

شناسایی منطقه آسیب جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی ستون فولادی پر شده با بتن (CFST) با استفاده از روش تحلیلی آنالیز موجک

محترم خان احمدی^۱، امید رضایی فر^{۲*}، مجید قلعهکی^۳، عادل یونسی^۴

۱- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*orezyfar@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

چکیده

ستون فولادی پر شده با بتن (CFST) به دلیل بهره‌مندی از خواص مکانیکی هم‌زمان دو ماده فولاد و بتن، قابلیت باربری بالا، تأمین ممان اینرسی معادل مقاطع بزرگ و افزایش فضای مفید داخل ساختمان‌ها و غیره، در صنعت ساختمان سازی به طور گسترده مورد استفاده است. با توجه به جایگاه و اهمیت این ستون به ویژه در ساختمان‌های بلند و پل‌ها، شناسایی آسیب‌های جزئی به وجود آمده در آن، پیش از تبدیل به آسیب‌های بزرگ و غیر قابل جبران، ضروری و حائز اهمیت است. یکی از محتمل‌ترین آسیب‌ها در این نوع ستون، جدایی هسته بتنی از جداره فولادی است. در این نوشتار، المان ستون CFST در دو حالت آسیب و بدون آسیب در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی و تحلیل فرکانسی شد. اثر جداشدگی به صورت کاهش مدول الاستیسته بتن در محل‌های آسیب به عمق ۳ میلی‌متر لحاظ شد. بررسی‌ها نشان داد که اطلاعات شکل مودهای حالت‌های آسیب و بدون آسیب (زاویه بین بردار شکل مودها و مقادیر فرکانس) به دلیل تأثیر از آسیب دچار تغییر شد. برای شناسایی محل‌های آسیب جداشدگی، در الگوریتم شناسایی تبدیل موجک پیوسته، سیگنال ورودی به صورت مجموع یا تفاضل شکل مودهای حالت‌های آسیب و بدون آسیب بر مبنای زاویه بین بردار شکل مودها تعریف شد. نتایج نشان داد که سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات آنالیز موجک سیگنال ورودی دارای اطلاعات سودمندی برای شناسایی محل‌های جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی است و در مقیاس‌های بالا، محل‌های آسیب جداشدگی به راحتی قابل شناسایی است و در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری از ضرایب موجک در محل‌های آسیب مشاهده می‌شود.

واژگان کلیدی: ستون فولادی پر شده با بتن (CFST)، آسیب جداشدگی، تحلیل فرکانسی، تبدیل موجک، شناسایی آسیب.

۱- مقدمه

سازه‌های عمرانی به مرور زمان با تجربه شرایط محیطی و بارهای وارد شده دچار آسیب می‌شوند. حفظ سلامت، پایداری و عملکرد مناسب سازه‌ها و بخش‌های مختلف آن‌ها امری ضروری و حائز اهمیت است و عدم شناخت صحیح از رفتار سازه‌ها در دوره سرویس‌دهی ممکن است سبب بروز آسیب‌های ناگهانی و ایجاد هزینه‌های فراوان اجتماعی و اقتصادی شود. با توجه به عملکرد مناسب ستون‌های فولادی پر شده با بتن^۱ (CFST) استفاده از این نوع ستون‌ها در ساختمان‌های بلند مرتبه و سازه‌های پل به خصوص در مناطق لرزه‌خیز گسترش یافته است.

استفاده همزمان از خواص بتن و فولاد در ستون‌های CFST شرایطی ایجاد می‌نماید که ضعف بتن در برابر کشش و خمش و ضعف فولاد در برابر فشار جبران می‌شود. از آنجا که وجود آسیب در سازه‌ها امری اجتناب ناپذیر است، ممکن است این ستون‌ها در حین اجرا و یا پس از تجربه دوره‌های بارگذاری، دچار نقص و آسیب احتمالی شوند.

شناسایی آسیب از اهداف اولیه روش‌های پایش سلامت سازه^۲ (SHM) است. چنانچه بتوان محل‌های آسیب را تعیین و سیر تدریجی آن را مشاهده نمود، اعضای آسیب‌دیده را می‌توان قبل از رسیدن به حالت بحرانی و وقوع خرابی کامل، تعمیر و یا جایگزین نمود. به صورت متداول، تعمیر سازه بر اساس بازدیدهای چشمی و یا آزمایش‌های موضعی برای تعیین نارسایی‌ها و برآورد شرایط سازه نظیر تعیین سطح مقطع عرضی، تعیین محل و میزان نقص، تعیین اتصالات ضعیف و ... بوده است. در روش‌هایی چون آلتروسونیک^۳، آکوستیک^۴، میدان مغناطیسی^۵، رادیوگرافی^۶، میدان حرارتی^۷ و ... لازم است ناحیه خرابی از قبل شناخته شده و به آسانی نیز در دسترس باشد. با این محدودیت‌ها، روش‌های آشکارسازی در نزدیکی و یا روی سطح سازه قابل اعمال

است. در روش‌های بازرسی سلامت سازه رسیدن به نظری واحد در ارتباط با شرایط سازه به علت تفاوت در آرا بازرسان امکان‌پذیر نیست. این محدودیت‌ها منجر به ابداع روش‌های آشکارسازی کامل‌تری شد که از تغییر مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها استفاده می‌نماید و قابلیت کاربردی برای سازه‌های پیچیده را فراهم نموده است. یکی از این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر تحلیل سیگنال است. تبدیلات ریاضی چون تبدیل فوریه^۸ (FT)، هیلبرت هوآنگ^۹ (HT)، تبدیل موجک^{۱۰} (WT) و ... به عنوان ابزارهای توانمند پردازشی سیگنال‌ها و استخراج ویژگی از آن‌ها در دسترس‌اند. در این مقاله با توجه به اینکه از تکنیک موجک برای شناسایی آسیب بهره گرفته شده، در ادامه تاریخچه‌ای از کاربردهای موجک در زمینه پایش سلامت سازه آورده شده است.

تبدیل موجک یک تبدیل توانمند پردازشی سیگنال‌ها است که با استفاده از آن اطلاعات بیشتری از سیگنال آنالیز شده بر اساس توانایی آن در محلی‌سازی سیگنال در حوزه زمان - فرکانس حاصل می‌شود [1-3].

نیولند [4] با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی پرداخت و با معرفی این روش در مهندسی سرآغاز مطالعات بعدی بررسی‌های سلامت سازه‌ای شد. سون و همکاران [5] با استفاده از تحلیل موجک پاسخ تاریخچه زمانی سیستم یک درجه آزادی، زمان وقوع آسیب را تعیین نمودند. وانگ و دنگ [6] یک روش شناسایی آسیب بر مبنای آنالیز موجک با فرض اینکه آسیب باعث اختلال در پاسخ سازه می‌شود، معرفی نمودند و نشان دادند که اگرچه این اختلالات در داده‌های پاسخ کلی ظاهر نمی‌شوند، اما اغلب از روی مؤلفه‌های موجک قابل شناسایی هستند. هوو و همکاران [7] برای شناسایی آسیب از آنالیز موجک داده‌های حاصل از زلزله سن فرناندو استفاده کردند. محل پیک‌ها در جزئیات آنالیز موجک متناظر با زمان وقوع آسیب بود. دوکا و

7. Thermal Square
8. Fourier Transform (FT)
9. Hilbert Transform (HT)
10. Wavelet Transform (WT)

1. Concrete-Filled Steel Tube (CFST)
2. Structural Health Monitoring (SHM)
3. Ultrasonic
4. Acoustic
5. Magnetic Square
6. Radiography

شکل مود صفحه سالم یک روش شناسایی آسیب ارائه نمودند. ژنگ و ایادیچی [16] با بکارگیری تبدیل موجک ایستا^۱ (SWT) و داده‌های مودال موفق به شناسایی محل ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده شدند. روخا [17] با بکارگیری هشت مود اول مدل‌های عددی و آزمایشگاهی یک تیر طره نشان داد که از تحلیل موجک شکل مودهای بالاتر، شناسایی قابل اطمینان‌تری حاصل می‌شود. باقری و کورهللی [18] با استفاده از تبدیل موجک گسسته به تحلیل پاسخ‌های سرعت و تغییر مکان سازه‌های تحت تحریک زلزله پرداختند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک، زمان وقوع خرابی را نشان داد. ژو و همکاران [19] با استفاده از موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی^۲ و شکل‌های انحنای عملیاتی^۳ اسکن شده با لیزر^۴ موفق به شناسایی محل آسیب صفحات شدند. لی و همکاران [20] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته^۵ به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابایی^۶ پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرابایی را دارد. لی و هوو [21] به شناسایی آسیب زیر ساختاری^۷ در سازه قاب صفحه‌ای ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه موجک پرداختند. آن‌ها محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمودند. کاتونین [22] با استفاده از موجک‌های نا پایداری کوینکاکس^۸ تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای صفحات کامپوزیتی آسیب‌دیده پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها سازوکار دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پاتل و همکاران [23] برای شناسایی آسیب یک ساختمان بتنی با بکارگیری آنالیز 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 [8] با بکارگیری آنالیز موجک، محل ترک در صفحات خمشی را شناسایی نمودند. اوانسوا و سوارز [9] تبدیل موجک را برای شناسایی محل ترک در تیرها و قاب‌ها تحت شرایط متفاوت بارگذاری بکار گرفتند. آن‌ها موجک بیورتوگنال را به عنوان بهترین موجک موفق در شناسایی معرفی کردند. لوتریدیس و همکاران [10] نشان دادند که از آنالیز موجک پیوسته مود ارتعاشی تیرهای طره دوبل ترک‌خورده، مقادیر بالایی از ضرایب موجک در محل ترک به دست می‌آید. چانگ و چن [11] با بکارگیری تبدیل موجک در شناسایی آسیب یک تیر طره نشان دادند هنگامی که محل ترک نزدیک انتهای گیردار است، مقادیر بزرگ‌تری از پیک حاصل می‌شود و هنگامی که محل ترک نزدیک انتهای آزاد است، مقیاس‌های بالاتری برای شناسایی نیاز است. خاتم و همکاران [12] بر مبنای بارگذاری کلاس هارمونیک^۱ و آنالیز موجک موفق به شناسایی محل آسیب در تیرها شدند. کوکداگ و کوپماز [13] با استفاده از ترکیب تبدیلات موجک گسسته و پیوسته به تشخیص آسیب در تیرها پرداختند. در روش پیشنهادی آن‌ها، شکل مود ثانویه به صورت ترکیبی از شکل مود اولیه و عواملی چون خطای ناشی از اندازه‌گیری و آسیب‌های محلی در نظر گرفته شد. پس یک تابع تقریب مناسب که بیانگر حالت سالم سازه باشد، به کمک تبدیل موجک گسسته استخراج شد. اختلاف بین ضرایب موجک حالت آسیب و تابع تقریبی، شاخص مناسبی برای تخمین خسارت در نظر گرفته شد. کاتونین [14] با استفاده از آنالیز موجک گسسته شکل‌های مود یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های متعدد پرداخت و نشان داد که ضرایب جزئیات دارای اطلاعات سودمندی برای شناسایی محل ترک است. قدرتی امیری و همکاران [15] با استفاده از نسبت ضرایب موجک حاصل از آنالیز موجک شکل مود صفحه آسیب‌دیده به ضرایب موجک حاصل از آنالیز موجک

1 . Truss bridge structures
1 . Substructure damage
1 . quincunx 8

1 . Harmonic classloading
1 . Stationary Wavelet Transform (SWT)
1 . Two-Dimensional directional Gaussian wavelets
1 . Laser scanned operating deflection shapes
1 . Continuous relative wavelet entropy

همکاران [24] با استفاده از مفاهیم آنالیز انرژی در تبدیل بسته‌ای موجک به تشخیص خرابی در سکوها ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت به طور محسوس به شدت خسارت‌های وارد شده به سکو وابسته است. عموزاده و همکاران [25] به شناسایی آسیب در سازه‌های تحت تحریک زلزله بر مبنای تبدیل موجک پرداختند. آن‌ها با تحلیل پاسخ تاریخیچه زمانی سازه و واکاوی ضرایب جزئیات موجک موفق شدند محل و زمان وقوع آسیب را بدون نیاز به اطلاعات اولیه سازه شناسایی نمایند. نادرپور و فخاریان [26] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای به شناسایی پارامترهای مودال سازه پرداختند. در روش پیشنهادی، پاسخ ارتعاش آزاد سازه با استفاده از تبدیل بسته موجک تجزیه شد. آن‌ها سیگنال تجزیه شده‌ای را که دارای انرژی یکسان با سیگنال اصلی است برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده نمودند و عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال را با استفاده از نتایج نمونه آزمایشگاهی مبنای تأیید کردند. یانگ و ایادیچی [27] روشی برای شناسایی آسیب صفحات کامپوزیتی چند لایه، با استفاده از سطح فرکانس مودال⁹ (MFS) ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضریب موجک سطح فرکانس مودال می‌توان محل و شکل آسیب در صفحات کامپوزیتی چند لایه را مشخص نمود. ژاو و همکاران [28] با استفاده از اختلاف ضرایب موجک و آنالیز چند رزولو شنی²⁰ به آشکارسازی آسیب تیر بتن آرمه پرداختند و با معرفی یک شاخص شناسایی خرابی، محل آسیب را شناسایی نمودند. رضایی فر و همکاران [29] به شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها 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 شکل مود موفق به شناسایی موقعیت جداشدگی هسته بتنی و جداره فولادی شدند. همچنین، آن‌ها

در پژوهش دیگری با استفاده از آنالیز موجک داده‌های شکل مود، محدوده تقریبی آسیب در ستون‌های فولادی پر شده با بتن را شناسایی نمودند [30]. پایسته و همکاران [31] با بکارگیری تبدیل موجک گسسته و داده‌های مودال بازسازی شده به شناسایی آسیب صفحات پرداختند. نتایج نشان داد که ضرایب موجک داده‌های مودال بازسازی شده در مقایسه با ضرایب موجک داده‌های مودال اصلی، آسیب‌های ریز را با وضوح بالایی نشان می‌دهد. حسینی واعظ و عارف زاده [32] با استفاده از آنالیز موجک به مقایسه داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند. مشاهده شد که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از داده‌های استاتیکی، عواملی چون نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری در میزان ضرایب موجک تأثیرگذار است. وانگ و همکاران [33] برای شناسایی آسیب در یک سازه تونلی، یک شاخص شناسایی خرابی مبتنی بر تبدیل موجک و بردار نیروی باقی‌مانده پیشنهاد دادند و برای مدل المان محدود تونل با انواع مختلف خرابی در موقعیت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک شاخص مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب مورد استفاده واقع شود. خان احمدی و همکاران [34] با مقایسه ضرایب موجک حالت‌های سالم و معیوب هشت شکل مود اول صفحه فولادی نشان دادند که اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف خرابی چشم‌گیر است و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان محل‌های خرابی را با دقت بالایی شناسایی نمود. آن‌ها در پژوهش دیگری با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی به شناسایی خرابی در صفحات پیش‌ساخته 3D پانل پرداختند و موفق به آشکارسازی مکان‌های آسیب با شدت‌های مختلف خرابی شدند [35]. همچنین، آن‌ها با مطالعه مقایسه‌ای آشکارسازی خرابی در تیرهای فولادی مبتنی بر تبدیلات موجک پیوسته و گسسته نشان دادند که می‌توان با هر دو نوع تبدیلات موجک از تحلیل پاسخ‌های

استاتیکی و دینامیکی، موقعیت‌های خرابی را با دقت بالایی شناسایی نمود [36]. همچنین در پژوهش دیگری، به شناسایی آسیب ستون تحت بار محوری بر مبنای موجک و داده‌های مودال پرداختند. نتایج نشان داد که ضرایب جزئیات حاصل از آنالیز موجک در محل‌های آسیب اغتشاشات را نشان می‌دهد، به شکلی که در تمامی مودهای بررسی شده در نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، محل‌های آسیب با دقت بالایی شناسایی شدند [37].

در ادامه، مطالعات انجام شده در ارتباط با پایش سلامتی ستون‌های CFST بر مبنای آنالیز موجک آورده شده است. شناسایی منطقه جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی ستون CFST بر اساس طیف انرژی موجک و پیزو سرامیک توسط ژو و همکاران در مراجع [38 و 39] انجام شده است. در این مطالعات با تعبیه پیزوالکتریک‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده از سطح خارجی به عنوان حسگر، یک روش پایش وضعیت سطح داخلی پیشنهاد شده است. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل طیف انرژی موجک انجام شده و شاخص شناسایی بر پایه تغییرات وزنی تعریف شده است. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی به نقص جداشدگی حساس است و سطح داخلی ستون را به طور کامل ارزیابی می‌کند. شناسایی آسیب جداشدگی ستون CFST بر مبنای پاسخ حسگر پیزوالکتریک تعبیه شده در بتن انجام شد. نتایج نشان داد که اثر جداشدگی فعال جداره فولادی از هسته بتنی روی PZT غالب است. این پژوهش امکان شناسایی آسیب جداشدگی ستون‌های CFST با مقطع مستطیلی شکل با ساختار هسته بتنی چند مقیاسی را تأیید کرده است [40]. برای درک سازوکار شناسایی برای مقاطع مستطیلی و دایره‌ای با استفاده از PZT نصب شده روی سطح و PZT جاسازی شده در هسته بتنی، شبیه‌سازی عددی تغییرات انتشار موج تنش به علت وجود نقص‌های جداشدگی صورت گرفته است [41-42]. به منظور بررسی اثر پیزوالکتریک، مواد PZT بکار گرفته شده و اثر کوپلینگ بین PZT و ستون CFST،

کوپلینگ چند فازی ایجاد شده است و علاوه بر این، مطالعه عددی بررسی تأثیر آسیب‌های جداشدگی بر فرآیند انتشار موجک و کاهش تنش موج در ستون انجام شده است. سرانجام حساسیت سیگنال‌های خروجی به ابعاد آسیب مورد بررسی قرار گرفته و با یافته‌های مربوطه مقایسه شده است [43].

با توجه به اینکه در حوزه پایش سلامت در ارتباط با ستون‌های CFST بر خلاف ستون‌های بتنی و فولادی پژوهش‌های مدون و مفصلی انجام نشده، مسئله شناسایی آسیب چه به صورت آزمایشگاهی و چه تحلیلی موضوعی مورد توجه است. از طرفی ستون‌های CFST به طور افزونی در سازه‌های بلند مرتبه و پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با نظر به اهمیت و جایگاه این نوع ستون‌ها در سازه‌های مهندسی و گسترش روز افزون استفاده از آن‌ها، شناسایی آسیب‌های جزئی قبل از تبدیل به آسیب‌های بزرگ و غیر قابل جبران، بسیار مهم و حائز اهمیت است. با توجه به مطالعات به نظر می‌رسد در این نوع ستون‌ها، جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی نسبت به سایر آسیب‌ها نظیر چروکیدگی جداره فولادی و وجود حفره در هسته بتنی، محتمل‌ترین آسیب بوده و شناسایی آن به دلیل طول زیاد و تأثیر کمتر در کاهش سختی سازه دشوارتر باشد. در این مقاله، شناسایی منطقه جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی با استفاده از داده‌های مودال مبتنی بر آنالیز موجک پیوسته مورد بررسی واقع، و سعی شده است منطقه آسیب جداشدگی به شکل واضح‌تری قابل شناسایی باشد.

۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک یکی از روش‌های توانمند پردازش سیگنال‌ها است که نسبت به دیگر روش‌های پردازش سیگنال (تبدیل فوریه^۱ (FT) و تبدیل فوریه زمان کوتاه^۲ (STFT)) مشکلات مربوط به رزولوشن ثابت را ندارد؛ در واقع تبدیل موجک مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای

برای یک بازه زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود [49].

هر رزولوشن فرکانسی تغییر کرده و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آید [45-46].

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود ستون CFST

ستون CFST به ارتفاع ۳ متر و ضخامت جداره فولادی ۳ میلی‌متر با مقطع مربعی به طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر با شرایط تکیه‌گاهی گیردار- مفصلی و مشخصات مصالح فولادی و بتنی ارائه شده در جدول (۱) در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی جداره فولادی و هسته بتنی به ترتیب از المان‌های Shell و Solid استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی و بتنی در ستون CFST

Material	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Steel	200	7850	0.3
Concrete	18	2170	0.2

Table 1. Material properties in a CFST column

در شکل (۱) ستون CFST با شرایط تکیه‌گاهی و محل‌های آسیب جداشدگی به ابعاد ۳۰×۱۰ سانتی‌متر و به عمق ۳ میلی‌متر که به صورت کاهش مدول الاستیسیته بتن به میزان ۳۰٪ تعریف و، نشان داده شده است. مشخصات هندسی محل‌های آسیب به شرح جدول (۲) است.

شکل ۱. ستون CFST با شرایط تکیه‌گاهی گیردار- مفصلی

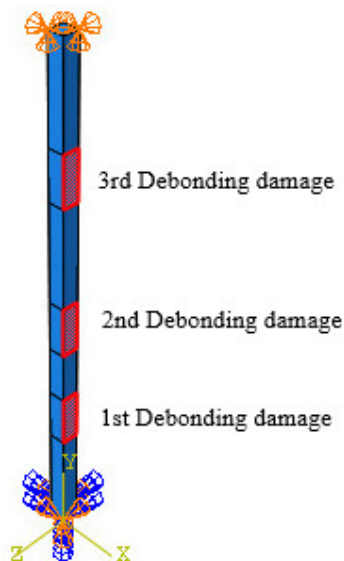


Fig. 1. CFST column with fixed-pinned Support conditions

تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته^۱ (CWT) و تبدیل موجک گسسته^۲ (DWT) تعریف شده‌اند که در این مقاله نوع پیوسته تبدیل موجک استفاده شده و در ادامه به مبانی ریاضی آن پرداخته شده است. تبدیل موجک پیوسته سیگنال $x(t)$ در بازه $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) تعریف می‌شود [46-47]:

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

که در آن

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند. ψ^* مزدوج مختلط تابع موجک ψ است. تابع موجک در آنالیز 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 آنالیز موجک انتخاب می‌شود.

تابع موجک باید این ۳ شرط را داشته باشد:

۱- انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [46 & 48]: به عبارتی:

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

۲- انرژی آن محدود باشد [46 & 48]: به عبارتی:

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

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

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

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

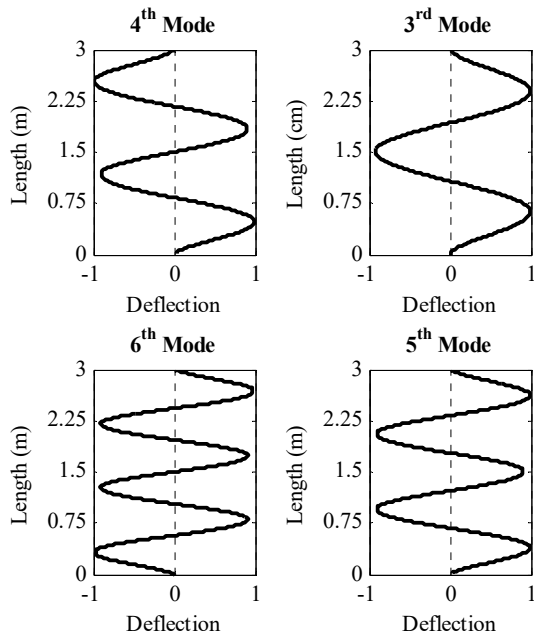


Fig. 2. Six undamaged first mode shapes of the column

جدول ۳. مقادیر فرکانس طبیعی شش مود اول حالت بدون آسیب و هر یک از حالت‌های آسیب (Hz)

Damage State	Mode Number					
	1	2	3	4	5	6
Natural Frequency (Hz)						
U	50.821	137.90	264.9	427.5	621.2	841.9
D1	50.819	137.84	264.8	427.4	621.1	841.5
D2	50.796	137.88	264.8	427.3	621.0	841.6
D3	50.819	137.84	264.8	427.4	621.1	841.5
D4	50.817	137.77	264.7	427.3	620.9	841.2

Table 3. Natural frequency values of no-damage condition and each of the damage conditions (Hz)

۵- شناسایی منطقه آسیب جداول

۵-۱- الگوریتم آشکارسازی موجک

به طور کلی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تبدیلات موجک توانمندی آن‌ها در شناسایی نقاط ناپیوستگی و یا تغییرات ناگهانی رخ داده در برخی نقاط از سیگنال‌ها است. بر مبنای این توانمندی، گام‌های الگوریتم شناسایی آسیب بر مبنای تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر ارائه شده است:

گام ۱: فراخوانی شکل مودهای حالت‌های آسیب و بدون

آسیب به محیط نرم افزار MATLAB؛

جدول ۲. مشخصات هندسی محل‌های آسیب جداولگی ستون CFST

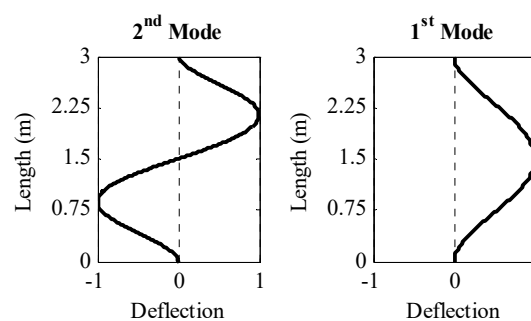
Debonding Damage ...			
State	Number	Label	Zone (m)
D1	1	1	0.6 – 0.9
D2	1	2	1.2 – 1.5
D3	1	3	2.1 – 2.4
D4	2	1	0.6 – 0.9
		3	2.1 – 2.4

Table 2. Geometric profile of the CFST column debonding damage locations

۴- تحلیل فرکانسی

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 مورد تحلیل فرکانسی واقع شده است. در شکل (۲) شش شکل مود اول حالت بدون آسیب ستون نشان داده شده و در جدول (۳) مقادیر فرکانس‌های حالت بدون آسیب و هر یک از حالت‌های آسیب شش مود اول ارائه شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس‌های حالت آسیب از فرکانس‌های حالت بدون آسیب کمتر است. همچنین، فرکانس حالت آسیب D4 از فرکانس حالت‌های آسیب D1 و D3 کمتر است؛ زیرا حالت آسیب D4 به صورت مجموع حالت‌های آسیب D1 و D3 تعریف شده است.

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



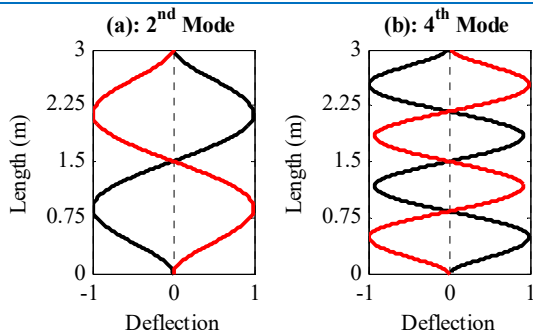
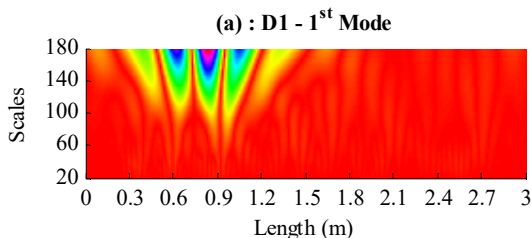


Fig. 3. The concept of the angle between the mode shape of the no-damage condition and the mode shape of damage condition (D1); (a) 2nd Mode, (b) 4th Mode

۵-۲- آشکارسازی منطقه آسیب جداشدگی

آنالیز موجک پیوسته سیگنال‌های ورودی انجام شده و نتایج آنالیز با تابع موجک بهینه coif5 در شکل‌های (۴ تا ۶) برای موده‌های اول تا سوم آورده شده است. محل‌های آسیب با با وضوح مناسبی شناسایی شده‌اند. لازم به ذکر است که بررسی‌ها با دیگر توابع موجک از خانواده‌های دابچیز^۲ (Db)، کوئفلتس^۳ (Coif) و سیمپلتس^۴ (Sym) و همچنین، توابع موجک بیورتوگونال^۵ (Bior و Rbio) انجام گرفت و نتایج آشکارسازی قابل قبولی به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با تعریف سیگنال ورودی تبدیل موجک به صورت مجموع یا تفاضل شکل موده‌های سالم و معیوب درونیابی شده اسپلاین مکعبی، سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات تبدیل موجک دارای اطلاعات سودمندی برای آشکارسازی محل‌های آسیب جداشدگی هستند؛ به شکلی که در مقیاس‌های بالا، تجمع اغتشاش ضرایب موجک با وضوح بالایی مشاهده می‌شود و در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری به محدوده جداشدگی وجود دارد.

شکل ۴: نتایج آنالیز موجک پیوسته سیگنال مود اول حالت‌های آسیب



گام ۲: درونیابی اسپلاین مکعبی^۱ (CSI) شکل موده‌ها؛

گام ۳: تعریف سیگنال ورودی مود i ام (S_i) بر مبنای زاویه بین بردار شکل موده‌های سالم و معیوب گام ۲؛

$$S_i = \phi_i^u \pm \phi_i^d \quad (6)$$

که در آن ϕ_i^u و ϕ_i^d به ترتیب بردار درونیابی شده شکل‌های مود i ام حالت‌های سالم و آسیب هستند. در رابطه (۶) هنگامی که زاویه بین بردار شکل موده‌ها تقریباً صفر و یا ۱۸۰ درجه باشد، به ترتیب از حالت تفاضل و مجموع استفاده می‌شود.

گام ۴: آنالیز موجک پیوسته سیگنال S_i و شناسایی منطقه آسیب جداشدگی.

بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که زاویه بین بردار شکل موده‌های سالم و معیوب نزدیک به صفر و یا ۱۸۰ درجه است. در جدول (۴) زاویه بردار شکل موده‌های هر یک از حالت‌های آسیب با شکل مود نظیر شان از حالت بدون آسیب محاسبه شده است.

زوایای محاسبه شده نزدیک به ۱۸۰ درجه نشان می‌دهد که در اثر آسیب، جابه‌جایی نسبی درجات آزادی در خلاف جهت هم هست. این موضوع به عنوان نمونه، در شکل (۳) برای شکل موده‌های دوم و چهارم حالت‌های سالم و آسیب D1 نشان داده شده است.

جدول ۴: زاویه بین بردار شکل موده‌های حالت‌های آسیب و حالت بدون آسیب (درجه)

	Damage State				Mode Number
	D4	D3	D2	D1	
	$\angle(\boldsymbol{\phi}_i^u, \boldsymbol{\phi}_i^d)$				
Undamaged State	0.0034	0.0048	0.0159	0.0048	1
	0.0200	0.0389	0.0201	179.96	2
	0.0316	0.0495	0.0472	0.0495	3
	0.0269	0.0301	179.95	179.97	4

Table 4. The angle between the mode shapes of no-damage and damage conditions (degree)

شکل ۳: مفهوم زاویه بین بردار شکل موده‌های حالت‌های سالم و آسیب D1؛ (آ) مود دوم، (ب) مود چهارم

4. Symlets
5. Biorthogonal

1. Cubic Spline Interpolation (CSI)
2. Daubechies
3. Coiflets

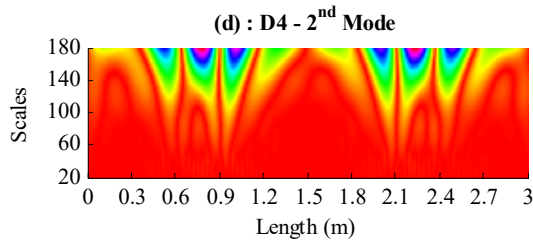


Fig. 5. Results of continuous wavelet analysis of the 2nd mode signal of the damage conditions; (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4

شکل ۶. نتایج آنالیز موجک پیوسته سیگنال مود سوم حالت‌های آسیب

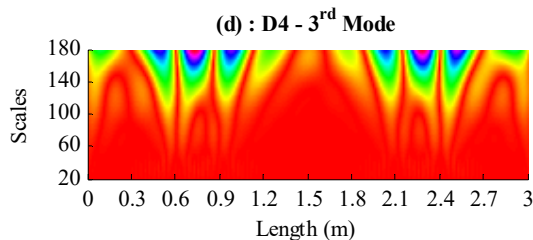
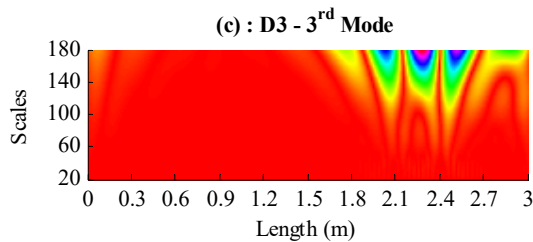
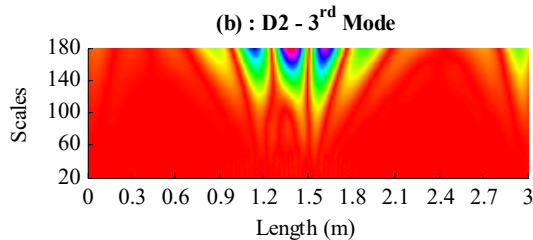
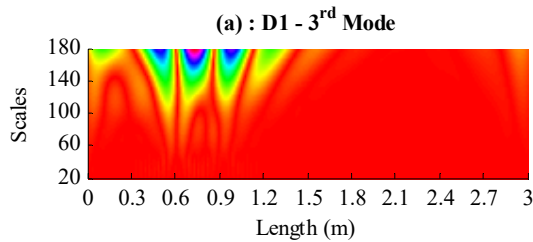


Fig. 6. Results of continuous wavelet analysis of the 3rd mode signal of the damage conditions; (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4

۶- شکل مود نویزدار و الگوریتم آشکارساز موجک

در روند شناسایی آسیب ممکن است سازه‌ها تحت اثر ارتعاشات بیرونی واقع باشند و داده‌های شکل مود با نویزهای

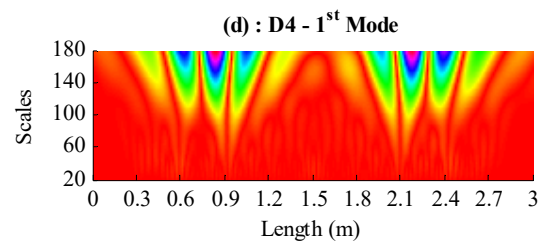
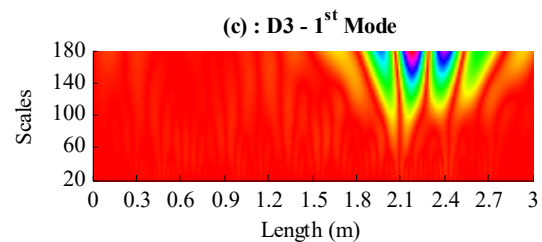
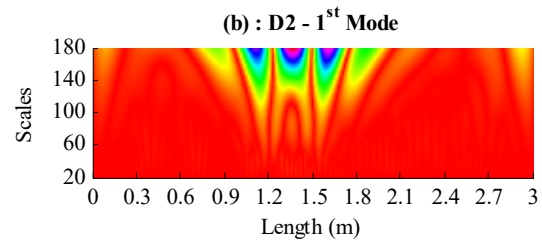
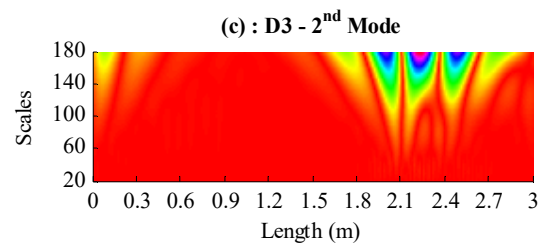
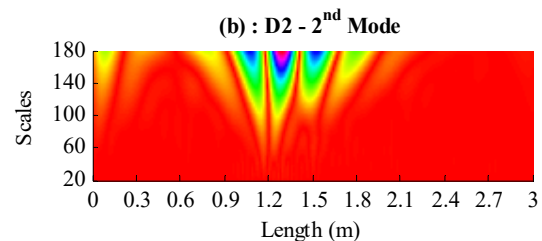
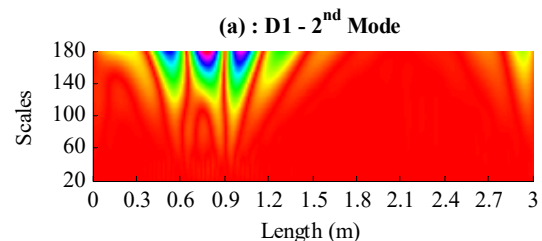


Fig. 4. Results of continuous wavelet analysis of the 1st mode signal of the damage conditions; (a) D1, (b) D2, (c) D3, (d) D4

شکل ۵. نتایج آنالیز موجک پیوسته سیگنال مود دوم حالت‌های آسیب



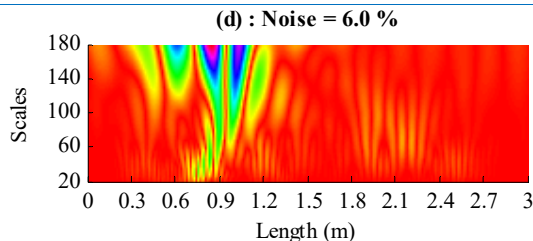


Fig. 7. Results of continuous wavelet analysis of the 1st mode noisy signal for the D1 damage state

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با گذشت زمان سازه‌ها تحت شرایط محیطی و بارهای وارد شده دچار آسیب می‌شوند. حفظ سلامت، پایداری و عملکرد مناسب سازه‌ها و بخش‌های مختلف آن‌ها، ضرورتی انکار ناپذیر است و عدم شناخت صحیح از رفتار سازه‌ها ممکن است سبب بروز آسیب‌های ناگهانی و ایجاد هزینه‌های فراوان اجتماعی و اقتصادی شود.

با توجه به عملکرد مناسب ستون‌های CFST استفاده از این نوع ستون‌ها در ساختمان‌های بلند مرتبه و سازه‌های پل به ویژه در مناطق لرزه خیز گسترش یافته است. از آنجا که وجود آسیب در سازه‌ها امری اجتناب ناپذیر است، ممکن است این ستون‌ها در حین اجرا و یا پس از تجربه دوره‌های بارگذاری دچار آسیب‌های احتمالی شوند. یکی از محتمل‌ترین آسیب‌های موجود در ستون‌های CFST جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی است. در این مقاله، ستون CFST با شرایط تکیه‌گاهی گیردار-مفصلی در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS در دو حالت با و بدون آسیب مدل سازی و تحلیل فرکانسی شد و اطلاعات مودال شامل فرکانس‌ها و جابجایی در جات آزادی استخراج شد. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد:

۱- در اثر جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی، مقادیر فرکانس‌های اولیه (حالت بدون آسیب) و ثانویه (حالت با آسیب) دارای اختلاف است؛ این اختلاف فرکانسی به دلیل وجود آسیب است.

۲- مقدار زاویه بین بردار شکل مدهای اولیه و ثانویه نزدیک

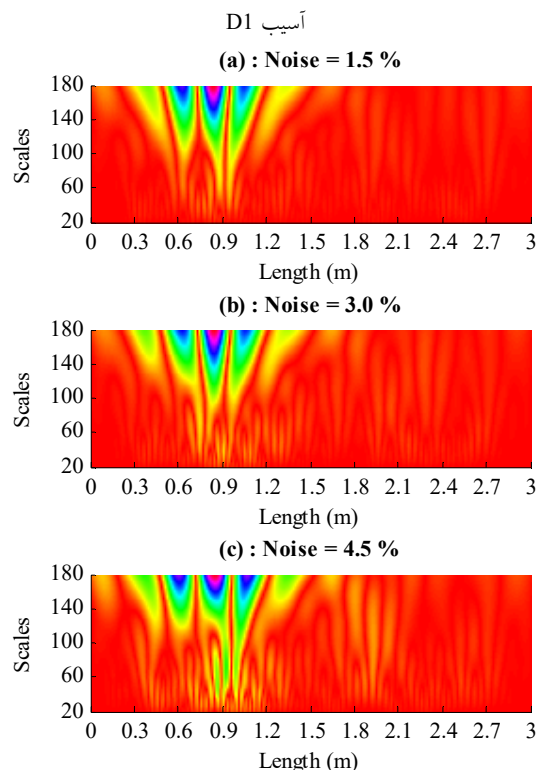
احتمالی همراه باشد؛ بنابراین، از یک الگوریتم تشخیص آسیب توانمند انتظار می‌رود با بکارگیری داده‌های مودال نویزی نیز نتایج آشکارسازی قابل قبولی به دست آید.

در رابطه (۷) چگونگی اعمال نویز به بردار شکل مود ϕ_i آورده شده است.

$$\begin{aligned} r &= 2 * (\text{rand}(\text{numel}(\phi_i), 1) - 0.5) \\ R &= 1 + \text{Noise} * r \\ \phi_i^{\text{Noise}} &= \phi_i * R \end{aligned} \quad (7)$$

با استفاده از تابع numel تعداد اعضای بردار ϕ_i محاسبه می‌شود. تابع rand یک بردار تصادفی هم اندازه با ϕ_i با مقادیر اینفیمم و سوپریمم صفر و ۱ تولید می‌کند و در نتیجه، بردار r برداری با مقادیر اینفیمم و سوپریمم -۱ و ۱ خواهد بود و به این صورت اثر رفت و برگشت نویز لحاظ می‌شود. در شکل (۷) نتایج بررسی تشخیص آسیب مربوط به مقادیر نویز ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ در صد قابلیت تشخیص آسیب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در هر بار اجرای الگوریتم با توجه به تصادفی بودن بردار r چگونگی اغتشاش ضرایب جزئیات موجک در منطقه آسیب جداشدگی متفاوت است.

شکل ۷. نتایج آنالیز موجک پیوسته سیگنال نویزدار مود اول حالت



- Acoustics*, **116**(4), 409-416.
- [5] Sone A., Yamamoto S., Nakaoka A., Masuda A. 1995 Health monitoring system of structures based on orthonormal wavelet transform, *Seismic Engineering*, ASME, **312**, 161-167.
- [6] Wang Q., Deng X. 1999 Damage detection with spatial wavelets, *International Journal of Solids and Structures*, **36**(23), 3443-3468.
- [7] Hou Z., Noori M., Amand R. 2000 Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **126**, 677-683.
- [8] Douka E., Loutridis S., Trochidis A. 2002 Crack identification in plates using wavelet analysis, *Journal of Sound and Vibration*, **270**, 279-295.
- [9] Ovanessova A.V., Suarez L.E. 2004 Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*, **26**(1), 39-49.
- [10] Loutridis S., Douka E., Trochidis A. 2004 Crack identification in double-cracked beams using wavelet analysis, *Journal of Sound and Vibration*, **277**, 1025-1039.
- [11] Chang C.C., Chen L.W. 2005 Detection of the location and size of cracks in the multiple cracked beam by spatial wavelet based approach, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **19**(1), 139-155.
- [12] Khatam H., Golafshani A.A., Beheshti-Aval S.B. and Noori M. 2007 Harmonic class loading for damage identification in beams using wavelet analysis, *Structural Health Monitoring*, **6**(1), 67-80.
- [13] Gokdag H., Kopmaz O. 2009 A new damage detection approach for beam-type structures based on the combination of continuous and discrete wavelet transforms, *Journal of Sound and Vibration*, **324**, 1158-1180.
- [14] 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.
- [15] 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*.
- [16] Zhong S. and Oyadiji S.O. 2011 Crack detection in simply supported beams using به صفر و یا ۱۸۰ درجه است؛ به عبارتی، در اثر آسیب ماهیت انحنایی شکل مودها دچار تغییر نمی‌شود (تغییرات بسیار ناچیز است) و تنها ممکن است جهت انحنا متفاوت باشد. بر مبنای زاویه بین بردار شکل مودها، مجموع یا تفاضل شکل موده‌های اولیه و ثانویه درونیابی شده اسپلاین مکعبی به عنوان سیگنال ورودی تبدیل موجک پیوسته تعریف شد. نتایج تحلیلی توابع موجک بهینه نشان داد که:
- ۳- سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات آنالیز موجک سیگنال ورودی دارای اطلاعات سودمندی برای شناسایی منطقه آسیب جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی است؛ به شکلی که با یک وارسی ساده می‌توان منطقه آسیب جداشدگی را شناسایی نمود.
- ۴- با استفاده از الگوریتم پیشنهادی می‌توان حتی برای شکل موده‌های آلوده به نویز نیز، منطقه آسیب جداشدگی را با قابلیت بالایی شناسایی نمود.
- ۵- هرچند شناسایی آسیب جداشدگی در مقیاس‌های بالا با وضوح مناسب‌تری انجام شده است و تجمع اغتشاش بیشتری از ضرایب جزئیات موجک مشاهده می‌شود، اما در مقیاس‌های پایین همگرایی بیشتری از ضرایب جزئیات موجک به محدوده آسیب جداشدگی وجود دارد.
- ### مراجع
- [1] 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.
- [2] Andreus 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).
- [3] 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*.
- [4] Newland D.E. 1994 Wavelet analysis of vibration, *Theory Journal of Vibration and*

- KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(7), 2859-2867.
- [27] Yang C., Oyadiji S.O. 2017 Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface, *Journal of Computers and Structures*, **179**, 109-126.
- [28] Zhao Y., Noori M., Altabey W.A. and Beheshti-Aval, S.B. 2017 Mode shape-based damage identification for a reinforced concrete beam using wavelet coefficient differences and multiresolution analysis, *Structural Control and Health Monitoring*.
- [29] Rezaifar O., Younesi A., Gholhaki M., and Esfandiari A. 2018 Debbonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **6**(4), 93-106. (In Persian).
- [30] Younesi A., Rezaifar O., Gholhaki M., and Esfandiari A., Structural health monitoring of a concrete-filled tube column, *Magazine of Civil Engineering*, **85**, 136-145.
- [31] Payesteh M., Aghajan Nashtae M., Taheri Nasab M., Beheshti-Aval S.B. 2019 Detection of damage in simply-supported plates by discrete wavelet transform of reconstructed modal data, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **51**(3), 503-522. (In Persian)
- [32] Hoseini-Vaez S.R., 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. (In Persian)
- [33] Wang S., Li J., Luo H., and Zhu H. 2019 Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector, *Journal of Engineering Structures*, **178**, 506-520.
- [34] Khanahmadi M., Rezayfar O., and Gholhaki M. 2021 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 (JSCE)*, **8**(5), 198-214. (In Persian).
- [35] Khanahmadi M., Rezayfar O., and Gholhaki M. 2021 Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **8**(8) (In Persian).
- [36] Khanahmadi M., Rezayfar O., and Gholhaki stationary wavelet transform of modal data, *Structural Control and Health Monitoring*, **18**, 169-190.
- [17] Ruckha M. 2011 Damage detection in beam using wavelet transform on higher vibration modes, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **49**(2), 399-417.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Li J., Hao H. 2014 Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction, *Structural Health Monitoring*, 1-17.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Rahami H., Amini-Tehrani H., Akhavat 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).
- [25] Amoozadeh A., Fadavi-Amiri M., Zare Hosseinzadeh, A. and Ghodrati-Amiri G. 2016 Processing of structural responses via wavelet transform for detecting damage under earthquake excitation, *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(20), 103-117 (in Persian).
- [26] Naderpour H., Fakharian P. 2016 A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification,

- [46] Mertins A. 1992 Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications, Wiley.
- [47] MATLAB Reference Guide, the Math Works, Ince, 2010b.
- [48] Zhongm S., Oyadiji S.O. 2011 Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data, *Computers and Structures*, **89**(1-2), 127-148.
- [49] Hansang K., Hani M. 2004 Damage detection of structures by wavelet analysis, *Engineering Structures*, **26**(3), 347-362.
- M. 2021 Comparative study on beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **8**(9) (In Persian).
- [37] Khanahmadi M., Gholhaki M., and Rezayfar O. 2021 Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data, *Journal of Modeling in Engineering (JME)*. **18**(63), 51-64 (In Persian).
- [38] Xu B., Li B., and Song G. 2012 Active debonding detection for large rectangular CFSTs based on wavelet packet energy spectrum with piezoceramics, *Journal of Structural Engineering*, **139**(9), 1435-1443.
- [39] Xu B., Zhang T., Song G., and Gu H. 2013 Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technology using wavelet packet analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **36**(1), 7-17.
- [40] Xu B., Chen H., Mo Y.L., and Zhou T. 2018 Dominance of debonding defect of CFST on PZT sensor response considering the meso-scale structure of concrete with multi-scale simulation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **107**, 515-528.
- [41] Xu B., Chen H., and Xia S. 2017 Numerical study on the mechanism of active interfacial debonding detection for rectangular CFSTs based on wavelet packet analysis with piezoceramics, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **86**, 108-121.
- [42] Xu B., Chen H., and Xia S. 2017 Wave propagation simulation and its wavelet package analysis for debonding detection of circular CFST members, *Smart Structure Systems*, **19**(2), 181-194.
- [43] Xu B., Chen H., Mo Y.L., and Chen X. 2017 Multi-physical field guided wave simulation for circular concrete-filled steel tubes coupled with piezoelectric patches considering debonding defects, *International Journal of Solids Structures*, **122**(123), 25-32.
- [44] Benedetto J.J., Frazier M.W. 1994 Wavelets: Mathematics and application, CRC Press, Boca Raton.
- [45] Rao K.R., Kim D.E., and Hwang J.J. 2005 Fast fourier transform: Algorithm and applications, *Springer*, Berlin Heidelberg.

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

Mohtasham Khanahmadi¹, Omid Rezaifar², Majid Gholhaki³, Adel Younesi⁴

1- M.Sc. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran

3- Professor, Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran

4- Ph.D. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

Structures get local damages by passing time during the service period under environmental conditions and loads, although insignificant. It is essential and important to maintain the health, durability and proper performance of structures and their various parts and lack of proper recognition of the behavior of structures may cause spontaneity damages and consequently, high social and economic costs may occur. According to the proper performance of CFST columns, using this type of columns in high-rise buildings and bridge structures has expanded especially in seismic areas. Steel and concrete can cover each other's weaknesses by simultaneously using concrete and steel in CFST columns. The weakness of concrete against tensile and the weakness of steel against pressure has compensated by the combination of steel and concrete in this type of columns. Also these columns may be damaged during construction or after experiencing load periods (earthquake, wind, etc.), because getting structures damage is inevitable. One of the primary goals of Structural Health Monitoring (SHM) is damages detection of the structure in the early stages of formation. If the damage locations in the structure can be determined and its gradual course can be observed, the damaged members can be repaired or replaced before reaching the critical condition and occurring complete breakdown. Among the methods of damage detection, many researchers consider the methods based on signal processing. One of the methods of signal processing is the mathematical method of wavelet analysis. By using wavelet analysis, more information can be obtained from the intended signal based on its ability to localize the signal in both time and frequency domains. One of the most probable damages in CFST columns is the debonding of the concrete core from the steel tube. In this paper, the CFST column element was modeled and frequency analyzed in ABAQUS finite element software in two conditions including damage and no-damage. The effect of the debonding was considered by decreasing the modulus of elasticity of the concrete in the damage places with depth of 3 mm. The results of the analysis have shown that the information of the mode shapes of the damage and no-damage conditions (angle between the mode shape vectors and the frequency values) changes due to the effect of the damage. In order to identify the debonding damage locations, in the Continuous Wavelet Transform (CWT) detection algorithm, the input signal was defined as the sum or difference of the mode shape of the damage condition and the mode shape of the no-damage condition based on the angle between the damaged and no-damaged mode shape vectors. The results showed that the output signals obtaining from the details of input signal wavelet analysis have useful information to identify the debonding locations of the concrete core from the steel tube and at high scales, the locations of the debonding damage identify easily, and at low scales, more convergence of wavelet coefficients is observed in the locations of the damage. According to the results, the proposed method was introduced as an effective detection method of debonding damage in CFST columns.

Keywords: Concrete-Filled Steel Tube (CFST) Column, Debonding Damage, Frequency Analysis, Wavelet Analysis, Damage Detection