

پایش سلامت و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از داده‌های دینامیکی مودال و روش تحلیلی موجک

محتشم خان احمدی^۱، امید رضایی فر^{۲*}، مجید قلهکی^۳، بهزاد دژکام^۴، عادل یونسی^۵

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۴. مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران
۵. دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*orezayfar@semnan.ac.ir

اریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

چکیده

همواره سازه‌ها تحت اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی متعددی همچون زلزله، انفجار و گودبرداری‌های غیر اصولی واقع‌اند که می‌تواند آسیب‌های موضعی موجود در آن‌ها را تشدید نموده و باعث انهدام آن‌ها و در نتیجه، ایجاد خسارت‌های جانی و مالی فراوانی شود؛ بنابراین، پایش سلامتی سازه‌ها و اعضای سازه‌ای بسیار مهم و حائز اهمیت است. در این نوشتار، پایش سلامت عضو سازه‌ای ستون با لحاظ نمودن اثر بار محوری بر پاسخ‌های دینامیکی مودال (فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مود ارتعاشی) انجام شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مقدار فرکانس در تمامی مودها برای وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده با افزایش بار محوری به صورت نسبت‌هایی از بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) کاهش می‌یابد. همچنین، در بارگذاری‌های یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب‌دیده بیشتر است؛ به طوری‌که با افزایش شدت آسیب، اختلاف فرکانسی بین وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده افزایش می‌یابد. با معرفی یک شاخص شناسایی آسیب (DDI) بر مبنای ضرایب موجک حاصل از جزئیات آنالیز موجک شکل‌های مود وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده، موقعیت‌های آسیب با دقت بالایی به صورت پرش و یا اغتشاش در نمودار DDI شناسایی شد. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که DDI موقعیت‌های مختلف آسیب مستقل از هم بوده و تنها متأثر از شدت آسیب همان موقعیت آسیب است و آثار بار محوری بر DDI بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. مستقل بودن DDI موقعیت‌های مختلف آسیب نشان‌دهنده کارآمدی روش پیشنهادی در شناسایی موقعیت‌های آسیب است؛ زیرا در غیر اینصورت، ممکن است عدم شناسایی یک موقعیت آسیب بر شناسایی سایر موقعیت‌های آسیب تأثیرگذار باشد.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه، بار محوری، پاسخ دینامیکی مودال، آنالیز موجک، شناسایی آسیب در ستون.

۱- مقدمه

سلامت سازه‌ها، تأمین ایمنی و احساس امنیت یک نیاز همیشگی و یکی از چالش‌های مهندسی و مدیران در حوزه مدیریت بحران است. فرسودگی و وقوع آسیب‌های جزئی در سازه‌ها و اعضای آن‌ها در مراحل اولیه ساخت یا در طول بهره‌برداری به ویژه در سازه‌های مهمی چون نیروگاه‌ها، ساختمان‌های بلند، پل‌ها، سدها، فرودگاه‌ها، بیمارستان‌ها و غیره، همواره یک مشکل اساسی است و در صورت عدم شناسایی به موقع محل‌های آسیب و اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مناسب ممکن است خسارت‌های جبران ناپذیر اجتماعی و اقتصادی بسیاری به وجود آید؛ بنابراین، موضوع پایش سلامت در سازه‌ها و اعضای سازه‌ای بسیار مهم و ضرورتی انکار ناپذیر است.

گاهی اوقات محل و میزان آسیب را می‌توان از طریق بازرسی‌های بصری تعیین نمود؛ اما روش بازرسی بصری دارای محدودیت ارزیابی آسیب است، به ویژه زمانی که آسیب در لایه‌های داخلی سازه قرار می‌گیرد [1]؛ بنابراین روش‌های تشخیص خرابی توسعه پیدا کردند. به طور کلی روش‌های پایش سلامت در سازه‌ها دارای چهار سطح می‌باشد؛ سطح ۱ شامل تشخیص وجود آسیب در سازه؛ سطح ۲ شامل تعیین محل آسیب؛ سطح ۳ ارزیابی و محاسبه شدت آسیب و سطح ۴، پیش‌بینی طول عمر باقیمانده سازه است [2]. وقوع خرابی، پاسخ‌های استاتیکی (جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها) و پاسخ‌های دینامیکی (فرکانس‌ها، شکل مودها و میرایی مودال) سازه را تغییر می‌دهد؛ بنابراین از بررسی تغییرات به وجود آمده می‌توان به مسئله وجود آسیب، محل و شدت آن پرداخت (که در این مقاله، مطالعات تا سطح ۲، یعنی تشخیص وجود آسیب در سازه و شناسایی محل‌های آسیب انجام شده است).

در دهه‌های اخیر، تبدیلات ریاضی با ایده پردازش سیگنال‌ها در زمینه پایش سلامت سازه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. تبدیل موجک^۱ (WT) به عنوان یکی از

تبدیلات توانمند پردازشی سیگنال‌ها است که با استفاده از آن می‌توان مشخصات سیگنال‌ها را در دو حوزه زمان و فرکانس استخراج کرد و نقاط ناپیوستگی یا تغییرات محلی ناگهانی در سیگنال‌ها را شناسایی نمود. بر همین اساس پژوهش‌های متعددی در حوزه پایش سلامتی سازه مبتنی بر تبدیل موجک انجام شده است. نیولند با استفاده از مفاهیم موجک به تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی سازه پرداخت؛ اگرچه مشخصاً از تبدیل موجک برای شناسایی آسیب‌های سازه استفاده نمود، اما معرفی این روش در مهندسی، سرآغاز مطالعه پایش سلامتی سازه‌ها به روش موجک شد [4, 3]. سون و همکاران با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل پاسخ‌های تاریخچه زمانی سیستم یک درجه آزادی با معرفی آسیب به صورت کاهش سختی پرداختند و زمان وقوع آسیب را تعیین نمودند [5]. هوو و همکاران با استفاده از تحلیل موجک داده‌های حاصل از زلزله سن فرناندو موفق شدند لحظه‌ای را که آسیب رخ می‌دهد شناسایی نمایند [6]. اوانسوا و سوراژ 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 انتخاب کردند [7]. کاتونین با استفاده از تحلیل موجک پاسخ‌های مودال 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 [8]. قدرتی امیری و همکاران با به‌کارگیری تبدیل موجک و داده‌های شکل مود به تشخیص محل آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب شدند [9]. باقری و کورهلی بر مبنای استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله پرداختند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک، زمان وقوع خرابی را نشان داد [10]. ژو و همکاران با استفاده از موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی^۲ و شکل‌های انحنا عملیاتی اسکن شده با لیزر^۳ به تشخیص آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب

2. Two-Dimensional directional Gaussian wavelets
3. Laser scanned operating deflection shapes

1. Wavelet Transform (WT)

شدند [11]. لی و همکاران با استفاده از روش آنروپی موجک نسبی پیوسته به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرپایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی‌سازی آسیب در سازه‌های پل خرپایی را دارد [12]. لی و هوو برای شناسایی آسیب در سازه قاب صفحه‌ای ۷ طبقه روشی مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه موجک پیشنهاد دادند و با استفاده از این روش موفق شدند موقعیت‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمایند [13]. کاتونین با استفاده از موجک‌های ناپایدار گویکنانکس^۱ تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل موده‌های صفحات کامپوزیتی آسیب‌دیده پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها سازوکار دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد [14]. پاتل و همکاران با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی آسیب در یک ساختمان بتنی ۶ طبقه پرداختند. آن‌ها با تحلیل 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 [15]. یونسی و همکاران برای شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر مبنای استفاده از تبدیل موجک به تحلیل شکل موده‌های ارتعاشی پرداختند و موفق شدند موقعیت‌های جداشدگی هسته بتنی از جداره فولادی را شناسایی نمایند [16-18]. وانگ و همکاران از تبدیل موجک برای شناسایی آسیب سازه تونلی استفاده نمودند. آن‌ها در این مطالعه، یک شاخص شناسایی آسیب مبتنی بر تبدیل موجک بر اساس بردار نیروی باقی‌مانده پیشنهاد دادند و برای مدل المان محدود تونل با انواع مختلف خرابی در موقعیت‌های مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد که این شاخص می‌تواند به عنوان یک شاخص مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب مورد استفاده واقع شود [19]. حسینی واعظ و عارف‌زاده با استفاده از تبدیل موجک به مقایسه داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند و موفق به شناسایی محل‌های آسیب

شدند [20]. خان احمدی و همکاران با به‌کارگیری تبدیل موجک دو بعدی و شکل‌های مود صفحه 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 موده‌های بررسی شده می‌توان محل‌های آسیب را با دقت بالایی شناسایی نمود [21]. آن‌ها در تحقیقات دیگری با استفاده از تبدیل موجک دو بعدی موفق به شناسایی آسیب در صفحات فولادی و پیش‌ساخته پانلی شدند [22,23]. همچنین، در ارتباط با شناسایی آسیب در تیرهای فولادی نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک (تبدیل موجک پیوسته و تبدیل موجک گسسته) می‌توان از تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی، موقعیت‌های آسیب را شناسایی نمود [24, 25]. آن‌ها در مطالعه دیگری، [26] با به‌کارگیری تبدیل موجک پیوسته و تعریف یک سیگنال ورودی به شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر ماکزیمم نسبی ضرایب جزئیات به دست آمده از تحلیل موجک سیگنال ورودی با صرف نظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، محل‌های آسیب را نشان داد. رضایی فر و همکاران با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش‌های نسبی در ضرایب موجک تولید شده شناسایی شد [27-30].

مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که کمتر به آثار بار محوری بر پاسخ‌های دینامیکی مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) و مسئله شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری مبتنی بر موجک پرداخته شده است. با توجه به اینکه همواره المان ستون تحت اثر نیروی محوری واقع است و در اثر تشدید آسیب‌های محلی ممکن است ستون دچار کماتش و در نتیجه، ناپایداری شود؛ بنابراین، پایش سلامتی در عضو سازه‌ای ستون تحت اثر بار محوری مسئله‌ای مورد توجه است.

۲- تبدیل موجک

واژه "Wavelet" از دو جزء "Wave" به معنی موج و "let" به معنی کوچک تشکیل شده و به معنی موج کوچک است که در زبان فارسی معادل "موجک" برای آن در نظر گرفته شده است. تبدیل موجک یا تبدیل ویولت تبدیلی است که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه زمانی کوتاه استخراج نموده و بیان می‌کند که این مشخصات با گذشت زمان به چه شکل تغییر می‌کند. این تبدیل مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن فرکانسی تغییر می‌کند و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آید [31].

تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته^۱ (CWT) و تبدیل موجک گسسته^۲ (DWT) تعریف شده‌اند که در ادامه به هر یک پرداخته می‌شود.

۲-۱- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته سیگنال $x(t)$ در بازه $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) تعریف می‌شود [31, 32]:

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

که در آن

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

در رابطه (۱)، a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند. ψ مزدوج مختلط تابع موجک ψ است. تابع موجک در تحلیل 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 تحلیل انتخاب می‌شود. مقیاس‌های کمتر از واحد متناظر با تقریب‌های سیگنال و مقیاس‌های بزرگ‌تر از واحد متناظر با جزئیات سیگنال است.

۲-۲- تبدیل موجک گسسته

به دلیل تغییر پیوسته پارامترهای مقیاس و انتقال، انجام CWT روی یک سیگنال منجر به تولید اطلاعات اضافی می‌شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازه حافظه افزایش می‌یابد؛ بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف تا حد ممکن مورد نظر بود. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته‌سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و سپس، وابسته نمودن مقدار پارامتر انتقال به آن است [32].

$$\begin{cases} s = s_0^j, & s_0 < 1, & j \in Z \\ \tau = k\tau_0 s_0^j, & \tau_0 \neq 0, & k \in Z \end{cases} \quad (3)$$

با فرض $s_0 = 2$ و $\tau_0 = 1$ ، تبدیل موجک گسسته سیگنال $x(t)$ با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید [31, 32].

$$DWT_{s,\tau}^{x(t),\psi(t)} = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-k2^j}{2^j} \right) dt \quad (4)$$

اگر مجموعه‌ای از ضرایب موجک $\langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$ وجود داشته باشد که اطلاعات کامل سیگنال $x(t)$ را توصیف نماید، باید رابطه (۵) برقرار باشد:

$$A \|x(t)\|^2 \leq \sum_{j,k} |x(t), \psi_{j,k}(t)|^2 \leq B \|x(t)\|^2 \quad (5)$$

$A, B \in R^+$

در چنین حالتی، سیگنال $x(t)$ را می‌توان از طریق معکوس تبدیل موجک گسسته بازسازی نمود.

$$x(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT_{s,\tau}^{x(t),\psi(t)} \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

در تحلیل چند رزولوشنی، یک سیگنال مشخص می‌تواند در دو قسمت جزئیات و تقریبات تجزیه شود. برای به دست آوردن سطح بعدی جزئیات و تقریبات می‌توان اطلاعات تقریبی را بیشتر تجزیه نمود. فرآیند تجزیه می‌تواند تا رسیدن به مقیاس طراحی شده z تکرار شود و این چگونگی پیاده‌سازی یک DWT است. معادله‌های (۷) و (۸) جزئیات و تقریبات را در مقیاس z ارائه می‌دهند [31, 32].

$$\begin{aligned} x_a^j(t) &= \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k \langle x(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t), \quad k \in Z \end{aligned} \quad (7)$$

1. Continuous Wavelet Transform (CWT)
2. Discrete Wavelet Transform (DWT)

۴- تئوری اثر بار محوری بر داده‌های مودال

معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی را می‌توان از تعادل نیروهای مؤثر در هرکدام از درجات آزادی به دست آورد:

$$f_{li} + f_{Di} + f_{Si} = P_i(t) \quad (13)$$

شکل ماتریسی رابطه (۱۳) به صورت رابطه (۱۴) است:

$$f_I + f_D + f_S = P(t) \quad (14)$$

با در نظر گرفتن اثر بار محوری در رابطه (۱۴) می‌توان نوشت:

$$f_I + f_D + f_S - f_G = P(t) \quad (15)$$

با توجه به اینکه نیروی محوری (نسبتی از بار کمانشی بحرانی) در خلاف جهت حرکت است؛ بنابراین اثر آن منفی لحاظ شد. در معادله (۱۵) f_I, f_D, f_S, f_G و $P(t)$ به ترتیب ماتریس نیروهای اینرسی، میرایی، سختی، محوری و گرهی بوده و این‌گونه تعریف می‌شوند:

$$f_I = M\ddot{u}, \quad f_D = C\dot{u} \quad (16)$$

$$f_S = Ku, \quad f_G = K_G u$$

در روابط بالا u بردار جابه‌جایی گره‌ها و ماتریس‌های مربعی M, C, K, K_G به ترتیب ماتریس جرم، میرایی، سختی و سختی هندسی (ناشی از نیروی محوری) هستند؛ بنابراین از جایگذاری به دست می‌آید:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K - K_G)u = P(t) \quad (17)$$

که با قرار دادن $\bar{K} = K - K_G$ (ماتریس سختی مرکب) معادله دینامیکی حرکت سازه به شکل رابطه (۱۸) قابل بیان است:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + \bar{K}u = P(t) \quad (18)$$

در این صورت معادله ارتعاش آزاد یک سیستم چند درجه آزادی بدون میرایی خواهد بود:

$$M\ddot{u} + \bar{K}u = 0 \quad (19)$$

با فرض یک جابه‌جایی هارمونیک برای تمام درجات آزادی با زاویه فاز θ و فرکانس ω روابط زیر به دست می‌آیند:

$$u(t) = \bar{u} \sin(\omega t + \theta) \quad (20)$$

$$\ddot{u}(t) = -\bar{u} \omega^2 \sin(\omega t + \theta) \quad (21)$$

که در آن \bar{u} نشان دهنده شکل سیستم بوده و با زمان تغییر نمی‌کند. با جایگذاری در (۱۹) معادله زیر حاصل می‌شود:

$$x_d^j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ = \sum_k (x(t), \psi_{j,k}(t)) \psi_{j,k}(t), \quad k \in Z \quad (8)$$

که در آن ضرایب $a_{j,k}$ و $d_{j,k}$ (به ترتیب) در ارتباط با تقریب‌ها و جزئیات هستند. در نتیجه، یک سیگنال $x(t)$ را می‌توان با استفاده از رابطه (۹) به مجموعه‌ای از زیر فضا تجزیه نمود.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=J_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (9)$$

که در آن J_0 یک پارامتر مقیاس از پیش تعیین شده است. در معادلات فوق، $\phi(t)$ تابع مقیاس است و $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j/2}t - k)$ نسخه انتقال یافته و مقیاس شده $\phi(t)$ است [31].

۳- معادله اویلر حاکم بر کمانش خمشی

معادله اساسی حاکم بر کمانش خمشی ستون دو سر مفصل تحت اثر نیروی محوری با رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$EIy'' = -Py \Rightarrow y'' + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (10)$$

شرایط مرزی موجود عبارت است از $y(0) = y(L) = 0$

معادله دیفرانسیل (۱۰) یک معادله خطی مرتبه دوم با ضرایب ثابت است و ریشه‌های معادله کمکی آن، مختلط مزدوج هستند؛ بنابراین، پاسخ عمومی معادله مزبور خواهد بود:

$$y = A \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) + B \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) \quad (11)$$

از شرایط مرزی حاکم بر سازه به دست می‌آید:

$$y(0) = 0 \rightarrow B = 0$$

$$y(L) = 0 \rightarrow A \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}L\right) = 0$$

ضریب A نمی‌تواند صفر شود؛ بنابراین قسمت سینوسی صفر است و در این صورت به دست می‌آید:

$$\sqrt{\frac{P}{EI}}L = n\pi \rightarrow P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

که به ازای $n = 1$ مقدار بار بحرانی کمانش حاصل می‌شود.

شکل ۱. ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی

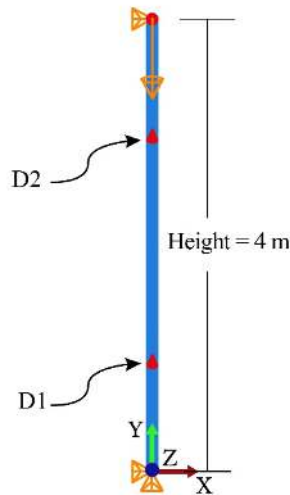


Fig. 1. The column under the effect of axial load with the pinned support conditions

جدول ۱. بار کمانشی تئوری و اجزا محدود ستون سالم (نیوتن)

| Mode Number | $P_{critical} (N)$ | |
|-------------|--------------------|--------------|
| | Theoretical | ABAQUS (FEM) |
| 1 | 1.03E+6 | 1.03E+6 |
| 2 | 4.11E+6 | 4.09E+6 |
| 3 | 9.25E+6 | 9.16E+6 |
| 4 | 1.65E+7 | 1.61E+7 |

Table 1. Theoretical and finite element critical loads of the healthy column

مقدار تئوری برای بار کمانش بحرانی در مود اول به صورت ذیل محاسبه شده است.

$$P_{cr} = \pi^2 \frac{200000 \times 10^6 \times 10^{-6}}{12 \times 4^2} \approx 1.03 \times 10^6 (N)$$

۷- معرفی حالت‌های آسیب

آسیب‌ها به صورت کاهش درصدی مدول الاستیسیته تعریف شده و مشخصات هندسی حالت‌های آسیب در جدول (۲) آورده شده است.

$$(\bar{K} - \omega^2 M)\bar{u} = 0 \quad (22)$$

دستگاه معادله بالا در صورتی جواب غیر صفر دارد که درمیان ضرایب برابر صفر باشد:

$$\det(\bar{K} - \omega^2 M) = 0 \quad (23)$$

بسط معادله بالا منجر به یک معادله جبری درجه n (تعداد درجات آزادی) از ω^2 می‌شود و از این طریق، فرکانس‌ها و شکل‌های مود متأثر از بار محوری به دست می‌آیند.

۵- بیان مسئله تحقیق

ستون فولادی به طول ۴ متر و سطح مقطع مربعی توپر به طول ضلع ۱۰ سانتیمتر با مشخصات مکانیکی مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسن ۰/۳ با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل مورد نظر است. مسئله تحقیق، پایش سلامت و آشکارسازی محل‌های مختلف آسیب در المان ستون معیوب تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) با استفاده از اطلاعات دینامیکی مودال و روش‌های تحلیلی تبدیل موجک است.

۶- مدل اجزا محدود ستون تحت بار محوری

ستون فولادی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل شکل (۱) با استفاده از المان Beam-Wire در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. به منظور اعتماد به رفتار سازه و تصور اینکه در واقعیت به مسئله پایش سلامت پرداخته شده است، مقادیر بار بحرانی مدل‌سازی نرم‌افزاری با مقادیر تئوری مقایسه شد و مورد تأیید واقع گردید. مقادیر بار بحرانی حاصل از تحلیل کمانش ستون با ابعاد مش ۸ سانتی‌متر و مقادیر تئوری نظیرشان در جدول (۱) آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که تحلیل کمانش با ابعاد مش متفاوت نیز انجام شد و نتایج نشان داد که مشبندی به طول ۸ سانتی‌متر برای ادامه تحقیق مناسب است.

جدول ۲. مشخصات هندسی حالت‌های آسیب

| Damage ... | | | | |
|------------|--------|-----------|------------|----------|
| State | Number | Zone (m) | Center (m) | Severity |
| D1 | 1 | 0.96-1.04 | 1 | 30 |
| D2 | 1 | 2.96-3.04 | 3 | 20 |
| D3 | 2 | 0.96-1.04 | 1 | 30 |
| | | 2.96-3.04 | 3 | 20 |

Table 2. Geometric profile of damage states

مدول الاستیسیته ناحیه آسیب عبارت است از

$$E_d = \left(1 - \frac{d}{100}\right) E_u \quad (24)$$

که در آن d شدت آسیب موقعیت مورد نظر است.

۸- بررسی اثر شدت آسیب بر بار بحرانی

در جدول (۳) مقادیر نرم افزاری بار محوری بحرانی ستون معیوب در هر یک از حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 آورده شده است؛ مشاهده شد که با افزایش شدت خرابی ناحیه آسیب‌دیده، از میزان بار محوری بحرانی کاسته می‌شود؛ و این اهمیت عیب‌یابی در المان سازه‌ای ستون تحت اثر بار محوری و در مراحل بعدی ترمیم و یا تعویض المان معیوب به منظور تأمین ایمنی و کاهش هزینه‌های جانی و مالی در اثر تشدید خرابی‌های موضعی را یادآوری می‌نماید.

جدول ۳. اثر شدت آسیب بر بار محوری بحرانی (نیوتن)

| Damage Severity (%) | Critical Axial Load (*10 ⁶) | | |
|---------------------|---|--------|--------|
| | D1 | D2 | D3 |
| 0 | 1.0269 | 1.0269 | 1.0218 |
| 10 | 1.0246 | 1.0246 | 1.0195 |
| 20 | 1.0218 | 1.0218 | 1.0167 |
| 30 | 1.0181 | 1.0181 | 1.0131 |
| 40 | 1.0132 | 1.0132 | 1.0083 |
| 50 | 1.0064 | 1.0064 | 1.0015 |
| 60 | 0.9961 | 0.9961 | 0.9915 |
| 70 | 0.9791 | 0.9791 | 0.9747 |
| 80 | 0.9455 | 0.9455 | 0.9415 |
| 90 | 0.8491 | 0.8491 | 0.8462 |

Table 3. The effect of damage severity on critical axial load (N)

لازم به ذکر است که شدت خرابی ناحیه آسیب ۲ در حالت D3 برابر ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین، بار بحرانی حالت آسیب D3 با شدت‌های آسیب ۳۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب در نواحی آسیب ۱ و ۲ به عنوان بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) برای ادامه تحقیق انتخاب شده است. البته در نسبت‌های مختلف از این بار به شکلی که شدت آسیب نواحی ۱ و ۲ به ترتیب از ۳۰٪ و ۲۰٪ تجاوز ننماید، ستون پایداری خود را حفظ می‌نماید.

۹- بررسی اثر بار محوری بر فرکانس طبیعی

در شکل (۲) شکل‌های مود ارتعاشی (هشت شکل مود اول) ستون سالم حاصل از تحلیل فرکانسی تحت اثر بار محوری نشان داده شده است.

تحلیل فرکانسی ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی در وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده انجام شده است و مقدار فرکانس متناظر با شکل مودهای وضعیت‌های سالم و آسیب D1 (به عنوان نمونه) در جداول (۴ و ۵) آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار فرکانس در تمامی مودها برای هر دو وضعیت سالم و آسیب‌دیده با افزایش بار محوری کاهش می‌یابد. همچنین، از مقایسه جداول (۴ و ۵) مشاهده می‌شود که فرکانس‌های طبیعی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده در تمامی مودها با در نظر گرفتن اثر بار محوری یکسان به دلیل وجود آسیب دارای اختلاف هستند. نیز، با افزایش بار محوری، اختلاف فرکانسی وضعیت‌های سالم و آسیب در تمامی مودها افزایش می‌یابد.

در شکل (۳) نمودارهای نسبت بار به بار بحرانی مبنا ($\xi = P/P_{cr}$) - نسبت فرکانس به فرکانس ω_0 ($\gamma = \omega/\omega_0$) برای حالت سالم ستون در چهار مود اول ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش بار محوری، فرکانس طبیعی تمامی مودها کاهش می‌یابد و این روند کاهش در مودهای پایین‌تر محسوس‌تر است. (ω_0 فرکانس طبیعی متناظر با $\xi = 0$ است.)

شکل ۲. شکل‌های مود ستون سالم تحت اثر بار محوری

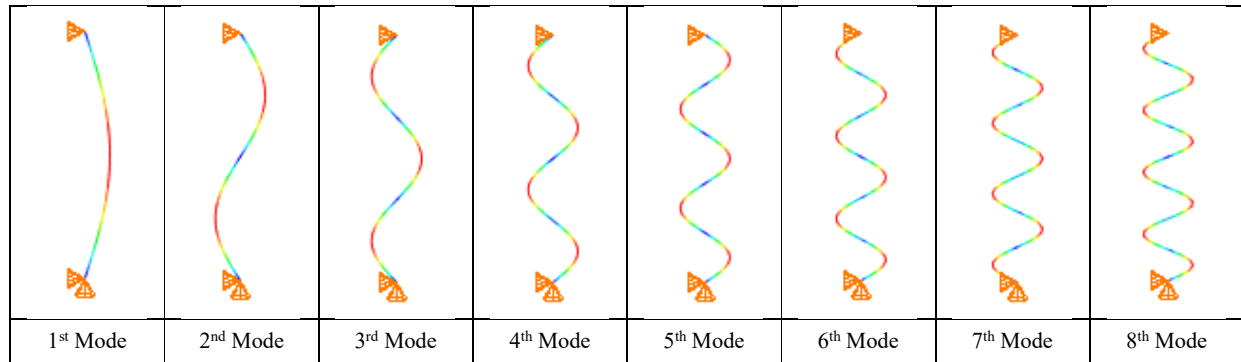


Fig. 2. Undamaged mode shapes of the column under the effect of axial load

جدول ۴. اثر بار محوری بر مقادیر فرکانس حالت سالم (هرتز)

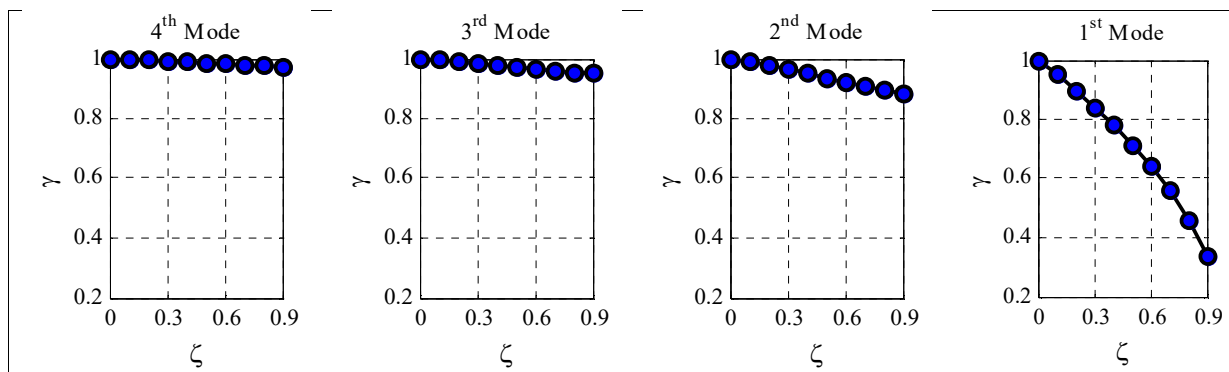
| $\frac{P}{P_{cr}}$ | Mode Number | | | | | | | |
|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | Natural Frequency (Hz) | | | | | | | |
| 0 | 14.291 | 56.992 | 127.60 | 225.30 | 348.99 | 497.37 | 668.94 | 862.07 |
| 0.1 | 13.569 | 56.286 | 126.90 | 224.60 | 348.31 | 496.70 | 668.28 | 861.42 |
| 0.2 | 12.806 | 55.572 | 126.20 | 223.91 | 347.63 | 496.03 | 667.61 | 860.76 |
| 0.3 | 11.994 | 54.848 | 125.49 | 223.22 | 346.94 | 495.35 | 666.95 | 860.11 |
| 0.4 | 11.143 | 54.114 | 124.78 | 222.52 | 346.25 | 494.67 | 666.28 | 859.45 |
| 0.5 | 10.178 | 53.371 | 124.07 | 221.82 | 345.56 | 494.00 | 665.62 | 858.80 |
| 0.6 | 9.1360 | 52.616 | 123.35 | 221.11 | 344.87 | 493.32 | 664.95 | 858.14 |
| 0.7 | 7.9580 | 51.850 | 122.62 | 220.41 | 344.18 | 492.64 | 664.28 | 857.48 |
| 0.8 | 6.5719 | 51.073 | 121.90 | 219.70 | 343.49 | 491.96 | 663.61 | 856.83 |
| 0.9 | 4.8007 | 50.484 | 121.17 | 218.99 | 342.79 | 491.27 | 662.92 | 856.17 |

Table 4. Effect of axial load on frequency values of the healthy state (Hz)

جدول ۵. اثر بار محوری بر مقادیر فرکانس حالت آسیب D1 (هرتز)

| $\frac{P}{P_{cr}}$ | Mode Number | | | | | | | |
|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | Natural Frequency (Hz) | | | | | | | |
| 0 | 14.230 | 56.516 | 127.07 | 225.24 | 347.53 | 493.55 | 666.25 | 861.31 |
| 0.1 | 13.504 | 55.804 | 126.37 | 224.55 | 346.84 | 492.87 | 665.56 | 860.65 |
| 0.2 | 12.738 | 55.084 | 125.66 | 223.86 | 346.15 | 492.19 | 664.92 | 860.00 |
| 0.3 | 11.921 | 54.353 | 124.95 | 223.16 | 345.46 | 491.51 | 664.25 | 859.34 |
| 0.4 | 11.045 | 53.612 | 124.24 | 222.46 | 344.77 | 490.82 | 663.58 | 858.69 |
| 0.5 | 10.092 | 52.861 | 123.52 | 221.76 | 344.08 | 490.14 | 662.91 | 858.03 |
| 0.6 | 9.0400 | 52.099 | 122.80 | 221.06 | 343.39 | 489.46 | 662.24 | 857.38 |
| 0.7 | 7.8475 | 51.326 | 122.07 | 220.36 | 342.69 | 488.77 | 661.57 | 856.72 |
| 0.8 | 6.4376 | 50.540 | 121.34 | 219.65 | 342.00 | 488.08 | 660.90 | 856.06 |
| 0.9 | 4.6149 | 49.743 | 120.61 | 218.94 | 341.30 | 487.40 | 660.23 | 855.40 |

Table 5. Effect of axial load on frequency values of the D1 damage state (Hz)

شکل ۳. نمودارهای نسبت بار به بار بحرانی مبنا- نسبت فرکانس به فرکانس مبنا ω_0 Fig. 3. Graphs of the ratio of load to basic critical load- the ratio of frequency to basic frequency ω_0

شده، آورده شده است.

$$\theta_i^{u,d} = \frac{180^\circ}{\cos^{-1} \left(\frac{\pi \phi_i^{undamaged} \cdot \phi_i^{damaged}}{|\phi_i^{undamaged}| \times |\phi_i^{damaged}|} \right)} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، $\phi_i^{undamaged}$ و $\phi_i^{damaged}$ به ترتیب شکل‌های سالم و معیوب مود i ام و $\theta_i^{u,d}$ زاویه بین شکل مودهای i ام با واحد درجه است. رابطه (۲۶) از تعریف ضرب داخلی بردارها حاصل شده است.

عیب‌یابی با استفاده از توابع موجک خانواده‌های دابچیز^۲، سیملتس^۳، کویفلتس^۴، بیورتوگونال^۵ تحت تحلیل موجک پیوسته با پارامتر مقیاس ۲ و همچنین، تحلیل موجک گسسته انجام شده است. بسیاری از توابع موجک خانواده‌های مزبور عملکرد شناسایی موفقی ارائه نمودند و حساسیت DDI در محل‌های مختلف آسیب به صورت قله‌هایی برجسته قابل مشاهده است. در ادامه، نتایج عیب‌یابی سه مود اول مربوط به تابع db8 برای حالت‌های آسیب جدول (۲) تحت نیروی محوری $0.5P_{cr}$ آورده شده است (شکل‌های (۴ تا ۹)). نیز، به بررسی تأثیر نیروی محوری، شدت آسیب، تغییر مقطع ستون و سایر شرایط تکیه‌گاهی بر DDI پرداخته شده است. در پایان، نتایج بررسی‌ها با استفاده از سایر توابع موجک (از هر خانواده سه تابع موجک به عنوان نماینده‌های آن خانواده) ارائه شده است.

در نتایج نموداری، E_u و E_d به ترتیب مدول الاستیسیته ناحیه

۱۰- شاخص شناسایی آسیب و کشف آسیب

اساساً مهم‌ترین ویژگی تبدیلات موجک که در حوزه پایش سلامت سازه‌ها، نظر بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است، قابلیت شناسایی نقاط ناپیوستگی و همچنین، تغییرات ناگهانی رخ داده در سیگنال‌ها است. بررسی‌های اولیه در این تحقیق نشان داد که ضرایب جزئیات تحلیل موجک سیگنال‌های (شکل مودهای) سالم و معیوب دارای اطلاعات مفیدی برای آشکارسازی محل‌های آسیب است؛ به شکلی که از مقایسه ضرایب جزئیات تحلیل موجک سیگنال‌های سالم و معیوب، تفاوت در محل‌های آسیب مشاهده می‌شود. بر همین اساس، در این نوشتار با معرفی یک شاخص شناسایی آسیب^۱ (DDI) به آشکارسازی محل‌های آسیب پرداخته شده است. شاخص مزبور با رابطه (۲۵) تعریف می‌شود.

$$DDI_i = |cD_i^{undamaged} - cD_i^{damaged}| \quad (25)$$

که در آن $cD_i^{undamaged}$ و $cD_i^{damaged}$ به ترتیب ضرایب جزئیات تحلیل موجک شکل‌های سالم و معیوب مود i ام است و DDI_i شاخص شناسایی آسیب مود i ام است. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان داد که زاویه بین شکل مودهای سالم و معیوب i ام همواره به صفر یا 180° درجه نزدیک است. به عنوان نمونه، در جدول (۶) زاویه بین شکل‌های سالم و معیوب سه مود اول تحت اثر نیروی محوری $0.5P_{cr}$ ، که با استفاده از رابطه (۲۶) [33] محاسبه

2 Daubechies
3 Symlets
4 Coiflets
5 Biorthogonal

1 Damage Detection Index (DDI)

سالم و مدول الاستیسیته منطقه محتمل آسیب است.

شکل ۵. نمودار DDI مدول دوم حاصل از تحلیل موجک پیوسته تابع db8

برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3

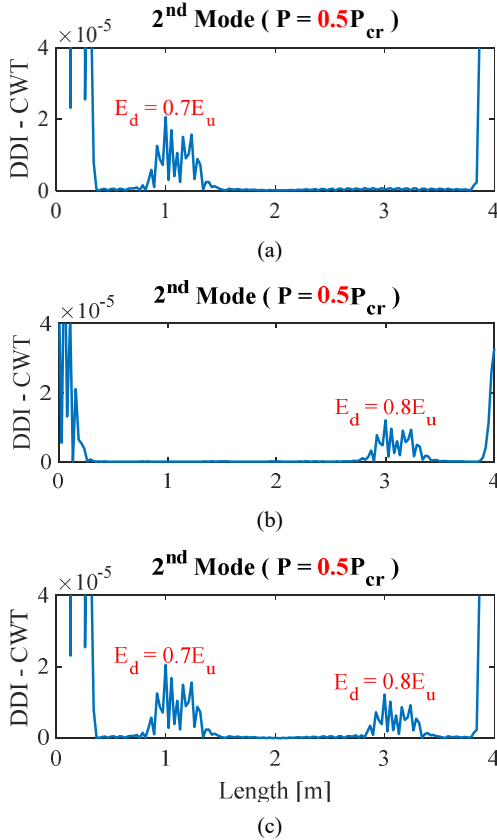
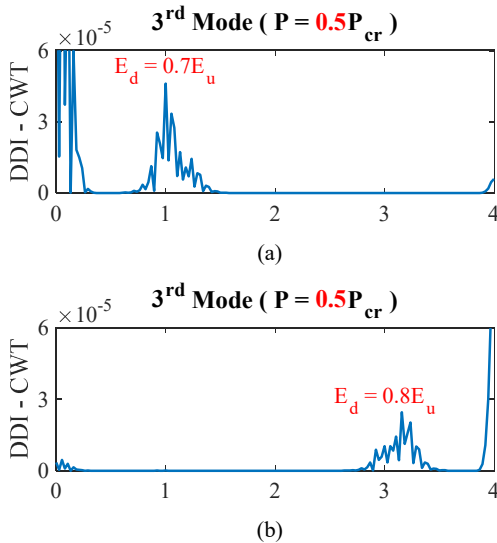


Fig. 5. DDI diagram of the 2nd mode resulting from continuous wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

شکل ۶. نمودار DDI مدول سوم حاصل از تحلیل موجک پیوسته تابع db8

برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3



جدول ۶. زاویه بین شکل‌های مدول سالم و معیوب سه مدول اول

| Mode Number | Angle between of mode shapes (Degree) | | |
|-------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| | $\theta_i^{u,d1}$ | $\theta_i^{u,d2}$ | $\theta_i^{u,d3}$ |
| 1 | 0.2144 | 0.1253 | 0.1297 |
| 2 | 179.53 | 0.2782 | 179.74 |
| 3 | 0.4916 | 0.2901 | 0.4096 |

Table 6. The angle between of undamaged and damaged mode shapes of three first modes (degree)

شکل ۴. نمودار DDI مدول اول حاصل از تحلیل موجک پیوسته تابع db8

برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3

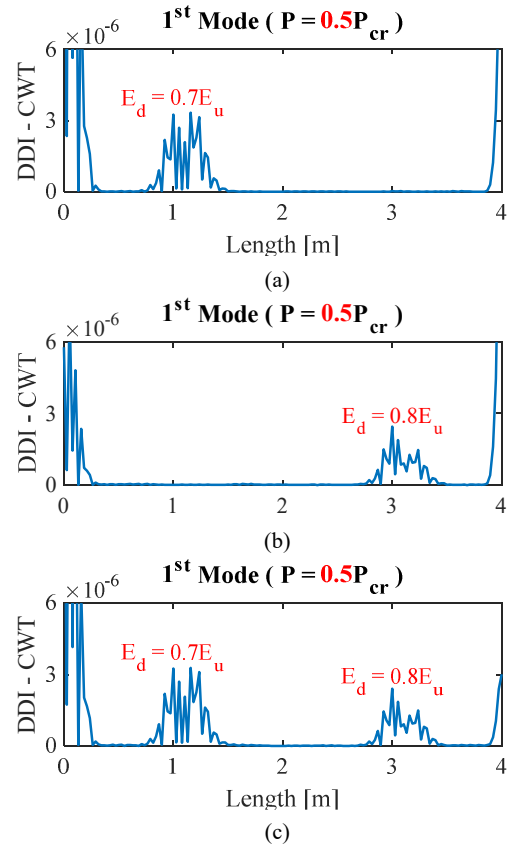


Fig. 4. DDI diagram of the 1st mode resulting from continuous wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

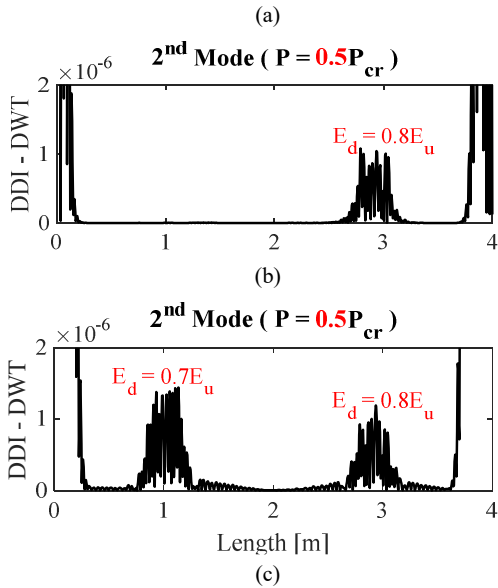


Fig. 8. DDI diagram of the 2nd mode resulting from discrete wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

شکل ۹. نمودار DDI مود سوم حاصل از تحلیل موجک گسسته تابع

db8 برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3

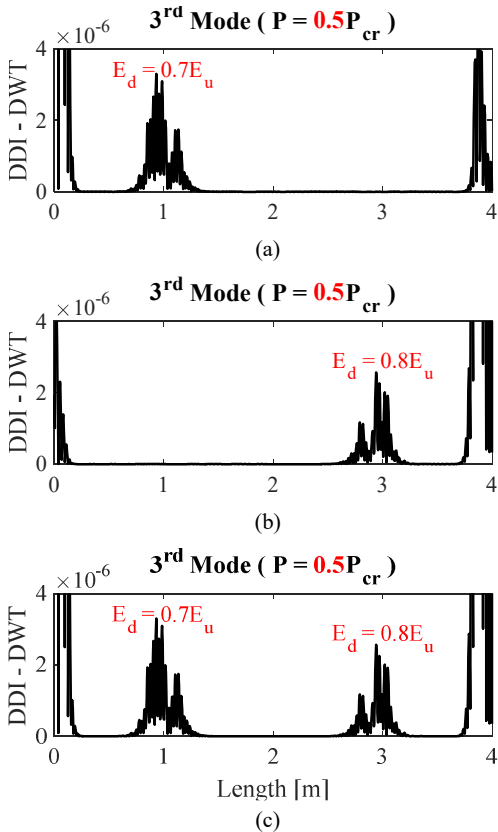


Fig. 9. DDI diagram of the 3rd mode resulting from discrete wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

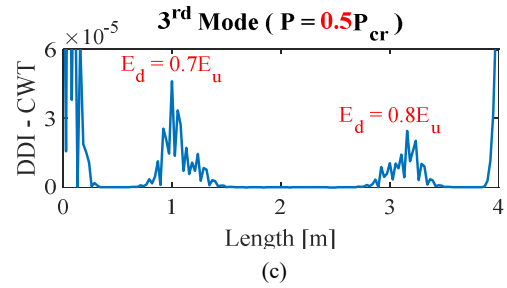


Fig. 6. DDI diagram of the 3rd mode resulting from continuous wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

شکل ۷. نمودار DDI مود اول حاصل از تحلیل موجک گسسته تابع

db8 برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3

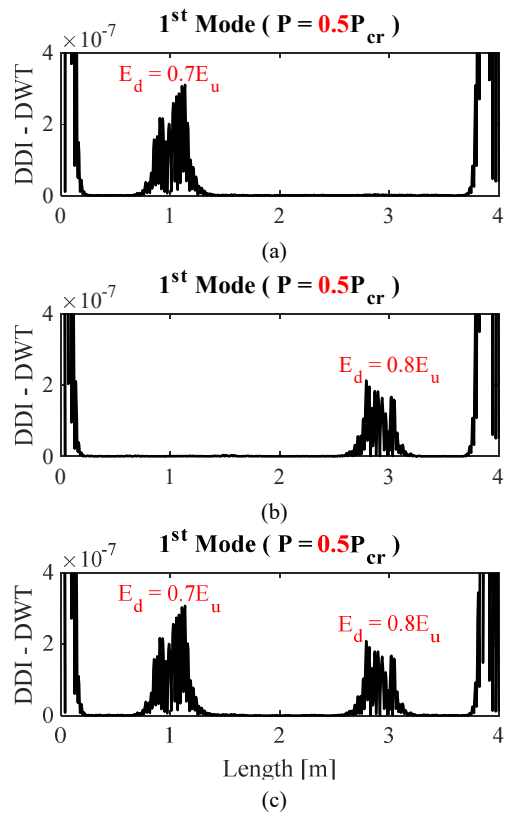
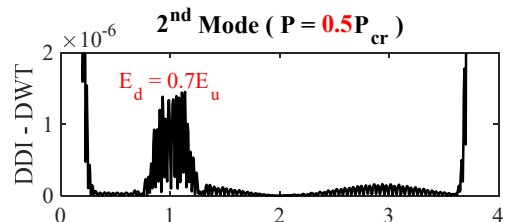


Fig. 7. DDI diagram of the 1st mode resulting from discrete wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state

شکل ۸. نمودار DDI مود دوم حاصل از تحلیل موجک گسسته تابع

db8 برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج) D3



های DDI ایجاد شده در محل آسیب مزبور در یک مختصات مکانی ثابت، مرتفع‌تر می‌شوند. به عنوان نمونه، در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نتایج عیب‌یابی مود اول حالت آسیب D3 با شدت آسیب ۲۰٪ در موقعیت آسیب ۲ و شدت‌های آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۱ تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ آورده شده است. حساسیت DDI ناحیه آسیب ۱ به تغییر شدت آسیب مشاهده می‌شود. نیز، نتایج حاکی از آن است که حساسیت DDI موقعیت آسیب ۲ با تغییر شدت آسیب موقعیت ۱ تغییر نمی‌نماید؛ به عبارتی، DDI نواحی مختلف آسیب مستقل از هم هستند.

شکل ۱۱. نمودار DDI مود اول حالت آسیب D3 با شدت آسیب ۲۰٪ در موقعیت آسیب ۲ و (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۱ حاصل از تحلیل موجک پیوسته

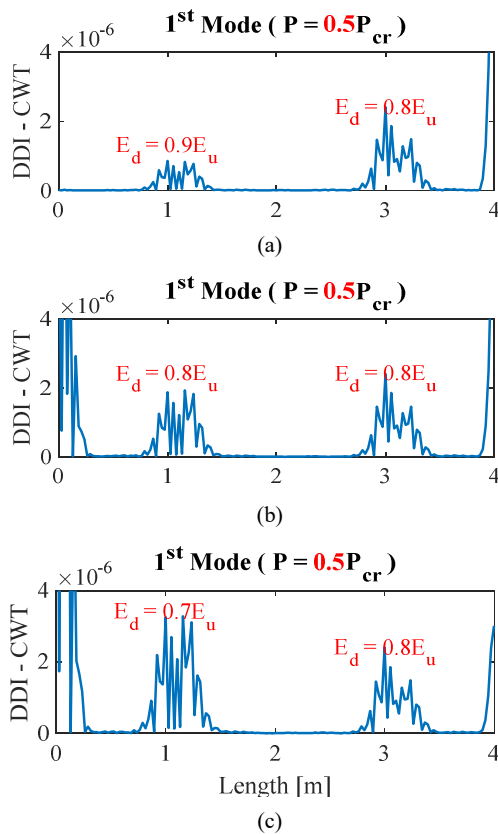


Fig. 11. DDI diagram of the 1st mode resulting from continuous wavelet analysis of D3 damage state with damage severity of 20% in the damage location 2 and (a) 10%, (b) 20% and (c) 30% in damage location 1

۱-۱۰- بررسی اثر بار محوری بر حساسیت DDI

آشکارسازی آسیب‌های D1، D2 و D3 با استفاده از DDI در سایر نسبت‌های باری انجام شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، تغییری در حساسیت DDI محل‌های آسیب ایجاد نمی‌شود و به عبارتی، تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است به شکلی که می‌توان گفت DDI محل‌های مختلف آسیب، متأثر از مقدار بار محوری اعمال شده به ستون نیست. به عنوان مثال، در شکل (۱۰) نتایج عیب‌یابی مود اول حالت آسیب D3 تحت اثر بارهای محوری $0.1P_{cr}$ و $0.9P_{cr}$ آورده شده است.

شکل ۱۰. نمودار DDI مود اول حاصل از تحلیل موجک پیوسته حالت آسیب D3 تحت اثر بار محوری (a) $0.1P_{cr}$ و (b) $0.9P_{cr}$

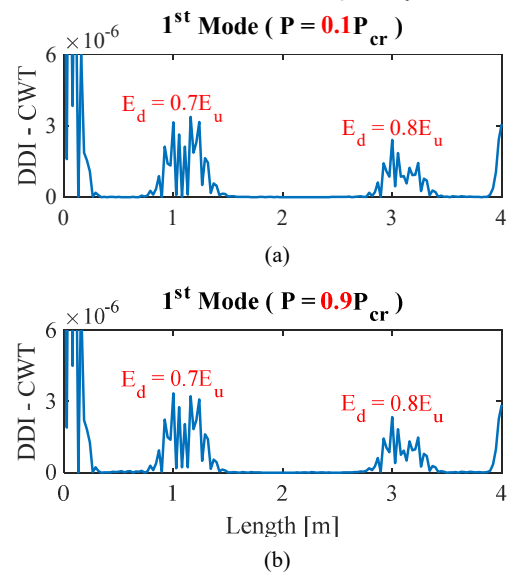


Fig. 10. DDI diagram of the 1st mode resulting from continuous wavelet analysis of D3 damage state under the effect of axial load (a) $0.1P_{cr}$, (b) $0.9P_{cr}$

۱-۲- بررسی اثر شدت آسیب بر حساسیت DDI

شناسایی آسیب برای هر یک از حالت‌های آسیب D1، D2 و D3 در مدهای اول تا سوم برای شدت‌های آسیب مختلف (به شکلی که ستون ناپایدار نشود) تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت آسیب موقعیت محتمل آسیب، برجستگی

شکل ۱۳. نمودار DDI مود اول آسیب D1 حاصل از تحلیل موجک پیوسته؛ (آ) مقطع مربعی توخالی، (ب) مقطع دایره‌ای توپر

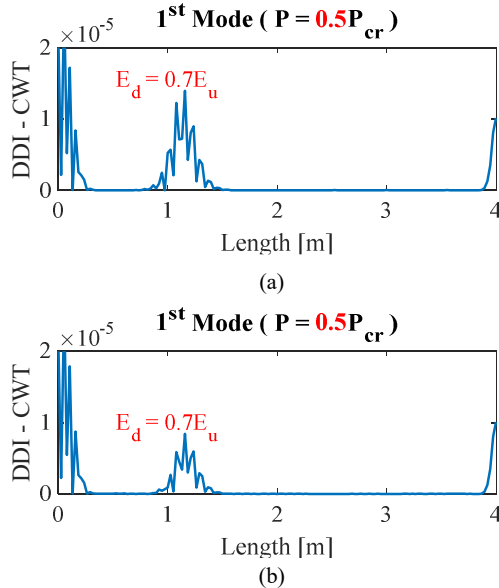


Fig. 13. DDI diagram of the 1st mode of D1 damage resulting from continuous wavelet analysis; (a) hollow square section, (b) solid circular section

شکل ۱۴. نمودار DDI مود اول حالت آسیب D1 حاصل از تحلیل موجک گسسته؛ (آ) مقطع مربعی توخالی، (ب) مقطع دایره‌ای توپر

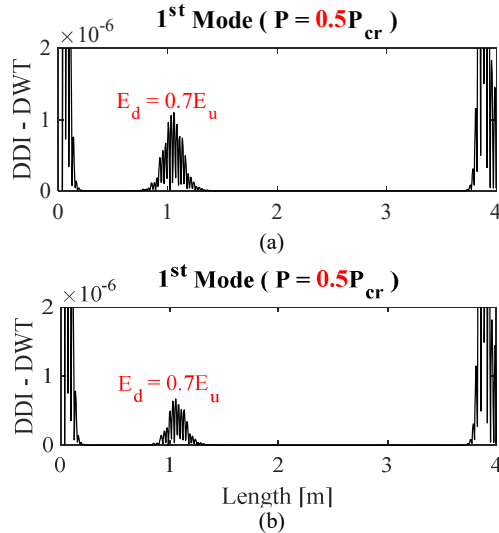


Fig. 14. DDI diagram of the 1st mode of D1 damage resulting from discrete wavelet analysis; (a) hollow square section, (b) solid circular section

۱۰-۳- بررسی اثر مقطع ستون بر حساسیت DDI

آشکارسازی موقعیت آسیب D1 در ستون تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ با مقاطع مربعی توخالی (ضخامت ۲ سانتی‌متر) و دایره‌ای توپر به ترتیب به طول ضلع ۲۵ و قطر ۲۰ سانتی‌متر با استفاده از DDI بر مبنای دو نوع پیوسته و گسسته تحلیل موجک در مود اول انجام شده است. در این حالت بار بحرانی حالت آسیب D1 برای مقاطع مزبور به ترتیب 1.92278×10^7 و 1.51044×10^8 نیوتن محاسبه شده است. نتایج عیب‌یابی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان می‌دهد که DDI شاخص عیب‌یابی توانمندی برای ستون با مقطع دلخواه است.

شکل ۱۲. نمودار DDI مود اول حالت آسیب D3 با شدت آسیب ۲۰٪ در موقعیت آسیب ۲ و (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۱ حاصل از تحلیل موجک گسسته

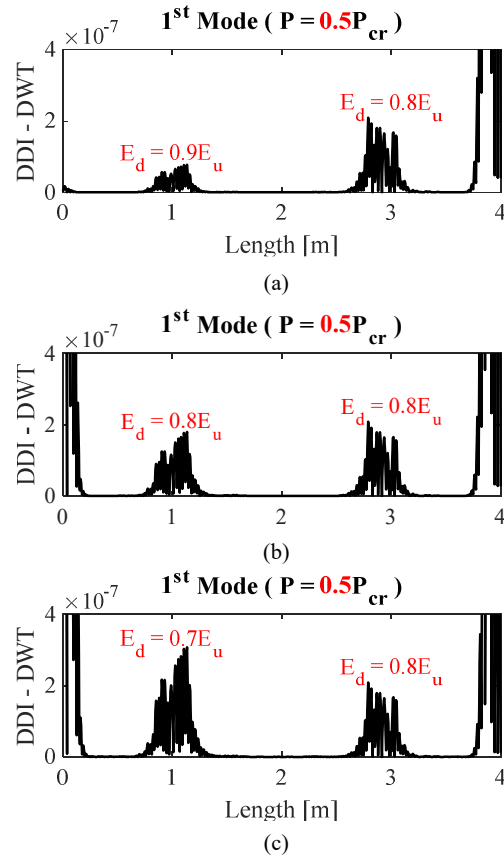


Fig. 12. DDI diagram of the 1st mode resulting from discrete wavelet analysis of D3 damage state with damage severity of 20% in the damage location 2 and (a) 10%, (b) 20% and (c) 30% in damage location 1

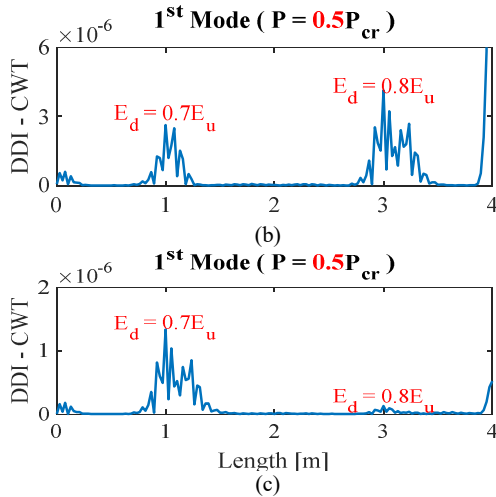


Fig. 16. DDI diagram of the 1st mode of D3 damage under the effect of axial load $0.5P_{cr}$ and support conditions (a) pinned-pinned, (b) fixed-pinned and (c) fixed-free resulting from continuous wavelet analysis

شکل ۱۷. نمودار DDI مود اول آسیب D3 تحت بار محوری $0.5P_{cr}$ و شرایط تکیه‌گاهی (آ) مفصلی - مفصلی، (ب) گیردار - مفصلی و (ج) گیردار - آزاد حاصل از تحلیل موجک گسسته

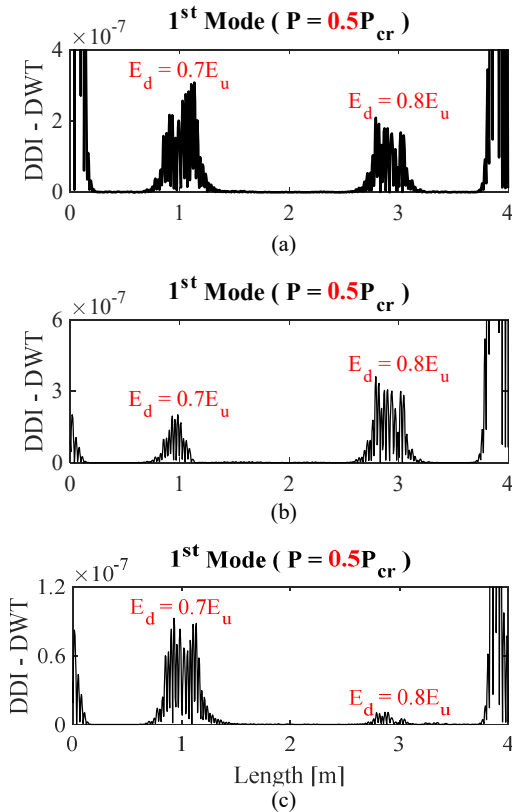


Fig. 17. DDI diagram of the 1st mode of D3 damage under the effect of axial load $0.5P_{cr}$ and support conditions (a) pinned-pinned, (b) fixed-pinned and (c) fixed-free resulting from discrete wavelet analysis

ستون با مقطع مربعی توپر به طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴ متر با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی-مفصلی، گیردار-مفصلی و گیردار-آزاد (شکل ۱۵) برای آسیب D3 محاسبه شده و در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) نتایج عیب‌یابی حاصل از تحلیل موجک پیوسته و گسسته نشان داده شده است. به دلیل تفاوت انحنایی شکل‌های مود شرایط تکیه‌گاهی، ضرایب جزئیات و شاخص‌های شناسایی متفاوتی حاصل شده است.

جدول ۷. بار کمانش بحرانی ستون با آسیب D3 و شرایط تکیه‌گاهی مختلف (نیوتن)

| Support Conditions | Critical Load (N) |
|--------------------|-------------------|
| Pinned - Pinned | 1.0131E+6 |
| Fixed - Pinned | 2.0777E+6 |
| Fixed - Free | 2.5287E+5 |

Table 7. The critical axial load of the column with D3 damage and different support conditions (N)

شکل ۱۵. شکل مود اول ستون تحت اثر بار محوری و شرایط تکیه‌گاهی (آ) مفصلی - مفصلی، (ب) گیردار - مفصلی، (ج) گیردار - آزاد

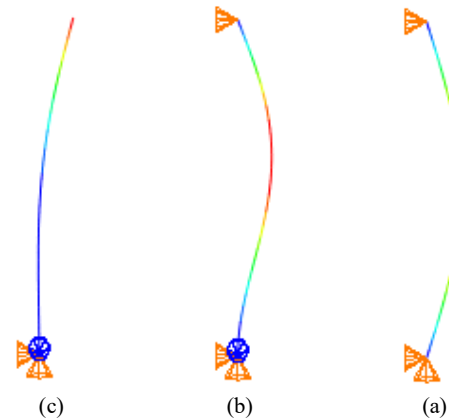
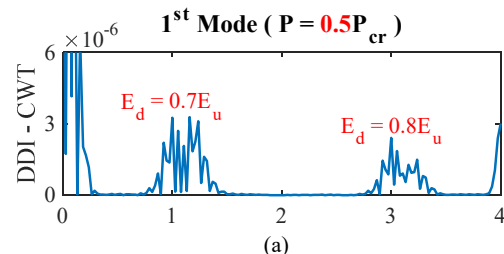


Fig. 15. The 1st mode shape of the column with support conditions (a) pinned-pinned, (b) fixed-pinned and (c) fixed-free

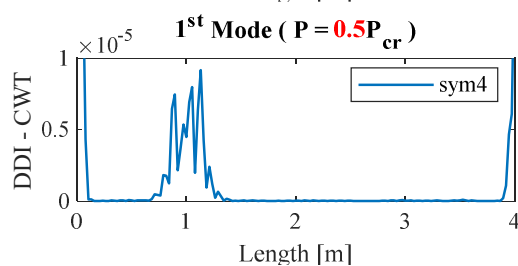
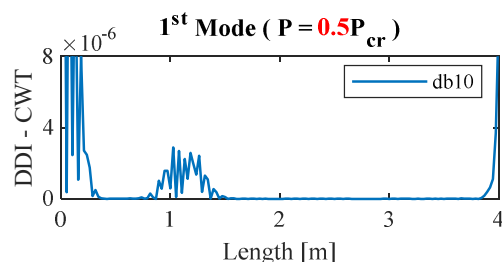
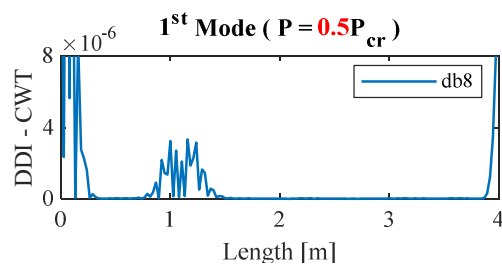
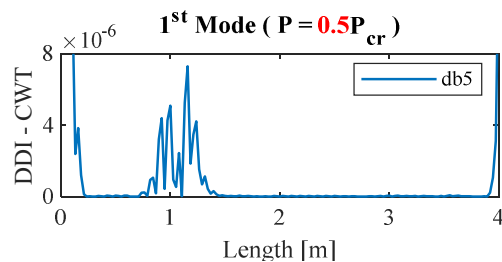
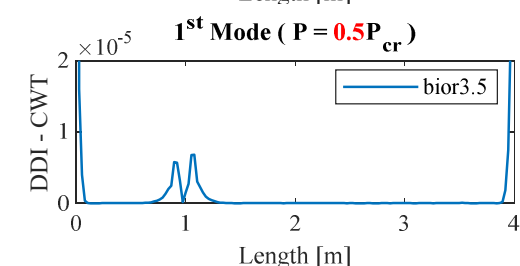
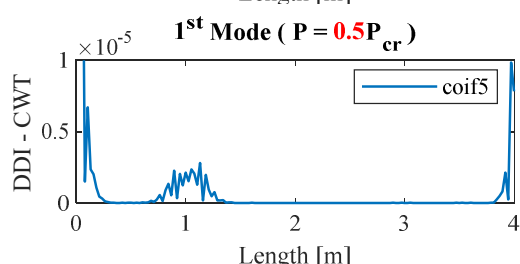
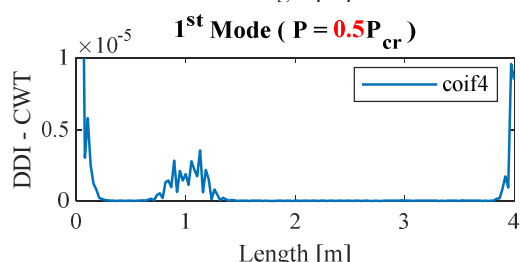
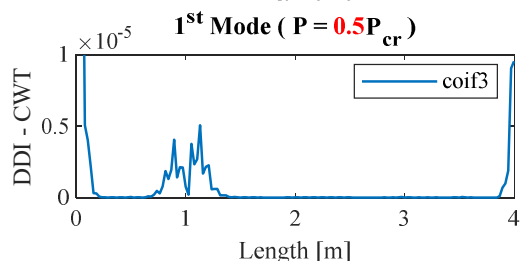
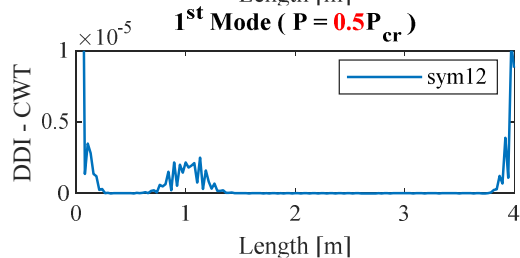
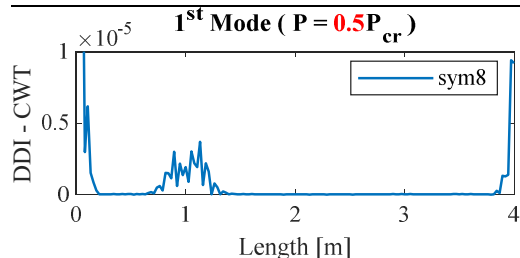
شکل ۱۶. نمودار DDI مود اول ستون با آسیب D3 تحت بار محوری $0.5P_{cr}$ و شرایط تکیه‌گاهی (آ) مفصلی - مفصلی، (ب) گیردار - مفصلی و (ج) گیردار - آزاد حاصل از تحلیل موجک پیوسته



۱۰-۵- شناسایی آسیب با دیگر توابع موجک

شناسایی آسیب بر پایه DDI با بسیاری از توابع موجک خانواده‌های دابچیز (Db)، سیملت (Sym)، کویفلت (Coif)، بیور (Bior) و آریو (Rbio) برای حالت آسیب D1 انجام شده و نتایج عیب‌یابی در شکل (۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که موقعیت آسیب همچنان با موفقیت شناسایی شده است و این نشان دهنده مناسب بودن تعریف شاخص شناسایی آسیب است.

شکل ۱۸. نمودار DDI مود اول حالت آسیب D1 تحت بار محوری $0.5P_{cr}$ و شرایط تکیه‌گاهی مفصلی - مفصلی با سایر توابع موجک حاصل از تحلیل موجک پیوسته



های مناسب ممکن است خسارت‌های جبران ناپذیر اجتماعی و اقتصادی بسیاری به وجود آید؛ بنابراین، پایش سلامت سازه‌ها ضرورتی انکار ناپذیر است. مطالعات انجام شده در این مقاله نشان داد که کمتر به آثار بار محوری بر پاسخ‌های دینامیکی مودال و مسئله شناسایی آسیب در عضو سازه‌ای ستون تحت اثر بار محوری پرداخته شده است و با توجه به اینکه المان ستون همواره تحت اثر بار محوری واقع است و در اثر تشدید آسیب‌های محلی ممکن است دچار کمزش و در نتیجه، ناپایداری شود؛ بنابراین، سلامت عضو سازه‌ای ستون تحت اثر بار محوری مورد توجه واقع شد. نتایج بررسی‌های اولیه این مطالعه نشان داد:

۱- فرکانس طبیعی تمامی مودها در هر دو وضعیت سالم و آسیب‌دیده با افزایش بار محوری به صورت نسبت‌هایی از بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) کاهش می‌یابند. ۲- در بارگذاری‌های یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب‌دیده بیشتر است؛ و با افزایش شدت آسیب، اختلاف فرکانسی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده افزایش می‌یابد.

در گام بعدی، شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با معرفی یک شاخص شناسایی آسیب (DDI) بر مبنای ضرایب موجک حاصل از جزئیات تحلیل موجک شکل‌های مود وضعیت‌های سالم و آسیب انجام شد.

۳- مهم‌ترین نتیجه این بررسی‌ها، آشکارسازی موقعیت‌های آسیب است؛ به طوری که موقعیت‌های آسیب با دقت بالایی به صورت پرش و یا اغتشاش در نمودار DDI شناسایی شد.

همچنین، نتایج نشان داد:

۴- DDI موقعیت‌های مختلف آسیب مستقل از هم بوده و تنها متأثر از شدت آسیب همان موقعیت آسیب است و آثار بار محوری بر DDI بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

۵- DDI پیشنهادی، قابلیت شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با هر مقطع و شرایط تکیه‌گاهی مختلف را دارد.

مستقل بودن DDI موقعیت‌های مختلف آسیب، کارآمدی

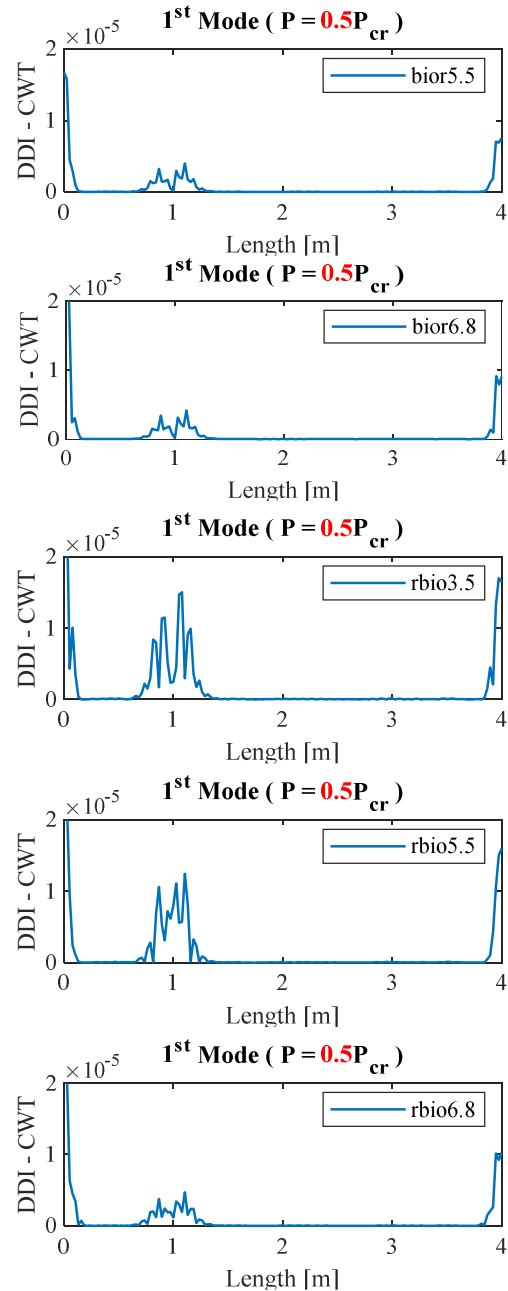


Fig. 18. DDI diagram of the 1st mode of D1 damage under the effect of axial load $0.5P_{cr}$ with other wavelet functions

۱۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سلامت سازه‌ها، تأمین ایمنی و احساس امنیت یک نیاز همیشگی و یکی از چالش‌های مهندسی و مدیران در حوزه مدیریت بحران است. فرسودگی و وقوع آسیب‌های محلی در سازه‌ها همواره یک مشکل اساسی است و در صورت عدم شناسایی به موقع موقعیت‌های آسیب و اتخاذ تصمیم‌گیری

- روش پیشنهادی در شناسایی موقعیت‌های آسیب را نشان می‌دهد؛ زیرا در غیر این صورت، عدم شناسایی یک موقعیت آسیب ممکن است بر شناسایی سایر موقعیت‌های آسیب تاثیرگذار باشد. با توجه به نتایج، شاخص پیشنهادی به عنوان یک شاخص شناسایی موفق و کارآمد در آشکارسازی موقعیت‌های مختلف دارای آسیب معرفی می‌شود.
- ### مراجع
- [10] Bagheri, A., Kourehli, S., 2013 Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis, *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**, 289-304.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Li, J., and Hao, H., 2014 Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction, *Structural Health Monitoring*, 1-17.
- [14] Katunin, A., 2015 Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**, 251-261.
- [15] Patel, S., Chourasia, A., Panigrahi, S., Parashar, J., Parvez, N., Kumar, M., 2016 Damage identification of RC structures using wavelet transformation, *Procedia Engineering*, **144**, 336-342.
- [16] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., Esfandiari, A., 2019 Structural health monitoring of a concrete-filled tube column, *Magazine of Civil Engineering*, **85**, 136-145.
- [17] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 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.
- [18] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M., 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.
- [19] Wang, S., Li, J., Luo, H., Zhu, H., 2019 Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector, *Journal of Engineering Structures*, **178**, 506-520.
- [20] Hoseini Vaez, S., Arefzade, T., 2019
- [1] Majumdar, A., Maiti, D.K., Maity, D., 2012 Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization, *Applied Mathematics and Computation*, **218**(19), 9759-9772.
- [2] Rytter, A., 1993 Vibrational based inspection of civil engineering structures, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- [3] Newland, D., 1994 Wavelet analysis of vibration. Part 1: Theory, *Journal of Vibration and Acoustic*, **116**, 409-416.
- [4] Newland, D., 1994 Wavelet analysis of vibration. Part 2: Wavelet Maps, *Journal of Vibration and Acoustic*, **116**, 417-424.
- [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] Hou, Z., Noori, M., Amand, R., 2000 Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **126**, 677-683.
- [7] Ovanesova, A.V., Suarez, L.E., 2004 Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*, **26**, 39-49.
- [8] Katunin, A., 2010 Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform, *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, **2**(162).
- [9] Ghodrati Amiri, G.R., 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-Ghafoori (Ed).

- [30] Hanteh M, Rezaifar O, Gholhaki M., 2021 Damage detection in precast full panel building based on experimental results and continuous wavelet analysis analytical method, *Modares Civil Engineering journal*, **21**(1), 13-29.
- [31] Mallat, S., 2008 A wavelet tour of signal processing: the sparse way, Academic Press.
- [32] Gao, R.X., and Yan, R., 2010 Wavelets: Theory and applications for manufacturing, *Springer Science & Business Media*.
- [33] Mamazizi, A., Khanahmadi, M., 2023 Damage identification in steel plates using a detection algorithm based on 1D continuous wavelet transform and 2D vibration mode shapes, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **39**(1), 59-69.
- 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., 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] Rezaifar, O., Gholhaki, M., Khanahmadi, M., Younesi, A., Dezhkam, B., 2023 Damage detection and localization in steel plates using modal dynamic data and two-dimensional wavelet analysis, *Modares Civil Engineering Journal*, **23**(1), 135-152.
- [23] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., 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.
- [24] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., 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.
- [25] Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M., Dezhkam, B., Miri, M., 2021 Wavelet-based damage detection of steel beam-structures, *Journal of Structure & Steel*, **15**(33), 15-27.
- [26] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., 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.
- [27] Hanteh, M., Rezaifar, O., 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., 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, Gholhaki M., 2021 Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast full panel building based on experimental results and wavelet analysis, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 1-24.

Health Monitoring and Damage Assessment of a Column under the Effect of Axial Load Using Modal Dynamic Data and Wavelet Analytical Method

Mohtasham Khanahmadi¹, Omid Rezaifar², Majid Gholhaki³, Behzad Dezhkam⁴, Adel Younesi⁵

- 1- M.Sc. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
- 2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
- 3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
- 4- M.Sc. of Structural Eng., Department of Civil Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran
- 5- Ph.D. of Structural Eng., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

The health of structures, provision of safety, and the sense of security are among constant requirements and perpetual challenges of engineering and managers in the field of crisis management. Erosion and occurrence of minor local damage to structures and structural members in the early stages of construction or during operation, especially in critical structures such as power plants, tall buildings, stairs, dams, airports, and hospitals, among others, have always been among major problems. In case the damage sites are not identified timely and decisions are not made appropriately, substantial irreparable damage is expectable. Structures are always affected by various natural or unnatural factors such as earthquakes, explosions, and unprincipled excavations, which can aggravate the local damage in them and lead to their destruction, hence substantial human and financial losses. Therefore, it is highly crucial to monitor the health of structures and structural members. Therefore, health monitoring in structures and structural members is highly important. The column is one of the most significant members of engineering structures, especially in building structures and bridges, so that the instability of one of these members can lead to instability and destruction of the structure. Hence, design engineers expect columns to be the last members of structures to be damaged. In this paper, the health monitoring of the column as a structural member was performed by considering the effect of axial load on modal dynamic responses (i.e., natural frequencies and mode shapes). The results showed that the natural frequencies of all modes in both healthy and damaged states decreased with increasing axial load in proportions of the base critical load (the worst-case limit load). Also, at the same loads, the frequency of the healthy sample was always higher than that of the damaged sample so that the frequency difference between healthy and damaged states increased with greater severity of the damage. By introducing a Damage Detection Index (DDI) based on the wavelet coefficients obtained from the details of wavelet analyses of damaged and undamaged modes, the damage sites could be identified with a simple check and high accuracy by observing vibrations in DDI. Also, studies have shown that the DDIs of different damaged sites are independent of each other and are only affected by the severity of the damage and that the effects of axial load on DDI are very small and negligible. The independence of the DDIs of different damaged sites indicates the effectiveness of the proposed method in identifying damaged sites. Otherwise, failure to identify one damaged site may affect the identification of other damaged sites. The damage detection capability using the proposed DDI was investigated in columns with different support sections and conditions, and successful troubleshooting results were obtained. Moreover, investigations were performed with other wavelet functions, and the damage site was successfully identified. The proposed damage detection indicator is an efficient index in the column structures under the effect of axial load with axial buckling-prone support conditions and is proposed as a reliable method in identifying column damage sites in practical health monitoring of structures.

Keywords: Structural Health Monitoring, Axial Load, Modal Dynamic Response, Wavelet Analysis, Column Damage Detection.