymers recycled aggregate concrete: A review. *Polymers*, 15(3), 615.
- [2] Wang, D., Lu, C., Zhu, Z., Zhang, Z., Liu, S., Ji, Y., & Xing, Z. (2023). Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02384.
- [3] Tejas, S., & Pasla, D. (2023). Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 387, 131620.
- [4] Xu, W., Tang, Z., Song, Y., Xie, Y., Lei, B., Yu, H., & Kai, M. (2023). Drying shrinkage of geopolymers recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 395, 132220.
- [5] Wang, S., Xia, P., Gong, F., Zeng, Q., Chen, K., & Zhao, Y. (2024). Multi objective optimization of recycled aggregate concrete based on explainable machine learning. *Journal of Cleaner Production*, 445, 141045.
- [6] Abd, Abbas M., and Suhad M. Abd. "Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM)." *Case Studies in Construction Materials* 6 (2017): 8-15.
- [7] Kiani, Behnam, et al. "New formulation of compressive strength of preformed-foam cellular concrete: an evolutionary approach." *Journal of Materials in Civil Engineering* 28.10 (2016): 04016092.
- [8] Gholampour, Aliakbar, Amir H. Gandomi, and Togay Ozbakkaloglu. "New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming." *Construction and Building Materials* 130 (2017): 122-145.
- [9] Ashrafiyan, A., Amiri, M. J. T., Rezaie-Balf, M.,

ANFIS-SUB-PSO و ANFIS-SUB-PSO در این مرحله به ترتیب ۷/۹۱۸، ۷/۳۳، ۷/۰۲۴، ۳/۴۳۲، ۴/۴۷۹ و ۴/۶۵۸ حاصل گردیده است. در مرحله تست نیز، روش شبکه عصبی مصنوعی بر پایه الگوریتم ازدحام ذرات، از عملکرد بهتری نسبت به روش ANN برخوردار بود. اما روش ANFIS-FCM-PSO بر خلاف اینکه در مرحله آموزش کمی از روش ANFIS-FCM ضعیف‌تر عملکرد، اما در مرحله تست بر اساس سه شاخص ارائه شده عملکردی بهتر از باقی روش‌های پیشنهادی داشته است.

- در این تحقیق، نمودارهای پراکندگی مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه واقعی و پیش‌بینی شده نظیر آن توسط مدل پیشنهادی ANFIS-FCM، ANIFS-SUB، ANN-PSO، ANN و ANFIS-SUB-PSO و ANFIS-FCM-PSO بصورت تفکیک شده به ترتیب برای مراحل آموزش و آزمون نشان می‌دهد که بیشتر مقاومت فشاری‌ها در روش نروفازی با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی C میانگین بر روی خط نیمساز متمرکز هستند و فقط تعداد اندکی از این نقاط خارج از منطقه تمرکز می‌باشند. این روش با استفاده از الگوریتم PSO توانست ضعف‌های پیش‌بینی در مرحله تست را پوشش دهد.

- میزان و مقدار خطای هر یک از شش روش هوشمند مصنوعی برای تخمین مقاومت فشاری بتن بازیافتی در نمودار خطا نشان می‌دهد که بر اساس مساحت زیر نمودار تعریف شده، روش‌های بر پایه شبکه عصبی مصنوعی (یعنی ANN و ANN-PSO) دارای میزان مساحت بالاتری نسبت به باقی روش‌ها دارد. از سوی دیگر نیز، روش ANFIS-FCM-PSO نیز برای میزان خطا، مساحت بسیار کمی را در زیر نمودار تشکیل داده، به‌طوری که مقادیری از خطا بالا و یا پایین ۲۰ مگاپاسکال دیده نمی‌شود و عملکرد به مراتب قوی‌تری داشته است.

- نمودار خطی داده‌های مقاومت فشاری محاسباتی مدل‌های پیشنهادی را نسبت به داده‌های مشاهداتی نیز نشان می‌دهد که مدل ANN در مرحله تست در پیش‌بینی بیشینه و کمینه‌های محلی داده‌ها نسبت به دیگر روش‌های پیشنهادی دارای دقت ضعیف‌تری در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی داشته است. مقدار ابتدایی از مقاومت فشاری در مرحله تست که در شکل ۸ دیده می‌شود می‌تواند مثال جالب و کاربردی باشد تا نشان دهد کدام یک از

- [20] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.
- [21] Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205-220.
- [22] Yang, K. H., Chung, H. S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.
- [23] Kou, S. C., & Poon, C. S. (2008). Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 57-64
- [24] Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., & Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9, 1317-1322
- [25] Vieira, J. P. B., Correia, J. R., & De Brito, J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 533-541.
- [26] Alengaram, U. J., Salam, A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., & Saad, H. B. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research*, 14(2), 248-255
- [27] Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, 58, 19-29
- [28] Folino, P., & Xargay, H. (2014). Recycled aggregate concrete—mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*, 56, 21-31.
- [29] Kotrayothar, D. (2012). *Recycled aggregate concrete for structural applications* (Doctoral dissertation, University of Western Sydney).
- [30] Thomas, J., Thaickavil, N. N., & Wilson, P. M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 19, 349-365
- [31] Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and building materials*, 23(5), 2047-2052.
- [32] Tung Y, Yen B, Hydrosystem engineering uncertainty analysis, McGraw Hill Book Company, NY, USA, 2006.
- Ozbakkaloglu, T., & Lotfi-Omran, O. (2018). Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods. *Construction and Building Materials*, 190, 479-494.
- [10] Asteris, P. G., Ashrafi, A., & Rezaie-Balf, M. (2019). Prediction of the compressive strength of self-compacting concrete using surrogate models. *Computers and Concrete*, 24(2), 137-150.
- [11] Shahrokhishahraki, M., Malekpour, M., Mirvalad, S., & Faraone, G. (2024). Machine learning predictions for optimal cement content in sustainable concrete constructions. *Journal of Building Engineering*, 82, 108160.
- [12] Zhang, S., Chen, W., Xu, J., & Xie, T. (2024). Use of interpretable machine learning approaches for quantificationally understanding the performance of steel fiber-reinforced recycled aggregate concrete: From the perspective of compressive strength and splitting tensile strength. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, 109170.
- [13] Dinesh, A., & Prasad, B. R. (2024). Predictive models in machine learning for strength and life cycle assessment of concrete structures. *Automation in Construction*, 162, 105412.
- [14] Sedaghat Shayegan D. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using a metaheuristic algorithm, *Int J Optim Civil Eng* 2022; 12(4): 545-55.
- [15] Shahebrahimi, SS., Lork, A., Sedaghat Shayegan, D. (2022). KNOWLEDGE MANAGEMENT TO INVESTIGATE THE FAILURE FACTORS IN MANAGING OF GAS AND OIL INDUSTRY TRANSMISSION LINES PROJECTS, *Iran University of Science & Technology* 12 (2), 215-233
- [16] Saberi AA, Ahmadi H, Sedaghat Shayegan D, Amirkardoust A (2023) Prediction of electricity consumption using three meta-heuristic algorithms. *Int J Optim Civil Eng*. 13(1):111–125
- [17] Sedaghat Shayegan D, Lork A, Hashemi AH. optimum cost design of reinforced concrete slabs using Mouth Brooding Fish (MBF) algorithm, *J Appl Eng Sci* 2020; 10(23): ISSUE 1 ART.NO. 290: pp. 95-100.
- [18] JACOB, L. L. G. (2011). *Effects of Recycled Aggregates on Concrete Properties* (Doctoral dissertation).
- [19] Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506.

## **Evaluation of construction components with eco-friendly recycled concrete with artificial neural network modeling approach and adaptive neural fuzzy inference system optimized with meta-heuristic algorithm**

**Mahyar Azizkhani**

Ph.D. candidate Department of civil engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

**Ali Asghar Amirkardoost \***

Department of civil engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

**Davood sedaghat shayegan**

Department of civil engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

### **Abstract**

In this study, modeling with environmentally friendly recycled concrete construction components has been investigated. To model the compressive strength of recycled concrete, two methods of artificial neural network and adaptive neural fuzzy inference system were used. Then, in order to increase the performance of smart methods and prevent the trial and error approach to achieve the most optimal parameter values of each model, the particle swarm optimization algorithm was used. The data of the mixing plan from the research background to create the proposed models were 201 laboratory data that were collected to estimate the compressive strength of recycled concrete. Then, to determine the best input parameters to the model, four scenarios were defined, from which the best scenario was selected. Also, for this index, the ANFIS-FCM method is more accurate than the rest of the neurophasic based methods. In the test phase, the artificial neural network method based on the particle swarm algorithm had a better performance than the ANN method. However, the ANFIS-FCM-PSO method performed slightly weaker than the ANFIS-FCM method in the training phase, but it performed better than the rest of the proposed methods in the test phase based on the three presented indicators. The results of the uncertainty analysis indicated that the proposed method had a very small margin of error in the term of average prediction. Also, among the proposed intelligent methods, the ANFIS-FCM-PSO method has better performance than other models with a slight difference.

**Keywords:** sustainable development, recycled concrete, compressive strength prediction, artificial neural network, adaptive neural fuzzy inference system, particle swarm optimization algorithm.

---

\* Corresponding Author: al.amirkardoust@iau.ac.ir

