



ظرفیت برشی تیرهای لاغر بتن آرمه با بتن مقاومت بالا و بدون خاموت

مسعود احمدی^{۱*}، مهدی عبادی جامخانه^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

کلمات کلیدی:

تیر لاغر
مقاومت برشی
بتن مقاومت بالا
فازی-عصبی
الگوریتم ازدحام ذرات

خلاصه: در این مطالعه مدلی جدید برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای لاغر بتن آرمه با بتن مقاومت بالا و بدون آرماتور عرضی با استفاده از ترکیب سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بر اساس تعداد قابل توجهی نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. پارامترهای موثر در مدل ارائه شده شامل: عمق موثر تیر، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور طولی، نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر و بزرگترین بعد سنگدانه مصرفی در بتن می‌باشند. نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه به صورت تصادفی به دو بخش تقسیم شده که بخش اول برای فرآیند آموزش و مابقی برای ارزیابی صحت عملکرد مدل استفاده شده است. پس از ایجاد مدل، آنالیز حساسیت برای بررسی سهم پارامترهای موثر و به صورت تعیین حساسیت خروجی سیستم با توجه به تغییرات دو پارامتر ورودی انجام گرفته است. برای کنترل بیشتر دقت مدل پیشنهادی، نتایج آن با آئین نامه های ACI 318-14، Eurocode-2، CEB-FIP Model Code، AS 3600-2009، JSCE Guidelines صورت گرافیکی و همچنین با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MAPE مقایسه شده است. نتایج نشان داده که مدل ارائه شده در محدوده پایگاه داده ایجاد شده، دقت بیشتری از مدل‌های موجود در آئین نامه‌ها داشته و می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب در تخمین ظرفیت برشی تیرهای لاغر مورد استفاده قرار گیرد.

۱- مقدمه

(به ارتفاع موثر d) و عدم در نظرگیری تمام پارامترهای موثر در ظرفیت برشی، باشد. تیر بتن آرمه را می‌توان لاغر در نظر گرفت به نحوی که نسبت دهانه برشی (α) به ارتفاع موثر (d) آن بیشتر از $2/5$ باشد ($a/d \geq 0.25$) [۱۰]. شکل ۱ به صورت شماتیک دسته بندی تیرهای لاغر و عمیق را نشان داده است.

اگر چه معیار یکسانی برای تعیین مرز بین بتن مقاومت بالا^۱ (HSC) و بتن معمولی^۲ (NSC) که مورد تأیید همه آئین نامه باشد وجود ندارد اما می‌توان بتن مقاومت بالا را بتنی دانست که دارای مقاومت فشاری در محدوده حدود ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال است. با این حال در این مطالعه از معیار ارائه شده در ACI 363R-10 [۱۱] که عدد ۴۰ مگاپاسکال را پیشنهاد می‌دهد استفاده شده است. بایستی توجه شود که برای تولید بتنی با مقاومت بیش از ۴۰ مگاپاسکال، نیاز به کنترل کیفیت دقیق‌تر و همچنین دقت بیشتر در انتخاب مصالح و نسبت‌های آن است. بتن با مقاومت بالا،

به دلیل پیچیدگی در مکانیزم انتقال برش، تعیین دقیق ظرفیت برشی اعضای بتن آرمه به آسانی قابل محاسبه نبوده و از این رو مدل‌ها و رویکردهای متنوعی در این زمینه ارائه شده است [۷-۱]. مطالعه در رابطه با برش و شکست برشی از جمله مطالعاتی است که در سال‌های اخیر توجهات ویژه‌ای به آن انجام گرفته و این امر در اعضای بدون آرماتور عرضی به دلیل نوع شکست ترد که به صورت ناگهانی و بدون اخطار اتفاق افتاده و خسارات مالی و جانی می‌تواند ایجاد نماید، قابل توجه بوده است [۹ و ۸]. عمده روابط موجود در این زمینه بر اساس مقادیر محدودی از مطالعات آزمایشگاهی یا با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی ارائه شده‌اند. از سوی دیگر نتایج مقایسه بعضی از روابط با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده قابلیت اطمینان غیرمناسب آن‌ها بوده که می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های انجام شده در مکانیزم پیچیده انتقال برش، دقت در بازه محدودی از نسبت دهانه برشی (α)

1 High strength concrete
2 Normal strength concrete

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: masoud.ahmadi@abru.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



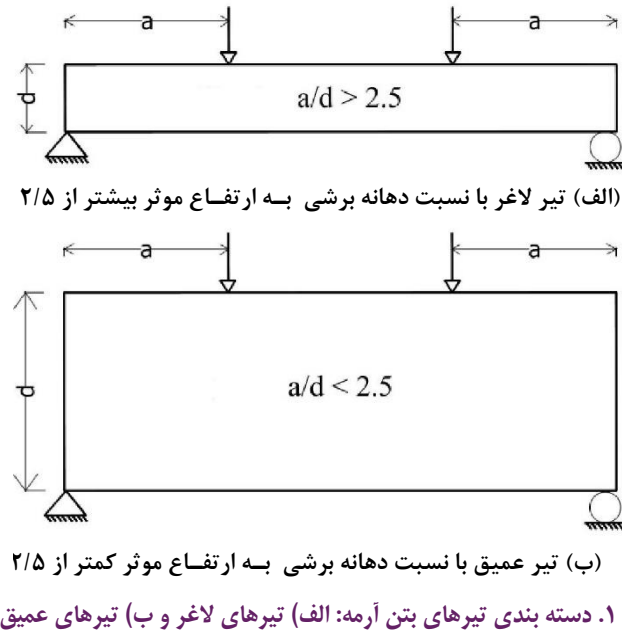


Fig. 1. Classification of reinforced concrete beams: a) slender beam with shear span-to-depth ratio greater than 2.5. b) deep beam with shear span-to-depth ratio less than 2.5.

نوع بتن‌ها احتمال ترک خوردگی حرارتی کاهش می‌یابد. مطالعه‌های آزمایشگاهی قابل توجهی بر روی تیرهای لاغر انجام گرفته است. به عنوان نمونه، بررسی هامرات^۱ و همکاران [۱۳] بر روی تیرهای با بتن مقاومت بالا نشان داده که پارامترهای نسبت دهانه برشی به عمق موثر و درصد آرماتور طولی نقش موثری در رفتار برشی دارند که این نتایج مشابه آزمایش‌های احمد و همکاران [۱۴] می‌باشد. کلادرا^۲ و ماری^۳ [۱۵] با مطالعه بر روی تیرهای با مقاومت بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال گزارش نمودند که رفتار تیرهای بدون آرماتور عرضی در برش بسیار ترد بوده و با افزایش مقاومت فشاری روند شکست تسریع می‌شود. نتایج بررسی‌های دوآنگ^۴ و همکاران [۱۶] بر روی قاب‌های طراحی شده بدون رعایت ضوابط لرزه‌ای نشان داده است که احتمال رخداد شکست برشی در تیرهای این نوع قاب‌ها بالا می‌باشد و بایستی با بهسازی لرزه‌ای مود شکست را تغییر داد. در سالیان اخیر شاهد حرکت مستمر از تحقیقات تئوری و کاربردی به خصوص در زمینه پردازش اطلاعات، برای مسائلی که برای آن‌ها راه حل دقیقی موجود نیست و یا به راحتی قابل حل نیستند، بوده‌ایم. با توجه به

در مقایسه با بتن معمولی، بیشتر شبیه مصالح همگن رفتار می‌کند و شیب منحنی‌های تنش-کرنش در آن نسبت به بتن معمولی زیادتر است و رفتار آن تا نسبت‌های تنش و مقاومت بیشتری در مقایسه با بتن‌های با مقاومت معمولی، خطی است زیرا مقدار و روند افزایش ترک‌های موثرین در ناحیه انتقال کمتر است. بنابراین، بتن مقاومت بالا در هنگام گسیختگی تردی بیشتر و انبساط حجمی کمتری از خود نشان می‌دهد. مشخص شده است که این گونه بتن‌ها تا نسبت‌های بالاتری از تنش و مقاومت قابل بارگذاری هستند، بدون آن که مکانیزم خود انتشاری در آن‌ها شروع شده و منجر به شکست گسیختگی شوند. به عبارت دیگر درصد مقاومت باربری دراز مدت نسبت به مقاومت کوتاه مدت این نوع بتن بیشتر از NSC است. استفاده از HSC در سال‌های اخیر به شدت افزایش داشته و نسبت به NSC، مقاومت و دوام بهتری دارد. به عبارت دیگر بتن مقاومت بالا نسبت به بتن معمولی افزایش قابل توجهی در مشخصاتی همچون مدول الاستیسیته، مقاومت شیمیایی، مقاومت در برابر ذوب و یخ، و کاهش در مشخصاتی همچون خزش، جمع شدگی و نفوذپذیری دارد [۱۲]. بایستی توجه شود که به علت میزان حرارت هیدراتاسیون نسبتاً کم به ازای مقاومت واحد در این

1 Hamrat
2 Cladera
3 Mari
4 Duong

در NSC سهم قابل توجهی در مقاومت برشی نهایی تیر دارد و بررسی های Taylor [۲۱] نشان داده است که این سهم برای بتن های دارای مقاومت فشاری در محدوده ۲۶ تا ۴۹ مگاپاسکال در بازه ۳۳ تا ۵۰ درصد می تواند متغیر باشد. از سوی دیگر در HSC به دلیل نوع تشکیل صفحات شکست و زاویه ترک های تشکیل شده، V_a را می توان با تقریب مناسبی برابر صفر در نظر گرفت [۲۲].

بیشتر آئین نامه های مطرح در دنیا همچون: ACI 318-14 [۲۳]، Eurocode-2، fib Model Code [۲۵]، CSA A23.3-04 [۲۴]، CEB-FIP Model Code [۲۷]، AS 3600-2009 [۲۸] و JSCE Guidelines [۲۹] روابطی را که برای تعیین مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه ارائه داده اند که عموماً تابعی از پارامترهایی مانند: ابعاد تیر، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور طولی و نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر، می باشند. روابط مرتبط با آئین نامه هایی که در بخش ۸ این مطالعه استفاده خواهند شد، در جدول ۱ ارائه شده است. قابل ذکر است که مدل ارائه شده توسط آئین نامه های همچون CSA A23.3-04 و Fib Model Code بر پایه تئوری اصلاح شده میدان فشاری به دست آمده اند. این تئوری به عنوان یک مدل تحلیلی برای پیش بینی پاسخ نیرو-جابجایی اعضای بتن مسلح تحت تنش های قائم و برشی ارائه شده است. این روش تنش ها و کرنش های قائم محلی و میانگین، عرض و جهت ترک بتن و میلگرد را از پاسخ نیرو-جابجایی عضو تخمین می زند. صحت این روابط برای بتن های با مقاومت معمولی بررسی شده است اما میزان قابلیت اطمینان آن ها برای بتن های با مقاومت بالا نیاز به بررسی های بیشتری دارد.

۳- پایگاه داده آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی متنوعی در دهه های اخیر بر روی تیرهای لاغر با بتن مقاومت بالا و بدون آرماتور عرضی انجام شده که سبب ارائه روابط جدید و افزایش در قابلیت اطمینان در این زمینه شده اند. نتایج مطالعات [۳۰] نشان داده که مواردی همچون مقاومت فشاری بتن، نسبت دهانه برشی به عمق موثر، میزان آرماتور طولی و ابعاد تیر از پارامترهای موثر بر مقاومت برشی می باشند که در این مطالعه نیز مورد توجه قرار گرفته اند. برای نیل به هدف این مطالعه و استفاده از سیستم ترکیبی فازی-عصبی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات نیاز به داده هایی برای فرآیند آموزش وجود دارد. در این مطالعه پایگاه داده آزمایشگاهی که شامل نتایج ۱۸۵ تیر لاغر HSC و بدون آرماتور عرضی هستند، از مطالعه های آزمایشگاهی در سال های ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۷

این امر، علاقه فزاینده ای در توسعه تئوریک سیستم های دینامیکی هوشمند که مبتنی بر داده های تجربی هستند، ایجاد شده است. شبکه های عصبی مصنوعی جز این دسته از سیستم های دینامیکی قرار دارند که با پردازش روی داده های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در ورای داده ها را به ساختار شبکه منتقل می کنند [۱۷]. سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی از جمله روش های جدیدتری است که در مسائل مهندسی عمران به صورت قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفته است و مدل های توسعه داده شده بر این مبنا قابلیت اطمینان مطلوبی دارند [۱۹ و ۱۸].

با توجه به پیچیدگی های مکانیزم انتقال برش، مدل های رفتاری متنوعی در مبحث برش آئین نامه های مختلف ارائه شده که در بخش ۲ به آن ها اشاره خواهد شد. استفاده از روش های تحلیل متنوع می تواند در فهم صحیح تر این مکانیزم نقش موثری داشته باشد. سیستم های هوشمند شاخه ای از این روش ها هستند که می تواند سبب شناخت بهتر تلاش های برشی گردد. در این مقاله، ابتدا عوامل موثر بر ظرفیت برشی تیرهای لاغر فاقد خاموت شناسایی شده و بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه، پایگاه داده جامعی ایجاد گردیده است. سپس به کمک ترکیب سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به تخمین ظرفیت برشی تیرهای لاغر بتن آرمه با بتن مقاومت بالا پرداخته شده است.

۲- مدل های موجود در تعیین ظرفیت برشی تیرهای لاغر

مکانیزم شکست برشی در تیرهای بتن آرمه فاقد خاموت را می توان تحت تاثیر سه عامل داخلی در نظر گرفت که شامل الف) سهم بتن ترک نخورده در ناحیه فشاری (V_c)، ب) سهم برشی ناشی از قفل و بست سنگ دانه ها (V_a) و ج) سهم عملکرد میخ پرچی آرماتورهای طولی (V_d)، پس در این حالت معادله زیر را می توان برای تعیین مقاومت برشی تیرهای فاقد خاموت مورد استفاده قرار داد:

$$V = V_c + V_d + V_a \quad (1)$$

مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته نشان داده است که با باز شدن بیش از حد ترک، مولفه های V_d و V_a سهم کمتری را در مقاومت برشی دارند و می توان از آن ها صرف نظر کرد. با این فرض، شکست در تیر بتنی با خرد شدگی بتن در ناحیه فشاری شروع خواهد شد [۲۰]. البته قابل ذکر است V_a

جدول ۱. روابط مقاومت برشی موجود در آیین نامه‌ها

Table 1. Design models of codes for shear capacity

روابط مقاومت برشی بتن و توضیحات	آیین نامه
$V_c = \min \left\{ \left(0.16\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d, 0.29\sqrt{f'_c} b_w d \right\}$	ACI 318-14
$V_c = \max \left\{ 0.18k^3 \sqrt{1000\rho f_{ck}} bd, 0.035\sqrt{k^3 f_{ck}} bd \right\}$ $k = \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2 \right), \rho \leq 0.02, f_{ck} \leq 90 \text{MPa}$	Eurocode-2
$V = 0.15 \sqrt{\frac{3}{a/d}} \zeta^3 \sqrt{1000\rho f_{ck}} bd, \zeta = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$	CEB-FIP Model Code
$V = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \sqrt{\rho} f_{cv} bd$ $\beta_1 = \max \left\{ 1.1 \times \left(1.6 - \frac{d}{1000} \right), 0.8 \right\}$	AS 3600-2009
$1 \leq \beta_3 = \frac{2d}{a} \leq 2, f_{cv} = \min \{ \sqrt[3]{f_{ck}}, 4 \text{MPa} \}$	
$V = \beta_a \beta_p f_{vcd} bd$ $\beta_a = \min \left\{ \sqrt[4]{\frac{1000}{d}}, 1.5 \right\}, \beta_p = \min \{ \sqrt[3]{1000\rho}, 1.5 \}, f_{vcd} = \min \{ 0.2\sqrt[3]{f_{ck}}, 0.72 \text{MPa} \}$	JSCE Guidelines

بازه ۱۳۰ تا ۴۷۰ میلی‌متر متغیر است و میانگین آن‌ها حدوداً ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین با توجه به لاغر بودن تیرها، مقدار کمینه، ماکزیمم و میانگین نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر به ترتیب برابر با ۲/۵، ۵/۶ و ۳/۶ می‌باشد. از سوی دیگر حداقل مقاومت فشاری بر اساس معیار ارائه شده در ACI 363R-10 [۱۱] ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

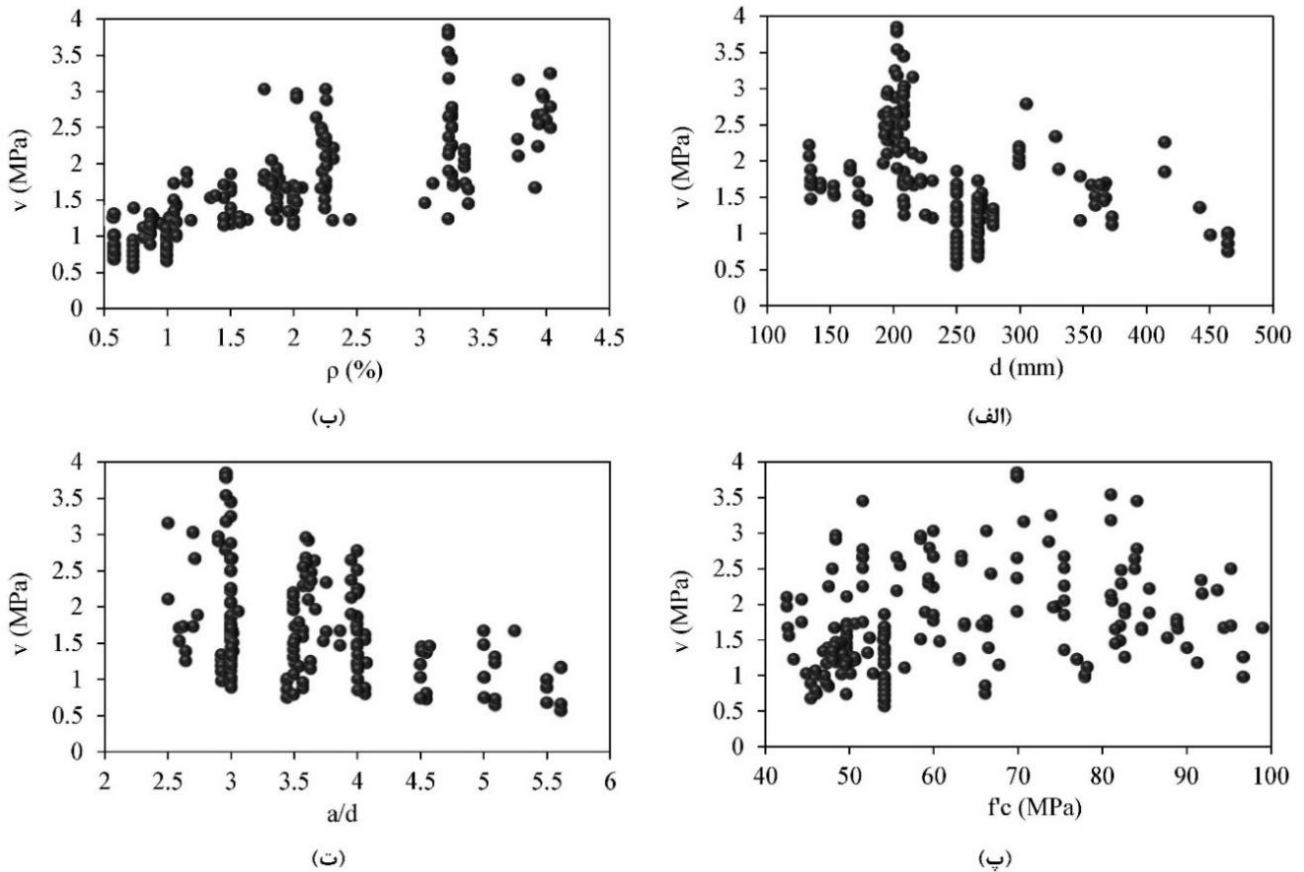
۴- سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی^۱ (ANFIS) و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۲ (PSO)

سیستم استنتاج عصبی-فازی نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که بر اساس سیستم فازی تاکاگی-سوگنو می‌باشد. این شیوه در اوایل ۱۹۹۰ ایجاد

[۱۵-۱۳ و ۵۳-۳۰]، جمع آوری شده است. برای جمع آوری نمونه‌های آزمایشگاهی معیارهای مورد استفاده قرار گرفته است:

- تیرها بدون آرماتور عرضی باشند و برای آرماتورهای طولی از حالت پیش تنیده استفاده نشده باشد.
 - تیرها در محدوده اعضای لاغر با نسبت دهانه برشی (a) به ارتفاع موثر (d) بزرگ‌تر از ۲/۵ باشند.
 - شکست حاکم در نمونه برشی باشد.
 - بارگذاری مورد استفاده در تیرها به صورت نقطه‌ای باشد.
 - بارگذاری نقطه‌ای به صورت مونوتونیک اعمال شده باشد.
- نمودار توزیع پراکنندگی پارامترهای موثر بر مقاومت برشی در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که عمق موثر نمونه‌ها در

1 Adaptive neuro-fuzzy inference system
2 Particle swarm optimization



شکل ۲. نمودار پراکندگی در برابر مقاومت برشی: الف) عمق موثر، ب) درصد آرماتور طولی، پ) مقاومت فشاری بتن و ت) نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر.

Fig. 2. The scatter diagram for shear strength: a) effective depth, b) percent of longitudinal reinforcement, c) compressive strength of concrete, d) shear span-to-depth ratio

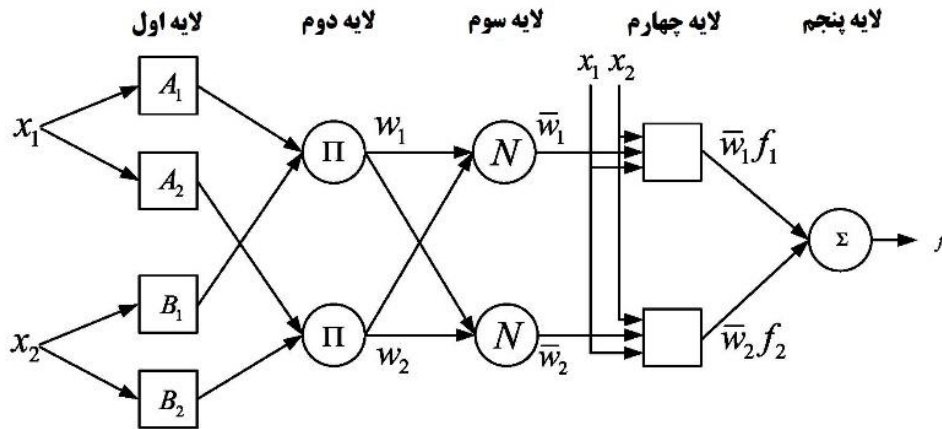
در لایه اول ورودی‌ها بر اساس توابع عضویت در نظر گرفته شده فازی‌سازی می‌شوند. در این لایه A_1 و A_2 توابع عضویت متغیر x_1 و B_1 و B_2 توابع عضویت متغیر x_2 می‌باشند. برای هر متغیر بایستی نوع تابع عضویت (گوسی، مثلثی، S شکل و ...) تعیین گردد. قواعد فازی تعیین شده در لایه دوم مورد بررسی قرار می‌گیرند که به صورت زیر می‌باشند:

Rule1. If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 then $f_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + c_1$

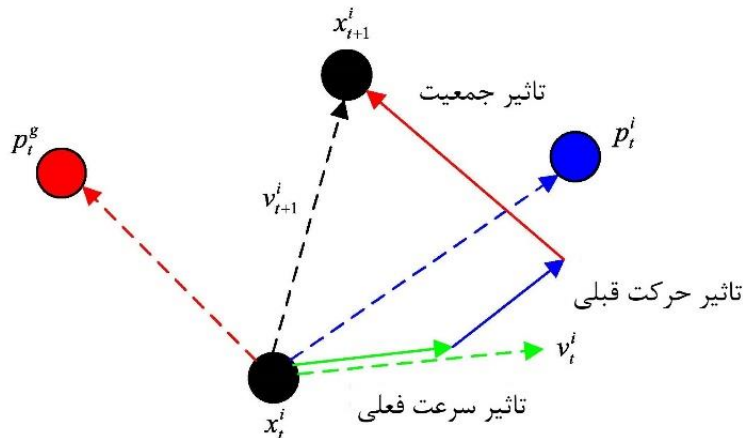
Rule2. If x_1 is A_2 and x_2 is B_2 then $f_2 = a_3x_1 + a_4x_2 + c_2$

که در روابط فوق، مقادیر a_1, a_2, a_3, a_4, c_1 و c_2 ضرایب ثابت و تابع f در ANFIS به صورت تابعی خطی از ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. خروجی هر قاعده با عبارت W نشان داده می‌شود. اگر از t -نرم ضرب در این مرحله استفاده شود، مقادیر W ها از ضرب مقادیر به دست آمده

شده است. از آنجایی که این سیستم، شبکه‌های عصبی و مفاهیم منطق فازی را یکی می‌کند، می‌تواند از امکانات هر دو آن‌ها در یک مجموعه بهره برد. سیستم استنتاج آن مطابق با مجموعه قوانین فازی اگر-آنگاه است که قابلیت یادگیری برای تقریب زدن توابع غیرخطی را دارد. در سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، ابتدا ساختار مدل با مشخصه‌های معین که متناسب با ورودی‌ها، توابع عضویت، اپراتورهای فازی، نوع استنتاج، نوع تجمیع و نحوه نافازی‌سازی است، انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از بخشی از داده‌ها که دسته آموزش نامیده می‌شوند، آموزش سیستم انجام می‌گیرد. در مرحله آموزش با اصلاح مشخصه‌های سیستم، مدل پیش‌بینی توسعه داده شده به خروجی‌های واقعی نزدیک‌تر می‌شود. سیستم ANFIS به صورت ساختار شبکه‌ای پیش رونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم دارای ۵ لایه است که به صورت شماییک برای دو ورودی، دو تابع عضویت و یک خروجی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار کلی سیستم فازی - عصبی تطبیقی برای دو ورودی
 Fig. 3. Basic ANFIS architecture for a system with two inputs



شکل ۴. نحوه حرکت به سوی جواب بهینه در الگوریتم PSO
 Fig. 4. Geometric illustration of a particle's movement to the global best positioning in PSO

از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در این چنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند، و نتایج حاصله بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند (شکل ۴).

از توابع عضویت به دست می‌آیند. در لایه سوم مقادیر w ها نرمال‌سازی می‌شوند (مقادیر \bar{w}). در مرحله چهارم، مقادیر وزن‌های نرمال شده در مقادیر خروجی متناظر ضرب می‌شوند ($\bar{w}f$). در گام آخر مقادیر به دست آمده از مرحله چهارم با یکدیگر جمع می‌شوند. این مراحل در هر گام انجام می‌شود تا بتوان مقادیر بهینه متناظر با توابع عضویت را تعیین کرد. روش‌های متنوعی برای تعیین ضرایب مناسب توابع عضویت وجود دارد که در این مطالعه از الگوریتم PSO استفاده شده است. این الگوریتم در شاخه هوش ازدحامی قرار گرفته و یک روش سراسری کمینه‌سازی است که با استفاده

جدول ۲. نحوه نرمال‌سازی داده‌های ورودی در بازه ۰/۱ تا ۰/۹.

Table 2. Normalization relationship of parameters within the value of 0.1–0.9

نوع پارامتر	پارامتر	تابع تبدیل
	عمق موثر (میلی‌متر)	$0.00241 \times (d - 133) + 0.1$
	نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر	$0.25825 \times (a/d - 2.5) + 0.1$
ورودی	بزرگ‌ترین بعد سنگ‌دانه بتن (میلی‌متر)	$0.05031 \times (a_g - 9.5) + 0.1$
	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	$0.01418 \times (f'_c - 42.5) + 0.1$
	درصد آرماتور طولی (%)	$0.23188 \times (\rho - 0.57) + 0.1$
خروجی	ظرفیت برشی تیر (مگاپاسکال)	$0.24391 \times (v - 0.57) + 0.1$

پ) توابع خطی در لایه چهارم شکل ۳، در این مرحله محاسبه می‌شوند که جزئیات آن‌ها در بخش ۵-۳ گزارش شده است. (ت) بر اساس مدل ترکیبی ANFIS-PSO که بر اساس دسته‌ای از داده‌ها آموزش داده شده و با استفاده از دسته دیگر تست شده، از معادله زیر مقدار خروجی سیستم محاسبه می‌شود.

$$Output = \frac{\sum_{j=1}^6 W_j CL_j}{\sum_{j=1}^6 W_j} \quad (3)$$

ث) در مرحله آخر، مقدار خروجی پیش بینی شده توسط سیستم هوشمند که در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ قرار دارد بایستی به بازه اصلی خود که در رنج خروجی‌های آزمایشگاهی است برگردانده شود. این نگاشت با استفاده از معادله زیر انجام می‌شود.

$$v_u (MPa) = 4.1 \times (v - 0.1) + 0.57 \quad (4)$$

در شکل ۵، سیستم هوشمند بهینه مبتنی بر سیستم های ANFIS-PSO نشان داده شده است که در ادامه جزئیات آن به تفصیل ارائه خواهد شد.

برای هماهنگی بیشتر بین برد توابع ورودی و مقادیر خروجی، نیاز به نرمال‌سازی در داده‌ها وجود دارد تا بتوان میزان خطای سیستم را کاهش داد. در این مطالعه داده‌ها در بازه بین ۰/۱ تا ۰/۹ نرمال‌سازی شده‌اند. معادله مورد استفاده برای هر پارامتر (ورودی‌ها یا خروجی) به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_{i, scaled} = \frac{0.8}{[\max(\theta_i) - \min(\theta_i)]} \times (\theta_i - \min(\theta_i)) + 0.1 \quad (2)$$

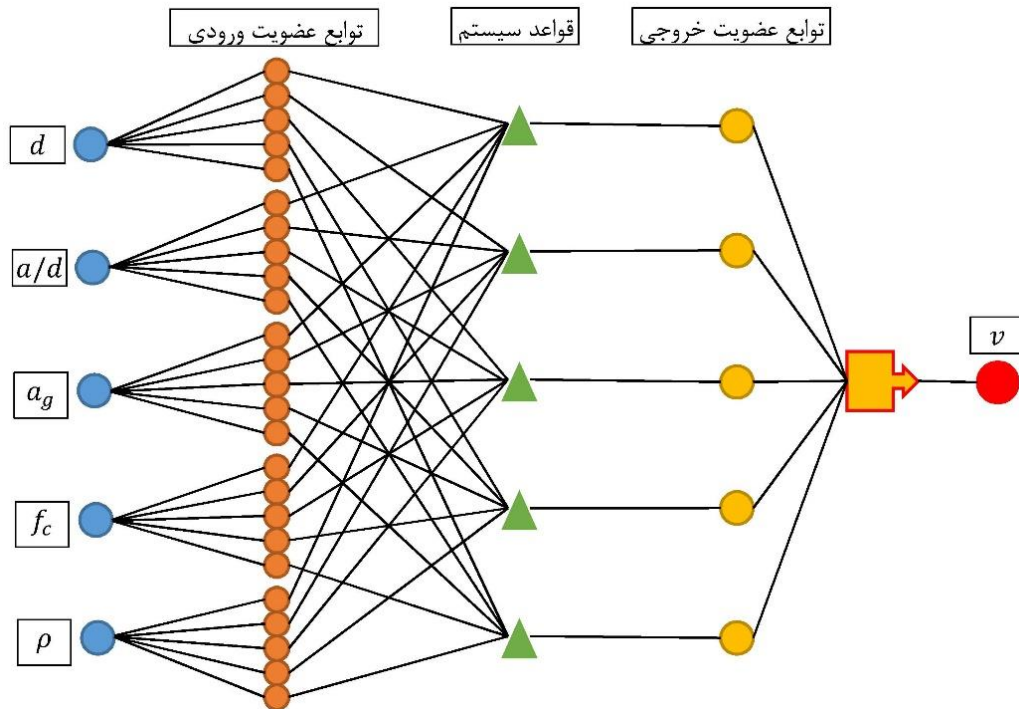
که مقادیر θ_i و $\theta_{i, scaled}$ به ترتیب مقادیر نرمال شده و واقعی می‌باشند.

۵- جزئیات سیستم بهینه ترکیبی ANFIS-PSO

در این بخش ابتدا گام های سیستم پیشنهادی ارائه و سپس جزئیات بهترین سیستم آموزش داده شده که عملکرد مطلوبی نیز برای داده‌های تست دارد، ارائه شده است.

۵-۱- مراحل مورد نیاز برای پیش بینی مقدار خروجی هدف

شش گام برای رسیدن به ساختار مد نظر مورد نیاز است که شامل: الف) پارامترهای ورودی مطابق رابطه ارائه شده در معادله ۲ نرمال‌سازی می‌شوند. جزئیات مرتبط با این بخش در جدول ۲ آمده است. ب) مرحله دوم مرتبط با انتخاب نوع و تعداد توابع عضویت برای هر پارامتر ورودی و تعیین حالت بهینه پارامترهای آن‌ها می‌باشد که در بخش ۲-۵ جزئیات آن‌ها ارائه شده است.



شکل ۵. ساختار بهینه سیستم هوشمند پیشنهادی مبتنی بر روش‌های ANFIS-PSO

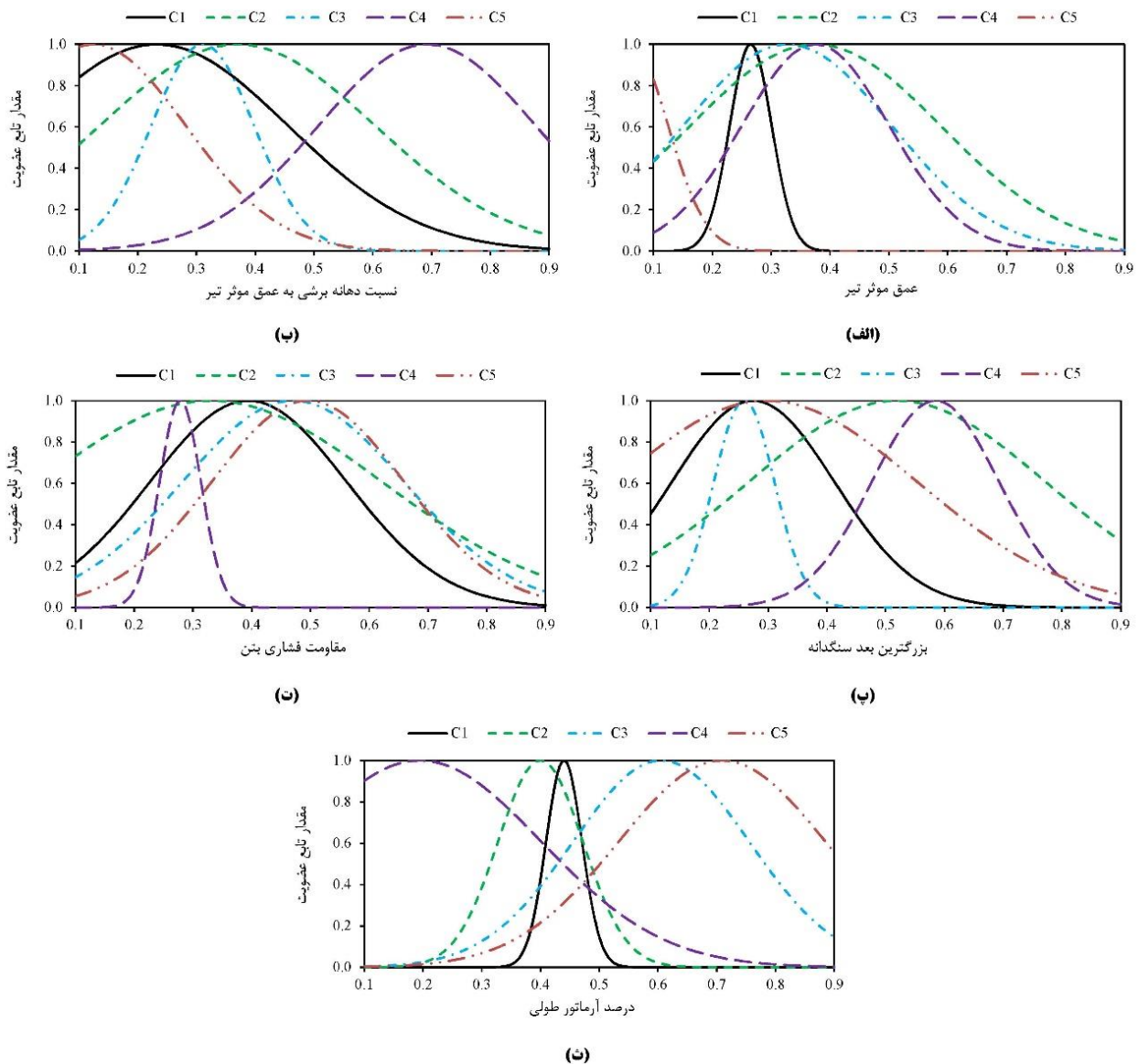
Fig. 5. The optimum structure of the proposed ANFIS-PSO model

۵-۲- جزئیات توابع عضویت

$$\mu(x; \sigma, c) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

که در رابطه فوق، σ و c به ترتیب انحراف معیار و میانگین تابع عضویت گوسی μ برای متغیر x می‌باشند. میانگین تعیین کننده محل قله تابع عضویت و انحراف معیار نشان دهنده میزان کشیدگی یا پهن‌شدگی آن می‌باشد. در کدنویسی انجام گرفته برای ایجاد سیستم ANFIS از دستور genfis3 استفاده شده که در این روش با استفاده از تکنیک دسته بندی c-means مرکز کلاسترها انتخاب می‌شوند. نسخه فازی این روش بندی Fuzzy c-means (FCM) نامیده می‌شود که مقادیر عضویت بر اساس فاصله نسبی (نه فاصله مطلق) تا مراکز خوشه‌ها محاسبه می‌گردد. بایستی ذکر شود که این امر سبب شده است که روش FCM به داده‌های دارای خطا حساس بوده و تحت تاثیر آن‌ها قرار می‌گیرد.

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۴ و ۵-۱، هر پارامتر ورودی در سیستم هوشمند ارائه شده دارای تعدادی مشخص تابع عضویت می‌باشد که نوع این توابع در این مطالعه ثابت در نظر گرفته شده است. بررسی مقالات مشابه نشان داده است که انتخاب نوع تابع عضویت و تعداد کلاسترها به صورت سعی و خطا بایستی بررسی شده و حالت بهینه آن‌ها وابسته به نوع مسئله، تعداد پارامترهای ورودی، تعداد نمونه‌ها و میزان پراکندگی داده‌ها داشته و بعد از تعداد تکرارهای قابل توجهی به دست می‌آیند. در این بررسی، انواع مختلفی از توابع عضویت مورد بررسی قرار گرفته و در انتها از تابع عضویت گوسی تک متغیره (معادله ۵) برای همه پارامترهای ورودی استفاده شده است. شکل این تابع به صورت زنگوله‌ای و حول نقطه میانگین به صورت متقارن است و به سرعت می‌تواند به سمت صفر میل کند.



شکل ۶. توابع عضویت گوسی مورد استفاده در داده‌های ورودی: الف) عمق موثر، ب) نسبت دهانه برشی به عمق موثر، پ) بزرگ‌ترین بعد سنگدانه، ت) مقاومت فشاری بتن و ث) درصد آرماتور طولی.

Fig. 6. Gaussian membership functions for inputs variables: a) effective depth, b) shear span-to-depth ratio, c) maximum size of aggregate, d) compressive strength of concrete, and e) percent of longitudinal reinforcement

ثابت بودن بازه تغییرات متغیرهای ورودی به دلیل آن است که قبل از شروع آموزش، داده‌ها در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ نرمال‌سازی شده‌اند. مقادیر C_1 تا C_6 نشان داده در شکل ۶ بیانگر توابع عضویت می‌باشند.

پس از تولید سیستم اولیه، بهینه کردن محل توابع عضویت و پارامترهای آن‌ها به الگوریتم PSO سپرده شده است. مقادیر به دست آمده در این حالت پس از تکرارهای متعدد به دست آمده و در شکل ۶ نشان داده شده و پارامترها به صورت مجزا در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بایستی ذکر شود که

جدول ۳. پارامترهای انحراف استاندارد و میانگین توابع عضویت گوسی در هر داده ورودی

Table 3. The values of standard deviation and mean of the Gaussian membership functions

ρ		f'_c		a_g		a/d		d		تابع عضویت
c	σ	c	σ	c	σ	c	σ	c	σ	
0.4401	0.0306	0.3941	0.1676	0.2742	0.1386	0.232	0.2239	0.2651	0.0359	C1
0.3999	0.0724	0.3306	0.2917	0.5196	0.253	0.3695	0.2346	0.3751	0.2128	C2
0.6053	0.1501	0.4707	0.189	0.2589	0.0517	0.3104	0.0875	0.3277	0.1773	C3
0.1946	0.207	0.2783	0.0353	0.5846	0.1086	0.6923	0.1851	0.3753	0.1254	C4
0.709	0.1763	0.4957	0.1642	0.2971	0.2569	0.1243	0.1575	0.0609	0.0642	C5

جدول ۴. ضرایب توابع خطی سیستم پیشنهادی

Table 4. Coefficients of the linear functions in the proposed system

ضریب ثابت	ضرایب پارامترهای ورودی سیستم					کلاستر
	C	a_5	a_4	a_3	a_2	
16.0058	-8.8756	2.811	0.3338	-2.0294	-41.013	CL_1
0.2936	0.4055	0.0392	-0.0108	-0.092	-0.1824	CL_2
-0.3458	1.0696	0.1693	-0.1458	-0.4461	0.1681	CL_3
0.5	0.4738	-0.1444	-0.9104	-0.1423	0.5953	CL_4
-0.2925	0.9932	-0.5867	-5.7731	1.5695	10.8664	CL_5

۵-۳- توابع خطی

که که در رابطه فوق CL_j بیانگر یک کلاستر است. مقادیر a_1 تا a_5

ضرایب متناظر با تعداد ورودی‌های مسئله می‌باشند. همچنین ضریب C مقدار ثابت این معادله می‌باشد. مقادیر مرتبط با پارامترهای اشاره شده در رابطه ۶، در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۵-۴- پایگاه قواعد

همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، استنتاج تطبیقی فازی- عصبی برای تخمین مقدار هدف مورد انتظار نیاز به پایگاه قواعد دارد. برای سیستم پیشنهادی از ۵ قاعده استفاده شده که جزئیات آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول پارامتر v همان ظرفیت برشی تیر یا مقدار هدف می‌باشد.

توابع خطی ایجاد شده بر اساس روش FCM وابسته به تعداد ورودی‌ها و یک عدد ثابت مجزا می‌باشد. به عبارت دیگر، مقادیری ثابتی در ورودی‌ها ضرب و سپس با عدد ثابتی جمع خواهند شد. این معادله به صورت عمومی در رابطه ۶ ارائه شده است.

$$CL_j = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + C \quad j=1,2,3,4,5 \quad (6)$$

جدول ۵. لیست پایگاه قواعد مورد استفاده

Table 5. List of used rules

شماره قاعده	رابطه مربوط به قاعده
۱	$If\ disC1_d\ anda / disC1_{a/d}\ anda_g\ isC1_{a_g}\ and\ f_c'isC1_{f_c}\ and\ pisC1_{\rho}\ then\ visCL_1$
۲	$If\ disC2_d\ anda / disC2_{a/d}\ anda_g\ isC2_{a_g}\ and\ f_c'isC2_{f_c}\ and\ pisC2_{\rho}\ then\ visCL_2$
۳	$If\ disC3_d\ anda / disC3_{a/d}\ anda_g\ isC3_{a_g}\ and\ f_c'isC3_{f_c}\ and\ pisC3_{\rho}\ then\ visCL_3$
۴	$If\ disC4_d\ anda / disC4_{a/d}\ anda_g\ isC4_{a_g}\ and\ f_c'isC4_{f_c}\ and\ pisC4_{\rho}\ then\ visCL_4$
۵	$If\ disC5_d\ anda / disC5_{a/d}\ anda_g\ isC5_{a_g}\ and\ f_c'isC5_{f_c}\ and\ pisC5_{\rho}\ then\ visCL_5$

۷- آنالیز حساسیت

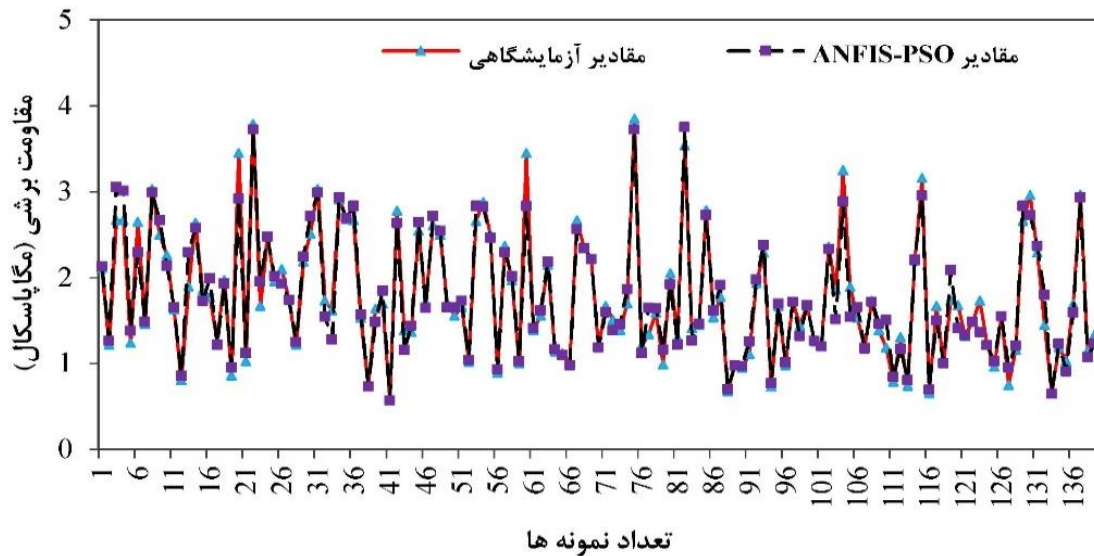
در این بخش، سیستم ترکیبی ANFIS-PSO ایجاد شده مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته است. از این رو میزان تغییرات خروجی سیستم با توجه به تغییرات دو پارامتر ورودی تعیین شده است. بایستی توجه شود که با ایجاد تغییرات در دو پارامتر ورودی، سایر پارامترهای ورودی برابر با مقدار میانگین خود در نظر گرفته می‌شوند. رویکرد اشاره شده برای تمام پارامترهای ورودی انجام شده و در شکل ۱۰ ارائه شده است.

نتایج بررسی آنالیز حساسیت نشان داده است که:

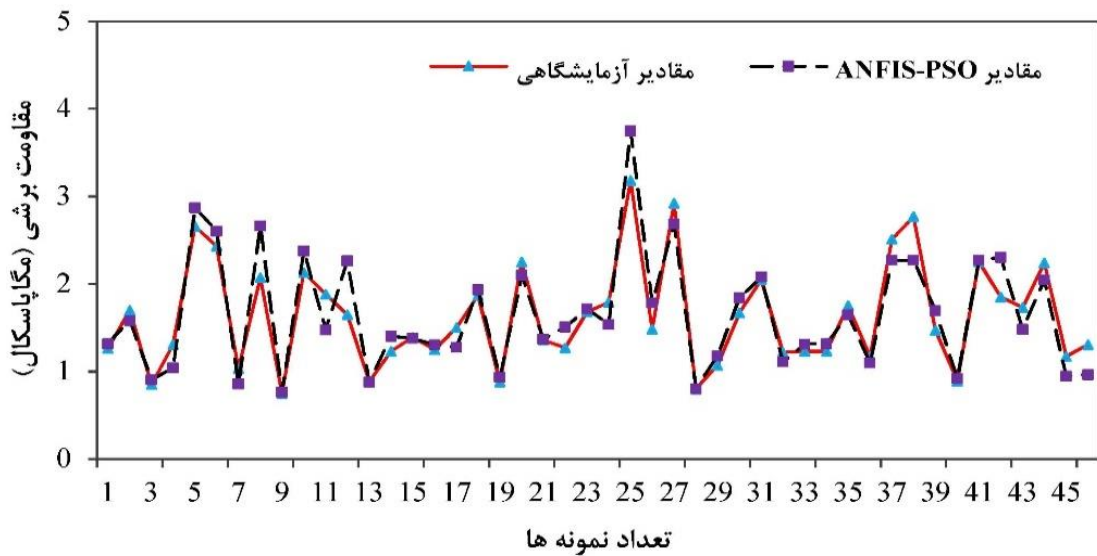
- تغییرات ایجاد شده در پارامترهای d و a/d نقش کلیدی را در تغییرات مقاومت برشی دارند.
- تاثیر همزمان $x_3 = a_g$ و $x_1 = d$ در بازه ابتدایی به صورت غیرخطی و در بازه میانی و انتهایی دو پارامتر تغییرات به صورت خطی بوده است.
- تغییرات در درصد نسبی آرما تور طولی (ρ)، تغییر سریع و یک باره‌ای در ظرفیت برشی ایجاد نکرده و با افزایش یا کاهش ρ تغییرات خطی آرامی در ظرفیت برشی رخ داده است.
- پارامتر بزرگترین قطر سنگ‌دانه اثر قابل توجهی بر روی مقاومت برشی نداشته است که این موضوع نشان از اهمیت کمتر آن در تعیین ظرفیت برشی دارد. قابل توجه است که این موضوع در روابط ارائه شده در جدول ۱ نیز رعایت شده و به نظر می‌رسد اثرات آن به نحو دیگری در روابط در نظر گرفته شده است.
- ظرفیت برشی در بازه ابتدایی بعضی از ورودی‌ها افزایش و در بازه

۶- بررسی نتایج

سیستم ترکیبی ANFIS-PSO انتخابی با استفاده از ۱۸۵ نمونه آزمایشگاهی ایجاد شده که تعداد ۱۳۹ نمونه در مرحله آموزش و تعداد ۴۶ نمونه در مرحله آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. در ایجاد این شبکه تعداد ۵۰ پارامتر مجهول مرتبط با توابع عضویت گوسی در هر داده ورودی (جدول ۳) و ۳۰ پارامتر مجهول برای ضرایب توابع خطی سیستم در لایه خروجی (جدول ۴) بایستی در مرحله آموزش محاسبه شوند. از سوی دیگر قوانین نیز بایستی در هر مرحله از آموزش مورد ارزیابی قرار گرفته تا قوی ترین قاعده انتخاب گردد. به عبارت دیگر تعداد قابل توجهی پارامتر مجهول وجود داشته که با توجه به محدود بودن نمونه‌های آزمایشگاهی موجود در مقالات چاپ شده بایستی به صورت مناسب تعیین گردند. نتایج متناظر با داده‌های آموزش و تست در شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب بر اساس مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و سیستم هوشمند، میزان میانگین قدر مطلق درصد خطا مقادیر پیش بینی شده و میزان باقی‌مانده ارائه شده است. نتایج نشان داده است که میانگین قدر مطلق درصد خطا سیستم هوشمند آموزش داده شده برای مجموعه آموزش و آزمایش به ترتیب برابر با ۶/۲۴ و ۱۰/۸۷ بوده که نشان از توانایی مطلوب آن می‌باشد. از سوی دیگر نتایج مدل توسعه داده شده نشان داده که بیش از ۸۰ درصد نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مرحله تست دارای خطای کمتر از ۱۵ درصد می‌باشند.



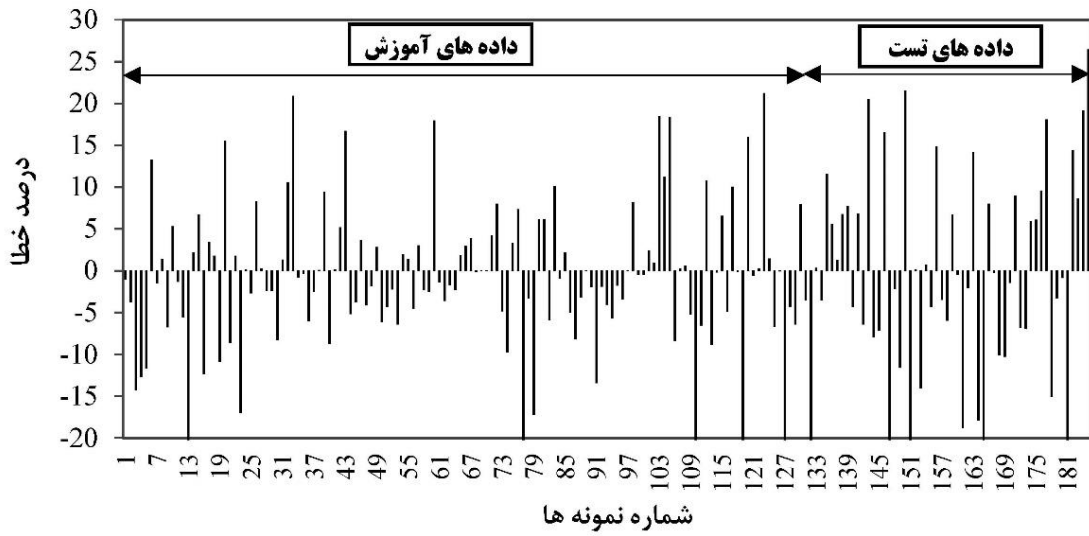
(الف)



(ب)

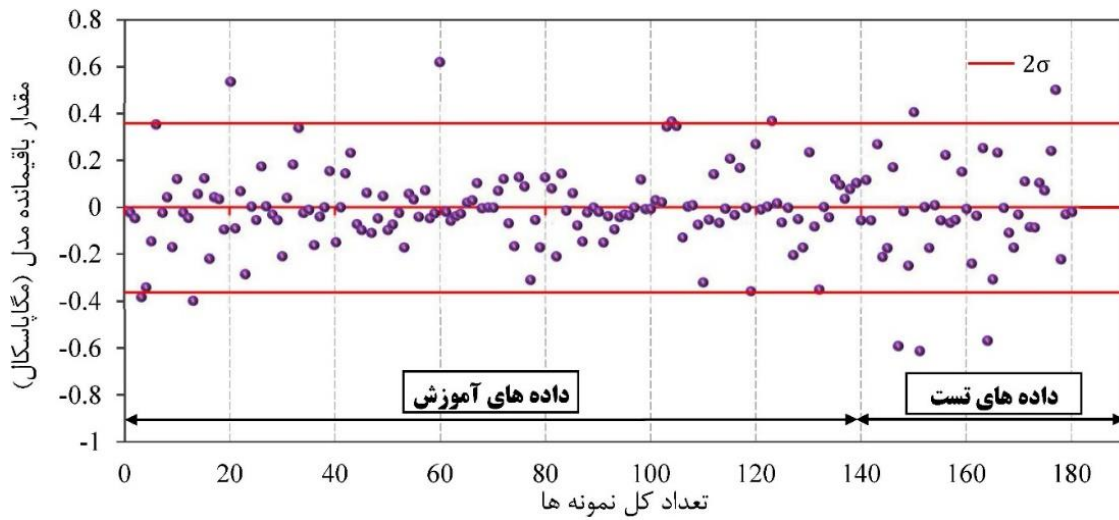
شکل ۷. مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی: الف) مجموعه آموزش، ب) مجموعه آزمایش.

Fig. 7. Comparison of test and prediction results: a) training dataset, b) test dataset



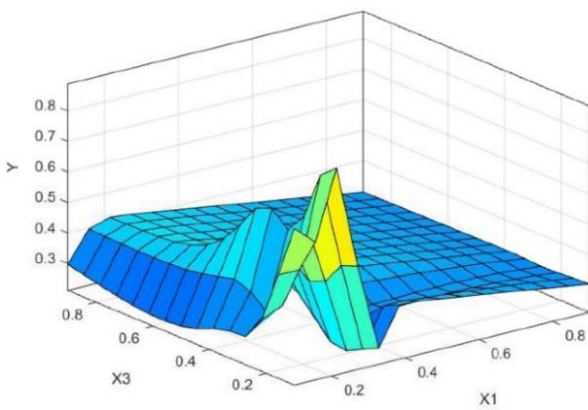
شکل ۸. میانگین قدر مطلق درصد خطا مقادیر پیش بینی شده نسبت به مقادیر آزمایشگاهی

Fig. 8. The mean absolute percentage error of predicted values with respect to the corresponding experimental results

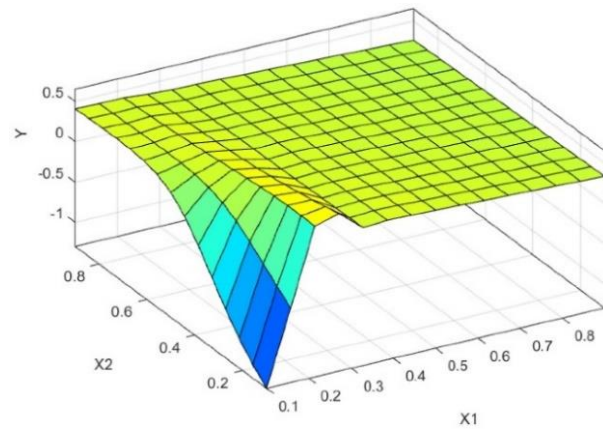


شکل ۹. مقادیر باقیمانده مدل ANFIS-PSO نسبت به مقادیر آزمایشگاهی

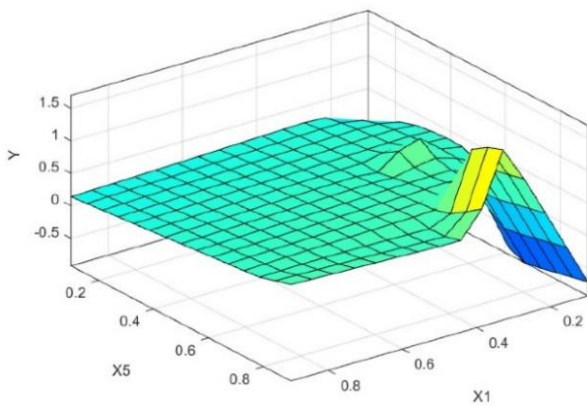
Fig. 9. Residual values of the proposed model with respect to the experimental results



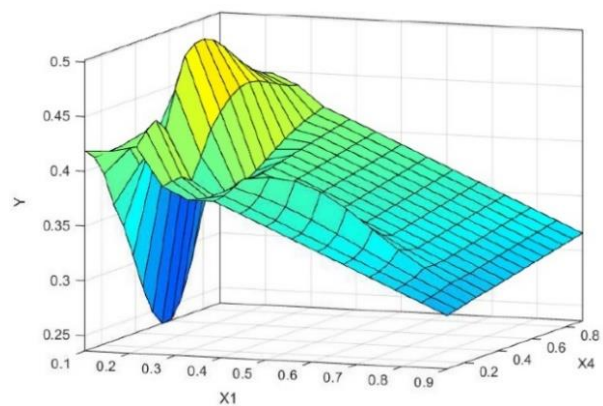
ب) تاثیر $x_1 = d$ و $x_3 = a_g$ بر روی ظرفیت برشی



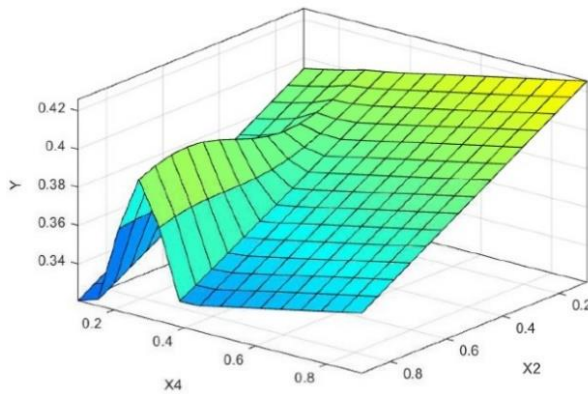
الف) تاثیر $x_1 = d$ و $x_2 = \frac{a}{d}$ بر روی ظرفیت برشی



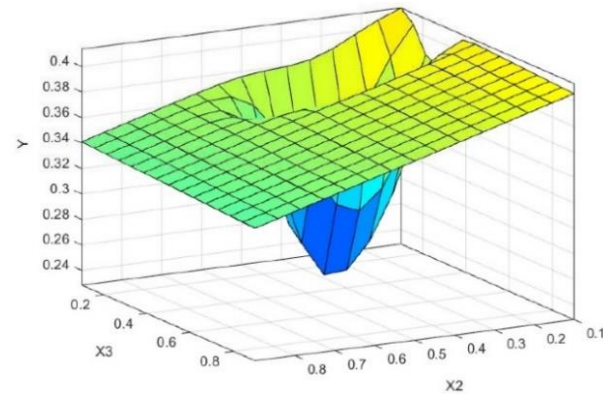
ت) تاثیر $x_1 = d$ و $x_5 = \rho$ بر روی ظرفیت برشی



پ) تاثیر $x_1 = d$ و $x_4 = f'_c$ بر روی ظرفیت برشی



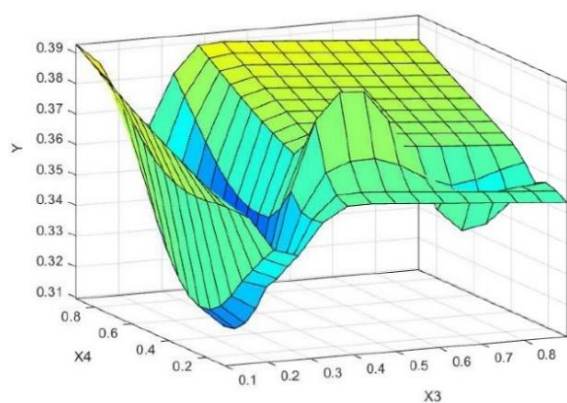
ج) تاثیر $x_2 = \frac{a}{d}$ و $x_4 = f'_c$ بر روی ظرفیت برشی



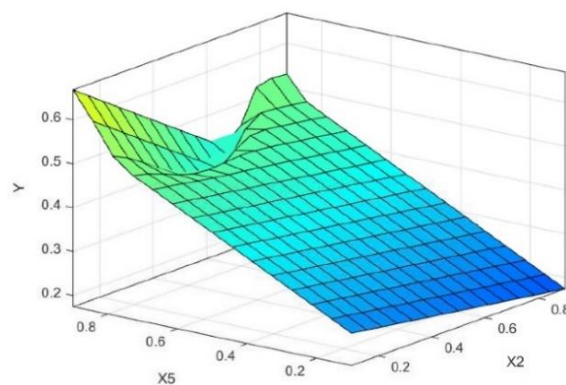
ث) تاثیر $x_2 = \frac{a}{d}$ و $x_3 = a_g$ بر روی ظرفیت برشی

شکل ۱۰. آنالیز حساسیت مدل ANFIS-PSO نسبت به پارامترهای ورودی (ادامه دارد)

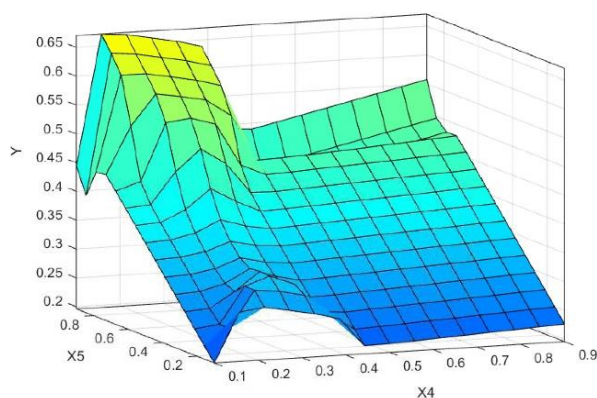
Fig. 10. Sensitivity analysis of the model to input parameters: a) effect of $x_1 = d$ and $x_2 = \frac{a}{d}$ on shear strength, b) effect of $x_1 = d$ and $x_3 = a_g$ on shear strength, c) effect of $x_1 = d$ and $x_4 = f'_c$ on shear strength, d) effect of $x_1 = d$ and $x_5 = \rho$ on shear strength, e) effect of $x_2 = \frac{a}{d}$ and $x_3 = a_g$ on shear strength, f) effect of $x_2 = \frac{a}{d}$ and $x_4 = f'_c$ on shear strength.(Continued)



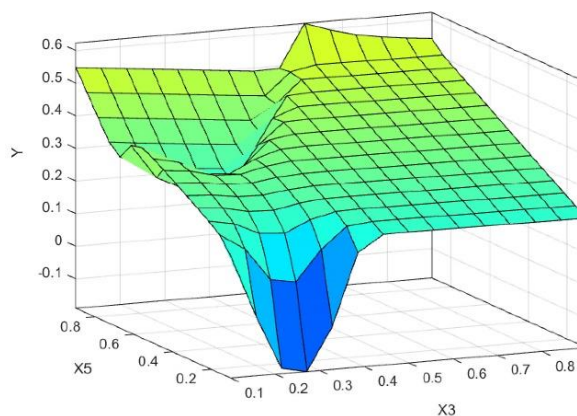
ح) تاثیر $x_3 = a_g$ و $x_4 = f'_c$ بر روی ظرفیت برشی



چ) تاثیر $x_2 = \frac{a}{d}$ و $x_5 = \rho$ بر روی ظرفیت برشی



د) تاثیر $x_4 = f'_c$ و $x_5 = \rho$ بر روی ظرفیت برشی



خ) تاثیر $x_3 = a_g$ و $x_5 = \rho$ بر روی ظرفیت برشی

شکل ۱۰. آنالیز حساسیت مدل ANFIS-PSO نسبت به پارامترهای ورودی

Fig. 10. Sensitivity analysis of the model to input parameters: g) effect of $x_2 = \frac{a}{d}$ and $x_5 = \rho$ on shear strength, h) effect of $x_3 = a_g$ and $x_4 = f'_c$ on shear strength, i) effect of $x_3 = a_g$ and $x_5 = \rho$ on shear strength, j) effect of $x_4 = f'_c$ and $x_5 = \rho$ on shear strength.

جدول ۵. نتایج شاخص های آماری مدل توسعه داده شده و روابط موجود

Table 5. Statistical indices for proposed model and existing equations

ANFIS-PSO	JSCE	AS 3600	CEB-FIP	Eurocode-2	ACI 318	شاخص
۰/۹۶	۰/۸۱۷	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۱۲	۰/۸۳۸	R
۰/۱۸۵	۰/۷۱۲	۰/۵۲۷	۰/۶۱۱	۰/۴۵۶	۰/۴۳۲	RMSE (MPa)
۷/۳۹	۲۵/۵۴	۱۹/۳۷	۲۱/۰۹	۱۹/۷۹	۱۹/۶۷	MPAE

که روابط آن در ادامه آمده است.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (v_{i,actual} - \bar{v}_{actual}) (v_{i,model} - \bar{v}_{model}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (v_{i,actual} - \bar{v}_{actual})^2 \sum_{i=1}^n (v_{i,model} - \bar{v}_{model})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{i,actual} - v_{i,model})^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = \left(\frac{100}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{|v_{i,actual} - v_{i,model}|}{v_{i,actual}} \right) \quad (9)$$

که در روابط فوق که $v_{i,actual}$ مقدار ظرفیت برشی گزارش شده در آزمایشگاه؛ \bar{v}_{actual} میانگین همه مقادیر $v_{i,actual}$ ؛ $v_{i,model}$ مقدار ظرفیت برشی به دست آمده از مدل؛ \bar{v}_{model} میانگین همه مقادیر $v_{i,model}$ و n تعداد نمونه‌ها است.

در بهترین حالت بایستی مقدار $R=1$ و مقادیر RMSE و MAPE برابر صفر شوند که در عمل رسیدن به این آستانه‌ها بسیار سخت می‌باشد. مطالعات Smith [۵۴] نشان داده است اگر مقدار R بزرگ‌تر از ۰/۸ باشد و مقدار خطا در کمترین مقدار خود قرار گیرد، همبستگی قابل قبولی بین

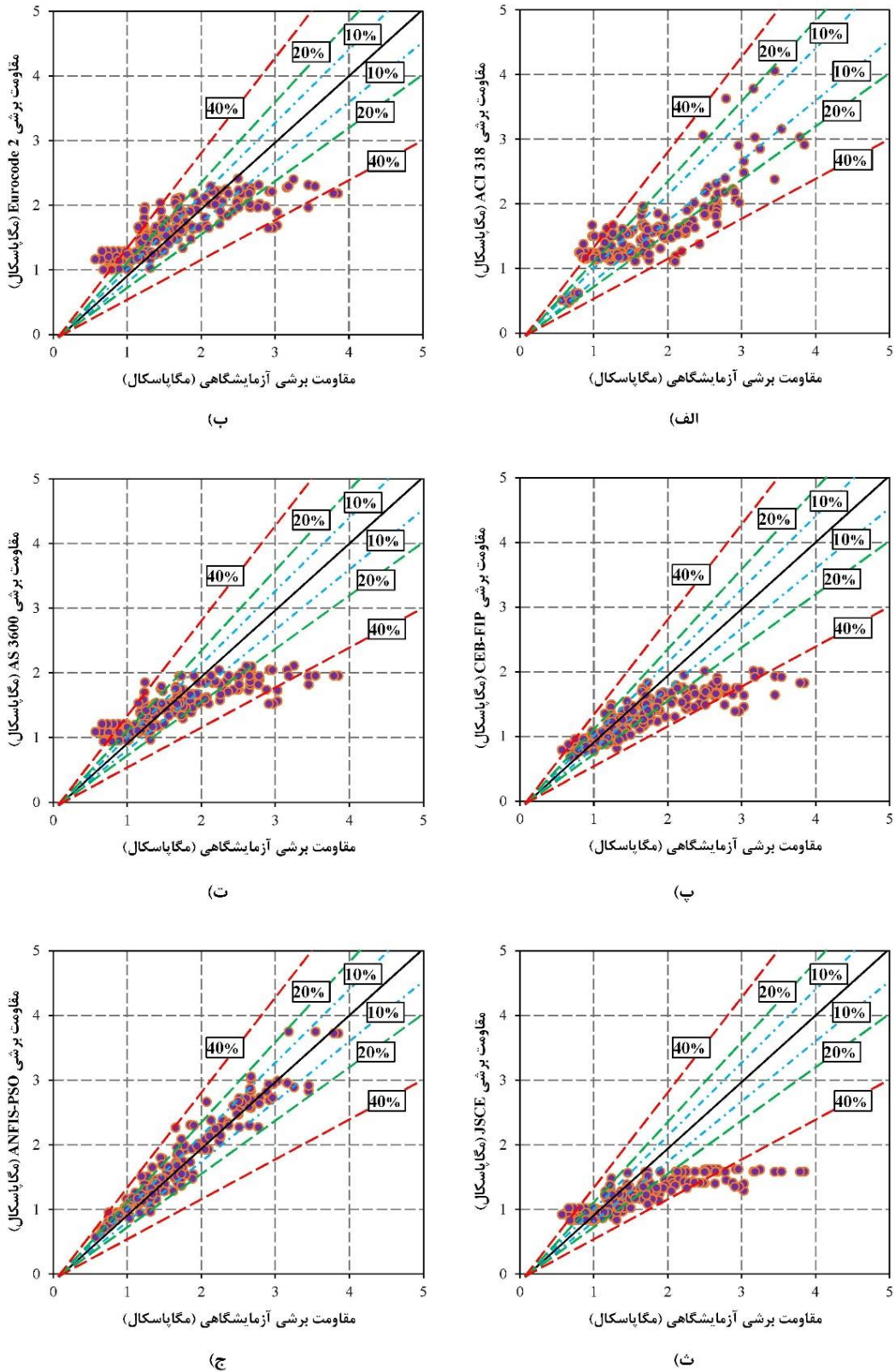
انتهایی کاهش داشته است که این موضوع نشان از مکانیزم پیچیده برش در بازه‌های مختلف می‌باشد.

- ظرفیت برشی در محدوده مشخصی از داده‌ها تغییراتی نداشته که نشان می‌دهد سیستم هوشمند ارائه شده در آن بازه نسبت به تغییرات انجام شده حساسیتی ندارد و سایر پارامترها در ظرفیت برشی نقش ایفا می‌نمایند.

۸- مقایسه نتایج سیستم ترکیبی ANFIS-PSO با روابط موجود

در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه بدون آرماتور برشی انجام گرفته که نتیجه آن در آئین نامه‌ها قابل مشاهده است. در این بخش برای بررسی بیشتر عملکرد مدل پیشنهادی مقایسه‌ای با مدل‌های ارائه شده در آئین نامه‌های Eurocode-2 [۲۶]، ACI 318-14 [۲۵]، CEB-FIP Model Code [۲۷]، AS 3600-2009 [۲۸] و JSCE Guidelines [۲۹] انجام شده است.

برای انجام مقایسه از تمام داده‌های جمع آوری شده استفاده شده تا بتوان مقایسه را در محدوده قابل قبولی از پارامترهای موثر انجام داد. این مقایسه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بهترین نتیجه متناظر با حالتی است که داده‌ها بر روی نیمساز نمودار (زاویه ۴۵ درجه) قرار گیرند. فاصله گرفتن از نیمساز نشان دهنده خطای مدل‌ها می‌باشد. مقایسه بین نتایج مربوط به مدل ANFIS-PSO (شکل ۱۰-ج) و سایر روابط موجود (شکل‌های ۱۰-الف تا ث) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد قابل قبولی دارد. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد روش‌های توسعه داده شده از سه شاخص آماری ضریب تشخیص (R^2)، ضریب خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) استفاده شده



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی با روابط موجود و مدل ANFIS-PSO

Fig. 11. Comparison of the predicted results provided by proposed and existing models against measured data

منابع

- [1] M. Nielsen, M. Braestrup, B. Jensen, F. Bach, Concrete plasticity, beam shear–shear in joints–punching shear, Special Publication, (1978) 1-129.
- [2] F.J. Vecchio, M.P. Collins, Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using modified compression field theory, *ACI Structural Journal*, 85(3) (1988) 258-268.
- [3] S.-J. Hwang, H.-J. Lee, Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model, *Journal of Structural Engineering*, 128(12) (2002) 1519-1526.
- [4] E.C. Bentz, F.J. Vecchio, M.P. Collins, Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements, *ACI Materials Journal*, 103(4) (2006) 614-624.
- [5] P. Hong-Gun, K.-K. Choi, J.K. Wight, Strain-based shear strength model for slender beams without web reinforcement, *ACI Structural Journal*, 103(6) (2006) 783-793.
- [6] S. Xu, X. Zhang, H.W. Reinhard, Shear Capacity Prediction of Reinforced Concrete Beams without Stirrups Using Fracture Mechanics Approach, *ACI Structural Journal*, 109(5) (2012) 706-713.
- [7] A.H. Gandomi, A.H. Alavi, M. Gandomi, S. Kazemi, Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part II: With shear reinforcement, *Measurement*, 95 (2017) 367-376.
- [8] F. Cavagnis, M.F. Ruiz, A. Muttoni, Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results, *Engineering Structures*, 103 (2015) 157-173.
- [9] S.H. Ahmad, S. Fareed, S. Rafeeqi, Shear strength of normal and light weight reinforced concrete slender beams without web reinforcement, *Civil Engineering and Architecture*, 2(1) (2014) 33-41.
- [10] M.N. Hassoun, A. Al-Manaseer, *Structural concrete: theory and design*, John Wiley & sons, 2012.

مقدار واقعی و تقریب زده شده برقرار است. مقادیر شاخص های آماری R ، $RMSE$ و $MAPE$ بر اساس داده های آزمایشگاهی در جدول ۶ آورده شده که بیانگر توانایی مناسب مدل توسعه داده شده در پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای لاغر بتن آرمه با بتن مقاومت بالا و بدون خاموت می باشد. پارامترهای ورودی در مدل ارائه شده به ترتیب: عمق موثر (میلی متر)، نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر، بزرگترین بعد سنگدانه بتن (میلی متر)، مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال) و درصد آرماتور طولی، در نظر گرفته شده اند. پس از ایجاد مدل بهینه، مقایسه ای بین نتایج ظرفیت برشی آزمایشگاهی و نتایج مدل انجام شده که نتایج بیانگر آن است که میانگین قدر مطلق درصد خطا سیستم هوشمند برای مجموعه آموزش و آزمایش به ترتیب برابر با $۶/۲۴$ و $۱۰/۸۷$ بوده که نشان از توانایی مطلوب آن می باشد. همچنین بیش از ۸۰ درصد نمونه های آزمایشگاهی مورد استفاده از گروه تست دارای خطای کمتر از ۱۵ درصد می باشند. در آنالیز حساسیت انجام شده بر روی مدل پیشنهادی ANFIS-PSO، تغییرات خروجی سیستم با توجه به تغییرات دو پارامتر ورودی تعیین شده است. بررسی آنالیز حساسیت حاکی از آن است که تغییرات ایجاد شده در پارامترهای d ، $\frac{a}{d}$ و f'_c نقش کلیدی در تغییرات مقاومت برشی دارند. از سوی دیگر ظرفیت برشی در بازه ابتدایی بعضی از ورودی ها افزایش و در بازه انتهایی کاهش داشته است که این موضوع نشان از مکانیزم پیچیده برش در بازه های مختلف دارد. برای اطمینان بیشتر نسبت به نتایج مدل، مقایسه ای با مدل های موجود بر اساس شاخص های آماری الف) ضریب همبستگی، ب) خطای جذر میانگین مربعات و پ) ضریب میانگین درصد مطلق خطا انجام گرفته که مقدار این ضرایب برای مدل پیشنهادی به ترتیب برابر با $۰/۹۶$ ، $۰/۱۸۵$ و $۷/۳۹$ می باشد.

۹- نتیجه گیری

در این مطالعه رویکرد جدیدی بر اساس روش های هوش محاسباتی برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای لاغر بتن آرمه با بتن مقاومت بالا و بدون خاموت ارائه شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از ترکیب سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و بر مبنای ۱۸۵ نمونه آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه ایجاد شده است. برای جلوگیری از پدیده نامطلوب بیش برآزش و چک کردن عمومیت بخشی مدل پیشنهادی، درصد داده های مورد استفاده در فرآیند آموزش به ۷۵ درصد محدود شده است.

- reinforced concrete beams, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 85(3) (1988) 397-413.
- [23] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute. ACI, 2014.
- [24] CSA, Design of concrete structures, Mississauga, Ont.: Canadian Standards Association, 2004.
- [25] F.M. Code, Model Code 2010, Federation Internationale du Beton (fib), (2010).
- [26] B. EN, 1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization (2004).
- [27] CEB-FIP, Model Code for concrete structures, Euro-International Committee for Concrete, Bulletin, (1990).
- [28] Standards Association of Australia. Committee BD-002, Concrete Structures: AS 3600-2009, Standards Australia, (2009).
- [29] Standard Specifications for Concrete Structures, Japan Society of Civil Engineers, JSCE Guidelines for Concrete, (2010).
- [30] S. Ahmad, P. Bhargava, Shear strength models for reinforced concrete slender beams: a comparative study, in: Structures, Elsevier, 2018, 119-128.
- [31] A.H. Elzanaty, A.H. Nilson, F.O. Slate, Shear capacity of reinforced concrete beams using high-strength concrete, in: Journal Proceedings, 1986, 290-296.
- [32] A. Shah, S. Ahmad, An experimental investigation into shear capacity of high strength concrete beams, in: Asian Journal of Civil Engineering, 8(5) (2007) 549-562.
- [33] K. Al-Shaleh, K.N. Rahal, Shear behavior of K850 reinforced concrete beams with low transverse reinforcement, Kuwait journal of science and engineering, 34(2B) (2007) 35-54.
- [34] J. Sagaseta, R.L. Vollum, Non-linear finite element analysis of shear critical high strength concrete beams, Architecture Civil Engineering Environment–ACEE, 2(4) (2009) 95-106.
- [35] H. Elsanadedy, H. Abbas, Y. Al-Salloum, T. Almusallam, Shear strength prediction of HSC slender beams without web reinforcement, Materials and Structures, 49(9) [11] ACI 363, Report on High-Strength Concrete, 2010.
- [12] G. Campione, A. Monaco, G. Minafò, Shear strength of high-strength concrete beams: Modeling and design recommendations, Engineering Structures, 69 (2014) 116-122.
- [13] M. Hamrat, B. Boulekbache, M. Chemrouk, S. Amziane, Shear behaviour of RC beams without stirrups made of normal strength and high strength concretes, Advances in Structural Engineering, 13(1) (2010) 29-41.
- [14] S.H. Ahmad, A. Khaloo, A. Poveda, Shear capacity of reinforced high-strength concrete beams, in: Journal Proceedings, 1986, pp. 297-305.
- [15] A. Cladera, A. Mari, Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear, Engineering Structures, 27(10) (2005) 1519-1527.
- [16] K.V. Duong, S.A. Sheikh, F.J. Vecchio, Seismic behavior of shear-critical reinforced concrete frame: Experimental investigation, ACI Structural Journal, 104(3) (2007) 304-313.
- [17] S. Lee, C. Lee, Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete flexural members without stirrups using artificial neural networks, Engineering structures, 61 (2014) 99-112.
- [18] H. Naderpour, K. Nagai, M. Haji, M. Mirrashid, Adaptive neuro-fuzzy inference modelling and sensitivity analysis for capacity estimation of fiber reinforced polymer-strengthened circular reinforced concrete columns, Expert Systems, (2019) e12410 1-18.
- [19] H. Naderpour, M. Mirrashid, K. Nagai, An innovative approach for bond strength modeling in FRP strip-to-concrete joints using adaptive neuro-fuzzy inference system, Engineering with Computers, (2019) 1-18.
- [20] H.P. Taylor, The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear, Special Publication, 42 (1974) 43-78.
- [21] H. Taylor, Investigation of the forces carried across cracks in reinforced concrete beams in shear by interlock of aggregate. Cement and Concrete Association, London, technical report 42.447, 1970.
- [22] A. Mphonde, Aggregate interlock in igh strength

- [45] K.-H. Reineck, E.C. Bentz, B. Fitik, D.A. Kuchma, O. Bayrak, ACI-DAFStb Database of Shear Tests on Slender Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, 110(5)(2013) 867-876.
- [46] D. Angelakos, E.C. Bentz, M.P. Collins, Effect of concrete strength and minimum stirrups on shear strength of large members, *Structural Journal*, 98(3) (2001) 291-300.
- [47] P. Adebar, M.P. Collins, Shear strength of members without transverse reinforcement, *Canadian journal of civil engineering*, 23(1) (1996) 30-41.
- [48] M.A. Salandra, S.H. Ahmad, Shear capacity of reinforced lightweight high-strength concrete beams, *Structural Journal*, 86(6) (1989) 697-704.
- [49] M. Islam, H. Pam, A. Kwan, Shear capacity of high-strength concrete beams with their point of inflection within the shear span, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 128(1) (1998) 91-99.
- [50] S.M. Kulkarni, S.P. Shah, Response of reinforced concrete beams at high strain rates, *Structural Journal*, 95(6) (1998) 705-715.
- [51] M. Hallgren, Punching shear capacity of reinforced high-strength concrete slabs, (1998).
- [52] I.A. Bukhari, S. Ahmad, Evaluation of shear strength of high-strength concrete beams without stirrups, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(2) (2008) 321-335.
- [53] A.H. Gandomi, A.H. Alavi, S. Kazemi, M. Gandomi, Formulation of shear strength of slender RC beams using gene expression programming, part I: Without shear reinforcement, *Automation in Construction*, 42 (2014) 112-121.
- [54] G.N. Smith, Probability and statistics in civil engineering, Collins professional and technical books, (1986).
- (2016) 3749-3772.
- [36] J.-K. Kim, Y.-D. Park, Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams without Web Reinforcement, *Magazine of concrete research*, 46(166) (1994) 7-16.
- [37] A.G. Mphonde, G.C. Frantz, Shear tests of high-and low-strength concrete beams without stirrups, in: *Journal Proceedings*, 1984, pp. 350-357.
- [38] R.S. Pendyala, P. Mendis, Experimental study on shear strength of high-strength concrete beams, *Structural Journal*, 97(4) (2000) 564-571.
- [39] S.-W. Shin, K.-S. Lee, J.-I. Moon, S.K. Ghosh, Shear strength of reinforced high-strength concrete beams with shear span-to-depth ratios between 1.5 and 2.5, *Structural Journal*, 96(4) (1999) 549-556.
- [40] Y. Xie, S.H. Ahmad, T. Yu, S. Hino, W. Chung, Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high-strength concrete, *Structural Journal*, 91(2) (1994), 140-149.
- [41] R. Grimm, Influence of fracture mechanics parameters on the bending and shear bearing behavior of high-strength concretes, Ph. D. Dissertation, 1997.
- [42] M. Hallgren, Flexural and shear capacity of reinforced high strength concrete beams without stirrups, Ph. D. Dissertation, 1994.
- [43] B. Stanik, The Influence of Concrete Strength, Distribution of Longitudinal Reinforcement, Amount of Transverse Reinforcement, and Member Size on Shear Strength of Reinforced Concrete Members, M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto (1998).
- [44] J. Morrow, I.M. Viest, Shear strength of reinforced concrete frame members without web reinforcement, in: *Journal Proceedings*, 1957, pp. 833-869.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ahmadi, M. Ebadi Jamkhaneh, *Shear Capacity of High-Strength Concrete Slender Beams without Transverse Reinforcement*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2515-2534.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17435.6560

