مجله علمی – پژوهشی
«عمـــران مـــدرس»
دوره دهم، شماره۳، پاییز ۱۳۸۹

«یادداشت تحقیقاتی»

سلامت‌سنجی تیرهای طره‌ای شکل ترک‌خورده به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، با درنظرگرفتن رفتار غیرخطی ترک

مهران جوهرزاده[۱]، ناصر خاجی[۲*]، اردشیر بحرینی‌نژاد[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار بخش مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

nkhaji@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸٦، دریافت پذیرش: اردیبهشت ۱۳۸۸)

چکیده – در این تحقیق، با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش المان محدود، تیرهای طره‌ای‌شکل آسیب‌دیده که دارای ترک‌های طولی هستند، مورد بررسی و سلامت‌سنجی قرار گرفته‌اند. رفتار غیرخطی ترک‌ها (بازوبسته‌شدن آنها) در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده توسط نویسندگان، در ردیابی ترک در سازه‌ها به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، رفتار مزبور تاکنون مورد توجه محققان دیگر قرار نگرفته است. برای منظورنمودن اثرات غیرخطی ترک، از روش المان محدود استفاده شده است. تغییرات ایجاد شده در فرکانس‌های طبیعی مودهای مختلف ارتعاشی در اثر وجود ترک، به عنوان داده‌های لازم در آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با ایجاد سناریوهای مختلف برای حالات تیرهای سالم و آسیب‌دیده (با موقعیت‌ها و شدت‌های ترک‌خوردگی مختلف) دو کلاس مشخص از شبکه‌های عصبی برای تعیین موقعیت و طول (شدت) ترک‌های طولی در تیرها آموزش داده شده‌اند. نتایج حاصل از دو کلاس مزبور نشان می‌دهند که شبکه‌های آموزش‌دیده به صورت مطلوبی طول ترک را پیش‌بینی می‌کنند. همچنین ملاحظه می‌شود که پیش‌بینی شبکه‌های آموزش‌دیده برای تعیین محل ترک در حد قابل قبول بوده، که علل تقریبات وارده در این پیش‌بینی مورد بحث قرار گرفته است.

کلیدواژگان: سلامت‌سنجی سازه‌ها، تیر طره‌ای، شبکه عصبی مصنوعی، روش المان محدود غیرخطی، باز و بسته شدن ترک.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۱- مقدمه

بررسی آسیب‌های ناشی از زلزله و سایر عوامل بر ساختمان‌های پایدارِ موجود و نیز مطالعه‌ی ساختمان‌ها قبل از وقوع زلزله، برای برآورد دلیل آن‌ها و پیش‌بینی نقاط آسیب‌پذیر احتمالی در زمان وقوع زلزله از مباحث روز در مهندسی زلزله و دینامیک سازه‌ها است.

در هنگام زلزله، یک سازه تغییرمکان‌های مختلفی را تجربه می‌کند که در لحظه‌ای از زمان رکورد، بیشینه پاسخ تغییرمکانی را از خود نشان می‌دهد. در حرکات ضعیف زمین، این تغییرمکان‌هایِ بیشینه، بسیار کوچک و در محدوده‌ی ارتجاعی هستند؛ که پس از توقف حرکات، سازه به حالت نخست خود باز می‌گردد. در این محدوده، سازه متحمل هیچ‌گونه خسارتی نشده وهمه‌ی اعضای سازه‌ای، مقاومت، سختی و شکل هندسی نخست خود را دوباره به‌دست می‌آورند و به حالت قبل از زلزله باز می‌گردند.

در حرکات قوی زمین، تغییر مکان‌ها، زیاد شده و باعث ایجاد تنش‌های زیادتر از حد طراحی الاستیک در اعضا می‌شود. با توجه به افزایش تغییر مکان‌ها و در نتیجه تنش‌ها، اجزا از حد خطی و الاستیک خود خارج و وارد محدوده‌ی غیرارتجاعی می‌شوند. از این مرحله به بعد است که اجزا بر اثر تنش‌های وارده و مقاومت موجود، آسیب‌دیدن و خسارت اجزا آغاز می‌شود. این خسارت به شکل‌های متفاوتی هم‌چون ترک‌خوردن، قلوه‌کن شدن مصالح، کمانش اجزا، و خمیری‌شدن اجزای سازه‌ای نمایان می‌شود. بسته به درجه‌ی آسیب‌دیدگی، سازه سختی اولیه و نیز مقاومت خود را (تا حدودی که بستگی به درجه آسیب‌دیدگی دارد) از دست می‌دهد.

با توجه به مباحث فوق، موضوع این نوشتار، سلامت‌سنجی سازه‌ای[1] برای بررسی و ردیابی آسیب[2] در آن‌ها است. این موضوع طی سال‌های اخیر حجم قابل توجهی از پروژه‌های تحقیقاتی مرتبط را به خود اختصاص داده است که مرور کامل پیشینه‌ی علمی تحقیق[3] را در این نوشتار مشکل می‌سازد. بنابراین در قسمت بعد، بر پیشینه‌ی علمی تحقیق، مرتبط با موضوع نوشتار حاضر تأکید می‌شود.

۲- پیشینه‌ی علمی تحقیق

در میان تحقیقات مختلف در زمینه‌ی سلامت‌سنجی و ردیابی آسیب در سازه‌های مختلف، بخش قابل‌توجهی به المان‌های سازه‌ای پرداخته‌اند. در این قسمت فقط به مرور پیشینه‌ی علمی تحقیق در مورد سلامت‌سنجی و ردیابی آسیب در المان‌های سازه‌ای پرداخته می‌شود. سعی شده است که در این مرور، تحقیقات مهم‌تر و جدیدتر ذکر شود.

ماروالا و هانت [۱] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی[4]، به ردیابی ترک در تیرهای طره‌ای‌شکل پرداخته‌اند. آنان برای آموزش شبکه‌ی مورد استفاده، از توابع پاسخ فرکانسی[5] و پارامترهای مودال[6] سود جسته‌اند. در تحقیق ایشان، آثار ترک به‌سادگی با کاهش ماتریس سختی المان‌های محدود تیر مدل شده و از اثرات غیرخطی آن صرف‌نظر شده است. در یک حل تحلیلی ساده، سینها و همکاران [۲] آثار ترک‌های چندگانهٔ عمود بر محور طولی تیرها را با استفاده از روش المان محدود در قلمرو فرکانس، بررسی کرده‌اند. ایشان ترک را

1. Structural Health Monitoring (SHM)
2. Damage Detection
3. Literature Review
4. Artificial Neural Networks (ANNs)
5. Frequency Response Functions
6. Modal Parameters

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

به‌صورت یک شیار[1] (یا بازشدگی)[2] که دارای رفتار خطی است مدل کردند. دادو و شپلی [۳] مسئله‌ی تعیین کیفیت ترک‌های خطی (ارزیابی عمق ترک و تعیین موقعیت) را مطرح کردند. آنان یک تکنیک بهینه‌سازی را بر اساس یک مدل المان محدود اعضای سازه‌ای ترک‌خورده برای تخمین پارامترهای ترک در تیرها، خرپاها و سازه‌های قابی دوبعدی، به‌کار گرفته‌اند. اطلاعات مودی سازه‌های ترک خورده با حل مسئله‌ی مقادیر ویژه‌ی متناظر، تعیین می‌شوند. در تحقیق ایشان نیز آثار ترک با کاهش ماتریس سختی المان‌های محدود مدل شده و از آثار غیرخطی آن صرف‌نظر شده است. ساهین و شنوئی [٤] با استفاده از شبکه‌های عصبی، به ردیابی خسارت در تیرهای طره‌ای‌شکل پرداخته‌اند. آنان برای آموزش شبکه‌ی مورد استفاده، از تغییرات فرکانس طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی بهره برده‌اند. در تحقیق ایشان، خسارت به‌سادگی با کاهش ضخامت المان‌های محدود مدل شده و از آثار غیرخطی آن صرف‌نظر شده است. لین [۵] با استفاده از روش تحلیلی ماتریس انتقال، مسائل مستقیم و معکوس ردیابی یک ترک باز (شیار) منفرد عمود بر محور طولی تیرهای ساده را حل کرده است. تحلیل مزبور نیز در قلمرو فرکانس انجام شده است.

در میان پژوهش‌های متنوع انجام‌شده که به برخی از آن‌ها در بالا اشاره شد، رفتار خطی ترک یا خسارت (که به‌صورت‌های ساده‌شده ذکر شده مدل شده‌اند) در قلمروی فرکانس مدنظر قرار گرفته است. از سوی دیگر، برخی از پژوهش‌های اخیر در مورد رفتار باز و بسته‌شدن[3] ترک در تیرهای ترک‌خورده طره‌ای شکل [٦–٨] و ساده [۹–۱۰] نشان می‌دهد که رفتار غیرخطی ترک که به‌صورت بازوبسته‌شدن آن بروز می‌کند، فرکانس‌های طبیعی تیرهای ترک‌خورده را به‌صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار میدهد. مرور پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که تعداد انگشت‌شماری از محققان به بررسی مسأله‌ی ردیابی ترک (یا خسارت) با استفاده از فرکانس‌های طبیعی تیرهای ترک‌خورده با درنظرگرفتن رفتار غیرخطی ترک پرداخته‌اند. لئونارد و همکاران [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی آثار یک ترک غیرخطی عمود بر محور طولی تیرهای طره‌ای شکل پرداخته‌اند. آنان تلاش کردند که با بررسی تغییرات ایجادشده در مشخصات دینامیکی تیرها، ترک را شناسایی کنند. در پژوهشی دیگر [۱۲]، آثار یک ترک غیرخطی عمود بر محور طولی تیرهای طره‌ای‌شکل به‌صورت تحلیلی بررسی شده است که در آن از مشخصات دینامیکی هم‌زمان مودها برای ردیابی و شناسایی ترک استفاده شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دربیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی شناسایی و ردیابی ترک در المان‌های تیر، رفتار خطی ترک منظور شده است. در تحقیقات اندک موجود در مورد ردیابی ترک‌های غیرخطی نیز تاکنون از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نشده است. از سوی دیگر، بیش‌تر تحقیقات موجود آثار ترک‌های عمود بر محور طولی تیرها را بررسی کرده‌اند و تحقیقات کم‌تری، به ترک-های هم‌راستا با محور طولی تیرها پرداخته‌اند. با توجه به زمینه‌های ذکر شده، تحقیق حاضر تلاش می‌کند که با بهره‌گیری از مزایا و قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شناسایی سیستم‌های غیرخطی، از یک سو، و استفاده از روش المان محدود برای مدل‌سازی مسائل غیرارتجاعی و مدل‌سازی پدیده‌ی بازوبسته‌شدن ترک از سوی دیگر، تیرهای طره‌ای‌شکل آسیب‌دیده را که دارای ترک‌های طولی هستند، سلامت‌سنجی کند.

1. Notch
2 . Opening
3. Breathing

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۳- روش‌شناسی[1] تحقیق

به طور کلی، خسارات وارد بر یک سازه (یا المان سازه‌ای) باعث تغییر در فرکانس‌های طبیعی آن می‌شود. بنابراین با داشتن تخمین‌های مناسب از فرکانس‌های مذکور، امید می‌رود که بتوان براوردهای کمّی و کیفی مناسبی از خسارات احتمالی موجود در سازه‌ی موردنظر ارائه کرد. تغییرات فرکانس‌های طبیعی می‌تواند بیانگر وجود خسارت (مثلاً تَرَک) در سازه بوده، و در تعیین موقعیت آن نیز مؤثر باشد. هم‌چنین لازم است که داده‌های مربوط به چندین مود در مطالعات مد نظر قرارگیرند، چرا که هر فرکانس طبیعی، با توجه به موقعیت تَرَک، به میزان مشخصی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

با توجه به این‌که ردیابی آسیب یک مسأله معکوس[2] است که در حالت کلی دارای یک راه‌حل الگوریتمی نیست، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۳-۱٤] به صورت وسیعی در حل این کلاس مهم از مسائل مهندسی و علوم پایه به‌کار می‌روند [۱۵].

داده‌های دینامیکی موردنیاز برای استفاده در شبکه‌های عصبی را می‌توان به دو صورت آزمایشگاهی (مثلاً ٤) و یا صرفاً عددی [۱٦-۱۷] ایجاد کرد. از این داده‌ها می‌توان برای هر دو منظور آموزش و آزمایش استفاده کرد. در این تحقیق، روش عددی المان محدود غیرخطی برای تولید داده‌های مزبور انتخاب شده است.

روش کلی کار به این صورت است که با اعمال آسیب‌های محتمل به مدل المان محدود یک سیستم (یا المان) سازه‌ای و به‌دست آوردن مشخصات دینامیکی سیستم آسیب‌دیده، و مقایسه‌ی مشخصات حاصل با مشخصات اصلی سیستم (یا المان) سالم، می‌توان مدل‌هایی ارائه کرد که در یک حالت کلی‌تر مورد استفاده قرار گرفته و مسئله سلامت‌سنجی یک سازه‌ی مشابه را حل کنند. حل مسئله فوق منجر به ردیابی آسیب‌های احتمالی در سازه، محل آسیب‌ها و شدت آن‌ها خواهد بود.

٤- تعریف مسئله

در این قسمت، روش حل مسئله‌ی معکوس که در قسمت قبل تشریح شد، برای ردیابی آسیب در یک المان سازه‌ای بررسی می‌شود. المان سازه‌ای مورد بحث، یک تیر طره‌ای شکل با ابعاد مشخص است. فرض می‌شود جنس تیر از فولاد باشد و قبل از ایجاد آسیب، در محدوده‌ی ارتجاعی عمل کند. هم‌چنین فرض می‌شود تیر در راستای لایه‌های نورد شده، به تکیه‌گاه وصل شده و در همه‌ی جهات، همگن باشد.

برای تیر آسیب‌دیده (ترک خورده)، فرضیات زیر مدنظر قرار می‌گیرد:

- امتداد ترک‌ها در طول تیر فرض می‌شود.
- موقعیت ترک‌ها در نوار میانی تیر در نظر گرفته می‌شود.
- برای هر تیر آسیب‌دیده تنها یک ترک در نظر گرفته می‌شود.
- ترک‌های موجود دارای طول‌های متفاوتی هستند که الگوریتم پیشنهادی (در قسمت قبل) باید این طول‌های متفاوت را تعیین کند.
- موقعیت ترک‌ها در امتداد محور تیر نیز باید به کمک الگوریتم مزبور شناسایی شود.

بنابراین می‌توان دو گام اصلی زیر را برای حل مسئله تعریف‌شده درنظر گرفت:

ا) آنالیز عددی تیرهای سالم و آسیب‌دیده‌ی بالا به کمک روش المان محدود برای استخراج مشخصات

1. Methodology
2. Inverse Problem

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

دینامیکی سیستم در حالات مختلف.

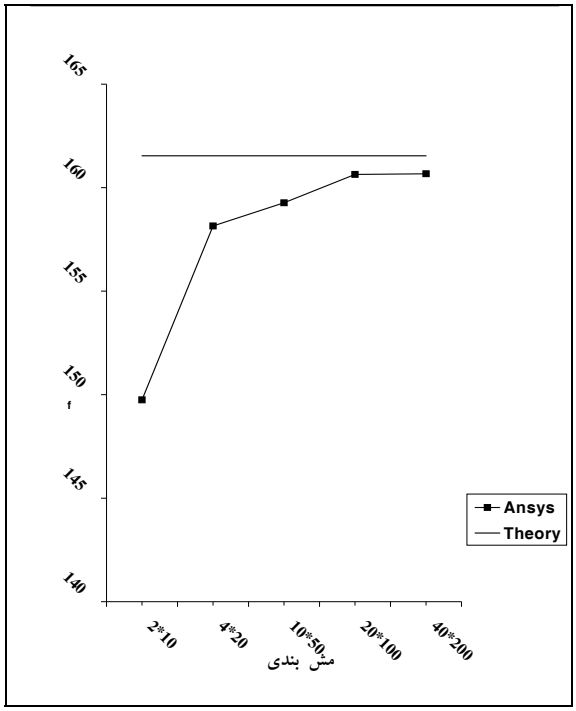
۲) به‌کارگیری اطلاعات حاصل در گام اول برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی مورد استفاده.

۵- مدل‌سازی المان محدود

در این تحقیق، از نرم‌افزار ANSYS برای مدل‌سازی المان محدود استفاده شده است. با توجه به هندسه و شرایط مرزی ساده، برای حالات سالم و آسیب‌دیده، المان‌های ایزوپارامتریک تنش مسطح[1] چهارگرهی مورد استفاده قرار گرفته است.

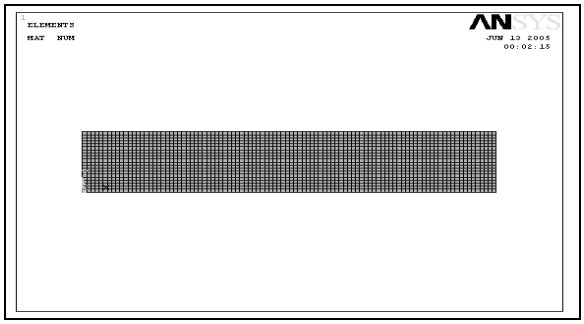
در تمام آنالیزهای انجام‌شده در این تحقیق، یک تیر طره‌ای شکل به طول ۱۰۰۰، پهنای ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر بررسی شده است.

برای حصول اطمینان از تناسب مش‌بندی مورد استفاده برای حل مسئله‌ی موردنظر از تست همگرایی[2] استفاده شده است. در این تست، فرکانس مود اول تیر مزبور به عنوان معیار همگرایی انتخاب شده است که مقدار آن به صورت حل بسته[3] [۱۸]، موجود و برابر f = ۱٦۱/٥٤ است. برای انجام تست، پنج مش‌بندی با دقت‌های مختلف انتخاب شده است که در محور افقی نمودار شکل ۱ نشان داده شده‌اند. اعداد محور افقی بیانگر تعداد تقسیمات تیر در ارتفاع و طول آن است. محور قائم نیز فرکانس را نشان می‌دهد.



شکل ۱ تست همگرایی تیر طره‌ای‌شکل در این شکل، نتایج شبکه‌های مختلف المان محدود با نتایج حل بسته *(Theory)* موجود، مقایسه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، یک مش‌بندی با دقت (۱۰۰×۲۰) دارای خطای کم‌تر از یک درصد است، و افزایش دقت مش نیز تأثیری بر افزایش دقت جواب‌ها ندارد. بنابراین در قسمت‌های بعدی از این مش استفاده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲ مش (شبکه) المان محدود مورد استفاده در تحقیق حاضر

1. Plane Stress
2. Convergence Test
3. Closed-Form Solution

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

این شبکه از ۲۰۰۰ المان ایزوپارامتریک تنش مسطح چهارگرهی مربع‌شکل به طول و عرض ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است.

با حل مسئله‌ی مقدار ویژه[1] برای تیر طره‌ای شکل مزبور، مقادیر فرکانس‌های پانزده مود اول آن در جدول ۱ وارد شد.

جدول ۱ فرکانس‌های پانزده مود اول تیر طره‌ای‌شکل

$f_1 =$ ۱۶۰/۶۴	$f_2 =$ ۸۸۰/۴۵	(بر حسب هرتز) $f_3 =$ ۱۲۷۸/۳۰
$f_4 =$ ۲۱۳۷/۸	$f_5 =$ ۳۶۲۹/۷	$f_6 =$ ۳۸۳۹/۰
$f_7 =$ ۵۲۸۱/۶	$f_8 =$ ۶۴۰۲/۱	$f_9 =$ ۷۰۰۶/۱
$f_{10} =$ ۸۵۵۹/۸	$f_{11} =$ ۸۸۴۹/۷	$f_{12} =$ ۸۹۱۶/۵
$f_{13} =$ ۹۹۸۷/۵	$f_{14} =$ ۱۰۵۸۴	$f_{15} =$ ۱۱۱۳۴

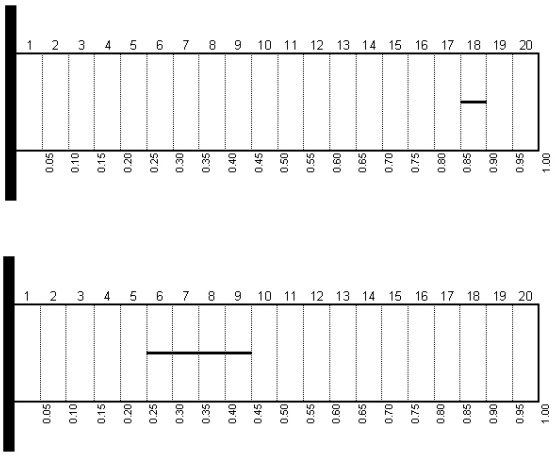
دلیل انتخاب داده‌های مزبور برای پانزده مود اول در قسمت طراحی شبکه‌های عصبی تشریح می‌شود. هم‌چنین در قسمت‌های بعد، فرکانس‌های بالا با فرکانس‌های تیر آسیب‌دیده مقایسه می‌شود.

پس از مدل‌سازی تیر سالم، لازم است به تیر آسیب‌دیده (ترک خورده) بپردازیم. تاکنون دیدگاه‌های مختلفی برای لحاظ کردن ناپیوستگی‌ها در یک محیط پیوسته، بر اساس روش المان محدود ارائه شده است که در میان آن‌ها می‌توان به مسائل تماس[2] و المان‌های درز[3] اشاره کرد (به عنوان نمونه، [۱۹–۲۵]). در این تحقیق، با توجه به مش‌بندی و المان انتخاب‌شده (شکل ۲)، از المان تماس[4] هماهنگ با سایر المان‌های پیوسته (در نرم‌افزار ANSYS) برای مدل‌سازی ترک‌ها استفاده شده است.

1. Eigen-Value Problem
2. Contact Problems
3. Joint Elements
4. Contact Element

۶- سناریوهای خسارت

شکل ۲ را در نظر می‌گیریم. برای اعمال ترک با طول‌ها و موقعیت‌های مختلف در امتداد طولی تیر و در نوار (لایه‌ی) میانی آن، ابتدا تیر را (به صورت فرضی) به ۲۰ قسمت مساوی ۵۰ میلی‌متری در امتداد طول تیر تقسیم-بندی و شماره‌گذاری می‌کنیم. ترک‌های مفروض در تیر بر اساس فواصل ۵۰ میلی‌متری مزبور و شماره‌ی آن‌ها، تعیین می‌شوند. تیرها نیز بر اساس ترک‌های روی آنها نام‌گذاری می‌شوند، به‌طوری‌که b (مخفف beam) و شماری پس از آن به معنی محل ترک است. به عنوان مثال، در تیر b-18 ناحیه‌ی هیجدهم تیر، دارای ترک‌خوردگی است و یا عبارت b-6~9 به معنی تیری با ترک در نواحی ششم الی نهم آن (به صورت پیوسته) است. این دو تیر نمونه در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳ دو تیر ترک‌خورده‌ی نمونه. تیر *b-18* (بالا) و تیر *b-6~9* (پایین).

با توجه به توضیحات اخیر، حال می‌توان سناریوهای (حالات) خسارت مختلف و متنوعی ایجاد کرد. این سناریوها با تغییر طول و موقعیت ترک در تیر تولید می‌شوند. به عنوان نمونه، می‌توان ۲۰ سناریوی مختلف در

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

نظر گرفت که در تمام آن‌ها طول ترک ۵۰ میلی‌متر بوده و فقط موقعیت آن‌ها در طول تیر تغییر می‌کند. نمونه‌ی دیگر، ایجاد ۱۶ سناریو است که در تمام آن‌ها طول ترک ۲۰۰ میلی‌متر بوده و موقعیت آنها در طول تیر جابه‌جا می‌شود. در این تحقیق، با تولید سناریوهای مختلف، در مجموع ۲۰۹ سناریو برای تیرهای آسیب‌دیده به‌کار گرفته شده است. با در نظر گرفتن یک سناریو برای تیر سالم، در مجموع ۲۱۰ سناریو خواهیم داشت.

در مرحله‌ی بعد، هر یک از سناریوها در نرم‌افزار المان محدود، تعریف شده و پس از مش‌بندی و به‌کارگیری المان‌های تماس در مدل، تحلیل شده است. با حل مسئله‌ی مقدار ویژه برای هر یک از سناریوها، مقادیر فرکانس‌های پانزده مود اول آن‌ها به‌دست آمده است. به عنوان نمونه، فرکانس‌های پانزده مود اول تیر b-18 در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ فرکانس‌های پانزده مود اول تیر *b-18*

(بر حسب هرتز)

$f_1 =$ ۱۶۰/۶۴	$f_2 =$ ۸۷۹/۹۶	$f_3 =$ ۱۲۷۸/۳
$f_4 =$ ۲۱۳۳/۷	$f_5 =$ ۳۶۲۱/۸	$f_6 =$ ۳۸۳۶/۹
$f_7 =$ ۵۲۷۵/۴	$f_8 =$ ۶۳۹۴/۰	$f_9 =$ ۶۹۶۹/۲
$f_{10} =$ ۸۳۰۱/۷	$f_{11} =$ ۸۸۴۰/۵	$f_{12} =$ ۸۸۸۷/۵
$f_{13} =$ ۹۸۰۶/۷	$f_{14} =$ ۱۰۴۹۷	$f_{15} =$ ۱۱۰۵۱

مقایسه‌ی این فرکانس‌ها با فرکانس‌های تیر سالم، بیانگر تغییرات ناچیز آن‌هاست که بیش‌تر در مودهای بالاتر قابل ردیابی است. به عنوان نمونه‌ی دیگر، فرکانس‌های پانزده مود اول تیر b-6~9 در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ فرکانس‌های پانزده مود اول تیر *b-6~9*

(بر حسب هرتز)

$f_1 =$ ۱۶۰/۰۷	$f_2 =$ ۸۵۳/۵۷	$f_3 =$ ۱۲۷۸/۱۰
$f_4 =$ ۲۰۸۶/۶۰	$f_5 =$ ۳۳۲۲/۷۰	$f_6 =$ ۳۸۳۷/۱۰
$f_7 =$ ۴۵۰۳/۷۰	$f_8 =$ ۵۱۲۵/۲۰	$f_9 =$ ۵۸۵۸/۹۰
$f_{10} =$ ۶۴۲۶/۵	$f_{11} =$ ۷۳۸۹/۱	$f_{12} =$ ۸۴۲۰/۸
$f_{13} =$ ۸۸۸۵/۰	$f_{14} =$ ۹۵۹۱/۹	$f_{15} =$ ۹۷۳۰/۷

مقایسه‌ی این فرکانس‌ها با فرکانس‌های تیر سالم، بیانگر تغییرات قابل‌توجه آن‌هاست که می‌تواند به عنوان معیاری برای ردیابی خسارت (اندیس خسارت[1])، مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به تعداد زیاد سناریوها، از ارائه‌ی نتایج تحلیل همه مدل‌ها صرف نظر می‌شود. این نتایج در قسمت‌های بعدی برای آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی به‌کار می‌روند.

۷- شبکه‌های عصبی مصنوعی

امروزه شبکه‌های عصبی مصنوعی، ، چه از نظر آنالیز ساختاری و چه روش‌های پیاده‌سازی سخت‌افزاری، از لحاظ کمّی و کیفی به سرعت در حال پیش‌رفت هستند [۱۳] در این‌جا تنها به ذکر این نکته بسنده می‌شود که شبکه‌های عصبی چندلایه‌ی‌پیش‌رو[2] یا پرسپترون چندلایه[3] با قانون یادگیری پس‌انتشار خطا[4] در مسائل مهندسی (هم‌چون سلامت‌سنجی و ردیابی آسیب در سازه‌ها)، از مقبولیت فراوان برخوردارند با توجه به وجود منابع علمی فراوان در زمینه ساختار و معماری انواع شبکه‌های عصبی

1. Damage Index
2. Multi Layer Feed-Forward
3. Multi Layer Perceptron (MLP)
4. Back Propagation Learning Rule (BPLR)

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

مصنوعی موجود، این نوع معماری در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است [۱، ۱٤]. تابع محرک زیگموئیدی نیز به عنوان پرکاربردترین تابع در شبکه‌های عصبی به‌خصوص شبکه‌های عصبی مزبور انتخاب شده است.

۸- طراحی شبکه‌های عصبی

در این قسمت به دنبال یافتن کلاسی از شبکه‌های عصبی هستیم که بتواند با استفاده از داده‌های فرکانسی مودهای مختلف تیر آسیب‌دیده (که در قسمت سناریوهای خسارت به‌دست آمده است)، موقعیت و شدت آسیب (طول ترک) را با استفاده از جعبه‌ابزار شبکه عصبی[1] موجود در نرم‌افزار متلب[2] پیش‌بینی کند.

ابتدا برای آموزش شبکه‌ها در هر کلاس، دو سوم داده‌ها را برای آموزش (۱٤۰ سناریو) و یک سوم داده‌ها را برای آزمایش (۷۰ سناریو) جدا کرده و با پیشوند Tr و Ts مشخص می‌کنیم. سپس شبکه‌ها را یک بار برای تعیین موقعیت ترک (کلاس ۱) و بار دیگر برای تعیین طول ترک (کلاس ۲) آموزش داده و بعد از آن به‌وسیله‌ی داده‌های تست به آزمایش شبکه می‌پردازیم.

برای بررسی آثار مودهای بالاتر، هریک از کلاس‌های مزبور در ۲۰ حالت مختلف مورد آموزش و آزمایش قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، حالت اول فقط شامل داده‌های فرکانسی مود اول است، در حالی‌که حالت دوم داده‌های فرکانسی مود اول و دوم را دربرمی‌گیرد و به همین ترتیب تا حالت بیستم که در آن داده‌های فرکانسی هر بیست مود اول درنظرگرفته می‌شود.

متدولوژی بالا برای حالات بیست‌گانه انجام شده است که به‌دلیل حجم زیاد داده‌ها و شبکه‌های مختلف، نتایج بهینه‌ی آن‌ها (به عنوان نمونه) در قسمت بعد آمده است. برای انتخاب حالت بهینه، لازم است خطای حاصل از شبکه‌ی آموزش‌دیده را بررسی کنیم. شبکهٔ آموزش‌دیده از داده‌های آزمایش هیچ‌گونه تجربه‌ای ندارد؛ بنابراین پس از آموزش شبکه، داده‌های آزمایش را وارد می‌کنیم ونتایج به‌دست‌آمده از شبکه‌ی آموزش‌دیده را با نتایج حاصل از تحلیل عددی المان محدود مقایسه کرده و میزان انحراف را بر اساس حداقل مربعات خطای متوسط[3] محاسبه می‌کنیم. با محاسبه‌ی خطای مزبور ملاحظه می‌شود که در این مسئله، درنظرگرفتن پانزده مود اول جواب‌های بهینه را به‌دست می‌دهد و درنظرگرفتن اثرات مودهای بالاتر تأثیر خاصی بر افزایش دقت شبکه‌های آموزش‌دیده ندارد. به همین علت در سراسر تحقیق حاضر داده‌های مربوط به پانزده مود اول مدنظر قرار گرفته است.

۹- نتایج شبکه‌های عصبی بهینه

خلاصه‌ای از معماری شبکه‌های عصبی بهینه که پس از سعی‌وخطاهای فراوان حاصل شده‌اند، در این قسمت ارائه می‌شود. در این‌جا، دو شبکهٔ عصبی بهینه معرفی می‌شوند که شبکه‌ی اول برای تعیین محل ترک و شبکه‌ی دوم برای تعیین طول ترک، آموزش دیده‌اند. همان‌گونه که در قسمت شبکه‌های عصبی مصنوعی آمده است، هر دو شبکه از نوع پرسپترون چندلایه هستند که مشخصات آن‌ها به صورت زیر است:

الف) شبکهٔ اول (برای تعیین محل ترک):

- تعداد ورودی: ۱۵
- تعداد لایه‌ها: ۳
- تعداد نرون لایه اول: ۱۰
- تعداد نرون لایه دوم: ۳

1. Neural Network Toolbox
2. MATLAB®
3. Minimum Mean-Squares Error

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

- تعداد نرون لایه سوم: ۱
- تابع انتقال تمام لایه ها : لوگ زیگموئید
- الگوریتم آموزش: پس‌انتشار خطا
- تعداد داده های آموزش: ۱٤۰
- تعداد داده های آزمایش: ۷۰

ب) شبکه‌ی دوم (برای تعیین طول ترک):

- تعداد ورودی: ۱۵
- تعداد لایه‌ها: ۳
- تعداد نرون لایه اول: ٦
- تعداد نرون لایه دوم: ۲
- تعداد نرون لایه سوم: ۱
- تابع انتقال تمام لایه ها : لوگ زیگموئید
- الگوریتم آموزش: پس‌انتشار خطا
- تعداد داده های آموزش: ۱٤۰
- تعداد داده های آزمایش: ۷۰

در ادامه نتایج شبکه به‌صورت نمودار ارائه شده است، که در آن‌ها اطلاعات زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

- X: محل ترک،
- L: طول ترک،
- Tr-inX: ورودی شبکه در مرحله‌ی آموزش برای تعیین محل ترک (X)،
- Tr-inL: ورودی شبکه در مرحله‌ی آموزش برای تعیین طول ترک (L)،
- Ts-ouX: محل ترک حاصل از آنالیز المان محدود برای کنترل خروجی شبکه در مرحله‌ی آزمایش،
- Ts-ouL: طول ترک حاصل از آنالیز المان محدود برای کنترل خروجی شبکه در مرحله‌ی آزمایش،
- Net: خروجی شبکه در هر یک از مراحل آموزش و آزمایش.

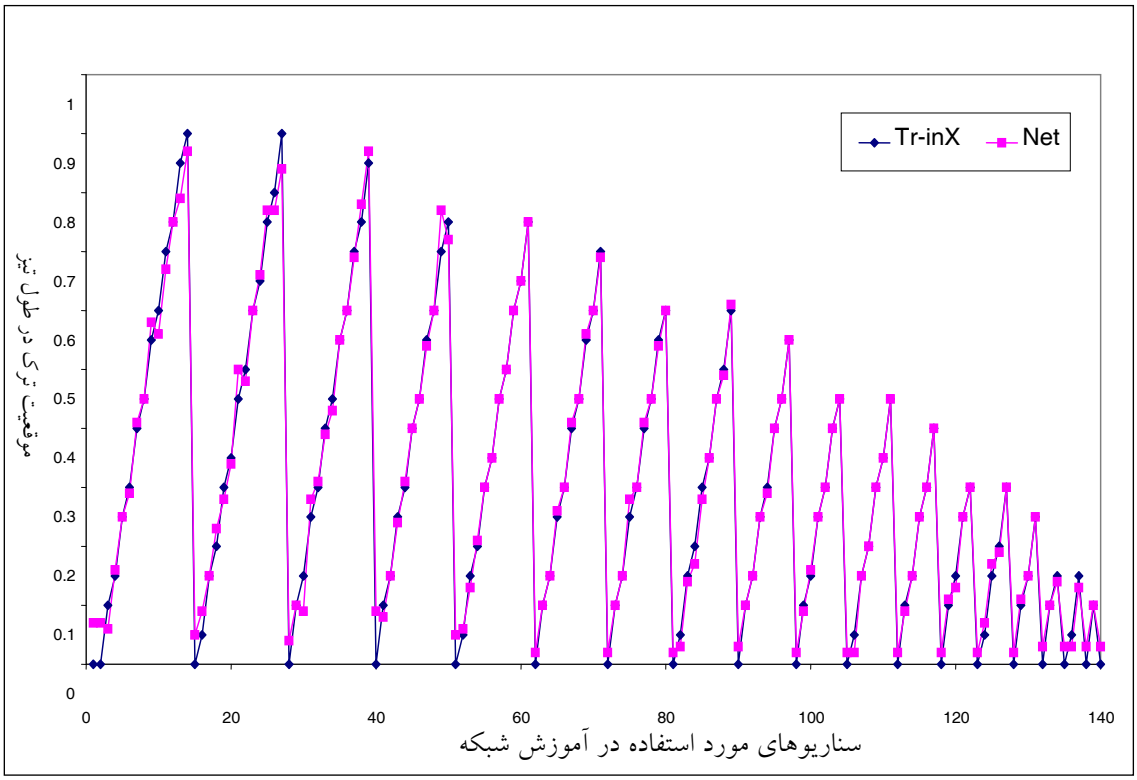
شکل ٤ نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ی کلاس ۱، برای ۱٤۰ سناریو (دو سوم داده‌های موجود) به منظور تعیین موقعیت ترک در طول تیر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شبکه به صورت مطلوبی آموزش دیده است. بررسی اختلاف دو نمودار نشان می‌دهد که متوسط خطای مطلق، برای تعیین موقعیت ترک در طول تیر، در حدود ۱٤ میلی‌متر است.

نتایج حاصل از آزمایش شبکه‌ی کلاس ۱، برای ۷۰ سناریو (یک سوم داده‌های موجود) به منظور تعیین موقعیت ترک در طول تیر، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شبکه به صورت نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. بررسی اختلاف دو نمودار نشان می‌دهد که متوسط خطای مطلق، برای پیش‌بینی موقعیت ترک در طول تیر، در حدود ۹۷ میلی‌متر است.

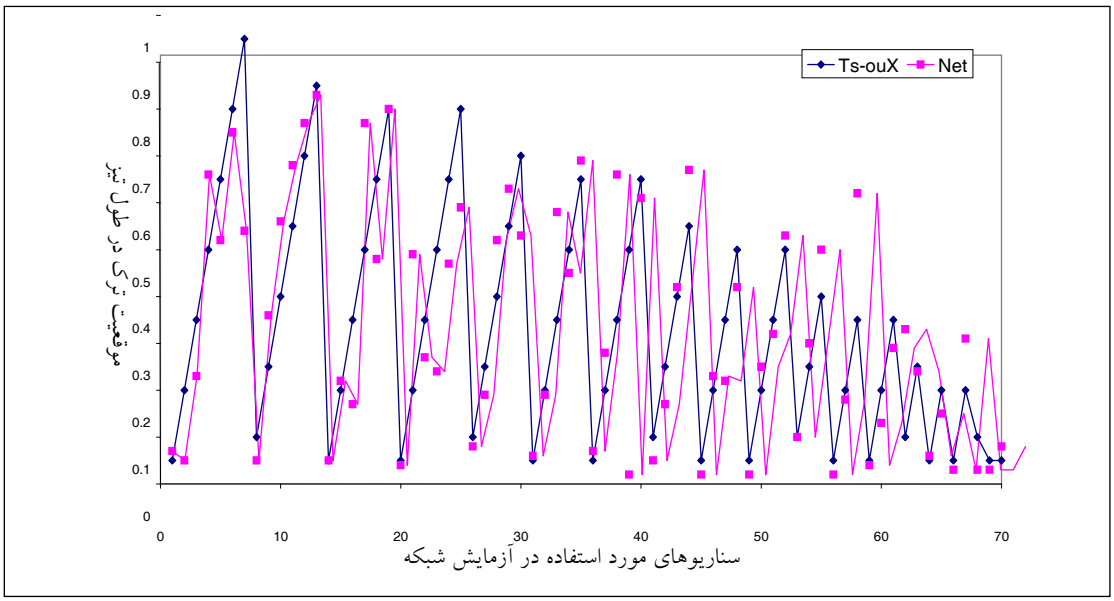
شکل ٦ نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ی کلاس ۲، برای ۱٤۰ سناریو (دو سوم داده‌های موجود) به منظور تعیین طول ترک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شبکه به صورت مطلوبی آموزش دیده است. بررسی اختلاف دو نمودار نشان می‌دهد که متوسط خطای مطلق، برای تعیین طول ترک، در حدود ۲ میلی‌متر است.

نتایج حاصل از آزمایش شبکه‌ی کلاس ۲، برای ۷۰ سناریو (یک سوم داده‌های موجود) به منظور تعیین طول ترک، در شکل ۷ آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شبکه به صورت نسبتاً خوبی پیش‌بینی می‌کند. بررسی اختلاف دو نمودار نشان می‌دهد که متوسط خطای مطلق، برای پیش‌بینی طول ترک، در حدود ۲۰ میلی‌متر است.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

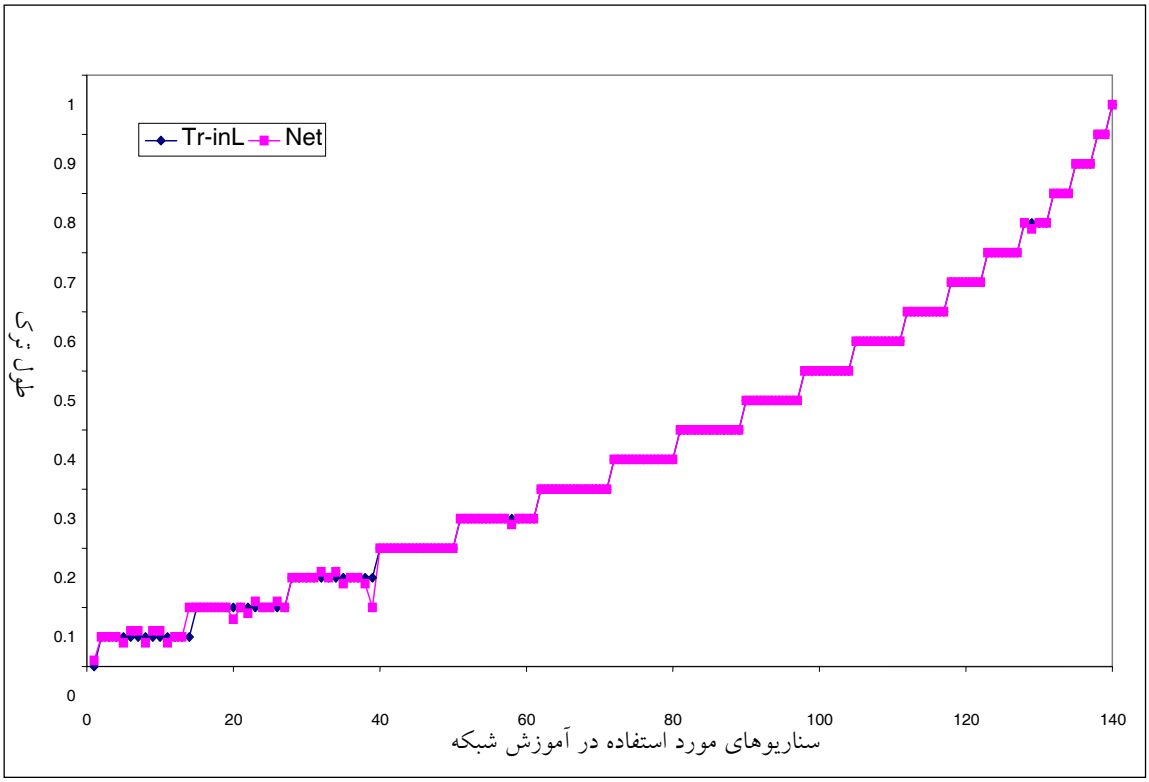


شکل ٤ نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ی کلاس ۱، برای ۱٤۰ سناریو (دو سوم داده‌های موجود) برای تعیین موقعیت ترک در طول تیر.

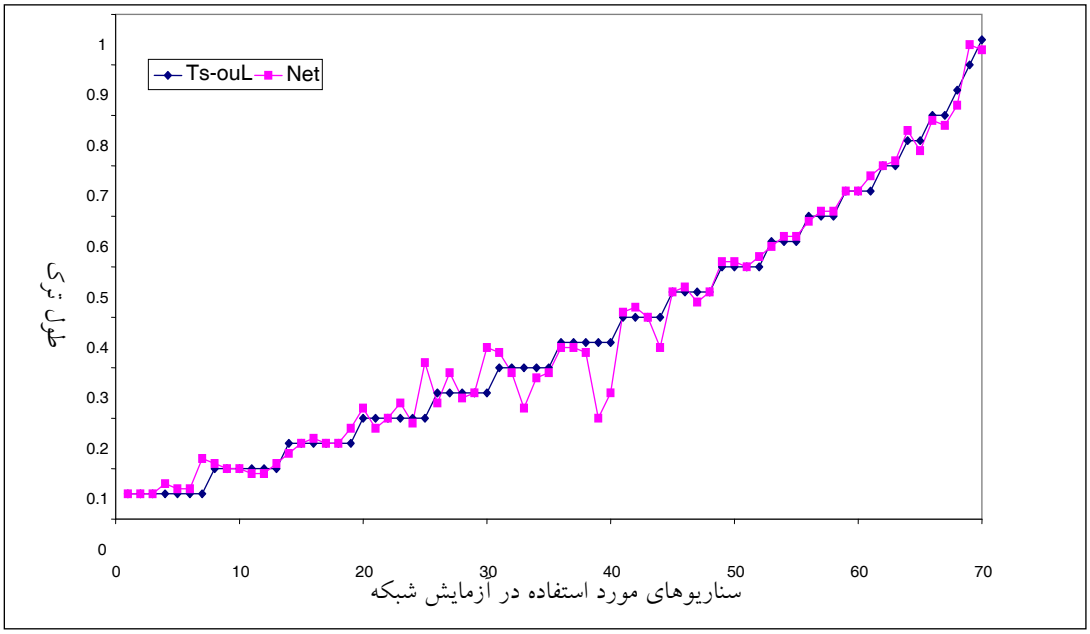


شکل ٥ نتایج حاصل از آزمایش شبکه‌ی کلاس ۱، برای ۷۰ سناریو (یک سوم داده‌های موجود) برای تعیین موقعیت ترک درطول تیر

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]



شکل ٦ نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ی کلاس ۲، برای ۱٤۰ سناریو (دو سوم داده‌های موجود) برای تعیین طول ترک.



شکل ۷ نتایج حاصل از آزمایش شبکه‌ی کلاس ۲، برای ۷۰ سناریو (یک سوم داده‌های موجود) برای تعیین طول ترک.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۱۰- نتیجه‌گیری

توسعه‌های اخیر در روش‌های عددی و هوش مصنوعی، باعث شده است که شبکه‌های عصبی به عنوان یک ابزار مؤثر در کنار روش‌های کلاسیک در تحلیل‌های مختلف مهندسی به‌کار برده شوند. به‌ویژه در مسائل غیرخطی و برازش توابع غیرخطی، می‌توان با کاربرد شبکه‌های عصبی جواب‌های مناسبی را در مدت زمان کوتاه به‌دست آورد.

در این تحقیق، با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی برای شناسایی سیستم‌های غیرخطی و استفاده از روش المان محدود برای مدل‌سازی مسائل غیرارتجاعی، تیرهای طره‌ای‌شکل آسیب‌دیده که دارای ترک‌های طولی هستند، مورد بررسی و سلامت‌سنجی قرار گرفته‌اند. تغییرات ایجاد شده در فرکانس‌های طبیعی مودهای مختلف ارتعاشی در اثر وجود ترک، به عنوان داده‌های لازم در آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با ایجاد ۲۱۰ سناریوی مختلف برای حالات تیرهای سالم و آسیب‌دیده (با موقعیت‌ها و شدت‌های ترک‌خوردگی مختلف) دو کلاس مشخص از شبکه‌های عصبی برای تعیین موقعیت و طول (شدت) ترک‌های طولی در تیرها آموزش داده شده‌اند. هم‌چنین فرض شده است که ترک موجود به صورت افقی و در وسط ارتفاع تیر ایجاد شده است.

نتایج حاصل از دو کلاس مختلف در شکل‌های ٤ تا ۷ خلاصه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبکه‌های کلاس ۲ مطلوب بوده و متوسط خطای مطلق ناشی از پیش‌بینی طول ترک در حدود ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به محدوده‌ی ۵۰ تا ۹۵۰ میلی‌متری برای ترک‌های محتملِ موجود در تیرِ موردِ تحلیل و متوسط خطای ۲ میلی‌متر در مرحله‌ی آموزش، می‌توان به نتایج حاصل اعتماد کرد. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از شبکه‌های کلاس ۱ در حد قابل قبول و متوسط خطای مطلق ناشی از پیش‌بینی محل ترک در حدود ۹۷ میلی‌متر است. به نظر می‌رسدکه با آموزش شبکه‌های جدید و افزودن داده‌های مؤثر دیگری به‌جز تغییرات فرکانس‌های مودی، بتوان نتایج بهتری در پیش‌بینی محل ترک به‌دست آورد. در این خصوص، بررسی‌هایِ دیگرِ انجام‌شده (که در این نوشتار ارائه نشده‌اند) بیانگر این واقعیت هستند که خطای موجود در پیش‌بینی محل ترک، به این علت است که موقعیت ترک و فرکانس مدها از ضریب همبستگی پایینی برخوردار هستند.

با بررسی شکل ۵ به نظر می‌رسد که ترک‌های نوک تیر به علت ایجاد مدهای ارتعاشی جدید (به خصوص وقتی که طول ترک زیاد است) باعث پراکندگی در برازش داده‌ها می‌شود، که این نکته نیز باعث ایجاد خطای بیش‌تر در پیش‌بینی محل ترک‌ها است.

۱۱- منابع

[1] Marwala T., Hunt H.E.M.; "Fault identification using finite element models and neural networks", *Mechanical Systems and Signal Processing*; Vol. 13; 1999; pp. 475-490.

[2] Sinha J.K., Friswell M.I., Edwards S.; "Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 251; 2002; pp. 13-38.

[3] Dado M.H.F., Shpli O.A.; "Crack parameter estimation in structures using finite element modeling", *International Journal of Solids and Structures*; Vol. 40; 2003; pp. 5389-5406.

[4] Sahin M., Shenoi R.A.; "Quantification and localisation of damage in beam-like

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

structures by using artificial neural networks with experimental validation", *Engineering Structures*; Vol. 25; 2003; pp.1785-1802.

[5] Lin H.-P; "Direct and inverse methods on free vibration analysis of simply supported beams with a crack", *Engineering Structures*; Vol. 26; 2004; pp. 427-436.

[6] Kisa M., Brandon J.; "The effects of closure of cracks on the dynamics of a cracked cantilever beam", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 238, 2000; pp. 1-18.

[7] Douka E., Hadjileontiadis L.J.; "Time-frequency analysis of the free vibration response of a beam with a breathing crack", *NDT&E International*; Vol. 38; 2005; pp. 3-10.

[8] Andreaus U., Casini P., Vestroni F.; "Non-linear dynamics of a cracked cantilever beam under harmonic excitation", *International Journal of Non-Linear Mechanics*; Vol. 42; 2007; pp. 566-575.

[9] Chondros T.G., Dimarogonas A.D., Yao J.; "Vibration of a beam with a breathing crack", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 239; 2001; pp. 57-67.

[10] Luzzato E.; "Approximate computation of non-linear effects in a vibrating cracked beam", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 265; 2003; pp. 745-763.

[11] Leonard F., Lanteigne J., Lalonde S., Turcotte Y.; "Free-vibration behaviour of a cracked cantilever beam and crack detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*; Vol. 15; 2001; pp. 529-548.

[12] Loutridis S., Douka E., Hadjileontiadis L.J.; "Forced vibration behaviour and crack detection of cracked beams using instantaneous frequency", *NDT&E International*; Vol. 38; 2005; pp. 411-419.

[13] Patterson D.W.; *Artificial neural networks: theory and applications*, Prentice Hall, 1996.

[14] Mehrotra K.; *Elements of artificial neural networks*, The M.I.T Press, 1997.

[15] Waszczyszyn Z., Ziemianski L.; "Neural networks in mechanics of structures and materials - new results and prospects of applications", *Computers and Structures*; Vol. 79; 2001; pp. 2261-2276.

[16] Abdo M.A.-B., Hori M.; "A Numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 251; 2002; pp. 227-239.

[17] Chung J., Yoo H.H.; "Dynamic analysis of a rotating cantilever beam by using the finite element method", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 249; 2002; pp. 147-164.

[18] Blevins R.D.; *Formulas for natural frequency and mode shape*, Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., 1979.

[19] Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L.; "A model for the mechanics of jointed rock", *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*; Vol. 99; 1968; pp. 637-659.

[20] Ghaboussi J., Wilson E.L., Isenberg J.; "Finite element for rock joints and interfaces", *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*; Vol. 99; 1973; pp. 833-848.

[21] Oden J.T., Pires E.B.; "Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for contact problems in elasticity", *ASME Journal of Applied Mechanics*; Vol. 50; 1983; pp. 67-76.

[22] Simo J.C., Wriggers P., Taylor R.L.; "A perturbed lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems", *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*; Vol. 50; 1985; pp. 163-180.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[23] Eterovic A.L., Bathe K.J.; "On the treatment of inequality constraints arising from contact conditions in finite element analysis", *Computers and Structures*; Vol. 40; 1991; pp. 203-209.

[24] Cescotto S., Charlier R.; "Frictional contact finite elements based on mixed variational principles", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*; Vol. 36; 1993; pp. 1681-1701.

[25] Kaliakin V.N., Li J.; "Insight into deficiencies associated with commonly used zero-thickness interface elements", *Computers and Geotechnics*; Vol. 17; 1995; pp. 225-252.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]