

## ردیابی آسیب مبتنی بر موجک در المان سازه‌های تیر فولادی

محشم خان احمدی<sup>۱</sup>، حمید محمدی گرمی<sup>۲</sup>، مجید قلهکی<sup>۳\*</sup>، بهزاد دژکام<sup>۴</sup>، محمد اقبال میری<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج

۲- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۴- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

۵- کارشناسی ارشد آنالیز، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

\* سمنان، صندوق پستی ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، [mgholhaki@semnan.ac.ir](mailto:mgholhaki@semnan.ac.ir)

### چکیده

وقوع خرابی در سازه‌ها امری اجتناب ناپذیر است و این موضوع که تجمع و گسترش خرابی‌های موضعی می‌تواند منشأ خرابی‌های کلی باشد، اهمیت و ضرورت پایش سلامتی سازه را نشان می‌دهد. آنالیز موجک پاسخ‌های سازه یکی از روش‌های تشخیصی آسیب با عملکرد شناسایی مطلوب در حوزه زمان-فرکانس است که با استفاده از آن اطلاعات بیشتری از پاسخ آنالیز شده سازه در دو حوزه زمان و فرکانس حاصل می‌گردد. با توجه به اینکه تیرها و ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌های هستند و انتظار می‌رود آخرین اعضای آسیب‌دیده سازه‌ها از تیرها یا ستون‌ها باشد؛ بنابراین، شناسایی آسیب در آن‌ها بیش از سایر المان‌های سازه‌ای اهمیت می‌یابد. در این نوشتار با به‌کارگیری داده‌های آنالیز مودال مدل اجزا محدود تیر فولادی و پیشنهاد روش تحلیلی آنالیز موجک به ردیابی موقعیت‌های مختلف آسیب در طول تیر با لحاظ نمودن آسیب به صورت کاهش مدول الاستیسیته فولاد پرداخته شد. تغییر کاهشی مقادیر فرکانسی در تمامی مدها به دلیل وجود آسیب رخ داده است. به منظور ردیابی آسیب، سیگنال شکل مود به دو صورت شکل مود حالت آسیب و تفاضل شکل مود حالت‌های سالم و آسیب به عنوان سیگنال ورودی تبدیل موجک تعریف گردید. سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات آنالیز موجک سیگنال ورودی، پرس نسبی حداکثری و حداقلی را در موقعیت‌های مختلف آسیب نشان دادند، به‌نحوی که مراکز آسیب با خطای صفر شناسایی گردید. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش شدت آسیب یک موقعیت آسیب، تنها نامنظمی ضرایب موجک آن موقعیت آسیب افزایش می‌یابد.

### واژگان کلیدی

پایش سلامت سازه، آنالیز مودال، آنالیز موجک، ردیابی آسیب

## Wavelet-based damage detection of steel beam-structures

M. Khanahmadi, H. Mohammady Garfamy, M. Gholhaki, B. Dejkan, M.E. Miri

### Abstract

Damage to structures is inevitable. Besides, the accumulation and spread of local damage can be a source of global damage; hence, the significance and necessity of monitoring the health of the structure. Wavelet analysis of structural responses is a method of damage detection with optimal performance in the time-frequency domain, which yields more information from the analyzed response of the structure in both time and frequency domains. As beams and columns are among the most fundamental structural elements and, expectably, the last elements to be damaged, it bears greater importance to identify damage in them than in other structural elements. This paper draws on modal analysis data of steel beams modeled in Abacus and a proposal of the wavelet analytical method to track different positions of damage along the beam, where the damages are defined as a decrease in the elastic modal. A decreasing shift in frequency values occurred in all modes due to damage. To detect the damage, the mode shape signal was defined as the damage mode shape and the differentiation between the healthy and the damage mode shapes as the wavelet transform input signal. The output signals from the wavelet analysis of the input signal indicated maximum and minimum relative fluctuations in different situations of damage so that the centers of damage were identified with zero error. The results also revealed that with increasing the severity of the damage, only the irregularity of the wavelet coefficients of that damage position increases.

### Keywords

Structural health monitoring (SHM), Modal analysis, Wavelet analysis, Damage detection

وقوع آسیب در ساختمان‌ها، پل‌ها، سکوها نفتی و به طور کلی سازه‌ها و المان‌های سازه‌ای امری اجتناب پذیر است. به طوری که تاکنون نمونه‌های بسیاری از انواع خرابی‌ها در سازه‌های مهندسی با خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی فراوان به ثبت رسیده است. این موضوع در مناطق لرزه‌خیز که تجمع و گسترش خرابی‌های موضعی در المان‌های سازه‌ای می‌تواند منشأ خرابی‌های کلی باشد، اهمیت و ضرورت پایش سلامتی سازه‌ها را نشان می‌دهد.

در نوشتارهای علمی پایش سلامتی سازه‌ها، آسیب عبارت است از هرگونه تغییر در خواص ماده یا هندسه سازه که عملکرد کلی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ هر چند تغییرات در پاسخ‌های سازه ناچیز باشد و در واقع، هدف از پایش سلامتی سازه‌ها، شناسایی تغییرات ناچیز و حتی بسیار ناچیز رخ داده در سازه‌ها است. اگر آسیب‌های موضعی به طریقی قابل شناسایی باشند، می‌توان با ترمیم به موقع محل آسیب و یا تعویض عضو محتمل آسیب از ایجاد خرابی‌های کلی جلوگیری نمود و هزینه‌های نگهداری سازه‌ها را به حداقل رساند و ایمنی لازم را تأمین نمود.

در دهه‌های اخیر توجه ویژه‌ای به مباحث تشخیصی و شناسایی آسیب در سازه‌ها و المان‌های سازه به منظور کنترل سلامت سازه انجام شده است. آنالیز پاسخ‌های سازه به عنوان سیگنال‌های پردازشی در حوزه زمان-فرکانس یکی از روش‌های تشخیصی آسیب با عملکرد شناسایی مطلوب است. در این میان، تبدیل موجک<sup>۱</sup> یک ابزار قدرتمند ریاضی پردازشی سیگنال‌ها است که به کمک آن می‌توان به این سؤال پاسخ داد که در یک محدوده زمانی چه فرکانسی رخ داده است (محدوده فرکانس را مشخص می‌کند). با استفاده از تبدیل موجک اطلاعات بیشتری از سیگنال آنالیز شده را بر اساس توانایی آن در محلی‌سازی سیگنال در دو حوزه زمان و فرکانس حاصل می‌گردد [۱]. بر این اساس تاکنون در زمینه پایش سلامتی سازه‌ها مورد توجه بسیاری از محققان بوده است.

**Katunin [۲]** با استفاده از آنالیز موجک و داده‌های مودال یک تیر ساخته شده از ورق پلیمری به بررسی ترک‌های متعدد پرداخت. نتایج نشان داد که برای شناسایی محل ترک، حذف نوبه از ضرایب جزئیات موجک لازم است. **Oyadiji** و **Zhong** [۳] با استفاده از تبدیل موجک ایستا<sup>۱</sup> (SWT) و داده‌های مودال به آشکارسازی ترک تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند و نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای داده‌های شکل مود

می‌توان محل آسیب را شناسایی نمود. **Bagheri** و **Kourehli** [۴] با استفاده از آنالیز موجک به شناسایی خرابی در سازه‌های تحت تحریک زلزله پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، از پاسخ‌های سرعت و تغییر مکان سازه‌های مورد نظر استفاده نمودند. مقادیر اوج پاسخ‌ها در ضرایب جزئیات موجک، زمان وقوع خرابی را نشان داد. **Xu** و همکارانش [۵] با به‌کارگیری موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی<sup>۳</sup> و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر<sup>۴</sup> موفق به شناسایی محل آسیب در اعضای صفحه‌ای شدند. **Lee** و همکارانش [۶] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته به شناسایی آسیب در سازه‌های پل خرابی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی سازی آسیب را دارد و می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر و کارآمد شناسایی آسیب مورد استفاده واقع گردد. **Li** و **Hao** [۷] به شناسایی آسیب زیر ساختاری با در نظر گرفتن آسیب به صورت کاهش سختی در سازه قاب صفحه‌ای ۷ طبقه مبتنی بر بازسازی پاسخ دامنه موجک پرداختند. آن‌ها موفق شدند با روش پیشنهادی، محل‌های آسیب را با برآورد دقیق میزان خسارت به درستی شناسایی نمایند. **Katunin** [۸] با استفاده از موجک‌های ناپایدار کوینکاکس<sup>۵</sup> تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود آسیب‌دیده صفحات کامپوزیتی پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک‌ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. **Patel** و همکارانش [۹] با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در یک ساختمان بتنی 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 خصوصیات ذاتی سازه از جمله جرم وجود دارد. **Rahami** و همکارانش [۱۰] با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته‌ای موجک به تشخیص آسیب در سکوها ثابت دریایی پرداختند و نشان دادند که میزان تغییرات مؤلفه‌های حساس به خسارت حتی در آسیب‌های با شدت کم به طور محسوسی به شدت خسارت‌های وارده به سکو وابسته است. **Yang** و **Oyadiji** [۱۱] روش جدیدی جهت شناسایی خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه با استفاده از سطح فرکانس مودال ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضرایب موجک سطح فرکانس مودال می‌توان محل و شکل خرابی صفحات کامپوزیتی چند لایه را مشخص نمود. **Rezaifar** و همکارانش [۱۲ و ۱۳] به شناسایی آسیب جدادشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس

رفتار برای این محدوده فرکانس، مقداری ثابت در حدود ۱۱ تا ۱۳ پیشنهاد شد. در تحقیق دیگری، **Gholhaki** و همکارانش [۲۰] با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشده نشان دادند که ضریب رفتار دیوار برشی فولادی با ورق نازک در حالت حدی برای سازه‌های بلند برابر با ۸ و سازه‌های کوتاه و میان مرتبه در حدود ۹ است.

تیرها و ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند و انتظار می‌رود در اثر زلزله و یا سایر عوامل اثرگذار نامطلوب، آخرین اعضای آسیب‌دیده در سازه‌ها از تیرها و ستون‌ها باشد؛ بنابراین، شناسایی آسیب در آن‌ها بیش از سایر المان‌های سازه‌ای اهمیت می‌یابد. بر این اساس در این نوشتار، پایش سلامتی در المان سازه‌ای تیر فولادی با استفاده از داده‌های آنالیز مودال به منظور ردیابی موقعیت‌های مختلف آسیب مبتنی بر روش تحلیلی آنالیز مودال مورد پژوهش واقع گردیده است. در ادامه، مبانی ریاضی تبدیل مودال ارائه می‌گردد.

## ۲- تبدیل مودال

تبدیل مودال یا یولت تبدیلی است که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه زمانی کوتاه استخراج نموده و نشان می‌دهد که با گذشت زمان به چه نحو 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 [۲۱].

در یک تقسیم‌بندی کلی، تبدیلات مودال به دو صورت تبدیل مودال پیوسته<sup>۶</sup> (CWT) و تبدیل مودال گسسته<sup>۷</sup> (DWT) تعریف شده‌اند که در این پژوهش نوع پیوسته آن مد نظر است و به صورت رابطه (۱) قابل بیان است.

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

که در آن  $\psi$  تابع مودال مادر و  $x(t)$  سیگنال ورودی است. نیز،  $a$  و  $b$  به ترتیب ضرایب مقیاس و انتقال مودال هستند. مقیاس‌های بالا ( $a > 1$ ) متناظر با جزئیات و مقیاس‌های پایین ( $a < 1$ ) متناظر با تقریب‌های سیگنال هستند.

تابع مودال باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

۱- انتگرال تابع مودال باید صفر باشد [۲۲ و ۲۳]؛ به

عبارتی:

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

داده‌های مودال آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها آسیب جداشدگی را توسط یک لایه پلی استایرن نازک در یکی از وجوه ستون بین هسته بتنی و جداره فولادی شبیه‌سازی نمودند و با استفاده از تبدیل مودال پیوسته موفق به شناسایی محل جداشدگی بین هسته بتنی و جداره فولادی شدند. **Hosseini vaez** و **Arefzadeh** [۱۴] با استفاده از آنالیز مودال 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 داده‌های استاتیکی، عواملی همچون نزدیکی ترک به موقعیت نمونه‌برداری در میزان ضرایب مودال تأثیرگذار است. **Khanahmadi** و همکارانش [۱۵] با استفاده از تبدیل مودال و شکل‌های مود صفحه فولادی به مقایسه ضرایب مودال در حالت‌های سالم و معیوب پرداختند. نتایج نشان داد که اغتشاشات در ضرایب مودال تولید شده حالت‌های معیوب در مقایسه با ضرایب مودال تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب چشم‌گیر است و در تمامی مدهای بررسی شده می‌توان محل‌های آسیب را شناسایی نمود. همچنین، آن‌ها نشان دادند که از تحلیل مودال شکل‌های مود اول نسبت به تحلیل مودال شکل‌های مود بالاتر، موقعیت‌های آسیب با هم‌سطحی مناسب‌تری از ضرایب مودال شناسایی می‌گردد. آن‌ها در تحقیق دیگری با استفاده از تبدیل مودال موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته پانلی شدند [۱۶]. **Rezafar** و همکارانش [۱۷ و ۱۸] با استفاده از تبدیل مودال پیوسته به تحلیل شکل مود در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب مودال تولید شده شناسایی گردید.

در بعضی مراجع با استفاده از مفاهیم فرکانسی به مطالعه سایر مباحث کاربردی در سازه‌ها پرداخته شده است. این موضوع نشان می‌دهد که خواص مودال سازه‌ای نه تنها در مسائل پایش سلامتی کاربرد دارد، بلکه در سایر مباحث سازه‌ای نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای، **Gholhaki** و همکارانش [۱۹] به بررسی اثر اندازه چشمه سخت‌کننده‌ها بر رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که کوچک شدن اندازه زیر صفحات باعث افزایش محسوس شکل‌پذیری و ضریب رفتار می‌گردد. در خصوص سازه‌ها با سختی زیاد (فرکانس بیشتر از حدود ۲ هرتز) افزایش ضریب رفتار ناچیز بوده و به طور کلی، ضریب

۲- انرژی آن محدود باشد [۲۲ و ۲۳]؛ به عبارتی:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (۳)$$

۳- باید در رابطه (۴) صدق کند [۲۲-۲۴]؛

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (۴)$$

که در آن  $\Psi$  تبدیل فوریه  $\psi$  و  $\omega$  بیانگر بسامد است. رابطه (۲) پیشنهاد می‌کند تابع به صورت نوسانی است. رابطه (۳) به این معنی است که بیشترین انرژی در تابع موجک برای یک بازه زمانی کوتاه نا محدود نمی‌شود [۲۳].

#### ۴- تحلیل مودال

از دینامیک سازه‌ها، معادله ارتعاش آزاد یک سیستم سازه‌ای  $n$  درجه آزادی به صورت رابطه (۵) قابل بیان است.

$$M \left( \frac{d^2 U}{dt^2} \right) + KU = 0 \quad (۵)$$

که در آن ماتریس‌های  $M$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های مربعی  $n \times n$  جرم و سختی و  $U$  بردار پاسخ سازه هستند. معادله مشخصه یا کمکی معادله دیفرانسیلی-ماتریسی (۵) با در نظر گرفتن پاسخ‌هایی به شکل توابع نمایی به صورت رابطه (۶) بیان می‌گردد.

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (۶)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس طبیعی سازه است.

معادله مشخصه (۶) با یک معادله جبری چندجمله‌ای درجه  $n$  متناظر است که از حل آن  $n$  مقدار برای فرکانس حاصل می‌شود و هر فرکانس نظیر یک شکل مود است.

هرگونه تغییر در خواص ماده از جمله مدول الاستیسیته بر ماتریس‌های ذاتی سازه (جرم و سختی) تأثیرگذار است و در نتیجه اثرات آن بر پاسخ‌های فرکانسی سازه (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) لحاظ می‌گردد؛ بنابراین، از بررسی پاسخ‌ها می‌توان مسئله پایش سلامتی سازه را مورد پژوهش قرار داد. در ادامه به بررسی مسئله وجود آسیب پرداخته شده است.

#### ۵- مسئله وجود آسیب

تحلیل مودال المان سازه‌ای تیر فولادی در حالت‌های سالم و آسیب با در نظر گرفتن ابعاد مش تحلیلی به طول ۳ سانتی‌متر در محیط نرم افزار اجزا محدود ABAQUS انجام شده است. در جدول (۲) مقادیر فرکانسی شش مود اول و در شکل (۲) شکل مود نظیر هر فرکانس در حالت سالم آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در اثر آسیب مقدار فرکانس مودهای مختلف تمامی حالت‌های آسیب از فرکانس متناظر از حالت سالم کمتر است. همچنین، مقادیر فرکانسی حالت آسیب D4 از مقادیر فرکانسی حالت آسیب D3 و مقادیر فرکانسی حالت آسیب D1 و D2 کمتر است و این به دلیل وجود آسیب (کاهش مدول الاستیسیته) در سازه است.

#### ۳- مدل‌سازی اجزا محدود

المان تیر فولادی (شکل (۱)) به طول ۴ متر و با مقطع IPB220 و خصوصیات مکانیکی مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسن ۰/۳ با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل با استفاده از المان Wire-Beam با در نظر گرفتن حالت‌های سلامتی بدون آسیب و آسیب D1 تا D4 در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. مشخصات حالت‌های آسیب مزبور در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- المان سازه‌ای تیر با شرایط تکیه‌گاهی و نواحی آسیب

جدول ۱- مشخصات آسیب در تیر فولادی شکل (۱)

آسیب	تعداد	شماره	محدوده	مرکز	درصد آسیب
D1	۱	۱	۰/۹۵-۱/۰۵	۱	۳۰
D2	۱	۲	۱/۹۵-۲/۰۵	۲	۲۵
D3	۲	۱	۰/۹۵-۱/۰۵	۱	۳۰
		۲	۱/۹۵-۲/۰۵	۲	۲۵
D4	۳	۱	۰/۹۵-۱/۰۵	۱	۳۰
		۲	۱/۹۵-۲/۰۵	۲	۲۵
		۳	۲/۹۵-۳/۰۵	۳	۳۰

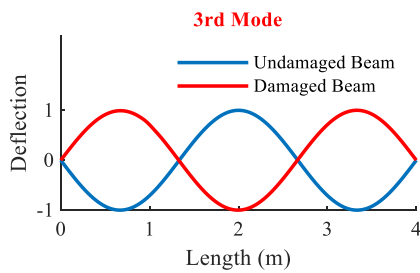
جدول ۲- فرکانس‌های شش‌مده اول حالت‌های سالم و آسیب (هرتز)

شماره مود	حالت سالم	حالت آسیب			
		D4	D3	D2	D1
۱	۴۵/۳۱۴	۴۴/۷۱۶	۴۴/۹۵۲	۴۵/۰۷۳	۴۴/۴۸۵
۲	۱۷۲/۸۱	۱۷۱/۰۴	۱۷۲/۶۶	۱۷۱/۱۹	۱۶۹/۴۵
۳	۳۶۲/۸۵	۳۵۸/۶۰	۳۶۰/۵۰	۳۶۰/۹۶	۳۵۶/۶۹
۴	۵۹۴/۶۷	۵۹۱/۲۱	۵۹۳/۱۵	۵۹۲/۷۱	۵۸۹/۳۰
۵	۸۵۲/۰۳	۸۴۳/۴۳	۸۴۷/۸۹	۸۴۷/۵۴	۸۳۹/۰۵
۶	۱۱۲۳/۹	۱۱۱۳/۴	۱۱۱۹/۴	۱۱۱۷/۹	۱۱۰۷/۵

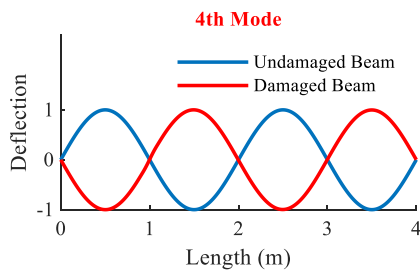
که در آن  $\phi_i^u$  و  $\phi_i^d$  به ترتیب شکل‌های سالم و آسیب مود نام هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ماهیت انحنایی شکل‌های مود بر اثر آسیب با صرف نظر از علامت آن‌ها تغییر نمی‌کند و زاویه بین شکل‌های مود سالم و آسیب برابر با مقدار تقریبی صفر یا ۱۸۰ درجه است. در جدول (۳) زاویه بین شکل‌های مود سالم و آسیب بر حسب درجه ارائه شده است. مفهوم تصویری زاویه نزدیک به ۱۸۰ درجه بین شکل‌های مود سوم، چهارم و پنجم سالم و آسیب D1 در شکل (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۳- مقدار زاویه بین شکل‌های مود سالم و آسیب (درجه)

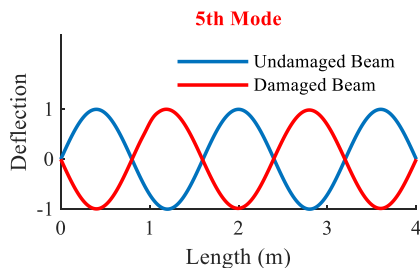
نام آسیب	شماره مود				
	۱	۲	۳	۴	۵
D1	۰/۲۳۵	۰/۵۲۷	۱۷۹/۴۱۶	۱۷۹/۳۵۷	۱۷۸/۹۰۲
D2	۰/۱۱۲	۱۷۹/۹۱۸	۰/۳۳۸	۰/۴۱۶	۰/۶۳۲
D3	۰/۲۲۸	۰/۵۳۲	۰/۷۲۰	۱۷۹/۲۷۵	۱/۲۵۹
D4	۰/۰۵۴	۰/۲۴۳	۰/۶۲۴	۰/۶۵۱	۱/۰۴۱



الف) مود سوم

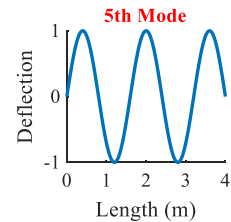
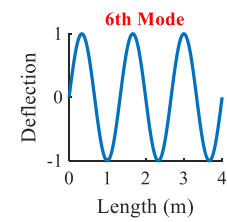
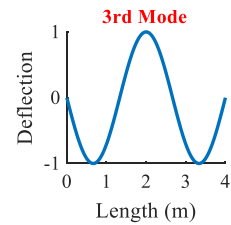
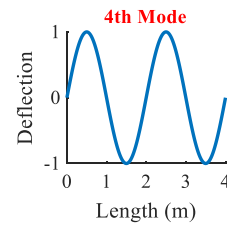
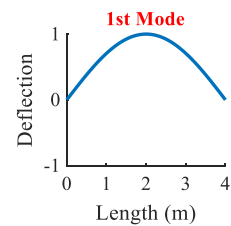
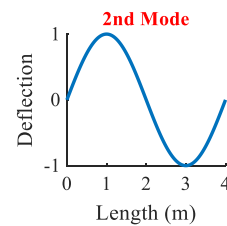


ب) مود چهارم



ج) مود پنجم

شکل ۳- شکل‌های مود سالم و آسیب D1



شکل ۲- شکل‌های مود اولیه (سالم) المان سازه‌ای تیر

## ۶- ردیابی آسیب

تبدیل موجک یک روش قدرتمند پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان-فرکانس است که قابلیت محلی سازی سیگنال را در دو حوزه زمان و فرکانس دارد. بر همین اساس سیگنال ورودی آن جهت آنالیز و شناسایی آسیب بر مبنای شکل‌های مود به صورت شکل مود آسیب یا تفاضل شکل‌های مود سالم و آسیب تعریف می‌گردد.

$$S_i = \phi_i^u - \phi_i^d \quad (۷)$$

یا

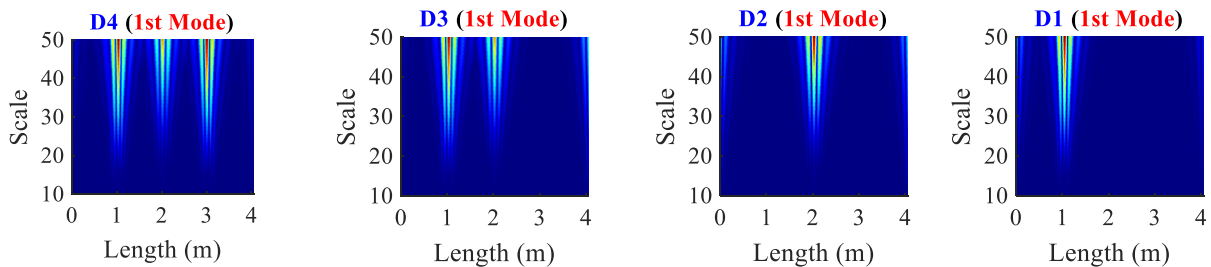
$$S_i = \phi_i^d \quad (۸)$$

در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نتایج ردیابی آسیب با استفاده از تابع موجک  $\text{coif5}$  با تعریف سیگنال ورودی با رابطه (۸) ارائه گردیده است.

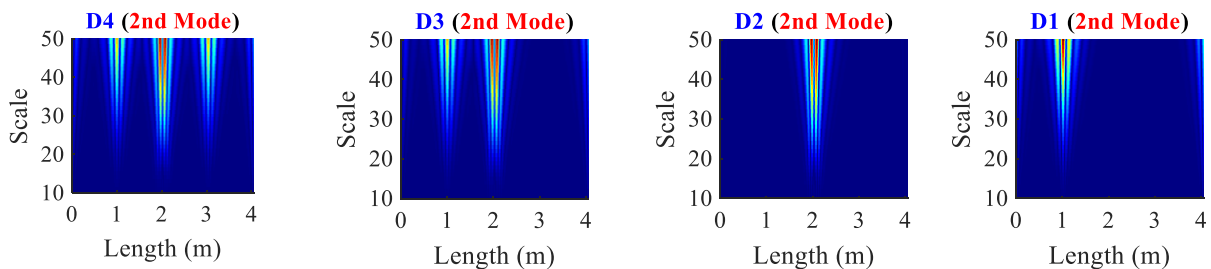
نتایج ردیابی آسیب در حالت‌های مختلف آسیب D1 تا D4 در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان می‌دهد که بدون نیاز به پاسخ شکل مود اولیه یا سالم سازه تیر فولادی نیز می‌توان با استفاده از روش تحلیلی موجک موقعیت‌های مختلف آسیب را ردیابی و شناسایی نمود. همچنین، نتایج نموداری تمامی مودها نشان می‌دهد که با اضافه شدن موقعیت‌های آسیب جدید، ضرایب موجک موقعیت‌های آسیب قبلی دچار تغییر نمی‌گردد؛ به عبارتی، ضرایب موجک هر یک از موقعیت‌های مختلف آسیب به ضرایب موجک دیگر موقعیت‌های آسیب وابسته نیست و این یک امتیاز مثبت برای روش تشخیصی و ردیابی آسیب آنالیز موجک محسوب می‌شود.

در تعریف سیگنال ورودی تبدیل موجک در رابطه (۷) در صورتی که زاویه بین شکل‌های مود سالم و آسیب تقریباً  $180^\circ$  درجه باشد، شکل مود حالت آسیب در یک منفی ضرب می‌گردد. همچنین، به منظور افزایش دقت شناسایی در تعریف سیگنال ورودی تبدیل موجک از درونیابی شکل مودها استفاده می‌گردد؛ لازم به ذکر است بررسی‌های اولیه نشان داد که درونیابی اسپیلاین مکعبی مناسب‌ترین درونیابی می‌باشد.

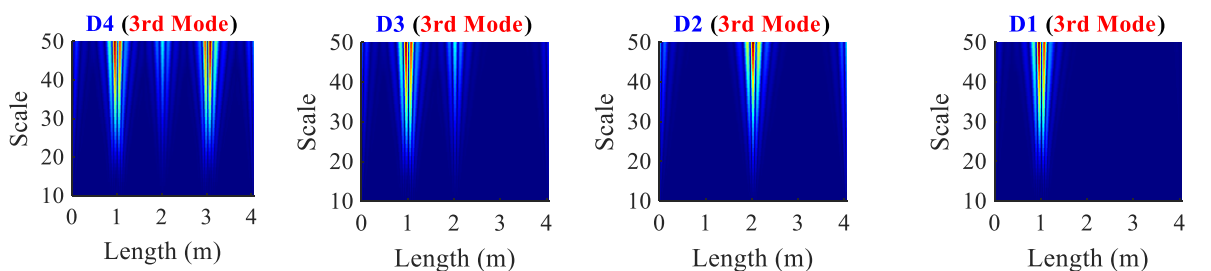
بررسی‌های ردیابی آسیب با به‌کارگیری توابع موجک متعددی انجام شده است که با ترسیم سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات آنالیز موجک سیگنال ورودی در راستای طول تیر، موقعیت‌های آسیب با دقت بالایی شناسایی شده‌اند. در شکل‌های (۴) تا (۷) نتایج نموداری تحلیلی تابع موجک  $\text{coif5}$  با تعریف سیگنال ورودی با رابطه (۷) به صورت دو بعدی و در شکل‌های (۸) تا (۱۱) سه بعدی نشان داده شده است. همچنین،



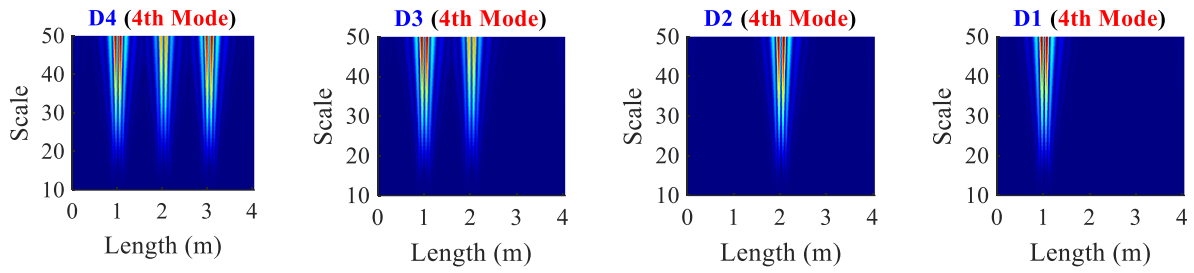
شکل ۴- نمودار دو بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود اول حالت‌های آسیب D1 تا D4



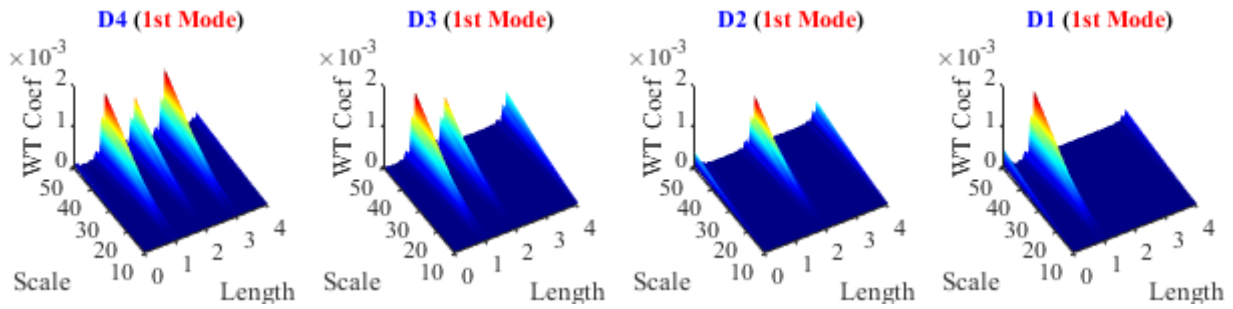
شکل ۵- نمودار دو بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود دوم حالت‌های آسیب D1 تا D4



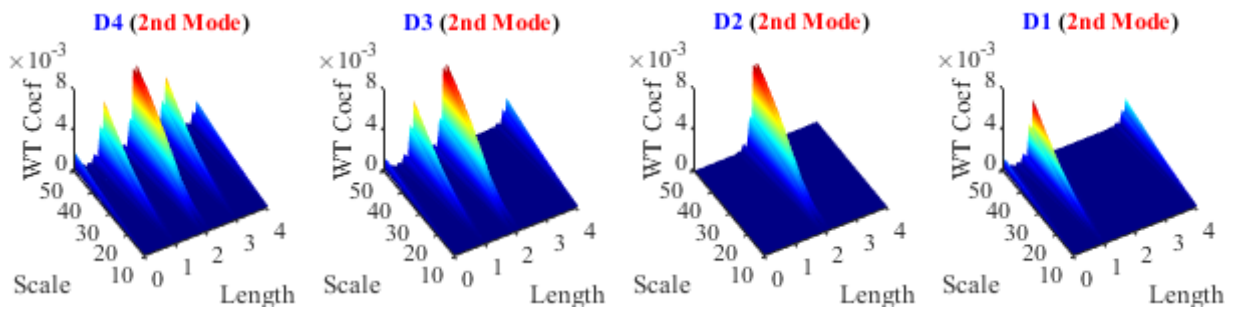
شکل ۶- نمودار دو بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود سوم حالت‌های آسیب D1 تا D4



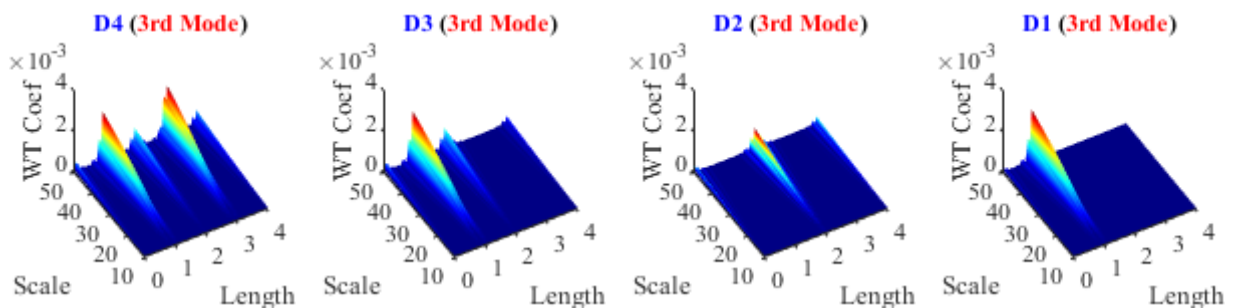
شکل ۷- نمودار دو بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود چهارم حالت‌های آسیب D1 تا D4



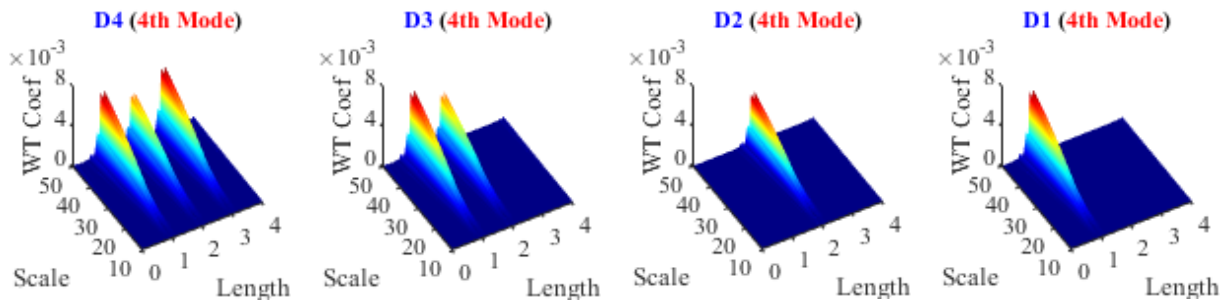
شکل ۸- نمودار سه بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود اول حالت‌های آسیب D1 تا D4



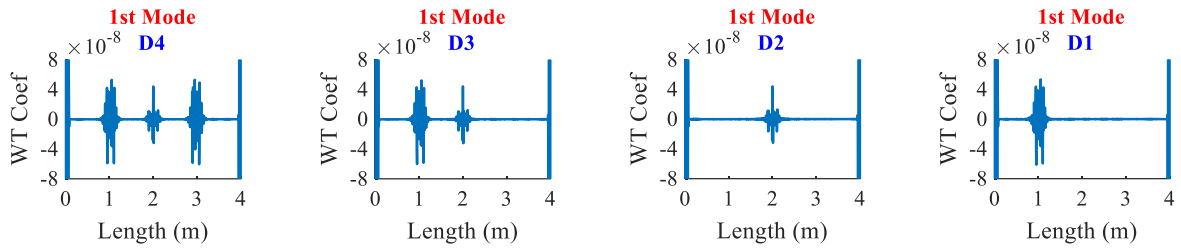
شکل ۹- نمودار سه بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود دوم حالت‌های آسیب D1 تا D4



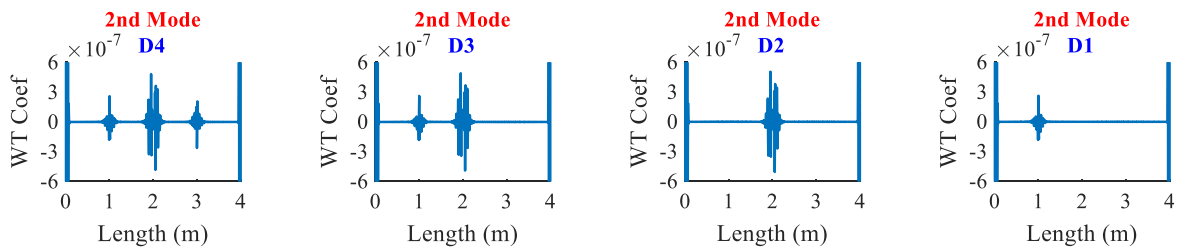
شکل ۱۰- نمودار سه بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود سوم حالت‌های آسیب D1 تا D4



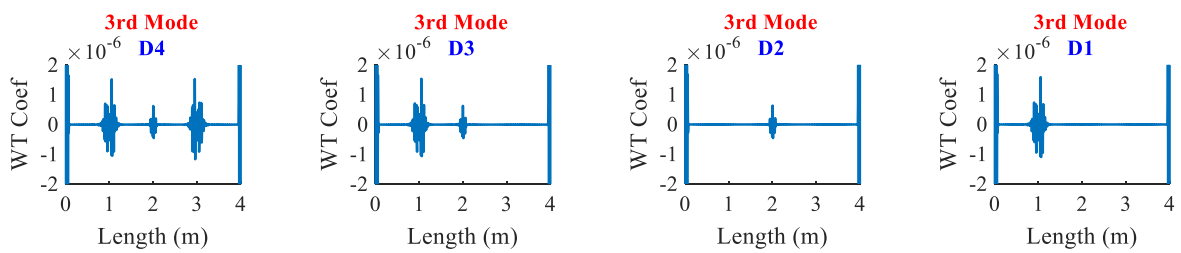
شکل ۱۱- نمودار سه بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مود چهارم حالت‌های آسیب D1 تا D4



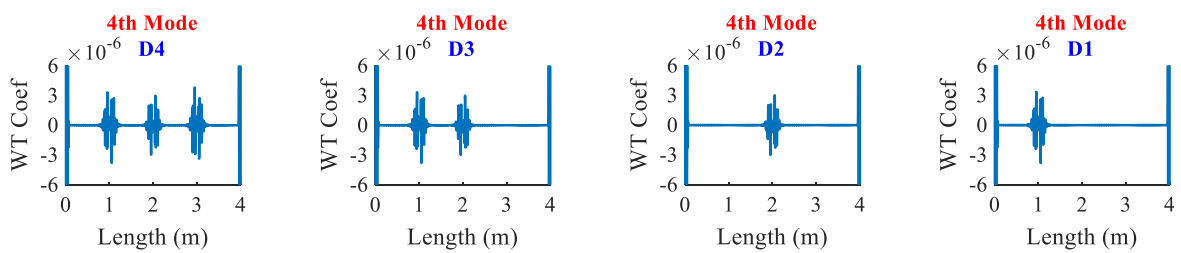
شکل ۱۲- نمودار ضرایب موجک سیگنال ورودی مود اول حالت‌های آسیب D1 تا D4



شکل ۱۳- نمودار ضرایب موجک سیگنال ورودی مود دوم حالت‌های آسیب D1 تا D4



شکل ۱۴- نمودار ضرایب موجک سیگنال ورودی مود سوم حالت‌های آسیب D1 تا D4

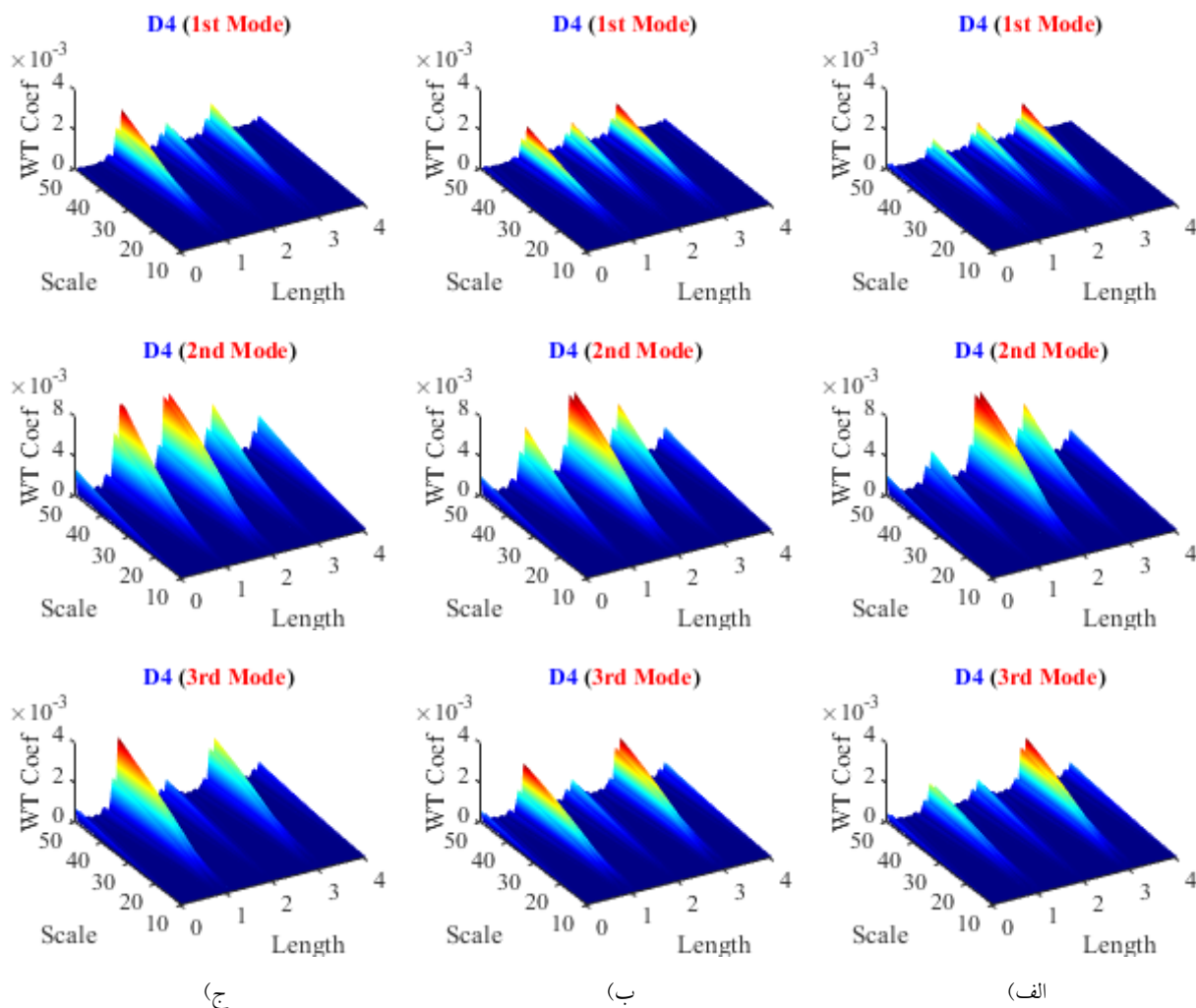


شکل ۱۵- نمودار ضرایب موجک سیگنال ورودی مود چهارم حالت‌های آسیب D1 تا D4

### ۷- بررسی اثر شدت آسیب

به منظور حساسیت سنجی روش تشخیص آسیب آنالیز موجک به شدت آسیب و همچنین، بررسی اثرگذاری شدت آسیب یک موقعیت آسیب بر ضرایب موجک سایر موقعیت‌های آسیب، شدت‌های آسیب موقعیت‌های آسیب ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۲۵٪ و ۳۰٪ کاهش مدول الاستیسیته به صورت ثابت تعریف گردید و شدت آسیب موقعیت ۱ به صورت (الف) ۲۰٪، (ب) ۳۰٪ و (ج) ۴۰٪ تعریف شد. نتایج نموداری تحلیل موجک

سیگنال ورودی تعریفی با رابطه (۷) برای سه مود اول در شکل (۱۶) آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در مودهای مورد بررسی در تمامی مقیاس‌ها، با افزایش شدت آسیب موقعیت ۱ (کاهش بیشتر مدول الاستیسیته در موقعیت ۱) تنها ضرایب موجک موقعیت آسیب ۱ تغییر افزایشی دارد و ضرایب موجک سایر موقعیت‌های آسیب به تغییر شدت آسیب موقعیت ۱ وابسته نیستند و این یک مزیت برای الگوریتم ردیابی آنالیز موجک محسوب می‌شود.



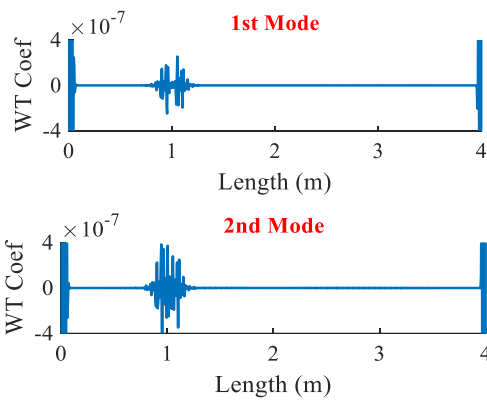
شکل ۱۶- نمودار سه بعدی ضرایب موجک سیگنال ورودی مودهای اول تا چهارم حالت آسیب D4 با شدت آسیب الف) ۲۰٪، ب) ۳۰٪ و ج) ۴۰٪

### ۸- ردیابی آسیب با دیگر شرایط تکیه‌گاهی

شناسایی آسیب با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - مفصلی و گیردار - گیردار انجام شده است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) شکل‌های مود اول و دوم تیر فولادی با حالت آسیب D1 و شرایط

تکیه‌گاهی فوق‌الذکر نشان داده شده است.

نتایج عیب‌یابی با استفاده از سیگنال ورودی رابطه (۸) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی روشی کارآمد برای تشخیص آسیب تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی متفاوت است.



شکل ۲۰- نمودار ضرایب موجک مودهای اول و دوم با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار

درجات آزادی شکل‌های مود حالت‌های سلامتی بدون آسیب و آسیب D1 با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل با استفاده از کد نویسی روابط (۹) لحاظ شده است.

$$r = 2 * (\text{rand}(\text{numel}(\phi_i^{d1}), 1) - 0.5)$$

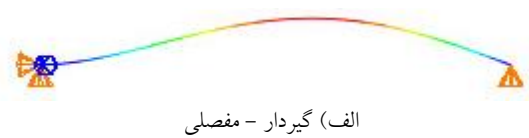
$$R = 1 + \text{Noise} * r \quad (9)$$

$$\phi_i^{d1, \text{Noise}} = \phi_i^{d1} * R$$

در شکل (۲۱) نتایج عیب‌یابی مود اول حالت آسیب D1 متأثر از درصدهای مختلف نویز با استفاده از تعریف سیگنال ورودی با رابطه (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که چون  $r$  یک ماتریس تصادفی با مقادیر ماکزیمم و مینیمم نسبی ۱ و -۱ است، تأثیر رفت و برگشتی نویزهای اعمالی لحاظ می‌گردد. همچنین، در هر بار اجرای برنامه کد نویسی شده آشکارساز آسیب، به دلیل ویژگی تصادفی بودن  $r$  مقادیر متفاوت ضرایب موجک در موقعیت آسیب حاصل می‌گردد.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

وقوع آسیب در سازه‌ها امری اجتناب ناپذیر است و با گذشت زمان و تجمع خسارت‌های جزئی، سلامت کلی سازه به خطر خواهد افتاد و ممکن است در اثر خرابی کلی سازه، هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی غیر قابل جبرانی به وجود آید؛ بنابراین، کنترل سلامت سازه دارای اهمیت بوده و توجه ویژه‌ای به آن لازم است. تاکنون روش‌های متعددی برای شناسایی و ردیابی آسیب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل پایش و کنترل سلامت سازه ارائه شده است. برخی از این روش‌ها مربوط به حوزه پردازش سیگنال‌ها است به این صورت که با پاسخ‌های سازه



الف) گیردار - مفصلی



ب) گیردار - گیردار

شکل ۱۷- شکل‌های مود اول المان سازه‌ای تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف

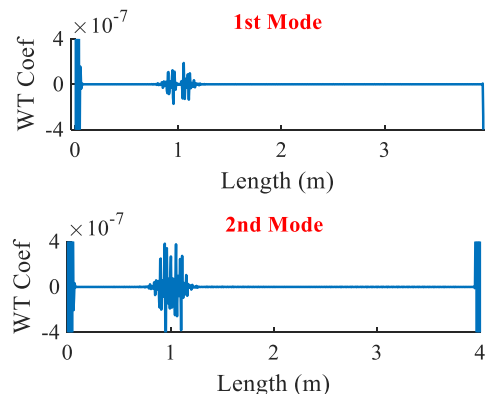


الف) گیردار - مفصلی



ب) گیردار - گیردار

شکل ۱۸- شکل‌های مود دوم المان سازه‌ای تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف



شکل ۱۹- نمودار ضرایب موجک مودهای اول و دوم با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - مفصلی

#### ۹- ردیابی آسیب با در نظر گرفتن اثر نویز بر سیگنال ورودی آنالیز موجک

در مسائل پایش سلامتی سازه‌ها توصیه می‌شود که اثر ارتعاشات محیطی بر پاسخ‌های سازه در محیط نرم افزار تحلیل سازه‌ای و یا به صورت جداگانه و تصادفی در محیط نرم افزار MATLAB اعمال گردد و کارآمدی روش پیشنهادی شناسایی آسیب بررسی شود. در این مقاله، اثر نویزهای تصادفی بر جابجایی نسبی

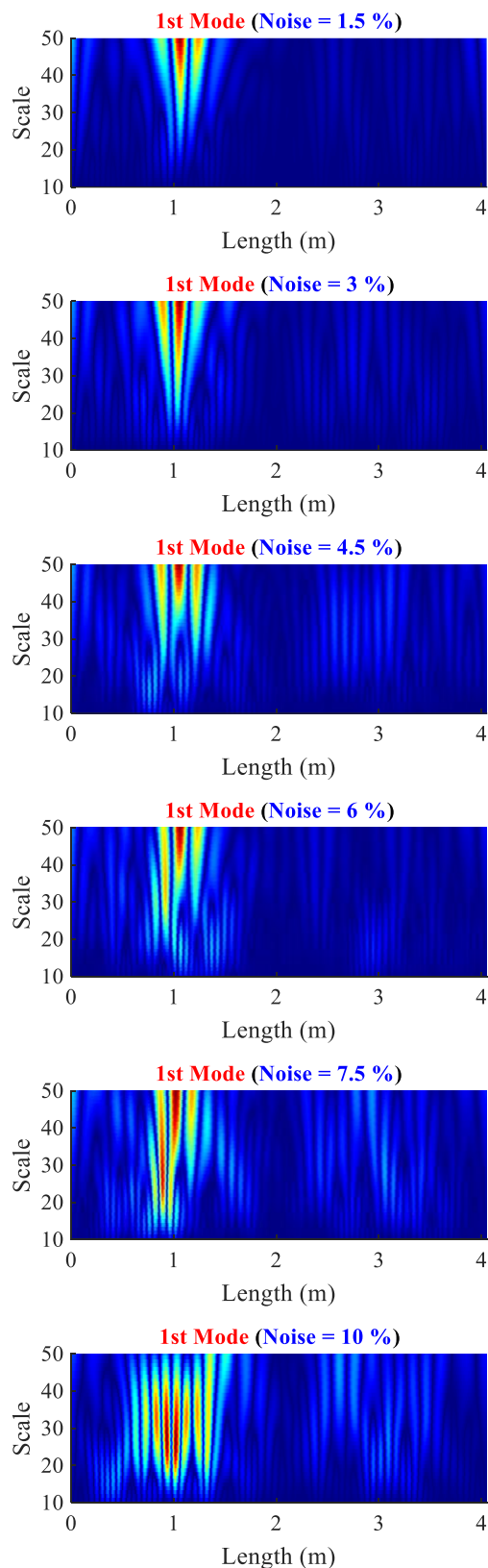
همانند سیگنال‌های پردازشی رفتار می‌شود. تبدیل موجک یکی از روش‌های موفق تحلیلی سیگنال‌ها در حوزه زمان و فرکانس است که با استفاده از آن اطلاعات بیشتری از سیگنال آنالیز شده بر اساس توانمندی آن در محلی سازی سیگنال در دو حوزه زمان و فرکانس ارائه می‌گردد.

در این نوشتار، مسئله ردیابی آسیب در المان سازه‌ای تیر فولادی به عنوان یکی از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای در صنعت ساختمان‌سازی، پل‌ها و ماشین‌آلات ساختمانی مطرح گردید. ابتدا مدل‌سازی در محیط نرم افزار اجزا محدود انجام شد و با آنالیز مودال در وضعیت‌های بدون آسیب و با آسیب مورد تحلیل واقع شد. نتایج اولیه، تغییر کاهشی مقادیر فرکانسی را به دلیل وجود آسیب نشان داد؛ فرکانس تمامی مودهای حالت‌های آسیب از فرکانس نظیر مود حالت سالم کمتر است و همچنین، با اضافه شدن موقعیت آسیب جدید به المان سازه‌ای تیر فولادی، مقادیر فرکانسی بیشتر کاهش یافت. با استخراج شکل‌های مود سالم و معیوب، سیگنال ورودی تبدیل موجک به دو صورت شکل مود معیوب و تفاضل شکل‌های مود سالم و معیوب تعریف گردید. بررسی‌ها نشان داد که سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات ضرایب موجک آنالیز موجک سیگنال ورودی دارای اطلاعات مفید و سودمندی جهت شناسایی و ردیابی موقعیت‌های مختلف آسیب هستند. نتایج نموداری مربوط به تابع موجک  $coif5$  گزارش شده در متن مقاله نشان می‌دهد که:

۱- سیگنال‌های خروجی حاصل از جزئیات آنالیز موجک سیگنال شکل مود این قابلیت را دارند که با ایجاد پرش نسبی حداقلی و حداکثری در موقعیت‌های مختلف آسیب در تمامی مقیاس‌های بزرگ‌تر از واحد، موقعیت‌های مختلف آسیب را ردیابی و شناسایی نمایند.

۲- نتایج نموداری تمامی مودها نشان می‌دهد که با اضافه شدن موقعیت آسیب جدید، تغییری در مقادیر پرش نسبی حداقلی و حداکثری ضرایب موجک در موقعیت‌های آسیب قبلی به وجود نمی‌آید؛ به عبارتی، مقادیر ضرایب موجک موقعیت‌های مختلف آسیب مستقل از هم هستند و این یک مزیت برای روش تشخیصی موجک محسوب می‌گردد، زیرا عدم شناسایی یک موقعیت آسیب تأثیری بر روش تشخیصی موجک در شناسایی سایر موقعیت‌های آسیب نمی‌گذارد.

۳- سیگنال شکل مود ورودی تبدیل موجک به صورت تعریفی تنها با شکل مود حالت آسیب نشان می‌دهد که بدون نیاز به پاسخ‌های شکل مود سالم نیز می‌توان با قابلیت بالایی



شکل ۲۱- نمودار ضرایب موجک مود اول حالت آسیب  $D1$  با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل با در نظر گرفتن اثر درصدهای متفاوت نویزهای تصادفی

continuous relative wavelet entropy method", *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 1-14.

[7] Li, J. and Hao, H. (2014), "Substructure damage identification based on wavelet-domain response reconstruction", *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 1-17.

[8] Katunin, A. (2015), "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.

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

[۱۰] [رحامی، ح، امینی تهرانی، ح، اخوات، م. و قدرتی امیری، غ.ر. (۱۳۹۵). "شناسایی خسارت در سکوهاى ثابت دریایی با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته موجک"، نشریه علمی و پژوهشی مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، دوره ۴۸، شماره ۳، ص. ۲۴۱-۲۴۸.

[11] Yang, C. and Oyadiji, S.O. (2017), "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Journal of Computers and Structures*, Vol. 179, pp. 109-126.

[۱۲] [رضایی فر، ا، یونسی، ع، قلهکی، م. و اسفندیاری، ا. (۱۳۹۷). "شناسایی آسیب جداشدگی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی"، نشریه علمی و پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۴، ص. ۹۳-۱۰۶.

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

[۱۴] [حسینی واعظ، س.ر، عارف زاده، ط. (۱۳۹۵). "مقایسه تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد وزنی با استفاده از تبدیل موجک"، نشریه علمی و پژوهشی مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۵، شماره ۱/۱، ص. ۳۳-۴۱.

[۱۵] [خان احمدی، م، رضایی فر، ا، و قلهکی، م. (۱۴۰۰). "عیب‌یابی صفحات فولادی مبتنی بر مقایسه نتایج تحلیلی تبدیل موجک گسسته دو بعدی شکل مودهای اولیه و ثانویه"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۸، شماره ۵، ص. ۱۹۸-۲۱۴.

[۱۶] [خان احمدی، م، رضایی فر، ا، و قلهکی، م. (۱۳۹۸). "عیب‌یابی دیوارهای پیش‌ساخته (صفحات 3D پانل) مبتنی بر الگوریتم شناسایی تبدیل موجک"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، انتشار آنلاین. <https://doi.org/10.22065/JSC.2019.197470.1923>

[۱۷] [حنطه، م، رضایی فر، ا، و قلهکی، م. (۱۳۹۸). "انتخاب تابع موجک مناسب در تشخیص خرابی ساختمان پیش ساخته پانلی مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و روش عددی"، نشریه مهندسی عمران شریف، انتشار آنلاین. <https://doi.org/10.24200/J30.2020.56237.2812>

[18] Hanteh, M. and Rezaifar, O. (2021), "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", *Journal of Structures*, Vol. 29, pp. 701-713.

موقعیت‌های مختلف آسیب را ردیابی و شناسایی نمود؛ و این یک مزیت برای الگوریتم ردیابی موجک محسوب می‌شود، زیرا در بسیاری از حالات پایش سلامت سازه‌ها به خصوص سازه‌های ارزشمند به جا مانده از گذشتگان که نمادی از تاریخ و فرهنگ آن ملت است، اطلاعات اولیه سازه‌ها در دسترس نمی‌باشد.

۴- روش پیشنهادی ردیابی آسیب با الگوریتم تبدیل موجک نشان می‌دهد که با افزایش شدت آسیب یک موقعیت آسیب، تنها ضرایب موجک آن موقعیت آسیب تغییر می‌کند (افزایش می‌یابد) و تأثیری بر ضرایب موجک سایر موقعیت‌های آسیب نمی‌گذارد؛ به عبارتی، ضرایب موجک هر یک از موقعیت‌های آسیب تنها متأثر از شدت آسیب آن موقعیت آسیب است.

۵- روش آنالیز موجک برای تشخیص آسیب المان سازه‌ای تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف، همچنان عملکرد شناسایی موفقی دارد.

۶- روش پیشنهادی قابلیت مطلوبی در شناسایی موقعیت آسیب با استفاده از سیگنال متشکل از شکل‌های مود آلوده به نویز دارد و برای درصدهای مختلف نویزهای تصادفی نتایج قابل قبولی حاصل می‌گردد.

روش تحلیلی موجک به عنوان یک روش مطمئن تشخیصی و ردیابی آسیب در المان‌های سازه‌ای تیر و ستون است که در این پژوهش با معرفی سیگنال‌های شکل مود به عنوان ورودی تبدیل موجک، مراکز مختلف آسیب با خطای صفر (خطای بسیار ناچیز) آشکار گردید.

#### ۱۱- مراجع

[1] Zhou, S., Tang, B. and Chen, R. (2009), "Comparison between non-stationary signals fast fourier transform and wavelet analysis", *Intelligent Interaction and Affective Computing, International Asia Symposium, IEEE*.

[2] Katunin, A. (2010), "Identification of multiple cracks in composite beams using discrete wavelet transform", *Scientific Problem of Machines Operation and Maintenance*, Vol. 45, pp. 41-52.

[3] Zhong, S. and Oyadiji, S.O., (2011), "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 18, pp. 169-190.

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

[5] 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*, Vol. 12, pp. 457-468.

[6] Lee, S.G., Yun, G.J. and Shang, S. (2014), "Reference-free damage detection for truss bridge structures by



[۱۹] قلعهکی، م.، کریمی، م.، و پاچیده، ق. (۱۳۹۷)، "مطالعه اثر اندازه چشمه سخت‌کننده‌ها بر روی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ویژه ۴، ص. ۷۳-۸۷.

[۲۰] قلعهکی، م.، پاچیده، ق.، رضایی فر، ا.، و قزوینی، س. (۱۳۹۸)، "تعیین ضریب رفتار دیوار برشی فولادی با ورق نازک به روش تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA)"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۲، ص. ۲۱۱-۲۲۴.

[21] Mallat, S. (2008), "A wavelet tour of signal processing: the sparse way", Academic Press.

[22] Zhongm, S. and Oyadiji, S.O. (2011), "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", Computers and Structures, Vol. 89, pp. 127-148.

[23] Hansang, K. and Hani, M. (2004), "Damage detection of structures by wavelet analysis", Engineering Structures, Vol. 26, pp. 347-362.

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

## پی نوشت

<sup>1</sup> Wavelet transform

<sup>2</sup> Stationary Wavelet Transform (SWT)

<sup>3</sup> Two-dimensional directional Gaussian wavelets

<sup>4</sup> Laser scanned operating deflection shapes

<sup>5</sup> Quincunx

<sup>6</sup> Continuous Wavelet Transform (CWT)

<sup>7</sup> Discrete Wavelet Transform (DWT)