مجله علمی – پژوهشی
«عـمـران مـدرس»
دوره دهم، شماره۳، پاییز ۱۳۸۹

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی عملکرد تبدیل موجک پیوسته در شناسایی مشخصات ترک

محمد علی لطف اللهی یقین[1*]، مهدی کوهدرق[2]

۱- دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملکان

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸٦، دریافت پذیرش: شهریور ۱۳۸۷)

چکیده– بسیاری از شکست‌های سازه‌ای به‌سبب گسیختگی مواد تشکیل دهنده رخ می‌دهند. آغاز این گسیختگی‌ها با ترک همراه بوده که با گسترش خود به عنوان تهدید جدی برای رفتار سازه محسوب می‌شود، بر این اساس روش‌های تشخیص و نمایان سازی ترک، موضوع تحقیقات گسترده‌ای است که تاکنون انجام شده و ادامه دارد. در این میان، روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک، از جمله روش‌های جدید و کارا در مباحث سیگنال است، و اهمیت بسیار بالایی دارد. بنابراین هدف از این تحقیق، یافتن روش‌هایی است که توانایی شناسایی مشخصات ترک را علاوه بر تئوری، در عمل نیز داشته باشند.

بدین منظور، در این مقاله، در حالت نخست سازه با استفاده از نرم افزار المان محدودANSYS تحت آنالیز مودال قرار داده شده و سپس با استفاده از نرم افزارMATLAB در جعبه ابزار موجک، تحت آنالیز موجک قرار داده می‌شود و نتایج به‌صورت نموداهای دو بعدی ضریب–موقعیت مشاهده می‌شود

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، آنالیز مودال، سیگنال

۱- مقدمه

سازه‌های موجود در معرض خطرات عمده‌ای مانند افت کارایی سازه و خرابی آن است. این مشکلات با خطرات طبیعی یا مصنوعی مانند زلزله و انفجار تشدید می‌شوند. آسیب‌های سازه‌ای سبب تغییرات نامطلوب در کارایی سازه می‌شوند. خرابی ها ممکن است مانند گسیختگی یک المان در اثر بارگذاری زلزله به‌طور ناگهانی رخ دهند، یا از نوع رشد آسیب و به‌صورت پیشرونده باشد مانند کاهش سختی و مقاومت در اثر رشد ترک. بنابراین به روش‌هایی برای شناسایی خرابی نیاز است. در این راستا روش‌های پایش سلامت سازه‌ها[1] که به اختصار SHM نامیده می‌شود، موضوع تحقیقات پردامنه‌ای است که

1. Structural Health Monitoring

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]

تاکنون انجام شده است. در سال‌های اخیر نیز برای توسعه‌ی سیستم‌های قابل اعتماد و بهینه‌ی SHM کوشش‌های فراوانی شده است. این سیستم‌ها باید جواب-گوی سؤالاتی مانند محل آسیب و خرابی سازه‌ها باشند. که در این‌صورت می‌توان به تمهیدات بعدی برای تعمیر و بهسازی سازه‌ها اندیشید. به‌طور کلی، SHM این‌طور تعریف می‌شود: «گرداوری، ارزشیابی و آنالیز اطلاعات تکنیکی برای تسهیل در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در طول عمر سازه».

در این میان، ترک‌ها از مهم‌ترین دلایل شکست‌های سازه-ای است که شناسایی و نمایان کردن آن‌ها در زمره‌ی متدهای SHM قرار می‌گیرد. در این مسیر تلاش‌های فراوانی انجام شده که می‌توان به تعدادی از این تجربیات اشاره کرد.

دیمارگوناس به عنوان ایده‌ی اولیه، ترک را به صورت نرمیت موضعی مدل کرد و سختی معادل را توسط آزمایشاتی به‌دست آورد [۱]. چاندراس این روش را برای مطالعه‌ی پاسخ دینامیکی تیر ترک خورده به‌کار برد [۲]. کاولی و آدامز روش تجربی را برای محاسبه‌ی موقعیت و عمق ترک، از تغییرات در فرکانس‌های طبیعی ارائه دادند [۳]. چاندراس و دیمارگوناس روشی را برای شناسایی ترک در اتصالات جوش شده پیشنهاد دادند [٤]. پتروسکی تکنیکی را برای مدل کردن ترک با استفاده از مدول مقطع ارائه داد [٥]. گودمانسون از روش اختلال (آشفتگی) برای پیش‌بینی تغییرات در فرکانس‌های طبیعی سازه‌ی منتج از ترک‌ها استفاده کرد [٦]. دیمارگوناس و پاپیتس ترک را به صورت نرمیت موضعی مدل کردند و سختی معادل آن‌را با استفاده از روش سازوکار گسیختگی به دست آوردند [۷]. ریزاس روشی را پیشنهاد داد که برای استفاده از دامنه‌ی اندازه‌گیری شده در دو نقطه از تیر طره که در یکی از مودهای طبیعی‌اش می‌لرزد به‌کار گرفته شود [۸]. لیانگ و همکارانش مسئله‌ی مشابهی را مطالعه کردند و نشان دادند که معادله‌ی مشخص می‌تواند برای محاسبه‌ی مقدار سختی برای یک فرکانس طبیعی و موقعیت ترک، حل شود [۹].

۲- زمینه‌ی تئوری تبدیل موجک پیوسته[1]

تبدیل موجک wavelet Transform WT یک روش مفید و جدید برای تحلیل سیگنال‌هاست. توابع موجک ترکیبی از یک سری توابع اساس است که قادر به تفکیک یک سیگنال در زمان (یا مکان) و فرکانس (یا مقیاس) است. بنابراین تبدیل‌های موجک قادرند بسیاری از جنبه-های ناشناخته‌ی اطلاعات را که دیگر روش-های تحلیل سیگنال نمی‌توانستند آشکار کنند، کشف کند. این مشخصات به‌ویژه برای کاربردهای کشف ترک مفید است. علی‌رغم این‌که یکی از معایب تبدیل موجک، تفکیک فرکانسی ضعیف، در نواحی با فرکانس بالا می باشد بسیاری از محققین (وانگ، دنگ، کورلی) از تبدیلات موجک برای کشف ترک در قاب‌های سازه‌ای استفاده کردند. [۱۰ تا ۱۳].

با توجه به قابلیت بالای تبدیل موجک در تحلیل سیگنال پاسخ ارتعاشی یا استاتیکی یک سازه که شناسایی هرگونه ناپیوستگی یا ناهماهنگی - مانند کاهش ناگهانی سختی و مقاومت- را میسر می‌سازد، و از روی گراف ضرایب موجک (Wavelet Coefficients) به صورت یک یا چند نقطه‌ی نزدیک به هم دارای اغتشاش یا مقادیر ناهماهنگ با نقاط دیگر قابل تشخیص است. تبدیل موجک یک سیگنال به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۷]:

1.Continues Wavelet Transform

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]

$$W_x(b,a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).\psi^*(\frac{t-b}{a})dt \qquad (۱)$$

بنابراین تبدیل موجک با ضـرب داخلـی $x(t)$ و نـسخه‌ی انتقال یافته و مقیاس شده‌ی تابع تکـی $\psi(t)$ کـه موجـک نامیده می‌شود، به‌دست می‌آید (ψ^* مزدوج مخـتلط تـابع موجک است).

هنگامی که از یک تبدیل اسـتفاده مـی شـود تـا از منظـر بهتری به خواص سیگنال نگریسته شود، بایـستی مطمـئن بود که سیگنال کاملاً مـی‌توانـد از شـکل بازنمـایی یافتـه بازسازی شود. از طرف دیگر بازنمایی می‌توانـد کـاملاً یـا نسبتاً بی‌معنی باشد. برای تبدیل موجک، شـرط بازسـازی کامل عبارت است از:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \qquad (۲)$$

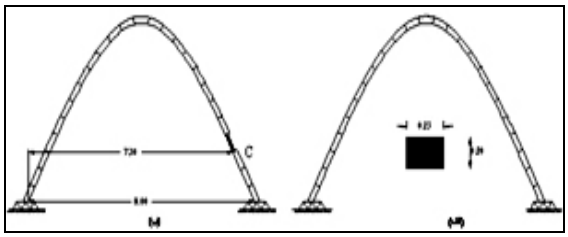
که $\Psi(\omega)$، تبدیل فوریه موجـک اسـت. ایـن شـرط بـه عنوان شرط پـذیرفتگی (Admissibility) بـرای موجـک شناخته می‌شود. برای این‌که موجک شـرط بـالا را داشـته باشد بایستی:

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \qquad (۳)$$

به این معنی که موجک تابع نوسانی است با مقدار متوسط صفر؛ به‌عـلاوه، $\Psi(\omega)$ بایـد بـا $|\omega| \to \infty$ و $|\omega| \to 0$ سریعاً کـاهش یابـد. پـس $\psi(t)$ بایـستی پاسـخ ضـربه‌ی میانگذر باشد. از آن‌جایی‌که یـک پاسـخ ضـربه، میانگـذر شبیه به یک موج کوچک است، این تبدیل با عنوان تبدیل موجک شناخته می‌شود.

۳- مدل کردن سازه‌ی قوس‌دار

برای مدل کردن سـازه قـوس دار، یـک تیـر قـوس‌دار بـه دهانه‌ی ۸ متر و ارتفاع ۵ متر با تکیه گاه‌های مفـصلی کـه در شکل ۱ نشان داده شده به‌کار می‌رود. چگالی و مـدول الاستیسیته‌ی سازه به ترتیب برابـر ۷۸۵۰ kg/m^3 و 2.11×10^{11} pa است. مساحت و ممان اینرسی بخـش عرضـی المان برابر ۰/۰۵ m^2 و 1.66×10^{-4} m^4 است.



(الف) : نمونه‌ی سالم (ب) : نمونه‌ی ترک خورده

شکل ۱ مشخصات سازه‌ی مدل شده

٤- آنالیز مودال و پروسه‌ی شناسایی تـرک با استفاده از موجک پیوسته

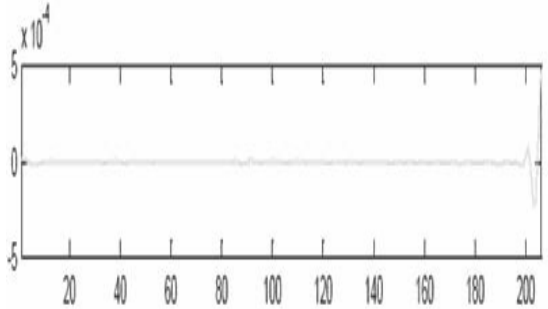
برای این منظور یک نمونه‌ی سالم و چهار نمونه‌ی تـرک-دار و با مشخصات فیزیکی یـاد شـده در جـدول ۱ نـشان داده شده است. موقعیـت تـرک فاصـله‌ی هفـت متـری از تکیه‌گاه چپ سازه است. این نمونه‌هـا در بانـد فرکانـسی ۱۰۰-۰ تحـت آنـالیز مـودال قـرار مـی‌گیرنـد. اولـین تـا چهارمین فرکانس طبیعی برای هر پنج نمونه در جـدول ۲ آمده است.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]

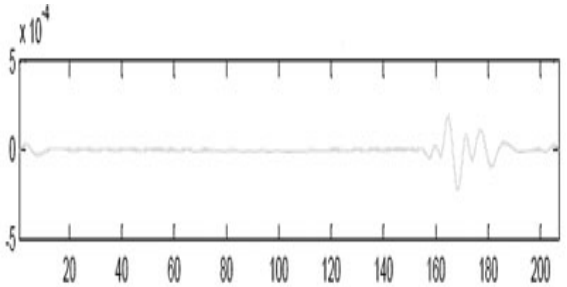
جدول۱ مشخصات محل و عمق ترک در نمونه های مدل شده

نمونه	موقعیت ترک	شماره‌ی المانها	عمق ترک
۱	سالم	-	-
۲	C	(۲۱ ،۲۰)	٪۱۰
۳	C	(۲۱ ،۲۰)	٪۲۵
٤	C	(۲۱ ،۲۰)	٪۳۵
٥	C	(۲۱ ،۲۰)	٪۵۰

همان‌طور که جدول زیر نشان می‌دهد، با افـزایش عمـق تـرک، مقادیر فرکانس‌ها کاهش می‌یابد که این کـاهش فرکـانس‌هـا، از مود سوم به بعد بسیار محسوس است که این تغییرات به‌صورت یک ناهماهنگی مشخص است. نتـایج بـه‌دسـت آمـده از آنـالیز مودال بـرای تغییـر مکـان نمونـه‌هـا در ۲۰۷ نقطـه از سـازه در شکل‌های ۳ تا ۱۲ (شماره‌هـای زوج) نـشان داده شـده اسـت؛



شکل۳ نمودارمکان –ضریب، نمونه‌ی ۱ (سالم) برای پاسخ تیر در مود اول

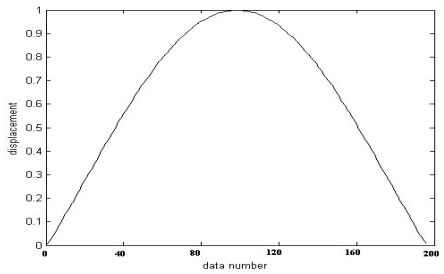


شکل۵ نمودارمکان – ضریب، نمونه ی ۲ برای پاسخ تیر در مود اول

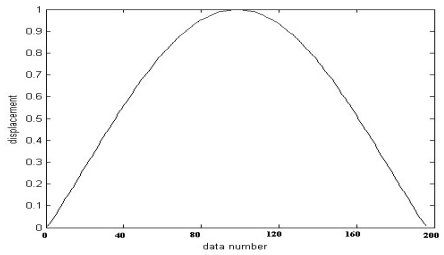
سپس برای شناسایی ترک، نتایج به‌دست آمـده را بـا اسـتفاده از آنالیز موجک پیوسته تحلیل می‌کنیم. نتایج برای نمونه‌ها در مـود اول در شکل‌های۳ تا ۱۲ (شماره‌های فرد) نشان داده شده است.

جدول ۲ نتایج چهار فرکانس طبیعی اول نمونه‌ها

نمونه	فرکانس مود اول	فرکانس مود دوم	فرکانس مود سوم	فرکانس مود چهارم
۱	۱۰/٤۱۳	۲٤/٥۸۸	٤۲/۲۷۹	٦۳/۳۰۹
۲	۱۰/٤۱۱	۲٤/٤۷۷	٤۱/۹۳۲	٦۲/۸٥٥
۳	۹/٦۳۰	۲٤/٥۳۱	۳۹/٦٤٤	٥۹/٦٤٤
٤	۹/٤۲۰	۲٤/۲٥۱	۳۸/٥٦۲	٥۸/٦۳٥
٥	۸/۹۲٥	۲٤/۱۲۰	۳۷/۸٥٦	٥٦/٦۳٥

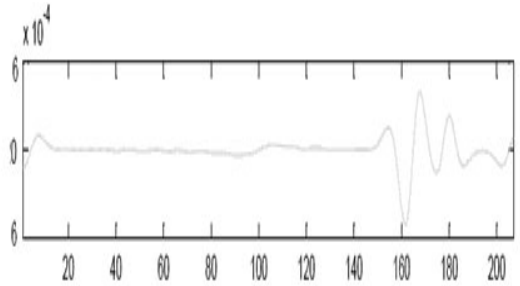


شکل٤ تغییر مکان، نمونه‌ی ۱ (سالم) در مود اول

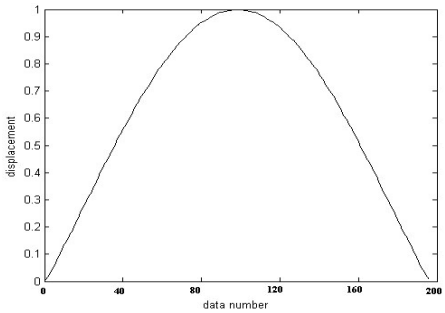


شکل ٦ تغییر مکان، نمونه‌ی۲ در مود اول

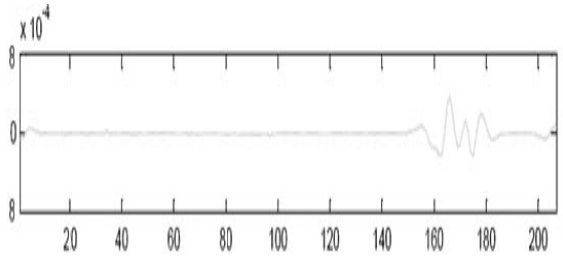
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]



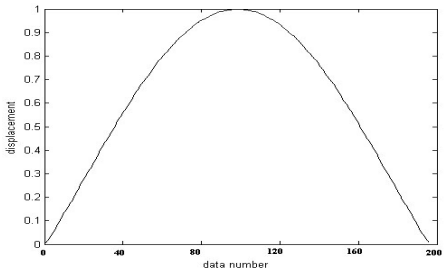
شکل۷ نمودارمکان – ضریب، نمونه‌ی ۲ برای پاسخ تیر در مود اول



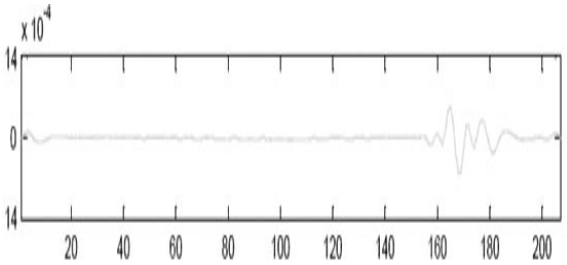
شکل ۸ تغییر مکان، نمونه‌ی۲ در مود اول



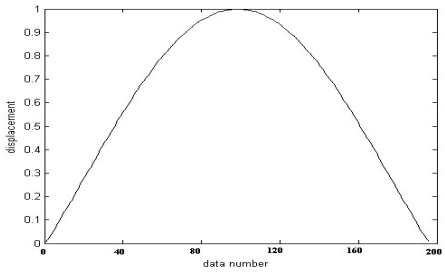
شکل۹ نمودارمکان – ضریب، نمونه‌ی ۲ برای پاسخ تیر در مود اول



شکل ۱۰ تغییر مکان، نمونه‌ی ۲ در مود اول



شکل۱۱ نمودارمکان – ضریب، نمونه‌ی ۲ برای پاسخ تیر در مود اول



شکل ۱۲ تغییر مکان، نمونه۲ی در مود اول

همان‌طور که شـکل ۳ نـشان مـی‌دهـد، در طـول تیـر هـیچ اغتشاش یا ناهماهنگی دیده نمی‌شود و این گواه این مطلـب است که سازه در طول خود دارای ترک یا خرابی نیست ولی در محل تکیه‌گاه‌ها دارای یک اغتشاش است که این اغتشاش از جمله معایـب تبـدیل موجـک بـه‌شـمار مـی‌رود. وجـود اغتشاش تکیه‌گاهی عمل شناسایی تـرک را در نقـاط انتهـایی دچار مشکل می‌سازد و نمی‌تـوان تـرک‌هـای چـسبیده و یـا نزدیک تکیه‌گاه را شناسایی کرد. همواره در محل تکیه‌گـاه‌هـا اغتشاش وجود دارد و هم‌چنین همان‌طور که شـکلهای ۵ تـا ۱۲ (شماره‌های فرد) نشان می‌دهند، اغتـشاش و ناهمـاهنگی مابین نقاط ۱۶۰ تا ۱۸۰ دیده می‌شود که دقیقاً محل تـرک در سازه‌ی معیوب است. با این روش می‌توان محل ترک را بـه-

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]

طور واضح شناسایی کرد و هم‌چنین طول اغتشاشات با طول ترک در سازه مطابقت دارد و اغتشاشات تکیه‌گاهی هم‌چنان در نمودارها مشهود است.

۵- نتیجه گیری

تبدیل موجک معمولی قابلیت بالایی در تحلیل سیگنال پاسخ ارتعاشی یا استاتیکی دارد. این قابلیت در شناسایی انواع ناپیوستگی یا ناهماهنگی، مانند کاهش ناگهانی سختی، نمایان است و از روی گراف ضرایب موجک پیوسته به‌صورت یک یا چند نقطه نزدیک به هم دارای اغتشاش یا مقادیر ناهماهنگ با نقاط دیگر قابل تشخیص است. بر این اساس روش موجک از جمله روش‌های بسیار کارا در زمره کشف آسیب به‌شمار می‌آید.

علیرغم این‌که در روش مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته، امکان شناسایی ترک وجود دارد، به‌دست آوردن نتایج آنالیز مودال در عمل تقریباً غیر ممکن است. هم‌چنین برداشت ۲۰۷ داده از روی سازه مشکل و بسیار پر هزینه است.

تأثیر نقاط انتهایی، از جمله مشکلات تبدیل موجک پیوسته است که در آنالیز موجک، با بالا رفتن مقیاس، تأثیر این نقاط بیش‌تر می‌شود.

در حالت کلی، به دلیل تداخل اثر ترک با اثر نقطه‌ی انتهایی، شناسایی ترک چسبیده به تکیه‌گاه در تبدیل موجک پیوسته، به سادگی امکان‌پذیر نیست.

٦- مراجع

[1] Dimarogonas A.D., Vibration Engineering, West Publishes, St. Paul, MN.1976.

[2] Chondros T., Dynamic Response of Cracked Beams, M Sc. Thesis, university of patras, Greece.1977.

[3] Cawely p., Adams R.D., Defect location in Structures by a Vibration Technique, American society of Mechanical Engineering Technical Conference, 1979,p.p. 79-46, St. Louis.

[4] Daubechies I., Ten lectures on Wavelets, CBMS-NSF Conference Seriess 61, Philadelphia, PA: SIAM. 1992.

[5] Petroski H.J., , simple static and dynamic models for the cracked elastic beam, International Journal of Fracture 17, 1981. P.P. 71-76.

[6] Gudmaunson P., , Engine frequency changes of Structures Due to cracks, notches or other geometrical changes. Journal of Mechanics and Physics of Solids 30.1982, P.P. 339-353.

[7] Dimarogonas A.D., Paipets S,A., Analytical Methods in Rotor Dynamic Elsevier Applied Science, London. 1986.

[8] Liang R.Y., Choy F.K., Hu J., detection of cracks in beam structures using measurement of natural frequencies, Journal of the Franklin Institue 328, 1981. P.P. 505-518.

[9] Rizos P., Aspragathos N., Dimaroginas A.D., , Identification of crack location and magnitude in Cantilever beam from the vibration modes. Journal of Sound and Vibration 138, 1990. P.P.381-388.

[10] Hou, Z., Noori, M., St. Amand, R., Wavelet-based approach for structural damage detection. Journal of Structural Engineering, ASCE 12 (7), 2000. 677–683.

[11] Kitada, Y., Identification of nonlinear structural dynamic systems using wavelets. Journal of Engineering Mechanics, ASCE 124 (10), 1998. 1059–1066.

[12] Wang, Q., Deng, X., Damage detection with spatial wavelets. International Journal of Solids and Structures 36 (23), 1999. 3443–3468

[13] Gurley, K., Kareem, A., Application of wavelet transform in earthquake, wind and ocean engineering. Engineering Structures 21, 1999. 149–167.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-28]