

عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دو‌بُعدی

آرمان مام عزیزی* (استادیار)

مجتبم خان احمدی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف (بهار ۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۵۹-۶۹ (پژوهشی)

شناسایی آسیب در المان‌ها و تعلقات سازه‌یی، یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی و پایش سلامتی در سازه است. پس از تشخیص آسیب‌های جزئی با ترمیم و یا تعویض المان‌های محتمل آسیب می‌توان از گسترش آسیب جلوگیری کرد و خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی احتمالی را کاهش داد. در صنعت ساختمان، استفاده از صفحات جدارنازک فولادی رو به افزایش است. آسیب در اعضاء صفحه‌یی و به‌طور خاص دیوارهای برشی فولادی می‌تواند به‌صورت پیش‌رونده به سایر المان‌ها انتقال یابد و ایجاد خسارت سازه‌یی کلی کند. در نوشتار حاضر، به تشخیص و تعیین موقعیت آسیب‌های جزئی در المان صفحه‌یی فولادی پرداخته شده است. الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی و شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دو‌بُعدی پیشنهاد و شاخص‌های تشخیصی DI-W و DI-L ارائه شده‌اند. نتایج نموداری بررسی‌های مربوط به هر دو شاخص پیشنهادی، کارآمدی و قابلیت تشخیص دو‌بُعدی موقعیت‌های مختلف آسیب را نشان می‌دهد؛ به‌نحوی که در منطقه‌ی آسیب، قله‌هایی برآمده از مقادیر شاخص‌های تشخیصی به صورت بی‌نظمی و اغتشاش پدید آمده است.

واژگان کلیدی: پایش سلامتی سازه، شناسایی آسیب، تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی، شکل‌های مود ارتعاشی، شاخص تشخیص آسیب.

a.mamazizi@uok.ac.ir
mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

ارزیابی سلامتی در سازه‌ها و تعلقات سازه‌یی، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. بدون تردید وضعیت سلامت سازه‌ها، حائز اهمیت بوده و در صورت امکان تشخیص آسیب، محل و شدت آن می‌توان با ترمیم ناحیه‌ی آسیب‌دیده و یا تعویض اعضاء محتمل آسیب، از وقوع خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی پیش رو جلوگیری کرد. توسعه‌ی انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مفاهیم و کاربردهای عملی را کاهش داده و این ممکن را فراهم ساخته است تا با بکارگیری روش‌های پایش سلامت قابل اعتماد بتوان رفتار سازه‌ها را در

مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل کرد. تحلیل پاسخ‌های سازه با استفاده از تبدیل ریاضی توانمندی، مانند تبدیل موجک^۱، در هر دو حوزه‌ی زمان و بسامد، یکی از روش‌های کارآمد تشخیص آسیب است. با استفاده از تبدیل موجک، اطلاعات بیشتری از پاسخ تحلیل شده‌ی سازه بر اساس توانایی آن در محلی‌سازی پاسخ سازه در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل می‌شود.^[۱] تاکنون مطالعات متعددی بر مبنای استفاده از تبدیلات موجک در ارتباط با شناسایی آسیب انجام و در ادامه، خلاصه‌ی برخی از آن‌ها ارائه شده است: کاتونین^۲ (۲۰۱۰)،^[۲] بر مبنای استفاده از تبدیل موجک و داده‌های مودال تیر ساخته شده از ورق پلیمری به شناسایی موقعیت آسیب ترک پرداخته و نشان داده است که در روند شناسایی، حذف نوفه از ضرایب موجک لازم است. ژانگ و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۵، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۳۰، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۲

DOI:10.24200/J30.2022.61052.3143

استاد به این مقاله:

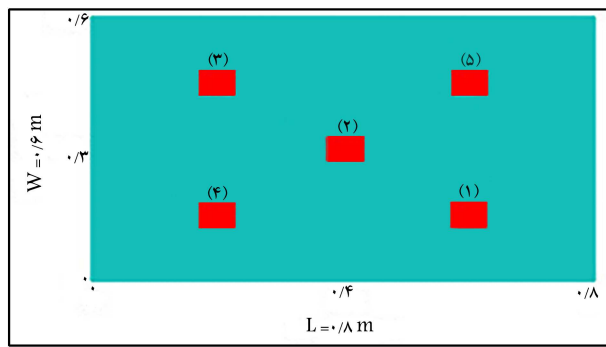
مام عزیزی، آرمان و خان احمدی، مجتبم (۱۴۰۲). «عیب‌یابی در صفحه‌های فولادی با استفاده از الگوریتم تشخیصی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بُعدی و شکل‌های مود ارتعاشی دو‌بُعدی»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۵۹-۶۹

یادگیری^۳ (۲۰۱۱)،^[۳] با استفاده از تبدیل موجک ایستا^۴ و داده‌های مودال، موفق به شناسایی آسیب ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده شده‌اند. ژو^۵ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۴] نیز با بکارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دوبعدی^۶ و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر^۷ موفق به شناسایی آسیب در صفحات شده‌اند. لی^۸ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۵] با استفاده از روش آنالیز موجک نسبی پیوسته^۹ به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابایی پرداخته و نشان داده‌اند که این روش قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرابایی را دارد. کاتونین (۲۰۱۵)،^[۶] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوپنکاکس^{۱۰} تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود صفحات کامپوزیتی آسیب‌دیده پرداخته و نشان داده است که با استفاده از موجک‌های مذکور، مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۷] با تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت‌شده‌ی تراز هر طبقه از یک ساختمان بتنی برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. نادرپور و فخاریان (۲۰۱۶ و ۲۰۲۲)،^[۸] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ی به شناسایی پارامترهای مودال سازه پرداختند و پاسخ ارتعاش آزاد سازه را توسط تبدیل موجک بسته‌ی تجزیه کردند. سپس سیگنال تجزیه شده‌ی را که دارای انرژی یکسان با سیگنال اصلی بود، برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. عملکرد روش اخیر در شناسایی، با استفاده از نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد تأیید واقع شد.

عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۰] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ی مبتنی بر موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرها پرداختند و با بهره‌گیری از تبدیل موجک، محل‌های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌ها شدند. یانگ و یادگیری^{۱۲} (۲۰۱۷)،^[۱۱] روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال^{۱۳} ارائه دادند و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال، موقعیت آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه را شناسایی کردند. نوری و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۲] با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی پرداختند و دریافتند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان، می‌توان شناسایی آسیب موفق‌تری را انجام داد. یونسو و همکاران^[۱۳-۱۶] بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب جاداشدگی در ستون‌های فولادی پُرشده با بتن (CFST)^{۱۴} پرداختند. ایشان آسیب جاداشدگی را توسط یک لایه‌ی پلی استایرن نازک در یک وجه ستون بین بتن و فولاد در نظر گرفتند و با بکارگیری تبدیل موجک پیوسته، موفق به شناسایی موقعیت آسیب جاداشدگی شدند. وانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۷] تبدیل موجکی مبتنی بر روش بردار نیروی باقی‌مانده برای تشخیص آسیب در سازه‌های تونلی پیشنهاد دادند و برای مدل المان محدود تونل با انواع آسیب استفاده کردند و نتایج شناسایی مطلوبی به‌دست آوردند. میرزایی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] با روشی مشابه روش عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۰] به شناسایی آسیب در سازه‌ی خرابایی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند. در ابتدا، المان‌های محتمل آسیب را شناسایی و سپس مقدار خسارت در هر یک از المان‌ها را محاسبه کردند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۹] با استفاده از تحلیل موجک دوبعدی شکل‌های مود صفحه‌ی فولادی به مقایسه‌ی ضرایب موجک وضعیت‌های با و بدون آسیب پرداختند و نشان دادند که اغتشاش‌ها در ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت‌های محتمل آسیب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت بدون آسیب در موقعیت‌های مختلف

آسیب چشم‌گیر است و در تمامی مودها می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد. ایشان در مطالعات دیگری با استفاده از روش‌های مبتنی بر موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات فولادی پیش‌ساخته‌ی پانلی و چندلایه‌ی کامپوزیتی شدند.^[۲۰-۲۱] همچنین، آن‌ها نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع پیوسته و گسسته‌ی تبدیلات موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب در تیر را به درستی شناسایی کرد.^[۲۲-۲۴] ایشان در مطالعات دیگری،^[۲۵-۲۶] با بکارگیری تبدیل موجک به شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر اوج سیگنال‌های خروجی با صرف‌نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، موقعیت‌های آسیب را نشان دادند. همچنین آن‌ها در ادامه‌ی مطالعات‌شان، شاخص‌های مبتنی بر شیب و انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود را برای شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پیشنهاد دادند.^[۲۷-۲۸] حنطه^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۹] بر مبنای تحلیل موجک پیوسته‌ی شکل‌های مود یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب نشان دادند که موقعیت آسیب با ایجاد جهش‌های نسبی بیشینه و کمینه در ضرایب موجک قابل شناسایی است. ما^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۳۱] بر مبنای تحلیل موجک انحنای استاتیکی تیرها به شناسایی آسیب‌های چندگانه پرداختند و به نتایج شناسایی مطلوبی دست یافتند. سان^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۲] استفاده از تبدیل موجک و همبستگی تصاویر دیجیتال را برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیت پیشنهاد دادند، که یک روش شناسایی کارآمد است. مام عزیزی و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۳] برای شناسایی موقعیت‌های جاداشدگی در ستون‌های کامپوزیت CFST، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی شکل‌های مود را پیشنهاد کردند و حساسیت آن را به موقعیت‌های جاداشدگی و شدت‌های مختلف آسیب نشان دادند. در پژوهش دیگری، خان احمدی و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۴] با تعریف یک سیگنال ورودی و بکارگیری تبدیل موجک پیوسته به شناسایی منطقه‌ی جاداشدگی در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و نشان دادند که در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری از ضرایب موجک به محدوده‌ی آسیب وجود دارد؛ با این حال در مقیاس‌های بالاتر، منطقه‌ی آسیب با وضوح مناسب‌تری قابل شناسایی است. همچنین ایشان در مطالعه‌ی دیگری،^[۳۵] مقایسه‌ی ضرایب جزئیات به‌دست آمده از تحلیل موجک شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی برای شناسایی آسیب در تیرها را پیشنهاد کرده و نشان داده‌اند که با استفاده از روش مذکور، بدون در نظر گرفتن آثار نوبه، موقعیت‌های آسیب با خطای کمتر از ۲٪ قابل شناسایی است.

تحلیل ویژگی‌های بسامدی در سایر مباحث مهندسی سازه نیز مهم است. به عنوان مثال، قلهکی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۳۶-۳۷] برای سازه‌های دارای دیوار برشی فولادی با بسامد بزرگ‌تر از ۲ هرتز، ضریب رفتار در حدود ۱۱ تا ۱۳، برای سازه‌های بلندمرتبه برابر با ۸، و برای سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه در حدود ۹ را پیشنهاد کرده‌اند. با توجه به استفاده‌ی روزافزون از صفحه‌های فولادی در صنعت ساختمان و امکان انتقال و گسترش آسیب‌های جزئی در میان‌قاب‌های صفحه‌ی به دیگر المان‌ها، شناسایی آسیب در صفحات مهم بوده و مورد توجه نویسندگان نوشتار حاضر واقع شده است. از طرفی اغلب مطالعات انجام شده در ارتباط با پایش سلامت در المان‌های صفحه‌ی بر مبنای استفاده از تبدیلات حوزه‌ی زمان - بسامد (همانند تبدیل موجک) با زمینه‌ی تئوری دوبعدی بوده است. در نوشتار حاضر، یک الگوریتم تشخیصی مبتنی بر شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دوبعدی و تبدیل موجک پیوسته با زمینه‌ی تئوری یک‌بُعدی برای شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب در صفحه‌های فولادی، پیشنهاد و کارایی تشخیصی آن بررسی شده است.



شکل ۱. صفحه‌ی فولادی با موقعیت‌های آسیب تعریفی و شرایط لبه‌ی آزاد.

جدول ۱. مشخصات آسیب در صفحه‌ی فولادی شکل ۱.

مرکز آسیب (m)		آسیب		
عرضی	طولی	شماره	تعداد	نام
۰/۱۵	۰/۶۰	۱		
۰/۳۰	۰/۴۰	۲	۳	D۱
۰/۴۵	۰/۲۰	۳		
۰/۱۵	۰/۶۰	۱		
۰/۴۵	۰/۲۰	۳		
۰/۱۵	۰/۲۰	۴	۴	D۲
۰/۴۵	۰/۶۰	۵		
۰/۱۵	۰/۶۰	۱		
۰/۳۰	۰/۴۰	۲		
۰/۴۵	۰/۲۰	۳	۵	D۳
۰/۱۵	۰/۲۰	۴		
۰/۴۵	۰/۶۰	۵		

۴. تحلیل مودال

۴.۱. بررسی اثر آسیب در مقادیر بسامد

از دینامیک سازه‌ها، معادله‌ی ارتعاش آزاد بدون میرایی یک سیستم سازه‌ی n درجه آزادی مطابق رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$M\ddot{U} + KU = \{0\}_{n \times 1} \quad (5)$$

که در آن، ماتریس‌های M و K به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی و U پاسخ سازه هستند. معادله‌ی مشخصه‌ی رابطه‌ی ۵ با در نظر گرفتن پاسخ‌هایی به شکل توابع نمایی به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (6)$$

که در آن، ω بسامد طبیعی سازه است. معادله‌ی مشخصه‌ی ۶، با یک معادله‌ی چندجمله‌ی n درجه متناظر است که از حل آن، n مقدار متمایز برای بسامد حاصل می‌شود و هر بسامد نظیر یک شکل مود است. هرگونه تغییر در خواص ماده، از جمله مدول کشسانی، در ماتریس‌های جرم و سختی سازه تأثیرگذار است؛ و در نتیجه، آثار آن در مشخصات مودال (بسامدها و شکل‌های مود ارتعاشی) لحاظ

۲. تبدیل موجک

تبدیل موجک یک تبدیل ریاضی پردازشی سیگنال‌هاست که مشخصات بسامدی سیگنال را در یک بازه‌ی زمانی کوتاه استخراج می‌کند و نشان می‌دهد که با گذشت زمان، چگونه تغییر می‌کند. تبدیل موجک، مجموعه‌ی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن بسامدی تغییر می‌کند و اجزاء بسامدی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آیند.^[۳۸] در یک تقسیم‌بندی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)^{۱۹} و تبدیل موجک گسسته (DWT)^{۲۰} تعریف می‌شوند که در نوشتار حاضر، با توجه به اینکه نوع پیوسته‌ی تبدیل موجک مد نظر بوده است، از بیان مبانی تئوری نوع گسسته‌ی آن صرف نظر شده است. تبدیل موجک پیوسته‌ی سیگنال $f(t)$ در بازه‌ی $-\infty$ تا ∞ مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:^[۳۹، ۴۰]

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

که در آن، s و τ به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند و ψ تابع موجک است. مقیاس‌های بالا ($s > 1$) متناظر با جزئیات^{۲۱} و مقیاس‌های پایین ($s < 1$) متناظر با تقریب‌های^{۲۲} سیگنال هستند. در رابطه‌ی ۱، تابع موجک باید این ویژگی‌ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد:^[۴۰، ۴۱]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

۲. انرژی آن محدود باشد:^[۴۱، ۴۰]

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (3)$$

۳. باید در رابطه‌ی ۴ صدق کند:^[۴۰-۴۲]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega^{-1} |\Psi(\omega)|^2 d\omega < +\infty \quad (4)$$

که در آن، Ψ تبدیل فوری ψ و ω بیانگر بسامد هستند. رابطه‌ی ۲ پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه‌ی ۳، به این معنی است که بیشترین انرژی موجک برای یک بازه‌ی زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود.^[۴۱]

۳. مدل‌سازی اجزاء محدود صفحه‌ی فولادی

صفحه‌ی فولادی (مطابق شکل ۱) به ابعاد 0.8×0.6 متر با ضخامت ۲ میلی‌متر و موقعیت‌های آسیب مربعی به طول ضلع ۵ سانتی‌متر به شماره‌های ۱ تا ۵ در نرم‌افزار آباکوس^{۲۳} با مشخصات مکانیکی مدول کشسانی ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۳ و شرایط لبه‌ی آزاد با استفاده از المان Shell۳D مدل‌سازی شده است. مشخصات آسیب در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار ۱۰٪ کاهش مدول کشسانی فولاد در هر یک از موقعیت‌های آسیب به عنوان خسارت در نظر گرفته شده است. در این صورت، مدول کشسانی موقعیت‌های آسیب برابر با ۰/۹ مدول کشسانی نواحی بدون آسیب خواهد بود.

جدول ۲. بسامدهای ۶ مود اول حالت‌های سالم و آسیب (Hz).

شماره‌ی مود	حالت آسیب			حالت سالم
	D۳	D۲	D۱	
	بسامد طبیعی (Hz)			
۱	۱۳/۵۸۸	۱۳/۵۹۴	۱۳/۵۹۵	۱۳/۶۰۸
۲	۱۶/۲۰۲	۱۶/۲۱۲	۱۶/۲۰۹	۱۶/۲۲۵
۳	۳۰/۱۳۵	۳۰/۱۵۷	۳۰/۱۴۷	۳۰/۱۸۱
۴	۳۲/۲۱۳	۳۲/۲۱۳	۳۲/۲۳۰	۳۲/۲۴۷
۵	۳۹/۳۷۰	۳۹/۳۷۰	۳۹/۳۸۹	۳۹/۴۰۹
۶	۴۷/۴۷۷	۴۷/۴۷۸	۴۷/۵۲۶	۴۷/۵۷۵

مقادیر زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود محاسبه و در جدول‌های ۳ الی ۵ گزارش شده‌اند. در صورتی که هیچ‌گونه آسیبی در صفحه اتفاق نیفتاده باشد، مقدار زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه برای تمامی مودهای متناظر صفر محاسبه می‌شود. به عبارتی دیگر، بردارهای جابه‌جایی درجه‌های آزادی اولیه و ثانویه‌ی مود \hat{z}_m بر هم منطبق خواهند شد؛ در غیر این صورت، مقادیر زاویه‌ی غیر صفر محاسبه می‌شوند. مقادیر قطری گزارش شده در جدول‌های ۳ الی ۵، غیر صفر هستند که به دلیل وجود آسیب در صفحه است.

۵. شناسایی آسیب

از قابلیت‌های تبدیلات موجک، شناسایی موقعیت‌های مکانی یا زمانی است که در آنجا، سیگنال مورد نظر دچار ناپیوستگی‌های ناگهانی می‌شود. بررسی‌های اولیه‌ی انجام شده نشان می‌دهند که ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک سیگنال‌های فرضی، اطلاعات مفیدی برای شناسایی نقاط ناپیوستگی دارند. بنابراین، در نوشتار حاضر، برای شناسایی آسیب در صفحه، الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی ارائه شده است که با استفاده از شاخص‌های پیشنهادی، موقعیت‌های آسیب با ایجاد قله‌های برآمده از بی‌نظمی قابل شناسایی است.

۱.۵. الگوریتم تشخیص آسیب

گام ۱: فراخوانی سیگنال‌های اولیه و ثانویه‌ی شکل مود به محیط نرم‌افزار متلب؛
گام ۲: درون‌یابی سیگنال‌های فراخوانی شده بر مبنای طول و عرض صفحه (L و W)؛

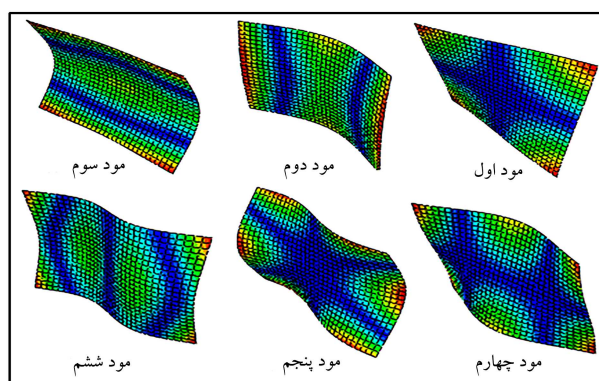
گام ۳: انجام تحلیل موجک پیوسته‌ی یک‌بعدی سیگنال‌های دوبعدی حاصل از گام ۲ و تشکیل ماتریس‌های شاخص‌های آسیب DI-L و DI-W (پیوست ۱)؛
گام ۴: اختصاص درایه‌های ماتریس شاخص‌های تشخیصی به درجه‌های آزادی صفحه‌ی فولادی و شناسایی آسیب (پیوست ۱).

۲.۵. شناسایی موقعیت‌های آسیب

در نرم‌افزار متلب (R2021a)، کدنویسی‌ها برای محاسبه‌ی شاخص‌های تشخیصی در دو بُعد طول و عرض صفحه انجام شده است (پیوست‌های ۱ و ۲) و مقادیر محاسبه شده به درجه‌های آزادی نظیرشان در صفحه‌ی فولادی اختصاص داده شده‌اند. در شکل‌های ۳ الی ۵، نتایج نموداری مربوط به شاخص‌های تشخیصی DI-L سه مود اول وضعیت‌های آسیب D۱، D۲ و D۳ ترسیم شده است. همچنین، در شکل‌های ۶ الی ۸، نتایج نموداری سه مود اول وضعیت‌های آسیب براساس شاخص‌های تشخیصی DI-W مشاهده می‌شوند. ضرایب موجک تعریف‌کننده‌ی شاخص‌های تشخیصی بر مبنای استفاده از تابع موجک coif5 محاسبه شده‌اند.

۳.۵. بررسی تغییر شرایط گیرداری لبه‌ها

روش تشخیص آسیب پیشنهادی برای صفحه با شرایط گیرداری لبه‌ها به صورت آزاد بررسی و نتایج آشکارسازی مطلوب حاصل شده است. اما صفحات فولادی به عنوان دیوارهای برشی دارای شرایط گیرداری لبه‌ی غیرآزاد هستند؛ بنابراین، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، تشخیص و تعیین موقعیت آسیب در صفحه با شرایط



شکل ۲. شکل‌های مود صفحه‌ی فولادی سالم.

می‌شود؛ بنابراین، از بررسی پاسخ‌ها می‌توان پایش سلامتی در سازه را مورد پژوهش قرار داد. تحلیل مودال صفحه‌ی فولادی با وضعیت‌های سلامتی بدون آسیب و با آسیب (حالت‌های آسیب D۱ تا D۳) با در نظر گرفتن ابعاد مش تحلیلی به طول ۲/۵ سانتی‌متر در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. در جدول ۲، مقادیر بسامدی ۶ مود اول ارائه و در شکل ۲، شکل‌های مود نظیر هر بسامد وضعیت سالم مشاهده می‌شود که مطابق آن، در اثر آسیب، مقدار بسامد مودهای مختلف حالت‌های آسیب از بسامد متناظر از حالت سالم کمتر است. همچنین، مقادیر بسامدی حالت‌های آسیب D۱ و D۲ از مقادیر بسامدی حالت آسیب D۳ کمتر است؛ به عبارتی، با اضافه شدن موقعیت‌های جدید آسیب، مقادیر بسامدی کاهش یافته است.

۲.۴. بررسی اثر آسیب در زاویه‌ی بین شکل‌های مود ارتعاشی

یکی از مفاهیمی که به کمک آن می‌توان تأثیر آسیب در جابه‌جایی درجه‌های آزادی شکل‌های مود ارتعاشی سازه را مطالعه و بررسی کرد، زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی است که عبارت از زاویه با ابتدای مشترک بردارهای شکل مودهای اولیه و ثانویه است که مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$\theta_{i,j}^{u,d} = \frac{180^\circ}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\left(\sum_{k=1}^n \phi_{i,k}^u \times \phi_{j,k}^d \right)}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \left(\phi_{i,k}^u \right)^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n \left(\phi_{j,k}^d \right)^2 \right)}} \right) \quad (7)$$

که در آن، ϕ_i^u و ϕ_j^d به ترتیب شکل اولیه‌ی مود \hat{z}_m و شکل ثانویه‌ی مود \hat{z}_m هستند.

جدول ۳. زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۱.

شماره مود وضعیت بدون آسیب	زاویه بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)					
	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۸۹/۹۹۲	۸۹/۹۷۸	۱۷۹/۹۷۲	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۳۴۶	۰/۰۳۱	۸۹/۹۸۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۵۷	۹۰/۳۲۷	۸۹/۹۹۶	۳
۸۹/۹۵۴	۹۰/۰۶۷	۰/۰۸۶	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۸۹/۰۵۴	۱۷۹/۹۰۸	۹۰/۰۶۸	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۱۷۹/۸۹۵	۸۹/۱۶۶	۸۹/۹۵۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

جدول ۴. زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۲.

شماره مود وضعیت بدون آسیب	زاویه بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)					
	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۱۰	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۳۳۰	۰/۰۲۵	۹۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۳۴	۹۰/۳۳۹	۹۰	۳
۹۰	۹۰	۰/۰۲۲	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۹۱/۰۰۵	۰/۱۱۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۰/۱۳۳	۹۰/۷۸۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

جدول ۵. زاویه بین شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی (درجه) مربوط به وضعیت آسیب D۳.

شماره مود وضعیت بدون آسیب	زاویه بین وضعیت‌های سالم و آسیب (درجه)					
	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۱۳	۱
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰/۳۴۳	۰/۰۲۱	۹۰	۲
۹۰	۹۰	۹۰	۰/۰۵۳	۹۰/۳۲۹	۹۰	۳
۹۰	۹۰	۰/۰۲۲	۹۰	۹۰	۹۰	۴
۹۱/۰۰۵	۰/۱۱۲	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۵
۰/۱۳۲	۹۰/۷۸۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۶

مدهای مختلف انجام شده است، درستی این قضیه تأیید شده است. به عنوان مثال، در شکل ۱۱، نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D۳ با تعریف مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب (۱)، (۳)، (۴)، و (۵) و (الف) ۲۰٪ و (ب) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فقط، ارتفاع قله‌های بی‌نظمی ایجاد شده در موقعیت آسیب ۲ با افزایش مقدار خسارت در موقعیت مذکور افزایش پیدا کرده است.

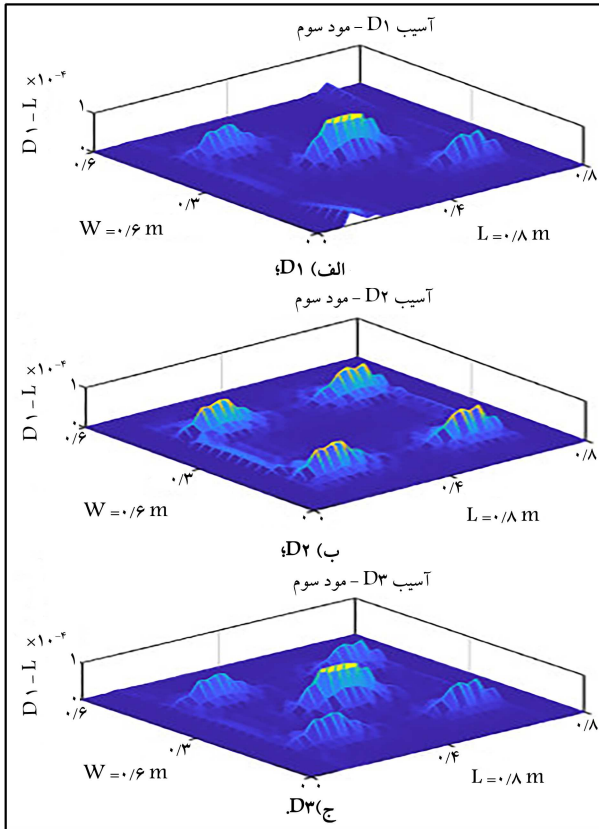
۵.۵. شناسایی آسیب با دیگر توابع موجک

یکی از مشکلاتی که در روش‌های تشخیص آسیب بر پایه تبدیلات موجک وجود دارد، این است که با کدام تابع موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب را به درستی

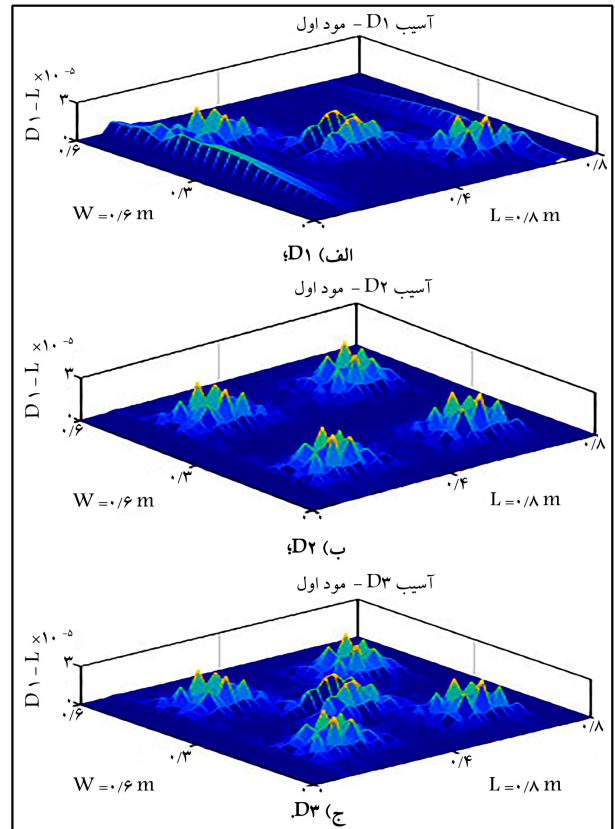
گیرداری کامل لبه‌ها در مود اول بررسی و مشاهده شد که با استفاده از روش اخیر می‌توان موقعیت‌های آسیب در صفحه را با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها شناسایی کرد. نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی DI-L و DI-W مود اول (شکل ۹) برای وضعیت آسیب D۳ با مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

۴.۵. بررسی اثر تغییر شدت آسیب در شاخص‌های تشخیص آسیب

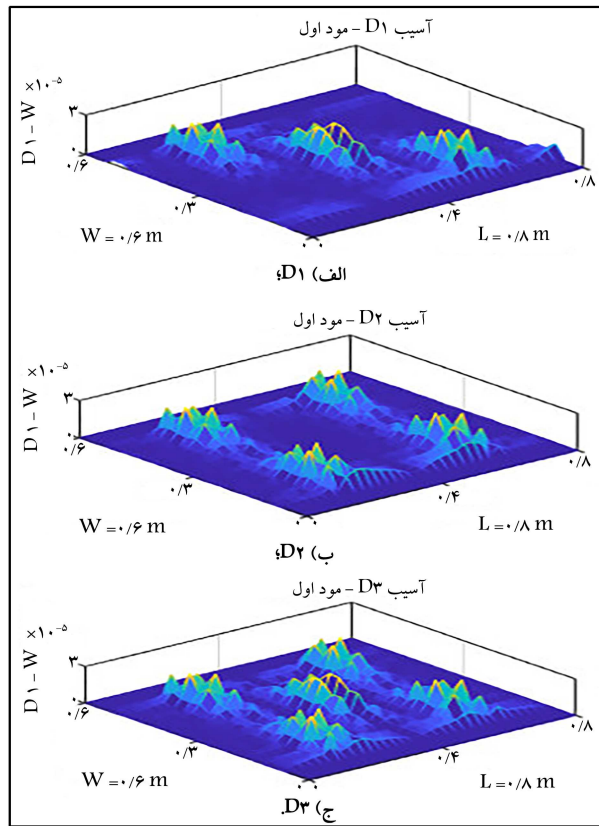
شاخص‌های تشخیصی آسیب معرفی شده در نوشتار حاضر به مقدار خسارت رخ داده در موقعیت‌های آسیب حساس هستند و با افزایش مقدار خسارت رخ داده در یک موقعیت آسیب، ارتفاع قله‌های ایجاد شده از بی‌نظمی‌ها، در همان موقعیت آسیب افزایش می‌یابد. در بررسی‌های تشخیص آسیب که در



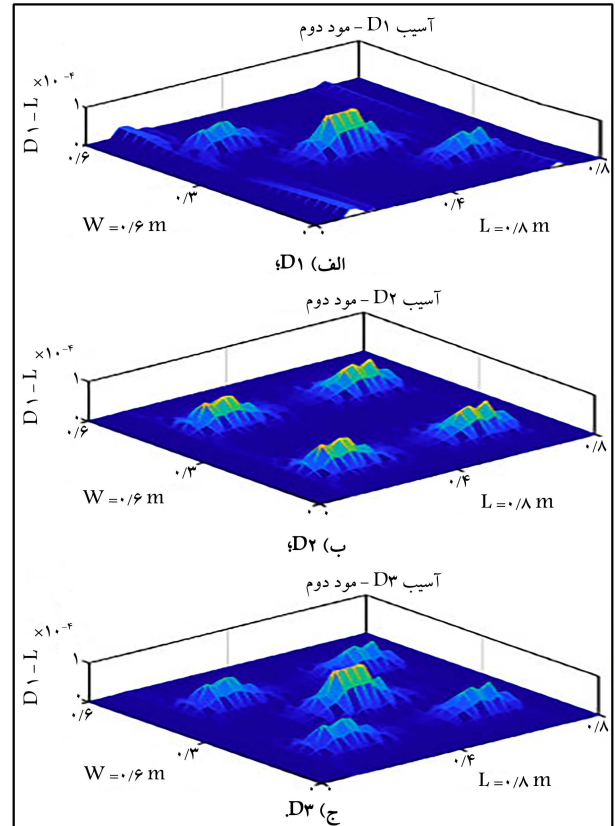
شکل ۵. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود سوم برای وضعیت آسیب.



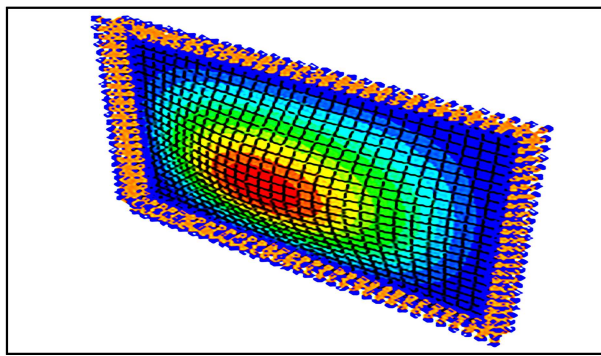
شکل ۳. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب.



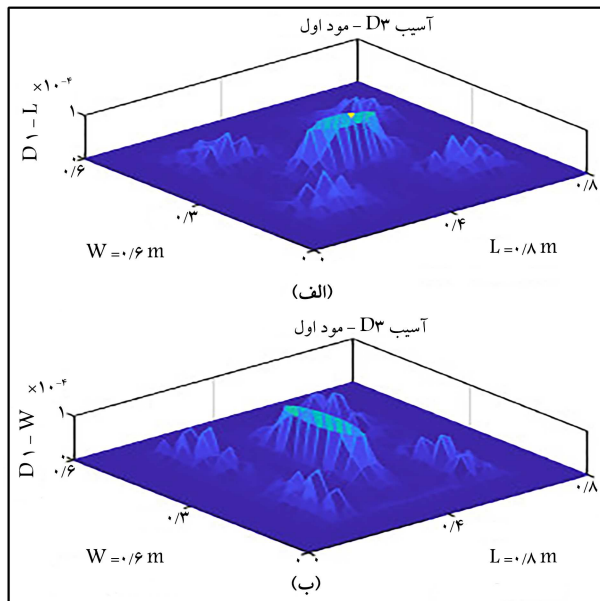
شکل ۶. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-W مود اول برای وضعیت آسیب.



شکل ۴. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود دوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۹. شکل مود اول صفحه‌ی فولادی سالم با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها.

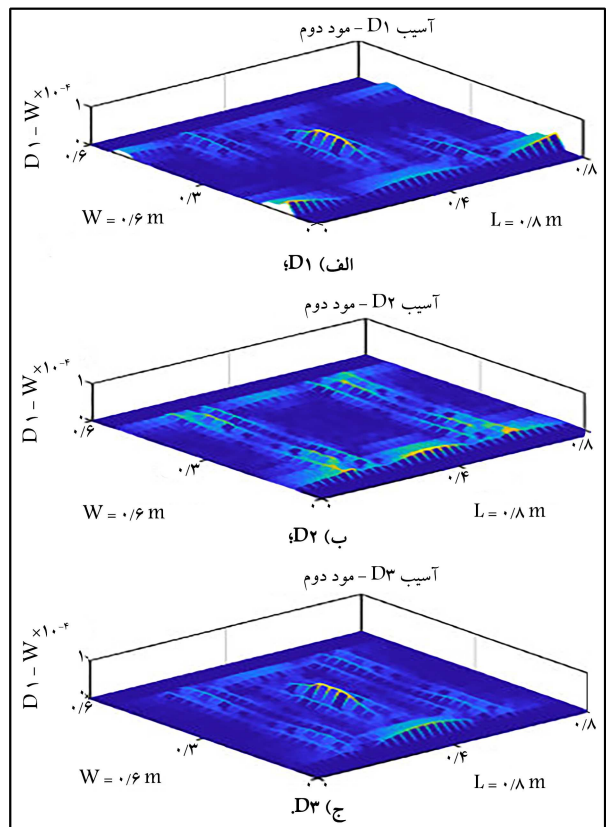


شکل ۱۰. نمودار شاخص‌های تشخیصی الف) $DI-L$ و ب) $DI-W$ مود اول وضعیت آسیب $D3$ با شرایط گیرداری کامل لبه‌ها.

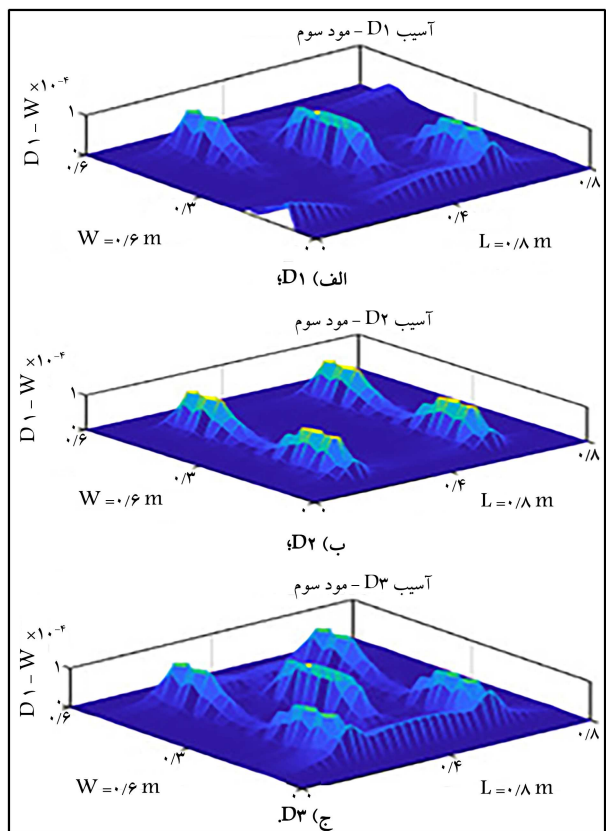
شناسایی کرد؛ به عبارتی، انتخاب تابع موجک مناسب به عنوان یکی از چالش‌های روش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر تبدیلات موجک مطرح است. در نوشتار حاضر، فرایند آشکارسازی موقعیت‌های آسیب در صفحه با توابع موجک متعددی بررسی و مشاهده شده که می‌توان با استفاده از شمار زیادی از توابع موجک، موقعیت‌های آسیب را به درستی شناسایی کرد که این موضوع بر قابلیت اعتماد تشخیصی روش پیشنهادی نوشتار حاضر می‌افزاید. به عنوان مثال، در شکل ۱۲، نتایج نموداری شاخص‌های تشخیصی $DI-L$ مود اول برای وضعیت آسیب $D3$ با توابع موجک $rbio5/5$, $bior5/5$, $sym4$ و $db8$ مشاهده می‌شود که تأییدی بر درستی مطالب بخش حاضر است.

۶. نتیجه‌گیری

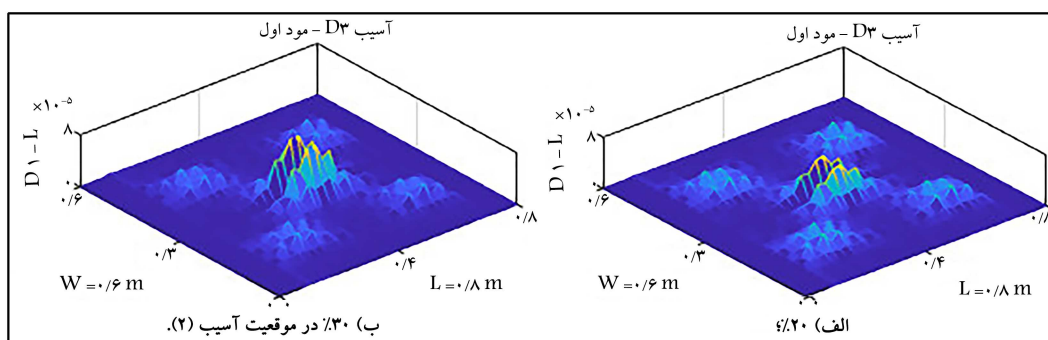
پایش سلامت در سازه‌های مهندسی، از زمینه‌های پژوهشی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است که همواره شناسایی و تعیین موقعیت‌های آسیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل آن در سازه‌ها مطرح بوده است. امروزه استفاده از صفحه‌های جدار نازک فولادی در صنعت ساختمان، به ویژه به عنوان دیوار برشی فولادی، رو



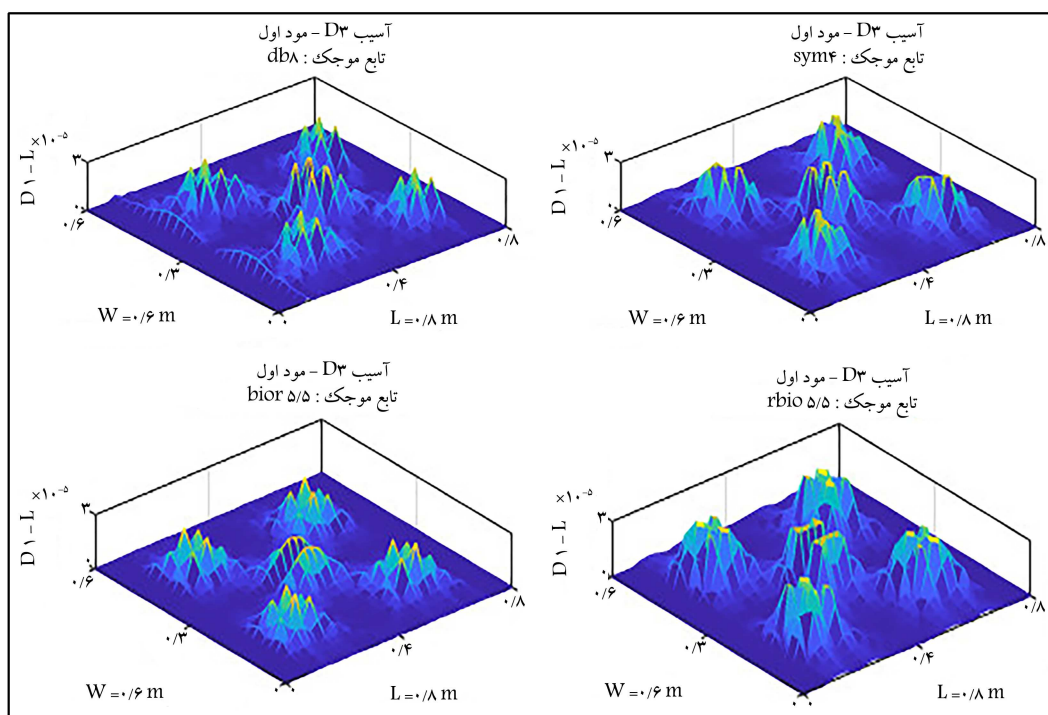
شکل ۷. نمودار شاخص‌های تشخیصی $DI-W$ مود دوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۸. نمودار شاخص‌های تشخیصی $DI-W$ مود سوم برای وضعیت آسیب.



شکل ۱۱. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D^۳ با مقدار خسارت ۱۰٪ در موقعیت‌های آسیب (۱)، (۳)، (۴) و (۵) و مقدار خسارت (الف) ۲۰٪ و (ب) ۳۰٪ در موقعیت آسیب (۲).



شکل ۱۲. نمودار شاخص‌های تشخیصی DI-L مود اول برای وضعیت آسیب D^۳ با استفاده از توابع موجک db8، sym4، bior5/5 و rbio5/5.

۳. در اثر آسیب، زاویه‌ی بین شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی غیرصفر است؛ به عبارتی، بردار جابه‌جایی مودال درجه‌های آزادی متناظر از دو وضعیت اولیه و ثانویه بر هم انطباق ندارند.

۴. اندازه‌ی زاویه‌ی بین شکل اولیه‌ی مود i و شکل ثانویه‌ی مود j ($i \neq j$) برابر با مقدار تقریبی 90° درجه محاسبه شده است؛ که ویژگی اصلی تعامد مودهای متفاوت است. در صورتی که آسیب در سازه وجود نداشته باشد، ماتریس‌های زاویه (جدول‌های ۳ تا ۵) به صورت کاملاً متقارن محاسبه می‌شوند.

برای شناسایی موقعیت‌های محتمل آسیب در صفحه، یک الگوریتم تشخیصی بر مبنای استفاده از شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی دوتعدی و تبدیل موجک پیوسته یک‌بعدی ارائه شده است. خروجی الگوریتم پیشنهادی، ماتریس‌های شاخص تشخیصی DI-W و DI-L هستند که:

الف) از اختصاص مقادیر درایه‌ی هر یک از ماتریس‌های ذکر شده به درجه‌های

به افزایش است. با توجه به گسترش آسیب‌های موضعی در صفحه‌های فولادی و انتقال آن‌ها به دیگر المان‌ها امکان وقوع آسیب‌های کلی در سازه وجود دارد؛ بنابراین، شناسایی آسیب‌های موضعی در صفحه‌ها دارای اهمیت است. در نوشتار حاضر، صفحه‌ی فولادی با وضعیت‌های با و بدون آسیب در نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی و اطلاعات مودال شامل بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود ارتعاشی استخراج شده است. بررسی‌ها نشان داده است که:

۱. در تمامی مودها (به دلیل وجود آسیب)، مقدار بسامد وضعیت‌های آسیب از مقدار بسامد متناظر با وضعیت بدون آسیب کمتر بوده است.

۲. از مقایسه‌ی مقادیر بسامدی وضعیت‌های آسیب D^۱ و D^۲ با مقادیر بسامدی متناظر با وضعیت آسیب D^۳ مشخص می‌شود که با اضافه شدن یک یا چند موقعیت آسیب به یک وضعیت آسیب قبلی، تغییر کاهشی بیشتری در مقادیر بسامد رخ می‌دهد.

شناسایی موقعیت‌های آسیب رضایت‌بخش نیست و حال آنکه با استفاده از DI-L، موقعیت‌های مختلف آسیب به درستی شناسایی شده‌اند.

ج) مقدار بی‌نظمی‌های ایجاد شده در نمودار شاخص‌های تشخیصی در یک موقعیت آسیب به مقدار خسارت موجود در همان موقعیت آسیب وابسته است و با افزایش مقدار خسارت، ارتفاع قله‌های بی‌نظمی در آن موقعیت آسیب افزایش می‌یابد.

د) طبق الگوریتم پیشنهادی با استفاده از توابع موجک متعددی می‌توان موقعیت‌های آسیب در صفحه را با شرایط مختلف گیرداری لبه‌ها شناسایی کرد.

آزادی نظیرشان در صفحه‌ی فولادی، قله‌هایی از بی‌نظمی‌ها و اغتشاش‌ها در موقعیت‌های آسیب ایجاد می‌شوند که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های آسیب را به درستی شناسایی کرد.

ب) مقایسه‌ی نتایج نموداری حاصل از ترسیم ماتریس‌های شاخص‌های تشخیصی نشان می‌دهد که شاخص‌های تشخیصی امتداد طولی یا DI-L نسبت به شاخص‌های تشخیصی امتداد عرضی یا DI-W عملکرد شناسایی مطابقی ارائه می‌دهد، به طوری که در مود دوم مشاهده می‌شود با استفاده از DI-W.

پانویس‌ها

1. Wavelet Transform
2. Katunin
3. Zhong & Oyadji
4. Stationary Wavelet Transform
5. Xu
6. Two-Dimensional Directional Gaussian Wavelets
7. Laser Scanned Operating Deflection Shapes
8. Lee
9. Continuous Relative Wavelet Entropy Method
10. Quincunx
11. Patel
12. Yang & Oyadji
13. Modal Frequency Surface
14. Concrete-Filled Steel Tube (CFST)
15. Wang
16. Hanteh
17. Ma
18. Sun
19. Continuous Wavelet Transform (CWT)
20. Discrete Wavelet Transform (DWT)
21. Details
22. Approximations
23. Abaqus

منابع (References)

1. Zhou, S., Tang, B. and Chen, R. "Comparison between non-stationary signals fast fourier transform and wavelet analysis", *Intelligent Interaction and Affective Computing*, International Asia Symposium, IEEE (2009).
2. Katunin, A. "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, **45**(2), pp. 41-52 (2010).
3. Zhong, S. and Oyadji, S.O. "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, **18**(2), pp. 169-190 (2011).
4. Xu, W., Radzienski, M., Ostachowicz, W. and Cao, M. "Damage detection in plates using two-dimensional direction Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes", *Structural Health Monitoring*, **12**(5-6), pp. 457-468 (2013).
5. Lee, S.G., Yun, G.J. and Shang, S. "Reference-free damage detection for truss bridge structures by continuous relative wavelet entropy method", *Structural Health Monitoring*, **13**(3), pp. 1-14 (2014).
6. Katunin, A. "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**(1), pp. 251-261 (2015).
7. Patel, S.S., Chourasia, A., Panigrahi, S. and et al. "Damage identification of RC structures using wavelet transformation", *Procedia Engineering*, **144**, pp. 336-342 (2016).
8. Naderpour, H. and Fakharian, P. "A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(7), pp. 2859-2867 (2016).
9. Fakharian, P. and Naderpour, H. "Damage severity quantification using wavelet packet transform and peak picking method", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **27**(1), p. 04021063 (2022).
10. Abbasnia, R., Mirzaei, B. and Yousefbeck, S. "A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams", *Journal of Vibroengineering*, **18**(3), pp. 1497-1513 (2016).
11. Yang, C. and Oyadji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Computers & Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
12. Noori, M., Wang, H., Altabeyc, W.A. and et al. "A modified wavelet energy rate-based damage identification method for steel bridges", *Scientia Iranica*, **25**(6), pp. 3210-3230 (2018).

13. Rezaifar, O., Younesi, A., Gholhaki, M. and et al. "Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(4), pp. 93-106 (2018).
14. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", *Magazine of Civil Engineering*, **85**, pp. 136-145 (2019).
15. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Esfandiari, A. "Damage detection in concrete filled tube columns based on experimental modal data and wavelet technique", *Mechanics of Advanced Composite Structures*, **7**(2), pp. 245-254 (2020).
16. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Active interface debonding detection of a concrete filled tube (CFT) column by modal parameters and continuous wavelet transform (CWT) technique", *Structural Monitoring and Maintenance*, **8**(1), pp. 69-90 (2021).
17. Wang, S., Li, J., Luo, H. and et al. "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", *Engineering Structures*, **178**, pp. 506-520 (2019).
18. Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefbeik S. and et al. "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), pp. 1-20 (2019).
19. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "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*, **8**(5), pp. 198-214 (2021).
20. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(8), pp. 289-309 (2021).
21. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalehahman, A. and et al. "Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method", *Journal of Vibration and Sound*, **10**(20), pp. 144-156 (2022).
22. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "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*, **8**(9), pp. 166-183 (2021).
23. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Wavelet-based damage detection of steel beam-structures", *Journal of Structure & Steel*, **15**(33), pp. 15-27 (2021).
24. Rezaifar, O., Gholhaki, M., Khanahmadi, M. and et al. "A review of structural health monitoring and damage detection using wavelet transform: The case study of damage detection in cantilever beams", *Journal of Vibration and Sound*, **11**(21), pp. 157-17 (2022).
25. Khanahmadi, M., Gholhaki, M. and Rezaifar, O. "Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data", *Journal of Modeling in Engineering*, **18**(63), pp. 51-64 (2021).
26. Khanahmadi, M., Khademi-Kouhi, M. and Azizi Rashid, F. "A finite element analytical study of the effect of axial load on structural modal properties in a column", *5th International Conference on Civil, Architecture and Urbanity Engineering* (2021).
27. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. "Curvature-based damage detection in a column under the effect of axial load", *Journal of Structure & Steel*, **16**(35), pp. 65-75 (2022).
28. Khanahmadi, M., Pouraminian, M., Mohammady Garfamy H. and et al. "Damage detection and identification in a column under the effect of axial load using modal properties and mode shapes-based detection index", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(4.2), pp. 53-62 (2023).
29. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "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*, **37**(2.2), pp. 131-147 (2021).
30. Hanteh, M. and Rezaifar, O. "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
31. Ma, Q., Solis, M. and Galvin, P. "Wavelet analysis of static deflections for multiple damage identification in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **147**, pp. 1-14 (2021).
32. Sun, G., Wang, Y., Luo, Q. and et al. "Vibration-based damage identification in composite plates using 3D-DIC and wavelet analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **173**, p. 108890 (2022).
33. Mamazizi, A., Khanahmadi, M., and Nobakht Vakili, K. "Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(3.1), pp. 53-63 (2022).
34. Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. "Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using wavelet analysis analytical method", *Modares Civil Engineering Journal*, **22**(1), pp. 129-142 (2023).
35. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Rezaifar, O. and et al. "Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis", *Civil Infrastructure Researches*, **8**(2), pp. 173-183 (2023).
36. Gholhaki, M., Karimi, M. and Pachideh, G. "Investigation of subpanel size effect on behavior factor of stiffened steel plate shear wall", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **5**(4), pp. 73-87 (2019).
37. Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezaifar, O. and et al. "Specification of response modification factor for steel plate shear wall by incremental dynamic analysis method [IDA]", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(2), pp. 211-224 (2019).
38. Mallat, S. "A wavelet tour of signal processing: the sparse way", Academic Press (2008).
39. Gao, R.X., and Yan, R. "Wavelets: Theory and applications for manufacturing", Springer, Science & Business Media (2010).

40. Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of Solids and Structures*, **40**(13-14), pp. 3557-3569 (2003).
41. Zhong, Sh. and Olutunde Oyadiji, S. "Detection of

cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers & Structures*, **89**(1-2), pp. 127-148 (2011).

42. Hansang, K. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).

پیوست

پیوست ۱. (کد متلب الگوریتم تشخیص آسیب):

```
k\ = floor(n\/\);
DIL(:, \ : k\ + \) = 0; DIL(:, n\ - k\ : n\) = 0
for j = \ : n\
if Teta(Ui(:, j), Di(:, j)) > 90
DIW(:, j) = abs(cwt(Ui(:, j) + Di(:, j), scale, wname));
else
DIW(:, j) = abs(cwt(Ui(:, j) - Di(:, j), scale, wname));
end
end
k\ = floor(m\/\);
DIW(\ : k\ + \, :) = 0; DIW(m\ - k\ : m\, :) = 0
%.Step\
figure(\); surf(X\, Y\, DIL)
figure(\); surf(X\, Y\, DIW)
%.End
```

پیوست ۲. (کد متلب تابع Teta):

```
function [z] = Teta(X, Y)
z = acosd(dot(X, Y)/(norm(X) * norm(Y)))
end
```

```
%.Step\
U = xlsread('Undamaged Signal.xlsx', 'Sheet\');
D = xlsread('Damaged Signal.xlsx', 'Sheet\');
%.Step\
[m, n] = size(U);
x\ = linspace(0, L, n); y\ = linspace(0, W, m); N = \;
x\ = linspace(0, L, N * n); y\ = linspace(0, W, N * m);
[X\, Y\] = meshgrid(x\, y\);
[X\, Y\] = meshgrid(x\, y\);
{
Ui = interp\ (X\, Y\, U, X\, Y\, 'spline');
Di = interp\ (X\, Y\, D, X\, Y\, 'spline');
%.Step\
[m\, n\] = size(Ui);
DIL = zeros(m\, n\); DIW = zeros(m\, n\);
wname = 'coif\'; scale = \;
{
for i = \ : m\
if Teta(Ui(i,:), Di(i,:)) > 90
DIL(i,:) = abs(cwt(Ui(i,:) + Di(i,:), scale, wname));
else
DIL(i,:) = abs(cwt(Ui(i,:) - Di(i,:), scale, wname));
end
end
end
```