

Applying neural networks for estimating the compressive strength of confined circular concrete columns with FRP sheets

Yaser Moodi¹, Ehsan Eslami², Seyed Roohollah Mousavi^{3*}, Babak Dizangian⁴, Hamid Mirshekar⁵

1- PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Lecturer, Dept. of Computer Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

3- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

4- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

5- M.S Graduated, Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Most of existing reinforced concrete columns are in need of retrofitting and strengthening for various reasons, including errors during the construction phase, changing the type of applications in structures, changes in design codes, occurrence of strong beam-weak column mechanism and the damages due to natural disasters. One of the most common ways of strengthening the columns is the confinement of the reinforced concrete columns. So far, several experiments have been conducted on concrete columns confined with fibre-reinforced polymer sheets and the results show that the use of fibre-reinforced polymer sheets increases the compressive strength of the concrete columns effectively. Different models in order to determine the compressive strength of the fibre-reinforced-polymer-confined concrete columns are provided in the previous researches. In this study, a large set of experimental data regarding circular columns confined with different types of FRP has been collected. Two neural network prediction methods were also used for determining the compressive strength of the confined circular columns with FRP sheets. These methods are back propagation (BP) and radial basis functions (RBF). Finally, the defined neural networks were examined with the available estimation models based on four standard error testing criteria. Results show that the neural networks could estimate the compressive strength of the confined columns with FRP with more accuracy rather than the existing analytical models.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.178649.1825

*Corresponding author: Seyed Roohollah Mousavi.
Email address: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 April 2019

Revise Date: 25 September 2021

Accept Date: 14 November 2021

Keywords: Concrete
Confinement
FRP
Compressive Strength
BP
RBF

بررسی کاربرد شبکه عصبی در تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصورشده با ورقه‌های FRP

یاسر مودی^۱، احسان اسلامی^۲، سید روح الله موسوی^{۳*}، بابک دیزنگان^۴، حمید میرشکار^۵

۱- فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۲- مربی گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

۵- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

بسیاری از ستون‌هایی که در گذشته ساخته شده‌اند به دلایل مختلفی نظیر خطا در حین ساخت، خطا در طراحی، تغییر کاربری ساختمان، تغییر در آیین‌نامه، به وجود آمدن شرایط تیرقوی-ستون ضعیف و همچنین آسیب‌دیدگی در برابر حوادث نیاز به ترمیم و تقویت دارند. محصور کردن ستون‌های بتن مسلح، یکی از رایج‌ترین روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌ها است. آزمایش‌های متعددی بر روی استوانه‌های بتنی محصورشده با FRP انجام شده است که نشان می‌دهد، استفاده از محصورکننده‌ی FRP باعث افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری آنها می‌شود. در تحقیقات گذشته مدل‌هایی برای تعیین مقاومت فشاری این نمونه‌ها ارائه شده است. در این مطالعه یک مجموعه‌ی گسترده‌ای از اطلاعات آزمایشگاهی استوانه‌های بتنی محصورشده با انواع FRP جمع‌آوری شده است. سپس از دو مدل پیش‌بینی شبکه عصبی برای تعیین مقاومت فشاری این نمونه‌ها FRP استفاده شد. این روش‌ها شامل دو شبکه عصبی پس انتشار خطا (BP) و شبکه توابع شعاعی (RBF) می‌باشند. در نهایت، بر اساس چهار معیار سنجش خطا، شبکه‌های عصبی نسبت به مدل‌های تخمین مقاومت موجود ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد شبکه‌های عصبی مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP را نسبت به مدل‌های تحلیلی موجود با دقت بیشتری تخمین می‌زند، به طوری که استفاده از شبکه پس انتشار خطا و توابع شعاعی به ترتیب باعث کاهش ۳۳ و ۹۱ درصدی خطای کلی نسبت به مدل‌های تحلیلی می‌شود. همچنین با توجه به نتایج عددی، از بین این دو مدل شبکه عصبی، مدل شبکه توابع شعاعی عملکرد بهتری نسبت به مدل پس انتشار خطا نشان دارد.

کلمات کلیدی: محصورکننده‌ی بتن، پلیمرهای مسلح الیافی، مقاومت فشاری، شبکه عصبی پس انتشار خطا، شبکه توابع پایه شعاعی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.178649.1825	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.178649.1825	۱۴۰۱/۵/۰۱	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۷/۰۳	۱۳۹۸/۰۱/۲۵
سید روح الله موسوی s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Backpropagation

³ Radial basis function

۱- مقدمه

محصور کردن یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش مقاومت فشاری ستون‌های بتنی است. استفاده از پوشش بتنی و فلزی برای محصور کردن و تقویت ستون‌های بتن مسلح در گذشته رواج زیادی داشته است و امروز هنوز جزء روش‌های متداول است. اگرچه این روش‌ها در افزایش ظرفیت سازه مؤثر هستند اما نیاز به تجهیزات و نیروی کار نسبتاً زیادی دارند و گاهی اوقات مشکل در پیاده‌سازی دارند، علاوه بر این سیستم پوشاندن بتن مسلح منجر به یک افزایش قابل توجهی در مقطع عرضی ستون می‌شود و سیستم غلاف فلزی اغلب پرهزینه است و به صورت ضعیف در برابر شرایط نامطلوب زیست‌محیطی عمل می‌کند. از این رو، یک سیستم مقاوم‌سازی ابتکاری، پایدار، آسان برای نصب و مقرون‌به‌صرفه در عوض روش‌های قدیمی‌تر نیاز است [۱]. در اواسط دهه ۸۰ میلادی، برای اولین بار استفاده از پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) برای تقویت ستون‌های بتن‌آرمه موجود، در برابر بارهای زلزله مطرح شد [۲]؛ اما زلزله‌های ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، عامل مهم و مؤثری جهت بررسی همه‌جانبه کاربرد FRP جهت تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و بنایی در مناطق لرزه‌خیز گردید [۳]. نانی و برادفورد [۴] در سال ۱۹۹۴ میلادی اولین مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتنی پوشیده شده با سه نوع FRP با مقاومت معمولی تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری را انجام دادند. آن‌ها با بررسی نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها نشان دادند که دو خاصیت مکانیکی بتن، یعنی مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن، با محصور کردن بتن با پوشش FRP، افزایش می‌یابد.

مطالعات آزمایشگاهی متعددی رفتار بتن محصورشده با FRP را بررسی کرده‌اند. همچنین، به‌خاطر محبوبیت استفاده از FRP، مدل‌های گوناگونی برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP ارائه شد. محمودآبادی و سخائی‌پور [۵] با نرم‌افزار آباکوس به بررسی اثر شکل مقطع بر روی ستون‌های محصورشده با CFRP پرداختند. آن‌ها نشان دادند شکل مقطع ستون بر ظرفیت باربری محوری اثری ندارد اما، در ظرفیت باربری جانبی مؤثر است. ساجدی و همکاران [۶] با انجام آزمایش به بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح محصورشده با FRP ساخته شده از بتن با مقاومت بالا پرداختند. آن‌ها نشان دادند اثر غلاف GRP بر روی افزایش مقاومت بیشتر است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند برای حل بسیاری از مسائل استفاده شوند و می‌توانند در طول زمان آموزش یابند تا دانش خود را به دست آورند و با دقت آن را در شناخت الگوها افزایش دهند. شبکه عصبی مصنوعی، انتزاعی از شبکه عصبی بیولوژیکی است که شبیه‌سازی نحوه کارکرد آن در مغز بیولوژیکی است. نوروها به‌وسیله سیناپسی که اطلاعات را حمل می‌کنند با یکدیگر مرتبط می‌شوند و می‌توانند با روند آموزشی اصلاح شوند [۷]. امروزه شبکه‌های عصبی دارای دامنه کاربرد وسیعی در علوم مختلف از جمله پزشکی، کامپیوتر، عمران، کنترل صنعتی، نظامی و ... هستند. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در مهندسی عمران نیز کاربردهای متعددی دارد که به برخی از آنها اشاره می‌گردد. تاپکو و ساریدمیر [۸] یک روش مبتنی بر ANN و منطق فازی برای تعیین مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر ارائه دادند. تاپکو و ساریدمیر [۹] در سال ۲۰۰۸ یک روش برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن حاوی برخی از مواد افزودنی پیشنهاد دادند. آلتون و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۰] یک شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر تکنیک رگرسیون چندخطی برای تخمین مقاومت فشاری بتن الیافی پیشنهاد کردند. چندین فرایند آموزشی وجود دارد که می‌تواند برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شود، یکی از پرکاربردترین آن‌ها روش پس انتشار خطا (BP) است. این روش در هر تکرار دو مرحله دارد که مرحله اول حرکت روبه‌جلو است که سرانجام در همان مرحله اول به یک خروجی می‌رسد که به احتمال زیاد خروجی آن با نتایج واقعی تفاوت زیادی دارد. در این مرحله توسط تابع هزینه مشخص می‌شود که مرحله حرکت روبه‌جلو چه مقدار خطا داشته است. در مرحله دوم یک حرکت رو به عقب وجود دارد که در آن وزن‌ها و بایاس‌ها باتوجه‌به میزان خطا شبکه تنظیم مجدد می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد شبکه عصبی توابع پایه شعاعی است که در مدل‌سازی داده‌های غیرخطی نتایج خوبی به همراه دارد. این روش برخلاف شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP) در یک مرحله انتشار روبه‌جلو توسط توابع پایه شعاعی آموزش پیدا می‌کند و از سرعت خوبی برخوردار است [۱۱].

⁴ Artificial Neural Network

⁵ Feed Forward

⁶ Multi Layer Perceptron

در مطالعات گذشته، استفاده از روش‌های شبکه عصبی برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP کمتر دیده شده است. برخی از این مطالعات که از روش‌های شبکه عصبی برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP استفاده کرده‌اند در جدول (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است روش‌های مورد استفاده و تعداد نمونه پایگاه داده‌های این مطالعات در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مطالعات گذشته استفاده کننده از روش‌های شبکه عصبی برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP.

مرجع	سال	روش(ها)	تعداد نمونه‌ها
سیویک و گوزلبی [۱۲]	۲۰۰۸	ANN	۱۰۱
وو و همکاران [۱۳]	۲۰۱۰	ANN-RBF	۳۶۲
نادرپور و همکاران [۱۴]	۲۰۱۰	ANN-BP	۲۱۳
سیویک [۱۵]	۲۰۱۱	NF/ ANN-BP	۱۸۰
السانادی و همکاران [۱۶]	۲۰۱۲	FFBP	۲۷۲
جلال و رضانیانپور [۱۷]	۲۰۱۲	ANN-BP	۱۲۸
کاسکاردی و همکاران [۱۸]	۲۰۱۷	ANN	۴۶۵
منصوری و همکاران [۱۹]	۲۰۱۷	ANN-RBF /ANFIS-SC/ANFIS-FCM	۵۱۹
نادرپور و همکاران [۲۰]	۲۰۱۹	ANN-BP	۱۳۵
کمگر و همکاران [۲۱]	۲۰۲۰	FFBP	۲۸۱
حمید و همکاران [۲۲]	۲۰۲۰	FFBP	۴۹
احمد و همکاران [۲۳]	۲۰۲۰	ANN-BP	۷۰۸

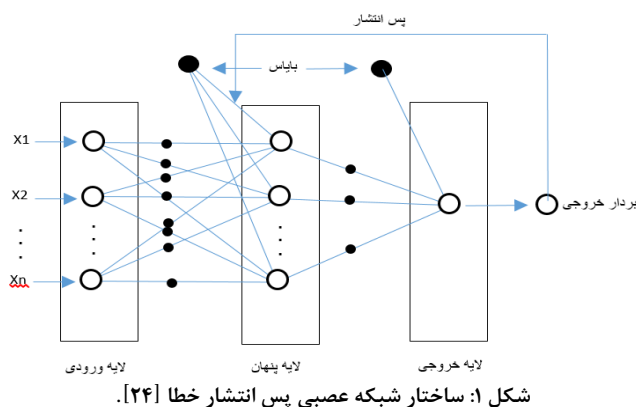
همان طوری که در جدول (۱) قابل مشاهده است، در مطالعات گذشته تعداد نمونه‌ها برای آموزش شبکه‌های عصبی محدود می‌باشد. بزرگ‌ترین پایگاه داده‌ها در مطالعات گذشته شامل ۷۰۸ نمونه می‌باشد. در این مطالعه یک مجموعه‌ی گسترده‌ای از داده‌های آزمایشگاهی استوانه‌های بتنی محصورشده با انواع FRP جمع‌آوری شده است. این مجموعه شامل ۷۳۲ نمونه می‌باشد که از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی احمد و همکاران [۲۳] بزرگتر می‌باشد. سپس از دو شبکه عصبی پس انتشار خطا (BP) و شبکه توابع شعاعی (RBF) برای تخمین مقاومت فشاری ستون‌های بتنی دایره‌ای محصورشده با FRP استفاده شد. در نهایت با توجه به چهار معیار تعیین خطا، مقایسه‌ای میان روش‌های تخمین ذکر شده با شبکه عصبی و مدل‌های تخمین مطالعات گذشته انجام شد. نتایج نشان می‌دهد عملکرد روش RBF نسبت به مدل‌های ارائه شده در مطالعات گذشته و روش BP عملکرد بهتری دارد.

۲- ضرورت انجام تحقیق

تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP یکی از نیازهای اساسی مهندسان طراح مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی می‌باشد. در مطالعات قبلی مدل‌های زیادی برای تخمین مقاومت فشاری این بتن‌ها ارائه شده است. مدل‌ها در مطالعات گذشته ممکن است نتوانند مقاومت این بتن‌ها را با دقت کافی تخمین بزنند؛ بنابراین امکان‌سنجی استفاده از روش‌های تخمین و شبکه‌های عصبی برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP می‌تواند یک وظیفه چالش‌برانگیز باشد که در این مطالعه به آن پرداخته می‌شود.

۳- نظریه مدل شبکه عصبی پس انتشار خطا (BP)

مدل شبکه عصبی مورد استفاده برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP از نوع پس انتشار خطا است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده این روش شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است. لایه ورودی دارای پنج گره (x_1, x_2, \dots, x_5) شامل اطلاعات قطر، مقاومت فشاری بتن محصور نشده، ضخامت دورپیچ FRP، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته دورپیچ FRP و لایه خروجی دارای یک گره (O1) مربوط به میزان مقاومت فشاری بتن محصور شده به عنوان متغیر خروجی مسئله است.



الگوریتم BP شامل دو فرایند یادگیری است: انتشار اولیه روبه جلو و انتشار رو به عقب خطا. در اولین تکرار نمونه‌های ورودی از لایه ورودی به لایه خروجی انتشار داده شده و با یک لایه پنهان پردازش می‌شوند. در این شبکه عصبی از تابع فعال‌ساز سیگموئید استفاده شده است. اگر بردار خروجی واقعی با بردار خروجی موردنظر مطابقت نداشته باشد، با انتشار رو به عقب خطا، مقادیر وزن و بایاس را جهت به حداقل رساندن خطا بین مقدار هدف و مقدار خروجی تنظیم می‌نماید و مجدداً مقدار خروجی محاسبه می‌گردد. این روند تا رخ ندادن شرایط خاتمه الگوریتم ادامه پیدا خواهد کرد؛ بنابراین روند تکراری تعیین و تنظیم وزن و بایاس منجر به آموزش شبکه می‌شود [۲۵].

هدف آموزش، کاهش خطا است که به شرح زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$E = \left(\frac{1}{P}\right) \sum_p E_p \quad (1)$$

که در اینجا E خطا سراسری است، P تعداد کل تکرار آموزش است و E_p ، p امین خطای آموزش است که طبق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_p = \frac{\sum_{k=1}^N (O_k - D_k)^2}{2} \quad (2)$$

در اینجا N تعداد کل گره‌های خروجی است، O_k و D_k به ترتیب مقدار خروجی و مقدار هدف گره خروجی k ام را نمایش می‌دهد. در شبکه پس انتشار خطا، تعداد گره‌های لایه مخفی مستقیماً بر آموزش شبکه اثر می‌گذارد منتهی خطای نسبی خروجی شبکه با افزایش گره‌های پنهان کاهش نمی‌یابد [۲۶].

در اینجا با استفاده از الگوریتم گرادینان نزولی سعی می‌شود تا مربع خطای بین خروجی‌های شبکه و تابع هدف کمینه شود. هنگامی که تعداد گره‌های پنهان شبکه افزایش می‌یابد، خطای خروجی ظاهراً نوسان می‌کند، یعنی خروجی شبکه دیگر بهبود نمی‌یابد؛ بنابراین، لازم است تعداد مطلوب گره‌های پنهان برای دستیابی به یک توازن خوب بین دقت خروجی و هزینه عملیات را پیدا کرد. در این مطالعه، گره‌های پنهان توسط فرمول تجربی که توسط ژو و همکاران [۲۷] تعریف شده است، استفاده می‌شود:

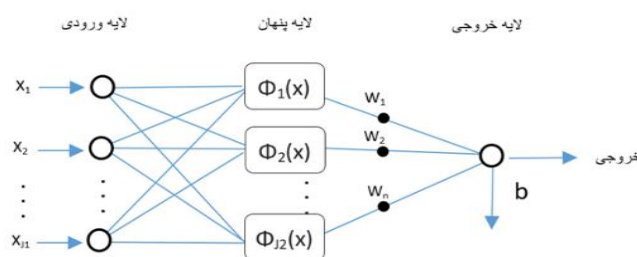
$$l = \sqrt{0.43mn + 0.12n^2 + 2.54m} + 0.77n + 0.35 + 0.51 \quad (3)$$

که در اینجا l تعداد گره‌های لایه پنهان، m تعداد گره‌ها در لایه ورودی و n تعداد گره‌ها در لایه خروجی است، و قسمت اعشاری نتایج باید گرد شود. در این مطالعه مقادیر m و n به ترتیب ۵ و ۱ می‌باشند؛ بنابراین، تعداد مطلوب گره‌های پنهان برای این مطالعه ۵ است. این شبکه با مشخصات فوق آموزش داده می‌شود تا زمانی که یکی از دو شرط خاتمه ۱۰۰ تکرار آموزش یا حداقل خطا $MSE=0.1$ را برآورده سازد.

۴- شبکه توابع پایه شعاعی (RBF)

شبکه‌ی توابع پایه شعاعی، شبکه‌ی انتشار رو به جلویی است که در لایه پنهان آن از تابع پایه شعاعی به عنوان تابع فعال‌سازی استفاده می‌شود. شبکه RBF با استفاده از توابع شعاعی متقارن و محلی هر تابعی را تخمین می‌زند [۲۸]. شکل ۲ معماری این شبکه را نشان می‌دهد.

⁷ Mean squared error



شکل ۲: ساختار شبکه عصبی توابع پایه شعاعی [۲۹].

به طور کلی RBFN دارای سه لایه ورودی، پنهان و خروجی در ساختار خود هستند. معمولاً لایه پنهان شامل تابع گاوسی و یک تابع سیگموئید یا خطی در لایه خروجی است. روند آموزش در RBFNها سریع تر از سایر شبکه های عصبی انتشار روبه جلو است. RBFNها ویژگی های متعددی دارند مانند توانایی یادگیری آنلاین، قابلیت تعمیم خوب و توانایی عالی در کنترل صداهای ورودی [۲۸]. در شبکه RBF پارامترهای ورودی در قالب یک بردار ورودی به شبکه داده می شود و تحت یک تبدیل غیرخطی در لایه مخفی قرار می گیرند، این بدان معنی است که تابع فعال سازی RBF در لایه پنهان به عنوان نوروں شبکه خدمت می کند. قبل از اعمال تغییر غیرخطی توسط تابع فعال سازی RBF، متغیرهای ورودی باید در بایاس مربوطه ضرب شوند. یک بردار که اختلاف بین ورودی های ضرب شده و وزن های مربوط به آن ها است، به عنوان ورودی تابع فعال سازی RBF داده می شود [۳۰]. خروجی شبکه برای یک الگوی ورودی مانند x می تواند به صورت رابطه (۴) بیان شود.

$$y(x) = \sum_{k=1}^{J_2} w_k \phi(\|x - c_k\|) \quad (4)$$

که در اینجا y نشان دهنده خروجی RBF است w_k وزن اتصال k امین نوروں لایه مخفی به خروجی است. $\|\cdot\|$ قاعده اقلیدسی و $\phi(0)$ نشان دهنده تابع گوسین است. فرم ماتریسی معادله فوق با در نظر گرفتن $N\{(x_k, y_k)\}$ به صورت رابطه (۵) بیان خواهد شد:

$$Y = W^T \Phi \quad (5)$$

که در اینجا $W = \{w_1, \dots, w_{j3}\}$ ماتریس وزن با ابعاد $J_2 \times J_3$ است و $w_i = (w_{i1}, \dots, w_{ij2})^T$ و $\Phi_p = [\phi_1, \dots, \phi_N]$ ماتریس هایی با ابعاد $J_2 \times J_3$ هستند.

شبکه RBF توابع پیوسته را زمانی که RBF به طور مناسب انتخاب شده است را با دقتی قابل قبول تخمین می زند. شبکه RBF گوسین توانایی پیش بینی هر تابع پیوسته با استفاده از انحراف استاندارد $\sigma > 0$ در حضور تعداد کافی از مراکز $i=1, \dots, J_2$ را دارد [۲۸]. بردارهای مرکز c_i به روش های مختلفی از جمله تصادفی، خوشه بندی، الگوریتم های تکاملی و ... انتخاب می شوند که در اینجا به طور تصادفی انتخاب شده اند. وزن ها و بایاس متناظر آن ها پارامترهای ضروری در طول پردازش آموزش هستند. دقت و کیفیت مدل توسعه یافته RBF تا حد زیادی بر انتخاب مناسب مراکز RBF بستگی دارد. این مراکز می تواند به طور تصادفی یا با طبقه بندی و یا با استفاده از یک روش یادگیری آنلاین مشخص شود.

۵- داده های آزمایشگاهی

تحقیقات آزمایشگاهی زیادی بر روی بتن محصور شده با FRP انجام شده است. در این مطالعه از یک جامعه آماری شامل ۷۳۲ نمونه دایره ای بتن محصور شده با FRP که از تحقیقات مختلف استخراج شده اند، استفاده گردید. جزئیات نمونه ها در جدول (۲) آورده شده است.

⁸ Neuron

جدول ۲: جزئیات داده‌های آزمایشگاهی.

مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور نشده (MPa)	*FRP نوع	مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور نشده (MPa)	*FRP نوع
احمد و همکاران [۳۱]	۲	۱۰۲	۲۹/۵۰-۰/۵	G	سوی و شیخ [۳۲]	۲۴	۱۵۲	۴۵/۴۸-۶/۱	C, G, HM-C
آیر و همکاران [۳۳]	۶	۱۵۰	۴۲/۰	C, G	هوسوتانی و همکاران [۳۴]	۲	۲۰۰	۴۱/۷	C, HM-C
اکبگ و همکاران [۳۵]	۱۲	۳۰۰-۱۰۰	۲۱/۲۶-۷/۵	C	ایلکی و همکاران [۳۶]	۵	۱۵۰	۳۲/۰	C
السلوم [۳۷]	۲	۱۵۰	۳۲/۳۶-۴/۲	C	عیسی [۳۸]	۳	۱۵۰	۲۳/۲۳-۶/۹	C
آو و بایوکوزتارک [۳۹]	۱	۱۵۰	۲۴/۲	G	روچته و لایوسینر [۴۰]	۷	۱۵۰-۱۰۰	۴۲/۴۳-۰/۰	C, A
بنزیزاد و همکاران [۴۱]	۴	۱۶۰	۲۵/۴۹-۹/۵	C	ژیانگ و تنگ [۴۲]	۸	۱۵۲	۳۳/۴۵-۱/۹	G
برست و همکاران [۴۳]	۴۲	۱۶۰	۲۵/۵۲-۰/۰	C, G	کرایینیس و روساکیس [۴۴]	۱۶	۲۰۰	۳۵/۳۸-۷/۵	C
بیسبای و همکاران [۴۵]	۳	۱۵۰	۳۴/۴	C	کارام و تابارا [۴۶]	۲	۱۵۰	۱۲/۸	C
بیسبای و همکاران [۴۷]	۳	۱۰۰	۲۸/۰	C	کارانتزیکیس و همکاران [۴۸]	۱	۲۰۰	۱۲/۱	C
بولو [۴۹]	۱۲	۱۵۰	۳۲/۵	G, HM-C	کاربهاری و گئو [۵۰]	۳	۱۵۲	۳۸/۴	C
کمپیون و همکاران [۵۱]	۱	۱۰۰	۲۰/۱	C	کنو و همکاران [۵۲]	۱۵	۱۰۰	۳۲/۳۴-۳/۸	C
کاری و هاریس [۵۳]	۲	۲۵۴-۱۵۲	۳۳/۳۸-۵/۹	C	لام و تنگ [۵۴]	۱۸	۱۵۲	۳۴/۳۸-۳/۵	C, G
کومرت و همکاران [۵۵]	۲	۱۵۰	۳۹/۰	G	لام و همکاران [۵۶]	۶	۱۵۲-۱۵۲/۵	۳۸/۴۱-۹/۱	C
لی و همکاران [۵۷]	۵	۱۵۰	۳۶/۲	C	پیچر و همکاران [۵۸]	۱	۱۵۲	۳۹/۷	C
دای و همکاران [۵۹]	۹	۱۵۲	۳۹/۲	A	پیکارکزیگ و همکاران [۶۰]	۲	۴۷	۵۵/۰	C
دمرز و ننال [۶۱]	۸	۱۵۲	۳۲/۴۳-۲/۷	C, G	ولدمانیس و همکاران [۶۲]	۶	۱۵۰	۴۰/۴۴-۰/۳	C
السناددی و همکاران [۶۳]	۶	۱۵۰-۵۰	۴۱/۵۳-۱/۸	C	لی و همکاران [۶۴]	۱	۱۵۲/۴	۴۵/۶	G
اردیل و همکاران [۶۵]	۲	۱۵۰	۱۱/۲۰-۱/۸	C	لیانگ و همکاران [۶۶]	۱۲	۱۰۰	۲۲/۲۵-۷/۹	C
اوانز و همکاران [۶۷]	۱	۱۵۰	۳۷/۳	C	لین و لی [۶۸]	۲۷	۱۰۰-۱۵۰	۱۷/۲۵-۷/۹	C
گرین و همکاران [۶۹]	۳	۱۵۲	۴۶/۵۴-۰/۰	C, G	ماندال و همکاران [۷۰]	۹	۱۰۵-۱۰۲	۳۰/۵۴-۷/۵	C, G

مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور نشده (MPa)	*FRP نوع	مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور نشده (MPa)	*FRP نوع
هارمون و اسلاتری [۷۱]	۴	۵۱	۲۹/۳۷-۸/۲	C	مسترایا [۷۲]	۶	۱۵۲/۵	۴۱/۰	C
هاریز و کاری [۷۳]	۲	۱۵۲	۲۵/۵۱-۲/۸	C	روساکیس [۷۴]	۲۰	۱۵۰	۳۱/۸	C
هاریز و خارل [۷۵]	۱۰	۱۵۲	۲۰/۴۹-۴/۲	C, G	روساکیس و همکاران [۷۶]	۶	۱۵۰	۳۲/۱	C, G
متسیس و همکاران [۷۷]	۲	۱۵۰	۴۰/۴۷-۳/۵	C, HM-C	سائنز و پنتلیدز [۷۸]	۴	۱۵۲	۳۴/۹	C, HM-C
میسل و همکاران [۷۹]	۲	۱۰۲	۱۵/۲۸-۳/۱	C, G	سانتاروسا و همکاران [۸۰]	۳	۱۵۰	۳۲/۳۷-۰/۰	C, G
میرمیران و همکاران [۸۱]	۱۳	۱۵۲/۵	۱۹/۴۹-۴/۰	G	شهای و همکاران [۸۲]	۹	۱۵۲/۵	۲۹/۳۱-۸/۲	G
میاجی و همکاران [۸۳]	۱۰	۱۵۰-۱۰۰	۴۰/۲	C	شاو و همکاران [۸۴]	۲	۱۵۲	۳۱/۵۱-۲/۹	C
مدارلی و همکاران [۸۵]	۳	۱۵۰	۲۵/۲۹-۶/۸	C, G	شهااتا و همکاران [۸۶]	۴	۱۵۰	۲۸/۳۸-۴/۲	C, G
نانی وبرادفورد [۴]	۱۷	۱۵۰	۳۴/۰	A, G	شهااتا و همکاران [۸۷]	۴	۲۲۵-۱۵۰	۳۵/۳۶-۶/۳	A, G
اونگینگ [۸۸]	۲	۱۸۰	۲۹/۳۱-۶/۲	C	سیلوا و رودریگوئس [۸۹]	۷	۲۵۰-۱۵۰	۲۷/۰	C
اون [۹۰]	۸	۱۵۲-۱۰۲	۳۵/۰	C	سمیت و همکاران [۹۱]	۴	۲۵۰	۴۷/۵۳-۹/۰	C
وینسنت و ازبکالوگلو [۹۲]	۴	۱۵۲	۲۲/۴	A	سونگ و همکاران [۹۳]	۱۲	۱۵۰-۱۰۰	۳۹/۰	A
ستانتون و اون [۹۴]	۵	۱۵۲/۵	۴۶/۴	C	وو و همکاران [۹۵]	۲	۱۰۰	۴۹/۰	C
سوتر و پینزلی [۹۶]	۱۶	۱۵۰	۳۳/۵۴-۷/۲	C, A, G, HM-C	ژاو و وو [۹۷]	۲۷	۱۵۲	۳۳/۵۴-۳/۰	C, A, G, HM-C
تاموزس و همکاران [۹۸]	۴	۱۵۰	۱۵/۲	C	یان و همکاران [۹۹]	۱	۳۰۵	۲۰/۴۸-۸/۸	C
تنگ و همکاران [۱۰۰]	۶	۱۵۲/۵	۲۹/۴۴-۴/۶	C, G	یوسف و همکاران [۱۰۱]	۴۰	۴۰۶-۱۵۲	۳۹/۶	G
سریالت و همکاران [۱۰۲]	۵	۳۰۴-۵۱	۳۴/۳	C, G	ژانگ و همکاران [۱۰۳]	۱	۱۵۰	۱۸/۳۷-۰/۰	C, G
وینسنت و ازبکالوگلو [۱۰۴]	۶	۱۵۲	۱۴/۴۱-۸/۷	G	بخشی و همکاران [۱۰۵]	۵	۱۵۰	۳۵/۳۸-۵/۰	C
وانگ و وو [۱۰۶]	۱۲	۱۵۰	۴۷/۵۰-۷/۸	G	المسلم [۱۰۷]	۴	۱۵۰	۳۰/۵۲-۹/۱	C
وانگ و وو [۱۰۸]	۱۸	۱۹۴-۷۰	۲۸/۶	C	هوی و کاربهراری [۱۰۹]	۱۲	۱۵۲	۲۴/۵۱-۰/۶	A
وو و ژانگ [۱۱۰]	۳۴	۱۵۰	۶/۲	C	ایلیکی و همکاران [۱۱۱]	۱۲	۱۵۰	۲۰/۳۶-۶/۷	C
وانگ و ژانگ [۱۱۲]	۲	۱۵۰	۳۰/۵	C	عیسی و کارام [۱۱۳]	۹	۱۵۰	۴۷/۵۱-۳/۱	AFRP

مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور (MPa)	*FRP نوع	مقاله	تعداد نمونه	قطر نمونه (mm)	مقاومت بتن محصور (MPa)	*FRP نوع
واتانابه و همکاران [۱۱۴]	۹	۱۰۰	۳۰/۲	C, A, HM-C	لین و جن [۱۱۵]	۱۰	۱۲۰	۳۲/۷	G, HM-C
وونگ و همکاران [۱۱۶]	۴	۱۵۲/۵	۳۶/۴۶-۵/۷	G	لین و لیو [۱۱۷]	۶	۱۰۰	۲۳/۹	C
وو و ژانگ [۱۱۸]	۴	۱۵۰	۲۸/۳۰-۷/۱	C	میچی و همکاران [۱۱۹]	۶	۱۵۰-۱۰۰	۲۳/۲۶-۶/۳	C
وو و همکاران [۱۲۰]	۴	۱۵۰	۲۳/۰	C, A, G, HM-C	وینسنت و ازبکلوگلو [۱۲۱]	۶	۱۵۲	۴۹/۴	A
وو و همکاران [۱۲۲]	۱۰	۱۵۰	۲۳/۱	C, A, G, HM-C					

۱۱, HM-C=HM-CFRP, G=GFRP, C=CFRP, A=AFRP

نمونه‌های شامل شده در این جامعه آماری قطرهای ۴۷ تا ۴۰۶ میلی‌متر با متوسط ۱۵۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری محصور نشده ۶/۲ تا ۵۵/۲ مگاپاسکال با متوسط ۳۵ مگاپاسکال دارند. انواع FRP به‌کاررفته در این داده‌ها عبارت‌اند از: GFRP, AFRP, CFRP و HM-CFRP. مدول الاستیسیته‌ی آن‌ها از ۴/۹ تا ۶۴۰ تا ۱۷۰ گیگاپاسکال با متوسط ۱۷۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی نهایی آن‌ها از ۷۵ تا ۴۵۱۰ مگاپاسکال با میانگین ۲۷۰۳ مگاپاسکال است. تمام پوشش‌های FRP به‌کاررفته در این داده‌ها تک‌جهت یا تک‌سویه (با جهت حلقه‌ای) می‌باشند. ۷۰ درصد از این داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت تصادفی جهت مدل‌سازی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی پس‌انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی استفاده شد، از سایر نمونه‌های باقی‌مانده ۱۵ درصد به‌صورت تصادفی برای آزمون و ۱۵ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است.

۶- روابط موجود برای تعیین مقاومت فشاری بتن محصورشده

مدل‌های گوناگونی برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP در مقالات ارائه شده است. برخی از این مدل‌ها در جدول (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۳: برخی از مدل‌های تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصورشده با FRP.

توضیحات	مدل	مقاله
$f_l = \frac{2f_{frp}t_j}{D}$	$f'_{cc} = f'_c(0.75 + 2.7(\frac{f_l}{f'_c})^{0.9})$	وو و ونی [۱۲۳]
$f_l = \frac{2f_{frp}t_j}{D}$	$f'_{cc} = 0.7f'_c + 1.8f_l + 5.7\frac{t_j}{D} + 13$	فام و هادی [۱۲۴]

9 Aramid Fiber Reinforced Polymers

1 Carbon Fiber Reinforced Polymers

1 Glass Fiber Reinforced Polymers

1 High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymers

$f_{lo} = k_1(0.43 + 0.009 \frac{k_1}{f_c}) \varepsilon_{co}$ $k_1 = \frac{2E_{frp}t_j}{D} \geq f_c^{1.65}$ $f_{l,a} = \frac{2E_{frp}\varepsilon_{h,rup}t_j}{D}$	$f'_{cc} = (1 + 0.0058 \frac{k_1}{f_c}) f'_c + k_1(f_{l,a} - f_{lo})$	ازبکالوگلو و لیم [۱۲۵]
$f_l = \frac{2f_{frp}t_j}{D}$ $\begin{cases} k_1 = 4.5 f_{l,a}^{-0.3} & f'_c \leq 40 MPa \\ k_1 = 3.75 f_{l,a}^{-0.3} & f'_c > 40 MPa \end{cases}$	$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_l$	فهمی و وو [۱۲۶]
$\rho_k = \frac{2E_{frp}t_j}{(f'_c / \varepsilon_{co}) D}, \quad \rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}$	$\begin{cases} f'_{cc} = f'_c(1 + 3.5(\rho_k - 0.01)\rho_\varepsilon) & \rho_k \geq 0.01 \\ f'_{cc} = f'_c & \rho_k < 0.01 \end{cases}$	تنگ و همکاران [۱۲۷]
$f_l = \frac{2f_{frp}t_j}{D}$	$f'_{cc} = f'_c(1 + 2.25(\frac{f_l}{f'_c})^{\frac{5}{4}})$	یوسف و همکاران [۱۰۱]
$f_l = \frac{2f_{frp}t_j}{D}$	$f'_{cc} = f'_c + 0.93 f_l$	کوسا و همکاران [۱۲۸]
$f_{l,a} = \frac{2E_{frp}\varepsilon_{h,rup}t_j}{D}$	$f'_{cc} = f'_c(0.616 + \frac{f_{l,a}}{f'_c} + 1.57 \sqrt{\frac{f_{l,a}}{f'_c} + 0.06})$	گورانیک و گونوان [۱۲۹]
$f_{l,a} = \frac{2E_{frp}\varepsilon_{h,rup}t_j}{D}$	$f'_{cc} = f'_c(1 + 3.3 \frac{f_{l,a}}{f'_c})$	لام و تنگ [۱۳۰]

در این جدول، D نشان دهنده قطر نمونه‌های استوانه‌ای، t_j ضخامت دورپیچ FRP، f_{frp} مقاومت نهایی کششی FRP، f_{frp} مدول الاستیسیته کششی FRP، f_l تنش محصورشدگی بتن ناشی از FRP، $f_{l,a}$ تنش محصورشدگی واقعی بتن، f'_c مقاومت فشاری بتن محصورنشده، f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصورشده، ε_{co} کرنش متناظر با f'_c بتن محصورنشده و $\varepsilon_{h,rup}$ کرنش واقعی پارگی FRP که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \quad (۲)$$

ε_{frp} کرنش کششی نهایی مواد FRP و k_ε عامل کرنش موثر می‌باشد که مقدار آن در مطالعات مختلف، متفاوت در نظر گرفته شده است.

۷- ارزیابی مدل‌های ارائه شده

در این پژوهش از نرم افزار MATLAB جهت برنامه نویسی و مدل سازی شبکه عصبی استفاده شده است. به منظور ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، از یک سری داده‌های آزمایشگاهی که در روند مدل سازی تأثیری نداشته‌اند، استفاده شده است. بنابراین، ۳۰ درصد باقی مانده جدول (۲) به صورت تصادفی برای ارزیابی استفاده می‌شود.

جهت مقایسه بهتر مدل‌ها، علاوه بر خطای کلی عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی می‌شود. این شاخص‌های آماری عبارتند از: ۱- میانگین مربع خطا، ۲- متوسط قدر مطلق خطا و ۳- انحراف معیار که به ترتیب با روابط (۶) تا (۸) تعیین می‌شوند:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{Theo_i - Expe_i}{Expe_i})^2}{N} \quad (۶)$$

$$AAE = \frac{\sum_1^N \left| \frac{Theo_i - Expe_i}{Expe_i} \right|}{N} \quad (7)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_1^N \left(\frac{Theo_i}{Expe_i} - \frac{Theo_{avg}}{Expe_{avg}} \right)^2}{N-1}} \quad (8)$$

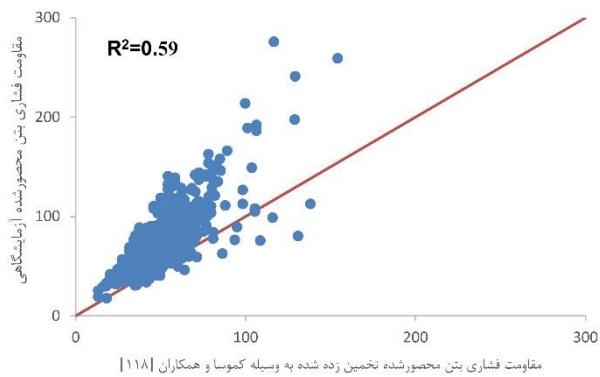
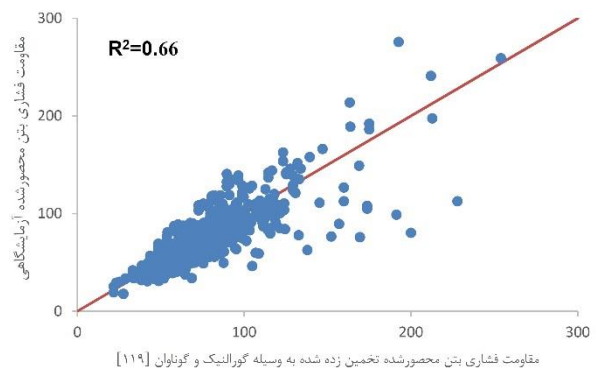
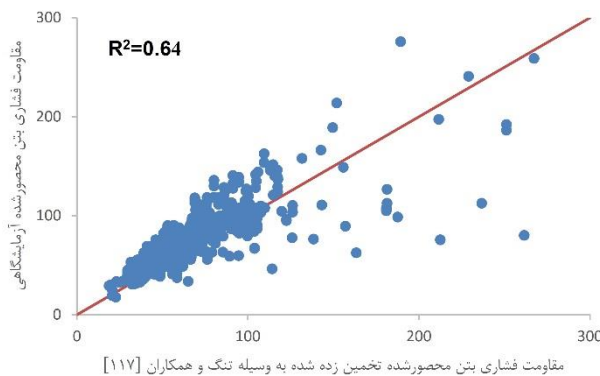
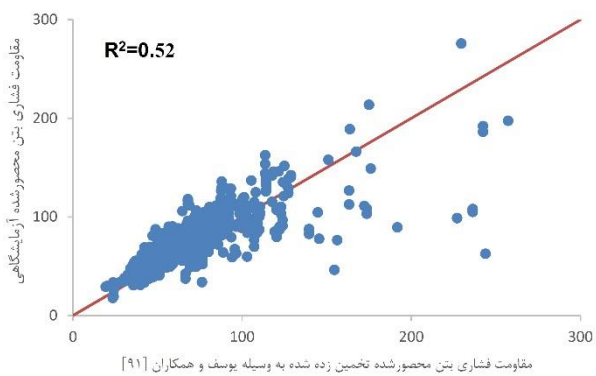
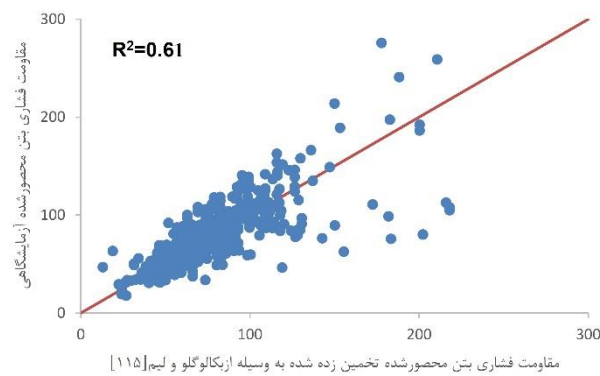
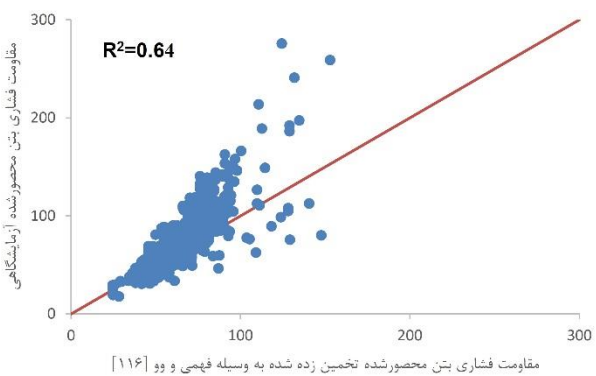
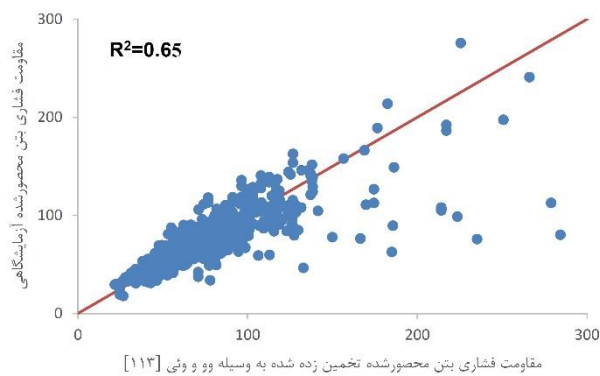
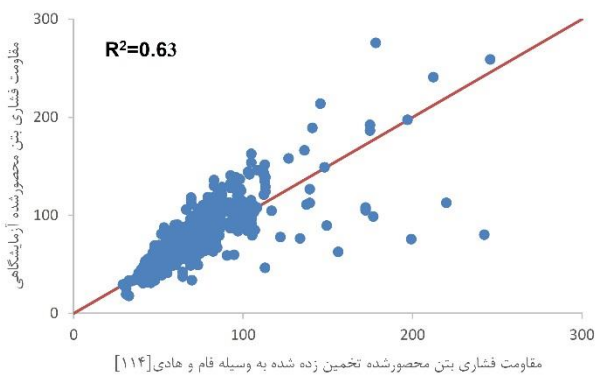
که در آنها Theo و Expe به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقاومت فشاری تخمین‌زده شده و مقاومت فشاری آزمایشگاهی می‌باشد. شاخص‌های آماری محاسبه‌شده به منظور ارزیابی عملکرد مدل ارائه‌شده برای تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۴)، خلاصه شده‌اند.

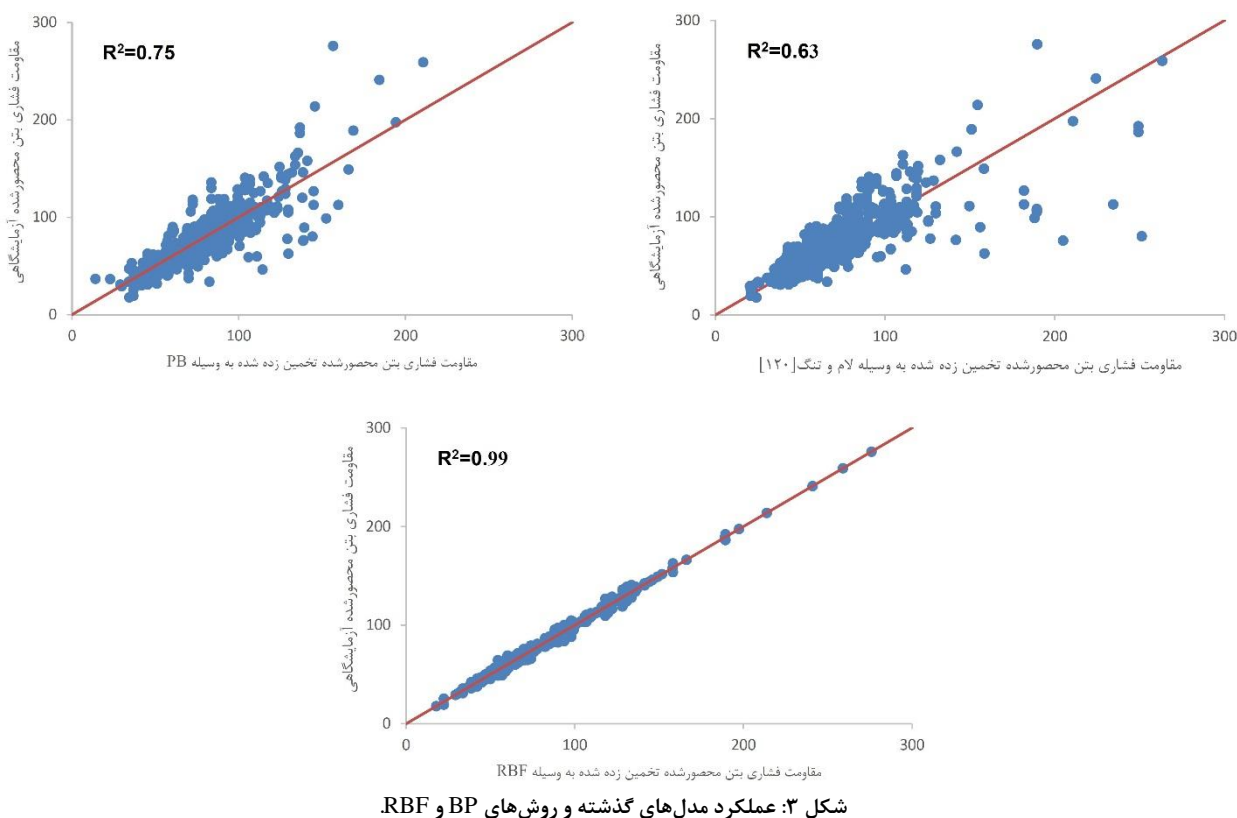
همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود استفاده از روش‌های شبکه مصنوعی نسبت به مدل‌های دیگر، با توجه به نتایج آماری دارای خطای کمتری است. برای نمونه‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی، روش شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی به ترتیب باعث کاهش ۳۳ و ۹۱ درصدی خطای کلی نسبت به میانگین روش‌های تجربی شده‌اند. همچنین، برای نمونه‌های استفاده‌شده برای ارزیابی، روش شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی به ترتیب باعث کاهش ۲۷ و ۹۲ درصدی خطای کلی نسبت به میانگین روش‌های تجربی شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که روش توابع پایه شعاعی مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصورشده با FRP را با دقت بیشتری تخمین می‌زند.

برای مقایسه روش‌های شبکه عصبی بهتر است شاخص‌های آماری نمونه‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گیرد. در نمونه‌های ارزیابی مقدار شاخص‌های آماری روش RBF نسبت به روش BP کمتر است، به طوری خطای کلی نمونه‌های ارزیابی در روش RBF تقریباً یک دهم روش BP می‌باشد. بنابراین روش RBF می‌تواند روشی مناسب برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP باشد و نسبت به روش BP دارای عملکرد بهتری است.

جدول ۴: شاخص‌های آماری برای نمونه‌های بتنی محصورشده با FRP

نمونه‌های مدل‌سازی				نمونه‌های ارزیابی				نوع مدل
e_{tot}	SD	AAE	MSE	e_{tot}	SD	AAE	MSE	
۱۷/۳۳	۲۲/۳۹	۱۶/۶	۵/۰۳	۱۷/۸۵	۲۸/۱۸	۱۷/۲۹	۷/۸۸	لام و تنگ [۱۳۰]
۱۶/۱۸	۲۴/۴۶	۱۵/۹۰	۶/۰۰	۱۷/۸۲	۳۲/۶۵	۱۷/۸۵	۱۰/۸۲	وو و وئی [۱۲۳]
۱۶/۳۴	۲۱/۰۱	۱۵/۳	۴/۴۴	۱۷/۴۵	۲۷/۰۵	۱۶/۶۴	۷/۲۱	فام و هادی [۱۲۴]
۱۶/۷۰	۲۳/۲۷	۱۶/۵۳	۵/۳۴	۱۸/۰۷	۲۸/۱۱	۱۷/۶۹	۷/۹۰	ازیکالوگلو و لیم [۱۲۵]
۱۹/۴۱	۲۰/۴۲	۱۷/۱۵	۴/۴۰	۱۸/۷۵	۲۱/۱۶	۱۶/۹۹	۴/۶۶	فهمی و وو [۱۲۶]
۱۸/۹۴	۲۱/۰۸	۱۷/۹۵	۵/۵۷	۱۹/۹۷	۲۸/۵۶	۱۹/۳۰	۸/۸۳	تنگ و همکاران [۱۲۷]
۱۹/۱۲	۲۸/۳۶	۱۸/۱۸	۸/۲۶	۲۲/۹۵	۴۶/۵۲	۲۲/۲۸	۲۱/۵۴	یوسف و همکاران [۱۰۱]
۳۱/۸۵	۱۷/۷۳	۲۸/۵۴	۱۰/۳۷	۳۱/۵۸	۱۸/۱۹	۲۹/۰۲	۱۰/۴۸	کوسا و همکاران [۱۲۸]
۱۶/۶۰	۲۲/۵۸	۱۷/۱۵	۵/۳۳	۱۶/۹۱	۲۴/۸۶	۱۷/۲۵	۶/۵۴	گورالنیک و گونوان [۱۲۹]
۱۹/۱۶	۲۲/۳۶	۱۸/۱۴	۶/۰۸	۲۰/۱۵	۲۸/۳۶	۱۹/۳۷	۹/۵۴	میانگین روش‌های تجربی
۱۲/۷۹	۱۸/۶۶	۱۲/۷۲	۳/۵۰	۱۴/۶۵	۲۳/۴۳	۱۵/۷۵	۵/۵۷	شبکه پس انتشار خطا (BP)
۱/۸۲	۳/۲۳	۱/۸۸	۰/۱۰	۱/۶۰	۳/۲۳	۱/۷۸	۰/۱۰	شبکه توابع پایه شعاعی (RBF)





برای مقایسه روش‌های شبکه مصنوعی با مدل‌های موجود در مطالعات گذشته بهتر است از شاخص‌های آماری کل نمونه‌ها استفاده گردد. شکل ۳ عملکرد مدل‌های وو و وی [۱۲۳]، فام و هادی [۱۲۴]، ازبک‌الوگلو و لیم [۱۲۵]، فهمی و وو [۱۲۶]، تنگ و همکاران [۱۲۷]، یوسف و همکاران [۱۰۱]، کموسا و همکاران [۱۲۸]، گورانیک و گوناوان [۱۲۹]، لام و تنگ [۱۳۰]، روش شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی برای کل نمونه‌های (۷۳۲ نمونه) آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. شکل ۳ نشان می‌دهد که تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده با FRP با استفاده از شبکه‌های مصنوعی عملکرد بهتری دارند. در شکل ۳ ضریب همبستگی (R^2) برای مدل‌های تجربی مطالعات گذشته و روش‌های تخمین شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی باعث افزایش ۱۳ و ۳۷ درصدی ضریب همبستگی نسبت به میانگین ضریب همبستگی مدل‌های تجربی گذشته می‌شوند. این مقایسه نشان می‌دهد روش RBF با ضریب همبستگی ۰/۹۹ دارای عملکرد بهتری نسبت به روش BP برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP می‌باشد.

برای مقایسه بیشتر مدل‌ها، تابع Z که اثر خطای کلی و ضریب همبستگی را در خود جای داده است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = 1 - R^2 + e \quad (9)$$

مقادیر این تابع برای کلیه مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه در جدول (۵) آورده شده است (در ۷۳۲ نمونه). همچنین برای یافتن اثر روش‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP، درصد کاهش مقدار Z ، برای هر دو روش نسبت به مدل‌های ارائه شده در جدول (۳) در این جدول آورده شده است.

جدول (۵): مقایسه مقدار تابع بهینه برای مدل‌های ارائه شده

مدل / روش	Z	درصد کاهش یا افزایش روش RBF	درصد کاهش یا افزایش روش BP
لام و تنگ [۱۳۰]	۱۷/۴۹	-۸۹/۲۲	-۲۲/۲۸
وو و ونی [۱۲۳]	۱۶/۶۶	-۸۸/۶۸	-۱۸/۴۱
فام و هادی [۱۲۴]	۱۶/۶۵	-۸۸/۶۷	-۱۸/۳۶
ازیکالوگلو و لیم [۱۲۵]	۱۷/۱۰	-۸۸/۹۷	-۲۰/۵۱
فهمی و وو [۱۲۶]	۱۹/۲۱	-۹۰/۱۸	-۲۹/۲۴
تنگ و همکاران [۱۲۷]	۱۹/۲۴	-۹۰/۲۰	-۲۹/۳۵
یوسف و همکاران [۱۰۱]	۲۰/۲۵	-۹۰/۶۹	-۳۲/۸۷
کوسا و همکاران [۱۲۸]	۳۱/۷۷	-۹۴/۰۶	-۵۷/۲۱
گورالنیک و گوناوان [۱۲۹]	۱۶/۶۹	-۸۸/۷۰	-۱۸/۵۵

در جدول (۵) علامت منفی نشانه کاهش خطا و علامت مثبت نشانه‌ی افزایش خطا نسبت به مدل ذکر شده می‌باشد. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد در میان روش‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصورشده روش RBF نتایج بهتری ارائه می‌دهد. همچنین تفاوت زیادی میان دقت این دو روش وجود دارد. باتوجه به جدول (۵) روش‌های RBF و BP به طور میانگین باعث کاهش ۹۰ و ۲۷ درصدی مقدار تابع Z می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از روش‌های تخمین شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصورشده با FRP استفاده شد که شبکه عصبی پس انتشار خطا با ۵ نورون لایه مخفی شروع به آموزش می‌کند و باتوجه به میزان خطایی که با استفاده روش گرادیان نزولی محاسبه می‌گردد، وزن‌ها و بایاس‌ها را برای حرکت روبه‌جلو تنظیم مجدد می‌کند. شبکه RBF که در لایه پنهان آن از تابع پایه شعاعی به‌عنوان تابع فعال‌سازی استفاده می‌شود. این شبکه نیز با بردارهای مراکز تصادفی آموزش داده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. استفاده از شبکه‌های مصنوعی برای تخمین مقاومت فشاری بتن دایره‌ای محصورشده با FRP دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تجربی مطالعات گذشته دارد. به‌طوری‌که استفاده از روش‌های تخمین شبکه پس انتشار خطا و شبکه توابع پایه شعاعی به ترتیب باعث کاهش ۲۵ و ۹۰ درصدی خطای کلی نسبت به میانگین روش‌های تجربی شده‌اند.
۲. ضریب همبستگی نتایج روش‌های RBF و BP با نتایج آزمایشگاهی (R^2) به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۷۵ می‌باشد. این نشان می‌دهد در میان دو روش ارائه‌شده شبکه عصبی، روش RBF مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP را بهتر تخمین می‌زند.
۳. زمانی که از تابع Z که تابعی از خطای کلی و ضریب همبستگی است برای مقایسه استفاده می‌شود، در میان مدل‌های موجود در مطالعات گذشته، مدل فام و هادی [۱۲۴] عملکرد بهتری دارد. در صورتی استفاده از روش‌های شبکه مصنوعی RBF و BP برای تخمین مقاومت فشاری استوانه‌های بتنی محصور شده با FRP، مقدار Z به ترتیب ۸۹ و ۱۸ درصد نسبت به مدل فام و هادی [۱۲۴] کاهش می‌یابد.

۹- مراجع

- [1] Fam, A. and Rizkalla, S. H. (2001). Behavior of axially loaded concrete-filled circular FRP tubes. *ACI Structural Journal*, 98(3), 280-289.
- [2] Teng, J., Chen, J.-F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002). FRP: strengthened RC structures. *Frontiers in Physics*, 266.
- [3] Becque, J., Patnaik, A. K., and Rizkalla, S. H. (2003). Analytical models for concrete confined with FRP tubes. *Journal of Composites for Construction*, 7(1), 31-38.

- [4] Nanni, A. and Bradford, N. M. (1995). FRP jacketed concrete under uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, 9(2), 115-124.
- [5] محمودآبادی and پور, س. بررسی عددی اثر شکل مقطع بر ظرفیت باربری نهایی ستون بتن مسلح تقویت شده با CFRP. نشریه مهندسی سازه و ساخت, ۷ (1).
- [6] ساجدی, س. ا., شفیع نیام, and رضوی طوسی, و. (۲۰۱۸). بررسی رفتار ستون های بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و محصور شده با غلاف GRP و دورپیچ FRPC. نشریه مهندسی سازه و ساخت, -۲۲۰۶۵, ۱۰, ۱۶۰۲. /jsce.2018.138470.1602.
- [7] Tarigan, J., Diedan, R., and Suryana, Y. (2017). Plate recognition using backpropagation neural network and genetic algorithm. *Procedia computer science*, 116, 365-372.
- [8] Topcu, Bekir, I., and Sarıdemir, M. (2008). Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science*, 41(3), 305-311.
- [9] Topcu and Sarıdemir, M. (2008). Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural network and fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 22(4), 532-540.
- [10] Altun, F., Kişi, Ö., and Aydın, K. (2008). Predicting the compressive strength of steel fiber added lightweight concrete using neural network. *Computational Materials Science*, 42(2), 259-265.
- [11] Venkatesan, P. and Anitha, S. (2006). Application of a radial basis function neural network for diagnosis of diabetes mellitus. *Current Science (00113891)*, 91(9).
- [12] Cevik, A. and Guzelbey, I. H. (2008). Neural network modeling of strength enhancement for CFRP confined concrete cylinders. *Building and Environment*, 43(5), 751-763.
- [13] Wu, Y.-b., Jin, G.-f., Ding, T., and Meng, D. (2010). Modeling confinement efficiency of FRP-confined concrete column using radial basis function neural network. *2010 2nd international workshop on intelligent systems and applications: IEEE*, 1-6.
- [14] Naderpour, H., Kheyroddin, A., and Amiri, G. G. (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 92(12), 2817-2829.
- [15] Cevik, A. (2011). Modeling strength enhancement of FRP confined concrete cylinders using soft computing. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5662-5673.
- [16] Elsanadedy, H., Al-Salloum, Y., Abbas, H., and Alsayed, S. (2012). Prediction of strength parameters of FRP-confined concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 228-239.
- [17] Jalal, M. and Ramezani-pour, A. A. (2012). Strength enhancement modeling of concrete cylinders confined with CFRP composites using artificial neural networks. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2990-3000.
- [18] Cascardi, A., Micelli, F., and Aiello, M. A. (2017). An Artificial Neural Networks model for the prediction of the compressive strength of FRP-confined concrete circular columns. *Engineering Structures*, 140, 199-208.
- [19] Mansouri, I., Kisi, O., Sadeghian, P., Lee, C.-H., and Hu, J. W. (2017). Prediction of ultimate strain and strength of FRP-confined concrete cylinders using soft computing methods. *Applied Sciences*, 7(8), 751.
- [20] 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.
- [21] Kamgar, R., Naderpour, H., Komeleh, H. E., Jakubczyk-Gałczyńska, A., and Jankowski, R. (2020). A proposed soft computing model for ultimate strength estimation of FRP-confined concrete cylinders. *Applied Sciences*, 10(5), 1769.
- [22] Hamid, F. L., Jumaa, G. B., and Weli, S. S. (2021). Predicting ultimate strength of FRP and lateral steel confined circular concrete columns using Artificial Neural Networks. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22(3), 493-503.
- [23] Ahmad, A., Plevris, V., and Khan, Q.-u.-Z. (2020). Prediction of Properties of FRP-Confined Concrete Cylinders Based on Artificial Neural Networks. *Crystals*, 10(9), 811.
- [24] Amin, M. A., Hanif, M. K., Sarwar, M. U., Rehman, A., Waheed, F., and Rehman, H. Parallel Backpropagation Neural Network Training Techniques using Graphics Processing Unit.

- [25] Zhang, N., Ma, Y., and Zhang, Q. (2018). Prediction of sea ice evolution in Liaodong Bay based on a back-propagation neural network model. *Cold Regions Science and Technology*, 145, 65-75.
- [26] Cobaner, M., Seckin, G., Seckin, N., and Yurtal, R. (2010). Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels and ducts using neural networks. *Water and Environment Journal*, 24(2), 133-139.
- [27] Xu, A., Jin, X., and Guo, P. (2006). Two-dimensional PCA combined with PCA for neural network based image registration. *International Conference on Natural Computation*: Springer, 696-705.
- [28] Afshin, T. et al. (2016). Prediction of water formation temperature in natural gas dehydrators using radial basis function (RBF) neural networks. *Natural Gas Industry B*, 3(2), 173-180.
- [29] Khan, S., Naseem, I., Malik, M. A., Togneri, R., and Bennamoun, M. (2018). A fractional gradient descent-based rbf neural network. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 37(12), 5311-5332.
- [30] Du, K.-L. and Swamy, M. N. (2006). *Neural networks in a softcomputing framework*: Springer Science & Business Media
- [31] Ahmad, S., Khaloot, A., and Irshaid, A. (1991). Behaviour of concrete spirally confined by fibreglass filaments. *Magazine of Concrete Research*, 43(156), 143-148.
- [32] Cui, C. and Sheikh, S. (2010). Experimental study of normal-and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 553-561.
- [33] Aire, C., Gettu, R., Casas, J., Marques, S., and Marques, D. (2010). Concrete laterally confined with fibre-reinforced polymers (FRP): experimental study and theoretical model. *Materiales de Construcción*, 60(297), 19-31.
- [34] Hosotani, M., Kawashima, K., and Hoshikuma, J.-i., "A model for confinement effect for concrete cylinders confined by carbon fiber sheets," 1088-3800, 1997.
- [35] Akogbe, R.-K., Liang, M., and Wu, Z.-M. (2011). Size effect of axial compressive strength of CFRP confined concrete cylinders. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 49-55.
- [36] Ilki, A., Kumbasar, N., and Koc, V. (2002). Strength and deformability of low strength concrete confined by carbon fiber composite sheets. *Proc. ASCE 15th Engineering Mechanics Conference*
- [37] Al-Salloum, Y. and Siddiqui, N. (2009). Compressive strength prediction model for FRP-confined concrete. *Proceedings, ninth international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures*, 97-106.
- [38] Issa, C. (2007). The effect of elevated temperatures on CFRP wrapped concrete cylinders. *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Ed. by TC Triantafillou. Patras, Greece
- [39] Au, C. and Buyukozturk, O. (2005). Effect of fiber orientation and ply mix on fiber reinforced polymer-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 397-407.
- [40] Rochette, P. and Labossiere, P. (2000). Axial testing of rectangular column models confined with composites. *Journal of composites for construction*, 4(3), 129-136.
- [41] Benzaid, R., Mesbah, H., and Chikh, N. E. (2010). FRP-confined concrete cylinders: axial compression experiments and strength model. *Journal of Reinforced plastics and composites*, 29(16), 2469-2488.
- [42] Jiang, T. and Teng, J. (2007). Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete. *Engineering Structures*, 29(11), 2968-2986.
- [43] Berthet, J., Ferrier, E., and Hamelin, P. (2005). Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study. *Construction and Building Materials*, 19(3), 223-232.
- [44] Karabinis, A. and Rousakis, T. (2002). Concrete confined by FRP material: a plasticity approach. *Engineering structures*, 24(7), 923-932.
- [45] Bisby, L., Take, W., and Caspary, A. (2007). Quantifying strain variation in FRP confined concrete using digital image correlation: Proof-of-concept and initial results. *Proc., 1st Asia-Pacific Conf. on FRP in Structures*: Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hong Kong, Hong Kong, 599-604.
- [46] Karam, G. and Tabbara, M. (2004). Corner effects in CFRP-wrapped square columns. *Magazine of Concrete Research*, 56(8), 461-464.

- [47] Bisby, L., Chen, J., Li, S., Stratford, T., Cueva, N., and Crossling, K. (2011). Strengthening fire-damaged concrete by confinement with fibre-reinforced polymer wraps. *Engineering Structures*, 33(12), 3381-3391.
- [48] Karantzikis, M., Papanicolaou, C. G., Antonopoulos, C. P., and Triantafillou, T. C. (2005). Experimental investigation of nonconventional confinement for concrete using FRP. *Journal of Composites for Construction*, 9(6), 480-487.
- [49] Bullo, S. (2003). Experimental study of the effects of the ultimate strain of fiber reinforced plastic jackets on the behavior of confined concrete. *Proceedings of the international conference composites in construction, Cosenza, Italy*, 16-19.
- [50] Karbhari, V. M. and Gao, Y. (1997). Composite jacketed concrete under uniaxial compression—Verification of simple design equations. *Journal of materials in civil engineering*, 9(4), 185-193.
- [51] Campione, G., Miraglia, N., and Scibilia, N. (2001). Comprehensive Behaviour Of RC Members Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Plastic Layers. *WIT Transactions on The Built Environment*, 57.
- [52] Kono, S., Inazumi, M., and Kaku, T. (1998). Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members. *Second International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation*
- [53] Carey, S. A. and Harries, K. A. (2005). Axial behavior and modeling of confined small-, medium-, and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets. *ACI Structural Journal*, 102(4), 596.
- [54] Lam, L. and Teng, J. (2004). Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8(6), 539-548.
- [55] Comert, M., Goksu, C., and Ilki, A. (2009). Towards a tailored stress–strain behavior for FRP confined low strength concrete. *Proceedings of 9th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures, Sydney, Australia*
- [56] Lam, L., Teng, J., Cheung, C., and Xiao, Y. (2006). FRP-confined concrete under axial cyclic compression. *Cement and Concrete Composites*, 28(10), 949-958.
- [57] Lee, J.-Y., Yi, C.-K., Jeong, H.-S., Kim, S.-W., and Kim, J.-K. (2010). Compressive response of concrete confined with steel spirals and FRP composites. *Journal of Composite Materials*, 44(4), 481-504.
- [58] Picher, F. (1996). Confinement of concrete cylinders with CFRP, Fiber Composites in Infrastructure. *Proceedings of the first International Conference on Composites in Infrastructure*, 829-841.
- [59] Dai, J.-G., Bai, Y.-L., and Teng, J. (2011). Behavior and modeling of concrete confined with FRP composites of large deformability. *Journal of composites for construction*, 15(6), 963-973.
- [60] Piekarczyk, J., Piekarczyk, W., and Blazewicz, S. (2011). Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2365-2369.
- [61] Demers, M. and Neale, K. W. (1994). Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets. *Developments in short and medium span bridge engineering*, 895-905.
- [62] Valdmanis, V., De Lorenzis, L., Rousakis, T., and Tepfers, R. (2007). Behaviour and capacity of CFRP-confined concrete cylinders subjected to monotonic and cyclic axial compressive load. *STRUCTURAL CONCRETE-LONDON-THOMAS TELFORD LIMITED-*, 8(4), 187.
- [63] Elsanadedy, H. M., Al-Salloum, Y. A., Alsayed, S. H., and Iqbal, R. A. (2012). Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns. *Construction and Building Materials*, 29, 56-72.
- [64] Li, G., Maricherla, D., Singh, K., Pang, S.-S., and John, M. (2006). Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylinders. *Composite structures*, 74(4), 475-483.
- [65] Erdil, B., Akyuz, U., and Yaman, I. (2012). Mechanical behavior of CFRP confined low strength concretes subjected to simultaneous heating–cooling cycles and sustained loading. *Materials and structures*, 45(1-2), 223-233.

- [66] Liang, M., Wu, Z.-M., Ueda, T., Zheng, J.-J., and Akogbe, R. (2012). Experiment and modeling on axial behavior of carbon fiber reinforced polymer confined concrete cylinders with different sizes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(6), 389-403.
- [67] Evans, J., Kocman, M., and Kretschmer, T. (2008). Hybrid FRP confined concrete columns. *Honours, The School of Civil, Environmental and Mining Engineering, Univ. of Adelaide., Adelaide, Australia.*
- [68] Lin, C.-T. and Li, Y.-F. (2003). An effective peak stress formula for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(5), 882-889.
- [69] Green, M. F., Bisby, L. A., Fam, A. Z., and Kodur, V. K. (2006). FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions. *Cement and concrete composites*, 28(10), 928-937.
- [70] Mandal, S., Hoskin, A., and Fam, A. (2005). Influence of concrete strength on confinement effectiveness of fiber-reinforced polymer circular jackets. *ACI Structural Journal*, 102(3), 383.
- [71] Harmon, T. and Slattery, K. (1992). Advanced composite confinement of concrete. *Advanced composite materials in bridges and structures*, 299-306.
- [72] Mastrapa, J. (1997). Effect of construction bond on confinement with fiber composites. *Masters, University of Central Florida, Orlando, Fla.*
- [73] Harries, K. A. and Carey, S. A. (2003). Shape and "gap" effects on the behavior of variably confined concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 881-890.
- [74] Rousakis, T. and Tepfers, R. (2001). Experimental investigation of concrete cylinders confined by carbon FRP sheets, under monotonic and cyclic axial compressive load. *Research Rep*, 1(2).
- [75] Harries, K. A. and Kharel, G. (2002). Behavior and modeling of concrete subject to variable confining pressure. *Materials Journal*, 99(2), 180-189.
- [76] Rousakis, T., You, C.-S., de Lorenzis, L., Tamužs, V., and Tepfers, R., "Concrete cylinders confined by CFRP sheets subjected to cyclic axial compressive load," in *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)*: World Scientific, 2003, pp. 571-580.
- [77] Matthys, S., Taerwe, L., and Audenaert, K. (1999). Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping. *Special Publication*, 188, 217-228.
- [78] Saenz, N. and Pantelides, C. P. (2006). Short and medium term durability evaluation of FRP-confined circular concrete. *Journal of composites for construction*, 10(3), 244-253.
- [79] Micelli, F., Myers, J., and Murthy, S. (2001). Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP. *Proceedings of CCC2001 international conference on composites in construction, Porto, Portugal*
- [80] Santarosa, D., Beber, A., and Campagnolo, J. (2001). Concrete columns confined with CFRP sheets. *FRP Composites in Civil Engineering. Proceedings of the International Conference on FRP composites in Civil Engineering Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong Institution of Steel Construction*
- [81] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., Echary, H. E., Mastrapa, J. C., and Pico, O. (1998). Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *Journal of Composites for construction*, 2(4), 175-185.
- [82] Shahawy, M., Mirmiran, A., and Beitelman, T. (2000). Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 471-480.
- [83] MIYAUCHI, K. (1997). Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Japan Concrete Institute*, 217-224.
- [84] Shao, Y., Zhu, Z., and Mirmiran, A. (2006). Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility. *Cement and Concrete Composites*, 28(10), 959-968.
- [85] Modarelli, R., Micelli, F., and Manni, O. (2005). FRP-confinement of hollow concrete cylinders and prisms. *Proceedings of the 7th International Symposium on FRP reinforcement for reinforced concrete structures, Kansas City, Missouri: Citeseer*, 6-9.
- [86] Shehata, I. A., Carneiro, L. A., and Shehata, L. C. (2002). Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. *Materials and Structures*, 35(1), 50-58.

- [87] Shehata, I., Carneiro, L., and Shehata, L. (2007). Strength of confined short concrete columns. *Proc., 8th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, 1-10.
- [88] Ongpeng, J. (2006). Retrofitting RC circular columns using CFRP sheets as confinement. *Symposium on infrastructure development and the environment*, 1-10.
- [89] Silva, M. A. and Rodrigues, C. C. (2006). Size and relative stiffness effects on compressive failure of concrete columns wrapped with glass FRP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 334-342.
- [90] Owen, L. M., "Stress-strain behavior of concrete confined by carbon fiber jacketing," University of Washington, 1998.
- [91] Smith, S. T., Kim, S. J., and Zhang, H. (2010). Behavior and effectiveness of FRP wrap in the confinement of large concrete cylinders. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 573-582.
- [92] Vincent, T. and Ozbakkloglu, T. (2013). Axial Compressive Behavior of High-and Ultra High-Strength Concrete-Filled AFRP Tubes. *Advanced Materials Research: Trans Tech Publ*, 626-631.
- [93] Song, X., Gu, X., Li, Y., Chen, T., and Zhang, W. (2012). Mechanical behavior of FRP-strengthened concrete columns subjected to concentric and eccentric compression loading. *Journal of Composites for Construction*, 17(3), 336-346.
- [94] Stanton, J. and Owen, L. (2006). The influence of concrete strength and confinement type on the response of FRP-confined concrete cylinders. *Special Publication*, 238, 347-362.
- [95] Wu, H.-L., Wang, Y.-F., Yu, L., and Li, X.-R. (2009). Experimental and computational studies on high-strength concrete circular columns confined by aramid fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Composites for Construction*, 13(2), 125-134.
- [96] Suter, R. and Pinzelli, R. (2001). Confinement of concrete columns with FRP sheets. *Proc., 5th Int. Conf. on Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures*, 793-802.
- [97] Xiao, Y. and Wu, H. (2000). Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *Journal of materials in civil engineering*, 12(2), 139-146.
- [98] Tamuzs, V., Valdmanis, V., Tepfers, R., and Gylltoft, K. (2008). Stability analysis of CFRP-wrapped concrete columns strengthened with external longitudinal CFRP sheets. *Mechanics of Composite Materials*, 44(3), 199-208.
- [99] Yan, Z., Pantelides, C. P., and Reaveley, L. D. (2006). Fiber-reinforced polymer jacketed and shape-modified compression members: I-experimental behavior. *ACI structural journal*, 103(6), 885.
- [100] Teng, J. G., Yu, T., Wong, Y., and Dong, S. (2007). Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior. *Construction and building materials*, 21(4), 846-854.
- [101] Youssef, M. N., Feng, M. Q., and Mosallam, A. S. (2007). Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 614-628.
- [102] Thériault, M., Neale, K. W., and Claude, S. (2004). Fiber-reinforced polymer-confined circular concrete columns: Investigation of size and slenderness effects. *Journal of composites for construction*, 8(4), 323-331.
- [103] Zhang, S., Ye, L., and Mai, Y.-W. (2000). A study on polymer composite strengthening systems for concrete columns. *Applied composite materials*, 7(2-3), 125-138.
- [104] Vincent, T. and Ozbakkaloglu, T. (2013). Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high-and ultra high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering*, 50, 413-428.
- [105] BAKHSHI, M., ABDOLLAHI, B., MOTAVALLI, M., SHEKARCHIZADE, M., and GHALIBAFIAN, M. (2007). The experimental modeling of GFRP confined concrete cylinders subjected to axial loads. *Proceedings of the 8th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for concrete Structures, Patras, Greece*
- [106] Wang, L.-M. and Wu, Y.-F. (2008). Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering structures*, 30(2), 493-505.
- [107] Almusallam, T. H. (2007). Behavior of normal and high-strength concrete cylinders confined with E-glass/epoxy composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 629-639.

- [108] Wang, Y.-f. and Wu, H.-I. (2010). Size effect of concrete short columns confined with aramid FRP jackets. *Journal of Composites for Construction*, 15(4), 535-544.
- [109] Howie, I. and Karbhari, V. (1994). Effect of materials architecture on strengthening efficiency of composite wraps for deteriorating columns in the North-East. *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*: ASCE, 199-206.
- [110] Wu, Y.-F. and Jiang, J.-F. (2013). Effective strain of FRP for confined circular concrete columns. *Composite Structures*, 95, 479-491.
- [111] Ilki, A., Kumbasar, N., and Koc, V. (2004). Low strength concrete members externally confined with FRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, 18(2), 167-194.
- [112] Wang, Y. and Dianjie, Z. (2009). Creep-effect on mechanical behavior of concrete confined by FRP under axial compression. *Journal of engineering mechanics*, 135(11), 1315-1322.
- [113] Issa, C. A., Chami, P., and Saad, G. (2009). Compressive strength of concrete cylinders with variable widths CFRP wraps.
- [114] Watanabe, K. *et al.* (1997). Confinement effect of FRP sheet on strength and ductility of concrete cylinders under uniaxial compression. *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*, 1, 233-240.
- [115] Lin, H.-J. and Chen, C.-T. (2001). Strength of concrete cylinder confined by composite materials. *Journal of reinforced plastics and composites*, 20(18), 1577-1600.
- [116] Wong, Y., Yu, T., Teng, J., and Dong, S. (2008). Behavior of FRP-confined concrete in annular section columns. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 451-466.
- [117] Lin, H.-J. and Liao, C.-I. (2004). Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material. *Composite Structures*, 65(2), 239-250.
- [118] Wu, Y.-F. and Jiang, C. (2013). Effect of load eccentricity on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete columns. *Composite structures*, 98, 228-241.
- [119] Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., and Kobayashi, A. (1999). Strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column. *Proc Jpn Concr Inst*, 21(3), 1453-1458.
- [120] Wu, G., Lü, Z., and Wu, Z. (2006). Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites. *Construction and building materials*, 20(3), 134-148.
- [121] Vincent, T. and Ozbakkaloglu, T. (2013). Influence of fiber orientation and specimen end condition on axial compressive behavior of FRP-confined concrete. *Construction and Building materials*, 47, 814-826.
- [122] Wu, G., Wu, Z., Lu, Z., and Ando, Y. (2008). Structural performance of concrete confined with hybrid FRP composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 27(12), 1323-1348.
- [123] Wu, Y.-F. and Wei, Y. (2014). General stress-strain model for steel-and FRP-confined concrete. *Journal of composites for construction*, 19(4), 04014069.
- [124] Pham, T. M. and Hadi, M. N. (2014). Confinement model for FRP confined normal-and high-strength concrete circular columns. *Construction and Building Materials*, 69, 83-90.
- [125] Ozbakkaloglu, T. and Lim, J. C. (2013). Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model. *Composites Part B: Engineering*, 55, 607-634.
- [126] Fahmy, M. F. and Wu, Z. (2010). Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 41(3), 199-213.
- [127] Teng, J., Jiang, T., Lam, L., and Luo, Y. (2009). Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, 13(4), 269-278.
- [128] Kumutha, R., Vaidyanathan, R., and Palanichamy, M. (2007). Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. *Cement and concrete composites*, 29(8), 609-615.
- [129] Guralnick, S. A. and Gunawan, L. (2006). Strengthening of reinforced concrete bridge columns with FRP wrap. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11(4), 218-228.
- [130] Lam, L. and Teng, J. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. *Journal of reinforced plastics and composites*, 22(13), 1149-1186.