

کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه‌ی ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی مسلح شده با FRP

حسین نادرپور^۱، مژده غلامی شالی^{۲*}، پویان فخاریان^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

pouyanfakharian@semnan.ac.ir

چکیده

مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه به دلایل مختلفی نظیر عوامل جوی و محیطی، خطا در محاسبات، ضعف در اجرا و نگهداری، تغییر کاربری و ... در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نیاز به تقویت دال‌های بتنی با توجه به اینکه یک سیستم سازه‌ای اقتصادی بوده و کاربرد فراوان دارند یک ضرورت اجتناب ناپذیر می‌باشد. در جایی که احتمال خوردگی وجود دارد الیاف FRP می‌توانند جایگزین مناسبی برای مسلح کردن دال‌های بتن آرمه باشند. در این مقاله به بررسی نتایج آزمایشات ۵۹ دال بتنی ساخته شده در آزمایشگاه که از تاریخچه تحقیقات مربوط به دال‌های بتنی گردآوری شده، پرداخته شده است. پارامترهای تاثیرگذار میزان FRP، ابعاد ستون، مقاومت نمونه ی بتنی، ضخامت، بارگذاری و ... می‌باشند. میزان مقاومت برش پانچ توسط روابط آیین‌نامه‌های ACI318، BS8110، ACI440 و روابط مربوط به تحقیقات سایر نویسندگان محاسبه شد. در این پژوهش یک مدل به وسیله‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز ارائه شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از مؤثرترین و سریع‌ترین روش‌های موجود برای تخمین ظرفیت برش پانچ دال‌های بتن آرمه محسوب می‌شوند. در نهایت با بررسی اطلاعات حاصل از این مطالعه و مقایسه‌ی روش‌های موجود در می‌یابیم که نتایج به دست آمده از شبکه‌های عصبی و روابط موجود همگرایی زیادی به نتایج آزمایشگاهی خواهند داشت.

کلمات کلیدی: شبکه عصبی مصنوعی، دال بتن آرمه، FRP، برش پانچ.

۱. مقدمه

دال‌ها اعضای بتن آرمه‌ای هستند که ابعاد آنها نسبت به ضخامتشان بزرگ بوده بارگذاری آن‌ها در جهت عمود بر صفحه خواهد بود. در سیستم‌های دال تخت، دال‌ها مستقیماً روی ستون‌ها تکیه داشته و در نتیجه کف نیاز به قالب‌بندی نخواهد داشت. باید به این نکته توجه داشت، هنگامی که دال بدون واسطه روی ستون می‌نشیند، عملاً دال به صورت دو طرفه بوده و خطر ایجاد برش سوراخ‌کننده یا پانچ در محل اتصال دال به ستون باید در نظر گرفته شود.

یک نگرانی عمده در صنعت ساختمان دوام طولانی مدت سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. یکی از فاکتورهای اصلی که باعث کاهش دوام و عمر خدمت سازه‌های بتن آرمه می‌گردد، خرابی آرماتورهای فولادی می‌باشد [۱].

به عنوان یک نتیجه، استفاده از FRP به جای فولاد در سازه‌های بتن آرمه می‌تواند راه حل موثری برای این مشکل باشد [۲]. در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های FRP به علت نسبت‌های بالای مقاومت به وزن و سختی به وزن، خواص ترمومکانیکی خوب، مقاومت در برابر خوردگی، وزن پایین و پتانسیل بالای دوام به طور فزاینده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

کاربرد این ماده‌ی جدید فرصتی برای افزایش بهره‌وری ساخت و ساز، افزایش عملکرد سازه، کاهش هزینه‌ی نگهداری سازه و افزایش عمر خدمت سازه پدید آورده است. کامپوزیت‌های FRP در انواع مختلف مانند میله، گرید، شیت و دورپیچ موجود می‌باشد. به علاوه این مواد می‌توانند در سازه‌های مختلف که شامل تیرها، ستون‌ها، دال‌ها و عرشه‌های پل می‌باشند، به کار گرفته شوند [۴].

مطالعات گسترده‌ای برای درک و بررسی رفتار اعضای بتنی مسلح شده با FRP انجام شده است [۳، ۵-۷]. به علاوه، دال‌های تخت دو طرفه به طور گسترده‌ای در سازه‌ها در مهندسی عمران به علت سرعت بالای اجرا در محل، سهولت در پارتنش‌بندی فضا و کاهش ارتفاع کلی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. اخیراً میلگردهای FRP به عنوان یک جایگزین بالقوه برای آرماتورهای فولادی موجود در دال‌های تخت در نظر گرفته می‌شوند [۸].

هنگامی که طراحی دال تخت بتنی متکی به ستون‌ها است، ظرفیت برش پانچ یک فاکتور بحرانی محسوب شده و نیاز است که در نظر گرفته شود.

قرن‌هاست رفتار برش پانچ دال‌های مسلح شده با فولاد معمولی به طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته و مدل‌های طراحی متنوعی آماده شده است [۶].

با این حال با توجه به مدول الاستیسیته پایین میلگردهای FRP در مقایسه با میلگردهای فولادی، ظرفیت برشی کلی اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP اساساً پایین‌تر از اعضای بتنی مسلح شده با میلگردهای فولادی می‌باشد [۲].

به علاوه، تفاوت در سایر خواص مکانیکی مانند مقاومت نهایی و مشخصات Bond بین FRP و میلگردهای فولادی باعث می‌شود این مدل‌ها برای پیش‌بینی رفتار دال‌های بتنی مسلح شده با FRP ناکافی باشند. بنابراین تحقیقات اخیر به بررسی روش‌های تجربی موجود پرداخته و مدل‌های جدیدی برای پیش‌بینی ظرفیت برش پانچ دال‌های مسلح شده با FRP پیشنهاد کرده‌اند [۲ و ۹].

Metwally در سال ۲۰۱۳ شبکه عصبی مصنوعی را برای ساخت رابطه‌ی نگاشت بین عوامل موثر و ظرفیت برش پانچ به کار گرفت. نویسنده نتیجه گرفت که این تکنیک می‌تواند یک ابزار عملی برای تخمین ظرفیت برش پانچ دال‌های مسلح با FRP باشد و شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند عملکرد پیش‌بینی بهتری را در مقایسه با روش‌های مبتنی بر فرمول ارائه دهد [۲].

۲. نمونه‌های آزمایش و روش‌های موجود

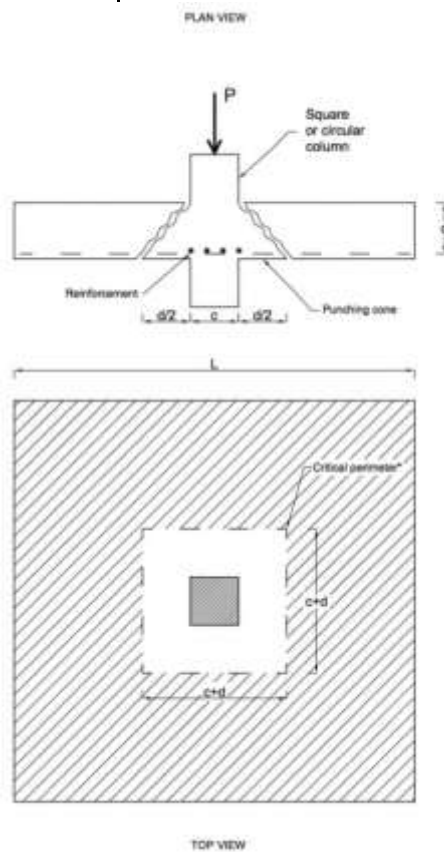
نمونه‌های آزمایش شامل ۵۹ دال بتن مسلح شده با میلگردهای FRP بوده که از تاریخچه تحقیقات جمع‌آوری شده است. همه‌ی نمونه‌ها اتصالات دال-ستون مسلح شده با FRP بوده که بدون هر نوعی از DROP پانل، سرستون یا آرماتورهای برشی می‌باشند.

نتایج آزمایشگاهی جمع‌آوری شده در تاریخچه تحقیقات موجود بوده و توسط محققین متفاوتی گردآوری شده است. دال‌ها تحت بار متمرکز برشی قرار گرفته‌اند. همه‌ی دال‌های مورد آزمایش قبل از رسیدن به ظرفیت خمشی طراحی در برش پانچ تخریب شده‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی استوانه‌ای (f'_c) برای آنالیز داده‌ها دارای بازه‌ای از ۲۶ تا ۶۵ MPa، مدول یانگ میلگردهای FRP (E_f) دارای بازه‌ای از ۲۸ تا ۱۴۸ GPa، نسبت آرماتورهای خمشی (ρ_f) دارای بازه‌ای از ۰٫۱۸٪ تا ۳٫۸٪ بوده و عمق موثر دال (d) بازه‌ای از ۵۵ تا ۱۶۵ میلی‌متر را دارا می‌باشد.

هدف در این پژوهش بررسی تاثیر این پارامترها (f'_c, E_f, ρ_f, d) بر ظرفیت برش پانچ می‌باشد. در جدول ۱ معرفی پارامترهای مورد نیاز آورده شده است. شکل ۱ مکانیزم برش پانچ در دال‌های بتنی مسلح شده با FRP را نشان می‌دهد.

جدول ۱- معرفی پارامترهای مورد نیاز

نماد پارامتر	تعریف پارامتر
b_0 (mm)	عرض تیر بتن آرمه
d (mm)	ارتفاع موثر تیر بتن آرمه
ρ_f (%)	نسبت آرماتورهای FRP
E_{fp} (MPa)	مدول الاستیسیته ورق FRP
E_s (MPa)	مدول الاستیسیته فولاد
f'_c (MPa)	مقاومت نمونه بتنی استوانه‌ای
ρ_s (%)	نسبت آرماتورهای فولادی
C_x (mm)	بعد در راستای X ستون
C_y (mm)	بعد در راستای Y ستون



شکل ۱- شکل هندسی عمومی دال‌های بتنی دوطرفه با FRP [10]

در حال حاضر فقدان طراحی و مدل‌های پیش‌بینی برای به دست آوردن مقاومت برش پانچ دال‌های بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP وجود دارد. پیشنهادهای فعلی در آیین‌نامه ACI318-11 [۱۱] و British Standards [۱۲] که برای دال‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی به دست آمده‌اند، در زیر آورده شده است:

$$V_{C(ACI318)} = 0.33\sqrt{f'_c} b_0 d \quad (۱)$$

در این رابطه b_0 محیط بحرانی به فاصله $d/2$ از محل بارگذاری و d متوسط عمق خمشی دال می‌باشد.

$$V_{C(BS8110)} = 0.79(100\rho_s)^{0.33} \left(\frac{400}{d}\right)^{0.25} \left(\frac{f_{ck}}{25}\right)^{0.25} b_0 d \quad (۲)$$

در این رابطه f_{ck} مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی مکعبی، ρ_s نسبت آرماتور فولادی، b_0 محیط بحرانی مستطیل به فاصله $d/5$ از محل بارگذاری و d متوسط عمق خمشی دال می‌باشد.

زیر کمیته‌ی ACI440H [۱۳] در حال حاضر یک بند جدید برای محاسبه‌ی ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی دو طرفه مسلح شده با میلگردهای FRP در ویرایش بعدی راهنمای ACI-440.1R مطرح کرده است.

این زیر کمیته رابطه‌ی (۳) را پیشنهاد کرده است. این رابطه اثر سختی آرماتورها برای محاسبه‌ی انتقال برشی در دال‌های بتنی دو طرفه را تاثیر داده است.

$$V_{C(ACI440)} = 0.8\sqrt{f'_c} b_0 c \quad (۳)$$

در این رابطه b_0 محیط مقطع بحرانی (mm) برای دال‌ها بوده و باید در فاصله‌ی $d/2$ از سطح ستون محاسبه شود. همچنین c عمق تار خشی در مقطع ترک خورده بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c = kd \quad (۴)$$

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

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

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$$

El-Ghandour رابطه‌ی آیین‌نامه‌ی ACI-318 را با افزودن مقدار $\left(\frac{E_f}{E_s}\right)^{0.33}$ اصلاح کرد و رابطه‌ی (۵) را به وجود آورد:

$$V_{C(EL)} = 0.33\sqrt{f'_c} \left(\frac{E_f}{E_s}\right)^{0.33} b_0 d \quad (۵)$$

در این رابطه E_f و E_s مدول الاستیسیته‌ی FRP و فولاد بوده و پارامترهای دیگر همانند رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شوند. Matthys و Taerwe رابطه‌ی اصلاح شده از British Standard بدست آوردند که در زیر نشان داده شده است:

$$V_{C(MT)} = 1.36 \frac{(100\rho_f \frac{E_f}{E_s} f'_c)^{0.33}}{d^{0.25}} b_0 d \quad (۶)$$

در این رابطه ρ_f نسبت آرماتورهای FRP و E_f و E_s مدول الاستیسیته‌ی FRP و فولاد می‌باشند. پارامترهای دیگر همانند رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شوند.

Ospina و همکاران یک اصلاحیه برای رابطه‌ی ۵ پیشنهاد دادند که در زیر آورده شده است:

$$V_{C(OS)} = 2.77(\rho_f f'_c) \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} b_0 d \quad (۷)$$

در نهایت El-Gamal و همکاران [۱۴] رابطه‌ی ACI318 را توسط افزودن تاثیر سختی خمشی $(\rho_f \times E_f)$ آرماتورهای اصلی پایینی و همچنین لحاظ نمودن اثر پیوستگی در راستای طولی و یا عرضی اصلاح کرده و رابطه‌ی زیر را پیشنهاد دادند:

$$V_{c,El-Gamal} = 0.33 \sqrt{f'_c} b_0 d \alpha (1.2)^N \quad (۸)$$

در این رابطه N اثر پیوستگی دال را روی ظرفیت برش پانچ نشان می‌دهد و داریم:

$N = 0$ برای دال‌های یک دهانه در هر دو جهت (تکیه گاه ساده)

$N = 1$ برای دال‌های پیوسته در یک جهت

$N = 2$ برای دال‌های پیوسته در دو جهت

α نیز تابعی از سختی خمشی آرماتورهای اصلی زیرین، مساحت بارگذاری و عمق موثر دال می‌باشد.

$$\alpha = 0.62 \times 3 \sqrt{\rho_f E_f} \times \left(1 + \frac{8d}{b_0}\right) \quad (۹)$$

در این رابطه ρ_f و E_f به ترتیب نسبت آرماتور و مدول الاستیسیته (GPa) آرماتورهای اصلی زیرین می‌باشند. پارامترهای دیگر همانند رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شوند.

سرانجام Metwally [۲] با جایگزین کردن ضریب ۰,۳۶۸ به جای ۰,۳۳ در رابطه‌ی ۷ توانست رابطه‌ی زیر را ارائه دهد:

$$V_{c,Metwally} = 0.368 \sqrt{f'_c} b_0 d \alpha (1.2)^N \quad (۱۰)$$

۳. شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک فرآیند پردازش اطلاعات بوده که از سیستم عصبی انسان الهام می‌گیرد. این شبکه‌ها، با قابلیت قابل توجه آنها در استنتاج معانی از داده‌های پیچیده یا مبهم، می‌تواند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آنها برای انسان و دیگر تکنیک‌های کامپیوتری بسیار پیچیده و دشوار است به کار گرفته شود. مهم‌ترین جزء یک شبکه نورون یا سلول عصبی مصنوعی می‌باشد. هر نورون شامل تعدادی ورودی و خروجی بوده که عملکرد این سلول‌ها به صورت سری و موازی می‌باشند و مجموعه‌ی سلول‌های عصبی موازی تشکیل یک لایه را می‌دهند. در این فرآیند ابتدا به شبکه‌ی مورد نظر توسط مثال‌ها آموزش داده شده و سپس وزن‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شود که خطای مقدار محاسبه شده و مقدار هدف به کمترین مقدار خود برسد [۱۵-۱۶]. هدف ما از آموزش شبکه آماده‌سازی آن برای پاسخ‌گویی مناسب به داده‌های موجود و داده‌های مشابه از ورودی‌های مختلف می‌باشد.

۴. شبکه عصبی و مدل‌سازی

برای آموزش دادن شبکه از اطلاعات آزمایشات انجام شده با موضوع ظرفیت برش پانچ دال‌های بتنی تقویت شده با FRP استفاده شده است. در این پژوهش به آموزش شبکه با ۵۹ نمونه دال بتنی پرداخته‌ایم. در جدول ۲ مشخصات آماری داده‌های ورودی و خروجی برای شبکه آورده شده است. قبل از شبیه‌سازی با شبکه عصبی، تمام دیتاهای آزمایشگاهی (مقادیر ورودی و خروجی) باید بین ۰/۱ و ۰/۹ نرمالایز شوند. برای مقیاس کردن این پارامترها همانند رابطه‌ی (۱۱) عمل خواهیم کرد.

$$d_{scaled} = a_1 \frac{(d - d_{min})}{(d_{max} - d_{min})} + a_2 \quad (۱۱)$$

که در این رابطه d_{min} و d_{max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر می‌باشد. در این مقاله، ۰/۸ و ۰/۱ برای a_1 و a_2 در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات آماری داده‌های ورودی و خروجی

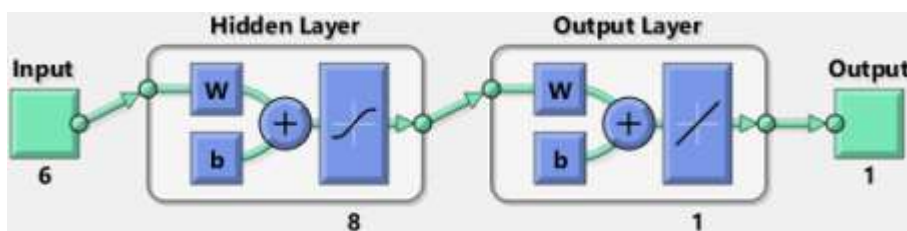
	C_x (mm)	C_y (mm)	d (mm)	f'_c (MPa)	E_f (GPa)	ρ_f (%)	V_{test} (KN)
مینیمم	75	75	55	26	28.4	0.2	61
ماکزیمم	600	600	165	64.8	147.6	3.8	1328
میانگین	239.4915	253.8989	118	40.08	74.346	0.9	373.8983
انحراف معیار	143.712	145.241	33.5	8.4434	36.653	0.8	279.385
ضریب تغییرات	0.60007	0.57204	0.28	0.2107	0.493	0.8	0.74722

۵. مدل شبکه عصبی بهینه

در این مقاله برای مدل‌سازی رفتار برشی دال‌های مسلح شده با FRP از شبکه‌ی پس‌انتشار برگشتی استفاده شده است. شبکه‌ی بهینه و مطلوب، شبکه‌ای است که در آن دقت بالا بوده و همبستگی خروجی‌ها و هدف بالا و خطای مجذور مربعات پایین باشد. شبکه‌های انتشار برگشتی از مؤثرترین و معمول‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی و تخمین هدف در میان شبکه‌های چند لایه بوده و دارای کاربرد فراوان و متنوع در این زمینه می‌باشند. در این نوع از شبکه‌ها ۷۰ درصد از کل داده‌های موجود را به آموزش و ۳۰ درصد باقیمانده را برای آزمایش و قیاس و آزمودن بازده شبکه‌ی آموزش دیده اختصاص می‌دهیم [۱۷]. در این پژوهش یک لایه‌ی پنهان داریم و تابع حاکم بر آن از نوع تانژانت سیگموئید بوده و معادله‌ی تابع به صورت زیر می‌باشد:

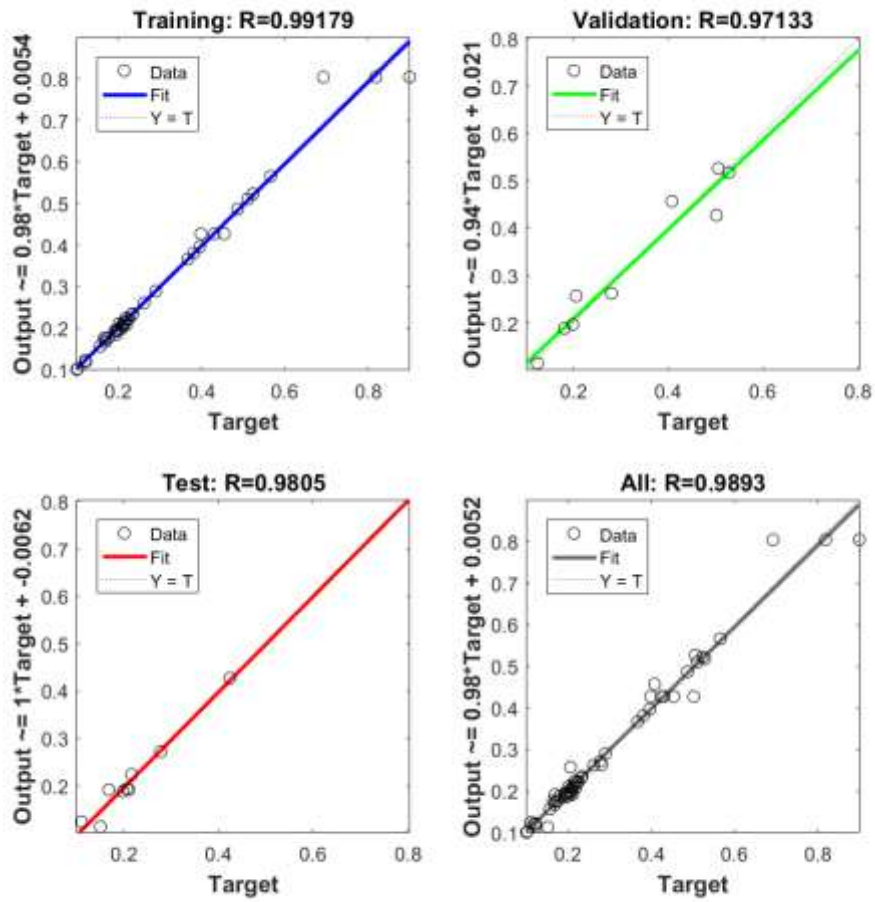
$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (12)$$

شکل ۲ نمای شماتیکی از شبکه‌ی عصبی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

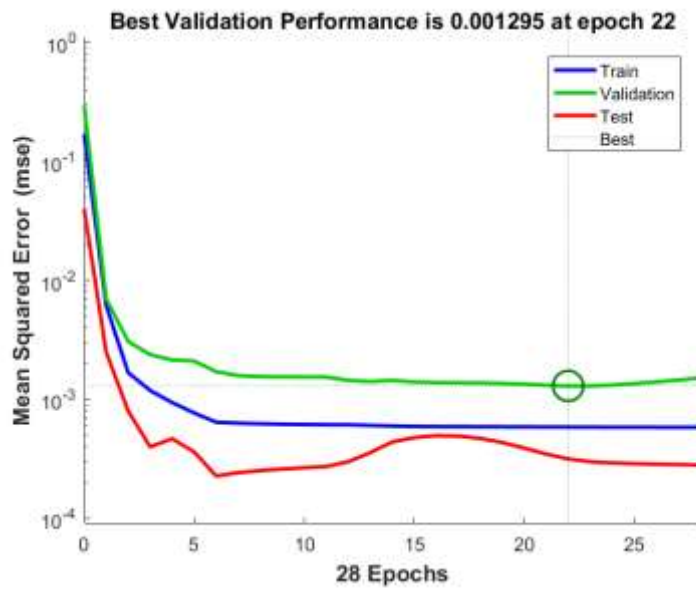


شکل ۲- معماری شبکه عصبی

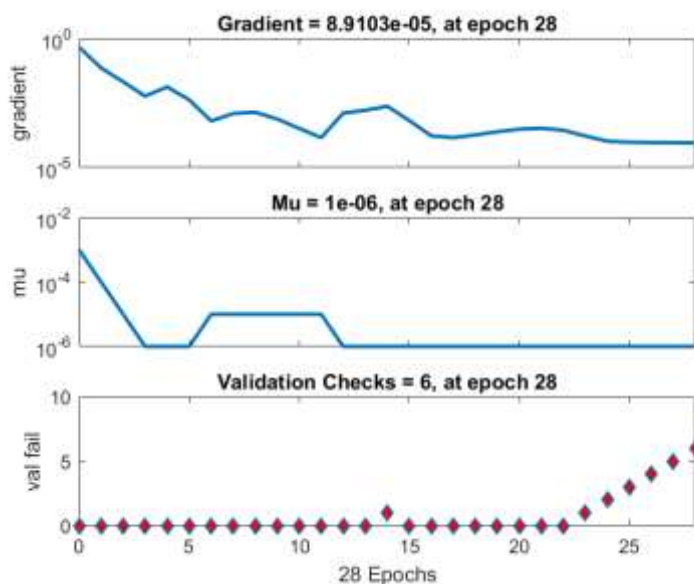
در شکل ۳ مقایسه‌ی میان میزان دقت نتایج در صورت استفاده از شبکه‌ی عصبی و خروجی‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. مقادیر رگرسیون موجود در شکل مذکور نشان دهنده‌ی همبستگی بالای هدف با خروجی شبکه می‌باشد. در این شکل یک منحنی برای آموزش، بعدی برای صحت سنجی و آخرین منحنی برای آزمودن می‌باشد. در شکل ۴ میزان رگرسیون شبکه پس از ۲۲ اپوک بررسی شده و نمودار میانگین مربعات خطا آورده شده است. در شکل ۵ نیز روند تغییرات شبکه در مجموع نمایش داده شده است. این شکل مربوط به شبکه‌ی دارای ۸ نورون در لایه‌ی پنهان می‌باشد و این سیر نزولی از بزرگ به کوچک نشان دهنده‌ی یادگیری شبکه است.



شکل ۳- نمودار رگرسیون شبکه پس از آموزش



شکل ۴- نمودار میانگین مربعات خطا در فرآیند آموزش شبکه



شکل ۵- روند تغییرات شبکه در مراحل آموزش

۶. آنالیز حساسیت

در سیستم شبکه‌های عصبی مصنوعی، در درون هر نورون وزن به خصوصی وجود دارد که بر روی مقادیر ورودی به نورون تاثیر گذاشته و بردارهای وزن دار را به توابع تحریک هدایت می‌کنند. ممکن است نیاز باشد یک بردار علاوه بر آن که وزن آن تغییر کند، در فضای برداری جابجا شود که این عمل با اضافه کردن یک بایاس به ماتریس وزن‌ها صورت می‌گیرد. حال مقادیر وزن‌ها به توابع تحریک برده می‌شوند و تابع خروجی مقدار اصلی را به خود می‌گیرد و با توجه به اینکه آیا جواب مناسب بدست آمده است یا خیر این مقادیر با بردار هدف مقایسه می‌شوند و در صورت اختلاف با بردار هدف به عقب برگشت داده می‌شوند تا وزن‌های مناسب‌تری برای آن بردارها انتخاب گردد.

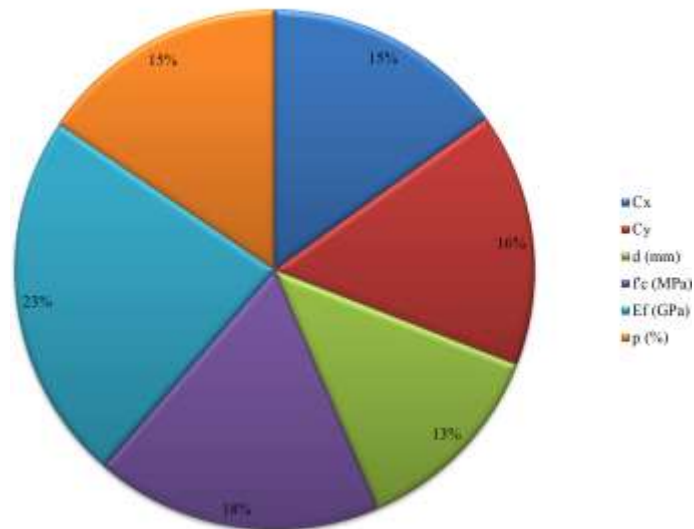
آنالیز بر اساس اندازه وزن‌ها اختصاصاً بر اساس مقادیر ذخیره شده در ماتریس وزن‌ها برای تعیین تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی تمرکز دارد. در این مطالعه از رابطه ارائه شده توسط [18] Milne برای محاسبه تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی استفاده شده است. در جدول ۳ وزن‌های تنظیم شده بدست آمده از شبکه عصبی ایده‌آل آمده است.

جدول ۳- وزن‌های تنظیم شده بدست آمده از شبکه عصبی ایده‌آل

C_x (mm)	C_y (mm)	d (mm)	f'_c (MPa)	E_f (GPa)	ρ_f (%)	V_{test} (KN)
1.0956	0.98953	-0.46346	0.65266	-0.49736	0.097796	0.18953
-0.06274	0.85147	0.74616	1.1749	-0.4504	-1.7509	-0.50508
-0.21763	-0.20352	0.36141	-0.1918	-1.5341	1.0883	0.60644
1.3784	1.2571	1.5156	1.7475	0.31298	-0.43354	0.21222
0.3949	-0.20607	0.26073	1.1603	2.2677	-0.9695	0.54804
-1.0239	-0.32899	-0.37322	0.21989	0.59327	0.02014	-0.19149
-0.52348	1.4113	1.1856	1.18	1.1596	-0.60001	0.5613
-0.54021	-1.331	0.10591	-1.4456	-2.0746	-1.4575	-1.1242

پس از انجام آنالیز حساسیت، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، E_f با ۲۳ درصد، بیشترین تاثیر و d با ۱۳ درصد، کمترین تاثیر را بر روی پارامتر هدف داشته‌اند.

آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی



شکل ۶- درصد تاثیر پارامترهای ورودی بر روی برش پانچ

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله مقاومت برش پانچ دال‌های بتن آرمه تقویت شده با FRP مورد بررسی قرار گرفته و از بین روش‌های موجود برای تخمین مقاومت برشی بر اساس داده‌های ورودی، شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده است. ورودی‌های شبکه ابعاد ستون بتن آرمه در جهت X و Y، عمق موثر دال بتن آرمه، مقاومت نمونه‌ی بتنی استوانه‌ای، مدول الاستیسیته ورق FRP و نسبت آرماتور فولادی می‌باشد. مقاومت برش پانچ دال بتن آرمه نیز به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند مقاومت برش پانچ دال‌های بتنی تقویت شده با FRP را تخمین بزند. برای درک بیشتر میزان تاثیر هر کدام از متغیرهای ورودی بر مقاومت برشی، یک آنالیز حساسیت نیز ارائه شده که طبق آن مدول الاستیسیته FRP به عنوان مهم‌ترین متغیر معرفی می‌شود.

۸. مراجع

- [1] L. Bertolini, Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures, Struct. Infrastruct. Eng. 4 (2008) 123–137. doi:10.1080/15732470601155490.
- [2] I.M. Metwally, Prediction of punching shear capacities of two-way concrete slabs reinforced with FRP bars, HBRC J. 9 (2013) 125–133. doi:10.1016/j.hbrcej.2013.05.009.
- [3] J. Bai, ed., Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, in: Adv. Fibre-Reinforced Polym. Compos. Struct. Appl., Woodhead Publishing, 2013: pp. xix – xxii. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-85709-418-6.50026-0.
- [4] L.C. Hollaway, A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 2419–2445. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062.

- [5] A. Cevik, I.H. Guzelbey, Neural network modeling of strength enhancement for CFRP confined concrete cylinders, *Build. Environ.* 43 (2008) 751–763. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.036.
- [6] A.A. Elshafey, E. Rizk, H. Marzouk, M.R. Haddara, Prediction of punching shear strength of two-way slabs, *Eng. Struct.* 33 (2011) 1742–1753. doi:10.1016/j.engstruct.2011.02.013.
- [7] L.C. Hollaway, 16 - Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composite materials in bridge engineering: materials, properties and applications in bridge enclosures, reinforced and prestressed concrete beams and columns, in: J. Bai (Ed.), *Adv. Fibre-Reinforced Polym. Compos. Struct. Appl.*, Woodhead Publishing, 2013: pp. 582–630. doi:http://dx.doi.org/10.1533/9780857098641.4.582.
- [8] A.W. El-Ghandour, K. Pilakoutas, P. Waldron, Punching Shear Behavior of Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Flat Slabs: Experimental Study, *J. Compos. Constr.* 7 (2003) 258–265. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(258).
- [9] M. Hassan, E. Ahmed, B. Benmokrane, Punching shear strength of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete flat slabs, *Can. J. Civ. Eng.* 960 (2013) 951–960. doi:10.1139/cjce-2012-0177.
- [10] A.E. Kurtoglu, A. Çevik, H.M. Albegmprli, M.E. Gülsan, M. Bilgehan, Reliability-based modeling of punching shear capacity of FRP-reinforced two-way slabs, *Comput. Concr.* 17 (2016) 87–106. doi:10.12989/cac.2016.17.1.087.
- [11] American Concrete Institute (ACI), *ACI 318M-14: Building Code Requirements for Structural Concrete*, 2014.
- [12] B.S.I. BS8110, Part 1, Code of practice for design and construction, structural use of concrete, London Br. Stand. Inst. (1997).
- [13] ACI Committee 440, American Concrete Institute, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, 2008.
- [14] S. El-Gamal, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, Behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars under concentrated loads, *ACI Struct. J.* 102 (2005) 727–735.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] نادریپور. حسین، وثوقی فر. حمیدرضا، قباخلو. احسان، "ارزیابی پارامترهای موثر در تفرق امواج زلزله‌های دور از گسل به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی"، *مهندسی عمران شریف*، بهار ۱۳۹۵، دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۱/۱، ۱۳-۲۳.
- [18] L. Milne, Feature Selection Using Neural Networks with Contribution Measures 1 Introduction 2 Calculating Proportion Contribution of Input Features to Outputs, (1995) 1–8.