

به کارگیری آنالیز موجک بسته ای Wavelet Packet در شناسایی موقعیت و عمق ترک در تیرهای انحنادار با استفاده از روش المان‌های محدود

محمد علی لطف الهی یقین*^۱ و مهدی کوهدرق^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

^۲دانشگاه آزاد اسلامی - واحد ملکان

(// // // //)

بسیاری از شکست‌های سازه‌ای بسبب گسیختگی مواد تشکیل دهنده رخ می‌دهند. آغاز این گسیختگی‌ها با ترک توام بوده که با گسترش خود به عنوان تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می‌شوند، بر این اساس روش‌های تشخیص و نمایان‌سازی ترک موضوع تحقیقات گسترده‌ای است که تا کنون انجام شده و کماکان ادامه دارد. در این مقاله ابتدا سازه با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود (ANSYS) تحت آنالیز دینامیکی گذرا قرار گرفته و سپس تاریخچه شتاب-زمان، در نقاط مختلف از آن برداشت می‌شود. در ادامه این سیگنال‌ها در نرم افزار MATLAB به مؤلفه‌های Wavelet Packet تجزیه می‌شود و شاخص نرخ انرژی برای هر کدام محاسبه می‌شود که آن را با (WPERI)^۱ نشان می‌دهند. نتایج بیانگر آنست که این شاخص‌ها، معیاری حساس و دقیق برای شناسایی ترک می‌باشد.

: تبدیل موجک بسته ای، شاخص نرخ انرژی، آنالیز دینامیکی، تحلیل سیگنال، شناسایی ترک

مقدمه

سیگنال در تابع دو بعدی زمان (یا مکان) و فرکانس رسم کرد. ولی دقت اطلاعات به دست آمده از این روش به اندازه پنجره انتخاب شده بستگی دارد و در فرکانس‌های بالا به طور همزمان تفکیک زمانی ایجاد نمی‌شود. این مسئله بدین خاطر است که تمامی فرکانس‌ها با سایز پنجره ای یکسان انتخاب نمی‌شوند [۴].

تبدیل موجک (WT)^۲ یک روش مفید و جدید برای تحلیل سیگنال‌هاست که مشکلات دیگر روش‌های ذکر شده را ندارد. توابع موجک ترکیبی از یک سری توابع اساسی، که قادر به تفکیک یک سیگنال در زمان (یا مکان) و فرکانس (یا مقیاس) می‌باشند.

بنابراین تبدیل‌های موجک قادرند بسیاری از جنبه‌های ناشناخته اطلاعات را که دیگر روش‌های تحلیل سیگنال نمی‌توانستند آشکار کنند، کشف کند. این مشخصات به ویژه برای کاربردهای کشف ترک مفید می‌باشند. بسیاری از محققین (وانگ، دنگ، کورلی) از تبدیلات موجک برای کشف ترک در قاب‌های سازه‌ای استفاده کردند. ولی یکی از معایب تبدیل موجک، تفکیک فرکانسی ضعیف، در نواحی با فرکانس بالا می‌باشد [۵] تا [۹].

تبدیل موجک بسته ای (WPT)^۳ حالت توسعه

در طول بهره برداری از یک سازه مانند قاب‌های با اندازه بزرگ، ساختمان‌های بلند مرتبه و پل‌ها، ممکن است ترک‌های موضعی و نهفته داخلی سازه به طور پیوسته افزایش یافته و در نهایت باعث فرو ریختن کل سازه شود. به طور کلی روش‌های شناسایی این ترک‌ها را می‌توان در چهار سطح ۱- وجود ترک ۲- موقعیت ترک ۳- مقدار شدت ترک ۴- پیش بینی قابلیت استفاده از باقی مانده سازه ارزیابی کرد [۱]. تاثیر ترک در ساختار سازه به صورت تغییرات موضعی سختی است، که این تغییرات در ساختار دینامیکی سازه اثر قابل توجهی دارد. این موضوع در تغییر فرکانس طبیعی و مد شکل‌های لرزه‌ای، قابل مداخله بوده و تحلیل این تغییرات، شناسایی ترک را ممکن می‌سازد.

روش‌های گوناگونی در راستای بررسی و تشخیص این تغییرات ارائه شده است که هر کدام دارای توانایی‌ها و ضعف‌هایی هستند. از جمله روش تبدیل فوریه که اطلاعات مربوط به فرکانس‌های موجود در یک سیگنال را ارائه می‌کند. در حالی که از زمان رخ دادن یک فرکانس خاص هیچ اطلاعاتی به دست نمی‌دهد [۲، ۳].

برای تصحیح این نقص تبدیل فوریه کوتاه مدت STFT^۴ پیشنهاد شد که در این روش می‌توان یک

یافته‌ی تبدیل موجک معمولی است که تفکیک سطح به سطح کاملی را برای سیگنال ایجاد می‌کند [۱۰]. بنابراین یک تحلیل فرکانس-زمان دلخواهی را ایجاد می‌کند. اما مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در این مورد بسیار کم می‌باشد [۱۱].

ساق و چاقق یک روش انرژی بر پایه مؤلفه‌های تبدیل موجک بسته‌ای پیشنهاد کردند که اجزای انرژی را محاسبه کرده و سپس در یک مدل شبکه عصبی برای ارزیابی ترک به کار بردند [۱۲]. لین و یین در مورد استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای بر روی سیگنال‌های ارتعاشی تحقیق کردند، آنها یک شاخص انرژی گرهی تبدیل موجک بسته‌ای را با استفاده از ضریب آن پیشنهاد کردند [۱۳].

در این مقاله یک روش بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای برای تشخیص ترک پیشنهاد می‌شود که سیگنال‌های دینامیکی اندازه‌گیری شده از سازه به مؤلفه‌های تبدیل موجک بسته‌ای تجزیه شده و سپس شاخص نرخ انرژی برای هر کدام به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای شاخص خوبی برای شناسایی ترک در سازه می‌باشد.

زمینه تئوری تبدیل موجک

توابع موجک بسته‌ای از یک سری توابع خطی موجک تشکیل شده‌اند که جانشین بعضی خصوصیات همانند تعامد و تمرکز زمان-فرکانس از توابع موجک می‌باشند. $\psi_{j,k}^i(t)$ تابعی با سه پارامتر i ، j و k که به ترتیب پارامترهای مدولاسیون، مقیاس و انتقال می‌باشد [۱۴].

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \cdot \psi^j(2^j t - k) \quad (۱) \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

از رابطه بازگشتی زیر به دست می‌آید: ψ^i تابع موجک

$$\psi^{2^j}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k) \quad (۲)$$

$$\psi^{2^{j+1}}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k) \quad (۳)$$

اولین تابع موجک به عنوان تابع مادر نامیده می‌شود:

$$\psi^1(t) = \psi(t) \quad (۴)$$

فیلترهای گسسته $g(k)$ ، $h(k)$ قرینه مربع

فیلترهایی هستند که با توابع مقیاس و تابع موجک مادر در ارتباط هستند.

تابع‌های موجک مادر برای توسعه بسیاری از خصوصیات کلیدی از قبیل قابلیت معکوس شدن و تعامد ایجاد شده‌اند. انتخاب بهترین تابع موجک برای مقاصد کشف محل خرابی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در مقالات و متون مختلف موجک‌های مختلفی از جمله bior6.8، Sym4، Sym6، Gaus4، Gaus6 و db5 بررسی شده‌اند. در تحقیقی که توسط همین مؤلفین انجام گرفته موجک‌های یاد شده مورد بحث قرار گرفته و امکان شناسایی ترک با تک‌تک آنها به طور جداگانه مورد آنالیز قرار گرفته است. که از میان آنها موجک db5 بهتر از بقیه موجک‌ها عمل می‌کند. در این مقاله تابع موجک مادر db5 پیشنهاد شده است. ولی بعلاوه محدود بودن حجم مقاله از آوردن آنها در این مقاله خودداری شده است.

تبدیل موجک بسته‌ای شامل یک تجزیه کامل از هر سطحی است که به همین خاطر در ناحیه با فرکانس بالا تجزیه و تحلیل بالایی انجام می‌دهد. رابطه بازگشتی بین مؤلفه‌های سطح j و $j+1$ به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$f_j^i(t) = f_{j+1}^{2i-1}(t) + f_{j+1}^{2i}(t) \quad (۵)$$

$$f_{j+1}^{2i-1}(t) = H f_j^i(t) \quad (۶)$$

$$f_{j+1}^{2i}(t) = G f_j^i(t) \quad (۷)$$

مقادیر H ، G اپراتورهای کاهنده فیلتر بوده و مربوط به فیلترهای گسسته $g(k)$ ، $h(k)$ بوده و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$H\{.\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k-2t) \quad (۸)$$

$$G\{.\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k-2t) \quad (۹)$$

بعد از تجزیه در سطح j می‌توان تابع $f(t)$ را به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (۱۰)$$

همچنین تابع $f_j^i(t)$ از ترکیب خطی توابع موجک بسته‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i(t) \psi_{j,k}^i(t) \quad (۱۱)$$

ترک

$(E_{f_j^i})_b$ انرژی‌های موجک بسته ای در سطح j با ترک

دو فرض کلی در هنگام استفاده از این روش

پیشنهادی باید در نظر گرفت:

۱- مدل‌های قابل اطمینان از سازه های سالم و خراب باید در دسترس باشد.

۲- سازه به وسیله بارهای ضربه ای وارده به نقاط مختلف سازه تحریک می شود.

سیگنال‌های ارتعاشی اندازه گیری شده از سازه در ابتدا بوسیله نرم افزار MATLAB به مؤلفه های موجک بسته ای تجزیه می شود و سپس شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای به دست می آید که در ادامه با استفاده از تحلیل های آماری آستانه ی ترک برای نقاط مختلف از سازه به دست می آید [۱۴]:

$$UL_{WPERI}^{\alpha} = \mu_{WPERI} + Z_{\alpha} \left(\frac{\delta_{WPERI}}{\sqrt{n}} \right) \quad (18)$$

n : تعداد نقاط برداشت سیگنال

μ_{WPERI} : مقدار میانگین

δ_{WPERI} : انحراف استاندارد

Z_{α} : مقدار توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس واحد که با احتمال $100(1-\alpha)\%$ رو به افزایش می باشد.

یک مزیت این روش شناسایی، انتخاب مقادیر آستانه ای با استفاده از روش آماری می باشد و بسیاری از این شاخص ها که از مقدار آستانه ای تجاوز کنند باعث اختار ترک می باشند. نتایج نشان می دهد حتی وقتی که تعداد متعددی ترک در سازه وجود داشته باشد روش پیشنهادی در حد قابل قبولی در شناسایی ترک عمل می کند.

برای این منظور یک تیر قوس دار به دهانه ۸ متر و ارتفاع ۵ متر با تکیه گاه‌های مفصلی که در شکل (۱) نشان داده شده به کار گرفته می شود. چگالی و مدول الاستیسیته سازه به ترتیب برابر 7850 kg/m^3 ، $11 \times 10^4 \text{ pa}$ می باشد. مساحت و ممان اینرسی بخش عرضی المان برابر 0.05 m^2 ، $10^4 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ می باشد. برای اعمال بار ضربه، همانند بار مثلثی شکل (۲) تاریخچه نیرو - زمان را در فاصله های مختلف از تکیه

ضریب توابع موجک بسته ای می باشد. $c_{j,k}^i(t)$ که در ن

$$c_{j,k}^i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (12)$$

مشروط بر اینکه تابع موجک بسته ای یک تابع

متعامد باشد پس می توان نوشت:

$$\psi_{j,k}^m(t) \psi_{j,k}^n(t) = 0 \quad \text{if } m \neq n \quad (13)$$

در تجزیه موجک بسته ای سیگنال، توزیع درختی

آن به 2^j مؤلفه تجزیه می شود (ز سطح تجزیه می باشد).

بنابراین برای هر سیگنال در سطح تجزیه ۴ به تعداد $2^4 = 16$ مؤلفه انرژی به دست می آید. و در سطح ۵ به تعداد $2^5 = 32$ مؤلفه انرژی به دست می آید و همچنین در آخرین مرحله تجزیه، تفکیک زمانی خوبی به دست می آید

در این مقاله شاخص انرژی موجک بسته ای، برای

شناسایی محل و شدت ترک پیشنهاد می شود. برای این منظور انرژی سیگنال E_{f_j} در مرحله j به صورت زیر

محاسبه می شود:

$$E_{f_j} = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \sum_{m=1}^{2^j} \sum_{n=1}^{2^j} \int_{-\infty}^{\infty} f_j^m(t) f_j^n(t) dt \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۴) و استفاده از شرایط تعامدی رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{f_j} = \sum_{i=1}^{2^j} E_{f_j^i} \quad (15)$$

در نهایت:

$$E_{f_j^i} = \int_{-\infty}^{\infty} f_j^i(t)^2 dt \quad (16)$$

معادله ۱۵ نشان می دهد که انرژی کلی سیگنال

می تواند به مؤلفه های انرژی موجک بسته ای در باندهای

فرکانسی مختلف تجزیه شود. در نهایت شاخص WPERI

برای شناسایی محل و شدت ترک در سازه به صورت زیر

پیشنهاد می شود [۱۴]:

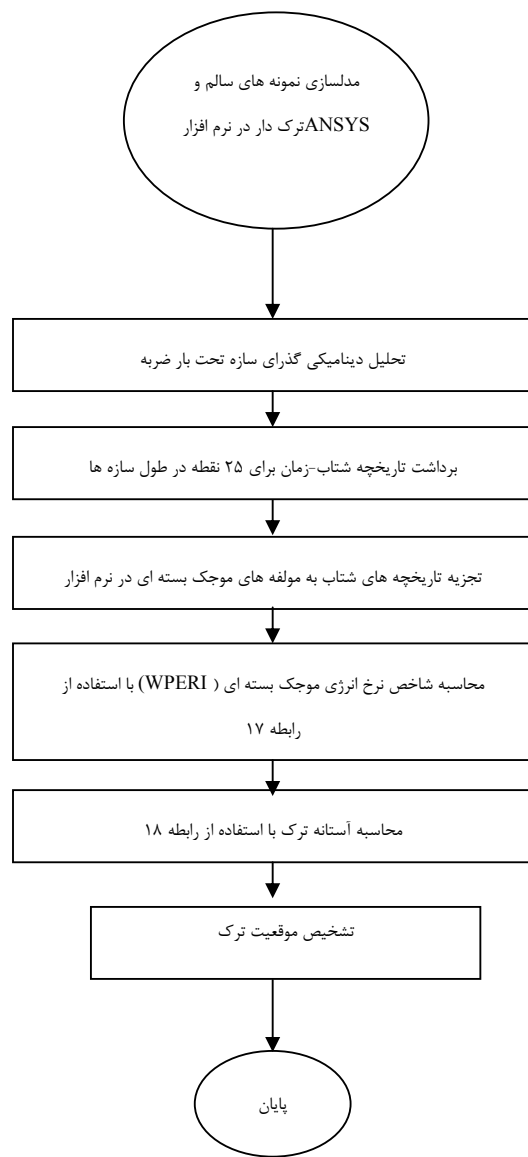
$$\Delta(E_{f_j}) = \sum_{i=1}^{2^j} \frac{|(E_{f_j^i})_b - (E_{f_j^i})_a|}{(E_{f_j^i})_a} \quad (17)$$

$(E_{f_j^i})_a$ انرژی‌های موجک بسته ای در سطح j بدون

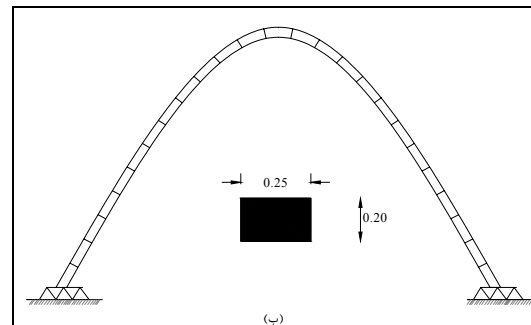
جدول ۱: مشخصات محل و عمق ترک در نمونه های مدل شده.

عمق ترک	شماره المانها	ترک	موقعیت نمونه
-	-	سالم	۱
٪۱۰	(۲۱، ۲۰)	C	۲
٪۲۵	(۲۱، ۲۰)	C	۳
٪۵۰	(۲۱، ۲۰)	C	۴
٪۲۵-٪۵۰	(۲۱، ۲۰)-(۹، ۱۰)	A, C	۵
٪۵۰-٪۵۰	(۲۱، ۲۰)-(۹، ۱۰)	A, C	۶
٪۲۵-٪۵۰	(۲۱، ۲۰)-(۱۶، ۱۷) (۹، ۱۰)	A, B, C	۷

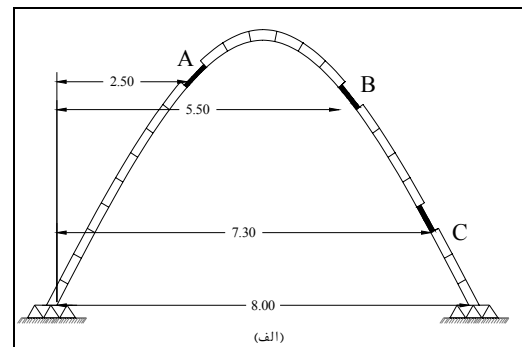
گاه چپ بر روی سازه اعمال می شود و تاریخچه شتاب - زمان، جا به جایی - زمان تحت آنالیز دینامیکی گذرا در نرم افزار ANSYS به دست می آید [۱۵]. این سیگنال های به دست آمده از هر سری بارگذاری به صورت جداگانه به مؤلفه های موجک بسته ای تجزیه شده و نتایج به صورت تجمعی با هم جمع می شود. برای درک بهتر این پروسه از عملیات فلوجارتی همانند شکل (۳) ارائه شده است. نمونه سالم و شش نمونه ترکدار با شدت و محل های مختلف در نظر گرفته می شود و همچنین عمق هر ترک با کم کردن مقاومت ویژه المان مربوطه تعیین می شود. مشخصات و محل و چگونگی قرار گیری ترک ها در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۳: فلوجارت نشان دهنده پروسه عملیات شناسایی ترک.

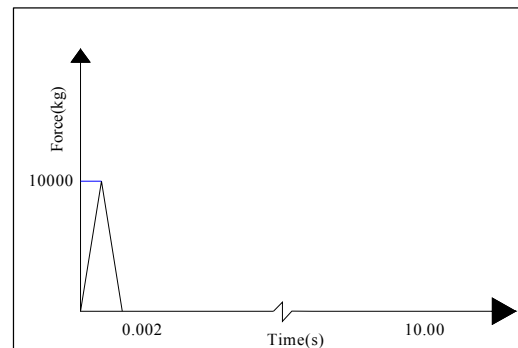


(الف) : نمونه سالم

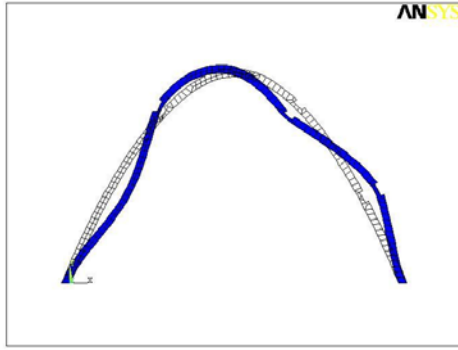


(ب) : نمونه ترک خورده

شکل ۱: مشخصات سازه مدل شده.



شکل ۲: تاریخچه نیرو - زمان اعمالی روی سازه.



شکل ۶: تغییر شکل نمونه ترک خورده در مود سوم.

برای حل این مشکل در این حالت خاص، بار ضربه در نقاطی به فاصله های ۲، ۳، ۵ و ۶ متری از تکیه گاه چپ بر روی نمونه ها اعمال می شود و شاخص نرخ انرژی به صورت جداگانه برای هر سری از بارگذاری ها محاسبه می شود و سپس نتایج به صورت تجمعی با هم جمع می شوند که با این روش می توان تمامی ترک ها را در هر نقطه از سازه شناسایی کرد. برای این منظور می توان نتایج را به صورت زیر فرموله کرد:

$$WPERI_j = \sum_{i=1}^n WPERI_i, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (19)$$

i: متغیر مربوط به تعداد نقاط بارگذاری (n=4) در تحقیق حاضر)

j: متغیر مربوط به تعداد نقاط برداشت داده (m=25) در تحقیق حاضر)

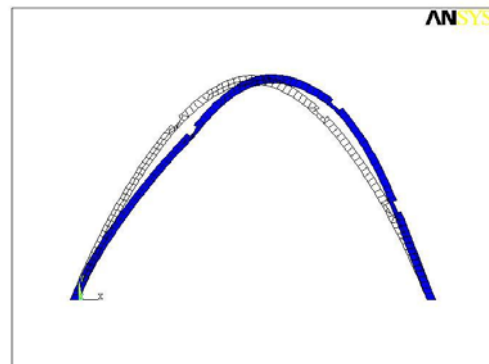
جدول ۲: نتایج چهار فرکانس طبیعی اول نمونه ها.

	/	/	/	/
	/	/	/	/
	/	/	/	/
	/	/	/	/
	/	/	/	/
	/	/	/	/
	/	/	/	/

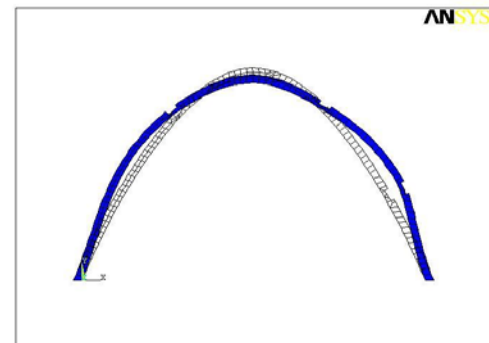
اولین تا چهارمین فرکانس طبیعی برای هر هفت نمونه در جدول (۲) آمده است. همچنین تغییرات فرکانسی هر مود در تمامی نمونه ها در شکل (۷) مورد

محل قرار گیری ترک بر روی سازه در امکان شناسایی آن بسیار مهم می باشد بطوری که به نظر می رسد اگر ترک مورد نظر در محلی قرار گیرد که بیشترین تغییر مکان در مود شکل های اول تا سوم داشته باشد، امکان شناسایی آن ممکن می باشد. ولی همان طور که در ادامه بحث خواهد شد، امکان شناسایی محل ترکی که در کمترین (یا بدون) تغییر مکان در مود شکل های اول تا سوم قرار می گیرد، ممکن نیست.

بنابراین همانند شکل های (۴) تا (۶) ترک C در بیشترین تغییر مکان در هر سه مود اول می باشد در صورتی که ترک های A و مخصوصا B در کمترین مقدار تغییر شکل مودی قرار دارند لذا شناسایی ترک هایی بدین گونه ممکن نمی باشد. همچنین موقعیت بارگذاری در روی سازه باعث تحریک مود شکل خاصی می شود. لذا باید نقاط بیشتری بارگذاری شود تا نتایج قابل قبولی به دست آید و بنا به پیشنهاد محقق حاضر این نتایج باید به صورت تجمعی با هم جمع شوند.



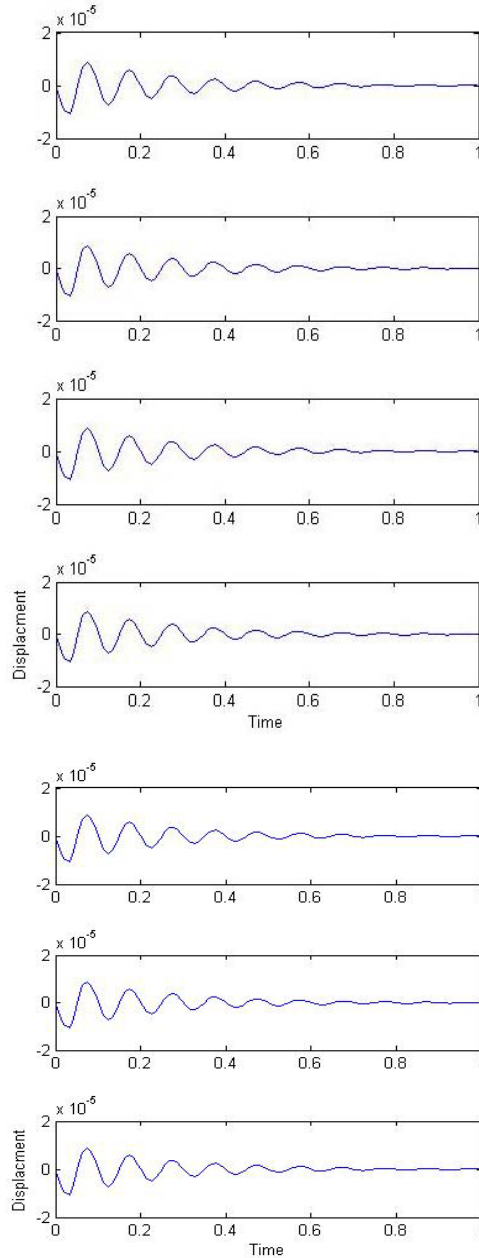
شکل ۴: تغییر شکل نمونه ترک خورده در مود اول.



شکل ۵: تغییر شکل نمونه ترک خورده در مود دوم.

می‌شود.

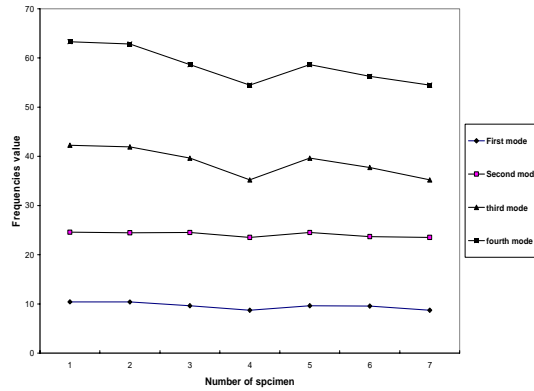
تاریخچه شتاب - زمان در فاصله ۳/۵ متری از تکیه گاه چپ، تحت اثر بار اعمالی در ۲ متری از تکیه گاه برای تمامی نمونه ها در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸: تاریخچه جابجایی - زمان در فاصله ۳/۵ متری از تکیه گاه چپ برای تمامی نمونه ها.

همان‌طور که اشکال نشان می‌دهند، پاسخ‌های شتاب - زمان در همان شرایط برای تمامی نمونه ها یکسان نمی‌باشد لذا می‌تواند معیار خوبی برای شناسایی

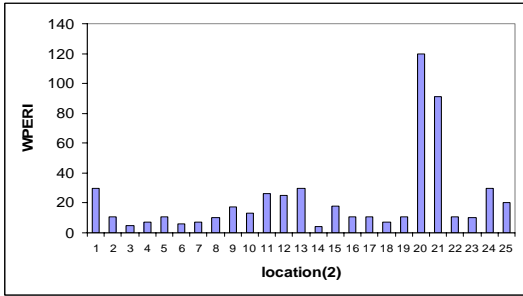
بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد با افزایش عمق ترک و نیز افزایش تعداد ترک، مقادیر فرکانس‌ها کاهش می‌یابد. که این کاهش فرکانسها، از مود سوم به بعد بسیار محسوس می‌باشد که این تغییرات به صورت یک ناهماهنگی در نمودار مشخص می‌باشد.



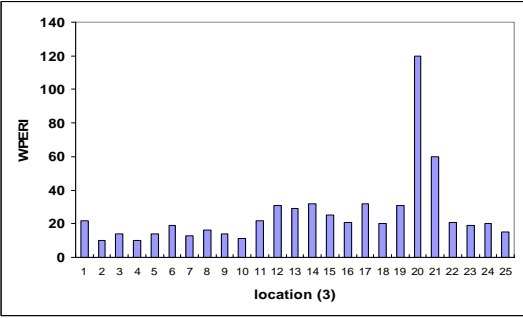
شکل ۷: تغییرات فرکانسی نمونه‌ها در چهار فرکانس اول.

تاریخچه زمانی مربوط به جا به جایی نقطه ای در فاصله ۳/۵ متری از تکیه گاه چپ، تحت اثر بار اعمالی در فاصله ۲ متری از تکیه گاه چپ، برای تمامی نمونه ها در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که اشکال نشان می‌دهند، سازه ابتدا توسط بار ضربه اعمالی، دچار یک تغییر مکان اولیه بزرگ می‌شود که در ادامه به علت میرایی موجود، این ارتعاشات با گذشت زمان میرا شده و سازه به حالت اولیه خود بر می‌گردد، که این روند در تمامی نمونه‌ها یکسان می‌باشد. ولی همان‌طور که در تاریخچه نیرو - زمان (برای بار ضربه) نشان داده شده است رفتار سازه تا ثانیه ۱۰م مورد نظر بوده و تمامی محاسبات تا ثانیه دهم صورت می‌گیرد. ولی به علت اینکه رفتار سازه از ثانیه ۱ به بعد در مقایسه با ثانیه یکم بسیار کوچک و قابل چشم پوشی است لذا نمودارها تا ثانیه یکم رسم شده است.

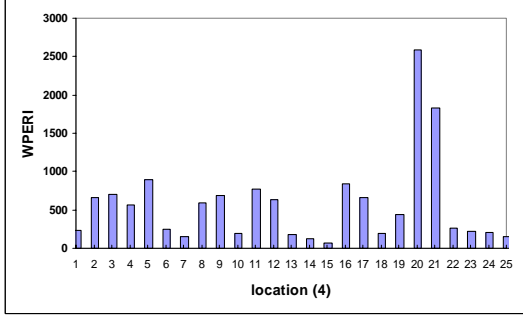
از این رو پاسخ‌های تاریخچه جا به جایی معیار خوبی برای شناسایی ترک نمی‌باشند. از آنجایی که پاسخ‌های سرعت - زمان برگرفته از پاسخ‌های جا به جایی - زمان بوده و تفاوت عمده ای در این پاسخ‌ها برای نمونه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. لذا این پاسخ‌ها نیز نمی‌توانند معیار خوبی برای شناسایی ترک باشند. بدین ترتیب از پاسخ‌های شتاب - زمان برای شناسایی ترک استفاده



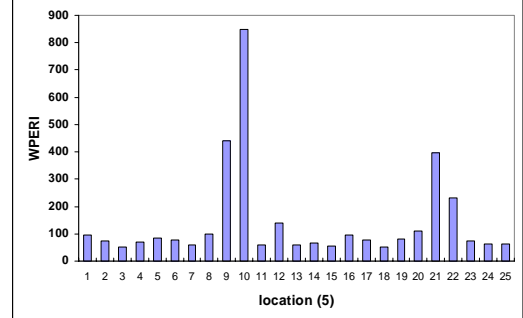
شکل ۱۰: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۲.



شکل ۱۱: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۳.

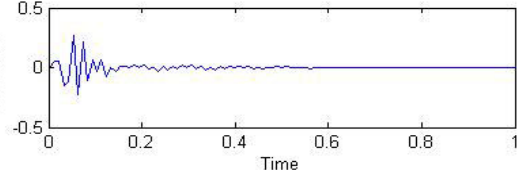
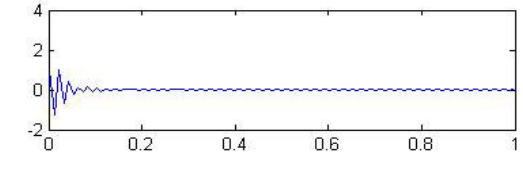
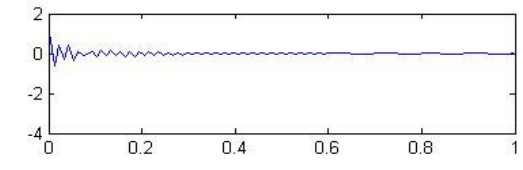
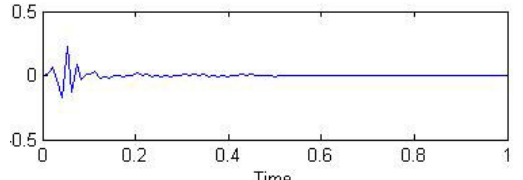
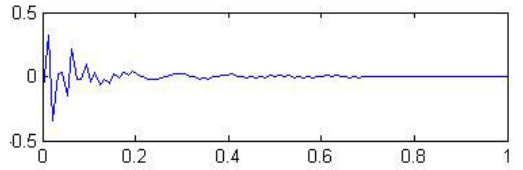
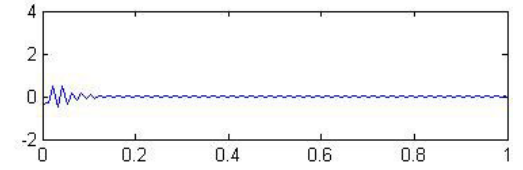
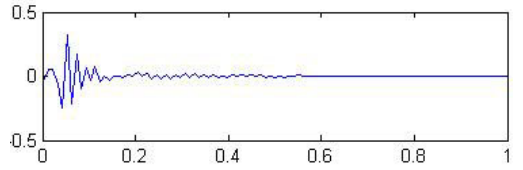


شکل ۱۲: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۴.



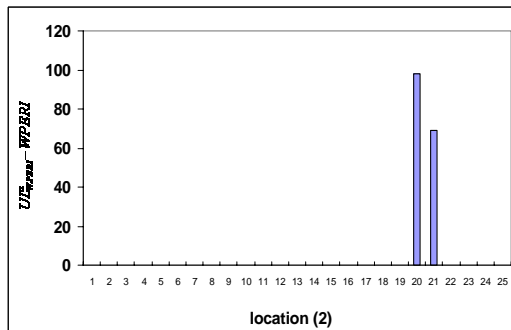
شکل ۱۳: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۵.

ترک مورد استفاده قرار گیرد. بعد از تجزیه سیگنال‌ها به مؤلفه‌های موجک بسته ای (در سطح ۵) شاخص WPERI با استفاده از رابطه ۱۸ برای شتاب‌ها محاسبه می‌شود و مقادیر در اشکال (۱۰) تا (۱۵) نشان داده شده است.

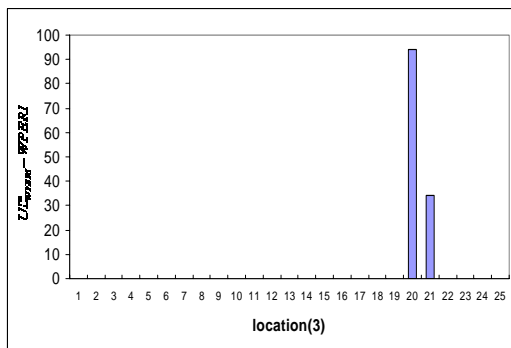


شکل ۹: تاریخچه شتاب - زمان در فاصله ۳/۵ متری از تکیه گاه چپ در تمامی نمونه‌ها.

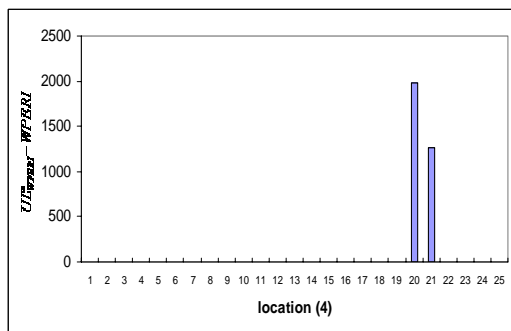
۹۸٪ مقادیر UL_{WPERI}^{α} به دست می آید که اختلاف مقادیر WPERI از UL_{WPERI}^{α} در اشکال (۱۶) تا (۲۱) نشان داده شده است.



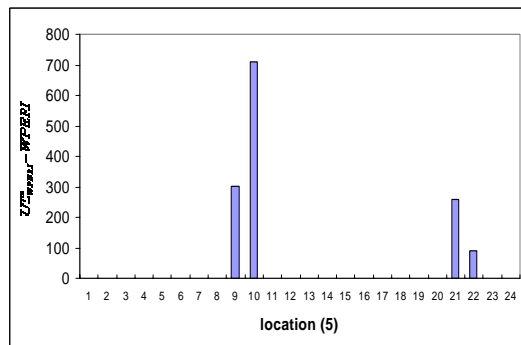
شکل ۱۶: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۲.



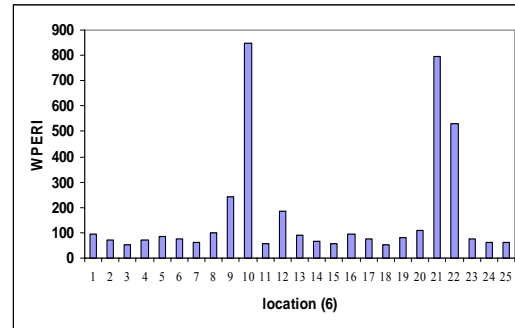
شکل ۱۷: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۳.



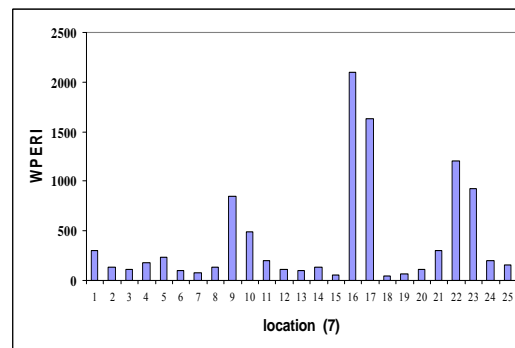
شکل ۱۸: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۴.



شکل ۱۹: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۵.



شکل ۱۴: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۶.



شکل ۱۵: مقادیر شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای برای نمونه ۷.

همانطور که اشکال بالا نشان می دهند، در محل ترک شاخص پیشنهادی به صورت ماکزیمم مقدار می باشد و در بقیه نقاط این مقدار خیلی کمتر می باشد بنابراین به وسیله این روش می توان محل ترک را به خوبی شناسایی کرد. همچنین همین روش علاوه بر محل ترک به عمق ترک نیز حساس می باشد به طوری که این شاخص با افزایش عمق ترک، رو به افزایش می باشد. ولی این افزایش با نسبت افزایش عمق ترک رابطه خطی ندارد.

بنابراین همانطور که اشکال نشان می دهند، روش پیشنهادی می تواند ترکها را در هر نقطه از نمونه با عمقهای متفاوت شناسایی کند. همانطور که شکل (۱۵) نشان می دهد نمونه ۷ دارای سه ترک با عمقهای ۱۰، ۵۰ و ۲۵ درصدی می باشد. که در نمودار نیز مقادیر آستانه ترک برای آنها (ماکزیمم) برابر ۹۸۵، ۲۱۰۰ و ۱۲۲۵ می باشد، یعنی به عبارت دیگر با افزایش عمق ترک، مقادیر شاخص انرژی نیز افزایش یافته است که این افزایش به صورت غیر خطی می باشد. در ادامه با استفاده از رابطه ۱۹ و با فرض $\alpha = 0.02$ و حد اطمینان بالای

موجک بسته ای برای شناسایی ترک بسیار مفید می باشد. از نقطه نظر اجرایی، روش زیر دارای سه مرحله می باشد: ۱- تجزیه سیگنالها به ضرایب موجک بسته ای ۲- محاسبه شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای ۳- تشخیص موقعیت ترک.

انتخاب مقیاس و سطح تجزیه مناسب از اهمیت بسیار بالایی در آنالیز موجک بسته ای برخوردار است. چنانچه در مقیاس و سطح تجزیه پایین تر از ۴ امکان شناسایی ترک های کوچک وجود ندارد.

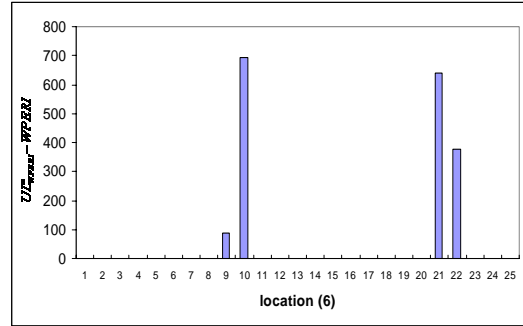
با بررسی انواع موجک ها در مقیاسها و سطح های تجزیه مختلف، موجکهای Haar, Db, Sym, Coif و Bior به عنوان موجک های مفید در تشخیص ترک معرفی می شوند. در این میان با توجه به تحقیق حاضر موجک Db5 با کارایی بهتر در شناسایی ترک نسبت به بقیه موجک ها معرفی می شود.

این محاسبات نسبتا سریع بوده و وقت گیر نمی باشد بنابراین روش پیشنهاد شده نسبت به روش های مشابه، یک روش کاربردی و عملی می باشد.

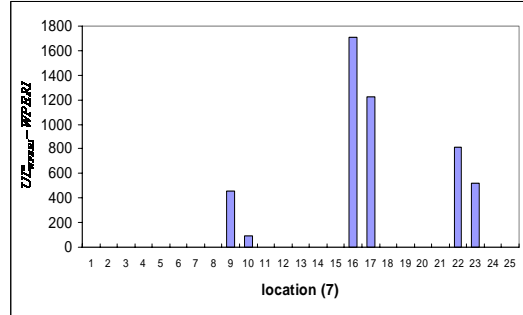
افزایش عمق ترک سبب افزایش شاخص پیشنهادی بر پایه موجک بسته ای می شود اما با افزایش روند آسیب، رابطه خطی ندارد.

شاخص نرخ انرژی بر پایه موجک بسته ای به افزایش تعداد ترک حساس می باشد یعنی با افزایش تعداد ترک این شاخص در نقاط بیشتری نمایان می شود.

نتایج نشان می دهد استفاده از جمع شاخص پیشنهادی محققین حاضر به صورت تجمعی، از کارایی بسیار بالایی برخوردار بوده و امکان شناسایی ترک را در تمامی نقاط از سازه ممکن می سازد.



شکل ۲۰: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۶.



شکل ۲۱: مقادیر آستانه ترک برای نمونه ۷.

همانطور که اشکال نشان می دهند آستانه ترک به صورت واضح در اشکال مشخص می باشد و در محل های غیر از ترک این شاخص برابر صفر می باشد. برای مثال در شکل (۱۷) شاخص نرخ انرژی موجک بسته ای بین گره های ۲۰ و ۲۱ (المان C در نمونه ۳) که دقیقا محل ترک می باشد ظاهر شده است.

تبدیل موجک بسته ای به عنوان یک ابزار ریاضی قوی برای شناسایی ناپیوستگی یا ناهماهنگی در تغییرات سختی سازه، به کار می رود. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی محاسبه شاخص انرژی بر پایه تبدیل

- 1 - Doebling, S. W., Farrar, C. R. and Prime, M. B. (1998). "A summary review of vibration-based damage identification methods." *Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, No. 2, PP. 91-105.
- 2 - Ren, W. X. and De Roeck, G. (2002a). "Structural damage identification using modal data. I: Simulation verification." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 1, PP. 87-95.
- 3 - Ren, W. X. and De Roeck, G. (2002b). "Structural damage identification using modal data. II: Test verification." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 1, PP. 96-104.
- 4 - Gabor, D. (1946). "Theory of communication." *IEEE Journal*, Vol. 21, PP. 149-157.
- 5 - Hou, Z., Noori, M., St. and Amand, R. (2000). "Wavelet-based approach for structural damage detection."

Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 7, PP. 677–683.

- 6 - Kitada, Y. (199). "Identification of nonlinear structural dynamic systems using wavelets." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 124, No. 10, PP. 1059–1066.
- 7 - Wang, Q. and Deng, X. (1999). "Damage detection withspatial wavelets." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, No. 23, PP. 3443–3468
- 8 - Wang, W. J. And McFadden, P. D. (1996). "Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 192, No. 5, PP. 927–939.
- 9 - Ovanesoova, A.V. and Suarez, L. E. (2003). "Application of wavelet transforms to damage detection in frame structures." *Engineering Structures*, Vol. 26, PP. 39–49.
- 10 - Mallat, S. (1989). "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 11, PP. 674–693.
- 11 - Coifman, R. R. and Wickerhauser, M. V. (1992). "Entropy-based algorithms for best basis selection." *IEEE Transactions of Information Theory*, Vol. 38, PP. 713–718.
- 12 - Sun, Z. and Chang, C. C. (2002). "Structural damage assessment based on wavelet packet transform." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 10, PP. 1354–1361.
- 13 - Yen, G. G. and Lin, K. C. (2000). "Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 3, PP. 650–667.
- 14 - Zeng, S. S., Wei, X. R. and Jian, G. H. (2005). "Wavelet packet based damage identification of beam structures." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, PP. 6610-6627.
- 15 - ANSYS, (1999). *User's manual, revision 5.6. Swanson Analysis System, USA.*

- 1 - Wavelet Packet Energy Rate Index
 - 2 - Short Time Fourier Transform
 - 3 - Wavelet Transform
 - 4 - Wavelet packet Transform
-