

عیب‌یابی در المان ستون تحت اثر نیروی محوری مبتنی بر تبدیل موجک و داده‌های مودال

محتشم خان احمدی^۱، مجید قلهکی^{۲*} و امید رضایی فر^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷	با گذشت زمان، سازه‌ها در برخی المان‌ها دچار خسارت‌های موضعی هرچند ناچیز می‌شوند که با تجمیع و گسترش تحت اثر عواملی چون زلزله و گودبرداری غیراصولی ممکن است دچار تخریب کلی گردند و هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی زیادی تحمیل نمایند. عضو ستون به عنوان حیاتی‌ترین عضو سازه‌های ساختمانی و پل‌ها محسوب می‌شود، به طوری که طراحان انتظار دارند آخرین عضو آسیب‌دیده سازه‌ها از ستون‌ها باشد. در این مقاله به مسئله شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از داده‌های مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) و آنالیز تبدیل موجک پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش بار محوری به صورت نسبت‌هایی از بار کمانش بحرانی، مقدار فرکانس در تمامی مودها در حالت‌های سالم و معیوب کاهش می‌یابد. همچنین، تحت اثر بار محوری یکسان، فرکانس نمونه معیوب کمتر از فرکانس نمونه سالم است و با افزایش شدت خرابی، میزان کاهش فرکانس افزایش می‌یابد. بر مبنای زاویه بین شکل‌های مود سالم و معیوب، سیگنال ورودی تبدیل موجک تعریف گردید. جزئیات سیگنال خروجی در محل‌های آسیب اغتشاشات را نشان داد به نحوی که در تمامی مودهای بررسی شده در نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، محل‌های آسیب با دقت بالایی شناسایی شدند. همچنین، نتایج نشان داد اغتشاشات در محل‌های مختلف خرابی مستقل از هم بوده و تنها متأثر از شدت خرابی محل است و بار محوری تأثیری بر حساسیت عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک ندارد. نیز، مجموع ضرایب موجک محل‌های آسیب‌دیده چند حالت خرابی با ضرایب موجک محل‌های آسیب‌دیده مجموع حالت‌های خرابی برابر است.
واژگان کلیدی: تحلیل فرکانسی، داده‌های مودال، بار کمانش بحرانی، بار محوری، تبدیل موجک، شناسایی آسیب.	

۱- مقدمه

با استفاده از بازرسی‌های چشمی، بازرسی آلتروسونیک، بازرسی به روش مایع نفوذی، بازرسی رادیوگرافی و ... صورت می‌گرفت. دقت پایین و محدودیت‌های موجود در این روش‌ها باعث شد تا روش‌های مبتنی بر آنالیز پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی شکل گیرند. در روش‌های استاتیکی از پاسخ‌های استاتیکی نظیر تغییر مکان‌ها، شیب‌ها و کرنش‌ها و در روش‌های دینامیکی از پاسخ‌های دینامیکی نظیر شکل‌های مود، فرکانس‌های

همواره سازه‌ها با گذشت زمان در برخی از المان‌ها دچار آسیب‌های جزئی می‌شوند که ممکن است با گسترش این آسیب‌ها در اثر عواملی چون زلزله، انفجار، گودبرداری‌های غیراصولی و ... دچار تخریب کلی شوند و هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی زیادی تحمیل نمایند؛ لذا مراقب از سلامت سازه‌ها در دوره سرویس‌دهی ضروری و دارای اهمیت است. این مسئله از دیر باز مورد توجه بوده است و

^۱ * پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mgholhaki@semnan.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مطالعه پایش سلامت سازه‌ها به روش‌های تحلیل موجک شد [۲ و ۳].

سون و همکاران در سال ۱۹۹۵ 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 [۴].

هو و همکاران در سال ۲۰۰۰ با استفاده از آنالیز موجک داده‌های حاصل از زلزله سن فرناندو موفق شدند لحظه‌ای را که آسیب رخ می‌دهد شناسایی نمایند [۵].

اوانسوآ و سوراژ در سال ۲۰۰۴ تبدیل موجک را جهت شناسایی محل ترک در تیرها و قاب‌ها تحت شرایط متفاوت بارگذاری بکار گرفتند. آن‌ها از طریق سعی و خطا از بین موجک‌های موجود، موجک بیورتوگنال را به عنوان بهترین موجک موفق در شناسایی انتخاب کردند [۶].

باجابا و آلفنای در سال ۲۰۰۵ از داده‌های مودال و تبدیل موجک پیوسته در شناسایی آسیب یک تیر طره استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ضرایب تبدیل موجک مقادیر بالایی را در محل آسیب در مقایسه با مکان‌های دیگر نشان می‌دهند [۷].

کاتونین در سال ۲۰۱۰ با استفاده از آنالیز موجک گسسته پاسخ‌های مودال تیر ساخته شده از ورق پلیمری به شناسایی ترک‌های چندگانه پرداخت. نتایج نشان داد که ضرایب جزئیات دارای اطلاعات سودمندی جهت شناسایی محل ترک است [۸]. در همان سال، قدرتی و همکاران با به‌کارگیری تبدیل موجک گسسته و شکل‌های مود سالم و آسیب‌دیده صفحات به تشخیص محل آسیب پرداختند. آن‌ها از نسبت ضرایب موجک حالت آسیب به ضرایب موجک حالت سالم استفاده نمودند و موفق شدند محل آسیب را شناسایی نمایند [۹].

باقری و کورهللی در سال ۲۰۱۳ به شناسایی خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله با استفاده از تبدیل موجک گسسته پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از پاسخ‌های سرعت و تغییر مکان استفاده نمودند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک، زمان وقوع خرابی بود [۱۰].

عزالدین و همکاران در سال ۱۳۹۳ با استفاده از تبدیل موجک گسسته به تجزیه و تحلیل پاسخ تغییر شکل قائم تیر تحت بار استاتیکی ثابت در حالت‌های مختلف خرابی

طبیعی و میرایی مودال استفاده می‌گردد. در روش‌های استاتیکی تنها یک مود مورد بررسی قرار می‌گیرد، این در حالی است که در روش‌های دینامیکی می‌توان با بررسی تعداد مود بیشتری به موضوع تشخیص خرابی پرداخت؛ از این‌رو روش‌های دینامیکی تشخیص خسارت به روش استاتیکی ترجیح داده می‌شود.

در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران متوجه حوزه پایش سلامت سازه‌ها^۱ (SHM) است. پایش سلامت سازه‌ها در چهار سطح انجام می‌شود که عبارت‌اند از [۱]:

سطح ۱- آیا در سازه آسیب وجود دارد؟

سطح ۲- در صورت وجود آسیب، محل آن کجاست؟

سطح ۳- شدت خرابی در محل آسیب چقدر است؟

سطح ۴- عمر باقی‌مانده سازه آسیب‌دیده با شدت‌های خرابی معلوم چقدر است؟

در مباحث مربوط به مهندسی عمران، مطالعات سطح اول تا سوم به دلیل وابستگی به پاسخ‌های سازه و مربوط بودن به مباحث سرویس‌دهی دارای اهمیت است. مطالعه سطح چهارم کامل‌ترین مرحله پایش سلامت سازه می‌باشد و به حوزه‌های ارزیابی طراحی سازه یا آنالیز فرسودگی ارتباط دارد. (در این مقاله، بررسی‌ها تا سطح ۲ انجام شده است). امروزه نظارت بر سلامت سازه‌ها بر اساس ارتعاش به موضوعی مورد علاقه برای مطالعه جامع روش‌ها و کاربردها تبدیل شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال را نام برد.

با در نظر پاسخ‌های ارتعاشی سازه به عنوان سیگنال‌های ورودی می‌توان به مسئله شناسایی خرابی پرداخت. در این راستا، تبدیلات ریاضی از جمله تبدیل فوریه^۲، تبدیل هیلبرت^۳ و تبدیل موجک^۴ به عنوان ابزارهای توانمند پردازشی سیگنال‌ها در دسترس است. نیز، الگوریتم‌های فرا ابتکاری در ارتباط با تحلیل پاسخ‌های سازه مورد توجه می‌باشد.

در حیطه مهندسی عمران، نیولند اولین کسی بود که در سال ۱۹۹۴ با استفاده از مفاهیم تبدیل موجک به تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی پرداخت؛ اگرچه او به طور مشخص از تبدیل موجک جهت شناسایی خرابی‌های سازه استفاده نمود، اما معرفی این روش در حل مسائل مهندسی، سرآغاز

³ Hilbert Transform (HT)

⁴ Wavelet Transform (WT)

¹ Structural Health Monitoring (SHM)

² Fourier Transform (FT)

ضرایب موجک و تغییر در خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد [۱۶].

گله‌بان و مرادی در سال ۱۳۹۷ با به‌کارگیری تبدیل هیلبرت- هوانگ به تشخیص ترک در تیرها پرداختند. فرکانس‌های طبیعی تجربی سیگنال‌های ارتعاشی تیر ترک‌دار توسط تبدیل فوریه سریع و تبدیل هیلبرت- هوانگ محاسبه شد. سپس، با کمینه نمودن یک تابع هدف معرفی شده توسط الگوریتم کلونی زبور عسل، محل و عمق ترک‌ها تعیین گردید [۱۷].

احمد نژاد و طریقت در سال ۱۳۹۷ به شناسایی خرابی در سازه‌های صفحه‌ای شکل مانند عرشه پل‌ها و دیوارها پرداختند. آن‌ها با استفاده از آنالیز انرژی موجک پیوسته، دو شاخص خرابی معرفی نمودند و موفق شدند با تعداد محدودی شتاب‌سنج، محدوده خرابی را شناسایی نمایند [۱۸]. در همان سال، رضایی فر و همکاران به شناسایی آسیب جداولی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق آسیب جداولی را توسط یک لایه پلی استایرن نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه‌سازی نمودند و موفق شدند با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، محل جداولی بین هسته بتنی و جداره فولادی را شناسایی نمایند [۱۹]. همچنین، آن‌ها در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۹ موفق شدند با استفاده از آنالیز تبدیل موجک داده‌های شکل مود، محدوده تقریبی آسیب در ستون‌های فولادی پر شده با بتن را شناسایی نمایند [۲۰].

پایسته و همکاران در سال ۱۳۹۸ با استفاده از تبدیل موجک گسسته و داده‌های مودال بازسازی شده به شناسایی آسیب در صفحات پرداختند. نتایج نشان داد که ضرایب موجک داده‌های مودال بازسازی شده در مقایسه با ضرایب موجک داده‌های مودال اصلی، آسیب‌های ریز را با وضوح بالایی نمایش می‌دهد [۲۱].

حسینی واعظ و عارف‌زاده در سال ۱۳۹۸ با استفاده از آنالیز 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. مشاهده گردید که در فرایند شناسایی آسیب با استفاده از

پرداختند و موفق شدند محل ترک را شناسایی و عمق آن را محاسبه نمایند [۱۱].

تبریزیان و همکاران در سال ۱۳۹۴ با استفاده از اطلاعات خیز استاتیکی و الگوریتم ژنتیک به شناسایی خرابی در سازه‌های فولادی پل قوسی و پل خرابایی پرداختند و حالت‌های مختلف خرابی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک با تابع هدف ارائه شده می‌تواند با دقت قابل قبولی حتی در حضور نوفه‌های تصادفی، مکان و مقدار خرابی‌های احتمالی را شناسایی نماید [۱۲].

رحامی و همکاران در سال ۱۳۹۵ با استفاده از مفاهیم آنالیز انرژی در تبدیل بسته موجک به شناسایی خرابی در سکوها ثابت دریایی پرداختند. آن‌ها پاسخ‌های شتاب ثبت شده را توسط تبدیل بسته موجک در ترازهای مختلف تجزیه کردند و مؤلفه‌های حساس به خسارت را با بهره‌گیری از مفاهیم آنالیز انرژی و انجام تحلیل حساسیت انتخاب نمودند. نتایج نشان داد که مؤلفه‌های حساس به خسارت حتی در آسیب‌های با شدت کم از کارایی مطلوبی برخوردار بوده و میزان تغییرات این مؤلفه‌ها به طور محسوسی به شدت خسارت‌های وارده به سکو بستگی دارد [۱۳].

کاتونین در سال ۲۰۱۵ با استفاده از موجک‌های ناپایدار گوینکس^۱ تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مدهای صفحات کامپوزیتی معیوب پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد [۱۴].

نادرپور و فخاریان در سال ۲۰۱۶ به شناسایی پارامترهای مودال سازه با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای پرداختند. در روش پیشنهادی، پاسخ ارتعاش آزاد سازه با استفاده از تبدیل بسته موجک تجزیه گردید. آن‌ها، سیگنال تجزیه شده‌ای را که دارای انرژی یکسان با سیگنال اصلی است برای شناسایی پارامترهای مودال استفاده کردند. سپس، عملکرد روش پیشنهادی را در شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از نتایج نمونه آزمایشگاهی مبنای تأیید نمودند [۱۵].

پاتل و همکاران در سال ۲۰۱۶ به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتنی ۶ طبقه پرداختند. آن‌ها با استفاده از تحلیل موجک پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده تراز هر طبقه برای جرم‌های مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین

^۱ quincunx

۲- تبدیل موجک

در تاریخچه ریاضیات، منابع متعددی در زمینه تبدیل موجک مشاهده می‌شود. بخش عمده‌ای از فعالیت‌ها در سال ۱۹۳۰ انجام شده است. پیش از سال ۱۹۳۰، شاخه اصلی ریاضیات که منجر به تئوری تبدیل موجک گردید با کارهای ریاضیدان فرانسوی به نام ژوزف فوریه در سال ۱۸۰۷ و تئوری آنالیز فرکانسی وی آغاز شد. ژوزف بیان نمود که هر تابع ایستا را می‌توان به صورت یک مجموع نامتناهی از امواج سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف نشان داد. وی با تبدیلی که بعدها به افتخارش تبدیل فوریه نامیده شد، اطلاعات حوزه زمان را به حوزه فرکانس برده و فرکانس‌های سازنده سیگنال را آشکار نمود. ادعای فوریه نقش اساسی در تحول ایده‌های ریاضی پیرامون توابع ایجاد نمود و در حقیقت دریچه‌ای به یک جهان عملکردی گشود. به تدریج، این ایده برای توابع غیر ایستا که توزیع آماری آن‌ها با زمان تغییر می‌کند، بسط داده شد. با گذشت زمان دانشمندان دریافتند که با شکستن سیگنال به اجزای جداگانه که امواج سینوسی خالص نیستند، می‌توان اطلاعات را در هر دو حوزه زمان و فرکانس متمرکز نمود. این موضوع ایده بنیادینی است که به تدریج به عنوان تبدیل موجک شناخته شد [۲۷].

تبدیل موجک یک تبدیل ریاضی است که چنانچه بر یک سیگنال دلخواه $x(t)$ اعمال گردد، نقاط گسستگی و یا محل تغییر شیب‌های ناگهانی سیگنال، هر چند کوچک و نا مشهود باشد، به نحو چشمگیری برجسته می‌نماید؛ به صورتی که با یک واریسی ساده می‌توان محل‌های ناپیوستگی را شناسایی نمود. تبدیلات موجک به دو صورت تبدیل موجک پیوسته^۱ و تبدیل موجک گسسته^۲ تعریف شده‌اند که در این مقاله از نوع پیوسته تبدیل موجک استفاده شده است و برای یک سیگنال $x(t)$ در بازه زمانی $-\infty$ تا ∞ با رابطه (۱) تعریف می‌گردد [۲۸].

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

که در آن

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

داده‌های استاتیکی، عواملی همچون نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری در میزان ضرایب موجک تأثیرگذار است [۲۲].

وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ جهت شناسایی خرابی سازه تونلی یک شاخص خرابی 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 نمودند. نتایج نشان داد که شاخص خرابی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک شاخص مؤثر و کارآمد شناسایی خرابی مورد استفاده واقع گردد [۲۳].

خان احمدی و همکاران در سال ۱۳۹۸ با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی و شکل‌های مود صفحه فولادی به مقایسه ضرایب موجک حالت‌های سالم و معیوب هشت شکل مود اول پرداختند و نشان دادند که اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف خرابی چشم‌گیر است و در تمامی مودهای بررسی شده می‌توان محل‌های خرابی را با دقت بالایی شناسایی نمود. همچنین، آن‌ها نشان دادند که از تحلیل موجک شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل موجک شکل‌های مودهای بالاتر، موقعیت‌های خرابی با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب موجک شناسایی می‌گردد [۲۴].

آن‌ها در تحقیق دیگری در همان سال به شناسایی خرابی در صفحات پیش‌ساخته پانلی پرداختند و موفق شدند با تحلیل موجک تفاضل یا مجموع شکل‌های مودی سالم و معیوب، محل‌های خرابی را با دقت بالایی شناسایی نمایند [۲۵]. آن‌ها در تحقیق دیگری در سال ۱۳۹۹ به مطالعه مقایسه‌ای آشکارسازی خرابی در تیرهای فولادی با استفاده از تبدیلات موجک پیوسته و گسسته پرداختند و نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک می‌توان از تحلیل پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی، موقعیت خرابی را با دقت بالایی شناسایی نمود [۲۶].

با توجه به مطالعات انجام شده تا به این مرحله از تحقیق به اثرات بار محوری بر داده‌های مودال و عیب‌یابی در عضو ستون تحت اثر بار محوری مبتنی بر تبدیل موجک کمتر پرداخته شده است. در ادامه مبانی ریاضی تبدیل موجک ارائه گردیده است.

² Discrete Wavelet Transform (DWT)

¹ Continuous Wavelet Transform (CWT)

شرایط مرزی موجود عبارت است از $y(0) = y(L) = 0$. معادله دیفرانسیل بالا، معادله‌ای خطی از مرتبه دوم با ضرایب ثابت است و ریشه‌های معادله مشخصه آن مختلط مزدوج می‌باشند؛ بنابراین پاسخ عمومی آن خواهد بود:

$$y = A \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) + B \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) \quad (7)$$

که از شرایط مرزی به دست می‌آید:

$$\begin{cases} y(0) = 0 \longrightarrow B = 0 \\ y(L) = 0 \longrightarrow A \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}L\right) = 0 \end{cases}$$

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

$$\sqrt{\frac{P}{EI}}L = n\pi \longrightarrow P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (8)$$

که از رابطه (۸) به ازای $n = 1$ مقدار بار کماتش بحرانی حاصل می‌گردد.

۵- مبانی تئوری اثر بار محوری بر داده‌های مودال

معادله حرکت یک سیستم چند درجه آزادی را می‌توان از تعادل نیروهای مؤثر در هر کدام از درجات آزادی به صورت رابطه (۹) به دست آورد.

$$f_{Ii} + f_{Di} + f_{Si} = P_i(t) \quad (9)$$

شکل ماتریسی رابطه (۹) عبارت است از:

$$f_I + f_D + f_S = P(t) \quad (10)$$

با در نظر گرفتن اثر بار محوری در رابطه (۱۰) می‌توان نوشت:

$$f_I + f_D + f_S - f_G = P(t) \quad (11)$$

با توجه به اینکه نیروی محوری (نسبتی از بار کماتش بحرانی) در خلاف جهت حرکت می‌باشد، اثر آن منفی لحاظ گردید. در معادله (۱۱) f_I ، f_D ، f_S ، f_G و $P(t)$ به ترتیب بردار نیروهای اینرسی، میرایی، سختی، محوری و گرهی بوده و با روابط (۱۲) تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} f_I = M\ddot{u} \\ f_D = C\dot{u} \\ f_S = Ku \\ f_G = K_G u \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه (۲)، a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند. Ψ^* مزدوج مختلط تابع موجک مادر Ψ است. تابع موجک مادر در آنالیز موجک با پارامتر مقیاس و انتقال تعریف شده است. این ویژگی منجر به ارائه تحلیل چندگانه سیگنال‌های غیر ایستا می‌گردد، به این صورت که با انتخاب مقیاس‌های کوچک و بزرگ به ترتیب بازه‌های کوچک و بزرگی روی سیگنال توسط تبدیل موجک برای انجام آنالیز موجک انتخاب می‌شود.

تابع موجک باید این ۳ شرط را ارضا نماید:

۱- انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۲۹ و ۳۰]؛ به عبارتی:

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

۲- انرژی آن محدود باشد [۲۹ و ۳۰]؛ به عبارتی:

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

۳- باید در رابطه (۵) صدق نماید [۲۹-۳۱]:

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

که در آن Ψ تبدیل فوریه ψ و ω بیانگر بسامد است. رابطه (۳) پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه (۴) بدین معنی است که بیشترین انرژی در تابع موجک برای یک بازه زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود [۳۰].

۳- بیان مسئله تحقیق

المان ستون فولادی به طول ۴ متر و سطح مقطع مربعی توپر به طول ضلع ۱۰ سانتیمتر با مشخصات مکانیکی مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و ضریب پواسن 0.3 با شرایط تکیه‌گاهی مستعد کماتش محوری مورد نظر می‌باشد. مسئله مورد تحقیق، شناسایی موقعیت‌های خرابی در المان ستون فولادی معیوب تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار کماتش بحرانی حالت آسیب‌دیده ستون با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک و داده‌های مودال اجزاء محدود می‌باشد.

۴- معادله اوپلر حاکم بر کماتش محوری

معادله اساسی حاکم بر کماتش خمشی ستون دو سر مفصل تحت اثر نیروی محوری با رابطه (۶) تعریف می‌گردد:

$$EIy'' = -Py \Rightarrow y'' + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (6)$$

مقایسه شده‌اند. به این منظور تحلیل کماتش ستون با مشبندی به طول‌های متفاوت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مشبندی به طول ۸ سانتی‌متر برای ادامه تحقیق مناسب است (جدول ۱).



شکل ۱- ستون فولادی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و نحوه بارگذاری

جدول ۱- مقایسه بارهای کماتش بحرانی تئوری و مدل اجزاء محدود حالت سالم (نیوتن)

شماره مود	نتایج تئوری	نتایج ABAQUS
۱	$1/0.3 \times 10^6$	$1/0.3 \times 10^6$
۲	$4/11 \times 10^6$	$4/0.9 \times 10^6$
۳	$9/25 \times 10^6$	$9/16 \times 10^6$
۴	$1/65 \times 10^7$	$1/61 \times 10^7$

۷- معرفی حالت‌های خرابی

مشخصات هندسی حالت‌های خرابی در جدول ۲ معرفی شده است. خرابی‌ها به صورت کاهش درصدی مدول الاستیسیته لحاظ شده‌اند. مدول الاستیسیته ناحیه خرابی عبارت است از

$$E_d = \%(100 - d)E_u \quad (19)$$

که در آن d شدت خرابی می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات هندسی حالت‌های خرابی

خرابی	ناحیه خرابی	شدت خرابی (%)	محدوده خرابی (m)
D1	۱	۳۰	۰/۹۶ - ۱/۰۴
	۲	۲۰	۲/۹۶ - ۳/۰۴
D3	۱	۳۰	۰/۹۶ - ۱/۰۴
	۲	۲۰	۲/۹۶ - ۳/۰۴

در روابط (۱۲) بردار جابجایی گره‌ها و ماتریس‌های مربعی C, M, K و K_G به ترتیب ماتریس جرم، میرایی، سختی و سختی هندسی (ناشی از نیروی محوری) می‌باشند؛ بنابراین از جایگذاری به دست می‌آید:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K - K_G)u = P(t) \quad (13)$$

که با قرار دادن $\bar{K} = K - K_G$ (ماتریس سختی مرکب) و $C = 0$ در معادله (۱۳)، معادله ارتعاش آزاد بدون میرایی سیستم با رابطه (۱۴) تعریف می‌گردد.

$$M\ddot{u} + \bar{K}u = \bar{O} \quad (14)$$

با فرض یک جابجایی هارمونیک برای تمامی درجات آزادی با زاویه فاز θ و فرکانس ω روابط (۱۵) و (۱۶) حاصل می‌شود.

$$u(t) = \bar{u} \sin(\omega t + \theta) \approx \bar{u} \quad (15)$$

$$\ddot{u}(t) = -\bar{u}\omega^2 \sin(\omega t + \theta) \approx -\bar{u}\omega^2 \quad (16)$$

که در آن \bar{u} نشان‌دهنده شکل سیستم با دامنه متغیر بوده و با زمان تغییر نمی‌کند. با جایگذاری روابط (۱۵) و (۱۶) در (۱۴)، معادله (۱۷) حاصل می‌شود.

$$(\bar{K} - \omega^2 M)\bar{u} = \bar{O} \quad (17)$$

دستگاه معادلاتی (۱۷) در صورتی جواب غیر صفر دارد که دترمینان ماتریس ضرایب برابر صفر گردد.

$$|\bar{K} - \omega^2 M| = 0 \quad (18)$$

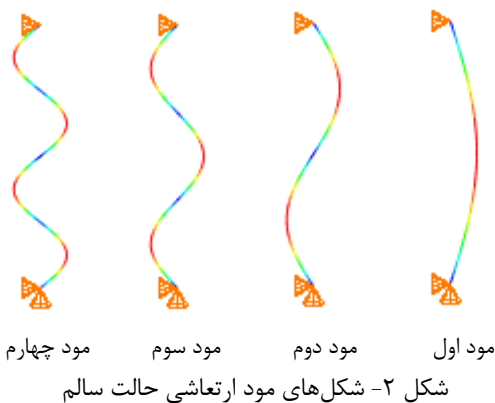
بسط معادله (۱۸) منجر به یک معادله جبری درجه n (تعداد درجات آزادی) از ω^2 می‌شود که از حل آن فرکانس‌های مودهای مختلف به دست می‌آیند و از قرار دادن هر یک از فرکانس‌ها در (۱۷) شکل مود نظیر آن فرکانس ایجاد می‌گردد.

۶- مدل اجزاء محدود ستون تحت بار محوری

المان ستون فولادی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل تحت بارگذاری محوری با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است (شکل ۱).

به منظور اعتماد به رفتار سازه و تصور اینکه در واقعیت به مسئله عیب‌یابی پرداخته شده است، نیاز است رفتار قابل قبول مدل نرم افزاری با رفتار مدل آزمایشگاهی نظیر یا با مقادیر تئوری مورد تأیید واقع شود. در این مقاله مقادیر بار کماتش بحرانی نرم افزاری با مقادیر تئوری نظیرشان

حالت‌های سالم و معیوب D1 (به عنوان نمونه) در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده‌اند.



مشاهده می‌گردد که مقادیر فرکانس‌های تمام مودها در هر دو حالت سالم و آسیب با افزایش بار محوری کاهش می‌یابد. نیز، از مقایسه جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که فرکانس‌های طبیعی حالت‌های سالم و معیوب در تمامی مودها با در نظر گرفتن اثر بار محوری یکسان به دلیل وجود خرابی دارای اختلاف هستند.

جدول ۴- اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی بر فرکانس‌های طبیعی حالت سالم (Hz)

شماره مود				$\frac{P}{P_{cr}}$
۴	۳	۲	۱	
فرکانس طبیعی (Hz)				
۲۲۵/۳۰	۱۲۷/۶۰	۵۶/۹۹۲	۱۴/۲۹۱	صفر
۲۲۴/۶۰	۱۲۶/۹۰	۵۶/۲۸۶	۱۳/۵۶۹	۰/۱
۲۲۳/۹۱	۱۲۶/۲۰	۵۵/۵۷۲	۱۲/۸۰۶	۰/۲
۲۲۳/۲۲	۱۲۵/۴۹	۵۴/۸۴۸	۱۱/۹۹۴	۰/۳
۲۲۲/۵۲	۱۲۴/۷۸	۵۴/۱۱۴	۱۱/۱۲۳	۰/۴
۲۲۱/۸۲	۱۲۴/۰۷	۵۳/۳۷۱	۱۰/۱۷۸	۰/۵
۲۲۱/۱۱	۱۲۳/۳۵	۵۲/۶۱۶	۹/۱۳۶۰	۰/۶
۲۲۰/۴۱	۱۲۲/۶۲	۵۱/۸۵۰	۷/۹۵۸۰	۰/۷
۲۱۹/۷۰	۱۲۱/۹۰	۵۱/۰۷۳	۶/۵۷۱۹	۰/۸
۲۱۸/۹۹	۱۲۱/۱۷	۵۰/۲۸۴	۴/۸۰۰۷	۰/۹

۱۰- الگوریتم عیب‌یابی تبدیل موجک؛ شناسایی

خرابی

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 در سیگنال‌ها می‌باشد. بر همین اساس الگوریتم عیب‌یابی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و

۸- بررسی اثر شدت خرابی بر بار بحرانی

در جدول ۳ مقادیر بار کمانش بحرانی ستون معیوب در هر یک از حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 آورده شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش شدت خرابی ناحیه آسیب‌دیده، از میزان بار بحرانی کاسته می‌شود و این ضرورت عیب‌یابی در ستون تحت اثر بار محوری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که شدت خرابی ناحیه ۲ در حالت D3 ثابت و برابر ۲۰٪ لحاظ شده است.

جهت ادامه تحقیق، بار بحرانی مبنا مینیمم بارهای بحرانی حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 انتخاب شده است؛ زیرا حالت خرابی D3 به صورت مجموع حالت‌های خرابی D1 و D2 تعریف گردیده است و اگر بار بحرانی یکی از دو حالت خرابی D1 یا D2 به عنوان بار بحرانی مبنا انتخاب گردد، ممکن است ستون در حالت خرابی D3 تحت اثر بار محوری از نظر کمانش دچار ناپایداری شود و حال آنکه مسئله پایش سلامت برای سازه‌هایی که در اثر خرابی یا بارهای اعمالی ناپایدار می‌باشند، عملی بی‌فایده است. با انتخاب بار بحرانی حالت خرابی D3 به عنوان بار بحرانی مبنا می‌توان حالت‌های خرابی مزبور را برای آسیب‌های با شدت‌های خرابی به ترتیب کمتر از ۳۰٪ در ناحیه ۱ و ۲۰٪ در ناحیه ۲ مورد بررسی قرار داد.

جدول ۳- اثر شدت خرابی ناحیه آسیب بر مقدار بار بحرانی

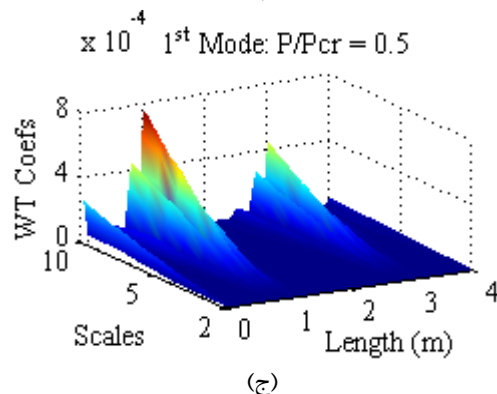
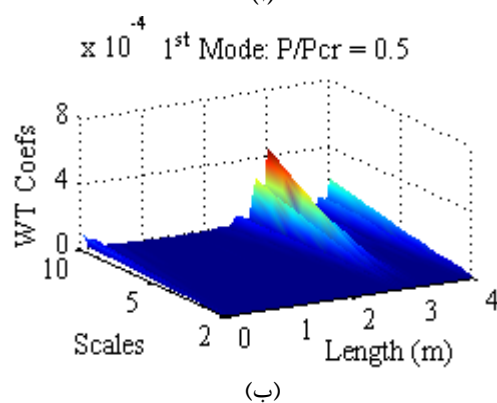
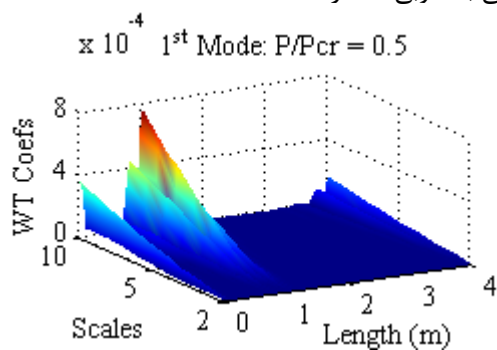
شدت خرابی (%)	بار کمانش بحرانی ($\times 10^6$) (نیوتن)		
	D3	D2	D1
صفر	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۶۹
۱۰	۱/۰۱۹۵	۱/۰۲۴۶	۱/۰۲۴۶
۲۰	۱/۰۱۶۷	۱/۰۲۱۸	۱/۰۲۱۸
۳۰	۱/۰۱۳۱	۱/۰۱۸۱	۱/۰۱۸۱
۴۰	۱/۰۰۸۳	۱/۰۱۳۲	۱/۰۱۳۲
۵۰	۱/۰۰۱۵	۱/۰۰۶۴	۱/۰۰۶۴
۶۰	۰/۹۹۱۵	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۱
۷۰	۰/۹۷۴۷	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۹۱
۸۰	۰/۹۴۱۵	۰/۹۴۵۵	۰/۹۴۵۵
۹۰	۰/۸۴۶۲	۰/۸۴۹۱	۰/۸۴۹۱

۹- بررسی اثر بار محوری بر فرکانس‌ها

در شکل (۲) چهار شکل مود اول ارتعاشی ستون در حالت سالم تحت اثر بار محوری مشاهده می‌گردد.

تحلیل فرکانسی ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی در وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده انجام شده است و مقادیر فرکانس‌های نظیر شکل‌های مود اول تا چهارم

مبتنی بر تحلیل سیگنال متشکل از تفاضل یا مجموع شکل‌های مود سالم و معیوب متأثر از بار محوری با توابع موجک مادر خانواده‌های دابچیز (db)، کویفلتس (coif) و سیملتس (sym) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با بسیاری از توابع موجک خانواده‌های مزبور می‌تواند با دقت بالایی محل‌های آسیب را شناسایی نماید. در شکل‌های (۳) تا (۵) نتایج عیب‌یابی مودهای اول تا سوم حالت‌های خرابی D1, D2 و D3 تحت اثر بار محوری $\Delta P_{cr} / 0.5$ توسط تابع مادر تحلیلی coif5 آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در نواحی خرابی، اغتشاشات در ضرایب موجک چشم‌گیر می‌باشد؛ به نحوی که محل‌های خرابی به خوبی آشکار شده است.



شکل ۳- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت خرابی (آ) D1، (ب) D2 و (ج) D3 تحت اثر بار محوری $\Delta P_{cr} / 0.5$

سیگنال متشکل از تفاضل یا مجموع شکل‌های سالم و آسیب‌دیده مود i ام به صورت زیر ارائه شده است.

جدول ۵- اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی بر فرکانس‌های

طبیعی حالت خرابی D1 (Hz)

P/P _{cr}	شماره مود			
	۴	۳	۲	۱
صفر	۲۲۵/۲۴	۱۲۷/۰۷	۵۶/۵۱۶	۱۴/۲۳۰
۰/۱	۲۲۴/۵۵	۱۲۶/۳۷	۵۵/۸۰۴	۱۳/۵۰۴
۰/۲	۲۲۳/۸۶	۱۲۵/۶۶	۵۵/۰۸۴	۱۲/۷۳۸
۰/۳	۲۲۳/۱۶	۱۲۴/۹۵	۵۴/۳۵۳	۱۱/۹۲۱
۰/۴	۲۲۲/۴۶	۱۲۴/۲۴	۵۳/۶۱۲	۱۱/۰۴۵
۰/۵	۲۲۱/۷۶	۱۲۳/۵۲	۵۲/۸۶۱	۱۰/۰۹۲
۰/۶	۲۲۱/۰۶	۱۲۲/۸۰	۵۲/۰۹۹	۹/۰۴۰۰
۰/۷	۲۲۰/۳۶	۱۲۲/۰۷	۵۱/۳۲۶	۷/۸۴۷۵
۰/۸	۲۱۹/۶۵	۱۲۱/۳۴	۵۰/۵۴۰	۶/۴۳۷۶
۰/۹	۲۱۸/۹۴	۱۲۰/۶۱	۴۹/۷۴۳	۴/۶۱۴۹

گام ۱: فراخوانی شکل‌های سالم و معیوب مود i ام به محیط MATLAB؛

```
% Start
U_i = xlsread ('undamaged_mode_shape_i.xlsx');
D_i = xlsread ('damaged_mode_shape_i.xlsx');
```

گام ۲: درون‌یابی اسپلاین مکعبی (CSI) شکل‌های سالم و معیوب مود i ام؛

```
x = linspace (0, L, numel (U_i)); % L = Length
Interpolation = 'spline';
n = 3;
xj = linspace (0, L, n*numel (U_i));
U_ij = interp1(x, U_i, xj, Interpolation);
D_ij = interp1(x, D_i, xj, Interpolation);
```

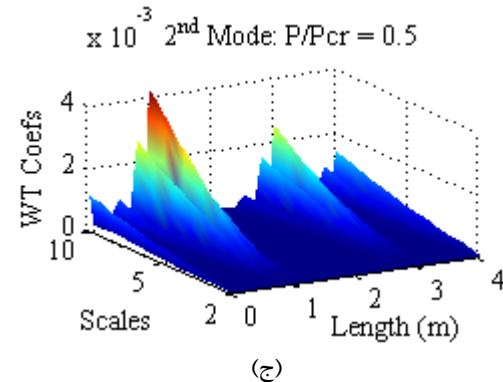
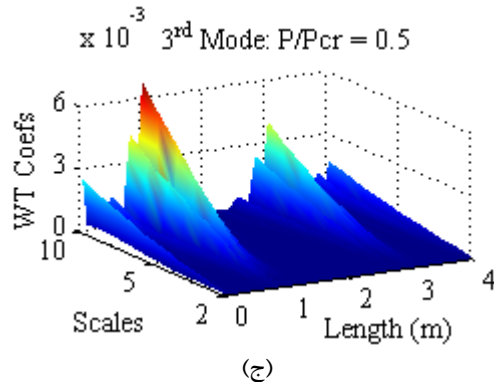
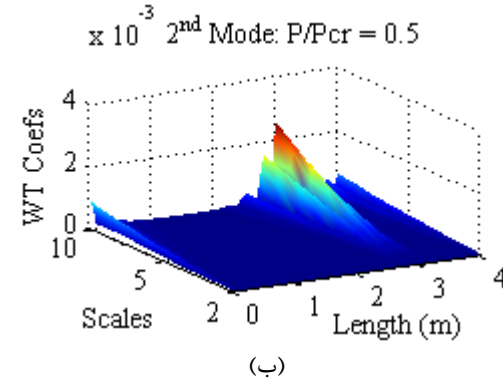
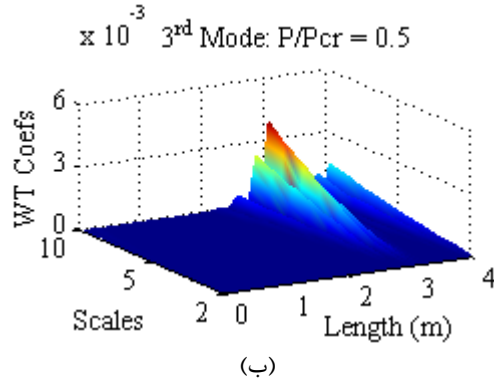
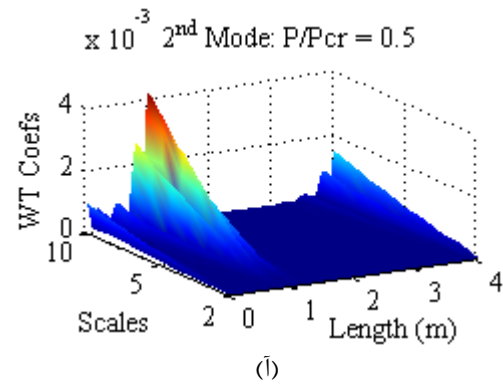
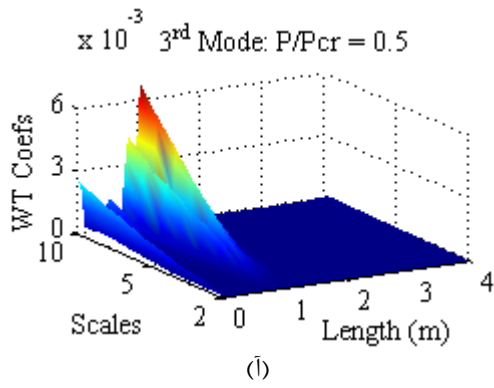
گام ۳: تعریف سیگنال S_i مود i ام؛

```
Theta_i = (180/pi)*acos (dot (U_ij, D_ij)/...
(norm (U_ij)*norm (D_ij)));
if floor (Theta_i) == 0
    S_i = U_ij - D_ij
else if ceil (Theta_i) == 180
    S_i = U_ij + D_ij
end
end
```

گام ۴: آنالیز موجک پیوسته سیگنال S_i و عیب‌یابی؛

```
Scale = 2:10;
Wavelet = 'coif5';
WT_Coefs = cwt (S_i, Scale, Wavelet, 3Dplot)
% End
```

عیب‌یابی با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک پیوسته



شکل ۵- نمودار ضرایب موجک مود سوم حالت خرابی (آ) D1، (ب) D2 و (ج) D3 تحت اثر بار محوری ΔP_{cr} .

شکل ۴- نمودار ضرایب موجک مود دوم حالت خرابی (آ) D1، (ب) D2 و (ج) D3 تحت اثر بار محوری ΔP_{cr} .

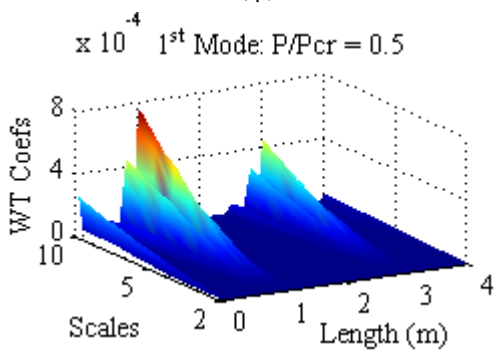
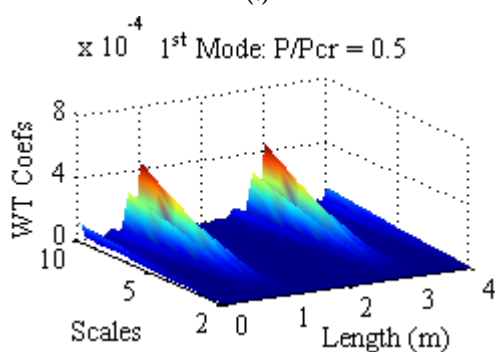
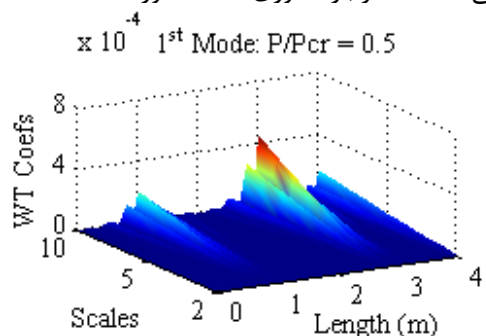
جدول ۶- ماکزیمم ضرایب موجک مودهای اول و دوم در مقیاس‌های ۵ و ۱۰ در محل‌های خرابی

ماکزیمم ضرایب موجک محل خرابی در مود دوم		ماکزیمم ضرایب موجک محل خرابی در مود اول		شدت خرابی (%)	ناحیه خرابی	نام خرابی
مقیاس ۱۰	مقیاس ۵	مقیاس ۱۰	مقیاس ۵			
۰/۰۰۴۱۳۴	۰/۰۰۰۷۱۴۴	۰/۰۰۰۷۵۱۸	۰/۰۰۰۱۳	۳۰	۱	D1
۰/۰۰۲۴۳۷	۰/۰۰۰۴۲۲۸	۰/۰۰۰۴۳۹۳	۰/۰۰۰۰۷۶۵۳	۲۰	۲	D2
۰/۰۰۴۱۱۹	۰/۰۰۰۷۱۱۴	۰/۰۰۰۷۴۸۴	۰/۰۰۰۱۲۹۲	۳۰	۱	D3
۰/۰۰۲۴۰۶	۰/۰۰۰۴۱۶۸	۰/۰۰۰۴۳۶۵	۰/۰۰۰۰۷۵۸۵	۲۰	۲	

آسیب حالت‌های خرابی D1 و D2 با ضرایب موجک محل‌های آسیب مجموع حالت‌های خرابی D1 و D2 یعنی حالت خرابی D3 برابر است. این موضوع در جدول ۶ بر مبنای ماکزیمم ضرایب موجک مودهای اول و دوم در

نتایج عیب‌یابی سه حالت خرابی در مودهای مختلف نشان می‌دهد که حساسیت ضرایب موجک هر یک از نواحی خرابی مستقل از حساسیت ضرایب موجک ناحیه خرابی دیگر است. همچنین، مجموع ضرایب موجک محل‌های

مثال، در شکل (۷) نتایج عیب‌یابی مود اول حالت خرابی D3 با شدت خرابی ثابت ۲۰٪ در ناحیه خرابی ۲ و شدت‌های خرابی (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در ناحیه خرابی ۱ تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ آورده شده است.



شکل ۷- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D3 با شدت خرابی ثابت ۲۰٪ در ناحیه ۲ و (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪، (ج) ۳۰٪ در ناحیه ۱

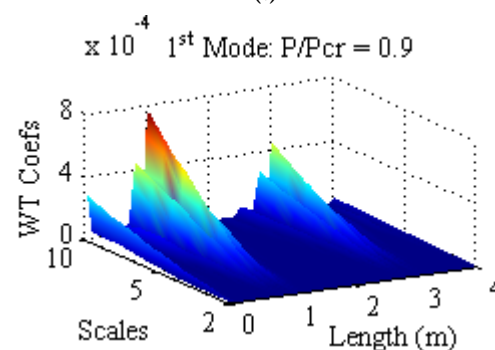
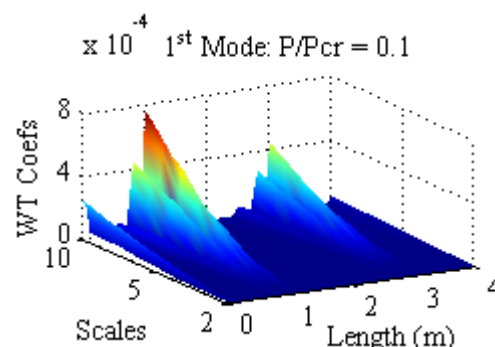
۱۳- بررسی اثر تغییر مقطع بر قابلیت عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک

به منظور بررسی اثر مقطع بر توانمندی الگوریتم پیشنهادی در شناسایی و آشکارسازی محل خرابی، عیب‌یابی ستون (شکل ۱) تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ برای مود اول حالت خرابی D1 (مطابق جدول ۲) با مقاطع مربعی توخالی (ضخامت ۲ سانتیمتر) و دایره‌ای توپر به ترتیب به طول

مقیاس‌های ۵ و ۱۰ در محل‌های خرابی نشان داده شده است.

۱۱- بررسی اثر بار محوری بر قابلیت عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک

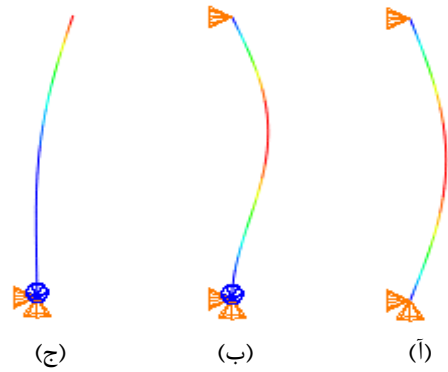
مسئله عیب‌یابی در سایر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی در چهار مود اول حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، تغییری در حساسیت ضرایب موجک ایجاد نمی‌شود. به عنوان مثال، در شکل (۶) نتایج عیب‌یابی مود اول حالت خرابی D3 تحت اثر بارهای محوری $0.1P_{cr}$ و $0.9P_{cr}$ نشان داده شده است.



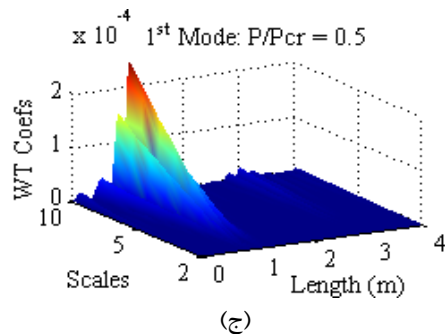
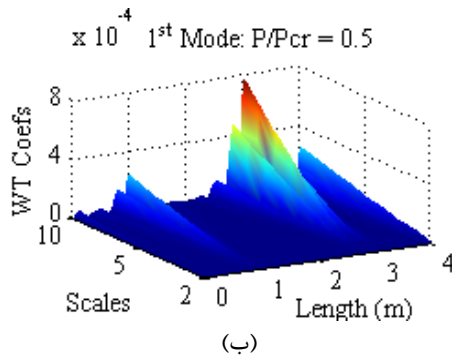
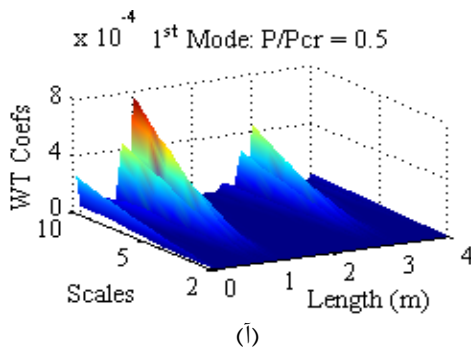
شکل ۶- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D3 تحت اثر بار محوری (آ) $0.1P_{cr}$ ، (ب) $0.9P_{cr}$

۱۲- بررسی اثر شدت خرابی بر حساسیت عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک

بررسی‌های عیب‌یابی چهار مود اول حالت‌های خرابی D1، D2 و D3 در شدت‌های خرابی مختلف (به‌طوری‌که ستون ناپایدار نگردد) تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت خرابی ناحیه آسیب‌دیده، اغتشاشات ضرایب موجک ناحیه خرابی در یک موقعیت مکانی ثابت افزایش می‌یابد. به عنوان



شکل ۹- شکل مود اول ستون با آسیب D3 تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ و شرایط تکیه‌گاهی (آ) مفصلی- مفصلی، (ب) گیردار- مفصلی، (ج) گیردار- آزاد

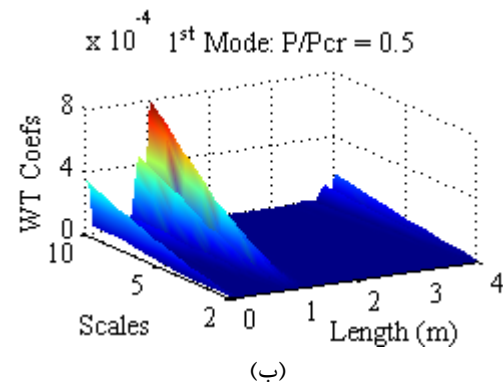
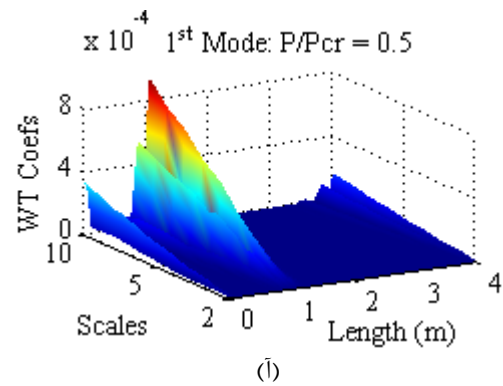


شکل ۱۰- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D1 ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی (آ) مفصلی- مفصلی، (ب) گیردار- مفصلی، (ج) گیردار- آزاد

نتایج عیب‌یابی ستون در شکل (۱۰) آورده شده است. مشاهده می‌گردد که با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک،

ضلع ۲۵ و طول قطر ۲۰ سانتیمتر انجام شده است. در این حالت بار بحرانی حالت خرابی D1 به ترتیب برای مقاطع مربعی توخالی و دایره‌ای توپر، 1.92278×10^7 و 1.51044×10^8 نیوتن محاسبه شده است.

نتایج عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک برای ستون با مقاطع مربعی توخالی و دایره‌ای توپر در شکل (۸) آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در محل آسیب‌دیده، اغتشاش در ضرایب موجک اتفاق افتاده و موقعیت خرابی با قابلیت بالایی شناسایی شده است.



شکل ۸- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت خرابی D1 ستون تحت اثر بار محوری با مقطع (آ) مربعی توخالی، (ب) دایره‌ای توپر

۱۴- بررسی تغییر شرایط تکیه‌گاهی بر قابلیت عیب‌یابی الگوریتم تبدیل موجک

عیب‌یابی ستون تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ با شرایط تکیه‌گاهی مختلف انجام شده است. در جدول ۷ بار بحرانی ستون با مقطع مربعی توپر به طول ضلع ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴ متر با شرایط تکیه‌گاهی مستعد کماتش برای حالت آسیب D3 (جدول ۲) محاسبه شده و در شکل (۹)، شکل مود اول ستون معیوب با شرایط تکیه‌گاهی نشان داده شده است.

شکل‌های مود حالت‌های سالم و معیوب متأثر از نیروهای محوری پیشنهاد شد. نتایج عیب‌یابی نشان داد که:

۱- محل‌های خرابی در تمامی مودها و نسبت‌های مختلف از بار بحرانی با دقت بالایی قابل شناسایی است.
 ۲- حساسیت ضرایب موجک متأثر از بار محوری نمی‌باشد؛ به عبارتی، تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی، حساسیت ضرایب موجک محل‌های خرابی تغییر نمی‌نماید.
 ۳- با افزایش شدت خرابی یک محل، حساسیت ضرایب موجک آن محل در یک موقعیت مکانی ثابت افزایش می‌یابد.

۴- حساسیت ضرایب موجک محل‌های خرابی مستقل از هم می‌باشد؛ به عبارتی، با افزایش شدت خرابی یک محل، ضرایب موجک سایر محل‌های خرابی تغییر نمی‌نماید.

۵- با توجه به جدول ۶ مجموع ضرایب موجک محل‌های آسیب‌دیده چند حالت خرابی (در اینجا حالت‌های خرابی D1 و D2) با ضرایب موجک محل‌های آسیب‌دیده مجموع حالت‌های خرابی (در اینجا حالت خرابی D3) برابر است (اصل بر هم نهد ضرایب موجک محل‌های آسیب حالت‌های خرابی).

۶- با استفاده از الگوریتم عیب‌یابی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و سیگنال متشکل از مجموع یا تفاضل شکل‌های مود سالم و معیوب می‌توان محل‌های خرابی در المان ستون تحت اثر بارگذاری محوری را با هر مقطع دلخواه و شرایط تکیه‌گاهی مستعد کماتش با دقت بالایی شناسایی نمود.

محل‌های آسیب با ایجاد اغتشاش در ضرایب موجک به خوبی شناسایی شده است.

جدول ۷- بار کماتش بحرانی ستون با آسیب D3 با شرایط تکیه‌گاهی مختلف (نیوتن)

شرایط تکیه‌گاهی	بار بحرانی (نیوتن)
مفصلی- مفصلی	$1/0.131 \times 10^6$
گیردار- مفصلی	$2/0.777 \times 10^6$
گیردار- آزاد	$2/5287 \times 10^5$

۱۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همواره سازه‌ها با گذشت زمان در دوره خدمت‌رسانی دچار خسارت‌های جزئی در برخی از المان‌ها می‌شوند که با تجمیع و گسترش تحت اثر عواملی چون زلزله، گودبرداری‌های غیراصولی و ... ممکن است دچار تخریب کلی شوند و هزینه‌های جانی و مالی زیادی را تحمیل نمایند؛ بنابراین پایش سلامت در سازه‌ها ضروری و حائز اهمیت است. در این مقاله به بررسی اثر بار محوری بر مقادیر فرکانس‌های طبیعی حالت‌های سالم و معیوب المان ستون پرداخته شد. نتایج نشان داد که در اثر افزایش بار محوری، فرکانس‌های مودهای مختلف چه در حالت سالم و چه در حالت معیوب کاهش می‌یابند. همچنین، تحت اثر بار محوری یکسان بین فرکانس‌های حالت‌های سالم و معیوب به دلیل خرابی اختلاف وجود دارد. سپس، مسئله شناسایی نواحی خرابی مد نظر واقع گردید. به این منظور الگوریتم عیب‌یابی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و

مراجع

- [1] A. Rytter, "Vibration based inspection of civil engineering structures", Ph.D. Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.
- [2] D. Newland, "Wavelet analysis of vibration. Part 1: Theory", Journal of Vibration and Acoustic, Vol. 116, pp. 409-416, 1994.
- [3] D. Newland, "Wavelet analysis of vibration. Part 2: Wavelet Maps", Journal of Vibration and Acoustic, Vol. 116, pp. 417-424, 1994.
- [4] A. Sone, S. Yamamoto, A. Nakaoka, and A. Masuda, "Health monitoring system of structures based on orthonormal wavelet transform", Seismic Engineering, ASME, Vol. 312, pp.161-167, 1995.
- [5] Z. Hou, M. Noori, and R. Amand, "Wavelet-based approach for structural damage detection", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, pp. 677-683, 2000.
- [6] A. V. Ovanosova, and L. E. Suarez, "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures", Engineering Structures, Vol. 26, pp. 39-49, 2004.
- [7] N.S. Bajaba, and K.A. Alnefaie, "Multiple damage detection structures using wavelet transforms", Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 10, No.1, pp. 35-40, 2005.
- [8] A. Katunin, "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance, Vol. 2, No. 162, 2010.

[9] G. R. Ghodrati-Amiri, A. Bagheri, S. A. Seyed Razzaghi, and A. Asadi, "Structural damage detection in plate using wavelet transform", Challenges, Opportunities and Solution in Structural Engineering and Construction-Ghafoori (Ed), 2010.

[10] A. Bagheri, S. Kourehli, "Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis", Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), Vol. 14, pp. 289-304, 2013.

[۱۱] امیر عزالدین، حسین نادریپور، علی خیرالدین و غلامرضا قدرتی امیری، "تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۱.

[۱۲] زهرا تبریزیان، مرتضی حسینعلی بیگی و غلامرضا قدرتی امیری، "تشخیص آسیب در سازه های فلزی با استفاده از اطلاعات خیز استاتیکی و الگوریتم ژنتیک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۴۷-۱۵۸.

[۱۳] حسین رحامی، حامد امینی تهرانی، مصطفی اخوات و غلامرضا قدرتی امیری، "شناسایی خسارت در سکوها ثابت دریایی با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته موجک"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۴۸-۲۴۱.

[14] A. Katunin, "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 15, pp. 251-261, 2015.

[15] H. Naderpour, P. Fakharian, "A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 2859-2867, 2016.

[16] S. Patel, A. Chourasia, S. Panigrahi, J. Parashar, N. Parvez, and M. Kumar, "Damage identification of RC structures using wavelet transformation", Procedia Engineering, Vol. 144, pp. 336-342, 2016.

[۱۷] محمدرضا گله بان، شاپور مرادی، "تشخیص ترک در تیرها به کمک تبدیل هیلبرت- هوانگ"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۷-۴۰.

[۱۸] امیر احمد نژاد زرنقی و امیر طریقت، "آشکار سازی خرابی در سازه های صفحه ای با استفاده از تحلیل انرژی موجک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۹۹-۳۱۳.

[۱۹] امید رضایی فر، عادل یونسی، مجید قلهکی و اکبر اسفندیاری، "شناسایی آسیب جداشدگی در ستون های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده های مودال آزمایشگاهی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۷، doi:10.22065/JSCE.2018.117020.1444.

[20] A. Younesi, O. Rezaifar, M. Gholhaki, and A. Esfandiari, "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", Magazine of Civil Engineering, Vol. 85, pp. 136-145, 2019.

[۲۱] میلاد پایسته، مرتضی آقاچان نشتایی، محمد طاهری نسب و سید بهرام بهشتی اول، "کشف آسیب های صفحات با استفاده از تبدیل موجک گسسته داده های مودال بازسازی شده"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۳، سال ۱۳۹۸، صفحه ۵۰۳-۵۲۲.

[۲۲] سید روح الله حسینی واعظ و طاهره عارف زاده، "مقایسه ی تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد وزنی با استفاده از تبدیل موجک"، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۳۳-۴۱.

[23] S. Wang, J. Li, H. Luo, and H. Zhu, "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", Journal of Engineering Structures, Vol. 178, pp. 506-520, 2019.

[۲۴] محتشم خان احمدی، امید رضایی فر و مجید قلهکی، "عیب یابی صفحات فولادی مبتنی بر مقایسه نتایج تحلیلی تبدیل موجک گسسته دو بعدی شکل مودهای اولیه و ثانویه"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۸، doi:10.22065/JSCE.2019.174347.1799.

[۲۵] محتشم خان احمدی، امید رضایی فر و مجید قلهکی، "عیب یابی دیوارهای پیش ساخته (صفحات 3D پانل) مبتنی بر الگوریتم شناسایی تبدیل موجک"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۸، doi:10.22065/JSCE.2019.197470.1923.

[۲۶] محتشم خان احمدی، امید رضایی فر و مجید قلهکی، "مطالعه مقایسه ای آشکار سازی خرابی تیرهای فولادی مبتنی بر تبدیلات موجک پیوسته و گسسته پاسخ های استاتیکی و دینامیکی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۹، doi:10.22065/JSCE.2020.216647.2058.

[۲۷] هاله عزیزی، بهزاد تخم‌چی، حسین احمدی نوبری، پرویز جبه دار مارالانی و حسین معماریان، "اهمیت گزینش موجک مادر بهینه در تحلیل داده‌ها در حوزه علوم زمین"، فصلنامه زمین شناسی ایران، ۱۳۹۰، دوره ۵، شماره ۱۸، صفحه ۶۳-۷۶.

[28] A. Mertins, "Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications", Wiley, 1992.

[29] S. Zhongm, and S. O. Oyadiji, "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", Computers and Structures, Vol. 89, No.1-2, pp. 127-148, 2011.

[30] K. Hansang, and M. Hani, "Damage detection of structures by wavelet analysis", Engineering Structures, Vol. 26, No. 3, pp. 347-362, 2004.

[31] D. Hester, and A. Gonzalez, "A wavelet- based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 28, pp. 145-166, 2012.