

تشخیص ترک در تیر تیموشنکو با استفاده از داده‌های فرکانس و تابع پاسخ فرکانسی

سیامک قدیمی^۱ و سید سینا کوره‌لی^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
در این تحقیق روش نوینی جهت تشخیص محل و عمق ترک در تیر تیموشنکو با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی و فرکانس ارائه شده است. تابع پاسخ فرکانسی و فرکانس سه مود اول به عنوان ورودی ماشین یادگیری کرانه‌ای به کار رفته است. این در حالیست که محل و عمق ترک در المان‌های مختلف سازه‌ای تیر به عنوان خروجی برای آموزش ماشین بکار می‌رود. برای نمایش کارایی روش ارائه شده، از تیر کنسولی و تیر دو سر مفصل با سه سناریوی مختلف شامل یک ترک و چند ترک در تیر استفاده شده است. همچنین برای اعتبار سنجی مدل‌سازی صورت گرفته، فرکانس‌های تیر کنسولی با مقادیر ارائه شده در منابع دیگر مقایسه گردیده است. در بخش دیگری از مطالعه انجام شده، اثر وجود سطوح مختلف نوفه در داده‌های ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر کارایی روش ارائه شده در تشخیص محل و میزان ترک در سازه‌های تیری است. همچنین روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در حالت وجود نوفه در داده‌های فرکانس و تابع پاسخ فرکانسی به عنوان ورودی‌های ماشین دارد.	دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸
	واژگان کلیدی: تشخیص ترک، تابع پاسخ فرکانسی، فرکانس، ماشین یادگیری کرانه‌ای.

۱- مقدمه

ترک یکی از مهمترین آسیب‌های پنهانی است که موجب شکست ناگهانی سازه‌ها می‌شود. شناسایی ترک در سازه‌های تیر مانند به وسیله تست‌های غیر مخرب و آنالیز دینامیکی آنها، یک چالش در حوزه عیب‌یابی سیستم‌های سازه‌ای می‌باشد. در اثر ایجاد ترک در سازه، انعطاف پذیری محلی آن افزایش می‌یابد که این پدیده منجر به ایجاد تغییراتی در خواص دینامیکی سازه‌ها از جمله فرکانس طبیعی، شکل مود و میرایی آنها می‌گردد که با استفاده از این تغییرات می‌توان به حضور ترک در سازه‌ها پی برد. در واقع دو مکانیزم عمده منجر به اتلاف انرژی در محل ترک و افزایش میرایی سیستم ارتعاشی می‌گردد: اصطکاک بین سطوح ترک در حین باز بسته شدن و ناحیه پلاستیک نزدیک نوک ترک [۱]. اگر ترکی در سازه بوجود آید هنوز

می‌توان از سازه استفاده نمود، اما وجود ترک مراقبت بیشتر را طلب می‌نماید. این امر، دلیل توجه محققین به مسئله تشخیص ترک در همان مراحل اولیه پیدایش آن در چند دهه اخیر بوده است [۲].

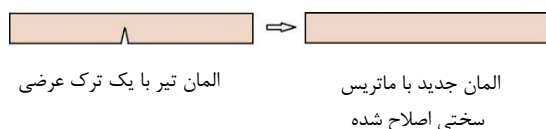
بسیاری از روش‌های ارائه شده جهت شناسایی ترک در سازه‌ها بر اساس تغییرات در فرکانس‌های طبیعی [۳ و ۴]، مقایسه اشکال مودی [۵] یا استفاده از تغییر شکل‌های استاتیکی [۶ و ۷] می‌باشند. همچنین مطالعات جامعی در زمینه رفتار دینامیکی تیرهای دارای ترک به عنوان یک مسئله مستقیم و معکوس [۸] طی دو دهه گذشته انجام شده است. با توجه به تغییراتی که ترک در سختی و به دنبال آن در ویژگی‌های مودال سازه دارد، لذا برای بررسی عیب سازه‌ها استفاده از ویژگی‌های مودال سازه بسیار کارآمد است که از بین این ویژگی‌ها روش تابع پاسخ

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s-kourehli@iau-ahar.ac.ir

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

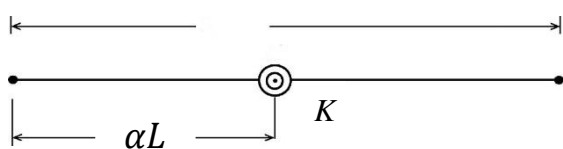
۲. گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

همانطوری که در شکل (۱) دیده می‌شود برای مدلسازی ترک در تیر، ابتدا فرض شده که المان دارای ترک با یک المان بدون ترک با سختی اصلاح شده جایگزین گردد [۱۵].



شکل ۱- تاثیر ترک با اصلاح ماتریس سختی [۱۵]

برای به دست آوردن ماتریس L سختی اصلاح شده برای یک المان به طول L ، ترک به عنوان یک فنر دورانی بدون جرم در نظر گرفته شده است که دو بخش یک المان دارای ترک را که الاستیک فرض شده به هم پیوند می‌دهد (شکل ۲). موقعیت فنر در روی المان در نظر گرفته می‌شود که چون یک پارامتر نسبی نسبت به طول المان است بی بعد می‌باشد $0 \leq \alpha \leq 1$.



شکل ۲- المان تیر تکرار که با فنر دورانی بدون جرم مدل گردیده است [۱۵]

سختی فنر دورانی نشان داده شده در شکل (۲) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Ew(h^2)}{72\pi f(\eta)} \quad (1)$$

که در آن η نسبت بدون بعد عمق ترک است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{d}{h} \quad (2)$$

در روابط فوق، d عمق ترک، w عرض تیر، E مدول الاستیسیته و h ارتفاع تیر می‌باشد. عمق ترک براساس تئوری مکانیزم شکست در محدوده $0 \leq \eta \leq 0.6$ خواهد

بود. همچنین $f(\eta)$ از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f(\eta) = 0.638\eta^2 - 1.035\eta^3 + 3.7201\eta^4 - 5.1773\eta^5 + 7.553\eta^6 - 7.332\eta^7 + 2.4909\eta^8 \quad (3)$$

فرکانسی نتایج با اطمینان بیشتر نسبت به روش‌های سنتی تحلیل مودال در بردارد.

روش منحنی تغییرات تابع پاسخ فرکانسی یکی از روش‌های مبتنی بر نتایج اطلاعات تابع پاسخ فرکانسی بوده که تفکر اولیه آن در سال ۱۹۹۹ توسط سمپایو و همکارانش ارائه شد [۹]. همچنین در سال ۲۰۰۲ روشی توسط لی و شین براساس تابع پاسخ فرکانسی جهت شناسایی در یک سازه تیر ارائه گردید که در آن، آسیب در عرض تیر به کمک یک تابع توزیع خرابی مشخص می‌شود [۱۰]. معمولا موضوع تشخیص محل و میزان ترک در المان سازه‌ای بر اساس مشخصه‌های مودال آن، یک مسئله معکوس می‌باشد که یکی از بهترین روش‌ها جهت حل این نوع مسائل محاسبات نرم شامل ماشین‌های مختلف یادگیری [۱۱ و ۱۲] و الگوریتم‌های مختلف بهینه یابی [۱۳] است.

در این مقاله هدف تعیین میزان ترک و موقعیت ترک بر روی المان‌های تیر می‌باشد. برای مدلسازی ترک از روش جاگذاری یک فنر دورانی بدون جرم (به عنوان ترک در المان تیر) استفاده شده است و با استفاده از سختی فنر، ماتریس سختی تیر اصلاح شده بدست آمده است. تابع پاسخ فرکانسی تیر به همراه سه فرکانس مود اول آن، به عنوان ورودی ماشین بکار رفته است. همچنین موقعیت و میزان ترک به عنوان خروجی برای آموزش ماشین یادگیری کرانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمایش عملکرد روش ارائه شده، تیر کنسولی و دو سر مفصل با سناریوهای مختلف شامل یک ترک یا چند ترک مورد تست و ارزیابی قرار گرفته شده است. همچنین اثر وجود نوفه در داده‌های فرکانس و تابع پاسخ فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدلسازی از نرم افزار MATLAB (2015 rb) استفاده شده است. نتایج حاصله بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی در تعیین محل و عمق ترک در تیرهای مورد مطالعه است.

۲- بیان مسئله

در این بخش به روش ارائه شده جهت تشخیص ترک در تیر اشاره می‌شود. ابتدا روابط مورد نیاز جهت مدلسازی ترک‌دار با استفاده از روش سختی اصلاح شده بدست آمده و سپس تابع پاسخ فرکانسی توضیح داده می‌شود. در نهایت توضیحات مربوط به ماشین یادگیری کرانه‌ای ارائه می‌گردد.

۲-۱- رابطه‌سازی تیر ترک‌دار

بر اساس اصول دینامیک سازه‌ها، معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار دینامیکی سازه‌های چند درجه آزادی به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۶]:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (10)$$

در رابطه فوق M ، C و K به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه بوده و $\ddot{X}(t)$ ، $\dot{X}(t)$ ، $X(t)$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی سازه در لحظه t می‌باشند. همچنین بردار نیروی وارده در درجات آزادی سازه است. اگر نیروی وارد بر سازه به صورت هارمونیک در نظر گرفته شود، این نیرو و جابجایی سازه در هر لحظه با استفاده از تبدیل فوریه به صورت زیر در می‌آید [۱۷]:

$$F(t) = F(w)e^{i\omega t} \quad (11)$$

$$X(t) = X(w)e^{i\omega t} \quad (12)$$

در رابطه فوق w فرکانس بار محرک و $X(w)$ و $F(w)$ به ترتیب جابجایی و نیروی وارد بر سازه در حوزه فرکانس می‌باشند. با جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه (۱۰) داریم:

$$X(w) = H(w) \cdot F(w) \quad (13)$$

در رابطه فوق، $H(w)$ پاسخ سازه در حوزه فرکانس بوده و به عنوان تابع پاسخ فرکانس تعریف می‌شود. تابع پاسخ فرکانس به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$H(w) = \frac{1}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2 + i 2\xi \left(\frac{w}{w_n}\right)} \quad (14)$$

در رابطه فوق، w_n فرکانس طبیعی سازه، ξ نسبت میرایی سازه و i برابر با $\sqrt{-1}$ می‌باشد. برای سیستم‌های چند درجه آزادی، تابع پاسخ فرکانس برای درجات آزادی i و j از روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر استخراج می‌گردد [۱۸]:

$$H_{ij}(w) = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_{ik} \phi_{jk}}{w_k^2 - w^2 + i 2\xi_k w_k w} \quad (15)$$

در نهایت ماتریس سختی اصلاح شده برای عضو ترک‌دار از طریق رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$[K_j^c] = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} 1 & A & -1 & L-A \\ & CA & -A & A(L-C) \\ & & 1 & A-L \\ \text{Symmetric} & & & L^2 - 2AL + AC \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن،

$$A = \frac{L^2(K) + 2EIL\alpha}{2L(K) + 2EI} \quad (5)$$

$$B = \frac{L^3}{3EI} + \frac{L}{GA_s} - \frac{AL^2}{2EI} - \frac{A\alpha L}{K} \quad (6)$$

$$C = \frac{2GA_s KL^2 + 6EIGA_s L\alpha^2 + 6EIK}{3GA_s LK + 6GA_s EI\alpha} \quad (7)$$

که در اینجا A_s سطح مقطع تیر و E مدول الاستیسیته و G_s مدول برشی الاستیسیته می‌باشد.

پس از تشکیل ماتریس سختی عضو ترک خورده، می‌توان ماتریس سختی کلی سازه را از طریق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$[K^c] = \sum_{j=1}^{N_e} [K_j^c] \quad (8)$$

که در آن، K_j^c و K^c به ترتیب ماتریس سختی کل تیر ترک‌دار و ماتریس سختی المان j ام ترک‌دار است. همچنین N_e تعداد کل المان‌های تیر می‌باشد.

بنابراین معادله مشخصه برای سازه ترک‌دار به صورت زیر خواهد بود:

$$([K^c] - \lambda_i^c [M]) \{\phi_i^c\} = 0 \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

که در آن λ_i^c و ϕ_i^c به ترتیب مربع فرکانس طبیعی و شکل مودی مود i ام سازه ترک‌دار می‌باشد.

۲-۲- تابع پاسخ فرکانسی^۱

^۱ Frequency Response Function

که در آن، β_i بردار ضرایب مربوط به i امین نرون لایه پنهان و نرونهای خروجی است. همچنین f تابع تحریک و w_i بردار ضرایب مربوط به i امین نرون لایه پنهان و نرونهای ورودی است و b_i بایاس مربوط به i امین نرون لایه پنهان می‌باشد. در نتیجه رابطه ۱۸ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Y = H \beta \quad (18)$$

که در آن H برابر است با:

$$H = \begin{pmatrix} f(x_1; w_1, b_1) & \dots & f(x_1; w_N, b_N) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ f(x_M; w_1, b_1) & \dots & f(x_M; w_N, b_N) \end{pmatrix} \quad (19)$$

بنابراین در ماشین یادگیری کرانه‌ای پس از تعیین تعداد گره‌های لایه پنهان و تابع تحریک تمامی پارامترها به جز β_i می‌توانند بصورت تصادفی انتخاب شوند و پارامتر β_i را می‌توان را با استفاده از روش معکوس کلی مور پنروز به ترتیب زیر تعیین نمود [۱۹]:

$$\hat{\beta} = H^+ Y \quad (20)$$

که H^+ معکوس کلی مور پنروز H می‌باشد [۲۰]. بنابراین به صورت کلی می‌توان گفت که ماشین یادگیری کرانه‌ای شامل دو مرحله می‌باشد که در مرحله اول مقادیر تصادفی به w_i و b_i اختصاص داده شده و خروجی لایه پنهان H محاسبه می‌گردد و در مرحله دوم ضرایب وزنی خروجی $\hat{\beta}$ بر اساس رابطه ۲۰ محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که تعداد لایه‌های پنهان به کار رفته در تحقیق حاضر هزار بوده و از تابع تحریک سینوسی استفاده شده است.

۳- مثال‌های عددی

در این بخش تیر کنسولی و دو سر مفصل ابتدا توسط روش المان محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس ترک در تیر مدلسازی شده است. همچنین برای آموزش ماشین، ابتدا داده‌های آموزشی تولید شده و سپس به ماشین آموزشی داده شده و در نهایت تست شده است.

در رابطه فوق، $H_{ij}(w)$ پاسخ درجه آزادی i تحت اثر بار هارمونیک با دامنه واحدی است که بر درجه آزادی j اعمال می‌شود. در این تحقیق ξ نسبت میرایی سازه برابر با ۰,۰۵ در نظر گرفته شده و ϕ_{ik} و ϕ_{jk} به ترتیب اشکال مودی درجه آزادی i و j مربوط به مود k ام می‌باشند. قابل ذکر است که تابع $H_{ij}(w)$ را می‌توان به صورت یک ماتریس بیان نمود که در این صورت ابعاد ماتریس برابر تعداد درجات آزادی سازه خواهد بود.

در این تحقیق برای استفاده از تابع پاسخ فرکانسی از اختلاف بین پاسخ فرکانس سازه ترک‌دار و سازه سالم استفاده شده است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H_{ij}^d = H_{ij}^{intact} - H_{ij}^{cracked} \quad (16)$$

که در این رابطه $H_{ij}^{cracked}$ ، H_{ij}^{intact} و H_{ij}^d به ترتیب تفاضل تابع پاسخ فرکانس سازه سالم و ترک‌دار، تابع پاسخ فرکانس سازه سالم و تابع پاسخ فرکانس سازه ترک‌دار را نشان می‌دهند.

۳-۲- ماشین یادگیری کرانه‌ای^۱

ماشین یادگیری کرانه‌ای که در واقع یک شبکه یک سوپه تک لایه می‌باشد، اولین بار توسط هوانگ [۱۹] در سال ۲۰۰۶ ارائه گردیده است. در این نوع شبکه ضرایب وزنی لایه پنهان به صورت تصادفی مقدار دهی شده و در نتیجه فقط ضرایب وزنی لایه خروجی می‌بایست بهینه‌یابی شود که می‌توان از روش معکوس کلی مور پنروز^۲ بهره برد. بنابراین زمان محاسبات بهینه‌یابی به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد. برای M داده آموزشی $\{x_i \in R^m\}$ که $\{x_i, y_i\} : i = 1, \dots, M$ و $\{y_i \in R^m\}$ می‌باشند هدف یافتن رابطه بین $\{x_i\}$ و $\{y_i\}$

است. تابع خروجی مربوط به ماشین یادگیری کرانه‌ای با N نرون در لایه پنهان را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$y = \sum_{i=1}^N \beta_i f(x, w_i, b_i) \quad (17)$$

² Moore-Penrose generalized inverse

¹ Extreme Learning Machine

است بی‌نهایت حالت مختلف ترک در تیر وجود دارد که جهت آموزش از ۸۱۰۰ داده که به روش تصادفی انتخاب گردیده، استفاده شده است.

برای وارد کردن نیروی هارمونیک ابتدا فرکانس مود اول سازه سالم را به دست می‌آوریم. محدوده فرکانس نیروی وارده بایستی در محدوده فرکانسی قبل از اولین تشدید در نظر گرفته شود چرا که قبل از اولین فرکانس تشدید، نتایج تابع پاسخ فرکانسی عملکرد بهتری دارند [۹].

جدول ۱- اعتبار سنجی فرکانس‌های (هرتز) سه مود اول تیر

کنسولی			
مود سوم	مود دوم	مود اول	
۱۶۵,۶۷	۶۰,۰۸	۹,۷۱	المان چهار نقطه- ای مستطیلی ارائه شده در منبع [۱۵]
۱۷۹,۱۸	۶۳,۳۶	۱۰,۲۳	مطالعه حاضر

برای تیر کنسولی همانطوری که در جدول ۲ دیده می‌شود، سه سناریوی فرضی ترک با موقعیت‌های مختلف و با عمق متفاوت در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای تیر

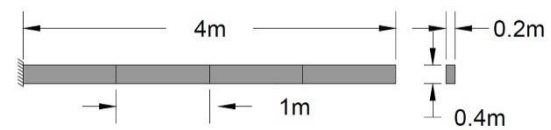
کنسولی				
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰,۳
سناریوی دو	۰	۰,۳	۰,۲	۰
سناریوی سه	۰	۰,۳	۰,۲	۰,۲
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰,۲
سناریوی دو	$0 < \alpha < 1$	۰,۵	۰,۴	$0 < \alpha < 1$
سناریوی سه	$0 < \alpha < 1$	۰,۴	۰,۲	۰,۴

با توجه به اینکه داده‌های به دست آمده از آزمایشات مودال انجام شده بر روی سازه‌ها معمولاً دارای نوفه‌های اندازه-گیری است، بنابراین لحاظ نمودن نوفه‌های مصنوعی در اندازه‌گیری‌های شبیه‌سازی شده (که از حل مستقیم مسئله با فرض یک سناریوی ترک مشخص به دست می‌آید) برای آزمودن پایداری و کارایی الگوریتم پیشنهادی بسیار مهم می‌باشد.

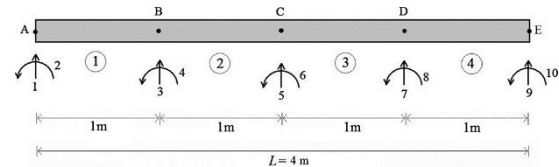
در مطالعه حاضر اثرات نوفه بصورت ارائه شده در روابط زیر

۱-۳- تیر کنسولی

تیر کنسولی در نظر گرفته شده، در شکل (۳) نشان داده شده است. مدل اجزا محدود تیر شامل ۴ عضو تیری و ۵ گره می‌باشد (شکل ۴). برای تیر در نظر گرفته، مشخصات مصالح شامل مدول مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون تیر ۰,۳ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع و ممان اینرسی برای اعضای تیر برابر ۰,۰۸ مترمربع و m^4 ۰,۰۱۰۶۶۶۶۷ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تیر کنسولی با چهار المان



شکل ۴- مدل اجزا محدود تیر کنسولی

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی صورت گرفته، فرکانس‌های مربوط به سه مود اول تیر کنسولی مورد مطالعه با مقادیر ارائه شده در منبع [۱۵] مقایسه شده است (جدول ۱). همانطوری که مشاهده می‌شود مقادیر فرکانس‌ها نسبتاً نزدیک می‌باشند.

در مطالعه حاضر جهت آموزش ماشین، مقادیر مربوط تابع پاسخ فرکانسی و فرکانس مربوط به سه مود اول به عنوان ورودی و وضعیت ترک در المان‌های مختلف تیر به عنوان خروجی به کار رفته‌اند. همچنین با توجه به تعداد المان‌های تیر و مدل اجزا محدود تیر، تابع پاسخ فرکانسی با توجه به نیروهای هارمونیک اعمال شده به درجات آزادی فعال انتقالی^۱ مورد محاسبه قرار می‌گیرد که با توجه به شکل (۴) درجات آزادی ۳، ۵، ۷ و ۹ درجات آزادی انتقالی فعال می‌باشند. در تابع پاسخ فرکانسی با اعمال نیروی هارمونیک به یک گره، در گره‌های فعال انتقالی کل تیر، پاسخ‌ها محاسبه می‌شود که در مثال حاضر یک ماتریس 4×4 به دست می‌آید. بنابراین ۱۶ ویژگی از تابع پاسخ فرکانسی و سه ویژگی از فرکانس‌های اول تیر به عنوان ورودی و ۸ مقدار مربوط به میزان ترک و موقعیت ترک به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح

^۱ Active translational degree of freedom

لحاظ شده است [۲۱]:

$$FRF^{noisy} = (FRF)(1 + \beta \text{rand}[-1,1]) \quad (21)$$

$$\omega_i^{noisy} = \omega_i (1 + \beta \text{rand}[-1,1])$$

که در آن FRF^{noisy} و ω_i^{noisy} به ترتیب تابع پاسخ فرکانسی نوفه‌دار و فرکانس نوفه‌دار مود i ام و FRF و ω_i به ترتیب تابع پاسخ فرکانسی و فرکانس بدون نوفه مود i ام بوده و β سطح نوفه (به عنوان مثال ۰٫۰۳ مربوط به سطح نوفه ۳٪) می باشد.

کارایی روش ارایه شده در تشخیص ترک تحت سه سناریوی مختلف فرضی در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه آموزش ماشین با انتخاب تصادفی داده‌ها صورت گرفته است، سه بار اقدام به آموزش ماشین گردیده و میانگین خطاها محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد خوب روش پیشنهادی در تعیین محل و میزان ترک در طول تیر است.

جدول ۳- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی یک

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰٫۳	۰	۰	۰
آموزش ۱	۰٫۲۶۹	۰٫۰۴۵	-۰٫۰۳۳	-۰٫۰۰۳
آموزش ۲	۰٫۲۵۳	۰٫۰۵۲	-۰٫۰۶۶	-۰٫۰۰۵
آموزش ۳	۰٫۲۶۴	۰٫۰۲۹	-۰٫۰۵۲	۰٫۰۰۵
میانگین خطا	۰٫۰۳۷	۰٫۰۴۲	۰٫۰۵۰	۰٫۰۰۴
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	۰٫۲	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$
آموزش ۱	۰٫۰۵۱	۰٫۱۶۵	-۰٫۰۷۸	۰٫۰۴
آموزش ۲	۰٫۰۰۹	۰٫۱۸۹	-۰٫۱۴	۰٫۰۴
آموزش ۳	۰٫۰۰۲	۰٫۱۱	-۰٫۱۱۷	-۰٫۰۰۵
میانگین خطا	۰٫۱۷۸	۰	۰	۰

همچنین حساسیت روش ارایه شده نسبت به وجود نوفه نیز بررسی شده است. در جداول ۶ تا ۸ میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک برای سناریوهای مختلف با سه سطح داده نوفه‌دار (۱٪، ۲٪ و ۳٪) ارائه شده است.

همانطوری که از نتایج مشاهده می‌شود در اغلب موارد، روش پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است. هرچند که در تعیین محل ترک مقدار خطاها افزایش یافته است.

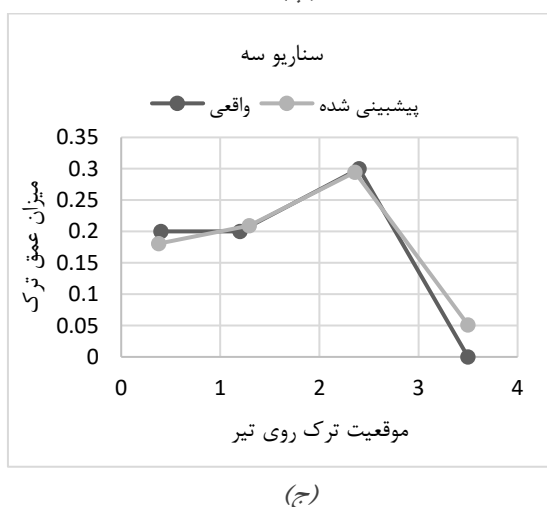
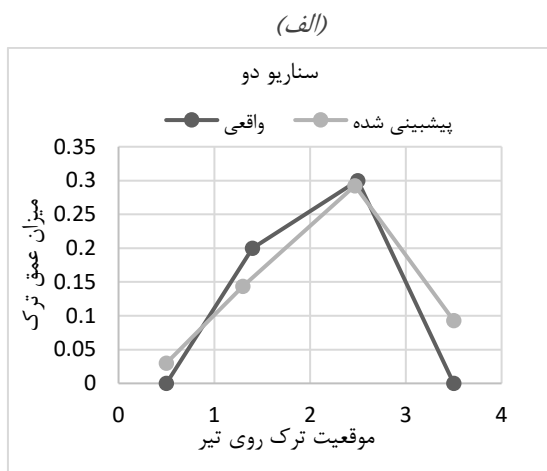
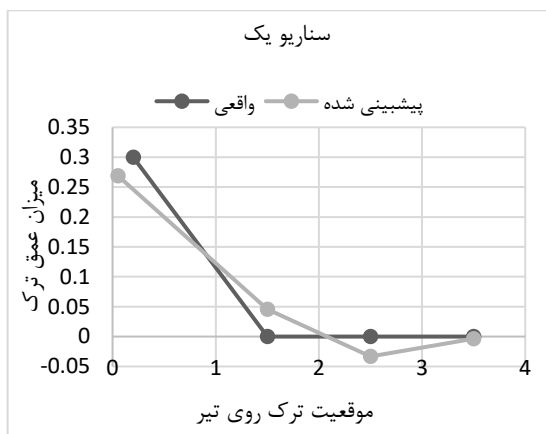
جدول ۴- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی دو

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی دو	۰	۰٫۲	۰٫۳	۰
آموزش ۱	۰٫۰۲۷	۰٫۱۴۳	۰٫۲۹۳	۰٫۱
آموزش ۲	۰٫۰۲۸	۰٫۱۴۵	۰٫۲۸۹	۰٫۰۷۸
آموزش ۳	۰٫۰۲۷	۰٫۱۴۵	۰٫۲۸۵	۰٫۰۷۲
میانگین خطا	۰٫۰۲۷	۰٫۰۵۵	۰٫۰۱۰	۰٫۰۸۳
موقعیت ترک، α				
سناریوی دو	$0 < \alpha < 1$	۰٫۴	۰٫۵	$0 < \alpha < 1$
آموزش ۱	۰٫۱۹۷	۰٫۲۹۲	۰٫۴۵۶۱	۰٫۲۲
آموزش ۲	۰٫۱۷	۰٫۲۸۹	۰٫۴۶۶	۰٫۲۰۶
آموزش ۳	۰٫۱۹۱	۰٫۲۸۲	۰٫۴۳۰	۰٫۱۸۵
میانگین خطا	۰	۰٫۱۱	۰٫۰۴	۰

جدول ۵- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی سه

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی سه	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۳	۰
آموزش ۱	۰٫۱۸۴	۰٫۲۰۱	۰٫۲۹۱	۰٫۰۳
آموزش ۲	۰٫۱۸۱	۰٫۲۰۲	۰٫۳۰۶	۰٫۰۵
آموزش ۳	۰٫۱۷۲	۰٫۲۰۶	۰٫۲۹۴	۰٫۰۴
میانگین خطا	۰٫۰۲۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۶	۰٫۰۴
موقعیت ترک، α				
سناریوی سه	۰٫۴	۰٫۲	۰٫۴	$0 < \alpha < 1$
آموزش ۱	۰٫۳۹۹	۰٫۲۷	۰٫۳۲۷	۰٫۱۱
آموزش ۲	۰٫۳۶۷	۰٫۲۵۶	۰٫۳۴۲	۰٫۱۷
آموزش ۳	۰٫۳۲۲	۰٫۲۳۱	۰٫۳۲۲	۰٫۱۴
میانگین خطا	۰٫۰۳۶	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰

و حالت پیش بینی شده (ارائه شده توسط ماشین) را برای حالت بدون نوبه و نوبه ۳٪ نمایش می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در حالت بدون نوبه و نوبه‌دار می‌تواند با دقت قابل قبولی ترک را در المان‌های تیر شناسایی نماید.



شکل ۵- نتایج به دست آمده مربوط به تیر کنسولی با استفاده از داده‌های ورودی بدون نوبه

جدول ۶- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره یک با داده های نوبه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰,۳	۰	۰	۰
نوبه ۱٪	۰,۰۲۷	۰,۰۱۲	۰,۰۱۹	۰,۰۳۰
نوبه ۲٪	۰,۰۲۳	۰,۰۰۵	۰,۰۱۷	۰,۰۳۸
نوبه ۳٪	۰,۰۰۹	۰,۰۰۶	۰,۰۱۱	۰,۰۵۳
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	۰,۲	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$
نوبه ۱٪	۰,۱۸۴	۰	۰	۰
نوبه ۲٪	۰,۲۲۸	۰	۰	۰
نوبه ۳٪	۰,۲۰۲	۰	۰	۰

جدول ۷- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره دو با داده‌های نوبه‌دار

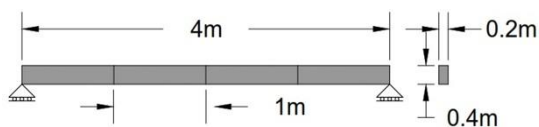
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی دو	۰	۰,۲	۰,۳	۰
نوبه ۱٪	۰,۰۳۲	۰,۰۴۲	۰,۰۱۴	۰,۱۰۴
نوبه ۲٪	۰,۰۴۹	۰,۰۳۸	۰,۰۳۲	۰,۱۱
نوبه ۳٪	۰,۰۶۲	۰,۰۳۲	۰,۰۵۸	۰,۱۰۷
موقعیت ترک، α				
سناریوی دو	$0 < \alpha < 1$	۰,۴	۰,۵	$0 < \alpha < 1$
نوبه ۱٪	۰	۰,۰۷۴	۰,۰۱	۰
نوبه ۲٪	۰	۰,۰۶۸	۰,۰۱۴	۰
نوبه ۳٪	۰	۰,۰۴۵	۰,۰۴۲	۰

جدول ۸- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره سه با داده‌های نوبه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی سه	۰,۲	۰,۲	۰,۳	۰
نوبه ۱٪	۰,۰۱۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۵	۰,۰۹۱
نوبه ۲٪	۰,۰۰۸	۰,۰۰۵	۰,۰۰۲	۰,۱۲۰
نوبه ۳٪	۰,۰۰۳	۰,۰۱۱	۰,۰۰۶	۰,۱۳۸
موقعیت ترک، α				
سناریوی سه	۰,۴	۰,۲	۰,۴	$0 < \alpha < 1$
نوبه ۱٪	۰,۰۱۱	۰,۰۷	۰,۰۳	۰
نوبه ۲٪	۰,۰۲۰	۰,۰۶	۰,۰۱۱	۰
نوبه ۳٪	۰,۰۳۷	۰,۰۸۱	۰,۰۰۴	۰

اشکال (۵) و (۶) به صورت تصویری نتایج مربوط به موقعیت و میزان عمق ترک را برای حالت واقعی (مقادیر فرض شده)

ممان اینرسی برای اعضای تیر برابر $0,08$ مترمربع و m^4 $0,01066667$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ - تیر دو سر مفصل با چهار المان

برای تیر کنسولی همانطوریکه در جدول ۹ دیده می‌شود، سه سناریوی فرضی ترک با موقعیتهای مختلف و با عمق متفاوت در نظر گرفته شده است.

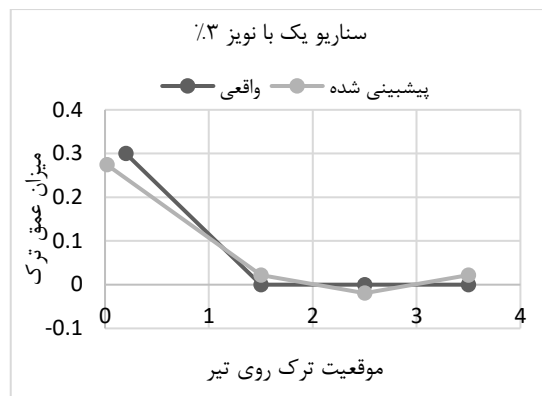
جدول ۹- سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای تیر دو سر مفصل

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰,۳
سناریوی دو	۰,۲	۰	۰	۰,۲
سناریوی سه	۰,۳	۰,۲	۰,۲	۰
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰,۵
سناریوی دو	۰,۴	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰,۴
سناریوی سه	۰,۵	۰,۲	۰,۴	$0 < \alpha < 1$

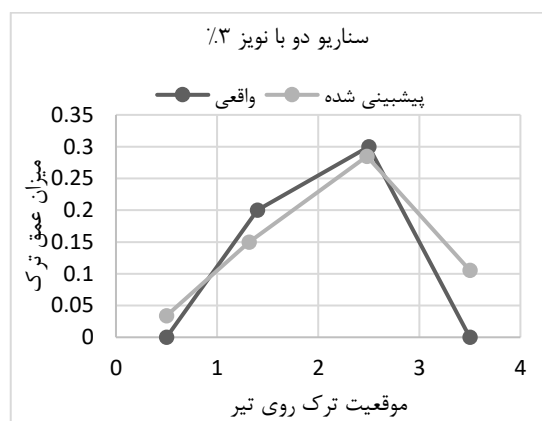
کارایی روش ارائه شده در تشخیص ترک تحت سه سناریوی مختلف فرضی در جداول ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۰- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی یک

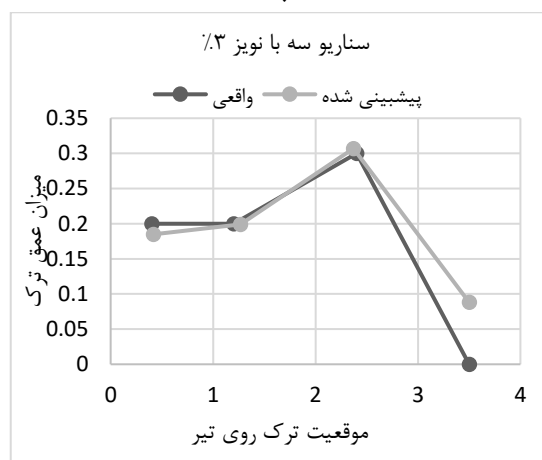
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰,۳
آموزش ۱	۰,۰۶۸۷	-۰,۰۱۶	۰,۰۱۱۳	۰,۲۶۳۵
آموزش ۲	۰,۰۶۱۶	-۰,۰۰۸	-۰,۰۰۱	۰,۲۸۱
آموزش ۳	۰,۰۶۸۳	-۰,۰۱۲	۰,۰۰۵	۰,۲۵۷
میانگین خطا	۰,۰۶۶	۰,۰۱۲	۰,۰۰۶	۰,۰۳
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰,۵
آموزش ۱	۰,۲۳۰	۰,۰۱۲	۰,۰۷۰	۰,۵۲
آموزش ۲	۰,۲۱۶	۰,۰۲۱	۰,۰۰۱	۰,۵۷
آموزش ۳	۰,۲۴۲	۰,۰۲۱	۰,۰۷۴	۰,۵۰۸
میانگین خطا	۰	۰	۰	۰,۰۳۸



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- نتایج به دست آمده مربوط به تیر کنسولی با استفاده از داده‌های ورودی با نوفه ۳٪

۲-۳- تیر دو سر مفصل

تیر دو سر مفصل در نظر گرفته شده، در شکل (۷) نشان داده شده است. مدل اجزا محدود تیر شامل ۴ عضو تیری و ۵ گره می‌باشد (شکل ۷). برای تیر در نظر گرفته، مشخصات مصالح شامل مدول مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون تیر ۰,۳ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع و

جدول ۱۳- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره یک با داده‌های نوفه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰.۳
۱٪ نوفه	۰.۰۷۴	۰.۰۰۱	۰.۰۳۱	۰.۰۳۵
۲٪ نوفه	۰.۰۶۵	۰.۰۰۴	۰.۰۶۲	۰.۰۵۳
۳٪ نوفه	۰.۰۵۸	۰.۰۱۱	۰.۰۸۷	۰.۰۷۰
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰.۵
۱٪ نوفه	۰	۰	۰	۰.۱۰
۲٪ نوفه	۰	۰	۰	۰.۱۲
۳٪ نوفه	۰	۰	۰	۰.۱۰

جدول ۱۴- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره دو با داده‌های نوفه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰.۲	۰	۰	۰.۲
۱٪ نوفه	۰.۰۰۴۷	۰.۰۲۰	۰.۰۲۳	۰.۰۰۶
۲٪ نوفه	۰.۰۱۵	۰.۰۳۶	۰.۰۰۴	۰.۱۰
۳٪ نوفه	۰.۰۲۶	۰.۰۵۰	۰.۰۰۶	۰.۱۲
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	۰.۴	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰.۴
۱٪ نوفه	۰.۰۳	۰	۰	۰.۱۱
۲٪ نوفه	۰.۰۲	۰	۰	۰.۱۴
۳٪ نوفه	۰.۰۰۸	۰	۰	۰.۱۶

جدول ۱۵- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره سه با داده‌های نوفه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی یک	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰
۱٪ نوفه	۰.۰۰۹	۰.۰۴۱	۰.۰۱۱	۰.۱۲
۲٪ نوفه	۰.۰۰۹	۰.۰۳	۰.۰۰۴	۰.۱۱
۳٪ نوفه	۰.۰۰۸	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۱۱
موقعیت ترک، α				
سناریوی یک	۰.۵	۰.۲	۰.۴	$0 < \alpha < 1$
۱٪ نوفه	۰.۰۳۰	۰.۰۵	۰.۰۳	۰
۲٪ نوفه	۰.۰۱	۰.۰۷	۰.۰۴	۰
۳٪ نوفه	۰.۰۱۹	۰.۰۹	۰.۰۲	۰

اشکال (۸) و (۹) به صورت تصویری نتایج مربوط به موقعیت و میزان عمق ترک را برای حالت بدون نوفه و نوفه ۳٪

جدول ۱۱- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی دو

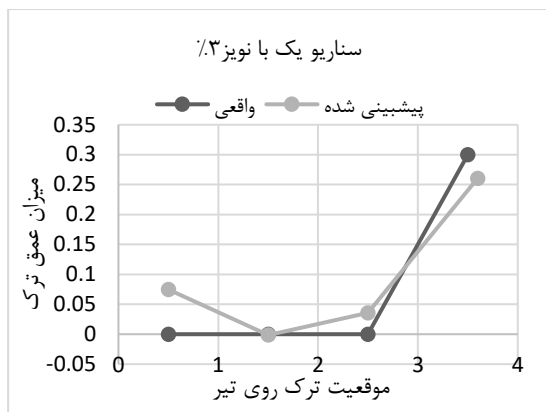
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی دو	۰.۲	۰	۰	۰.۲
آموزش ۱	۰.۱۹۷	-۰.۰۰۲	-۰.۰۰۲	۰.۱۶۴
آموزش ۲	۰.۲۰۷	۰.۰۰۱	-۰.۰۰۵	۰.۱۵۲
آموزش ۳	۰.۱۹۳	-۰.۰۰۰۳	-۰.۰۰۷	۰.۱۵۸
میانگین خطا	۰.۰۰۵	۰.۰۰۱	۰.۰۰۵	۰.۰۴۱
موقعیت ترک، α				
سناریوی دو	۰.۴	$0 < \alpha < 1$	$0 < \alpha < 1$	۰.۴
آموزش ۱	۰.۳۶۹	۰.۰۰۶	-۰.۰۱۷	۰.۲۸۹
آموزش ۲	۰.۳۸۷	۰.۰۲۶	-۰.۰۰۵	۰.۲۷۹
آموزش ۳	۰.۳۸۴	-۰.۰۰۵	-۰.۰۳۷	۰.۲۷۵
میانگین خطا	۰.۰۱۹	۰	۰	۰.۱۱۸

جدول ۱۲- نتایج مربوط به پیش بینی سناریوی سه

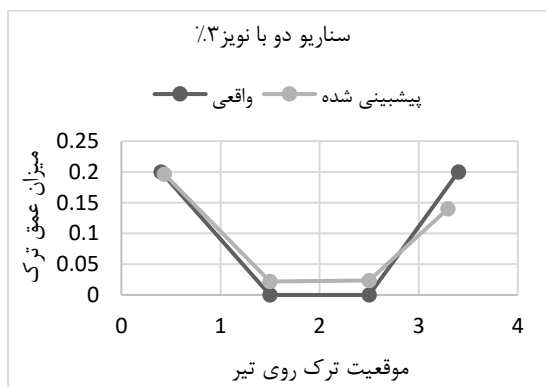
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
نسبت عمق ترک، η				
سناریوی دو	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰
آموزش ۱	۰.۳۰۲	۰.۱۶۱	۰.۱۷۸	۰.۱۲۰
آموزش ۲	۰.۳۰۴	۰.۱۳۵	۰.۱۹۳	۰.۱۱۵
آموزش ۳	۰.۲۷۲	۰.۱۴۹	۰.۱۸۶	۰.۱۵۴
میانگین خطا	۰.۰۱۱	۰.۰۵۱	۰.۰۱۳	۰.۱۳۰
موقعیت ترک، α				
سناریوی دو	۰.۵	۰.۲	۰.۴	۰
آموزش ۱	۰.۴۷	۰.۲۵	۰.۴۰	۰.۳۲
آموزش ۲	۰.۵۰۷	۰.۱۹۳	۰.۴۰	۰.۳۲
آموزش ۳	۰.۳۸۴	۰.۲۳۰	۰.۴۲	۰.۳۸
میانگین خطا	۰.۰۴۹	۰.۰۳۱	۰.۰۱	۰.۳۴

با توجه به اینکه آموزش ماشین با انتخاب تصادفی داده‌ها آموزش می‌بیند فلذا سه بار اقدام به آموزش ماشین گردیده و میانگین خطاها محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد خوب روش پیشنهادی در تعیین محل و میزان ترک در طول تیر است. همچنین عملکرد روش ارائه شده نسبت به وجود نوفه نیز بررسی شده است. در جداول ۱۳ تا ۱۵ میانگین خطای روش ارائه شده در پیش بینی ترک برای سناریوهای مختلف با سه سطح داده نوفه‌دار (۱٪، ۲٪ و ۳٪) ارائه شده است.

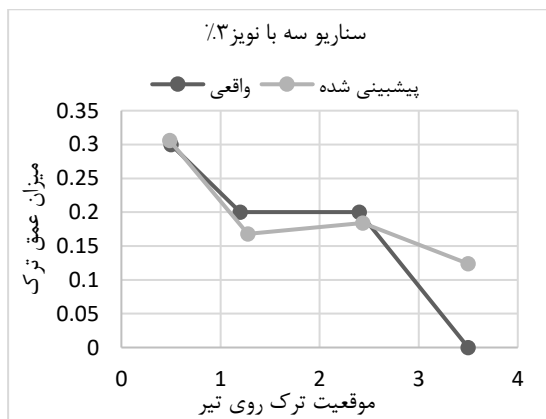
نمایش می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود، نتایج قابل قبولی به دست آمده‌اند.



(الف)



(ب)

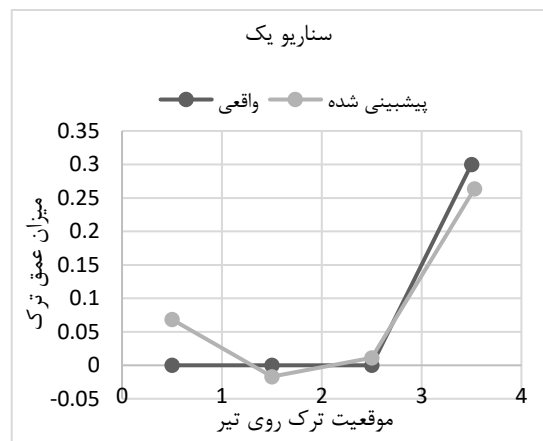


(ج)

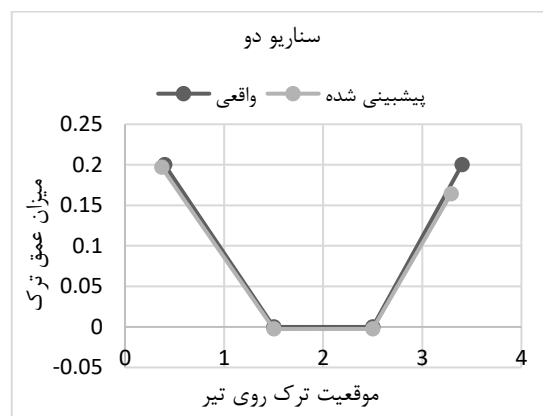
شکل ۹- نتایج به دست آمده مربوط به تیر دو سر مفصل با استفاده از داده‌های ورودی با نوفه ۳٪

۴- نتیجه گیری

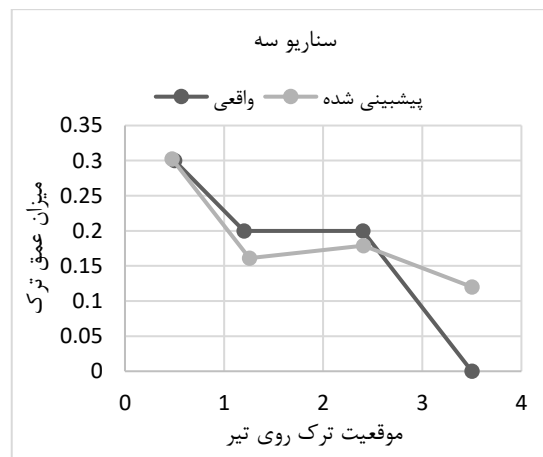
در مقاله حاضر یک روش نوین جهت تعیین محل و موقعیت ترک در تیرها ارائه گشته است که از اطلاعات مودال سازه شامل فرکانسها و تابع پاسخ فرکانسی سه مود اول تیر به عنوان ورودی ماشین یادگیری کرانه‌ای استفاده شده است. خروجی‌های ماشین به کار رفته نیز موقعیت و عمق ترک



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- نتایج به دست آمده مربوط به تیر دو سر مفصل با استفاده از داده‌های ورودی بدون نوفه

همچنین نمودار ۵ عملکرد ماشین آموزشی بر روی داده‌های نوفه‌دار را نشان می‌دهد.

متناظر خواهد بود. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی سه سناریوی مختلف برای تیر کنسولی و تیر دو سر مفصل به کار رفته است. نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی در شناسایی ترک تیرها است. همچنین روش پیشنهادی نتایج نسبتاً مناسبی را با وجود نوفه در ورودی های ماشین نشان می دهد.

مراجع

[1] A. Bovsunovsky, "The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, No. 16–17, 2004, pp. 2271–2281.

[2] K.H. Barad, D.S. Sharma, and V. Vyas, "Crack detection in cantilever beam by frequency based method", *Procedia Engineering*, Vol. 51, 2013, pp. 770–775.

[3] S. Chinchalkar, "Detection of the crack location in beams using natural frequencies", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 247, No. 3, 2001, pp. 417–429.

[4] N. Khaji, M. Shafiei, and M. Jalalpour, "Closed-form solutions for crack detection problem of Timoshenko beams with various boundary conditions", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 51, No. 9–10, 2009, pp. 667–681.

[5] A.K. Pandey, M. Biswas, and M. Samman, "Damage detection from change in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, No. 2, 1991, pp. 321–332.

[۶] ا. عزالدین، ح. نادرپور، ع. خیرالدین، غ. قدرتی امیری، "تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۲، شماره ۳۹، ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۱.

[۷] ز. تبریزیان، م. حسینعلی بیگی، غ. قدرتی امیری، "تشخیص آسیب در سازه های فلزی با استفاده از اطلاعات خیز استاتیکی و الگوریتم ژنتیک"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۱، ۱۳۹۴، صفحه ۱۴۷-۱۵۸.

[8] A.C. Chasalevris, and C.A. Papadopoulos, "Identification of multiple cracks in beams under bending", *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 1631–1673.

[9] R.P. Sampaio, N.M. Maia, and J.M. Silva, "Damage Detection Using the Frequency Response Function Curvature Method", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 5, 1999, pp. 1029–1042.

[10] U. Lee, and J. Shin, "A Frequency Response Function-Based Structural Damage Identification Method", *Computers & Structures*, Vol. 80, No. 2, 2002, pp. 117–132.

[11] M. Mehrjoo, N. Khaji, H. Moharrami, and A. Bahreinnejad, "Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks", *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, No. 3, 2008, pp. 1122–1131.

[12] S. Suresh, S.N. Omkar, R. Ganguli, and V. Mani, "Identification of crack location and depth in a cantilever beam using a modular neural network approach", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 4, 2004, pp. 907–915.

[۱۳] م. رضایی پزند، س. موسوی، "ترک یابی در سازه های مستوی با الگوریتم ژنتیک"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۴، شماره ۱۸، ۱۳۸۸، صفحه ۲۳-۳۷.

[14] Matlab User Manual, Mathwork Inc. Lowell, MA, U.S.A, 2015.

[15] M. Mehrjo, N. Khaji, and M. Ghafory-Ashtiany, "New Timoshenko-cracked beam element and crack detection in beam-like structures using genetic algorithm", *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 22, No. 3, 2014, pp. 359–382.

- [16] A. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, New Jersey, 2001.
- [17] R. Craig, *Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, 1981.
- [18] A. Girard, *Structural Dynamics in Industry*, John Wiley & Sons, 1990.
- [19] G.B. Huang, Q.Y. Zhu, and C.K. Siew, "Extreme Learning Machine: A New Learning Scheme of Feedforward Neural Networks", *Neurocomputing*, Vol. 70, 2006, pp.489–501.
- [20] O.F. Ertugrul, Y. Kaya, "A detailed analysis on Extreme learning machine and novel approaches based on ELM", *American Journal of computer science and engineering*, Vol. 1, No. 5, 2014, pp. 43–50.
- [21] S.S. Kourehli, A. Bagheri, G.G. Amiri and M. Ghafory-Ashtiany, "Structural damage detection using incomplete modal data and incomplete static response", *KSCE Journal of civil engineering*, Vol. 17, No. 1, 2013, pp. 216–223.