

## شناسایی موقعیت و شدت ترک‌های چندگانه در تیر طره‌ی بتن آرمه با استفاده از تحلیل مودال و آنالیز موجک

طاهره عارف زاده<sup>۱</sup>، سید روح الله حسینی واعظ<sup>۲\*</sup>، حسین نادرپور<sup>۳</sup>، امیر عزالدین<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

در این تحقیق روش شناسایی ترک‌های چندگانه در تیر طره بتن مسلح بر پایه تبدیل موجک ارائه شده است. به این منظور، سناریوهای مختلف خرابی در تیر بتنی در نظر گرفته شد. سپس، شکل‌های مودی چهار مود اول تیر در حالت سالم و آسیب دیده با استفاده از نرم افزار *ABAQUS* استخراج گردید. شکل‌های مودی بدست آمده برای شناسایی آسیب‌های در نظر گرفته شده، تحت تبدیل موجک پیوسته و گسسته قرار گرفتند. مشاهده شد که موجک گسسته به موقعیت آسیب برای تیر بتنی تعریف شده در این مطالعه، نسبت به موجک پیوسته حساس تر می باشد. همچنین اثر مرتبه مودها و تاثیر فاصله آسیب از تکیه‌گاه در شناسایی آسیب ارزیابی شد. ملاحظه شد که فاصله ترک‌ها از یکدیگر تاثیری در شناسایی موقعیت آنها ندارد.

**کلمات کلیدی:** شناسایی آسیب، تیر بتنی، شکل مودی، موجک پیوسته، موجک گسسته

\*نویسنده مسئول: سید روح الله حسینی واعظ.

پست الکترونیکی: hoseinivaez@qom.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

## ۱- مقدمه

اعمال نیروی زلزله، بارگذاری بیش از ظرفیت سازه، ترک خوردگی و سایر رخداد‌های غیرقابل پیش‌بینی در طول عمر یک سازه از جمله مواردی است که سلامت سازه را مورد تهدید قرار می‌دهند. به عنوان مثال، ترک سختی سازه در محل وقوع آسیب را کاهش می‌دهد. بنابراین، با افزایش تغییرمکان در محل آسیب‌دیده منجر به افزایش بار تشدید در سازه شده و در نهایت ممکن است باعث گسیختگی سازه شود. از سویی دیگر، اگر سازه‌ای در معرض چنین بارگذاری‌هایی نیز نباشد؛ مطلوب است که موقعیت آن به صورت پیوسته کنترل شود. از آنجا که این رخدادها طول عمر مفید سازه را کاهش می‌دهند؛ کنترل مداوم و ارزیابی براساس قاعده‌ای منظم در سازه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

رویکرد کنترلی سازه، پایش سلامت سازه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. پایش سلامت سازه‌ها شامل دو مرحله است: مرحله‌ی اول شامل شناسایی وجود آسیب، موقعیت و شدت آن و مرحله‌ی دوم شامل برآورد ظرفیت و عمر مفید باقی‌مانده‌ی سازه می‌باشد [۱]. در این میان، تشخیص وجود آسیب اولین گام در نظارت بر سلامت سازه محسوب می‌شود. به‌همین دلیل در دهه‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن روشی مناسب در جهت شناسایی وجود و موقعیت آسیب در سازه‌ها صورت گرفته است.

روش‌های شناسایی آسیب شامل روش‌های مخرب<sup>۲</sup> و روش‌های غیرمخرب<sup>۳</sup> می‌باشد. بسیاری از روش‌های به‌کار رفته برای این منظور نیاز به اطلاعاتی از سازه‌ی سالم دارند که دسترسی به آنها مشکل و گاهی نیز غیرممکن است. تبدیل موجک از جمله روش‌های غیرمخرب است که نیازمند اطلاعات سازه‌ی سالم نمی‌باشد. در این روش، موجک بر روی تغییرمکان‌های استاتیکی یا شکل مودی دینامیکی در سازه‌ی ترک‌خورده اعمال می‌شود تا از این طریق ضرایب موجک توزیع شده به‌دست آید. در این حالت، تغییر ناگهانی در ضرایب موجک نشان‌دهنده‌ی اختلالی محلی است که با استفاده از آن موقعیت آسیب در سازه شناسایی می‌شود [۲].

در سال ۲۰۰۴، Suarez و Ovanesova کاربردهای تبدیل موجک در شناسایی آسیب در سازه‌های قابی شکل مانند تیرها و قاب‌های صفحه‌ای را ارائه دادند. در این روش موقعیت ترک با استفاده از سیگنال‌های پاسخ ناشی از بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی قابل تشخیص است. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد، اگر موجک مناسب انتخاب شود این روش قادر به استخراج اطلاعات آسیب از سیگنال‌های پاسخ می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که اثربخشی موجک پیشنهاد شده به شرایط مرزی اعضا و فاصله‌ی ناحیه‌ی آسیب‌دیده از تکیه‌گاه و اتصالات حساس است [۳]. در سال ۲۰۰۶، Ruka و Wilde روشی را برای تخمین موقعیت آسیب در سازه‌ها بر پایه‌ی تبدیل موجک پیوسته ارائه دادند. موقعیت آسیب توسط قله‌ای در نوسانات تبدیل موجک گرفته شده از تغییرشکل‌های مودی اولیه تعریف می‌شود. در روش پیشنهاد شده موجک غیر متعامد Gaussian برای موقعیت‌یابی آسیب انتخاب شد. محققین نشان دادند که موجک پیوسته<sup>۴</sup> نسبت به موجک گسسته<sup>۵</sup> برای شناسایی موقعیت آسیب ناشی از رزولوشن معین مناسب‌تر است [۴]. در سال ۲۰۰۹، Gokdag و Kopmaz با ترکیب تبدیل موجک گسسته و پیوسته به آشکارسازی آسیب در تیرها پرداختند. در این روش شکل مودی سازه‌ی آسیب‌دیده، به صورت ترکیبی از شکل مودی سازه‌ی سالم و عواملی همچون خطای ناشی از اندازه‌گیری و آسیب‌های محلی در نظر گرفته شده است. بنابراین یک تابع تقریبی مناسب که بیان‌گر حالت سالم سازه باشد، می‌تواند به‌کمک تبدیل موجک گسسته استخراج گردد. اختلاف بین ضرایب تبدیل موجک پیوسته‌ی حالت آسیب‌دیده و تابع تقریبی متناظر با سازه‌ی سالم می‌تواند به‌عنوان شاخص مناسبی برای تخمین خسارت سازه در نظر گرفته شود [۵]. در سال ۲۰۱۱، Oyadiji و Zhong تبدیل موجک پیوسته را برای تشخیص آسیب از داده‌های مودال در تیرهای با تکیه‌گاه

1- Structural Health Monitoring (SHM)

2- Destructive Damage Detection (DDD)

3- Non-destructive Damage Detection (NDD)

4- Continuous Wavelet Transform (CWT)

5- Discrete Wavelet Transform (DWT)

ساده به کار بردند. آنها از اطلاعات جابه‌جایی‌های مودال برای تعریف و موقعیت‌یابی آسیب استفاده کردند. نتایج نشان داد که CWT از داده‌های مودال در تیرهای با تکیه‌گاه ساده نشانه‌های بهتری را نسبت به DWT فراهم می‌کند. به علاوه، نتایج به دست آمده نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به فاصله‌ی نمونه‌گیری‌ها حساس می‌باشد [۶]. در سال ۲۰۱۲، Liu و همکاران به پردازش سیگنال و تشخیص آسیب با استفاده از موجک‌ها در توربین‌های بادی پرداختند. آنها علاوه بر تشخیص آسیب و موقعیت آن، با استفاده از ارتباط بین میزان آسیب و بزرگ‌ترین مقدار ضریب موجک به دست آمده، شدت آسیب را ارزیابی کردند [۷]. در سال ۲۰۱۲، Vafaei و Adnan به شناسایی آسیب لرزه‌ای برج کنترل فرودگاه با استفاده از آنالیز موجک پرداختند. نتایج نشان داد که موجک پیوسته آسیب‌های لرزه‌ای را با موفقیت شناسایی می‌کند. از سوی دیگر، موجک گسسته به اغتشاشات در سیگنال بسیار حساس است و تشخیص آسیب موفق بستگی به سطح اغتشاش و فاصله‌ی نمونه‌گیری دارد. علاوه بر این، مشاهده شد که موجک گسسته نسبت به موجک پیوسته به تغییرات سختی المان سازه‌ای بسیار حساس است [۸]. در سال ۲۰۱۳، Khorram و همکاران به شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیر با تکیه‌گاه ساده ناشی از اعمال بار متحرک پرداختند. آنها ضرایب به دست آمده در نقاط ترک‌ها را به عنوان شاخص آسیب در نظر گرفتند و با استفاده از آن ثابت کردند که شاخص آسیب در یک ترک به اندازه و موقعیت سایر ترک‌ها در تیر بستگی ندارد. همچنین، با استفاده از شاخص آسیب ترک‌های با عمق بیش از ۵٪ از ارتفاع تیر شناسایی شد [۹].

## ۲- تئوری تبدیل موجک

تبدیل موجک یک تحلیل زمان-فرکانس است که مبتنی بر تکنیک پنجره با ناحیه‌های اندازه‌گذاری متفاوت است. موجک‌ها قادر به توصیف سیگنالی هستند که در حوزه‌ی زمان و فرکانس قرار گرفته است. برای درک بهتر مفهوم تبدیل موجک لازم است ابتدا خلاصه‌ای از مفاهیم تبدیل فوریه<sup>۶</sup> بیان شود. تبدیل فوریه‌ی یک سیگنال تابعی توصیفی از توابع سینوسی است که سیگنال‌های مبدأ را در زمان می‌سازند.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt \quad (1)$$

در سیگنال‌های ایستا تبدیل فوریه بخوبی محتوای سیگنال را ارائه می‌دهد، اما در سیگنال‌های غیرثابت و گذرا به دلیل وجود تغییرات ناگهانی، توابع سینوسی با فرکانس ثابت قادر به شناسایی این تغییرات نخواهد بود. به عبارت دیگر، ضعف تبدیل فوریه این است که در حوزه‌ی فرکانس اطلاعات زمان به طور کامل از بین می‌رود و نمی‌توان با استفاده از آن، لحظه‌ی وقوع تغییر در سیگنال را مشاهده کرد. برای رفع این محدودیت، تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه<sup>۷</sup> توسط Dennis Gabor ارائه شد [۱۰].

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \omega(t - \tau) \cdot \exp(-i\omega t) dt \quad (2)$$

در این روش از تکنیک پنجره‌سازی استفاده شده است. به این صورت که سیگنال به پنجره‌هایی با ابعاد مشخص تقسیم می‌شود و می‌توان در آن محدوده سیگنال را ایستا در نظر گرفت. با استفاده از این روش حوزه‌ی تاثیر هر فرکانس و موقعیت آن به دست می‌آید. در روش STFT توابع پایه همان توابع سینوسی است و اشکالاتی که ناشی از منظم بودن این نوع توابع در سری فوریه وارد است، در این روش نیز وجود دارد. بنابراین به روش انعطاف‌پذیرتر با تغییرات در سازه تابع پنجره و اصطلاحاً نامنظمی برای بررسی دقیق‌تر سیگنال‌های گذرا نیاز است. تبدیل موجک روشی جدید برای تحلیل سیگنال‌ها است که می‌تواند جنبه‌های مخفی اطلاعاتی که روش‌های دیگر تحلیل سیگنال برای شناسایی آنها شکست خوردند، را آشکار کند. مهمترین مزیت استفاده از تبدیل موجک برای کاربردهای شناسایی آسیب همین

6- Fourier Transform (FT)

7- Short-Time Fourier Transform (STFT)

خصوصیت است. موجک‌ها از خانواده‌ای از توابع پایه تشکیل شده‌اند که قادر هستند سیگنال را در زمان مشخص (یا مکان) و فرکانس معین (یا مقیاس) توصیف کنند [۳]. دو الگوریتم کلی توابع موجک شامل موجک پیوسته و موجک گسسته می‌باشد.

موجک پیوسته از لحاظ ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot y^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

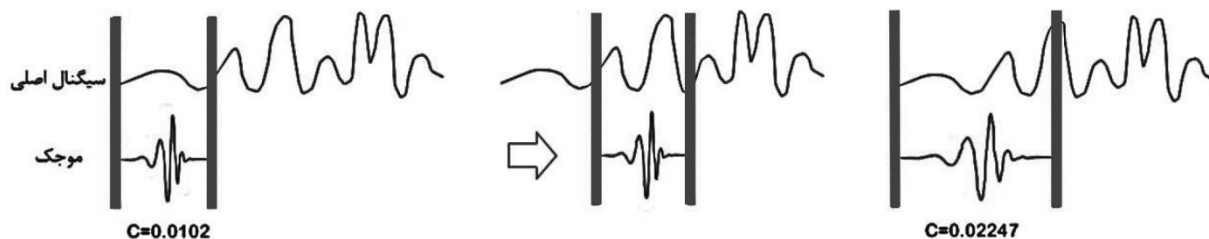
که در آن  $a$  و  $b$  به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال و  $y^*$  پیچش مختلط  $y$  می‌باشند. همچنین تابع پایه (در اصطلاح موجک

مادر)  $y$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y_{j,k}(t) = 2^{j/2} y(2^j t - k) \quad (4)$$

با اعمال تابع موجک و انتخاب مقدار معینی برای پارامتر مقیاس و سپس انتقال تابع در طول سیگنال مجموعه‌ای از ضرایب موجک

به دست می‌آید. با بررسی دقیق این ضرایب اطلاعات محلی از سیگنال استخراج می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: اعمال موجک با مقیاس مشخص و انتقال آن در طول سیگنال.

در CWT به ازای هر مقداری از  $a$  و  $b$  ضریبی به دست می‌آید، حال آنکه تمامی این ضرایب برای استخراج ویژگی‌های سیگنال مورد استفاده نخواهند بود. به همین دلیل از مقدار گسسته‌ای از پارامترها استفاده می‌شود. در این حالت پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت نمایی تعریف می‌شود:

$$a = 2^j \quad (5)$$

$$b = k \cdot 2^j$$

در این معادلات  $j$  سطح مبنا و عضو مجموعه‌ای اعداد صحیح می‌باشد. با جای‌گذاری مقادیر رابطه‌ی ۵ در معادله‌ی ۳ موجک گسسته

به دست می‌آید:

$$C(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot y^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

در حقیقت، با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌ها به نام sub-band coding سیگنال به چند مسیر تقسیم می‌شود که این مسیرها

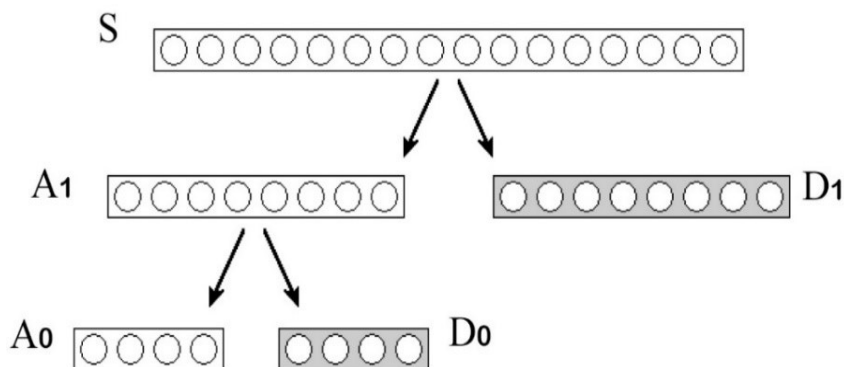
در نهایت سیگنال اصلی را تشکیل می‌دهند. این مسیرها رفتارهای بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت سیگنال‌ها را بررسی کرده و خصوصیات

آن را ارائه می‌دهند. حالت خاص این مجموعه، Two-channel S.C است که توسط Stephane Mallat در سال ۱۹۸۸ به توابع موجک

اعمال شد و با استفاده از آن توانستند بخش‌های مهم سیگنال را جدا کنند. در تبدیل موجک گسسته، دو نوع فیلتر به سیگنال اعمال می‌شود؛

نوع اول تقریبی از سیگنال را نتیجه می‌دهد که در واقع سیگنال با فرکانس‌های پایین هستند و دیگری جزئیات سیگنال را به خوبی نشان

می‌دهد و نتیجه‌ی آن سیگنالی با محتوای فرکانسی بالا می‌باشد؛ که اولی به نام فیلتر مقیاس یا تابع مقیاس (در اصطلاح تابع پدر) می‌باشد و از دومی با نام فیلتر موجک یاد می‌شود [۱۱]. در شکل ۲ عملکرد موجک گسسته در تجزیه‌ی داده‌های سیگنال نشان داده شده است.

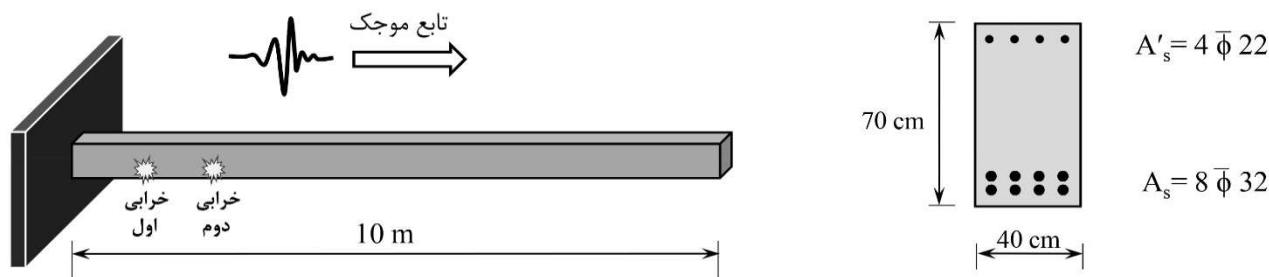


شکل ۲: تجزیه‌ی داده‌های سیگنال توسط موجک گسسته در دو سطح تجزیه.

باید به این نکته توجه کرد که فقط توابع متعامد موجک را می‌توان گسسته‌سازی کرد. برای اطلاعات بیشتر در رابطه با تئوری موجک می‌توان به کتب و مقالات [۱۰، ۱۲-۱۴] اشاره کرد.

### ۳- شناسایی آسیب در تیر طره‌ی بتن آرمه

به منظور تعیین کارآمدی تحلیل موجک برای تشخیص آسیب در سازه‌ها، تیر طره‌ی بتن آرمه با مشخصات هندسی مطابق شکل ۳ و خصوصیات مصالح براساس جدول ۱ در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و بعد از انجام آنالیز مودال بر روی تیر در دو حالت سالم و آسیب‌دیده، نمودارهای چهار مود اول آن استخراج می‌گردد. سپس نتایج تغییر مکان‌های ۵۰۰ گره در نظر گرفته شده در وجه پایینی تیر به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده شده و تحت آنالیز موجک پیوسته و گسسته قرار داده می‌شود. در بررسی نتایج حاصل از موجک پیوسته خرابی‌ها به صورت نوارهایی روشن مشاهده می‌شود. همچنین در ارزیابی نمودار جزئیات در آنالیز موجک گسسته خرابی‌ها به صورت اغتشاشاتی در نمودار ظاهر می‌شود. مدل‌سازی خرابی به صورت ایجاد دو شکاف به اندازه‌ی ۰/۰۱ متر با فواصل مشخص در مقطع فولاد کششی تیر بتن آرمه انجام شده است. در طول انجام تحقیق ابعاد، مشخصات مصالح و نوع تحلیل یکسان در نظر گرفته شده است و تنها محل خرابی‌ها در مراحل تحلیل تغییر می‌کند.



شکل ۳: مدل هندسی تیر طره‌ی بتن آرمه.

جدول ۱: مشخصات مصالح تیر طره‌ی بتن آرمه

جنس مصالح پارامتر مصالح	بتن	فولاد
مدول الاستیسیته (E)	$25 \times 10^4$ (MPa)	$200 \times 10^4$ (MPa)
ضریب پواسون (ν)	۰/۲	۰/۳
چگالی (ρ)	$2400$ (Kg/m <sup>3</sup> )	-

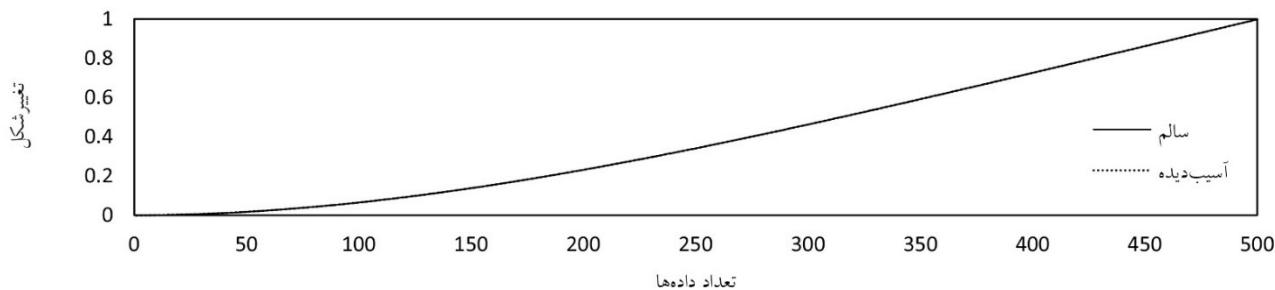
برای بررسی اثر شناسایی آسیب توسط موجک سناریوهای مختلف آسیب مطابق جدول ۲ در تیر طره‌ی بتن آرمه تحت مطالعه در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: مشخصات سناریوهای خرابی

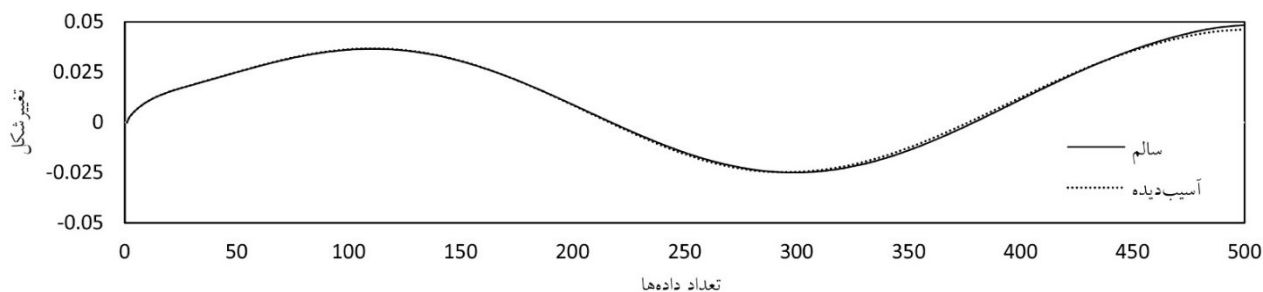
نام مدل	فاصله ترک‌ها از یکدیگر (m)	فاصله ترک اول از تکیه‌گاه (m)	مرتب‌بندی مود	نام مدل	فاصله ترک‌ها از یکدیگر (m)	فاصله ترک اول از تکیه‌گاه (m)	مرتب‌بندی مود
DSS-۰/۵-۱-۱	۰/۵	۱	۱	DSS-۱-۳-۳	۱	۳	۳
DSS-۰/۵-۱-۲	۰/۵	۱	۲	DSS-۱-۳-۴	۱	۳	۴
DSS-۰/۵-۱-۳	۰/۵	۱	۳	DSS-۱-۵-۱	۱	۵	۱
DSS-۰/۵-۱-۴	۰/۵	۱	۴	DSS-۱-۵-۲	۱	۵	۲
DSS-۰/۵-۳-۱	۰/۵	۳	۱	DSS-۱-۵-۳	۱	۵	۳
DSS-۰/۵-۳-۲	۰/۵	۳	۲	DSS-۱-۵-۴	۱	۵	۴
DSS-۰/۵-۳-۳	۰/۵	۳	۳	DSS-۲-۱-۱	۲	۱	۱
DSS-۰/۵-۳-۴	۰/۵	۳	۴	DSS-۲-۱-۲	۲	۱	۲
DSS-۰/۵-۵-۱	۰/۵	۵	۱	DSS-۲-۱-۳	۲	۱	۳
DSS-۰/۵-۵-۲	۰/۵	۵	۲	DSS-۲-۱-۴	۲	۱	۴
DSS-۰/۵-۵-۳	۰/۵	۵	۳	DSS-۲-۳-۱	۲	۳	۱
DSS-۰/۵-۵-۴	۰/۵	۵	۴	DSS-۲-۳-۲	۲	۳	۲
DSS-۱-۱-۱	۱	۱	۱	DSS-۲-۳-۳	۲	۳	۳
DSS-۱-۱-۲	۱	۱	۲	DSS-۲-۳-۴	۲	۳	۴
DSS-۱-۱-۳	۱	۱	۳	DSS-۲-۵-۱	۲	۵	۱
DSS-۱-۱-۴	۱	۱	۴	DSS-۲-۵-۲	۲	۵	۲
DSS-۱-۳-۱	۱	۳	۱	DSS-۲-۵-۳	۲	۵	۳
DSS-۱-۳-۲	۱	۳	۲	DSS-۲-۵-۴	۲	۵	۴

شکل‌های ۴ و ۵ نمودار دو مود اول و چهارم تیر را در حالت سالم و آسیب‌دیده در حالتی که فاصله‌ی ترک‌ها از یکدیگر ۰/۵ متر و اولین ترک در وسط دهانه‌ی تیر قرار دارد، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در اشکال مودی هیچ‌گونه آشفتگی مبنی بر وجود آسیب در تیر مشاهده نمی‌شود، در نتیجه با بررسی نمودار شکل مودی نمی‌توان موقعیت آسیب را تشخیص داد. برای مقایسه‌ی اثربخشی موجک پیوسته و گسسته ابتدا دو نمودار شکل مودی فوق در حالت آسیب‌دیده با استفاده از موجک پیوسته‌ی ۶۱db مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این تحلیل مقادیر پارامتر مقیاس و انتقال به ترتیب ۸ و ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود تابع موجک

قادر به شناسایی آسیب در مود اول نمی باشد، در حالی که در شکل ۷ آسیب به صورت نواری نسبتاً روشن در مود چهارم مشاهده می شود. با این وجود مقدار ضرایب موجک به دست آمده به اندازه ی کافی برای تشخیص دقیق موقعیت و میزان آسیب، بالا نمی باشد.

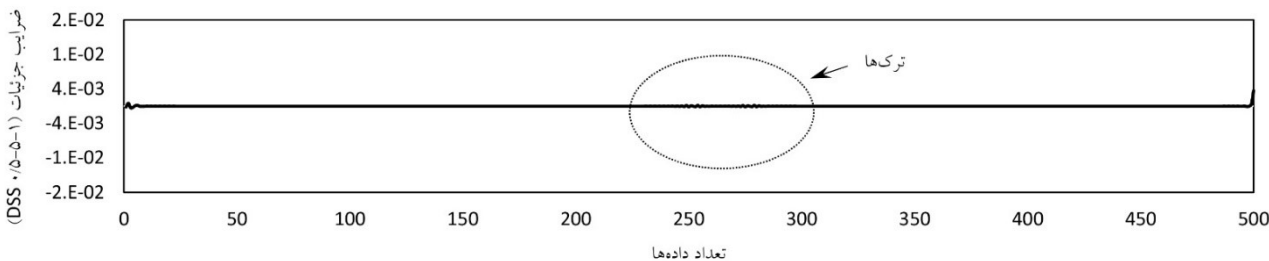
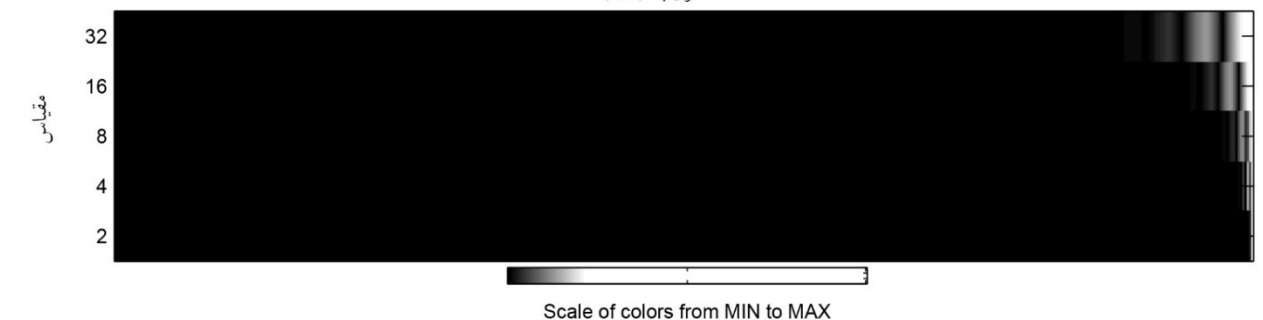


شکل ۴: نمودار مود اول.

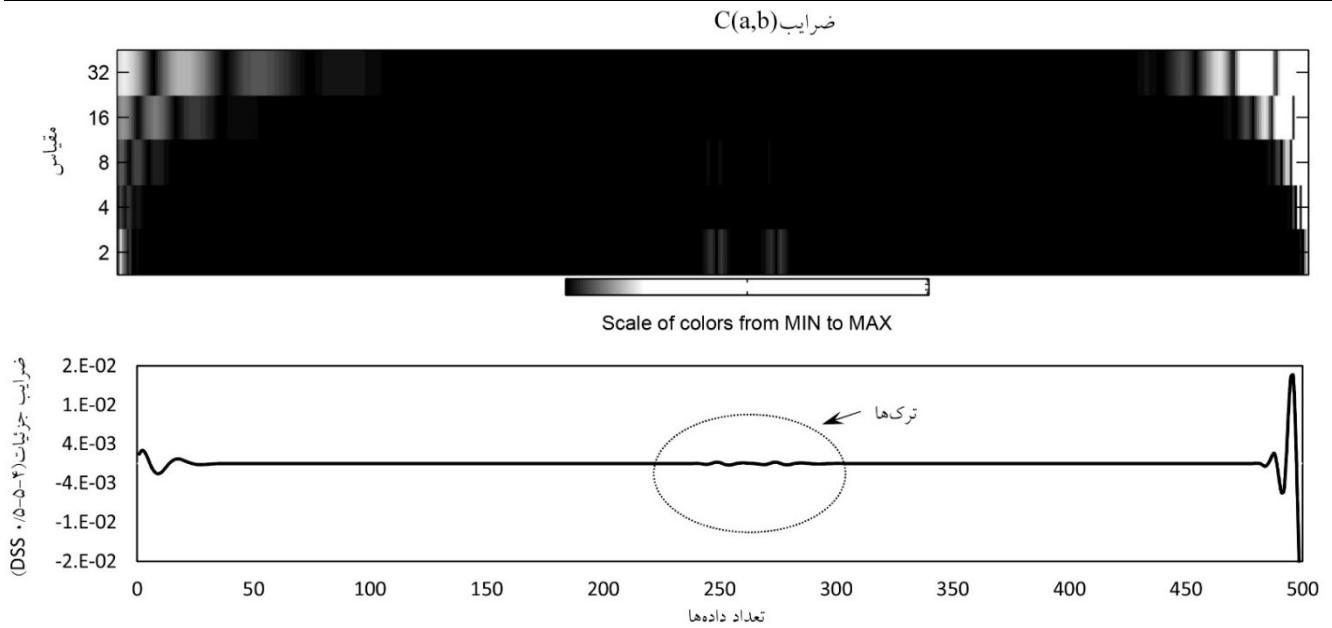


شکل ۵: نمودار مود چهارم.

ضرایب C(a,b)

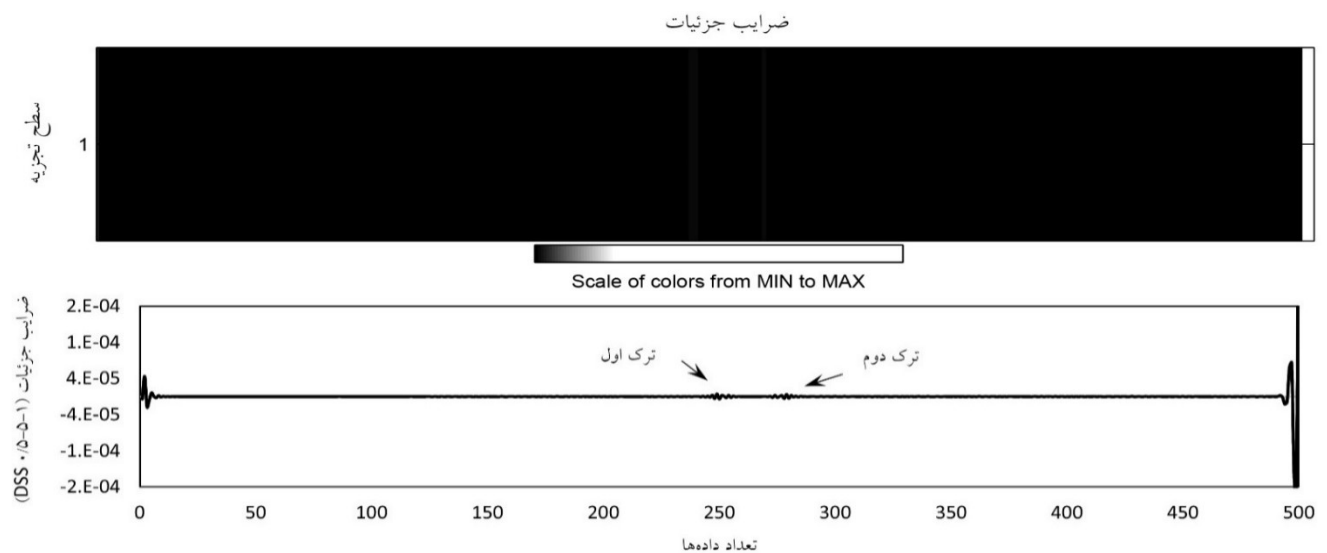


شکل ۶: تبدیل موجک پیوسته ی مود اول (db۶).



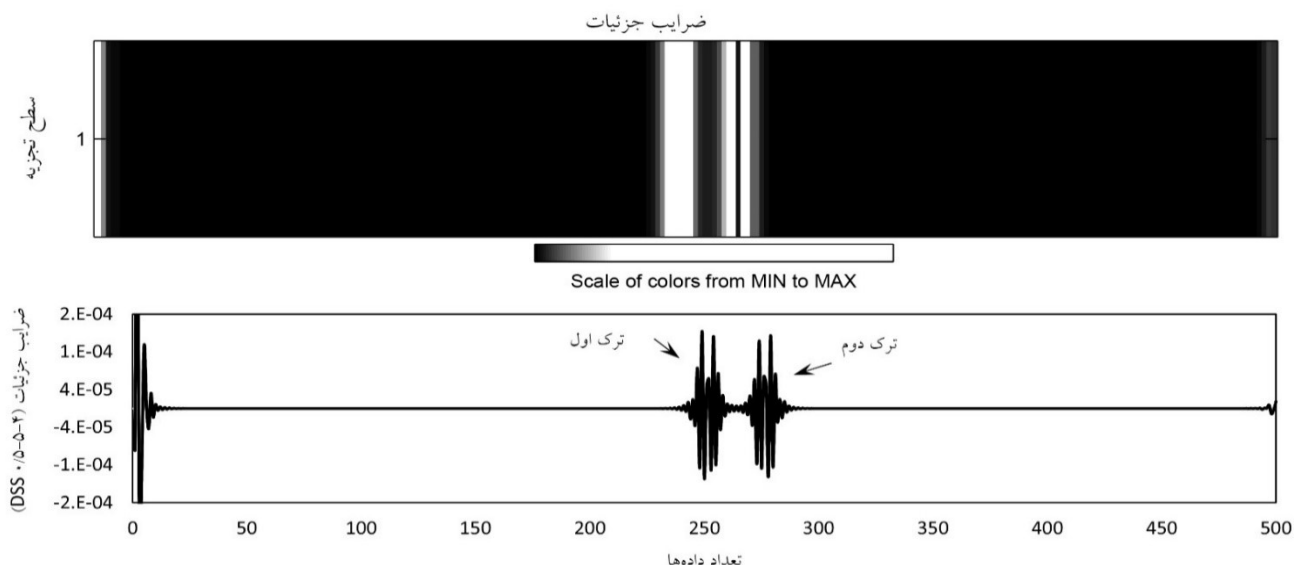
شکل ۷: تبدیل موجک پیوسته‌ی مود چهارم (db<sup>۶</sup>).

در اشکال ۸ و ۹ نمودارهای مودی حالت آسیب‌دیده فوق مجدداً تحت آنالیز موجک گسسته در یک سطح تجزیه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود موجک گسسته قادر به شناسایی محل آسیب در شکل مودی مرتبه اول تیر می‌باشد.



شکل ۸: تبدیل موجک گسسته‌ی مود اول (db<sup>۶</sup>).

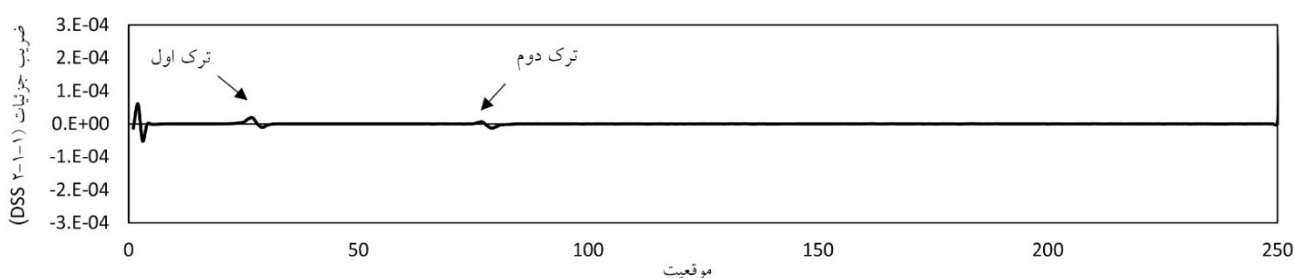




شکل ۹: تبدیل موجک گسسته‌ی مود چهارم (db6).

با این حال با بررسی مود چهارم در شکل ۹ امکان شناسایی محل آسیب دقیق‌تر می‌باشد که این نشان‌دهنده بالا بودن ضرایب موجک در این نواحی می‌باشد. مشاهده می‌شود که با بالا رفتن مرتبه‌ی مود امکان شناسایی محل آسیب بیشتر است. همچنین موجک نسبت به آسیبی که دقیقاً در وسط دهانه قرار دارد، حساسیت بیشتری نشان داده است.

اشکال ۱۰ و ۱۱ اثر مرتبه‌ی مودها را در امکان شناسایی آسیب در سازه با استفاده از موجک گسسته‌ی sym4 نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که در مود اول هر دو آسیب با میزان ضرایب پایینی قابل شناسایی می‌باشند. به دلیل پایین بودن ضرایب، این نمودار به صورت جداگانه نشان داده شده است. در مود دوم میزان آسیب اول و در مود سوم میزان آسیب دوم با دقت تقریباً مناسبی قابل تشخیص می‌باشد. بنابراین این نوع موجک قادر به شناسایی مناسب تمامی آسیب‌ها در مودهای دوم و سوم نمی‌باشد. در مود چهارم هر دو آسیب با تقریب بسیار خوبی شناسایی شده‌اند.

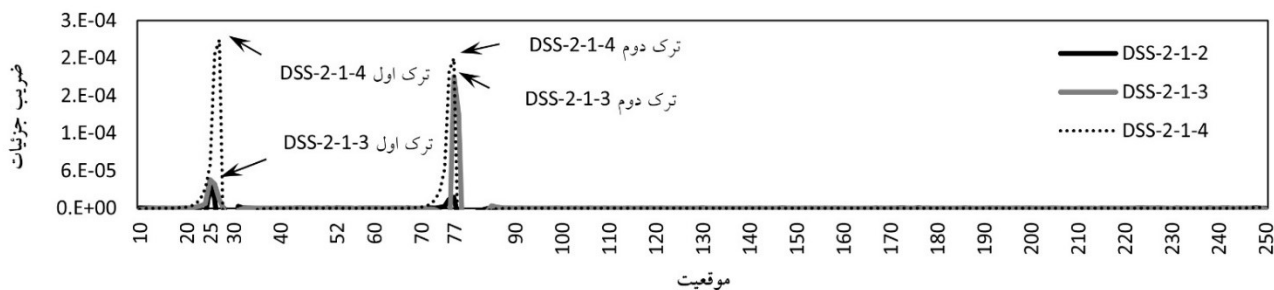


شکل ۱۰: نمودار جزئیات مود اول در تیر آسیب‌دیده (sym4).

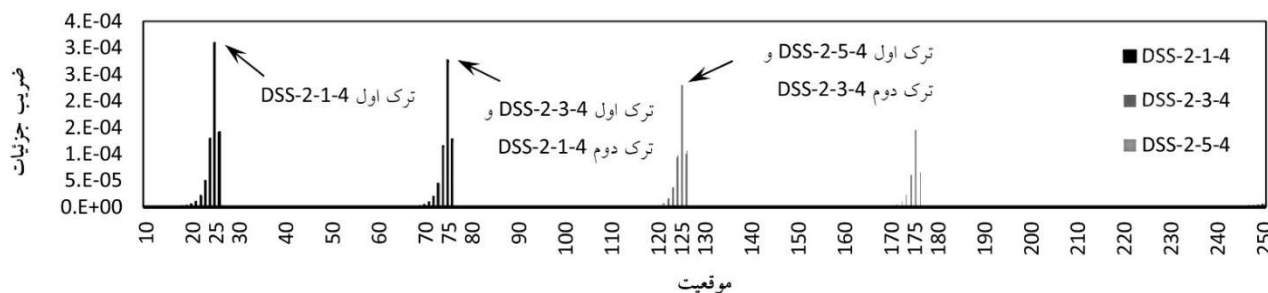
در بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شد که تمامی موجک‌ها در مود چهارم هر دو آسیب را با دقت قابل توجهی شناسایی کردند. همچنین به دلیل پایین بودن ضرایب موجک در شناسایی آسیب مود اول در ادامه از بیان نتایج سناریوهای مرتبط با مود اول صرف نظر شده است.

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در مود چهارم زمانی که ترک اول در فاصله ۱ متری از تکیه‌گاه قرار داشته باشد، شدت بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در مود چهارم هرچه آسیب به تکیه‌گاه نزدیک‌تر باشد با شدت بیشتری قابل شناسایی می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل میزان ضرایب موجک در ترک‌های اول در موقعیت‌های ۳ و ۵ متری از تکیه‌گاه با میزان ضرایب موجک در موقعیت ترک‌های دوم در ۱ و ۳ متری از تکیه‌گاه با یکدیگر برابر است که این نشان‌دهنده حساسیت موجک به موقعیت آسیب‌ها می‌باشد و به فواصل ترک‌ها از یکدیگر بستگی ندارد.

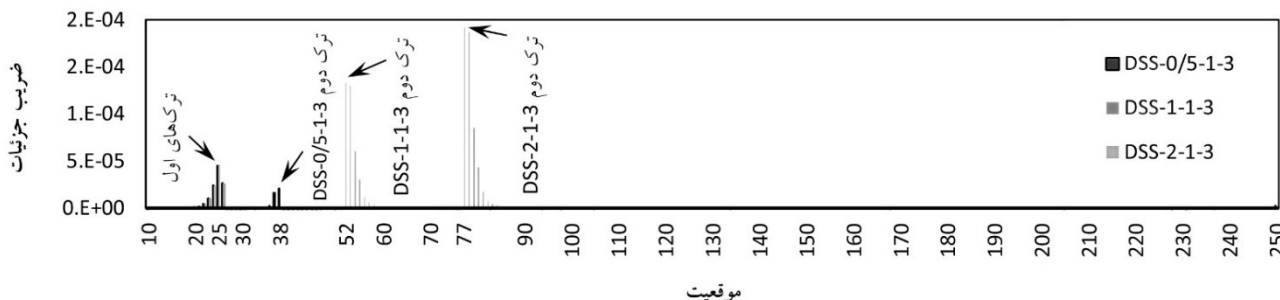


شکل ۱۱: نمودار جزئیات موده‌های دوم تا چهارم تیر آسیب‌دیده (sym4).



شکل ۱۲: نمودار جزئیات فاصله ترک‌ها از تکیه‌گاه در مود چهارم (db4).

جهت بررسی میزان آسیب در وسط دهانه می‌توان نمودار جزئیات سیگنال را ترسیم کرد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در مود سوم هنگامی که ترک‌ها در فاصله ۵ متری از تکیه‌گاه قرار گیرد، شدت آسیب بیشتر است که این مسئله به دلیل قرار گرفتن آسیب در وسط دهانه‌ی تیر می‌باشد. بنابراین در مود سوم هرچه موقعیت آسیب به وسط دهانه نزدیک‌تر باشد میزان ضرایب به دست آمده بالاتر خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که میزان ترک اول در کلیه فواصل با یکدیگر برابر است.

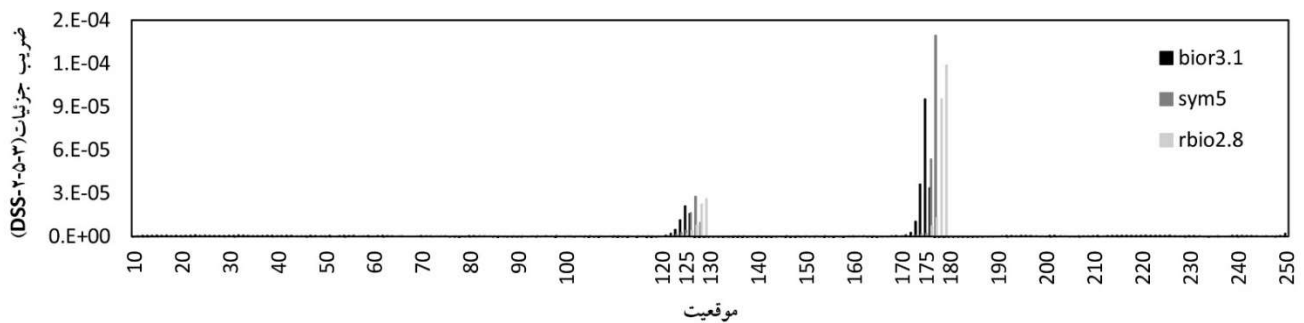


شکل ۱۳: نمودار جزئیات موقعیت ترک‌ها در مود سوم (db4).

براساس نتایج به دست آمده از دیگر سناریوهای خرابی مشاهده شد که در مود دوم، هنگامی که ترک در فاصله‌ی ۳/۵ متری از تکیه‌گاه قرار دارد میزان ضرایب موجک بیشتر از میزان این ضرایب در موقعیت‌های ۴ و ۵ متری از تکیه‌گاه است. همچنین مشاهده شد که در فاصله‌ی ۵ متری از تکیه‌گاه میزان آسیب بیشتر از قرار گرفتن ترک در فاصله‌ی ۴ متری از تکیه‌گاه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که

در مود دوم موجک هم به نزدیکی آسیب به تکیه‌گاه و هم به قرار گرفتن در وسط دهانه تیر حساس است. بررسی همین نتایج در مود اول نشان داد که این مود آسیب را در فاصله‌ی ۳/۵ متری از تکیه‌گاه با ضریب بیشتری شناسایی می‌کند که نشان دهنده حساسیت موجک نسبت به نزدیکی آسیب به تکیه‌گاه در مود اول است.

جهت بررسی تاثیر نوع موجک مادر در شناسایی آسیب میزان ضرایب در سه نوع موجک با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که میزان شناسایی آسیب در موجک sym5 بیشتر از موجک‌های bior3/1 و rbio2/8 است که این به دلیل شباهت بیشتر شکل موجک مادر با شکل مودی مورد بررسی است.



شکل ۱۴: بررسی اثر انواع موجک مادر.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مطالعه‌ای بر روی کاربرد تبدیل موجک در شناسایی آسیب‌های چندگانه در تیرهای بتنی انجام شد؛ بدین صورت که یک تیر طره‌ای بتن‌آرمه با ابعاد و طول مشخص با سناریوهای مختلف خرابی مدل‌سازی و تحت آنالیز مودال قرار گرفته و اشکال مودی آن استخراج گردید. مشاهده شد که با مقایسه‌ی مستقیم پاسخ سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده نمی‌توان به وجود یا عدم وجود خرابی در تیر پی برد. در حالی‌که با تجزیه سیگنال شکل مودی توسط آنالیز موجک خرابی‌ها آشکار می‌گردند. نتایج نشان داد که موجک گسسته نسبت به موجک پیوسته با تقریب بهتری موقعیت آسیب‌ها و شدت آن را شناسایی می‌کند. همچنین با بالا رفتن مرتبه مودی امکان شناسایی آسیب بهتر خواهد بود. براساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها می‌توان گفت در مود چهارم هرچه آسیب به تکیه‌گاه نزدیک‌تر باشد ضرایب موجک به‌دست آمده بالاتر بوده و موقعیت خرابی با دقت مناسبی قابل شناسایی می‌باشد. از طرفی فاصله‌ی آسیب‌ها از یکدیگر بر امکان شناسایی آن‌ها تاثیری نخواهد داشت. در مود سوم هرچه آسیب به وسط دهانه تیر نزدیک‌تر باشد با شدت بیشتری شناسایی می‌شود. همچنین نشان داده شد که تابع sym5 در مود سوم نسبت به دو تابع دیگر موجک با دقت مناسب‌تری قادر به شناسایی موقعیت آسیب می‌باشد.

#### مراجع

- [1] Nair, K. K. and Kiremidjian, A. S.; "Derivation of a Damage Sensitive Feature Using the Haar Wavelet Transform"; *Journal of Applied Mechanics* 76, No. 6 (2009) 061015-23.
- [2] Wang, J. and Qiao, P.; "On Irregularity-Based Damage Detection Method for Cracked Beams"; *International Journal of Solids and Structures* 45, No. 2 (2008) 688-704.
- [3] Ovanesova, A. V. and Suárez, L. E.; "Applications of Wavelet Transforms to Damage Detection in Frame Structures"; *Engineering Structures* 26, No. 1 (2004) 39-49.
- [4] Rucka, M. and Wilde, K.; "Application of Continuous Wavelet Transform in Vibration Based Damage Detection Method for Beams and Plates"; *Journal of Sound and Vibration* 297, No. 3-5 (2006) 536-50.
- [5] Gökdağ, H. and Kopmaz, O.; "A New Damage Detection Approach for Beam-Type Structures Based on the Combination of Continuous and Discrete Wavelet Transforms"; *Journal of Sound and Vibration* 324, No. 3-5 (2009) 1158-80.

- [6] Zhong, S. and Oyadiji, S. O.; "Detection of Cracks in Simply-Supported Beams by Continuous Wavelet Transform of Reconstructed Modal Data"; *Computers & Structures* 89, No. 1-2 (2011) 127-48.
- [7] Liu, X. Leimbach, K. R. Hartmann, D. and Höffer, R.; "Signal Analysis Using Wavelets for Structural Damage Detection Applied to Wind Energy Converters"; *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, (2012).
- [8] Vafaei, M. R. and Adnan, A. b.; "Seismic Damage Detection of Tall Airport Traffic Control Towers Using Wavelet Analysis"; *Structure and Infrastructure Engineering* 10, No. 1 (2014) 106-27.
- [9] Khorram, A. Rezaeian, M. and Bakhtiari-Nejad, F.; "Multiple Cracks Detection in a Beam Subjected to a Moving Load Using Wavelet Analysis Combined with Factorial Design"; *European Journal of Mechanics* 40 (2013) 97-113.
- [10] Spanos, P. D. and Failla, G.; "Wavelets: Theoretical Concepts and Vibrations Related Applications"; *Shock and Vibration Digest* 37, No. 5 (2005) 359.
- [11] Ezzodin, A. Naderpour, H. Kheyroddin, A. and Ghodrati Amiri G. R.; "Damage Localization and Quantification of Beams Using Wavelet Transform"; [In Persian]. *Journal of Modeling in Engineering* 12, No. 39 (2015) 1-11.
- [12] Antoine, J. P. Murenzi, R. Vanderghenst, P. and Twareque, A. S.; "2-D Wavelets and Their Relatives"; Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, (2004).
- [13] Bachmann, G. Narici, L. and Beckenstein, E.; "Fourier and Wavelet Analysis"; Springer New York, (2012).
- [14] Stark, H.G.; "Wavelets and Signal Processing: An Application-Based Introduction"; Springer Berlin Heidelberg, (2005).