

Damage Detection of Steel Moment Frames with Multiple Damages using Wavelet Transform

Milad Ebrahimnejad^{1*}, Masoume Nazari²

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering-Eastern Guilan, University of Guilan, Roudsar, Iran

2- MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Deylaman Institute of Higher Education, Lahijan, Iran

ABSTRACT

Regarding the possibility of lifetime reduction of the structure due to different factors, including cracking and phenomena, such as earthquakes, it is crucial to constantly monitor the structure so that the location and severity of the damage can be timely identified to correctly estimate the remaining lifetime of the structure. Wavelet transform is a robust tool for identifying local structural damages, by which the damage location is identified by observing a disturbance in the wavelet coefficients of the damaged structure, regardless of the main (undamaged) structure response. This paper addresses the application of wavelet transforms for identifying multiple cracks in steel moment resisting frames, which has received less attention in the literature. To this end, different crack modes were considered in the form of element removal for one-story and two-story frames, and the first four mode shapes of the damaged structure were derived using the ABAQUS. Finally, the derived mode shapes were subjected to continuous *coif5* and *sym2* wavelet transform, and the capability of the method in identifying cracks in structures accounting for the effect of mode order and damage location was evaluated. The results indicated that if the proper wavelet was selected, the proposed method would be able to identify the damage location based on the response signal using a simple, robust, and reliable way. The results also showed that the damage in the beam was identified with a higher accuracy than the column foot. It was also shown that the location of the damage in the mid-span of the beam can be identified with a higher accuracy than the damage near to the column abutments. Also, it was observed that higher modes could identify the damage location with a higher resolution.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 September 2022

Revise Date: 22 December 2022

Accept Date: 30 January 2023

Keywords:

Structural health monitoring

Damage detection

Multiple cracks

Element removal

Wavelet transform

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.360149.2924>

*Corresponding author: Milad Ebrahimnejad.

Email address: m.ebrahimnejad@guilan.ac.ir

تشخیص خرابی در قاب‌های خمشی فولادی با آسیب‌های چندگانه به کمک تبدیل موجک

میلاذ ابراهیم نژاد شلمانی^{۱*}، معصومه نظری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، مؤسسه آموزش عالی دیلمان، لاهیجان ایران

چکیده

با توجه به احتمال کاهش عمر مفید سازه در نتیجه عواملی چون ترک خوردگی و پدیده‌هایی نظیر زلزله، کنترل مداوم سازه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد تا با شناسایی به موقع موقعیت و شدت آسیب، بتوان تخمین مناسبی از عمر مفید باقیمانده‌ی سازه ارائه نمود. یک ابزار قدرتمند برای شناسایی آسیب‌های موضعی در سازه‌ها تبدیل موجک می‌باشد که در آن، بدون توجه به پاسخ سازه اصلی (آسیب ندیده)، موقعیت آسیب در سازه با مشاهده تغییر ناگهانی در ضرایب موجک سازه‌ی آسیب‌دیده شناسایی می‌گردد. در این مقاله کاربرد تبدیل موجک برای تشخیص ترک‌های چندگانه در قاب‌های خمشی فولادی، که در مطالعات گذشته کمتر مورد توجه بوده است، ارائه شده است. در این راستا، حالت‌های مختلف ترک به صورت حذف جزء^۱ (المان) در قاب‌های یک طبقه و دوطبقه در نظر گرفته شده و سپس، چهار مدل سازه در حالت آسیب‌دیده با استفاده از نرم افزار آباکوس^۲ استخراج می‌گردد. در نهایت، شکل‌های مدی به دست آمده تحت تبدیل‌های موجک پیوسته $sym2$ و $coif5$ قرار گرفته و توانایی این روش برای تشخیص ترک در سازه‌ها با در نظر گرفتن اثر مرتبه مدها و همچنین تاثیر فاصله آسیب از تکیه‌گاه ارزیابی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت انتخاب موجک مناسب، این روش قادر است موقعیت آسیب را از نشانک (سیگنال) پاسخ به روشی ساده، قوی و قابل اعتماد استخراج کند. همچنین نشان داده شد که موقعیت آسیب در وسط تیر نسبت به پای ستون با دقت بالاتری قابل شناسایی است. علاوه بر این مشاهده گردید که مدهای بالاتر با وضوح بیشتری موقعیت آسیب را شناسایی می‌کنند.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه‌ای، تشخیص خرابی، ترک چندگانه، حذف المان، تبدیل موجک.

doi:	سابقه مقاله:				شناسه دیجیتال:
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2023.360149.2924	۱۴۰۱/۰۶/۱۲	۱۴۰۱/۱۰/۰۱	۱۴۰۱/۱۱/۱۰	۱۴۰۱/۱۱/۱۰	۱۴۰۲/۰۸/۳۰
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: m.ebrahimnejad@guilan.ac.ir					میلاذ ابراهیم نژاد شلمانی

¹ element

² ABAQUS

۱- مقدمه

سازه‌ها در طول عمر مفید خود تحت اثر عوامل خارجی نظیر زلزله ممکن است سطوح مختلف آسیب را تجربه کنند. با توجه به اینکه حتی آسیب‌های جزئی سازه‌های نظیر ترک‌های موضعی نیز می‌توانند با گسترش خود، باعث فروریختن کل سازه گردند، لذا پایش مستمر وضعیت سلامت سازه جهت به‌دست آوردن اطلاعات دقیق لحظه‌ای از عملکرد سازه و در نهایت تشخیص وقوع آسیب ضروری می‌باشد. بر این اساس آسیب عبارتست از تغییراتی که در خصوصیات مادی، هندسی و ابعادی اعضای سازه در طول بهره‌برداری از آن رخ می‌دهد و شناسایی آسیب به کلیه روش‌هایی اطلاق می‌گردد که وجود خرابی را تشخیص و موقعیت و شدت آن را بیان می‌کنند. به‌کارگیری روش‌های قدیمی تشخیص خرابی که بیشتر آن‌ها بر اساس استفاده از تبدیل فوریه می‌باشد از دیرباز مورد توجه محققین مختلف بوده است. این روش‌ها با مشکلاتی مانند عدم دسترسی به پاسخ ارتعاشی سازه قبل از وقوع خرابی، مشکل بودن اطلاع از خواص مکانیکی دقیق مصالح به‌کاررفته در سازه و در نهایت پیچیدگی تحلیل دینامیکی کامل سازه روبه‌رو می‌باشند. لذا در سال‌های اخیر تلاش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای برای ارائه روش‌های جایگزین در جهت رفع این مشکلات انجام گرفته است.

با توجه به اینکه بروز ترک در سازه منجر به ایجاد تغییرات موضعی در سختی سازه‌ای می‌گردد، لذا پارامترهای دینامیکی وابسته مانند فرکانس‌های طبیعی و شکل مدها نیز با تغییراتی مواجه می‌گردند که تحلیل این تغییرات، شناسایی ترک در سازه را ممکن می‌سازد. یکی از روش‌های تشخیص خرابی که مبتنی بر پردازش نشانک (سیگنال) خروجی بوده و پایش سلامت سازه^۳ را بدون داشتن پاسخ سازه سالم، که دسترسی به آن مشکل و گاهی نیز غیرممکن است، انجام می‌دهد روش تبدیل موجک^۴ می‌باشد. در این روش، تبدیل موجک روی پاسخ استاتیکی یا شکل مدهای سازه‌ی آسیب‌دیده اعمال شده و ضرایب موجک به‌دست می‌آید. سپس با پردازش ضرایب موجک و مشاهده تغییرات ناگهانی در آن‌ها، وجود آسیب و موقعیت آن در سازه شناسایی می‌شود. مزیت اصلی که با استفاده از موجک‌ها به دست می‌آید، توانایی انجام تحلیل محلی یک نشانک با بزرگنمایی در هر بازه زمانی یا مکانی است. بنابراین تحلیل موجک قادر است برخی از جنبه‌های پنهان داده‌ها را که سایر روش‌های تحلیل نشانک از جمله تبدیل فوریه قادر به شناسایی آن‌ها نیستند، آشکار کند. به سبب توانایی بالایی که این روش در تشخیص تغییرات کوچک موجود در نشانک‌ها دارد، در سال‌های گذشته به عنوان ابزاری قدرتمند برای تشخیص خرابی در سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

در سال ۱۹۰۹ هار^۵ اولین کسی بود که در تحقیق خود به موجک‌ها اشاره نمود و نتایج او پایه و اساس کار دیگر محققان قرار گرفت [۱]. برای اولین بار، توانایی تبدیل موجک در تحلیل نشانک‌های ارتعاشی در سال ۱۹۹۳ توسط نیولند^۶ مورد ارزیابی قرار گرفت [۲]. اگرچه نیولند به صورت مشخصی از تبدیل موجک برای شناسایی خرابی در سازه‌ها استفاده نکرد، اما معرفی این روش به مباحث مهندسی مکانیک، عمران و هوافضا، مقدمه پژوهش‌های بعدی در زمینه شناسایی خرابی در سازه‌ها شد. سورس و روتولو^۷ در سال ۱۹۹۴ برای اولین بار با استفاده از تحلیل موجک پاسخ تاریخیچه زمانی انتهای آزاد تیر کنسولی، به تشخیص آسیب در آن پرداختند. آن‌ها در مدل اجزای محدود تیر مورد مطالعه، اثر باز و بسته شدن ترک را نیز مورد بررسی قرار دادند [۳].

سون^۸ و همکاران در سال ۱۹۹۵ تبدیل موجک را برای پردازش پاسخ‌های تاریخیچه زمانی سیستم یک درجه آزادی که در آن، خرابی به صورت کاهش سختی مدل شده بود، به کار گرفتند و مشاهده نمودند که تبدیل موجک حتی برای نشانک‌های آغشته به نویز نیز زمان وقوع خرابی را به خوبی نشان خواهد داد [۴]. نالدی و ونینی^۹ در سال ۱۹۹۷ کارآیی موجک‌ها را در تشخیص آسیب اجزای سازه‌ای

³ Structural Health Monitoring (SHM)

⁴ Wavelet Transform (WT)

⁵ Haar

⁶ Newland

⁷ Surace and Ruotolo

⁸ Sone

⁹ Naldi and Venini

مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آسیب را در مدل عددی تیری که تحت اثر تحریک هارمونیک قرار داشت به صورت کاهش ۲۱ درصدی سختی محوری در فاصله یک سوم از انتهای تیر لحاظ نمودند [۵]. جنتایل و مسینا^{۱۰} در سال ۲۰۰۳ با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به شناسایی ترک در تیرها پرداختند [۶]. آن‌ها یک تیر دو سرگیردار و یک تیر دو سر آزاد را به صورت عددی مدل‌سازی نموده و با تحلیل سه شکل مد اول، موقعیت خرابی را تعیین نمودند. محققین مذکور به این نتیجه رسیدند که تبدیل موجک قابلیت شناسایی آسیب حتی با حضور نویز را نیز دارد. در تحقیق دیگری توسط کیم و مهلم^{۱۱} در سال ۲۰۰۴، توانایی تبدیل موجک و تبدیل فوریه برای شناسایی آسیب در سازه‌ها بررسی شد [۷]. نتایج نشان داد که تبدیل فوریه سریع برای نشانک‌های ایستا و تبدیل موجک برای نشانک‌های غیر ایستا مناسب است.

شناسایی آسیب به کمک تبدیل موجک در سازه‌های خرابی نیز در سال‌های گذشته توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. پاتیسیری و هلمستاد^{۱۲} در سال ۲۰۰۳ توانستند الگوریتمی برای تشخیص خرابی در سازه‌های خرابی با استفاده از تحلیل موجک شکل مدها در اختیار قرار دهند [۸]. از جمله جدیدترین تحقیقات در این حوزه می‌توان به تحقیق موسوی و همکاران اشاره نمود که یک رویکرد جدید تشخیص آسیب مبتنی بر تبدیل موجک تجربی^{۱۳} و شبکه عصبی مصنوعی^{۱۴} به نام EWT-ANN برای تشخیص موفقیت-آمیز وجود، شدت و مکان آسیب در یک پل خرابی فولادی در مقیاس آزمایشگاهی ارائه نمودند [۹].

علاوه بر مطالعاتی که ذکر گردید، در دو دهه گذشته تحقیقات فراوانی در خصوص استفاده از تبدیل موجک برای شناسایی آسیب در تیرها و ورق‌ها صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به آشکارسازی آسیب در تیرها با ترکیب تبدیل موجک گسسته و پیوسته توسط گوکدگ و کوپمز^{۱۵} در سال ۲۰۰۹ [۱۰]، مطالعه تجربی وو و وانگ^{۱۶} در سال ۲۰۱۱ برای تشخیص ترک در یک تیر تحت جابجایی‌های استاتیکی [۱۱]، تحقیق هی و ژو^{۱۷} در سال ۲۰۱۳ در خصوص ارائه یک روش تشخیص خرابی پیش‌رونده براساس مدل اجزای محدود مبتنی بر موجک^{۱۸} (WFEM) چند مقیاسه [۱۲]، ارائه یک روش‌های شناسایی آسیب تبدیل موجک پیوسته^{۱۹} سه‌بعدی در تیرها توسط مونتانی^{۲۰} و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۳]، ارائه روش جدیدی جهت شناسایی خرابی صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح فرکانس مدال توسط یانگ و اویادیجی^{۲۱} در سال ۲۰۱۷ [۱۴]، ارائه یک روش تشخیص آسیب با دو فاز محلی‌سازی و کمی‌سازی برای تیرهای تحت بار متحرک به صورت آزمایشگاهی توسط هی^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۵] و شناسایی خرابی صفحات فولادی با استفاده از تبدیل موجک گسسته دوبعدی توسط خان احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۶] اشاره نمود.

در سال‌های اخیر شناسایی آسیب به کمک تبدیل موجک در قاب‌های ساختمانی، هر چند به صورت محدود، نیز موضوع تحقیق محققین بوده است. پتل^{۲۳} و همکاران در سال ۲۰۱۶ امکان‌سنجی استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر موجک، بدون توجه به مدل و فقط وابسته به پاسخ سازه، را برای شناسایی آسیب در یک ساختمان بتن مسلح شش طبقه مقیاس‌شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ضرایب موجک مستقیماً تحت تأثیر تغییر ویژگی‌های فیزیکی سازه قرار می‌گیرند و به طور مناسبی قادر به تشخیص آسیب هستند [۱۷]. وانگ^{۲۴} و همکاران در سال ۲۰۱۹ جهت شناسایی خرابی سازه تونلی، یک شاخص خرابی جدید مبتنی بر تبدیل موجک بر اساس

¹⁰ Gentile and Messina

¹¹ Kim and Mehlem

¹² Pothisiri and Hjelmstad

¹³ Empirical Wavelet Transform (EWT)

¹⁴ Artificial Neural Network (ANN)

¹⁵ Gökdağ and Kopmaz

¹⁶ Wu and Wang

¹⁷ He and Zhu

¹⁸ Wavelet Finite Element Model

¹⁹ Continuous Wavelet Transform (CWT)

²⁰ Montanari

²¹ Yang and Oyadiji

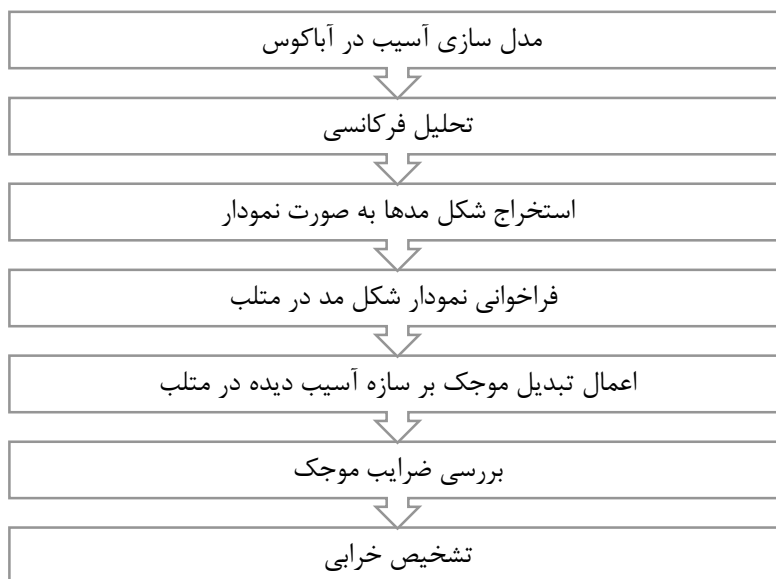
²² He

²³ Patel

²⁴ Wang

بردار نیروی باقی مانده پیشنهاد و برای مدل اجزای محدود تونل با انواع مختلف خرابی در موقعیت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان داد که شاخص خرابی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک شاخص مؤثر و کارآمد شناسایی خرابی مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]. تیموری و محمودی در سال ۲۰۲۰ نیز روشی جدید برای تشخیص آسیب در اتصالات قاب‌های خمشی فولادی بر اساس انحنای شکل مد معرفی نمودند. در این روش آسیب‌ها با استفاده از تجزیه متعامد مناسب^{۲۵} شکل مد به کمک تبدیل موجک، به طور دقیق محلی‌سازی می‌شوند. روش مذکور بر روی یک قاب آزمایشگاهی یک دهانه سه طبقه و همچنین بر روی مدل‌های عددی، در سناریوهای مختلف آسیب، به طور موفقیت آمیزی مورد مطالعه قرار گرفت [۱۹]. حنطه و رضایی‌فر در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به تحلیل شکل مد در یک سازه ساختمانی پانلی دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب موجک تولید شده شناسایی گردید [۲۰].

با بررسی مطالعات انجام شده و با توجه به کمبود تحقیقات جامع در خصوص شناسایی خرابی‌های چندگانه همزمان در اعضای مختلف قاب‌های ساختمانی، در این تحقیق امکان شناسایی چند آسیب همزمان در تیرها و یا ستون‌ها در قاب‌های ساختمانی فولادی با استفاده از تبدیل موجک مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، سناریوهای مختلفی برای آسیب در قاب‌های یک طبقه و دو طبقه با استفاده از روش حذف جزء (المان) در نظر گرفته شده و پس از انجام تحلیل مدال روی مدل اجزای محدود سازه آسیب دیده، شکل مدهای ارتعاشی استخراج می‌گردد. سپس شکل مدها تحت دو نوع تبدیل موجک مختلف بررسی شده تا بهترین موجک جهت پردازش داده‌ها و شناسایی آسیب مشخص گردد. روندنمای تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: روندنمای تحقیق.

۲- مبانی نظری

هدف از اعمال توابع ریاضی بر روی نشانک‌ها، به دست آوردن اطلاعات اضافی است که در نشانک اولیه قابل رؤیت نمی‌باشد. برای این منظور می‌توان از تبدیل فوریه یا تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده نمود. اما به دلیل ثابت نبودن محتوای فرکانسی پاسخ‌های سازه‌ای نسبت به زمان، نمی‌توان با استفاده از تبدیل فوریه با تقریب مناسبی اختلال محلی را شناسایی نمود. همچنین باید توجه داشت که تبدیل

²⁵ Proper Orthogonal Decomposition (POD)

فوریه اطلاعاتی در خصوص موقعیت اختلال (آسیب) ارائه نمی‌کند. تبدیل فوریه زمان کوتاه نیز اگرچه موقعیت آسیب را شناسایی می‌کند، اما نمی‌تواند مشخص نماید که فرکانس‌های مشخص در چه زمان‌هایی وجود دارند. یکی از روش‌هایی که برای رفع مشکلات فوق توسعه یافته است روش تبدیل موجک می‌باشد. در واقع تحلیل زمان-فرکانس یک نشانک توسط تبدیل موجک قابل انجام بوده و این تبدیل در تشخیص محتویات طیفی به صورت محلی مؤثر است. با دقت به این خصوصیت موجک‌ها، تشخیص نقاط شکستگی و یا تغییر شیب‌های ناگهانی یک نشانک (اختلال محلی) امکان‌پذیر شده و بدین ترتیب می‌توان محل وقوع آسیب را مشخص نمود [۲۱].

تحلیل موجک با انتخاب یک تابع موجک اصلی از خانواده موجک‌های موجود که می‌تواند تابعی از مکان x یا زمان t باشد، شروع می‌شود. این تابع موجک اصلی، که موجک مادر (ψ) نامیده می‌شود، توسط پارامتر مقیاس a کشیده یا فشرده شده و توسط پارامتر انتقال b منتقل می‌شود تا مجموعه‌ای از توابع پایه به صورت زیر تولید گردد [۲۲]:

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

در رابطه فوق a و b اعداد حقیقی بوده و $a \neq 0$ می‌باشد.

در تبدیل موجک ضرایبی نیز وجود دارند که بیانگر میزان شباهت نشانک مورد مطالعه با توابع موجک انتخاب شده می‌باشند. هر قدر شباهت این دو تابع بیشتر باشد ضرایب موجک بزرگتری تولید خواهد شد. این ضرایب با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شوند:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (2)$$

۳- مدل سازی

۳-۱- تحلیل اجزای محدود

یکی از پرکاربردترین روش‌های بررسی رفتار سازه‌ها در کنار مطالعات آزمایشگاهی و همچنین حل دقیق و تحلیلی، روش مدل‌سازی اجزای محدود می‌باشد که حوزه کاربرد آن در علوم مهندسی مختلف، به دلیل امکان شبیه‌سازی با کامپیوتر و حل عددی معادلات روز به روز در حال افزایش است. مدل‌سازی سازه در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌گیرد که شامل مراحل ساخت هندسه مدل، تعریف خصوصیات مکانیکی مصالح، سرهم‌بندی مدل، تعریف نوع تحلیل، تعریف شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری، شبکه‌بندی و پردازش مدل می‌باشد.

- برای تعریف هندسه قاب، در زیربخش^{۲۶} پارت^{۲۷}، فضای مدل‌سازی سه‌بعدی و اعضای قاب از نوع شکل‌پذیر^{۲۸} با اجزای سالیید^{۲۹} انتخاب شده و روش ترسیم اکستروژن^{۳۰} انتخاب می‌گردد. سپس با در نظر گرفتن ترک به عرض ۲ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر در تیر و ستون‌ها، قاب سه‌بعدی رسم می‌شود (شکل ۲).

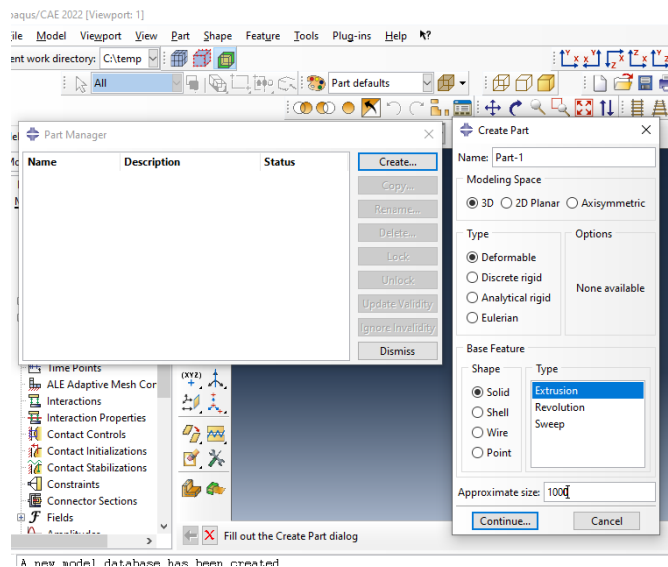
¹ Module

² Part

³ Deformable

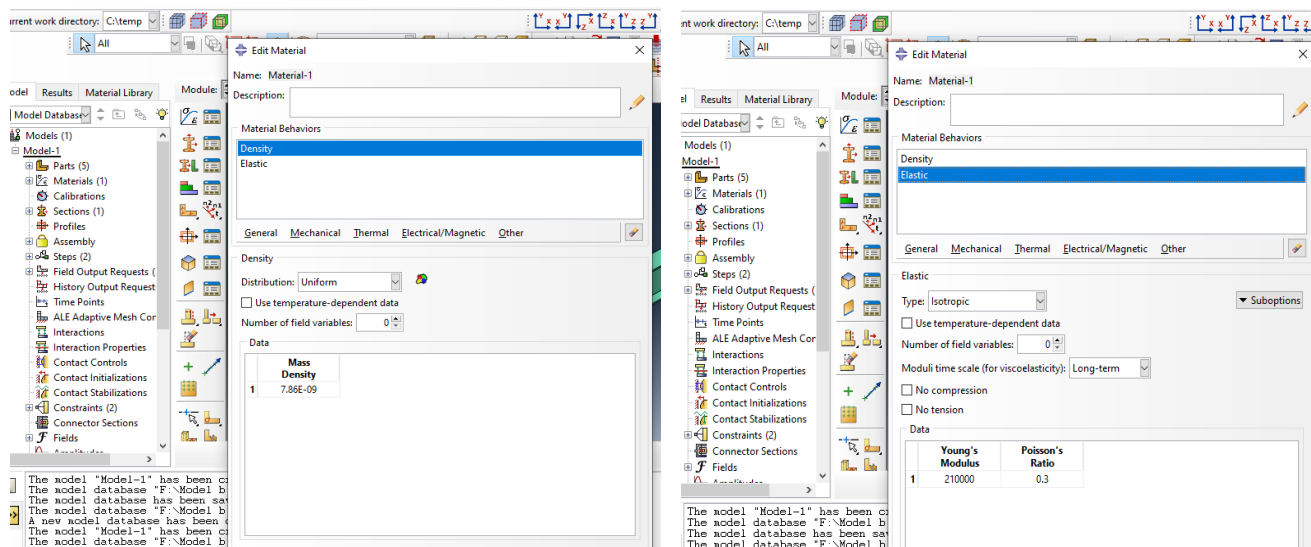
⁴ Solid

⁵ Extrusion



شکل ۲: تنظیمات مربوط به ترسیم هندسه مدل.

- جهت تعریف خصوصیات مکانیکی فولاد از قسمت پروپرتی^{۳۱} استفاده می‌گردد. برای این منظور چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ (با لحاظ کردن رفتار ارتجاعی) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).



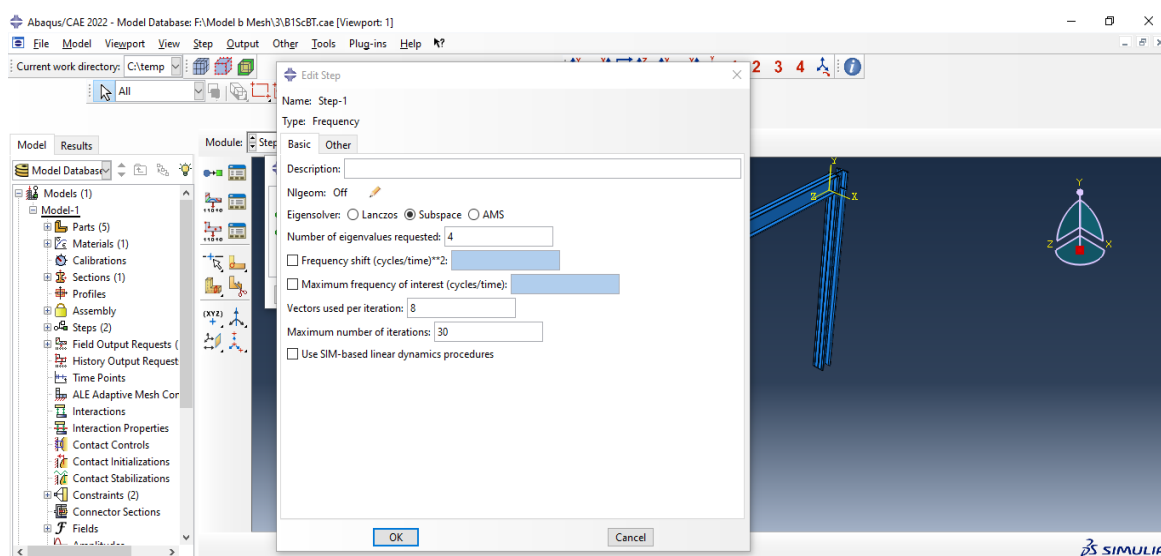
شکل ۳: تنظیمات مربوط به تعریف خصوصیات مصالح.

- برای سرهم کردن اجزای مختلف مدل مورد مطالعه (ساخته شده در قسمت پارت) از قسمت اسمبلی^{۳۲} استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در مدل‌سازی، تمام قاب به عنوان یک قطعه تعریف شده است، برای سرهم کردن مدل تنها همین قطعه مورد فراخوانی قرار می‌گیرد. اتصالات اعضا به یکدیگر به صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

³¹ Property

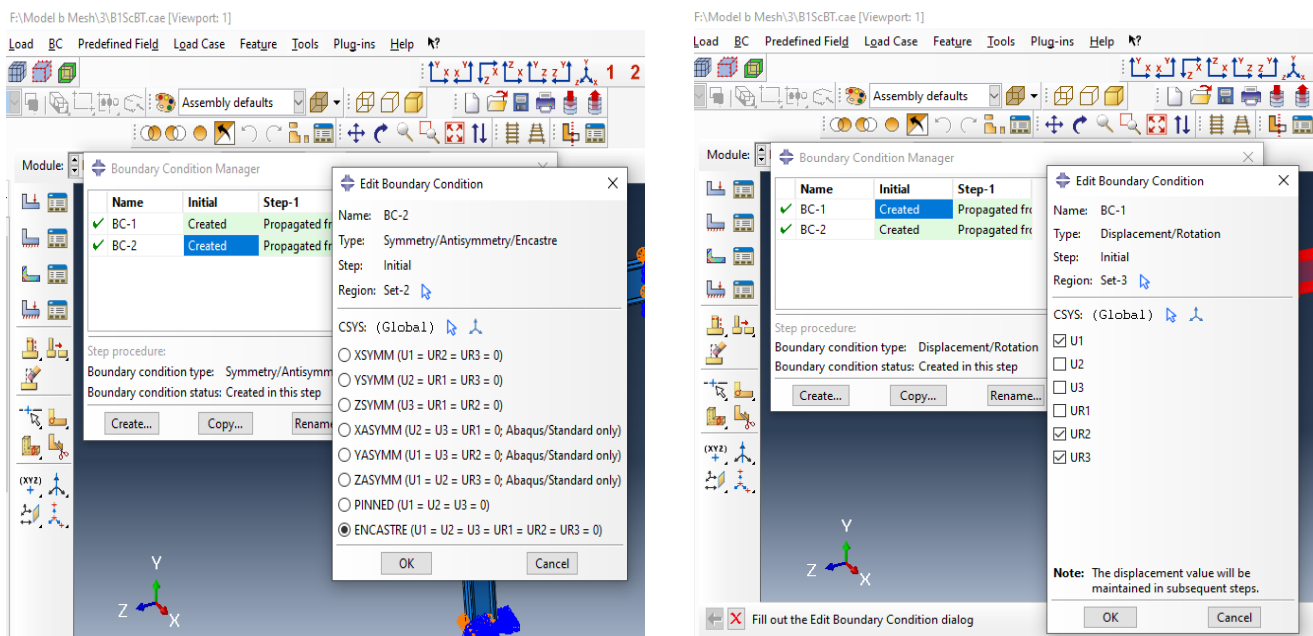
³² Assembly

- برای تعریف نوع تحلیل از قسمت استپ^{۳۳} استفاده می‌شود. در این قسمت انواع مختلف تحلیل از جمله استاتیکی، دینامیکی، فرکانسی و کمانشی ارائه شده است که در این تحقیق تحلیل فرکانسی انتخاب می‌گردد (شکل ۴).



شکل ۴: تنظیمات مربوط به انتخاب نوع تحلیل.

- برای معرفی قیدهای تکیه‌گاهی و اعمال بارگذاری از قسمت لود^{۳۴} استفاده می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی از نوع مکانیکال^{۳۵} انتخاب شده و برای گیردار نمودن پای ستون‌ها، تمامی درجات آزادی انتقالی و دورانی انتهای ستون‌ها بسته می‌شوند (شکل ۵).



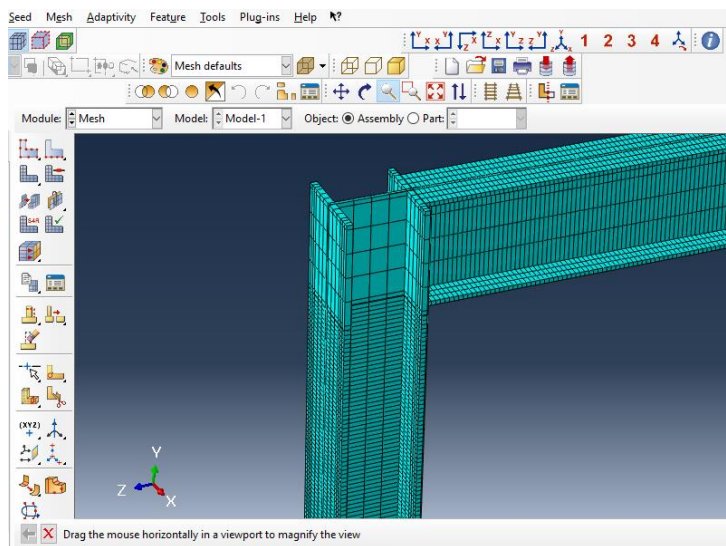
شکل ۵: تنظیمات مربوط به اعمال شرایط مرزی و بارگذاری.

³³ Step

³⁴ Load

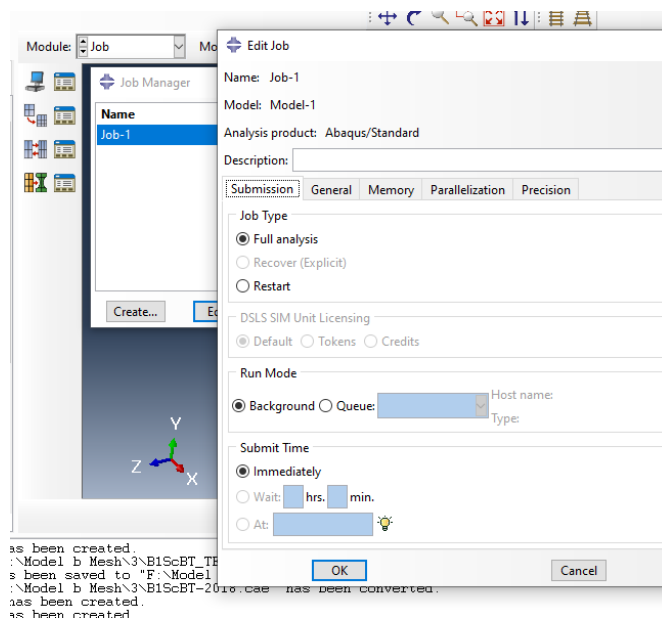
³⁵ Mechanical

- شبکه‌بندی قاب در قسمت مش^{۳۶} انجام می‌شود. در این تحقیق اندازه شبکه‌ها برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و با توجه به شکل هندسی منظم مدل، از تکنیک شبکه‌زنی با ساختار^{۳۷} استفاده می‌گردد و اجزای سه‌بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته C3D8R به مدل اختصاص داده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶: شبکه‌بندی مدل.

- در این مرحله با استفاده از قسمت جاب^{۳۸}، مدل ساخته شده تحلیل خواهد شد. پس از پایان تحلیل، می‌توان نتایج را در قسمت ویژوالیزیشن^{۳۹} مشاهده نمود. در تحقیق حاضر، چهار شکل مدل اول قاب آسیب‌دیده به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷: تنظیمات مربوط به تحلیل مدل.

³⁶ Mesh

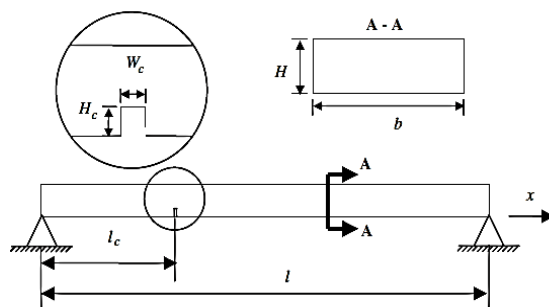
³⁷ Structured

³⁸ Job

³⁹ Visualization

۳-۱-۱- صحت سنجی مدل اجزای محدود

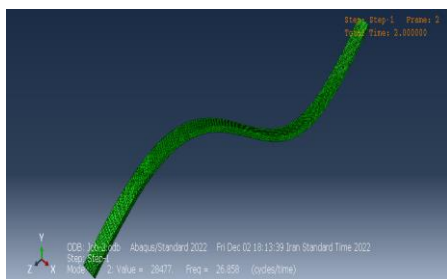
برای حصول اطمینان از صحت روش مدل سازی عددی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، در ابتدا نتایج مدل این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط ژانگ^{۴۰} و اویادیجی^{۴۱} [۲۳] که به شناسایی آسیب بر روی یک تیر دو سر مفصل پرداختند مقایسه می شود. مشخصات سازه مورد مطالعه آن ها در شکل ۸ و جدول ۱ ارائه شده است.



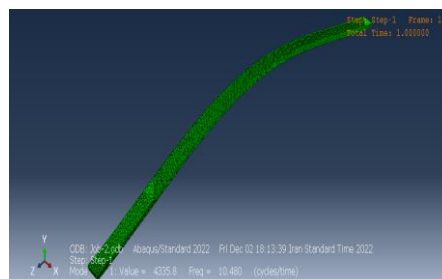
شکل ۸: جزئیات تیر مورد بررسی در مرجع [۲۳].

جدول ۱: جزئیات تیر مورد بررسی در مرجع [۲۳].

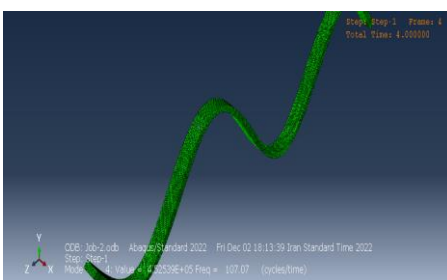
H_c (mm)	W_c (mm)	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	H (mm)	b (mm)	l (mm)
۱	۱	۷۸۵۰	۲۱۰	۲۵	۱۰۰	۳۰۰۰



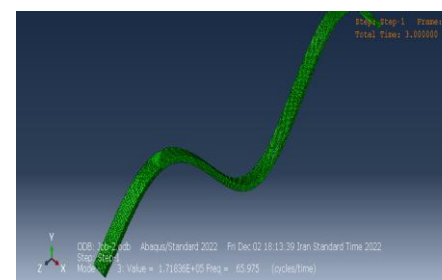
مد دوم



مد اول



مد چهارم



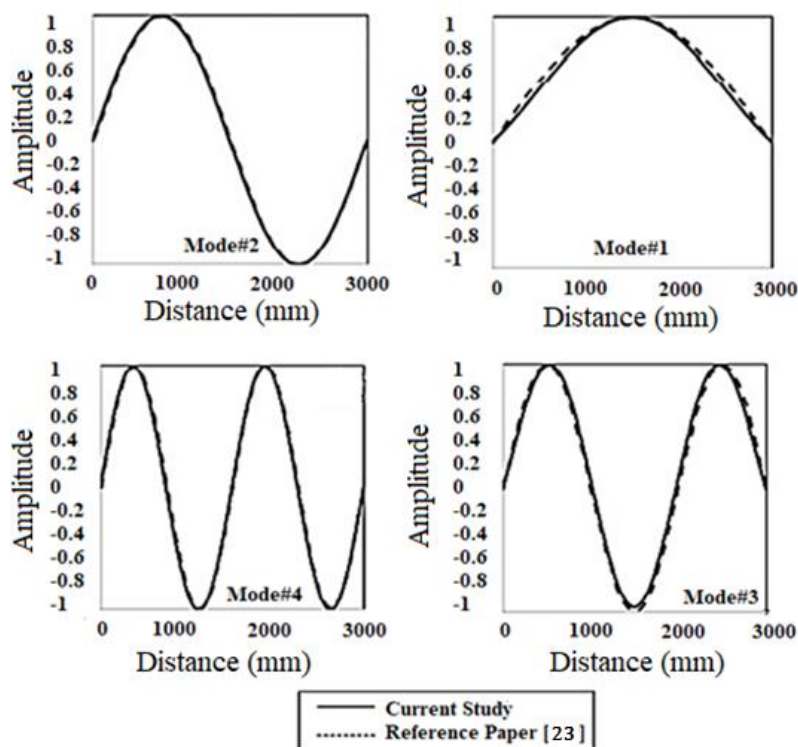
مد سوم

شکل ۹: شکل مد ارتعاشی استخراج شده از نرم افزار.

⁴⁰ Zhong

⁴¹ Oyadiji

برای مدل‌سازی تیر آسیب‌دیده در نرم افزار آباکوس از مدل آسیب (ترک) به صورت حذف عضو استفاده شده و ترک مذکور به ابعاد $100 \times 100 \times 1$ میلی متر در فاصله $L_c = 500$ mm از تکیه‌گاه سمت چپ مدل گردید. پس از انجام تحلیل مدال، چهار شکل مد ابتدایی تیر بررسی شده و مشخص گردید تطابق خوبی میان نتایج این تحقیق و نتایج مرجع مورد بررسی وجود دارد (شکل‌های ۹ و ۱۰).



شکل ۱۰: مقایسه شکل مد ارتعاشی تحقیق حاضر با مرجع [۲۳]

۳-۲- اعمال تبدیل موجک

۳-۲-۱- معیارهای انتخاب موجک مناسب

برای اعمال تبدیل موجک، انتخاب مناسب‌ترین موجک بسیار مهم می‌باشد. این انتخاب معمولاً از طریق آزمون و خطا انجام می‌شود، اما با بررسی ویژگی موجک‌های مختلف می‌توان بسیاری از آن‌ها را کنار گذاشته و روند تحلیل را تسریع نمود. به‌عنوان مثال، با توجه به مطالعه اوآنسو^{۴۲} و سوآرز^{۴۳} [۲۲] می‌توان موجک‌هایی که اجازه انجام تبدیل موجک سریع را نمی‌دهند حذف نمود، مانند موجک‌های گاوسین^{۴۴}، مکزیکن هت^{۴۵}، مورلت^{۴۶}، شانن^{۴۷} و می‌یر^{۴۸}. پس از حذف این موجک‌ها، موجک‌های متعامد مانند هار، دابشیز^{۴۹}، سیملت^{۵۰} و کویفلت^{۵۱} باقی می‌مانند که به علت تقارن و هموار بودن بیشتر موجک‌های سیملت و کویفلت [۲۴]، در این مطالعه از موجک‌های مذکور جهت تحلیل نشانک پاسخ استفاده شده است.

⁴² Ovanosova

⁴³ Suárez

⁴⁴ Gaussian

⁴⁵ Mexican Hat

⁴⁶ Morlet

⁴⁷ Shannon

⁴⁸ Meyer

⁴⁹ Daubechies

⁵⁰ Symlet

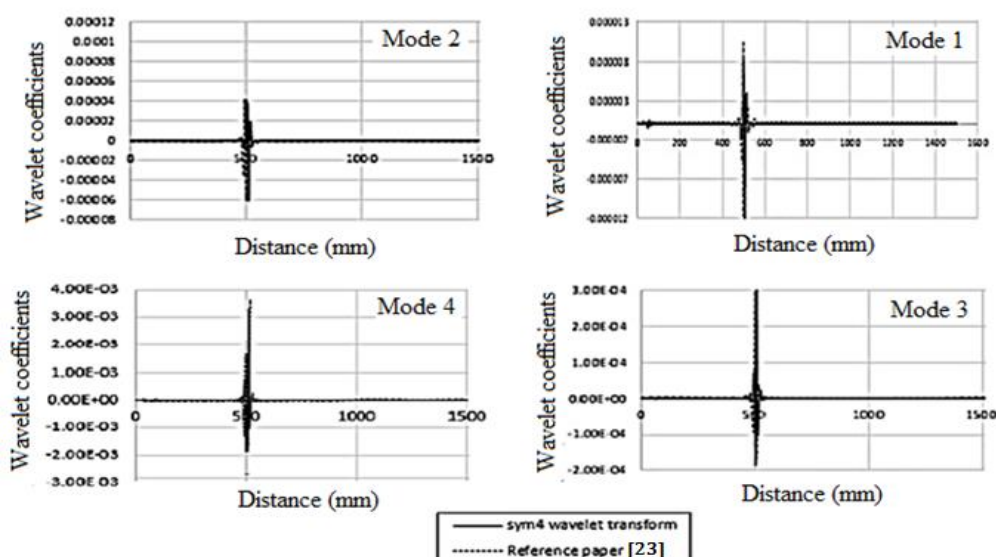
۲-۲-۳- روند تشخیص خرابی با تبدیل موجک

ایده اصلی استفاده از موجک‌ها برای تشخیص خرابی سازه‌ای بر این واقعیت استوار است که وجود ترک، ناپیوستگی‌های کوچکی را در پاسخ سازه‌ای در مکان‌های آسیب دیده ایجاد می‌کند. اغلب این ناپیوستگی‌ها را نمی‌توان از بررسی پاسخ کلی سازه مشاهده نمود، در حالی که ناپیوستگی‌های مذکور با توجه توزیع ضرایب موجک به دست آمده قابل تشخیص هستند. به طور خلاصه روند تشخیص آسیب در قاب به کمک موجک را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- نشانک مرتبط با پاسخ استاتیکی، دینامیکی یا فرکانسی سازه آسیب‌دیده توسط نرم‌افزار آباکوس محاسبه می‌گردد. در این تحقیق شکل مد ارتعاشی به عنوان نشانک پاسخ در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی عددی آسیب در قاب، می‌توان در محل ترک از اعضای با طول کوتاه با کاهش سطح مقطع و یا ممان اینرسی استفاده نمود. در صورت مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از اعضای سالیید، می‌توان ترک را به سادگی با حذف سطح مقطع اعضا یا کاهش مدول الاستیسیته آن‌ها شبیه‌سازی کرد.
- با استفاده از نشانک‌های اندازه‌گیری شده (شکل مدها) و با انتخاب موجک مناسب، ضرایب موجک پیوسته آن براساس معادلات مربوطه و به کمک نرم‌افزار متلب^{۵۲} محاسبه می‌شود.
- ضرایب موجک، ترسیم شده و بررسی می‌گردد. با انتخاب یک موجک مناسب، هرگونه ناپیوستگی نشانک در نمودار ضرایب موجک تشخیص داده می‌شود. به منظور مشاهده ناپیوستگی نشانک، انجام یک تحلیل در مقیاس پایین در تبدیل موجک پیوسته ضروری است [۲۲].

۳-۲-۳- صحت‌سنجی تحلیل موجک

به منظور تشخیص آسیب، شکل مدهای استخراج شده از نرم‌افزار آباکوس (بخش ۳-۱-۱) به نرم‌افزار متلب منتقل شده و تحت تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک sym4 با مقیاس ۱ قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج تحلیل موجک چهار مد اول استخراج شده تیر آسیب دیده در تحقیق حاضر با مرجع [۲۳] (نصف طول تیر).

⁵¹ Coiflet

⁵² MATLAB

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، تطابق قابل قبولی بین نتایج به دست آمده در این تحقیق و نتایج مرجع وجود دارد که این امر صحت مدل سازی اجزای محدود، نحوه اعمال تبدیل موجک و روند تشخیص خرابی را تأیید می کند.

۴- شناسایی آسیب در قاب ها

پس از اطمینان از صحت مدل سازی اجزای محدود و همچنین تبدیل موجک مورد استفاده، در این بخش شناسایی آسیب در قاب ها با استفاده از تحلیل موجک مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور یک قاب یک طبقه- یک دهانه و یک قاب دو طبقه- یک دهانه در نرم افزار آباکوس مدل سازی می گردد. مشخصات قاب های مذکور در جدول ۲ نشان داده شده است. روند ساخت مدل و تنظیمات مربوط به خصوصیات مصالح، نوع تحلیل، شرایط تکیه گاهی و شبکه بندی در بخش ۳-۱ ارائه گردیده است.

جدول ۲: مشخصات اعضای قاب.

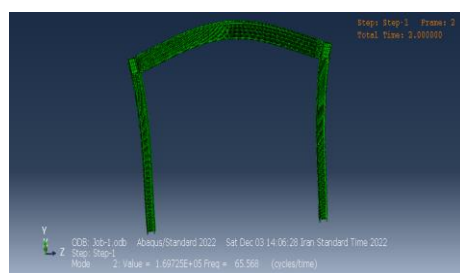
تیر	ستون	مقطع
IPE240	IPB180	طول (mm)
۴۰۰۰	۳۰۰۰	

به منظور بررسی قابلیت موجک در تشخیص آسیب برای قاب های مورد مطالعه، آسیب شامل ترک (حذف جزء) در دو موقعیت قرارگیری آسیب که عبارتند از: (۱) وسط طول تیرها و (۲) در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون های طبقات تعریف می گردند.

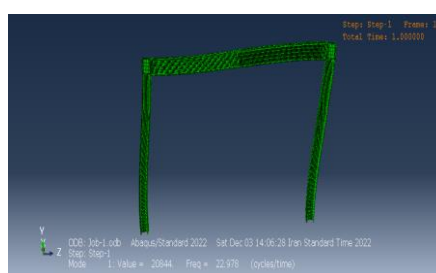
۴-۱- آسیب در قاب یک طبقه - یک دهانه

۴-۱-۱- آسیب در وسط طول تیر برای قاب یک طبقه - یک دهانه

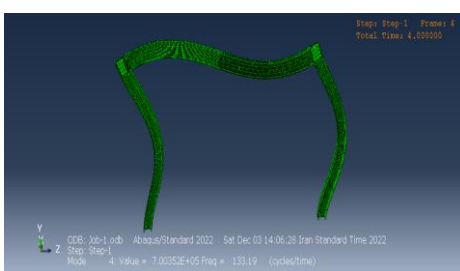
برای بررسی قاب با تیر آسیب دیده، آسیبی از نوع ترک به عرض و عمق ۲ میلی متر در وسط طول تیر لحاظ می گردد. شکل ۱۲، چهار شکل مدل اول قاب آسیب دیده را پس از تحلیل مدال نشان می دهد.



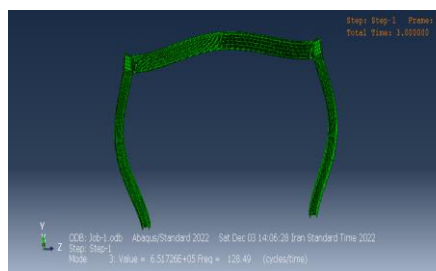
مد دوم



مد اول



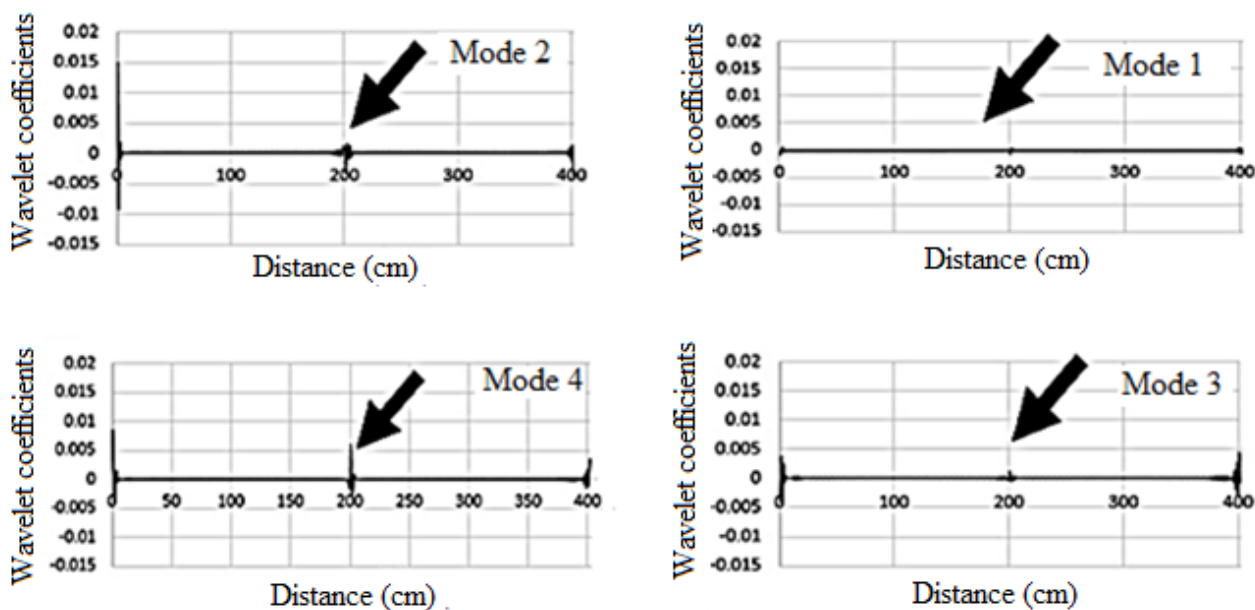
مد چهارم



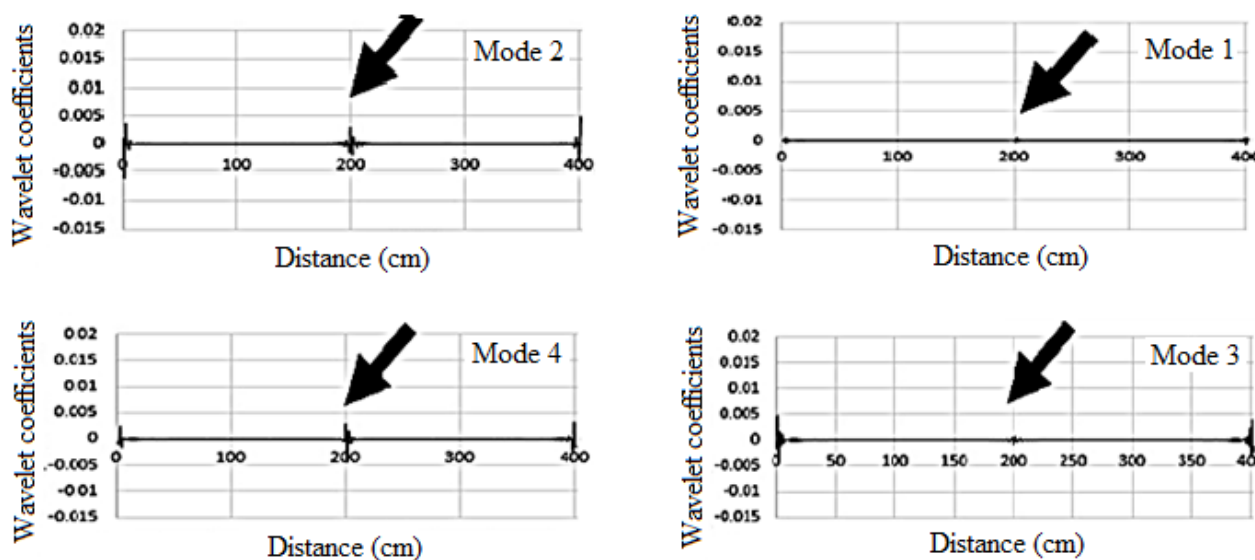
مد سوم

شکل ۱۲: شکل مدهای استخراج شده پس از تحلیل مدال قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیر.

برای بررسی قابلیت تبدیل موجک در تشخیص آسیب، شکل مدهای قاب آسیب دیده تحت تحلیل موجک پیوسته با استفاده از موجک های مادر $\text{sym}2$ و $\text{coif}5$ در مقیاس ۱ قرار خواهند گرفت. تحلیل موجک شکل مد اول تا چهارم قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیر با استفاده از موجک های $\text{sym}2$ و $\text{coif}5$ به ترتیب در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: تحلیل موجک چهار مد اول تیر در قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیر با استفاده از موجک $\text{sym}2$.



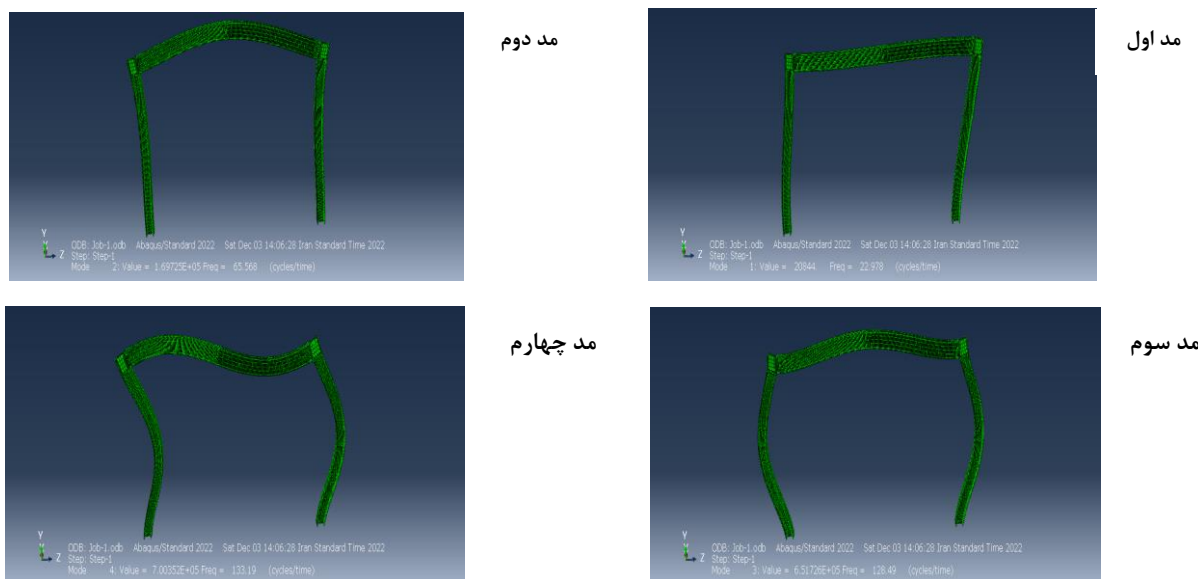
شکل ۱۴: تحلیل موجک چهار مد اول قاب تیر در یک طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیر با استفاده از موجک $\text{coif}5$.

همانطور که در شکل های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، علاوه بر وجود اغتشاشات با دامنه زیاد در محل اتصال تیر به ستون، اغتشاشات بسیاری با دامنه کم در وسط طول تیر وجود دارد. اغتشاشی که به صورت ناگهانی در ضرایب ایجاد شده وجود دارد بیانگر خرابی در تیر می باشد. نمودار حاصل از تحلیل چهار مد اول تیر نشان دهنده این است که تغییرات دامنه اغتشاشات در مدهای دوم و چهارم از وضوح

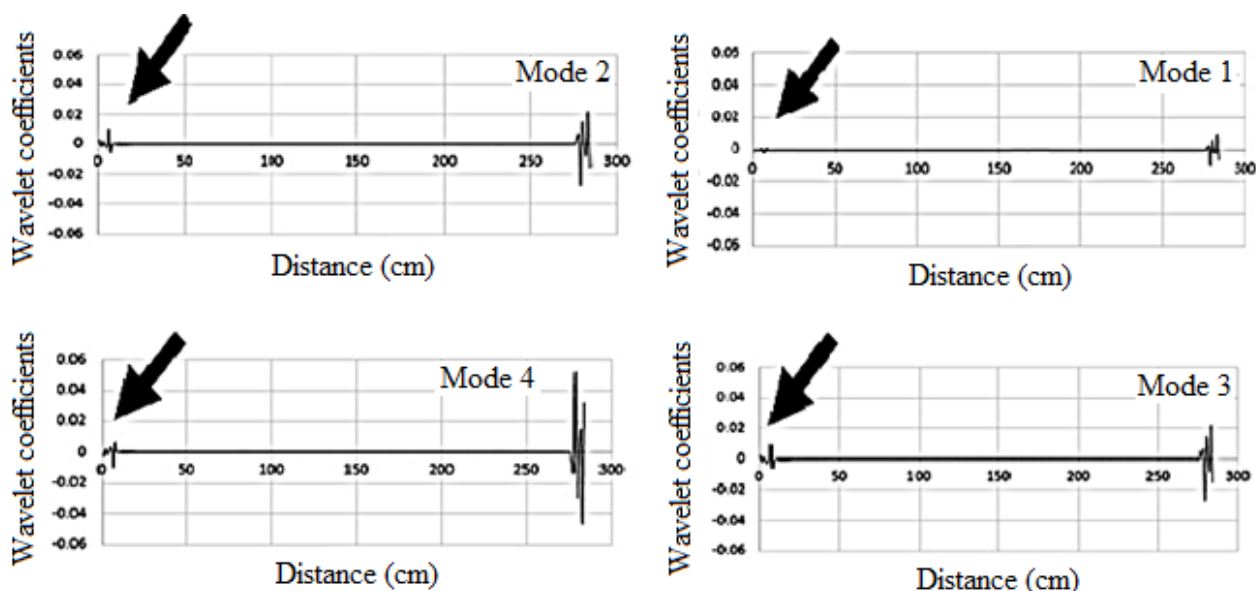
بیشتری نسبت به دو مد دیگر برخوردار است. علاوه بر این، با توجه به ضرایب بزرگتر موجک $sym2$ می توان گفت که موجک مذکور عملکرد بهتری نسبت به موجک $coif5$ در شناسایی آسیب وسط عضو تیر از قاب یک طبقه - یک دهانه دارد.

۴-۱-۲- آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون ها برای قاب یک طبقه - یک دهانه

در این بخش، ترک با عمق و عرض گفته شده در بخش قبل در فاصله ۵۰ میلی متری از پای هر دو ستون قرار داده شده است. شکل ۱۵ نشان دهنده چهار مد اول ارتعاشی قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون ها می باشد.

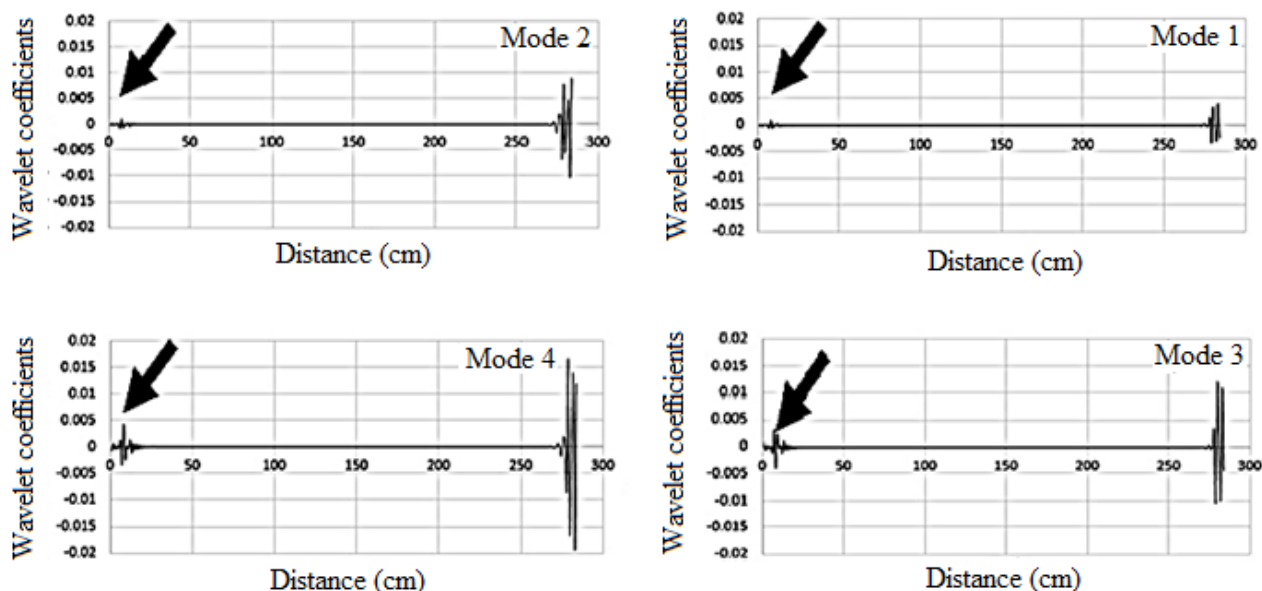


شکل ۱۵: شکل مدهای استخراج شده پس از تحلیل قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون ها.



شکل ۱۶: تحلیل موجک چهار مد اول ستون در قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون ها با استفاده از موجک $sym2$.

با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می‌توان گفت در حالتی که آسیب به طور همزمان در پای دو ستون رخ دهد، دامنه اغتشاش ضرایب موجک در حالت استفاده از موجک $\text{sym}2$ ، در مدهای دوم، سوم و چهارم بیشتر بوده و لذا مدهای مذکور آسیب را با وضوح بیشتری نشان می‌دهند. در حالی که با استفاده از موجک coif5 ، شناسایی دقیق آسیب تنها با استفاده از مدهای سوم و چهارم امکان پذیر خواهد بود. به عبارت دیگر مدهای بالاتر عملکرد مناسب‌تری در نمایان کردن موقعیت آسیب دارند. همچنان که در بخش ۴-۱-۱ مشاهده شد، در حالت آسیب در پای ستون‌ها نیز موجک $\text{sym}2$ عملکرد بهتری در مقایسه با موجک coif5 نشان می‌دهد.

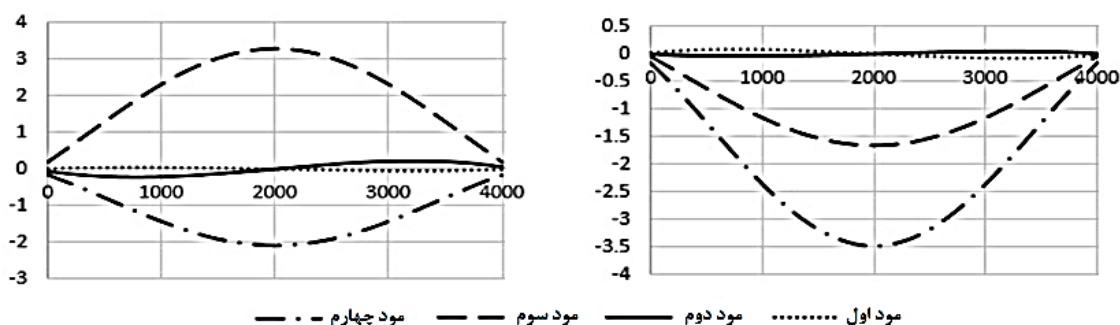


شکل ۱۷: تحلیل موجک چهار مد اول ستون در قاب یک طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی‌متری از پای ستون‌ها با استفاده از موجک coif5 .

۴-۲- آسیب در قاب دو طبقه - یک دهانه

۴-۲-۱- آسیب در وسط طول تیرها برای قاب دو طبقه - یک دهانه

در این بخش به تحلیل موجک آسیب همزمان ایجاد شده در وسط طول تیرهای طبقات قاب دو طبقه - یک دهانه پرداخته می‌شود. چهار شکل مد اول تیرهای این قاب در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



(ب) تیر طبقه دوم

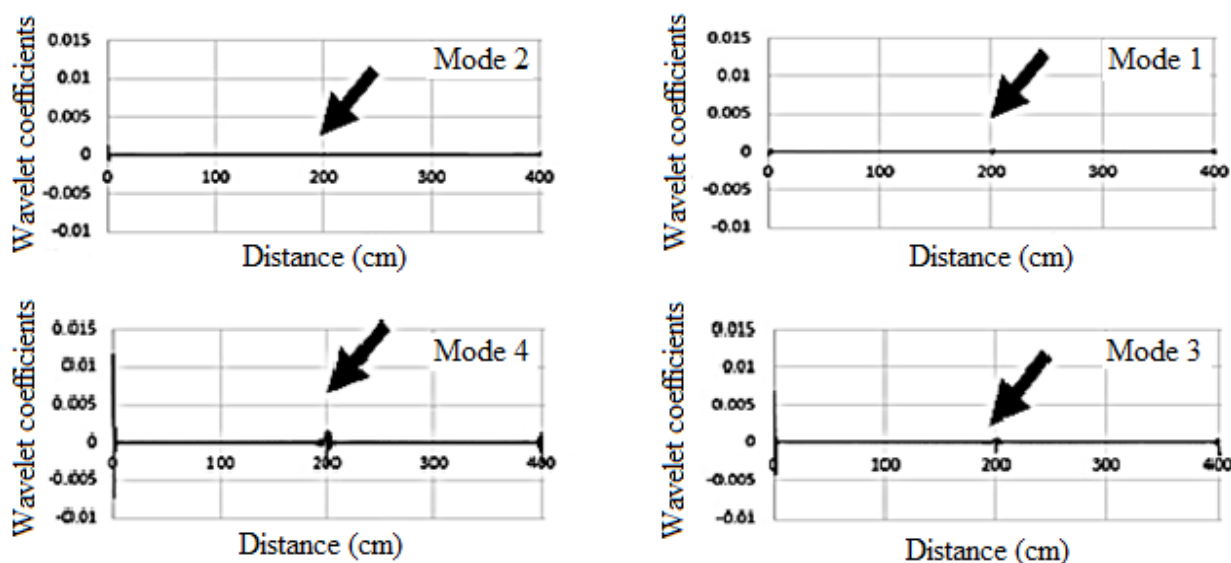
(الف) تیر طبقه اول

شکل ۱۸: چهار مد اول تیرها در قاب دو طبقه یک دهانه با آسیب در وسط طول تیرها.

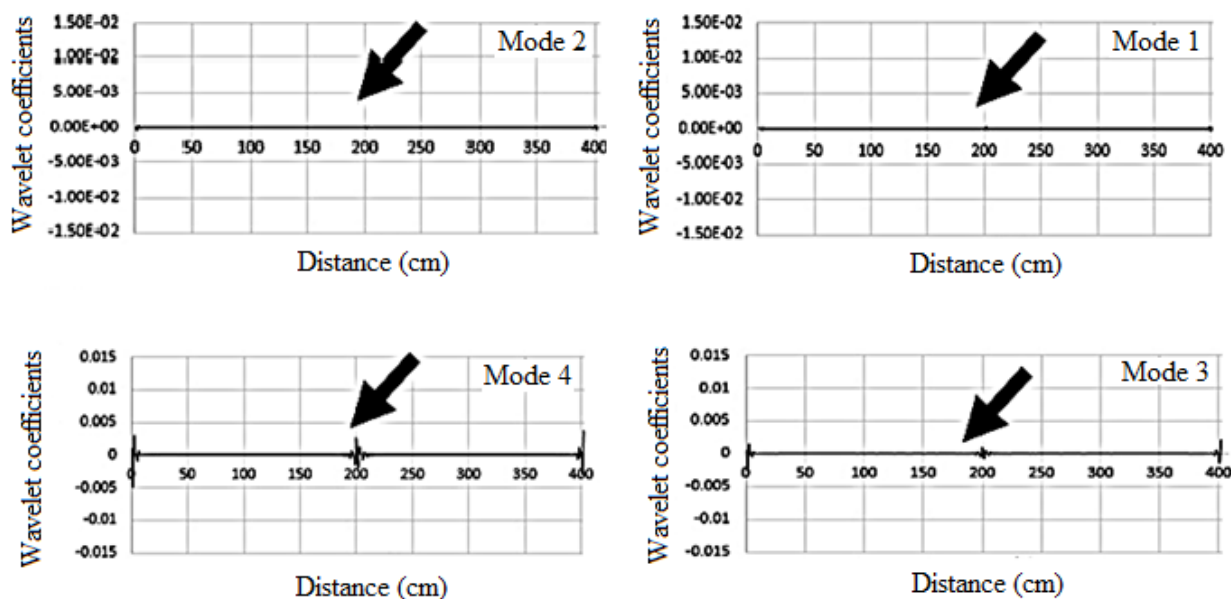
تیر طبقه اول

پس از مدل سازی عددی و تحلیل مدال، به تعیین موقعیت آسیب با استفاده از تحلیل موجک با استفاده از موجک های $sym2$ و $coif5$ پرداخته می شود. همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود، در وسط طول تیر طبقه اول تغییرات جزئی در ضرایب موجک به دست آمده از موجک $sym2$ رخ داده است. ملاحظه می گردد که اغتشاش مذکور در مدهای اول و دوم بسیار ناچیز بوده و در مدهای سوم و چهارم به وضوح آن افزوده می شود. در نتیجه تشخیص خرابی در مدهای بالا با دقت بهتری صورت خواهد گرفت.

در صورتی که از موجک $coif5$ استفاده شود (شکل ۲۰) نیز مشاهده می شود که به دلیل عدم وضوح تغییرات ضرایب در مدهای اول و دوم، تشخیص خرابی در این مد امکان پذیر نیست. اما در مدهای بالاتر، این تغییرات به راحتی قابل رؤیت هستند. ملاحظه می گردد که در این حالت خرابی، موجک های $sym2$ و $coif5$ از دقت یکسانی در شناسایی آسیب برخوردار می باشند.



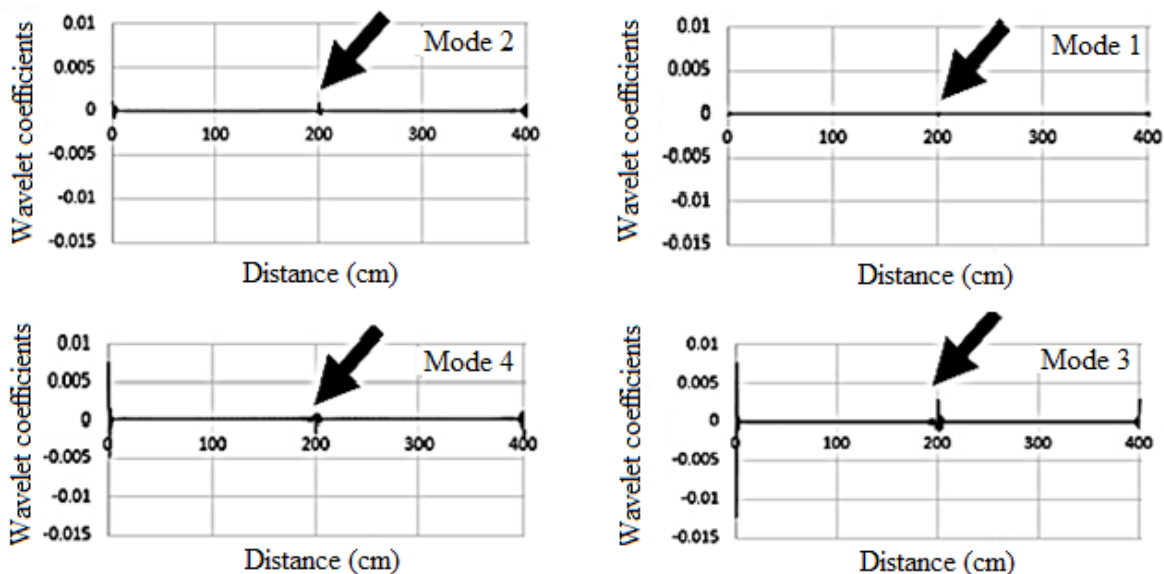
شکل ۱۹: تحلیل موجک چهار مد اول تیر طبقه اول قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیرها با استفاده از موجک $sym2$.



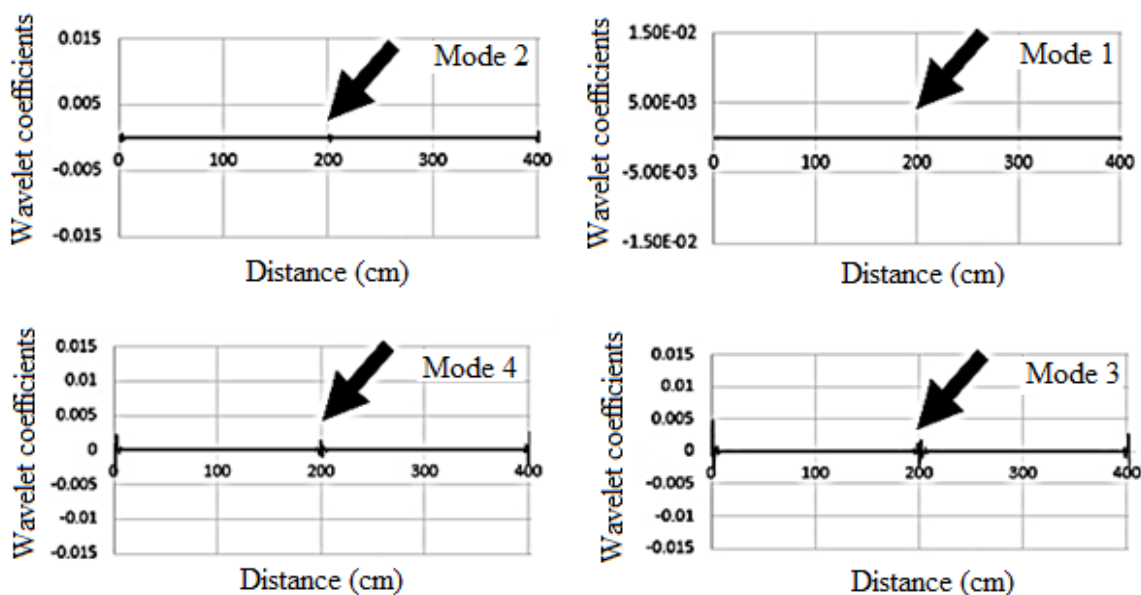
شکل ۲۰: تحلیل موجک چهار مد اول تیر طبقه اول قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیرها با استفاده از موجک $coif5$.

تیر طبقه دوم

همانطور که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌شود، قابلیت دو موجک $\text{sym}2$ و $\text{coif}5$ در تعیین موقعیت آسیب در تیر طبقه دوم قاب دو طبقه - یک دهانه تا حدود زیادی به هم نزدیک می‌باشد. با توجه به شکل‌های مذکور، اغتشاشات اندکی در مد اول و دوم وجود داشته و عملکرد ضعیفی در تعیین موقعیت خرابی مشاهده می‌شود، اما در مدهای سوم و چهارم به دامنه این اغتشاشات افزوده می‌شود که این امر بیانگر عملکرد قابل قبول مدهای مذکور در تشخیص خرابی تیر طبقه دوم می‌باشد. لازم به ذکر است که برخلاف تحلیل موجک تیر طبقه اول این قاب، مد دوم ارتعاشی نیز تا حدودی می‌تواند به شناسایی آسیب در تیر طبقه دوم کمک نماید.



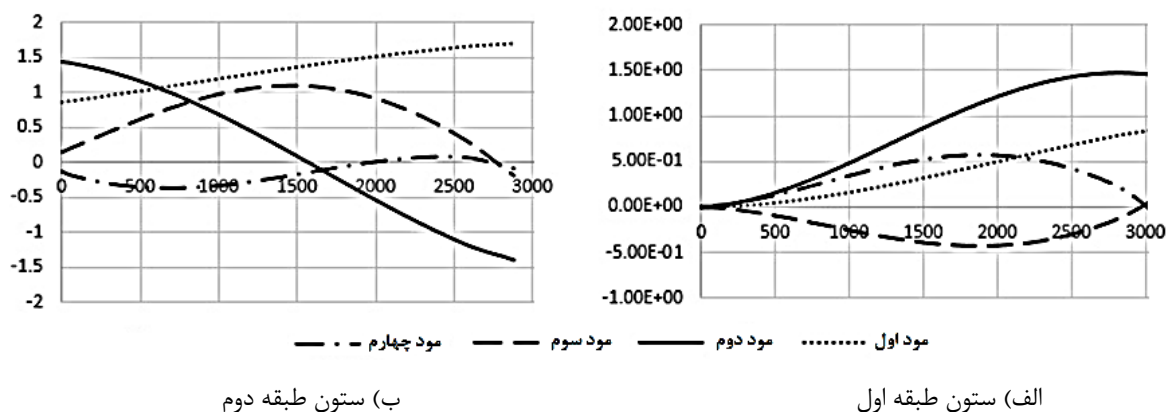
شکل ۲۱: تحلیل موجک چهار مد اول تیر طبقه دوم قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیرها با استفاده از موجک $\text{sym}2$.



شکل ۲۲: تحلیل موجک چهار مد اول تیر طبقه دوم قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در وسط طول تیرها با استفاده از موجک $\text{coif}5$.

۴-۲-۲- آسیب در فاصله ۵۰ میلی‌متری پای ستون‌ها برای قاب دو طبقه - یک دهانه

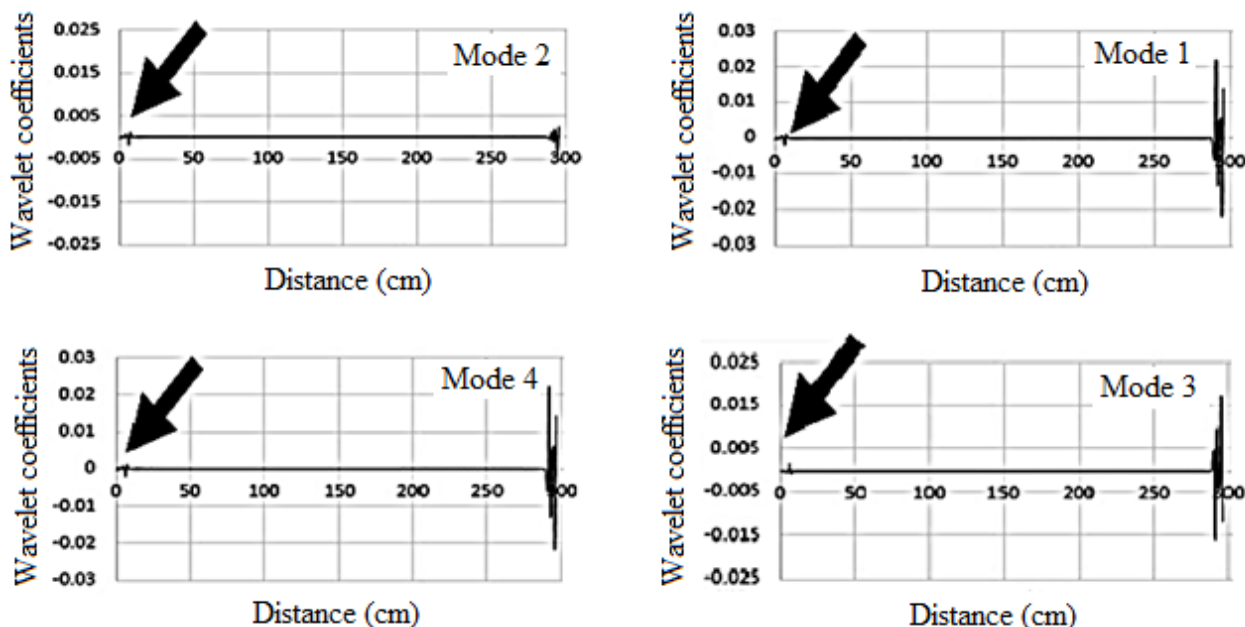
در این بخش موقعیت خرابی در فاصله ۵۰ میلی‌متری پای ستون‌های طبقات در نظر گرفته می‌شود. چهار شکل مد اول ارتعاشی ستون‌های طبقه اول و دوم در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



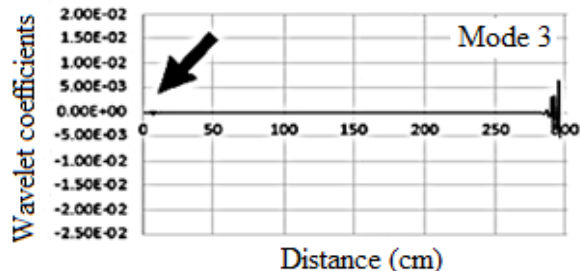
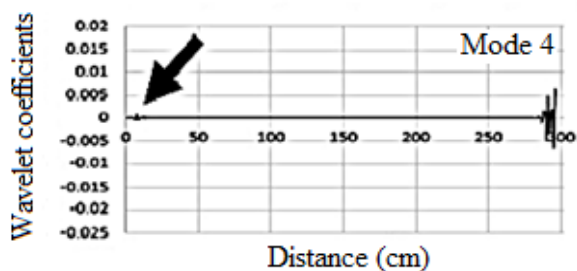
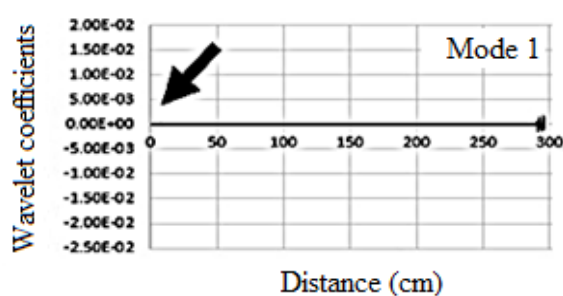
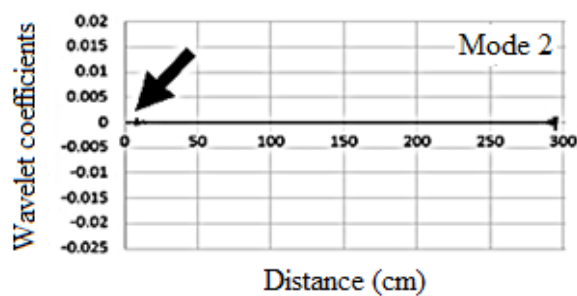
شکل ۲۳: چهار مد اول ستون در قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی‌متر از پای ستون‌ها.

ستون طبقه اول

با بررسی دو شکل ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌شود که اغتشاشات اندکی در ضرایب موجک ستون طبقه اول وجود دارد که این امر می‌تواند بیانگر موقعیت خرابی در این عضو باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که موجک $\text{sym}2$ در هر چهار مد آسیب را شناسایی می‌کند، اما موجک $\text{coif}5$ در مدهای دوم تا چهارم و با دامنه کمتر قادر به شناسایی آسیب می‌باشد.



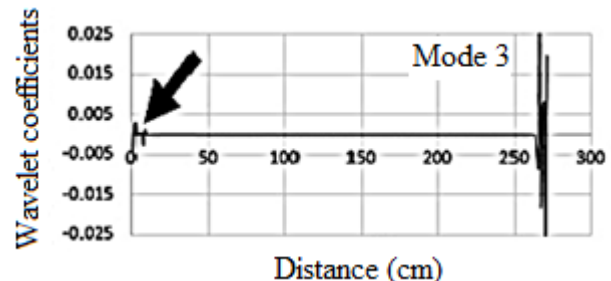
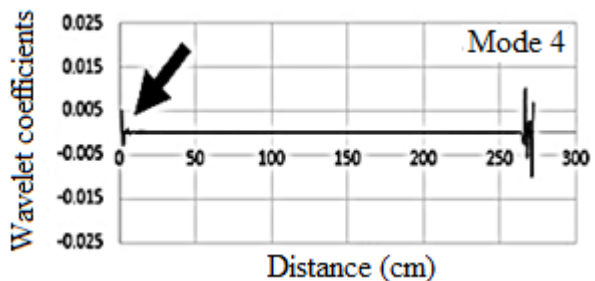
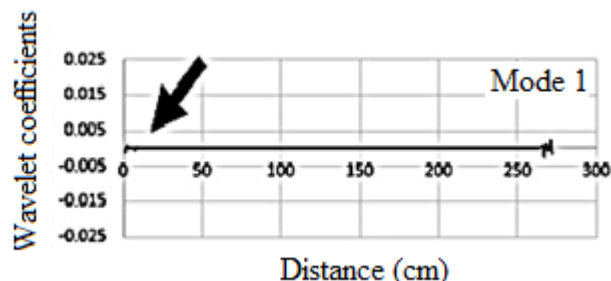
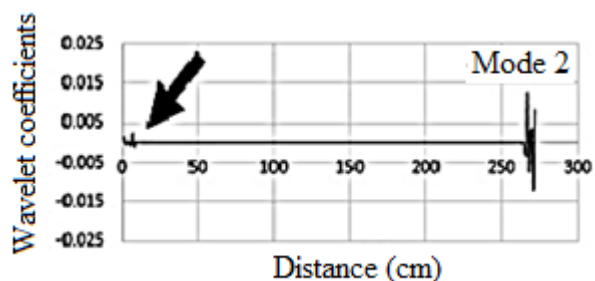
شکل ۲۴: تحلیل موجک چهار مد اول ستون طبقه اول قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی‌متری از پای ستون‌ها با استفاده از موجک $\text{sym}2$.



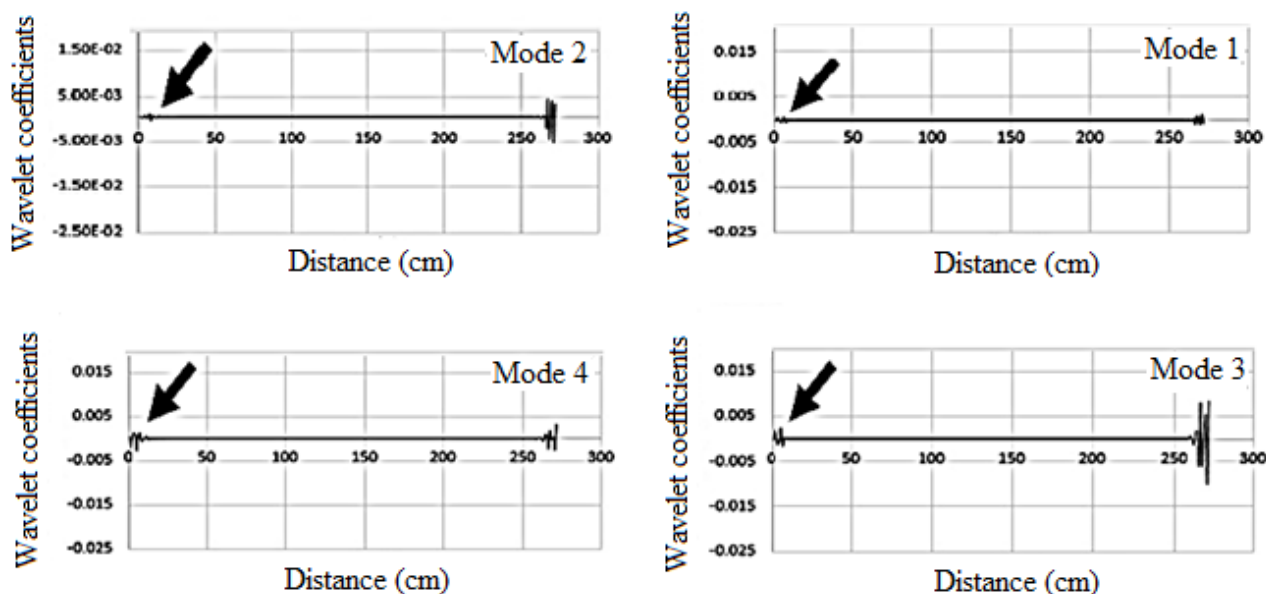
شکل ۲۵: تحلیل موجک چهار مد اول ستون طبقه اول قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون‌ها با استفاده از موجک *cif5*.

ستون طبقه دوم

با بررسی شکل‌های ۲۶ و ۲۷ مشاهده می‌شود که مدهای سوم و چهارم با وضوح بیشتری موقعیت آسیب را مشخص می‌کنند. همچنین دقت بالاتر موجک *sym2* نشان داده می‌شود.



شکل ۲۶: تحلیل موجک چهار مد اول ستون طبقه دوم قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون‌ها با استفاده از موجک *sym2*.



شکل ۲۷: تحلیل موجک چهار مد اول ستون طبقه دوم قاب دو طبقه - یک دهانه با آسیب در فاصله ۵۰ میلی متری از پای ستون‌ها با استفاده از موجک $coif5$.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به ارائه روش غیرمخرب، کارآمد و دقیق تبدیل موجک برای تشخیص ترک‌های چندگانه در قاب‌های خمشی فولادی بدون در اختیار داشتن پاسخ سازه سالم پرداخته شد. برای این منظور حالت‌های مختلف خرابی به صورت حذف جزء (المان) در قاب‌های یک طبقه و دو طبقه در نظر گرفته شده و شکل‌های مدی به دست آمده از تحلیل فرکانسی اجزای محدود تحت تبدیل‌های موجک پیوسته $sym2$ و $coif5$ قرار گرفت. به طور خلاصه مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ۱- تبدیل موجک عملکرد مطلوبی در تشخیص آسیب قاب‌های یک طبقه و دو طبقه مورد بررسی در حالت‌های مختلف خرابی دارد.
- ۲- موقعیت آسیب در وسط تیر نسبت به پای ستون با دقت بالاتری شناسایی می‌شود.
- ۳- برای شناسایی آسیب در وسط عضو تیر در قاب‌های مورد مطالعه، شکل مد سوم و چهارم عملکرد بهتری دارند. این موضوع با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۰] تطابق مناسبی دارد که در آن از تبدیل موجک پیوسته برای شناسایی آسیب مبتنی بر شکل مد در یک سازه ساختمانی پانلی استفاده شده است. در این مرجع نشان داده شده است که با در نظر گرفتن حداکثر و حداقل جهش نسبی در ضرایب موجک می‌توان مرکز آسیب را با دقت مناسبی شناسایی کرد. همچنین در تحقیق مذکور تأثیر مدهای بالاتر در نمایش شدت آسیب بیشتر به چشم می‌آید.
- ۴- برای شناسایی آسیب در پای ستون طبقه اول در قاب‌های مورد مطالعه می‌توان از شکل مدهای دوم تا چهارم استفاده نمود، هر چند مدهای بالاتر با وضوح بیشتری موقعیت آسیب را شناسایی می‌کنند. در صورتی که آسیب در پای ستون طبقه دوم باشد، مدهای سوم و چهارم مؤثرترند. همچنان که در بند قبل اشاره شد، قابلیت مدهای بالا در شناسایی آسیب، مشابه نتایج ارائه شده در مرجع [۲۰] می‌باشد.

۵ - به طور کلی مشاهده شد که موجک‌های $\text{sym}2$ و $\text{coif}5$ کارآیی مناسبی در تشخیص خرابی دارند. مشابه این نتایج در مرجع [۲۵] نیز گزارش گردیده است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر نشان داده شد که عملکرد موجک $\text{sym}2$ بهتر از موجک $\text{coif}5$ می‌باشد.

در ادامه تحقیق حاضر و با توجه به محدودیت‌های روش معرفی شده در این مطالعه می‌توان با ارائه روشی برای کاهش و یا حذف اغتشاشات ضرایب موجک در تکیه‌گاه‌ها و محل اتصال تیر به ستون و همچنین با ارائه روش‌های نوین برای مدل‌سازی اثر ترک (به جای حذف المان)، قابلیت‌هایی روش مذکور در تشخیص خرابی را ارتقا بخشید.

مراجع

- [1] Mallat, S.G. (1989). A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(7), 674-693.
- [2] Newland, D. (1993). *An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*. 3rd Edition, NewYork: Prentice-Hall.
- [3] Surace, C., Ruotolo, R. (1994). Crack Detection of a Beam Using Wavelet Transform, In: *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, Honolulu, Hawaii.
- [4] Sone, A., Yamamoto, A., Nakaoka, A., Masuda, A. (1995). Health monitoring system of structures based on orthonormal wavelet transform. *American Society of Mechanical Engineers*, New York, USA.
- [5] Naldi, G., Venini, P. (1997). Postprocessing Singular Solutions by the Wavelet Transform. Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures. In: *Proceedings of DAMAS '97*, University of Sheffield, UK, 109-120.
- [6] Gentile, A., Messina, A. (2003). On the continuous wavelet transforms applied to discrete vibrational data for detecting open cracks in damaged beams. *International Journal of Solids and Structures*, 40(2), 295-315.
- [7] Kim, H., Mehlem, H. (2003). Damage detection of structures by wavelet analysis. *Engineering Structures*, 26(3), 347-362.
- [8] Pothisiri, T., Hjelmstad, K.D. (2003). Structural damage detection and assessment from modal response. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(2), 135-145.
- [9] Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F., Gholipour, G. (2021). Damage detection and localization of a steel truss bridge model subjected to impact and white noise excitations using empirical wavelet transform neural network approach. *Measurement*, 185, 110060.
- [10] Gökdağ, 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.
- [11] Wu, N., Wang, Q. (2011). Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform. *International Journal of Engineering Science*, 49(3), 253-261.
- [12] He, W-Y., Zhu, S. (2013). Progressive damage detection based on multi-scale wavelet finite element model: numerical study. *Computers & Structures*, 125, 177-186.
- [13] Montanari, L., Spagnoli, A., Basu, B., Broderick, B. (2015). On the effect of spatial sampling in damage detection of cracked beams by continuous wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, 345, 233-249.
- [14] Yang, C., Oyadiji, S.O. (2017), Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface, *Computers and Structures*, 179, 109-126.

- [15] He, W-Y., Zhu, S., Ren, W-X. (2019). Two-phase damage detection of beam structures under moving load using multi-scale wavelet signal processing and wavelet finite element model. *Applied Mathematical Modelling*, 66, 728-744.
- [16] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., 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*, 8(5), 198-214.
- [17] Patel, S.S., Chourasia, A.P., Panigrahi, S.K., Parashar, J., Parvez, N., Kumar, M. (2016). Damage Identification of RC Structures Using Wavelet Transformation. *Procedia Engineering*, 144, 336-342.
- [18] Wang, S., Li, J., Luo, H., Zhu, H. (2019). Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector, *Engineering Structures*, 178. 506-520.
- [19] Teimoori, T., Mahmoudi, M. (2020). Damage detection in connections of steel moment-resisting frames using proper orthogonal decomposition and wavelet transform. *Measurement*, 166, 108188.
- [20] Hanteh, M., Rezaifar, O. (2021). Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method, *Structures*, 29, 701-713.
- [21] Soman, K.P. (2010). *Insight into wavelets: From theory to practice*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [22] Ovanesova, A.V., Suárez, L.E. (2004). Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, 26(1), 39-49.
- [23] Zhong, Sh., Oyadiji, S.O. (2007). Wavelet-Based Structural Damage Detection. In: *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Las Vegas, Nevada, USA.
- [24] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J-M. (1996). Wavelet toolbox user's guide. The MathWorks Inc, 2-36.
- [25] Mortazavi, S.R., Zaeimdar, B. (2020). Structural Health Monitoring and Damage Detection of Structures by Wavelet-Based Method. *journal of structure & steel*, 14 (28), 41-51.