

M. Khanahmadi

Faculty of Civil Engineering,
University of Kurdistan.

e-mail:

m.khanahmadi@uok.ac.ir

M. Gholhaki*

Faculty of Civil Engineering,
Semnan University.

e-mail:

mgholhaki@semnan.ac.ir

O. Rezaifar

Faculty of Civil Engineering,
Semnan University.

e-mail:

orezayfar@semnan.ac.ir

B. Dejkam

Faculty of Civil Engineering,
Velayat University.

e-mail: b.dejkam@velayat.ac.ir

Damage Identification in Steel Beam Structures Based on the Comparison of Analytical Results of Wavelet Analysis

Numerous researchers focus on monitoring the health of structures to ensure safety and reduce maintenance costs. Beams and columns are the primary elements of structures in civil engineering, and designers expect beams and columns to be the last elements to experience damage. This paper identifies steel beam damage based on dynamic modal data. After a modal analysis was performed on the modeled beam using the ABAQUS finite element software, modal information was extracted, including the frequencies and shapes of healthy and damaged modes. Due to the presence of damage, differences in the frequency values of primary and secondary conditions were observed. In addition, modal assurance criteria (MAC) values below one were obtained, confirming the presence of damage. Using an analytical method based on wavelet analysis, MATLAB.R2021a processed healthy and damaged mode shape signals. In all modes, a comparison of the output signal diagrams of healthy and damaged modes revealed the difference in the damaged area, allowing the damage locations to be identified with an error of less than 2 percent using a simple examination.

Keywords: Structural Health Monitoring, Modal Analysis, Signal Processing, Wavelet Transform, Damage Identification.

* Corresponding author

Received 23 June 2022, Revised 05 August 2022, Accepted 17 August 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8340.1407

مجتشم خان احمدی

دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه کردستان، سنندج،
ایران.

پست الکترونیک:

m.khanahmadi@uok.ac.ir

مجید قلهکی*

استاد، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

پست الکترونیک:

mgholhaki@semnan.ac.ir

امید رضایی فر

استاد، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

پست الکترونیک:

orezayfar@semnan.ac.ir

بهزاد دژکام

مربی، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

پست الکترونیک:

b.dejkam@velayat.ac.ir

آسیب‌یابی در سازه تیر فولادی مبتنی بر مقایسه نتایج تحلیلی آنالیز مویک

پایش سلامت سازه‌ها با هدف تأمین ایمنی و کاهش هزینه‌های نگهداری مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. تیرها و ستون‌ها از اعضای اصلی سازه‌های مهندسی عمران هستند و طراحی انتظار دارند آخرین اعضای آسیب‌دیده سازه‌ها از تیرها و ستون‌ها باشد. در این مقاله به شناسایی آسیب تیر فولادی بر اساس داده‌های دینامیکی مودال پرداخته شده است. پس از انجام آنالیز مودال تیر مدل‌سازی شده در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS اطلاعات مودال شامل فرکانس‌ها و شکل‌های مود سالم و آسیب استخراج شد. تفاوت در مقادیر فرکانس وضعیت‌های اولیه و ثانویه به دلیل وجود آسیب مشاهده گردید. همچنین، مقادیر معیار همبستگی مودال (MAC) کمتر از ۱ به دست آمد که تأییدی بر وجود آسیب است. پردازش سیگنال‌های شکل مود سالم و معیوب با استفاده از روش تحلیلی آنالیز مویک در محیط نرم افزار MATLAB.R2021a انجام شد. در تمامی مودها مقایسه بین نمودار سیگنال‌های خروجی وضعیت‌های سالم و آسیب تفاوت را در منطقه آسیب نشان می‌دهد به نحوی که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های آسیب را با خطای کمتر از ۲٪ شناسایی نمود.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه، تحلیل مودال، پردازش سیگنال، تبدیل مویک، شناسایی آسیب.

۱- مقدمه

با گذشت زمان سازه‌ها شرایط محیطی متعددی را تجربه می‌کنند. همچنین، انتظار بیش از ظرفیت طراحی المان‌ها و عدم برآورده نمودن انتظارات به‌روز شده آیین‌نامه‌ای به افت کارایی سازه می‌افزاید. برای تأمین ایمنی و کاهش هزینه‌های نگهداری سازه لازم است

المان‌های آسیب‌دیده را ترمیم و در صورت لزوم تعویض نمود؛ بنابراین لازم است که موقعیت‌های آسیب در المان‌های سازه به درستی شناسایی شود و تصمیم‌گیری‌های مناسب اتخاذ گردد. تیرها و ستون‌ها مهم‌ترین اعضای سازه‌های مهندسی عمران هستند که اگر چنانچه آسیب‌های موضعی اتفاق افتاده در آن‌ها به موقع شناسایی نگردد، ممکن است تحت اثر عوامل نامطلوب به سایر المان‌ها توسعه یابند و باعث خرابی زود هنگام کلی سازه شوند و هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی جبران ناپذیری متحمل نمایند.

آسیب عبارت است از هرگونه تغییر در خواص

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۰۴/۰۲، بازنگری ۱۴۰۱/۰۵/۱۴، پذیرش ۱۴۰۱/۰۵/۲۶.

(DOI): 10.22091/cer.2022.8340.1407 شناسه دیجیتال

وقوع خرابی بود. ژو^۷ و همکاران [۴] با به‌کارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی^۸ و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر^۹ به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند. محققان [۵] با استفاده از روش آنالیز موجک نسبی پیوسته^{۱۰} به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرپایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرپایی را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب مورد استفاده واقع گردد. لی و هاو^{۱۱} [۶] به شناسایی آسیب در سازه قاب صفحه‌ای^۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه موجک پرداختند. آن‌ها موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمایند. در تحقیقی، عزالدین و همکاران [۷] بر مبنای استفاده از نوع گسسته تبدیل موجک و جابجایی‌های استاتیکی وضعیت‌های سالم و آسیب به شناسایی ترک در تیرها پرداختند و موفق به شناسایی موقعیت ترک با عمق و بازشدگی متعدد شدند. کاتونین [۸] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوپنکانکس^{۱۲} تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود صفحات کامپوزیت آسیب‌دیده پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. پژوهشگران [۹] با استفاده از مفاهیم آنالیز موجک در تبدیل بسته‌های موجک به تشخیص خرابی در سکوه‌های ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت به طور محسوس به شدت خسارت‌های وارده به سکو وابسته است. نادرپور و فخاریان [۱۰] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای به شناسایی

مصالح یا هندسه سازه که می‌تواند عملکرد کلی سازه را دچار مشکل نماید. تاکنون روش‌های متعددی برای شناسایی و تعیین موقعیت آسیب معرفی شده است. از جمله این روش‌ها بازرسی‌های چشمی است که دارای محدودیت است و نمی‌توان موقعیت بسیاری از آسیب‌ها را که تأثیرشان صرفاً بر ماتریس سختی سازه است و یا آسیب‌هایی که در زیر سطوح اتفاق افتاده است را شناسایی کرد. امروزه پایش سلامت و تشخیص آسیب سازه‌ای بر اساس تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. از جمله روش‌های تحلیل پاسخ‌ها، روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال در حوزه‌های زمان، فرکانس و یا هم‌زمان و هم فرکانس است. تبدیل موجک^۲ یکی از تبدیلات ریاضی توانمند پردازشی سیگنال‌ها در دو حوزه زمان و فرکانس است که بر اساس آن تحقیقات ارزشمندی در حوزه پایش سلامت سازه^۳ انجام شده است.

کاتونین^۴ [۱] با استفاده از تبدیل موجک و داده‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های متعدد پرداخت. نتایج نشان داد که برای شناسایی محل ترک، حذف نوفه از ضرایب جزئیات موجک لازم است. ژانگ و ایادیجی^۵ [۲] با استفاده از تبدیل موجک ایستای^۶ و داده‌های مودال به آشکارسازی آسیب ترک در تیرها پرداختند. آن‌ها نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای شکل مود می‌توان محل آسیب را شناسایی نمود. باقری و کورهللی [۳] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله پرداختند. آن‌ها در این بررسی از پاسخ‌های سرعت و تغییر مکان سازه‌های مورد نظر استفاده نمودند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک نشان دهنده زمان

⁷ Xu

⁸ Two-dimensional directional Gaussian wavelets

⁹ Laser scanned operating deflection shapes

¹⁰ Continuous relative wavelet entropy method

¹¹ Li & Hao

¹² Quincunx

² Wavelet Transform

³ Structural Health Monitoring

⁴ Katunin

⁵ Zhong & Oyadiji

⁶ Stationary Wavelet Transform

الگوریتم جنگل تصادفی به مسئله تشخیص آسیب در یک سازه آزمایشگاهی پرداختند. در این مطالعه جابجایی سازه توسط بسته تبدیل موجک به مؤلفه‌های انرژی تجزیه گردید و با استفاده از روش جنگل تصادفی و پایگاه داده‌ها، حدس دیگر حالات خرابی و طبقه‌بندی آن‌ها با دقت قابل قبول انجام شد. یونسی و همکاران [۱۶-۱۹] به شناسایی آسیب جداولی ستون کامپوزیت CFST مبتنی بر داده‌های مودال پرداختند. آن‌ها جداولی را توسط یک لایه پلی استارین نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه‌سازی نمودند و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته موفق به شناسایی محل جداولی شدند. حسینی واعظ و عارف زاده [۲۰] با استفاده از تبدیل موجک به مقایسه داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند. مشاهده گردید که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از داده‌های استاتیکی، عواملی مانند نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری بر ضرایب موجک مؤثر است. خان احمدی و همکاران [۲۱] با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود فولادی به مقایسه ضرایب موجک حالت‌های سالم و معیوب پرداختند. نتایج نشان داد که اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب چشم‌گیر است و در تمامی مودها می‌توان محل‌های آسیب را شناسایی نمود. همچنین، آن‌ها با استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود ارتعاشی موفق به شناسایی آسیب صفحات کامپوزیت پانلی و چندلایه شدند [۲۲-۲۴]. آن‌ها در تحقیق دیگری با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته به مطالعه مقایسه‌ای آشکارسازی آسیب در تیرهای فولادی مبتنی بر پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی پرداختند و نشان دادند که با هر دو نوع تبدیلات موجک می‌توان از تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی موقعیت‌های آسیب را شناسایی نمود [۲۵ و ۲۶]. رضایی فر و همکاران [۲۷-۲۹] با استفاده از تبدیل موجک

پارامترهای مودال سازه پرداختند. آن‌ها پاسخ ارتعاش آزاد سازه با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای تجزیه نمودند. سپس سیگنال تجزیه شده‌ای را که دارای انرژی یکسان با سیگنال اصلی بود برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از نتایج نمونه آزمایشگاهی مینا تأیید شد. عباس‌نیا و همکاران [۱۱] با استفاده از روش دو مرحله‌ای تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شناسایی آسیب در تیرها پرداختند. آن‌ها توسط تبدیل موجک محل‌های آسیب را شناسایی نمودند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هدف را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده آسیب کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از موقعیت‌های آسیب شدند. میرزایی و همکاران [۱۲] با روشی مشابه، به شناسایی آسیب در سازه خرابی با تعداد المان‌های زیاد پرداختند و به این طریق المان‌های آسیب‌دیده شناسایی و مقدار آسیب در هر یک از المان‌ها محاسبه گردید. محققان [۱۳] با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و مدل المان محدود به تشخیص آسیب در صفحات کامپوزیتی چندلایه پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با استفاده از تبدیل موجک، محل خرابی شناسایی نمودند و سپس با بهینه نمودن یک تابع خطای ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک موفق به شناسایی پارامترهای آسیب شدند. یانگ و ایادیجی^{۱۳} [۱۴] روشی برای شناسایی خرابی صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح فرکانس مودال^{۱۴} ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضرایب موجک سطح فرکانس مودال می‌توان محل و شکل خرابی صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص نمود. حبیب‌زاده آذری و غفارزاده [۱۵] با استفاده از بسته تبدیل موجک و

¹³ Yang & Oyadiji¹⁴ Modal Frequency Surface

هستند و ψ تابع موجک است. تابع موجک در آنالیز موجک با پارامترهای مقیاس و انتقال تعریف شده است. این ویژگی منجر به ارائه تحلیل چندگانه سیگنال‌های غیرایستا 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 شرایط را داشته باشد:

۱- انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۳۵]؛

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

۲- انرژی آن محدود باشد [۳۵]؛

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

۳- باید در رابطه (۴) صدق نماید [۳۷-۳۵]؛

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

که در آن Ψ تبدیل فوریه ψ و ω بیانگر بسامد است. رابطه (۳) پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه (۴) به این معنی است که بیشترین انرژی در تابع موجک برای یک بازه زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود [۳۷].

۳- مصالح و هندسه سازه تیر فولادی

سازه تیر فولادی به طول ۱/۵ متر با مقطع IPE100 و شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل با مشخصات مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، نسبت پواسن ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در وضعیت‌های سالم و آسیب D1، D2 و D3 با شکل ۱ مورد نظر است.

خسارت در محل‌های آسیب به صورت ۳۰٪ کاهش

مدول الاستیسیته فولاد در نظر گرفته شد.

پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب موجک تولید شده شناسایی گردید. خان احمدی و همکاران در تحقیقی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر اوج سیگنال‌های خروجی را با صرف نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون در محل‌های آسیب مشاهده گردید [۳۰-۳۲]. در تحقیق دیگری با به‌کارگیری تبدیلات موجک و داده‌های شکل مود موفق به شناسایی ناحیه جدادگی هسته بتنی از جداره فولادی ستون‌های مقاطع مرکب CFST شدند [۳۳ و ۳۵].

تیرها و ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌های مهندسی عمران و همچنین، ماشین‌آلات صنعتی هستند و تشخیص آسیب در آن‌ها به منظور پایش وضعیت سلامت کلی سازه دارای اهمیت است. در این مقاله، روشی برای تشخیص آسیب در المان تیر مبتنی بر نتایج تحلیلی تبدیل موجک پیوسته و سیگنال‌های اولیه و ثانویه شکل مود پیشنهاد و کارایی آن بررسی شده است.

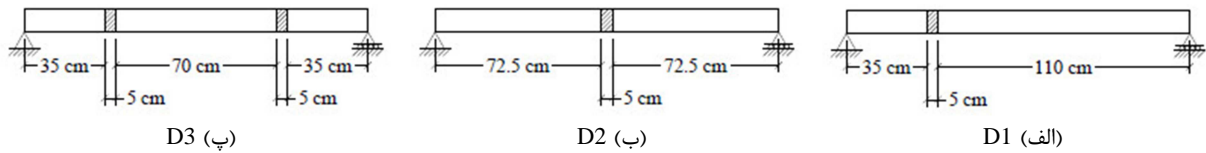
۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک یکی از روش‌های توانمند پردازش سیگنال‌ها است که نسبت به سایر روش‌های پردازش سیگنال (مانند تبدیل فوریه و تبدیل فوریه زمان کوتاه) مشکلات مربوط به رزولوشن ثابت را ندارد؛ و در واقع مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن فرکانسی تغییر کرده و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آید [۳۳].

تبدیل موجک سیگنال $f(t)$ در بازه $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

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

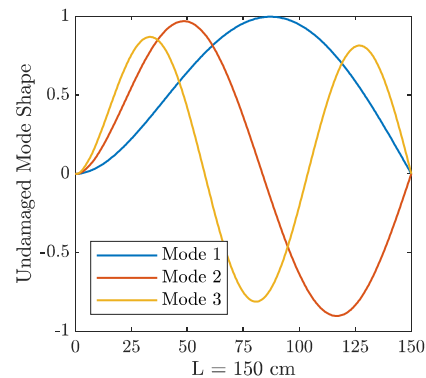
که در آن a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال



شکل ۱- سازه تیر فولادی در وضعیت های مختلف آسیب

۴- تحلیل فرکانسی

سازه تیر فولادی با استفاده از المان Shell 3D در محیط نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدل سازی و با ابعاد مش ۲۵ میلی متر تحلیل فرکانسی شد و اطلاعات مودال (فرکانس ها و شکل های مود ارتعاشی) استخراج گردید. در شکل ۲ سه شکل مود اول خمشی تیر فولادی سالم نشان داده شده و مقادیر فرکانس وضعیت های سالم و آسیب در جدول ۱ گزارش شده است.



شکل ۴- سه شکل مود اول تیر فولادی سالم

مشاهده می گردد مقدار فرکانس وضعیت آسیب از مقدار فرکانس وضعیت سالم در هر سه مود کمتر است. همچنین، مقایسه مقادیر فرکانسی حالت آسیب D1 و D3 نشان می دهد که با اضافه شدن یک موقعیت آسیب جدید به یک وضعیت آسیب، کاهش بیشتری در مقادیر فرکانس اتفاق می افتد.

جدول ۱- فرکانس های طبیعی وضعیت های سالم و آسیب

شماره مود	وضعیت سلامتی			
	D3	D2	D1	سالم
	فرکانس طبیعی (Hz)			
۱	۵۸/۴۵۷	۵۸/۹۸۷	۵۸/۴۳۶	۵۸/۹۹۶
۲	۱۸۶/۰۳	۱۸۸/۴۷	۱۸۹/۴۴	۱۸۹/۸۱
۳	۳۸۲/۸۶	۳۸۴/۶۰	۳۸۴/۵۰	۳۸۸/۹۳

لازم به ذکر است که لزوماً آسیب در سازه باعث کاهش مقادیر فرکانس نمی شود. در زیر زمینه تئوری این موضوع برای یک سیستم سازه ای یک درجه آزادی به جرم m و سختی k بحث شده است. معادله ارتعاش آزاد بدون میرایی یک سیستم یک درجه آزادی به جرم m و سختی k با رابطه (۵) تعریف می گردد:

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (5)$$

که در آن y پاسخ سازه است.

رابطه (۵) یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم با ضرایب ثابت جرم و سختی است و معادله مشخصه آن دارای دو ریشه مزدوج مختلط است. از حل معادله (۵) پاسخی از جنس توابع کسینوس و سینوس به شکل (۶) حاصل می شود:

$$y(t) = \frac{\dot{y}_0}{\omega} \sin \omega t + y_0 \cos \omega t \quad (6)$$

که در آن $\omega = \sqrt{k/m}$ فرکانس طبیعی است.

در ادامه اثر تغییر در جرم و سختی بر مقدار ω مورد بررسی واقع شده است:

$$k = \omega^2 m \Rightarrow \Delta k = 2m\omega\Delta\omega + \omega^2\Delta m \Rightarrow$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{2m\omega\Delta\omega}{\omega^2 m} + \frac{\omega^2\Delta m}{\omega^2 m} \Rightarrow \frac{\Delta k}{k} = \frac{2\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta m}{m}$$

در نتیجه

$$\Delta\omega = \frac{1}{2}\omega \left(\left| \frac{\Delta m}{m} \right| - \left| \frac{\Delta k}{k} \right| \right) \quad (7)$$

با توجه به (۷) می توان نتیجه گرفت که در اثر آسیب بسته به اینکه عبارت داخل پرانتز مثبت یا منفی باشد، مقدار فرکانس به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.

D1 و D2) به عنوان مرکز شناسایی شده آسیب، درصد‌های خطای شناسایی ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که خطای شناسایی مرکز از ۲٪ کمتر است و این مقدار خطای شناسایی ناچیز بوده و نشان دهنده دقت روش پیشنهادی مقایسه نتایج تحلیلی آنالیز موجک است.

۵-۱- بررسی سناریوی خرابی D1

سیگنال‌های اولیه و ثانویه شکل نمود وضعیت آسیب D1 تحت آنالیز تابع موجک coif5 واقع شدند و نتایج نموداری مربوط به ضرایب جزئیات مودهای اول تا سوم (سیگنال‌های خروجی) در شکل ۳ ترسیم شده است. مشاهده می‌گردد از مقایسه نمودارهای وضعیت‌های سالم و آسیب، موقعیت آسیب با ایجاد پرش یا جهش در نمودار وضعیت آسیب قابل شناسایی است

۵-۲- بررسی سناریوی خرابی D2

به طور مشابه شکل‌های مود سالم و آسیب D2 به عنوان ورودی تبدیل موجک تعریف گردید و ضرایب جزئیات موجک از تحلیل با تابع موجک coif5 استخراج شدند. مقایسه نتایج نموداری مودهای بررسی شده، تفاوت را در موقعیت محتمل آسیب نشان می‌دهد (شکل ۴).

۵-۳- بررسی سناریوی خرابی D3

مشابهاً سیگنال‌های ورودی با تابع موجک coif5 تحلیل و نمودار سیگنال‌های خروجی ترسیم شدند. مقایسه نمودارهای وضعیت‌های اولیه و ثانویه، تفاوت را در موقعیت‌های آسیب نشان می‌دهد و هر دو موقعیت آسیب به صورت پرش یا جهش اتفاق افتاده در نمودار سیگنال خروجی ثانویه شناسایی شدند (شکل ۵).

۶- شناسایی با دیگر توابع موجک

با استفاده از الگوی مقایسه‌ای سیگنال‌های خروجی حاصل از آنالیز موجک سیگنال‌های شکل مود، شناسایی با دیگر توابع موجک خانواده Daubechies, Coiflets, Symlets و Bior و Rbio نیز انجام گردید.

در ادامه، اثر آسیب بر شکل‌های مود تیر با استفاده از معیار همبستگی مودال^{۱۵} مورد بررسی قرار گرفته است. این معیار در واقع توان دوم کسینوس زاویه بین بردارهای شکل مود اولیه و ثانویه است [۳۸ و ۳۹] که با رابطه (۸) تعریف می‌گردد:

$$MAC_i^{u,d} = \frac{(\sum_{j=1}^n \phi_{i,j}^u \phi_{i,j}^d)^2}{\sum_{j=1}^n (\phi_{i,j}^u)^2 \sum_{j=1}^n (\phi_{i,j}^d)^2} \quad (8)$$

مقدار MAC همواره بین صفر و ۱ قرار دارد و مقادیر کمتر از ۱ عدم همبستگی کامل شکل‌های مود را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مقادیر MAC محاسبه شده است.

جدول ۲- مقادیر معیار همبستگی مودال

مود	حالت آسیب		
	D3	D2	D1
	معیار همبستگی مودال		
۱	۰/۹۹۹۹۳۲۳۸	۰/۹۹۹۹۹۹۷۴	۰/۹۹۹۹۷۹۲۱
۲	۰/۹۹۹۸۸۳۶۷	۰/۹۹۹۸۵۵۹۴	۰/۹۹۹۹۵۴۴۶
۳	۰/۹۹۹۶۹۲۴۹	۰/۹۹۹۶۴۵۵	۰/۹۹۹۷۳۱۴۶

۵- شناسایی آسیب

از ویژگی‌های پردازشی تبدیل موجک، قابلیت محلی‌سازی سیگنال در دو حوزه زمان و فرکانس است. بر این اساس در این مقاله، شکل‌های مود با تابع درون‌یاب اسپلاین مکعبی^{۱۶} درون‌یابی شد و به عنوان سیگنال‌های ورودی تبدیل موجک تعریف گردید. بررسی‌ها با توابع موجک مختلف انجام شد و مقایسه نتایج تحلیلی شماری از توابع موجک عملکرد شناسایی مطلوبی ارائه نمودند. در ادامه نتایج تحلیلی تابع موجک coif5 (با انتخاب ضریب مقیاس ۲) به عنوان یک تابع موجک موفق در شناسایی موقعیت آسیب تیر آورده شده است.

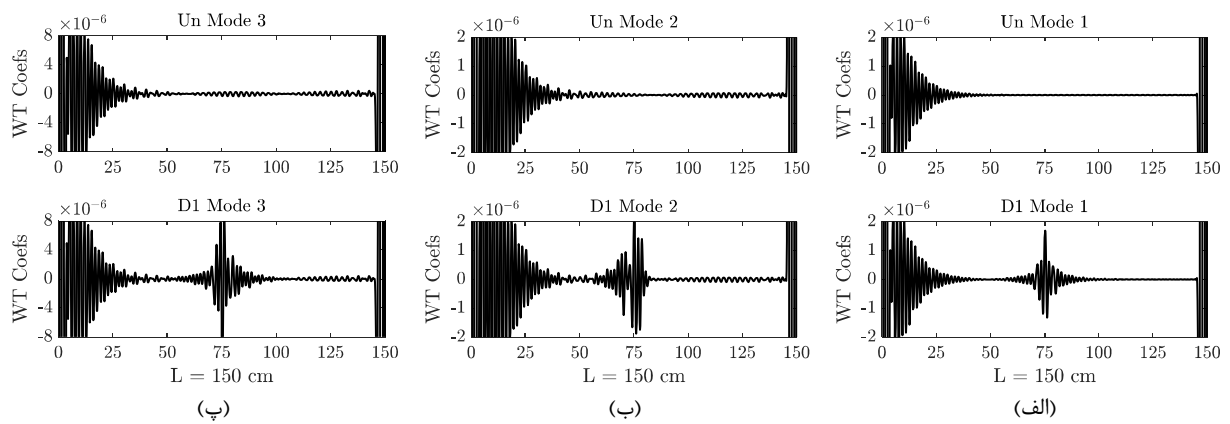
در جدول ۳ با در نظر گرفتن مقدار حداکثر نسبی ضریب موجک اتفاق افتاده در منطقه آسیب (آسیب‌های

¹⁵ Modal Assurance Criterion (MAC)

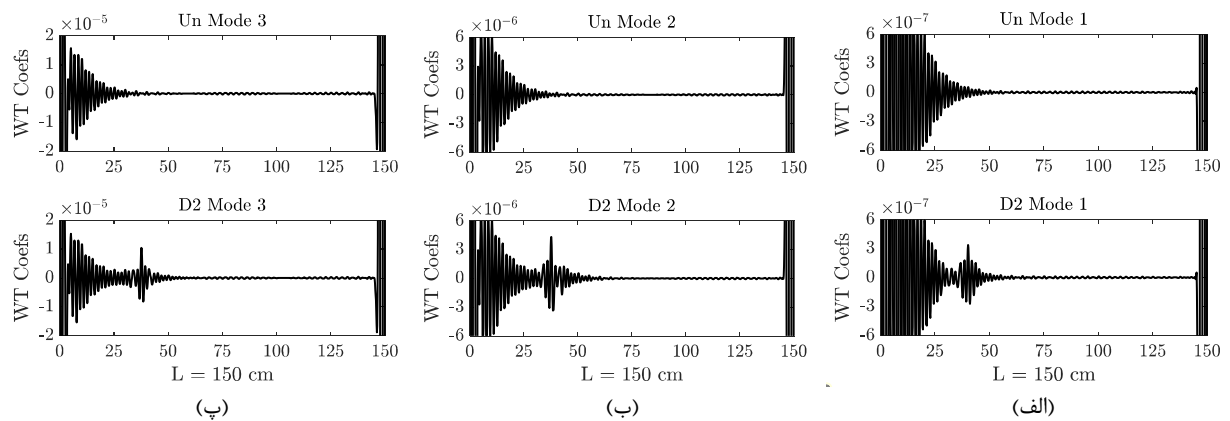
¹⁶ Cubic Spline Interpolation

جدول ۳- مقادیر درصد خطای شناسایی مرکز آسیب D1 و D2

مرکز آسیب D1				
خطا (%)	مرکز آسیب (cm)		$CWT_{max} \times 10^6$	مود
	تشخیصی	واقعی		
۰/۱۵	۷۵/۲۲۵	۷۵	۱/۱۶۹۵۶	۱
۰/۱۵	۷۵/۲۲۵	۷۵	۲/۳۹۲۴	۲
۰/۷۵	۷۶/۱۲۶	۷۵	۸/۷۳۵۶	۳
مرکز آسیب D2				
خطا (%)	مرکز آسیب (cm)		$CWT_{max} \times 10^6$	مود
	تشخیصی	واقعی		
۱/۸۳	۴۰/۲۴۰	۳۷/۵	۰/۳۳۸۸	۱
۰/۲۳	۳۷/۸۳۸	۳۷/۵	۴/۳۲۵۲	۲
۰/۱۳	۳۷/۶۸۸	۳۷/۵	۱۰/۴۴۵	۳



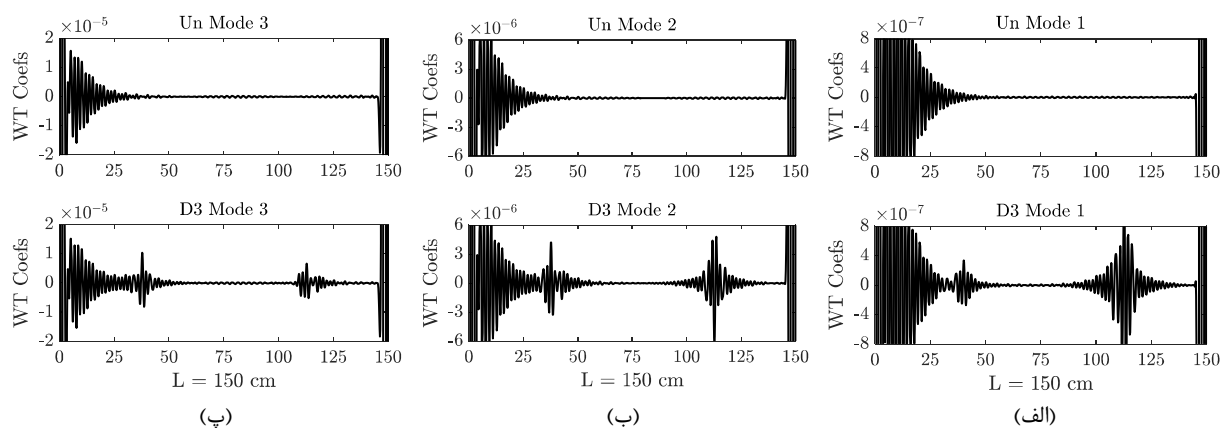
شکل ۳- سیگنال‌های خروجی (الف) مود اول، (ب) مود دوم و (پ) مود سوم سالم و آسیب D1



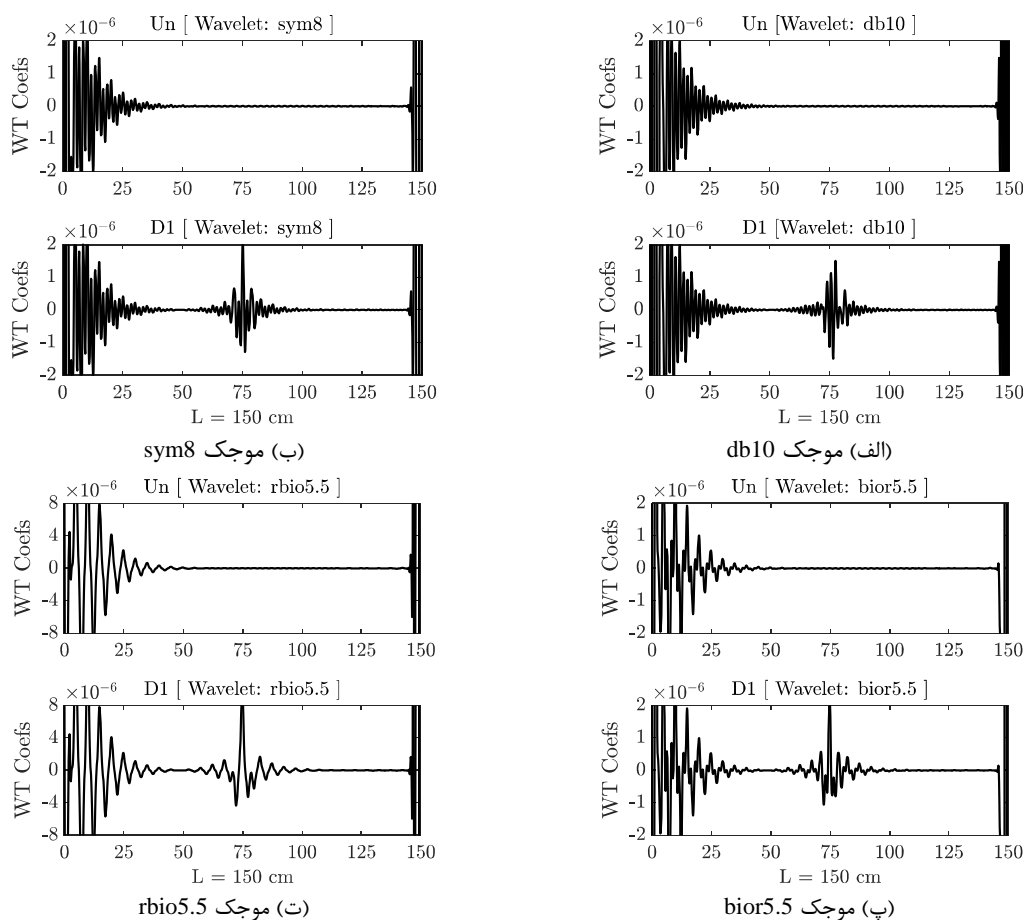
شکل ۴- سیگنال‌های خروجی (الف) مود اول، (ب) مود دوم و (پ) مود سوم سالم و آسیب D2

(D1) در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار سیگنال‌های خروجی، تفاوت را در موقعیت آسیب نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، نتایج تحلیلی توابع موجک db10، bior5.5 و rbio5.5 (برای مود اول حالت آسیب



شکل ۵- سیگنال‌های خروجی (الف) مود اول، (ب) مود دوم و (پ) مود سوم سالم و آسیب D3



شکل ۶- نتایج آنالیز موجک های مختلف سیگنال‌های ورودی

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

می‌تواند از خرابی کلی سازه جلوگیری نماید و خسارت‌های احتمالی را به حداقل ممکن رساند.

در این مقاله، بر اساس فرکانس‌ها و شکل‌های مود اولیه و ثانویه ارتعاشی به شناسایی و تشخیص آسیب سازه تیر پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد:

۱- در اثر آسیب (کاهش مدول الاستیسیته)، مقادیر فرکانس کاهش می‌یابد؛ به طوری که از مقایسه

پایش سلامت و تشخیص آسیب سازه‌ها از ضروریات اولیه نگهداری سازه و تأمین ایمنی ساکنان آن است. تیرها و ستون‌ها از اعضای اصلی سازه‌های مهندسی عمران (ساختمان‌ها و پل‌ها) هستند؛ بنابراین، تشخیص آسیب در این اعضا و سپس، ترمیم و یا تعویض به موقع آن‌ها

شناسایی نمود.

۴- بررسی‌ها با توابع موجک متعدد انجام شد و نتایج آشکارسازی مطلوب حاصل گردید. این موضوع نشان می‌دهد که مقایسه نمودار سیگنال‌های خروجی حاصل از تحلیل تبدیل موجک پیوسته وضعیت‌های اولیه و ثانویه، روشی کارآمد و قابل اعتماد در تشخیص موقعیت‌های مختلف آسیب در اعضای سازه‌ای تیر مانند است. روش پیشنهادی تشخیص آسیب مبتنی بر مقایسه نمودار سیگنال‌های خروجی اولیه و ثانویه برای شرایطی که شکل‌های مود ارتعاشی آلوده به نویز نیستند و یا کمترین تأثیر از نویزهای تصادفی را دارند، مناسب است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از همکاری ارزشمند جناب مهندس محمد دالوند دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه سمنان قدردانی می‌نمایند.

مقادیر فرکانس وضعیت‌های D2 و D3 مشاهده گردید با اضافه شدن یک موقعیت آسیب جدید به یک وضعیت آسیب، نرخ کاهش فرکانس افزایش می‌یابد.

۲- شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی بر هم انطباق کامل ندارند و مقادیر معیار اطمینان مودال کمتر از ۱ محاسبه می‌شود.

با توجه به خاصیت تشخیصی تبدیل موجک، شکل‌های اولیه و ثانویه مود به عنوان سیگنال‌های ورودی تبدیل موجک برای انجام تحلیل موجک تعریف شدند. نتایج نشان داد:

۳- در تمام مودها تفاوت نمودار سیگنال خروجی اولیه در مقایسه با نمودار سیگنال خروجی ثانویه، در موقعیت‌های آسیب در نمودار خروجی ثانویه به صورت پرش ایجاد شده قابل مشاهده است؛ به نحوی که با یک بررسی ساده می‌توان موقعیت‌های آسیب را با خطای کمتر از ۲٪

مراجع

- [1] 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.
- [2] Zhong, S., and Oyadiji, S.O. (2011). "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, 18, 169-190.
- [3] Bagheri, A., and Kourehli, S. (2013). "Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis", *Asian Journal of Civil Engineering*, 14(2), 289-304.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Li, J., and Hao, H. (2014). "Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction", *Structural Health Monitoring*, 1-17.
- [7] Ezzodin, A., Naderpour, H., Kheyroddin, A., and Ghodrati Amiri, G. (2015). "Damage Localization and Quantification of Beams Using Wavelet Transform", *Journal of Modeling in Engineering*, 12(39), 1-11.
- [8] 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.
- [9] Rahami, H., Amini-Tehrani, H., Akhvat, M., and Ghodrati-Amiri, G. (2016). "Damage detection in offshore fixed platforms using concepts of energy entropy in wavelet packet transform, *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 241-248.
- [10] Naderpour, H., and Fakharian, P. (2016). "A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(7), 2859-2867.
- [11] Abbasnia, R., Mirzaei, B., and Yousefbeck, S. (2016). "A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams", *Journal of Vibroengineering*, 18(3), 1497-1513.
- [12] Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefbeck, S., Ghodrati Amiri, G., and Zare Hosseinzadeh, A. (2019). "A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization

- algorithm”, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), 1-20.
- [13] Ashory, M.R., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Kokabi, M.J. (2017). “Damage identification in composite laminates using a hybrid method with wavelet transform and finite element model updating”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 232, 815-827.
- [14] Yang, C., and 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] Habibzadeh Azari, O., and Ghaffarzadeh, H. (2018). “Damage Detection Using Wavelet Packet Decomposition and Random Forests Algorithm in Experimental Structure at the UBC (University of British Columbia)”, *Civil Infrastructure Researches*, 3(2), 51-60.
- [16] Rezaifar, O., Younesi, A., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2018). “Debonding damage detection in concrete filled tube columns by experimental modal data”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special Issue 4), 93-106.
- [17] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2019). “Structural health monitoring of a concrete-filled tube column”, *Magazine of Civil Engineering*, 85, 136-145.
- [18] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2020). “Damage detection in concrete filled tube columns based on experimental modal data and wavelet technique”, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 7(2), 245-254.
- [19] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., and Esfandiari, A. (2021). “Active interface debonding detection of a Concrete Filled Tube (CFT) column by modal parameters and Continuous Wavelet Transform (CWT) technique”, *Structural Monitoring and Maintenance*, 8(1), 69-90.
- [20] Hoseini Vaez, S., and 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.
- [21] Khanahmadi, M., Rezaifar, 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*, 8(5), 198-214.
- [22] Khanahmadi, M., Rezaifar, 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*, 8(8), 289-309.
- [23] Khademi-Kouhi, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Khanahmadi, M. (2019). “Damage assessment in laminated composite plates using wavelet transform”, *4th National Conference on Mechanical & Aerospace Engineering*, K. N. Toosi University, Tehran, Iran.
- [24] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Khademi-Kouhi, M. (2022). “Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method”, *Journal of Vibration and Sound*, 10(20), 144-156.
- [25] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., and Gholhaki, M. (2021). “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), 166-183.
- [26] Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M., Dejkam, B., and Miri, M.E. (2021). “Wavelet-based Damage Detection of Steel Beam-Structures”, *Journal of Structure & Steel*, 16(33), 15-27.
- [27] Hanteh, M., Rezaifar, O., and Gholhaki, M. (2021). “Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37(2.2), 131-147.
- [28] Hanteh, M., and Rezaifar, O. (2021). “Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method”, *Structures*, 29, 701-713.
- [29] Hanteh, M., Rezaifar, O., and Gholhaki, M. (2021). “Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and wavelet analysis”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(4), 1013-1036.
- [30] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., and Rezaifar, O. (2021). “Damage identification of a column under the axial load based on wavelet transform and modal data”, *Journal of Modeling in Engineering*, 18(63), 51-64.
- [31] Khanahmadi, M., Khademi-Kouhi, M., and Azizi Rashid, F. (2021). “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*.
- [32] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., Dejkam, B., and Younesi, A. (2023). “Health Monitoring and Damage Assessment of a Column under the Effect of Axial Load Using Modal Dynamic Data and Wavelet Analytical Method”, *Modares Civil Engineering Journal*.
- [33] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., and Younesi, A. (2023). “Detection of Debonding Damage Location of the Concrete Core from the Steel Tube of Concrete-Filled Steel Tube (CFST) Columns Using Wavelet Analysis Analytical Method”, *Modares Civil Engineering Journal*, 22(1), 129-142.
- [34] Mamazizi, A., Khanahmadi, M., and Nobakht Vakili, K. (2022). “Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data”, *Sharif Journal of Civil Engineering*.

- [35] Zhongm, S., and Oyadiji, S.O. (2011). "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers & Structures*, 89(1-2), 127-148.
- [36] MATLAB Reference Guide, the Math Works, Ince, R2021a.
- [37] Hansang, K., and Hani, M. (2004). "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, 26(3), 347-362.
- [38] Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M., and Tehranian, A. (2008). "Dynamic behaviour of 3D-panel single-storey system using shaking table testing", *Engineering Structures*, 30(2), 318-337.
- [39] Kabir, M.Z., and Rezaifar, O. (2019). "Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system", *Structures*, 20, 411-424.