تشخیص محل و عمق ترک در سازه‌ها با استفاده از انرژی کرنشی مودال و فرکانس

سیامک قدیمی
گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
سید سینا کورهلی*
گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
s-kourehli@iau-ahar.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۰/۱۶

چکیده:

در تحقیق حاضر روش نوینی جهت تشخیص ترک در سازه‌ها با استفاده از انرژی کرنشی مودال و فرکانس ارائه شده است. با توجه به اینکه تشکیل ترک در المانهای سازه‌ای باعث تغییر در سختی عضو و همچنین انرژی کرنشی مودال و فرکانس سازه می‌گردد، بنابراین در تحقیق حاضر به عنوان شاخص جهت شناسایی ترک در سازه بکار رفته است. انرژی‌های کرنشی مودال سازه و فرکانس سه مود اول به عنوان ورودی و محل و عمق ترک در المانهای مختلف سازه‌ای به عنوان خروجی جهت آموزش ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان بکار می‌رود. برای نمایش کارایی روش ارائه شده از تیر کنسولی و دو سر مفصل و همچنین قاب پورتال، استفاده شده است. همچنین اثر وجود نوفه در اطلاعات مودال نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر کارایی روش ارائه شده در تشخیص محل و میزان ترک با استفاده از اطلاعات مربوط به انرژی‌های کرنشی مودال سازه و فرکانس و با استفاده از ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان است.

کلیدواژگان: تشخیص ترک، انرژی کرنشی مودال، فرکانس، ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان

۱- مقدمه

با توجه به اینکه اغلب سازه‌های مهندسی در معرض آسیب هستند بنابراین تشخیص به موقع این آسیب می‌تواند از وقوع یک حادثه ناگوار جلوگیری نماید. ترک یکی از مهمترین آسیب‌های وارده بر انواع سازه‌ها می‌باشد که ممکن است ناشی از پدیده خستگی در المانهای سازه‌ای باشد. از آنجائیکه ترک ایجاد شده در سازه باعث تغییر در مشخصه‌های دینامیکی سازه و از جمله سختی آن می‌گردد، بنابراین پاسخهای دینامیکی و در نتیجه مشخصه‌های مودال سازه نیز دچار تغییر می‌گردد. بنابراین یکی از شاخه‌های بسیار مهم در تشخیص ترک و آسیب در سازه‌ها استفاده از اطلاعات مودال سازه می‌باشد. علت این موضوع به این دلیل است که اطلاعات مودال سازه به مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها بسیار حساس می‌باشند و هرگونه تغییر کوچک در مشخصه‌های دینامیکی نظیر سختی هر المان سازه ای باعث تغییر در پاسخهای دینامیکی می‌گردد.

بسیاری از روشهای ارائه شده جهت شناسایی ترک در سازه‌ها بر اساس تغییرات فرکانس‌های طبیعی [۲-۱]، اندازه‌گیری انعطاف پذیری دینامیکی [۳] و یا انرژی کرنشی مودی [۴] است. همچنین مطالعات جامعی در زمینه رفتار دینامیکی تیرهای دارای ترک به عنوان یک مسئله مستقیم [۷-۵] و معکوس [۱۲-۸] طی دو دهه گذشته انجام شده است.

موضوع تشخیص محل و میزان آسیب و یا ترک در المانهای 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 و یا الگوریتم‌های بهینه‌یابی می‌باشد [۱۵-۱۳].

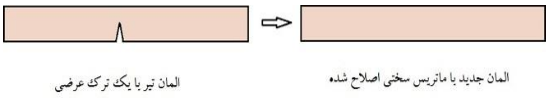
در مقاله حاضر هدف تعیین محل ترک وعمق آن در المانهای مختلف سازه‌ای است. مدلسازی ترک در تیرهای مورد مطالعه با اصلاح ماتریس‌های سختی عضو ترک دار در مدل المان محدود صورت گرفته است. انرژی کرنشی مودال و فرکانس به عنوان ورودی و موقعیت و عمق ترک به عنوان خروجی برای آموزش ماشین یادگیری حداقل مربعات بردار پشتیبان مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمایش عملکرد روش ارائه شده، دو تیر با شرایط تکیه‌گاهی مختلف و همچنین یک قاب در نرم‌افزار MATLAB (2013) مدلسازی شده‌اند. نتایج حاصله بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی در تعیین عمق و محل ترک در طول کل تیرهای مورد مطالعه است.

۲- بیان مسئله

در این بخش به روش ارائه شده جهت تشخیص ترک در تیر به صورت کامل ارائه می‌گردد. ابتدا به رابطه‌سازی الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص ترک پرداخته و سپس مبانی نظری مربوط به ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان ارائه می‌گردد.

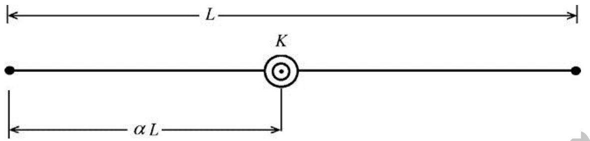
۲-۱-رابطه‌سازی روش ارائه شده

در مطالعه حاضر، همانطوریکه در شکل ۱ نشان داده شده است جهت مدلسازی ترک در تیرهای مورد مطالعه اصلاح ماتریس‌های سختی عضو ترک‌دار در مدل المان محدود اصلاح گردیده است [۱۶].



شکل۱- تاثیر ترک با اصلاح ماتریس سختی[۱۶]

در مقاله حاضر برای یک المان تیر با طول L، ترک به عنوان یک فنر دورانی بدون جرم در نظر گرفته شده است که دو المان الاستیک بدون ترک با ممان اینرسی I را به هم پیوند می‌دهد (شکل ۲) وجود ترک در هر المان در واقع تغییرات زاویه‌ای را در دو طرف نقطه مورد ترک ایجاد می‌کند و روشهای المان محدود برای مدلسازی از رابطه سازی بین دو طرف نقطه مورد ترک استفاده می‌کنند. موقعیت فنر با پارامتر بدون بعد α مشخص می‌گردد که $0 \le \alpha \le 1$ است.



شکل ۲- مدل تیر ترک‌دار که با فنر دورانی بدون جرم مدل گردیده است[۱۶]

همچنین سختی فنر از طریق روابط زیر محاسبه می‌گردد[۱۷]:

$$K = \frac{Ew\left(h^2\right)}{72\pi f\left(\eta\right)} \qquad (۱)$$

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

$$\eta = \frac{d}{h} \qquad (۲)$$

که در آن، d عمق ترک، w عرض تیر، E مدول الاستیسیته و h ارتفاع تیر است. عمق ترک براساس تئوری مکانیزم شکست در محدوده $0 \le \eta \le 0.6$ خواهد بود. همچنین $f(\eta)$ از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f\left(\eta\right) = 0.638\eta^2 - 1.035\eta^3 + 3.7201\eta^4 - 5.1773\eta^5 + 7.553\eta^6 - 7.332\eta^7 + 2.4909\eta^8 \qquad (۳)$$

در نهایت ماتریس سختی اصلاح شده برای عضو ترک‌دار از طریق رابطه زیر حاصل می‌شود[۱۶]

$$\left[K_j^c\right]=\frac{-1}{BL^2}\begin{bmatrix}(2A+CA+1) & (A+1)L & -(2A+CA+1) & (A+AC)L\\ & L^2 & -(A+1)L & AL^2\\ & & (2A+CA+1) & -(A+AC)L\\ Symmetric & & & CAL^2\end{bmatrix} \quad (۴)$$

که در آن ،

$$A=\frac{L(K)+6EI\alpha(1-\alpha)}{2L(K)+6EI(\alpha^2)} \quad (۵)$$

$$B=(A-1)\frac{L}{2EI}+(A+1)\frac{\alpha}{K}-\frac{1}{K} \quad (۶)$$

$$C=\frac{2L(K)+6EI(1-\alpha)^2}{L(K)+6EI\alpha(1-\alpha)} \quad (۷)$$

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

$$\left[K^c\right]=\sum_{j=1}^{Ne}\left[K_j^c\right] \quad (۸)$$

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

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

$$\left(\left[K^c\right]-\lambda_i^c\left[M\right]\right)\left\{\phi_i^c\right\}=0 \quad i=1,2,\ldots,n \quad (۹)$$

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

انرژی کرنشی سازه که مربوط به بردار شکل مودی است معمولاً بنام انرژی کرنشی مودال شناخته می‌شود که به عنوان یک پارامتر ارزشمند جهت تشخیص آسیب در سازه‌ها قابل استفاده می‌باشد. انرژی کرنشی مودال مربوط به j امین المان مربوط به مود i ام را می توان از طریق رابطه زیر بیان نمود[۱۸]:

$$MSE_i^j=\frac{1}{2}\phi_i^{jT}K_j\phi_i^j \quad (۱۰)$$

که در آن، K_j ماتریس سختی المان j ام و ϕ_i^j بردار تغییرمکانهای گرهی مربوط به المان j ام در مود i ام است.

با استفاده از این روش برای تیر ترکدار و با توجه به اینکه هر قاب سازه‌ای با استفاده از چندین تیر تشکیل می‌شود (با صرفنظر از اثر نیروی محوری) می‌توانیم یک قاب سازه‌ای ترکدار را نیز مدلسازی کرده و نتایج مودال انرا بدست آوریم.

۲- ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان به عنوان یکی از ابزارهای قوی جهت حل مسائل مربوط به رگرسیون، شناسایی الگو و تخمین تابع می باشد[۱۹]. ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان نیز ویرایش پیشرفته تر ماشین بردار پشتیبان استاندارد می‌باشد که از معیار حداقل مربعات خطی بجای قیود نامساوی استفاده می‌کند[۲۰]. مدل ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان مربوط به ورودی xi و خروجی yi را می توان به صورت زیر رابطه‌سازی نمود [۲۱]:

$$\left\{\begin{array}{l}\min j(w,e)=\frac{1}{2}w^Tw+\frac{1}{2}\gamma\sum_{i=1}^{k}e_i^2\\ s.t.\ \ y_i=w^T\varphi(x_i)+b+e_i \quad i=1,\ldots,k\end{array}\right\} \quad (۱۱)$$

که در رابطه فوق، w بردار ضرایب، b بیانگر خطا، γ پارامتر تنظیم کننده و ei متغییر Slack variable می‌باشد. با حذف متغییرهای w و ei ، مسئله بهینه‌یابی به صورت حل خطی زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix}0 & Q^T\\ Q & K+\gamma^{-1}I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}b\\ A\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ Y\end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق

$$Q=[1,\ldots,1]^T,\ A=[a_1,\ldots,a_k]^T,\ Y=[y_1,\ldots,y_k]^T \quad (۱۳)$$

بر اساس شرط مرسرز[1] تابع کرنل می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$K(x_i,x_j)=\varphi(x_i)^T\varphi(x_j) \quad (۱۴)$$

و در نهایت مدل ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان برای رگرسیون به صورت زیر در می‌آید:

$$f(x)=\sum_{i=1}^{k}a_i K(x,x_i)+b \quad (۱۵)$$

تابع شعاعی[2] یکی از معمول‌ترین و کارآمدترین توابع کرنل است که با پارامتر اندکی نیز کار می‌کند[۲۲]. بنابراین در تحقیق حاضر از تابع شعاعی به عنوان تابع کرنل استفاده می‌گردد:

$$K(x,x_i)=exp\left\{-x-x_i^2/2\sigma^2\right\} \quad (۱۶)$$

در نتیجه دو پارامتر σ و γ میباست تعیین گردند.

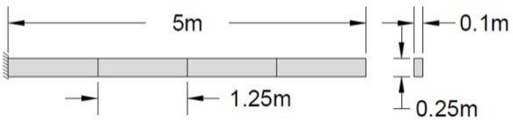
۳- مثالهای عددی

برای نمایش عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های انرژی کرنشی مودال و فرکانس و ماشین حداقل مربعات‌بردار پشتیبان، اقدام به مدلسازی دو تیر سازه‌ای با شرایط تکیه‌گاهی مختلف و همچنین یک قاب شده است که جهت مدلسازی المان محدود از نرم‌افزار MATLAB (2013) استفاده شده است.

[1] Mercer’s condition
[2] Radial basis function

۳-۱- تیر گیردار

تیر گیردار در نظر گرفته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل اجزا محدود تیر شامل ۴ عضو تیری و ۵ گره می‌باشد. برای تیر در نظر گرفته شده، مشخصات مصالح شامل مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. سطح مقطع و ممان اینرسی برای اعضای تیر برابر ۰/۰۲۵ مترمربع و ۰/۰۰۰۱۳۰۲۸ m۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- مدل المان محدود تیر یک سرگیردار

در مطالعه حاضر جهت آموزش ماشین مقادیر مربوط به انرژی کرنشی مودی المانهای مختلف سازه‌ای در سه مود اول به عنوان ورودی و وضعیت ترک در المانهای مختلف تیر به عنوان خروجی بکار رفته‌اند. لازم به توضیح است که بینهایت حالت مختلف ترک در تیر وجود دارد که جهت آموزش از ۷۸۳۰ داده که به روش تصادفی انتخاب گردیده، استفاده شده است.

برای تیر مورد مطالعه همانطوریکه در جدول ۱ دیده می‌شود، سه سناریوی فرضی ترک با موقعیتهای مختف و با عمق متفاوت در نظر گرفته شده است. در سناریوی یک، یک ترک در طول تیر در نظر گرفته شده و در سناریوهای دو و سه، دو و سه ترک لحاظ شده است.

جدول ۱- سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای تیر یکسر گیردار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰/۲	۰
سناریوی دو	۰	۰/۳	۰	۰/۲
سناریوی سه	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۵	$0<\alpha<1$
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰/۱	$0<\alpha<1$	۰/۶
سناریوی سه	۰/۵	۰/۵	۰/۸	$0<\alpha<1$

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

در مطالعه حاضر اثرات نوفه بصورت ارائه شده در روابط زیر لحاظ شده است:

$$
\begin{aligned}
MSE_i^{noisy} &= \left(MSE_i\right)\left(1+\beta\, rand\left[-1,1\right]\right) \\
\omega_i^{noisy} &= \omega_i\left(1+\beta\, rand\left[-1,1\right]\right)
\end{aligned}
\qquad (۱۵)
$$

که در آن MSE_i^{noisy} و ω_i^{noisy} به ترتیب انرژی کرنشی و فرکانس نوفه دار مود i ام و MSE_i و ω_i به ترتیب انرژی کرنشی و فرکانس بدون نوفه مود i ام بوده و β سطح نوفه (بعنوان مثال ۰/۰۳ مربوط به سطح نوفه ۳٪) می‌باشد.

در مثال حاضر پارامترهای در نظر گرفته شده برای ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده بر اساس روش آزمون و خطا تعیین شده‌اند.

جدول۲- پارامترهای ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان برای تیر یکسرگیردار

	بدون نوفه	نوفه دار
γ	۴۰۰	۴۰۰
σ^2	۱۵	۱۵

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 آموزش می‌بیند فلذا سه بار اقدام به آموزش ماشین گردیده و میانگین خطاها محاسبه شده‌اند. نتایج بدست آمده بیانگر عملکرد خوب روش پیشنهادی در تعیین محل و میزان ترک در طول تیر است.

جدول۳- نتایج روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره یک

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰/۲	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۴	۰/۲۲	۰/۰۱۳
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۳	۰/۲۱۷	۰/۰۱۴۷
پیش‌بینی شده ۳	۰/۰۰۲۶	۰/۰۱۳	۰/۲۱۷	۰/۰۱۳۶
میانگین خطای پیش بینی	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۳
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۵	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۰۳۵	۰/۱۲۹	۰/۶۹۵	۰/۱۱
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۳۳	۰/۱۱۸	۰/۶۷۴	۰/۱
پیش‌بینی شده ۳	۰/۰۳۴	۰/۱۲	۰/۶۶	۰/۱۱
میانگین خطای پیش بینی	۰	۰	۰/۱۷۸۸	۰

جدول۴- نتایج روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره دو

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی دو	۰	۰/۳	۰	۰/۲
پیش بینی شده ۱	۰/۰۰۰۱	۰/۳۰۵	۰/۰۰۷	۰/۱۵۷
پیش بینی شده ۲	۰/۰۰۵	۰/۳۰۳	۰/۰۰۵	۰/۱۵۸
پیش بینی شده ۳	۰/۰۰۲	۰/۳۰۲	۰/۰۰۴	۰/۱۵۲
میانگین خطای پیش بینی	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۴
	موقعیت ترک، α			
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰/۱	$0<\alpha<1$	۰/۶
پیش بینی شده ۱	۰/۰۰۰۵	۰/۱۲۷۸	۰/۰۶۷	۰/۴۲۱
پیش بینی شده ۲	۰/۰۴۶۱	۰/۱۱۸	۰/۰۳۵	۰/۴۰۸۱
پیش بینی شده ۳	۰/۰۲۷۳	۰/۱۱۴	۰/۰۰۷	۰/۳۸۷۶
میانگین خطای پیش بینی	۰	۰/۰۲	۰	۰/۱۹۴۳

جدول۵- نتایج روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره سه

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی سه	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰
پیش بینی شده ۱	۰/۲۰۳	۰/۱۸۸	۰/۳۱۰	۰/۰۵
پیش بینی شده ۲	۰/۲۰۵	۰/۱۷۵	۰/۳۱	۰/۰۴۱
پیش بینی شده ۳	۰/۲۰۶	۰/۱۷۷	۰/۳۱۲	۰/۰۵۶۹
میانگین خطای پیش بینی	۰/۰۰۴	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۰/۰۴۹
	موقعیت ترک، α			
سناریوی سه	۰/۵	۰/۵	۰/۸	$0<\alpha<1$
پیش بینی شده ۱	۰/۵۷	۰/۴۶۷	۰/۸۲۲	۰/۲۶
پیش بینی شده ۲	۰/۵۹۹	۰/۴۰۴۵	۰/۸۳۷	۰/۱۹۹
پیش بینی شده ۳	۰/۶۱۲	۰/۳۸۶	۰/۸۲	۰/۲۳
میانگین خطای پیش بینی	۰/۰۹۴	۰/۰۸	۰/۰۲۸	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 بینیترک برای سناریوهای مختلف با سه سطح داده نوفه‌دار (۱٪، ۲٪ و ۳٪) ارائه شده است. همانطوریکه از نتایج مشاهده می‌شود در اغلب موارد روش پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته است. هرچند که در تعیین محل ترک مقدار خطاها افزایش یافته است.

جدول۶- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره یک با داده‌های نوفه دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰/۲	۰
۱٪ نوفه	۰/۰۱۵۶	۰/۰۵۰۶	۰/۰۴۴	۰/۰۳۰۸
۲٪ نوفه	۰/۰۱۹۱	۰/۰۵۳۵	۰/۰۷۷	۰/۰۴۶
۳٪ نوفه	۰/۰۲۵۳	۰/۰۵۶۵	۰/۰۹۱	۰/۰۴۸
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۵	$0<\alpha<1$
۱٪ نوفه	۰	۰	۰/۰۱۳	۰
۲٪ نوفه	۰	۰	۰/۰۷۸	۰
۳٪ نوفه	۰	۰	۰/۱۲	۰

جدول۷- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره دو با داده‌های نوفه‌دار

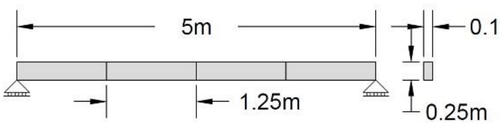
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی دو	۰	۰/۳	۰	۰/۲
۱٪ نوفه	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۱۰	۰/۰۴۸
۲٪ نوفه	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴	۰/۰۵۱
۳٪ نوفه	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۵۱	۰/۰۶۶
	موقعیت ترک، α			
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰,۱	$0<\alpha<1$	۰/۶
۱٪ نوفه	۰	۰/۰۳۳	۰	۰/۲
۲٪ نوفه	۰	۰/۰۱۹	۰	۰/۱۸
۳٪ نوفه	۰	۰/۰۱۶	۰	۰/۱۹

جدول۸- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره سه با داده‌های نوفه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی سه	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰
(۱٪ نوفه)	۰/۰۴۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳	۰/۰۹
(۲٪ نوفه)	۰/۰۶۶	۰/۰۱۲	۰/۰۴۲	۰/۰۱۴
(۳٪ نوفه)	۰/۰۹۳	۰/۰۰۸	۰/۰۵۳	۰/۱۸
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	۰/۵	۰/۵	۰/۸	$0<\alpha<1$
(۱٪ نوفه)	۰/۰۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۰۵	۰
(۲٪ نوفه)	۰/۰۹۲	۰/۰۷	۰/۰۶	۰
(۳٪ نوفه)	۰/۱۶۱	۰/۰۷۷	۰/۱۲۸	۰

۳-۲- تیر دو سر مفصل

مثال دیگر بکار رفته شامل تیر دو سر مفصل نشان داده شده در شکل ۴ می‌باشد. مدل اجزا محدود تیر شامل ۴ عضو تیری و ۵ گره می‌باشد. برای تیر در نظر گرفته شده، مشخصات مصالح شامل مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. سطح مقطع و ممان اینرسی برای اعضای تیر برابر ۰/۰۲۵ مترمربع و۰/۰۰۰۱۳۰۲۸ m۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مدل المان محدود تیر دو سر مفصل

سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده برای تیر دو سر مفصل در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده برای تیر یکسر گیردار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰/۳
سناریوی دو	۰	۰/۲	۰/۲۵	۰
سناریوی سه	۰/۳	۰/۲	۰/۲۵	۰
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۷
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰/۳	۰/۶	$0<\alpha<1$
سناریوی سه	۰/۴	۰/۵	۰/۸	$0<\alpha<1$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰- پارامترهای ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان برای تیر دو سر مفصل

	بدون نوفه	نوفه دار
γ	۵۰۰	۴۰۰
σ^2	۱۹	۵

کارایی روش ارایه شده در تشخیص ترک تحت سه سناریوی مختلف فرضی در جداول ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. نتایج بدست آمده بیانگر اینست که روش پیشنهادی می‌تواند به طرز نسبتا صحیحی محل و میزان ترک در طول تیر را تعیین نماید.

جدول ۱۱- نتایج روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره یک

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰/۳
پیش‌بینی شده ۱	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۰/۲۹۶۸
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۰۷۴۳	−۰/۰۳	۰/۰۴۲	۰/۲۹۶۳
پیش‌بینی شده ۳	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۶	۰/۲۹۱۵
میانگین خطای پیش‌بینی	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۰۰۴
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۷
پیش‌بینی شده ۱	۰/۰۲۱	۰/۰۴۹۴	۰/۰۲۷	۰/۷۲
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۵	۰/۱۰۱۱	۰/۱۳	۰/۷۲۱
پیش‌بینی شده ۳	۰/۰۷	۰/۰۳۴	۰/۰۸۸	۰/۰۷۲۶
میانگین خطای پیش‌بینی	۰	۰	۰	۰/۰۲۲

جدول ۱۲- نتایج روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره دو

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی دو	۰	۰/۲	۰/۲۵	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۰۳	۰/۱۱۲	۰/۲۶۵	−۰/۰۲
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۳۲	۰/۱۲۶	۰/۲۶۴	−۰/۰۲
پیش‌بینی شده ۳	۰/۰۴	۰/۱۲۹	۰/۲۶	−۰/۰۲
میانگین خطای پیش بینی	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۲
	موقعیت ترک، α			
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰/۳	۰/۶	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۱۳۷	۰/۱۵۵	۰/۵۳۷۴	۰/۰۲۷
پیش‌بینی شده ۲	۰/۱	۰/۲۰۱	۰/۵۵۶	۰/۰۰۳
پیش‌بینی شده ۳	۰/۱۳۵	۰/۱۹۸	۰/۵۱۷	۰/۰۲۹
میانگین خطای پیش بینی	۰	۰/۱۱۴	۰/۰۶۲۹	۰

جدول ۱۳- نتایج روش ارائه شده در پیش بینی ترک سناریوی شماره سه

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی سه	۰/۳	۰/۲	۰/۲۵	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۳۲	۰/۱۴۶۵	۰/۲۶۲	−۰/۰۱
پیش‌بینی شده ۲	۰/۳۲	۰/۱۸۱	۰/۲۵۲	−۰/۰۶
پیش بینی شده ۳	۰/۳۲	۰/۱۳۸	۰/۲۶۳	۰/۰۱
میانگین خطای پیش‌بینی	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۳
	موقعیت ترک، α			
سناریوی سه	۰/۴	۰/۵	۰/۸	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۳۵۹	۰/۳۷۱	۰/۸۱۱	۰/۰۰۲
پیش‌بینی شده ۲	۰/۰۳۷۸	۰/۰,۵۵	۰/۸۱۸	۰/۰۳
پیش‌بینی شده ۳	۰/۳۸۳	۰/۳۶۶	۰/۸۱۳	۰/۱۸۵
میانگین خطای پیش‌بینی	۰/۰۲۵	۰/۰۸۷	۰/۰۱۴	۰

در بخش دیگری نیز حساسیت روش پیشنهادی نسبت به وجود نوفه در مقادیر فرکانس و انرژی کرنشی مودی بکار رفته به عنوان ورودی ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوریکه از جداول ۱۴ تا ۱۶ قابل مشاهده است مقادیر خطاها با افزایش نوفه بالا می‌رود که این موضوع بیشتر در تعیین محل ترک به چشم می‌خورد.

جدول۱۴- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره یک با داده‌های نوفه دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی یک	۰	۰	۰	۰/۳
(۱٪ نوفه)	۰/۰۰۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵
(۲٪ نوفه)	۰/۰۰۶	۰/۰۳۶	۰/۰۲۲	۰/۰۰۲
(۳٪ نوفه)	۰/۰۰۷	۰/۰۳۸	۰/۰۴۵	۰/۰۱۵۱
	موقعیت ترک، α			
سناریوی یک	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$	۰/۷
(۱٪ نوفه)	۰	۰	۰	۰/۰۱۴
(۲٪ نوفه)	۰	۰	۰	۰/۰۰۸
(۳٪ نوفه)	۰	۰	۰	۰/۰۲

جدول۱۵- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره دو با داده‌های نوفه دار

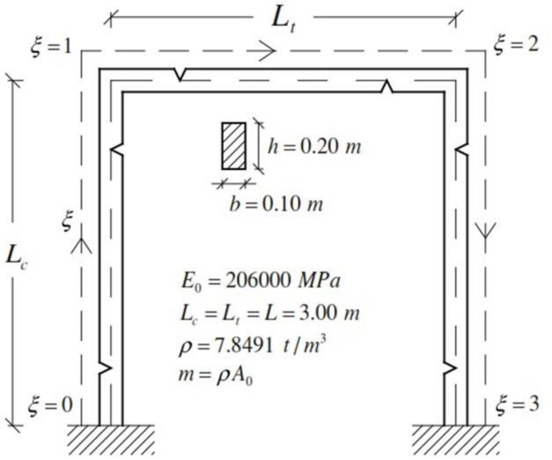
شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی دو	۰	۰/۲	۰,۲۵	۰
(۱٪ نوفه)	۰/۰۶۶	۰,۰۶۳۹	۰,۰۰۷	۰,۰۰۶
(۲٪ نوفه)	۰/۰۷۹	۰,۰۸۵	۰,۰۰۱	۰,۰۱۹
(۳٪ نوفه)	۰/۰۸۱	۰,۰۹۷	۰,۰۱	۰,۰۲۴
	موقعیت ترک، α			
سناریوی دو	$0<\alpha<1$	۰/۳	۰/۶	$0<\alpha<1$
(۱٪ نوفه)	۰	۰/۰۲۶	۰/۰۰۹	۰
(۲٪ نوفه)	۰	۰/۰۳۴	۰/۰۳۵	۰
(۳٪ نوفه)	۰	۰/۰۴۵	۰/۰۲۲	۰

جدول۱۶- میانگین خطای روش ارائه شده در پیش‌بینی ترک سناریوی شماره سه با داده‌های نوفه‌دار

شماره عضو	یک	دو	سه	چهار
	نسبت عمق ترک، η			
سناریوی سه	۰/۳	۰/۲	۰/۲۵	۰
(۱٪ نوفه)	۰/۰۰۹	۰/۰۶۶	۰/۰۲۹	۰/۰۳۶
(۲٪ نوفه)	۰/۰۴۵	۰/۰۸۸	۰/۰۳۲	۰/۰۷۷
(۳٪ نوفه)	۰/۰۶۹	۰/۰۷۱	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸
	موقعیت ترک، α			
سناریوی دو	۰/۴	۰/۳	۰/۶	$0<\alpha<1$
(۱٪ نوفه)	۰/۰۹۷	۰/۱۷۵	۰/۰۲۱	۰
(۲٪ نوفه)	۰/۱۳۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۳	۰
(۳٪ نوفه)	۰/۱۷۱	۰/۳۷۴	۰/۰۳۴	۰

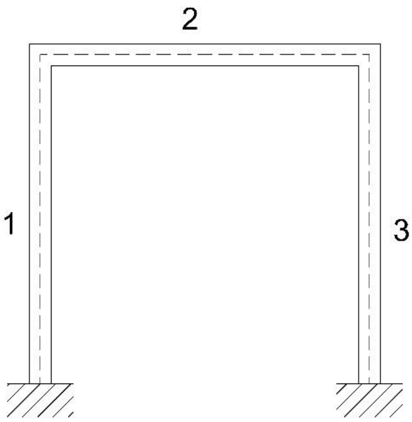
۳-۳ – تشخیص ترک در قاب

در بخش دیگری از تحقیق حاضر اقدام به بررسی کارایی روش پیشنهادی جهت تشخیص ترک در سازه‌های قابی شده است. قاب مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است که مشخصات هندسی و مکانیکی آن ارائه شده است.



شکل ۵- قاب یک دهانه [۲۳]

برای تشخیص ترک در قاب به دلیل اینکه قاب دارای بی‌نهایت حالت وجود ترک می‌باشد بایستی قاب مش‌بندی شده و در بین این مش بندیها وجود ترک تشخیص داده شود. برای نیل به این هدف، قاب به ۳ المان تقسیم شده است که در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای ماشین بکار رفته در جدول ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۶- المان محدود قاب یک دهانه

جدول ۱۷- پارامترهای ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان برای قاب مورد مطالعه

	بدون نوفه	نوفه دار
γ	۱۰۰	۴۰
σ^2	۴	۱۵

برای تشخیص ترک توسط ماشین‌بردار پشتیبان داده آموزشی با استفاده از فرض حالتهای وجود ترک در تیر به تعداد ۴۵۰۰ سناریوی اموزشی تولید می‌شود. همچنین برای تست قابلیت تشخیص ترک در قاب، دو سناریوی فرضی با یک ترکدار و دو ترکدار برای قاب در نظر گرفته می‌شوند که در جدول ۱۸ آمده است.

جدول ۱۸- سناریوی قاب ترکدار

شماره عضو	یک	دو	سه
	نسبت عمق ترک، η		
سناریوی یک	۰/۳	۰	۰
سناریوی دو	۰/۲	۰/۱	۰
	موقعیت ترک، α		
سناریوی یک	۰/۴	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$
سناریوی دو	۰/۴	۰/۶	$0<\alpha<1$

نتایج پیش‌بینی سناریوی فرضی برای قاب ترکدار برای سه آموزش به صورت رندوم در جداول ۱۹ تا ۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۹- نتایج پیش‌بینی برای سناریوی شماره یک قاب ترکدار

شماره عضو	یک	دو	سه
	نسبت عمق ترک، η		
سناریوی یک	۰/۳	۰	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۲۹۷۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
پیش‌بینی شده ۲	۰/۲۹۷۰۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳
پیش‌بینی شده ۳	۰/۲۹۵	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۵
	موقعیت ترک، α		
سناریوی یک	۰/۴	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۳۹۸۰	۰/۰۲۷۴۳	۰/۰۱۸۷
پیش‌بینی شده ۲	۰/۳۹۷۸	۰/۰۳۳	۰/۰۳۵۵
پیش‌بینی شده ۳	۰/۴۰۰۲	۰/۰۵۴۶	۰/۰۵۳۸

جدول ۲۰- نتایج پیش بینی برای سناریوی شماره دو قاب ترکدار

شماره عضو	یک	دو	سه
	نسبت عمق ترک، η		
سناریوی دو	۰/۲	۰/۱	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۱۹۱۹۸	۰/۱۲۳۵	۰/۰۰۲۷
پیش‌بینی شده ۲	۰/۱۹۸۳	۰/۱۲۲۴۷	۰/۰۰۱۱
پیش‌بینی شده ۳	۰/۱۹۸	۰/۱۲۰۴۶	۰/۰۰۱۷
	موقعیت ترک، α		
سناریوی دو	۰/۴	۰,۶	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۳۹۸۸	۰/۵۸۷	۰/۰۲۴
پیش‌بینی شده ۲	۰/۳۸۷۵	۰/۵۴۰	۰/۰۵۰۲
پیش‌بینی شده ۳	۰/۴۰۵	۰/۵۲۴	۰/۰۴۹

همانطوریکه از نتایج فوق مشاهده می‌شود روش پیشنهادی قابلیت بسیار بالایی در یافتن محل ترک روی قاب و همچنین میزان ترک موجود در سازه دارد و می‌تواند به صورت صحیح محل و عمق ترک را پیش‌بینی نماید.

جدول ۲۱- نتایج پیش‌بینی برای سناریوی شماره یک قاب ترکدار با استفاده از داده‌های با ۳٪ نوفه

شماره عضو	یک	دو	سه
	نسبت عمق ترک، η		
سناریوی یک	۰/۳	۰	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۲۴۵۰۰۳	۰/۰۵۶۳	۰/۰۰۸۱۱۵
پیش‌بینی شده ۲	۰/۲۴۴	۰/۰۶۱	۰/۰۰۹۷۵
پیش‌بینی شده ۳	۰/۲۴۴	۰/۰۳۴۲	۰/۰۱۰۷
	موقعیت ترک، α		
سناریوی یک	۰/۴	$0<\alpha<1$	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۴۴۵۵۸	۰/۱۵۳۱	۰/۰۶۲۴۵
پیش‌بینی شده ۲	۰/۴۴۵۵	۰/۲۰۲۱۱	۰/۰۴۶۹
پیش‌بینی شده ۳	۰/۴۱۷۲	۰/۱۱۸۹	۰/۰۴۴۶

جدول ۲۲- نتایج پیش‌بینی برای سناریوی شماره دو قاب ترکدار با استفاده از داده‌های با ۳٪ نوفه

شماره عضو	یک	دو	سه
	نسبت عمق ترک، η		
سناریوی دو	۰/۲	۰/۱	۰
پیش‌بینی شده ۱	۰/۱۷۸۶	۰/۱۳۵	-۰/۰۰۷۱
پیش‌بینی شده ۲	۰/۱۹۶۹	۰/۱۴۵	۰/۰۱۰۹
پیش‌بینی شده ۳	۰/۱۸۲	۰/۱۲۴	۰/۰۰۵۱
	موقعیت ترک، α		
سناریوی دو	۰/۴	۰/۶	$0<\alpha<1$
پیش‌بینی شده ۱	۰/۴۱۱	۰/۵۰۸	-۰/۰۲۳
پیش‌بینی شده ۲	۰/۴۴۳	۰/۴۲۱	۰/۰۴۷۲
پیش‌بینی شده ۳	۰/۴۱۹	۰/۵۵۸۵	-۰/۰۰۶۱۴

جداول ۲۱ و ۲۲ نتایج پیش‌بینی برای دو سناریوی مختلف را با استفاده از داده‌های نوفه‌دار نشان می‌دهند. همانطوریکه دیده می‌شود روش پیشنهادی کارایی خود را با وجود نوفه در داده‌های مودال حفظ نموده است هرچند در درصدی خطا در نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که قابل قبول می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر یک روش نوین جهت تعیین محل و موقعیت ترک در تیرها و قابها ارائه گشته است که از اطلاعات مودال سازه شامل فرکانسها و انرژی‌های کرنش مودال سه مود اول به عنوان ورودی ماشین حداقل مربعات بردار پشتیبان استفاده شده است. خروجی‌های ماشین بکار رفته نیز موقعیت و عمق ترک متناظر خواهد بود. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی دو تیر با شرایط تکیه‌گاهی مختلف و همچنین یک قاب بکار رفته است. نتایج بدست آمده بیانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی در شناسایی ترک قابها و تیرهاست. همچنین روش پیشنهادی نتایج نسبتاً مناسبی را با وجود نوفه در ورودی‌های ماشین در تشخیص ترک در تیرها را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] Chinchalkar, S., "Detection of the crack location in beams using natural frequencies", Journal of Sound and Vibration, 247, pp. 417–429 (2001).

[2] Khaji, N., Shafiei, M., Jalalpour, M., "Closed-form solutions for crack detection problem of Timoshenko beams with various boundary conditions", International Journal of Mechanical Sciences, 51, pp. 667–681 (2009).

[3] Pandey, A.K., Biswas, M., "Damage detection in structures using change in flexibility", Journal of Sound and Vibration 169, pp. 3–17 (1994).

[4] Ghadimi, S., Kourehli, S. S., "Multiple Crack Identification in Euler Beams Using Extreme Learning Machine", KSCE journal of civil engineering, DOI: 10.1007/s12205-016-1078-0 (2016).

[5] Chasalevris, A.C., Papadopoulos, C.A., "Coupled horizontal and vertical bending vibrations of a stationary shaft with two cracks", Journal of Sound and Vibration, 309, pp. 507–528 (2008).

[6] Caddemi, S., Calio, I., "Exact closed-form solution for the vibration modes of the Euler–Bernoulli beam with multiple open cracks", Journal of Sound and Vibration 327, pp. 473–489 (2009).

[7] Shafiee, M., Khaji, N., "Analytical solutions for free and forced vibrations of a multiple cracked Timoshenko beam subject to a concentrated moving load", Acta Mechanica, 221, pp. 79–97 (2011).

[8] Chasalevris, A.C., Papadopoulos, C.A., "Identification of multiple cracks in beams under bending", Mechanical Systems and Signal Processing, 20, pp. 1631–1673 (2006).

[9] Lam, H.F., Ng, C.T., Veidt, M., "Experimental characterization of multiple cracks in a cantilever beam utilizing transient vibration data following a probabilistic approach", Journal of Sound and Vibration, 305, pp. 34–49 (2007).

[10] Faverjon, B., Sinou, J.J., "Robust damage assessment of multiple cracks based on the frequency response function and the Constitutive Relation Error updating method", Journal of Sound and Vibration, 312, pp. 821–837 (2008).

[11] Lin, R.J., Cheng, F.P., "Multiple crack identification of a free–free beam with uniform material property variation and varied noised frequency", Engineering Structures, 30, pp. 909–929 (2008).

[12] Lee, J., "Identification of multiple cracks in a beam using natural frequencies",Journal of Sound and Vibration, 320, pp. 482–490 (2009).

[13] Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H., Bahreininejad, A., "Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks", Expert Systems with Applications 35 (3), pp. 1122–1131 (2008).

[14] Kourehli, S. S., Bagheri, A., Ghodrati Amiri, G., Ghafory-Ashtiany, M., "Structural damage identification method based on incomplete static responses using an optimization problem", Scientia Iranica, 21(4), pp. 1209-1216 (2014).

[15] Kourehli, S. S., "LS-SVM regression for structural damage diagnosis using the iterated improved reduction system", International Journal of Structural Stability and Dynamics, 16 (6) , DOI: 10.1142/S0219455415500182 (2015).

[16] Mehrjoo, M., Khaji, N., Ghafory-Ashtiany, M., "Application of genetic algorithm in crack detection of beam-like structures using a new cracked Euler-Bernoulli beam element", Applied Soft Computing, 13, pp. 867–880 (2013).

[17] Ostachowicz, W.M., Krawczuk, M., "Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam", Journal of Sound and Vibration, 150 (2), pp. 191–201 (1991).

[18] Seyedpoor, S. M., "A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization", International Journal of Non-Linear Mechanics, 47 (1), pp. 1-8, (2012).

[19] Cristianini, N., Shawe-Taylor, J., "An Introduction to Support Vector Machines", Cambridge University Press, (2000).

[20] Suykens, JAK., Vandewalle, J., "Least squares support vector machine classifiers", Neural Process. Lett., 9, pp. 293–300 (1999).

[21] Van Gestel, T., De Brabanter, J., De Moor, B., Vandewalle, J., Suykens, J. A. K., & Van Gestel, T., "Least Squares Support Vector", Machines World Scientific, (2002).

[22] Keerthi, SS., Lin, CJ., "Asymptotic behaviors of support vector machines with Gaussian kernel", Neural Comput., 15 (7), pp. 1667-1689, (2003).

[23] Caddemi, S., Caliò, I., Cannizzaro, F., & Rapicavoli, D., "A novel beam finite element with singularities for the dynamic analysis of discontinuous frames", Archive of Applied Mechanics, 83(10), pp. 1451-1468 (2013).

Crack Detection in Structures Using Modal Strain Energy and Frequency

Siamak Ghadimi
Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran
Seyed Sina Kourehli
Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

Abstract:

In this paper a new method for crack detection in structures based on first three mode frequencies and modal strain energies using least square support vector machine has been proposed. Since the mode shape vectors are equivalent to nodal displacements of a vibrating structure, therefore in each element of the structure strain energy is stored. The strain energy of a structure due to mode shape vector are usually referred to as modal strain energy (MSE) and can be considered as a valuable parameter for crack identification. Also, change of natural frequencies is effective, inexpensive, and fast tool for non-destructive testing. So, the proposed method uses the first three natural frequencies and modal strain energies as the input parameters and crack states as output to train the least squares support vector machine model.

Keywords: Crack Detection, Frequency, Modal strain energy, Least square support vector machine.