

شناسایی و تعیین موقعیت آسیب در صفحات فولادی با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال و آنالیز موجک دو بعدی

امید رضایی فر^{۱*}، مجید قلهکی^۲، محتشم خان احمدی^۳، عادل یونسی^۴، بهزاد دژکام^۵

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

۴- دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۵- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

*orezayfar@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

چکیده

با گذشت زمان، سازه‌ها تحت اثر عوامل مخرب طبیعی و غیر طبیعی متعددی چون زلزله، گودبرداری‌های غیراصولی، ارتعاشات دینامیکی حاصل از انفجار و غیره قرار می‌گیرند. همچنین، عواملی چون انتظار سرویس‌دهی بیش از ظرفیت طراحی المان‌های سازه و عدم بر آورده نمودن انتظارات به روز شده آیین‌نامه‌ای، باعث افت کارایی سازه می‌شود. از طرفی گسترش آسیب‌های موضعی در سازه‌ها تحت اثر عوامل نامطلوب می‌تواند سلامتی کلی سازه را با مشکل مواجه نماید. بنابراین، اطلاع از وضعیت سلامتی سازه‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت بوده و پایش و کنترل سلامتی در سازه‌ها یکی از مهمترین و مورد توجه‌ترین زمینه‌های پژوهشی بسیاری از پژوهشگران است. صفحات از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند که آسیب در آن‌ها می‌تواند به صورت پیش‌رونده به سایر المان‌ها منتقل شده و منجر به آسیب کلی سازه شود و در نتیجه، هزینه‌های اجتماعی جبران ناپذیر و اقتصادی فراوانی را تحمیل نماید. در این مقاله، با توجه به گسترش روز افزون استفاده از صفحات فولادی در سازه‌های ساختمانی به عنوان دیوارهای برشی فولادی، موضوع شناسایی و تعیین موقعیت آسیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل پایش سلامتی در سازه‌ها با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود ارتعاشی) و یک روش تشخیصی مبتنی بر تحلیل موجک گسسته دو بعدی مورد توجه واقع شد. به این منظور، صفحه فولادی مدل‌سازی شده در نرم افزار تحلیل اجزا محدودی ABAQUS تحت تحلیل فرکانسی واقع شد و داده‌های مودال حالت‌های آسیب و بدون آسیب استخراج شد. نتایج، اختلاف بین فرکانس‌ها و عدم هماهنگی کامل شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی را بر اساس معیار انطباق مودال (MAC) و زاویه بین بردارهای اولیه و ثانویه شکل مود نشان داد. با معرفی یک شاخص مکان‌یاب آسیب (DLI) بر مبنای ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری تحلیل موجک دو بعدی شکل‌های اولیه و ثانویه مود ارتعاشی مورد نظر، مکان‌های آسیب با ایجاد پرش نسبی حداکثری در نمودار DLI در دو راستای طول و عرض صفحه با دقت بالایی شناسایی شد. واژگان کلیدی: پایش سلامتی سازه، داده‌های مودال، معیار اطمینان مودال، تحلیل موجک، شناسایی آسیب.

۱- مقدمه

های غیراصولی و زلزله تشدید یافته و منجر به تخریب کلی سازه شود. اطلاع از وضعیت سلامت سازه‌ها و اعضای سازه‌ای در گرایش‌های مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا

با گذشت زمان سازه‌ها و اعضای سازه‌ای ممکن است دچار آسیب‌های موضعی شده و در اثر عواملی چون گودبرداری

مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. بی‌شک وضعیت سلامت سازه‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است و در صورت تشخیص وجود آسیب، محل و شدت آن می‌توان با ترمیم محل آسیب و یا تعویض اعضای آسیب دیده از وقوع خسارت‌های جانی و مالی تا حد امکان جلوگیری نمود. ابداع و توسعه انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله بین مفاهیم و کاربردهای عملی را کاهش داده و این امکان را فراهم نموده است تا با استفاده از روش‌های پیش سلامت قابل اعتماد بتوان رفتار سازه‌ها را در مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل نمود.

داده‌های دینامیکی (شتاب و جابه‌جایی) و مشخصات مودال (فرکانس‌ها، شکل‌های مود و میرایی مودال) به مشخصات فیزیکی سازه (جرم، سختی و میرایی) وابسته است. وجود آسیب منجر به تغییر در مشخصات دینامیکی و در نتیجه، مشخصات مودال می‌شود [1, 2]. بر این اساس، روش‌های تشخیص خسارت در سازه‌ها شامل تغییر در فرکانس‌ها [3,4]، شکل‌های مود [5, 6]، انحنای شکل مود [7-9] و توابع پاسخ فرکانسی¹ (FRFs) [10, 11] می‌شود. به عنوان نمونه، می‌توان به کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی [12, 13]، الگوریتم ژنتیک [14, 15] و منطق فازی [16, 17] در زمینه تشخیص خسارت اشاره نمود. از دیگر روش‌های شناسایی آسیب، تبدیل موجک² (WT) است که یک ابزار ریاضی توانمند پردازش سیگنال‌ها است [18, 19]. با استفاده از تبدیل موجک اطلاعات بیشتری از سیگنال تحلیل شده بر اساس توانایی آن در محلی سازی سیگنال‌ها در دو حوزه زمان و فرکانس حاصل می‌شود [20].

کاتونین³ [21] با استفاده از تحلیل موجک و داده‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های متعدد پرداخت. نتایج نشان داد که برای شناسایی محل ترک، حذف نوفه از ضرایب جزئیات موجک لازم است. قدرتی امیری و همکاران⁴ [22] با به‌کارگیری تبدیل

موجک و شکل‌های مود صفحات سالم و آسیب‌دیده به شناسایی محل آسیب پرداختند. آن‌ها از نسبت ضرایب موجک صفحات آسیب‌دیده به ضرایب موجک صفحات سالم استفاده نمودند. ژانگ و ایادیچی⁵ [23] با استفاده از تبدیل موجک ایستا⁶ (SWT) و داده‌های مودال به آشکارسازی ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند. آن‌ها نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای

داده‌های شکل مود می‌توان محل آسیب را شناسایی نمود. باقری و کورهلی⁷ [24] به شناسایی خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله با استفاده از تبدیل موجک پرداختند. آن‌ها در این بررسی از پاسخ‌های سرعت و تغییر مکان سازه‌های مورد نظر استفاده نمودند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک نشان دهنده زمان وقوع خرابی بود.

ژو و همکاران⁸ [25] با به‌کارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی⁹ و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر¹⁰ به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند. لی و همکاران¹¹ [26] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته¹² به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی سازی آسیب در سازه‌های پل خرابی را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب مورد استفاده واقع شود. لی و هو¹³ [27] به شناسایی آسیب زیر ساختاری با در نظر گرفتن آسیب به صورت کاهش سختی در سازه قاب صفحه‌ای ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه موجک پرداختند. آن‌ها موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمایند. کاتونین [28] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکانکس¹⁴ تحت اثر انرژی‌های

5. Zhong & Oyajdi

6. Stationary Wavelet Transform (SWT)

7. Bagheri & Kourheli

8. Xu et al

9. Two-dimensional directional Gaussian wavelets

10. Laser scanned operating deflection shapes

11. Lee et al

12. Continuous relative wavelet entropy method

13. Li & Hao

14. Quincunx

1. Frequency Response Functions (FRFs)

2. Wavelet Transform (WT)

3. Katunin

4. Ghodrati-Amiri et al

مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای آسیب‌دیده صفحات کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها سازوکار دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل و همکاران^۱ [29] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی یک ساختمان بتنی پرداختند. آن‌ها با تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده تراز هر طبقه برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در ویژگی‌های ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. رحامی و همکاران [30] با استفاده از مفاهیم آتروپی انرژی در تبدیل بسته‌ای موجک به تشخیص خرابی در سکوه‌های ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت حتی در آسیب‌های با شدت کم به طور محسوسی به شدت خسارت‌های وارد شده به سکو وابسته است. عباس‌نیا و همکاران^۲ [31] در پژوهشی با استفاده از روش دو مرحله‌ای تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرها پرداختند. آن‌ها با استفاده از تبدیل موجک محل‌های آسیب را شناسایی نمودند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده آسیب کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌های آسیب شدند. میرزایی و همکاران^۳ [32] با روشی مشابه، به شناسایی آسیب در سازه خرپایی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند و به این طریق المان‌های آسیب دیده شناسایی و مقدار آسیب در هر یک از المان‌ها محاسبه شد. آشوری و همکاران^۴ [33] با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و مدل المان محدود به‌روزرسانی شده به تشخیص آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با استفاده از تبدیل موجک، محل خرابی و سپس با بهینه نمودن یک تابع خطای ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک موفق به

شناسایی پارامترهای آسیب شدند. یانگ و ایادیجی^۵ [34] روشی برای شناسایی خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه با استفاده از سطح فرکانس مودال ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضرایب موجک سطح فرکانس مودال می‌توان محل و شکل خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه را مشخص نمود. رضایی فر و همکاران [35, 36] به شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق، آسیب جداشدگی را توسط یک لایه پلی استایرن نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه‌سازی نمودند و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته موفق به شناسایی محل جداشدگی بین هسته بتنی و جداره فولادی شدند. حسینی واعظ و عارف زاده [37] با استفاده از تبدیل موجک به مقایسه داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند و موفق به شناسایی محل‌های آسیب شدند. مشاهده شد که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از داده‌های استاتیکی، عواملی مانند نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری بر ضرایب موجک تأثیرگذار است. خان احمدی و همکاران [38] با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود صفحه فولادی به مقایسه ضرایب موجک حالت‌های سالم و معیوب پرداختند. نتایج نشان داد که اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب چشم‌گیر است و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان محل‌های آسیب را شناسایی نمود. همچنین، آن‌ها نشان دادند که از تحلیل موجک شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل موجک شکل‌های مودهای بالاتر، موقعیت‌های آسیب با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب موجک شناسایی می‌شود. آن‌ها در تحقیق دیگری با استفاده از تبدیل موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته پانلی شدند

1. Patel et al
2. Abasnia et al
3. Mirzaei et al
4. Ashory et al

5. Yang & Oyadiji

در یک تقسیم‌بندی کلی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته^۱ (CWT) و تبدیل موجک گسسته^۲ (DWT) به صورت ذیل تعریف می‌شود.

۲-۱- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته سیگنال $f(t)$ در بازه $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) تعریف می‌شود [44, 45]:

$$CWT_{s,\tau}^{f(t),\psi(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن s و τ به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر انتقال بوده و ψ تابع موجک است. مقیاس‌های بالا ($s > 1$) متناظر با جزئیات^۳ و مقیاس‌های پایین ($s < 1$) متناظر با تقریبات^۴ سیگنال می‌باشد. تابع موجک در تحلیل موجک با پارامتر مقیاس و انتقال تعریف شده است. این ویژگی منجر به ارائه تحلیل چندگانه سیگنال‌های غیر ایستا می‌شود، به این صورت که با انتخاب مقیاس‌های کوچک و بزرگ به ترتیب بازه‌های کوچک و بزرگی روی سیگنال توسط تبدیل موجک برای انجام تحلیل موجک انتخاب می‌شود.

تابع موجک باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

۱- انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [46 & 47]؛ به عبارتی:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

۲- انرژی آن محدود باشد [46 & 47]؛ به عبارتی:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (4)$$

۳- باید در رابطه (۵) صدق نماید [46-49]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(t)|^2}{\omega} dt < +\infty \quad (5)$$

که در آن Ψ تبدیل فوریه ψ و ω بیانگر بسامد است. رابطه (۳) پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه (۴) به این معنی است که بیشترین انرژی در تابع موجک برای یک بازه زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود [49].

[39]. همچنین، این پژوهشگران در تحقیقی با مطالعه مقایسه‌ای آشکارسازی آسیب در تیرهای فولادی با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته نشان دادند که با هر دو نوع تبدیلات موجک می‌توان از تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی، موقعیت‌های آسیب را با دقت بالایی شناسایی نمود [40]. همچنین آن‌ها در تحقیق دیگری [41] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته و تعریف یک سیگنال ورودی به شناسایی آسیب در المان ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. نتایج، مقادیر اوج سیگنال‌های خروجی را با صرف نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، در محل‌های آسیب نشان داد. رضایی فر و همکاران [42, 43] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب موجک تولید شده شناسایی شد.

صفحات از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند که آسیب در آن‌ها می‌تواند به صورت پیشرونده به سایر المان‌ها منتقل شده و سلامت کلی سازه را دچار مشکل نماید. در این مقاله، به شناسایی و تعیین موقعیت آسیب در صفحه فولادی جدار نازک با استفاده از اطلاعات دینامیکی مودال و روش پیشنهادی مبتنی بر تحلیل موجک دو بعدی پرداخته شده است. در روش پیشنهادی یک شاخص جدید مکان‌یاب آسیب بر مبنای ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری تحلیل موجک سیگنال‌های اولیه و ثانویه شکل مود تعریف شده و توانمندی آن در موقعیت‌یابی آسیب‌ها تحقیق شده است.

۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک یا ویولت تبدیلی است که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه زمانی کوتاه استخراج نموده و نشان می‌دهد که با گذشت زمان به چه شکل تغییر می‌کند. این تبدیل مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن فرکانسی تغییر می‌کند و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آید [44].

1. Continuous Wavelet Transform (CWT)
2. Discrete Wavelet Transform (DWT)
3. Details
4. Approximations

۲-۲- تبدیل موجک گسسته

به دلیل تغییر پیوسته پارامترهای مقیاس و انتقال، انجام CWT روی یک سیگنال منجر به تولید اطلاعات اضافی می‌شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازه حافظه افزایش می‌یابد؛ بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف تا حد ممکن مورد نظر بود. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته‌سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و وابسته نمودن مقدار پارامتر انتقال به آن است [45].

$$\begin{cases} s = s_0^j, & s_0 < 1, j \in \mathbb{Z} \\ \tau = k\tau_0 s_0^j, & \tau_0 \neq 0, k \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (2)$$

با فرض $s_0 = 2$ و $\tau_0 = 1$ ، تبدیل موجک گسسته سیگنال $f(t)$ با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید [44, 45].

$$DWT_{s,\tau}^{f(t),\psi(t)} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t - k2^j}{2^j} \right) dt \quad (3)$$

اگر مجموعه‌ای از ضرایب موجک $\langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$ وجود داشته باشد که اطلاعات کامل سیگنال $f(t)$ را توصیف نماید، باید رابطه (۴) برقرار باشد:

$$A \|f(t)\|^2 \leq \sum_{j,k} |f(t), \psi_{j,k}(t)|^2 \leq B \|f(t)\|^2 \quad (4)$$

$A, B \in \mathbb{R}^+$

در چنین حالتی، سیگنال $f(t)$ را می‌توان از طریق معکوس تبدیل موجک گسسته بازسازی نمود.

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT_{s,\tau}^{f(t),\psi(t)} \psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

در تحلیل چند کیفیتی، یک سیگنال مشخص می‌تواند در دو قسمت جزئیات و تقریبات تجزیه شود. برای به دست آوردن سطح بعدی جزئیات و تقریبات می‌توان اطلاعات تقریبی را بیشتر تجزیه نمود. فرآیند تجزیه می‌تواند تا رسیدن به مقیاس طراحی شده z تکرار شود و این چگونگی پیاده‌سازی یک DWT است. معادله‌های (۶) و (۷) جزئیات و تقریبات را در مقیاس z ارائه می‌دهند [44, 45].

$$\begin{aligned} f_a^j(t) &= \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f_d^j(t) &= \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن ضرایب $a_{j,k}$ و $d_{j,k}$ (به ترتیب) در ارتباط با تقریب‌ها و جزئیات هستند. در نتیجه، یک سیگنال $f(t)$ را می‌توان با استفاده از رابطه (۸) به مجموعه‌ای از زیر فضا تجزیه نمود.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (8)$$

که در آن z یک پارامتر مقیاس از پیش تعیین شده است. در معادلات فوق، $\phi(t)$ تابع مقیاس است و $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j/2}t - k)$ شده مقیاس شده است [44].

به طور مشابه، یک سیگنال دو بعدی $f(x, y)$ را می‌توان با استفاده از معادله (۹) به مجموعه‌ای از زیر فضا به صورت زیر تجزیه نمود [50].

$$f(x, y) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} a_{j_0, k_1, k_2} \Phi_{j_0, k_1, k_2}(x, y) \quad (9)$$

$$+ \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{i=1}^3 \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} d_{j, k_1, k_2}^{(i)} \Psi_{j, k_1, k_2}^{(i)}(x, y)$$

در معادله (۹) ضرایب a_{j_0, k_1, k_2} ، $d_{j, k_1, k_2}^{(1)}$ ، $d_{j, k_1, k_2}^{(2)}$ و $d_{j, k_1, k_2}^{(3)}$ به ترتیب در ارتباط با تقریبات و جزئیات افقی، قائم و قطری تحلیل موجک هستند و توابع مقیاس و موجک با معادلات (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شود [50].

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \phi(x)\phi(y) \\ \Psi^1(x, y) &= \phi(x)\psi(y) \\ \Psi^2(x, y) &= \psi(x)\phi(y) \\ \Psi^3(x, y) &= \psi(x)\psi(y) \end{aligned} \quad (10)$$

در این مقاله، شکل‌های مود اولیه و ثانویه صفحه فولادی به عنوان سیگنال‌های فضایی دو بعدی برای انجام تحلیل توسط تبدیل موجک گسسته دو بعدی^۱ (D2DWT) استفاده شده است.

۳- مدل سازی اجزاء محدود صفحه فولادی

صفحه فولادی جدار نازک به ضخامت ۲ میلی‌متر و به ابعاد ۶۰۰×۸۰۰ میلی‌متر در نرم افزار ABAQUS با شرایط تکیه گاهی آزاد و مشخصات مکانیکی نسبت پوآسن ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته ۲×۱۰^۵ مگاپاسکال در حالت‌های سالم و آسیب D1، D2 و D3 معرفی شده در جدول (۱) مدل‌سازی شده و با ابعاد ۲۵ میلی‌متر تحلیل فرکانسی شده است. آسیب به ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر در تمام حالت‌های آسیب به صورت کاهش مدول الاستیسیته تعریف شده است. در شکل (۱) صفحه فولادی با موقعیت‌های آسیب ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. شکل ۱. صفحه فولادی با شرایط تکیه‌گاهی آزاد و موقعیت‌های آسیب ۱، ۲ و ۳

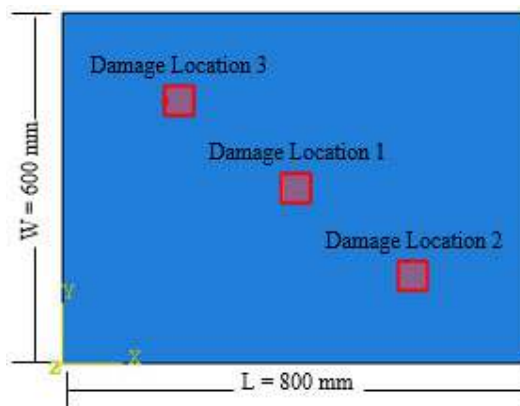


Fig. 1. The steel plate with free support conditions and damage zones 1, 2 and 3

۴- وجود آسیب

آسیب در سازه باعث تغییر در مشخصات فیزیکی (جرم، سختی و میرایی) و در نتیجه، مشخصات مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود ارتعاشی) می‌شود؛ بنابراین، از تغییرات به وجود آمده در مشخصات مودال می‌توان به مسئله وجود

آسیب پاسخ داد. در ادامه، این تغییرات بررسی شده است.

۴-۱- تغییرات فرکانس

از دینامیک سازه‌ها، معادله ارتعاش آزاد یک سیستم سازه‌ای n درجه آزادی بدون میرایی با رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (11)$$

که در آن K و M به ترتیب ماتریس‌های سختی و جرم هستند. در این صورت، فرکانس‌های طبیعی از حل معادله مشخصه (۱۲) قابل محاسبه هستند.

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (12)$$

بنابراین به دلیل ارتباط مستقیم ماتریس سختی با مدول الاستیسیته انتظار می‌رود فرکانس‌های طبیعی حالت‌های سالم و آسیب متفاوت باشد. در جدول (۲) مقادیر فرکانس در چهار مود اول آورده شده است و تغییر در فرکانس‌ها به دلیل تغییر در مدول الاستیسیته مشاهده می‌شود؛ به طوری که با افزایش شدت آسیب، اختلاف فرکانس‌ها بین دو وضعیت سالم و آسیب افزایش می‌یابد.

1..Discrete 2-D Wavelet Transform (D2DWT)

$$0 \leq MAC_i(\phi_i^u, \phi_i^d) = \frac{(\phi_i^u \cdot \phi_i^d)^2}{|\phi_i^u|^2 \times |\phi_i^d|^2} \leq 1 \quad (14)$$

در شکل (۲) چهار شکل مود اول سالم نشان داده شده و در جدول (۳) زاویه بین بردارهای شکل مود و در جدول (۴) مقادیر MAC محاسبه شده است. در تمامی حالت‌ها، زاویه بین بردارهای شکل مود سالم و معیوب غیر صفر است که تأییدی بر وجود آسیب است. با این حال، از بررسی مستقیم تغییر در مقادیر فرکانس و زاویه بین شکل‌های مود نمی‌توان موقعیت آسیب‌ها را شناسایی نمود.

با توجه به جدول (۳) در اثر آسیب‌های موضعی، زاویه بین بردارهای شکل مود نزدیک به صفر و یا ۱۸۰ درجه است. زاویه ۱۸۰ درجه بین بردارهای شکل مود به معنی خلاف جهت هم بودن جابه‌جایی نسبی درجات آزادی وضعیت‌های سالم و آسیب دیده است.

جدول ۱. مشخصات حالت‌های مختلف آسیب ایجاد شده در صفحه

فولادی

| Damage ... | | | Damage Zone (mm) | | Damage Center | | Damage Severity (%) |
|------------|--------|----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| State | Number | Location | x | y | x/L = 800 m | y/W = 600 m | |
| D1 | 1 | 1 | 375 - 425 | 275 - 325 | 0.5 - 0 | 0.5 - 0 | 10, 20 & 30 |
| D2 | 1 | 2 | 575 - 625 | 125 - 175 | 0.7 - 0.5 | 0.2 - 0.5 | 10, 20 & 30 |
| D3 | 2 | 3 | 575 - 625 | 125 - 175 | 0.7 - 0.5 | 0.2 - 0.5 | 10, 20 & 30 |
| | | 4 | 175 - 225 | 425 - 475 | 0.2 - 0.5 | 0.7 - 0.5 | 25 |

Table 1. Specifications of different damage states on the steel plate

شکل ۲. شکل‌های مود سالم صفحه فولادی

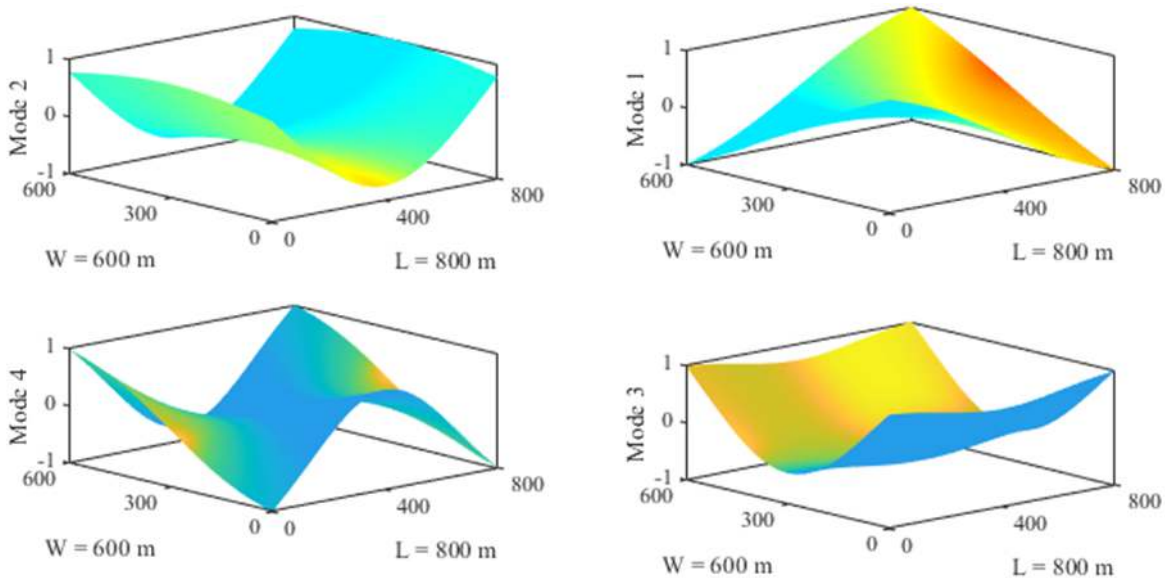


Fig. 2. Healthy mode shapes of the steel plate

جدول ۲. مقادیر فرکانس طبیعی چهار مود اول سالم و معیوب (هرتز)

| Mode Number | Undamaged State | D1 Damage State | | | D2 Damage State | | | D3 Damage State | | |
|-------------|-----------------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
| | | Damage Severity (%) | | | Damage Severity (%) | | | Damage Severity (%) | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| 1 | 13.608 | 13.603 | 13.597 | 13.591 | 13.605 | 13.601 | 13.597 | 13.595 | 13.591 | 13.587 |
| 2 | 16.225 | 16.216 | 16.205 | 16.193 | 16.222 | 16.218 | 16.215 | 16.213 | 16.210 | 16.206 |
| 3 | 30.181 | 30.159 | 30.135 | 30.107 | 30.175 | 30.168 | 30.160 | 30.158 | 30.151 | 30.144 |
| 4 | 32.248 | 32.247 | 32.246 | 32.245 | 32.239 | 32.230 | 32.221 | 32.217 | 32.208 | 32.199 |

Table 2. Natural frequency values of the first four healthy and damaged modes

جدول ۳. زاویه بین بردارهای شکل مود سالم و معیوب (درجه)

| Mode Number | D1 Damage Severity (%) | | | D2 Damage Severity (%) | | | D3 Damage Severity (%) | | |
|-------------|------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| | $\theta_i^{u,d1}$ | | | $\theta_i^{u,d2}$ | | | $\theta_i^{u,d3}$ | | |
| 1 | 0.0086 | 179.98 | 179.97 | 179.98 | 179.96 | 179.93 | 0.0550 | 0.0639 | 0.0803 |
| 2 | 0.0194 | 0.0427 | 0.0711 | 0.0230 | 0.0482 | 0.0764 | 0.0632 | 0.0738 | 0.0929 |
| 3 | 0.0496 | 0.1068 | 0.1738 | 0.0386 | 0.0828 | 0.1341 | 0.0891 | 0.0863 | 0.1085 |
| 4 | 0.0005 | 0.0011 | 0.0018 | 179.95 | 179.89 | 179.83 | 0.1621 | 0.1994 | 179.75 |

Table 3. The angle between of healthy and damaged mode shapes

جدول ۴. معیار اطمینان مودال (MAC) شکل‌های مود سالم و معیوب

| Mode Number | D1 Damage State | | | D2 Damage State | | | D3 Damage State | | |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| | $MAC_i^{u,d1}$ | | | $MAC_i^{u,d2}$ | | | $MAC_i^{u,d3}$ | | |
| 1 | 0.9999999 | 0.9999999 | 0.9999997 | 0.9999998 | 0.9999994 | 0.9999986 | 0.9999991 | 0.9999987 | 0.9999998 |
| 2 | 0.9999998 | 0.9999994 | 0.9999984 | 0.9999998 | 0.9999993 | 0.9999982 | 0.9999987 | 0.9999983 | 0.9999998 |
| 3 | 0.9999992 | 0.9999965 | 0.9999908 | 0.9999995 | 0.9999979 | 0.9999945 | 0.9999975 | 0.9999977 | 0.9999995 |
| 4 | 0.9999999 | 0.9999999 | 0.9999999 | 0.9999991 | 0.9999964 | 0.9999913 | 0.9999919 | 0.9999878 | 0.9999991 |

Table 4. The MAC value between of healthy and damaged mode shapes

۵- شناسایی آسیب

معیوب دارای اطلاعات سودمندی برای آشکارسازی محل‌های آسیب است؛ بنابراین، با معرفی یک شاخص مکان‌یاب آسیب^۱ (DLI) به آشکارسازی محل‌های آسیب پرداخته شده است. شاخص مزبور با رابطه (۱۵) پس از این تعریف می‌شود.

از پایه مهم‌ترین ویژگی تبدیلات موجک که در حوزه پایش سلامت سازه‌ها، نظر پژوهشگران را به خود جلب نموده است، قابلیت شناسایی نقاط ناپیوستگی و تغییرات ناگهانی رخ داده در سیگنال‌ها است. بررسی‌های اولیه نویسندگان این مقاله نشان داد که ضرایب حاصل از جزئیات قطری تحلیل موجک سیگنال‌های (شکل‌های مود) سالم و

1. Damage Localization Index (DLI)

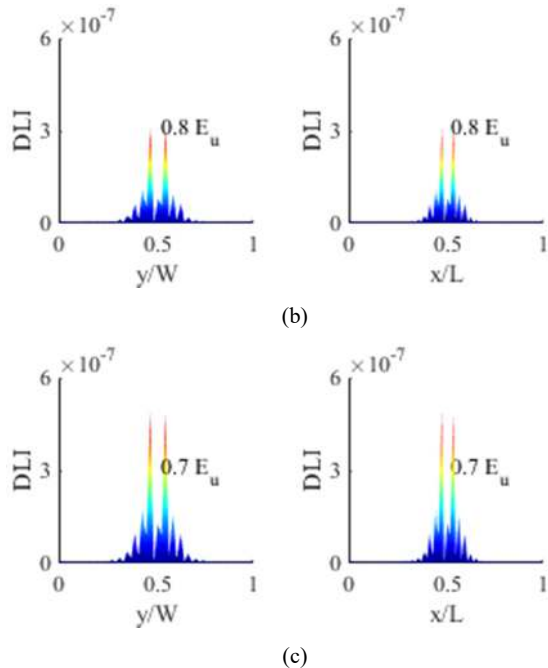
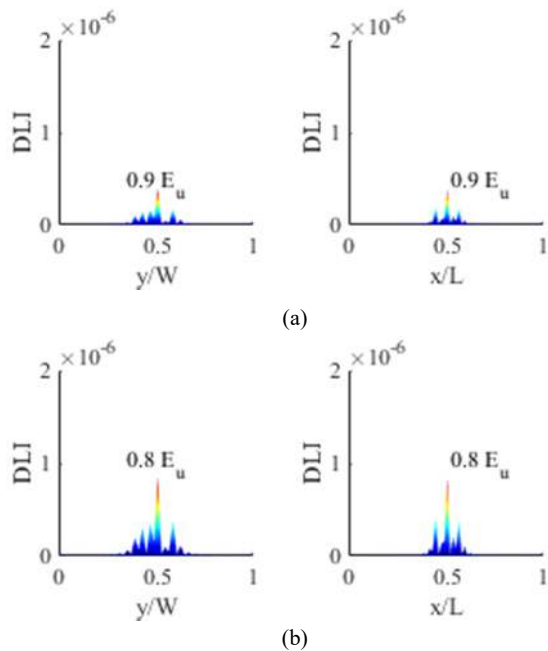


Fig. 3. 1st mode DLI diagram of the D1 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

شکل ۴. نمودار DLI مود دوم حالت آسیب D1 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



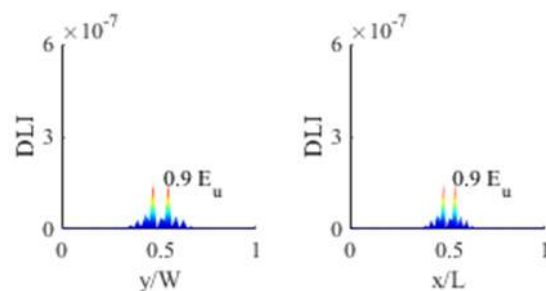
$$DLI_i = |cD_i^u \pm cD_i^d| \quad (15)$$

که در آن cD_i^u و cD_i^d به ترتیب ماتریس ضرایب جزئیات قطری در ارتباط با حالت‌های بدون آسیب و با آسیب است و DLI_i شاخص مکان‌یاب آسیب مود i ام است. در صورتی که زاویه بین بردارهای شکل مود نزدیک به 180° درجه باشد، حالت مجموع و در صورتی که نزدیک به صفر باشد، حالت تفاضل ماتریس ضرایب موجک مد نظر است.

۵-۱- مکان‌یابی آسیب

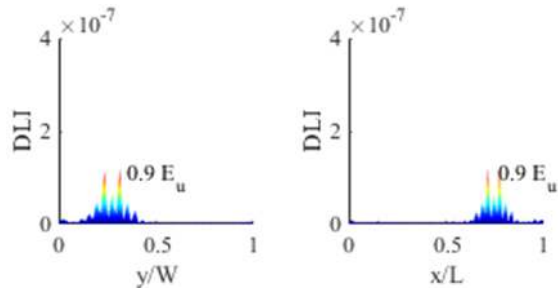
بررسی‌های تشخیص آسیب با DLI تحت تحلیل با توابع موجک مختلف نشان داد که تابع موجک sym4 به عنوان یکی از توابع تشخیصی مناسب و بهینه، عملکرد شناسایی موفقی دارد. نتایج عیب‌یابی سه مود اول حالت‌های آسیب D1، D2 و D3 در شکل‌های (۳ تا ۱۱) در دو راستای طول و عرض صفحه آورده شده است. در نمودارها E_u مدول الاستیسیته موقعیت‌های سالم است. نتایج نموداری DLI جهش‌های نسبی حداکثری را در موقعیت‌های آسیب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جهش‌های نسبی حداکثری در نمودار DLI با افزایش میزان خسارت موقعیت آسیب دیده (شدت آسیب)، در موقعیت‌های مکانی ثابت در منطقه آسیب افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به شکل‌های (۹ تا ۱۱) مشاهده می‌شود که DLI هر یک از موقعیت‌های آسیب تنها متأثر از میزان خسارت همان موقعیت آسیب است و به عبارتی با تغییر میزان شدت آسیب یک موقعیت آسیب، DLI سایر موقعیت‌های آسیب تغییر نمی‌نماید.

شکل ۳. نمودار DLI مود اول حالت آسیب D1 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪

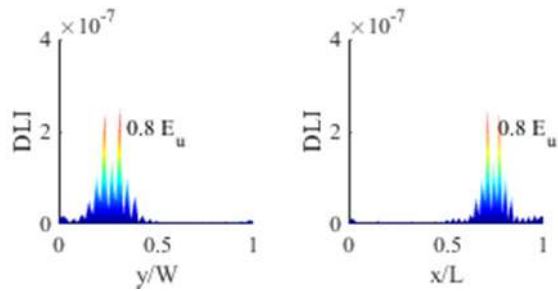


(a)

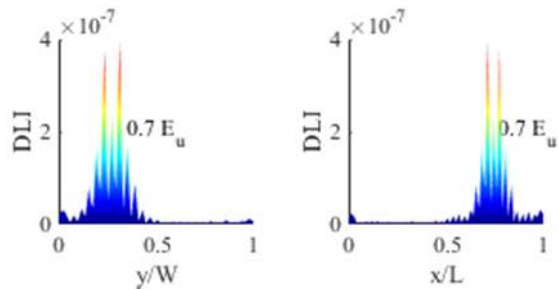
شکل ۶. نمودار DLI مود اول حالت آسیب D2 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



(a)



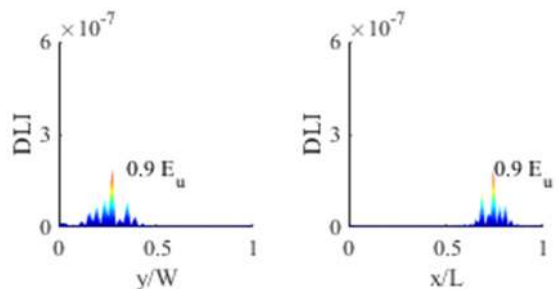
(b)



(c)

Fig. 6. 1st mode DLI diagram of the D2 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

شکل ۷. نمودار DLI مود دوم حالت آسیب D2 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



(a)

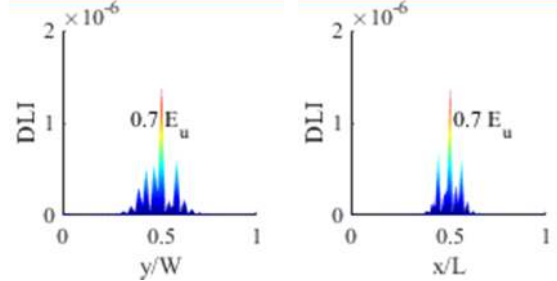


(b)



(c)

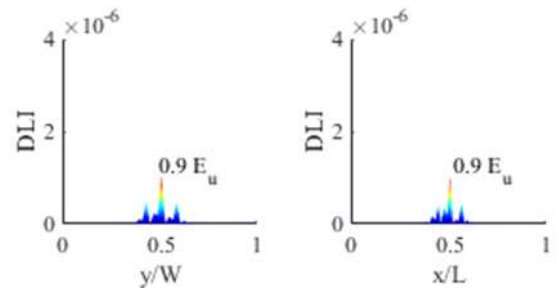
Fig. 7. 2nd mode DLI diagram of the D2 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%



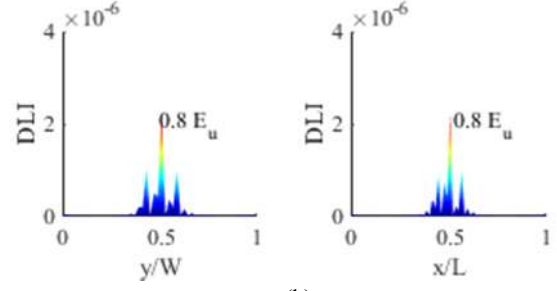
(c)

Fig. 4. 2nd mode DLI diagram of the D1 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

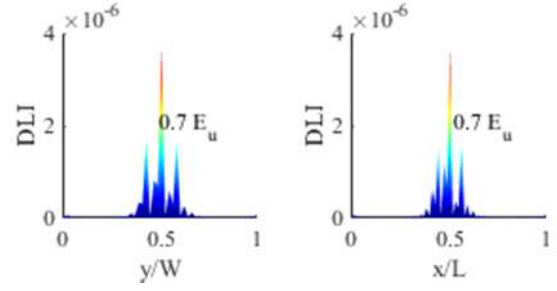
شکل ۵. نمودار DLI مود سوم حالت آسیب D1 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. 3rd mode DLI diagram of the D1 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

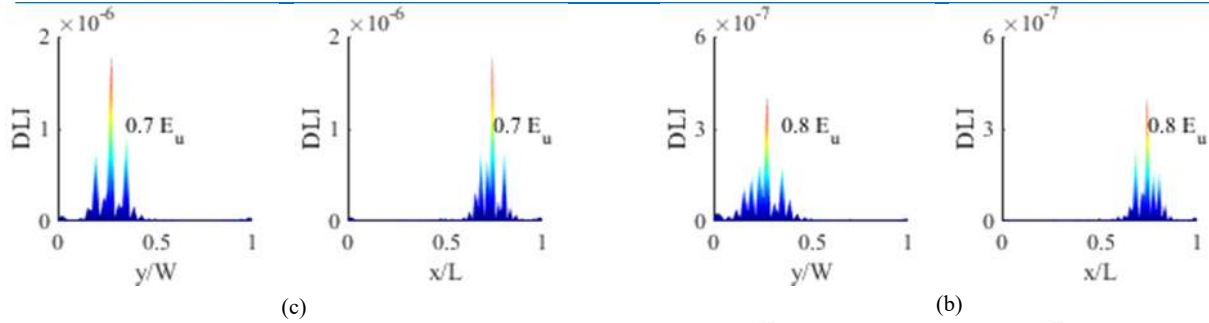


Fig. 8. 3rd mode DLI diagram of the D2 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

شکل ۹. نمودار DLI مود اول حالت آسیب D3 با شدت آسیب (ا) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪

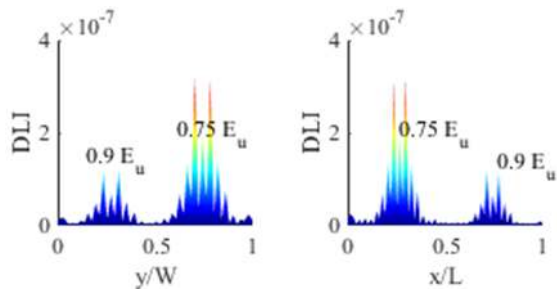


Fig. 9. 1st mode DLI diagram of the D3 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

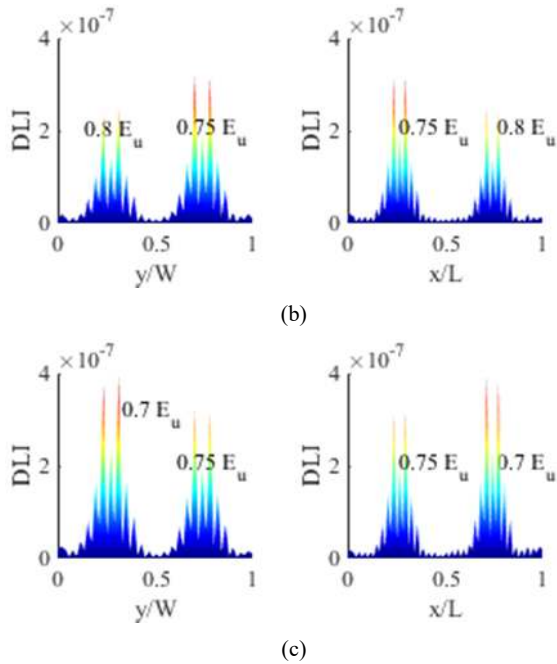


Fig. 7. 2nd mode DLI diagram of the D2 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

شکل ۸. نمودار DLI مود سوم حالت آسیب D2 با شدت آسیب (ا) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪

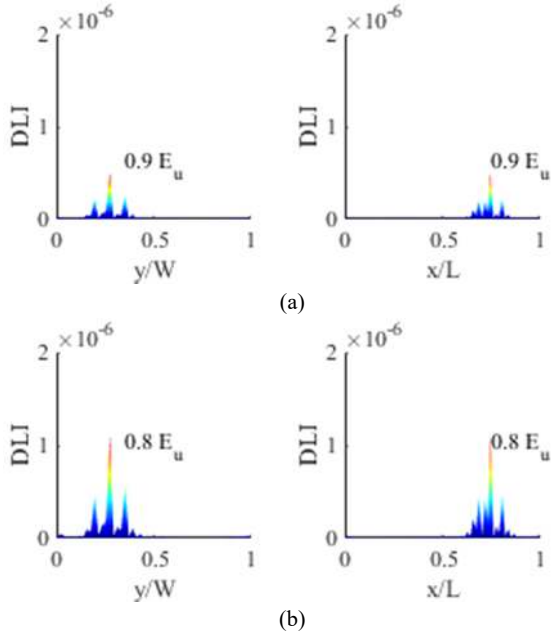


Fig. 9. 1st mode DLI diagram of the D3 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

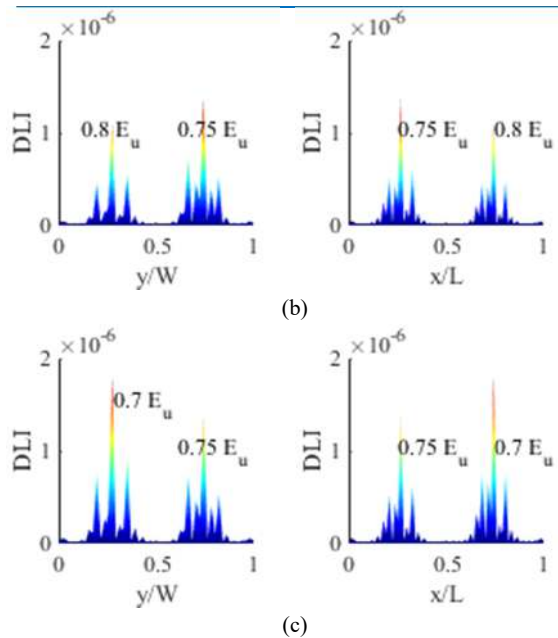
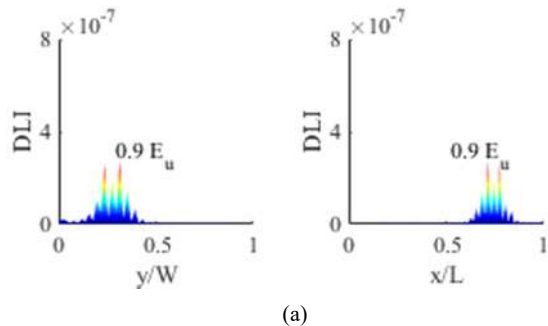


Fig. 11. 3rd mode DLI diagram of the D3 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

۵-۲- مکان‌یابی آسیب با شرایط تکیه‌گاهی گیردار

شناسایی آسیب صفحه فولادی با شرایط گیرداری لبه‌ها برای حالت آسیب D2 با درصدهای آسیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ در سه مود اول انجام شد. نتایج نموداری توانمندی شاخص پیشنهادی را در تشخیص موقعیت آسیب صفحه با شرایط لبه‌ای گیردار با درصدهای مختلف خسارت نشان داد. به عنوان نمونه، در شکل (۱۲) نتایج نموداری شاخص آسیب مود اول گزارش شده است. در موقعیت آسیب، در هر دو بعد صفحه، بی‌نظمی و جهش‌های نسبی حداکثری در نمودار شاخص مکان‌یاب آسیب اتفاق افتاده است.

شکل ۱۲. نمودار DLI مود اول حالت آسیب D2 با شرایط تکیه‌گاهی گیردار و شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



شکل ۱۰. نمودار DLI مود دوم حالت آسیب D3 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪

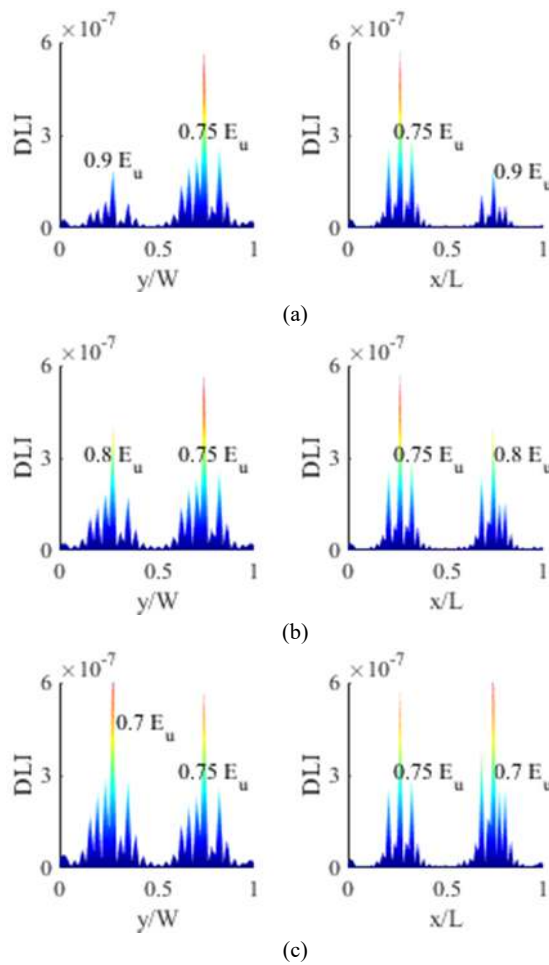
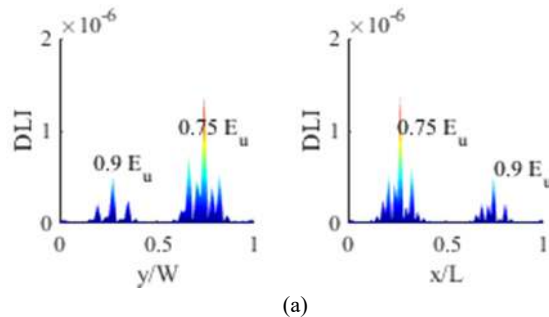


Fig. 10. 2nd mode DLI diagram of the D3 damage state with the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

شکل ۱۱. نمودار DLI مود سوم حالت آسیب D3 با شدت آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪



که در آن \emptyset و \emptyset^N به ترتیب سیگنال‌های شکل مود بدون نویز و دارای نویز است.

تعیین موقعیت آسیب صفحه فولادی با شرایط لبه‌ای گیردار برای حالت آسیب D2 در مود اول با شدت آسیب ۲۰ درصد و اثر درصدهای نویزی ۱ و ۱/۵ انجام شد. نتایج نموداری شاخص مکان‌یاب آسیب بیشترین میزان اغتشاش و بی‌نظمی را در موقعیت آسیب نشان می‌دهد (شکل ۱۳).

شکل ۱۳. نمودار DLI مود اول برای حالت آسیب D2 با شرایط تکیه‌گاهی گیردار و تأثیر نویز بر سیگنال‌های شکل مود

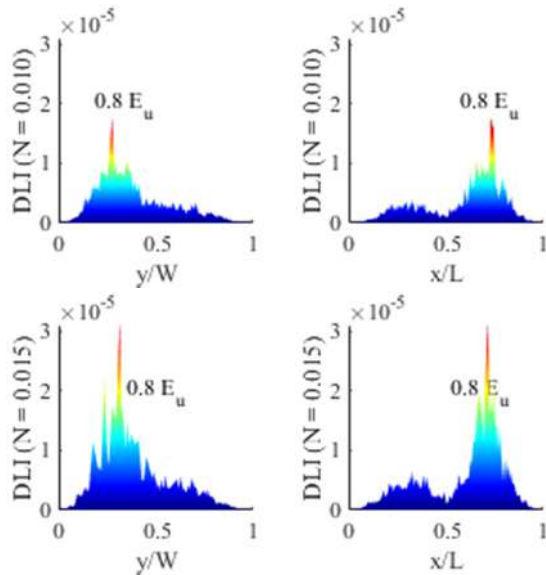


Fig. 13. 1st mode DLI diagram of the D2 damage state with the fixed support conditions and the effect of noise on mode shape signals

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

اطلاع از وضعیت سلامتی سازه‌ها و اعضای سازه‌ای مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. ابداع و توسعه انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله بین مفاهیم و کاربردهای عملی را تا حد امکان کاهش داده و این ممکن را فراهم نموده است تا با به‌کارگیری روش‌های پایش سلامت مورد اعتماد بتوان رفتار سازه‌ها را در مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل نمود.

صفحات از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند که آسیب در آن‌ها می‌تواند به صورت پیشرونده به سایر المان‌ها منتقل

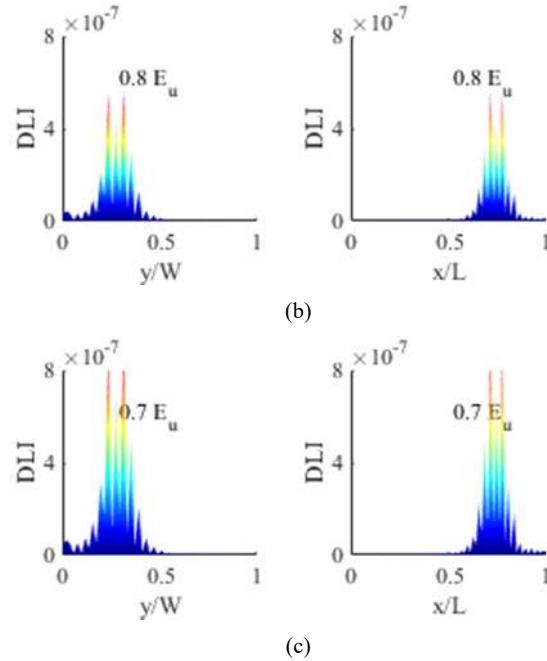


Fig. 12. 1st mode DLI diagram of the D2 damage state with the fixed support conditions and the damage severity (a) 10%, (b) 20% and (c) 30%

۵-۳- مکان‌یابی آسیب با در نظر گرفتن نویز

در شرایط آزمایشگاهی، داده‌های مودال متأثر از نویزهای تصادفی است. بنابراین، روش پیشنهادی تعیین موقعیت آسیب با در نظر گرفتن اثر درصدهای مختلف نویز بررسی شد. مراحل اعمال اثر رفت و برگشتی نویزهای تصادفی بر جابه‌جایی نسبی درجات آزادی شکل‌های مود به صورت زیر انجام شد:

۱- ماتریس r با مقادیر تصادفی و هم اندازه با سیگنال شکل مود با استفاده از رابطه (۱۶) تعریف می‌گردد:

$$r = -1 + 2 \times \text{rand}(m, n) \quad (16)$$

که در آن m و n به ترتیب تعداد ردیف‌ها و ستون‌های ماتریس سیگنال شکل مود است.

۲- در نظر گرفتن درصد نویز N و اثر دادن آن بر سیگنال شکل مود با استفاده از رابطه (۱۷)

$$\emptyset^N = (1 + Nr) \times \emptyset \quad (17)$$

شده و باعث آسیب کلی سازه شود. در این مقاله، با بهره‌گیری از داده‌های دینامیکی مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود ارتعاشی) و ابزار ریاضی تبدیل موجک (به دلیل توانمندی آن در محلی‌سازی سیگنال‌ها در دو حوزه زمان و فرکانس) به تشخیص آسیب صفحه فولادی پرداخته شد. بررسی‌های فرکانسی و شکل‌های مودی نشان داد:

۱- در اثر آسیب، تغییرات در مقادیر فرکانس قابل ملاحظه است؛ به شکلی که با افزایش میزان خسارت در محل‌های آسیب، اختلاف بین فرکانس‌های وضعیت‌های سالم و آسیب افزایش می‌یابد.

۲- در اثر آسیب، زاویه بین بردارهای اولیه و ثانویه شکل مود، همواره غیر صفر است؛ به عبارتی، شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی بر هم منطبق نیستند.

۳- زاویه بین بردارهای اولیه و ثانویه شکل‌های مود همواره به صفر یا ۱۸۰ درجه نزدیک است و ماهیت انحنایی شکل مودها دچار تغییر نمی‌شود.

۴- معیار اطمینان مودال (MAC) بردارهای اولیه و ثانویه شکل‌های مود از ۱ کمتر است و این عدم هماهنگی کامل شکل‌های اولیه و ثانویه مودها را نشان می‌دهد.

با معرفی یک شاخص مکان‌یابی آسیب (DLI) بر مبنای ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری تحلیل موجک سیگنال‌های اولیه و ثانویه شکل مود به مسئله تعیین موقعیت‌های آسیب پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها با استفاده از تابع موجک sym4 به عنوان یکی از مناسب‌ترین توابع موجک (با خطای شناسایی تقریباً صفر) نشان داد:

۵- DLI قابلیت بالایی در شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب با میزان خسارت متفاوت دارد.

۶- DLI به میزان خسارت موقعیت آسیب حساس است و با افزایش میزان خسارت، در مختصات مکانی ثابت در منطقه آسیب افزایش می‌یابد.

۷- DLI هر یک از موقعیت‌های آسیب متأثر از میزان خسارت سایر موقعیت‌های آسیب نیست؛ به عبارتی، تنها متأثر از میزان خسارت همان موقعیت آسیب است.

۸- مستقل بودن DLI هر یک از موقعیت‌های آسیب از

شدت آسیب سایر موقعیت‌ها یک امتیاز در روند شناسایی محسوب می‌شود؛ زیرا در غیر این صورت ممکن است عدم شناسایی یک موقعیت آسیب بر شناسایی سایر موقعیت‌های آسیب تأثیرگذار باشد و در نتیجه، قابلیت شناسایی و تعیین موقعیت آسیب برای حالت‌های آسیب چندگانه را با مشکل مواجه نماید.

۹- شاخص مکان‌یاب آسیب حتی با در نظر گرفتن اثر نویزهای تصادفی بر سیگنال‌های اولیه و ثانویه شکل مود، بیشترین بی‌نظمی و اغتشاش نسبی را در موقعیت آسیب نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، DLI به عنوان یک شاخص شناسایی مؤثر و کارآمد در تعیین موقعیت‌های مختلف آسیب در اعضای صفحه‌ای فولادی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Montalvao, D., Maia, N.M.M., Ribeiro, A.M.R., 2006 A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials, *The Shock and Vibration Digest*, 38(4), 295-324.
- [2] Farrar, C.R., Doebling, S.W., Nix, D.A., 2001 Vibration-based structural damage identification, *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359, 131-149.
- [3] Chatterjee, A., 2010 Structural damage assessment in a cantilever beam with a breathing crack using higher order frequency response functions, *Journal of Sound and Vibration*, 329(16), 3325-3334.
- [4] Majumdar, A., Maiti, D.K., Maity, D., 2012 Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization, *Applied Mathematics and Computation*, 218(19), 9759-9772.
- [5] Yazdanpanah, O., Seyedpoor, S.M., Bengar, H.A., 2015 A new damage detection indicator for beams based on mode shape data, *Structural Engineering and Mechanics*, 53(4), 725-744.
- [6] Bai, R.B., Ostachowicz, W., Cao, M.S., Su, Z., 2014 Crack detection in beams in noisy conditions using scale fractal dimension analysis of mode shapes, *Smart Materials and Structures*, 23(6).

- diagnosis using adaptive fuzzy neural structure and wavelet analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 39, 181-194.
- [18] Reda Taha, M.M., Noureldin, A., Lucero, J.L., Baca, T.J., 2006 Wavelet transform for structural health monitoring: a compendium of uses and features, *Structural Health Monitoring*, 5(3), 267-295.
- [19] Andreas, U., Baragatti, P., Casini, P., Iacoviello, D., 2017 Experimental damage evaluation of open and fatigue cracks of multi-cracked beams by using wavelet transform of static response via image analysis, *Structural Control and Health Monitoring*, 24(4).
- [20] Zhou, S., Tang, B., Chen, R., 2009 Comparison between non-stationary signals fast fourier transform and wavelet analysis, *Intelligent Interaction and Affective Computing, International Asia Symposium, IEEE*.
- [21] Katunin, A., 2010 Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform, *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, 45(2), 41-52.
- [22] Ghodrati-Amiri, G., Bagheri, A., Seyed Razzaghi, S.A., Asadi, A., 2010 Structural damage detection in plate using wavelet transform, *Challenges, Opportunities and Solution in Structural Engineering and Construction-Ghafoori (Ed)*.
- [23] Zhong, S. and Oyadiji, S.O., 2011 Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data, *Structural Control and Health Monitoring*, 18, 169-190.
- [24] Bagheri, A., Kourehli, S., 2013 Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis, *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14(2), 289-304.
- [25] Xu, W., Radzienski, M., Ostachowicz, W., and Cao, M., 2013 Damage detection in plates using two-dimensional direction Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes, *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 457-468.
- [26] Lee, S.G., Yun, G.J., and Shang, S., 2014 Reference-free damage detection for truss bridge structures by continuous relative wavelet entropy method, *Structural Health Monitoring*, 1-14.
- [7] Pandey, A.K., Biswas, M., Samman, M.M., 1991 Damage detection from changes in curvature mode shapes, *Journal of Sound and Vibration*, 145 (2), 321-332.
- [8] Cao, M., Radzienski, M., Xu, W., Ostachowicz, W.M., 2014 Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 46(2), 468-480.
- [9] Tomaszewska, A., 2010 Influence of statistical errors on damage detection based on structural flexibility and mode shape curvature, *Computers and Structures*, 88(3), 154-164.
- [10] Bandara, R.P., Chan, T.H., Thambiratnam, D.P., 2014 Frequency response function based damage identification using principal component analysis and pattern recognition technique, *Engineering Structures*, 66, 116-128.
- [11] Liu, X., Lieven, N.A.J., P.J., 2019 Frequency response function shape-based methods for structural damage localization, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(4), 1243-1259.
- [12] Bakhary, N., Hao, H., Deeks, A.J., 2010 Substructuring technique for damage detection using statistical multi-stage artificial neural network, *Advances in Structural Engineering*, 13(4), 619-639.
- [13] Shu, J., Zhang, Z., Gonzalez, I., Karoumi, R., 2013 The application of a damage detection method using artificial neural network and train-induced vibrations on a simplified railway bridge model, *Engineering Structures*, 52, 408-421.
- [14] He, R.S., Hwang, S.F., 2007 Damage detection by a hybrid real-parameter genetic algorithm under the assistance of grey relation analysis, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(7), 980-992.
- [15] Meruane, V., Heylen, W., 2011 Structural damage assessment with antiresonances versus mode shapes using parallel genetic algorithms, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(8), 825-839.
- [16] Chandrashekhar, M., Ganguli, R., 2009 Damage assessment of structures with uncertainty by using mode-shape and fuzzy logic, *Journal of Sound and Vibration*, 326, 939-957.
- [17] Nguyen, S.D., Ngo, K.N., Tran, Q.T., Choi, S., 2013 A new method for beam-damage-

- Esfandiari, A., 2019 Structural health monitoring of a concrete-filled tube column, *Magazine of Civil Engineering*, 85, 136-145.
- [37] Hoseini Vaez, S., Arefzade, T., 2019 Comparison of static and modal analysis in damage detection of concrete gravity dams via wavelet transform, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35.2(1.1), 33-41.
- [38] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 2019 Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape, *Journal of Structural and Construction Engineering*, DOI: 10.22065/JSCE.2019.174347.1799.
- [39] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 2019 Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm, *Journal of Structural and Construction Engineering*, DOI: 10.22065/JSCE.2019.197470.1923
- [40] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 2020 Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses, *Journal of Structural and Construction Engineering*, DOI: 10.22065/JSCE.2020.216647.2058
- [41] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Rezaifar, O., 2021 Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data, *Journal of Modeling in Engineering*, 18(63), DOI: 10.22075/jme.2020.20940.1931
- [42] Hanteh, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 2021 Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method, *Sharif Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.24200/j30.2020.56237.2812
- [43] Hanteh, M., Rezaifar, O., 2021 Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method, *Journal of Structures*, 29, 701-713.
- [44] Mallat, S., 2008 A wavelet tour of signal processing: the sparse way, Academic Press.
- [45] Gao, R.X., and Yan, R., 2010 Wavelets: Theory and applications for manufacturing, Springer Science & Business Media.
- [46] Mertins A. 1992 Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications, *Wiley*.
- [47] Zhongm S., Oyadiji S.O. 2011 Detection of
- [27] Li, J., and Hao, H., 2014 Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction, *Structural Health Monitoring*, 1-17.
- [28] Katunin, A., 2015 Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 251-261.
- [29] Patel, S.S., Chourasia, A., Panigrahi, S., Parashar, J., Parvez, N., and Kumar, M., 2016 Damage identification of RC structures using wavelet transformation, *Procedia Engineering*, 144, 336-342.
- [30] Rahami, H., Amini-Tehrani, H., Akhvat, M., and Ghodrati-Amiri, G., 2016 Damage detection in offshore fixed platforms using concepts of energy entropy in wavelet packet transform, *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), 241-248 (in Persian).
- [31] Abbasnia, R., Mirzaei, B., and Yousefbeck, S., 2016 A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams, *Journal of Vibroengineering*, 18(3), 1497-1513.
- [32] Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefbeck S., Ghodrati Amiri G., Zare Hosseinzadeh A. 2019 A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization algorithm, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), 1-20.
- [33] Ashory, M.R., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Kokabi, M.J., 2017 Damage identification in composite laminates using a hybrid method with wavelet transform and finite element model updating, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 232, 815-827.
- [34] Yang, C., Oyadiji, S.O., 2017 Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface, *Computers and Structures*, 179, 109-126.
- [35] Rezaifar, O., Younesi, A., Gholhaki, M., Esfandiari, A., 2018 Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special Issue 4), 93-106.
- [36] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M.,

- [50] Araujo dos Santos, J.V., Katunin, A., and Lopes, H., 2019 Vibration-based damage identification using wavelet transform and a numerical model of shearography, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(3).
- [51] Pastor, M., Binda, M., and Harcarik, T., 2012 Modal Assurance Criterion, *Journal of Procedia Engineering*, 48, 543-548.
- cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data, *Computers and Structures*, 89(1-2), 127-148.
- [48] MATLAB Reference Guide, the Math Works, Ince, 2021b.
- [49] Hansang K., Hani M. 2004 Damage detection of structures by wavelet analysis, *Engineering Structures*, 26(3), 347-362.

Damage Detection and Localization in Steel Plates Using Modal Dynamic Data and Two-Dimensional Wavelet Analysis

Omid Rezaifar¹, Majid Gholhaki², Mohtasham Khanahmadi³, Adel Younesi⁴, Behzad Dejkam⁵

1. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2. Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
3. Ph.D. Student of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran
4. Ph.D. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
5. M.Sc. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering, University of Velayat, Iranshahr, Iran

Abstract

The health of structures, provision of safety, and the sense of security are among constant requirements and perpetual challenges of engineering and managers in the field of crisis management. Erosion and occurrence of minor local damage to structures and structural members in the early stages of construction or during operation, especially in critical structures such as power plants, tall buildings, stairs, dams, airports, and hospitals, have always been among major problems. As time passes, Structures are affected by a variety of natural and non-natural destructive factors such as earthquakes, non-systematic excavations, dynamic vibrations resulting from explosions and heavy vehicle traffic. In addition, factors such as serviceability expectation beyond the design capacity of structural elements and failure to meet the latest expectations imposed by regulations, use of poor-quality materials and execution problems will reduce efficiency and, consequently the service life of structures. Also, the spread of local damages in structures can impair the overall health of the structure. Undoubtedly, knowledge of structural health and safety is of vital importance and structural health monitoring is recognized as one of the most important subjects that has received a lot of attention from researchers. Plates are one of the most important structural elements that can, when damaged, progressively transfer damages to other elements and lead to overall structural damage incurring irreparable social and economic costs. Due to the increasing applications of steel plates, especially in building structures (as steel plate shear walls) in the present study attempts were made to focus on damage detection and localization as one of the most important steps of health monitoring using modal dynamic data (natural frequencies and mode shapes) and a proposed diagnostic method based on two-dimensional discrete wavelet analysis. To this end, the modeled steel plate was subjected to frequency analysis in ABAQUS finite element analysis software and the modal data associated with damaged and non-damaged states were extracted. The results showed differences between the frequencies and lack of correlation between primary and secondary vibration mode shapes based on the modal assurance criterion (MAC) and the angle between the primary and secondary mode shape vectors. Using a proposed damage localization index (DLI) based on the wavelet coefficients obtained from the diameter details of the two-dimensional wavelet analysis of the primary and secondary vibration mode shapes, the damage zones were detected by creating a maximum relative jumps in the DLI diagram. Studies showed that DLI values are sensitive to the damage severity of the damage zone and with increasing the damage severity, these values increase in fixed spatial coordinates in the damaged zone. Also, the DLI of one damaged zone is independent of the damage severity of the other damaged zones, and this is a positive advantage in the damage determination process. Otherwise, failure to detect one damaged zone may affect the detection of other damaged zones, and consequently pose problems in the process of damage detection and localization in cases where we are dealing with multiple damage zones. According to the results of the present study, DLI can be proposed as an efficient and effective index in detection and localization of damages in steel plate elements.

Keywords: Structural Health Monitoring, Modal Data, Modal Assurance Criterion (MAC), Two-dimensional Wavelet Analysis, Damage Detection.