

شناسایی و تشخیص آسیب جداشدگی در ستون کامپوزیت CFST با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال

آرمان مام‌عزیزی* (استادیار)

محتمم خان احمدی (دانشجوی دکتری)

گاهران نوبخت وکیلی (مربی)

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۱ (ص. ۳۰-۵۳، شماره ۱/۳، ص. ۳۸-۲، دوری ۲)

شناسایی آسیب در سازه‌ها از اهداف اولیه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها است. امروزه استفاده از ستون‌های کامپوزیت CFST در صنعت ساختمان، به‌ویژه سازه‌های ساختمانی بلندمرتبه، رو به افزایش است. در ستون‌های کامپوزیت CFST، جداشدگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی به‌عنوان رایج‌ترین نوع آسیب مطرح است، که در نوشتار حاضر به تأثیر آن بر خواص دینامیکی مودال و همچنین، شناسایی منطقه‌ی آسیب جداشدگی پرداخته شده است. جداشدگی به عمق ۳ میلی‌متر به صورت کاهش سختی بتن در اتصال با جداری فولادی تعریف و ستون تحت تحلیلی بسامدی واقع شده است. تفاوت در مقادیر بسامدی و همچنین، میزان همبستگی مودال کمتر از ۱ به دلیل وجود آسیب مشاهده شده است. برای شناسایی ناحیه‌ی جداشدگی، شاخصی بر مبنای ضرایب جزئیات حاصل از تحلیلی موجک گسسته‌ی شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه و کمینه‌ی نسبی شاخص آسیب در تمامی مودها در موقعیت‌های جداشدگی اتفاق افتاده است.

واژگان کلیدی: پایش سلامتی سازه، شناسایی آسیب جداشدگی، تحلیلی بسامدی، معیار همبستگی مودال، تحلیلی موجک.

۱. مقدمه

آگاهی از وضعیت سلامتی سازه‌ها، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. بی‌شک وضعیت سلامتی سازه‌ها بسیار مهم است و در صورت تشخیص وجود آسیب، محل و شدت آن می‌تواند با ترمیم محل آسیب و یا تعویض المان‌های آسیب‌دیده، حتی‌الامکان از وقوع خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری کرد. ابداع و توسعه‌ی انواع مختلف روش‌های پردازش و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، فاصله‌ی بین مفاهیم و کاربردهای عملی را کاهش داده و این امکان را فراهم ساخته است که با استفاده از روش‌های پایش سلامتی قابل اعتماد، بتوان رفتار سازه‌ها را در مراحل ساخت و بهره‌برداری کنترل کرد.

یکی از روش‌های کارآمد تشخیص آسیب سازه‌ی، تحلیلی پاسخ‌های سازه به طور هم‌زمان در دو حوزه‌ی زمان و بسامد، استفاده از تبدیل ریاضی توانمندی چون تبدیل موجک (WT)^۱ است که با استفاده از آن، اطلاعات بیشتری از پاسخ تحلیلی شده‌ی سازه بر اساس توانایی آن در محلی‌سازی پاسخ در دو حوزه‌ی زمان و بسامد حاصل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۳۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۲۸

DOI:10.24200/J30.2022.59903.3075

a.mamazizi@uok.ac.ir
m.khanahmadi@uok.ac.ir
k.vakili@uok.ac.ir

می‌شود.^[۱] بر این اساس، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی شناسایی آسیب بر مبنای تبدیلات موجک انجام شده است که در ادامه، تاریخچه‌ی کاربردهای تبدیل موجک در حوزه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها ارائه شده است. کاتونین^۲ (۲۰۱۰)،^[۲] با استفاده از تبدیل موجک و داده‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های چندگانه پرداخت و دریافت که برای شناسایی محل ترک، حذف نوفه از ضرایب جزئیات موجک لازم است. ژانگ و ایادیجی^۳ (۲۰۱۱)،^[۳] با استفاده از تبدیل موجک ایستا (SWT)^۴ و داده‌های مودال به آشکارسازی ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند و نشان دادند که از تحلیلی موجک ایستای داده‌های شکل مود، می‌توان محل آسیب را شناسایی کرد. ژو^۵ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۴] با به کارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بُعدی^۶ و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر^۷ به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند. لی^۸ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۵] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته^۹ به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی، قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرابایی را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب استفاده شود. لی و هو^{۱۰}

(۲۰۱۴).^[۶] به شناسایی آسیب زیرساختاری با در نظر گرفتن آسیب به صورت کاهش سختی در سازه‌ی قاب دوعده‌ی ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه‌ی موجک پرداختند و موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به‌درستی شناسایی کنند. کاتونین (۲۰۱۵)،^[۷] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکانکس^{۱۱} تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای آسیب‌دیده‌ی صفحات کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که با استفاده از موجک‌های مذکور، مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۸] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتنی پرداختند و با استفاده از تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده‌ی تراز هر طبقه برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه، از جمله جرم، وجود دارد. عباس‌نیا^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] در پژوهشی با استفاده از روش دو مرحله‌ی مبتنی بر تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرها پرداختند و با استفاده از تبدیل موجک، محل‌های آسیب را شناسایی کردند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده‌ی آسیب کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی، موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌های آسیب شدند. رحامی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۰] با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته‌ی موجک به تشخیص خرابی در سکوها ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت، حتی در آسیب‌های با شدت کم، به‌طور محسوسه با شدت خسارت‌های وارده به سکوا بسته است. یانگ و ایادیچی^{۱۴} (۲۰۱۷)،^[۱۱] روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال ارائه کردند و نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها، باعث اختلال در سطح بسامد مودال شده و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص کرد. نوری^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۲] به شناسایی آسیب سازه‌های پل فولادی با روشی مبتنی بر نرخ انرژی موجک پرداختند و دریافته‌اند که با استفاده از شاخص پیشنهادی ایشان می‌توان شناسایی آسیب موفق‌تری را انجام داد. رضایی‌فرو و همکاران (۲۰۱۸-۲۰۲۰)،^[۱۳] به شناسایی آسیب جدارشدگی در ستون‌های فولادی پرشده با بتن (CFST)^{۱۶} براساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آسیب جدارشدگی توسط یک لایه‌ی پلی استایرن نازک در یکی از جوه ستون بین هسته‌ی بتنی و جداره‌ی فولادی شبیه‌سازی شده و با استفاده از تبدیل موجک، موفق به شناسایی محل جدارشدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی شدند.

وانگ^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۴] برای شناسایی آسیب سازه‌های تونلی زیرزمینی، یک تبدیل موجک جدید بر اساس روش بردار نیروی باقیمانده پیشنهاد و برای مدل المان محدود تونل با انواع آسیب استفاده کردند، که نتایج شناسایی موفق به‌دست آمد. حسینی واعظ و عارف‌زاده (۲۰۱۹)،^[۱۵] با استفاده از تحلیل تبدیل موجک به مقایسه‌ی داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند و موفق به شناسایی محل‌های آسیب شدند و دریافته‌اند که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از داده‌های استاتیکی، عواملی چون نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری، در میزان ضرایب موجک تأثیرگذار است. میرزایی^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۶] با روشی مشابه روش عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] به شناسایی آسیب در سازه‌ی خرابی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند و به این طریق، المان‌های آسیب‌دیده، شناسایی و مقدار آسیب در هر یک از آن‌ها محاسبه شدند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۷] با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود

صفحه‌ی فولادی به مقایسه‌ی ضرایب موجک وضعیت‌های سالم و معیوب پرداختند و دریافته‌اند که اغتشاش‌ها در ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی وضعیت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب، چشم‌گیر بوده و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد. همچنین، ایشان نشان دادند که از تحلیل موجک شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل موجک شکل‌های مود بالاتر، موقعیت‌های آسیب با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب موجک شناسایی می‌شود. آن‌ها در مطالعات دیگری با استفاده از تبدیل موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته‌ی پانلی و کامپوزیت چندلایه شدند.^[۱۸] همچنین ایشان با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته به آشکارسازی آسیب در تیرهای فولادی پرداختند و نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک می‌توان موقعیت‌های آسیب را با دقت بالایی شناسایی کرد.^[۲۳] همچنین ایشان در مطالعات دیگری،^[۲۵] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به شناسایی آسیب در المان ستون تحت اثر بار محوری پرداختند و دریافته‌اند که مقادیر اوج در سیگنال‌های خروجی با صرف‌نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، در محل‌های آسیب می‌باشد. رضایی‌فر و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۶] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند و محل آسیب را با ایجاد جهش نسبی بیشه و کمیته در ضرایب موجک تولیدشده شناسایی کردند. ما^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲۸] بر مبنای تحلیل موجک انحنای استاتیکی المان‌های تیر به شناسایی آسیب‌های چندگانه پرداختند و نتایج شناسایی موفق به‌دست آوردند. در پژوهش دیگری، سان^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۲۹] با استفاده از تبدیل موجک و همبستگی تصاویر دیجیتال موفق به شناسایی آسیب در صفحه‌های کامپوزیت شدند.

در سال‌های اخیر، مطالعات آزمایشگاهی و عددی در ارتباط با مباحث لرزه‌یی و اتصال‌ها در سازه‌های با ستون‌های کامپوزیت CFST انجام شده است.^[۳۰-۳۲] با این حال، هنوز به صورت جدی به موضوع پایش سلامتی در المان‌های مذکور پرداخته نشده است. با توجه به گسترش استفاده از ستون‌های کامپوزیت در صنعت ساختمان به‌ویژه سازه‌های ساختمانی بلند، شناسایی آسیب در آن‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است. از طرفی، جدادشدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی از رایج‌ترین نوع آسیب‌ها در ستون‌های با مقاطع مرکب است. بر این اساس در نوشتار حاضر، به تشخیص ناحیه‌ی آسیب جدادشدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی ستون CFST با به‌کارگیری الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک پرداخته شده است. همچنین، اثر جدادشدگی بتن از جداره‌ی فولادی بر خواص دینامیکی مودال (بسامدها و شکل‌های مود) بررسی و در ادامه به مباحث تئوری تبدیل موجک پرداخته شده است.

۲. تبدیل موجک

تبدیل موجک، یک تبدیل ریاضی پردازشی سیگنال‌ها است که مشخصات بسامدی سیگنال را در یک بازه‌ی زمانی کوتاه استخراج می‌کند و نشان می‌دهد که با گذشت زمان به چه نحو تغییر می‌کند. تبدیل موجک، مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن بسامدی تغییر می‌کند و اجزاء بسامدی در رزولوشن‌های مختلف به‌دست می‌آیند.^[۳۴] در یک تقسیم‌بندی کلی، تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT)^{۲۱} و تبدیل موجک گسسته (DWT)^{۲۲} به این صورت تعریف می‌شود.

که در آن، $A, B \in R^+$ در چنین حالتی، سیگنال $f(t)$ را می‌توان از طریق معکوس تبدیل موجک گسسته مطابق رابطه ۸ بازسازی کرد: [۳۵،۳۴]

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) \psi_{j,k}(t) \quad (8)$$

در تحلیل چندمقیاسی، یک سیگنال مشخص را می‌توان در دو قسمت جزئیات و تقریبات تجزیه کرد. برای به دست آوردن سطح بعدی جزئیات و تقریبات، می‌توان اطلاعات تقریبی را بیشتر تجزیه کرد. فرایند تجزیه می‌تواند تا رسیدن به مقیاس طراحی شده z تکرار شود و این چگونگی پیاده‌سازی یک تبدیل موجک گسسته (DWT) است. معادله‌های ۹ و ۱۰، جزئیات و تقریبات را در مقیاس z ارائه می‌دهند: [۳۵،۳۴]

$$f_a^j(t) = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t) \quad (9)$$

$$f_d^j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) = \sum_k \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (10)$$

که در آن، $k \in Z$ و ضرایب $a_{j,k}$ و $d_{j,k}$ به ترتیب در ارتباط با تقریبات و جزئیات هستند. در نتیجه، یک سیگنال $f(t)$ را می‌توان با استفاده از معادله ۱۱ به مجموعه‌ی زیرفضا تجزیه کرد:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (11)$$

که در آن، z یک پارامتر مقیاس از پیش تعیین شده است. در معادله‌های اخیر، $\phi(t)$ تابع مقیاس و $\psi(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$ نسخه‌ی انتقال یافته و مقیاس شده‌ی $\phi(t)$ است. [۳۴]

۳. مدل‌سازی المان محدود ستون CFST

ستون CFST با مقطع دایره‌ی به شعاع ۱۰ سانتی‌متر به ارتفاع ۳ متر و ضخامت جداره‌ی فولادی ۶ میلی‌متر با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و مشخصات مصالح فولادی و بتنی ارائه شده در جدول ۱ به ترتیب با استفاده از المان‌های Shell و Solid در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده است.

در شکل ۱، المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی ستون CFST با نواحی آسیب جاداشدگی به طول ۳ سانتی‌متر و عرض ۲۵/۰ محیط مقطع ستون و عمق ۳ میلی‌متر که به صورت کاهش سختی بتن به میزان ۳۰ درصد تعریف شده است، مشاهده می‌شود. مشخصات هندسی محل‌های آسیب نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی و بتنی در ستون CFST.

مصالح	مدول کشسانی (MPa)	چگالی (k/m^3)	نسبت پواسون
فولاد	۲۰۰۰۰۰	۷۸۵۰	۰/۳
بتن	۱۸۰۰۰	۲۱۷۰	۰/۲

۱.۲. تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته‌ی سیگنال $f(t)$ در بازه‌ی $-\infty$ تا ∞ مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود: [۳۵،۳۴]

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

که در آن، s و τ به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر انتقال و ψ تابع موجک هستند. مقیاس‌های بالا ($s > 1$) متناظر با جزئیات^{۲۳} و مقیاس‌های پایین ($s < 1$) متناظر با تقریب‌های^{۲۴} سیگنال هستند. تابع موجک در رابطه ۱، باید این ویژگی‌ها را داشته باشد:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۳۵،۳۶] (رابطه ۲):

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

۲. انرژی آن محدود باشد [۳۵،۳۶] (رابطه ۳):

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

۳. باید در رابطه ۴ صدق کند: [۳۸-۳۶]

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

که در آن، Ψ تبدیل فوریه‌ی ψ و ω بیانگر بسامد است. در رابطه ۲، تابع به صورت نوسانی است. رابطه ۳ به این معنی است که بیشترین انرژی موجک برای یک بازه‌ی زمانی کوتاه، نامحدود نمی‌شود. [۳۸]

۲.۲. تبدیل موجک گسسته

به دلیل تغییر پیوسته‌ی پارامترهای مقیاس و انتقال، انجام CWT روی یک سیگنال، منجر به تولید اطلاعات اضافی می‌شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازگی حافظه افزایش می‌یابد. بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف مورد نظر است. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته‌سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و سپس، وابسته کردن پارامتر انتقال به آن است [۳۵] (رابطه ۵): [۳۵]

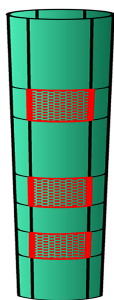
$$\begin{cases} s = s_0^j, & s_0 < 1, j \in Z \\ \tau = k\tau_0 s_0^j, & \tau_0 \neq 1, k \in Z \end{cases} \quad (5)$$

با فرض $s_0 = 2$ و $\tau_0 = 1$ ، تبدیل موجک گسسته‌ی سیگنال $f(t)$ با استفاده از رابطه ۶ به دست می‌آید: [۳۶،۳۵]

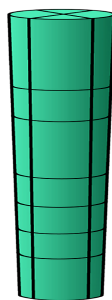
$$DWT_{j,k}^{\psi}(f(t)) = \langle f(t), \psi_{j,k} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-k2^j}{2^j}\right) dt \quad (6)$$

اگر مجموعی از ضرایب موجک $DWT_{j,k}^{\psi}(f(t))$ وجود داشته باشد که اطلاعات کامل سیگنال $f(t)$ را توصیف کند، باید رابطه ۷ برقرار باشد: [۳۵،۳۴]

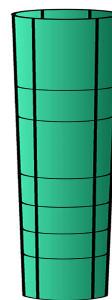
$$A \|f(t)\|^2 \leq \sum_{j,k} |DWT_{j,k}^{\psi}(f(t))|^2 \leq B \|f(t)\|^2 \quad (7)$$



ج) پوشش بتنی به ضخامت ۲ mm و شعاع بیرونی ۱۰ cm با نواحی آسیب جداشدگی.



ب) هسته بتنی به شعاع ۹/۷ cm



الف) جداره فولادی به ضخامت ۶ mm

شکل ۱. المان‌های ستون CFST.

را محاسبه کرد، معیار همبستگی مودال (MAC)^{۲۵} است که مطابق رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:^[۳۹]

$$MAC(\phi_i^u, \phi_j^d) = \frac{\left(\sum_{k=1}^n \phi_{i,k}^u \times \phi_{j,k}^d \right)^2}{\sum_{k=1}^n \left(\phi_{i,k}^u \right)^2 \times \sum_{k=1}^n \left(\phi_{j,k}^d \right)^2} \quad (12)$$

که در آن، ϕ_j^d و ϕ_i^u به ترتیب شکل مود نام اولیه و زام ثانویه هستند. بیشترین و کمترین مقدار MAC به ترتیب ۱ و صفر است (مطابق رابطه‌ی ۱۳):

$$0 < MAC \leq 1 \Rightarrow \log(MAC^{-1}) \geq 0 \quad (13)$$

در شکل ۲، شش شکل مود اول حالت بدون آسیب ستون مشاهده می‌شوند. در جدول‌های ۴ الی ۷، نیز مقادیر منفی لگاریتم MAC محاسبه و ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که مقادیر قطری ماتریس‌های همبستگی مودال، همگی مقداری غیرصفر هستند. مقدار صفر متناظر با مقدار MAC برابر با ۱ است و انطباق کامل شکل مودهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. به عبارتی، اگر تمام درایه‌های قطری اصلی ماتریس همبستگی مودال صفر باشد، آنگاه در سازه آسیبی وجود ندارد. مشاهده می‌شود که چنین نیست و مقادیر قطری به دلیل وجود آسیب غیرصفر هستند.

۵. شناسایی آسیب

یکی از قابلیت‌های تبدیل‌های موجک، شناسایی موقعیت‌های مکانی یا زمانی است که در آن موقعیت‌ها، سیگنال مورد نظر دچار تغییرات یا ناپیوستگی‌های ناگهانی شده است. بررسی‌های اولیه‌ی انجام شده نشان داده است که ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی سیگنال‌های فرضی، اطلاعات مفیدی جهت شناسایی نقاط ناپیوستگی دارند. بر این اساس، در نوشتار حاضر، برای شناسایی نواحی جداشدگی بتن از جداره‌ی فولادی الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته، به شرح مراحل زیر تعریف شده است که شاخص پیشنهادی در الگوریتم مذکور، میزان بی‌نظمی و اغتشاش را در موقعیت‌های جداشدگی بتن از جداره فولادی نشان می‌دهد.

۱.۵. الگوریتم تشخیص آسیب

گام ۱: فراخوانی سیگنال‌های شکل مود سالم و آسیب دیده به محیط نرم‌افزار تحلیل

جدول ۲. مشخصات هندسی محل‌های آسیب جداشدگی ستون CFST.

وضعیت	تعداد	آسیب	
		شماره	منطقه (متر)
D1	۱	۱	۰/۶ - ۰/۹
D2	۱	۲	۱/۲ - ۱/۵
D3	۱	۳	۲/۱ - ۲/۴
D4	۲	۱	۰/۶ - ۰/۹
	۲	۳	۲/۱ - ۲/۴

جدول ۳. مقادیر بسامدی وضعیت‌های سالم و آسیب (Hz).

وضعیت	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
سالم	۸۷/۰۵۸	۲۲۹/۹۱	۴۲۸/۳۴	۶۶۹/۰۲	۹۴۱/۵۱	۱۲۳۷/۵
D1	۸۷/۰۵۶	۲۲۹/۸۸	۴۲۸/۲۸	۶۶۸/۹۸	۹۴۱/۴۲	۱۲۳۷/۳
D2	۸۷/۰۴۴	۲۲۹/۹۰	۴۲۸/۲۷	۶۶۸/۹۵	۹۴۱/۴۰	۱۲۳۷/۳
D3	۸۷/۰۵۶	۲۲۹/۸۸	۴۲۸/۲۸	۶۶۸/۹۸	۹۴۱/۴۲	۱۲۳۷/۳
D4	۸۷/۰۵۵	۲۲۹/۸۴	۴۲۸/۲۲	۶۶۸/۹۴	۹۴۱/۳۲	۱۲۳۷/۱

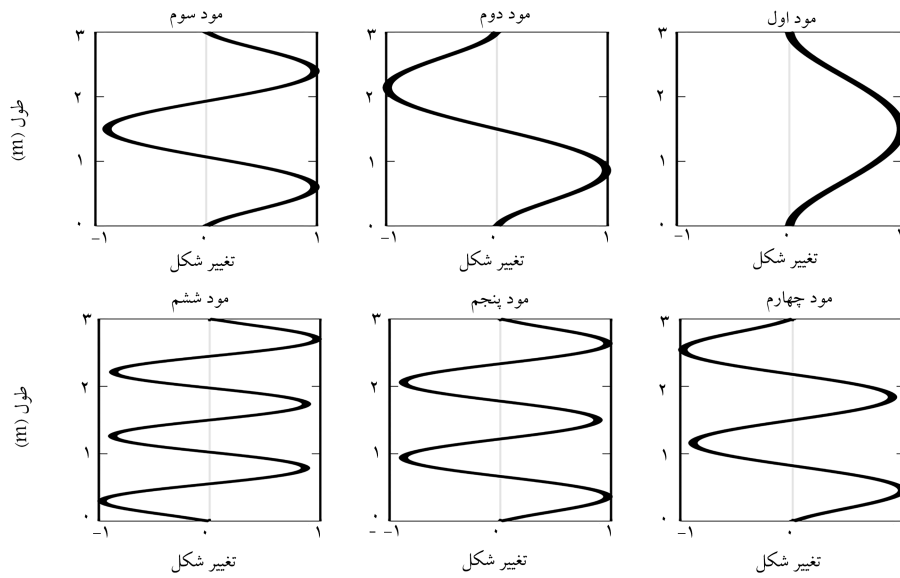
۴. تحلیل مودال

۱.۴. بررسی مقادیر بسامدی

ستون CFST با ابعاد مش ۳۰ میلی‌متر بدون هیچ‌گونه اثر بارگذاری در هر یک از حالت‌های آسیب D1 تا D4 و نیز، حالت بدون آسیب، تحلیل بسامدی شده است. مش‌بندی المان‌های Solid و Shell به ترتیب به صورت ۴ گره‌یی و ۸ گره‌یی به روش انتگرال‌گیری کاهشی انجام شده است. در جدول ۳، مقادیر بسامدی وضعیت‌های با آسیب و بدون آسیب ۶ مود اول ارائه شده است؛ که مطابق آن، مقدار بسامد حالت‌های آسیب از مقدار بسامد نظیرشان در حالت بدون آسیب کمتر است. همچنین، بسامد حالت آسیب D4 از بسامد حالت‌های آسیب D1 و D3 کمتر است؛ زیرا حالت آسیب D4 به صورت مجموع حالت‌های آسیب‌های D1 و D3 تعریف شده است.

۲.۴. بررسی همبستگی شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود

یکی از معیارهایی که به کمک آن می‌توان میزان همبستگی شکل‌های مود یک سازه



شکل ۲. شش شکل مود اول ستون CFST در حالت بدون آسیب.

جدول ۴. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۱.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ($LMAC^{-1}$)	شماره‌ی مود حالت آسیب D۱
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۰/۵۲۳	۵/۱۵۸۲	۱۰/۷۷۷	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۴	۰/۰۰۰۰۰۴۹۰۹	۱	
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۳۰	۴/۵۲۶۵	۷/۴۰۱۹	۰/۰۰۳۴۵۱۱	۹/۰۹۹۶	۲	
۷/۹۹۲۸	۴/۲۹۱۷	۷/۸۳۴۱	۰/۰۰۳۲۳۴۴	۷/۴۱۶۳	۴/۹۶۷۲	۳	
۴/۲۰۷۷	۸/۰۵۱۰	۰/۰۰۰۰۹۶۳۷	۷/۸۲۸۲	۴/۵۲۴۴	۱۰/۵۹۳	۴	
۷/۰۰۶۵	۰/۰۰۰۵۵۵۸	۸/۰۱۰۲	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۳۲	۵/۱۶۲۳	۵	
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۳۹۲	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۶۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۱۱	۶	

جدول ۵. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۲.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ($LMAC^{-1}$)	شماره‌ی مود حالت آسیب D۲
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۹/۴۸۵۸	۵/۱۶۷۷	۹/۱۹۶۵	۴/۹۵۵۴	۸/۵۵۱۲	۰/۰۰۳۶۶۲۷	۱	
۴/۶۴۴۰	۱۰/۲۷۰	۴/۵۱۶۲	۸/۲۵۶۹	۰/۰۰۰۱۶۳۸۷	۸/۵۲۷۵	۲	
۸/۲۵۰۸	۴/۲۸۳۳	۷/۵۴۹۸	۰/۰۰۳۸۷۳	۸/۳۳۴۵	۴/۹۸۹۴	۳	
۴/۱۹۲۲	۸/۲۶۰۲	۰/۰۰۱۱۱۱۱	۷/۵۵۴۷	۴/۵۳۲۳	۹/۲۲۲۴	۴	
۷/۶۴۹۲	۰/۰۰۱۱۰۷۹	۸/۳۳۲۹	۴/۳۱۸۹	۱۰/۷۸۹	۵/۱۵۷۶	۵	
۰/۰۰۱۶۸۳۵	۷/۶۷۵۷	۴/۲۲۸۱	۸/۳۳۱۶	۴/۶۳۳۰	۹/۶۸۶۶	۶	

جدول ۶. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D۳.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال ($LMAC^{-1}$)	شماره‌ی مود حالت آسیب D۳
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۰/۵۰۱	۵/۱۵۸۲	۱۰/۸۰۰	۴/۹۷۳۷	۹/۰۷۸۵	۰/۰۰۰۰۰۴۹۱	۱	
۴/۶۳۰۴	۸/۶۳۲۶	۴/۵۲۶۵	۷/۴۰۲۰	۰/۰۰۳۴۵۱۳	۹/۰۹۹۷	۲	
۷/۹۹۴۱	۴/۲۹۱۷	۷/۸۳۵۲	۰/۰۰۳۲۳۴۳	۷/۴۱۶۲	۴/۹۶۷۲	۳	
۴/۲۰۷۷	۸/۰۵۰۱	۰/۰۰۰۰۹۶۳۸۹	۷/۸۲۶۷	۴/۵۲۴۴	۱۰/۵۷۵	۴	
۷/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۵۵۵۹	۸/۰۱۱۶	۴/۳۰۹۰	۸/۶۹۲۷	۵/۱۶۲۳	۵	
۰/۰۰۲۹۸۴۲	۷/۰۴۰۶	۴/۲۱۲۵	۸/۰۷۵۰	۴/۶۴۹۹	۱۰/۸۴۳	۶	

جدول ۷. مقادیر منفی لگاریتم معیار همبستگی مودال شکل‌های مود وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D4.

شماره‌ی مود حالت سالم						منفی لگاریتم معیار انطباق مودال
۶	۵	۴	۳	۲	۱	(LMAC ⁻¹)
۱۴/۳۷۴	۵/۱۵۷۶	۱۴/۶۸۲	۴/۹۸۴۸	۱۶/۷۰۱	۰/۰۰۰۰۰۱۹۶	۱
۴/۶۲۷۸	۱۷/۲۸۱	۴/۵۲۹۷	۱۵/۹۹۴	۰/۰۱۳۰۳۲	۱۵/۴۲۸	۲
۱۴/۳۹۹	۴/۲۸۵۶	۱۴/۲۱۱	۰/۰۱۲۲۵۲	۱۶/۳۶۷	۴/۹۶۵۷	۳
۴/۲۱۱۵	۱۴/۵۲۲	۰/۰۰۰۳۸۴۱	۱۳/۹۳۵	۴/۵۳۰۸	۱۴/۶۴۵	۴
۱۳/۲۲۷	۰/۰۰۲۱۹۷۴	۱۴/۴۳۶	۴/۳۲۶۲	۱۷/۳۰۳	۵/۱۶۴۷	۵
۰/۰۱۱۳۴۵	۱۳/۲۱۰	۴/۲۱۶۴	۱۴/۳۸۶	۴/۶۶۹۴	۱۴/۲۶۷	۶

شماره‌ی مود حالت
آسیب D4

ریاضیاتی متلب:

۲.۵. شناسایی ناحیه‌ی آسیب جدارشدگی

بر اساس الگوریتم پیشنهادی، ضرایب جزئیات موجک حاصل از انجام تحلیل موجک توابع موجک مختلف استخراج و شاخص‌های شناسایی آسیب شش مود اول حالت‌های آسیب D1 تا D4 محاسبه شده است. نتایج نموداری مربوط به تحلیل موجک تابع موجک db10 در شکل‌های ۳ الی ۶ مشاهده می‌شود که مطابق آن در منطقه‌ی جدارشدگی بتن از جداره‌ی فولادی، در تمامی مودهای بررسی شده، بی‌نظمی و اغتشاش در نمودارهای شاخص آسیب وجود دارد؛ به نحوی که مناطق آسیب به خوبی و با دقت بالایی شناسایی شده‌اند. همچنین، با توجه به اینکه آسیب D4 به صورت مجموع دو حالت آسیب D1 و D3 تعریف شده است، مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص آسیب برای حالت آسیب D4 برابر با مجموع مقادیر شاخص‌های آسیب دو حالت آسیب D1 و D3 است. همچنین، مقایسه‌ی نمودارهای حالت آسیب دوتایی D4 با هر یک از حالت‌های آسیب تکی D1 و D3 نشان می‌دهد که با اضافه شدن یک موقعیت آسیب جدید به هر یک از حالت‌های آسیب تکی مذکور، تغییری در مقدار شاخص آسیب ناحیه‌ی جدارشدگی به وجود نمی‌آید و یا کمترین تغییر در آن صورت می‌گیرد که قابل چشم‌پوشی است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به عبارتی، شاخص‌های آسیب نواحی جدارشدگی مستقل از هم هستند و این یک امتیاز مثبت برای شاخص آسیب پیشنهادی است. چرا که در غیر این صورت ممکن است عدم شناسایی یک منطقه‌ی جدارشدگی در شناسایی سایر مناطق جدارشدگی تأثیرگذار باشد و در نتیجه، برخی از مناطق جدارشدگی بتن از جداره‌ی فولادی شناسایی نشود.

۳.۵. تأثیر شدت آسیب بر شاخص مکان‌یاب آسیب

یک روش مناسب تشخیص آسیب باید به مقدار آسیب از نظر عمق، سطح و شدت حساسیت نشان دهد. به این معنی که با افزایش مقدار آسیب، شاخص مکان‌یاب آسیب مقادیر اکسترمم نسبی بزرگ‌تری را نشان دهد. بررسی‌ها برای شدت‌های آسیب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد برای حالت آسیب D1 انجام شده است. با توجه به محدودیت تعداد صفحه‌های نوشتار حاضر، فقط نتایج نموداری مربوط به مود سوم در شکل ۷ گزارش شده است، که مطابق آن، با افزایش شدت آسیب، شاخص‌های مکان‌یاب آسیب در مختصات مکانی ثابت، اغتشاش و جهش بالایی را نشان می‌دهند.

۴.۵. تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر شاخص مکان‌یاب آسیب

با استفاده از یک روش مناسب برای تشخیص آسیب، علاوه بر اینکه باید بتوان موقعیت‌های آسیب با مقادیر مختلف خسارت را شناسایی کرد، باید جوابگوی

$$U = xlsread('Undamaged Signal.xlsx');$$

$$D = xlsread('Damaged Signal.xlsx');$$

گام ۲: انجام درون‌یابی سیگنال‌های فراخوانی شده بر مبنای طول ستون (L):

$$x = linspace(0, L, numel(U));$$

$$xi = linspace(0, L, n \times numel(U))$$

$$Ui = interp1(x, U, xi, 'spline');$$

$$Di = interp1(x, D, xi, 'spline');$$

در پژوهش حاضر، مقدار n برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است.

گام ۳: انجام تحلیل موجک گسسته روی سیگنال‌های گام ۲ و استخراج ضرایب موجک:

$$[cAu, cDu] = dwt(Ui, 'wavelet function');$$

$$[cAd, cDd] = dwt(Di, 'wavelet function');$$

در پژوهش حاضر، تابع موجک مادر، تابع تحلیلی db10 انتخاب شده است.

گام ۴: تعریف شاخص مکان‌یاب آسیب (DLI)^{۲۶} بر مبنای ضرایب جزئیات تحلیل موجک حاصل از گام ۳:

$$if \text{acosd}(\text{dot}(Ui, Di) / (\text{norm}(Ui) \times \text{norm}(Di))) < 90$$

$$DLI = cDu - cDd; \quad else$$

$$DLI = cDu + cDd;$$

end

گام ۵: شناسایی آسیب:

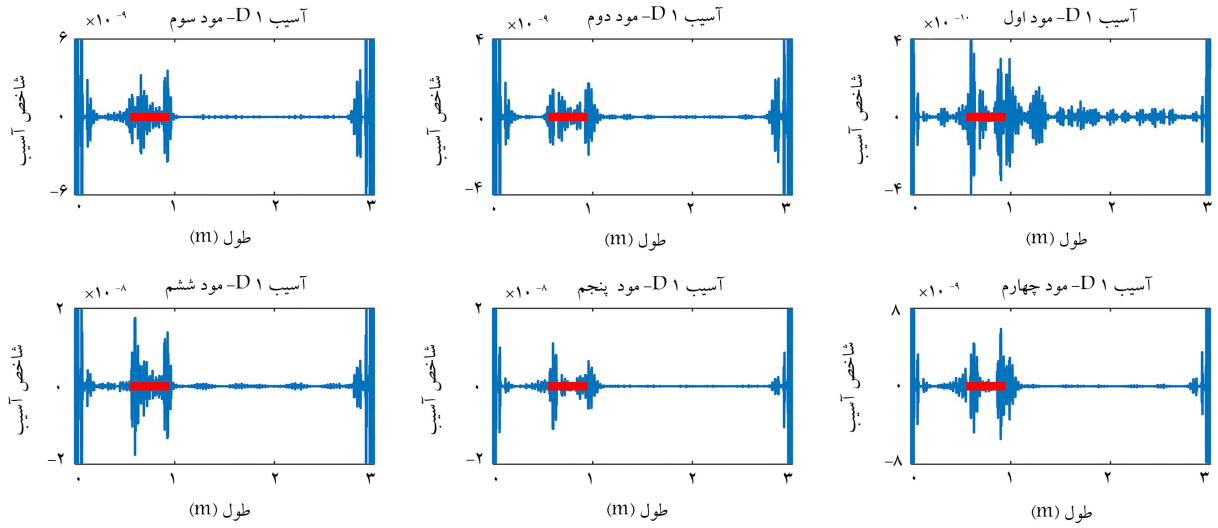
$$xx = linspace(0, L, numel(DLI));$$

$$xxi = linspace(0, L, m \times numel(DLI));$$

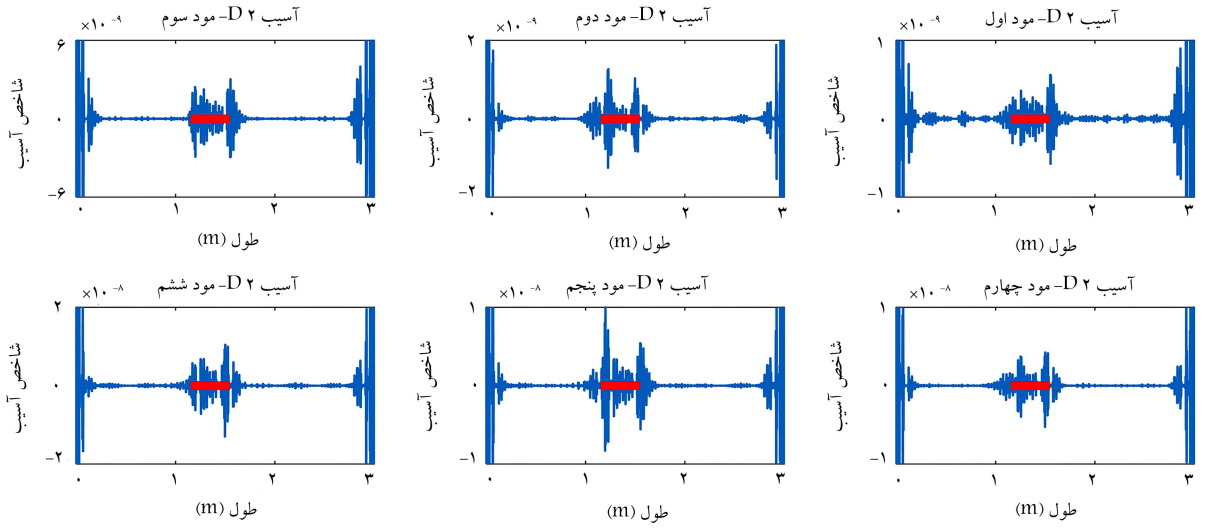
مقدار m برابر با ۵ در نظر گرفته شده است.

$$DLIi = interp1(xx, DLI, xxi, 'spline');$$

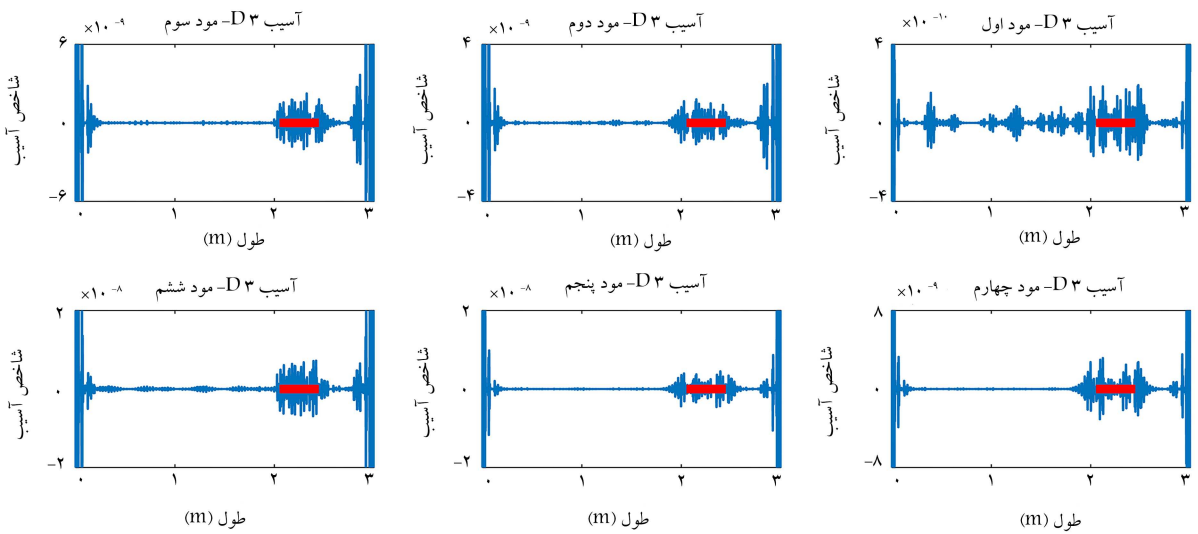
$$figure; plot(xxi, DLIi)$$



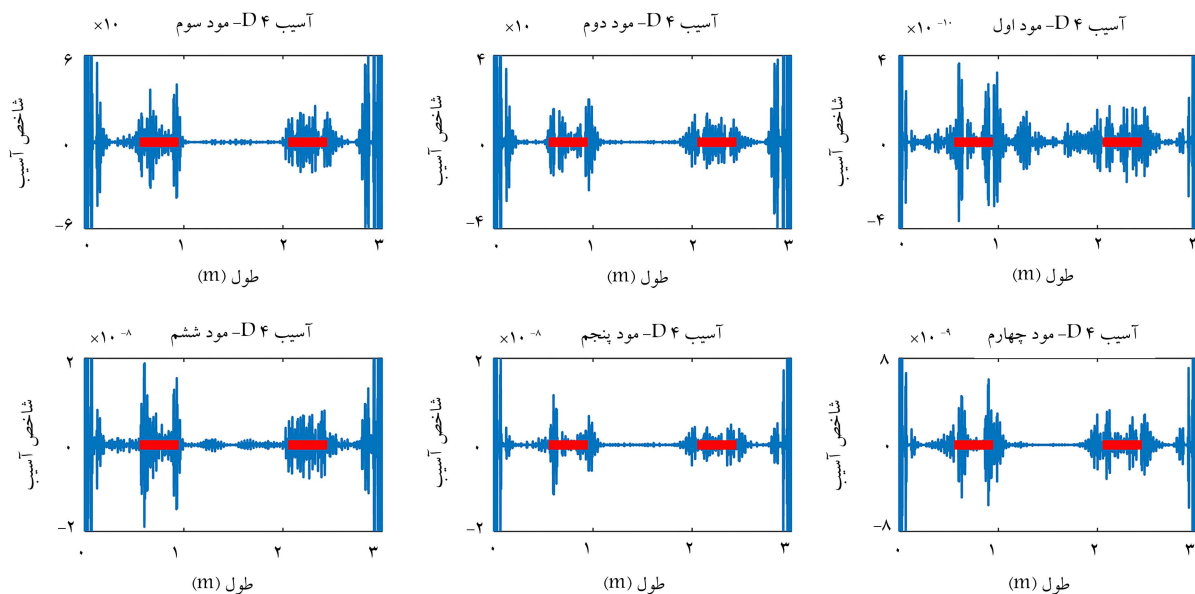
شکل ۳. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D1.



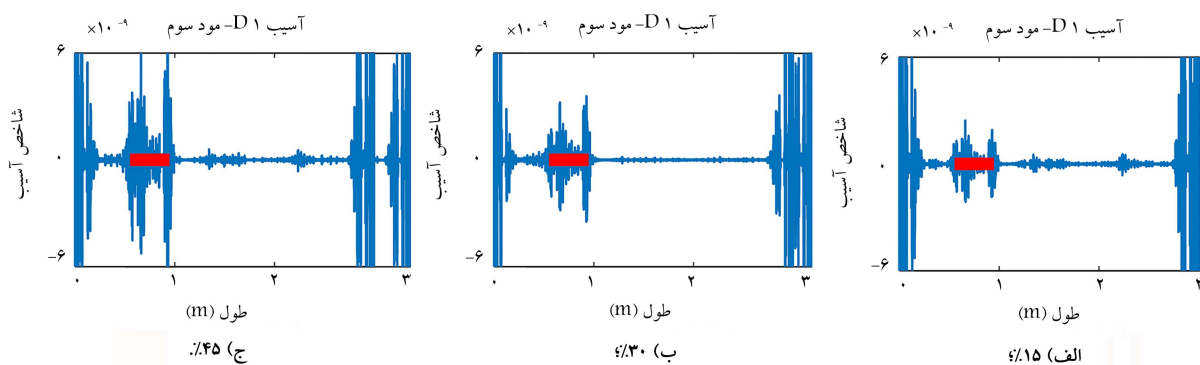
شکل ۴. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D2.



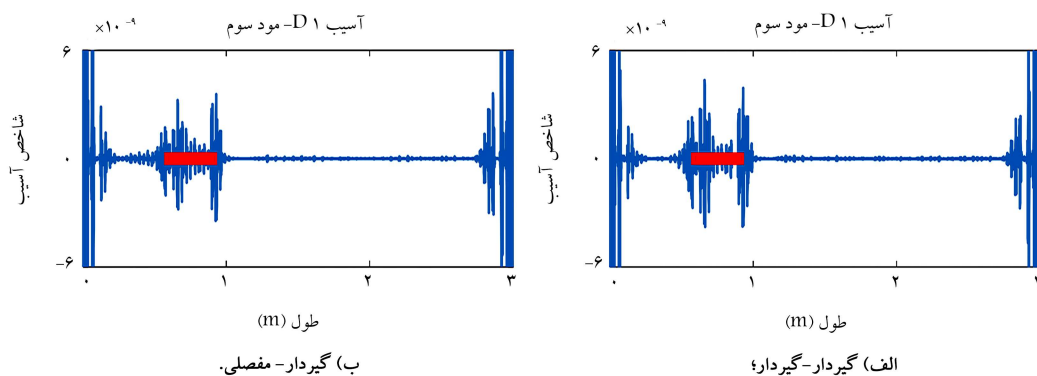
شکل ۵. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D3.



شکل ۶. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۴.



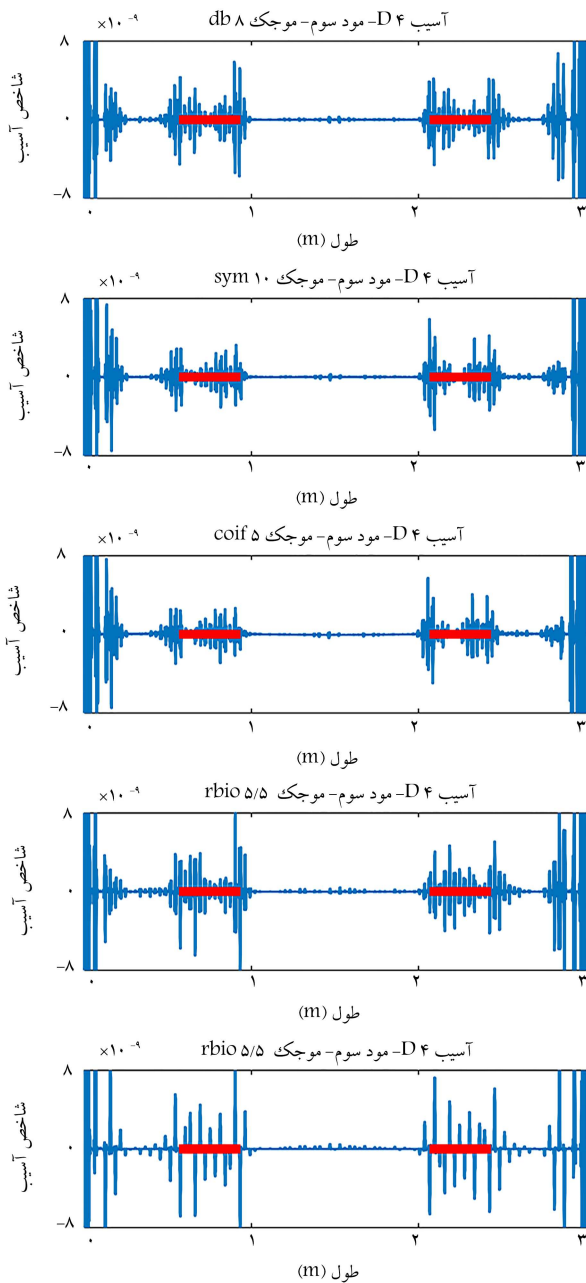
شکل ۷. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۱ با شدت آسیب.



شکل ۸. نمودار شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) حالت آسیب D۱ با شرایط تکیه‌گاهی.

فقط نتایج نموداری حالت آسیب D۱ برای مود سوم در شکل ۸ گزارش شده است، که مطابق آن، مقادیر اکسترمی متفاوتی در محل آسیب ایجاد شده است. بنابراین شاخص پیشنهادی برای تشخیص موقعیت آسیب ستون کامپوزیت CFST با شرایط تکیه‌گاهی مختلف، یک شاخص تشخیصی مناسب است.

تغییرات شرایط تکیه‌گاهی به منظور تشخیص موقعیت آسیب نیز بود. بررسی‌های انجام شده در موده‌های مختلف با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار - مفصلی نشان می‌دهند که با تغییر شرایط تکیه‌گاهی، همچنان نتایج شناسایی موفق‌تری حاصل می‌شود، با این تفاوت که مقادیر اکسترمی متفاوتی در موقعیت آسیب محاسبه می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد صفحه‌های نوشتار حاضر،



شکل ۹. نمودارهای شاخص شناسایی آسیب (شاخص تعیین بی‌نظمی) وضعیت آسیب D4 (مود سوم) با توابع موجک مختلف.

شاخص آسیب نواحی آسیب پیشین تغییری نمی‌کند و یا تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است؛ به عبارتی، شاخص‌های آسیب موقعیت‌های مختلف جداشدگی از هم مستقل بوده و این یک امتیاز مثبت برای شاخص پیشنهادی آسیب در روند شناسایی محسوب می‌شود؛ زیرا در غیر این صورت ممکن است عدم شناسایی یک موقعیت جداشدگی بر شناسایی سایر موقعیت‌های جداشدگی اثرگذار باشد و در نتیجه، برخی از موقعیت‌های جداشدگی قابل شناسایی نباشند.

۴. در حالت آسیب D4، دو منطقه‌ی جداشدگی کاملاً متقارن از نظر هندسه‌ی آسیب (سطح و عمق جداشدگی) و ویژگی مصالح آسیب (شدت آسیب) برای ستون با شرایط تکیه‌گاهی متقارن تعریف شده است. نتایج نموداری نشان داد با اینکه مسئله

۵.۵. تشخیص آسیب با دیگر توابع موجک

یکی از مشکلات اساسی تعیین موقعیت آسیب با استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر موجک، انتخاب تابع موجک مناسب است. در روش پیشنهادی نوشتار حاضر، شناسایی آسیب با توابع موجک متعددی انجام شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص‌های مکان‌یاب آسیب محاسبه شده با تعداد زیادی از توابع موجک خانواده‌های دابچیز^{۲۷} (Db)، سیملتس^{۲۸} (Sym)، کویفلتس^{۲۹} (Coif) توابع موجک بیورتوگونال^{۳۰}، پرش نسبی کمینه و بیشینه را در موقعیت‌های مختلف آسیب نشان می‌دهند. نتایج نموداری شاخص آسیب وضعیت D4 (مود سوم) با تعدادی از توابع موجک در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین میزان بی‌نظمی و اغتشاش با چشم‌پوشی از بی‌نظمی‌های ابتدا و انتهای ستون، در منطقه‌ی آسیب رخ داده است.

۶. نتیجه‌گیری

امروزه پایش و کنترل سلامتی در سازه‌های مهندسی در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا، یکی از زمینه‌های پژوهشی برای بسیاری از پژوهشگران است. به طوری که در دهه‌های اخیر، مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل پایش سلامت در سازه‌ها، شناسایی موقعیت‌های آسیب در اعضاء سازه‌یی به خصوص تیرها و ستون‌هاست که از مهم‌ترین اعضاء سازه‌یی هستند و انتظار می‌رود آخرین اعضاء آسیب‌دیده‌ی سازه‌ها، ستون‌ها باشند. امروزه استفاده از ستون‌های مقاطع مرکب به دلیل بهره‌مندی همزمان از ویژگی‌های دو ماده‌ی فولاد و بتن، تأمین ممان اینرسی معادل مقاطع بزرگ و غیره در صنعت ساختمان به ویژه سازه‌های ساختمانی بلند رو به گسترش است. با این حال، تاکنون مطالعات جدی در زمینه‌ی پایش سلامتی در ارتباط با ستون‌های مقاطع مرکب صورت نگرفته است. ستون‌های فولادی پرشده با بتن (ستون‌های CFST)، یکی از ستون‌های مقاطع مرکب هستند، که مورد توجه طراحان است. جداشدگی هسته‌ی بتنی از جداره‌ی فولادی در ستون‌های CFST، یکی از رایج‌ترین نوع آسیب‌هاست؛ بنابراین شناسایی منطقه‌ی جداشدگی بتن از جداره‌ی فولادی مورد توجه واقع شده است. تبدیل موجک، یکی از روش‌های ریاضیاتی توانمند پردازش سیگنال‌هاست که قابلیت محلی‌سازی سیگنال را در دو حوزه‌ی زمان و بسامد دارد. براساس ویژگی مذکور، الگوریتمی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته جهت شناسایی منطقه‌ی آسیب جداشدگی پیشنهاد شده است که براساس آن شاخص‌های تعیین بی‌نظمی محاسبه شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده برای سه حالت آسیب تکی و یک حالت آسیب دوتایی نشان داد که:

۱. مکانیاب آسیب در تمامی مودها در نواحی جداشدگی، بی‌نظمی و اغتشاش را نشان می‌دهد؛ به نحوی که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های جداشدگی را شناسایی کرد. لازم به ذکر است در مود اول با اینکه در منطقه‌ی آسیب، بی‌نظمی مشاهده می‌شود، اما شناسایی کمی دشوار است؛ بنابراین، مودهای بالاتر پیشنهاد می‌شود.
۲. مقادیر شاخص آسیب یک حالت آسیب چندتایی که به صورت مجموع حالت‌های آسیب تکی تعریف شده است، با اختلاف بسیار ناچیزی با مجموع شاخص‌های آسیب حالت‌های آسیب تکی برابر است.
۳. با اضافه شدن یک موقعیت جداشدگی جدید به یک حالت آسیب، مقدار

ب) با اضافه شدن یک منطقه‌ی جراثشنگی جدید به ستون محتمل آسیب، میزان کاهش مقادیر بسامدی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی، با افزایش میزان خسارت، میزان کاهش بسامد افزایش می‌یابد.

ج) در اثر جراثشنگی بتن از جداری فولادی، مقادیر قطری معیار همبستگی مودال شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی کمتر از واحد محاسبه می‌شود (مقادیر قطری ماتریس منفی لگاریتم MAC نا صفر محاسبه می‌شود)؛ به عبارتی، در اثر جراثشنگی بتن از جداری فولادی، شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی منطبق بر هم نیستند.

کاملاً متقارن تعریف شده است، اما لزوماً مقادیر بی‌نظمی و اغتشاش در مناطق جراثشنگی، متقارن نیستند. همچنین، تقارن مناطق جراثشنگی نمی‌تواند توانمندی و قابلیت تشخیصی شاخص پیشنهادی را با مشکل مواجه سازد. علاوه بر نتایج شناسایی موقعیت جراثشنگی، اثر جراثشنگی بتن از جداری فولادی در خواص مودال (بسامدها و شکل‌های مود ارتعاشی) بررسی و این نتایج حاصل شده است:

الف) در اثر جراثشنگی هسته‌ی بتنی از جداری فولادی، مقدار بسامد در تمام مودها کاهش می‌یابد.

پانوشتها

1. (WT) Wavelet Transform
2. Katunin
3. Zhong & Oyadji
4. stationary Wavelet Transform (SWT)
5. Xu
6. Two-dimensional directional gaussian wavelets
7. Laser scanned operating deflection shapes
8. Lee
9. Continuous Relative Wavelet Entropy Method
10. Li
11. Quincunx
12. Patel
13. Abbasnia
14. Yang & Oyadji
15. Noori
16. Concrete-Filled Steel Tube Columns (CFST)
17. Wang
18. Mirzaei
19. Ma
20. Sun
21. Continuous Wavelet Transform (CWT)
22. Discrete Wavelet Transform (DWT)
23. Details
24. Approximations
25. Modal Assurance Criterion (MAC)
26. Damage Localization Index (DLI)
27. Daubechies
28. Symlets
29. Coiflets
30. Biorthogonal

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**, pp. 169-190 (2011).
4. Xu, W., Radzienski, M., Ostachowicz, W. and et al. "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*, pp. 1-14 (2014).
6. Li, J. and Hao, H. "Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction", *Structural Health Monitoring*, pp. 1-17 (2014).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. Rahami, H., Amini-Tehrani, H., Akhavat, M. and et al. "Damage detection in offshore fixed platforms using concepts of energy entropy in wavelet packet transform", *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, **48**(3), pp. 241-248 (2016).
11. Yang, C. and Oyadji, S.O. "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Journal of Computers and 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**(Special Issue 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. 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).
17. Hoseini Vaez, S. and Arefzade, T. "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), pp. 33-41 (2019).
18. Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefibeik 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 & 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) (2021).
24. 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).
25. 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).
26. 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).
27. Hanteh, M. and Rezaifar, O. "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
28. 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).
29. 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).
30. Pachideh, G. and Gholhaki, M. "Evaluation of concrete filled steel tube column confined with FRP", *Journal of Testing Evaluation*, **48**, pp. 4343-4354 (2020).
31. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. "An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**(2), pp. 629-638 (2021).
32. Rezaifar, O. and Younesi, A. "Experimental study discussion of the seismic behavior on new types of internal/external stiffeners in rigid beam-to-CFST/HSS column connections", *Construction and Building Materials*, **136**, pp. 574-589 (2017).
33. Rezaifar, O. and Younesi, A. "Finite element study the seismic behavior of connection to replace the continuity plates in (NFT/CFT) steel columns", *Steel and Composite Structures*, **21**(1), pp. 73-91 (2016).
34. Mallat, S. "A wavelet tour of signal processing: the sparse way", Academic Press (2008)
35. Gao, R.X. and Yan, R. "Wavelets: Theory and applications for manufacturing", Springer Science & Business Media (2010).
36. 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).
37. Shuncong, Z. 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).
38. Kim, Hansang, and Hani Melhem, "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
39. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. "Dynamic behaviour of 3D-panel single-storey system using shaking table testing", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337