

پیش بینی طول مفصل پلاستیک پایه های پل های بتن آرمه با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی

علی خلیلی

کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مسعود احمدی

دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی عمران

ابراهیم امامی *

مربی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور

علی خیرالدین

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده

باتوجه به اهمیت پل ها به عنوان شریان های حیاتی و لزوم خدمت رسانی آن ها بعد از وقوع زلزله، طراحی مناسب این دست سازه ها امری مهم می باشد. در همین راستا یک گام مهم برای پیش بینی عملکرد این نوع سیستم های سازه ای تحت شرایط مختلف بارگذاری، تعیین محل پاسخ غیر ارتجاعی می باشد. در پایه پل ها، این تغییر شکل های غیر ارتجاعی عمدتاً در طولی محدود به نام مفصل پلاستیک رخ می دهند. یک مدل مناسب برای رفتار مفصلی در پایه پل های بتن آرمه کمک شایانی به جزییات بندی و تخمین تغییر شکل های نسبی برای طراحی بر اساس عملکرد، خواهد کرد. در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایشاتی که بر روی پایه پل های بتن آرمه صورت گرفته است و همچنین با بهره گیری از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی به پیش بینی طول مفصل پلاستیک در پایه پل های بتن آرمه پرداخته شده است. نتایج نشان دهنده صحت بالای الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی در پیش بینی این پارامتر نسبت به سایر روابط ارائه شده با توجه به درصد خطا محاسبه شده، می باشد.

واژه های کلیدی: طول مفصل پلاستیک، پایه های پل های بتن آرمه، الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی، شریان های حیاتی.

* نویسنده مسؤول: ebrahim_emami87@yahoo.com

۱- مقدمه

معدودی از این آزمایشات شامل پایه پل و بارگذاری دینامیکی می‌باشند. نتایج نشان می‌دهند روابطی که برای تخمین طول مفصل پلاستیک ارائه شده‌است، یا بر پایه حداکثر جا به جایی نسبی در بالای ستون بوده و یا بر پایه گسترش حالت خمیری در ناحیه مفصلی بدست آمده‌اند.

مفصل پلاستیک در مقاطعی رخ می‌دهد که آن مقطع، دارای لنگر خمشی فراتر از مقدار لنگر خمشی اسمی معادل جاری شدن مقطع باشند. طول مفصل پلاستیک را می‌توان بر پایه جمع توزیع انحناء برای اعضای معمولی حساب کرد. همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است به منظور ساده سازی محاسبات، یک طول معادل مفصل پلاستیک^۳ "L_p" بر حسب انحناء خمیری^۴، ϕ_p ، که برابرست با $\phi_M - \phi_y$ ، که در آن ϕ_M انحناء حداکثر و ϕ_y انحناء تسلیم می‌باشد، تعریف می‌شود.

دوران خمیری متمرکز^۵، θ_p ، در امتداد طول مفصل پلاستیک با استفاده از رابطه^۱ محاسبه می‌شود:

$$\theta_p = \phi_p L_p = (\phi_M - \phi_y) \cdot L_p \quad (1)$$

طبق رابطه (۱)، دوران خمیری را می‌توان برای تشخیص ظرفیت تغییر مکانی مقطعی که تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی را تجربه می‌کند مورد استفاده قرار داد. اگر فرض شود که دوران پلاستیک در وسط ارتفاع مفصل پلاستیک متمرکز شده است، تغییر مکان خمیری در بالای ستون طره مطابق رابطه ۲، تعریف می‌شود:

$$\Delta_p = \theta_p (L - 0.5 L_p) = (\phi_M - \phi_y) L_p \cdot (L - 0.5 L_p) \quad (2)$$

۲- مدل‌های ارائه شده جهت پیش‌بینی طول مفصل پلاستیک در پایه پل‌های بتن مسلح

مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین طول مفصل پلاستیک در مورد ستون‌های بتن مسلح صورت پذیرفته است که منجر به ارایه روابطی نیز در رابطه با طول مفصل پلاستیک شده است که می‌توان به روابط ارائه شده توسط پارک و دیگران^[۲] ۱۹۸۲، دود و کوک^[۳] ۲۰۰۰، هاچم و دیگران^[۴] ۲۰۰۳، بای^[۵] ۲۰۰۵،

باتوجه به آنکه درجه نامعینی پل‌ها به نسبت ساختمان‌ها بسیار کمتر می‌باشد شکست یک ستون می‌تواند باعث خرابی کل سیستم سازه گردد باتوجه به آنکه پل به عنوان یک شریان حیاتی در صنعت حمل و نقل مطرح می‌باشد فراهم آوردن امنیت لرزه‌ای کافی برای آن از درجه اهمیت بالایی برخوردار است و همچنین پایداری و قابلیت بهره برداری از آنها پس از رخ دادن زلزله از اهمیتی حیاتی برخوردار است. بعد از آسیب‌های گسترده پل‌ها در زلزله‌های گذشته جهان، توجه بروی طراحی مناسب با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر آنها متمرکز شده است.

یکی از این پارامترها طول مفصل پلاستیک^۱ در پایه پل‌های بتن مسلح می‌باشد. محل تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی در پایه پل‌های بتن آرمه به جهت شبیه سازی پاسخ غیر خطی و تخمین ظرفیت جا به جایی نهایی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ستون‌های پل این تغییر شکل‌ها عموماً در یک طول محدود پلاستیک رخ می‌دهد. مدل رفتار مفصلی در ستون‌های پل بتن مسلح، به جهت جزئیات بندی و تخمین جابه‌جایی نسبی برای طراحی براساس عملکرد کمک شایانی خواهد کرد. همچنین ناحیه مفصل پلاستیک^۲ مشخص کننده ناحیه‌ای می‌باشد که آسیب در آنجا متمرکز شده است بنابراین پیش‌بینی یک طول مفصل پلاستیک به جهت برآورد طولی از پایه پل که نیاز دارد در آن ناحیه به خوبی محصور شود امری حیاتی و مهم برای عملکرد درست سیستم سازه‌ای در ناحیه غیر خطی بوده و فراهم آورنده امنیت لرزه‌ای کافی می‌باشد. البته بایستی خاطر نشان کرد که طول مفصل پلاستیک بایستی به عنوان ناحیه مورد نیاز جهت محصور شدگی ستون در نظر گرفته شود، چون حداقل ابعاد تئوری آن را مشخص می‌کند.

بسیاری از آزمایش‌هایی که در گذشته برای تعیین طول مفصل پلاستیک در ستون‌های بتن آرمه انجام شده است، شامل اجزاء کوچک مقیاس و تحت بارگذاری استاتیکی بوده است. تعداد

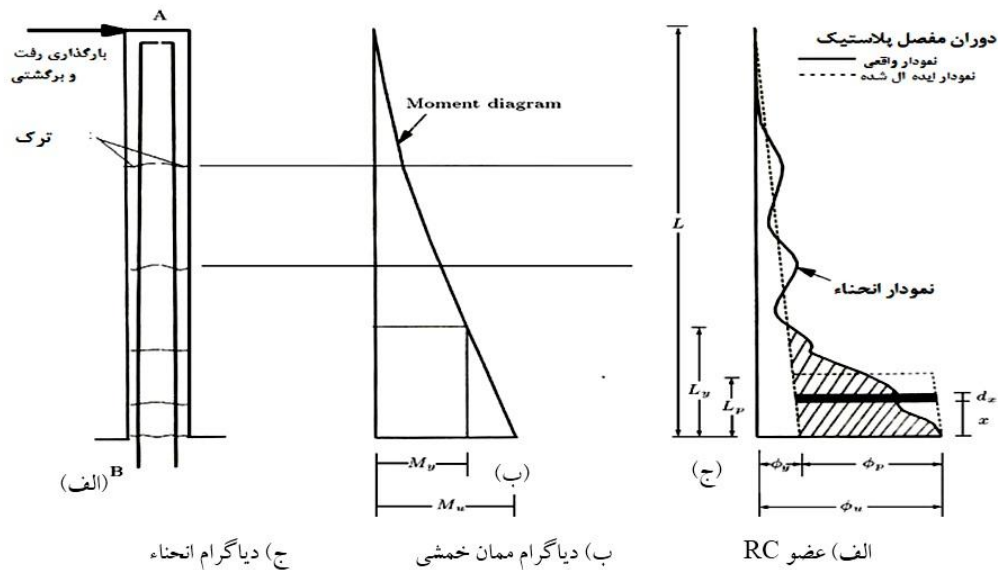
¹ Plastic hinge length

² Plastic hinge

³ Equivalent plastic hinge length

⁴ Plastic Curvature

⁵ Concentrated Plastic Rotation



شکل ۱- رابطه انحناء و تغییر شکل برای یک ستون بتن مسلح [۱]

از ضعف روابط ارایه شده می توان به محدود بودن آن ها به نتایج یک سری آزمایشات مشخص اشاره کرد که قابلیت تعمیم این روابط را برای سایر نمونه های موجود کم کرده است. در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایش ۴۱ عدد نمونه پایه پل که در برگیرنده حوزه وسیعی از پارامترها می باشد (مقاومت مصالح، درصد آرماتور طولی، نسبت اضلاع، نسبت نیروی محوری به ظرفیت محوری عضو، قطر آرماتور طولی و سایر پارامترها) و در آزمایشات گذشته مورد آزمایش قرار گرفته اند، به ارائه یک الگوی پیش بینی طول مفصل پلاستیک پایه پل های بتن آرمه با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی^۱ پرداخته می شود.

در جدول ۱ روابط مهم با ذکر عوامل تاثیر گذار که مد نظر محققین بوده است، ارایه شده است. تمام ۴۱ مورد، از آزمایشاتی که مشخصات پایه پل های مدرن را داشتند انتخاب شدند. آزمایشاتی که جزء این ۴۱ نمونه انتخاب شدند شامل محدودیت های زیر در طراحی بودند:

- اثر نیروی محوری
- نسبت اضلاع اعضاء
- نفوذ تسلیم آرماتور طولی در زائده انتهایی
- گسترش ترک های برشی - خمشی

رستریو و دیگران ۲۰۰۶ [۶]، بری و دیگران ۲۰۰۸ [۷] و المدار ۲۰۱۲ [۸] اشاره نمود. همچنین در سال ۲۰۱۳ همتی و همکاران [۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی تیرهای بتن مسلح با مصالح HPRC و پرداختن و یک رابطه پیشنهادی جهت تعیین طول مفصل پلاستیک تیرهای بتن مسلح HPRC ارائه دادند. جدول ۱ شامل مهم ترین روابطی می باشد که تا کنون برای پیش بینی طول مفصل پلاستیک اعضا بتن آرمه ارایه شده است. با بررسی مطالعات صورت گرفته در گذشته، می توان پارامترهای مؤثر بر طول مفصل پلاستیک که در روابط محققین گذشته مد نظر قرار گرفته است را به چهار دسته کلی تقسیم بندی کرد:

- اثر نیروی محوری
- نسبت اضلاع اعضاء
- نفوذ تسلیم آرماتور طولی در زائده انتهایی
- گسترش ترک های برشی - خمشی

که یا به صورت مستقیم و یا به صورت غیر مستقیم، مورد استفاده قرار گرفته اند. اثراتی همچون نیروی محوری، نسبت اضلاع اعضاء، که به صورت مستقیم و نفوذ تسلیم آرماتور طولی در زائده انتهایی و گسترش ترک های برشی - خمشی به صورت غیر مستقیم، و با لحاظ کردن پارامترهایی همچون مقاومت مصالح بکاربرده شده، درصد آرماتور طولی، قطر میلگردهای طولی، در رابطه های ارایه شده لحاظ شده اند.

- نیروی محوری موجود در ستون کمتر یا مساوی ۰/۳ ظرفیت محوری ستون باشد یا به عبارتی:

$$\frac{P}{f'_c Ag} \leq 0.3 \quad (3)$$

- نسبت آرماتور طولی ستون کمتر از ۳ (سه) درصد باشد.
- مقاومت فشاری بتن کمتر یا مساوی ۶۸ مگاپاسکال باشد.

¹Artificial neural Networks algorithm

جدول ۱- روابط ارائه شده توسط محققین مختلف

ردیف	نام محقق [مرجع]	روابط	توضیحات
۱	(Park, Priestley and Gill, 1982) [۲]	(۴) $L_p = 0.4h$	اثر نیروی محوری
۲	(Mander, 1983) [۱۰]	(۵) $L_p = L_{py} + 0.06L$ $L_{py} = 6.35 \sqrt{d_b}$	نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی
۳	(Park, Priestley, 1987) [۱۱]	(۶) $L_p = 0.08L + 0.88d_b$	نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی
۴	(Paulay, Priestley, 1992) [۱۲]	(۷) $L_p = 0.08L + 0.022d_b f_y$	نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی
۵	(Watson, Park, 1994) [۱۳]	(۸) $\frac{L_p}{h} = 1 + 0.4 \frac{P}{\phi_c f'_c A_g}$	اثر نیروی محوری
۶	(Bae, 2005) [۵]	(۹) $\frac{L_p}{h} = \left[0.3 \left(\frac{P}{P_0} \right) + 3 \left(\frac{A_s}{A_g} \right) - 0.1 \right] \left(\frac{L}{h} \right) + 0.25 \geq 0.25$	اثر نیروی محوری و نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی
۷	(Restrepo et al, 2006) [۶]	(۱۰) $L_p = \alpha H + \beta f_{ye} d_{be} \leq \beta f_{ye} d_{ol}$ $\alpha = 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{S_{He} - \left(\frac{M}{M_y} \phi_y' \right) H^2 / 3}{\phi_p H^2}}$ $\beta = \frac{\theta_p}{\phi f_{ye} d_{bl}}$	نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی
۸	(Berry, Lehman and Lowes, 2008) [۷]	(۱۱) $L_p = 0.05L + 0.1 \frac{f_y d_b}{\sqrt{f'_c}}$	نفوذ تسلیم آرماتور طولی و گسترش برشی و نسبت اضلاع ستون
۹	(Firat Alemdar, 2012) [۸]	(۱۲) $\frac{L_p}{d} = \frac{1}{4} + \frac{3f_y d_b}{10000\sqrt{f'_c}} + \frac{L}{25000}$	استفاده از داده‌های قبلی و روش تحلیل رگرسیون خطی چند متغیری

۳- شبکه عصبی مصنوعی

ها، قوانینی کلی را استخراج کرده و یاد گرفته‌اند [۱۴]. شبکه‌های عصبی مصنوعی با ایده گرفتن از رفتار شبکه عصبی بیولوژیکی شکل یافته است. مطابق شکل ۲، در این شبکه‌ها نیز عموماً لایه‌های موازی نورون‌ها را می‌بینیم که نورون‌های هر لایه نقش خاصی را ایفا می‌کنند. معمولاً ورودی‌هایی که از خارج به شبکه عصبی داده می‌شوند، به دسته‌ای از نورون‌ها که در یک لایه مرتب شده‌اند، اعمال می‌شود. این ورودی‌ها با وزن‌های خاص جمع شده به تابع تحریک هر نورون فرستاده می‌شوند که این اقدام به پردازش جمع وزن دار ورودی‌های اعمال شده به نورون می‌کند و خروجی نورون را به لایه‌های بعدی و در نهایت به لایه خروجی می‌فرستد که جواب شبکه نسبت به ورودی‌های اعمال شده به آن است.

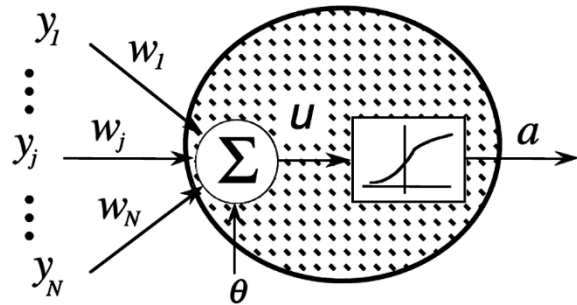
در سالیان اخیر شاهد حرکت مستمر از تحقیقات تئوری و کاربردی به‌ویژه در زمینه پردازش اطلاعات، برای مسائلی که برای آن‌ها راه حل دقیقی موجود نیست و یا به راحتی قابل حل نیستند، بوده ایم. با توجه به این امر، گرایش فراوانی در توسعه تئوریک سیستم‌های دینامیکی هوشمند که مبتنی بر داده‌های تجربی هستند، ایجاد شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی جزء این دسته از سیستم‌های دینامیکی قرار دارند که با پردازش بر روی داده‌های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به همین علت به این سیستم‌ها، سیستم‌های هوشمند می‌گویند چرا که بر اساس محاسبات بر روی داده‌های عددی یا مثال

پیش بینی طول مفصل پلاستیک پایه های پل های بتن آرمه ...

• شبیه سازی شبکه با داده های جدید

به عنوان گام اول برای تهیه اطلاعات کافی برای آموزش، بررسی صحت و آزمایش شبکه های عصبی، از مجموعه نتایج آزمایشگاهی جامعی در ارتباط با طول مفصل پلاستیک در ستون های بتن آرمه که جمع آوری شده است، بهره گرفته می شود. در مجموع، ۴۱ نتیجه آزمایشگاهی شامل مشخصات هندسی و مکانیکی مقطع و مصالح و طول مفصل پلاستیک ستون که مربوط به دهه های اخیر می باشند، انتخاب گردیده است. پارامترهای ورودی شامل موارد زیر می شوند:

- ابعاد مقطع، d ، بر حسب میلیمتر
- مقاومت فشاری بتن، f_c ، بر حسب مگاپاسکال
- مقاومت تسلیم فولاد، F_y ، بر حسب مگاپاسکال
- طول ستون، L ، بر حسب میلیمتر
- قطر آرماتور طولی، d_b ، بر حسب میلیمتر
- درصد آرماتور طولی، ρ_l
- نسبت بار محوری به اعمالی به ظرفیت محوری ستون، $\frac{P}{f_c A_g}$ با داشتن ۷ گره ورودی توضیح داده شده در بالا، گره هدف، طول مفصل پلاستیک در ستون های بتن آرمه می باشد. در مدلسازی شبکه، یک لایه مخفی در مدل سازی شبکه عصبی به کار رفته و توابع انتقال آن به صورت لگاریتم سیگموئید (شکل ۳-الف) در نظر گرفته شده است. همچنین تابع انتقال در لایه خروجی به صورت خطی می باشد (شکل ۳-ب). استفاده از این ساختار به این دلیل است که یک شبکه پس انتشار دارای بایاس، یک لایه Sigmoid، و یک لایه خروجی خطی توانایی تخمین زدن هر تابعی با نقاط ناپیوستگی محدود را داراست [۲۴].
- در مدل سازی از روش پس انتشار استفاده شده است. لغت پس انتشار به رفتار شبکه در محاسبه شیب در شبکه های غیرخطی چند لایه اشاره دارد. شبکه های پس انتشار، یک شبکه چند لایه با تابع انتقال غیرخطی و قاعده یادگیری Widrow-Hoff می باشد. از بردار ورودی و هدف برای تقریب زدن یک تابع، یافتن رابطه بین ورودی و خروجی و دسته بندی ورودی ها بر اساس روش تعیین شده توسط طراح استفاده می شود [۲۵].



شکل ۲- نمونه مدل محاسباتی شبکه های عصبی مصنوعی [۱۵]

۴- پیش بینی طول مفصل پلاستیک به کمک شبکه های عصبی مصنوعی

در سال های اخیر، شبکه های عصبی مصنوعی در مدل سازی بسیاری از سیستم های مهندسی عمران مورد توجه محققین بوده اند، که می توان به مواردی چون: پیش بینی مقاومت فشاری بتن محصور شده و نشده (توسط جانگ و زانگ [۱۶]، هول و ژابویز [۱۷]، تانگ و دیگران [۱۸]، اورتا و کاواشیما [۱۹]، لی [۲۰]، نادرپور و دیگران [۲۱]) و پیش بینی حداکثر مقاومت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده با FRP (توسط پررا و دیگران [۲۲]) و همچنین آنالیز ارتعاش آزاد (جدایی و دیگران [۲۳]) اشاره نمود.

شبکه های مصنوعی به طور خودکار روابط بین متغیرها را مدیریت کرده و بر مبنای داده های مورد استفاده در فرایند آموزش تطبیق می دهند. بنابراین جمع آوری تعداد مناسب اطلاعات آزمایشگاهی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه، یک پایگاه داده با استفاده از آزمایش های موجود در زمینه طول مفصل پلاستیک در ستون های بتن آرمه و با دقت بالا به منظور بررسی تاثیر متغیرهای مختلف ایجاد گردیده است. در نهایت یک مدل جدید بر مبنای شبکه های مصنوعی پیشنهاد گردیده و صحت آن با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و مدل های موجود تایید شده است.

در این مطالعه برای ایجاد شبکه های عصبی مصنوعی چهار گام زیر انجام شده است:

- مهیا کردن داده های آموزشی
- ایجاد شبکه
- آموزش شبکه

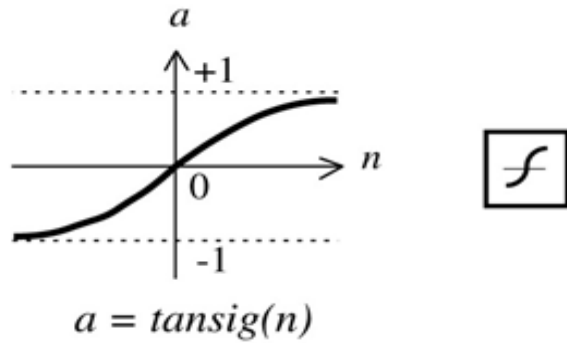
- مجموعه آموزشی: این مجموعه برای یادگیری مورد استفاده قرار می گیرند.
- مجموعه صحت سنجی شبکه .
- مجموعه آزمایش شبکه.

تغییر در درصد نسبی این بخش ها به میزان کمی می تواند پروسه یادگیری را بهبود دهد یا ضعیف تر نماید. در این مطالعه در گام مقدماتی، داده ها با درصد های مختلف از سه دسته آموزش، صحت و آزمایش مورد مطالعه قرار گرفتند؛ به طوری که داده های آموزش بین ۵۰ تا ۹۰ درصد تغییر داده شدند. در نهایت گروهی که در آن ۶۰٪ داده ها به آموزش، ۲۰٪ به صحت و ۲۰٪ به آزمایش اختصاص داده شده بود، به عنوان بهترین گروه در نظر گرفته شد.

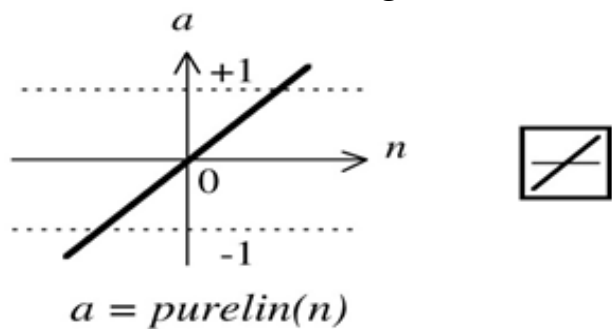
ملاک توقف آموزش شبکه ها، خطای میانگین مربعی (MSE) است که میانگین تفاوت مربعی بین مقادیر خروجی و هدف می باشد. مقادیر کمتر به معنای عملکرد بهتر شبکه بوده و مقدار صفر به معنی عدم وجود خطا می باشد. به عبارت دیگر آموزش هر شبکه تا زمانی انجام شده است که خطای میانگین مربعی مجموعه داده های مربوط به صحت سنجی شبکه کاهش داشته باشد که این نحوه آموزش باعث کارآمد و بهینه بودن شبکه خواهد بود.

یکی دیگر از فاکتورهایی که می تواند در انتخاب شبکه مناسب مورد استفاده قرار گیرد، مقدار رگرسیون (R) شبکه است. مقادیر رگرسیون، همبستگی بین خروجی ها و هدف ها را در شبکه ها اندازه گیری می کنند؛ به نحوی که $R=1$ به معنی ارتباط کامل بوده و $R=0$ نشان دهنده رابطه تصادفی است. این دو معیار یعنی MSE و R به عنوان اساس انتخاب شبکه ایده آل در نظر گرفته شده اند.

پس از بررسی دو معیار فوق (مقدار رگرسیون و حداکثر خطا میانگین شبکه ها) و همچنین قدرت پیش بینی شبکه ها، شبکه با تعداد ۱۲ نورون در لایه پنهان (NN12-1-Tsig) به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید. این شبکه برای داده های آموزشی، صحت سنجی و آزمایش به ترتیب دارای مقادیر رگرسیون ۰/۹۹۳۰۷، ۰/۷۸۶۹۷ و ۰/۸۶۳۶۹ است. ماتریس توابع وزن ورودی ها و خروجی شبکه در لایه پنهان به صورت ماتریس نشان داده شده در شکل ۴ است.



الف) تابع انتقال Tan sigmoid



ب) تابع انتقال Linear

شکل ۳- توابع انتقال شبکه عصبی مصنوعی [۲۴]

روش انتشار برگشتی استاندارد یک الگوریتم نزولی شیب دار است که در آن وزن های شبکه در طول شیب منفی تابع عملکرد انتقال می یابند. معمول ترین الگوریتم آموزش انتشار برگشتی، الگوریتم Levenberg-Marquardt می باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

آموزش شبکه های عصبی در صورت اعمال یکسری پیش پردازش بر روی داده های ورودی و هدف می تواند کارایی بالاتری داشته باشد. قبل از آموزش بهتر است تا ورودی ها و هدف را مقیاس بندی کنیم تا آنها در یک محدوده خاص قرار گیرند.

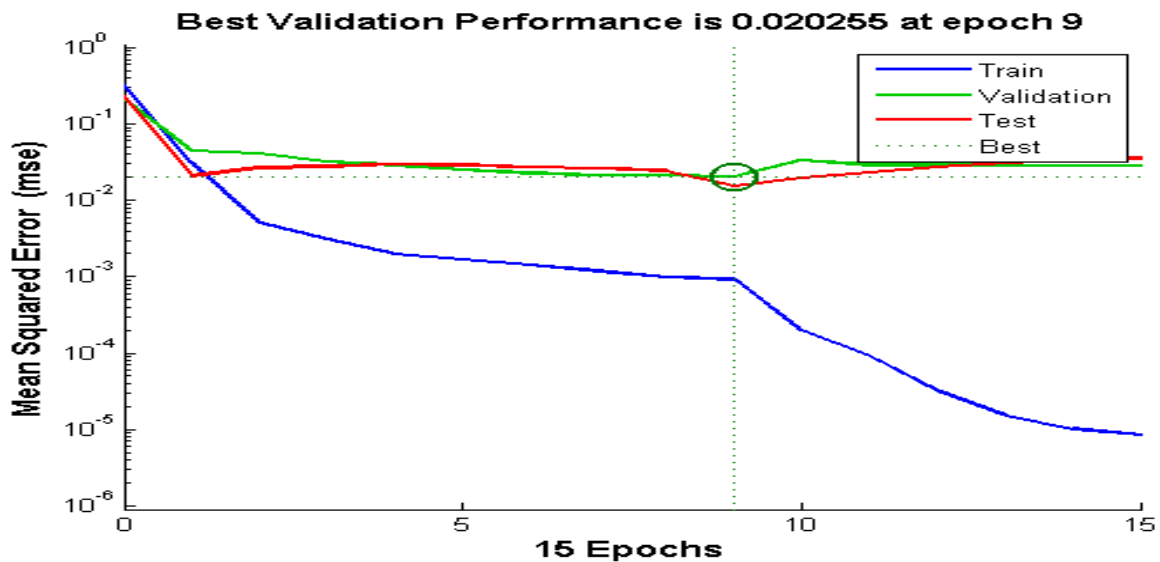
از این رو قبل از آموزش داده ها، نرمال سازی تمام داده ها انجام شده است؛ زیرا تابع لگاریتم سیگموئید، اعداد بین صفر و ۱ را می شناسد. به منظور مقیاس کردن داده ها بین ۰/۱ تا ۰/۹، مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب برابر مقادیر ۰/۱ و ۰/۹، در نظر گرفته شده و برای مقادیر داخل بازه از درون یابی خطی استفاده شده است. الگوریتم Levenberg-Marquardt به طور تصادفی بردارهای ورودی و بردارهای هدف را به سه بخش تقسیم می کند که شامل:

بیش بینی طول مفصل پلاستیک پایه های پل های بتن آرمه ...

مقدار خطا در گام ۱۵ برای مجموعه داده های صحت سنجی به مقدار ۰/۰۲ رسیده است. این شکل دارای سه منحنی می باشد که هر یک نماینده یک دسته از داده های آموزشی^۱، صحت سنجی^۲ و آزمایش^۳ می باشند. همچنین مقادیر رگرسیون های مربوط به داده های ورودی و نمودارهای مربوط به نحوه یادگیری به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

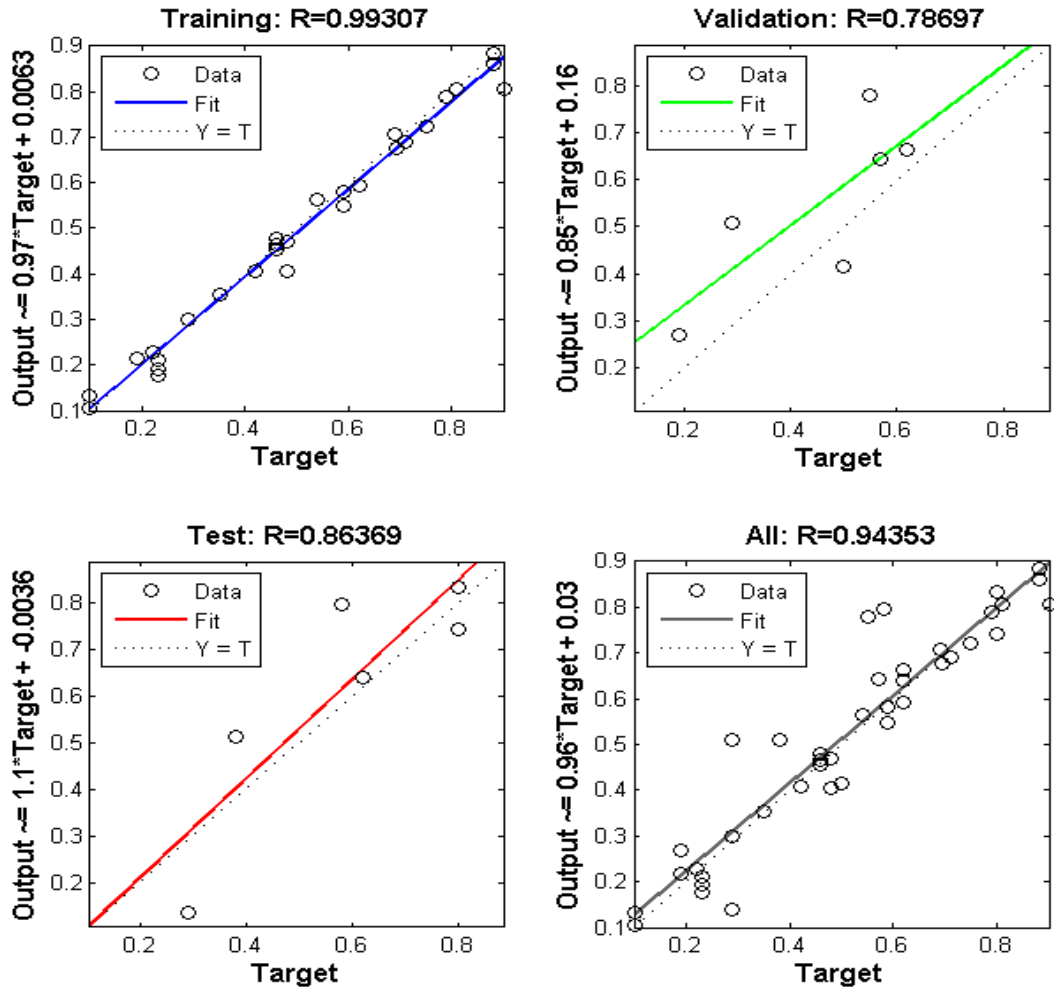
شکل ۴ نمودار MSE مربوط به شبکه (NN12-1-Tsig) را نشان می دهد که از مقادیر بزرگ شروع شده و به مقادیر کوچکتر کاهش می یابد. به عبارت دیگر، این مساله نشان می دهد که شبکه در حال یادگیری است. شبکه در ابتدای یادگیری دارای خطایی در حدود ۰/۱ است، با ادامه روند یادگیری و حرکت وزن های مورد استفاده در شبکه در جهت کم شدن خطای تابع عملکرد، این

خروجی =	0.1709	= ورودی	0.395	0.035	0.964	0.151	1.117	-0.249	0.956
	0.7409		0.715	0.274	0.935	-0.127	-0.039	1.289	-1.057
	-0.9449		-1.461	0.156	-1.130	0.306	-0.019	0.324	-0.878
	0.7923		0.916	0.448	-0.225	0.605	-1.191	1.153	0.088
	-1.1738		-0.066	-2.021	0.213	1.872	-1.391	0.947	0.369
	1.6350		-0.539	-1.581	0.139	1.389	-0.938	-0.719	0.139
	-1.2242		1.268	-0.747	1.137	-0.268	-1.830	0.052	0.674
	0.4903		-1.193	-0.678	1.011	0.075	-0.810	-0.269	1.058
	0.2994		-0.889	0.557	0.428	-0.863	-1.038	0.277	-0.487
	1.2283		0.679	-0.672	-0.438	1.119	0.509	0.60166	-1.272
	-1.7018		-0.596	0.260	1.284	-0.415	1.031	-0.191	-1.654
	-0.5064		-0.635	0.388	-0.696	1.581	-0.194	-1.095	-0.580

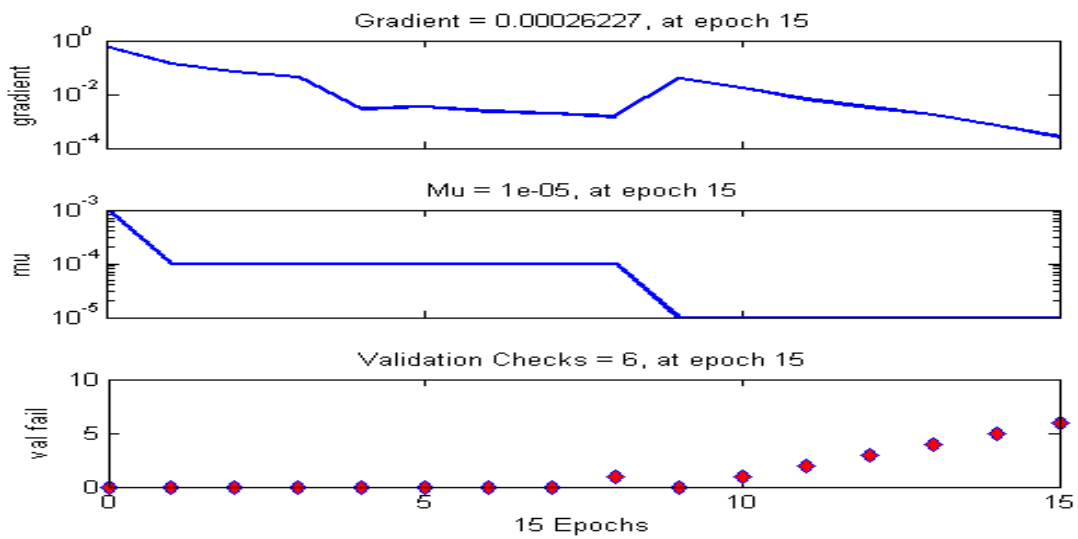


شکل ۴- نمودار عملکرد شبکه آموزش داده شده با تعداد ۱۲ نورون در لایه پنهان

¹ Train
² Validation
³ Test



شکل ۵- رگرسیون داده های مربوط به آموزش، صحت و آزمایش شبکه با تعداد ۱۲ نورون در لایه پنهان



شکل ۶- نمودار نحوه یادگیری شبکه آموزش داده شده با تعداد ۱۲ نورون در لایه پنهان

پیش بینی طول مفصل پلاستیک پایه های پل های بتن آرمه ...

شده اند. درصد خطا از رابطه ۱۳ بدست آمده است.

$$\text{درصد خطا} = \left(1 - \frac{L_p^{\text{calc}}}{L_p^{\text{exp}}}\right) * 100 \quad (13)$$

که در آن L_p^{calc} برابر با مقدار طول مفصل پلاستیک محاسباتی با استفاده از روابطی که در بالا ذکر شد و L_p^{exp} برابر با مقدار طول مفصل پلاستیک بدست آمده از آزمایش می باشد.

۵- مقایسه شبکه ارائه شده با مدل های موجود

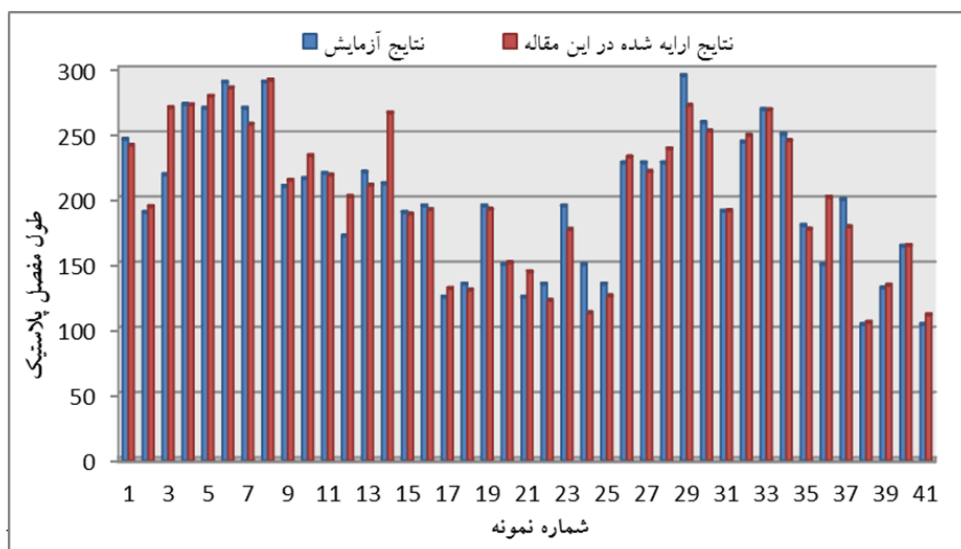
برای اعتبار سنجی نتایج، بر مبنای ۴۱ نمونه آزمایشگاهی مقایسه ای بین نتایج شبکه NN12-1-Tsig و روابط ارائه شده (رابطه ۷-۹-۱۱ و ۱۲ جدول شماره ۱) توسط محققان ردیف ۴، ۶، ۸ و ۹ جدول ۱ صورت پذیرفته است. نتایج این مقایسه در جدول ۲ و شکل ۷ و میزان درصد خطا و محدوده متغیرها در جدول ۳ نشان داده

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از روابط ارائه شده در این مقاله و نتایج آزمایشگاهی

آزمایش	نام محققین	لیست داده ها							آزمایش	مدل ارایه شده	رابطه (۱۱)	رابطه (۹)	رابطه (۱۲)	رابطه (۷)					
		d or h	f _c	f _y	L	d _b	ρ _l	p/f _c A _g							L _p	L _p	L _p	L _p	L _p
		mm	Mpa	Mpa	mm	mm	%	-							mm	mm	mm	mm	mm
(سری ۱)	(Priestley Park and Gill, 1982) [۲]	۵۵۹	۲۴	۳۸۰	۱۲۱۹	۲۴	۱/۸	۰/۲۶	۲۴۶	۲۴۱/۶	۲۵۱/۱	۱۷۸/۴	۱۱۸/۶	۲۹۸/۱					
		۵۵۹	۴۱	۳۸۰	۱۲۱۹	۲۴	۱/۸	۰/۲۱	۱۹۰	۱۹۴/۵	۲۰۳/۴	۱۶۰/۱	۱۱۸/۶	۲۹۸/۲					
		۵۵۹	۲۱	۳۸۰	۱۲۱۹	۲۴	۱/۸	۰/۴۲	۲۱۹	۲۷۰/۵	۲۶۰	۲۳۷	۱۱۸/۶	۲۹۸/۲					
		۵۵۹	۲۴	۳۸۰	۱۲۱۹	۲۴	۱/۸	۰/۶	۲۷۳	۲۷۲/۶	۲۴۷/۱	۳۰۲/۷	۱۱۸/۶	۲۹۸/۲					
(سری ۲)	(Davey, park, 1975) [۲۶]	۵۰۰	۳۳/۲	۳۷۱	۲۰۰۰	۱۳	۲/۶	۰/۰۶	۲۷۰	۲۷۹/۱	۱۸۳/۷	۱۱۷/۶	۱۷۱/۴	۲۶۶/۱					
		۵۰۰	۳۴/۸	۳۷۳	۲۰۰۰	۱۳	۲/۶	۰/۰۵	۲۹۰	۲۸۵/۵	۱۸۲/۲	۱۱۱/۶	۱۷۱/۴	۲۶۶/۷					
(سری ۳)	(Park, Priestley, 1987) [۱۱]	۵۰۰	۳۳	۳۷۳	۱۷۷۸	۱۳	۲/۷	۰/۱۱	۲۷۰	۲۵۷/۶	۱۷۳/۳	۱۵۰	۱۵۳/۷	۲۴۸/۹					
		۵۰۰	۳۵	۳۷۱	۲۷۴۳	۱۳	۲/۷	۰/۱۱	۲۹۰	۲۹۱/۶	۲۱۸/۷	۱۶۳/۴	۲۳۰/۹	۳۲۵/۵					
		۶۰۰	۳۰	۳۰۳	۱۱۹۴	۲۴	۲/۴	۰/۱۵	۲۱۰	۲۱۴/۶	۱۹۲/۵	۱۷۱/۴	۱۱۶/۶	۲۵۵/۵					
		۴۰۰	۲۶	۳۰۸	۱۶۰۰	۱۶	۲/۴	۰/۲	۲۱۶	۲۳۳/۶	۱۷۶/۶	۱۵۲/۶	۱۴۲/۱	۲۳۶/۴					
		۴۰۰	۲۵	۴۲۷	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۲۱	۲۲۰	۲۱۸/۷	۲۱۶/۶	۱۱۳/۳	۱۴۲/۱	۲۷۸/۳					
(سری ۴)	(Tanaka, park, 1990) [۲۷]	۴۰۰	۲۶	۴۷۴	۱۶۰۰	۲۰	۱/۶	۰/۲	۱۷۲	۲۰۲/۳	۲۶۵/۹	۱۱۱/۴	۱۴۵/۶	۳۳۶/۶					
		۴۰۰	۳۲	۵۱۱	۱۶۰۰	۲۰	۱/۶	۰/۲	۲۲۱	۲۱۱	۲۶۰/۷	۱۱۱/۴	۱۴۵/۶	۳۵۲/۸					
		۵۵۰	۳۲	۵۱۱	۱۶۵۱	۲۰	۱/۳	۰/۱	۲۱۲	۲۶۶/۳	۲۶۳/۲	۸۴/۸	۱۴۹/۷	۳۵۶/۹					
(سری ۵)	(Dodd, cooke, 2000) [۳]	۲۰۱	۴۰	۴۴۸	۱۷۹۲	۶	۱/۶	۰/۴	۱۹۰	۱۸۸/۸	۱۳۲/۱	۱۶۹	۱۴۸/۶	۲۰۲/۵					
		۲۰۱	۴۳	۴۴۸	۱۷۹۲	۶	۱/۶	۰/۳۶	۱۹۵	۱۹۲/۲	۱۳۵/۶	۱۵۰/۶	۱۴۸/۶	۲۰۲/۵					
		۲۰۱	۳۴	۴۴۸	۳۱۳۶	۶	۱/۶	۰/۰۵	۱۲۵	۱۳۱/۶	۲۰۳	۵۰/۲	۲۵۶/۲	۳۱۰					
		۲۰۱	۳۰	۴۴۸	۳۱۳۶	۶	۱/۶	۰/۰۵	۱۳۵	۱۳۰/۵	۲۰۵/۹	۵۰/۲	۲۵۶/۲	۳۱۱					
		۲۰۱	۳۷	۴۴۸	۴۴۸۰	۶	۱/۶	۰/۰۴	۱۹۵	۱۹۲/۷	۲۶۸/۲	۵۰/۲	۳۶۳/۷	۴۱۷/۵					
		۲۰۱	۲۹	۴۴۸	۴۴۸۰	۶	۱/۶	۰/۰۶	۱۵۰	۱۵۱/۵	۲۷۳/۹	۵۰/۲	۳۶۳/۷	۴۱۷/۵					
		۲۰۱	۳۴	۴۴۸	۱۴۰۵	۶	۱/۶	۰/۰۵	۱۲۵	۱۴۴/۳	۱۱۶/۳	۵۰/۲	۱۱۷/۷	۱۷۱/۵					
		۲۰۱	۳۲	۴۴۸	۱۴۰۵	۶	۱/۶	۰/۰۵	۱۳۵	۱۲۲/۶	۱۱۷/۸	۵۰/۲	۱۱۷/۷	۱۷۱/۵					
		۲۰۱	۳۷	۴۴۸	۲۰۰۷	۶	۱/۶	۰/۰۴	۱۹۵	۱۷۷	۱۴۴/۵	۵۰/۲	۱۶۵/۸	۲۱۹/۷					
		۲۰۱	۲۹	۴۴۸	۲۰۰۷	۶	۱/۶	۰/۰۶	۱۵۰	۱۱۳	۱۵۰/۳	۵۰/۲	۱۶۵/۸	۲۱۹/۷					
		۲۰۱	۴۰	۴۴۸	۱۴۰۵	۶	۱/۶	۰/۰۴	۱۳۵	۱۲۶	۱۱۲/۷	۵۰/۲	۱۱۷/۷	۱۷۱/۵					

ادامه جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از روابط ارایه شده در این مقاله و نتایج آزمایشگاهی

سری آزمایشات	نام محققین	لیست داده‌ها							آزمایش	مدل ارایه شده	رابطه (۱۱)	رابطه (۹)	رابطه (۱۲)	رابطه (۷)					
		d or h	f _c	f _y	L	d _b	ρ _l	p/f _c A _g							L _p	L _p	L _p	L _p	L _p
		mm	Mpa	Mpa	mm	mm	%	-							mm	mm	mm	mm	mm
(سری ۶)	(Moyer, Kowalsky, 2002) [۲۸]	۴۵۷	۳۳	۴۱۴	۲۱۴۳	۱۹	۲	۰/۰۴	۲۲۸	۲۳۲/۶	۲۴۳/۶	۵۴/۵	۱۸۷/۴	۳۴۳/۷					
		۴۵۷	۳۲	۴۱۴	۲۱۴۳	۱۹	۲	۰/۰۴	۲۲۸	۲۲۱/۶	۲۴۵/۷	۵۴/۵	۱۸۷/۴	۳۴۳/۷					
		۴۵۷	۳۴	۴۱۴	۲۱۴۳	۱۹	۲	۰/۰۴	۲۲۸	۲۳۸/۷	۲۴۱/۶	۵۴/۵	۱۸۷/۴	۳۴۳/۷					
(سری ۷)	(Ston, Cheok, 1989) [۲۹]	۲۴۹	۲۳	۳۹۳	۷۴۹	۴۴	۱/۵	۰/۲	۲۹۵	۲۷۲/۳	۳۹۸	۶۴/۹	۹۸/۶	۴۴۰/۳					
		۲۴۹	۲۵	۳۹۳	۱۴۹۹	۴۴	۰/۷	۰/۱	۲۵۹	۲۵۲/۶	۴۲۰/۸	۶۲/۲	۱۵۸/۷	۵۰۰/۳					
		۲۴۹	۲۴	۳۹۳	۷۴۹	۴۴	۱/۵	۰/۱	۱۹۱	۱۹۱/۳	۳۹۰/۴	۴۲/۴	۹۸/۶	۴۴۰/۳					
		۲۴۹	۲۴	۳۹۳	۷۴۹	۴۴	۱/۵	۰/۲	۲۴۴	۲۴۹/۱	۳۹۰/۴	۶۴/۹	۹۸/۶	۴۴۰/۳					
		۲۴۹	۲۳	۳۹۳	۱۴۹۹	۴۴	۰/۷	۰/۱	۲۶۹	۲۶۸/۷	۴۳۵/۵	۶۲/۲	۱۵۸/۷	۵۰۰/۳					
(سری ۸)	(Wang, luxl, liw, 2010) [۳۰]	۴۰۰	۳۸	۴۲۳	۸۰۰	۱۶	۳/۲	۰/۱۹	۲۵۰	۲۴۵/۱	۱۴۹/۸	۱۴۲/۴	۷۸/۱	۲۱۲/۹					
(سری ۹)	(Kunna th et al, 1997) [۳۱]	۳۰۵	۲۹	۴۴۸	۱۳۷۲	۱۰	۲	۰/۰۹	۱۸۰	۱۷۷/۲	۱۵۱/۸	۵۸/۴	۱۱۸/۶	۲۰۸/۳					
		۳۰۵	۳۳	۴۴۸	۱۳۷۲	۱۰	۲	۰/۰۹	۱۵۰	۲۰۱/۶	۱۴۹/۶	۵۸/۴	۱۱۸/۶	۲۰۸/۳					
		۳۰۵	۲۷	۴۴۸	۱۳۷۲	۱۰	۲	۰/۱	۲۰۰	۱۷۹	۱۵۴/۸	۶۲/۵	۱۱۸/۶	۲۰۸/۳					
(سری ۱۰)	(Watson , park, 1994) [۱۳]	۴۰۰	۴۰	۴۴۶	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۱	۱۰۴	۱۰۵/۶	۱۹۲/۸	۶۰/۵	۱۴۲/۱	۲۸۵					
		۴۰۰	۴۱	۴۷۴	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۳	۱۳۲	۱۳۴/۲	۱۹۸/۴	۱۵۶/۵	۱۴۲/۱	۲۹۴/۸					
		۴۰۰	۴۰	۴۷۴	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۳	۱۶۴	۱۶۴/۶	۱۹۹/۹	۱۵۶/۵	۱۴۲/۱	۲۹۴/۸					
		۴۰۰	۴۲	۴۷۴	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۳	۱۰۴	۱۱۱/۴	۱۹۷	۱۵۶/۵	۱۴۲/۱	۲۹۴/۸					



شکل ۷- مقایسه نتایج حاصل از روش ارایه شده در این مقاله با نتایج آزمایشگاهی

جدول شماره ۳- مقایسه میزان درصد خطا

نوع آزمایشات	d	f _c	f _y	L	d _b	ρ _l	p/f _c A _g	درصد خطا				تعداد نمونه	
	mm	Mpa	Mpa	mm	mm	%	-	رابطه (۱۱)	رابطه (۹)	رابطه (۱۲)	رابطه (۷)		مدل ارایه شده
اول	۵۵۹	۴۱ تا ۲۱	۳۸۰	۱۲۱۹	۲۴	۱/۷۹	۰/۲۱ تا ۰/۶	۹/۳	۱۵/۶	۴۷/۹	۳۰/۹	۶/۹	۴
دوم	۵۰۰	۳۵ تا ۳۳	۳۷۱ تا ۳۷۳	۲۰۰۰	۱۳	۲/۶	۰/۰۵ تا ۰/۰۶	۳۴/۶	۵۹	۳۸/۷	۴/۷	۲/۵	۲
سوم	۶۰۰ تا ۴۰۰	۳۵ تا ۲۵	۳۰۳ تا ۴۲۷	۱۱۹۴ تا ۲۷۴۳	۱۳ تا ۲۴	۱/۵ تا ۲/۷	۰/۱ تا ۰/۲	۱۷/۷	۳۶/۹	۳۵/۵	۱۵/۵	۳/۲	۵
چهارم	۵۵۰ تا ۴۰۰	۳۲ تا ۲۶	۴۷۴ تا ۵۱۱	۱۶۰۰ تا ۱۶۵۱	۲۰	۱/۳ تا ۱/۶	۰/۱ تا ۰/۲	۳۲/۲	۴۸/۴	۲۶/۳	۷۴/۶	۱۶	۳
پنجم	۲۰۱	۴۳ تا ۲۹	۴۴۸	۱۴۰۵ تا ۴۴۸۰	۶	۱/۶	۰/۰۴ تا ۰/۴	۳۲/۸	۵۶/۷	۴۷/۸	۶۶/۵	۷/۱	۱۱
ششم	۴۵۷	۴۳ تا ۳۲	۴۱۴	۲۱۳۴	۱۹	۲	۰/۰۴	۶/۹	۷۶/۱	۱۷/۸	۵۰/۸	۳/۲	۳
هفتم	۲۴۹	۲۵ تا ۲۳	۳۹۳	۷۴۹ تا ۱۴۴۹	۴۴	۰/۷ تا ۱/۴	۰/۱ تا ۰/۲	۶۴/۷	۷۶/۴	۵۰/۹	۸۷/۹	۲/۵	۵
هشتم	۴۰۰	۳۸	۴۲۳	۸۰۰	۱۶	۳/۲	۰/۱۹	۴۰/۱	۴۳	۶۸/۸	۱۴/۸	۲	۱
نهم	۳۰۵	۳۳ تا ۲۷	۴۴۸	۱۳۷۲	۱۰	۲	۰/۱	۱۳/۵	۶۵/۸	۳۱/۹	۱۹/۶	۱۵/۵	۳
دهم	۴۰۰	۴۲ تا ۴۰	۴۴۶ تا ۴۷۴	۱۶۰۰	۱۶	۱/۵	۰/۳	۶۱/۸	۲۸/۹	۲۳/۶	۱۴۰	۲/۷	۴
محدود کلی	۲۰۱ تا ۶۰۰	۲۱ تا ۴۳	۳۰۳ تا ۵۱۱	۷۴۹ تا ۴۴۸۰	۶ تا ۴۴	۰/۷ تا ۳/۲	۰/۰۴ تا ۰/۴	۳۱/۴	۵۰/۷	۳۸/۹	۵۰/۵	۶/۱	۴۱

۶- نتیجه گیری

آرمه انجام گرفت. در مدل سازی از روش انتشار برگشتی استفاده شده و نوع آموزش از نوع پیش نگر (Feed Forward) انتخاب گردید. همچنین الگوریتم آموزش انتشار برگشتی مورد استفاده، الگوریتم Levenberg-Marquardt و روش مورد استفاده در آموزش، روش گرادیان نزولی با مومنتم بود. همچنین توابع انتقال در لایه پنهان و خروجی به ترتیب صورت تابع سیگموئید و خطی بودند. ملاک توقف در آموزش شبکه، خطای میانگین مربعی و

مجموعه ای مناسب از مطالعات آزمایشگاهی در رابطه با طول مفصل پلاستیک جمع آوری شد. سپس با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی و استفاده از اطلاعات ورودی شامل: ابعاد مقطع، مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم فولاد، طول ستون، قطر آرماتور و درصد آرماتور طولی و نسبت بار محوری به ظرفیت محوری ستون، پیش بینی طول مفصل پلاستیک در ستون های بتن

[7]Berry, M., Lehman D. E., and Lowes L. N. (2008) "Lumped-Plasticity Models for Performance Simulation of Bridge Columns", *ACI Structural Journal*, No. 3, pp. 270-279.

[8]Firat Alemdar, Z.(2010); "Plastic hinging behavior of reinforced concrete bridge columns" Ph.D. dissertation, Lawrence (KS): the University of Kansas;

[9] Hemmati, A., Kheyroddin, A., and Sharbatdar, M. (2013). "Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced HPRCC Beams." *ASCE, J. Struct. Eng.*

[10]Mander J. B. (1983), "Seismic Design of Bridge Piers", PhD Thesis, University of Canterbury, Christ Church, New Zealand, pp.237-253.

[11]Priestley, M. J. N., and Park R. (1987), "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading", *ACI Structural Journal*, V.84, Issue 1, pp. 61-76.

[12]Paulay T., and Priestley M. J. N. (1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures", USA: John Wiley & Sons, Inc.

[13] Watson, S. and Park, R. (1994), "Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 120, No. 6, pp. 1825-1849.

[14] منہاج، محمد باقر (۱۳۸۱)، "هوش محاسباتی: مبانی شبکه های عصبی"، مرکز نشر دانشگاه امیر کبیر.

[15] Hu, Y. H. and Hwang, J. (2001). "Handbook of Neural Network Signal Processing ." 1th. Editon, USA: CRC press.

[16]Hong-Guang N, Ji-Zong W. (2000), "Prediction of Compressive Strength of Confined Concrete by Neural Networks", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1245-50.

[17]Hola J, Schabowicz K. (2005), "New Technique of Nondestructive Assessment of Concrete Strength using Artificial Intelligence", *NDT & E International*, Vol. 38, pp. 251-9.

[18] Tang CW, Chen HJ, Yen T. (2003), "Modeling Confinement Efficiency of Reinforced Concrete Columns with Rectilinear Transverse Steel using Artificial Neural Networks", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 775-783.

[19]Oreta AWC, Kawashima K. (2003), "Neural Network Modeling of Confined Compressive Strength and Strain of Circular Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 4, pp. 554-61.

[20]Lee SC. (2003), "Prediction of Concrete Strength using Artificial Neural Networks" *Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 849-57.

مقادیر رگرسیون در نظر گرفته شده بود، که خطای میانگین مربعی میانگین تفاوت مربعی بین مقادیر خروجی و هدف می باشد (مقادیر کمتر به معنای عملکرد بهتر شبکه است) و مقادیر رگرسیون، همبستگی بین خروجی ها و هدف ها را در شبکه ها اندازه گیری می کنند. مقدار رگرسیون در بازه صفر تا یک متغیر است و $R=1$ به معنی ارتباط کامل بوده و $R=0$ نشان دهنده رابطه تصادفی است. پس از بررسی نهایی شبکه در لایه پنهان با تعداد ۱۲ نورون (NN12-1-Tsig)، به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. برای بررسی عملکرد شبکه در مقایسه با مدل های موجود، از داده های آزمایشگاهی استفاده شد که میانگین خطای داده ها، مقدار $6/14$ درصد می باشد که نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب شبکه ارائه شده نسبت به روابط ارائه شده سایر محققین است. نتایج نشان دادند میانگین درصد خطای حاصل از سایر روابط نسبت به روش ارائه شده در این تحقیق به طور متوسط هفت برابر بیشتر می باشد.

۷- مراجع

[1] Mortezaei A., Ronagh H.R.(2012) "Plastic hinge length of FRP strengthened reinforced concrete columns subjected to both far-fault and near-fault ground motion", *scientia iranica* , Vol 19, , No.6,pp1365-1378

[2] Park R., Priestley M. J. N., and Gill W. D. (1982), "Ductility of Square-Confined Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, No.108, pp. 929-950.

[3] Dodd, L. L., and Cooke, N., (2000) "Capacity of Circular Bridge Columns Subjected to Base Excitation," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No.2, pp.297-308.

[4] Hachem M. M., Mahin, S.A., and Moehle J.P. (2003) "Performance of Circular Reinforced Concrete Bridge Columns under Bidirectional Earthquake Loading." Report No. PEER 2003/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, pp. 490-502.

[5] Bae, S. (2005) "Seismic Performance of Full-Scale Reinforced Concrete Columns," PhD Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, TX, 311 pp.

[6] Restrepo J. I., Seible F., Stephan B., and Schoettler J. M. (2006). "Seismic Testing of Bridge Columns Incorporating High-Performance Materials," *ACI Structural Journal*, V.103, Issue 4, pp. 496-504.

[21] Naderpour H, Kheyroddin A, Ghodrati Amiri G. (2010), "Prediction of FRP-Confined Compressive Strength of Concrete using Artificial Neural Networks", *Compos Struct*, Vol. 92, No. 12, pp. 2817–29.

[22] Perera R, Barchin M, Arteaga A, De Diego A. (2010), "Prediction of the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams FRP-Strengthened in Shear using Neural Networks", *Journal of Composite: Part B*, Vol. 41, No. 4, pp. 287–98.

[23] Jodaei A, Jalal M, Yas M.H. (2012), "Free Vibration Analysis of Functionally Graded Annular Plates by State-Space based Differential Quadrature method and Comparative Modeling by ANN", *J Compos: Part B*, Vol. 43, No. 2, pp. 340–53.

[24] Demuth H, Beale M, Hagan M. (2009) "Neural network toolbox 6: user's guide. Version 6.0.2., USA: MathWorks", Inc.

[۲۵] کاوه، علی و ایران منش، عباس (۱۳۸۷)، "شبکه های عصبی

مصنوعی در بهینه سازی سازه ها"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ک-۳۱۰.

[26] Davey B. E., and Park R. (1975) "Reinforced Concrete Bridge Piers Under Seismic Loading," Department of Civil Engineering Research Report 75-3, University of Canterbury.

[27] Tanaka, H. and Park, R. (1990), "Effect of Lateral Confining Reinforcement on the Ductile Behavior of Reinforced Concrete Columns," Research Report 90-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, NewZealand, pp. 458-483.

[28] Moyer, M.J. and Kowalsky, M.J., (2002), "Influence of tension strain on buckling of reinforcement in RC bridge columns" *ACI Structural Journal*, No. 3, pp. 330-359.

[29] Stone, William C.; and Cheok, Geraldine S., (1989), "Inelastic Behavior of Full-Scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading", NIST BSS 166, Building Science Series, Center for Building Technology, National Engineering Laboratory, National Institute of Standard.

[30] Wang ZY, LuXL, LiW, Wang DY. (2010), "Experimental research on seismic performance of high strength concrete circular column confined with carbon fiber sheets at plastic hinge zone", *Bulding Structures*, pp. 111–122.