

پیش‌بینی مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده به روش NSM-FRP با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

سید روح الله حسینی واعظ^{۱*}، حسین نادرپور^۲، محمد براتی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

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

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

یکی از متداول‌ترین روش‌های تقویت اعضای بتن مسلح استفاده از الیاف‌های پلیمری می‌باشد. روش کاشت آرماتورهای FRP در پوشش اعضای بتنی (NSM-FRP)، اخیراً توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده‌است. در این روش به دلیل اتصال بیشتر آرماتورها با بتن، از ظرفیت مصالح الیاف‌های پلیمری استفاده کامل‌تری می‌گردد. این روش دارای مزایای قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های مقاوم‌سازی می‌باشد، این در حالی است که مطالعات عددی کم‌تری در این زمینه نسبت به تکنیک‌های قدیمی‌تر مانند اتصال سطحی ورق‌های FRP انجام شده‌است. شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزاری مناسب و کارآمد برای بررسی و پیش‌بینی پاسخ یک سیستم بر پایه تعداد زیادی داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. اساس کار این شبکه‌ها مبتنی بر پروسه یادگیری به عنوان جایگزین مناسب روش رگرسیون‌های معمول در جهت به حداقل رساندن خطای محتمل مطرح می‌باشد. در این تحقیق نتایج آزمایشات انجام شده در زمینه‌ی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از سیستم NSM-FRP جمع‌آوری و پس از شناسایی پارامترهای موثر بر رفتار خمشی تیرهای تقویت شده به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی مصنوعی، با انتخاب نسبت افزایش ممان خمشی تیر به عنوان تابع هدف مدل شبکه عصبی ایجاد و به بررسی مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده پرداخته شده‌است. در نهایت با توجه به بررسی‌های پارامتریک، رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده ارائه شده‌است.

کلمات کلیدی: تقویت خمشی، روش نصب در نزدیک سطح، NSM-FRP، مقاومت خمشی، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

*نویسنده مسئول: سید روح الله حسینی واعظ

پست الکترونیکی: hoseinivaez@qom.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.44332

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.44332>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۱

۱- مقدمه

تمامی ساختمان‌ها، پل‌ها و دیگر سازه‌ها با هرگونه کیفیت و ساختار با گذشت زمان دچار فرسودگی شده و مقاومت آن‌ها در برابر بارهای وارده کم‌تر می‌شود. در کنار افزایش سن سازه‌ها عوامل مختلف بسیاری موجب کاهش ظرفیت آن‌ها می‌گردد. خراب شدن ساختمان‌ها به دلیل شرایط محیطی و حوادث طبیعی، طراحی و اجرای بسیاری از ساختمان‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های قدیمی، تغییر کاربری ساختمان‌ها، ساخت طبقات اضافی، عدم پیش‌بینی برخی بارها در حین طراحی، ضعف‌های اجرایی و بسیاری پارامترهای دیگر از جمله دلایل نیاز به مقاوم‌سازی می‌باشد. سازه‌های بتن مسلح بخش قابل توجهی از سازه‌های موجود را تشکیل می‌دهند و در طی دهه‌های گذشته به‌خصوص در سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه تقویت سازه‌های بتن مسلح و کاربرد آن‌ها انجام شده‌است. در بین انواع روش‌های مقاوم‌سازی، استفاده از الیاف‌های پلیمری^۱ به دلیل مزایایی مانند وزن کم‌تر، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت بالا، سرعت، سهولت و انعطاف بالای اجرا دارای استفاده‌ی گسترده‌تری می‌باشد [۱-۴]. مشخصات FRP به الیاف به‌کار رفته بستگی دارد. در بین انواع مصالح FRP، ترکیبات کربنی دارای بالاترین مقاومت و مدول الاستیسیته بوده و ترکیبات شیشه دارای بیش‌ترین کرنش در حین گسیختگی می‌باشند. یکی از مهم‌ترین خصوصیات مصالح FRP، رفتار خطی آن‌ها تا پیش از گسیختگی است، در واقع نمودار تنش-کرنش مصالح FRP تا لحظه گسیختگی به‌صورت خطی بوده و تسلیم نمی‌شوند. بنابراین وارد ناحیه پلاستیک نشده و گسیختگی ترد و ناگهانی خواهند داشت.

استفاده از مصالح FRP در صنعت ساختمان به صورت اتصال سطحی^۲ به سال‌ها پیش بازمی‌گردد که در این روش ورق‌های FRP به وسیله رزین به سطح عضو بتنی متصل شده و از طریق اتصال سطحی مقاومت کششی سطح مورد نظر را افزایش می‌دهد. در روش نصب در نزدیک سطح^۳ که اخیراً ارائه شده‌است، ابتدا شیارهایی بر روی عضو مورد نظر در پوشش بتن ایجاد شده و آرماتورها یا نوارهای FRP به وسیله اپوکسی درون شیارها قرار داده می‌شوند [۵]. در این روش با افزایش سطح تماس بین FRP و بتن، اتصال بهتر و قوی‌تری شکل گرفته و مانع از جداسازی زود هنگام FRP (که در روش اتصال سطحی موجب عدم استفاده کامل از ظرفیت FRP می‌گردد) خواهد شد. اتصال بین آرماتورهای NSM و بتن از موضوعات مهم و قابل توجه بوده و مطالعات و آزمایشات بسیاری در این راستا انجام شده‌است. مقاومت اتصال آرماتورها به عضو بتنی عامل اصلی و تعیین کننده‌ای در کارایی و تأثیر این تکنیک مقاوم‌سازی می‌باشد. از دیگر مزایای روش NSM می‌توان به مقاومت در برابر آتش، خوردگی و صدمات محیطی، عدم تغییر نمای ظاهری عضو، امکان پیش‌تنیدگی، رسیدن به کرنش‌های بالاتر و نیاز به فضای کار کم‌تر اشاره نمود. در پژوهشی بروس و فورتن نشان دادند که ظرفیت باربری در استفاده از نوارهای CFRP^۴ به روش NSM در حدود ۴/۸ برابر نسبت به نصب نوارهای CFRP بر روی سطح می‌باشد [۶]. مجموعه‌ای از مهم‌ترین مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی مدهای گسیختگی ممکن در تیرهایی که تقویت خمشی شده بودند، توسط لورنزیس و تنگ جمع‌آوری شد. آن‌ها مد گسیختگی حاکم در روش NSM را نیز در اغلب نمونه‌های آزمایش شده، جداسازی زود هنگام گزارش کرده‌اند [۷]. مراحل نصب آرماتورهای FRP بر روی اعضای بتن مسلح را همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان کرد:

ایجاد شیار با اندازه مناسب با توجه به قطر آرماتورهای مورد استفاده، تمیز کردن و زدودن گرد و غبار به‌منظور اتصال بهتر، پر کردن بیش از نیمی از شیار (حدود دو سوم) با اپوکسی، قرار دادن آرماتورها در شیارها با یک فشار ملایم تا اپوکسی اطراف آرماتور را احاطه کند و نهایتاً تراز کردن سطح شیار و در صورت نیاز افزودن اپوکسی می‌باشد.

تقویت تیرها و دال‌های بتنی به‌صورت نصب آرماتورهای FRP در قسمت تحتانی برای اعضای تحت خمش کاربرد گسترده‌ای دارد. تکنیک NSM برای تقویت سقف‌ها و نواحی با ممان منفی دال‌های پیوسته که در معرض آسیب‌های محیطی بیش‌تری قرار دارند به‌دلیل قرار گرفتن FRP درون اپوکسی، استفاده و کارایی بالایی دارد. در حالی که در روش اتصال سطحی، FRP‌ها نیاز به محافظت دارند.

1 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

2 Externally Bonded

3 Near Surface Mounted (NSM)

4 Carbon Fiber Reinforced Polymer

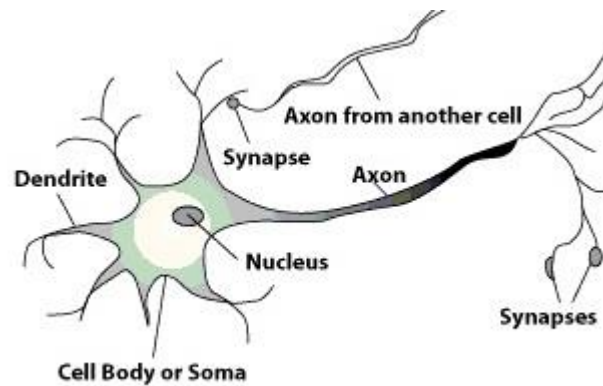


شکل ۱: مراحل کاشت آرماتورهای NSM در پوشش بتن.

در سال ۲۰۰۴، یاست و همکاران سازه‌های مقاوم شده با سیستم NSM-FRP را مورد مطالعه قرار داده و افزایش ۳۰ درصد و ۷۸ درصدی را به ترتیب برای بار تسلیم و بار نهایی گزارش دادند [۸]. در سال ۲۰۰۵، فورتس و باروس تأثیر مقاوم‌سازی با ورق‌های FRP را به روش NSM در شرایط مختلف مورد آزمایش قرار دادند؛ و به‌طور متوسط افزایش ظرفیت ۹۱ درصدی مشاهده گردید. در آزمایش آنان کرنش حداکثر CFRP در حدود ۶۲ تا ۹۱ درصد کرنش نهایی بود؛ این مساله بیان‌گر آن است که این روش می‌تواند سطوح بیشتری از تنش را در مصالح FRP تا نزدیکی مقاومت کششی آن‌ها را به‌کار گیرد [۹]. در سال ۲۰۰۹، بدوی و سودکی با بررسی تیرهای تقویت شده با سیستم NSM تحت بارگذاری یکنواخت و دینامیکی، مدلی تحلیلی به‌منظور برآورد عمر خستگی نمونه‌های تحت بارگذاری دینامیکی ارائه نمودند. در همه‌ی محدوده‌های بارگذاری، عمر خستگی تیرهای تقویت شده با NSM-FRP نسبت به نمونه‌های کنترل بیش‌تر بوده و افزایش مقاومت ۲۴ درصدی مشاهده گردید. مد گسیختگی حاکم برای نمونه‌های تقویت شده و همچنین نمونه‌های کنترل، گسیختگی ناشی از خستگی آرماتورهای فولادی کششی گزارش شد. آن‌ها نشان دادند که پیش‌تنیده کردن آرماتورهای CFRP ظرفیت خمشی را تقریباً دو برابر خواهد کرد، ولی شکل‌پذیری را نسبت به تیرهای تقویت نشده کاهش می‌دهد [۱۰]. تنگ و همکاران با مقاوم‌سازی تیرهای سبک بتنی با آرماتورهای NSM GFRP افزایش مقاومتی در حدود ۲۳ تا ۵۳ درصد را در مقاومت نهایی نسبت به نمونه‌های تقویت نشده گزارش کردند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴، پیرا و همکاران با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی در زمینه تقویت برشی تیرهای بتن مسلح به روش NSM-FRP، رفتار این تیرها را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی کردند [۱۲]. در این مطالعه با جمع‌آوری نتایج آزمایشات انجام شده در زمینه‌ی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از سیستم NSM-FRP و مدل‌سازی در شبکه عصبی مصنوعی به بررسی مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده پرداخته شده و با توجه به بررسی‌های پارامتری رابطه‌ای به‌منظور پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده ارائه شده‌است.

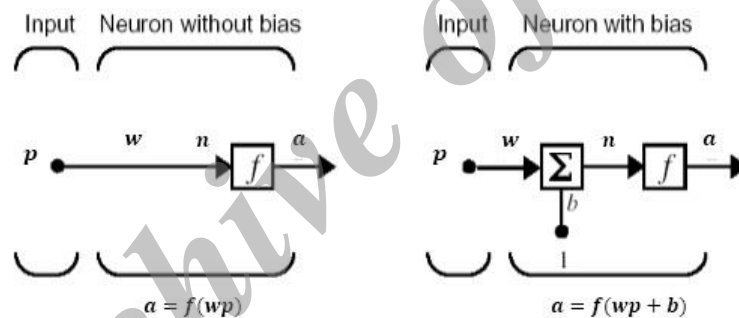
۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی برای حل مسائل پیچیده که مدل‌سازی آن‌ها مشکل می‌باشد، ابزاری مناسب و کارآمد می‌باشند. شبکه‌های عصبی از مهم‌ترین شاخه‌های هوش مصنوعی بوده و کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند. این شبکه‌ها از مغز انسان که دارای میلیاردها سلول عصبی می‌باشد الهام گرفته شده‌اند. نرون‌ها به‌عنوان ساده‌ترین واحدهای پردازش، به‌طور هماهنگ و موازی با یکدیگر در راستای حل یک مسأله عمل می‌کنند. هر نرون دارای سه قسمت اصلی دندریت، اکسون و بدنه سلول می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: ساختار یک شبکه عصبی [۴].

در واقع شبکه‌های عصبی مصنوعی همانند مغز براساس تجربیات و مشاهدات دارای قابلیت یادگیری می‌باشند. یادگیری به معنای شکل‌گیری ارتباطات جدید بین نرون‌ها و یا تغییر در آن‌ها می‌باشد. شبکه‌های عصبی با تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافتن الگوها و روابط پیچیده بین آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف را بر متغیر خروجی بررسی کرده و تابعی با دقت قابل قبول ارائه می‌دهند. به‌طور کلی شبکه‌های عصبی به دو نوع شبکه‌های پیش‌خور و پس‌خور تقسیم می‌شوند. تفاوت آن‌ها در این است که در شبکه‌های پس‌خور حداقل یک سیگنال برگشتی از یک نرون به همان نرون یا نرون‌های همان لایه و یا لایه قبل وجود دارد. در اغلب موارد از شبکه‌های پیش‌خور استفاده می‌گردد. در شکل ۳ مدل یک نرون با یک ورودی نمایش داده شده‌است که از دو عنصر کلیدی وزن w و تابع انتقال f تشکیل شده‌است.



شکل ۳: نرون با یک ورودی [۴].

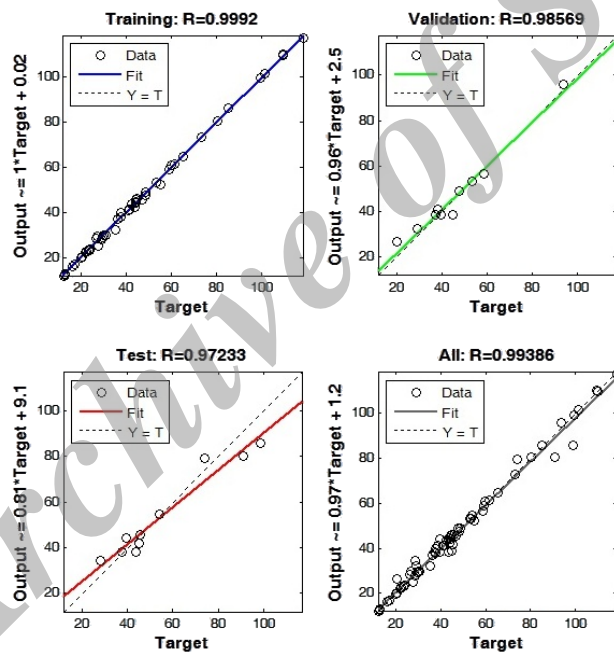
ورودی p با ضرب در وزن w وزن‌دار شده و به تابع انتقال f به عنوان ورودی اعمال می‌شود. خروجی نرون به صورت $a=f(wp+b)$ محاسبه می‌شود. در این رابطه w و b پارامترهای تنظیم شونده‌ای هستند که با تغییر آن‌ها خروجی به هدف مورد نظر نزدیک شود. تابع انتقال معمولاً تابعی پله‌ای یا سیگموئید^۵ می‌باشد که با توجه به مسائل مختلف برای تعیین مشخصات نرون استفاده می‌گردد. یک نرون معمولاً بیش از یک ورودی دارد. به مجموع وزن‌ها، تابع انتقال و بایاس یک لایه از شبکه می‌گویند. چندین نرون می‌توانند در یک لایه با هم تشکیل شوند و هر شبکه می‌تواند از یک یا چند لایه تشکیل گردد. شبکه‌های چندلایه بسیار قدرتمند هستند، به‌عنوان مثال یک شبکه دو لایه با لایه اول سیگموئید و لایه دوم خطی می‌تواند هر تابع دلخواهی را با تعداد محدود نقاط ناپیوستگی تخمین بزند. این نوع شبکه دو لایه‌ای به‌شکل وسیع در شبکه‌های پس‌انتشار کاربرد دارد.

۳- بررسی رفتار خمشی تیرهای تقویت شده به روش NSM-FRP با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

قدرت بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تطبیق با روابط و الگوهای پیچیده، آن‌ها را به ابزاری محبوب برای پیش‌بینی بسیاری از پدیده‌ها در علوم مختلف تبدیل کرده‌است. به‌منظور بررسی رفتار تیرهای تقویت شده به روش کاشت آرماتورهای FRP در نزدیک سطح و باتوجه به وجود روابط نامشخص و پیچیده بین پارامترهای مختلف و رفتار نهایی تیرهای مقاوم شده، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده‌است. یکی از مهم‌ترین مسائل در ارتباط با شبکه‌های عصبی مصنوعی در اختیار داشتن داده‌های آزمایشگاهی مناسب و کافی می‌باشد. هرچه داده‌های جمع‌آوری شده از لحاظ کمیت و کیفیت بهتر و به‌اصطلاح هموزن باشند، شبکه دقیق‌تر آموزش دیده می‌شود و دقت آن بالاتر خواهد رفت. از طرف دیگر هرچه نمونه‌های داده شده به شبکه محدود به‌شماره بیشتری را در بر گرفته باشد، شبکه نیز می‌تواند ورودی‌های آموزش داده‌نشده گسترده‌تری دریافت کرده و خروجی مناسبی ارائه دهد. بنابراین با گردآوری مقالات و پژوهش‌های منتشر شده معتبر در زمینه مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتن آرمه به روش NSM-FRP، محدوده‌ی مناسبی از داده‌ی آزمایشگاهی انتخاب و برای آموزش شبکه به‌کار گرفته شده‌اند [۹-۱۱ و ۱۳-۲۴]. در هر یک از آزمایشات پارامترها و عوامل مختلف که بر نتیجه آزمایش تأثیرگذار بوده‌اند استخراج گردیده و از نظر واحد یکسان‌سازی شده‌اند. آزمایشات و نمونه‌های مورد استفاده دارای دامنه تغییراتی مناسبی در پارامترهای مختلف مانند طول تقویت، درصد آرماتور فولادی و درصد آرماتور FRP، بارهای گسیختگی و ... هستند. همچنین در تمامی داده‌های مورد استفاده، مد گسیختگی جدادگی و شکستن کاور بتن بوده‌است. عملکرد و رفتار هر پدیده‌ای تحت تأثیر تعداد بی‌شماری پارامتر مختلف می‌باشد که در این میان برخی از عوامل دارای تأثیرگذاری بیش‌تری خواهند بود. نکته قابل‌توجه در مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی در نظر گرفتن تأثیرگذارترین پارامترها بر پاسخ سیستم به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی می‌باشد. با مطالعه و بررسی مقالات و آزمایشات بر روی تیرهای تقویت شده با سیستم NSM پارامترهای مختلفی به‌عنوان عوامل مؤثر معرفی شده‌اند. ابعاد تیر، طول دهانه، مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتورهای فولادی، مدول الاستیسیته بتن و فولاد، درصد آرماتور FRP، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته آرماتورهای FRP، طول اتصال آرماتورهای FRP تقویتی، قطر آرماتورهای FRP، ابعاد شیارهای ایجاد شده، ویژگی‌های سطحی آرماتورهای FRP (آج‌دار-سندبلاست شده)، چسب مورد استفاده برای اتصال، شکل مقطع آرماتورهای FRP، شرایط بارگذاری و غیره از جمله پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرهای تقویتی می‌باشد [۲۵ و ۲۶]. تعداد زیاد پارامترهای ورودی در شبکه عصبی مصنوعی ممکن است موجب کاهش بازدهی و دقت مراحل آموزش شود. به‌منظور در نظر گرفتن پارامترهایی که دارای بیش‌ترین تأثیر بر روی مقاومت نهایی تیرها هستند از مطالعات و آزمایشات انجام شده در زمینه تقویت تیرها با سیستم NSM و همچنین روابط کلاسیک ارائه شده برای تخمین ممان مقاوم تیرهای تقویت شده توسط ACI 440 و مقالات دیگر استفاده شده‌است. عواملی مانند ابعاد شیار، نوع چسب و سطح آرماتورها هرچند بر رفتار اتصال آرماتورهای FRP و بتن تأثیرگذار است، ولی تأثیرات آن‌ها بر مقاومت نهایی عضو قابل صرف‌نظر کردن است. برای اتصال آرماتورهای NSM به بتن از چسب اپوکسی و یا گاهی از ملات‌های پایه سیمانی استفاده می‌گردد. در تمامی داده‌های مورد استفاده در آموزش شبکه، از چسب اپوکسی به‌منظور اتصال استفاده شده‌است. نهایتاً ۹ پارامتر اصلی زیر به‌عنوان ورودی‌های شبکه در نظر گرفته شده‌اند:

- ۱- مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال، ۲- درصد آرماتور طولی فولادی، ۳- درصد آرماتورهای NSM-FRP، ۴- تنش تسلیم آرماتورهای فولادی داخلی برحسب مگاپاسکال، ۵- مدول الاستیسیته FRP بر حسب مگاپاسکال، ۶- مقاومت نهایی کششی FRP بر حسب مگاپاسکال، ۷- عرض مقطع تیر بر حسب میلی‌متر، ۸- طول مقطع بر حسب میلی‌متر، ۹- نسبت طول اتصال FRP به طول دهانه تیر بدون بُعد.
- در میان انواع مختلف شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی چندلایه پرسپترون برای کارهایی از این نوع بسیار رایج و مناسب می‌باشد. تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها در هر لایه بر قابلیت‌های شبکه تأثیر خواهد داشت. در شبکه‌های پرسپترون چندلایه، تعداد لایه‌های پنهان می‌تواند هر تعداد باشد، البته در اغلب کاربردها یک لایه پنهان کفایت می‌کند. آموزش شبکه به‌معنای یافتن وزن‌های اتصال است، به‌طوری‌که تابع خطا بین خروجی شبکه و مقادیر متناظر تابع هدف در داده‌های آموزشی حداقل گردد. شبکه عصبی مورد استفاده به وسیله

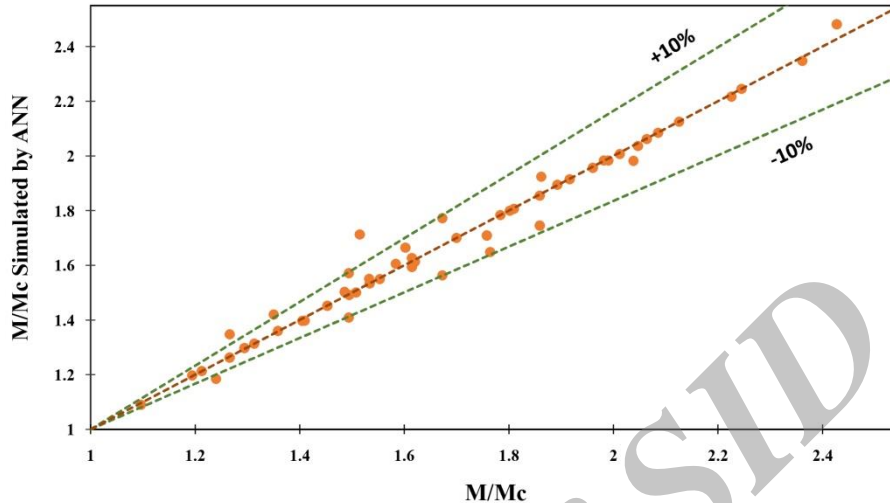
نرم افزار متلب^۶ با روال انتشار به عقب^۷ و الگوریتم آموزش لونیبرگ-مارکوارت^۸ آموزش دیده و ایجاد شده است. روال انتشار به عقب بدین معنی است که پس از مشخص شدن خروجی شبکه، ابتدا وزن‌های لایه آخر تصحیح شده و بعد به ترتیب اوزان لایه‌های قبلی تصحیح می‌شوند. نسبت ممان مقاوم تیر تقویت شده به تیر کنترل اولیه (مقاوم نشده) در هر آزمایش به عنوان تنها گره هدف در نظر گرفته شده است. شبکه عصبی برای حداقل کردن میانگین مربع خطا^۹ بین خروجی‌های شبکه و مقادیر متناظر تابع هدف، به طور مداوم و چندباره آموزش دیده می‌شود. در واقع شبکه‌ای بهینه است که دقت آموزشی بالا داشته باشد و دارای همبستگی بیش تر و مجذور مربعات خطای کم تری باشد. برای دستیابی به شبکه‌ای با دقت قابل قبول، چندین شبکه با توابع فعالیت مختلف و همچنین تعداد نرون‌های متفاوت ایجاد گردید. در هر مرحله پس از ساخت شبکه، دقت خروجی شبکه در مقابل داده‌های ورودی محاسبه شده است. در نهایت شبکه‌ای با کمترین خطا و بالاترین همبستگی انتخاب شده است. میانگین خطای شبکه‌ای ایجاد شده در حدود ۱/۷ درصد است که دارای دقت مناسب و قابل قبولی می‌باشد. شبکه مورد استفاده در این مطالعه شامل سه لایه می‌باشد: لایه ورودی، مخفی و خروجی. لایه ورودی شامل گره‌هایی است که بیانگر مشخصات رفتار تیرهای تقویت شده می‌باشد و همچنین در این شبکه عصبی، توابع فعالیت تانژانت-سیگموئید^{۱۰} و خطی^{۱۱} به ترتیب برای لایه مخفی و لایه خروجی استفاده شده و تعداد نرون‌ها برابر ۲۵ در نظر گرفته شده است. الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت داده‌های دریافتی را به طور تصادفی به سه قسمت آموزش^{۱۲}، اعتبارسنجی^{۱۳} و آزمایش^{۱۴} تقسیم‌بندی می‌کند که در صورت تغییر درصد نسبی این قسمت‌ها می‌توان دقت شبکه را تا حدودی تغییر داد. شکل ۴ نشان دهنده مقادیر رگرسیون داده‌های مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شبکه مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۴: رگرسیون داده‌های مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شبکه.

6 MATLAB
7 Back propagation
8 Levenberg-Marquardt
9 Mean Square Error
10 Tan-sigmoid
11 Linear
12 Training
13 Validation
14 Testing

برای بررسی دقت شبکه، مقادیر افزایش مقاومت تیرهای مقاوم شده به روش NSM نسبت به تیرهای تقویت نشده برای نمونه‌های اصلی در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط شبکه عصبی در شکل ۵ رسم شده‌است. همان‌گونه که مشخص است بیش‌تر نقاط در حوالی خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده این است که شبکه به‌خوبی آموزش دیده و دارای دقت بسیار مناسبی می‌باشد.

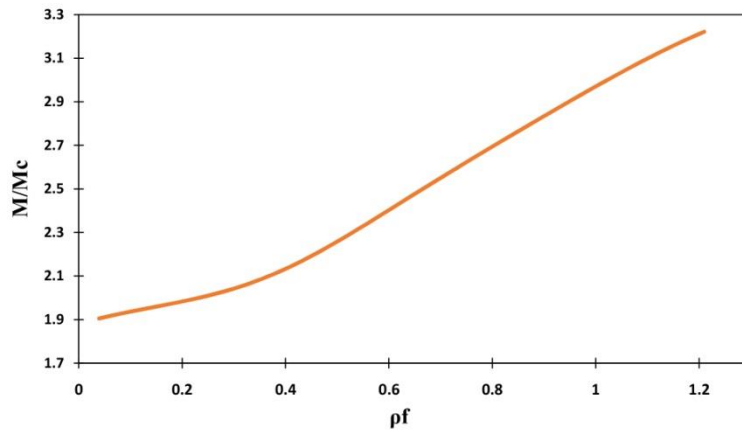


شکل ۵: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده M/M_c توسط شبکه عصبی در مقابل داده‌های واقعی.

شبکه عصبی به‌عنوان یک تابع، به‌ازای دریافت ورودی‌ها، خروجی مناسبی را ارائه می‌کند ولی معمولاً استفاده از شبکه عصبی مصنوعی که حاوی کدها و روابط پیچیده‌ای هستند در کاربردهای مهندسی متداول نمی‌باشد. بنابراین به بررسی روابط موجود بین پارامترهای مختلف و تأثیرشان بر روی گرهی هدف پرداخته، تا بتوان روابط پیچیده شبکه را در قالب معادله ساده‌ای ارائه کرد. برای این منظور پارامتری را که دارای تأثیر بیش‌تری بر افزایش مقاومت تیرها می‌باشد، به‌عنوان پارامتر اصلی در نظر گرفته و سپس با تغییر هر پارامتر تأثیر آن بر روی خروجی به‌کمک شبکه‌های عصبی مشاهده می‌شود. در این مطالعه درصد آرماتورهای FRP (ρ_f) به‌عنوان پارامتر اصلی در نظر گرفته شده‌است. برای هر یک از پارامترهای ورودی دیگر، مقدار محدوده تغییرات و همچنین مقدار مینا مطابق جدول ۱ مشخص شده‌است. مقادیر مینا به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که نزدیک به مقدار میانگین هر پارامتر باشد. با در نظر گرفتن تمامی پارامترها به‌جز درصد آرماتورهای FRP، برابر با مقادیر مینا به‌عنوان ورودی در شبکه عصبی طراحی شده، نمودار تابع هدف (نسبت افزایش ممان خمشی) در مقابل درصد آرماتورهای FRP رسم گردید (شکل ۶).

جدول ۱: محدوده‌ی پارامترهای ورودی و مقادیر مینای آن‌ها

پارامترهای ورودی	حداکثر	حداقل	مقدار مینا
ρ_s	۲/۶۱	۰/۳۱۷	۰/۷
ρ_f	۱/۲۱	۰/۰۴	۰/۳
F_y	۶۰۰	۳۹۸	۵۰۰
B	۲۰	۱۰۰	۱۶۰
H	۴۰۰	۱۳۰	۲۶۰
F_c	۶۸	۱۵	۴۰
F_{u-frp}	۴۱۴۰	۵۱۲	۱۹۰۰
L_b/L_t	۴	۰/۱۴۷	۰/۷۵
E_f	۲۵۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰

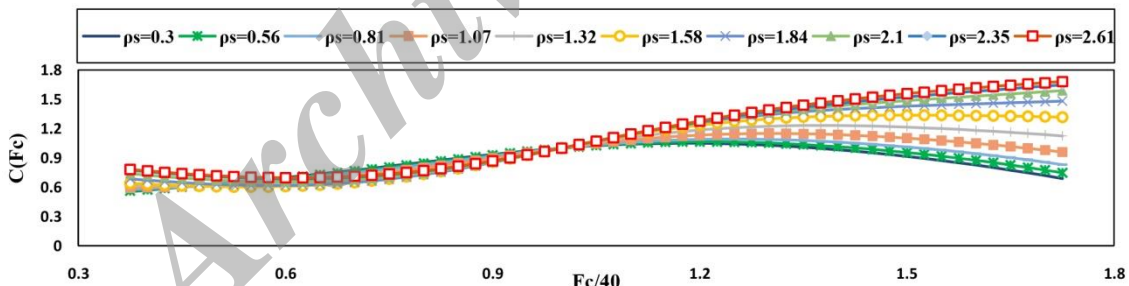


شکل ۶: تغییرات M/M_c در مقابل ρ_f با در نظر گرفتن سایر پارامترهای ورودی به مقدار مبنا.

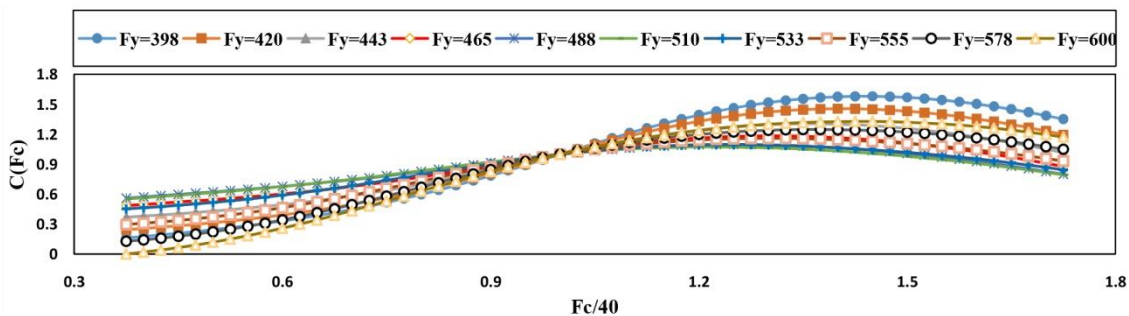
با استفاده از نمودار شکل به دست آمده، می‌توان رابطه‌ی (۱) را برای تغییرات M/M_c در مقابل ρ_f ارائه نمود:

$$M/M_c = 0.3991\rho_f^2 + 0.7264\rho_f + 1.8241 \quad (1)$$

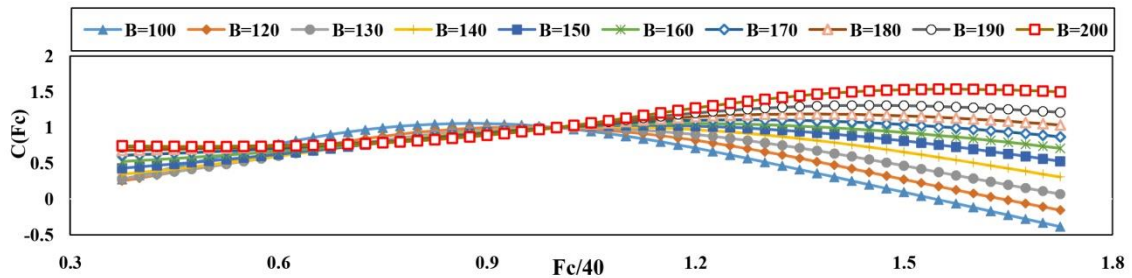
به منظور اعمال اثر سایر پارامترهای ورودی که برابر با مقادیر مبنا در نظر گرفته شده‌اند، ضرایب اصلاحی برای هر یک از پارامترها معرفی شده تا با ضرب شدن در رابطه‌ی (۱) مقادیر نهایی نسبت افزایش ممان برای تیرهای مقاوم شده به دست آیند. برای به دست آوردن ضریب تصحیح F_c با استفاده از شبکه عصبی ایجاد شده، مقادیر خروجی در برابر F_c به ازای مقادیر مختلف E_f و با در نظر گرفتن سایر پارامترها به مقدار ثابت مبنا محاسبه می‌شود. سپس مقادیر خروجی به ازای مقادیر مختلف B و با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای دیگر به مقدار مبنا به دست می‌آیند. در مراحل بعدی خروجی به ازای مقادیر مختلف سایر پارامترها و با ثابت گرفتن مابقی در مقابل F_c به دست می‌آیند (شکل‌های ۷ تا ۱۳). با در نظر گرفتن تمامی منحنی‌های به دست آمده برای $C(F_c)$ ، یک خط یا منحنی می‌تواند نماینده مجموعه‌ی منحنی‌ها با حداقل مقدار خطا باشد (رابطه ۲).



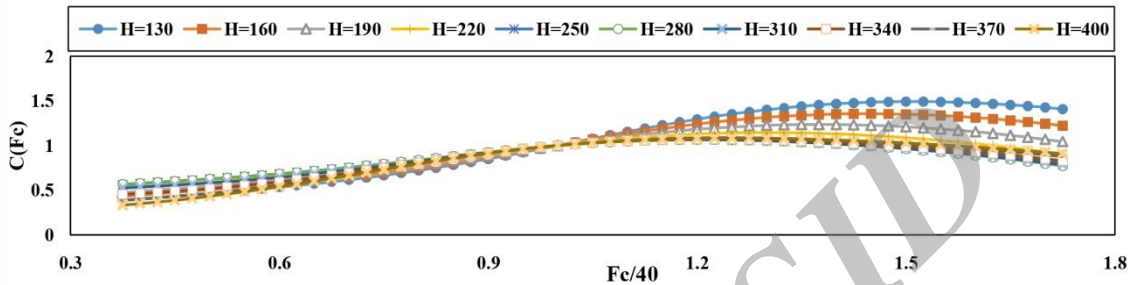
شکل ۷: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف ρ_s



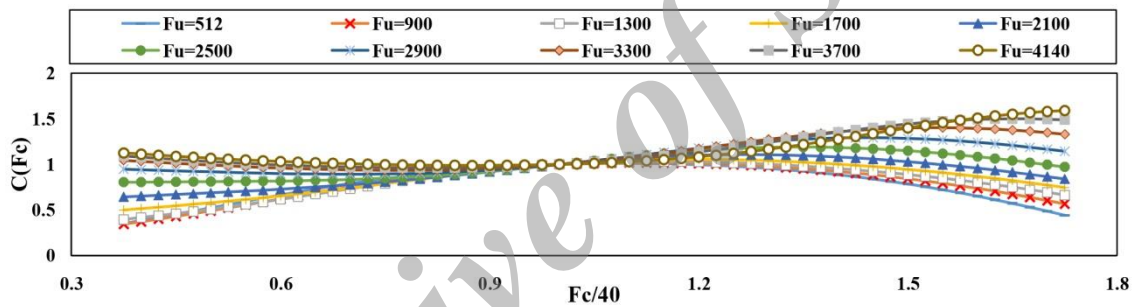
شکل ۸: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف F_y



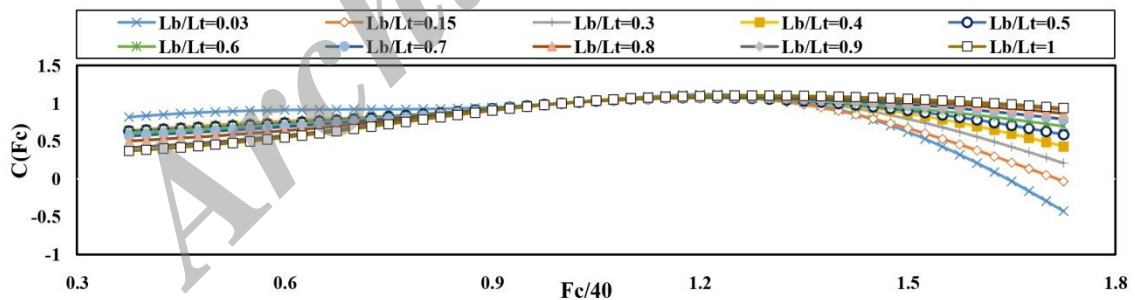
شکل ۹: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف B



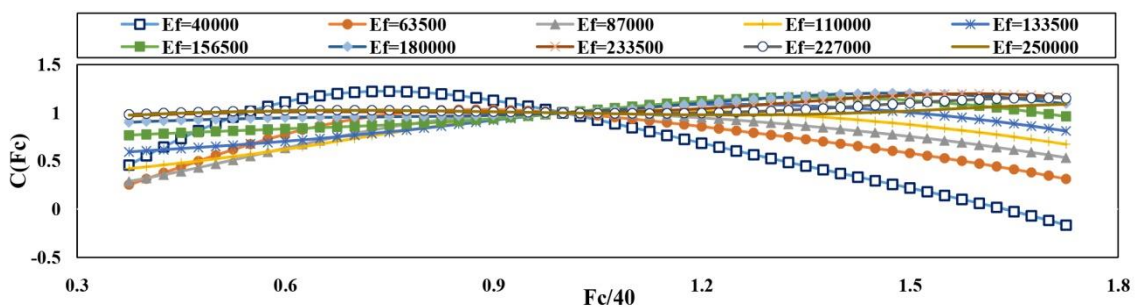
شکل ۱۰: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف H



شکل ۱۱: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف F_{u-firp}



شکل ۱۲: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف L_b/L_t



شکل ۱۳: ضریب اصلاحی $C(F_c)$ برای مقادیر مختلف E_f

مراحل فوق برای سایر پارامترهای ورودی تکرار و ضرایب تصحیح دیگر به دست می آیند. نتایج محاسبات در روابط (۲) تا (۹) ارائه شده است:

$$C(F_c) = -0.7806 \left(\frac{F_c}{40}\right)^3 + 1.7431 \left(\frac{F_c}{40}\right)^2 - 0.4948 \left(\frac{F_c}{40}\right) + 0.5319 \quad (۲)$$

$$C(\rho_s) = 0.1413 \left(\frac{\rho_s}{0.7}\right)^2 - 0.6698 \left(\frac{\rho_s}{0.7}\right) + 1.5292 \quad (۳)$$

$$C(E_f) = 0.3514 \left(\frac{E_f}{130000}\right)^3 - 1.2917 \left(\frac{E_f}{130000}\right)^2 + 1.9509 \left(\frac{E_f}{130000}\right) - 0.0216 \quad (۴)$$

$$C(B) = -1.9932 \left(\frac{B}{160}\right)^2 + 4.2313 \left(\frac{B}{160}\right) - 1.2357 \quad (۵)$$

$$C(F_u) = 0.1294 \left(\frac{F_u}{1900}\right)^3 - 0.5074 \left(\frac{F_u}{1900}\right)^2 + 0.243 \left(\frac{F_u}{1900}\right) + 1.1393 \quad (۶)$$

$$C(F_y) = -2.7231 \left(\frac{F_y}{500}\right)^2 + 6.0047 \left(\frac{F_y}{500}\right) - 2.2802 \quad (۷)$$

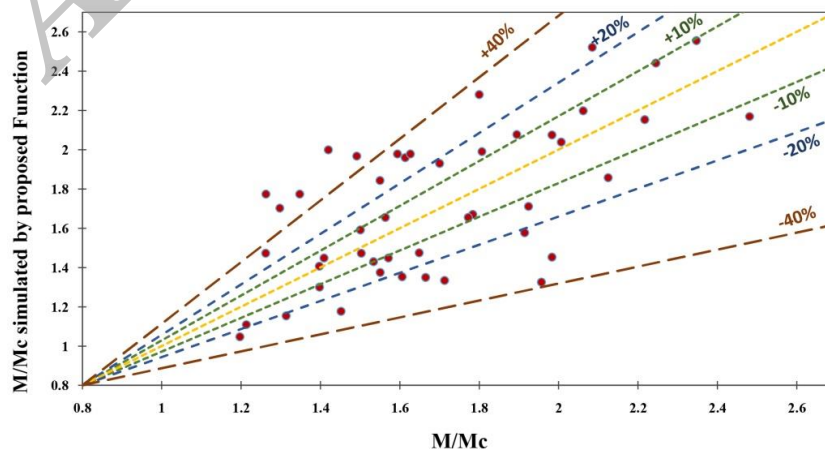
$$C(H) = 1.4753 \left(\frac{H}{260}\right)^3 - 3.7932 \left(\frac{H}{260}\right)^2 + 2.7763 \left(\frac{H}{260}\right) + 0.5264 \quad (۸)$$

$$C(L_b/L_t) = 1.1006 \left(\frac{L_b}{0.75 L_t}\right)^3 - 3.5238 \left(\frac{L_b}{0.75 L_t}\right)^2 + 3.8003 \left(\frac{L_b}{0.75 L_t}\right) - 0.3593 \quad (۹)$$

بنابراین معادله‌ی نهایی پیشنهادی برای نسبت افزایش ممان را می‌توان از رابطه (۱۰) به دست آورد. رابطه ارائه شده دارای دقت قابل قبولی بوده و با مقایسه‌ی خروجی‌های رابطه و مقادیر واقعی، خطایی در حدود ۱۵ درصد مشاهده گردید.

$$\frac{M}{M_c} = M/M_c (\rho_f) \times C(F_c) \times C(\rho_s) \times C(E_f) \times C(B) \times C(F_u) \times C(F_u) \times C(F_y) \times C(H) \times C(L_b/L_t) \quad (۱۰)$$

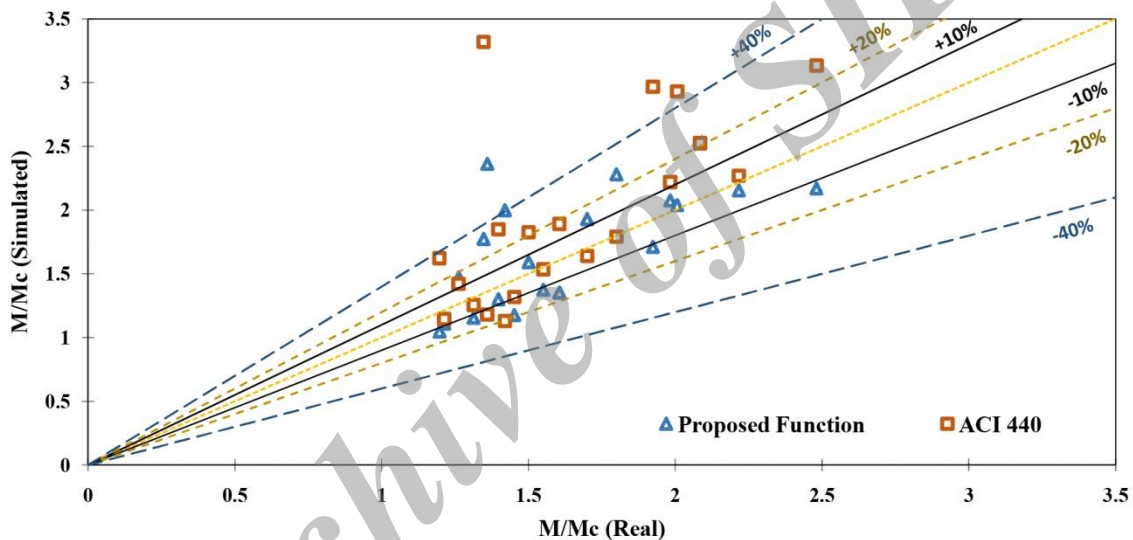
هرچند شبکه عصبی طراحی شده دارای دقت بالاتری نسبت به رابطه ارائه شده می‌باشد؛ ولی رابطه پیشنهادی ساده‌تر بوده و گدھا و معادلات پیچیده شبکه حذف شده‌اند. در شکل ۱۴ مقادیر به دست آمده از رابطه ارائه شده در مقابل مقادیر اصلی تحت شیب‌های مختلف نسبت به محور مبنا $X=Y$ رسم شده‌اند.



شکل ۱۴: نسبت افزایش ممان با استفاده از رابطه ارائه شده در برابر داده‌های واقعی.

۴- مقایسه دقت رابطه پیشنهادی با روابط آیین نامه

دستورالعمل‌ها و توصیه‌های ارائه شده در ACI-440 براساس اصول اولیه طراحی بتن مسلح در ACI-318 و باتوجه به مشخصات مکانیکی مصالح FRP می‌باشد. برای رسیدن به مقاومت نهایی در مراحل محاسبات بایستی سازگاری کرنش‌ها و تعادل تنش‌ها ارضا شود. محاسبات تعریف شده در آیین‌نامه به روش آزمون و خطا می‌باشد. روند سعی و خطا شامل فرض کردن عمق تار خنثی، محاسبه مقدار کرنش در هر ماده با استفاده از سازگاری کرنش‌ها، محاسبه مقدار تنش مربوطه در مصالح و بررسی تعادل نیروهای داخلی می‌باشد. اگر برآیند داخلی نیرو، در حال تعادل نباشد، عمق تار خنثی بایستی اصلاح شده و مراحل تکرار شوند. در بین نمونه‌های آزمایشگاهی، مقاومت خمشی تیرهایی که در تمام طول خود به کمک آرماتورهای NSM تقویت شده بودند، با استفاده از روابط ارائه شده در آیین‌نامه ACI440 محاسبه و با مقادیر به دست آمده از رابطه پیشنهادی مقایسه شده‌اند. میانگین درصد خطای مقادیر به دست آمده با استفاده از آیین‌نامه نسبت به مقادیر واقعی برابر با ۲۴/۳ درصد می‌باشد و میانگین درصد خطا با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) برابر با ۱۵/۰۶ درصد است. رابطه پیشنهادی نسبت به رابطه‌ی آیین‌نامه در حدود ۲۰ درصد خطا نشان می‌دهد. شکل ۱۵ مقادیر به دست آمده برای درصد افزایش ممان خمشی پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه (۱۰) و آیین‌نامه را در برابر داده‌های واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده نسبت افزایش ممان خمشی در برابر داده‌های واقعی.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی رفتار تیرهای تقویت شده به روش NSM-FRP از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده گردید. به‌منظور آموزش شبکه عصبی، تعداد زیادی داده‌های آزمایشگاهی در این زمینه جمع‌آوری شد. مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتورهای فولادی و طول FRP، ابعاد تیر، مقاومت و مدول الاستیسیته FRP و مقاومت آرماتورهای فولادی به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار و ورودی انتخاب شدند، همچنین نسبت افزایش ممان خمشی تیر به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و شبکه‌ی بهینه با ۲۵ نرون و ضریب همبستگی ۰/۹۹۳ طراحی گردید. درصد خطای شبکه نسبت به داده‌های واقعی ۱/۷ درصد می‌باشد. در ادامه به‌منظور استفاده از شبکه‌ی بهینه‌ی طراحی شده با استفاده از مطالعه‌ی پارامتریک، رابطه‌ی ساده‌شده‌ای برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده در خمش ارائه شد. با مقایسه‌ی خروجی‌های رابطه و مقادیر واقعی، خطایی در حدود ۱۵ درصد مشاهده گردید. هرچند شبکه عصبی طراحی شده دارای دقت بالاتری نسبت به رابطه ارائه شده می‌باشد؛ ولی رابطه پیشنهادی ساده‌تر بوده و گدھا و معادلات پیچیده شبکه حذف شده‌اند.

مراجع

- [1] ACI Committee 440. (2002). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute, ACI Committee 440, 118pp.
- [2] Kheyroddin, A., Hoseini Vaez, S.R. and Naderpour, H. (2008). Numerical analysis of slab-column connections strengthened with carbon fiber reinforced polymers. *Journal of Applied Sciences*, 8(3), pp. 420-431.
- [3] Kheyroddin, A., Naderpour, H., Ghdrati Amiri, Gh. and Hoseini Vaez, S.R. (2011). Influence of carbon fiber reinforced polymers on upgrading shear behavior of RC coupling beams. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 35(C2), pp. 155-169.
- [4] Naderpour, H., Kheyroddin, A., Ghdrati Amiri, Gh. and Hoseini Vaez, S.R. (2011). Estimating the Behavior of FRP-Strengthened RC Structural Members Using Artificial Neural Networks. *Procedia Engineering*, 14, pp. 3183-3190.
- [5] De Lorenzis, L. and Nanni, A. (2001). Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods. *ACI Structural Journal*, 98(1), pp.60-68.
- [6] Barros, J.A.O. and Fortes, A.S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), pp. 471-80.
- [7] De Lorenzis, L. and Teng, J.G. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures. *J Compo Part B: Eng*, 38(2), pp. 119-143.
- [8] Yost, J.R., Gross, S.P., and Dinehart, D.W. (2004). Near surface mounted CFRP reinforcement for structural retrofit of concrete flexural members. In: 4th Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada.
- [9] Barros, J.A., and Fortes, A.S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 471-480.
- [10] Badawi, M., and Soudki, K. (2009). Fatigue behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP rods. *Journal of Composites for Construction*, 13(5), pp. 415-421.
- [11] Tang, W.C., Balendran, R.V., Nadeem, A., and Leung, H.Y. (2006). Flexural strengthening of reinforced lightweight polystyrene aggregate concrete beams with near-surface mounted GFRP bars. *Building and environment*, 41(10), pp. 1381-1393.
- [12] Perera, R., Tarazona, D., Ruiz, A., and Martín, A. (2014). Application of artificial intelligence techniques to predict the performance of RC beams shear strengthened with NSM FRP rods: Formulation of design equations. *Composites Part B: Engineering*, 66, pp. 162-173.
- [13] Capozucca, R. (2013). Analysis of bond-slip effects in RC beams strengthened with NSM CFRP rods. *Composite Structures*, 102, pp. 110-123.
- [14] Wahab, N., Soudki, K.A., and Topper, T. (2010). Mechanism of bond behavior of concrete beams strengthened with near-surface-mounted CFRP rods. *Journal of Composites for Construction*, 15(1), pp. 85-92.
- [15] Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R., and Tourneur, C. (2009). Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. *Composite Structures*, 91(2), pp. 138-147.
- [16] Teng, J.G., De Lorenzis, L., Wang, B., Li, R., Wong, T.N., and Lam, L. (2006). Debonding failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Journal of composites for construction*, 10(2), pp. 92-105.
- [17] Singh, S.B., Reddy, A.L., and Khatri, C.P. (2013). Experimental and Parametric Investigation of Response of NSM CFRP-Strengthened RC Beams. *Journal of Composites for Construction*, 18(1).
- [18] Jung, W.T., Park, Y.H., Park, J.S., Kang, J.Y., and You, Y.J. (2005). Experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP reinforcements. In: 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, FRPRCS-7, pp. 7-10.
- [19] Almusallam, T.H., Elsanadedy, H.M., Al-Salloum, Y.A., and Alsayed, S.H. (2013). Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 145-161.
- [20] De Lorenzis, L., and Nanni, A. (2002). Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening. *ACI structural Journal*, 99(2), pp. 123-132.
- [21] Soliman, S.M., El-Salakawy, E., and Benmokrane, B. (2008). Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bars. In: 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE2008, pp. 22-24.
- [22] Ceroni, F. (2010). Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building Materials*, 24(2), pp. 1547-1559.
- [23] Sharaky, I.A., Torres, L., Comas, J., and Barris, C. (2014). Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*, 109, pp. 8-22.
- [24] Täljsten, B., Carolin, A., and Nordin, H. (2003). Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *Advances in structural engineering*, 6(3), pp. 201-213.

- [25] Al-Mahmoud, F., Castel A. and Françoi, R. (2012). Failure modes and failure mechanisms of RC members strengthened by NSM CFRP composites – Analysis of pull-out failure mode. *Composites: Part B*, 43(4), pp. 1893–1901.
- [26] Hassan T and Rizkalla S. (2004). Bond mechanism of NSM FRP for flexural strengthening of concrete structures. *ACI Struct J*, 101(6), pp. 830–839.

Archive of SID