

پیش‌بینی رفتار اتصالات خارجی بتن آرمه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

جعفر سبحانی
کارشناس ارشد

داود مستوفی نژاد
دانشیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این مقاله، برای پیش‌بینی رفتار لنگر- دوران اتصالات و همچنین پیش‌بینی لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات، از شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شده است. برای تنظیم داده‌های ورودی شبکه عصبی، ۴۳۲ اتصال بتن آرمه خارجی مورد تحلیل غیر خطی قرار گرفته است. متغیرهای طراحی این اتصالات عبارت بودند از ابعاد تیر و ستون، فولاد طولی تیر، فولاد طولی ستون، آرایش‌های متفاوت برای فولاد عرضی، و مقادیر متفاوت برای فولاد عرضی تیر و ستون. دو شبکه عصبی، یکی برای پیش‌بینی دوران اتصالات و دیگری برای پیش‌بینی میزان دوران نهایی، لنگر مقاوم نهایی و همچنین عملکرد اتصال بتن آرمه، آموزش یافته است. در نهایت، با استفاده از این دو شبکه عصبی، روش استخراج منحنی لنگر - دوران اتصالات بتنی خارجی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، اتصال بتن آرمه خارجی، منحنی لنگر - دوران.

Prediction of the Behaviour of Exterior Reinforced Concrete Joints Using Artificial Neural Networks

D. Mostofinejad
Associate Professor

J. Sobhani
Former Graduate Student

Department of Civil Engineering,
Isfahan University of Technology (IUT)

Abstract

This paper describes how to predict moment-rotation behaviour, ultimate resistance moment, ultimate rotation and performance of joints using artificial neural networks with back-propagation algorithm. To produce the input data for neural networks, 432 exterior reinforced concrete beam-column joints were non-linearly analyzed. The variables of design include the dimensions of beams and columns, longitudinal reinforcement of beams and columns, different arrangement for transverse reinforcement, and different amounts for transverse reinforcement in beams and columns. Two neural network systems have been trained one for predicting the rotation of joints, and the other for ultimate rotation, ultimate resistant moment, and performance of joints. At the end, a method proposed for prediction of moment-rotation curves of reinforced concrete connections.

Keywords

Artificial neural networks, Exterior reinforced concrete joint, Moment-rotation curve.

دیدگاه جدید شبکه‌های عصبی در دهه ۴۰ قرن بیستم شروع شد؛ زمانیکه وارن مک کلوت و والتر پیترز (۱۹۴۳) نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی در اصل می‌توانند هر تابع حسابی منطقی را محاسبه کنند. دو نالد هب اولین فردی بود که قانون آموزش برای شبکه‌های عصبی را در دهه ۸۰ علاقه به کار در زمینه شبکه‌های عصبی با رشد تکنولوژی میکروپروسورها روند صعودی طی کرد و ایده‌های جدیدی مطرح گردید. در این دوره، دو نگرش قابل تأمل می‌باشد؛ نگرش اول استفاده از مکانیزم‌های تصادفی جهت توضیح عملکرد یک طبقه وسیع از شبکه‌های برگشتی است که می‌توان آنها را جهت ذخیره سازی اطلاعات استفاده نمود. این ایده توسط جان هاپفیلد، فیزیکدان آمریکایی در سال ۱۹۸۲ مطرح شد. دومین ایده مهم که کلید توسعه شبکه‌های عصبی در دهه ۸۰ شد، الگوریتم پس انتشار خطا بود که توسط دیوید راملهارت و جیمز مک‌لند در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. با ارائه این دو ایده، شبکه‌های عصبی متحول شد و در ده سال اخیر صدها مقاله توسط دانشمندان مختلف به رشته تحریر در آمد و شبکه‌های عصبی کاربردهای متنوعی در علوم و تکنولوژی پیدا نمود [۱].

از سال ۱۹۸۶ به بعد، زمانیکه الگوریتم پس انتشار خطا توسعه پیدا کرد، نگرش جدیدی از سوی محققین در زمینه مهندسی سازه به شبکه‌های عصبی بوجود آمد؛ بطوریکه در طی ده سال اخیر دهها مقاله علمی در این مورد نوشته شد. در این میان بررسی رفتار اتصالات در سازه‌ها به کمک شبکه‌های عصبی نیز مورد توجه محققین بوده است که منجمله می‌توان به تحقیقات آندرسون و هینز [۲]، جوانگ و همکاران [۳]، و کاوه و همکاران [۴ و ۵] اشاره نمود.

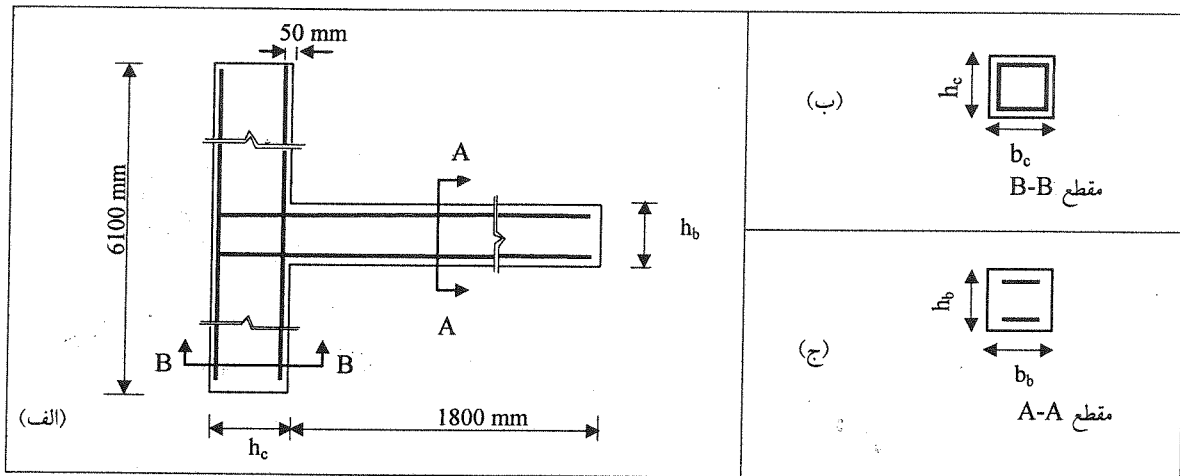
مطالعه و بررسی سازه‌های تخریب شده در اثر زلزله‌هایی که طی سی سال اخیر به وقوع پیوسته، مهندسان را به نقش و اهمیت اتصالات تیر-ستون در ایمنی ساختمانها واقف نموده است. مشاهده ساختمانهای آسیب دیده در برابر زلزله نشان داده است که تحت بار لرزه ای، اتصالات تیر-ستون آسیب پذیرترین المان سازه‌ای بوده و نسبت به سایر عناصر سازه‌ای نیاز به توجهات خاص در طرح و ساخت دارند. بدین منظور تحقیقات دامنه داری در زمینه رفتار شناسی اتصالات سازه‌ها و پیش‌بینی رفتار آنها لازم است. چنین تحقیقاتی لزوماً باید با تحلیل‌های غیر خطی بخصوص در زمینه اتصالات بتن آرمه همراه باشد. از طرفی انجام تحلیل‌های غیر خطی در سازه‌های بتن آرمه و بخصوص در اتصالات هزینه زیادی را از لحاظ زمانی و اقتصادی طلب می‌کند. به همین دلیل است که مهندسان در عمل، تحلیل‌های ساده و کم هزینه‌تر را ترجیح می‌دهند. از این دیدگاه، شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند به عنوان شیوه‌ای جدید برای حل این مشکلات مطرح شود. در این مقاله سعی شده است که از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی رفتار اتصالات بتن آرمه شامل منحنی لنگر-دوران، لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات استفاده شود.

۱- معرفی اتصالات بتن آرمه مورد بررسی

پارامترهایی که در این تحقیق برای بررسی رفتار اتصالات بتن آرمه خارجی در نظر گرفته شده است، عبارتند از: ۴ نوع ابعاد اتصال، ۲ درصد مختلف برای فولاد طولی تیر متصل به اتصال (۱٪ و ۲٪)، ۲ درصد مختلف برای فولاد طولی ستون متصل به اتصال (۱٪ و ۴٪)، سه مقدار مختلف فولاد عرضی (مطابق پیشنهادات آیین نامه ACI، ۷۵٪ و ۲ برابر مقدار پیشنهادی آیین نامه) و ۹ جزئیات مختلف برای فولادگذاری عرضی در نواحی مختلف اتصالات. بدین ترتیب، در مجموع ۴۳۲ نمونه اتصال در این تحقیق مورد تحلیل قرار گرفته است. در شکل (۱)، ابعاد هندسی اتصالات نشان داده شده است. مطابق این شکل، در جدول (۱)، مشخصات هندسی انواع اتصالاتی که در این تحقیق تحلیل شده و برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته، خلاصه شده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی اتصالات مورد بررسی مطابق با شکل (۱).

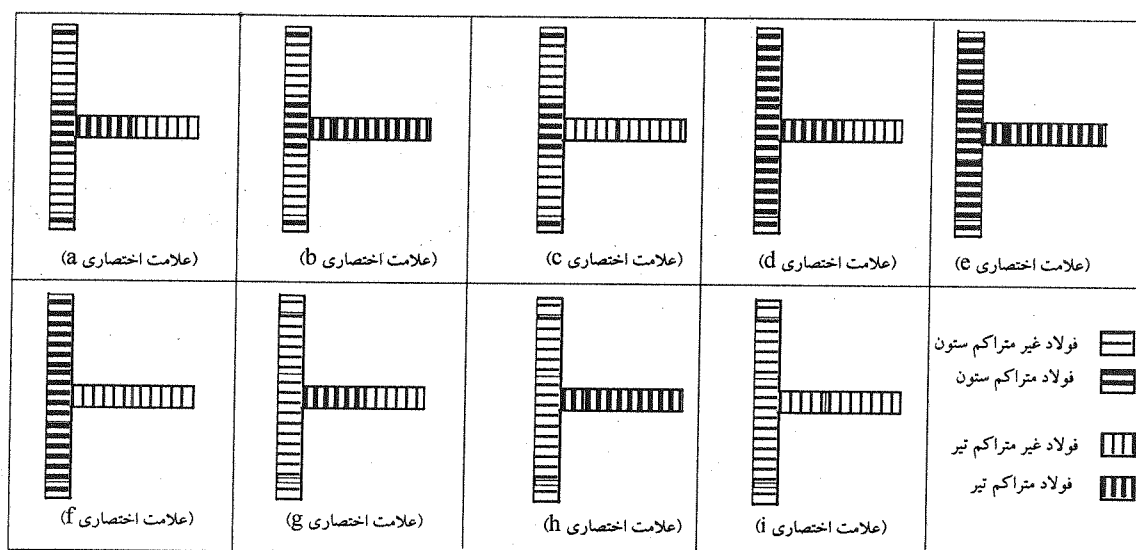
نوع اتصال	h_b (mm)	b_b (mm)	h_c (mm)	b_c (mm)
C1	300	300	300	300
C2	300	300	500	500
C3	500	500	500	500
C4	500	300	300	300



شکل (۱) مشخصات هندسی اتصالات؛ (الف) نمای جانبی؛ (ب) مقطع ستون؛ (ج) مقطع تیر.

– میزان فولادهای طولی و عرضی

برای هر چهار نمونه اتصال معرفی شده در جدول (۱)، دو درصد مختلف فولاد طولی برای هر کدام از تیر و ستون متصل به اتصال مورد استفاده قرار گرفته است. برای ستونهای اتصالات، ۱ و ۴ درصد و برای تیر، ۱ و ۲ درصد فولاد طولی انتخاب شده است. انتخاب فولاد عرضی برای اتصالات، بر اساس توصیه‌های فصل ۲۱ از آیین نامه بتن آمریکا (ACI) انجام گرفته است [۶]. میزان این فولاد، در جدول (۲) ذکر گردیده است. در هر چهار نمونه، از سه درصد مختلف فولاد به عنوان فولاد عرضی استفاده شده است. اولین انتخاب برای فولاد عرضی، مقداری است که بر اساس آیین نامه بدست می‌آید. دو انتخاب بعدی فولاد عرضی، دو و سه چهارم برابر میزان فولادی است که با توجه به ضوابط آیین نامه برای اتصالات بدست می‌آید. بر اساس توصیه‌های آیین نامه ACI، جهت حصول شکل پذیری مناسب در اتصالات، دو ناحیه فولادگذاری عرضی در اجزای متصل به اتصال وجود دارد؛ یکی ناحیه متراکم در نزدیکی اتصال و دیگری ناحیه غیر متراکم. در این تحقیق، علاوه بر استفاده از فولادگذاری عرضی منطبق بر توصیه فوق الذکر، از انواع دیگری از نحوه توزیع فولادهای عرضی نیز استفاده شده است؛ به صورتیکه در بعضی از حالات، در نواحی دور از اتصال، از فولادگذاری عرضی متراکم استفاده شده؛ و همچنین در بعضی از حالات دیگر، در نواحی نزدیک اتصال، از فولادگذاری معمولی (غیر متراکم) استفاده گردیده است. بدین ترتیب، برای هر اتصال، ۹ حالت مختلف فولادگذاری عرضی مطابق شکل (۲) بوجود می‌آید. برای بیان هر حالت از جزئیات فولادهای عرضی، در شکل (۲)، از علامتهای a, b, c, d, e, f, g, h, i استفاده شده است.



شکل (۲) نمایش انواع فولاد عرضی در نواحی مختلف تیر و ستون در نمونه‌های اتصال C1, C2, C3 و C4.

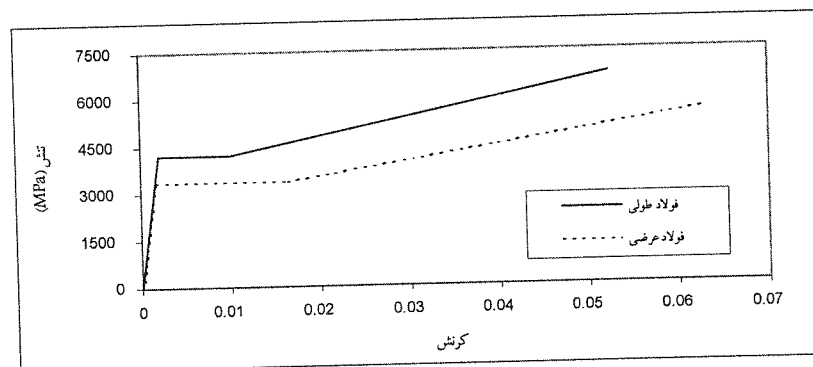
جدول (۲) میزان فولاد عرضی در نواحی مختلف اتصالات بر اساس محدودیت‌های آیین نامه ACI.

محل فولاد گذاری	ابعاد سطح مقطع (mm)	مساحت فولاد عرضی (mm ²)	فاصله بین فولادهای عرضی (mm)	درصد حجمی فولاد عرضی
ناحیه متراکم تیر	300×300	78.5	62.5	1
	300×500	78.5	112.5	0.6
ناحیه غیر متراکم تیر	300×300	78.5	125	0.5
	300×500	78.5	225	0.3
ناحیه متراکم ستون	300×300	360	75	4
	500×500	437	96	2.1
ناحیه غیر متراکم ستون	300×300	360	250	1.2
	500×500	437	250	0.8

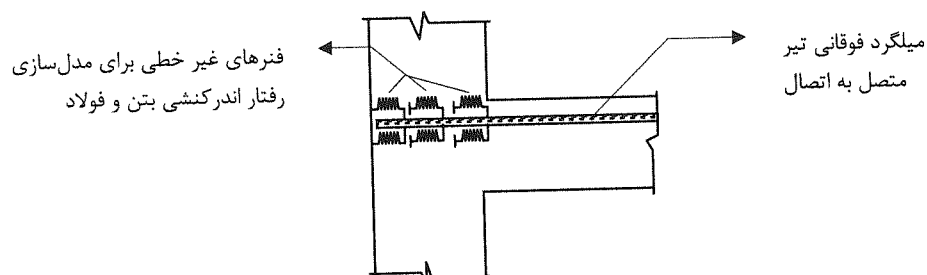
۲- نحوه مدل سازی و تحلیل اتصالات

برای مدل سازی سه بعدی و تحلیل اتصالات بتن آرمه از نرم افزار تحلیل اجزاء محدود ANSYS استفاده شده است. برای معرفی مصالح بتنی، از المان‌های شش وجهی با معیار شکست William-Warnk که یک معیار شکست ۵ پارامتری با قابلیت شکست بتن در فشار و ترک خوردن در کشش است، استفاده گردیده است. برای فولادهای طولی و عرضی اتصالات، از منحنی تنش کرنش مطابق با شکل (۳) استفاده شده است. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن به ترتیب ۳۰ و ۲۷۳۶۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

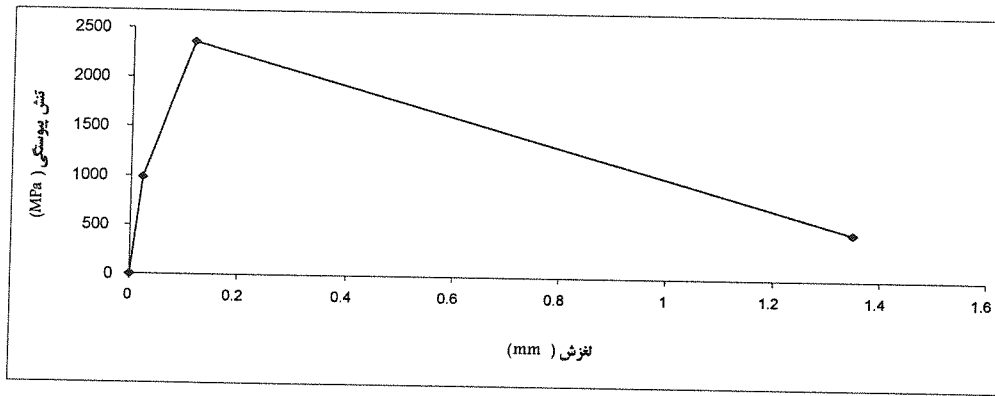
ایده‌ای که در این تحقیق برای تحلیل اتصالات مورد استفاده قرار گرفت و در عمل نیز رضایت بخش بود، استفاده از فنرهای غیر خطی برای برقراری ارتباط بین بتن و فولاد است. شکل (۴)، نشانگر نحوه مدل سازی رابطه بتن و فولاد با استفاده از فنر غیر خطی می‌باشد. البته آنچه که در شکل (۴) نشان داده شده است، تنها نمایش کلی و دو بعدی از مدل می‌باشد؛ اما آنچه که در عمل استفاده شده است، شکل سه بعدی از این مدل است. در حقیقت فلسفه کار چنین است که در ناحیه اتصال، احجام فولاد و بتن بطور کامل از یکدیگر جدا شده و سپس با استفاده از مجموعه‌ای از این فنرها، ارتباط بین فولاد و بتن برقرار گردد. با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [۷]، مدل رفتاری فنرها مطابق شکل (۵) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳) منحنی تنش-کرنش برای فولادهای طولی و عرضی اتصالات.



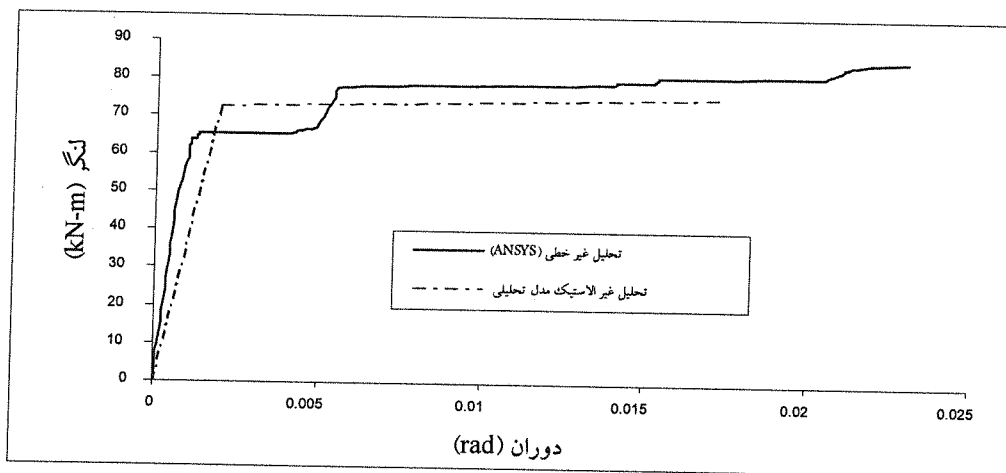
شکل (۴) نمایش دو بعدی ارتباط بتن و فولاد با فنر غیر خطی.



شکل (۵) نمودار تنش پیوستگی-لغزش برای فنر غیر خطی.

۳- ارزیابی مدل و تحلیل غیر خطی

جهت ارزیابی مدل سازی مورد اشاره در تحلیل غیر خطی با Ansys، اتصالی با مشخصات کلی نشان داده شده در شکل (۱) و با ابعاد 300×300 mm برای تیر و ستون در نظر گرفته شد. فولاد کششی تیر در این اتصال برابر با 750 mm^2 و تنش تسلیم آن برابر $f_y = 422.5 \text{ MPa}$ فرض شد. همچنین مقاومت فشاری بتن برابر $f'_c = 30 \text{ MPa}$ و مقاومت کششی آن برابر $f'_t = 3 \text{ MPa}$ منظور گردید. نمودار لنگر- دوران مورد نظر در کنار اتصال، با تحلیل غیر خطی به کمک نرم افزار Ansys رسم شد. همچنین نمودار لنگر- دوران همین نمونه بر اساس روابط تحلیلی غیر الاستیک و با منظور نمودن لغزش مهار میله‌گردها صورت گرفت که خواننده می‌تواند برای اطلاع از جزئیات آن به مرجع [۸] مراجعه کند. منحنی لنگر- دوران مورد نظر بر اساس تحلیل‌های فوق‌الذکر در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل (۶) مقایسه منحنی لنگر- دوران بدست آمده از تحلیل غیر خطی با نرم افزار ANSYS و تحلیل غیر الاستیک با در نظر داشتن پدیده لغزش مهار.

همانگونه که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، این دو منحنی از نظر رفتار کلی شبیه یکدیگر هستند. با این وجود در بعضی از قسمت‌ها تفاوت‌هایی نیز وجود دارد که این مساله را می‌توان به مسائلی همچون منظور نمودن ترک خوردگی بتن و نیز منظور نمودن فولادهای عرضی در محاسبات بر اساس روابط تحلیلی غیر خطی نسبت داد. لازم به ذکر است که جهت اطمینان بیشتر از صحت مدل سازی و تحلیل غیر خطی با نرم افزار Ansys، بعضی از نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۷] نیز مورد تحلیل غیر خطی با نرم افزار قرار گرفت و تطابق خوبی با نتایج تجربی مشاهده شد که جزئیات کامل این بررسی را می‌توان در مرجع [۸] ملاحظه نمود.

۴- نتایج مورد استفاده از تحلیل‌های غیر خطی

از آنجا که هدف این تحقیق عمدتاً بررسی رفتار اتصالات بتن آرمه بوده است، برای تمرکز بر این هدف معیارهای زیر مد نظر قرار گرفتند:

- (الف) لنگر مقاوم نهایی؛ منظور از لنگر مقاوم نهایی اتصال، بیشترین لنگری است که توسط مجموعه اتصال تحمل می‌شود.
- (ب) دوران نهایی؛ منظور از دوران نهایی اتصال، دورانی است که تحت اثر لنگر مقاوم نهایی بوجود می‌آید.
- (ج) عملکرد اتصال؛ عملکرد یک اتصال عبارتست از نسبت لنگر مقاوم نهایی اتصال (لنگر نهایی که توسط مجموعه اتصال شامل تیر و ستون تحمل می‌شود و از نتایج تحلیل‌های غیر خطی اجزاء محدود حاصل می‌شود)، به لنگر پلاستیک تیر متصل به اتصال که بر حسب درصد بیان می‌شود [۹].
- (د) منحنی لنگر- دوران اتصال.

برای رسیدن به یک پیش‌بینی مناسب از رفتار انواع اتصالات بتن آرمه به کمک شبکه‌های عصبی، لازم بود که حالات متنوعی برای اجزاء اتصال در نظر گرفته شود. به همین دلیل همانگونه که در قسمت ۱ توضیح داده شد، ۴ نوع اتصال از نظر ابعاد، ۲ مقدار فولاد طولی تیر، ۲ مقدار فولاد طولی ستون، ۹ آرایش مختلف برای فولادهای عرضی، و ۳ مقدار مختلف برای فولاد عرضی منظور شد که جمعاً به ۴۳۲ اتصال بتن آرمه بالغ می‌شود. مقادیر لنگر مقاوم نهایی اتصال، دوران نهایی اتصال، عملکرد اتصال، و منحنی لنگر- دوران برای کلیه اتصالات مورد اشاره محاسبه گردید و در آموزش و آزمایش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت. در این مقاله به جهت اختصار، از آوردن پارامترهای محاسبه شده مربوط به هر یک از انواع اتصالات مورد اشاره خودداری شده است. این مجموعه ارزشمند اطلاعات در مرجع [۸] قابل دستیابی است.

۵- شبکه عصبی مورد استفاده

۵-۱- کلیاتی از شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از سیستم بیولوژیکی، همانند سیستم عصبی انسان مدل‌سازی شده است. هر شبکه عصبی عموماً شامل دو یا تعداد بیشتری لایه می‌باشد. دو لایه ضروری شامل لایه ورودی و لایه خروجی می‌باشد. لایه‌های دیگر شبکه، به نام لایه‌های مخفی مشهور است.

داده‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی ابتدا با وزن‌های متفاوت با یکدیگر جمع شده و بر روی حاصل جمع (n)، یک تابع تحریک اعمال می‌شود. تابع تحریک ممکن است انواع متفاوتی داشته باشد که نوع سیگموئیدی آن به صورت $1/(1+e^{-n})$ و نوع تانژانت هیپربولیکی آن به صورت $(e^n - e^{-n})/(e^n + e^{-n})$ کاربرد بیشتری دارند.

آموزش شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا (BP) از نوع یادگیری با نظارت می‌باشد. قانون پس انتشار خطا از دو مسیر اصلی تشکیل می‌شود. مسیر اول موسوم به مسیر رفت می‌باشد که در این مسیر، بردار ورودی به شبکه اعمال می‌شود و با تأثیر وزن سلول‌ها، بردار خروجی تشکیل یافته و در لایه خروجی، پاسخ شبکه به ورودی آن بدست می‌آید. در این مسیر پارامترهای شبکه ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته می‌شوند. مسیر دوم موسوم به مسیر برگشت می‌باشد. در این مسیر برعکس مسیر رفت، پارامترهای شبکه تغییر یافته و تنظیم می‌گردند. این تنظیم با قانون اصلاح خطا انجام می‌گیرد. میزان خطا، در لایه خروجی شبکه، تشکیل می‌گردد. مقدار خطا، پس از محاسبه در مسیر برگشت از لایه خروجی و از طریق لایه‌های شبکه در کل شبکه توزیع می‌گردد. پارامترهای شبکه طوری تنظیم می‌شوند که پاسخ واقعی شبکه هر چه بیشتر به سمت پاسخ مطلوب نزدیکتر شوند.

میزان یادگیری شبکه از طریق پارامترها و روشهای مختلفی سنجیده می‌شود که از جمله می‌توان به معیار جذر میانگین مربعات خطاها و نیز معیار ضریب همبستگی بین خروجی‌های حقیقی و دلخواه اشاره نمود. منظور از جذر میانگین مربعات خطاها (RMS) در یک شبکه، جذر میانگین مربع خطاهای ایجاد شده بین خروجی‌های حقیقی و دلخواه لایه خروجی است. با استفاده از این معیار، نحوه یادگیری شبکه عصبی کنترل می‌شود. هر چه این مقدار بیشتر کاهش یابد، شبکه بهتر آموزش دیده است. به عبارت دیگر، طی آموزش شبکه، کاهش مقدار

RMS، نشان دهنده روند رو به رشد شبکه در میزان یادگیری است. همچنین ضریب همبستگی بین خروجی‌های حقیقی و دلخواه از دسته آموزشی و آزمایشی نیز به عنوان معیاری برای سنجش میزان یادگیری و عملکرد یک شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این ضریب برای هر دو اطلاعات موجود در دسته آموزش و آزمایش به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان یادگیری و عملکرد شبکه نیز بهتر است [۱۰].

۵-۲- نرم افزار مورد استفاده برای آموزش شبکه

در این تحقیق برای آموزش شبکه، از نرم افزار Neural Works استفاده شده است. این نرم افزار در سال ۱۹۹۱ توسعه یافته و با داشتن قابلیت‌های تخصصی در زمینه شبکه‌های عصبی، امکانات گسترده‌ای برای ساخت و تغییر ساختار شبکه عصبی فراهم می‌کند. این نرم افزار برای آموزش شبکه، از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده می‌کند. توابع تحریک مختلفی از جمله تانژانت هیپربولیک و سیگموئیدی در این نرم‌افزار وجود دارند که از آنها برای آموزش شبکه می‌توان استفاده نمود. نرم‌افزار Neural Works، قابلیت ترسیم منحنی RMS در حین آموزش شبکه را داشته و این امکان را به کاربر می‌دهد که با مشاهده میزان خطا حین آموزش، همگرایی آن را کنترل کند.

۵-۳- شبکه عصبی برای پیش‌بینی دوران اتصالات

مشخصات کلی شبکه عصبی برای پیش‌بینی دوران یک اتصال به صورت زیر در نظر گرفته شد:

الف - ورودی‌های شبکه عصبی

- | | |
|--|---|
| (۱) عرض تیر | (۲) ارتفاع تیر |
| (۳) عرض ستون | (۴) ارتفاع ستون |
| (۵) درصد فولاد طولی تیر | (۶) درصد فولاد طولی ستون |
| (۷) درصد فولاد عرضی تیر در ناحیه غیر متراکم | (۸) درصد فولاد عرضی تیر در ناحیه متراکم |
| (۹) درصد فولاد عرضی ستون در ناحیه غیر متراکم | (۱۰) درصد فولاد عرضی ستون در ناحیه متراکم |
| (۱۱) لنگر وارده | |

ب - خروجی شبکه

- دوران ناشی از لنگر وارده

با توجه به تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها، شبکه عصبی دارای ۱۱ سلول در لایه ورودی و ۱ سلول در لایه خروجی خواهد بود. برای آموزش شبکه از اطلاعات ۳۴۱ نمونه، و برای آزمایش شبکه از اطلاعات ۷۰ نمونه استفاده شده است. تعداد زیاد نمونه‌ها برای آموزش و آزمایش شبکه به دلیل تعداد زیاد پارامترهای ورودی و تنوع گسترده اتصالات در نظر گرفته شده اجتناب ناپذیر بوده است. قابل ذکر است که انتخاب نمونه‌های آموزشی و آزمایشی، به صورت تصادفی بوده و معیار خاصی برای انتخاب آنها در نظر گرفته نشده است.

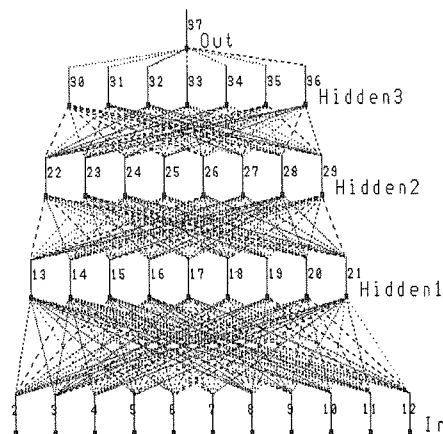
برای تشکیل انواع مختلف ساختار برای شبکه عصبی، حداکثر سه لایه پنهان در نظر گرفته شد که تعداد سلول‌های موجود در لایه اول بین ۶ تا ۱۰، در لایه دوم بین ۶ تا ۸ و در لایه سوم بین ۵ تا ۸ سلول بود. خصوصیات هر کدام از ساختارهایی که برای پیش‌بینی دوران اتصالات در نظر گرفته شده‌اند، بطور خلاصه در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول، تعداد لایه‌های شبکه شامل لایه‌های ورودی، خروجی و پنهان ذکر گردیده است. تعداد سلول‌ها در هر لایه نیز در این جدول آورده شده است. در جدول (۴)، با استفاده از دو عبارت T و S نوع تابع تحریک بکار رفته در هر شبکه بیان شده است. عبارات T و S به ترتیب معرف تابع تحریک تانژانت هیپربولیک و سیگموئید می‌باشد. همچنین در این جدول، خلاصه نتایج مربوط به آموزش هر شبکه با توابع تحریک مختلف آورده شده است.

با مقایسه نتایج بدست آمده در جدول (۴)، و با توجه به مقدار خطاها و همچنین ضرایب همبستگی برای دسته‌های آموزشی و آزمایشی، مناسب‌ترین ساختار، مربوط به شبکه NR6-S می‌باشد. این شبکه، دارای سه لایه پنهان می‌باشد که به ترتیب هر کدام دارای ۹، ۸ و ۷ سلول می‌باشند. در این شبکه از توابع تحریک سیگموئیدی استفاده شده است. شکل (۷)

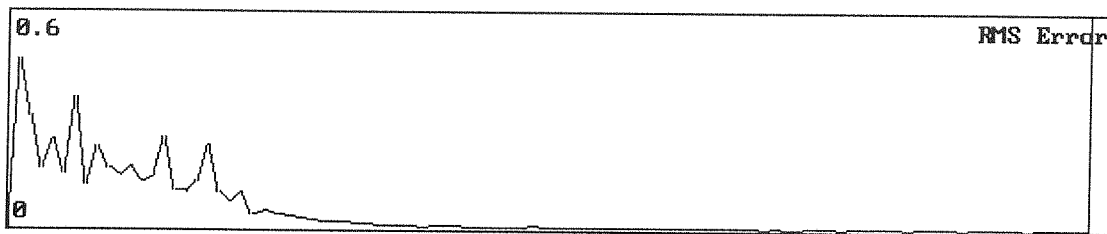
لایه‌بندی این شبکه که بهترین رفتار را در پیش‌بینی دوران اتصالات داشته است، نشان می‌دهد. در شکل (۸)، منحنی RMS آموزش شبکه نشان داده شده است. محورهای افقی و قائم این منحنی به ترتیب دوره (اپوک) و مقدار RMS برای دسته‌های آموزشی می‌باشد. مقدار ضرایب همبستگی برای دسته‌های آموزشی و آزمایشی به ترتیب ۰/۹۹۶۴ و ۰/۹۸۰۲ بوده و مجذور مربعات خطا برای دسته‌های آموزشی و آزمایشی آن به ترتیب، ۰/۱۳۵ و ۰/۲۰۳ می‌باشد.

جدول (۴) مشخصات شبکه‌های عصبی مختلف برای پیش‌بینی دوران اتصالات بتن آرمة خارجی.

RMS	ضریب همبستگی بین خروجی‌های شبکه عصبی و داده‌های واقعی برای			تعداد سلول‌های عصبی در لایه‌های شبکه					تعداد لایه‌های پنهان شبکه	نام شبکه
	دسته آموزشی	دسته آزمایشی	دسته آموزشی	خروجی	پنهان ۳	پنهان ۲	پنهان ۱	ورودی		
۰/۰۴۸۷	۰/۰۴۳۶	۰/۹۵۰۹	۰/۹۶۳۵	۱	۰	۶	۸	۱۱	۲	NR1-T
۰/۰۴۵۱	۰/۰۴۰۵	۰/۹۵۸۱	۰/۹۶۹۷	۱	۰	۶	۸	۱۱	۲	NR1-S
۰/۰۲۹۴	۰/۰۲۱۹	۰/۹۷۹۸	۰/۹۹۷۰	۱	۶	۶	۸	۱۱	۳	NR2-T
۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۱۹۴	۰/۹۸۶۳	۰/۹۹۷۵	۱	۶	۶	۸	۱۱	۳	NR2-S
۰/۰۳۹۴	۰/۰۳۱۶	۰/۹۷۰۹	۰/۹۸۰۱	۱	۰	۸	۱۰	۱۱	۲	NR3-T
۰/۰۳۲۱	۰/۰۲۹۵	۰/۹۷۳۹	۰/۹۸۹۰	۱	۰	۸	۱۰	۱۱	۲	NR3-S
۰/۰۳۴۹	۰/۰۳۲۴	۰/۹۷۶۹	۰/۹۸۰۳	۱	۵	۷	۶	۱۱	۳	NR4-T
۰/۰۳۷۹	۰/۰۳۳۵	۰/۹۸۱۷	۰/۹۸۸۶	۱	۵	۷	۶	۱۱	۳	NR4-S
۰/۰۲۹۴	۰/۰۲۱۹	۰/۹۷۷۹	۰/۹۸۸۴	۱	۵	۶	۷	۱۱	۳	NR5-T
۰/۰۲۱۶	۰/۰۱۹۸	۰/۹۸۰۹	۰/۹۹۲۵	۱	۵	۶	۷	۱۱	۳	NR5-S
۰/۰۲۰۳	۰/۰۱۳۵	۰/۹۸۱۲	۰/۹۹۶۴	۱	۷	۸	۹	۱۱	۳	NR6-T
۰/۰۱۷۶	۰/۰۱۲۱	۰/۹۸۸۱	۰/۹۹۸۶	۱	۷	۸	۹	۱۱	۳	NR6-S
۰/۰۳۱۵	۰/۰۲۸۰	۰/۹۸۱۱	۰/۹۸۵۰	۱	۸	۶	۷	۱۱	۳	NR7-T
۰/۰۳۴۹	۰/۰۳۰۷	۰/۹۸۰۸	۰/۹۸۱۵	۱	۸	۶	۷	۱۱	۳	NR7-S
۰/۰۲۷۵	۰/۰۰۲۰۶	۰/۹۸۴۶	۰/۹۸۶۱	۱	۸	۸	۱۰	۱۱	۳	NR8-T
۰/۰۲۶۱	۰/۰۱۹۵	۰/۹۸۷۷	۰/۹۸۸۴	۱	۸	۸	۱۰	۱۱	۳	NR8-S



شکل (۷) ساختار لایه‌بندی شبکه بهینه در پیش‌بینی دوران اتصالات (شبکه NR6-S).



شکل (۸) منحنی جذر مربعات خطا در جریان آموزش (منحنی RMS) برای شبکه NR6-S.

۵-۴- شبکه عصبی برای پیش‌بینی لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات بتن آرمه

در بخش قبل، با آموزش شبکه عصبی NR6-S، امکان استخراج نقاط مختلف منحنی لنگر- دوران برای یک اتصال بتن آرمه مشخص فراهم گردید؛ اما این شبکه تنها قادر است نقاط میانی منحنی لنگر- دوران را پیش‌بینی کند و نقطه انتهایی منحنی را با استفاده از این شبکه نمی‌توان بدست آورد. برای کامل نمودن منحنی لنگر- دوران، شبکه عصبی دیگری با ساختار متفاوت، برای پیش‌بینی نقاط انتهایی منحنی لنگر- دوران مورد نیاز است. این شبکه باید قادر باشد با دریافت مشخصات یک اتصال، لنگر مقاوم نهایی و همچنین دوران نهایی اتصالات را پیش‌بینی کند. بنابراین، برای پیش‌بینی این پارامترها، شبکه عصبی با مشخصات کلی زیر را در نظر می‌گیریم:

الف - ورودی‌های شبکه عصبی

- | | |
|--|---|
| (۱) عرض تیر | (۲) ارتفاع تیر |
| (۳) عرض ستون | (۴) ارتفاع ستون |
| (۵) درصد فولاد طولی تیر | (۶) درصد فولاد طولی ستون |
| (۷) درصد فولاد عرضی تیر در ناحیه غیر متراکم | (۸) درصد فولاد عرضی تیر در ناحیه متراکم |
| (۹) درصد فولاد عرضی ستون در ناحیه غیر متراکم | (۱۰) درصد فولاد عرضی ستون در ناحیه متراکم |

ب - خروجی شبکه

- | | | |
|-----------------------|----------------------------|------------------|
| (۱) دوران نهایی اتصال | (۲) لنگر مقاوم نهایی اتصال | (۳) عملکرد اتصال |
|-----------------------|----------------------------|------------------|

با توجه به تعداد ورودیها و خروجیها، شبکه عصبی دارای ۱۰ سلول در لایه ورودی و ۳ سلول در لایه خروجی خواهد بود. برای آموزش این شبکه از اطلاعات ۳۶۰ نمونه، و برای آزمایش شبکه از اطلاعات ۷۲ نمونه استفاده شده است. در این مورد نیز تعداد زیاد نمونه‌ها برای آموزش و آزمایش شبکه به دلیل تعداد زیاد پارامترهای ورودی و تنوع گسترده اتصالات در نظر گرفته شده اجتناب ناپذیر بوده است.

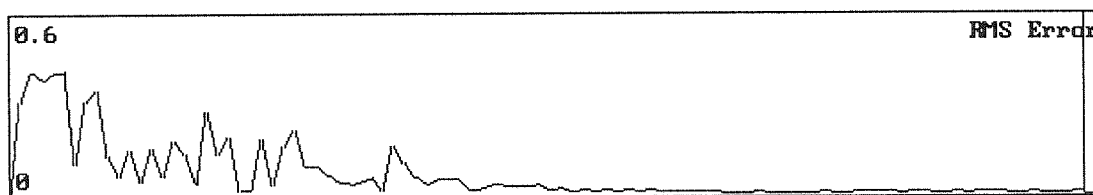
برای ساخت یک شبکه عصبی که بتواند چنین پیش‌بینی را انجام دهد، ابتدا باید همانند گذشته، ساختارهای مختلفی را برای شبکه عصبی در نظر گرفته و آنها را آموزش داده و آزمایش کنیم تا مناسب‌ترین ساختار بدست آید. البته باید توجه داشت که ساختاری که در اینجا به عنوان مناسب‌ترین ساختار برای شبکه عصبی ارائه می‌شود، لزوماً یک ساختار بهینه نخواهد بود. زیرا در واقعیت بدست آوردن چنین شبکه‌ای نوعی مسئله بهینه‌سازی بوده و با تعداد شبکه کمی که مورد آزمایش قرار می‌گیرد، نمی‌توان جواب بهینه را پیدا نمود. در عمل، برای بدست آوردن چنین ساختاری نیاز به الگوریتم‌های ژنتیکی (و یا راه حل‌های مناسب دیگر) است که خود مستلزم مطالعات و تحقیقات جداگانه‌ای است.

ساختاری که برای پیش‌بینی لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و همچنین میزان عملکرد اتصالات در نظر گرفته می‌شود، دارای ۱۰ سلول در لایه ورودی و ۳ سلول در لایه خروجی است. در این مورد برای بدست آوردن یک ساختار مناسب برای شبکه عصبی، سه ساختار با دو لایه پنهان و سه ساختار با سه لایه پنهان در نظر می‌گیریم. در جدول (۵)، مشخصات شبکه‌ها شامل تعداد لایه‌های شبکه، تعداد سلول‌ها در هر لایه و همچنین تابع تحریک مورد استفاده در آموزش هر شبکه خلاصه شده است. در این جدول نیز منظور از عبارات T و S، که در انتهای نام شبکه به کار رفته است، به ترتیب تابع تحریک تانژانت هیپربولیکی و سیگموئیدی می‌باشد.

جدول (۵) مشخصات شبکه‌های عصبی مختلف برای پیش‌بینی دوران نهایی،
لنگر مقاوم نهایی و عملکرد اتصالات بتن آرمه خارجی.

RMS	ضریب همبستگی بین خروجی‌های شبکه عصبی و داده‌های واقعی برای				تعداد سلول‌های عصبی در لایه‌های شبکه				تعداد لایه‌های پنهان شبکه	نام شبکه
	دسته آموزشی	دسته آزمایشی	دسته آموزشی	دسته آزمایشی	خروجی	پنهان ۳	پنهان ۲	پنهان ۱		
۰/۰۳۵۲	۰/۰۳۰۹	۰/۹۶۸۸	۰/۹۷۳۶	۳	۰	۹	۹	۱۰	۲	NMT1-S
۰/۰۳۸۳	۰/۰۳۱۹	۰/۹۶۷۳	۰/۹۷۰۶	۳	۰	۹	۹	۱۰	۲	NMT1-T
۰/۰۲۲۹	۰/۰۱۹۴	۰/۹۶۹۱	۰/۹۷۴۴	۳	۰	۹	۱۰	۱۰	۲	NMT2-S
۰/۰۲۷۷	۰/۰۲۱۹	۰/۹۶۷۸	۰/۹۷۳۳	۳	۰	۹	۱۰	۱۰	۲	NMT2-T
۰/۰۳۸۸	۰/۰۲۹۵	۰/۹۶۳۶	۰/۹۷۱۴	۳	۰	۱۰	۹	۱۰	۲	NMT3-S
۰/۰۴۱۱	۰/۰۳۱۶	۰/۹۶۲۱	۰/۹۷۰۸	۳	۰	۱۰	۹	۱۰	۲	NMT3-T
۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۰۸	۰/۹۸۵۴	۰/۹۹۷۱	۳	۹	۹	۹	۱۰	۳	NMT4-S
۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۳۲	۰/۹۷۸۹	۰/۹۸۵۲	۳	۹	۹	۹	۱۰	۳	NMT4-T
۰/۰۱۵۳	۰/۰۱۲۶	۰/۹۷۱۵	۰/۹۸۷۵	۳	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۳	NMT5-S
۰/۰۲۰۹	۰/۰۱۴۹	۰/۹۷۰۸	۰/۹۸۳۶	۳	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۳	NMT5-T
۰/۰۳۶۸	۰/۰۲۵۳	۰/۹۶۹۷	۰/۹۸۰۷	۳	۹	۸	۱۰	۱۰	۳	NMT6-S
۰/۰۳۸۹	۰/۰۲۸۵	۰/۹۶۷۸	۰/۹۷۹۸	۳	۹	۸	۱۰	۱۰	۳	NMT6-T

نتایج آموزش و آزمایش شبکه‌های مختلف به کار گرفته شده در جدول (۵) خلاصه شده است. با مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که شبکه NMT4-S دارای مناسب‌ترین عملکرد می‌باشد. البته در این جدول شبکه‌های دیگری نیز مشاهده می‌شود که دارای عملکرد خوبی هستند. به عنوان نمونه، ساختار چهار لایه‌ای NMT2-S نیز دارای عملکرد خوبی است؛ اما با توجه به عملکرد نسبی بهتر شبکه NMT4-S، این شبکه برای پیش‌بینی رفتار اتصالات انتخاب شده است. شبکه NMT4-S دارای ساختار پنج لایه‌ای شامل یک لایه ورودی و یک لایه خروجی می‌باشد که به ترتیب هر کدام دارای ۱۰ و ۳ سلول می‌باشند. این شبکه دارای سه لایه پنهان است که هر کدام دارای ۹ سلول می‌باشند. مقدار ضرایب همبستگی برای دسته‌های آموزشی و آزمایشی این شبکه، به ترتیب ۰/۹۹۷۱ و ۰/۹۸۵۴ بوده و مجذور مربعات خطا برای دسته‌های آموزشی و آزمایشی آن به ترتیب، ۰/۰۱۰۸ و ۰/۰۱۴۸ می‌باشد. در شکل (۹)، منحنی RMS آموزش شبکه نشان داده شده است.



شکل (۹) منحنی مربعات خطا در جریان آموزش (منحنی RMS) برای شبکه NMT4-S.

۶- استخراج منحنی لنگر- دوران اتصالات با استفاده از شبکه‌های آموزش یافته

در بخش‌های قبل دو شبکه عصبی مجزا برای پیش‌بینی نقاط مختلف از منحنی لنگر-دوران اتصالات و نیز پیش‌بینی لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات بتن آرمه آموزش داده شد. با استفاده توأم از این دو شبکه، می‌توان منحنی لنگر-دوران را به صورت کامل برای یک اتصال بتن آرمه بدست آورد. این منحنی به همراه میزان عملکرد اتصال که از شبکه

NMT4-S بدست می‌آید، معیارهای بسیار مناسب و تعیین کننده‌ای برای تبیین رفتار اتصالات بتن آرمه هستند. برای بدست آوردن منحنی لنگر-دوران یک اتصال بتن آرمه خارجی، مراحل زیر را باید دنبال نمود:

- با ارائه مشخصات اتصال به شبکه عصبی NMT4-S، دوران نهایی، لنگر مقاوم نهایی و میزان عملکرد اتصال را به عنوان خروجی این شبکه بدست می‌آوریم.

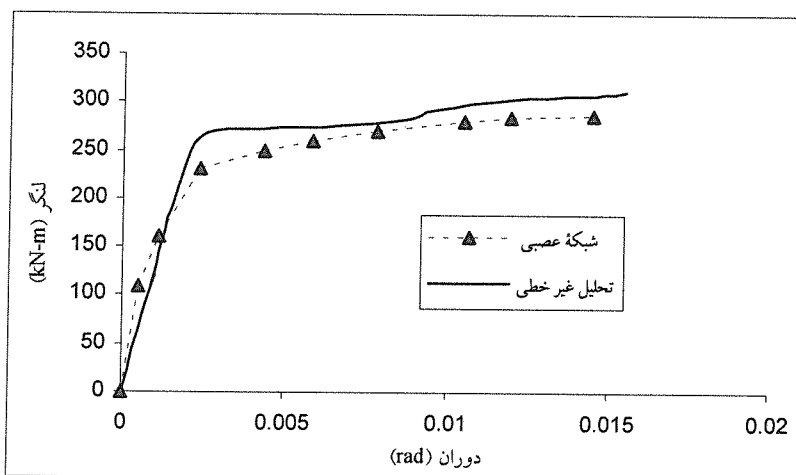
- با توجه به پاسخ شبکه به میزان لنگر مقاوم نهایی اتصال که در مرحله قبلی بدست آمد، به تعداد نقاطی از منحنی لنگر-دوران که مورد نیاز است، به شبکه عصبی NR6-S اطلاعات ورودی (مقادیر متفاوتی از لنگر که کوچکتر از لنگر مقاوم نهایی باشند) را وارد کرده و با استفاده از خروجی این شبکه که دوران اتصال در برابر لنگر وارده بر آن است، منحنی لنگر-دوران اتصالات تکمیل می‌شود.

برای روشن تر شدن مساله و به عنوان یک مثال، مشخصات یک نمونه اتصال خارجی را که در جدول (۶) آورده شده است، در نظر بگیرید. منحنی لنگر-دوران این نمونه اتصال که مشخصات آن متفاوت از مشخصات نمونه‌های آموزشی و آزمایشی مورد استفاده در تربیت شبکه‌های عصبی ذکر شده است را می‌توان با این روش بدست آورد.

در شکل (۱۰)، منحنی لنگر-دوران اتصال با مشخصات مندرج در جدول (۶) که توسط شبکه عصبی بدست آمده در مقابل نتایج مشابه برای تحلیل غیر خطی اتصال مشاهده می‌شود. از این مقایسه استنتاج می‌شود که شبکه عصبی تربیت یافته، قادر بوده است که به صورت رضایت بخش، منحنی لنگر-دوران اتصال را پیش‌بینی کند.

جدول (۶) مشخصات یک نمونه اتصال خارجی جهت معرفی به شبکه عصبی.

درصد فولاد عرضی ستون		درصد فولاد عرضی تیر		درصد فولاد طولی		ارتفاع ستون (mm)	عرض ستون (mm)	ارتفاع تیر (mm)	عرض تیر (mm)
در ناحیه متراکم	در ناحیه غیر متراکم	در ناحیه متراکم	در ناحیه غیر متراکم	ستون	تیر				
۰/۹	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۳	۱/۵	۴۲۰	۳۵۰	۳۶۵	۳۰۰



شکل (۱۰) منحنی لنگر-دوران اتصال با مشخصات جدول ۶؛ بدست آمده توسط شبکه‌های تربیت شده در این تحقیق (شبکه‌های NMT4-S و NR6-S) در مقایسه با نتایج تحلیل غیر خطی.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، برای پیش‌بینی رفتار لنگر-دوران اتصالات و همچنین لنگر مقاوم نهایی، دوران نهایی و عملکرد اتصالات بتن آرمه، از شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شد. ابتدا بانک اطلاعاتی جامعی از مشخصات رفتاری انواع اتصالات بتن آرمه (۴۳۲ حالت) بر اساس تحلیل غیر خطی اتصال فراهم شد. دو شبکه عصبی، یکی برای پیش‌بینی دوران اتصالات و دیگری برای پیش‌بینی میزان دوران نهایی، لنگر مقاوم نهایی و همچنین عملکرد اتصال بتن آرمه، آموزش یافت. در نهایت، روش استخراج منحنی لنگر-دوران اتصالات بتن آرمه خارجی با استفاده از این دو شبکه عصبی، ارائه

گردید. با توجه به عملکرد شبکه‌های عصبی که برای پیش‌بینی رفتار اتصالات بتن آرمه استفاده شد، نکات زیر قابل ذکر هستند:

- شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خصوصیات رفتاری اتصالات بتن آرمه نیز ابزار مناسبی هستند. در همین ارتباط، روش پس انتشار خطا می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر تلقی شود.
- در این تحقیق، شبکه‌های عصبی با سه لایه پنهان نسبت به شبکه‌های با دو لایه پنهان، و نیز تابع تحریک سیگموئیدی نسبت به تابع تحریک تانژانت هیپربولیک، در پیش‌بینی منحنی لنگر- دوران اتصال، عملکرد بهتری داشته است.
- استفاده از شبکه‌های عصبی تربیت شده در این تحقیق، این مکان را فراهم می‌کند که بدون انجام تحلیل غیر خطی اتصال که عموماً مستلزم صرف وقت و هزینه قابل توجهی می‌باشد، اطلاعات لازم برای پیش‌بینی واقع‌بینانه‌ای از رفتار یک اتصال بتن آرمه خارجی را بدست آورد.

مراجع

- [1] Fukuda, T., and Shibata, T., "Theory and Application of Neural Networks for Industrial Control Systems," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 39, No. 6, December, pp. 472-489 (1992).
- [2] Anderson, D., Hines, E. L., Arthur, S. J., and Eiap, E. L., "Application of Artificial Neural Networks to the Prediction of Minor Axis Steel Connections," *Computers & Structures*, Vol. 63, No. 4, pp. 685-692 (1997).
- [3] Chuang, P. H., Anthony, Goh, T. C., and Wu, X., "Modeling the Capacity of Pin Ended Slender Reinforced Concrete Columns Using Neural Networks," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 7, July, pp. 830-838 (1998).
- [4] Kaveh, A., Elhami, R., and Servati, H., "Prediction of Moment-Rotation Characteristic for Semi-Rigid Connections Using BP Neural Networks," *Asian Journal of Civil Engineering*, No. 2, 2, pp. 131-142, (2001).
- [5] Kaveh, A., Fazel-Dehkordi, D., and Servati, H., "Prediction of Moment-Rotation Characteristic for Saddle-Like Connections Using BP Neural Networks," *Asian Journal of Civil Engineering*, No. 3, 2, pp. 207-223, (2001).
- [6] ACI Building Code 318/318R-299: Chapter 21-Special Provision for Seismic Design, (2000).
- [7] Ueda, I. L., and Hawkins N. M., "Beam Bar Anchorage in Exterior Column-Beam Connections," *ACI Journal*, May-June, pp. 927-936 (1986).
- [8] سبحانی، ج.، بررسی رفتار اتصالات بتن آرمه خارجی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اسفند ۱۳۸۰.
- [9] Nilson, I. H. E., "Reinforced Concrete Corner and Joints Subjected to Bending Moment," National Swedish for Building Research, (1973).
- [۱۰] ثروتی، ه. و کاوه، ع. شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحلیل و طراحی سازه‌ها، انتشارات مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان، ۱۳۷۹.