http://journalisss.ir

تعیین عمر مفید باقی‌مانده ساختمان‌ها پس از وقوع زلزله
مطالعه موردی: تیرهای دو سر مفصل فولادی

موسی محمودی صاحبی[1*]، امیر زایری بغلانی‌نژاد[2]، محمدحسین دولتی[3]، عباس مهدیزاده لیما[4]

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

۳- کارشناس ارشد، مهندسی عمران-سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

٤- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱، m.mahmoudi@sru.ac.ir

چکیده

عمر مفید باقی‌مانده، نشان‌دهندهٔ مدت زمانی از حیات یک سازه است که بهره‌برداری ایمن از آن، پس از وقوع زلزله امکان‌پذیر باشد. با توجه به کاهش احتمالی مقاومت سازه در برابر زلزله‌های آتی در اثر آسیب‌دیدگی، تعریف شاخصی برای ارزیابی عملکرد سازه پس از زلزله، ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، روشی کارآمد جهت محاسبهٔ عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها با تمرکز بر تیرهای دوسر مفصل فولادی ارائه شده است. بدین منظور، حالات مختلف آسیب‌دیدهٔ این تیرها مدل‌سازی شده و با انجام تحلیل‌های مودال و بار افزون، پارامترهایی چون زمان تناوب و تغییرمکان ظرفیتی در سطح عملکرد ایمنی جانی استخراج گردید. سپس با بهره‌گیری از روابط احتمالاتی زلزله و مدل‌های کاهش‌دهنده، عمر مفید این المان‌ها محاسبه شد. در ادامه، با استفاده از شبکهٔ عصبی تحت نظارت، الگویی عددی برای تخمین عمر مفید تیرهای مشابه توسعه داده شد. نتایج حاصل، بیانگر توانمندی روش پیشنهادی در تخمین مؤثر عمر مفید تیرهای دوسر مفصل می‌باشد. لازم به ذکر است که این مطالعه با محدودیت‌هایی نظیر ساده‌سازی در مدل‌سازی عددی، عدم درنظرگرفتن رفتار غیرخطی پیچیدهٔ مصالح و چالش‌های تعمیم‌پذیری به سایر اجزای سازه‌ای همراه بوده است؛ لذا ضروری است که این موارد در تفسیر و کاربرد یافته‌ها مدنظر قرار گیرد.

واژگان کلیدی

عمر مفید باقی‌مانده، تیر دوسر مفصل، زلزله، تحلیل بار افزون، شبکهٔ عصبی مصنوعی

Determination of remaining useful life of building after an earthquake Case study: Hinged supported steel beams

M. Mahmoudi, A. Zayeri Baghlani Nejad, M.H. Dolati, A. Mehdizadeh Lima

Abstract

Remaining Useful Life (RUL) refers to the length of time a structure can be safely used after an earthquake. Given that seismic resistance may be reduced due to damage, defining a damage index to assess post-earthquake performance is essential. This study proposes an efficient method for calculating the RUL of simply supported steel beams. To achieve this, various damage states of these beams were modeled, and both modal and pushover analyses were conducted to extract parameters such as natural period and target displacement at the life safety performance level. Using probabilistic seismic hazard models and attenuation relationships, the RUL of these elements was estimated. The extracted data were then used to train a supervised artificial neural network to develop a numerical model for estimating the RUL of similar beams. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method in accurately predicting the RUL of simply supported beams. It should be noted that this study has limitations, such as simplifications in numerical modeling, exclusion of complex nonlinear material behavior, and challenges in generalizing the method to other structural components. Therefore, caution is advised when interpreting and applying the findings.

Keywords

Remaining Useful Life, Hinged Supported Beam, Earthquake, Pushover Analysis, Artificial Neural Network

۱- مقدمه

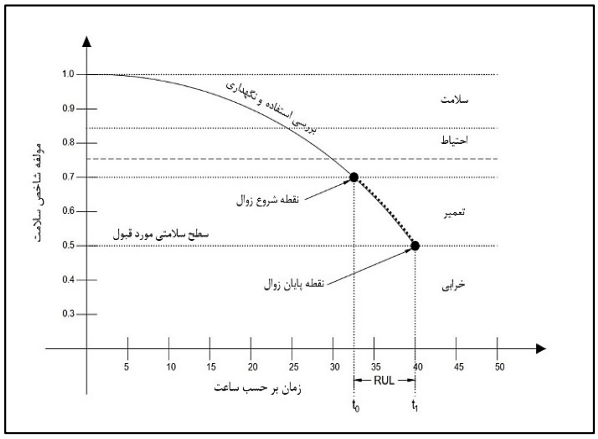
تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌های ساختمانی، امری مهم و ضروری است. دلیل این اهمیت را می‌توان در نقش مؤثر این کار در تسهیل برنامه‌ریزی‌های کلان‌شهری، اقتصادی و زیست‌محیطی یافت. از آن‌جایی که کشور ایران در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا قرار گرفته است و سالانه زلزله‌های زیادی با شدت‌های مختلف در آن رخ می‌دهد، اهمیت تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها پس از وقوع زلزله دوچندان می‌شود. درصورتی‌که بتوان عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها را پس از رخداد زلزله تعیین نمود، می‌توان در مورد نوع کاربری آیندهٔ سازه‌ها، تخریب کامل یا بهسازی و مقاوم‌سازی آن‌ها هوشمندانه‌تر تصمیم گرفت.

عوامل متعددی در تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها تأثیر گذار هستند که از میان آن‌ها می‌توان به خوردگی از نوع تغییر در مصالح در اثر واکنش‌های شیمیایی، زنگ‌زدگی به‌عنوان یکی از حالت های خوردگی، خستگی، تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند در اثر بارگذاری‌های مختلف ازجمله زلزله، تغییرات دمایی، وجود ترک در اعضای سازه‌ای و ... اشاره نمود؛ همچنین روش‌های ریاضی متنوعی برای تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها وجود دارد مانند روش‌های رگرسیون نمایی، شبکه‌های عصبی، ماشین بردار پشتیبان و وابسته و ... . [۱-۳].

در این پژوهش، با توجه به اهمیت برجستهٔ زلزله در طراحی و عملکرد اجزای سازه‌ای ساختمان‌ها و به‌منظور تعیین عمر مفید المان‌های سازه‌ای پس از وقوع زلزله، به بررسی عامل مؤثر زلزله بر عمر مفید باقی‌مانده پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، ارائهٔ یک روش کاربردی، ساده و قابل‌دسترس برای محاسبهٔ دقیق عمر مفید المان تیر پس از وقوع زلزله می‌باشد. این روش می‌تواند به مهندسان و طراحان کمک نماید تا با توجه به شرایط پس از زلزله، تصمیمات بهتری درخصوص تعمیرات و نگهداری سازه‌ها اتخاذ کنند و بهره‌وری و ایمنی ساختمان‌ها را افزایش دهند.

در سال ۲۰۱٤، اوکوه[1] و همکاران به بررسی عوامل مؤثر بر عمر مفید باقی‌مانده و روش‌های به‌دست‌آوردن عمر مفید باقی‌ماندهٔ جامدات پرداختند. در این تحقیق عوامل مؤثر بر عمر مفید باقی‌مانده ازجمله خوردگی، خستگی، تغییرشکل و گسیختگی در المان‌ها معرفی شد و همچنین یک دسته‌بندی کلی از روش‌های تعیین عمر مفید شامل روش‌های عددی، تحلیلی، میدانی و ترکیبی صورت گرفت [۱].

شکل (۱) شاخص سلامت ارائه‌شده توسط اوکوه و همکاران را نشان می‌دهد. در این شکل عمر مفید باقی‌مانده در فاصلهٔ زمانی بین نقطهٔ شروع زوال و پایان زوال نمایش داده شده است.



شکل ۱- معرفی شاخص سلامت المان ذکرشده در پژوهش اوکوه و همکاران [۱]

در سال ۲۰۰۹ دانیوتی[2] و همکاران به بررسی روش‌های تخمین عمر مفید باقی‌ماندهٔ اجزای تشکیل‌دهندهٔ ساختمان پرداختند. در این مقاله، ویژگی‌های روش تعیین عمر مفید باقی‌مانده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تلاش شد تا به کمک تعریف یک سری از فاکتورها و ویژگی‌های مخصوص المان‌های سازه‌ای، بتوان عمر مفید آن المان را تعیین نمود [۳].

طبق ISO 15686، عمر مفید باقی‌مانده به دوره‌ای اطلاق می‌شود که انتظار می‌رود یک المان یا سیستم، پس از ارزیابی شرایط فعلی، عملکرد قابل‌قبول خود را حفظ نماید. [٤].

در سال ۲۰۱۹ الکساندر[3] و بوشاسن[4] به بررسی عوامل مؤثر بر دوام سازه‌های بتن‌آرمه و پیش‌بینی عمر مفید آن‌ها پرداختند. در تحقیق مذکور مفهوم عمر مفید یک سازه، تعریف شده و عواملی که بر مقاومت فشاری بتن اثر دارند در نظر گرفته شد؛ همچنین یک مدل ابتدایی جهت تعیین یک فاکتور برای اجرای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه ارائه گردید. مدل ارائه‌شده بر اساس ترکیب توزیع‌های نرمال هر عامل مخرب تعریف شده است [۵].

به‌منظور ارائهٔ طرح‌های درست و بهینهٔ ترمیم و مقاوم‌سازی، نیاز است عواملی که بر کاهش عملکرد مطلوب ساختمان‌ها نقش دارند، به‌درستی شناخته شده و با تحلیل آن‌ها و اثراتشان بر

[1] Okoh

[2] Daniotti
[3] Alexander
[4] Beushausen

ساختمان، طرح مقاوم‌سازی صحیح را تنظیم نمود. ازجمله این موارد می‌توان به عوامل خارجی (مانند زلزله و آتش‌سوزی) و نیز عوامل ناشی از تغییر کاربری و تغییر در عملکرد ساختمان اشاره نمود. [٦].

در مقاله‌ی ارائه‌شده توسط کاوه و ایرانمنش، شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌منظور پردازش اطلاعات و داده‌های مربـوط به بهینه‌سازی سازه‌ها آموزش داده شده‌اند. [٧].

بر اساس مقالهٔ ارائه‌شده توسط امیدی‌نسب و عرب‌زاده در سال ١٣٨٢ که در خصوص پیش‌بینی مقاومت نهایی و عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیرهای عمیق بتن مسلح بود، از یک الگوریتم یادگیری ماشین به نام الگوریتم اصلاح‌شدهٔ انتشار برگشتی[1] استفاده شد [٨].

شبکه های عصبی مصنوعی با وجود این که با سیستم عصبی طبیعی قابل‌مقایسه نیستند، ویژگی‌هایی دارند کـه آن‌ها را در بعضی از کاربردها مانند تفکیک الگو، رباتیک، کنترل و به‌طورکلی در هر جا که نیاز به یـادگیری یک نگاشت خطی و یا غیرخطی باشد، ممتاز می‌نماید [٩]. شبکه‌های عصبی نقش مؤثری در پیش‌بینی دقیق عمر مفید باقی‌ماندهٔ اجزای صنعتی ایفا می‌کنند [١٠].

در سال ١٣٩٢ محمودی صاحبی و اعتضادی‌فر، شاخص عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه برای تشخیص و آسیب‌پذیری سازه‌ها را معرفی کردند. در این مقاله سه سازهٔ ٤، ٧ و ١٠ طبقه از نوع مهاربند ضربدری آسیب‌پذیر، مورد بررسی قرار گرفت و عمر مفید باقی‌ماندهٔ آن تخمین زده شد. نتایج حاصل از ارزیابی عمر مفید با مقدار پیشنهادی ٥٠ سال در آیین‌نامه‌ها، مقایسه شد. روش پیشنهادی در این مقاله، همان روش استفاده شده در تحقیق پیش‌رو و مبنای کار این پژوهش است. در مقالهٔ مذکور سعی شده بود با تلفیق مبحث تحلیل خطر لرزه‌ای[2] و تحلیل بارافزون شاخص جدیدی به نام «عمر مفید باقی‌ماندهٔ ساختمان» معرفی گردد. این شاخص می‌تواند به سهولت، میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها را بیان نماید. هنچنین به‌کمک این شاخص می‌توان زمان مناسب عملیات مقاوم‌سازی را با رعایت صرفهٔ اقتصادی مشخص نمود [١١].

درحالی‌که پژوهش مذکور، شاخص عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه را برای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها معرفی کرده است، روش پیشنهادی در این مطالعه با بهره‌گیری از شبکهٔ عصبی، امکان تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیر آسیب‌دیده را در هر نقطه از طول آن فراهم می‌نماید؛ که دقت و انعطاف‌پذیری بیش‌تری در تحلیل و پیش‌بینی رفتار سازه‌ای ارائه می‌دهد. مقالهٔ حاضر شامل چهار بخش اصلی خواهد بود. در بخش دوم به معرفی روش پیشنهادی، بخش سوم بررسی مطالعهٔ موردی و بخش چهارم شبکه‌های عصبی ارائه می‌گردد.

٢- روش پیشنهادی برای تعیین عمر مفید باقی‌مانده

الگوریتم تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ المان سازه‌ای در روش پیشنهادی در شش گام خلاصه می‌شود. این شش گام بر مبنای تحلیل استاتیکی غیرخطی و روابط گوتنبرگ ریشتر و توزیع پواسون تعیین شده‌اند.

گام ١- مدل‌سازی هندسی سازه و تعریف رفتار مصالح

در این گام، هندسهٔ سازه و مشخصات هندسی و مکانیکی، همچنین مشخصات مفصل پلاستیک و نیز مقاطع سالم و آسیب‌دیده در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود انجام می‌شود.

گام ٢- انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی

با ضوابط موجود در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها (نشریهٔ ٣٦٠) تحلیل استاتیکی خطی بر روی سازه‌ها انجام می‌شود. این تحلیل تا جایی ادامه می‌یابد که اولین مفصل پلاستیک تشکیل شده در عضو به عملکرد مورد انتظار برسد. در این مقاله عملکرد مورد انتظار، ایمنی جانی در نظر گرفته شده است.

گام ٣- محاسبه شتاب ظرفیتی سازه

به کمک روابط (١) و (٢) و مقادیر زمان تناوب و تغییرمکان ظرفیتی به‌دست‌آمده در گام ٢، شتاب ظرفیتی عضو سازه‌ای در عملکرد ایمنی جانی تعیین می‌شود.

$$\delta = C_0 C_1 C_2 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g \qquad (١)$$

$$S_a = aB \qquad (٢)$$

این فرمول مرتبط با تحلیل دینامیکی سازه‌ها است و معمولاً در مهندسی زلزله برای محاسبهٔ تغییرشکل‌ها یا پاسخ لرزه‌ای به‌کار می‌رود. در این معادلات (δ) تغییرمکان یا پاسخ لرزه‌ای سازه، (C_0) ضریب اصلاح برای تغییرمکان اولیه، (C_1) ضریب تأثیر شکل مود ارتعاشی، (C_2) ضریب غیرخطی‌بودن رفتار سازه، (S_a) شتاب طیفی در دوره تناوب مؤثر، (T_e) دوره تناوب مؤثر سازه، (g) شتاب گرانش زمین، (a) ضریب مقیاس‌گذاری یا تأثیر عوامل خاص و (B) ضریب وابسته به ویژگی‌های خاک، سازه یا طیف پاسخ لرزه‌ای می‌باشد. بااین‌حال، لازم به ذکر است که استفاده از رابطهٔ تغییرمکان هدف برای تیر دو سرمفصل، صرفاً در چارچوب تحلیل ساده‌شده و با فرضیات محدود انجام شده است و برای تحلیل

[1] Resilient Propagation.
[2] Seismic Hazard Analysis

دقیق‌تر و ارزیابی جامع رفتار غیرخطی سازه، نیاز به مدل‌سازی کامل و پیچیده‌تر می‌باشد. ازاین‌رو، نتایج حاصل از نمودارهای عمر مفید نیز در محدودهٔ شرایط فرض‌شده اعتبار دارند.

گام ٤- محاسبه بزرگای ظرفیتی سازه

به کمک روابط (٣) (رابطهٔ کاهندگی دنوان) و (٤) (رابطهٔ کاهندگی زارع)، بزرگای ظرفیتی عضو سازه‌ای محاسبه می‌شود [١٢].

$$a = 1080e^{0.5M}(R' + 25)^{-1.32} \quad (٣)$$

$$logA = aM + bX - logX + c_iS_i + \sigma p \quad (٤)$$

(a) مقدار شتاب یا عامل مقیاس‌گذاری طیفی، (M) بزرگی زلزله (Magnitude) که تأثیر مستقیم بر شدت لرزش دارد، (R') فاصلهٔ اصلاح‌شده از منبع زلزله که معمولاً در ارزیابی اثرات لرزه‌ای استفاده می‌شود. (bX-logX) تأثیر فاصلهٔ (X) که به‌صورت خطی و لگاریتمی در معادله لحاظ شده است. (c_iS_i) اثر ویژگی‌های خاص سایت یا منطقه که شامل پارامترهای محلی مانند نوع خاک، شرایط زمین‌شناسی، یا دیگر عوامل محیطی است. (σp) مقدار پراکندگی یا عدم قطعیت در رابطه که نشان‌دهندهٔ تغییرات آماری داده‌ها است.

لازم به ذکر است که رابطهٔ کاهندگی دنوان برای رکوردهای حاصل از ارتعاش زلزله در راستاهای افقی به‌دست آمده است و با توجه به این که اثر زلزله بر تیر دوسر مفصل ناشی از ارتعاشات در جهت قائم می‌باشد و در روش دنوان برای زلزلهٔ قائم رابطه‌ای یافت نشد؛ لذا با استناد به آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ٢٨٠٠)، برای محاسبهٔ بزرگای ظرفیت به‌روش دنوان، مقادیر شتاب ظرفیت در عدد ٠/٦ ضرب شده‌اند. با توجه به این که موضوع این تحقیق ارائهٔ یک روش و متدولوژی جدید و بررسی صحت عملکرد روش ارائه‌شده بر اساس اهداف و تحقیقات انجام‌شده در قبل می‌باشد، از روابط کاهندگی جدید (که دارای داده‌های مربوط به زلزلهٔ قائم نیز می‌باشند؛ درحالی‌که روابط استفاده‌شده در مقالهٔ محمودی صاحبی و اعتضادی‌فر [١١] این داده‌ها را ندارند) استفاده نشد تا ضمن حصول اطمینان از کارکرد روش فوق و تطابق آماری آن با سازهٔ جدید، راه برای بررسی سایر روابط کاهندگی در سایر ساختگاه‌ها و همچنین سازه‌های مختلف دیگر باز شده و این تحقیق مبنای توسعه و تکامل این متدولوژی قرار گیرد.

گام ٥- انتخاب خطر و محاسبه احتمال وقوع سالیانه

با استفاده از رابطهٔ (٥) (گوتنبرگ ریشتر) احتمال وقوع سالیانه تعیین می‌شود.

$$logN = a - bM \quad (٥)$$

این رابطه یک فرمول لگاریتمی است که معمولاً در تحلیل لرزه‌ای، مهندسی زلزله، یا زمین‌شناسی برای ارزیابی نرخ رخداد زلزله‌ها استفاده می‌شود. (logN) لگاریتم تعداد رخدادهای زمین‌لرزه یا نرخ وقوع آن‌ها، (a) ضریب ثابت که وابسته به منطقه و داده‌های آماری زلزله‌ها است، (bM) تأثیر بزرگی زلزلهٔ (M) بر تعداد رخدادها، با ضریب (b) که نشان‌دهندهٔ کاهش نرخ وقوع زلزله‌های بزرگ‌تر است.

گام ٦- محاسبه عمر مفید باقی‌مانده

به کمک رابطهٔ (٦) (توزیع پواسون)، عمر مفید سازه محاسبه می‌شود.

$$R = 1 - e^{-Nt} \quad (٦)$$

در این رابطه (R) مقدار نهایی یا پاسخ سیستم (ممکن است درصدی از چیزی مانند جمعیت، واکنش شیمیایی، یا رشد باشد). (e) عدد نپر (تقریباً ٢/٧١٨)، که در معادلات رشد و زوال نمایی کاربرد زیادی دارد. (N) یک پارامتر وابسته به نرخ تغییر یا رشد است. (t) زمان که نشان‌دهندهٔ پیشرفت یا گذر زمان در این فرآیند است. به‌منظور تشریح روش پیشنهادی، در ادامه به حل تئوریک یک مدل سازه‌ای عددی پرداخته می‌شود.

٣- ارائهٔ شبکهٔ عصبی مصنوعی و عمر مفید باقی‌مانده

در این بخش، به شرح شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهادی و نحوهٔ شکل‌گیری این شبکه‌ها برای تحلیل المان‌های سازه‌ای پرداخته می‌شود. همچنین، به نتایج حاصل از اعمال این شبکه‌ها و تأثیر آن‌ها بر پیش‌بینی عمر مفید و ارزیابی عملکرد سازه‌ای پرداخته می‌شود. در ادامه، جزئیات مرتبط با ساختار شبکه‌های عصبی، فرآیند آموزش و داده‌های مورد استفاده برای ایجاد مدل‌های دقیق‌تر و پایدارتر بررسی خواهد شد.

٣-١- مبانی شبکه‌های عصبی تحت نظارت

شبکه‌های عصبی مصنوعی، درواقع نوعی سیستم پردازش اطلاعات هستند که از تعمیم‌یافتن مدل‌های ریاضی شبکه‌های عصبی بر مبنای پنج فرضیهٔ زیر توسعه یافته‌اند [٧]:

١- داده‌پردازی در اجزای ساده‌ای به نام نرون صورت می‌گیرد.

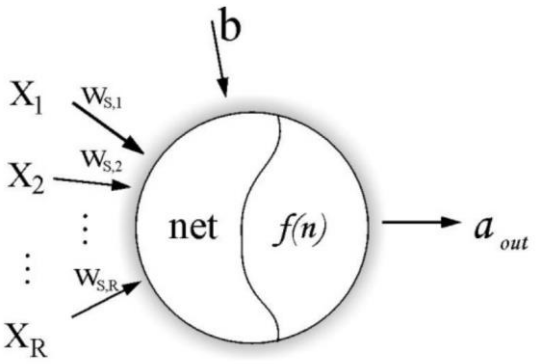
٢- اطلاعات از طریق ارتباط بین نرون‌ها منتقل می‌شود.

٣- هر ارتباط دارای وزن مخصوص به خود است.

٤- هر نرون برای محاسبهٔ خروجی‌اش، یک تابع تحریک دارد که به مجموع وزن‌دار ورودی‌هایش اعمال می‌شود.

۵- خروجی هر پردازشگر (نرون) ممکن است به تعداد زیادی واحد پردازشگر دیگر منتقل شود.

شکل (۲) مدل ریاضی یک نرون را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل ریاضی یک نرون [۱۳]

به‌طورکلی فرآیند تحلیل داده‌ها، یافتن رابطه بین آن‌ها، آزمون و خطا و اصلاح رابطهٔ به دست‌آمده، یادگیری ماشین نامیده می‌شود. عوامل مؤثر بر دوام و عمر مفید سازه‌ها (ازجمله ترک و خوردگی) نیز شامل انواع مختلفی از داده‌ها هستند که با یافتن رابطه بین این داده‌ها می‌توان به‌طور دقیق به بررسی آن‌ها و پیش‌بینی اثر آن‌ها بر عمر مفید سازه‌ها دست یافت. روش‌های متنوعی برای یادگیری ماشین وجود دارد که می‌توان به شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک چندمنظوره، روش نورو-فازی، برنامه‌نویسی ژنتیکی و یا ترکیبی از این‌ها اشاره نمود.

از آن‌جایی‌که در مقالهٔ حاضر از شبکه‌های عصبی مصنوعی تحت نظارت، جهت پیش‌بینی عمر مفید سازه استفاده شده است، قبل از پرداختن به شبکهٔ عصبی پیشنهادی به‌شرح مختصری از مبانی مربوط به این شبکه‌ها پرداخته می‌شود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی از لایه‌های مجزا تشکیل شده‌اند که شامل بخش‌های ورودی، پنهان و خروجی هستند. مجموعه‌ای از سلول‌های عصبی به‌طور منظم در قالب ارائه‌ای چندبعدی سازمان‌دهی شده‌اند که به‌عنوان لایه‌ها شناخته می‌شوند، و این ساختار امکان پردازش داده‌ها را به شکلی کارآمد فراهم می‌نماید. هر لایه شامل یک یا چند عنصر پردازشی ویژه است که نقش مشخصی در فرآیند پردازش داده‌ها ایفا می‌کنند. این عناصر به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که عملیات لازم را بر روی ورودی‌های خود انجام داده و اطلاعات را به لایه‌های بعدی منتقل می‌کنند. تعداد گره‌های ورودی نشان‌دهندهٔ تعداد متغیرهای ضروری است که برای پیش‌بینی متغیرهای خروجی مورد نظر به‌کار گرفته می‌شوند. این مقدار تعیین‌کنندهٔ میزان داده‌های اولیهٔ مورد نیاز برای انجام تحلیل و پردازش است.

تعداد بهینهٔ گره‌های مخفی و لایه‌های مخفی به پیچیدگی مدل‌سازی و هدف محقق مانند خطای یادگیری قابل‌قبول بستگی دارد. هرچه تعداد لایه‌های مخفی موجود در شبکهٔ عصبی بیش‌تر باشد، پیچیدگی مدل بیش‌تر است. در فرآیند آموزش، شبکهٔ عصبی مصنوعی به‌تدریج با الگوهای ورودی و نقاط خروجی متناظر آن‌ها آشنا می‌شود. این یادگیری به آن امکان می‌دهد تا روابط موجود میان داده‌ها را شناسایی کرده و عملکرد خود را بهبود بخشد. الگوریتم یادگیری (الگوریتم لونبرگ- مارکوارت در این تحقیق) مقادیر وزن‌های اتصال‌ها را در ساختار شبکهٔ عصبی مصنوعی تنظیم می‌نماید. در کل برای رسیدن به دقت مناسب، یک ساختار شبکهٔ عصبی مصنوعی ساده مطلوب‌تر است. به‌کارگیری شبکه‌های عصبی با ساختار ساده موجب کاهش زمان آموزش، بهبود فرآیند فعال‌سازی شبکه و جلوگیری از ایجاد اتصالات اضافی می‌شود. این امر باعث افزایش کارایی و بهینه‌سازی عملکرد شبکه خواهد شد. این روش به‌منظور یافتن مقدار حداقل یک تابع غیرخطی چندمتغیره به‌کار گرفته می‌شود و به‌عنوان یکی از راهکارهای استاندارد در حل مسائل کمینه مربعات برای توابع غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به بیان دیگر این الگوریتم روش استاندارد برای مسائل حداقل مربعات غیرخطی بوده و به‌عنوان ترکیبی از روش نیوتن-گوس و بیش‌ترین شیب نزول یا گرادیان نزولی بیان می‌شود. منظور از شبکهٔ تحت نظارت[۱] این است که مدل ریاضی بر اساس داده‌های موجود (ورودی‌ها و خروجی‌ها) اقدام به ساخت مسیر محاسبه می‌کند و خروجی‌های آن بر اساس داده‌های موجود کنترل می‌شوند.

به‌منظور پیش‌بینی عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه‌ها، از یک مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی استفاده شده است. ساختار این شبکه شامل یک لایهٔ مخفی با تعداد بهینهٔ نورون‌ها و یک لایهٔ خروجی می‌باشد. داده‌های ورودی شامل پارامترهایی نظیر زمان تناوب طبیعی سازه، تغییرمکان ماکزیمم و سایر ویژگی‌های دینامیکی استخراج‌شده از تحلیل نرم‌افزاری هستند. خروجی مدل، مقدار پیش‌بینی‌شدهٔ عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه است.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، از معیارهای MSE (میانگین مربعات خطا) برای سنجش میزان خطای مدل و ضریب تعیین (R^2) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی استفاده شده است. داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم شده‌اند تا از بیش‌برازش

[۱] Under Supervision

(Overfitting) جلوگیری شده و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل به‌صورت مستقل ارزیابی گردد.

٤- مطالعهٔ موردی

مطالعه موردی تیر دوسر مفصل در شرایط مختلف و بر اساس روش پیشنهادی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این بررسی شامل تحلیل رفتار تیر تحت تأثیر شرایط متنوع و بررسی عملکرد آن در مواجهه با عوامل مختلف بود. نتایج این مطالعه به درک بهتر از عملکرد و عمر مفید تیر در شرایط مختلف کمک می‌کند.

٤-١- عمرمفید تیر دوسر مفصل یک ساختمان با فاصلهٔ ٢٠ کیلومتری از گسل مولد

در این بخش با فرض این که پس از تحلیل‌های نرم‌افزاری، زمان تناوب و تغییرمکان حداکثر در سطح عملکرد ایمنی جانی یک تیر دوسر مفصل در یک منطقه که در فاصلهٔ ٢٠ کیلومتری از گسل مولد قرار دارد به‌ترتیب ٠/٠٣٦٥٧ و ٦/٢ (بر حسب ثانیه و سانتی‌متر) باشد، عمر مفید باقی‌ماندهٔ این تیر پس از وقوع زلزله به‌کمک روش معرفی‌شده و رابطهٔ کاهندگی دنوان تخمین زده می‌شود. (ریسک زلزله ١٠ درصد و ضرایب a و b منطقه به‌ترتیب ٦/٩ و ١/٦ در نظر گرفته می شود).

گام ١ و ٢- با توجه به دادهٔ اولیه:

$\delta = 6.2\ cm\ , T_e = 0.03657\ s$

گام ٣- محاسبهٔ شتاب ظرفیتی تیر:

$$\delta = C_0 C_1 C_2 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g$$

$$\rightarrow 6.2 = 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times a \times \left(\frac{0/03657}{2\pi}\right)^2 \times 981$$

$$\rightarrow a = 186/56\ {}^{cm}/_{s}$$

گام ٤- محاسبهٔ بزرگای ظرفیتی تیر:

$$a = 1080e^{0.5M}(R' + 25)^{-1.32}$$

$$\rightarrow 186.56 \times 0.6 = 1080e^{0.5M}(10 + 25)^{-1.32}$$

$$\rightarrow M = 5.55$$

گام ٥- محاسبهٔ احتمال وقوع سالیانه:

$$logN = a - bM \rightarrow logN = 7.1 - 2 \times 5.55$$

$$\rightarrow N = 0.0103$$

گام ٦- محاسبهٔ عمر مفید باقی‌مانده

$$R = 1 - e^{-Nt} \rightarrow 0.1 = 1 - e^{-t \times 0.0103}$$

$$\rightarrow t = 10.22\ years$$

٤-٢- عمرمفید تیر دوسر مفصل در منطقهٔ البرز مرکزی

با فرض این که پس از تحلیل‌های نرم‌افزاری، زمان تناوب و تغییرمکان حداکثر در سطح عملکرد ایمنی جانی یک تیر دوسر مفصل در منطقهٔ البرز مرکزی با خاک نوع ٢ که در فاصلهٔ ١٠ کیلومتری از گسل مولد قرار دارد به‌ترتیب ٠/٠٤٢٧١ و ٢/٩ (بر حسب ثانیه و سانتی‌متر) باشد، عمر مفید باقی‌ماندهٔ این تیر پس از وقوع زلزله به‌کمک روش معرفی‌شده و رابطهٔ کاهندگی زارع تخمین زده می شود. (ریسک زلزله ١٠ درصد و ضرایب a و b منطقه به‌ترتیب ٦/٥ و ١/٧ در نظر گرفته می شود).

گام ١ و ٢- با توجه به دادهٔ اولیه:

$\delta = 2.9\ cm\ , T_e = 0.04271\ s$

گام ٣- محاسبهٔ شتاب ظرفیتی تیر:

$$\delta = C_0 C_1 C_2 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g$$

$$\rightarrow 2.9 = 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times a \times \left(\frac{0/04271}{2\pi}\right)^2 \times 981$$

$$\rightarrow a = 154/42\ {}^{cm}/_{s}$$

گام ٤- محاسبهٔ بزرگای ظرفیتی تیر:

$$log154.42 = 0.322 \times M - 0.003 \times 10 - log10 + 0.754 \times 1 + 1$$

$$\rightarrow M = 5.39$$

گام ٥- محاسبهٔ احتمال وقوع سالیانه:

$$logN = a - bM \rightarrow logN = 6.5 - 1.7 \times 5.39$$

$$\rightarrow N = 0.0021$$

گام ٦- محاسبهٔ عمر مفید باقی‌مانده

$$R = 1 - e^{-Nt} \rightarrow 0.1 = 1 - e^{-t \times 0.0021}$$

$$\rightarrow t = 8.64\ years$$

٤-٣- تحلیل عمر مفید تیر دوسر مفصل با دهانهٔ ٨ متری در فاصلهٔ ٢٠ کیلومتری از گسل مولد زلزله

در ادامه مثال تحلیل لرزه‌ای تیر دوسر مفصل بحث‌شده در بخش ٣-١، با محاسبات جدید برای تیر با دهانهٔ ٥ متری تا ٨ متری انجام شد تا تأثیر افزایش طول دهانه بر عمر مفید باقی‌مانده پس از زلزله مورد بررسی قرار گیرد. خلاصهٔ حل در جدول (١) ارائه گردید. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (٣)، با افزایش طول تیر، میزان عمر مفید باقی‌مانده در برابر مؤلفهٔ قائم زلزله به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد

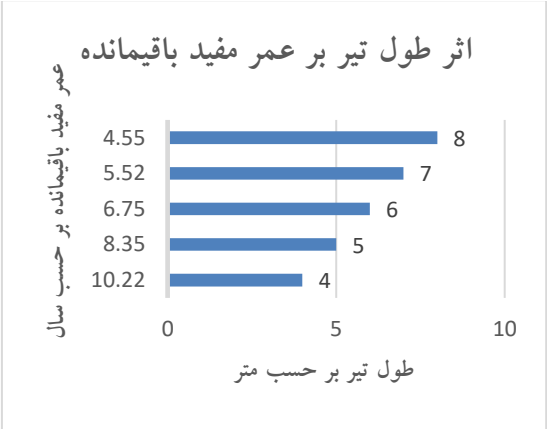
جدول ١- عمر مفید باقی‌مانده تیرهای با طول دهانه های مختلف

عامل	تیر ٥ متری	تیر ٦ متری	تیر ٧ متری	تیر ٨ متری
زمان تناوب (ثانیه)	0.04021	0.04487	0.04845	0.0517
جابه‌جایی حداکثر (سانتی‌متر)	7.1	8.2	9.1	10
شتاب ظرفیتی (cm/s^2)	170.2	155.6	145.2	139.4
بزرگای ظرفیتی	5.48	5.42	5.37	5.33
عمر مفید باقی‌مانده (سال)	8.35	6.75	5.52	4.55

با توجه به افزایش زمان تناوب و جابه‌جایی در تیر بلندتر، نتایج نشان داد که عمر مفید پس از زلزله برای تیر ٨ متری حدود ٤/٥٥ سال خواهد بود؛ درحالی‌که همین مقدار برای تیر ٤ متری ١٠/٢٢ سال برآورد شده بود. این تفاوت قابل‌توجه نشان‌دهندهٔ آن

است که با افزایش طول تیر، حساسیت سازه به شتاب قائم زلزله افزایش یافته و به تبع آن، پایداری لرزه‌ای کاهش می‌یابد.

در جریان زلزله، مؤلفهٔ قائم باعث ایجاد نوسانات شتاب در راستای عمودی می‌شود که به‌ویژه در دهانه‌های بلندتر یا اعضایی با بار مردهٔ زیاد، باعث ایجاد نیروهای دینامیکی شدید در تیر می‌گردد. این نیروها می‌توانند سبب بروز مکانیزم شکست خمشی، کمانش موضعی، ترک در اتصال‌ها یا کاهش سختی مؤثر در تیر شوند. به‌عبارت دیگر، آسیب تیر در اثر ارتعاش عمودی و پاسخ دینامیکی غیرخطی مصالح حاصل می‌گردد.



شکل ۳- اثر طول تیر بر عمر مفید باقی‌مانده

پس از انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، مقادیر زمان تناوب و تغییرمکان حداکثر تعیین می‌شوند. سپس، بر اساس روابط ارائه‌شده در بخش ۲ به‌عنوان روش پیشنهادی، عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه محاسبه می‌گردد. این فرآیند نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌های نرم‌افزاری و بهره‌گیری از این روابط، امکان تهیهٔ ماتریس‌های داده‌های ورودی و خروجی شبکهٔ عصبی به‌صورت دقیق و نظام‌مند فراهم می‌شود که نقش کلیدی در پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده را ایفا می‌نماید. این مثال‌ها نشان می‌دهند پس از انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، مقادیر زمان تناوب و تغییرمکان حداکثر استخراج می‌شوند. سپس، بر اساس روابط ارائه‌شده در بخش ۲ به‌عنوان روش پیشنهادی، عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه محاسبه می‌گردد. این فرآیند بیانگر آن است که با به‌کارگیری مدل‌های نرم‌افزاری و بهره‌گیری از این روابط، می‌توان ماتریس‌های داده‌های ورودی و خروجی شبکهٔ عصبی را به‌صورت دقیق و سازمان‌یافته تهیه نمود، که نقشی اساسی در تخمین عمر مفید باقی‌ماندهٔ سازه ایفا می‌نماید.

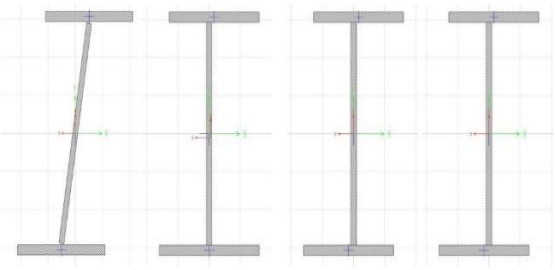
۵- شبکهٔ عصبی مصنوعی پیشنهادی تعیین عمر مفید باقی‌ماندهٔ المان سازه‌ای

جهت تهیهٔ داده‌های لازم برای مدل ریاضی شبکهٔ عصبی، می‌بایست مدل سازه‌ای چندین حالت از تیر که در نقاط مختلف در طول آن آسیب‌دیدگی رخ داده است ایجاد شود. مشخصات مصالح فولادی به‌کار رفته در مدل مطابق جدول (۲) است.

جدول ۲- مشخصات مصالح فولادی

مدول الاستیسیته	N/mm^2	E_s= ۲×۱۰^۵
وزن واحد حجم	Kg/m^3	w= ۲×۱۰^۵
ضریب پواسون	-	ν= ۰/۳
تنش جاری شدن فولاد	MPa	F_y= ۲٤۰
تنش گسیختگی فولاد	MPa	F_u= ۳۷۰

تیپ‌های مقاطع آسیب‌دیده که در شکل (٤) معرفی شده‌اند، در نرم‌افزار مدل می‌شوند. مقطع سالم مقطع Iشکل بال پهن شمارهٔ ۲۰۰[1] بوده و در مقطع ۱ کاهش یک سانتی‌متری در بال فوقانی، در مقطع ۲ کاهش یک سانتی‌متری در هر دو بال، در مقطع ۳ آسیب به جان و در مقطع ٤ دوران جان (شمارهٔ مقاطع به‌ترتیب از راست به چپ) در نظر گرفته شده است. استفاده از کاهش ضخامت بال صرفاً در چارچوب مدل‌سازی عددی و با هدف بررسی رفتار غیرخطی تیر انجام شده است و اعتبار آن برای شرایط واقعی نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بیش‌تر است.



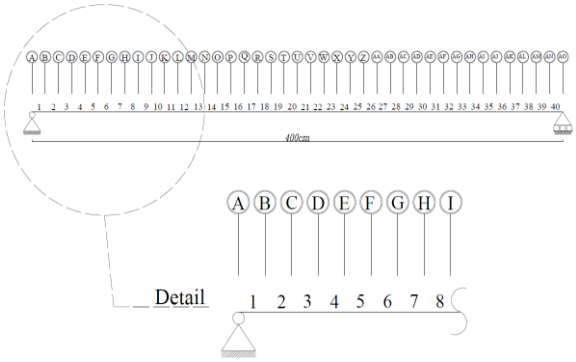
شکل ٤ - مقاطع آسیب‌دیدهٔ معرفی‌شده در نرم‌افزار

پس از مدل‌سازی هندسی و تعریف مفاصل پلاستیک، تحلیل بارافزون با بارگذاری یکنوا و متمرکز انجام می‌شود. مفصل پلاستیک در نواحی انتهایی تیرها و نزدیک اتصال با ستون‌ها تعریف شده که مطابق با ضوابط نشریهٔ ۳٦۰ و اصل تیر ضعیف–ستون قوی است. در مقالهٔ حاضر، تمرکز بر تسلیم

[1] IPE200

خمشی بوده است؛ چرا که در شرایط زلزله، این نوع خرابی معمولاً غالب است و با رفتار غیرخطی مصالح و مفاصل بهتر قابل‌مدل‌سازی است. مشخصات مفصل شامل رفتار غیرخطی خمشی با کنترل تغییرشکل بوده و در نرم‌افزار SAP2000 بر اساس منحنی‌های FEMA356 مدل‌سازی شده است. عملکرد ایمنی جانی نیز با ورود مفصل پلاستیک به ناحیهٔ LS در منحنی رفتار نقطهٔ C یا D تعیین شده و تحلیل تا رسیدن به این سطح ادامه یافته است.

برای توسعهٔ مدل ریاضی شبکهٔ عصبی، نمونه‌های مختلفی از تیرهای دارای آسیب‌دیدگی در نقاط متفاوت طراحی شده‌اند تا تأثیر تغییرات موقعیت و شدت آسیب بر پاسخ دینامیکی بررسی شود. در این مدل‌سازی، مشخصات مصالح فولادی بر اساس جدول (۱) تعیین شده و در فرآیند طراحی لحاظ شده است. مدل هندسی ارائه‌شده، مطابق شکل (۵)، شامل یک تیر دوسر مفصل به طول ٤ متر است که به ٤٠ بخش مساوی تقسیم شده است. در این ساختار، چهار مدل مقطع آسیب‌دیده به‌صورت تصادفی در میان این چهل بخش توزیع شده‌اند، که در نتیجه آن، ٤٠ مدل مختلف طراحی و تحلیل شده‌اند. این تنوع در مدل‌سازی امکان بررسی دقیق‌تر تأثیر آسیب‌های موضعی بر رفتار کلی سازه را فراهم می‌آورد و پایه‌ای مناسب جهت مطالعات عددی و تجربی ارائه می‌دهد.



شکل ۵ - مدل تیر دوسر مفصل با مقاطع آسیب‌دیده

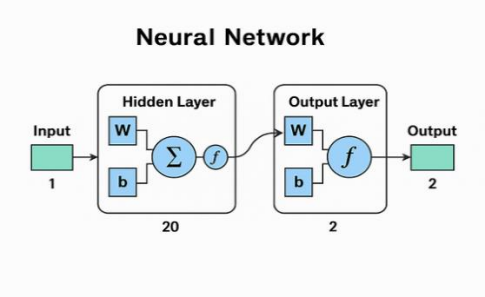
در هر نمونه، آرایش متفاوتی از مقاطع آسیب‌دیده استفاده شده و تحلیل پوش‌آور برای ٤٠ حالت مختلف انجام گرفته است. پس از تکمیل مدل‌سازی و تعریف مفاصل پلاستیک، تحلیل بارافزون با بارگذاری یکنوا و متمرکز صورت گرفته تا رفتار غیرخطی تیرها شبیه‌سازی شده و داده‌های لازم برای آموزش شبکهٔ عصبی استخراج گردد.

برای انجام تحلیل دقیق با استفاده از شبکهٔ عصبی، ابتدا باید مراحل پردازش داده‌ها و آموزش مدل مشخص شوند. فرآیند ورود اطلاعات و تحلیل در این شبکهٔ عصبی از طریق چهار گام اساسی صورت می‌گیرد:

گام اول: معرفی ورودی‌ها و خروجی‌ها به نرم‌افزار MATLAB.

در یک فایل حاوی مقادیر زمان تناوب به‌عنوان ورودی و یک فایل حاوی مقادیر به‌ترتیب عمر مفید باقی‌مانده بر اساس رابطهٔ کاهندگی دنوان و رابطهٔ کاهندگی زارع، به‌عنوان خروجی عددی به نرم‌افزار MATLAB معرفی می‌شوند. به‌عبارت دیگر ورودی شبکهٔ عصبی (زمان تناوب تیرها) یک ماتریس ۱در٤٠ و خروجی‌های آن (عمر مفید باقی‌مانده با استفاده از دو رابطهٔ کاهندگی) یک ماتریس ۲در٤٠ می‌باشد.

این شبکهٔ عصبی دارای یک لایهٔ ورودی، یک لایهٔ خروجی و یک لایهٔ پنهان جهت انجام محاسبات می باشد [۸]. تعداد گره‌های این شبکه، ۲۰ عدد در نظر گرفته شده است. ساختار شبکه در فلوچارت شکل (٦) آمده است.



شکل ٦- فلوچارت ساختار و لایه‌های شبکهٔ عصبی تحت نظارت

گام دوم: انجام آموزش اولیهٔ شبکه

در این مرحله شبکه آموزش می‌بیند و مقادیر رگرسیون و شاخص MSE که بیانگر میانگین مربعات خطا[1] می‌باشد را گزارش می‌نماید.

گام سوم: آزمایش شبکه

در این مرحله شبکهٔ آموزش‌دیده، خود را به کمک داده‌های تست و اعتبارسنجی آزمایش می‌کند.

۵-۱- نتایج تحلیل غیرخطی و عمر مفید باقی‌ماندهٔ مدل‌ها

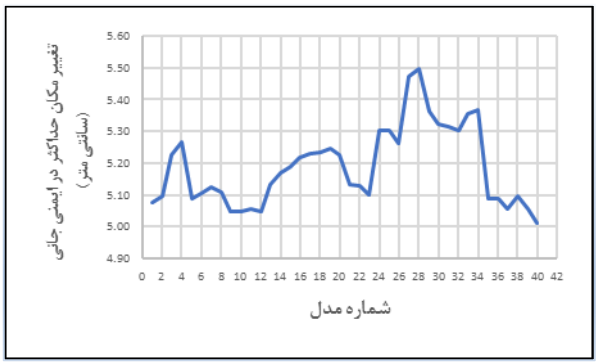
نتایج ارائه‌شده در این بخش به تحلیل عملکرد شبکهٔ عصبی پیشنهادی اختصاص دارد. نتایج عمر مفید باقی‌مانده بر حسب سال برای یکی از تیپ‌های تیر آسیب‌دیده (مدل شمارهٔ ٤) که به دو روش دنوان و زارع بر اساس شبکهٔ عصبی بر مبنای روش پیشنهادی به‌دست آمده‌اند به‌صورت شکل (۷) است.

[1] Mean Squared Error

شکل ۷- منحنی عمر مفید مدل شمارهٔ ٤

با توجه به شکل (۷) مشخص می‌شود با افزایش گام‌های تحلیل بارافزون و ادامه‌دادن تحلیل تا عملکردهای بالاتر، مقدار عمر مفید باقی‌ماندهٔ بیش‌تری گزارش می‌شود. علت این موضوع آن است که با درنظرگرفتن تغییرمکان ظرفیتی بیش‌تر برای تیر (انتخاب عملکرد بالاتر)، با توجه به رابطهٔ (۱) و (۲) در این تحقیق، شتاب ظرفیتی تیر بیش‌تر می‌شود و در اثر آن بزرگای ظرفیتی نیز بیش‌تر خواهد شد و عمر مفید باقی‌ماندهٔ محاسبه‌شده بیش‌تر می‌شود. در این تحقیق تحلیل‌های بارافزون برای هر کدام از ٤٠ مدل آسیب‌دیده تا تشکیل اولین مفصل در عملکرد آستانهٔ فروریزش[1] ادامه داده شده‌اند و در نهایت عمر مفید باقی‌مانده در عملکرد ایمنی جانی انتخاب شده است.

هرچقدر تغییرمکان ظرفیتی تیر آسیب‌دیده (خروجی تحلیل بارافزون) در عملکرد ایمنی جانی بیش‌تر باشد، بدین معنا است که در این عملکرد بزرگای زلزلهٔ بیش‌تری را می‌تواند تحمل نماید و در مقابل هر چقدر تغییرمکان ظرفیتی در عملکرد ایمنی جانی کم‌تر باشد، یعنی تیر در این عملکرد بزرگای زلزلهٔ کم‌تری را می‌تواند تحمل کند.

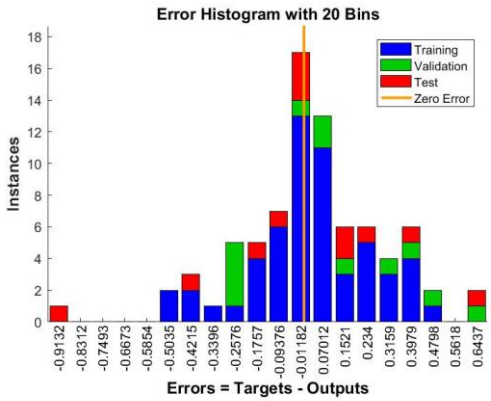


شکل ۸ – تغییرات تغییرمکان حداکثر تیر مدل‌ها

شکل (۸) تغییرمکان ظرفیتی تیرهای مدل‌شده را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر تغییرمکان حداکثر هر تیر در سطح عملکردی ایمنی جانی است و همچنین نشان می‌دهد که از طیف گسترده‌ای از تغییرمکان‌های مختلف در پایگاه داده استفاده شده و درصورتی‌که شبکهٔ عصبی بتواند در آموزش خود بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌ها همگرایی ایجاد کند، صحت متدولوژی و عملکرد شبکه معتبر خواهد بود.

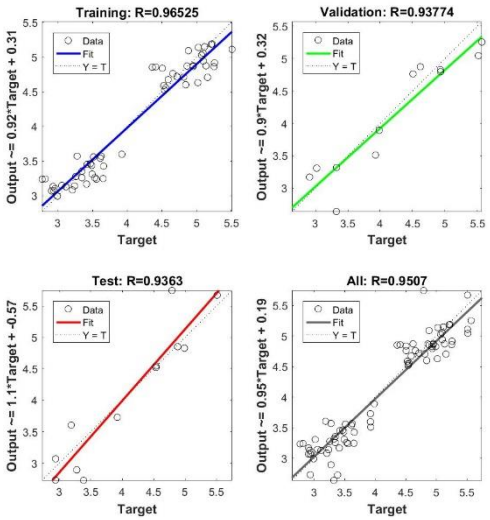
۵-۲- نتایج شبکهٔ عصبی

نمودار شکل (۹) مقدار خطای شبکهٔ عصبی با آزمایش‌کردن آن با ۱۵ درصد از داده‌های ورودی (رنگ قرمز) و مقدار صحت شبکه و نتایج شبکه (رنگ سبز) را نشان می‌دهد.



شکل ۹- هیستوگرام خطای شبکه‌ی عصبی

پراکندگی داده‌ها و نمودارهای رگرسیون داده‌های شبکهٔ عصبی مطابق شکل (۱۰) می‌باشد.



شکل ۱۰- پراکندگی داده‌ها و نمودار رگرسیون شبکهٔ عصبی

نتایج حاصل از تحلیل هیستوگرام خطای شبکهٔ عصبی نشان می‌دهد که مقدار خطا ناچیز بوده و فرآیند صحت‌سنجی مدل با

[1] Collapse Prevention

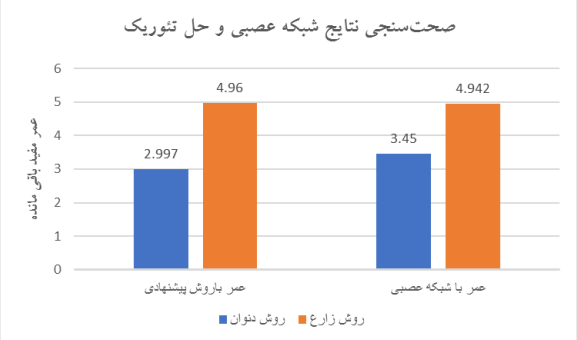
موفقیت انجام شده است. علاوه بر این، بررسی پراکندگی داده‌ها در مدل رگرسیون شبکهٔ عصبی بیانگر آن است که میزان تطابق بین داده‌های آموزشی، تست و صحت‌سنجی بسیار بالا بوده و مقدار ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹۳ ارزیابی شده است که نشان‌دهندهٔ عملکرد قابل‌قبول و دقت بالای مدل در پیش‌بینی داده‌ها است.

۶- مقایسهٔ نتایج شبکهٔ عصبی و حل تئوریک

نتایج صحت‌سنجی و حل یک نمونه به‌منظور حصول اطمینان از صحت عملکرد شبکهٔ عصبی بر اساس گام سوم تعیین عمر مفید باقی‌مانده مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳- صحت‌سنجی نتایج شبکه عصبی و حل تئوریک

زمان تناوب بر حسب ثانیه	عمر مفید باقی‌مانده بر حسب سال			
	خروجی روش پیشنهادی و با مدل‌سازی		خروجی شبکهٔ عصبی	
	روش دنوان	روش زارع	روش دنوان	روش زارع
۰/۰۲۵۱۸۶	۲/۹۹۷	٤/٥٩٦	۳/٤٥۰	٤/٩٤٢



شکل ۱۱- مقایسهٔ صحت‌سنجی نتایج شبکهٔ عصبی با حل تئوریک

با توجه به نتایج مندرج در شکل (۱۱)، مشاهده می‌شود که شبکهٔ عصبی با میانگین اختلاف ۹/۹۸ درصدی نسبت به خروجی‌های روش دقیق تحلیل نرم‌افزاری، که دقت قابل‌قبولی است، قادر است عمر مفید تیر دوسر مفصل فولادی پس از وقوع زلزله را با دقت بسیار خوبی گزارش کند. شاخص MSE بین روش دنوان و روش زارع برابر با ۲/۲۹۱ است.

محدودیت‌های مدل عبارتند از: فرضیات مدل‌سازی؛ مدل عددی توسعه‌یافته بر پایه فرض یکنواختی مصالح، چشم‌پوشی از رفتار غیرخطی پیچیده در نواحی اتصال و ساده‌سازی شرایط محیطی طراحی شده است. این موارد به‌صراحت مطرح شده‌اند و در تفسیر نتایج لحاظ گردیده‌اند. نبود داده‌های میدانی؛ به‌دلیل محدودیت در دسترسی به داده‌های واقعی سازه‌ها پس از زلزله، مدل‌سازی بر پایهٔ شبیه‌سازی عددی انجام شده و این مسئله به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی تحقیق مورد تأکید قرار گرفته است. حساسیت نتایج به پارامترهای ورودی؛ نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که متغیرهایی نظیر نوع روابط کاهشی و ویژگی‌های لرزه‌ای مورد استفاده در مدل‌سازی، تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج نهایی دارند. این موضوع به‌طور مشخص در تفسیر یافته‌ها مدنظر قرار گرفته است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی کارآمد برای برآورد عمر مفید باقی‌ماندهٔ اعضای سازه‌ای، با تمرکز بر تیرهای فولادی دوسر مفصل پس از زلزله، معرفی شد. ابتدا حالات مختلف آسیب‌دیدگی این تیرها مدل‌سازی گردید و تحلیل‌های مودال و بارافزون به‌منظور محاسبهٔ زمان تناوب و تغییرمکان ظرفیت در شرایط ایمنی جانی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با بهره‌گیری از روابط احتمال وقوع زلزله و روابط کاهندگی، عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیرها تخمین زده شد. در مرحلهٔ بعد، داده‌های حاصل از تحلیل‌ها، شامل زمان تناوب و عمر مفید باقی‌مانده، به‌عنوان ورودی به یک شبکهٔ عصبی تحت نظارت داده شد و الگویی عددی برای پیش‌بینی عمر مفید تیرهای مشابه توسعه یافت. استفاده از شبکهٔ عصبی موجب ارتقای دقت مدل در پیش‌بینی عمر مفید شد.

۱- نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به‌طور مؤثری در بهینه‌سازی و ارزیابی عمر مفید باقی‌ماندهٔ عضو سازهٔ فولادی پس از زلزله استفاده شود. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نه‌تنها دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه امکان تحلیل پیچیده‌تر و جامع‌تری از عوامل مؤثر بر عمر مفید اعضای سازه‌ای را فراهم می‌آورد.

۲- نکتهٔ قابل‌توجه در منحنی‌های عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیرهای دوسر مفصل این است که نتایج به‌دست‌آمده بر اساس روابط کاهندگی لرزه‌ای ساختگاه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد و این احتمال وجود دارد که در صورت استفاده از روابط کاهندگی دیگر، اختلاف‌هایی در نتایج به‌وجود آید. با توجه به این که روابط خصوصیت‌های لرزه‌ای ساختگاه و زلزله‌شناختی پوستهٔ زمین در همان ناحیهٔ مورد نظر کاربرد دارند، لذا استفاده از این روابط برای به‌دست‌آوردن عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیر در ساختمان‌های ساخته‌شده در نواحی دیگر توصیه نمی‌شود.

۳- تیر طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌ها به‌خوبی توانسته در عملکرد مدنظر (ایمنی جانی) بارهای وارده را تحمل نماید. مطابق

روابط ارائه‌شده در این تحقیق، هر چقدر که کاهش عمر مفید سازه به عدد پنجاه سال نزدیک‌تر باشد، یعنی طرح بهینه‌تر است. همچنین درصورتی‌که از این عدد بیش‌تر شود، یعنی سازه در عملکرد مذکور، بارهای وارده را تحمل نکرده و خرابی رخ داده است.

٤- روش پیشنهادی در این تحقیق، با دقت بالایی می‌تواند عمر مفید تیرهای دوسر مفصل فولادی پس از وقوع زلزله را محاسبه نماید.

٥- بر اساس نتایج حاصل، مشخص شد که میزان تأثیر آسیب‌دیدگی بر عمر مفید باقی‌ماندهٔ تیر دوسر مفصل فولادی در نواحی میانی به‌مراتب بیش‌تر از نواحی نزدیک به تکیه‌گاه است. به‌عبارت دیگر، آسیب‌های واردشده در بخش‌های میانی تیر موجب کاهش قابل‌توجهی در ظرفیت سازه‌ای و دوام آن می‌شود؛ درحالی‌که تأثیر آسیب‌های نزدیک به تکیه‌گاه نسبتاً کم‌تر است. این یافته‌ها نقش بحرانی موقعیت آسیب را در ارزیابی پایداری و عملکرد بلندمدت سازه‌های فولادی برجسته می‌نماید. همچنین پیشنهاد می گردد که در مطالعات آینده، از داده‌های واقعی لرزه‌ای و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای اعتبارسنجی دقیق‌تر این رابطه در اعضای مفصلی استفاده شود.

٨- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گرنت شمارهٔ ٤٩٤٩ مورخ ١٤٠٢/٠٦/٠٣ انجام شده است.

۹- مراجع

[1] Okoh, C., Roy, R., Mehnen, J., and Redding, L. (2014), “Overview of remaining useful life prediction techniques in through-life engineering services”, Procedia Cirp, 16, pp.158-163.

[2] Daniotti, B., Lupica Spagnolo, S., and Paolini, R. (2009), “Service life estimation of building components: methods for durability assessment in use conditions”, In International Conference on Construction and Building Research, pp.130-140.

[3] Taffese, W.Z., and Sistonen, E. (2017), “Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions”, Automation in Construction, 77, pp.1-14.

[4] ISO 15686-1, (2011), Buildings and constructed assets, Service life planning, Part 1: General principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

[5 Alexander, M., and Beushausen, H. (2019), “Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures–review and critique”, Cement and Concrete Research, 122, pp.17-29.

[6] Altaie, M.R. (2023), “Factors Affecting Building Maintenance Practices”, Journal of Engineering, 29(12), pp.153-172.

[۷] کاوه، ع.، و ایران‌منش، ع. (۱۳۷۸)، "شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی سازه‌ها"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری. (نشریه شماره ک-۳۱۰).

[۸] عربزاده، ا.، و امیدی‌نسب، ف. (۱۳۸۲)، "پیش‌بینی مقاومت نهایی برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دوسر ساده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، ششمین کنفرانس عمران اصفهان.

[۹] منهاج، م.ب.، و سیفی‌پور، ن. (۱۳۷۷)، "هوش محاسباتی، جلد دوم، کاربرد هوش محاسباتی در کنترل"، مرکز نشر پروفسور حسابی.

[10] Srinivasan A, Andresen J.C., and Holst A. (2023), “Ensemble Neural Networks for Remaining Useful Life (RUL) Prediction”, Proceedings of the Asia Pacific Conference of the PHM Society, 4(1).

[۱۱] محمودی صاحبی، م.، و اعتضادی‌فر، ح. (۱۳۹۳)، "معرفی شاخص عمر مفید باقی‌ماندهٔ ساختمان برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها"، نشریهٔ علمی و پژوهشی سازه و فولاد، ۸(۱۵)، ص ۵۷-۶۶.

[۱۲] پورمحمد، ف.، زارع، م.، درستیان، آ.، عکاشه، ب.، و مجرب، م. (۱۳۹۹)،"تحلیل خطر احتمالی زلزله و ارزیابی جنبش نیرومند زمین در جنوب غرب البرز"، نشریهٔ علمی پژوهشی زمین‌شناسی لرزه‌ای و مهندسی زلزله، ۲۴(۲)، ۴۷-۳۶.

[۱۳] محرمی، ح.، و مدنی، س.ح. (۱۳۹۵)، "پیش‌بینی خسارت لرزه‌ای سازه‌های خمشی فولادی به‌کمک شبکهٔ عصبی"، نشریهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۶(۸۳)، ص ۷۵-۸۶.