

Shear Capacity Prediction of FRP Reinforced Concrete Beams using Hybrid GMDH-GA

Masoud Ahmadi^{1*}, Hosein Naderpour², Pouyan Fakharian³, Danial Rezazadeh Eidgahee³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

In recent years, the use of composite rebars in reinforced concrete structures has received much attention due to its high corrosion resistance, significant tensile strength, and appropriate non-magnetization characteristics. Due to the lower modulus of elasticity of composite rebars than steel rebars, concrete beams reinforced with composite rebars have relatively lower shear strength compared to beams reinforced with steel rebars. On the other hand, shear failure in concrete beams reinforced with composite rebars is generally brittle and requires accurate prediction of the behavior of these members. Therefore, in this study, the shear strength of concrete beams reinforced with composite rebars is predicted using a combination of GMDH type neural networks and genetic algorithms based on a wide range of experimental results. The key effective parameters that consider in this study are the width of the web, effective depth of the beam, shear span to depth ratio, concrete compressive strength, modulus of elasticity of FRP longitudinal bars, and longitudinal reinforcement ratio. The accuracy of the proposed method has been verified by comparing the model predictions with the collected experimental results and existing shear design equations. The results show that the proposed model has more accurate results in calculating the shear strength of concrete beams than other existing relationships. A sensitivity analysis is also performed to assess the effect of the input parameters on the shear strength of FRP-reinforced concrete beams.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 May 2021

Revise Date: 30 May 2021

Accept Date: 03 August 2021

Keywords:

FRP bar;
Shear capacity;
GMDH;
Genetic algorithm;
Empirical model.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.284971.2445

*Corresponding author: Masoud Ahmadi
Email address: masoud.ahmadi@abru.ac.ir

تخمین مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP با استفاده از مدل GMDH-GA

مسعود احمدی^{۱*}، حسین نادرپور^۲، پویان فخاریان^۳ و دانیال رضازاده عیدگاهی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از میگردهای کامپوزیتی در سازه های بتن آرمه به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، مقاومت کششی قابل توجه و خاصیت ضد مغناطیسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مدول الاستیسیته کمتر میگردهای کامپوزیتی نسبت به میگردهای فولادی، تیرهای بتنی مسلح به میگردهای کامپوزیتی دارای مقاومت برشی نسبتاً کمتری در مقایسه با میگردهای فولادی هستند. از سوی دیگر، شکست برشی در تیرهای بتنی مسلح به میگردهای کامپوزیتی عموماً ترد بوده و نیاز به پیش بینی دقیقی از عملکرد این اعضا نیاز می باشد. از اینرو، در این مطالعه به پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به میگردهای کامپوزیتی با استفاده از ترکیب شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک بر اساس طیف گسترده ای از مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل: پهنای تیر، عمق موثر تیر، نسبت دهانه برش به عمق، مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد بتن، درصد آرماتورهای طولی و مدول الاستیسیته میگردهای کامپوزیتی می باشد. برای کنترل دقت و درجه اطمینان مدل پیشنهادی، نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود مقایسه گردیده است. نتایج این مقایسه نشان داده است که مدل پیشنهادی ترکیب شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک نتایج دقیقتری در محاسبه مقاومت برشی تیرهای بتنی نسبت به سایر روابط موجود دارد. همچنین بر اساس رابطه پیشنهادی به آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: میلگرد FRP، مقاومت برشی، GMDH، ژنتیک، مدل تجربی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2021.284971.2445	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/JSCE.2021.284971.2445	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۵/۱۲	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۶
مسعود احمدی					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	
masoud.ahmadi@abru.ac.ir						

۱- مقدمه

استفاده از میلگردهای کامپوزیتی (FRP^۱) در سال‌های اخیر به دلیل مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت کششی بالا و خواص ضد مغناطیسی در سازه‌های بتن آرمه مورد توجه قرار گرفته است [1]. این میلگردها با توجه به جنس الیاف به کار رفته قابل دسته بندی به مواردی همچون: میلگردهای CFRP ساخته شده با الیاف کربن، میلگردهای GFRP ساخته شده با الیاف شیشه و میلگردهای BFRP ساخته شده با الیاف بازالت، می باشند [2]. بسیاری از سازه های بتن آرمه در طی دوران بهره برداری تحت تاثیر فرآیندهای مخربی همچون خوردگی آرماتور قرار دارند [3]. پیوستگی بین بتن و آرماتور از عوامل کلیدی در تامین مقاومت و شکل پذیری مورد انتظار در سازه‌های بتن آرمه در طول مدت بهره برداری است. عوامل متعددی می توانند این پدیده را تشدید و زوال شدیدتری را در طی بازه زمانی کوتاه غیر قابل انتظار ایجاد کنند [4]. میلگردهای FRP به دلیل عملکرد قابل قبول در برابر حمله سولفات ها و کلریدها و همچنین مقاومت مناسب آنها در برابر خوردگی و زنگ زدگی، در سال های مورد استفاده وسیع قرار گرفته اند [5]. از سوی دیگر، برای کاهش هزینه تعمیر سازه های فراساحلی که در معرض محیط خورنده دریا قرار دارند و بر اثر از بین رفتن تدریجی پوشش بتنی میلگردهای فولادی تخریب می شوند، استفاده از میلگردهای FRP در کنار روش های مقابله موجود مانند حفاظت کاتدیک و استفاده از پوشش اپوکسی موفقیقت نسبی داشته است [6]. از این مصالح می توان برای طراحی و ساخت سازه های جدید نیز استفاده نمود. البته بایستی ذکر گردد که به علت مدول الاستیسیته کمتر میلگرد FRP نسبت به نوع فولادی، اعضای بتن آرمه با این نوع میلگرد مقاومت برشی کمتری نسبت به اعضای بتن آرمه با میلگرد فولادی دارند [7]. میلگردهای کامپوزیت علاوه بر ساختمان، کاربردهای وسیعی در انواع دیگر سازه ها دارند که برای نمونه می توان به عرشه بتنی پل های در معرض محیط مهاجم و اتاق MRI در بیمارستان ها اشاره نمود.

جایگزینی مستقیم و بدون بررسی مصالح FRP بجای آرماتورهای فولادی بدون لحاظ عملکرد اعضای که در آنها از این مصالح استفاده می شود، می تواند رفتار آنها را تحت تاثیر قرار دهد. در رابطه با استفاده از مصالح کامپوزیت، تعدادی استاندارد و دستورالعمل برای طراحی اعضای مسلح با آنها تحت بارگذاری های مختلف روابطی را ارائه نموده اند. یکی از نگرانی های مهندسیین طراح در سالهای اخیر، رفتار برشی اعضای اصلی و بخصوص تیرها بوده که تعدد تحقیقات انجام گرفته در این زمینه موید این مطلب می باشد [8-12]. مطالعات انجام شده در زمینه تیرهای بتن آرمه تحت برش نشان داده است که در اثر ترک های مورب که از ترکیب برش و خمش ناشی می شوند، مقاومت تیر در حد پایینتر از ظرفیت خمشی آن تنزل می کند. بررسی رفتار مقطع ترک خورده بدون آرماتور برشی بیانگر آن است که انتقال برش به کمک عواملی همچون: (۱) نیروی حاصل از درگیر شدن دانه ها و بتن در دو طرف ترک که بصورت پیوسته وجود داشته و از جابجایی و باز شدن بیشتر ترک ممانعت می کند، (۲) نیروی حاصل از عمل میخ پرچی آرماتورهای طولی خمشی که بتن را در قسمت پائینی ترک به هم فشرده و با تغییر شکل برشی خود، از جابجایی ترک ممانعت می کنند و (۳) ظرفیت برشی بتن در قسمتی از ناحیه فشاری که ترک ادامه نیافته، تامین می شود [13,14]. کمتر بودن مدول الاستیسیته میلگرد FRP نسبت به نوع فولادی باعث می شود که عرض ترکها بزرگتر که نتیجه آن کاهش در نیروی حاصل از درگیر شدن سنگدانه ها و بتن می باشد. همچنین در تیرهای بتنی مسلح به آرماتورهای طولی کامپوزیتی، ترک های خمشی می توانند به عمق بیشتری از مقطع نفوذ کرده و ترک های گسترده تری در مقایسه با تیرهای مسلح شده با مقدار مساوی آرماتورهای طولی فولادی (با سختی بیشتر) تشکیل می شود. ترک های خمشی عمیق تر باعث کاهش عمق ناحیه فشاری شده و بدین ترتیب سهم بتن ترک نخورده در مقاومت برشی کاهش می یابد [15]. از سوی دیگر، نتایج مطالعات آزمایشگاهی برخی از محققین بر روی رفتار برشی تیرهای بدون آرماتور عرضی نشان داده است که مقاومت میخ پرچی میلگردهای طولی کامپوزیتی که جابجایی برشی را در امتداد ترک ها محدود می کند، به دلیل مدول عرضی کمتر، قطر کوچکتر و تشکیل ترک های نسبتا گسترده تر کمتر از مقاومت میخ پرچی میلگردهای طولی فولادی بوده و رفتار پیچیده تری نیز دارند [16]. مطالعه در رابطه با برش و شکست برشی از جمله مطالعاتی است که در سال های اخیر توجهات ویژه ای به آن انجام گرفته و این امر در اعضای بدون آرماتور عرضی بدلیل نوع شکست ترد که بصورت ناگهانی و بدون اخطار اتفاق افتاده و خسارات مالی و جانی می تواند ایجاد نماید، قابل توجه بوده است [17-20].

¹ Fiber Reinforced Polymer

عمده روابط ارائه شده توسط محققان در این زمینه بر اساس مقادیر محدودی از مطالعات آزمایشگاهی یا با استفاده از روش های عددی و تحلیلی ارائه شده اند [21-24]. از سوی دیگر نتایج مقایسه بعضی از روابط با نتایج آزمایشگاهی دیگر نشان دهنده قابلیت اطمینان غیر مناسب آنها بوده که می تواند ناشی از ساده سازی های انجام شده در مکانیزم پیچیده انتقال برش، دقت در بازه محدودی از نسبت دهانه برشی (a) به ارتفاع موثر (d) و عدم در نظر گیری تمام پارامترهای موثر در ظرفیت برشی باشد [24]. این موضوع می تواند به کمبود داده های آزمایشگاهی کافی برای تائید توانمندی روش های طراحی موجود نیز نسبت داده شود. بنابراین کاهش درجهی محافظه کاری با افزایش نمونه های آزمایشگاهی، انتظار می رود. از طرف دیگر معادلات طراحی مبتنی بر آیین نامه نمی تواند رفتار برشی اعضای بتنی مسلح شده با FRP را به دلیل پیچیده بودن آن به طور کامل پیش بینی کنند [23,25]. رویکرد طراحی برشی در آیین نامه های طراحی فعلی فرض متداول "سهم بتن به علاوه سهم آرماتور عرضی" را که جمع ساده ای از ظرفیت برشی مقاومت شده توسط بتن و خاموت ها می باشد را دنبال می کنند. در چنین روشی که در طراحی برشی تیرهای بتنی با فولاد معمولی نیز استفاده می شود، فرض می شود که هیچ اندرکنشی بین مکانیسم های مقاومت در برابر برش رخ نمی دهد. همچنین رویکرد اشاره رفتارهای پیچیده دیگری مانند ترک خوردگی، قفل و بست سنگدانه ها، چسبندگی و اثر میخ پرچی را نیز در نظر نمی گیرند. مطالعات گذشته نشان داده است که دستورات عملی های طراحی برشی فعلی در محاسبه ظرفیت برشی تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای طولی FRP بسیار محافظه کارانه بوده که می تواند هم هزینه بر باشد و هم احتمالاً پیچیدگی های رفتار برشی را بیشتر کند [26]. از سوی دیگر، بر اساس پیشینه پژوهش استفاده از روش های هوش مصنوعی منجر به ارائه راهکارهایی با کارایی مناسب و خطای به نسبت کوچک در تخمین پارامترهای مقاومتی و رفتاری مصالح شده است [27-34].

به طور کلی بررسی نویسندگان نشان داده است که همچنان فقدان یک مدل مناسب برای پیش بینی مقاومت برشی اعضا بتنی مسلح شده با میلگرد FRP و بدون خاموت برای طیف گسترده ای از پارامترهای هندسی تیر و مشخصات مکانیکی میلگردهای کامپوزیتی وجود داشته و بایستی این موضوع مورد بررسی قرار گیرد. از اینرو در این مطالعه با استفاده از طیف وسیعی از مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته و بر اساس ترکیب شبکه عصبی GMDH² و الگوریتم ژنتیک به تخمین ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه مسلح به آرماتور FRP و بدون آرماتور عرضی پرداخته شده است.

۲- روابط موجود برای محاسبه مقاومت برشی

تا کنون آیین نامه ها و دستورات عملی های مختلفی به بررسی مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP پرداخته اند که می توان به [7] ACI 440.1R، [35] CNR DT-203، [36] CSA S806، [37] ISIS و [38] JSCE اشاره نمود. قابل ذکر است که برخی از این روابط از پایه با یکدیگر متفاوت بوده و همچنین درصد خطا و محافظانه کار بودن نتایج بدست آمده از آنها کاملاً متفاوت است (در بخش های بعدی این مورد نشان داده خواهد شد). در اکثر روابط، مقاومت برشی از رابطه پایه زیر بدست آمده است:

$$V_r = V_c + V_s \quad (1)$$

که در رابطه فوق، V_r مقاومت برشی نهایی مقطع، V_c و V_s به ترتیب مقاومت برشی بتن و آرماتورهای برشی می باشند. نحوه محاسبه این روابط سبب تفاوت در روابط نهایی آیین نامه ها و دستورات عملی ها گردیده است. بخشی از روابط موجود آیین نامه ها در بخش ۱-۲ تا ۶-۲ اشاره گردیده است. همچنین بررسی های اولیه نویسندگان و ارزیابی دقیق سایر محققان [23] نشان می دهد که کاستی هایی در این روش ها وجود دارد. برخی از این روش ها همه ی پارامترهای مقاومت برشی را در نظر نمی گیرند و برخی هم با درجه محافظه کاری نسبتاً بالا نتایج را ارائه می دهند.

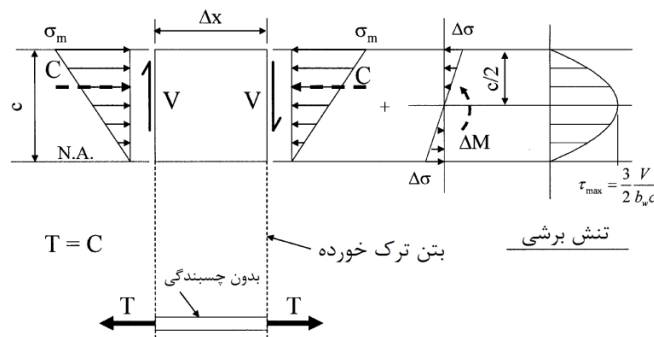
۲-۱- رابطه آیین نامه ACI 440.1R

برای در نظر گرفتن پارامتر مختلف و برای یافتن یک معادله ی معقول برای محاسبه مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگرد FRP، کمیته ACI 440 رابطه ظرفیت برشی بتن (V_c^{ACI}) را برای اعضا خمشی و بدون آرماتور عرضی به صورت زیر پیشنهاد داده است.

² Group Method of Data Handling

$$V_c^{ACI} = 0.4 \sqrt{f_c'} b_w c \quad (2)$$

که در آن b_w برابر با عرض جان تیر و c عمق محور تاری انتقال یافته‌ی مقطع ترک خورده (شکل ۱) می‌باشد.



شکل ۱: نمودار دیاگرام آزاد در حالت ترک خورده [15].

برای مقاطع مستطیلی با آرماتورهای تک ردیفه، عمق محور خنثی، c ، می‌تواند به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c = kd \quad (3)$$

که در رابطه فوق:

$$k = \sqrt{2\rho_f n + (\rho_f n)^2} - \rho_f n$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} \quad (4)$$

$$n = \frac{E_f}{E_c}$$

در معادله ۳ مدول الاستیسیته در محاسبه عمق محور خنثی ترک نخورده استفاده شده است. اثر مقاومت فشاری بتن، در همبستگی مقاومت کششی بتن و همچنین در عمق محور خنثی، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. با افزایش در مقاومت فشاری بتن، نسبت مدول الاستیسیته و مقدار k کاهش یافته و در نتیجه آن عمق محور خنثی کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که اثر مقاومت فشاری بتن، کمتر از مقداری است که در آئین نامه ACI 318-2014 برای میلگردهای فولادی توصیه شده است.

۲-۲- رابطه دستورالعمل JSCE

انجمن مهندسی عمران ژاپن رابطه زیر را برای مقاومت برشی، اعضای بتنی مسلح شده با میلگرد FRP بدون خاموت پیشنهاد داده است.

$$V_{ef} = \beta_d \beta_\rho \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b \quad (5)$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۵ بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$f_{vcd} = 0.2(f_c')^{(1/3)} \leq 0.72 \quad (6)$$

$$\beta_d = \left(\frac{1000}{d} \right)^{(1/4)} \leq 1.5$$

$$\beta_\rho = \left(100 \rho_f \frac{E_f}{E_s} \right)^{(1/3)} \leq 1.5$$

$$\beta_n = \begin{cases} 1 + \frac{M_o}{M_d} \leq 2 \text{ for the } N'_d \geq 0 \\ 1 + \frac{M_o}{M_d} \geq 0 \text{ for the } N'_d < 0 \end{cases}$$

که در روابط فوق: γ_b برابر با ضریب کاهش مقاومت می‌باشد که به طور کلی برابر با $1/3$ است، M_0 = لنگر اولیه عضو، M_d = لنگر طراحی و N_d = نیروی محوری فشاری طراحی است. برای مقاطع بدون نیروی محوری مقدار β_n برابر یک می‌باشد.

همچنین قابل ذکر است که با توجه به این آیین نامه، مشارکت بتن در مقاومت برشی مقدار محدودی دارد. این روش شامل اثر نسبت دهانه برشی به عمق (a/d) نمی‌شود و اگر یک مقطع آرماتورهای طولی نداشته باشد، مقدار مقاومت برشی برابر صفر خواهد بود.

۲-۳- رابطه آیین نامه CSA S806

بر اساس این آیین نامه، مقاومت برشی یک مقطع با مینیمم مقدار آرماتورهای عرضی (طبق مقدار استاندارد تعیین شده توسط CSA) و با تیری که عمق آن کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد، به صورت زیر پیشنهاد داده شده است:

$$V_{cf1} = 0.035 \lambda \phi_c \left(f'_c \rho_f E_f \frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/3} b_w d \quad (7)$$

که در آن مقاومت برشی نباید کمتر از $0.11 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d$ و بیشتر از $0.22 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d$ در نظر گرفته شود. در این معادله λ ضریب چگالی بتن است و ϕ_c ضریب مقاومت مصالح بتن است. مقدار $\frac{V_f}{M_f} d$ هم‌ارز با a/d است و نباید بزرگتر از ۱ در نظر گرفته شود، که در آن V_f و M_f نیروی برشی ضریب‌دار و ممان خمشی در مقطع مورد نظر است. این معادله تاثیر سختی محوری $\rho_f E_f$ ، نسبت دهانه برشی به عمق (a/d) و مقاومت فشاری بتن f'_c را برای محاسبه مقاومت برشی بتن در نظر می‌گیرد. با در نظر گرفتن اثر اندازه برای مقاطع با عمق موثر بزرگتر از 300mm و بدون خاموت و یا با مینیمم مقدار خاموت که توسط استاندارد CSA داده شده، مقدار مقاومت برشی بتن با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{cf} = \left(\frac{130}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0.08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (8)$$

قابل ذکر است که این معادله برای مشارکت بتن در مقاومت برشی، اثر نوع FRP و نسبت آرماتورهای FRP را در نظر نمی‌گیرد که با نتایجی که نشان می‌دهد با افزایش نسبت آرماتورها، مقاومت برشی افزایش می‌یابد، مغایرت دارد. بنابراین، این معادله نتایج محافظه کارانه تری را برای تیرها با میلگردهای طولی FRP که سختی محوری بالا دارند، ارائه می‌دهد. علاوه بر این، برشی که توسط اثر قوسی انتقال می‌یابد را در نظر نگرفته که این موضوع برای تیرهای با نسبت a/d کمتر از $2/5$ کاملاً محافظه کارانه می‌باشد. از سوی دیگر تغییر مقادیر مقاومت برشی از یک مقدار به مقدار دیگر، ناگهانی و غیرمعمول است و از این رو این مساله باید در آینده به عنوان یکی از مشکلات آیین نامه در نظر گرفته شود.

۲-۴- رابطه آئین نامه ISIS-M03

در این آئین نامه برای طراحی برش برای اعضا مسلح شده با میلگردهای FRP بدون خاموت از روش ساده شده آئین نامه CSA A23.3 استفاده نموده است. با توجه به این روش، مقاومت برشی بتن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{For } d \leq 300 \text{ mm : } V_{cf} = 0.2\lambda\phi_c \cdot \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \quad (9)$$

$$\text{For } d > 300 \text{ mm : } V_{cf} = \left[\frac{260}{1,000 + d} \right] \lambda\phi_c \cdot \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \geq 0.1\lambda\phi_c \cdot \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_f}{E_s}}$$

که در روابط فوق نسبت مدول‌های الاستیسیته به مقدار $\sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \leq 1.0$ محدود می‌شود. همچنین λ ، ϕ_c ، b_w ، d و E_f به ترتیب برابر با ضریب محاسبه چگالی بتن، ضریب مقاومت بتن، حداقل عرض موثر جان با عمق d ، فاصله از دورترین سطح فشاری نسبت به مرکز سطح آرماتورها و مدول الاستیسیته آرماتورهای خمشی FRP می‌باشد. در این روش، کاهش در مقدار مقاومت برشی بتن در مقایسه با بتن مسلح شده با فولاد، بر اساس نسبت مدول الاستیسیته می‌باشد. این روش تاثیر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق و نسبت آرماتورهای طولی، که قبلاً اشاره شد که بر روی مقاومت برشی تاثیر می‌گذارد را در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، حد فوقانی برای مقاومت برشی در این روش وجود ندارد.

۲-۵- رابطه دستورالعمل BISE

بر اساس رابطه پیشنهاد شده توسط انجمن مهندسی سازه انگلستان، مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگرد FRP به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$V_{cf} = 0.79 \left(100\rho_f \frac{E_f}{E_s} \right)^{1/3} \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3} b_w d \quad (10)$$

که در رابطه فوق f_{cu} بصورت مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن که مقدار آن برابر است با $f_{cu} = 1.25f'_c$ است تعریف می‌شود. همچنین قابل ذکر است که این رابطه نیز تاثیر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق و نسبت آرماتورهای طولی بر مقاومت برشی را در نظر نمی‌گیرد.

۲-۶- رابطه دستورالعمل CNR-DT 203

محققین ایتالیایی با انجام یک کالیبراسیون بر روی معادله مقاومت برشی آرماتور فولادی اعضای بتنی در اروپا، آن را به اعضای بتن مسلح با FRP توسعه دادند. عبارت زیر برای مقاومت برشی اعضای بتنی مسلح با میلگرد FRP ارائه شده است:

$$V_{cf} = 1.3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{1/2} \tau_{rd} k_d (1.2 + 40\rho_f) b_w d \quad (11)$$

که پارامترهای معادله فوق طبق معادلات زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\tau_{rd} = 0.25 f_{ctk0.05} \quad (12)$$

$$f_{ckt0.05} = 0.7 f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = (0.3 f_c')^{2/3}$$

$$k_d = 1.6 - d \geq 1$$

۳- پایگاه داده آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی متنوعی در دهه‌های اخیر بر روی تیرهای بتنی مسلح به آرماتورهای طولی کامپوزیتی و بدون آرماتور عرضی انجام شده که سبب ارائه روابط جدید و افزایش در قابلیت اطمینان در این زمینه شده‌اند. برای تعیین مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP، تعداد ۹۶ نمونه آزمایشگاهی از مقالات جمع آوری شده است [20,24,25,39-47]. قابل ذکر است که برای جمع آوری نمونه‌های آزمایشگاهی معیارهای اولیه زیر مد نظر 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.
- بتن مورد استفاده در تیرها دارای حداقل مقاومت فشاری مشخصه ۲۰ مگاپاسکال باشد.
- بارگذاری مورد استفاده در تیرها بصورت نقطه‌ای باشد.
- بارگذاری نقطه‌ای بصورت مونوتونیک اعمال شده باشد.

مشخصات هندسی و مکانیکی مقاطع و مصالح و حداکثر مقاومت برشی تیر از جمله پارامترهایی هستند که مورد انتخاب قرار گرفته‌اند. با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین روابط ارائه شده برای حداکثر مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه مسلح به میلگرد FRP بدون خاموت، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی بتن در این تیرها متأثر از عواملی همچون: عرض مقطع تیر بتنی (b_w)، عمق موثر مقطع تیر بتنی (d) نسبت دهانه برشی به عمق تیر بتنی (a/d)، مقاومت فشاری بتن (f_c')، درصد آرماتورهای طولی FRP (ρ_f) و مدول الاستیسیته آرماتورهای طولی FRP (E_f) می‌باشد. شش مشخصه ذکر شده به عنوان ورودی‌های مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند و خروجی آن، مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه مسلح به میلگرد FRP بدون خاموت است. خلاصه‌ای از اطلاعات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

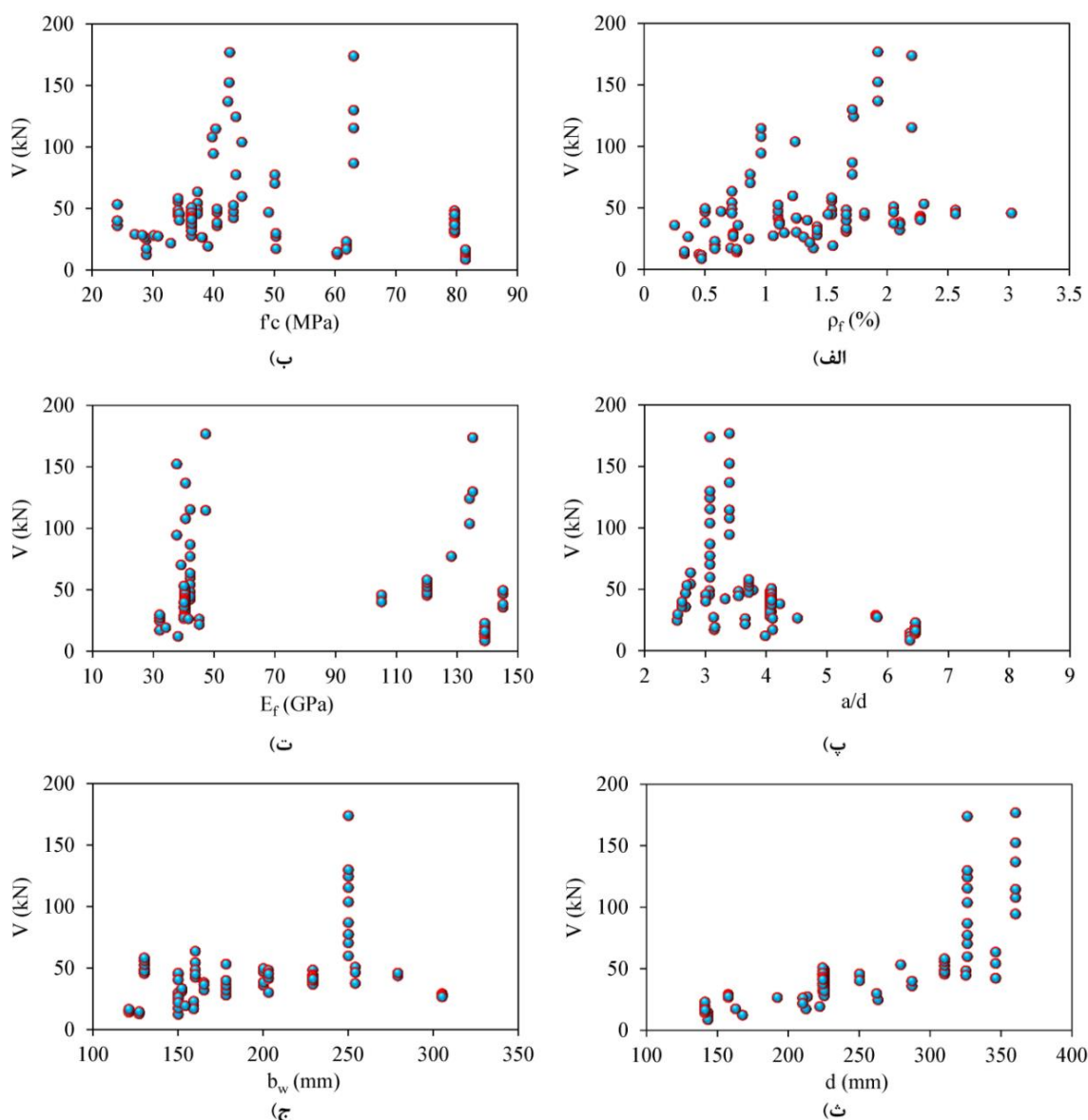
جدول ۱: مشخصات آماری نمونه‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده

V_f (kN)	d (mm)	b_w (mm)	a/d	E_f (GPa)	ρ_f	f_c' (MPa)	
۸/۸	۱۴۱	۸۹	۲/۵۳	۳۲	۰/۲۵	۲۴/۱	مینیم
۱۷۷	۳۶۰	۴۵۷	۶/۴۵	۱۴۵	۳/۰۲	۸۱/۴	ماکزیم
۴۸/۲۵۱	۲۴۳/۶۰۷	۲۰۸/۳۴۴	۴/۰	۶۹/۷۴۷	۱/۳۰۳	۴۸/۰۵۸	میانگین
۳۴/۳۵۶	۶۲/۲۶۷	۸۴/۲۷۳	۱/۱۲۹	۴۳/۸۷۶	۰/۶۳۹	۱۷/۹۷۳	انحراف استاندارد
۰/۷۱۲	۰/۲۷۶	۰/۴۰۴	۰/۲۸۱	۰/۶۲۹	۰/۴۹	۰/۳۷۳	ضریب تغییرات

برای ارائه جزئیات دقیقتر در رابطه با پایگاه داده آزمایشگاهی، نمودار توزیع پراکندگی پارامترهای موثر بر مقاومت برشی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴- شبکه عصبی GMDH

این روش در سال ۱۹۶۸ توسط دانشمند اوکراینی، آلکسی ایواکنکو معرفی شد [48]. در این رویکرد، به جای ساخت مدل های تخمینگر به صورت یکجا، از الگوریتمی تکرار شونده و افزایشی استفاده می شود که شامل تولید و افزوده شدن ساختارهای پایه بسیار ساده (نورون های چند جمله ای) است و به مرور، با ترکیب این ساختارهای ساده، سیستمی پیچیده شکل می گیرد که دارای عملکرد مطلوب است [49]. بر خلاف سایر روش های رگرسیون، در این رویکرد، علاوه بر ساخت تدریجی مدل، از الگوی انتخاب طبیعی، همانند آنچه که در الگوریتم های تکاملی است، استفاده شده است [50,51]. یکی از پایه ای ترین و مهم ترین الگوریتم ها برای ساخت مدل GMDH، که به نام شبکه عصبی چند جمله ای نیز شناخته می شود، الگوریتم ارائه شده توسط خود ایواکنکو است که پایه اصلی آن راه، مدل چند جمله ای درجه دو و الگوریتم کمترین مربعات خطا تشکیل می شود.



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

شبکه با ترکیب چند جمله‌هایی درجه دوم حاصل از تمامی نورون‌ها، تابع تقریبی \hat{f} را با خروجی \hat{y} ، برای یک مجموعه از ورودی‌ها $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ با کمترین خطا در مقایسه با خروجی واقعی y توصیف می‌کند. بنابراین M داده آزمایشگاهی شامل n ورودی و یک خروجی نتایج واقعی به شکل زیر نمایش داده می‌شوند:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (13)$$

در مدل‌سازی به دنبال آن هستیم که مدل بتواند مقدار خروجی \hat{y} را برای هر بردار ورودی X پیش بینی کند بنابراین:

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

در بسیاری از موارد کاربردی از شکل درجه دوم و دو متغیر این چند جمله‌ای به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2 \quad (15)$$

ضرایب مجهول a_i در معادله ۱۵ با تکنیک‌های رگرسیون چنان تعیین می‌شوند که اختلاف بین خروجی واقعی، y ، و مقادیر محاسبه شده، \hat{y} برای هر جفت متغیر ورودی x_i و x_j کمینه گردد. مجموعه‌ای از چند جمله‌ای‌ها با استفاده از معادله ۱۵ ساخته می‌شوند که ضرایب مجهول کلیه آن‌ها با استفاده از روش مربعات کمینه حاصل می‌شود. برای هر تابع G_i (هر نورون ساخته شده) ضرایب برای کمینه کردن خطای کل نورون به منظور انطباق بهینه ورودی‌ها بر تمام جفت مجموعه‌های ورودی-خروجی، بدست می‌آیند:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i)^2}{M} \rightarrow \min \quad (16)$$

در روش‌های پایه‌ای الگوریتم GMDH تمامی ترکیبات دو تایی (نورون‌ها) از n متغیر ورودی ساخته می‌شوند، و ضرایب مجهول کلیه نورون‌ها با استفاده از روش مربعات کمینه بدست می‌آیند. بنابراین $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ نورون در لایه دوم به صورت مجموعه زیر ساخته می‌شوند:

$$\{(y_i, x_{ip}, x_{iq}) | (i=1, 2, \dots, M) \& p, q \in (1, 2, \dots, M)\} \quad (17)$$

از شکل درجه دوم تابع بیان شده در معادله ۱۵ برای هر M ردیف سه‌تایی استفاده می‌کنیم. این معادلات را می‌توان به شکل ماتریسی زیر بیان کرد:

$$Aa = Y \quad (18)$$

که در معادله فوق:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \\ \mathbf{Y} &= \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_M\}^T \end{aligned} \quad (19)$$

از مقادیر بردارهای ورودی و شکل تابع به راحتی قابل مشاهده است که:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

روش کمترین مربعات از آنالیز رگرسیون چندگانه حل معادلات را به شکل زیر می‌دهد:

$$\mathbf{a} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (21)$$

چنانچه ماتریس $A^T A$ وارون پذیر نباشد از روش قاعده مند سازی تیخونوف جهت حل معادله فوق استفاده می شود.

در طراحی شبکه عصبی GMDH، هدف جلوگیری از رشد واگرایی شبکه و نیز مرتبط کردن شکل و ساختار شبکه به یک یا چند پارامتر عددی بوده، به گونه ای که با تغییر این پارامتر ساختار شبکه نیز تغییر کند. روش های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک کاربرد وسیعی در مراحل مختلف طراحی شبکه های عصبی به دلیل قابلیت های منحصر به فرد خود در پیدا کردن مقادیر بهینه و امکان جستجو در فضاهای غیر قابل پیش بینی، دارند. الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه حل های اولیه تصادفی شروع می کند. هرگاه معیارهای نهایی اقیاناع نشود به کمک عملگرهای ژنتیکی همچون پیوند، جهش و انتخاب جمعیت های جدیدی تولید می شود. با هر تکرار از این سه اپراتور (عملگر) ژنتیکی، یک نسل بوجود می آید. جمعیت های اولیه به صورت رشته ای تعریف می شوند و هر رشته را با نام کروموزوم توصیف می کنند. در عملگر پیوند ژن های دو والدین با یکدیگر ترکیب می شوند و دو فرزند جدید ایجاد می شود. در عملگر جهش، یک تغییر ناگهانی در ژن صورت می گیرد. در عملگر انتخاب، جمعیت ها را به کمک تابع برازندگی مورد ارزیابی قرار می دهند. جمعیت های دارای برازندگی کمتر حذف شده و جمعیت ها به سمت پاسخ بهینه سوق داده می شوند. در این ساختار ترکیبی، الگوریتم ژنتیک تعداد بهینه نوروں ها در هر لایه پنهان و نحوه اتصال آن ها را ارائه می دهد که در نتیجه آن سری بهینه از ضرایب مناسب توابع درجه دوم (چند جمله ای) پیش بینی کننده متغیر وابسته، به دست می آید. در ساختار ترکیبی مورد نظر به طور کلی سه تابع هدف به صورت خطای آموزش، خطای پیش بینی و تعداد نوروں ها وجود دارد. بنابراین ساختار بهینه بر مبنای توازن بین این توابع هدف به دست می آید. در تحقیق حاضر تابع هدف، به صورت مینیمم کردن خطای پیش بینی دو مجموعه آموزش و تست در نظر می گرفته می شود، و کروموزومی (تابع چند جمله ای از متغیرهای پیش بینی) به عنوان جواب بهینه انتخاب می شود که کمترین میزان خطا را در هر دو مجموعه آموزش و تست داشته باشد. معیار میانگین مربع مربعات خطا به عنوان معیار خطای پیش بینی در نظر گرفته می شود. در ساختار مدل ترکیبی پیشنهادی، نمایش ژن ها و کروموزوم ها به صورت رشته غیر دودویی در نظر گرفته می شوند.

۵- مدل پیشنهادی

رابطه تعیین مقاومت مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP براساس الگوریتم روش گروهی مدل سازی داده ها براساس تابع اشاره شده در معادله زیر قابل بیان است.

$$V_f = V(f_c, \rho_f, E_f, a/d, b_w, d) \quad (22)$$

که در رابطه فوق، b_w : عرض مقطع تیر بتنی بر حسب میلی متر، d : عمق مقطع تیر بتنی بر حسب میلی متر، a/d : نسبت دهانه برشی به عمق تیر بتنی، f_c : مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، ρ_f : درصد آرماتور طولی FRP بر حسب درصد، E_f : مدول الاستیسیته آرماتور طولی FRP بر حسب مگاپاسکال می باشد.

در آموزش شبکه ها از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی وزن ها یا ضرایب استفاده می شود. ژنوم یا کروموزومی که برای نمایش ساختار شبکه عصبی در نظر گرفته شده شامل یک رشته سمبولیک ساده است که در آن هر حرف نشان دهنده یکی از ورودی های شبکه می باشد. در این نوع کدگذاری هر ورودی با یک حرف جایگزین می شود و هر کروموزوم به صورت رشته ای ساخته شده از این حروف الفبا است. این روش در مقایسه با روش های کلاسیک گرادیان عملکرد بهتری را از خود نشان می دهند. در این مطالعه اپراتور پیوند با استفاده از روش انتخاب تصادفی چرخ رولت، دو والد را برای تولید دو فرزند انتخاب می کند. با اعمال اپراتور بر روی دو والد، پایه های کروموزوم ها از یک نقطه (به طور تصادفی) تعویض می شود. بایستی دقت نمود که ساختار اطلاعاتی شبکه GMDH به وسیله پیوند، عوض می شود. همچنین جهش سبب تغییر و تنوع در جمعیت می گردد.

جهت اجرای فرایند بهینه سازی، ابتدا داده های ورودی را به دو بخش آموزش و تست تقسیم بندی می شود. برای آموزش شبکه از ۶۷ داده استفاده شده و ۲۹ نمونه باقیمانده برای تست مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این خطای آموزش و خطای پیش بینی به عنوان دو

تابع هدف در نظر گرفته شده که الگوریتم ژنتیک توابع هدف مزبور را محاسبه کرده و ساختار بهینه شبکه بدست می آید. به منظور به دست آوردن چند جمله ای مناسب برای برآورد مقاومت برشی تیرها نسبت به پارامترهای ورودی، در طراحی ساختار پیشنهادی تعداد لایه های پنهان برابر ۲، جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰، تعداد نسل ها برابر با ۳۰۰ و احتمال عملگرهای پیوند و جهش به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده اند. تابع پایه مورد استفاده در همه شبکه های ایجاد شده در این مطالعه به صورت معادله ۲۳ می باشد.

$$V_f = V(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6) \quad (23)$$

که در رابطه فوق I_i ها متغیرهای ورودی رابطه هستند که از معادلسازی زیر بدست می آیند.

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.1\hat{f}_c \\ I_2 &= \rho_f \\ I_3 &= 0.1E_f \\ I_4 &= a/d \\ I_5 &= 0.01b_w \\ I_6 &= 0.01d \end{aligned} \quad (24)$$

بر اساس بهترین شبکه، رابطه زیر برای تعیین مقاومت مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP بدست آمده است.

$$V_f = -27.5845 + V_{f1} + V_{f2} \quad (25)$$

که مقادیر V_{f1} و V_{f2} در رابطه فوق از معادله ۲۶ بدست می آیند.

$$\begin{aligned} V_{f1} &= 20.9375I_6 - 13.5109\frac{I_1}{I_3} + 2.93151I_1I_5 \\ V_{f2} &= -3.29446I_4I_2 + 8.59052I_5I_2 \end{aligned} \quad (26)$$

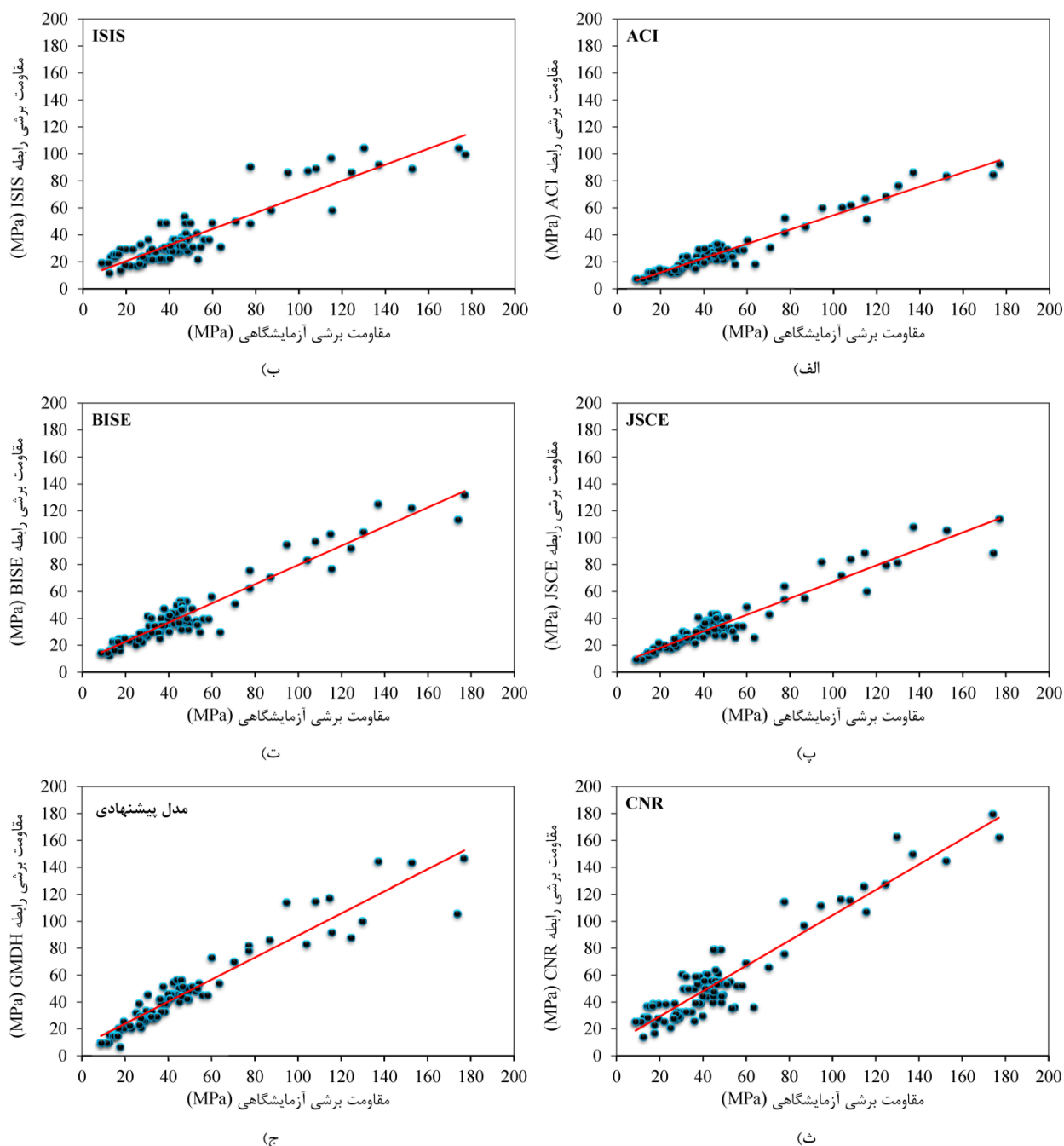
۶- بحث در نتایج

برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی، بایستی معیارهایی در نظر گرفته شود تا عملکرد و دقت پیش بینی های انجام شده مورد ارزیابی قرار گیرد. در مرحله اول، برای انجام مقایسه از تمام داده های جمع آوری شده استفاده شده تا مقایسه برای طیف گسترده تری از پارامترهای ورودی روابط موجود و پیشنهادی انجام شود. نویسندگان بر اساس رابطه پیشنهادی و اطلاعات نمونه های آزمایشگاهی، مقدار مقاومت برشی بتن را برای تمام نمونه های آزمایشگاهی محاسبه و سپس نتایج بدست آمده را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه نموده اند. این روند برای روابط موجود نیز انجام گرفته است. مقایسه انجام شده بین نتایج آزمایشگاهی و روابط در شکل ۳ ارائه شده است. در محور X مقادیر مقاومت برشی آزمایشگاهی و در محور Y مقادیر متناظر بدست آمده از روابط ترسیم شده است. بهترین نتیجه متناظر با حالتی است که داده ها بر روی نیمساز نمودار (زاویه ۴۵ درجه) قرار گیرند. فاصله گرفتن از نیمساز نشان دهنده خطای مدل ها می باشد. مقایسه بین نتایج مربوط به مدل GMDH-GA (شکل ۳-ج) و سایر روابط موجود (شکل های ۳-الف تا ث) نشان می دهد که مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روابط آئین نامه ای دارد.

همچنین مقدار خطا و میزان محافظه کار بودن تابع پیشنهادی برای کل داده ها در شکل ۴ نشان داده شده است. بایستی توجه شود که تنها در ۵ نمونه میزان خطا از ۳۰ درصد بیشتر شده و در حدود ۸۱ درصد داده ها دارای خطای کمتر از ۲۰ درصد می باشند. متناظرا درصد داده ها دارای خطای کمتر از ۲۰ درصد برای روابط ACI, JSCE, BISE, CNR و به ترتیب برابر با ۵/۲، ۳۱/۲۵، ۴۴/۷۹، ۶۷/۷ و ۵۴/۱۶ درصد می باشد. نتایج نشان داده است که میزان خطای رابطه پیشنهادی نسبت به مدل های موجود کمتر بوده و

توانسته مقاومت برشی را با دقت مناسب پیش بینی کند. قابل ذکر است که رابطه آیین نامه ACI دارای محافظه کاری بیشتری نسبت به سایر روابط 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 که روابط آن در ادامه آمده است.

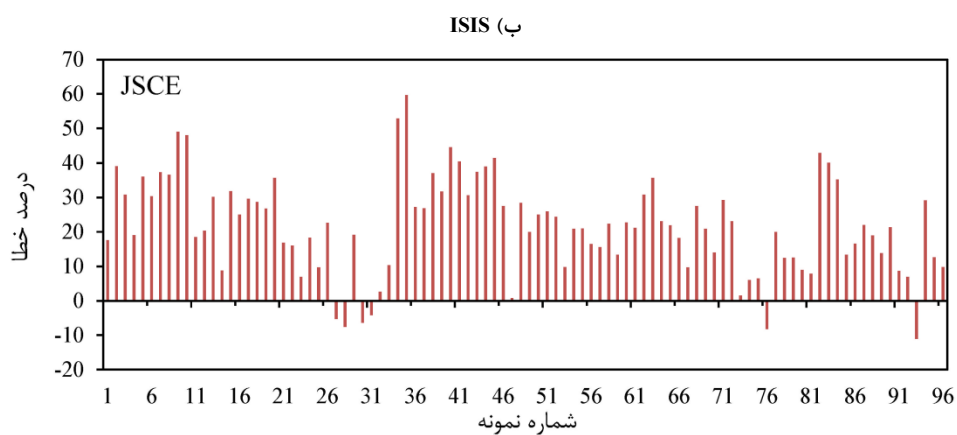
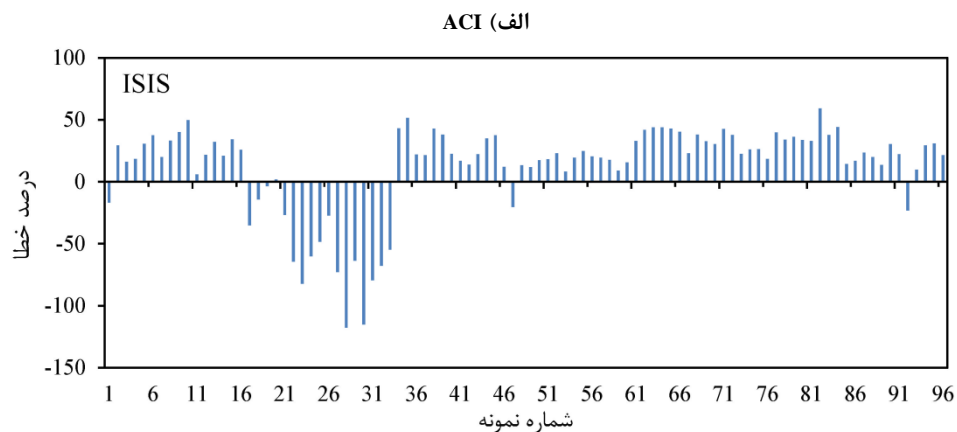
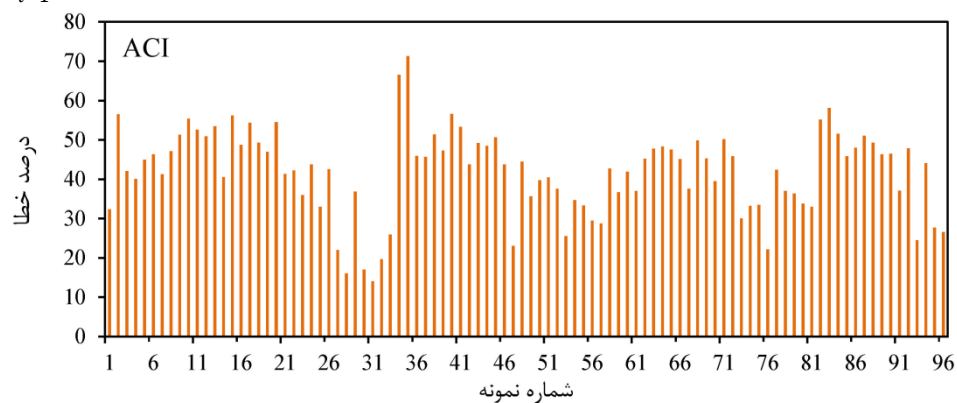


شکل ۳: مقایسه مدل‌های موجود و پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی: الف) ACI، ب) ISIS، ت) BISE، پ) JSCE، ج) مدل پیشنهادی، ث) CNR

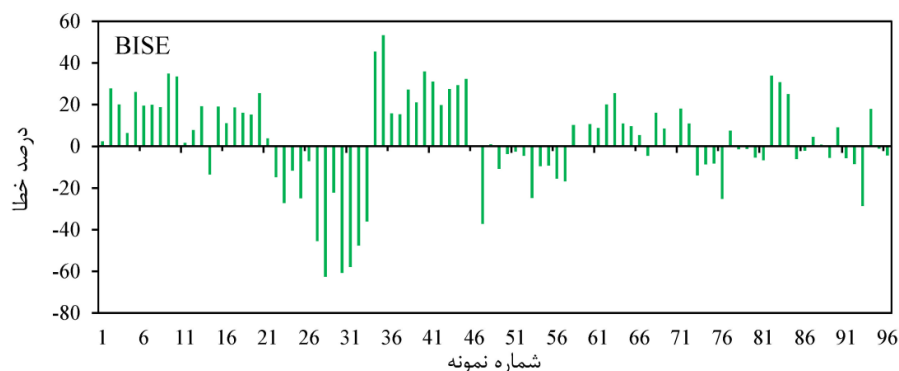
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (V_{i,actual} - \bar{V}_{actual})(V_{i,model} - \bar{V}_{model})]^2}{\sum_{i=1}^n (V_{i,actual} - \bar{V}_{actual})^2 \sum_{i=1}^n (V_{i,model} - \bar{V}_{model})^2} \quad (27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{i,actual} - V_{i,model})^2}{n}} \quad (28)$$

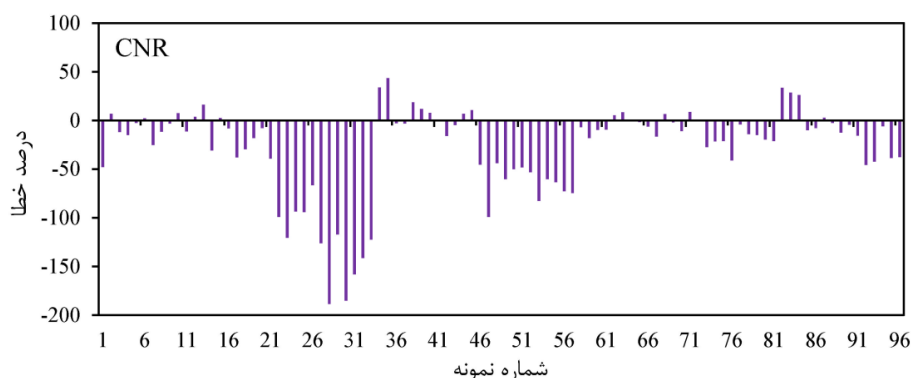
$$MAPE = \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_{i,actual} - V_{i,model}|}{V_{i,actual}}\right) \quad (29)$$



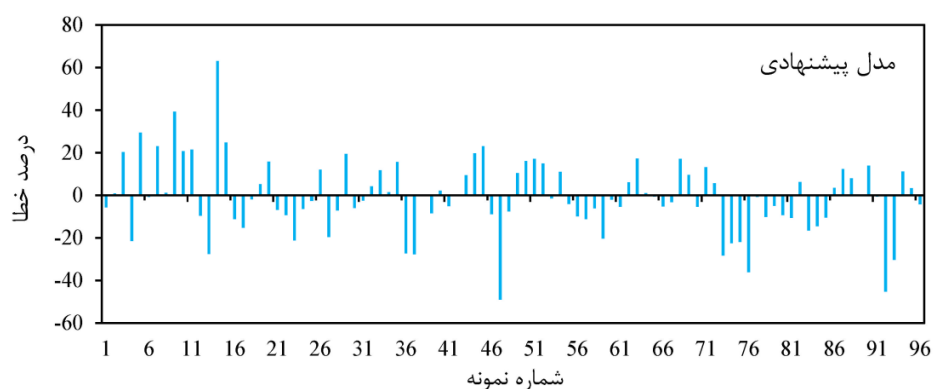
JSCE (ب)



BISE (ت)



CNR (ث)



ج) مدل پیشنهادی

شکل ۴: نمودار توزیع خطای روابط موجود و رابطه پیشنهادی

که در روابط ۲۷-۲۹، مقدار ظرفیت برشی گزارش شده در آزمایشگاه؛ \bar{V}_{actual} ؛ میانگین همه مقادیر $V_{i,actual}$ ؛ مقدار ظرفیت برشی بدست آمده از مدل؛ \bar{V}_{model} ؛ میانگین همه مقادیر $V_{i,model}$ و n تعداد نمونه ها است.

ضریب تشخیص، اندازه گیری آماری نزدیک داده ها به خط رگرسیون برازش شده می باشد. این ضریب نشان می دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل تبیین می شود یا به عبارت دیگر ضریب تعیین نشان دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تاثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می باشد. صفر بودن ضریب همبستگی تنها عدم وجود رابطه خطی بین دو متغیر را نشان می دهد ولی نمی توان مستقل بودن دو متغیر را نیز نتیجه گرفت. درصد بالای ضریب تشخیص (۱۰۰٪) که مورد هدف است نشان می دهد که مدل همه تغییرپذیری داده های پاسخ در اطراف میانگین آن

را تبیین می کند. خطای جذر میانگین مربعات و ریشه میانگین مربعات خطا بیانگر فاکتوری از خطاهای موجود است و هنگامی که هدف ما ارزیابی دقت کل داده ها باشد، میتوان از آنها بعنوان شاخص های مهم استفاده نمود. معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده ها منطبق باشد مقدار آنها کمتر می شود. در بهترین حالت بایستی مقدار $R=1$ و مقادیر $RMSE$ و $MAPE$ برابر صفر شوند که در عمل رسیدن به این آستانه ها بسیار سخت می باشد. مطالعات Smith [52] نشان داده است اگر مقدار R بزرگتر از $0/8$ باشد و مقدار خطا در کمترین مقدار خود قرار گیرد، همبستگی قابل قبولی بین مقدار واقعی و تقریب زده شده برقرار است. مقادیر شاخص های آماری R ، $RMSE$ و $MAPE$ براساس داده های آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج این جدول نشان می دهد که رابطه پیشنهادی دارای کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب همبستگی که بیانگر توانایی مناسب مدل توسعه داده شده در پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای بتنی مسلح به میلگرد FRP و بدون خاموت می باشد.

جدول ۲: شاخص های عملکردی بر اساس نمونه های آزمایشگاهی جمع آوری شده.

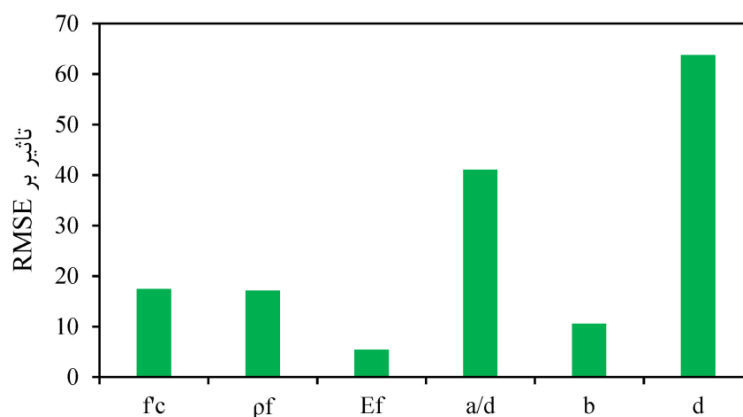
مدل پیشنهادی	CNR	BISE	JSCE	ISIS	ACI	
۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۶	R
۹/۶۲	۱۴/۴۵	۱۳/۷۵	۱۹/۶	۱۹/۸۶	۲۶/۶۳	RMSE
۱۲/۷۳	۳۶/۱۲	۱۸/۵۹	۲۳/۶۱	۳۳/۲۵	۴۲/۹۱	MAPE

۷- آنالیز حساسیت

برای محاسبه اهمیت پارامترهای موثر در مدل توسعه داده شده، مقادیر میانگین آنها بصورت یک به یک در مدل جایگزین گردیده و سپس ضریب خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) محاسبه شده است. در این بخش فرض شده است که خطای مدل اصلی دارای تاثیر صفر بر مقدار RMSE و در حالتی که تمام متغیرهای ورودی با مقدار میانگین خود جایگزین شوند دارای تاثیر ۱۰۰ درصد می باشد. در صورتی که متغیر موجود در یک مدل در یک متغیر دیگر ضرب یا به توان برسد، تأثیر می تواند از ۱۰۰ درصد نیز فراتر رود [53,54]. از سوی دیگر مقادیر کوچک نشانگر آن است که پارامتر مدنظر دارای تاثیر کمی بر مدل پیشنهادی می باشد. تأثیر بر RMSE را می توان برای مقایسه متغیرها و مقادیر مرجع به صورت زیر محاسبه نمود.

$$RMSE \text{ بر } \text{تأثیر} = [(R_{var} - R_{ori}) / (R_{all} - R_{ori})] * 100\% \quad (30)$$

که در رابطه فوق، R_{var} برابر با RMSE متغیر مورد نظر، R_{ori} برابر با RMSE مدل اصلی و R_{all} برابر با RMSE مدلی که همه متغیرها با مقدار میانگین جایگزین شوند. نتایج این ارزیابی در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که بیشترین و کمترین تاثیر به ترتیب مربوط به عمق موثر و مدول الاستیسیته میلگردهای طولی می باشد.



شکل ۵: تعیین اهمیت پارامترهای ورودی بر اساس تاثیر بر RMSE

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه رابطه جدیدی بر اساس ترکیب شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک برای تخمین مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP و بدون خاموت ارائه شده است. پارامترهای موثر ورودی در این روش شامل: عرض مقطع تیر، عمق مقطع تیر، نسبت دهانه برشی به عمق تیر، مقاومت فشاری بتن، نسبت میلگرد FRP و مدول الاستیسیته میلگرد FRP می باشد. برای جلوگیری از پدیده نامطلوب بیش‌برازش و چک کردن عمومیت بخشی مدل پیشنهادی، درصد داده های مورد استفاده در فرآیند آموزش به ۷۵ درصد محدود شده است. مدل های متنوع اولیه ای بر اساس تنظیم میزان درصد داده های مورد استفاده در آموزش مورد بررسی قرار گرفته و مدلی که در آن از ۶۷ داده برای آموزش و مابقی برای آزمایش استفاده شده، بعنوان ورودی مدل های بخش دوم در نظر گرفته شده اند. در آموزش شبکه ها از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی وزن ها یا ضرایب استفاده شده و به منظور به دست آوردن چندجمله ای مناسب برای برآورد مقاومت برشی تیرها نسبت به پارامترهای ورودی، در طراحی ساختار پیشنهادی تعداد لایه های پنهان برابر ۲، جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰، تعداد نسل ها برابر با ۳۰۰ و احتمال عملگرهای پیوند و جهش به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. پس از ایجاد مدل بهینه، مقایسه ای بین نتایج مقاومت برشی آزمایشگاهی و نتایج مدل انجام شده که نتایج بیانگر آن است که میانگین قدر مطلق درصد خطا مدل پیشنهادی برابر با ۱۲/۷۳ بوده که نشان از توانایی مطلوب آن می باشد. همچنین رابطه پیشنهادی در بازه داده های آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه نسبت به روابط ACI 440.1R، CNR DT-203، BISE، ISIS و JSCE عملکرد بهتری 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 ۰/۹۸، ۹/۶۲ و ۱۲/۷۳ می باشد. از اینرو این رابطه می تواند در پیش طراحی تیرهای بتنی مسلح به آرماتور FRP با درجه اطمینان قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] Gudonis, E., Timinskas, E., Gribniak, V., Kaklauskas, G., Arnautov, A.K., and Tamulėnas, V. (2013) FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design. *Engineering Structures and Technologies*. 5 (4), 147–158.
- [2] Siddika, A., Al Mamun, M.A., Ferdous, W., and Alyousef, R. (2020) Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs—A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*. 111 104480.
- [3] Ahmadi, M., Kheyroddin, A., and Kioumars, M. (2021) Prediction models for bond strength of steel reinforcement with consideration of corrosion. *Materials Today: Proceedings*.
- [4] Blomfors, M., Zandi, K., Lundgren, K., and Coronelli, D. (2018) Engineering bond model for corroded reinforcement. *Engineering Structures*. 156 394–410.
- [5] Tanarlan, H.M., Secer, M., and Kumanlioglu, A. (2012) An approach for estimating the capacity of RC beams strengthened in shear with FRP reinforcements using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*. 30 556–568.
- [6] Ahmed, A., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C., and Zhu, D. (2020) A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete. *Construction and Building Materials*. 256 119484.
- [7] ACI Committee 440 (2015) Report on fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures. American Concrete Institute, .
- [8] Alam, M.S. and Hussein, A. (2013) Unified Shear Design Equation for Concrete Members Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer without Stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 17 (5), 575–583.
- [9] Kim, C.H. and Jang, H.S. (2014) Concrete Shear Strength of Normal and Lightweight Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*. 18 (2), 04013038.
- [10] Chen, H., Yi, W.-J., Ma, Z.J., and Hwang, H.-J. (2020) Modeling of shear mechanisms and strength of concrete deep beams reinforced with FRP bars. *Composite Structures*. 234 111715.
- [11] Jumaa, G.B. and Yousif, A.R. (2019) Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*. 209 77–94.

- [12] Dhahir, M.K. and Nadir, W. (2018) A compression field based model to assess the shear strength of concrete beams reinforced with longitudinal FRP bars. *Construction and Building Materials*. 191 736–751.
- [13] (1998) Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 124 (12), 1375–1417.
- [14] Whitehead, P.A. and Ibell, T.J. (2005) Rational approach to shear design in fiber-reinforced polymer-prestressed concrete structures. *Journal of Composites for Construction*. 9 (1), 90–100.
- [15] (2002) Shear Tests of FRP-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*. 99 (4),.
- [16] Mari, A., Cladera, A., Oller, E., and Bairan, J. (2014) Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Composites Part B: Engineering*. 57 228–241.
- [17] Cavagnis, F., Ruiz, M.F., and Muttoni, A. (2015) 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*. 103 157–173.
- [18] Tung, N.D. and Tue, N.V. (2016) Effect of support condition and load arrangement on the shear response of reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Engineering Structures*. 111 370–382.
- [19] Ignjatović, I.S., Marinković, S.B., and Tošić, N. (2017) Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. *Engineering Structures*. 141 386–401.
- [20] Dhahir, M.K. (2017) Shear strength of FRP reinforced deep beams without web reinforcement. *Composite Structures*. 165 223–232.
- [21] Jumaa, G.B. and Yousif, A.R. (2018) Predicting shear capacity of FRP-reinforced concrete beams without stirrups by artificial neural networks, gene expression programming, and regression analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2018.
- [22] Gao, D. and Zhang, C. (2020) Shear strength prediction model of FRP bar-reinforced concrete beams without stirrups. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020.
- [23] Gao, D. and Zhang, C. (2020) Shear strength calculating model of FRP bar reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*. 221 111025.
- [24] Naderpour, H., Poursaeidi, O., and Ahmadi, M. (2018) Shear resistance prediction of concrete beams reinforced by FRP bars using artificial neural networks. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 126 299–308.
- [25] Razaqpur, A.G., Isgor, B.O., Greenaway, S., and Selley, A. (2004) Concrete Contribution to the Shear Resistance of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members. *Journal of Composites for Construction*. 8 (5), 452–460.
- [26] Nasrollahzadeh, K. and Basiri, M.M. (2014) Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*. 41 (4), 1006–1020.
- [27] Nematzadeh, M., Shahmansouri, A.A., and Fakoor, M. (2020) Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. *Construction and Building Materials*. 252 119057.
- [28] Shahmansouri, A.A., Yazdani, M., Ghanbari, S., Akbarzadeh Bengar, H., Jafari, A., and Farrokh Ghatte, H. (2021) Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymers incorporating silica fume and natural zeolite. *Journal of Cleaner Production*. 279 123697.
- [29] Alavi, S.A., Naderpour, H., Fakharian, P., and Noghani, S. (2018) An Approach for Estimating the Rotation Capacity of Wide Flange Beams using Bayesian Regularized Artificial Neural Networks (BRANN). *Modares Civil Engineering Journal*. 18 (4), 157–169.
- [30] Heidari, A., Tavakoli, D., and Fakharian, P. (2014) Approximate Eigenvalue of Plate by Artificial Neural Networks. *Journal of Modeling in Engineering*. 11 (35), 49–62.
- [31] Naderpour, H., Fakharian, P., Rafiean, A.H., and Yourtchi, E. (2016) Estimation of the Shear Strength Capacity of Masonry Walls Improved with Fiber Reinforced Mortars (FRM) Using ANN-GMDH Approach. *Journal of Concrete Structures and Materials*. 1 (2), 47–59.
- [32] Naderpour, H., Rafiean, A.H.A.H., and Fakharian, P. (2018) Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering*. 16, 213–219.
- [33] Fakharian, P., Naderpour, H., Haddad, A., Rafiean, A.H., and Rezazadeh Eidgahee, D. (2018) A Proposed Model for Compressive Strength Prediction of FRP-Confined Rectangular Columns in terms of Genetic Expression Programming (GEP). *Concrete Research*. 11 (1), 5–18.

- [34] Azimi, A. and Farahnaki, R. (2018) Flexural Capacity Prediction for Reinforced Concrete Beams by Group Method of Data Handling Approach. *Computational Engineering and Physical Modeling*. 1 (3), 100–110.
- [35] Advisory Committee Technical Recommendations Construction (2007) CNR DT-203: Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars.
- [36] Canadian Standards Association (2012) Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-12). *CSA Group*. 208.
- [37] Canadian Network of Centers Structures (2007) Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers (ISISM03-07).
- [38] Engineers, J.S. of C. (1997) Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials (JSCE-1997). 64.
- [39] Gross, S.P., Yost, J.R., Dinehart, D.W., Svensen, E., and Liu, N. (2003) Shear Strength of Normal and High Strength Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. *High Performance Materials in Bridges*.
- [40] Guadagnini, M., Pilakoutas, K., and Waldron, P. (2006) Shear resistance of FRP RC beams: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*. 10 (6), 464–473.
- [41] Yost, J.R., Gross, S.P., and Dinehart, D.W. (2001) Shear Strength of Normal Strength Concrete Beams Reinforced with Deformed GFRP Bars. *Journal of Composites for Construction*. 5 (4), 268–275.
- [42] Ashour, A.F. (2006) Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*. 20 (10), 1005–1015.
- [43] Bentz, E.C., Massam, L., and Collins, M.P. (2010) Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*. 14 (6), 637–646.
- [44] Tottori, S. and Wakui, H. (1993) Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement. *Special Publication*. 138 615–632.
- [45] Nagasaka, T., Fukuyama, H., and Tanigaki, M. (1993) Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. *Special Publication*. 138 789–812.
- [46] Zhao, W., Maruyama, K., and Suzuki, H. (1995) Shear behavior of concrete beams reinforced by FRP rods as longitudinal and shear reinforcement. in: Rilem Proc, Chapman & Hall, p. 352.
- [47] Duranovic, N., Pilakoutas, K., and Waldron, P. (1997) Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structure*. 2 479–486.
- [48] Ivakhnenko, A.G. (1971) Polynomial theory of complex systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1 (4), 364–378.
- [49] Naderpour, H., Nagai, K., Fakharian, P., and Haji, M. (2019) Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. *Composite Structures*. 215, 69–84.
- [50] Rezazadeh Eidgahee, D., Rafiean, A.H., and Haddad, A. (2020) A Novel Formulation for the Compressive Strength of IBP-Based Geopolymer Stabilized Clayey Soils Using ANN and GMDH-NN Approaches. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 44 (1), 219–229.
- [51] Rezazadeh Eidgahee, D., Haddad, A., and Naderpour, H. (2019) Evaluation of shear strength parameters of granulated waste rubber using artificial neural networks and group method of data handling. *Scientia Iranica*. 26 (6), 3233–3244.
- [52] Smith, G.N. (1986) Probability and statistics in civil engineering. Collins London, .
- [53] Jahangir, H. and Rezazadeh Eidgahee, D. (2021) A new and robust hybrid artificial bee colony algorithm – ANN model for FRP-concrete bond strength evaluation. *Composite Structures*. 257 113160.
- [54] Naderpour, H., Rezazadeh Eidgahee, D., Fakharian, P., Rafiean, A.H., and Kalantari, S.M. (2020) A new proposed approach for moment capacity estimation of ferrocement members using Group Method of Data Handling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 23 (2), 382–391.