



Experimental Study of Damage Detection in Beam Using Dynamic Excitation System and Wavelet Packet Transform and Energy Rate Index

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kouhdaragh M.^{*1} PhD,
Lotfollahi Yaghin M.A.² PhD,
Etefagh M.M.³ PhD,
Mojtahedi A.R.² PhD

How to cite this article

Kouhdaragh M, Lotfollahi Yaghin M.A, Etefagh M.M, Mojtahedi A.R. Experimental Study of Damage Detection in Beam Using Dynamic Excitation System and Wavelet Packet Transform and Energy Rate Index. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1655-1662.

¹Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Malekan Branch, Islamic Azad University, Malekan, Iran

²Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Mechanic Engineering Department, Mechanic Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Malekan Branch, Islamic Azad University, Malekan, Iran

Phone: -

Fax: +98(41) 33852027

koohdarag@malekaniau.ac.ir

Article History

Received: October 14, 2018

Accepted: January 07, 2019

ePublished: July 01, 2019

ABSTRACT

Most of structural failures are because of break in consisting materials. Beginning of these breaks is with crack, whose extension is a serious threat to behavior of structure; so, the methods of distinguishing and showing cracks are the most important subjects, which are being investigated. In this article, by experimental, a new smart portable mechanical system to detect damage in beam structures by wavelet packet energy rate index is introduced. At first, acceleration-time history is taken from the points of the simple support beam, using the accelerometer sensors, and then these signals are decomposed into packet wavelet components and the energy rate index is calculated for each, which is named by Wavelet Packet Energy Rate Index (WPERI). The results indicate that these values are a sensitive and accurate index for the identification of the cracks.

Keywords Damage Detection; Dynamic System; Energy Rate Index; Wavelet Packet

CITATION LINKS

[1] Examining the function of wavelet packet transform (WPT) and continues wavelet transform (CWT) in recognizing the crack specification [2] Damage detection in beam-like structure based on wavelet packet [3] Structural damage identification using system dynamic properties [4] An enhanced frequency-shift-based damage identification method using tunable piezoelectric transducer circuitry [5] Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses [6] Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions [7] Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge [8] Vehicle axle load identification on bridge deck with irregular road surface profile [9] A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction [10] Evaluating the response statistics of an uncertain bridge-vehicle system [11] A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [12] Entropy-based algorithms for best basis selection [13] Structural damage assessment based on wavelet packet transform [14] Ten lectures on wavelets [15] Damage detection of jacket type offshore platforms using rate of signal energy using wavelet packet transform [16] Damage identification method based on continuous wavelet transform and mode shapes for composite laminates with cutouts [17] Damage identification in offshore jacket structures based on modal flexibility [18] Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures [19] Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring [20] Probability concepts in engineering planning and design: Basic principles [21] Wavelet packet based damage identification of beam structures

شناسایی تجربی خرابی در تیر با استفاده از سیستم محرک دینامیکی و تبدیل موجک بسته‌ای و شاخص نرخ انرژی

مهدی کوهدرق* PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران

محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین PhD

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

میرمحمد اتفاق PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

علیرضا مجتهدی PhD

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

بسیاری از شکست‌های سازه‌ای به سبب گسیختگی مواد تشکیل‌دهنده رخ می‌دهند. آغاز این گسیختگی‌ها توام با ترک است که با گسترش خود به‌عنوان تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می‌شوند. در این راستا روش‌های پایش سلامت سازه‌ها، موضوع تحقیقات پرآمنه‌ای است که تاکنون انجام شده است و کماکان ادامه دارد. در این مقاله که به‌صورت آزمایشگاهی صورت گرفته، یک سیستم جدید مکانیکی پرتابل هوشمند برای شناسایی خرابی در سازه‌های تیری شکل با استفاده از شاخص نرخ انرژی بر پایه موجک بسته‌ای معرفی شده است. در ابتدا تاریخچه شتاب-زمان از نقاط تیر دو سر مفصل ساده با استفاده از سنسورهای شتاب‌سنج برداشت می‌شود و سپس این سیگنال‌ها به مولفه‌های موجک بسته‌ای تجزیه می‌شوند و شاخص نرخ انرژی برای هر کدام محاسبه می‌شود که آن را با Wavelet Packet Energy Rate Index (WPERI) نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که این مقادیر، شاخص‌های حساس و دقیقی برای شناسایی ترک هستند.

کلیدواژه‌ها: شناسایی خرابی، سیستم دینامیکی، شاخص نرخ انرژی، موجک بسته‌ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

*نویسنده مسئول: koohdarag@malekaniiau.ac.ir

۱- مقدمه

از آنجایی که عیب و ازکارافتادگی در سازه‌ها می‌تواند منجر به هدررفتن منابع انسانی و مالی شود، شناسایی خرابی در سازه‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. روش‌های آنالیز مودال به‌علت عملی بودن آنها عمومیت زیادی دارند. روش‌های مبتنی بر آنالیز مودال بر این حقیقت استوار هستند که پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، شکل مد و میرایی مودال) تابعی از پارامترهای فیزیکی (جرم، میرایی، سختی) هستند و بنابراین فرض اینکه وجود عیب منجر به تغییر در مشخصات مودال سازه می‌شود، منطقی است [1, 2]. به‌طور معمول اطلاعات اولیه به‌منظور مقایسه می‌تواند از اطلاعات اندازه‌گیری شده از سازه سالم یا مدل المان محدود بدون عیب استخراج شود. پارامترهای مودال مورد استفاده برای شناسایی عیوب سازه شامل تابع فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی، انحنای شکل مد، خمش مودال و غیره هستند [3-5]. وظیفه هر سیستم شناساگر خرابی به چند بخش تقسیم می‌شود که عبارت از کشف خرابی، شناسایی مکان خرابی، شناسایی میزان خرابی و پیش‌بینی میزان عمر خرابی هستند. به‌منظور به‌دست آوردن عملکرد خوب نیاز به مدل‌کردن ریاضی خیلی دقیق سیستم‌های مانی‌تور شده وجود دارد. خطاهای مدل‌سازی می‌تواند بر عملکرد سیستم‌های عیب‌یابی تاثیر بگذارد، به‌خصوص زمانی که سیستم‌های مانی‌تور شده غیرخطی باشند. استفاده از روش‌های هوش محاسباتی ممکن است خطاهای مدل‌سازی را جبران کند،

به‌طوری که این روش‌ها تقریب خوبی از سیستم‌های غیرخطی ارائه می‌دهند. دینگ و همکاران در دانشگاه وسترن استرالیا، تحقیقاتی را در زمینه ارزیابی نیروهای محوری دینامیکی ارابه به‌همراه شرایط سطح جاده‌ای متفاوت به انجام رساندند. نوآوری این تحقیق در به‌کارگیری روش "طیفی تکاملی" برای ارزیابی بارهای دینامیکی ارابه روی تیر بود که روی سطح ناصاف تیر با سرعت ثابت حرکت می‌کرد [6]. محققانی در دانشکده عمران دانشگاه توکیو ژاپن، روشی برای پیش‌بینی پاسخ‌های موضعی تحریک تیر مایل توسط ارابه پیشنهاد دادند [7]. وو و لائو در دانشکده مهندسی سازه دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ تحقیقی را در مورد شناسایی بار محوری ارابه روی تیر با ناهمواری سطح جاده انجام دادند. بارهای محوری به‌کاررفته روی تیر در این تحقیق با در نظر گرفتن ناهمواری‌های سطح جاده تخمین زده شد [8]. نوس و همکاران در دانشگاه پورتو پرتغال از روش مستقیمی برای آنالیز برهم‌کنش عمودی سازه-ارابه استفاده کردند. روش پیشنهادی آنها برای سیستم‌هایی با حجم سازه‌ای بالا مناسب‌تر از روش‌هایی بود که دائماً به‌روزرسانی می‌شوند [9]. وو و لائو در دانشکده مهندسی سازه دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ، تحقیقی را در زمینه پیش‌بینی آماری پاسخ دینامیکی سازه تیر با خصوصیات ذاتی نامعلوم بر اثر عبور بارهای متحرک اتفاقی به انجام رساندند. خصوصیات نامعلوم در سازه تیر که به‌صورت گاوسی فرض شده بود، به‌کمک روش المان محدود مدل شد و خصوصیات نامعلوم ارابه با توزیع گاوسی به کمک بسط "کارهونن-لوو" ارائه شد [10]. تبدیل موجک بسته‌ای (WPT) حالت توسعه‌یافته تبدیل موجک معمولی است که تفکیک سطح به سطح کاملی را برای سیگنال ایجاد می‌کند [11]. بنابراین یک تحلیل فرکانس-زمان دلخواهی را ایجاد می‌کند. اما مطالعات و تحقیقات انجام‌گرفته در این مورد بسیار کم است [12]. سان و چانگ یک روش انرژی بر پایه مولفه‌های تبدیل موجک بسته‌ای پیشنهاد کردند که اجزای انرژی را محاسبه کرده و سپس در یک مدل شبکه عصبی برای ارزیابی ترک به کار بردند [13]. برخی از محققان در مورد استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای روی سیگنال‌های ارتعاشی تحقیق کردند. آنها یک شاخص انرژی گرهی تبدیل موجک بسته‌ای را با استفاده از ضریب آن پیشنهاد کردند [14]. اصغریان و همکاران با مطالعه نتایج آزمایشگاهی نمونه آزمایشگاهی پلاتفرم افق‌هایی که تحت بارگذاری دینامیکی برای شرایط مختلف خسارت قرار دادند و کارایی نرخ انرژی سیگنال با استفاده از تبدیل بسته موجک برای تشخیص آسیب‌های این نوع سازه‌ها انجام گرفت. آزمایشات نتایج حاصل از دو شرایط حمایت از جمله موارد مبتنی بر لولا و شمع مورد استفاده قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل بسته‌های موجک برای تعیین موقعیت آسیب برای سناریوهای آسیب مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند محل آسیب را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند [15]. ژو و همکاران، با مطالعه روی مد شکل به‌طور گسترده‌ای، شناسایی محل و شدت آسیب برای سازه‌های ورقه‌ای را مورد استفاده قرار دادند. با این وجود، هر مد شکل، حساسیت خاص خود را نسبت به آسیب در مکان خاص دارد که منجر به شناسایی یا عدم آن می‌شود. به‌منظور افزایش دقت شناسایی آسیب، یک شاخص آسیب براساس تبدیل موجک دوبعدی (CWTT) پیشنهاد شده است [16]. لیو و همکاران، یک روش مبتنی بر انعطاف مودال با استفاده از روش به‌روزرسانی مدل عنصر محدود را برای اهداف تشخیص آسیب ارائه دادند. انگیزه برای انتخاب انعطاف‌پذیری مودال توضیح داده شده و تابع هدف برای یک روند بهینه‌سازی

$$f_{j+1}^{2i} = Gf_j^i(t) \quad (7)$$

f تابع فرکانسی است و مقادیر H, G از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$H\{0\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k-2t) \quad (8)$$

$$G\{0\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k-2t) \quad (9)$$

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

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (10)$$

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

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i(t) \psi_{j,k}^i(t) \quad (11)$$

که در آن ضریب توابع موجک بسته‌ای است.

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

مشروط بر اینکه تابع موجک بسته‌ای یک تابع متعامد است، پس می‌توان نوشت:

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

$\psi_{j,k}^m$ تابعی با سه پارامتر m, j, k بوده که به ترتیب پارامترهای مقیاس، مدولاسیون و انتقال است. در تجزیه موجک بسته‌ای سیگنال، توزیع درختی آن به 2^j مولفه تجزیه می‌شود (j سطح تجزیه است). بنابراین برای هر سیگنال در سطح تجزیه ۴ به تعداد $2^4=16$ مولفه انرژی و در سطح ۵ به تعداد $2^5=32$ مولفه انرژی به دست می‌آید و همچنین در آخرین مرحله تجزیه، تفکیک زمانی خوبی به دست می‌آید.

۲-۲- شاخص نرخ انرژی موجک بسته‌ای

در این مقاله، شاخص انرژی موجک بسته‌ای، برای شناسایی محل و شدت ترک پیشنهاد می‌شود و برای این منظور، انرژی سیگنال E_{f_j} در مرحله j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

با جای‌گذاری رابطه ۱۱ در رابطه ۱۴ و استفاده از شرایط تعامدی، رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در نهایت:

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

معادله ۱۵ نشان می‌دهد که انرژی کلی سیگنال می‌تواند به مولفه‌های انرژی موجک بسته‌ای در باندهای فرکانسی مختلف تجزیه شود. در نهایت، شاخص WPERI برای شناسایی محل و شدت ترک در سازه به صورت زیر پیشنهاد می‌شود [21]:

تکراری فرموله شده است. مدل مدل پلت فرم شبیه‌سازی شده با موارد آسیب تک و سه‌گانه‌ای که آلودگی صوتی و عدم اطمینان مدل در نظر گرفته شده است، ایجاد می‌شود. شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مطالعه پارامترهای تصادفی استفاده می‌شود [17]. از میان پارامترهای موادل، فرکانس طبیعی از آنجایی که راحت‌تر و با دقت بیشتری می‌تواند اندازه‌گیری شود، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مقاله، بار متحرک شامل جرم متمرکز و فنر الاستیک خطی، با سرعت ثابت برای تحریک دینامیکی تیر دو سر مفصل ساده استفاده می‌شود. سپس تاریخچه شتاب- زمان در نقطه میانی از تیر توسط سنسورهای شتاب‌سنج استخراج می‌شود. تاریخچه شتاب- زمان به دست آمده از سازه به مولفه‌های تبدیل موجک بسته‌ای تجزیه می‌شود 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 است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- زمینه تئوری تبدیل موجک

توابع موجک بسته‌ای از یک سری توابع خطی موجک تشکیل شده‌اند که جانشین بعضی خصوصیات‌ها همانند تعامد و تمرکز زمان- فرکانس از توابع موجک هستند. $\psi_{j,k}^i$ تابعی با سه پارامتر j, k, i که به ترتیب پارامترهای مقیاس، مدولاسیون و انتقال است [18].

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

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

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

$$\psi^{2^{j+1}}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k) \quad (3)$$

اولین تابع موجک به عنوان تابع مادر نامیده می‌شود:

$$\psi^1 = \psi(t) \quad (4)$$

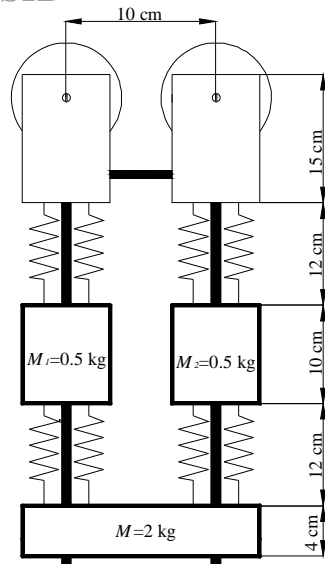
$g(k), h(k)$ فیلترهای گسسته قرینه مربع فیلترهایی است که با توابع مقیاس و تابع موجک مادر در ارتباط هستند.

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, db5 بررسی شده‌اند. در این مقاله تابع موجک مادر db5 پیشنهاد شده است [19].

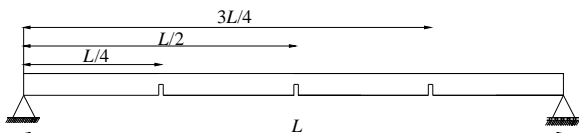
تبدیل موجک بسته‌ای شامل یک تجزیه کامل از هر سطحی است که به همین خاطر در ناحیه با فرکانس بالا، تجزیه و تحلیل بالایی انجام می‌دهد. رابطه بازگشتی بین مولفه‌های سطح i و $i+1$ به صورت زیر بیان می‌شود [20].

$$f_j^i(t) = f_{j+1}^{2i-1} + f_{j+1}^{2i}(t) \quad (5)$$

$$f_{j+1}^{2i-1}(t) = Hf_j^i(t) \quad (6)$$



شکل ۲) مدل فیزیکی بار متحرک



شکل ۳) محل قرارگیری ترک در تیر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استخراج سیگنال‌های ارتعاش

برای استخراج سیگنال‌های ارتعاشی، تیر به صورت شماتیک به ۲۵ قسمت تقسیم می‌شود و در هر قسمت، یک سنسور شتاب‌سنج *B&K* مدل ۴۵۰۷ با فرکانس نمونه‌برداری ۶/۴ کیلوهرتز نصب می‌شود که این سنسورها دارای توانایی ثبت کوچک‌ترین ارتعاش را روی تیر دارند. در ادامه، ارباه ذکر شده توسط موتور الکتریکی با سرعت ثابت یک‌متر در ثانیه به حرکت در می‌آید و کل طول تیر را می‌پیماید که این امر باعث تولید ارتعاش در طول تیر می‌شود که توسط شتاب‌سنج‌ها ذخیره می‌شود و برای اینکه قابلیت اعتماد به داده‌های استخراج شده بیشتر باشد، این عمل به تعداد ۱۰ بار تکرار می‌شود. محیط آزمایشگاه در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴) تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده به منظور انجام تست تجربی

دو عدد ترک در محل‌های ۱/۴ و ۱/۲ تیر با شدت‌های ۵۰ و ۸۰٪ (d/h) روی تیر قرار داده شده که برای ایجاد ترک در محل‌های ذکر شده از اره با ضخامت کم استفاده شده است و ده بار آزمایش

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

که در رابطه فوق، $(E_{fj}^i)_a$ نشان‌دهنده انرژی‌های موجک بسته‌ای در سطح z بدون ترک و $(E_{fj}^i)_b$ انرژی‌های موجک بسته‌ای در سطح z با ترک هستند.

۳-۲- روش‌های شناسایی ترک

سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده از سازه در ابتدا به وسیله نرم‌افزار MATLAB به مولفه‌های موجک بسته‌ای تجزیه می‌شود و سپس شاخص نرخ انرژی موجک بسته‌ای به دست می‌آید که در ادامه با استفاده از تحلیل‌های آماری، آستانه ترک برای نقاط مختلف از سازه به دست می‌آید [18].

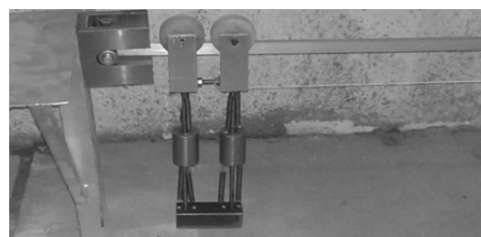
$$UL_{WPERI}^{\alpha} = \mu_{WPERI} + Z_{\alpha} \left(\frac{\delta_{WPERI}}{\sqrt{n}} \right) \quad (18)$$

که در رابطه فوق، n تعداد نقاط برداشت سیگنال، μ_{WPERI} مقدار میانگین، δ_{WPERI} انحراف استاندارد و Z_{α} مقدار توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس واحد که با احتمال $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ به افزایش است.

یک مزیت این روش شناسایی، انتخاب مقادیر آستانه‌ای با استفاده از روش آماری است و بسیاری از این شاخص‌ها که از مقدار آستانه‌ای تجاوز کنند، باعث اختار ترک هستند. نتایج نشان می‌دهد حتی وقتی که تعداد متعددی، ترک در سازه وجود داشته باشد، روش پیشنهادی در حد قابل قبولی در شناسایی ترک عمل می‌کند [18].

۳-۴- مدل‌سازی تیر و بار متحرک

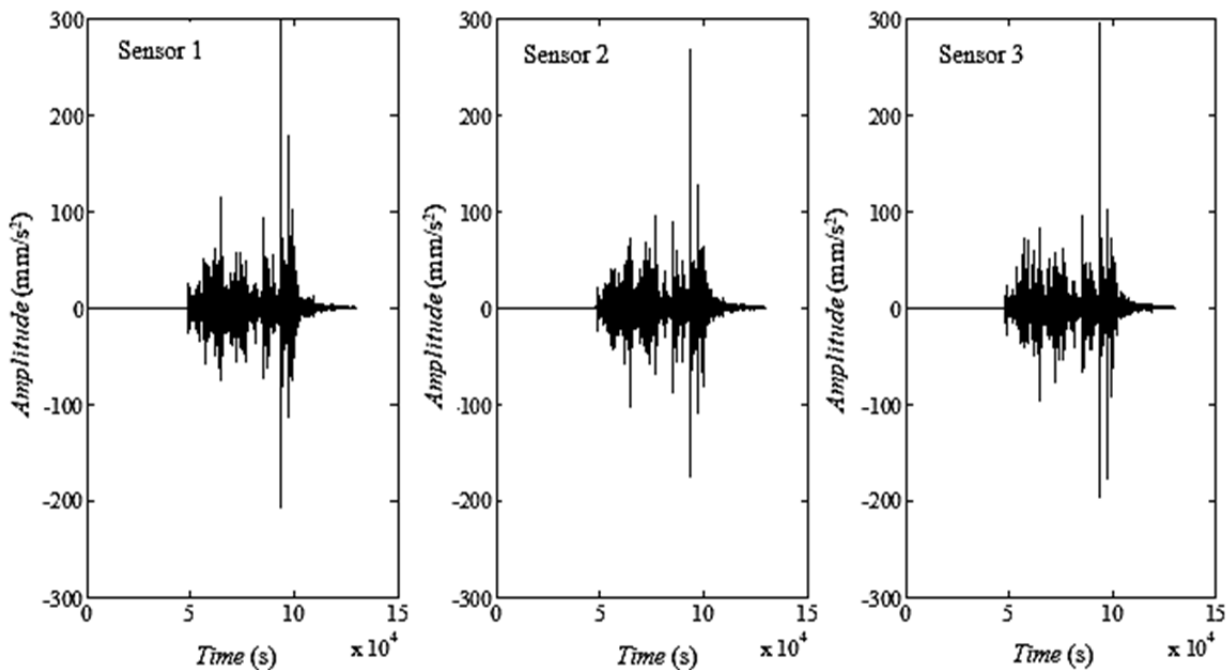
برای این منظور، یک تیر آلومینیومی به ابعاد مقطع ۲۰×۱۰ میلی‌متر به طول ۲ متر مورد آزمایش قرار گرفت که ابتدا و انتهای تیر توسط دو ستون نیم‌متری که دو فک به آنها متصل بوده، مدل‌سازی شده است. تیر آلومینیومی وارد این دو فک می‌شود و دقیقاً توسط بلبرینگ‌هایی که به آن متصل است، رفتار تکیه‌گاه مفصلی ساده را خواهد داشت. برای مدل‌سازی سیستم محرک دینامیکی، یک ارباه معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل ۱ در محیط آزمایشگاهی و در شکل ۲ به صورت فیزیکی نشان داده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد این ارباه شامل دو عدد چرخ از نوع تفلون است که به علت وزن، همواره در تماس با تیر حرکت می‌کند و احتمال جداشدگی از روی تیر را نخواهد داشت و دو عدد جرم m_1 و m_2 به وزن ۰.۵ کیلوگرم توسط دو فنر کششی به جرم دیگر به وزن ۲ کیلوگرم وصل شده است. این ارباه توسط یک موتور الکتریکی که مجهز به گیربکس نیز است، با سرعت ثابت یک‌متر بر ثانیه روی تیر کشیده می‌شود و باعث ارتعاش در تیر می‌شود. همچنین شکل ترک‌ها و محل قرارگیری آنها در شکل ۳ نشان داده شده است.



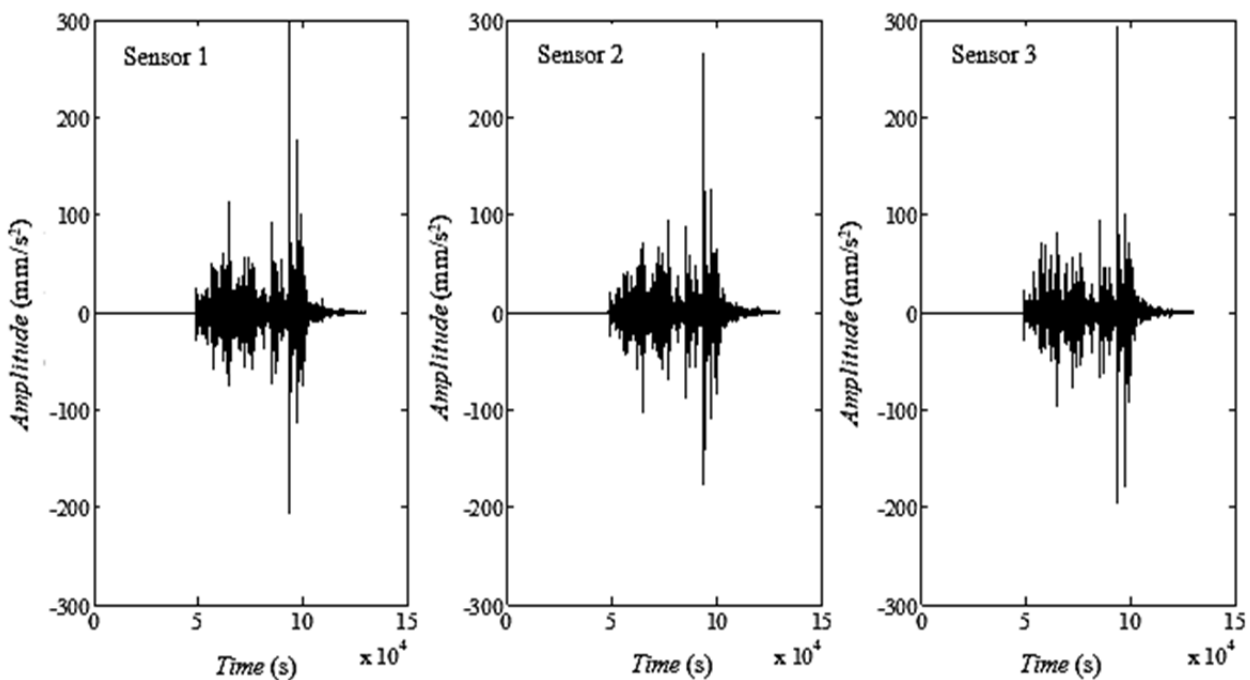
شکل ۱) تکیه‌گاه مفصلی متحرک

تکرارپذیری را دارد. در حالت دوم ترک در ۱/۲ از ابتدا با شدت‌های ۵۰ و ۸۰٪ قرار داده می‌شود و همان مراحل ذکر شده در حالت سالم دوباره تکرار می‌شود و نتایج ۱۰ بار آزمایش به‌طور جداگانه ذخیره می‌شود که نتایج دو آزمایش اول با شدت ۵۰٪ در نمودار ۳ نشان داده شده است. در حالت سوم ترک در قسمت ۱/۴ از ابتدا با شدت‌های ۵۰ و ۸۰٪ قرار داده می‌شود و دوباره ارابه به تعداد ۱۰ بار از روی تیر عبور داده می‌شود و نتایج به‌طور جداگانه ذخیره می‌شود. ولی به‌علت تکراری بودن عملیات از نشان دادن نمودارهای این حالت‌ها خودداری می‌شود.

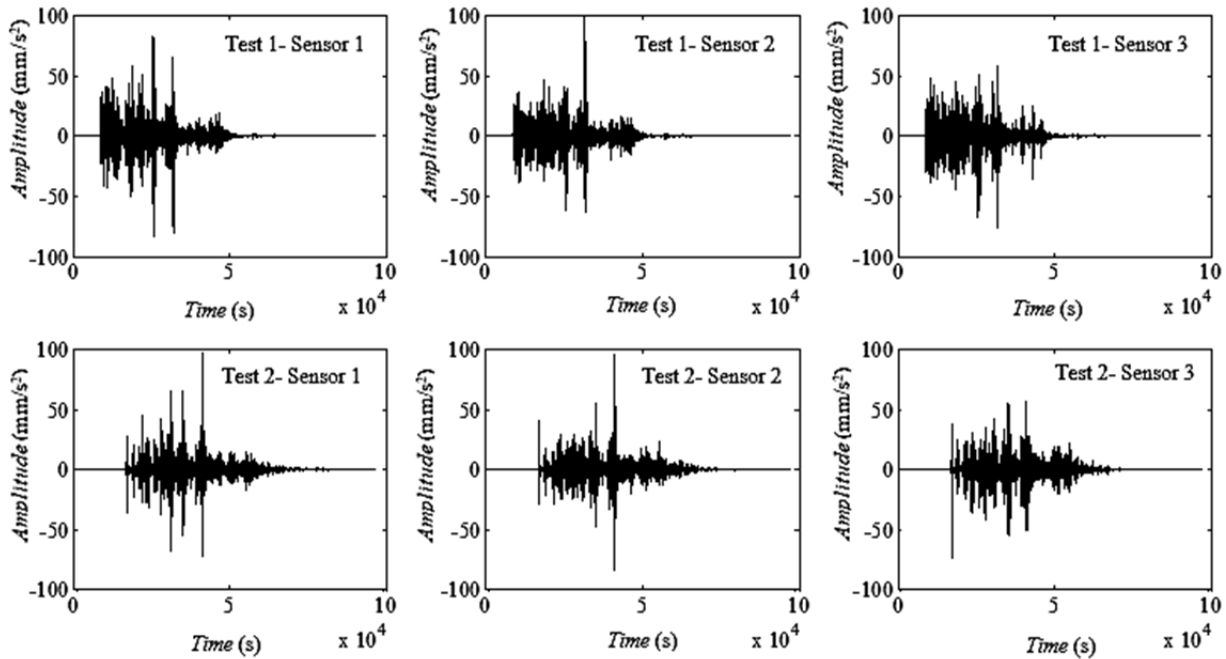
روی هر کدام از آنها تکرار می‌شود. در حالت اول، تیر سالم روی دو تکیه‌گاه مفصلی قرار می‌گیرد و ارابه به تعداد ۱۰ بار از روی تیر با سرعت ثابت یک‌متر بر ثانیه حرکت داده می‌شود و نتایج شتاب به‌دست‌آمده در هر آزمایش به‌طور جداگانه ذخیره می‌شود که نتایج ۲ بار عبور ارابه در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده می‌شود، با شروع حرکت ارابه، تیر نوسان می‌کند که این نوسانات با عبور کامل ارابه کاهش می‌یابد و به حالت سکون می‌رسد و با بررسی سیگنال‌های حاصل از ۱۰ بار آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که سیستم قابلیت



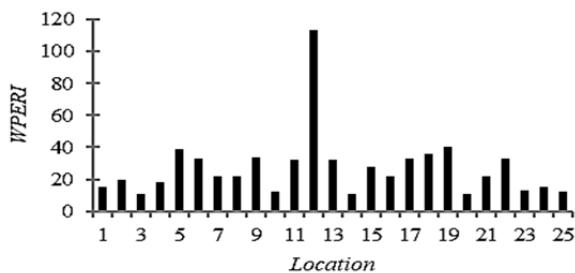
نمودار (۱) تاریخچه شتاب- زمان برای تیر سالم در آزمایش اول



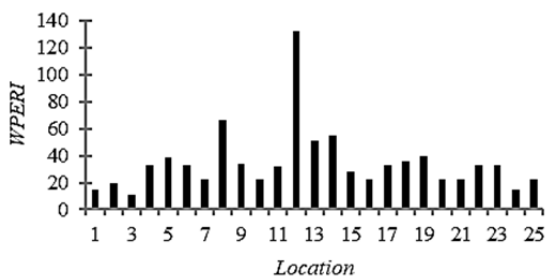
نمودار (۲) تاریخچه شتاب- زمان برای تیر سالم در آزمایش دوم



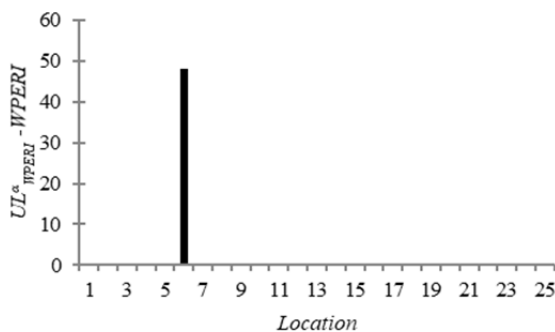
نمودار ۳) تاریخچه شتاب- زمان برای تیر معیوب در وسط و شدت ۵۰٪ در آزمایش اول و دوم



نمودار ۶) مقادیر شاخص نرخ انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای در ترک در ۱/۲ دهانه با عمق ۵۰٪

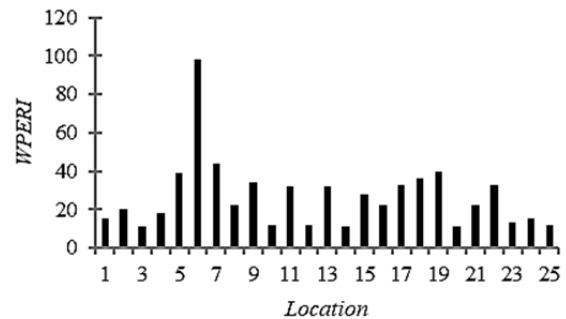


نمودار ۷) مقادیر شاخص نرخ انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای در ترک در ۱/۲ دهانه با عمق ۸۰٪

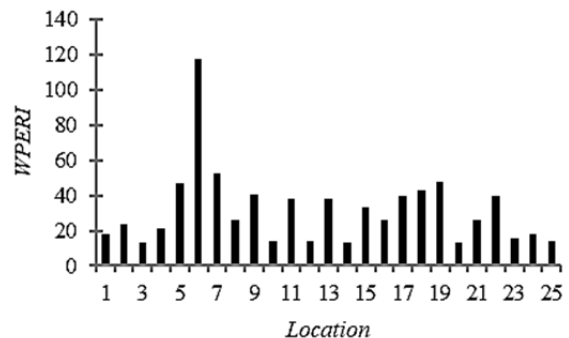


نمودار ۸) مقادیر استانه ترک در ۱/۴ دهانه با عمق ۵۰٪

آزمایشات انجام گرفته به علت افزایش دقت عملیات، ۱۰ بار تکرار می‌شوند. نتایج به دست آمده تاریخچه شتاب- زمان به شکل سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده از سازه در ابتدا به وسیله نرم افزار MATLAB به مولفه‌های موجک بسته‌ای تجزیه می‌شود و سپس شاخص نرخ انرژی موجک بسته‌ای به دست می‌آید که در نمودارهای ۷-۴ نشان داده شده است.



نمودار ۴) مقادیر شاخص نرخ انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای در ترک در ۱/۴ دهانه با عمق ۵۰٪



نمودار ۵) مقادیر شاخص نرخ انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای در ترک در ۱/۴ دهانه با عمق ۸۰٪

موجک بسته‌ای به‌عنوان یک ابزار ریاضی قوی برای شناسایی ناپیوستگی یا ناهماهنگی در تغییرات سختی سازه به کار می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی محاسبه شاخص انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای برای شناسایی ترک، بسیار مفید است. از نقطه‌نظر اجرایی، مراحل به‌صورت تجزیه سیگنال‌ها به ضرایب موجک بسته‌ای و محاسبه شاخص نرخ انرژی موجک بسته‌ای و تشخیص موقعیت ترک، قابل تفکیک است.

سیستم خرابی‌یاب، توانایی شناسایی مکان و شدت خرابی را در تمامی حالات مختلف دارد که این امر یکی از برتری‌های این تحقیق نسبت به کارهای گذشته است.

تشکر و قدردانی: از همه همکاران و اساتید که در نگارش و نتیجه‌گیری این مقاله همکاری داشته‌اند و نیز دانشگاه تبریز که بخشی از محاسبات این پژوهش آنجا انجام شد نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تاییدیه اخلاقی: از هر گونه چاپ این مقاله در مجلات دیگر ایرانی و خارجی ممانعت خواهد شد و در هیچ گونه مجله‌ای تا کنون به چاپ نرسیده ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

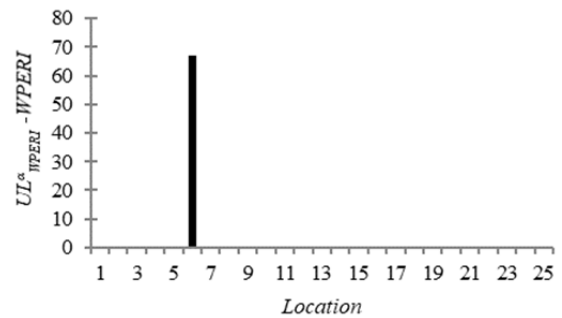
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مهدی کوهدرق (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ میرمحمد اتفاق (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ علیرضا مجتهدی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰٪)

منابع مالی: این پژوهش توسط دانشگاه آزاد ملکان حمایت مالی شده است.

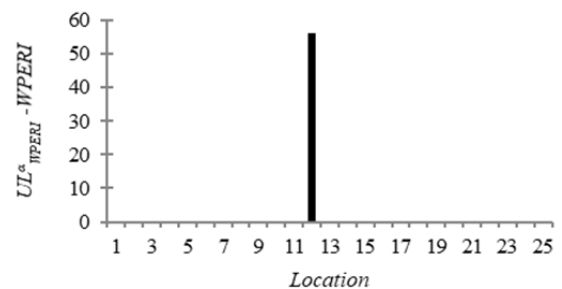
منابع

- Lotfollahi-Yaghin MA, Koohdaragh M. Examining the function of wavelet packet transform (WPT) and continues wavelet transform (CWT) in recognizing the crack specification. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2011;15(3):497-506.
- Koohdaragh M, Lotfollahi-Yaghin MA, Etefagh MM, Mojtehed A, Beyghbabaye B. Damage detection in beam-like structure based on wavelet packet. *Scientific Research and Essays*. 2011;6(7):1537-1545.
- Ge M, Lui EM. Structural damage identification using system dynamic properties. *Computers & structures*. 2005;83(27):2185-2196.
- Jiang LJ, Tang J, Wang KW. An enhanced frequency-shift-based damage identification method using tunable piezoelectric transducer circuitry. *Smart Materials and Structures*. 2006;15(3):799.
- Lu ZR, Liu JK, Huang M, Xu WH. Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses. *Journal of Sound and Vibration*. 2009;326(1-2):177-189.
- Ding L, Hao H, Zhu X. Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions. *Journal of Sound and Vibration*. 2009;323(3-5):826-848.

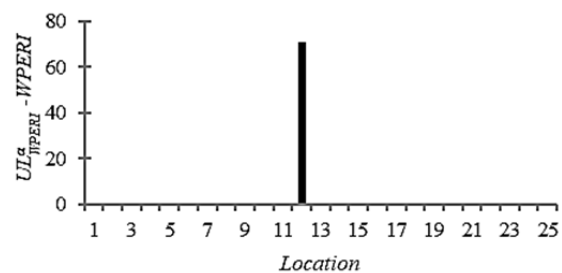


نمودار ۹) مقادیر استانه ترک در ۱/۴ دهانه با عمق ۸۰٪

همان‌طور که نمودارهای بالا نشان می‌دهند، در محل ترک شاخص پیشنهادی به‌صورت ماکزیمم مقدار است و در بقیه نقاط، این مقدار خیلی کمتر است. بنابراین به‌وسیله این روش می‌توان محل ترک را به‌خوبی شناسایی کرد. همچنین همین روش علاوه بر محل ترک به عمق ترک نیز حساس است، به‌طوری که این شاخص با افزایش عمق ترک، رو به افزایش است، ولی این افزایش با نسبت افزایش عمق ترک، رابطه خطی ندارد. در ادامه با استفاده از رابطه ۱۹، با فرض $\alpha = 0.02$ و حد اطمینان بالای ۹۸٪ مقادیر UL^{α}_{WPERI} به دست می‌آید که اختلاف مقادیر WPERI از UL^{α}_{WPERI} در نمودارهای ۱۱-۸ نشان داده شده است.



نمودار ۱۰) مقادیر استانه ترک در ۱/۲ دهانه با عمق ۵۰٪



نمودار ۱۱) مقادیر استانه ترک در ۱/۲ دهانه با عمق ۸۰٪

همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، آستانه ترک به‌صورت واضح در نمودارها مشخص است و در محل‌های غیر از ترک، این شاخص برابر صفر است. برای مثال در نمودار ۹، شاخص نرخ انرژی موجک بسته‌ای بین گره‌های ۲۰ و ۲۱ (المان C در نمونه ۳) که دقیقاً محل ترک بوده، ظاهر شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک سیستم جدید مکانیکی پرتابل هوشمند برای شناسایی خرابی در سازه‌های تیری شکل با استفاده از شاخص نرخ انرژی بر پایه تبدیل موجک بسته‌ای معرفی شده است. تبدیل

- 15- Asgarian B, Aghaeidoost V, Shokrgozar HR. Damage detection of jacket type offshore platforms using rate of signal energy using wavelet packet transform. *Marine Structures*. 2016;45:1-21.
- 16- Zhou J, Li Z, Chen J. Damage identification method based on continuous wavelet transform and mode shapes for composite laminates with cutouts. *Composite Structures*. 2018;191:12-23.
- 17- Liu K, Yan RJ, Soares CG. Damage identification in offshore jacket structures based on modal flexibility. *Ocean Engineering*. 2018;170:171-185.
- 18- Ovanesova AV, Suárez LE. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*. 2004;26(1):39-49.
- 19- Yen GG, Lin KC. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000;47(3):650-667.
- 20- Hua-Sing Ang A, Tang HW. *Probability concepts in engineering planning and design: Basic principles*. Hoboken: Wiley; 1975.
- 21- Han JG, Ren WX, Sun ZS. Wavelet packet based damage identification of beam structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2005;42(26):6610-6627.
- 7- Wyss JC, Su D, Fujino Y. Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge. *Engineering Structures*. 2011;33(4):1088-1097.
- 8- Wu SQ, Law SS. Vehicle axle load identification on bridge deck with irregular road surface profile. *Engineering Structures*. 2011;33(2):591-601.
- 9- Neves SGM, Azevedo AFM, Calçada R. A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction. *Engineering Structures*. 2012;34:414-420.
- 10- Wu SQ, Law SS. Evaluating the response statistics of an uncertain bridge-vehicle system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012;27:576-589.
- 11- Mallat SG. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989;11(7):674-693.
- 12- Coifman RR, Wickerhauser MV. Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1992;38(2):713-718.
- 13- Sun Z, Chang CC. Structural damage assessment based on wavelet packet transform. *Journal of Structural Engineering*. 2002;128(10):1354-1361.
- 14- Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia: SIAM; 1992.