

# Shear Strength Assessment of Slender Reinforced Normal Concrete Beams Using Artificial Neural Networks

Yasser Sharifi 1\*, Mahdieh Rahmatian Najar2, Adel Moghbeli3, Khodadad Moghbeli4

1- Associate Professor, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran

y.sharifi@vru.ac.ir yasser\_sharifi@yahoo.com

2- Master of structures, Faculty of Engineering, Institute of Higher Education Allameh Jafari Rafsanjan, Iran

3- Master of structures, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran

4- Deputy of Planning of Road and Transportation Organization of Iran

## ABSTRACT

Predicting the shear capacity of reinforced concrete beams with a suitable accuracy is an essential issue for engineering applications, especially for the rehabilitation and design of such structures. It was found that there is a significant difference between experimental and existing code recommendations for shear capacity predictions. Shear capacity assessment of slender reinforced concrete beams in reason of several assumptions to equation developing is one of the most important issues. An artificial neural network has been developed as a reliable method to simulate and determine the shear capacity of slender concrete beams. For this purpose, the effects of several parameters on the shear strength of concrete beams were evaluated. Finally, an empirical formula with suitable accuracy was obtained to determine the shear strength of slender concrete beams. Experimental, code recommendations and model suggested by artificial neural networks for shear strength of concrete beams show that the model suggested by artificial neural networks gives more exact predictions.

**Keywords:** Reinforced Concrete Beams Artificial Neural Networks Shear Strength Capacity Experimental Code Recommendation.

# مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر حاوی بتن با مقاومت معمولی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۷-۰۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

یاسر شریفی\*

دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران  
y.sharifi@vru.ac.ir yasser\_sharifi@yahoo.com

مهديه رحمتیان نجار

کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، موسسه آموزش عالی علامه جعفری رفسنجان، ایران

عادل مقبلی

کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

خداداد مقبلی

معاون برنامه ریزی سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای کشور

## چکیده

ارزیابی مقاومت نهایی برشی تیرهای بتن مسلح به دلیل فرضیات بسیار زیاد در برآورد فرمول‌های ارائه شده در آیین‌نامه‌ها، یک موضوع بسیار مهم تلقی می‌شود. از طرفی محاسبه دقیق مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح هم در زمان طراحی و هم در موارد مقاوم‌سازی از مهم‌ترین پارامترها می‌باشد. مقایسه مقاومت برشی آزمایش‌های موجود و فرمول‌بندی ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ها اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. در مقاله حاضر مدل شبکه عصبی مصنوعی به صورت یک روش قابل اطمینان برای شبیه‌سازی و تعیین مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر توسعه داده شده است. بدین منظور تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر از جمله عمق موثر، عرض تیر، دهانه‌ی برش، مقاومت تسلیم آرماتور برشی و کششی، مقاومت فشاری بتن و مقدار آرماتور برشی ارزیابی شده است. همچنین مطالعه‌ای عددی با هدف تحلیل و بررسی پارامترهای مورد استفاده در شبکه انجام داده شده است. سرانجام یک رابطه تجربی با دقت مناسب برای تعیین مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بدست آمده است و در نهایت نتایج بدست آمده با آیین‌نامه‌های معتبر دنیا مقایسه شده است. همچنین مقایسه‌ی مقاومت برشی آزمایشگاهی با آیین‌نامه‌های مختلف و مدل پیشنهادی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی، نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده از عملکرد مناسبی برخوردار است. کلمات کلیدی: تیرهای بتن مسلح لاغر، شبکه‌های عصبی مصنوعی، مقاومت (نهایی) برشی، آیین‌نامه‌ها.

به منظور شناخت رفتار تیرهای بتن مسلح تحقیقات زیادی انجام شده و در جریان است. تحقیقات گسترده ای توسط محققان مختلف بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح صورت گرفته است، اما از مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از روابط موجود در منابع درمی‌یابیم که روابط موجود نمی‌توانند پیش بینی صحیحی را از رفتار تیرهای بتنی مسلح ارائه نمایند که لزوم انجام پژوهش‌های بیشتری را در این زمینه می‌طلبد. یکی از مهمترین رفتار قابل بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح است. از آنجا که در برآورد مقاومت برشی مقاطع بتن مسلح فرضیات زیادی نسبت به سایر مقاومتها در نظر گرفته می‌شود، بنابراین فرمول بندیهای ارائه شده با مقادیر آزمایشگاه از دقت مناسب برخوردار نیستند [۴-۱].

گاتانو و همکاران [۵] در مقاله خود به بررسی و ارائه‌ی فرمول طراحی مقاومت برشی برای تیرهای بتن مسلح با خاموت و بدون خاموت پرداختند. در این مقاله مقاومت برشی در اثر قرار گرفتن خاموت داخل تیرهای بتن مسلح افزایش می‌یابد. فرمول پیشنهادی نشان می‌دهد که تاثیرات خاموت در افزایش مقاومت برشی تیر به شدت وابسته به مقاومت بتن می‌باشد که به مقاومت برشی خاموت غیر خطی بستگی دارد. یک فرمول طراحی متناظر پیشنهاد شد، سپس با اضافه کردن این فرمول از مقاومت برشی تیرهای بدون خاموت بیانیه‌ای منتشر شد که برای پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی از تیرهای با خاموت تحت شکست خمشی و برشی یک فرمول طراحی اصلی پیشنهاد شد. مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده از این فرمول عمومی و فرمول‌های Eurocode و ACI code با مقادیر تجربی که از تیرهای با خاموت بدست آمده‌است نشان می‌دهد که فرمول پیشنهاد شده سازگاری بیشتری دارد و از کدهای Eurocode و ACI code قابل اعتمادتر است.

یوچی یوشیدا [۶] در پژوهش خود اطلاعات تجربی در مورد ظرفیت برشی اعضای بتنی بسیار بزرگ بدست می‌آورد که نمونه حاوی آرماتور عرضی شکست خورده در برش نمی‌باشد. تنها ۴۷ درصد از بار شکست توسط مقررات برشی کد ACI پیش‌بینی می‌شود. فراهم کردن میزان کوچکی از آرماتور برشی تا حد زیادی واکنش تیر را در برابر ظرفیت برشی و شکل‌پذیری افزایش می‌دهد. برای مقدار کلی از خاموت‌ها ظرفیت برشی افزایش می‌یابد ولی فاصله‌ی آرماتورهای عرضی کاهش می‌یابد. روش در کد CSA مبنی بر تئوری MCF می‌باشد که بطور کلی برآورد خوبی از شکست برای همه نمونه‌ها می‌باشد.

کارایانیس و همکاران [۷] در مقاله خود به بررسی رفتاری از برش بحرانی تیرهای بتن مسلح با سطح مقطع مستطیل و با آرماتورهای مارپیچ مستطیلی به عنوان آرماتور عرضی تحت بارگذاری یکنواخت به صورت تجربی پرداختند. علاوه بر این پیشرفت آرماتور مارپیچ مستطیلی که دارای برش مطلوب عمودی مایل می‌باشد ارائه شد و به عنوان آرماتور برشی تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از آرماتور مارپیچ مستطیلی بهبود می‌بخشد عملکرد برشی را در تیرهایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تیرها با آرماتور مارپیچ، ظرفیت برشی با توجه به تیرهای متناظر با خاموت افزایش می‌یابد

شین کاو [۸] در پژوهش خود تاثیر نسبت آرماتور طولی را بهتر از درصدی از آرماتور عرضی مینیمم بر ظرفیت برشی از عضوهای بتن مسلح خیلی بزرگ را مورد بررسی قرار می‌دهد. در مجموع از چهار دهانه به عمق دو متر با مقادیری از متغییر طولی و آرماتور عرضی ساخته شده است و آزمایش می‌شود. ثباتی از تئوری MCF در پیش‌بینی مقاومت برشی از عضوهای آزمایش شده در سراسر این پروژه تحقیقاتی قابل مشاهده است. رابطه ساده شده مربوط

به نسبت آرماتور طولی با مقاومت برشی کلی عضو پیشنهاد می‌شود و سپس با مشاهدات تجربی مقایسه می‌شود. همبستگی خوبی بین پیش‌بینی و مشاهدات آزمایشی مشاهده می‌شود.

طبق مطالعات انجام شده تیرهای بتن مسلح لاغر شامل تیرهایی می‌شوند که نسبت دهانه‌ی برش به عمق موثر (a/d) بیشتر از ۲/۵ باشد؛ همچنین منظور از دهانه‌ی برش، فاصله تکیه‌گاه تا محل بارگذاری می‌باشد. همچنین در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری در رابطه با مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر با استفاده از روش‌های مختلف انجام گرفته است اما با وجود این مطالعات گسترده روابط ارائه شده از دقت مناسبی جهت طراحی اطمینان‌بخش با شرایط بهینه‌ی اقتصادی برخوردار نیستند. محاسبه دقیق مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح هم در زمان طراحی و هم در موارد مقاوم‌سازی از مهمترین پارامترها می‌باشد. از طرفی مقایسه مقاومت برشی آزمایش‌های موجود و فرمول‌بندی ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ها اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. بنابراین مطالعات گسترده‌ای جهت یافتن فرمول‌بندی دقیق جهت برآورد مقاومت نهایی برشی تیرهای بتن مسلح نیاز است. ابزارها و روشهای متعددی برای یافتن و تخمین فرمول‌بندی و روابط بین پارامترهای تاثیرگذار وجود دارند ولی در دهه اخیر استفاده از روشهای هوشمند بسیار رواج پیدا کرده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یک روش بسیار مناسب و دقیق در برآورد فرمول‌بندی پارامترهای تاثیرگذار است. اخیراً استفاده از این روش در علم مهندسی عمران رواج بسیاری یافته است [۲۲-۹]. محاسبه و تخمین مقاومت برشی تیرهای بتنی در مرحله طراحی و مهمتر از آن جهت مقاوم سازی سازه‌های اجرا شده از اهمیت بسیاری برخوردار است. آیین‌نامه‌های موجود روشهای متفاوتی را برای برآورد مقاومت برشی پیشنهاد داده‌اند. در این تحقیق سعی شد با استفاده از روشهای محاسباتی هوشمند فرمول‌بندی دقیق تری نسبت به روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها ارائه شود. در این راستا بررسی گسترده‌ای جهت جمع‌آوری نمونه‌های آزمایشگاهی معتبر انجام شد. پس از مشخص نمودن کلیه پارامترهای تاثیرگذار، مدل شبکه عصبی مصنوعی به صورت یک روش قابل اطمینان برای شبیه‌سازی و تعیین مقاومت برشی نهایی تیرهای بتنی لاغر با مقطع مستطیل شکل، توسعه داده شده است. سرانجام یک رابطه تجربی با دقت مناسب برای تعیین مقاومت برشی نهایی تیرهای بتنی لاغر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بدست آمده است و در نهایت نتایج بدست آمده با آیین‌نامه‌های معتبر دنیا مقایسه شده است.

## ۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته می‌شوند که به صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند. در طبیعت، عملکرد شبکه‌های عصبی از طریق نحوه‌ی اتصال بین اجزا تعیین می‌شود. از شبکه‌های عصبی برای پیاده‌سازی توابع پیچیده در زمینه‌های مختلف از جمله تشخیص الگو، تشخیص هویت، طبقه‌بندی، پردازش صحبت و تصویر و سیستم‌های کنترلی استفاده می‌شود. پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه‌ی عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاسخ خاصی می‌شود. شبکه بر مبنای تطابق و همسنگی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا اینکه خروجی شبکه و خروجی مورد نظر (هدف) بر هم منطبق گردند. گونه‌های خاصی از شبکه‌های عصبی مثل هاپفیلد و شبکه‌های خطی به صورت مستقیم توسط طراح، طراحی می‌شوند. به طور خلاصه می‌توان گفت روش‌های مختلفی برای طراحی تکنیک‌های یادگیری موجود می‌باشد و کاربرد در انتخاب روش دارای انتخاب‌های زیادی می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی

رابطه‌ی دورادوری با نقطه‌ی مقابل طبیعی خود دارد. مغز انسان شامل بیش از ۱۰۱۱ نورون عصبی می‌باشد که از طریق حدود ۱۰۴ اتصال به ازای هر نورون به هم متصل شده‌اند. به طور کلی و متناسب با کاربرد مورد نظر ما می‌توان سه قسمت اصلی برای نورون‌ها در نظر گرفت: دندریت، بدنه‌ی سلول و آکسون. دندریت‌ها دریافت کننده‌های درخت شکل از جنس فیبرهای عصبی هستند که سیگنال‌های الکتریکی را به بدنه‌ی سلول منتقل می‌کنند. بدنه‌ی سلول این سیگنال‌ها را جمع کرده و یک حد استانه بر روی آنها اعمال می‌کند. در نهایت آکسون یک فیبر عصبی بلند است که این سیگنال‌ها را از بدنه‌ی سلول به نورون‌های دیگر منتقل می‌کند. به نقطه‌ی اتصال بین آکسون یک سلول عصبی با دندریت سلول عصبی دیگر سیناپس گفته می‌شود. نحوه‌ی چینش نورون‌ها و قدرت سیناپس‌ها که در واقع بنا کننده‌ی تابع شبکه‌ی عصبی می‌باشند با توجه به فرایندهای پیچیده‌ی شیمیایی معین می‌گردد [۹-۲۲]. یک شبکه عصبی مصنوعی شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها به صورت اعداد و ارقام در قالب یک یا چند متغیر می‌باشد. داده‌های ورودی پس از عملیات پردازش بر روی آن‌ها به یک یا چند متغیر خروجی تبدیل می‌شوند. ورودی‌ها نقش متغیرهای مستقل و خروجی‌ها نقش متغیرهای وابسته را در یک تابع عمل می‌کنند. مهم‌ترین جزء شبکه عصبی، نورون‌ها هستند، که به سه دسته نورون‌های ورودی، خروجی و میانی تقسیم می‌شوند. نورون‌های ورودی، لایه ورودی<sup>۱</sup>، نورون‌های خروجی، لایه خروجی<sup>۲</sup> و در نهایت نورون‌های میانی، لایه میانی یا پنهان<sup>۳</sup> را تشکیل می‌دهند. وظیفه نورون‌های ورودی دریافت داده‌های ورودی و انتقال آن‌ها به لایه میانی می‌باشد. نورون‌های لایه‌های میانی و خروجی علاوه بر دریافت و انتقال داده‌ها، وظیفه پردازش بر روی این داده‌ها را نیز بر عهده دارند. در این نورون‌ها عملیاتی جبری بر اطلاعات ورودی انجام و نتیجه آن‌ها به صورت یک ورودی جدید به واحدهای دیگر در لایه‌های بعدی ارسال می‌شود. تعداد نورون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی بستگی به تعداد متغیرهای مستقل و وابسته دارد. در حالی که تعداد نورون‌ها در لایه پنهان به صورت دلخواه تعیین می‌گردد. معمولاً با توجه به نوع مسئله تعداد نورون‌ها در لایه‌های میانی به صورت تجربی و با سعی و خطا تعیین می‌گردد، اما به صورت یک قاعده کلی تقریباً با افزایش تعداد نورون‌ها در لایه میانی دقت شبکه بالاتر می‌رود. هر نورون از دو عنصر کلیدی یعنی وزن<sup>۴</sup>  $w$  و تابع انتقال<sup>۵</sup>  $f$  تشکیل شده است. متغیرهای ورودی به شبکه هر کدام ارزش خاصی دارند. که به کمک وزن‌ها به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. این وزن‌ها که قبل از لایه خروجی و لایه پنهان لحاظ می‌شوند، در گام اول مقداری دلخواه به خود می‌گیرند و در نهایت برای استفاده در شبکه عصبی مصنوعی اصلاح می‌گردند. توابع انتقال نیز در نورون‌های لایه خروجی و لایه یا لایه‌های پنهان شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شوند؛ و با توجه به وزن‌های هر ورودی محاسبه کلی خروجی را امکان پذیر می‌سازند. فرآیند پردازش داده‌ها در یک نورون را می‌توان به صورت نمودار شکل ۱ نشان داد. این نمودار مجموعه‌ای از ورودی‌ها و واحد پردازش داده‌ها و خطوط جهت‌دار بین آن‌ها که هر داده را به واحد پردازش متصل می‌کند را نشان می‌دهد. هر اتصال نمایانگر وزن و ارزشی است که به هر داده ورودی اختصاص داده می‌شود. در واحد پردازش مقدار هر ورودی در مقدار وزن اختصاصی آن ضرب می‌شود و سپس مقدار عدد بایاس<sup>۶</sup> به آن اضافه می‌شود. البته توجه داشته باشید که این عملیات پردازش

*Input-layer*<sup>۱</sup>  
*Output-layer*<sup>۲</sup>  
*Hidden layer*<sup>۳</sup>  
*weight*<sup>۴</sup>  
*Transfer Function*<sup>۵</sup>  
*Bias*<sup>۶</sup>

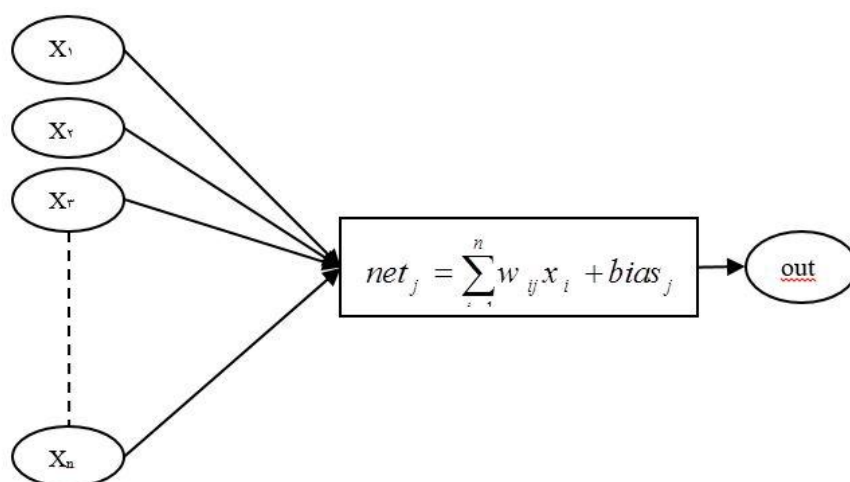
تنها در نورون‌های لایه خروجی و میانی انجام می‌گیرد و مربوط به نورون‌های لایه ورودی نمی‌شود. در نهایت نتیجه بدست آمده در تابع انتقال قرار می‌گیرد و خروجی تابع به عنوان خروجی نورون حساب می‌شود. بنابراین، این پردازش را می‌توان به صورت معادله زیر بیان کرد:

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + bias_j \quad (1)$$

در اینجا مقدار حساب شده برای نورون  $j$  ام برای قرار گرفتن در تابع انتقال می‌باشد،  $x_i$  مقدار داده  $i$  ام می‌باشد و  $w_{ij}$  مقدار وزن داده  $i$  ام است که به نورون  $j$  ام می‌رود. در نهایت خروجی نورون  $j$  ام از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$out_j = f(net_j) \quad (2)$$

که در این معادله  $out_j$  خروجی نورون  $j$  ام و  $f$  تابع انتقال می‌باشد.



شکل ۱: ساختمان یک نورون براساس ANN

داده‌های یادگیری و ارزیابی به منظور ساخت شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ایجاد شده‌اند. یک مطالعه‌ی عددی با هدف بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح لاغر انجام شده است و اثر خصوصیات هندسی مقطع عرضی و خصوصیات مصالح بر رفتار برشی ارزیابی و تشریح شده است. پس از آن یک مقایسه بین نتایج به دست آمده از آزمایشگاه و نتایج حاصل از آیین‌نامه‌های معتبر سازه‌های بتنی به انجام رسیده است. در نهایت رابطه‌ای براساس شبکه‌ی عصبی مصنوعی پیشنهاد شده است تا بتوان ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر را تعیین نمود.

### ۳- بررسی فرمول‌های پیشنهادی موجود

در این پژوهش از فرمول‌های پیشنهادی آیین‌نامه‌های مختلف استفاده شده است که برخی اصطلاحات تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت برشی از تیرهای بتن مسلح می‌باشند. عبارات پیشنهادی عمدتاً بر اساس سهمی از آرمتور عرضی و بتن توسعه یافته است.

۳-۱- فرمول پیشنهادی آیین‌نامه 318M-1999 (American Concrete Institute) ACI برای مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح

برای اعضای که در معرض برش و خمش قرار دارند، فرمول پیشنهادی توسط آیین‌نامه بتن آمریکا که برای محاسبه‌ی ظرفیت برشی بتن و آرماتور عرضی ارائه شده، عبارت است از:

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6}\right)b_w d \quad (3)$$

$$V_s = \frac{\sqrt{A_v f_y} d}{s} \quad (4)$$

$$V_r = V_c + V_s \quad (5)$$

در روابط فوق  $b_w$  و  $d$  به ترتیب عرض مقطع و عمق موثر از مقطع بر حسب میلیمتر،  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه عضو و  $f_y$  مقاومت تسلیم آرماتور برشی بر حسب مگاپاسکال هستند.  $A_v$  حداقل سطح آرماتور برشی بر حسب میلیمتر مربع،  $s$  فاصله بین خاموت‌ها بر حسب میلیمتر می‌باشند [۲۳].

۲-۳- فرمول پیشنهادی آیین‌نامه AS (Standards Australia) 3600-2001 برای مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح کد استاندارد بتن استرالیا برای محاسبه‌ی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح روابط زیر را پیشنهاد می‌دهد:

$$V_{uc} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot b_v \cdot d_o \left(\frac{A_{sv} f'_c}{b_v d_o}\right)^{1/3} \quad (6)$$

$$V_{us} = \left(A_{sv} f_y \frac{d_o}{s}\right) \cot \theta_v \quad (7)$$

$$V_u = V_{uc} + V_{us} \quad (8)$$

در حالیکه  $\beta_2$  مقداری ثابت و برابر یک در نظر گرفته شده و  $\beta_1$  و  $\beta_3$  از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\beta_1 = 1.1 \left(1.6 - \frac{d_o}{1000}\right) \geq 1.1 \quad (9)$$

$$\beta_3 = \frac{2d_o}{\alpha_v}$$

$\beta_1$ : ضریب تنش فشاری مجاز

$\beta_2$ : ضریب تنش کششی

$\beta_3$ : نسبت دهانه برش به عمق

$\alpha_v$ : فاصله از تکیه گاه تا محل اعمال نیروی برشی

در روابط فوق  $b_v$  و  $d_o$  به ترتیب عرض تیر و عمق موثر از مقطع بر حسب میلیمتر می‌باشند.  $A_{sv}$  سطح مقطع آرماتورهای طولی در منطقه تنش و به طور کامل در مقطع تحت نظر لنگر می‌باشد که با واحد میلیمتر مربع در نظر گرفته می‌شود.  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه عضو بر حسب مگاپاسکال است.  $A_{sv}$  حداقل سطح آرماتور برشی بر حسب میلیمتر مربع،  $f_y$  مقاومت تسلیم آرماتور برشی بر حسب مگاپاسکال،  $s$  فاصله بین خاموت‌ها بر حسب میلیمتر و  $\theta_v$  زاویه بین ناحیه فشرده سازی بتن و محور طولی از عضو می‌باشد [۲۴].

۳-۳- فرمول پیشنهادی مقررات ملی ساختمان مبحث نهم برای مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح

طبق آیین‌نامه بتن ایران مقاومت برشی برای اعضای بتن مسلح که تحت اثر برش و خمش قرار دارند براساس روابط زیر محاسبه شده است:

$$V_c = 0.2 \varphi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (10)$$

$$V_c = 0.2 \varphi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (11)$$

(۱۲)

$$V = V_c + V_s$$

در روابط فوق  $\varphi_c$  ضریب جزیی ایمنی بتن که برابر با ۰/۶۵ و  $\varphi_s$  ضریب جزیی ایمنی فولاد که معادل ۰/۸۵ می-باشد.  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه عضو برحسب مگاپاسکال،  $b_w$  و  $d$  به ترتیب عرض تیر و فاصله‌ی دورترین تار فشاری تا مرکز سطح آرماتور کششی طولی برحسب میلی‌متر می‌باشند همچنین  $A_{sv}$  سطح مقطع آرماتور برشی در محدوده‌ای به طول  $s$  برحسب میلی‌متر مربع،  $s$  فاصله بین سفره‌های آرماتور برشی یا پیچشی در امتداد موازی با آرماتور طولی برحسب میلی‌متر و  $f_{yv}$  مقاومت مشخصه‌ی فولادهای عرضی برحسب مگاپاسکال می‌باشند [۲۵].

۳-۴- فرمول پیشنهادی آیین‌نامه 23.3-2014 (Canadian Standards Association) CSA برای مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح

مقدار ظرفیت برشی پیشنهادی تیرهای بتن مسلح با آرماتور عرضی مطابق با آیین‌نامه کانادا طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_c = \varphi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v \quad (13)$$

$$V_s = \frac{\varphi_s A_v F_y d_v \cot \theta}{S} \quad (14)$$

در این روابط  $\varphi_c$  عامل مقاومت بتن،  $\lambda$  چگالی نرمال بتن که برابر با یک می‌باشد و  $\beta$  ضریب اختصاص مقاومت برشی بتن ترک خورده است.  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه عضو برحسب مگاپاسکال،  $b_w$  عرض تیر برحسب میلی‌متر و  $d_v$  عمق برشی موثر که به برابر با  $0.9d$  در نظر گرفته شده است.  $\varphi_s$  ضریب مقاومت آرماتور عرضی،  $A_{sv}$  سطح مقطع آرماتور برشی در فاصله‌ای به طول  $s$  برحسب میلی‌متر مربع،  $f_{yv}$  مقاومت تسلیم مشخص شده‌ی آرماتور برشی برحسب مگاپاسکال،  $s$  فاصله بین سفره‌های آرماتور برشی یا پیچشی در امتداد موازی با آرماتور طولی برحسب میلی‌متر و  $\theta$  زاویه انحراف از تنش فشاری مورب بر محور طولی از عضو می‌باشند. در نهایت مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح با آرماتور عرضی از مجموع دو رابطه‌ی بالا بدست آمده است [۲۶].

#### ۴- ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای بدست آوردن ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر

براساس مطالعه‌ی پارامترهای انجام شده، بردارهای ورودی و خروجی برای مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی به ترتیب شامل ۷ متغیر مستقل و ۱ متغیر وابسته به صورت زیر می‌باشند:

$$Input = \{b, d, a, F'_c, F_{yv}, \rho_l, \rho_v\} \quad (15)$$

$$Output = \{V\} \quad (16)$$

به  $f'_{yv}$  و  $f'_c$  به ترتیب عرض مقطع، عمق موثر از مقطع و دهانه‌ی برش برحسب میلی‌متر می‌باشند.  $a$  و  $d$  و  $b$  به ترتیب میزان آرماتور طولی و  $L$  ترتیب مقاومت فشاری تیر و مقاومت تسلیم آرماتور برشی بر حسب مگاپاسکال هستند و همچنین ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر بر حسب کیلونیوتن است. فرض بر این  $V$  میزان آرماتور عرضی را نشان می‌دهند. است که مقاومت تسلیم میلگردهای طولی و عرضی یکسان است. با توجه به اینکه اثر آرماتورهای طولی در مقاومت برشی مقطع بصورت پانچ است و از طرفی اثر مقاومت تسلیم در پانچ ناچیز است بنابراین اثر تنش تسلیم میلگردهای طولی در برآورد مقاومت برشی قابل صرف‌نظر کردن است.

داده‌ها قبل از این‌که به شبکه‌های عصبی مصنوعی معرفی گردند باید مقیاس‌بندی شوند. یعنی تمامی داده‌ها با استفاده از فرمول زیر استاندارد شده‌اند سپس وارد شبکه می‌شوند:

$$X_s = \frac{X - M}{S_d} \quad (17)$$

در فرمول بالا  $X$  متغیر ورودی و یا متغیر هدف است که باید به شبکه معرفی شود،  $M$  و  $S_d$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار دسته داده‌های مربوط به یک متغیر هستند. پارامترهای استفاده شده برای ارزیابی کارآمدی شبکه



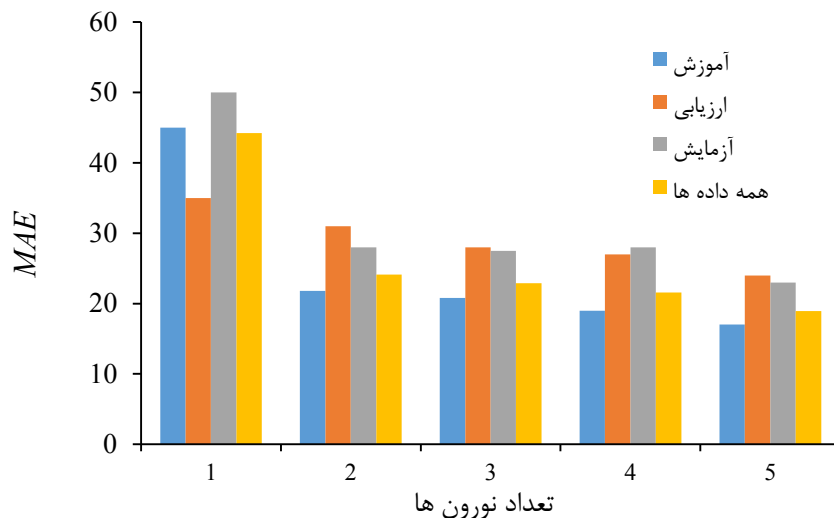
عصبی مصنوعی عبارتند از ضریب همبستگی ( $R$ )، میانگین مربع خطا ( $MSE$ )<sup>۱</sup> و میانگین خطای مطلق ( $MAE$ )<sup>۲</sup> که روابط آنها به صورت زیر است:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}} \quad (18)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad (19)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - t_i| \quad (20)$$

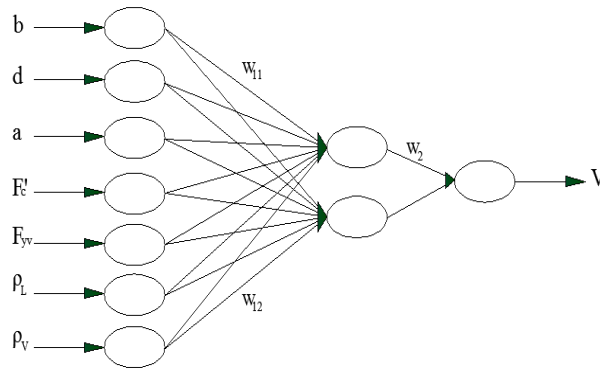
انتخاب تعداد نورون یکی از مهمترین قسمت‌ها برای بدست آوردن بهترین شبکه است به همین منظور ۵ شبکه با تعداد نورون ۱ تا ۵ مورد بررسی قرار گرفت و میانگین خطای مطلق در این شبکه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است بنابراین یک شبکه عصبی با وجود یک لایه پنهان با دو نورون در آن انتخاب شده است. از آنجایی که با افزایش تعداد نورون‌ها فرمول پیچیده‌تر و غیر کاربردی می‌شود، دو نورون بهترین انتخاب برای استفاده در شبکه است، زیرا که دارای دقت مناسب و نیز ساختاری مناسب می‌باشد. اگر تعداد لایه‌های پنهان کمتر باشد علاوه بر اینکه نیاز به تعداد کمتری داده جهت یادگیری شبکه است، فرمول استخراج شده نیز ساده تر می‌شود و استفاده از آن راحت‌تر است.



شکل ۲: مقایسه تعداد نورون و میانگین خطای مطلق

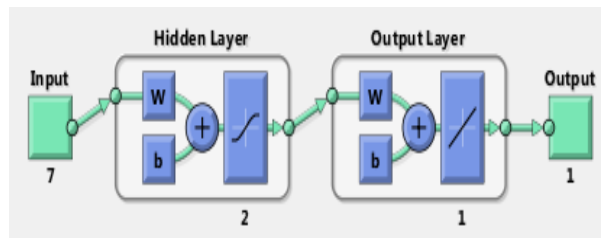
در شکل (۳) نمایی از شبکه عصبی ساخته شده نشان داده شده است که  $W_{12}$ ،  $W_{11}$  و  $W_2$  ماتریس وزن هستند [۲۷]

<sup>۱</sup>- MSE: Mean Squared Error  
<sup>۲</sup>- MAE: Mean Absolute Error



شکل ۳: ساختمان شبکه عصبی برای تعیین ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر

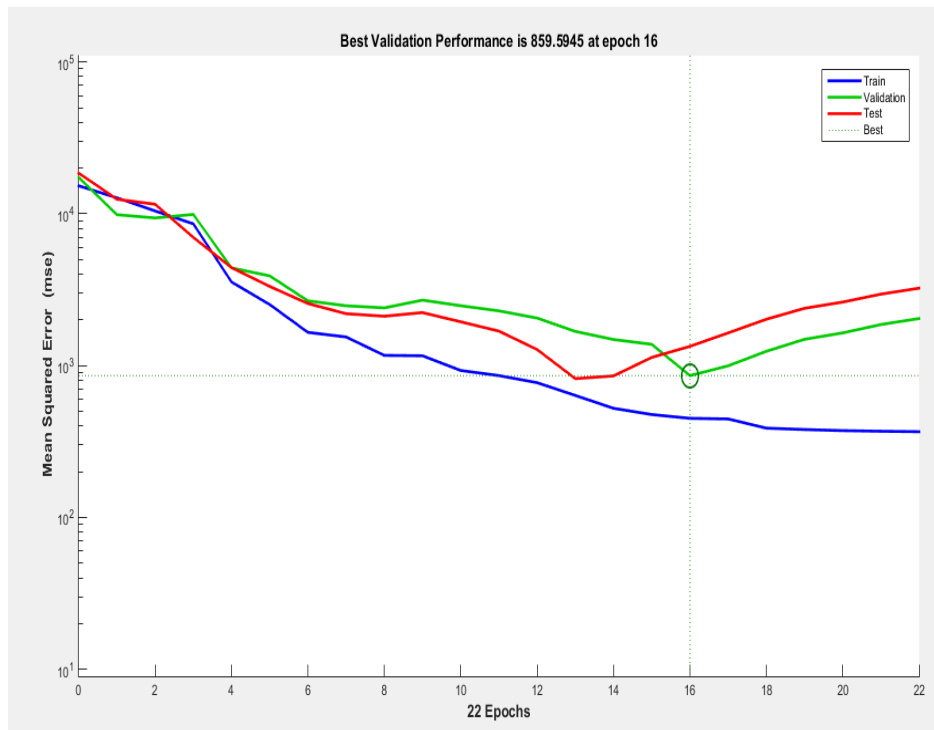
همچنین همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، شبکه عصبی ساخته شده دارای تابع انتقال تانژانت هایپربولیک در لایه پنهان و تابع همانی در لایه خروجی خود می‌باشد.



شکل ۴: معماری شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین ظرفیت برشی نهایی

در این مقاله الگوریتم پس‌انتشار<sup>۹</sup> با تابع یادگیری لونبرگ-مارکواریت<sup>۱۰</sup> به منظور یادگیری شبکه در نظر گرفته شده است. برای آنالیز، داده‌ها به سه گروه داده‌های آموزشی، ارزیابی و آزمایشی تقسیم شده‌اند. در این قسمت از مطالعه از ۱۲۱ داده برای پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی استفاده شده است که ۸۵ داده (۷۰ درصد) برای آموزش، ۱۸ داده (۱۵ درصد) برای ارزیابی و ۱۸ داده (۱۵ درصد) برای آزمایش در شبکه مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲-۲۳]. حداکثر تعداد تلاش<sup>۱۱</sup> در نظر گرفته شده ۱۰۰۰ می‌باشد، یعنی اگر تعداد تلاش‌های شبکه برای یادگیری قبل از رسیدن به خطای هدف به ۱۰۰۰ رسید، یادگیری شبکه متوقف خواهد شد. همان‌طور که مشخص است در تلاش ۲۲ یادگیری شبکه متوقف شده است و بهترین نتیجه مربوط به تلاش ۱۶ می‌باشد. این مهم در شکل (۵) نشان داده شده است. تابع کارایی در اینجا میانگین مجموع مربعات خطاها می‌باشد.

<sup>۹</sup>Backpropagation  
<sup>۱۰</sup>Levenberg-Marquardt  
<sup>۱۱</sup>Epoch



شکل ۵: تعیین موفق‌ترین تلاش با توجه به تابع کارایی

#### ۴-۱- ارائه فرمول مقاومت برشی نهایی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

مقاومت نهایی برشی ( $V$ ) برای تیرهای بتن مسلح لاغر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی براساس نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. به همین منظور برای محاسبه‌ی ظرفیت برشی نهایی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ماتریس وزن‌ها در لایه‌ها نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$W_{11} = [-0.50374 \quad 0.23125 \quad 0.378093 \quad -0.05695 \quad 0.009656 \quad 0.228421 \quad 0.049483 \quad 0.100005]$$

$$W_{12} = [-1.65410 \quad 0.020623 \quad 0.025426 \quad -0.11929 \quad -0.1997 \quad 0.833906 \quad -0.17151 \quad -0.80745]$$

$$W_2 = [0.108335 \quad 3.044968 \quad -1.45938]$$

در نهایت فرمول بدست آمده برای تخمین ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به صورت زیر آمده است.

$$V_{ANN} = 207.7647 + \left( 366.7557 \times \left( \left( \frac{2}{1+e^{(-2 \times \beta_1)}} \right) - 1 \right) \right) - \left( 175.7864 \times \left( \left( \frac{2}{1+e^{(-2 \times \beta_2)}} \right) - 1 \right) \right) \quad (21)$$

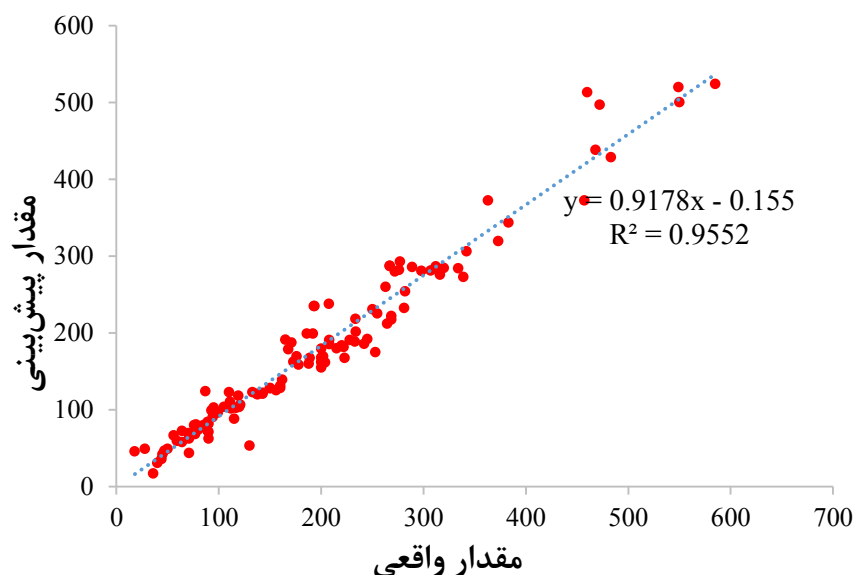
در حالیکه مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  که از محاسبات شبکه تعریف شده در شبکه‌های عصبی مصنوعی بدست آمده است طبق روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\beta_1 = 0.0032 \times b + 0.0015 \times d - 0.0001 \times a + 0.0009 \times F'_c + 0.0023 \times F_{yv} + 5.4812 \times \rho_l + 73.7981 \times \rho_v - 2.8455 \quad (22)$$

$$\beta_2 = 0.0003 \times b + 0.0001 \times d - 0.0001 \times a - 0.0193 \times F'_c + 0.0085 \times F_{yv} - 18.9985 \times \rho_l$$

$$-18.9985 \times \rho_1 - 595.852 \times \rho_v - 2.1747$$

برای سنجش دقت نتایج شبکه عصبی مصنوعی تحلیل رگرسیون انجام شده است. میزان توان دو ضریب همبستگی<sup>۱۲</sup> خروجی‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی ۰,۹۵۵۲ است که نشان دهنده‌ی دقت مناسب شبکه می‌باشد. آنالیز رگرسیون برای نشان دادن همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی انجام گرفته است. خصوصیات آن در شکل ۶ قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۱ مشخصات متغیرهای مورد استفاده در توسعه مدل برای یادگیری و صحت سنجی ANN آورده شده است.



شکل ۶: همبستگی نتایج آزمایشگاهی و ANN برای تعیین ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر

در جداول بالا  $a$  و  $b$  به ترتیب عرض مقطع، عمق مؤثر از مقطع و دهانه‌ی برش،  $F'_c$  مقاومت فشاری نمونه،  $F_{yv}$  مقاومت تسلیم آرماتور برشی،  $\rho_1$  میزان آرماتور طولی،  $\rho_v$  میزان آرماتور عرضی و  $V_{exp}$  مقاومت برشی آزمایشگاهی می‌باشند.

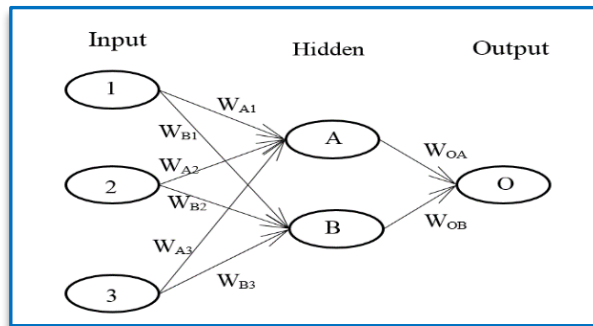
## ۵- بحث و بررسی نتایج

### ۵-۱- آنالیز حساسیت بر روی ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی

آنالیز حساسیت با استفاده از ابزار شبکه‌ی عصبی مصنوعی تشریح می‌شود به طوری که با اجرای تحلیل حساسیت در شبکه‌های آموزش دیده، می‌توان ورودی‌های مؤثر و غیرمؤثر را پیدا کرد. با تشخیص ورودی‌های نامرتب و حذف آن‌ها از مسئله، می‌توان هزینه و زمان گردآوری داده‌ها را کاهش داد و معمولاً عملکرد شبکه هم بهتر می‌شود. علاوه بر این آنالیز حساسیت می‌تواند بینشی را به روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه نماید. در این پژوهش، برای دستیابی به اهمیت نسبی مقادیر پیشگو (ورودی شبکه عصبی مصنوعی) از الگوریتم گارسون استفاده شده است [۲۷]. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، خلاصه‌ای از نحوه عملکرد الگوریتم گارسون با سه نرون ورودی (۱، ۲ و ۳). دو نرون پنهان (A) و (B) و یک نرون خروجی (O) به شرح زیر بیان می‌شوند:

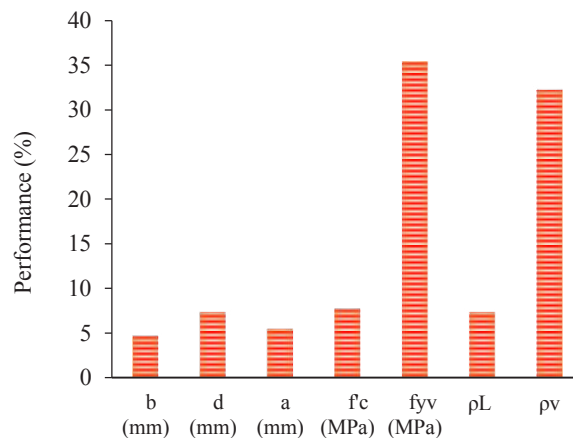
<sup>۱۲</sup> Coefficient of determination

- ۱- مشارکت هر نورون ورودی در خروجی از طریق هر نورون پنهان محاسبه شده به عنوان محصول اتصالات ورودی-پنهان و خروجی-پنهان (به عنوان مثال،  $C_{A1} = W_{A1} W_{OA}$ )
- ۲- سهم نسبی هر نورون در سیگنال خروجی هر نورون پنهان (به عنوان مثال  $|C_{A1}| / |C_{A1} + C_{A2} + C_{A3}|$ )
- ۳- جمع سهم نورون ورودی (به عنوان مثال  $S_f = r_{A1} + r_{B1}$ )
- ۴- اهمیت نسبی (RI) هر متغیر ورودی (به عنوان مثال  $R_{I1} = S_1 / (S_1 + S_2 + S_3)$ )



شکل ۷: تعیین اهمیت نسبی هر متغیر ورودی با استفاده از الگوریتم گارسون

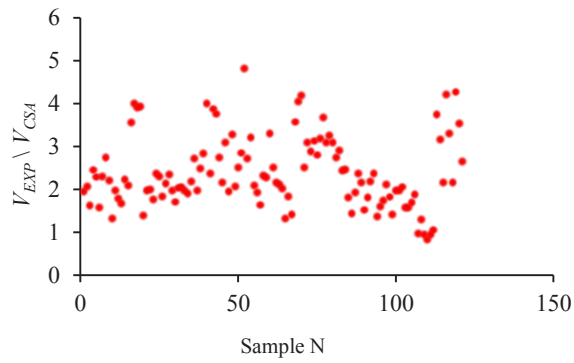
نتایج عملکرد (performance) هر ورودی بصورتی درصد در شکل ۸ نشان داده شده است.



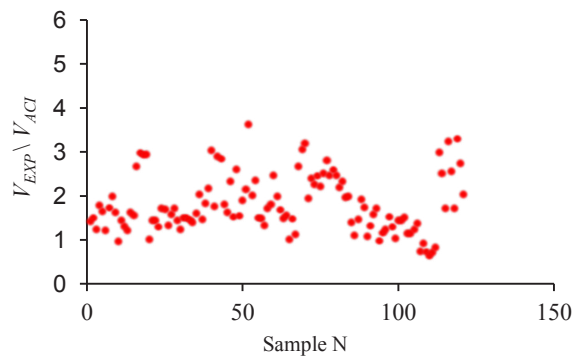
شکل ۸: نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم گارسون بر روی ورودی‌ها

با توجه به آنالیز حساسیت در تیرهای بتن مسلح لاغر، مقاومت تسلیم آرماتور عرضی و میزان آرماتور برشی بیشترین تأثیر را بر بروی مقاومت برشی نهایی ( $V_{ANN}$ ) دارند.

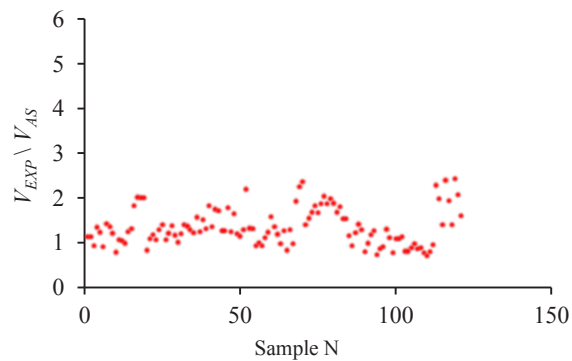
۵-۲- مقایسه‌ی نتایج مربوط به تیرهای بتن مسلح لاغر با آیین‌نامه‌های معتبر دنیا آیین‌نامه‌های کانادا (CSA23.3-2014)، آمریکا (ACI 318M-1999)، استرالیا (AS 3600-2001) و آبا (۱۳۹۲) روابطی را برای محاسبه مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح ارائه دادند. در شکل‌های ۹ الی ۱۳ مقایسه‌ای بین مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر بدست آمده از آزمایشگاه با آیین‌نامه‌های آمریکا، کانادا، استرالیا، آبا و مدل  $ANN$  بدست آمده نشان داده شده است.



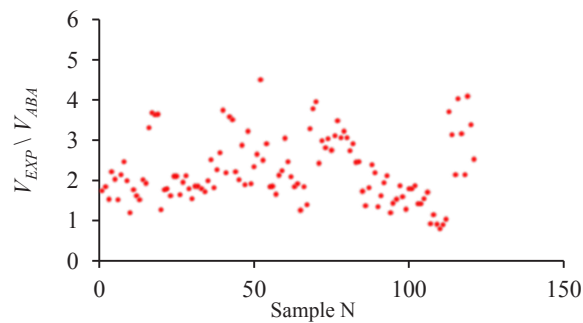
شکل ۹: نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی CSA



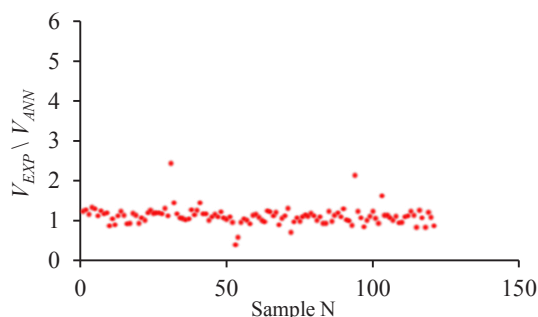
شکل ۱۰: مقایسه‌ی مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی ACI



شکل ۱۱: نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی پیش‌بینی شده آیین‌نامه AS



شکل ۱۲: نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی ABA



شکل ۱۳: نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به مقاومت برشی ANN

شایان ذکر است نتایج مندرج در اشکال بالا برای تمام نمونه ها می باشد. نتایج حاصل مربوط به فرمول استخراج شده است و واضح است در صورت مقایسه با نتایج کد موجود دقت بسیار بیشتری خواهند داشت. همانطور که بیان شد ۷۰ درصد از نمونهها برای عملیات آموزش استفاده شده است که بعد از آن ۱۵ درصد برای ارزیابی و شبکه آماده شده در این مقطع با ۱۵ درصد باقیمانده بصورت مستقل آزمایش می شود. همانطور که از جدول ۲ مشخص است در مرحله آزمایش که مقایسه مدل با داده های مستقل ۰.۹۷۴۵ است که نسبت به سایر فرمولبندی ها دقت بهتری دارد. بنابراین صحت سنجی مدل با ۱۵ درصد نمونه ها انجام شده است. در جدول (۲) مقایسه عملکرد آیین نامه های آمریکا، کانادا، استرالیا، آبا و مدل ANN برای پیش بینی مقاومت برشی نهایی نشان داده شده است.

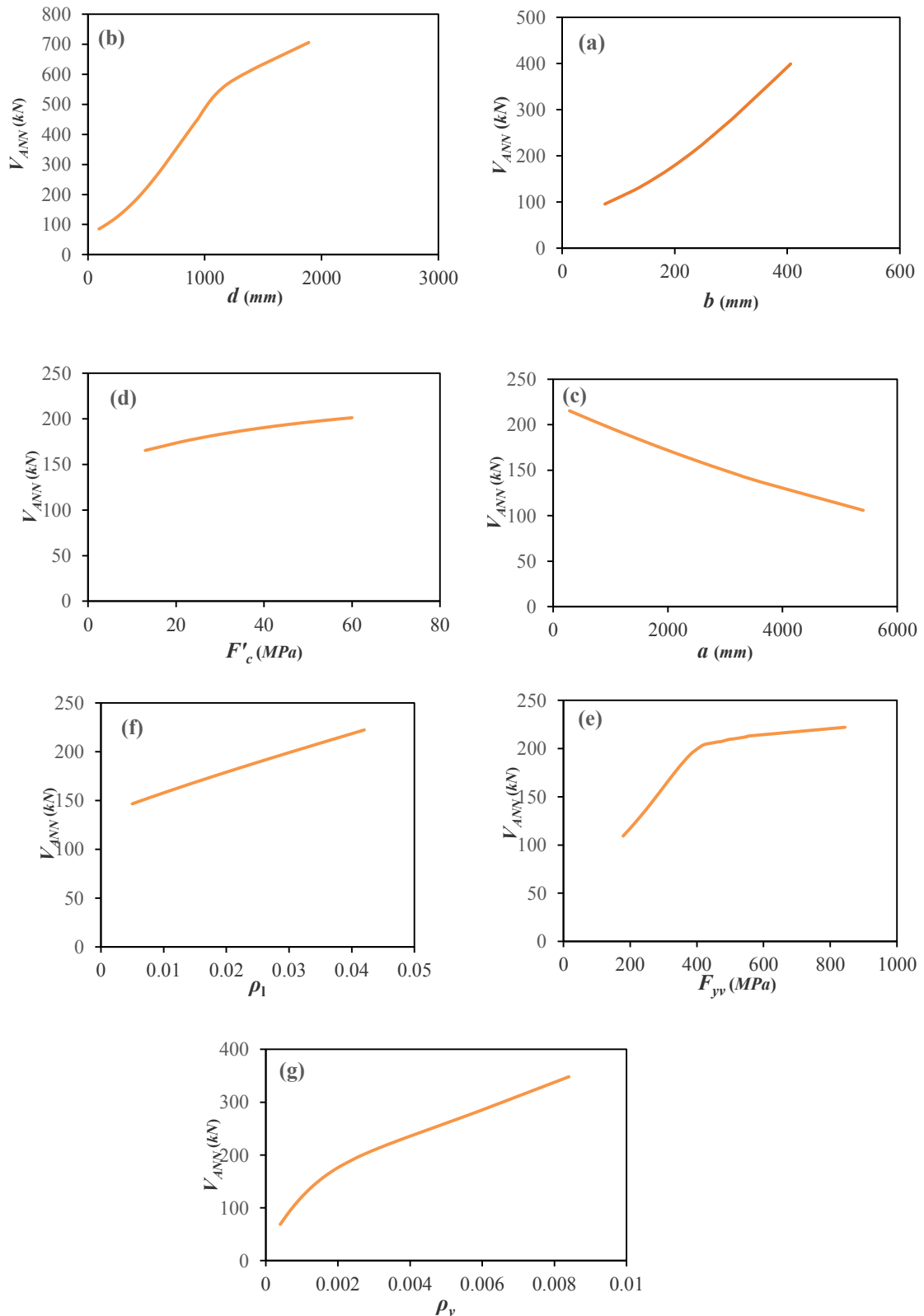
جدول ۱: مقایسه عملکرد مدل ها برای پیش بینی مقاومت برشی نهایی

فرمول های پیشنهادی	Training			Validation			Test		
	R	MSE	MAE	R	MSE	MAE	R	MSE	MAE
ANN	0.9807	739.9852	21.8708	0.9747	$1.4642 \times 10^3$	30.9814	0.9745	$1.2748 \times 10^3$	28.0939
ACI	0.7755	$1.0488 \times 10^4$	77.9342	0.7587	$1.8602 \times 10^4$	102.2651	0.7451	$1.3847 \times 10^4$	93.1062
CSA	0.7816	$1.3716 \times 10^4$	95.9973	0.7783	$2.5655 \times 10^4$	128.5635	0.7455	$2.0811 \times 10^4$	111.7665
AS	0.8313	$5.8253 \times 10^3$	52.4538	0.8040	$1.1326 \times 10^4$	69.9990	0.8536	$7.3067 \times 10^3$	66.4686
ABA	0.7748	$1.2885 \times 10^4$	91.6444	0.7564	$2.4169 \times 10^4$	123.0255	0.7450	$1.9180 \times 10^4$	108.1753

همان طور که در جدول بالا مشخص است مدل های پیش بینی شده تخمین دقیقی از ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر ندارند. به همین دلیل نیاز به رابطه ای دقیق تر برای بدست آوردن ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر می باشد که در بخش ۳-۱ با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی این رابطه ارائه شده است.

### ۳-۵- آنالیز پارامتری

برای ارزیابی بیشتر فرمول ارائه شده توسط شبکه های عصبی مصنوعی یک آنالیز پارامتری انجام شده است، به این شکل که برای سنجش تاثیر هر یک از پارامترها بر روی مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر، در فرمول ارائه شده بقیه پارامترها به صورت میانگین تأثیر داده شده اند. در شکل (۱۲) میزان تغییر  $V_{ANN}$  نسبت به تاثیر هر یک از پارامترهای  $\rho_v$ ,  $\rho_l$ ,  $F_{yv}$ ,  $F'_c$ ,  $a$ ,  $d$ ,  $b$  نمایش داده شده است. همچنین در جدول ۲ توصیف اماراتی متغیرهای استفاده شده برای مدل پیشنهادی آورده شده است.



شکل ۱۲: آنالیز پارامتری براساس مدل ارائه شده توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بدست آوردن ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر.



جدول ۲: توصیف اماری متغیرهای استفاده شده برای مدل پیشنهادی آورده

نمونه‌ها	$b$	$d$	$a$	$F'_c$	$F_{yv}$	$\rho_l$	$\rho_v$	$V$
میانگین	206.94	419.20	1431.55	33.204	358.23	0.0232	.0022	195
انحراف معیار	71.46	257.92	802.98	10.36	97.93	0.009	0.001	120.45
واریانس	5107	66527	644777	107.35	9591	0.00	0.00	14509
حداقل	76.00	95.00	285.00	13.00	179.00	0.01	0.00	18
حداکثر	406.00	1890.0	5405.40	60.00	844.00	0.04	0.01	585

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است با توجه به آنالیز پارامتری برای تیرهای بتن مسلح لاغر به‌طور کلی اکثر ورودی‌ها در شبکه‌های عصبی مصنوعی تأثیر مثبتی دارند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک ارزیابی مفصل را در مورد ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر ارائه می‌دهد. تیر بتنی مسلح زمانی که تحت اثر بار قرار می‌گیرد به علت وجود فولاد در ناحیه ی کششی پس از ایجاد اولین ترک، فولاد وارد عمل شده است و در مقابل کشش مقاومت می‌کند تا زمانی که ترک‌های بیشتری در این ناحیه به‌وجود آید و باعث گسیختگی در تیر گردد. تنش کششی در تیر فقط محدود به تنش خمشی نیست در نتیجه برش خالص و یا ترکیب برش و خمش در نقاط مختلف تیر به وجود می‌آید. جایی که ممان خمشی ناچیز و نیروی برشی زیاد باشد به علت وجود نیروی برشی زیاد در حوالی تار خنثی ترک‌های برشی تشکیل می‌شوند و گسترش می‌یابند. این ترک‌ها بیشتر در محل تکیه‌گاه‌های ساده به‌وجود می‌آیند. به‌طور کلی در سال‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای در رابطه با مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح لاغر انجام گرفته است و حال آن که با وجود این مطالعات گسترده بسیاری از موارد، روابط و فرمول‌های آیین‌نامه‌ای از دقت مناسبی جهت طراحی اطمینان‌بخش با شرایط بهینه‌ی اقتصادی برخوردار نیستند. با توجه به اهمیت موضوع، انجام تحقیقات بیشتر، جهت بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح لاغر بسیار مهم می‌باشد. به همین منظور در این تحقیق شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تعیین ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر به کار گرفته شده‌اند؛ همچنین برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی از داده‌های بدست آمده از آزمایشگاه استفاده شده است. نهایتاً یک فرمول نسبتاً دقیق برای تعیین مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر با به کار گرفتن شبکه عصبی مصنوعی توسعه داده شده است. فرمول جدید می‌تواند برای ارزیابی مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح لاغر توسط مهندسين استفاده شود.

#### مراجع

- [۱] مرتضایی، ع. و خیرالدین، ع. "مدل‌سازی و تخمین طول مفصل پلاستیک ستونهای بتن‌آرمه به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی"، نشریه علمی-پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی (دانشگاه سمنان)، سال ۱۰، شماره ۲۹، تابستان ۱۳۹۱، صفحه ۱-۱۷.
- [۲] شریفی، ی.، محمدی، ن. و مقبلی، ع. "ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتنی مسلح با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی". مصالح و سازه‌های بتنی، دوره ۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۳۰-۴۳.
- [۳] شریفی، ی.، محمدی، ن. و مقبلی، ع. "ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتنی مسلح با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی". مصالح و سازه‌های بتنی، دوره ۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۷۷-۸۸.
- [4] Russo, G., Mitri, D., & Pauletta, M. (2013). *Shear strength design formula for RC beams with stirrups. Engineering Structures, 51, 226-235.*
- [5] Gaetano R., Denis M., and Margherita P. "Shear strength design formula for RC beams with stirrups." *Engineering Structures 51 (2013): 226-235.*
- [6] Yoshida Y. *Shear reinforcement for large lightly reinforced concrete members. Master's thesis. Department of Civil Engineering, University of Toronto; 2000. p. 150.*

- [7] Karayannis CG, Chalioris CE, Mavroeidis PD. Shear capacity of RC rectangular beams with continuous spiral transversal reinforcement. *WIT Trans Model*.
- [8] Cao, S. Size effect and the influence of longitudinal reinforcement on the shear response of large reinforced concrete members (Master's thesis). Department of Civil Engineering, University of Toronto; 2001.
- [9] Tohidi, S. and Sharifi Y. (2015). Empirical modeling of distortional buckling strength of half-through bridge girders via stepwise regression method. *Advances in Structural Engineering*, 18(9), 1383-1397.
- [10] Tohidi, S. and Sharifi, Y. (201). Neural networks for inelastic distortional buckling capacity assessment of steel I-beams, *Thin-Walled Structures*, 94(9), 359-371.
- [11] Tohidi, S. and Sharifi, Y. (2014). Inelastic lateral-torsional buckling capacity of corroded web opening steel beams using artificial neural networks, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 8(1), 24-40.
- [12] Sharifi, Y. and Tohidi, S. (2014). Lateral-torsional buckling capacity assessment of web opening steel girders by artificial neural networks—elastic investigation, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 8(2), 167–177.
- [13] Sharifi Y, Tohidi S. (2014). Ultimate Capacity Assessment of Web Plate Beams with Pitting Corrosion Subjected to Patch Loading by Artificial Neural Networks. *Advanced Steel Construction* 10(3), 325-350.
- [14] Tohidi, S. and Sharifi, Y. (2014). A new predictive model for restrained distortional buckling strength of half-through bridge girders using artificial neural network, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(3), 325–350.
- [15] Tohidi, S. and Sharifi, Y. (2014). Load-carrying capacity of locally corroded steel plate girder ends using artificial neural network, *Thin-Walled Structures*, 100(1), 48–61.
- [16] Sharifi Y., Hosseinpour M., Moghbeli A., Sharifi H. (2019). Lateral Torsional Buckling Capacity Assessment of Castellated Steel Beams Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Steel Structures*, 19(5):1408–1420.
- [17] Sharifi Y., Moghbeli A., Hosseinpour M., Sharifi H. (2019). Study of Neural Network Models for the Ultimate Capacities of Cellular Steel Beams. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00281-z>.
- [18] Sharifi Y., Moghbeli A., Hosseinpour M., Sharifi H. (2019). Neural networks for lateral torsional buckling strength assessment of cellular steel I-beams. *Advances in Structural Engineering* 22 (9), 2192-2202.
- [19] Sharifi Y., Moghbeli A. (2019). Stepwise Regression for shear capacity assessment of steel fiber reinforced concrete beams. *J Rehabil Civ Eng* 7 (2), 1-14
- [20] Hosseinpour M., Sharifi H., Sharifi Y. (2019). Stepwise regression modeling for compressive strength assessment of mortar containing metakaolin. *International Journal of Modelling and Simulation* 38 (4), 207-215.
- [21] Sharifi Y., Hosseinpour M. (2019). Adaptive neuro-fuzzy inference system and stepwise regression for compressive strength assessment of concrete containing metakaolin. *Iran University of Science & Technology* 9 (2), 251-272.
- [22] Sharifi Y., Lotfi F., Moghbeli A. (2019). Compressive strength prediction by ANN formulation approach for FRP confined rectangular concrete columns. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 7 (3), 182-203.
- [23] Code, S.B., (2005). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (ACI 318RM-02)*.
- [24] Australian Standard, A.S., (2001). *AS 3600 2001: Concrete Structures*. Standards Association of Australia, p.176.
- [25] National Building Regulations (1392); Topic 9: Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings.
- [26] Canadian Standards, (2014). *CSA, Design of Concrete Structures A23.3-14*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- [27] Garson, G. D. *Interpreting neural-network connection weights*, *AI Expert*, 1991, Vol. 6, pp. 47–51.