

پیش‌بینی مقاومت پیچشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با FRP با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

حسین نادرپور^{۱*}، پویان فخاریان^۲

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

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

اعضای سازه‌های بتن‌آرمه نظیر تیرهای پیرامونی، تیرهای حلقوی در پایین دال دایروی، تیرهای نگهدارنده سایبان و سایر انواع تیرها تحت بارگذاری پیچشی قرار می‌گیرند. مقاوم‌سازی چنین تیرهایی به ویژه در شرایطی که بارهای سرویس افزایش می‌یابند و یا ظرفیت سازه‌ای در اثر گذشت زمان تقلیل می‌یابد و همچنین شرایطی که به روزرسانی ضوابط آیین‌نامه‌ای انجام می‌شود، ضروری به نظر می‌رسد. تقویت تیرهای بتن‌آرمه تحت پیچش توسط صفحات FRP یکی از مدرن‌ترین تکنیک‌های موجود در صنعت ساختمان می‌باشد. مقاوم‌سازی سازه‌ها به کمک FRP باعث افزایش در ظرفیت خمشی، برشی و پیچشی و همچنین سبب تغییر در مود شکست و صفحه شکست می‌گردد. در این مقاله، پیش‌بینی مقاومت پیچشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با FRP به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای ورودی شبکه عصبی شامل عرض تیر بتن‌آرمه، ارتفاع تیر، ضخامت ورق FRP، مدول الاستیسیته ورق FRP، تنش تسلیم میلگردهای طولی و عرضی، مقاومت فشاری بتن، عرض موثر نوار تقویت برشی در راستای طول تیر، فاصله مرکز تا مرکز رکابی FRP، زاویه دورپیچ ورقه FRP و تعداد دورپیچ‌های FRP در نظر گرفته شدند. پارامتر هدف، لنگر پیچشی قابل تحمل توسط تیر می‌باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد شبکه عصبی مصنوعی بهینه با تعداد مشخص نورون در لایه پنهان، با دقت مناسبی می‌تواند مقاومت پیچشی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با FRP را تخمین بزند و از این جهت، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های زمان‌بر و پرهزینه آزمایشگاهی باشد.

کلمات کلیدی: تیر بتن‌آرمه، مقاومت پیچشی، FRP، شبکه عصبی مصنوعی

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2017.70668.1023	۱۳۹۵/۰۹/۲۹	۱۳۹۵/۱۲/۲۷	۱۳۹۶/۰۱/۱۶	۱۳۹۶/۰۱/۱۶	۱۳۹۷/۰۳/۳۰
doi: http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.70668.1023					
*نویسنده مسئول: دکتر حسین نادرپور					
پست الکترونیکی: naderpour@semnan.ac.ir					

Predicting the torsional strength of reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets in terms of artificial neural networks

H. Naderpour^{1*}, P. Fakharian²

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

2- PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) structural elements such as peripheral beams, beams supporting the canopy, ring beams of circular slabs are common members which could encounter torsional moments. One of the up-to-date and modern techniques for strengthening such beams is using FRP sheets. The increase of service loads, degradation of mechanical properties and updates in code regulations would cause to the need for retrofit. Using FRP sheets as a strengthening technique would increase the flexure, shear and torsion capacity. It would also change the failure mode and/or plane. In this article, torsional strength prediction of RC beams strengthened by FRP using artificial neural networks has been investigated. Input parameters of ANNs are RC beam width, height, FRP sheet thickness, modulus of elasticity of FRP sheet, yielding stress of longitudinal and transverse steels, the compressive strength of concrete, the effective width of shear strips along beam length, center-to-center space of FRP strips, the angle of wrapping and number of FRP layers. The target parameter is the capacity of the beam in bearing the torsional moment. The results indicate that the idealized neural network having definite number of neurons in hidden layer, can predict the torsional strength of RC beams externally bonded with FRP with a high degree of precision. Considering the mentioned precision, the method could be an efficient alternative for time-consuming and highly cost experimental programs.

ARTICLE INFO

Received: 19/12/2016

Revised: 17/03/2017

Accepted: 05/04/2017

Keywords:

RC Beam

Torsional Strength

FRP

ANN

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.70668.1023

*Corresponding author: Dr. Hosein Naderpour.

Email address: naderpour@semnan.ac.ir

درک و شناخت رفتار پیچشی تیرهای بتن آرمه بسیار پیچیده و حائز اهمیت می‌باشد و این اهمیت در صورت مقاوم‌سازی آن‌ها با FRP دو چندان می‌شود. هرچند، مطالعات و آزمایشات بسیاری در زمینه بررسی تیرهای بتن آرمه تقویت شده تحت خمش انجام شده است ولی در زمینه مطالعه رفتار پیچشی این تیرها، آزمایشات بسیار کمتر و محدودتر می‌باشند. از طرفی، محققین همواره به دنبال راهکارهایی با صرف حداقل زمان و هزینه و نتایجی با دقت کافی می‌باشند.

پیچش، یکی از پیچیده‌ترین رفتارهای سازه می‌باشد. چنانچه نیروی برشی از مرکز برش عبور نکند، تنش‌های ناشی از پیچش بوجود می‌آیند. مطالعات متعددی در ارتباط با کارایی تیرهای تقویت شده با FRP تحت بارگذاری پیچشی انجام شده است. تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی مهم به شرح زیر می‌باشند:

در سال ۲۰۰۲، Ghobarah و همکاران مقاومت پیچشی تیر بتن آرمه با دورپیچ FRP را مورد بررسی قرار دادند. تیرها با استفاده از CFRP و GFRP در حالات گوناگون تقویت شدند. نتایج نشان داد که دورپیچ کامل، در مقایسه با سایر الگوهای دورپیچ عملکرد تیر بتن آرمه را بهبود بیشتری می‌بخشد.

همچنین، تیر با دورپیچ ۴۵ درجه، کارایی بیشتری نسبت به تیر با دورپیچ با ۹۰ درجه در پیچش خالص نشان داد زیرا تارهای قائم تحت تنش بودند که برخلاف راستای الیاف بود. از طرف دیگر، تارهای مورب در راستای نیرو بودند [۱].

در سال ۲۰۰۲، Belarbi و Panchacharam، تاثیر صفحات GFRP تحت پیچش خالص را بررسی کردند. برنامه آزمایشگاهی آنها بر اثر مهار دورپیچ U شکل و راستای الیاف و اثرات دورپیچ‌های جانبی تمرکز داشت.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که الیاف با زاویه ۹۰ درجه، مقاومت بالایی را نتیجه می‌دهد در حالی که در راستای ۰ درجه، شکل‌پذیری بیشتری را باعث می‌شود. همچنین دورپیچ‌های پیوسته نسبت به دورپیچ‌های نواری شکل مناسب‌تر بودند زیرا پیوستگی باعث تامین محصورشدگی بیشتری می‌گردد. به طور مشابه، دورپیچ‌های ۳ و ۴ وجهی و ۴ وجهی رفتار مشابهی را از خود نشان دادند. تیر با دورپیچ U شکل مقاومت کمتری داشت زیرا جریان برش، کمتر کنترل می‌شد. همچنین، مهار انتهای دورپیچ مقاومت تیر را افزایش داد [۲].

در سال ۲۰۰۴، رونق و همکاران، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی استفاده از صفحات CFRP و GFRP در مقاوم‌سازی پیچشی انجام دادند. الگوهای مورد استفاده به صورت دورپیچ U شکل در تمام طول و دورپیچ U شکل به صورت نوار و نیز دورپیچ کامل در تمام طول و دورپیچ کامل به صورت نوار بود.

نتایج برآمده از آزمایشات نشان می‌دهند که حداکثر مقاومت پیچشی به بکارگیری CFRP و به میزان ۱۴۳٪ بوده است. همچنین، تیرهای تقویت شده با GFRP به مقاومت ۱۱۰٪ نسبت به نمونه کنترلی رسیدند. تیرهای با دورپیچ کامل به بیشترین مقاومت در مقایسه با تیرهای با دورپیچ U شکل دست یافتند. دو مود شکست معمول شامل گسیختگی FRP و جداسازی FRP با بکارگیری صفحات FRP مشاهده گردید [۳].

در سال ۲۰۰۶، Al-Mahaidi و Hi، آزمایش بر روی تیر با مقطع توخالی و توپر تحت پیچش خالص انجام دادند. به کمک فتوگرامتری، الگوی ترک خوردگی و تغییرشکل در تیر، مشاهده گردید. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که تیر با مقطع توپر، بار ترک‌خوردگی بیشتری را نتیجه می‌دهد؛ در حالی که بار نهایی تقریباً برابر بدست آمد [۴].

محمدیزاده و همکاران در سال ۲۰۰۹، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۶ تیر بتن آرمه تحت پیچش خالص انجام دادند. نمونه‌ها دارای یک یا دو لایه دورپیچ CFRP به منظور تقویت در برابر پیچش ساخته شدند. نتایج نشان داد که با بکارگیری در لایه FRP، مقاومت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این حال، دورپیچ U شکل تاثیر کمتری در افزایش ظرفیت پیچشی نسبت به دورپیچ کامل دارد [۵].

Hakan Arslan در سال ۲۰۱۰، پیش‌بینی مقاومت پیچشی تیرهای بتن آرمه را به کمک شبکه عصبی مصنوعی انجام داد [۶].

در سال ۲۰۱۰، Deifalla و Ghobarah یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی مقاومت پیچشی و برشی تیرهای T شکل تقویت شده با صفحات CFRP انجام دادند [۷].

در سال ۲۰۱۱، Mahmood و Mahmood تاثیر استفاده از CFRP بر روی تیرهای پیش‌تنیده با/بدون آرماتور معمولی را بررسی کردند. آزمایش با بکارگیری بار پیچشی خالص انجام شد و الگوهای مقاوم سازی شامل نوارها (با فاصله $d/2$)، دورپیچ U شکل و دورپیچ کامل بودند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های دارای آرماتور، ظرفیت پیچشی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون آرماتور دارا هستند. همچنین الگوهای دورپیچ کامل، U شکل و نوار به ترتیب باعث افزایش ۷۹٪، ۷۴٪ و ۶۸٪ در مقاومت پیچشی نهایی تیرها شدند [۸].

در سال ۲۰۱۲، Tudu یک مطالعه آزمایشگاهی به منظور مشاهده اثر تیر بتن‌آرمه تقویت شده با GFRP تحت اثر توام پیچش و خمش انجام داد. مطالعه نشان داد که دورپیچ کامل، الگوی مقاوم‌ساز موثرتری نسبت به سایر الگوهاست [۹].

در سال ۲۰۱۳، Jariwala و همکاران، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیرهای تقویت شده با GFRP انجام دادند. تیرها تحت اثر توام پیچش و خمش آزمایش شدند. نتایج نشان داد که دورپیچ کامل عرضی، مقاومت لنگر پیچشی بیشتری نسبت به سایر الگوها به دست می‌دهد. از طرف دیگر، دورپیچ‌های قائم تاثیر کمتری نسبت به دورپیچ نواری قطری داشتند. همچنین، استفاده از نوارهای گوشه باعث بهبود شکل‌پذیری تیر گردید [۱۰].

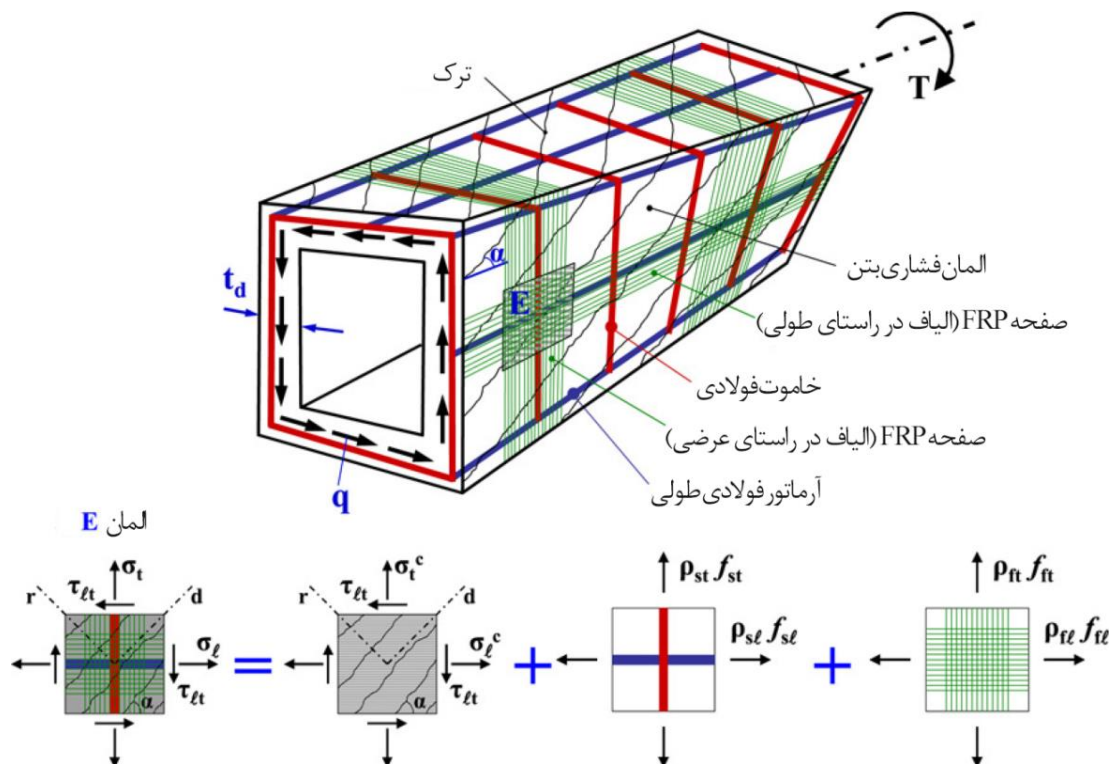
در سال ۲۰۱۶، Ranj Rafeeq [۱۱]، Behera [۱۲] و Elwan [۱۳] به بررسی آزمایشگاهی اثر افزایش مقاومت پیچشی تیرهای بتن آرمه مقاوم سازی شده با CFRP پرداختند.

شبکه عصبی مصنوعی روشی برای پیش‌بینی حل مسأله تحت آزمایشات انجام شده قبلی است که با آموزش به آن می‌توان با صرف زمان و هزینه بسیار کم به دقت قابل قبولی از نتایج دست یافت. شبکه‌های عصبی مصنوعی به کمک بهره‌گیری از قابلیت‌های مغز انسان و با استفاده از تجربیات قبلی می‌توانند در موقعیت‌های جدید، پیش‌بینی انجام دهند. امروزه یکی از مهمترین کارکردهای این شاخه از محاسبات نرم، شناسایی الگوی بین داده‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه مهندسی سازه و زلزله رشد قابل توجهی داشته است [۱۴-۲۴].

در این مقاله، ابتدا تئوری پیچش تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده توسط FRP تشریح شده و سپس روابط معتبر آیین‌نامه‌ای در این زمینه ارائه می‌گردد. سپس بر اساس یک پایگاه داده برگرفته از نتایج آزمایشات معتبر در زمینه تقویت تیرهای بتن‌آرمه با FRP و به کمک مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارتباط داده‌های ورودی و داده هدف که لنگر پیچشی نهایی قابل تحمل می‌باشد، تعیین می‌گردد.

۲- پیچش تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با ورق FRP

در شکل ۱، به عنوان نمونه‌ای رایج از تیرهای بتن‌آرمه در آزمایشات پیچش، یک تیر بتن‌آرمه با مقطع توخالی تحت لنگر پیچشی تنها (پیچش خالص) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، لنگر پیچشی توسط بتن، آرماتورها و صفحات FRP به صورت همزمان تحمل می‌شود.



شکل ۱: توزیع تنش در المان E از یک مقطع توخالی تیر بتن آرمه تحت پیچش خالص و نمایش سهم بابر بتن، خاموت و FRP [۲۵].

مدل‌های آزمایش شده از تیرهای تقویت شده با ورق‌های FRP به شکل‌های U شکل گسسته و U شکل پیوسته و دورپیچ پیوسته و دورپیچ گسسته مطابق شکل ۲ و شکل ۳ می‌باشند. مقدار مقاومت پیچشی در ورق‌های FRP در تیرهای تقویت شده با ورق‌های FRP مطابق رابطه نشریه ۳۴۵ [۲۶] به صورت زیر است:

$$T_{u,FRP} = 2\varepsilon_{FRP,e} E_{FRP} \frac{t_{FRP} W_{FRP}}{S_{FRP}} bh \quad (1)$$

همچنین رابطه مقاومت پیچشی تیرهای تقویت شده با ورق FRP از دید آیین‌نامه FIB-14 [۳] برای حالت‌های دورپیچ کامل و دورپیچ U شکل متفاوت و مطابق رابطه (۲) و (۳) می‌باشند:

برای حالت دورپیچ کامل:

$$T_f = \frac{2E_f \varepsilon_f t_f w_f bh \cot(\theta)}{s_f} \quad (2)$$

برای حالت دورپیچ U شکل:

$$T_f = \frac{E_f \varepsilon_f t_f w_f bh \cot(\theta)}{s_f} \quad (3)$$

کرنش موثر دورپیچ کامل با CFRP:

$$\varepsilon_{fe} = 0.17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \quad (4)$$

کرنش موثر در حالت U شکل با CFRP:

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[0.17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu}, 0.65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3} \right] \quad (5)$$

رابطه Ghobarah:

$$T_f = 0.006 w_f t_f E_f b h / s_f \quad (6)$$

یا

$$T_f = 0.003 w_f t_f E_f b h / s_f \quad (7)$$

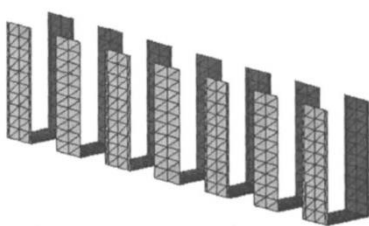
مقاومت پیچشی قابل تحمل توسط تیر:

$$T_u = T_{uc} + T_f \quad (8)$$

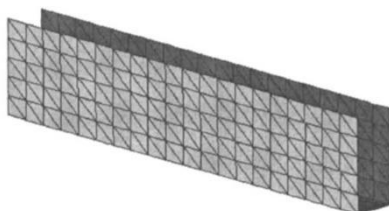
تمامی پارامترهای موجود در رابطه‌های فوق در جدول ۱ معرفی شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید پارامترهای ورق FRP مانند مدول الاستیسیته که بسته به نوع CFRP و GFRP متغییر است، ضخامت ورق، عرض موثر و تعداد لایه آن در رابطه محاسبه مقاومت پیچشی بسیار تاثیرگذار می‌باشد. همچنین مشاهده می‌کنید که مقاومت پیچشی تیرهای تقویت شده با ورق FRP پیوسته دو برابر مقاومت پیچشی همان تیر در شرایط دور پیچ FRP به صورت U شکل می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای موثر در مقاومت پیچشی تیر بتن آرمه تقویت شده با FRP

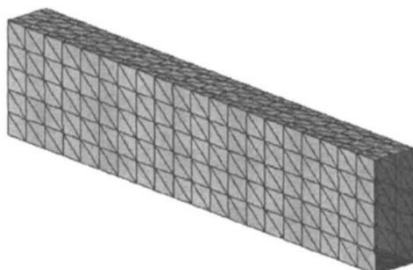
پارامترهای موثر	
b (mm)	عرض تیر بتن آرمه
h (mm)	ارتفاع تیر بتن آرمه
t_{FRP} (mm)	ضخامت ورق FRP
E_{FRP} (MPa)	مدول الاستیسیته ورق FRP
f_{yl} (MPa)	تنش تسلیم میلگردهای طولی
f_{yt} (MPa)	تنش تسلیم میلگردهای عرضی
f_c (MPa)	مقاومت فشاری بتن
w_{FRP} (mm)	عرض موثر نوار تقویتی برشی در راستای طول تیر
s_{FRP} (mm)	فاصله مرکز تا مرکز رکابی FRP
θ_{FRP}	زاویه دورپیچ ورق FRP
n_{layer}	تعداد دورپیچ FRP



الف) U شکل گسسته



ب) U شکل پیوسته



ج) دورپیچ پیوسته

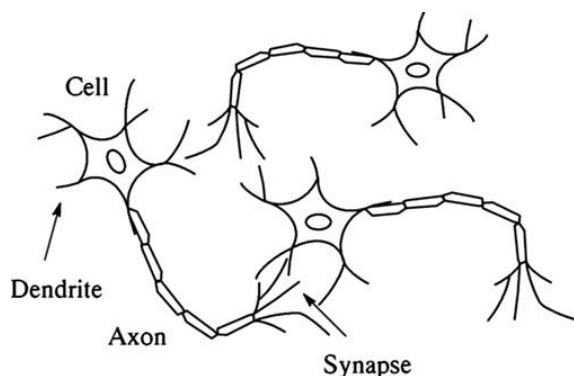
شکل ۲: شکل‌های مختلف ورق‌های تقویتی FRP دور تیر [۲۷].



شکل ۳: ورق FRP به صورت دورپیچ گسسته دور تیر [۲۵].

۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

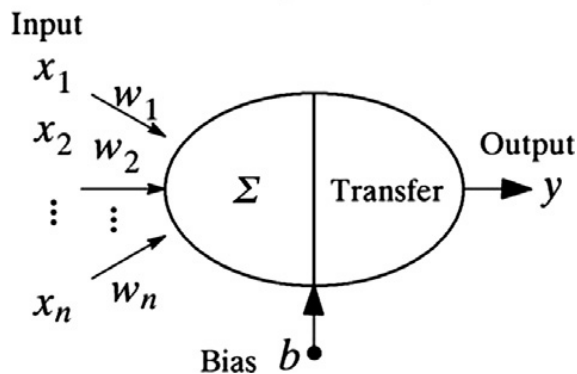
شبکه عصبی یک سیستم ارگانی شامل نورون‌ها می‌باشد که اعمال و واکنش جانداران را هماهنگ می‌سازد و سیگنال‌ها را به بخش‌های متفاوت بدن می‌فرستد. در بیشتر جانداران سیستم عصبی شامل دو بخش مرکزی و بخش جانبی است. در استفاده‌های جدیدتر، این عبارت به شبکه عصبی مصنوعی که از نورون‌هایی مصنوعی ساخته شده‌است هم اشاره دارد. شبکه عصبی مصنوعی یک سامانه پردازشی داده‌ها است که از مغز انسان ایده گرفته و پردازش داده‌ها را به عهده پردازنده‌های کوچک و بسیار زیادی سپرده که به صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی با یکدیگر رفتار می‌کنند تا یک مسئله را حل نمایند. در این شبکه‌ها به کمک دانش برنامه‌نویسی، ساختار داده‌ای طراحی می‌شود که می‌تواند همانند نورون عمل کند. به این ساختار داده، نورون گفته می‌شود. سپس، با ایجاد شبکه‌ای بین این نورون‌ها و اعمال یک الگوریتم آموزشی به آن، شبکه را آموزش می‌دهند. نورون‌های طبیعی، ورودی خود را از طریق سیناپس دریافت می‌کنند. این سیناپس‌ها بر روی دندریت‌ها یا غشاء عصب قرار دارند. در یک عصب واقعی، دندریت‌ها دامنه پالس‌های دریافتی را تغییر می‌دهند که نوع این تغییر در طول زمان یکسان نمی‌ماند و در اصطلاح، توسط عصب یاد گرفته می‌شود. اگر سیگنال دریافتی به حد کافی قوی باشد، عصب فعال شده و سیگنالی را در طول اکسون منتشر می‌کند. این سیگنال نیز به نوبه خود می‌تواند به یک سیناپس دیگر وارد شده و سایر اعصاب را تحریک کند. شکل ۴ یک نمونه عصب واقعی را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۴: نمای شماتیک از عصب و اجزای آن [۱۴].

در حالت ساده شده، مدل یک عصب باید شامل ورودی‌هایی باشد که در نقش سیناپس انجام وظیفه کنند. این ورودی‌ها در وزن‌هایی ضرب می‌شوند تا قدرت سیگنال را تعیین کنند. نهایتاً یک عملگر ریاضی تصمیم‌گیری می‌کند که آیا نورون فعال شود یا خیر و اگر جواب مثبت باشد، میزان خروجی را مشخص می‌سازد. بنابراین شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از مدل ساده شده عصب واقعی به پردازش اطلاعات می‌پردازد. در شکل ۵ نمای شماتیکی از یک نورون محاسباتی و اجزای آن آورده شده است.

$$y = f(\sum wx + b)$$



شکل ۵: نمای شماتیک از یک نورون محاسباتی [۱۰]

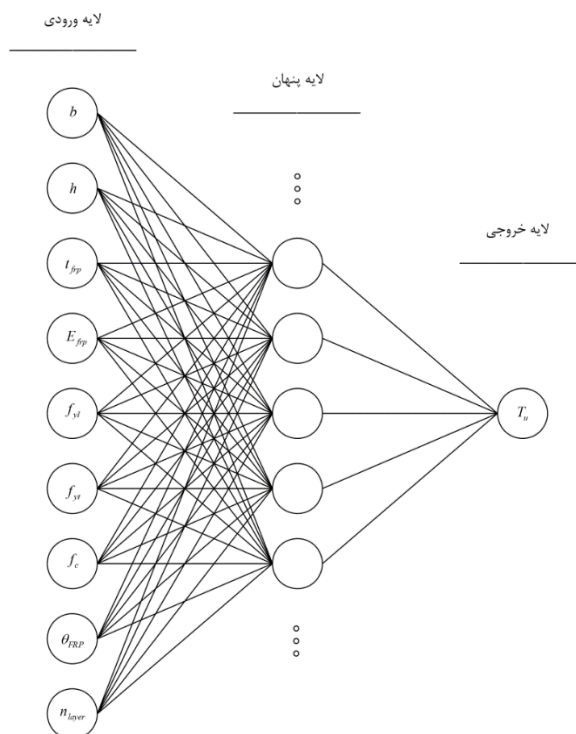
۴- مدل سازی

برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آزمایشات انجام شده در موضوع مقاومت پیچشی تیرهای تقویت شده با انواع مختلف FRP استفاده شده است. طبق این مطالعات، در سال ۲۰۰۱، Zhang با ۶ نمونه [۲۸]، Ghobarah در سال ۲۰۰۲ با ۶ نمونه [۱]، Panchacharam در سال ۲۰۰۲ با ۷ نمونه [۲]، عاملی در سال ۲۰۰۷ با ۱۰ نمونه [۳]، Adrian در سال ۲۰۰۷ با ۴ نمونه [۲۹]، Chalioris در سال ۲۰۰۸ با ۶ نمونه [۳۰]، محمدی زاده در سال‌های ۲۰۰۸ [۳۱] و ۲۰۰۹ [۳۲] به ترتیب با ۴ و ۱۰ نمونه Shengqiang در سال ۲۰۱۶ با ۳ نمونه [۳۳] استفاده شده است. در این مقاله با مجموعاً ۵۶ نمونه آزمایشگاهی فوق شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده است. ساز و کار و نوع بارگذاری در تمامی این آزمایش‌ها بصورت بار افزایشی بوده و ظرفیت نهایی همه نمونه‌ها به عنوان خروجی به دست آمده است. در ادامه مشخصات آماری برای ورودی‌ها و نتیجه این مطالعات به صورت آماری در جدول ۲ بیان شده است. تمامی پارامترها مانند ارتفاع مقطع h باید برای معرفی به شبکه با توجه به رابطه (۹) مقیاس شوند [۱۰].

$$h_{scaled} = \left[\frac{(0.9 - 0.1)(h - h_{min})}{(h_{max} - h_{min})} \right] + 0.1 \quad (9)$$

جدول ۳: مشخصات آماری داده‌های ورودی و خروجی

	b (mm)	h (mm)	t_{FRP} (mm)	w_{FRP}/s_{FRP} (mm)	E_{FRP} (MPa)	f_{yl} (MPa)	f_{yt} (MPa)	f_c (MPa)	T_u kN.m
میانگین	167.60	307.18	0.16	0.80	195.87	386.925	420.925	44.44	22.52
ماکزیمم	500	350	0.353	1	243	560	502	80.56	93.80
مینیمم	100	200	0.11	0.4	71	251	350	16.75	3.02
انحراف استاندارد	64.96	45.48	0.048	0.252	72.71	114.20	59.174	21.28	14.78

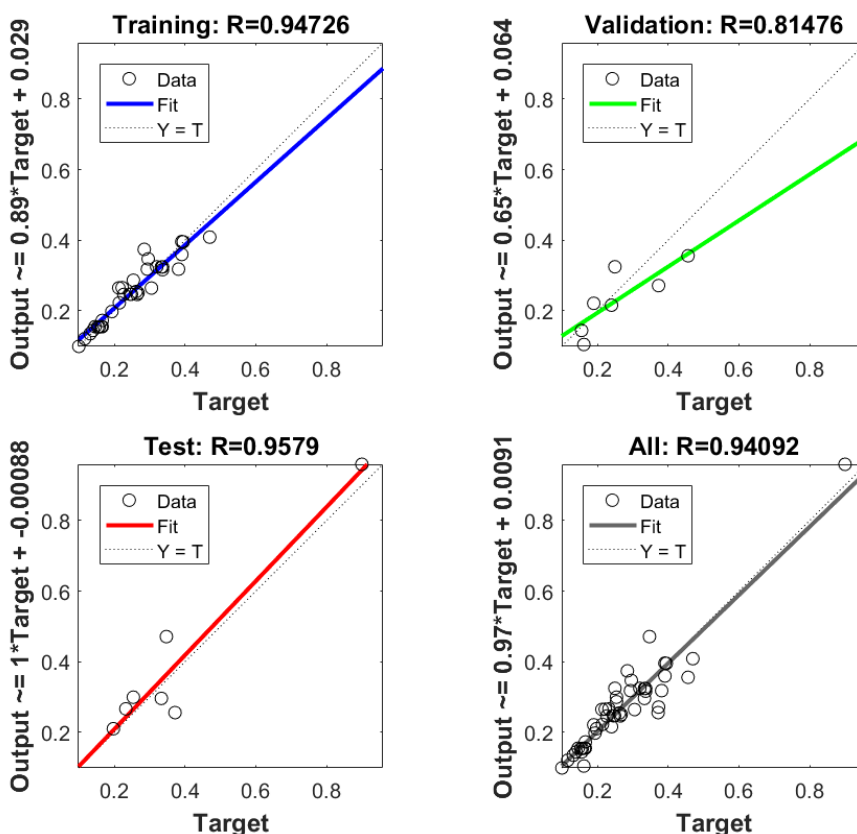


شکل ۶: نمونه شماتیک شبکه عصبی.

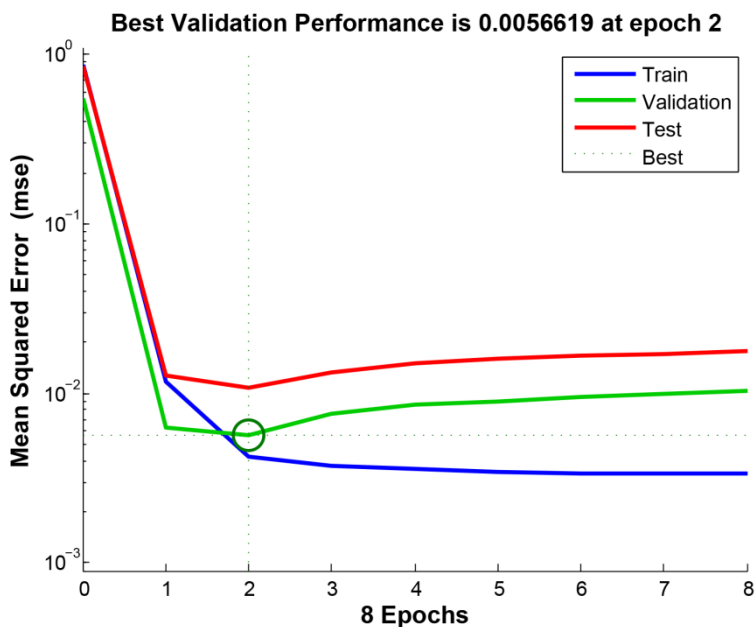
۵- پیشنهاد مدل شبکه بهینه

از انواع شبکه‌های قابل استفاده می‌توان به شبکه‌های دلتا، انتشار برگشتی، پس انتشار و ... اشاره کرد که در ادامه برای مدلسازی رفتار پیچشی تیر تقویت شده با FRP از شبکه پس انتشار برگشتی [۳۴] استفاده شده است. شبکه پس انتشار برگشتی آسان‌ترین و موثرترین مدل‌ها در میان شبکه‌های چندلایه می‌باشد. داده‌های مورد نیاز در شبکه به دو گروه داده‌های آموزشی که حدود ۷۰ درصد از کل داده‌ها راجهت آموزش و وزن‌دهی و داده‌های آزمایشی که حدود ۳۰ درصد از کل داده‌ها که در آموزش نقش نداشته و به عنوان راندمان شبکه آموزش دیده می‌باشند تقسیم می‌شود. این شبکه دارای یک لایه ورودی که تعداد ورودی‌های شبکه، بیان‌گر تعداد پارامترهای موجود در بخش ورودی شبکه است و دارای یک یا چند لایه پنهان که هر کدام دارای تعدادی نورون هستند که تعداد این نورون‌ها و نوع تابع رفتاری در رفتار شبکه مورد نظر تاثیر گذار می‌باشد. در این مقاله تعداد لایه پنهان ۱ در نظر گرفته شده است و تابع انتقال به کار رفته در لایه خروجی از نوع خطی ساده و در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموئید است. شکل ۶ نمونه شماتیک از لایه ورودی و پنهان را مشخص کرده است.

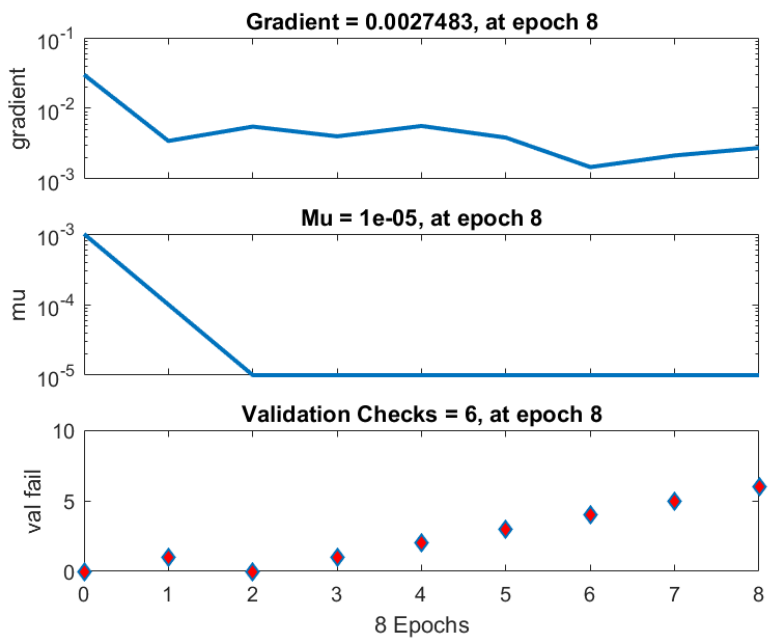
شکل ۷ نمودار میزان دقت نتایج ناشی از مدل سازی شبکه عصبی در مقایسه با نتایج واقعی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که هر چه تمرکز این نقاط بر روی نیمساز ربع اول بیشتر باشد، نشانگر دقت بالاتر آن می‌باشد. در شکل ۸ مقدار رگرسیون شبکه انتخابی در مراحل مختلف مدل‌سازی پس از ۲ اپوک مورد بررسی قرار گرفته است و افت حداقل مربعات خطا را نشان می‌دهد. شکل ۹، روند تغییرات شبکه طی اپوک‌های مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با پیش‌بینی شبکه عصبی آورده شده است.



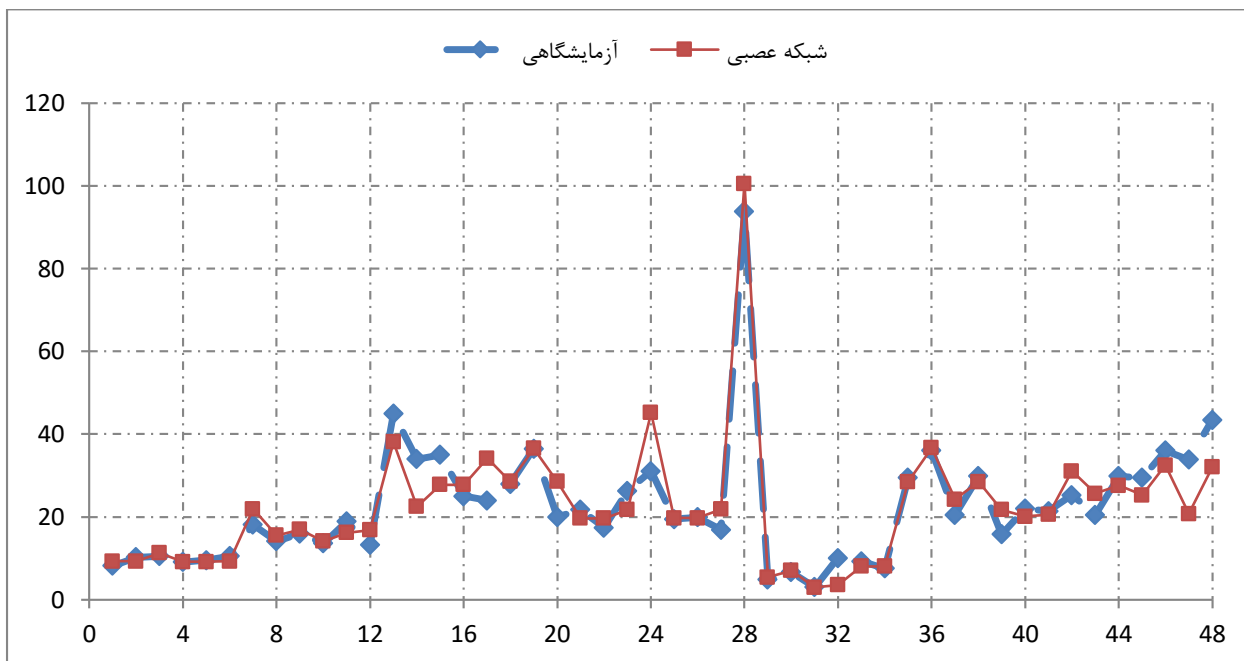
شکل ۷: نمودار رگرسیون شبکه پس از آموزش.



شکل ۸: نمودار میانگین مربعات خطا در فرآیند آموزش شبکه.



شکل ۹: روند تغییرات شبکه در مراحل آموزش شبکه.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبکه عصبی.

۶- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

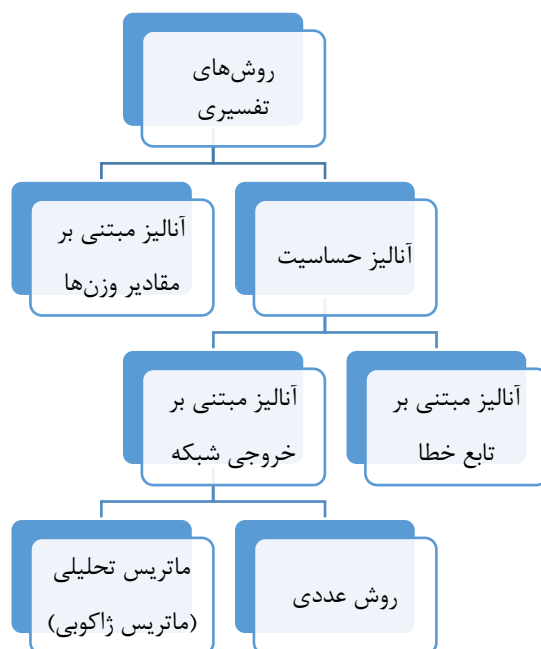
در طول سال‌های گذشته روش‌های مختلفی برای تحلیل اثر یا اهمیت متغیرهای ورودی بر خروجی شبکه عصبی پیش‌خورنده پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به دو مجموعه شامل تحلیل بر اساس میزان وزن و آنالیز حساسیت تقسیم کرد. با این حال، این روش‌ها با محدودیت همراه هستند. در تحقیقات شبکه عصبی مصنوعی، بیشترین تلاش‌ها متمرکز بر بهبود قوانین آموزشی جدید، کشف معماری‌های شبکه عصبی جدید و توسعه زمینه‌های جدید کاربردی می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی یک نوع جعبه سیاه بسیار پیچیده که ورودی‌ها را به خروجی‌های از پیش تعیین شده تبدیل می‌کند، به کار برارائه می‌دهد. به بیان دیگر، درک سریع چگونگی رابطه وزن‌های شبکه یا مقادیر تحریک نورون‌های مخفی به یک مجموعه داده‌های آموزشی امکان‌پذیر نیست. بنابراین بر خلاف مدل‌های کلاسیک آماری، در یک شبکه، پیدا کردن اثر متغیر صریح بر متغیر وابسته به سادگی ظاهر نمی‌شود. تا پایان سال ۱۹۸۰ روش‌های مختلفی برای تفسیر شبکه‌های عصبی پیش‌خورنده که شامل نورون‌های ورودی N ، نورون‌های مخفی L ، نورون‌های خروجی M می‌باشد، ارائه شده‌اند. در شکل ۱۱، روش‌های تفسیری به دو روش کلی تقسیم شده‌اند: آنالیز بر اساس مقدار وزن‌ها و تحلیل حساسیت.

آنالیز بر اساس مقادیر وزن، منحصرًا بر مبنای مقادیر ذخیره شده در ماتریس استاتیک وزن‌ها برای تعیین تاثیر نسبی هر یک از داده‌های ورودی بر داده‌های خروجی شبکه می‌باشد. معادلات مختلفی مبتنی بر مقادیر وزن‌ها ارائه شده است که تمامی آنها با محاسبه حاصل ضرب وزن‌ها w_{ij} (وزن اتصال بین نورون ورودی i و نورون مخفی j) و v_{jk} (وزن اتصال بین نورون مخفی j و نورون خروجی k) برای هر یک از نورون‌های مخفی شبکه به صورت مجموع حاصلضرب‌های محاسبه شده بدست می‌آید. یکی از کاربردی‌ترین معادلات، معادله Garson می‌باشد که در رابطه (۱۰) ذکر شده است.

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^L \left(\frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^N w_{rj}} U_{jk} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^L \left(\frac{w_{ij}}{\sum_{r=1}^N w_{rj}} U_{jk} \right) \right)} \quad (10)$$

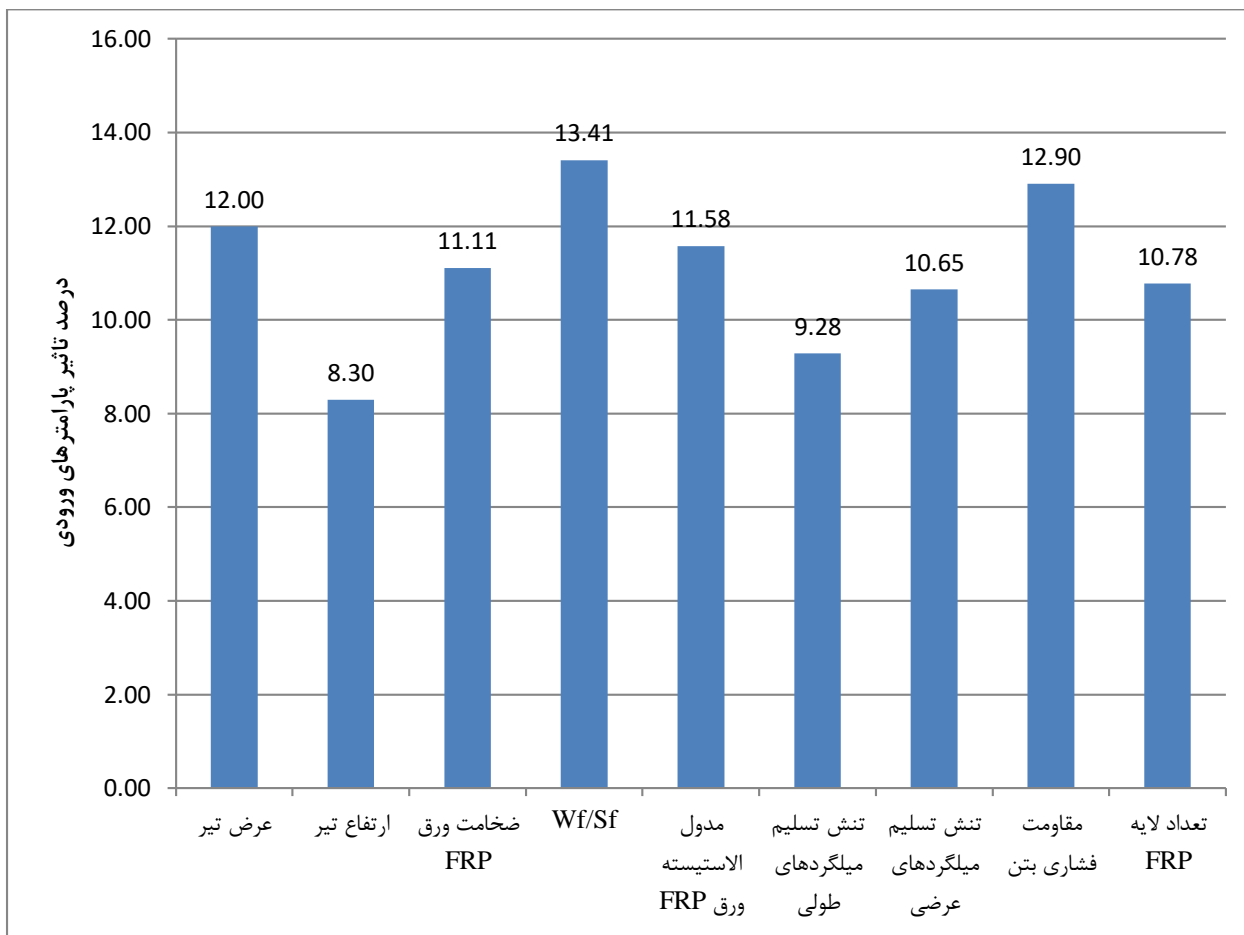
$$\frac{\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{ji}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj}}{\sum_{k=1}^{n_{inputs}} \left(\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \left| \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj} \right| \right)} \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، مجموع وزن‌های اتصال بین نورون‌های ورودی N و نورون‌های مخفی L Q_{ik} درصد تاثیر متغیر ورودی x_i بر متغیر خروجی y_k می‌باشد. این روش زمانی که وزن‌های مثبت و منفی با هم وجود دارند، نسبت درستی ارائه نمی‌دهد. به همین سبب میلن روش گارسون را اصلاح کرد. میلن برای اصلاح روش گارسون از قدرمطلق وزن‌ها استفاده کرد که با این روش، نسبت‌های صحیحی برای هر دو وزن مثبت و منفی بدست می‌آید. رابطه (۱۱) روش میلن [۳۵] را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: روش‌های تفسیری ارائه شده.

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج آنالیز حساسیت بیانگر این است که نسبت عرض مؤثر نوار تقویتی در راستای طول تیر به فاصله مرکز تا مرکز رکابی (W_f/S_f) FRP بیشترین درصد تاثیر و ارتفاع تیر دارای کمترین درصد تاثیر بر روی تابع هدف را داشته‌اند.



شکل ۱۲: درصد تاثیر پارامترهای ورودی.

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی ۵۶ تیر بتن آرمه تقویت شده با FRP جهت شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است که نتایج به دست آمده از مدل سازی شبکه نشان می دهد که استفاده از این شبکه ها برای پیش بینی میزان مقاومت پیچشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با FRP مناسب است. در فرایند مدل سازی، شبکه ای بهینه محسوب می شود که هم زمان با داشتن بالاترین رگرسیون، کمترین میانگین مربعات خطا را نیز داشته باشد. بنابراین مهم ترین نکته در فرایند مدل سازی شبکه های عصبی مصنوعی، انتخاب شبکه با تعداد نرون کمتر و رگرسیون بیشتر است. شبکه عصبی پیشنهادی بهینه در این مقاله از نوع انتشار برگشتی با ساختار ۱-۹-۱۵ می باشد که تابع انتقال آن در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموئید و در لایه خروجی از نوع خطی ساده است. تابع عملکرد خطا نیز میانگین مجموع مربعات خطا می باشد.

به منظور مشخص شدن میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر مقاومت پیچشی، آنالیز حساسیت با استفاده از روش میلن با وزن های تنظیم شده و حاصل از شبکه عصبی ایده آل انجام شد که نتایج حاصل، نشان دهنده آن است که (W_f/S_f) ، مقاومت فشاری بتن و عرض تیر به ترتیب با ۱۳/۴۱، ۱۲/۹۰ و ۱۲ درصد، تأثیر بیشتر و ارتفاع تیر و تنش تسلیم میلگردهای طولی، با ۸/۳۰ و ۹/۲۸ درصد، پارامترهایی با درصد تاثیر کمتری در تابع هدف ارزیابی شده است.

با استفاده از این شبکه می توان برای پیش بینی مقاومت پیچشی تیرهای تقویت شده با FRP بدون صرف هزینه و زمان زیادی استفاده کرد. البته تعداد نمونه های تست شده آزمایشگاهی، تاثیر زیادی در دقت آموزش شبکه دارد. مقدار خطای شبکه بهینه شده در این مقاله با این تعداد تیر آزمایش شده، ۱۵/۵۸ درصد می باشد. با توجه به اطلاعات آماری موجود حاصل از نتایج تحقیق، ۱۲ مورد خطای کمتر

از ۵ درصد، ۱۰ مورد، خطای کمتر از ۱۰ درصد و ۹ مورد، خطای کمتر از ۱۵ درصد داشتند، که در مجموع ۶۵ درصد از نتایج پیش‌بینی شبکه خطایی کمتر از ۱۵ درصد با نمونه های آزمایشگاهی داشته‌اند. بنابراین می‌توان بیان کرد، استفاده از شبکه بهینه معرفی شده در این تحقیق، راهگشای مناسبی برای پیش‌بینی ظرفیت پیچشی تیر مقاوم سازی شده با FRP به شمار رود.

مراجع

- [1] A. Ghobarah, M.N. Ghorbel, S.E. Chidiac, Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer, *J Compos Constr.* 6 (2002) 257–263. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:4(257).
- [2] S. Panchacharam, A. Belarbi, Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites, *First FIB Congr.* (2002) 1–11. <http://rb2c.mst.edu/media/research/rb2c/documents/torsional.pdf>.
- [3] M. Ameli, H.R. Ronagh, P.F. Dux, Experimental investigations on FRP strengthening of beams in torsion, in: *FRP Compos Civ Eng 2004*, AA Balkema, 2005: pp. 587–592.
- [4] A.K.Y. Hii, R. Al-Mahaidi, Experimental Investigation on Torsional Behavior of Solid and Box-Section RC Beams Strengthened with CFRP Using Photogrammetry, *J Compos Constr.* 10 (2006) 321–329. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(321).
- [5] M.R. Mohammadzadeh, M.J. Fadaee, H.R. Ronagh, Improving torsional behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer composite, *Iran Polym J.* 18 (2009) 315–327.
- [6] M.H. Arslan, Predicting of torsional strength of RC beams by using different artificial neural network algorithms and building codes, *Adv Eng Softw.* 41 (2010) 946–955. doi:10.1016/j.advengsoft.2010.05.009.
- [7] A. Deifalla, A. Ghobarah, Strengthening RC T-Beams Subjected to Combined Torsion and Shear Using FRP Fabrics: Experimental Study, *J Compos Constr.* 14 (2010) 301–311. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000091.
- [8] A.S. Mahmood, M.N. Mahmood, Torsional Behavior of Prestressed Concrete Beams Strengthened, (2011).
- [9] C. Tudu, Study of Torsional Behaviour of Rectangular Reinforced Concrete Beams Study of Torsional Behaviour of Rectangular Reinforced Concrete Beams, 2012.
- [10] V.H. Jariwala, P. V. Patel, S.P. Purohit, Strengthening of RC Beams Subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites, *Procedia Eng.* 51 (2013) 282–289. doi:10.1016/j.proeng.2013.01.038.
- [11] R. Rafeeq, Torsional Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Composites, *Portland State University*, 2016. doi:10.15760/etd.3121.
- [12] G.C. Behera, T.D.G. Rao, C.B.K. Rao, Torsional behaviour of reinforced concrete beams with ferrocement U-jacketing—Experimental study, *Case Stud Constr Mater.* 4 (2016) 15–31. doi:10.1016/j.cscm.2015.10.003.
- [13] S.K. Elwan, Torsion strengthening of RC beams using CFRP (parametric study), *KSCE J Civ Eng.* 0 (2016) 1–9. doi:10.1007/s12205-016-0156-7.
- [14] H. Naderpour, A. Kheyroddin, G.G. Amiri, Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks, *Compos Struct.* 92 (2010) 2817–2829. doi:10.1016/j.compstruct.2010.04.008.
- [15] M. Ahmadi, H. Naderpour, A. Kheyroddin, Utilization of artificial neural networks to prediction of the capacity of CCFT short columns subject to short term axial load, *Arch Civ Mech Eng.* 14 (2014) 510–517. doi:10.1016/j.acme.2014.01.006.
- [16] A. Kheyroddin, H. Naderpour, M. Ahmadi, Compressive Strength of Confined Concrete in CCFST Columns, *J Rehabil Civ Eng.* 2 (2014) 71–80.
- [17] H. Naderpour, A. Kheyroddin, G. Ghodrati Amiri, S.R. Hoseini Vaez, Estimating the behavior of FRP-strengthened RC structural members using artificial neural networks, *Procedia Eng.* 14 (2011) 3183–3190. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.402.
- [18] D. Rezazadeh Eidgahee, F. Fasihi, H. Naderpour, Optimized Artificial Neural Network for Analyzing Soil-Waste Rubber Shred Mixtures, *Sharif J Civ Eng.* 31.2 (2015) 105–111.
- [19] G. Shafabakhsh, H. Naderpour, F. Fasihi, Optimized ANN Algorithm for Analyzing the Road Flexible Pavements, *Journal Model Eng.* 8 (2010) 45–56. doi:10.22075/JME.2017.1559.
- [20] H. Naderpour, H. Vosoughifar, E. Ghobakhloo, Evaluation of Effective Parameters on Wave Diffraction of Far-Fault Ground Motions Using Artificial Neural Networks, *Sharif J Civ Eng.* 32.2 (2016) 13–23. http://journal.sharif.ir/journals/sjce/article_981_104.html.
- [21] G. Shafabakhsh, H. Naderpour, R. Noroozi, Optimized ANN Algorithm for Analyzing the Road Rigid Pavements, *Q J Transp Eng.* 3 (2011) 43–54.
- [22] H. Naderpour, P. Fakharian, F. Hosseini, Prediction of Behavior of FRP-Confined Circular Reinforced Concrete Columns using Artificial Neural Network, in: *8th Natl Conf Concr*, Tehran, Iran, 2016. doi:10.13140/RG.2.2.11714.58568.
- [23] H. Naderpour, S.A. Alavi, A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *Compos Struct.* 170 (2017) 215–227. doi:10.1016/j.compstruct.2017.03.028.
- [24] S. Hosseini Vaez, H. Naderpour, M. Barati, Estimating the behavior of RC beams strengthened with NSM system using artificial neural networks, *J Struct Constr Eng.* 4 (2017) 16–28. doi:10.22065/jsce.2017.44332.

- [25] C.E. Chalioris, Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials, *Eng Struct.* 29 (2007) 3263–3276. doi:10.1016/j.engstruct.2007.09.009.
- [26] State Planning Organization and Management, Design guidelines and customer agreement executive improvement of existing concrete structures using reinforced materials FRP (Publication 345), (2006).
- [27] M. Ameli, H.R. Ronagh, P.F. Dux, Behavior of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams under Torsion, *J Compos Constr.* 11 (2007) 192–200. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(192).
- [28] H. Zhang, J. W., Lu, Z. T. Zhu, Experimental study on the behaviour of RC torsional members externally bonded with CFRP, in: 2001.
- [29] A.K.Y. Hii, R. Al-Mahaidi, Torsional Capacity of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams, *J Compos Constr.* 11 (2007) 71–80. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(71).
- [30] C.E. Chalioris, Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers – Experimental study, *Constr Build Mater.* 22 (2008) 21–29. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.09.003.
- [31] M.R. Mohammadzadeh, M.J. Fadaee, H.R. Ronagh, A. Ahmadinezhad, Behavior of high-strength concrete beams strengthened with CFRP sheets in torsion, (2008) 22–24.
- [32] M.R. Mohammadzadeh, M.J. Fadaee, Torsional Behaviour of High-Strength Concrete Beams Strengthened Using CFRP Sheets ; an Experimental and Analytical Study, 16 (2009).
- [33] S. Ma, N.M. Bunnori, K.K. Choong, Evaluation of Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets under Torsion, *MATEC Web Conf.* 47 (2016) 2006. doi:10.1051/mateconf/20164702006.
- [34] B. Peter, T.B. Edil, DESIGN OF HIGHWAY EMBANKMENTS USING TIRE CHIPS By Peter, 123 (1997) 295–304.
- [35] L. Milne, Feature selection using neural networks with contribution measures, in: *Aust Conf Artif Intell AI'95*, Citeseer, 1995: pp. 1–8.