

A new model for determining the shear contribution of FRP in RC beams strengthened with U-shape FRP sheets

Masoud Ahmadi^{1*}, Mehdi Ebadi Jamkhaneh²

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

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

ABSTRACT

Due to their lightweight, high tensile strength, and ease to install on irregular surfaces, the use of FRP systems for the repair and strengthening of reinforced concrete structures has become an accepted practice within civil engineering community and codes. Extensive research has been conducted on structural members to identify the improvement in their flexural and axial capacity due to FRP strengthening. However, the analytical and experimental studies on shear strengthening with FRP systems, especially exact determining FRP contribution, are limited. This study provides a multi-layer artificial neural network and group method of data handling approach for predicting the shear contribution of FRP in RC beams strengthened by externally bonded FRP sheets. To achieve the main purpose; ultimate strain of FRP, thickness of FRP, elastic modulus of FRP, width, spacing and angle of FRP sheet, effective depth of FRP, width and of effective depth of beam, compressive strength of concrete, and shear span to depth ratio were considered as input parameters while the shear contribution of the FRP is calculated as the target one. In order to verify the validity of the proposed models, a comparative assessment was conducted between experimental results and predicted values obtained directly from the models and existing guideline equations such as ACI 440, fib-TG9.3, and JSCE. The results indicate that the proposed models could predict the shear contribution of FRP in RC beams strengthened by FRP sheets with a good degree of precision and can be used as a confident approach for pre-design concrete beams strengthened with externally bonded U-shape FRP plates.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2020

Revise Date: 11 July 2020

Accept Date: 30 September 2020

Keywords:

Shear
FRP sheet
Strengthening
Concrete beam
New model

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.230642.2137>

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

مدل جدید برای تعیین سهم ورقه‌های U-شکل FRP در ظرفیت برشی تیرهای بتنی مقاوم سازی شده

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

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

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه دامغان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از مصالح کامپوزیت FRP به دلیل وزن کم، مقاومت کششی بالا و آسانی اجرا در سطوح مختلف، بعنوان رویکردی مناسب برای تقویت و مقاومسازی اعضای بتن آرمه مطرح و مورد قبول مجامع مهندسی عمران و آئین نامه‌ها بوده است. از سوی دیگر تحقیقات گسترده‌ای بر روی تقویت خمشی و محوری اعضای بتن آرمه با استفاده از ورقه‌های FRP و میزان بهبود آن انجام شده اما میزان توجه به مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی مقاومت برشی اعضای مقاوم سازی شده با FRP و بخصوص تعیین دقیق سهم مصالح کامپوزیت نسبت به بحث مقاومت خمشی و محوری محدود بوده است. در این مطالعه با استفاده از روش مدیریت داده به روش گروهی و همچنین شبکه عصبی مصنوعی چند لایه، مدل‌هایی کارآمد برای تعیین سهم برش تحمل شده توسط ورقه‌های U-شکل FRP در تیرهای بتنی مقاومسازی شده بصورت خارجی ارائه شده است. همچنین با انجام آنالیز حساسیت، تغییرپذیری مدل‌های ایجاد شده نسبت به متغیرهای ورودی ارزیابی گردیده است. برای توسعه مدل‌ها، پارامترهای کرنش نهایی FRP، ضخامت FRP، مدول الاستیسیته FRP، میزان و نحوه اجرای FRP، ارتفاع موثر FRP، عرض تیر، عمق موثر تیر، نسبت دهانه برشی به عمق موثر و مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شده است. برای کنترل صحت نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده، نتایج آنها با مقادیر محاسبه شده از ضوابط ACI 440 و fib-TG9.3 و JSCE و براساس شاخص‌های آماری متنوع مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که مدل‌های ایجاد شده عملکرد مطلوبی داشته و می‌توانند بعنوان رویکردی مطمئن در پیش طراحی برشی تیرهای بتنی تقویت شده با ورقه‌های U-شکل FRP مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی: برش، ورقه‌های FRP، مقاومسازی، تیر بتنی، مدل جدید.

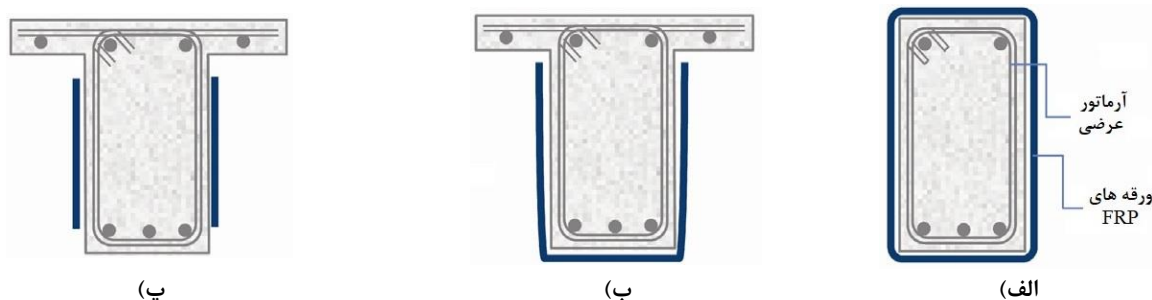
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.230642.2137	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2020.230642.2137	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۷/۰۹	۱۳۹۹/۰۴/۲۱	۱۳۹۹/۰۲/۲۱
مسعود احمدی masoud.ahmadi@abru.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن آرمه از جمله مصالحی است که به دلیل مواردی همچون اقتصاد طرح، اجرای مرحله‌ای، قابلیت قالب‌بندی و فرم دهی مناسب و دوام قابل قبول در برابر شرایط محیطی و حریق، به صورت قابل توجهی در ساخت و سازه‌های کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما بایستی به این نکته اشاره نمود که طراحی غیراصولی، اجرای نامناسب و شرایط محیطی مهاجم می‌تواند عملکرد یک عضو سازه‌ای بتن آرمه را بشدت تحت تاثیر قرار دهند. از اینرو سازه‌هایی که با چنین ضعف‌هایی روبرو هستند، عملکرد لرزه‌ای قابل قبولی نداشته و پس از رخداد زلزله خرابی‌های شدیدی در آنها ایجاد می‌گردد و حتی خرابی و تخریب کلی سازه نیز دور از انتظار نخواهد بود. در این بین، شکست برشی از خطرناکترین نوع خرابی در سازه‌ها می‌باشد. این نوع شکست بصورت ترد، ناگهانی و بدون اخطار اتفاق افتاده و خسارات مالی و جانی گسترده‌ای می‌تواند به همراه داشته باشد [1,2]. در این شرایط، مساله ارزیابی مناسب سازه‌های با عملکرد لرزه‌ای ضعیف و مقاومسازی و بهسازی آنها یک نیاز ضروری می‌باشد. از سوی دیگر مطالعه در رابطه با برش، شکست برشی و روشهای مناسب مقاومسازی برشی از جمله پژوهش‌هایی است که در سال‌های اخیر توجهات ویژه‌ای به آن انجام گرفته است.

برای نیل به عملکرد مناسب لرزه‌ای در سازه موجود، انتخاب روشهای مطلوب مقاومسازی که متاثر از عواملی همچون: اقتصاد، قابلیت اجرا (تهیه مصالح و نیروهای ماهر) و عملکرد بلند مدت بخصوص در زمینه دوام، می‌تواند باشد که به صورت مستقیم به تجربه مهندس طراح وابسته است. از سوی دیگر تکنولوژی و روش‌های مقاومسازی متنوعی در سال‌های اخیر در کشور مورد استفاده قرار گرفته که قابلیت انتخاب‌های متنوع تری را امکان می‌دهد. الیاف مسلح شده پلیمری (FRP) بعنوان یکی از روش‌های مدرن مقاومسازی شناخته می‌شود که میزان استفاده از نوع ورقه‌ای آن در سال‌های اخیر بدلیل مزایایی مانند: وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت کششی بالا و خواص ضد مغناطیسی، گسترش زیادی داشته است [3]. کامپوزیت FRP نوعی ماده مرکب است که از دو بخش تشکیل می‌شود. بخش اول فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله بخش دوم یعنی ماتریس احاطه شده است [4].

استفاده از ورقه‌های FRP بصورت خارجی برای مقاومسازی برشی از جمله کارآمدترین روش‌ها است که مطالعه‌های زیادی را در سال‌های اخیر به خود اختصاص داده است [5]. استفاده از این تکنیک به سه روش: (۱) چسباندن FRP در دور مقطع بصورت کامل (پوشش کامل)، (۲) چسباندن FRP در سه وجه (U-شکل) و (۳) چسباندن FRP در دو وجه، قابلیت اجر دارد [6] که بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه استفاده از ورقه‌های FRP برای مقاومسازی برشی تیر، الف) چسباندن FRP در دور مقطع بصورت کامل (پوشش کامل)، ب) چسباندن FRP در سه وجه (U-شکل)، پ) چسباندن FRP در دو وجه.

در مراحل اولیه استفاده از تکنیک چسباندن ورقه‌های FRP بصورت خارجی نوع اجرا در دو وجه بدلیل اجرای آسانتر مورد توجه قرار گرفت [7-10]. Dolan و همکارانش [11] چند تیر بتنی را با انواع مختلف FRP شامل مصالح کربنی، آرامیدی و شیشه‌ای مقاومسازی و مورد تست قرار دادند و نشان دادند تیرهایی که با مصالح آرامیدی مقاومسازی شده اند از نظر شکل‌پذیری عملکرد بهتری دارند [12]. در سال ۱۹۹۴، Täljsten مطالعه‌ای با هدف مقایسه نوارهای CFRP و GFRP و AFRP و ورقه‌های فولادی انجام داد. نتایج این مطالعه نشان

داد که مقاومت‌سازی برشی تیرها با مصالح FRP نتیجه مطلوب‌تری نسبت به تقویت با استفاده از ورق‌های فولادی به دست می‌دهد [13]. Chajes و همکارانش تیرهایی را با انواع مختلف کامپوزیت FRP مقاومت‌سازی کرده و مورد تست قرار دادند. در این تحقیق تأثیر زاویه بین راستای الیاف FRP با محور تیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و مشاهده گردید در صورتی که این زاویه برابر با ۴۵ درجه باشد، کامپوزیت عملکرد بهتری خواهد داشت. آنها عملکرد FRP را با فرض محدودیتی برای کرنش آن، مشابه خاموت‌های فولادی گزارش کردند [14]. Vielhaber و Limberger با انجام آزمایشاتی روی تیرهای بتنی بزرگ مقیاس مقاومت‌سازی شده با FRP نشان دادند که حتی استفاده از مقدار کمی تقویت کننده خارجی، از بروز انهدام برشی ترد جلوگیری می‌کند [15].

بر اساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی، سهم ورقه‌های FRP چسبیده شده بصورت خارجی در ظرفیت برشی مقطع قابل صرفنظر کردن نبوده اما در اکثر موارد بدلیل پدیده جدشدگی کامپوزیت نمی‌توان از کل ظرفیت این مصالح در برش استفاده کرد [16,17]. برای حل این مشکل دو راه حل ارائه شد: الف) مهار کردن دو انتهای FRP به روش‌های مرسوم و ب) استفاده از مهار مکانیکی.

Khalifa و Nanni [18] به بررسی تأثیر استفاده از مهار مکانیکی بر روی عملکرد FRP پرداختند. آنها تعدادی تیر بتنی را در دو حالت بدون مهار مکانیکی و با مهار مکانیکی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از مهار از جدشدن FRP از روی سطح بتن جلوگیری به عمل می‌آورد و در شرایط یکسان تیر دارای مهار عملکردی بهتری از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق یک الگو برای مهار کردن FRP در مقاومت‌سازی به صورت U شکل ارائه شده است. Gamino و همکارانش [19] هفت تیر بتنی شامل دو تیر مقاومت‌سازی شده در برش و پنج تیر کنترلی را مورد آزمایش قرار دادند. از بین پنج تیر تقویت شده، دو تیر دارای مهار مکانیکی و سه تیر دیگر فاقد مهار بودند. نتایج تأثیر به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد تیرهای دارای مهار عملکرد بهتری نسبت به تیرهای مقاومت‌سازی شده فاقد مهار دارند. همچنین مقدار سهم برش FRP در تیرهای مقاومت‌سازی شده توسط روابط آئین نام 440 ACI و 14 fib محاسبه گردید و مشخص شد مقادیر به دست آمده خطای زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارند. قابل ذکر است که استفاده از این دو روش نیازمند تعلیم نیروی کار ماهر و تحمیل هزینه‌های اضافی می‌باشد [20,21]. در مراحل بعدی تحقیقات برای کاهش یا رفع پدیده جدشدگی استفاده از دو روش چسباندن FRP در سه وجه (U-شکل) و چسباندن FRP در دور مقطع بصورت کامل مورد توجه قرار گرفتند [18,22-27]. از سوی دیگر اجرای U-شکل نیاز به تخریب سقف ندارد و نتایج مطالعات نشان داده است که اجرای صحیح این روش افزایش مشابهی در بهبود ظرفیت برشی در مقایسه با اجرای پوشش کامل دارد [28,29].

بر اساس آزمایش‌های انجام شده و مطالعات متعدد عددی و تحلیلی در زمینه تخمین ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه مقاومت‌سازی شده، روابطی در آئین نامه‌ها و دستورالعمل طراحی پیشنهاد شده است [30-34]. بایستی در نظر داشت که این روابط برای بازه محدودی از پارامترهای موثر در ظرفیت برشی بررسی شده و از اینرو محدودیت‌هایی در روابط وجود دارد. همچنین عمده روابط پیشنهادی بر اساس رگرسیون خطی توسعه داده شده‌اند. قابل ذکر است که مقایسه اولیه بین روابط موجود و نتایج آزمایشگاهی توسط نویسندگان مقاله نشان داده است که به دلیل پیچیدگی در مکانیزم انتقال برش، تعیین دقیق ظرفیت برشی اعضای بتن آرمه با روابط موجود به آسانی قابل محاسبه نبوده که بخشی از نتایج این مقایسه در بخش‌های آتی ارائه شده است. از اینرو استفاده از روش‌های تحلیل متنوع می‌تواند در فهم صحیح‌تر سهم ورقه‌های FRP چسبیده شده بصورت خارجی در ظرفیت برشی مقطع نقش موثری داشته باشد.

روش‌های مبتنی بر سیستم‌های هوشمند جز روش‌های جدید و با عملکرد مطلوبی هستند که در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. شبکه عصبی مصنوعی چندلایه (MLP) [35] و رویکرد مدیریت داده به روش گروهی (GMDH) [36] از جمله روش‌هایی هستند که در مسائل مهندسی عمران به صورت قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفته و مدل‌های توسعه داده شده بر این مبنا قابلیت اطمینان مطلوبی دارند [37-43]. از اینرو در این مطالعه برای نیل به رویکردی جدید در زمینه تعیین سهم کامپوزیت در مقاومت برشی نهایی تیرهای مقاومت‌سازی، از رویکردهای MLP و GMDH استفاده شده است.

۲- روابط موجود در تعیین ظرفیت برشی تیرهای مقاومسازی شده

تا کنون روابط معتبر محدودی در رابطه با تخمین سهم برشی FRP در تیرهای بتنی مقاوم سازی شده در برش ارائه شده است. در این بخش روابطی که جهت اعتبار سنجی نتایج مدل های ارائه شده برای محاسبه ظرفیت برشی FRP مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۱ به اختصار آورده شده است. این روابط عمدتاً حاصل رگرسیون و سعی و خطا بین نتایج آزمایشگاهی می‌باشند. یکی از ضعف‌های عمده مدل‌های موجود آن است که این روابط با استفاده از تعداد محدودی داده آزمایشگاهی به دست آمده‌اند و همین امر کاربرد روابط پیشنهادی در محدوده گسترده تر را میسر نمی‌سازد. به عنوان مثال می‌توان به روابط موجود در استاندارد ACI 440 [31] اشاره کرد. برای محاسبه سهم برشی FRP توسط روابط موجود در این استاندارد چند پارامتر را باید محاسبه نمود. یکی از این پارامترها، پارامتر k_2 می‌باشد. در این رابطه چنانچه پارامتر l_e بزرگتر از عمق موثر FRP (d_f) باشد، مقدار k_2 منفی می‌شود و از آنجا که مقدار سهم برشی FRP به صورت حاصلضرب مقدار k_2 در چند پارامتر دیگر به دست می‌آید، به این ترتیب سهم برشی FRP کوچکتر از صفر به دست می‌آید و این موضوع خلاف واقع می‌باشد. در این مطالعه تلاش شده است مدل‌هایی برای محاسبه سهم برشی FRP به دست آید که کاربرد آن، چنین محدودیت‌هایی نداشته باشد. همچنین برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، خطای نتایج حاصل از آنها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی با خطای مقادیر به دست آمده از روابط موجود در آئین نامه‌ها نیز مقایسه می‌شود.

جدول ۱- روابط آئین نامه‌ها و دستورالعمل‌ها

رابطه ارائه شده	آئین نامه/دستورالعمل
$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f (\sin \alpha + \cos \alpha)}{S_f}$ $A_{fv} = 2nt_f w_f$ $f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$ $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004$ $K_v = \frac{k_1 k_2 l_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$ $l_e = \frac{23300}{(nt_f E_f)^{0.58}}$ $k_1 = \left[\frac{f_c'}{27} \right]^{2/3}$ $k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - l_e}{d_f} & \text{برای پوشش } U - \text{شکل} \\ \frac{d_f - 2l_e}{d_f} & \text{برای پوشش دوطرفه} \end{cases}$	ACI 440 [31]
$V_{fd} = K \left[A_f f_{fud} \frac{\sin \alpha_f + \cos \alpha_f}{S_f} \right] * Z/\gamma_b$ $K = 1.68 - 0.67R, \quad 0.4 \leq K \leq 0.8$ $R = (\rho_f E_f)^{0.25} \left(\frac{f_{fud}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f_{cd}} \right)^{1/3}$ $0.5 \leq R \leq 2.0$ $\rho_f = \frac{A_f}{b_w S_f} = \frac{t_f w_f}{b_w S_f} = \frac{w_f}{S_f} * \frac{t_f}{b_w}$	JSCE [44]
$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{f,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$ $\rho_f = 2t_f \frac{\sin \alpha}{b_w}$ $\rho_f = \frac{2t_f b_f}{b_w S_f}$	برای تقویت با ورق‌های پیوسته برای تقویت با نوارهای منقطع fib-TG9.3 [30]

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[\underbrace{0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}}_{\text{peeling-off}}, \underbrace{0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.3}}_{\text{fracture}} \varepsilon_{fu} \right]$$

۳- دیتابیس آزمایشگاهی

به عنوان گام اول برای تهیه اطلاعات کافی برای آموزش، و تست شبکه های عصبی پرسپترون چند لایه و رویکرد مدیریت داده به روش گروهی، یک مجموعه از نتایج آزمایشگاهی جامع در ارتباط با مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت FRP جمع آوری شده است. تعداد نمونه های گردآوری شده ۹۴ تیر بتنی است که با استفاده از کامپوزیت FRP و بصورت U-شکل مقاوم سازی برشی شده اند. اطلاعات مرتبط با این نمونه ها در پیوست ۱ ارائه شده است.

۳-۱- بررسی تاثیر پارامترها بر سهم مقاومت برشی FRP

بر اساس نتایج آزمایش برشی تیرهای معمولی، مشخص شده است که پارامترهایی همچون ابعاد تیر، مقاومت فشاری بتن، نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثر (a/d) و خاموتها از اساسی ترین پارامترها در مقاومت برشی تیرهای معمولی می باشند که می توانند در این مطالعه نیز مدنظر قرار گیرند. در جدول ۲ پارامترهای موثر در نظر گرفته شده در روابط آیین نامه ها مورد بررسی قرار گرفته است. این جدول نشان می دهد که آئین نامه fib-TG9.3 بیشترین تعداد پارامترها را در نظر گرفته است. اما در این رابطه نیز پارامترهایی همچون نسبت a/d و ابعاد تیر در نظر گرفته نشده اند.

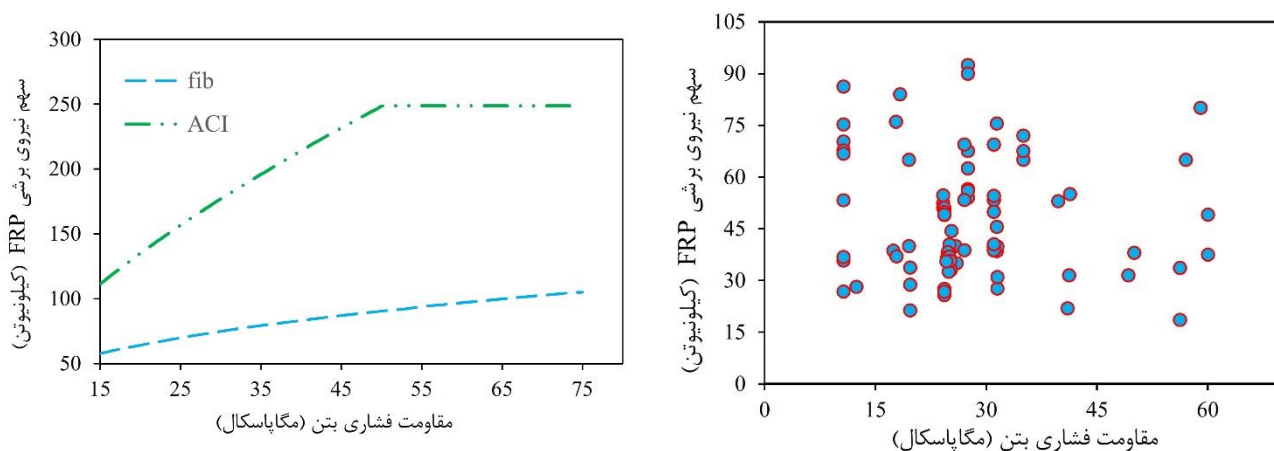
جدول ۲- پارامترهای موثر در مقاومت برشی FRP در آیین نامه های موجود

پارامتر	ACI 440	fib-TG9.3	JSCE
مقاومت فشاری بتن	√	√	√
کرنش FRP	√	√	√
درصد FRP	√	√	√
شکل مقاومسازی	√	√	-
نسبت a/d	-	-	-
ابعاد تیر	-	-	-

۳-۱-۱- بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن

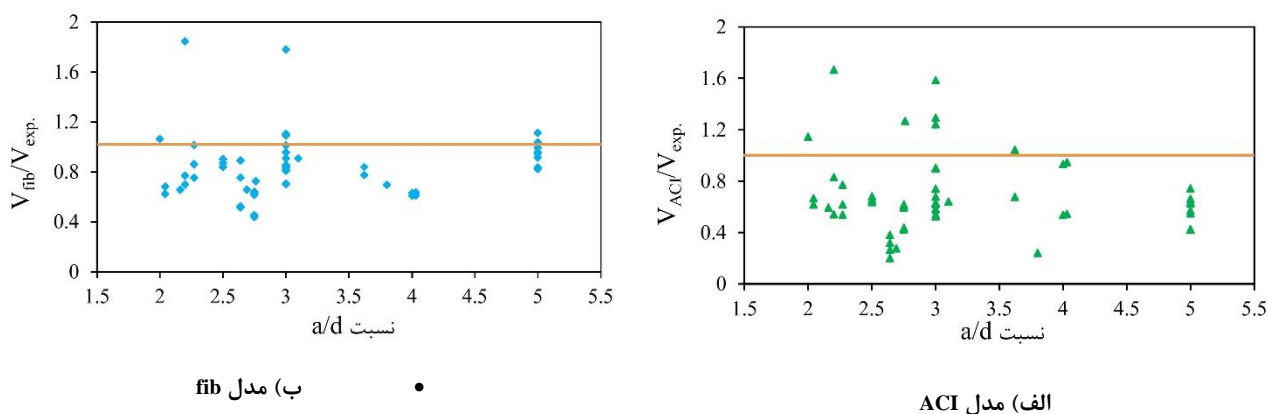
نمودار توزیع مقادیر مقاومت برشی در کل دیتابیس در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی های Chen و Teng [45] نشان داده است که مقاومت فشاری نقشی موثر بر سهم مقاومت برشی FRP در تیرهایی که بصورت U-شکل مقاومسازی شده اند، دارد که توصیه شده است در محاسبات در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، مطالعات آزمایشگاهی Li و همکاران [46] نشان داده است که ظرفیت پیوستگی بین FRP و بتن بصورت اساسی متاثر از اثرات مشترک مقاومت بتن و طول پیوستگی FRP است. برای درک بهتر تاثیر مقاومت فشاری، فرض می شود که یک تیر بتن آرمه به عرض ۲۵۰ میلیمتر، ارتفاع ۴۱۰ میلیمتر، نسبت a/d=3 که توسط CFRP ($E_f = 230 \text{ GPa}$) و بصورت U تقویت شده در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری بتن را در محدوده ۱۵ تا ۷۵ مگاپاسکال تغییر داده و سهم مقاومت برشی FRP

محاسبه و نمودار آن در شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که آیین نامه fib-TG9.3 در مقایسه با ACI نسبت به مقاومت فشاری بتن حساستر است.



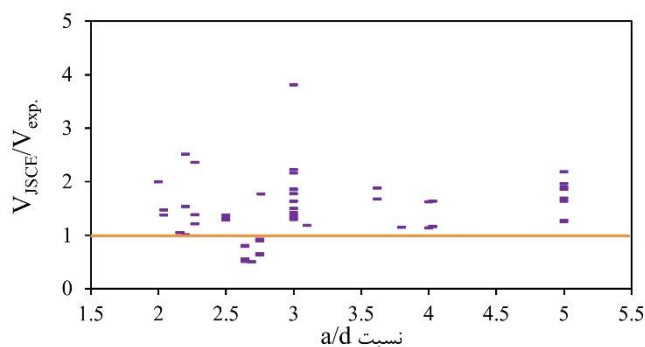
شکل ۲- تاثیر مقاومت فشاری بتن در سهم برشی FRP در نمونه های آزمایشگاهی جمع آوری شده

شکل ۳- تاثیر تغییرات مقاومت فشاری بتن در سهم برشی FRP



ب) مدل fib

الف) مدل ACI



ب) مدل JSCE

شکل ۴- تاثیر تغییرات نسبت a/d بر مقادیر پیش بینی شده توسط ACI, fib و JSCE.

۳-۱-۲- بررسی تاثیر نسبت دهانه برشی به عمق موثر

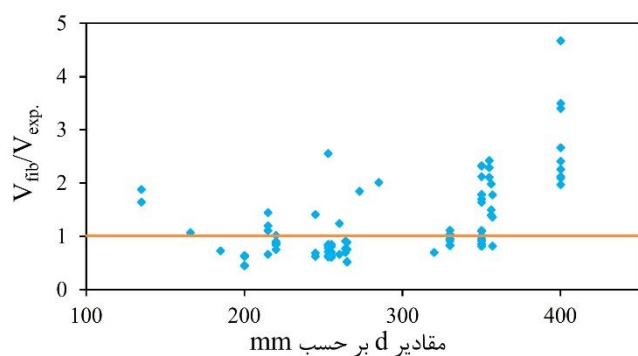
مطالعات انجام شده [27,47-49] نشان داده است که نسبت a/d بر روی حالت خرابی و همچنین اثربخشی FRP تاثیرگذار خواهد بود. در صورتیکه نسبت a/d بسیار کم باشد، تنش FRP به آرامی به دلیل عملکرد قوسی بتن افزایش می‌یابد که در نهایت سبب می‌شود از تمام قابلیت های آن استفاده نشود. از اینرو توصیه می‌شود برای مقاوم سازی خارجی با FRP این پارامتر بصورت ویژه مورد نظر قرار گیرد. همچنین بررسی مدل Chen و همکاران [50] و مدل پیشنهادی توسط Zhang و همکاران [51] نشان داده است که پارامتر a/d بایستی در مدل پیشنهادی در این مطالعه در نظر گرفته شود. در شکل ۴ اثر تغییرات نسبت a/d در نسبت مقدار پیش بینی شده به مقدار واقعی نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۴ مشخص است، نسبت a/d اکثر نمونه های آزمایشگاهی موجود در بازه ۲ تا ۳ بوده و مقادیر بسیار کم و زیاد برای نسبت a/d در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر بیشتر پیش بینی های آئین نامه JSCE دارای عدم ایمنی می باشد.

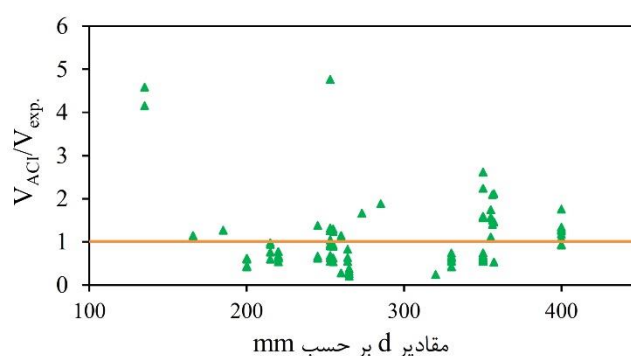
۳-۱-۳- بررسی تاثیر ابعاد تیر

ظرفیت برشی تیر بتن آرمه مقاوم سازی شده با FRP بصورت خارجی می تواند با افزایش ابعاد تیر کاهش یابد. مطالعات انجام شده در این زمینه [52,53] نشان داده است که افزایش در ابعاد تیر اثرات قابل توجهی در سهم برشی FRP خواهد گذاشت. همچنین بررسی ها نشان داده است که این اثر بر روی تیرهای مقاوم سازی شده با FRP بصورت U- شکل بایستی مدنظر قرار گیرد [53,54].

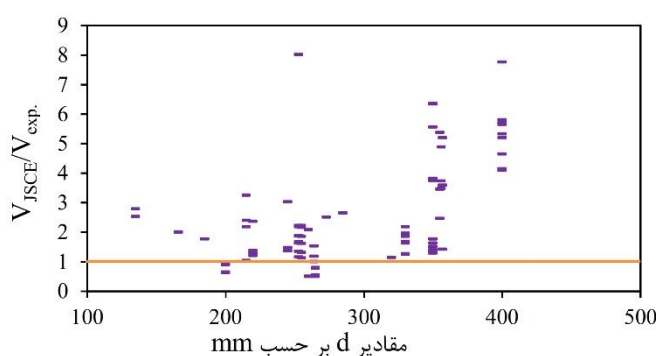
نتایج بررسی دیتابیس نشان می دهد که اکثر داده ها در محدوده کمتر از ۳۵۰ میلیمتر قرار دارند. بایستی به این نکته توجه داشت که مدل های توسعه داده شده در این مطالعه در محدوده ارتفاع کمتر از ۴۰۰ میلیمتر بهترین عملکرد را داشته و برای مقادیر خارج از این محدوده بایستی با بررسی های بیشتری مورد استفاده قرار گیرند. اثرات تغییر مقادیر ارتفاع تیر بر روی مقاومت برشی FRP بر اساس آئین نامه های ACI 440، fib و JSCE در شکل ۵ نشان داده شده است.



ب) مدل fib



الف) مدل ACI



پ) مدل JSCE

شکل ۵- تاثیر تغییرات نسبت d بر مقادیر پیش بینی شده توسط ACI, fib و JSCE.

۴- شبکه عصبی چند لایه (MLP) و رویکرد مدیریت داده به روش گروهی (GMDH)

در شبکه های عصبی مصنوعی بلوکهای ساختاری و یا نورونها دستگاههای محاسباتی هستند و ارتباط بین نورونها عملکرد شبکه را تعیین می کند و هدف از آموزش شبکه های عصبی مصنوعی تعیین ارتباط مناسب، جهت حل مسائل مختلف است. در واقع شبکه های عصبی مصنوعی با ایده گرفتن از رفتار شبکه عصبی بیولوژیکی شکل یافته است. در این شبکه ها نیز عموماً لایه های موازی نورونها را می بینیم که نورونهای هر لایه نقش خاصی را ایفا می کنند. معمولاً ورودیهایی که از خارج به شبکه عصبی داده می شوند، به دسته ای از نورونها که در یک لایه مرتب شده اند، اعمال می شود. این ورودیها با وزنهای خاص جمع شده به تابع تحریک هر نورون فرستاده می شوند که این اقدام به پردازش جمع وزن دار ورودیهای اعمال شده به نورون می کند و خروجی نورون را به لایه های بعدی و نهایتاً به لایه خروجی می فرستد که جواب شبکه نسبت به ورودیهای اعمال شده به آن است.

رویکرد مدیریت داده به روش گروهی (GMDH) توسط Ivakhenko [36] معرفی گردید و تاکنون برای کاربردهای پیش بینی و رگرسیون به صورت کارآمدی مورد استفاده قرار گرفته است [55-58]. این روش با ترکیب چند جمله ایهای درجه دوم، بر اساس رابطه ۱ تابع هدف Y را بصورت \hat{Y} تقریب می زند.

$$\hat{Y}(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i f_i \quad (1)$$

که \hat{Y} تابع هدف، f تابع پایه وابسته به ورودی ها، a ضرایب و m تعداد توابع پایه می باشد. پرکاربردترین تابع پایه مورد استفاده در رویکرد GMDH، چندجمله ای Kolmogorov است. بر اساس این چندجمله ای رابطه ۱ بصورت رابطه ۲ بازنویسی می شود.

$$\hat{Y}(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

رویکرد GMDH، شبکه ای خودسازمانده است که از چندین لایه و هرلایه از چندین نورون تشکیل می شود. برای نیل به حالت بهینه ابتدا تعدادی مدل های جزئی ایجاد و از بین آنها مدل های جزئی کارآمد انتخاب و درنهایت مدل نهایی ایجاد می شود. ساخت و انتخاب مدل های جزئی چندین بار تکرار می شود تا بهترین حالت پیدا شود. برای ساخت مدل های جزئی از معادله ۳ استفاده می شود.

$$\hat{y} = z(x_i, x_j) = c_0 + c_1 x_i + c_2 x_j + c_3 x_i^2 + c_4 x_j^2 + c_5 x_i x_j \quad (3)$$

ضرایب این معادلات جزئی بر اساس روش کمترین مربعات تعیین می شوند.

ویژگی شاخصی که در این نوع از شبکه ها مشاهده می گردد حاکی از آن است که از میان نورون های تولید شده، لزوماً بایستی تعدادی از آن ها حذف گردند تا بدین وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری به عمل آید. اصطلاحاً به این گونه نورون های حذف شده، نورون مرده گفته می شود. نورون هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می ماند، امکان دارد برای ایجاد فرم همگرایی شبکه و عدم ارتباط آن ها با نورون لایه آخر حذف گردند که اصطلاحاً به آنها نورون غیرفعال می گویند.

۵- مدل های جدید محاسبه سهم برش کامپوزیت FRP

در این بخش نتایج مرتبط با مدل های ایجاد شده به کمک شبکه عصبی چند لایه و رویکرد GMDH ارائه می گردد.

۵-۱- شبکه عصبی مصنوعی چند لایه

در این مطالعه برای ایجاد شبکه های عصبی مصنوعی چهار گام انجام شده است: الف) تهیه و جمع آوری داده های مورد نیاز برای آموزش شبکه، ب) ایجاد شبکه، پ) آموزش شبکه، ت) شبیه سازی شبکه با داده های جدید برای بررسی عملکرد شبکه بعد از جمع آوری داده های مناسب برای استفاده در شبکه، تصمیم گیری در مورد انتخاب پارامترهای موثر در مقادیر هدف امر مهمی می باشد. این امر با استناد به روابط موجود در استانداردها و دستورالعمل های موجود [۳-۷] و همچنین با بررسی مقالات و تحقیقات انجام شده [۳۸-۴۰] انجام شد. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که سهم برشی FRP تحت تأثیر عواملی همچون: کرنش نهایی FRP (ϵ_f)، عمق موثر FRP (h_f)، عرض نوارهای FRP (W_f)، زاویه بین محور تیر با راستای الیاف FRP (α)، مقاومت فشاری بتن (f_c)، مدول الاستیسیته FRP (E_f)، ضخامت (مجموع ضخامت) لایه های FRP (t_f)، نسبت a/d و عرض تیر (b_w) می باشد. از طرف دیگر در شرایط مساوی، هرچه تعداد گره های ورودی شبکه کمتر باشد، عملکرد شبکه و پروسه یافتن رابطه بین متغیرها بهتر انجام می پذیرد. لذا برای کاهش تعداد گره های ورودی، تصمیم گرفته شد که برخی از پارامترها با یکدیگر ترکیب شوند. روند ترکیب داده ها بر اساس روابط معتبر موجود و به شرح زیر انجام شد.

با توجه به روابط استانداردها مشخص می شود که سهم برشی FRP با عرض نوارها رابطه مستقیم و با فاصله مرکز به مرکز نوارها رابطه معکوس دارد. همچنین بهترین عملکرد FRP زمانی حاصل می شود که زاویه اعمال بار با راستای الیاف موازی باشد. با توجه به مکانیسم انهدام برشی که در فصل دوم مطرح شد، نیروهای برشی موجود در تیر با محور تیر زاویه ای نزدیک به ۴۵ درجه تشکیل می دهند (چنانچه تنش های خمشی نیز در نظر گرفته شوند، این زاویه اندکی تغییر می کند). در نتیجه زمانی که راستای الیاف مورد استفاده در مقاوم سازی برشی نسبت به محور تیر برابر با ۴۵ درجه باشد، FRP بهترین عملکرد را از خود نشان خواهد داد. معمولاً FRP را به گونه ای روی تیر می چسبانند که الیاف آن با محور تیر زاویه صفر، ۴۵ یا ۹۰ درجه می سازد. به همین دلیل برای تأثیر دادن حداکثر عملکرد FRP

در زاویه ۴۵ درجه، پارامتر $(\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha$ بر اساس آئین نامه fib در نظر گرفته شده است. از ترکیب پارامتر ρ_f و $(\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha$ عبارت زیر در ورودی شبکه استفاده شده است.

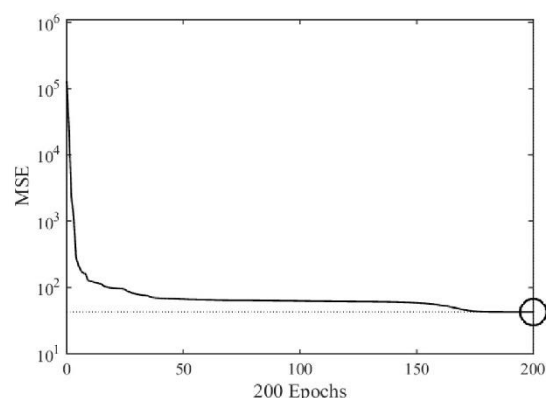
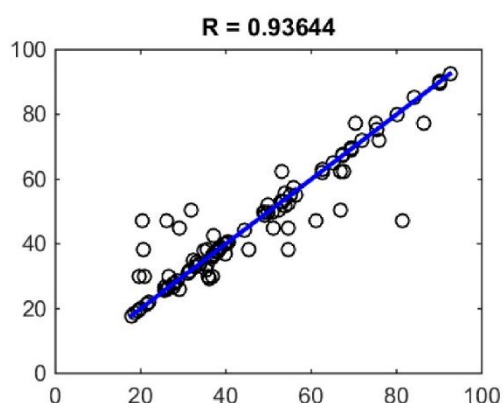
- $M = \rho_f * (\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha$
- $\rho_f = \left(\frac{2t_f}{b_w}\right) * \left(\frac{b_f}{s_f}\right)$

بر اساس روابط موجود، دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضخامت FRP، هر دو رابطه مستقیمی با سهم برشی کامپوزیت دارند. از طرف دیگر این دو عامل در بیشتر روابط موجود بصورت ضرب در یکدیگر بر روی سهم برشی FRP تأثیر می گذارند. البته در این مطالعه از اثرات مجزا هر کدام برای بالا بردن دقت استفاده شده است. در کل تعداد ۹ ورودی برای شبکه انتخاب گردیده است:

-۱	$\varepsilon_{f,e}$
-۲	E_f
-۳	t_f
-۴	$M = \rho_f * (\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha$
-۵	b_w
-۶	h_f
-۷	a/d
-۸	d
-۹	f_c

۹ مشخصه ذکر شده به عنوان ورودی‌های شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند و خروجی شبکه، مقاومت برشی FRP است.

قبل از آموزش بهتر است ورودی‌ها و هدف را مقیاس بندی کنیم تا در یک محدوده خاص قرار گیرند. با توجه به پارامترهای ورودی شبکه مشخص است که اعداد ورودی و خروجی و همچنین دامنه تغییرات آنها با یکدیگر بسیار متفاوت است. از این رو برای یکنواخت کردن مقادیر ورودی و خروجی، قبل از شروع آموزش شبکه لازم است دامنه تغییرات داده‌ها را به یکدیگر نزدیک کنیم تا پراکندگی آنها خللی در عملکرد شبکه ایجاد نکند. در روش مورد استفاده در این مطالعه، تمامی اعداد ورودی و نیز مقادیر مربوط به بردار هدف با توجه به مقدار حداقل و حداکثر هر یک از پارامترها، بین ۰/۱ تا ۰/۹، مقیاس می‌شوند. ملاک توقف آموزش شبکه‌ها، خطای میانگین مربعی (MSE) است که میانگین تفاوت مربعی بین مقادیر خروجی و هدف می‌باشد. مقادیر کمتر به معنای عملکرد بهتر شبکه بوده و مقدار صفر به معنی عدم وجود خطا می‌باشد. عاملی که در تشخیص شبکه مناسب موثر است، مقادیر رگرسیون (R) داده‌ها هستند که همبستگی بین خروجی‌ها و هدف‌ها را در شبکه‌ها اندازه‌گیری می‌کنند. به نحوی که R=1 به معنی ارتباط کامل بوده و R=0 نشان دهنده رابطه تصادفی است. این دو معیار یعنی MSE و R به عنوان اساس انتخاب شبکه ایده آل در نظر گرفته شده‌اند. پس از بررسی دو معیار فوق و همچنین قدرت پیش‌بینی شبکه‌ها، شبکه با تعداد ۹ نورون در لایه پنهان به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید. نمودار مربوط به مقادیر میانگین مربعات خطا در گام‌هایی مختلف برای بهترین شبکه ایجاد شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، گام‌های آموزش به نحوی پیش رفته‌اند که مقادیر خطا در ابتدای یادگیری مقدار قابل توجهی است که این مقدار در گام ۲۰۰ به کمترین مقدار ممکن خود رسیده است و تقریباً در همین مقدار به صورت ثابت باقی مانده است. همچنین نمودار مربوط به ضریب همبستگی در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شبکه از تابع انتقال tansig و purelin به ترتیب در لایه‌های پنهان و خروجی استفاده شده است.



شکل ۶- نمودار عملکرد شبکه آموزش داده شده با تعداد ۹ شکل ۷- نمودار ضریب R شبکه آموزش داده شده با تعداد ۹ نورون در لایه پنهان نورون در لایه پنهان

برای در دسترس بودن اطلاعات شبکه عصبی دولایه ایجاد شده و امکان استفاده راحتتر، مقادیر وزنها و بایاسها برای در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- پارامترهای موثر در مقاومت برشی FRP در آیین نامه های موجود

0.6614	1.080	0.8869	1.347	4.4896	-4.487	1.358	0.120	-2.514	ماتریس ضرایب وزنی برای لایه اول
9.0747	-3.214	8.7338	-6.652	-7.090	3.3255	-1.978	-1.56	-1.968	
3.1104	-1.5567	-0.3692	5.3410	-7.5303	6.9566	-3.913	-2.06	1.3268	
-0.248	-6.2665	-1.7449	-0.4739	-1.5186	-1.0413	-2.830	8.103	4.9903	
-1.056	-0.7164	0.1608	-7.2589	-2.9562	0.3885	4.0356	2.991	-0.617	
-5.443	1.8379	-2.969	-3.2962	2.1226	-1.812	2.1596	-0.56	2.385	
-11.54	-9.691	7.0322	13.173	-1.492	9.3467	5.5742	-6.65	-52.07	
-12.38	0.3864	-8.925	4.4731	8.0545	-0.598	1.6745	1.645	2.985	
-12.47	-5.383	3.5914	7.348	3.7636	6.7046	0.3803	-5.99	-24.63	
ترانهاده ماتریس بایاس برای لایه اول									
[0.9717	1.4533	-2.591	-4.1814	-0.4081	1.1081	1.1081	-0.6037	-2.5517	-1.4205]
ماتریس ضرایب وزنی برای لایه دوم									
[-8.427	-12.332	-6.958	-2.984	-3.269	-3.793	-27.403	-12.956	32.089]	
ماتریس بایاس برای لایه دوم [-3.71944]									

۵-۱-۱- آنالیز حساسیت شبکه عصبی مصنوعی چند لایه

در سالهای اخیر بیشتر تحقیقات در زمینه شبکه‌های عصبی مربوط به توسعه روش‌های یادگیری شبکه و همچنین ارائه شبکه‌های جدید است و تحقیقات کمی در زمینه فرآیند و ماهیت یادگیری شبکه و اختصاص وزن‌های ورودی انجام شده است. از سال ۱۹۸۰ تا کنون روش‌های گوناگونی برای تفسیر شبکه‌های Feedforward انجام شده است. این روشها در دو گروه کلی زیر تقسیم بندی می‌شوند: الف) آنالیز بر اساس اندازه وزن‌ها و ب) آنالیز حساسیت.

آنالیز بر اساس اندازه وزن‌ها به طور خاص بر اساس مقادیر ذخیره شده در ماتریس وزن‌ها برای تعیین تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی تمرکز دارد. تاکنون روابط گوناگونی در رابطه با روش اندازه وزن‌ها ارائه شده است. در این مطالعه از رابطه ارائه شده توسط Garson [59] برای محاسبه تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی استفاده شده است.

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^L \left(\frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^N w_{rj}} v_{jk} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^L \left(\frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^N w_{rj}} v_{jk} \right) \right)} \quad (4)$$

در این رابطه، N : نورون‌های ورودی، L : نورون‌های پنهان، $\sum_{r=1}^N w_{rj}$: مجموع وزن‌های بین N نورون ورودی و j نورون پنهان و Q_{ik} : درصد تاثیر پارامتر ورودی x_i بر خروجی y_k است. پس از محاسبه رابطه ۴ مقادیر تاثیر در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داده است که مشخصات FRP و پارامترهای M و a/d بیشترین تاثیر را دارا هستند.

جدول ۴- درصد تاثیر پارامترهای ورودی بر خروجی شبکه

پارامتر	ε_{fe}	E_f	t_f	M	b_w	h_f	d	a/d	f_c
درصد تاثیر	۱۷/۳۲	۱۰/۷	۱۳/۱۴	۱۱/۶۴	۵	۱۶/۴۳	۸/۹۷	۹/۳	۷/۵

۵-۲- رویکرد GMDH

با استفاده از رویکرد GMDH و براساس ۹ پارامتر ورودی که در بخش ۵-۱ اشاره شدند، رابطه‌ای جدید برای محاسبه ظرفیت برشی FRP در تیرهای مقاومسازی شده به صورت U-شکل بر اساس معادله زیر توسعه داده شده است.

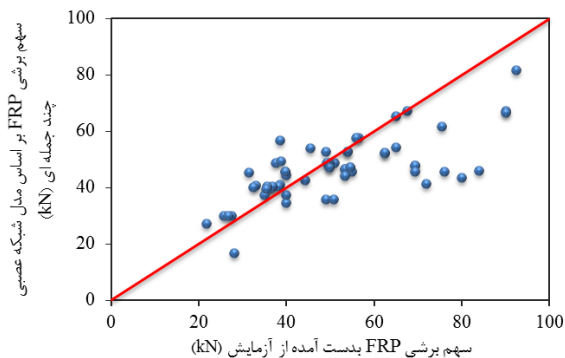
$$V_{frp} = V(\varepsilon_{fe}, E_f, t_f, M, b_w, h_f, d, \frac{a}{d}, f_c) \quad (5)$$

فرآیند آموزش سیستم مورد استفاده در این مطالعه براساس روش بسط فشار انتخاب شده است. از اینرو تعداد لایه‌ها و نیز تعداد نورون‌های هر لایه به صورت کاملاً خودکار و بهینه تعیین می‌گردند. لذا الگوریتمی را که برای این منظور در نظر گرفته شده است بدین گونه عمل می‌کند که برای هر لایه ضریب همبستگی مبنای R^2 که میانگین ضریب همبستگی‌های (R_j^2) از تعداد مشخص (V) از بهترین نورون‌ها (از لحاظ خطا) می‌باشد، مشخص می‌شود. سپس ضریب همبستگی مبنای R^2 را با ضریب همبستگی R_j^2 هر نورون مقایسه می‌شود. در صورتی که $R_j^2 \leq R^2$ باشد، نورون مربوطه به عنوان نورون برنده انتخاب شده و در ساختار اصلی شبکه باقی می‌ماند در غیر این صورت به عنوان نورون مرده از ساختار حذف می‌گردد. برای آموزش سیستم از ۷۰ درصد داده‌ها استفاده شده و ۳۰ درصد باقیمانده برای تست مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد زیادی سیستم ایجاد شده و در بین آنها سیستمی که بهترین عملکرد را دارد به عنوان سیستم بهینه (رابطه ۶) بدست آمده است.

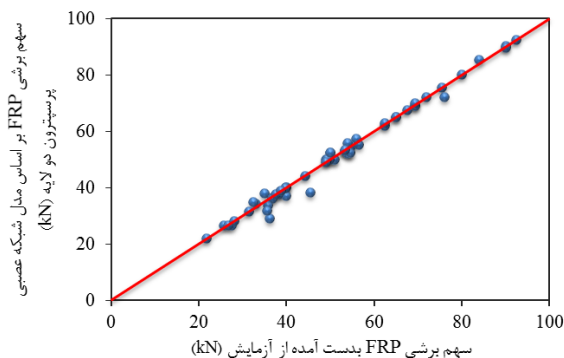
$$V_{frp} = -570.186 + 1.78804 h_f \sqrt[3]{M} - 483.142 M f_c - 0.0115335 b_w f_c + 10.9234 \sqrt[3]{b_w f_c} - 0.000694808 d^2 + 62.8358 \sqrt[3]{d} - 14.1068 \sqrt[3]{t_f b_w} + 1.8283 \sqrt[3]{\frac{E_f a}{d}} + 171.821 b_w M - \frac{3.13289 a}{d \sqrt[3]{b_w}} + 158746 \varepsilon_{fe} \sqrt[3]{M} - 85.0865 \varepsilon_{fe} \sqrt[3]{E_f} - 1.89996 d \sqrt[3]{M} \quad (6)$$

۶- بحث در نتایج

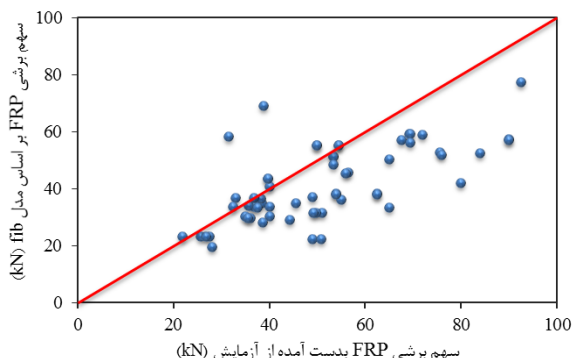
مقایسه بین ماتریس وزنی نورون‌ها در لایه پنهان و خروجی مربوط به مدل شبکه عصبی پرسپترون دولایه و مدل ارائه شده بوسیله رویکرد مدیریت داده به روش گروهی نشان می‌دهد که مدل GMDH تا حد ممکن نسبت به رویکرد MLP ساده‌تر است. برای بررسی عملکرد و دقت دو روش توسعه داده شده و معادلات آیین نامه موجود، نتایج آنها با نتایج تعداد ۶۰ نمونه‌های آزمایشگاهی که بصورت تصادفی انتخاب شده‌اند، مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه در شکل ۸ نشان داده شده است. در بهترین حالت نقاط بایستی بر روی خطی با زاویه ۴۵ درجه قرار گیرند.



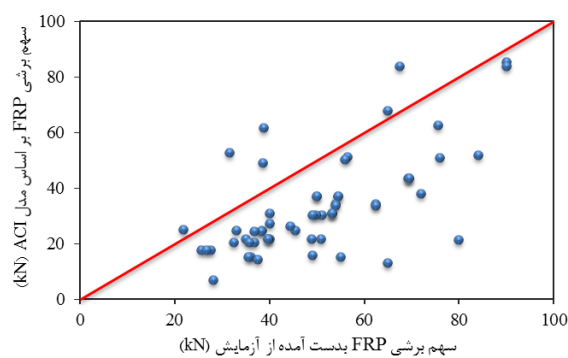
(ب) مدل الگوریتم GMDH (چند جمله ای)



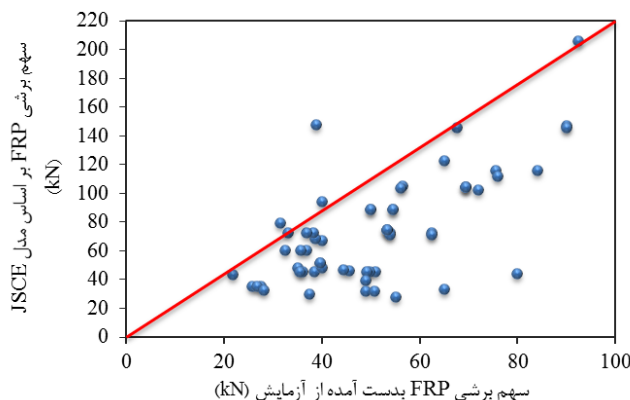
(الف) مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه



(ب) رابطه آئین نامه fib



(پ) رابطه آئین نامه ACI 440



(ث) رابطه آئین نامه JSCE

شکل ۸- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی با دو مدل پیشنهادی و سه رابطه آئین نامه های موجود.

مقدار میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) رویکرد GMDH، MLP، ACI 440، fib-TG9.3 و JSCE برای تعداد ۶۰ داده به ترتیب برابر ۲/۳۵، ۱۷/۲۶، ۳۹/۵۳، ۲۲/۸۴ و ۵۶/۲۵ است. مقدار میانگین درصد مطلق خطا، برای مقادیر پیش بینی شده توسط رویکردهای معرفی شده و آئین نامه های موجود بر اساس نتایج آزمایشگاهی طبق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^n \left| \frac{i_k - t_k}{i_k} \right|}{n} \times 100 \quad (Y)$$

که در آن: i_k : مقدار آزمایشگاهی، t_k : مقدار پیش بینی شده و n : تعداد کل داده ها می باشد.

نتایج نشان داده است که شبکه عصبی MLP دارای پراکندگی کمتر و رویکرد GMDH دارای پراکندگی بیشتری می باشد و در کل دو مدل ارائه شده قابلیت قابل قبولی در محاسبه سهم برش کامپوزیت FRP دارند. علاوه بر این، میانگین، انحراف استاندارد (SD) و ضریب تغییرات (COV) برای نسبت مقاومت برشی $\frac{V_{Test}}{V_{model}}$ جهت تعیین میزان نزدیکی نتایج شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون دولایه و چند جمله ای برای داده های آزمایشگاهی موجود در پایگاه داده به تفکیک نویسندگان مورد بررسی قرار گرفته است. اگر مقدار میانگین نزدیک به یک و انحراف استاندارد کوچک باشد، بیانگر آن است مدل توانایی خوبی برای تعمیم اطلاعات دارد. ضریب تغییرات، برای نشان دادن دقت نتایج به دست آمده با استفاده از دو مدل پیشنهادی محاسبه شده است، همچنین این مقدار میزان تغییرات در رابطه با مقدار میانگین را نشان می دهد. مقدار کوچکتر ضریب تغییرات، نشانگر میزان پراکندگی کمتر در نتایج مدل های توسعه داده شده، می باشد. مقادیر مورد نظر برای کل داده های جمع آوری شده در جدول ۵ و ۶ محاسبه شده اند. نتایج نشان می دهد که دو مدل پیشنهادی می توانند مقادیر آزمایشگاهی را با دقت مناسبی تخمین بزنند.

جدول ۵- تجزیه و تحلیل آماری پیش بینی مقاومت برشی با استفاده از مدل شبکه عصبی دو لایه

نویسندگان	تعداد داده ها	V_{Test}/V_{ANN}			MAE (%)
		میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	
Sato و همکاران	۲	۱/۰	۰/۰۰۰۰۴۰۷	۰/۰۰۰۰۴۰۷	۰/۱۰۶
Wu و همکاران	۳	۱/۰۶۲	۰/۰۸۸۸	۰/۰۸۳۶	۵/۳۱۷
Khalifa	۱۲	۰/۹۹۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۶۱۱
Annaiah	۳	۱/۱۳	۰/۰۷۲	۰/۰۶۴	۱۱/۱۴۱
Park و همکاران	۱	۰/۹۹۹	۰	۰	۰/۰۱۲
Cui	۳	۱/۰۰۰۸	۰/۰۶۴	۰/۰۶۴	۵/۳۱
Nanni و Khalifa	۶	۱/۰۰۱۷	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۸۸	۱/۲۴۵
Ye و Tan	۱	۱/۰۰۱	۰	۰	۰/۱۳۲
Kuang و همکاران	۸	۱/۰۰۰۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۱/۸۷۴
Barros و Dias	۱	۱/۰۰۰۵	۰	۰	۰/۰۵۵
Chaallal و Bousseham	۲	۱/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۱۷
Barros و Dias	۳	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۲
Monti	۹	۱/۰۳۷	۰/۱۲۷	۰/۱۲۳	۱۱/۲۷
Qu	۱	۰/۹۹۸	۰	۰	۰/۱۶۹
Hu و Zhang	۳	۱	۰	۰	۰/۰۱۸
Barros و همکاران	۳	۱	۰	۰	۰/۱۱۲
Altin و همکاران	۸	۱/۰۴۴	۰/۰۹۰۸	۰/۰۸۶۹	۶/۴۷
Gamino و همکاران	۴	۱	۰	۰	۰/۰۳
Triantafillou و Koutas	۳	۰/۹۶۹	۰/۰۷۸	۰/۰۸	۷/۴۱
Chaallal و Mofidi	۷	۰/۹۹۹	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۱/۴۳
Ozden و همکاران	۱	۱	۰	۰	۰/۰۸
Chaallal و Mofidi	۱۰	۰/۹۹	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۱/۰۸۷

جدول ۶- تجزیه و تحلیل آماری پیش‌بینی مقاومت برشی با استفاده از رویکرد مدیریت داده به روش گروهی

نویسندگان	تعداد داده‌ها	V_{Test}/V_{gmh}			MAE (%)
		میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	
Sato و همکاران	۲	۱/۰۴۱	۰/۱۶۲	۰/۱۵۶	۱۵/۳۵
Wu و همکاران	۳	۰/۹۱۶	۰/۲۲۸	۰/۲۴۹	۲۷/۹۵
Khalifa	۱۲	۱/۱۷۹	۰/۲۷	۰/۲۴۹	۱۶/۳۵۳
Annaiah	۳	۱/۰۹۴	۰/۱۲۹	۰/۱۱۸	۱۳/۲۰۲
Park و همکاران	۱	۰/۹۹۹	۰	۰	۵/۸۸
Cui	۳	۱/۰۵۷	۰/۰۹۲	۰/۰۸۶	۹/۱۷
Nanni و Khalifa	۶	۱/۱۱۴	۱/۱۳۰	۰/۱۱۷	۹/۹۸
Ye و Tan	۱	۱/۰۴۵	۰	۰	۴/۳
Kuang و همکاران	۸	۱/۰۶۹	۰/۱۹۹	۰/۱۸۶	۱۲/۷۹
Barros و Dias	۱	۰/۶۹۴	۰	۰	۴۳/۹۴
Chaallal و Bouselham	۲	۰/۸۱	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۱۸	۲۳/۳۴
Barros و Dias	۳	۰/۸۹۲	۰/۱۵۱	۰/۱۶۹	۲۱/۳۵
Monti	۹	۱/۰۶۴	۰/۱۹۱	۰/۱۷۹	۱۳/۴۲
Qu	۱	۰/۸۰۴	۰	۰	۲۴/۳۳
Hu و Zhang	۳	۰/۷۶۶	۰/۰۳۳	۰/۰۴۳۹	۳۰/۷۲
Barros و همکاران	۳	۰/۹۶۴	۰/۱۰۷	۰/۱۱۱	۱۱/۲۸
Altin و همکاران	۸	۰/۸۸۷	۰/۰۴۷	۰/۰۵۳	۱۳/۱۰۵
Gamino و همکاران	۴	۱/۱۸۵	۰/۴۰۷	۰/۳۴۳	۲۴/۹۱
Triantafillou و Koutas	۳	۱/۴۳۵	۰/۴۴۷	۰/۳۱۲	۳۶/۲۶۵
Chaallal و Mofidi	۷	۱/۰۴۴	۰/۲۱۹	۰/۲۰۹	۱۷/۹۲
Ozden و همکاران	۱	۱/۶۷۹	۰	۰	۴۰/۴۵
Chaallal و Mofidi	۱۰	۱/۰۸۶	۰/۲۵۲	۰/۲۳۲	۲۰/۱۰

۷- نتیجه گیری

سهم برشی FRP در تیرهای بتنی از عوامل متعددی تأثیر پذیر بوده و با توجه به مکانیزم پیچیده و خطرناک انهدام برشی، محاسبه آن برای پیشگیری از انهدام برشی اعضاء بسیار حایز اهمیت می باشد. با این وجود، تعداد مطالعات مربوط به تعیین رابطه منسجم و دقیقی برای تخمین سهم برشی FRP، محدود می باشد. بررسی نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود نشان داده است که سهم برشی FRP تحت تأثیر مشخصات هندسی و مکانیکی ورقه های کامپوزیت، مقاومت فشاری بتن، مقدار دهانه برشی و ابعاد مقطع تیر می باشد. در این مطالعه ابتدا یک بانک اطلاعاتی شامل نتایج آزمایشگاهی مربوط به سهم برش FRP در تیرهای بتن آرمه مقاومسازی شده بصورت U-شکل، جمع آوری شده است. در مرحله ی بعد تعداد نه پارامتر برای تعیین مقاومت برشی کامپوزیت FRP تعیین گردید. برای یکنواخت کردن مقادیر ورودی و خروجی، تمامی اعداد ورودی و نیز مقادیر مربوط به بردار هدف با توجه به مقدار حداقل و حداکثر هر یک از پارامترها، بین ۰/۱ تا ۰/۹، مقیاس گردیده است. همچنین پارامتر خطای میانگین مربعات به عنوان ملاک توقف آموزش رویکردهای مورد استفاده انتخاب شده است.

بر اساس توسعه مدل های پیسنهادی، می توان به نتایج زیر اشاره نمود:

۱- با کاهش غیرمنطقی تعداد پارامترهای ورودی، خطای هر دو سیستم شبکه عصبی چند لایه و رویکرد مدیریت داده به روش گروهی افزایش می یابد که دلیل آن پیچیده بودن عملکرد تیرها در برش می تواند باشد.

۲- مقایسه بین ماتریس وزنی نوروں‌ها در لایه پنهان و خروجی مربوط به مدل شبکه عصبی دولایه و مدل ارائه شده بوسیله رویکرد مدیریت داده به روش گروهی نشان می‌دهد که مدل GMDH تا حد ممکن نسبت به رویکرد دیگر ساده‌تر بوده و پیچیدگی مدل MLP را ندارد.

۳- نتایج آنالیز حساسیت رویکرد MLP نشان داده است که ϵ_{fe} ، t_f ، M و a/d بیشترین تاثیر را در سهم مقاومت برشی FRP دارند.

۴- پارامتر میانگین درصد مطلق خطا برای رویکرد MLP، GMDH، ACI 440، fib-TG9.3 و JSCE و با استفاده از داده‌های بخش تست، به ترتیب دارای مقادیر ۲/۳۵، ۱۷/۲۶، ۳۹/۵۳، ۲۲/۸۴ و ۵۶/۲۵ می‌باشند. همچنین نتایج بررسی آماری نیز نشان داده است که شبکه عصبی پرسپترون دولایه دارای پراکندگی کمتر و رویکرد GMDH دارای پراکندگی بیشتری می‌باشد.

۵- نتایج کنترل شاخص‌های عملکردی نشان داده است که مدل‌های ارائه شده در بازه داده‌های ورودی، عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی سهم برشی FRP در تیرهای بتنی تقویت شده با ورقه‌های U-شکل داشته و می‌توانند بعنوان رویکردی مطمئن در پیش‌طراحی استفاده شوند.

نتایج بدست آمده از مدل‌های پیشنهادی در این مطالعه نشان داده است که با صرف زمان و هزینه کمتر و جلوگیری از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مشابه مطالعات قبلی، می‌توان سهم FRP در ظرفیت برشی تیرهای بتن آرمه مقاومتساز شده بصورت U-شکل را با دقت قابل قبولی تعیین نمود. برای مطالعات آتی استفاده از روش‌های دیگر مبتنی بر هوش مصنوعی و مقایسه با نتایج مدل‌های توسعه داده شده، پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] Cavagnis F, Ruiz MF, Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Eng Struct* 2015;103:157–73.
- [2] Ahmad SH, Fareed S, Rafeeqi SFA. Shear strength of normal and light weight reinforced concrete slender beams without web reinforcement. *Civ Eng Archit* 2014;2:33–41.
- [3] Oller E, Pujol M, Marí A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Compos Part B Eng* 2019;164:235–48.
- [4] Rasheed HA. Strengthening design of reinforced concrete with FRP. CRC Press; 2014.
- [5] Hadhood A, Agamy MH, Abdelsalam MM, Mohamed HM, El-Sayed TA. Shear strengthening of hybrid externally-bonded mechanically-fastened concrete beams using short CFRP strips: Experiments and theoretical evaluation. *Eng Struct* 2019;201:109795.
- [6] Colotti V. Effectiveness factors for bond strength in FRP shear-strengthened RC beams. *Mater Struct* 2016;49:5031–49.
- [7] Mitsui Y, Murakami K, Takeda K, Sakai H. A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets. *Compos Interfaces* 1997;5:285–95.
- [8] Triantafillou TC. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. *Struct J* 1998;95:107–15.
- [9] Swamy RN, Mukhopadhyaya P, Lynsdale CJ. Strengthening for shear of RC beams by external plate bonding. *Struct Eng* 1999;77.
- [10] Chaallal O, Nollet M-J, Perraton D. Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP strips. *J Compos Constr* 1998;2:111–3.
- [11] Dolan CW, Rider W, Chajes MJ, DeAscanis M. Prestressed concrete beams using non-metallic tendons and external shear reinforcement. *Spec Publ* 1993;138:475–96.
- [12] Uji K. Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets. *Trans Japan Concr Inst* 1992;14.
- [13] Täljsten B. Plate bonding: Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics 1994.
- [14] Chajes MJ, Januszka TF, Mertz DR, Thomson TA, Finch WW. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics. *Struct J* 1995;92:295–303.
- [15] Vielhaber J, Limberger E. Upgrading of concrete beams with a local lack of shear reinforcement. *Fed Inst Mater Res Test (BAM), Unpubl Report, Berlin, Ger* 1995.
- [16] Smith ST, Teng JG. Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams. *Adv Struct Eng* 2003;6:183–99.

- [17] Teng JG, Chen JF. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: behaviour and modelling. Proc. first Asia-Pacific Conf. FRP Struct. (APFIS 2007), The University of Hong Kong, Hong Kong, China; 2007, p. 12–4.
- [18] Khalifa A, Nanni A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cem Concr Compos* 2000;22:165–74.
- [19] Gamino AL, Sousa J, Manzoli OL, Bittencourt TN. R/C Structures strengthened with CFRP Part II: Analysis of shear models. *Rev IBRACON Estruturas e Mater* 2010;3:24–49.
- [20] Khalifa A, Alkhrdaji T, Nanni A, Lansburg S. Anchorage of surface mounted FRP reinforcement. *Concr Int* 1999;21:49–54.
- [21] El-Mihilmy MT, Tedesco JW. Prediction of anchorage failure for reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer plates. *Struct J* 2001;98:301–14.
- [22] Umezu K. Shear Behavior of RC Beams with Aramid Fiber Sheet, Japan Concrete Institute, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Proceeding Third Int. Symp., vol. 1, 1997, p. 491–8.
- [23] Barros JAO, Dias SJE, Lima JLT. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cem Concr Compos* 2007;29:203–17.
- [24] Monti G. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear. *Constr Build Mater* 2007;21:799–809.
- [25] Diagana C, Li A, Gedalia B, Delmas Y. Shear strengthening effectiveness with CFF strips. *Eng Struct* 2003;25:507–16.
- [26] Sakar G. Shear strengthening of RC beams subjected to cyclic load using CFRP strips. *Adv Compos Lett* 2008;17:096369350801700604.
- [27] Jayaprakash J, Samad AAA, Abbasovich AA, Ali AAA. Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips. *Constr Build Mater* 2008;22:1148–65.
- [28] Khalifa A, Belarbi A, Nanni A. Shear performance of RC members strengthened with externally bonded FRP wraps. Proc. Twelfth World Conf. Earthquake, Auckland, New Zealand, January, Citeseer; 2000.
- [29] Naderpour H, Alavi SA. A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Compos Struct* 2017;170:215–27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.028>.
- [30] FIB. (2001). Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. fib Bulletin No. 14, Technical report.
- [31] ACI Committee 440. (2002). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farming Hills Am Concr Inst.
- [32] CIDAR. (2006) Design guideline for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: Beams and slabs. Standards Australia, Sydney, NSW 2001, Australia.
- [33] DT200 CNR. (2004). Guidelines for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre-reinforced composites—materials, reinforced concrete and prestressed concrete structures, masonry structures. Rome, Italy Natl Res Counc Advis Comm Tech Regul Constr.
- [34] CSA S806. (2002). Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association.
- [35] Beale MH, Hagan MT, Demuth HB. Neural network toolbox. User's Guid MathWorks 2010;2:77–81.
- [36] Ivakhnenko AG. Polynomial Theory of Complex Systems. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1971;SMC-1:364–78. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308320>.
- [37] Naderpour H, Nagai K, Haji M, Mirrashid M. Adaptive neuro-fuzzy inference modelling and sensitivity analysis for capacity estimation of fiber reinforced polymer-strengthened circular reinforced concrete columns. *Expert Syst* 2019:e12410.
- [38] Naderpour H, Mirrashid M, Nagai K. An innovative approach for bond strength modeling in FRP strip-to-concrete joints using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Eng Comput* 2019:1–18.
- [39] Naderpour H, Eidgahee DR, Fakharian P, Rafiean AH, Kalantari SM. A new proposed approach for moment capacity estimation of ferrocement members using Group Method of Data Handling. *Eng Sci Technol an Int J* 2020;23:382–91.
- [40] Naderpour H, Nagai K, Fakharian P, Haji M. Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. *Compos Struct* 2019;215:69–84.
- [41] Naderpour H, Fakharian P. Predicting the torsional strength of reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets in terms of artificial neural networks. *J Struct Constr Eng Doi* 2017;10.
- [42] Azimi A. GMDH-Network to estimate the punching capacity of FRP-RC slabs. *J Soft Comput Civ Eng* 2017;1:86–92.
- [43] Farahnaki R, Azimi A. An equation to determine the ultimate flexural load of RC beams strengthened with CFRP laminates. *J Soft Comput Civ Eng* 2018;2:86–95.
- [44] Engineers) J (Japan S of C. Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets, JSCE Tokyo, Japan; 2001.
- [45] Chen JF, Teng JG. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Constr Build Mater* 2003;17:27–41.

- [46] Li W, Li J, Ren X, Leung CKY, Xing F. Coupling effect of concrete strength and bonding length on bond behaviors of fiber reinforced polymer-concrete interface. *J Reinf Plast Compos* 2015;34:421-32.
- [47] Cao SY, Chen JF, Teng JG, Hao Z, Chen J. Debonding in RC beams shear strengthened with complete FRP wraps. *J Compos Constr* 2005;9:417-28.
- [48] Bousselham A, Chaallal O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-An experimental study. *ACI Struct J* 2006;103:339.
- [49] Li W, Leung CKY. Shear Span-Depth Ratio Effect on Behavior of RC Beam Shear Strengthened with Full-Wrapping FRP Strip. *J Compos Constr* 2015;20:4015067.
- [50] Chen GM, Teng JG, Chen JF. Finite-element modeling of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams. *J Compos Constr* 2010;15:339-53.
- [51] Zhang T, Oehlers DJ, Visintin P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups. *J Compos Constr* 2014;18:4014007.
- [52] Bentz EC, Massam L, Collins MP. Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement. *J Compos Constr* 2010;14:637-46.
- [53] Alam MS, Hussein A. Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams without stirrups. *J Compos Constr* 2012;17:507-16.
- [54] Leung CKY, Chen Z, Lee S, Ng M, Xu M, Tang J. Effect of size on the failure of geometrically similar concrete beams strengthened in shear with FRP strips. *J Compos Constr* 2007;11:487-96.
- [55] Fazel Zarandi MH, Türksen IB, Sobhani J, Ramezani-pour AA. Fuzzy polynomial neural networks for approximation of the compressive strength of concrete. *Appl Soft Comput* 2008;8:488-98. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.02.010>.
- [56] Najafzadeh M, Azamathulla HM. Neuro-Fuzzy GMDH to Predict the Scour Pile Groups due to Waves. *J Comput Civ Eng* 2015;29:04014068. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000376).
- [57] Madandoust R, Ghavidel R, Nariman-zadeh N. Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV. *Comput Mater Sci* 2010;49:556-67. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.05.050>.
- [58] Madandoust R, Bungey JH, Ghavidel R. Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models. *Comput Mater Sci* 2012;51:261-72. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.053>.
- [59] Garson GD. Interpreting neural-network connection weights. *AI Expert* 1991;6:46-51.
- [60] Sato Y, Ueda T, Kakuta Y, Tanaka T. Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams. *Proc. 2ND Int. Conf. Adv. Compos. Mater. Bridg. Struct. ACMBS-II, Montr.* 1996, 1996.
- [61] Wu G, An L, Lv Z. The investigation on shear capacity of CFRP strengthened RC beams. *Archit Struct* 2000;30:16-20.
- [62] Täljsten B, Elfgrén L. Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods. *Compos Part B Eng* 2000;31:87-96.
- [63] Annaiah RH. Shear performance of RC beams strengthened in situ with composites 2001.
- [64] Park SY, Naaman AE, Lopez MM, Till RD. Shear strengthening effect of RC beams using glued CFRP sheets. *FRP Compos. Civ. Eng. Proc. Int. Conf. FRP Compos. Civ. Eng. Kong Inst. Eng. Hong Kong Inst. Steel Constr.*, 2001.
- [65] Li W, Leung CKY. Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips. *Compos Struct* 2017;177:141-57.
- [66] Khalifa A, Nanni A. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Constr Build Mater* 2002;16:135-46.
- [67] Tan Z, Ye LP. Experimental research on shear capacity of RC beam strengthened with externally bonded FRP sheets. *China Civ Eng J* 2003;36:12-8.
- [68] Kuang Z, Liu C, Wang H. Experimental Research on Concrete Beams without Stirrups Strengthened for Shearing by Using Carbon Fiber Reinforced Plastic. *JOURNAL-TONGJI Univ* 2004;32:575-9.
- [69] Dias SJE, Barros JAO. Experimental research of a new CFRP-based shear strengthening technique for reinforced concrete beams 2005.
- [70] Dias SJE, Barros JAO. NSM CFRP laminates for the shear strengthening of T section RC beams 2006.
- [71] Qu Z. Analysis and design model of DRP shear-strengthened concrete beams 2008.
- [72] Zhang, Y, Hu, H. (2006). Study on shear behavior of RC beam strengthened with CFRP sheet. *Journal of Hunan University of Technology*, 21, 31-36.
- [73] Altin S, Anil Ö, Koprman Y, Mertoğlu Ç, Kara ME. Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips. *J Reinf Plast Compos* 2010;29:2975-91.
- [74] Koutas L, Triantafillou TC. Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP. *J Compos Constr* 2012;17:101-7.
- [75] Mofidi A, Chaallal O. Shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites: Effect of strip-width-to-strip-spacing ratio. *J Compos Constr* 2011;15:732-42.

- [76] Ozden S, Atalay HM, Akpınar E, Erdogan H, Vulaş YZ. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with fully or partially bonded fibre-reinforced polymer composites. *Struct Concr* 2014;15:229–39.
- [77] Mofidi A, Chaallal O. Tests and design provisions for reinforced-concrete beams strengthened in shear using FRP sheets and strips. *Int J Concr Struct Mater* 2014;8:117–28.

پیوست ۱

جدول A- مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه های جمع آوری شده آزمایشگاهی

$V_f(kN)$	$S_f(mm)$	$w_f(mm)$	$E_f(GPa)$	a/d	$h(mm)$	$b_w(mm)$	نام نمونه	مرجع	شماره نمونه
55	80	20	230	2.69	300	200	S3	[60]	۱
53	1	1	230	2.69	300	200	S5		۲
75.5	1	1	235	2.2	300	150	SL11	[61]	۳
45.5	157	62	235	2.2	300	150	SL15		۴
38.5	165	65	235	3.1	300	150	SL19		۵
54	125	50	228	3	305	150	A-SO3-2	[62]	۶
56.5	125	75	228	3	305	150	A-SO3-3		۷
67.5	1	1	228	3	305	150	A-SO3-4		۸
92.5	1	1	228	3	305	150	A-SO3-5		۹
62.5	125	50	228	4.03	305	150	A-SO4-2		۱۰
90	1	1	228	4.03	305	150	A-SO4-3		۱۱
40	125	50	228	3.62	305	150	B-CO2		۱۲
65	1	1	228	3.62	305	150	B-CO3		۱۳
38	1	1	228	3.62	305	150	B-CF3		۱۴
65	1	1	228	3	405	150	C-BT2		۱۵
67.5	1	1	228	3	405	150	C-BT3		۱۶
72	125	50	228	3	405	150	C-BT4		۱۷
52.36	1	1	228	2.57	381	152	JS5B	[63]	۱۸
54.72	1	1	228	4.28	381	152	JL3A		۱۹
51.07	1	1	228	4.28	381	152	JL3B		۲۰
38.6	1	1	240	2.76	250	100	2	[64]	۲۱
35	150	50	235	2.27	250	150	BL-3	[65]	۲۲
40	150	50	235	2.27	250	150	BL-4		۲۳
40	90	30	235	2.27	250	150	BL-6		۲۴
54	125	50	228	3	305	150	SO3-2	[66]	۲۵
56	125	75	228	3	305	150	SO3-3		۲۶
67.5	1	1	228	3	305	150	SO3-4		۲۷
92.5	1	1	228	3	305	150	SO3-5		۲۸
62.5	125	50	228	4	305	150	SO4-2		۲۹
90	1	1	228	4	305	150	SO4-3		۳۰
44.3	100	50	235	2.16	260	150	S-CU-2-1	[67]	۳۱
48.95	60	30	230	2.75	230	110	RL2-r	[68]	۳۲
50.8	60	30	230	2.75	230	110	RL3-r		۳۳
51	60	30	230	2.75	230	110	RaL1-r		۳۴
49.8	60	30	230	2.75	230	110	RaL2-r		۳۵
49.15	60	30	230	2.75	230	110	RaL3-r		۳۶
27.58	60	30	230	2.5	250	100	RL1-t		۳۷
25.7	60	30	230	2.5	250	100	RL2-t		۳۸
26.7	60	30	230	2.5	250	100	RL3-t		۳۹
31.5	95	25	390	2.2	300	150	VAM-9.5	[69]	۴۰
38.7	1	1	231	3	406	152	SB-S0-1 L	[48]	۴۱
40.4	1	1	231	3	406	152	SB-S0-2 L		۴۲
39.8	114	60	218.4	2.54	400	180	2 S_7M(2)	[70]	۴۳
27.6	180	60	218.4	2.54	400	180	4 S_4M(1)		۴۴
31	114	60	218.4	2.54	400	180	4 S_7M(1)		۴۵
35.75	300	150	390	3.48	450	250	USVA+	[24]	۴۶

26.75	300	150	390	3.48	450	250	US45+		۴۷
36.75	100	50	390	3.48	450	250	US45++		۴۸
70.25	1	1	390	3.48	450	250	US45+A		۴۹
75.25	1	1	390	3.48	450	250	US45++B		۵۰
86.25	1	1	390	3.48	450	250	US45++C		۵۱
67.75	225	150	390	3.48	450	250	US45+D		۵۲
66.75	225	150	390	3.48	450	250	US45++E		۵۳
53.25	225	150	390	3.48	450	250	US45++F		۵۴
21.85	50	30	235	2	200	100	U4	[71]	۵۵
21.25	100	30	235	2.33	250	150	SB-3	[72]	۵۶
33.75	100	30	235	2.33	250	150	SB-5		۵۷
28.75	100	50	235	2.33	250	150	SB-7		۵۸
31.52	95	25	390	2	300	150	A12-M	[23]	۵۹
18.56	80	25	390	2.22	150	150	B10-M		۶۰
33.65	40	25	390	2.22	150	150	B12-M		۶۱
33.04	125	50	231	5	360	120	2	[73]	۶۲
32.48	150	50	231	5	360	120	3		۶۳
38.17	125	50	231	5	360	120	5		۶۴
36.8	150	50	231	5	360	120	6		۶۵
36.12	200	50	231	5	360	120	7		۶۶
36.85	125	50	231	5	360	120	8		۶۷
35.7	150	50	231	5	360	120	9		۶۸
35.49	200	50	231	5	360	120	10		۶۹
37.5	150	50	221	2.64	300	120	VTC1	[19]	۷۰
80	150	50	218	2.64	300	120	VTC2		۷۱
49	175	60	235	2.64	300	120	VTC3		۷۲
65	175	50	235	2.64	300	120	VTC4		۷۳
37	1	1	230	2.04	300	140	U2C-AN3Ch	[74]	۷۴
76	1	1	230	2.04	300	140	U2C-AN3Cin		۷۵
84	1	1	230	2.04	300	140	U2C-AN5Cin		۷۶
39.7	115	40	230	3	406	152	S0-0.12 R	[75]	۷۷
53.3	175	88	230	3	406	152	S0-0.17R1		۷۸
54.5	88	53	230	3	406	152	S0-0.20R1		۷۹
49.9	50	30	230	3	406	152	S0-0.20R2		۸۰
69.3	125	88	230	3	406	152	S0-0.23 R		۸۱
38.7	1	1	230	3	406	152	S0-0.33 R		۸۲
40.4	1	1	230	3	406	152	S0-0.66 R		۸۳
28.1	120	20	238	3.8	360	120	FBwA-CFRP	[76]	۸۴
39.7	115	40	230	3	406	152	NT-ST-35	[77]	۸۵
53.3	175	88	230	3	406	152	NT-ST-50		۸۶
49.9	50	30	230	3	406	152	NT-ST-60		۸۷
54.5	88	53	230	3	406	152	NT-ST-61		۸۸
69.4	125	88	230	3	406	152	NT-ST-70		۸۹
38.8	1	1	230	3	406	152	NT-SH-100		۹۰
40.5	1	1	230	3	406	152	NT-SH-200		۹۱
53.3	175	88	230	3	406	152	NR-ST-LF		۹۲
69.4	125	88	230	3	406	152	NR-ST-HF		۹۳
38.8	1	1	230	3	406	152	NR-SH		۹۴