



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

محتشم خان احمدی'، امید رضایی فر'*، مجید قلهکی"، بهزاد دژکام[†]، 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./۲٥

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

چکیدہ

همواره سازهها تحت اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی متعددی همچون زلزله، انفجار و گودبرداریهای غیر اصولی واقعاند که می تواند 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 آسیب دیده با افزایش بار محوری به صورت نسبتهایی از بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) کاهش می بابد. همچنین، در بارگذاریهای یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب دیده بیشتر است؛ به طوری که با افزایش شدت می بابد. همچنین، در بارگذاریهای یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب دیده بیشتر است؛ به طوری که با افزایش شدت می بابد. همچنین، در بارگذاریهای یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب دیده بیشتر است؛ به طوری که با افزایش شدت می بابد. همچنین، در بارگذاریهای یکسان، همواره فرکانس نمونه سالم از فرکانس نمونه آسیب دیده بیشتر است؛ به طوری که با افزایش شدت موجک حاصل از جزئیات آنالیز موجک شکلهای مود وضعیتهای سالم و آسیب دیده، موقعیتهای آسیب با دقت بالایی به صورت پرش و یا اغتشاش در نمودار IDD شناسایی شد. همچنین، بررسیها نشان داد که IDD موقعیتهای مختلف آسیب مستقل از هم بوده و تنها متأثر از شدت آسیب همان موقعیت آسیب است و آثار بار محوری بر IDD بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. مستقل باز هم بوده و تنها متأثر از شدت نشاندهنده کارآمدی روش پیشنهادی در شناسایی موقعیتهای آسیب است؛ زیرا در غیر اینصورت، ممکن است عدم شناسایی یک موقعیت آسیب بر شناسایی سایر موقعیت های آسیب تأثیرگذار باشد.

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

تبدیلات توانمند پردازشی سیگنالها است که با استفاده از آن

می توان مشخصات سیگنالها را در دو حوزه زمان و فرکانس

استخراج کرد و نقاط ناپیوستگی یا تغییرات محلی ناگهانی در

سیگنالها را شناسایی نمود. بـر همـین اسـاس پـژوهش.هـای

متعددی در حوزه پایش سلامتی سازه مبتنی بر تبدیل موجـک

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 ننمود، اما

معرفی این روش در مهندسی، سرآغاز مطالعه پـایش سـلامتی

سازهها به روش موجـک شـد [3, 4]. سـون و همکـاران بـا

استفاده از تبدیل موجک به تحلیل پاسخهای تاریخچه زمانی

سیستم یک درجه آزادی با معرفی آسیب بـه صـورت کـاهش

سختي پرداختند و زمان وقـوع آسـيب را تعيـين نمودنـد [5].

هوو و همکاران با استفاده از تحلیل موجک دادههای حاصل

از زلزله سن فرناندو موفق شدند لحظهای را که آسیب رخ

مىدهد شناسايى نمايند [6]. اوانسوا و سوراز تبديل موجـک

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، حـذف

نوفه از ضرایب جزئیات موجک لازم است [8]. قدرتی امیری

و همکاران با بهکار گیری 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 انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر " به تشخیص

آسیب در صفحات پرداختند و موفق به شناسایی محل آسیب

۱ - مقدمه

سلامت سازه ها، تأمین ایمنی و احساس امنیت یک نیاز همیشگی و یکی از چالش های مهندسی و مدیران در حوزه مدیریت بحران است. فرسودگی و وقوع آسیب های جزئی در سازه ها و اعضای آن ها در مراحل اولیه ساخت یا در طول بهرهبرداری به ویژه در سازه های مهمی چون نیروگاه ها، ساختمان های بلند، پل ها، سدها، فرودگاه ها، بیمارستان ها و غیره، همواره یک مشکل اساسی است و در صورت عدم شناسایی به موقع محل های آسیب و اتخاذ تصمیم گیری های مناسب ممکن است خسارت های جبران ناپذیر اجتماعی و اقتصادی بسیاری به وجود آید؛ بنابراین، موضوع پایش سلامت در سازه ها و اعضای سازه ای بسیار مهم و ضرورتی انکار ناپذیر است.

گاهی اوقات محل و میزان آسیب را می توان از طریق بازرسیهای بصری تعیین نمود؛ اما روش بازرسی بصری دارای محدودیت ارزیابی آسیب است، بـه ویـژه زمـانی کـه آسیب در لایههای داخلی سازه قرار می گیرد [1]؛ بنابراین روشهای تشخیص خرابی توسعه پیدا کردند. به طورکلی روش های پایش سلامت در سازهها دارای چهار سطح می باشد؛ سطح ۱ شامل تشخیص وجود آسیب در سازه؛ سطح ۲ شامل تعیین محل آسیب؛ سطح ۳ ارزیابی و محاسبه شدت آسیب و سطح ۴، پیش بینی طول عمر باقیمانده سازه است [2]. وقوع خرابی، پاسخهای استاتیکی (جابهجاییها، کرنشها و تنشها) و پاسخهای دینامیکی (فرکانسها، شکل مودها و میرایی مـودال) سـازه را تغییـر میدهـد؛ بنـابراین از بررسي تغييرات به وجود أمده ميتوان 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 محل های آسیب انجام شده است).

در دهـههای اخیـر، تبـدیلات ریاضـی بـا ایـده پـردازش سیگنالها در زمینه پایش سلامت سازه مـورد توجـه بسـیاری قرار گرفته است. تبـدیل موجـک' (WT) بـه عنـوان یکـی از

^{2.} Two-Dimensional directional Gaussian wavelets

^{3.} Laser scanned operating deflection shapes

^{1.} Wavelet Transform (WT)

دوره بیست وسوم شماره ۲/ سال ۱۴۰۲

شدند [20]. خان احمدی و همکاران با بهکارگیری تبدیل موجک دو بعدی و شکل های 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 مودهای بررسی شده میتوان محل های 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 فولادي و پيشساخته پانلي شدند [22,23]. همچنین، در ارتباط با شناسایی آسیب در تیرهای فولادی نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک (تبديل موجک پيوسته و تبديل موجک گسسته) مي توان از تحلیل پاسخهای استاتیکی و دینامیکی، موقعیتهای آسیب را شناسایی نمود [25, 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 صرفنظر از مقادیر متناظر با دو انتهای ستون، محل های 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 دچـار 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 کمانش و در نتیجه، ناپایداری شود؛ بنابراین، پایش سلامتی در عضو سازهای ستون تحت اثر بار محوری مسئلهای مورد توجه است. مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس

شدند [11]. لی و همکاران با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته به شناسایی آسیب در سازهای پل خرپایی پرداختند و نشان دادند که روش پیشـنهادی قابلیـت 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 دادنـد و با استفاده از این روش موفق شدند موقعیتهای آسیب را بـا برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمایند [13]. کاتونین با استفاده از موجکهای ناپایدار گوینکانکس تحت اثر انرژیهای مختلف به تجزیه و تحلیل شکل مودهای صفحات کامپوزیتی آسیبدیده پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجکها سازوکار دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ میدهـد [14]. پاتـل و همکـاران بـا اسـتفاده از تبدیل موجک به شناسایی آسیب در یک ساختمان بتنی ۶ طبقه پرداختند. آنها با تحلیل موجـک پاسـخهای ارتعاشـی ثبت شده تراز هر طبقه، برای جرمهای مختلف نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین ضرایب موجک و تغییر در ویژگی های ذاتی سازه از جمله جـرم وجـود دارد [15]. یونسـی و همکاران برای شناسایی آسیب جداشدگی در ستونهای فولادی پر شده با بتن بر مبنای استفاده از تبدیل موجک به تحلیل شکل مودهای ارتعاشی پرداختند و موفق شدند موقعیت های 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 خرابي در موقعیتهای مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد که این شاخص می تواند 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 داده های حاصل از تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد بتنی وزنی پرداختند و موفق به شناسایی محل های آسیب

^{1.} Quincunx

پایش سلامت و تشخیص آسیب ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از دادههای...

۲- تبديل موجك

واژه "Wavelet" از دو جزء "Wave" به معنی موج و "tet" 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 که این مشخصات با گذشت 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 گسته (DWT) تعریف شدهاند که در ادامه به هر یک پرداخته میشود.

1-1- تبديل موجك پيوسته

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

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

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

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 می شود و در نتیجه، زمان محاسبه و اندازه حافظه افزایش می یابد؛ بنابراین، کاهش افزونگی ضرایب موجک در مقیاس های مختلف تا حد ممکن مورد نظر بود. یک روش کاهش افزونگی، استفاده از گسسته سازی لگاریتمی پارامتر مقیاس و سپس، وابسته نمودن مقدار پارامتر انتقال به آن است [32].

محتشم خان احمدي و همكاران

$$\{ au = k au_0 s_0^j, \ au_0 \neq 0, \ k \in Z$$
با فرض $s_0 = 2$ و $s_0 = 1$ ، تبديل موجـک گسسـته سـيگنال

x(t) با استفاده از رابطه (۴) به دست میآید [31, 32].

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

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

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

$$A, B \in \mathbb{R}^{+}$$
(Δ)

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

$$x(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j=\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} DWT^{x(t),\psi(t)}_{s,\tau} \psi_{j,k}(t) \qquad (\mathfrak{S})$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{a}^{j}(t) &= \sum_{k} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) \\ &= \sum_{k} \langle \mathbf{x}(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \phi_{j,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z} \end{aligned} \tag{V}$$

^{1.} Continuous Wavelet Transform (CWT)

^{2.} Discrete Wavelet Transform (DWT)

$$f -$$
 تئوری اثر بار محوری بر دادههای مودال
معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی را می توان از تعادل
نیروهای مؤثر در هرکدام از درجات آزادی به دست آورد:
 $f_{Ii} + f_{Di} + f_{Si} = P_i(t)$ (۱۳)
شکل ماتریسی رابطه (۱۳) به صورت رابطه (۱۴) است:
 $f_I + f_D + f_S = P(t)$ (۱۴)
با در نظر گرفتن اثر بار محوری در رابطه (۱۴) می توان

$$f_I + f_D + f_S - f_G = P(t) \tag{10}$$

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) *۶_۱، ۲_۵ و (P(t) ب*ه ترتیب ماتریس نیروهای اینرسی، میرایی، سختی، محوری و گرهی بوده و اینگونه تعریف می شوند:

$$f_I = M\hat{u}, \qquad f_D = C\hat{u}$$

$$f_S = Ku, \qquad f_G = K_G u$$
(19)

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

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K - K_G)u = P(t) \tag{1V}$$

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

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + \bar{K}u = P(t) \tag{1A}$$

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

$$M\ddot{u} + \bar{K}u = 0 \tag{19}$$

با فرض یک جابهجایی هارمونیک برای تمام درجات آزادی
با زاویه فاز
$$\theta$$
 و فرکانس w روابط زیر به دست میآیند:
 $u(t) = \overline{u}\sin(\omega t + \theta)$ (۲۰)

$$\ddot{u}(t) = -\bar{u}\omega^2 \sin(\omega t + \theta) \tag{71}$$

که در آن ū نشان دهنده شکل سیستم بوده و بـا زمـان تغییـر نمیکند. با جایگذاری در (۱۹) معادله زیر حاصل میشود:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{d}^{j}(t) &= \sum_{k} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ &= \sum_{k} \langle \mathbf{x}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z} \end{aligned} \tag{A}$$

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 یک پارامتر مقیاس از پیش تعیین شده است. در معادلات فوق، $\phi(t)$ تابع مقیاس است و $\phi_{j,k}(t) = 0$ معادلات فوق، $\phi(t)$ تابع مقیاس است و $\phi(t)$ است [31]. 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 می شود:
$$EIv'' = -Pv \Rightarrow v'' + \frac{P}{V} = 0$$
 (۱۰)

ثابت است و ریشههای معادله کمکی آن، مختلط مزدوج هستند؛ بنابراین، پاسخ عمومی معادله مزبور خواهد بود:

$$y = Asin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}x}\right) + Bcos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}x}\right) \tag{11}$$

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

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

$$\sqrt{rac{P}{EI}L=n\pi
ightarrow P=rac{n^2\pi^2EI}{L^2}}$$
که به ازای $n=1$ مقدار بار بحرانی کمانش حاصل میشود.

پایش سلامت و تشخیص آسیب ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از دادههای...

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

Mada Numbar	P _{crit}	ical (N)
Mode Number -	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

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

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

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

(۲۲) دستگاه معادلـه بـالا در صـورتی جـواب غیـر صـفر دارد کـه دترمینان ضرایب برابر صفر باشد: (۲۳) $0 = (M^2 - \overline{K} - \omega^2 M)$ بسط معادله بالا منجر به یک معادلـه جبـری درجـه n (تعـداد درجات آزادی) از ² می شود و از این طریـق، فرکانس.هـا و شکل.های مود متأثر از بار محوری به دست می آیند.

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 پوآسن ۲۰۳ با شرایط تکیهگاهی دو سر مفصل مورد نظر است. مسئله تحقیق، پایش سلامت و آشکارسازی محل های 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 روش های تحلیلی تبدیل موجک است.

۶- مــدل اجــزا محــدود ســتون تحــت بـار محورى

ستون فولادی با شرایط تکیه گاهی 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 تائید واقع گردید. مقادیر بار بحرانی حاصل از تحلیل کمانش ستون با ابعاد مش ۸ سانتی متر 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 سانتی متر برای ادامه تحقیق مناسب است.

يروسي يروسيني المهتداني المهراني الماراني	مدرس	عمران	مهندسي	-پژوهشي	علمى	مجله
---	------	-------	--------	---------	------	------

	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 -	2.96-3.04	3	20			

Table 2. Geometric profile of damage states

مدول الاستیسیته ناحیه آسیب عبارت است از $E_d = \left(1 - \frac{d}{100}\right) E_u$ (۲۴) 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 می شود؛ 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 می نماید.

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

Damage	Critical Axial Load (*10 ⁶)					
Severity (%)	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)

دوره بیست وسوم شماره ۲/ سال ۱۴۰۲

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 آسیب دیده 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 می شود که مقدار فرکانس در تمامی مودها برای هر دو وضعیت سالم و آسیب دیده با افزایش بار محوری کاهش مییابد. همچنین، از مقایسه جداول (۴ و ۵) مشاهده می شود که فرکانسهای طبیعی وضعیتهای سالم و آسیب دیده 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

 $\xi = (m, m, m)$ در شکل (۳) نمودارهای نسبت بار به بار بحرانی مبنا ($\xi = \chi/\omega_0) \omega_0$ ($\gamma = \omega/\omega_0$) – نسبت فرکانس به فرکانس $\omega_0 (\omega_0 - p/P_{cr})$ برای حالت سالم ستون در چهار مود اول ترسیم شده است. مشاهده می شود که با افزایش بار محوری، فرکانس طبیعی مشاهده ی مودهای تمامی مودها کاهش می یابد و این روند کاهشی در مودهای پایین تر محسوس تر است. (ω_0 فرکانس طبیعی متناظر با $\xi = \chi$) است. (0 است.)

مدي و همکاران	محتشم خان اح	نی و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از دادههای					پایش سلامتی و ت
		محورى	ن سالم تحت اثر بار .	شکلهای مود ستوز	شکل ۲.		
1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode	4 th Mode	5 th Mode	6 th Mode	7 th Mode	8 th Mode

Fig. 2. Undamaged mode shapes of the column under the effect of axial load (هرتز) **جدول ۴**. اثر بار محوری بر مقادیر فرکانس حالت سالم

_				Mode N	lumber				
$\frac{P}{P}$	1	2	3	4	5	6	7	8	
- 07				Natural Free	quency (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)

-				Mode N	Number			
$\frac{P}{P_{cr}}$	1	2	3	4	5	6	7	8
- 0				Natural Free	quency (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)



Fig. 3. Graphs of the ratio of load to basic critical load- the ratio of frequency to basic frequency ω_0

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 مشاهده میشود. بر همین اساس، در این نوشتار با معرفی مشاهده میشود. بر همین اساس، در این نوشتار با معرفی محلهای آسیب پرداخته شده است. شاخص مزبور با رابطه (۲۵) تعریف میشود.

 $DDI_{i} = |cD_{i}^{undamaged} - cD_{i}^{damaged}|$ (۲۵) $> cD_{i}^{undamaged} = cD_{i}^{undamaged} > cD_{i}^{$

ضرب داخلی بردارها حاصل شده است.

عیبیابی با استفاده از توابع موجک خانواده های دابچیز^۲، سیملتس⁷، کویفلتس⁷، بیور تو گونال^۵ تحت تحلیل موجک پیوسته با پارامتر مقیاس ۲ و همچنین، تحلیل موجک گسسته انجام شده است. بسیاری از توابع موجک خانواده های مزبور عملکرد شناسایی موفقی ارائه نمودند و حساسیت DDI در محل های مختلف آسیب به صورت قله هایی برجسته قابل محل های مختلف آسیب به صورت قلههایی برجسته قابل محل های مختلف آسیب به صورت قله هایی برجسته زبر موا می مختلف آسیب به صورت قله هایی برجسته زبر محوری محوری محوری شدت آسیب، تغییر مقطع ستون و سایر شرایط تکیه گاهی بر DDI پرداخته شده است. در پایان، نتایج بررسی ها با استفاده از سایر توابع موجک (از هر خانواده سه تابع موجک به عنوان نماینده های آن خانواده)

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

۱۵

² Daubechies 3 Symlets

⁴ Coiflets

⁵ Biorthogonal

¹ Damage Detection Index (DDI)

پایش سلامت و تشخیص آسیب ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از دادههای...

1

شکل ۵. نمودار DDI مود دوم حاصل از تحلیل موجک پیوسته تابع db8 برای حالت آسیب (آ) D1، (ب) D2، (ج)



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

تابع	پيوسته	موجك	تحليل	ل از	حاص	سوم	مود	DDI	نمودار	۶.	شكل
			D3 (~	-) (D	2.() ₍ D1	(Ĩ)	آسيب	ر حالت	cl.	db8



جدول ۶. زاویه بین شکل های مود سالم و معیوب سه مود اول

Mode	Angle betwe	en of mode sha	pes (Degree)
Number	$ heta_i^{u,d1}$	$ heta_i^{u,d2}$	$ heta_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)



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 2^{nd} mode resulting from discrete wavelet analysis of the db8 function for the (a) D1, (b) D2 and (c) D3 damage state



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



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



محتشم خان احمدی و همکاران

DDI بررسی اثر بار محوری بر حساسیت DDI در 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 نمی شود و به عبارتی، تغییرات بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است به شکلی که می توان 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 می ای ای می اورده شده



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

DDI بررسی اثر شدت آسیب بر حساسیت DDI و شناسایی آسیب برای هر یک از حالتهای آسیب D1، D2 و D3 در مودهای 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

های DDI ایجاد شده در محل آسیب مزبور در یک مختصات مکانی ثابت، مرتفع تر می شوند. به عنوان نمونه، در شکل های (۱۱ و ۱۲) نتایج عیب یابی مود اول حالت آسیب D3 با شدت آسیب ۲۰٪ در موقعیت آسیب ۲ و شدت های آسیب (آ) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۱ تحت اثر بار محوری ۰۵۹٬۰۰ آورده شده است. حساسیت DDI ناحیه آسیب ۱ به تغییر شدت آسیب مشاهده می شود. نیز، نتایج حاکی از آن است که حساسیت IDD موقعیت آسیب ۲ با تغییر شدت آسیب موقعیت ۱ تغییر نمی نماید؛ 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 1^{st} 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

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



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

۰۱–۴– بررسی شرایط تکیهگاهی بر حساسیت DDI
عیبیابی ستون تحت اثر بار محوری ۰/۵P _{cr} با دیگر شرایط
تکیهگاهی نیز انجام شده است. در جـدول (۷) بـار بحرانـی

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 1^{st} 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

DDI بررسی اثر مقطع ستون بر حساسیت DDI آشکارسازی موقعیت آسیب ID در ستون تحت اثر بار آشکارسازی موقعیت آسیب ID در ستون تحت اثر بار محوری ۰/۵*P*_{cr}، با مقاطع مربعی توخالی (ضخامت ۲ سانتی متر) و دایره ای توپر به ترتیب به طول ضلع ۲۵ و قطر ۲۰ سانتی متر 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 ID برای مقاطع مزبور به ترتیب ۱/۵۱۰۴۴۲۷۸ و ۱/۹۲۰۴۴ نیوتن محاسبه شده است. نتایج عیبیابی در شکلهای (۱۳ و ۱۴) نشان میدهد دلخواه است.



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

مکل ۱۷. تمودار DDI مود اول اسیب D3 تحت بار محوری D <i>P</i> _{cr} ، و
سرایط تکیهگاهی (آ) مفصلی – مفصلی، (ب) گیردار– مفصلی و (ج)
ئیردار – آزاد حاصل از تحلیل موجک گسسته



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

ستون با مقطع مربعی تـوپر بـه طـول ضـلع ۱۰ سـانتیمتر و ارتفاع ۴ متر با شرایط تکیهگاهی مفصلی- مفصـلی، گیـردار-مفصلی و گیردار- آزاد (شکل ۱۵) برای آسیب D3 محاسبه شده و در شـکلهای (۱۶ و ۱۷) نتـایج عیبیابی حاصـل از تحلیل موجک پیوسته و گسسته نشـان داده شـده است. بـه دلیـل تفـاوت انحنـایی شـکلهـای مـود شـرایط تکیـهگاهی، ضرایب جزئیات و شـاخصهای شناسـایی متفاوتی حاصـل 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 ۱**۵. شکل مود اول ستون تحت اثر بار محوری و شرایط تکیهگاهی



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

ىتون با آسيب D3 تحت بار محورى	شکل ۱۶ . نمودار DDI مود اول س
صلی – مفصلی، (ب) گیردار -مفصلی	۵ ۴ ٫۰ و شرایط تکیهگاهی (آ) مفع
و (ج) گیردار – آزاد حاصل از تحلیل موجک پیوسته	
$x \times 10^{-6}$ 1 st Mode (P = 0.5P _{cr})	
$E_{d} = 0.7E_{u}$	$E_d = 0.8E_u$

2

(a)

3

4

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-06-30

0

1



مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس

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 آربیو (Rbio) برای حالت آسیب ID انجام شده و نتایج عیبیابی در شکل (۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می شود 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 DI تحت بار محوری ۵۰/۵*۴ و* شرایط تکیهگاهی مفصلی – مفصلی با سایر توابع موجک حاصل از تحلیل موجک پیوسته







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

11- جمع بندی و نتیجه گیری سلامت سازهها، تامین 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 تصمیم گیری

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 کمانش 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 آسیب دیده 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 آسیب دیده بیشتر است؛ و با افزایش شدت آسیب، اختلاف فرکانسی وضعیتهای سالم و آسیب دیده 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 شکل های 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:
- + 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 چشم پوشی است.
 ۵- DDI پیشنهادی، قابلیت شناسایی آسیب در ستون تحت
 اثر بار محوری با هر مقطع و شرایط تکیهگاهی مختلف را
 دارد.
 مستقل بودن IDI موقعیتهای مختلف آسیب، کارآمدی

- [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 waveletdomain 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

مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس

روش پیشنهادی در شناسایی موقعیت های آسیب را نشان میدهد؛ زیرا در غیر این صورت، عدم شناسایی یک موقعیت آسیب ممکن است بر شناسایی سایر موقعیت های آسیب تاثیرگذار باشد. با توجه به نتایج، شاخص پیشنهادی به عنوان یک شاخص شناسایی موفق و کارآمد در آشکارسازی موقعیت های مختلف دارای آسیب معرفی می شود.

مراجع

- 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, Challeges. 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.