

کشف آسیب در سازه‌ها توسط آنالیز مویک با استفاده از داده‌های آنالیز مودال

یونس فولادقدم* (کارشناسی ارشد)

حمیدرضا غفوری (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

مهندسی عمران شریف، (پیاو ۱۳۹۴)
دربی ۲ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۱-۱۲۱

کشف آسیب در مراحل اولیه‌ی شکل‌گیری در سازه‌های مهندسی بسیار مهم است. تقریباً تمام روش‌هایی که تاکنون پیشنهاد شده‌اند، متکی به مقایسه‌ی سازه‌ی سالم اولیه و سازه‌ی موجود هستند. با وجود این، روش مذکور همیشه قابل اجرا نیست، زیرا رفتار سازه‌ی اولیه در بیشتر حالات در دسترس نیستند. روش آنالیز مویک، که اخیراً معرفی شده به این مشکل غلبه کرده است؛ زیرا به اطلاعاتی از سازه‌ی سالم نیاز ندارد. این روش از شکل‌های مودی تجربی، که از سیستم‌های پایش به دست می‌آیند، استفاده می‌کند. سپس با یک تبدیل ریاضی، ناپیوستگی‌های شکل‌های مودی، که معمولاً بسیار ناچیز هستند، برجسته و به راحتی شناسایی می‌شوند. در این مطالعه، امکان کاربرد این روش برای سه نوع سازه شامل: یک تیر ساده، یک قاب و یک پل کابلی معلق بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که این روش توانایی بسیار بالایی در تشخیص محل آسیب دارد.

youness.foladghadam@gmail.com
ghafouri_h@scu.ac.ir

واژگان کلیدی: آنالیز مویک، مقیاس، آنالیز مودال، کشف آسیب.

۱. مقدمه

سالم در دسترس باشد، ممکن است مقایسه‌ی رفتار آن با رفتار ثبت‌شده‌ی سازه‌ی موجود تفاوت مهمی را آشکار نسازد؛ زیرا خرابی‌ها در مراحل اولیه‌ی تشکیل، اثر قابل ملاحظه‌ی را در رفتار سازه به وجود نمی‌آورند. در دو دهه‌ی اخیر، پژوهشگران بسیاری به بررسی روش‌هایی برای کشف آسیب در سازه‌ها پرداخته‌اند، که در این میان، روش آنالیز مویک به‌منزله‌ی روشی قابل قبول از طریق مشاهدات عددی و آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفته است. این آنالیز بر روی پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده که با استفاده از حس‌گرهای نصب‌شده بر روی سازه قابل اندازه‌گیری و ثبت هستند، انجام می‌شود. پژوهشگران بسیاری از پاسخ‌های مختلف سازه برای کشف و تعیین محل آسیب استفاده کرده‌اند. برای مثال، پژوهشگرانی در سال ۱۹۹۸، معیار ایمنی محل آسیب را ارزیابی کرده‌اند که برای شناسایی سیگنال سازه‌ی معیوب استفاده می‌شده است و بعداً آن را جهت شناسایی محل‌های چندگانه‌ی آسیب توسعه دادند. در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۰ نیز از آنالیز مویک برای کشف آسیب در سازه‌ها استفاده شده است.^[۳] همچنین در پژوهشی دیگر (۲۰۰۲)، یک روش چند مرحله‌ی برای ردیابی آسیب معرفی و به عنوان نمونه بر روی یک پل کابلی استفاده شده است.^[۴] پژوهشگرانی هم در سال ۲۰۰۴، روش تحلیل مویک را برای شناسایی آسیب در قاب‌های سازه‌ی به کار گرفته‌اند.^[۵] و نیز در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، از روش مشابهی برای آسیب‌شناسی سایر سازه‌های مهندسی استفاده شده است.^[۶] در پژوهشی در سال ۲۰۰۵ هم از تحلیل مویک بسته‌ی برای کشف آسیب در تیرها استفاده شده است.^[۷] و نیز در همین سال، برای کشف آسیب‌های چندگانه در سازه‌ها، تحلیل مویک استفاده شده است.^[۸] همچنین در مطالعاتی در سال ۲۰۰۶،

یکی از مهم‌ترین نیازها برای نگهداری درست از سازه‌های مهم زیربنایی عمرانی، کشف آسیب در آن سازه‌ها در ابتدای تشکیل آسیب و مراحل اولیه‌ی رشد آن است. آسیب در سازه‌ها را می‌توان تغییرات نامطلوب در سیستم معرفی کرد، که این تغییرات می‌توانند رشد کنند و باعث گسیختگی سازه شوند. برای مثال یک ترک، که شایع‌ترین نوع آسیب در سازه است، باعث تغییر در خصوصیات سازه مانند کاهش سختی و افزایش میرایی در آن محل می‌شود. این پدیده افزایش تغییرمکان در آن محل را به همراه دارد، که می‌تواند با افزایش بار تشدید شود و به گسیختگی سازه کمک کند. از جمله خرابی‌های دیگر در سازه‌ها می‌توان به کاهش جزئی مساحت، تغییر در خصوصیات مصالح به‌کاررفته، خرابی‌های ناشی از اتصالات و غیره اشاره کرد. خرابی برای شرایط مرزی نیز رخ می‌دهد، مانند: ایجاد خرابی در محل اتصالات تیر به ستون برای تیرها.^[۱] هرگونه آسیب در سازه می‌تواند رفتار دینامیکی سازه را تغییر دهد. روش‌های غیرمخرب متداول برای شناسایی آسیب در سازه‌ها معمولاً به مقایسه‌ی رفتار سازه‌ی سالم اولیه با سازه‌ی موجود می‌پردازند و چنانچه تفاوتی را بین این دو تشخیص دهند، خرابی را در آن سازه آشکار می‌سازند. لذا روش‌های کشف آسیب به دلیل تغییراتی که در پارامترهای مودال سازه‌ی آسیب‌دیده به وجود می‌آید، به اطلاعات کاملی از سازه‌ی سالم نیز نیاز دارند، که این اطلاعات همواره در دسترس نیستند.^[۱] از طرف دیگر، حتی در صورتی که اطلاعات مربوط به سازه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱/۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۱، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۲۰.

برای آسیب‌شناسی سازه‌های تیری شکل از روش «تحلیل با درجه‌ی تفکیک پذیری چندگانه»^[۹] و نیز در سال ۲۰۱۱، از مودهای ارتعاشی مراتب بالا برای کشف آسیب در تیرها استفاده شده است.^[۱۰] همچنین در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در سلسله مقالاتی با اعمال تبدیل موجک بر روی اطلاعات حاصل از آنالیز بسامدی سازه‌های مختلف به تحلیل آسیب در آنها پرداخته شده است، که برای نمونه می‌توان به کشف آسیب در سد بتنی دو قوسی اشاره کرد.^[۱۱-۱۳] از شیوه‌ی آنالیز موجک برای کشف آسیب در پل‌ها نیز در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ استفاده شده است.^[۱۴] پژوهشگران دیگری هم در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تبدیل موجک، آسیب وارد شده به یک دیوار برشی را که به صورت کاهش سختی در آن اعمال شده بود، شناسایی کردند و همچنین به کمک اطلاعات آزمایشگاهی، یک سازه‌ی فولادی ۴ طبقه‌ی آسیب‌دیده را در دانشگاه کلمبیا مدل و سپس با اعمال تبدیل موجک به آن اطلاعات، کشف آسیب کردند.^[۱۵]

در این نوشتار، پاسخ‌های حاصل از آنالیز مودال یک تیر دو سر ساده، یک قاب دوتبعی یک طبقه و یک پل کابلی معلقی توسط آنالیز موجک بررسی و با کمک آن سعی شده است که توانایی این روش در شناسایی یک یا چند خرابی تصنعی، که به عمد در نقاط مختلف این سازه‌ها به وجود آمده‌اند، مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. تعریف مفاهیم تبدیل موجک

تبدیل موجک یک تبدیل ریاضی است که چنانچه بر تابع یا سیگنال دلخواهی مثل $f(t)$ عمل کند، نقاط گسستگی و یا محل تغییر شیب‌های ناگهانی آن تابع (یا سیگنال) را، هر چند هم که کوچک و نامشهود باشند، به نحو بارز و چشم‌گیری تقویت می‌کند؛ به صورتی که با یک واریسی ساده، محل این ناپیوستگی‌ها مشخص و شناسایی می‌شوند. تبدیل موجک انواع مختلفی دارد که از جمله‌ی آنها می‌توان به تبدیل موجک پیوسته (CWT)، تبدیل موجک گسسته (DWT) و تبدیل موجک ایستا (SWT) اشاره کرد. تبدیل موجک پیوسته‌ی یک سیگنال دلخواه $f(t)$ به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:^[۱۶،۱۷]

$$W(a, b) = \int f(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (۱)$$

که در آن، a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند. ψ^* مزدوج مختلط تابع موجک مادر ψ است. تابع موجک مادر (ψ) در آنالیز موجک با دو پارامتر مقیاس و انتقال تعریف شده است. این ویژگی منجر به ارائه‌ی تحلیل چندگانه‌ی سیگنال‌های غیر ثابت می‌شود، بدین صورت که با انتخاب مقیاس‌های کوچک و بزرگ به ترتیب بازه‌های کوچک و بزرگی روی سیگنال توسط تبدیل موجک برای انجام آنالیز موجک انتخاب می‌شود. تابع موجک مادر با رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:^[۱۶،۱۷]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (۲)$$

تابع موجک باید این ۳ شرط را ارضاء کند:

۱. انتگرال تابع موجک باید صفر باشد (رابطه‌ی ۳):^[۱۶]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (۳)$$

۲. انرژی آن باید محدود باشد (رابطه‌ی ۴):^[۱۶]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (۴)$$

۳. باید در رابطه‌ی ۵ صدق کند:^[۱۶،۱۷]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (۵)$$

که در آن‌ها، Ψ تبدیل فوری ψ و ω بیانگر بسامد است. رابطه‌ی ۳ پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است یا یک شکل موجی دارد. رابطه‌ی ۴ بدین معنی است که بیشترین انرژی در تابع موجک برای یک بازه‌ی کوتاه نامحدود نمی‌شود.^[۱۶] CWT مجموع کل بازه‌ی زمانی سیگنال ضرب شده با نسخه‌ی مقیاس شده و انتقال یافته‌ی موجک است. در DWT، مقیاس‌ها و انتقالات به صورت گسسته و براساس پایه‌ی ۲ از انتخاب می‌شوند که این مورد، دلیل نام‌گذاری این تبدیل به تبدیل موجک گسسته است.^[۱۶] SWT، یک تبدیل تکراری است که تعداد نمونه‌های ورودی در هر تکرار را ۲ برابر می‌کند. این تبدیل می‌تواند ارزیابی انحراف‌ها و شکستگی‌ها را با دقت بیشتری میسر سازد و شناسایی ناپیوستگی‌های یک سیگنال را به ویژه برای تشخیص نویز یا گسیختگی سیگنال آسان کند.^[۱۷] در این مطالعه، از تبدیل موجک ایستا (SWT) و گسسته (DWT) برای کشف آسیب استفاده شده است.

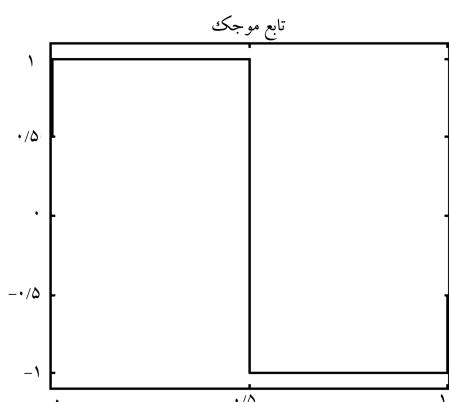
برای کشف آسیب، توابع موجک مادر مختلفی وجود دارد که از جمله‌ی آنها می‌توان به این توابع اشاره کرد:

الف) موجک هار^۱: اولین و ساده‌ترین موجک است و شکل آن مشابه تابع پله است (شکل ۱).^[۱۸] تابع موجک هار به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

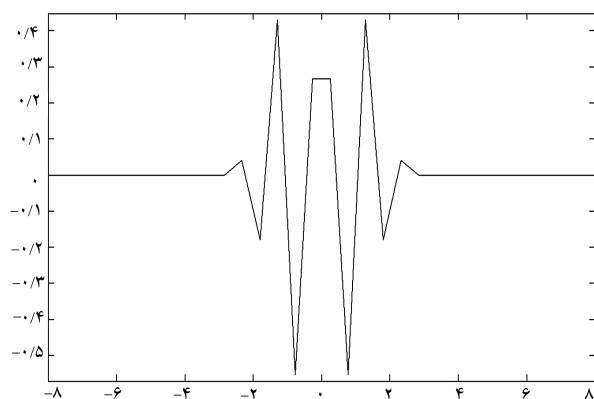
$$\Psi(x) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow 0 \leq x \leq 0.5 \\ -1 & \Rightarrow 0.5 \leq x \leq 1 \\ 0 & \Rightarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (۶)$$

ب) تابع موجک مورلت^۲: به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:^[۱۸]

$$\Psi(x) = \exp(i \omega_w \cdot x) \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right) \quad (۷)$$



شکل ۱. موجک هار.

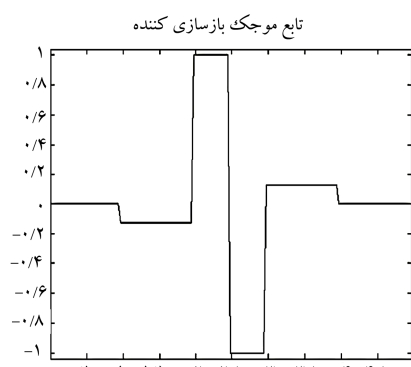


شکل ۲. موجک مورلت.

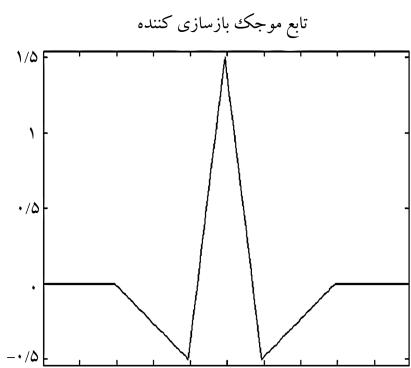
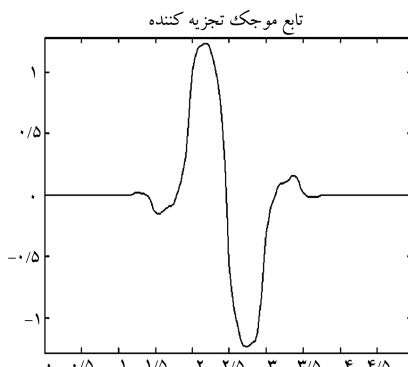
که در آن، دامنه‌ی تابع نرمال شده است، بنابراین، $\Psi(0) = 1$ و σ معیار گسترش زمان است. شکل تابع مورلت به صورت شکل ۲ است: [۱۸]

پ) بای ارتوگونال^۳: این خانواده از موجک‌ها، ویژگی قسمت خطی را به نمایش می‌گذارند، که معمولاً در سایر کاربردهای تبدیل موجک مثلاً در پردازش تصاویر، برای بازسازی سیگنال و تصویر مورد نیاز است. موجک‌های بای ارتوگونال روی یک سیگنال به صورت دوتایی اعمال می‌شوند، بدین صورت که یک موجک برای تجزیه و موجک دیگر به منظور بازسازی سیگنال مربوط به کار می‌رود (شکل ۳). [۱۸]

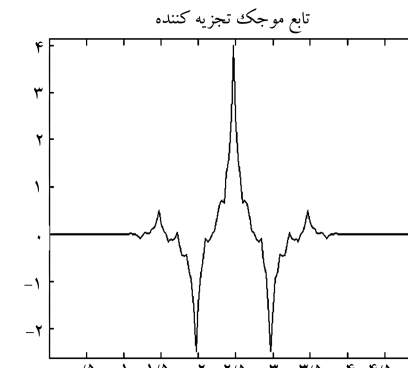
ت) تابع موجک داوپیچیس^۴: اینگرید داوپیچیس، یکی از پژوهشگران معروف در دنیای موجک است. هر آنچه که اختراع کرده است موجک‌های متعامد نامیده شده‌اند. نام‌های موجک‌های خانواده‌ی داوپیچیس به صورت dbN نوشته می‌شود، که در آن N، مرتبه و db لقب یا عنوان آن است (شکل ۴). [۱۸]



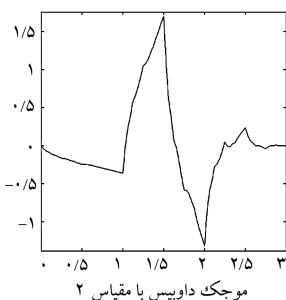
موجک بای ارتوگونال با مقیاس ۱/۳



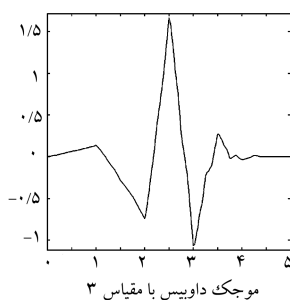
موجک بای ارتوگونال با مقیاس ۲/۲



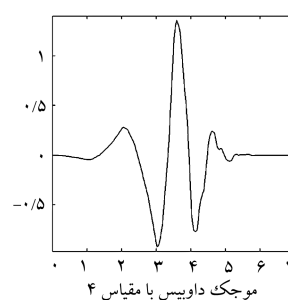
شکل ۳. موجک بای ارتوگونال.



موجک داوپیچیس با مقیاس ۲



موجک داوپیچیس با مقیاس ۳



موجک داوپیچیس با مقیاس ۴

شکل ۴. موجک داوپیچیس.

۵. آنالیز مودال

در دو دهه‌ی گذشته، آنالیز مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مهندسی تبدیل شده است. آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب بسامدهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها و به‌کارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی، مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شود. در عمل، انجام آنالیز مودال برای یک سازه به دو صورت کلی ممکن است: ۱. در این روش که بیشتر جنبه‌ی نظری و تئوری دارد، با مشخص کردن ابعاد هندسی سازه‌ی موردنظر و تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح آن، توسط نرم‌افزارهای مرسوم در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، آنالیز مودال انجام می‌شود و براساس آن خواص ذاتی دینامیکی سازه به دست می‌آیند. ۲. برای برخی کاربردهای مهندسی، آنالیز مودال براساس داده‌های دینامیکی حاصل از اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود. در این دسته روش‌ها که آنالیز مودال تجربی نامیده می‌شوند، با نصب حسگرهایی بر روی سازه‌ی موردنظر رفتارهای مختلف سازه، مثلاً تغییر شکل‌های آن تحت بارگذاری‌های مختلف، در یک دوره‌ی زمانی معین ثبت و ضبط می‌شوند. سپس براساس داده‌های برداشت‌شده، خواص دینامیکی سازه استخراج می‌شوند. برای استفاده‌ی عملی از تبدیل موجک، به داده‌های حاصل از آنالیز مودال تجربی نیاز است. برای انجام این کار باید آنالیز مودال آزمایشگاهی انجام داد. با استفاده از این آنالیز می‌توان تابع پاسخ بسامدی سازه را به دست آورد. از جمله کاربردهای آنالیز مودال می‌توان به پیش‌بینی پاسخ اجباری، رفع اشکال در سازه، تحلیل حساسیت، تعیین نیرو، و پیش‌بینی پاسخ اشاره کرد.^[۱۹]

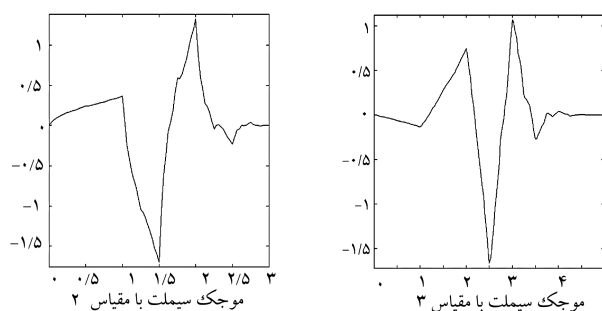
این تذکر لازم است که در مثال‌های ارائه‌شده‌ی بعدی، از آنالیزهای مودال نظری برای انجام بررسی‌ها استفاده شده است. به این منظور، ابتدا در هر یک از سازه‌های موردنظر با ایجاد یک یا چند خرابی تصنعی، رفتار دینامیکی سازه به صورت نظری توسط آنالیز مودال استخراج شده‌اند. این داده‌ها به جای داده‌های حاصل از آنالیز تجربی مودال استفاده شده و سپس رفتار دینامیکی به دست آمده برای سازه، تحت تبدیل موجک قرار گرفته است. انتظار می‌رود که تبدیل موجک بتواند با دقت مناسب محل خرابی‌های ایجادشده را بازشناسایی کند. مثال‌های بعدی میزان دقت به دست آمده را نشان می‌دهند.

۱.۵. مثال ۱. کشف آسیب در تیر دو سر ساده

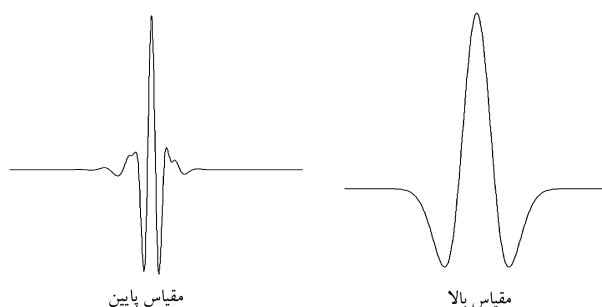
هدف این نوشتار، معرفی آنالیز موجک و استفاده از آن در سازه‌های مهندسی عمران است. به علت عدم دسترسی به نتایج حاصل از مطالعات تجربی و آزمایشگاهی، بررسی و امکان‌سنجی کاربرد روش پیشنهادی این نوشتار، فقط براساس مثال‌های نظری، که از لحاظ هندسه و مصالح، مشابه با کارهای آزمایشگاهی بوده‌اند، انجام شده است.

در مثال اول، کشف آسیب در یک تیر دوسر ساده بررسی شده است، که نمونه‌ی از این کار به صورت آزمایشگاهی توسط جین و ویرن (۲۰۰۸) و زانگ و اوایدیجی (۲۰۱۰) انجام شده است، که در شکل‌های ۸ و ۹ مدل‌های تجربی مورد استفاده‌ی آنها نشان داده شده است.^[۲۰]

تیر موردنظر به ۱۰۰۰ المان تقسیم و المان ۲۵۰ با کاهش جزئی سختی، به عنوان المان آسیب‌دیده معرفی شده است. مشخصات تیر بدین صورت است: طول تیر $L = 200$ cm؛ عرض تیر $B = 5$ cm؛ عمق تیر cm



شکل ۵. موجک سیملت.



شکل ۶. تغییر در مقیاس موجک‌ها.

ث) تابع موجک سیملت^۵: این موجک‌ها، موجک‌های تقریباً متقارنی هستند که دابچیس به منزله‌ی اصلاحاتی برای خانواده‌ی db ارائه کرده است. مشخصات این دو خانواده‌ی موجک مشابه به هم است (شکل ۵).^[۱۸]

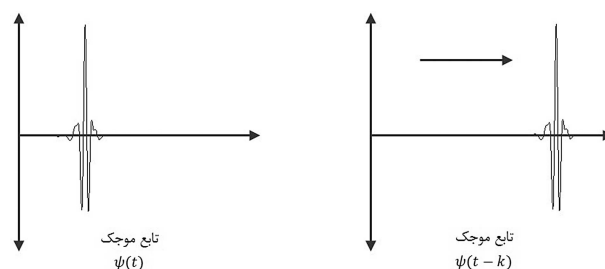
۳. مقیاس

به بیان ساده، مقیاس یک موجک به کشیدن و یا فشردن آن گفته می‌شود و نماد آن حرف a است. هر چه مقدار مقیاس بزرگ‌تر انتخاب شود، شکل موجک بازتر می‌شود؛ عکس این قضیه نیز صادق است. آثار انتخاب مقیاس روی موجک‌ها را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.^[۱۸]

۴. انتقال

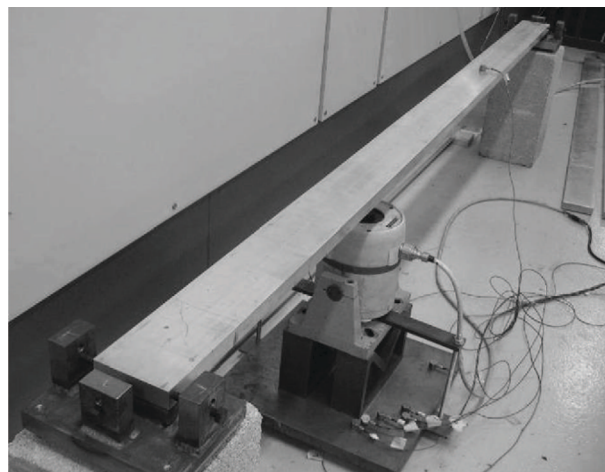
انتقال یک موجک به بیانی ساده، تأخیر در شروع سیگنال است (شکل ۷). از نظر ریاضی تأخیر تابع $\psi(t)$ به اندازه‌ی k به صورت رابطه‌ی ۸ بیان می‌شود:^[۱۸]

$$\psi(t - k) \quad (8)$$



شکل ۷. انتقال (تغییر در موقعیت) موجک‌ها.

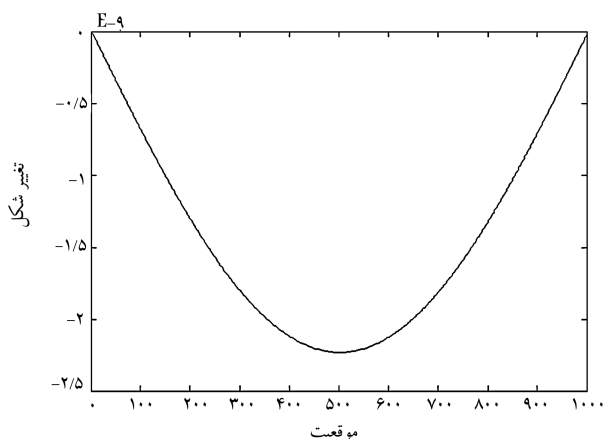
است. موجک‌های دیگر نیز توانایی کشف آسیب را دارند، اما باید آن‌ها را تحت مقیاس‌های مختلف بررسی کرد، موجک bior نیز از این قاعده مستثنی نیست. در ادامه، کشف آسیب در تیر دو سر ساده‌ی آسیب‌دیده‌ی مثال قبل، تحت موجک‌های مختلف با مقیاس‌های متفاوت بررسی شده است. انتخاب مقیاس برای کشف آسیب، اهمیت زیادی دارد. شکل موجک‌ها در مقیاس‌های پایین، به صورت فشرده و در مقیاس‌های بالا بازتر است. یکی از معایب تبدیل موجک این است که در نقاطی



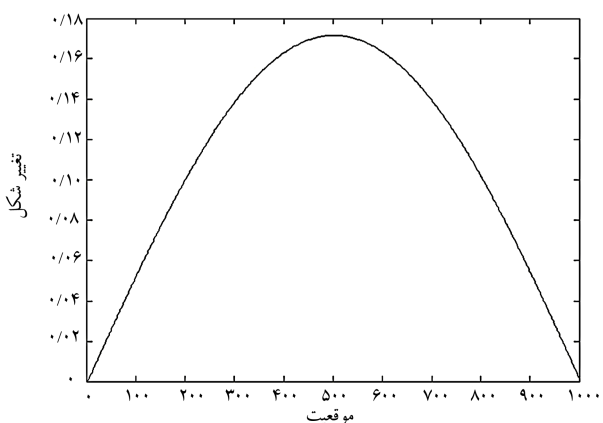
شکل ۸. مدل تیر آزمایشگاهی جین و ویرن (۲۰۰۸). [۲]



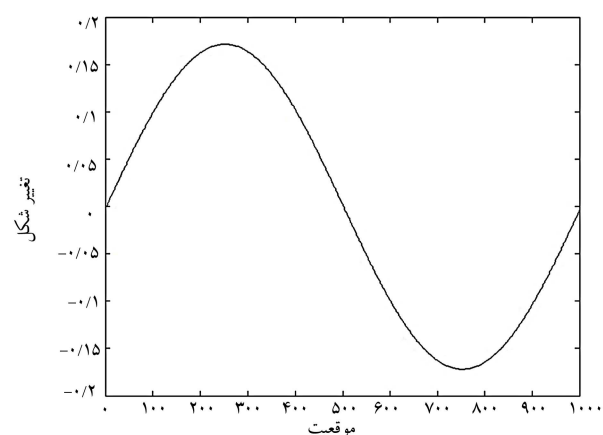
شکل ۹. مدل تیر آزمایشگاهی زانگ و اوایدیجی (۲۰۱۰). [۲۰]



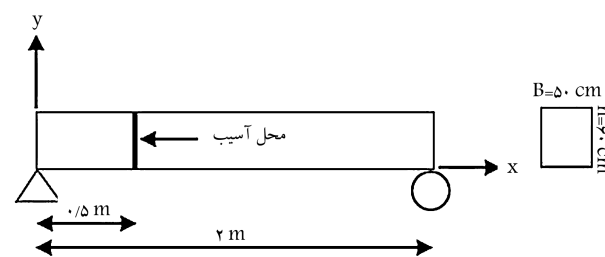
شکل ۱۰. شکل مودی اول تیر آسیب‌دیده.



شکل ۱۱. شکل مودی دوم تیر آسیب‌دیده.



شکل ۱۲. شکل مودی سوم تیر آسیب‌دیده.



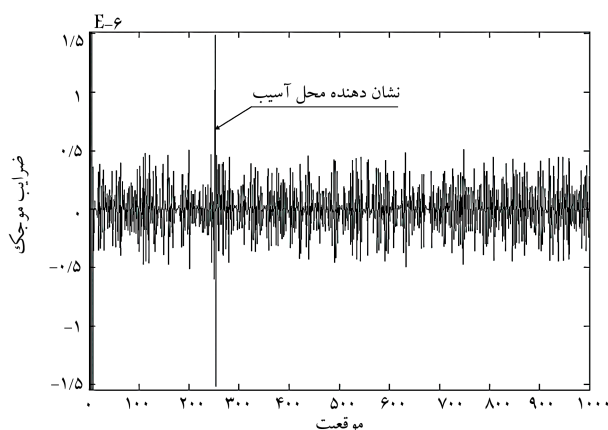
شکل ۱۳. ابعاد هندسی تیر دو سر ساده.

$h = 60$ ؛ وزن مخصوص $\lambda = 23.563 \text{ kN/m}^3$ ؛ مدول کشسانی KN/m^2 $E = 24855578$ ؛ نسبت بواسون $\nu = 0.2$. با توجه به اینکه طول تیر برابر با ۲۰۰۰ میلی‌متر و المان‌های آن برابر ۱۰۰۰ عدد است، بنابراین طول هر المان ۲ میلی‌متر است. المان آسیب‌دیده‌ی تیر در فاصله‌ی ۰/۵ متری از تکیه‌گاه سمت چپ قرار دارد (شکل ۱۰).

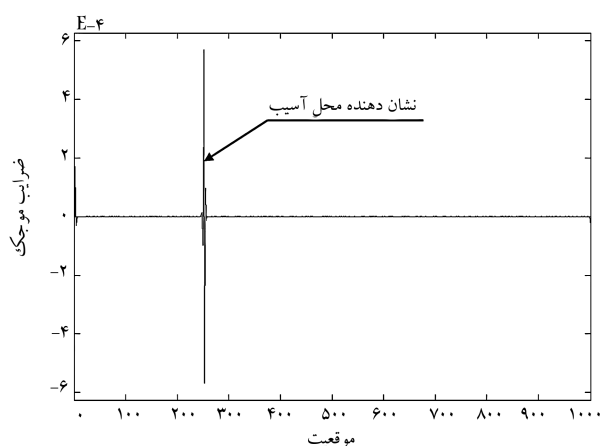
تیر آسیب‌دیده تحت آنالیز مودال قرار گرفته است، که با توجه به شکل‌های مودی آن (شکل‌های ۱۱ تا ۱۴)، ملاحظه می‌شود که این نمودارها ظاهراً با حالت تیر سالم تفاوتی ندارند و لذا تعیین محل آسیب (المان ۲۵۰) ظاهراً به کمک این نمودارها ممکن نیست.

حال اگر اطلاعات حاصل از این تغییر شکل‌ها تحت آنالیز موجک قرار گیرند، محل آسیب به صورت یک اغتشاش با دامنه‌ی متفاوت به وضوح مشخص می‌شود. پس از اعمال تبدیل موجک از نوع ایستا (SWT)، نتایج آن را می‌توان در ادامه مشاهده کرد (شکل‌های ۱۵ تا ۱۸).

با توجه به نتایج به دست آمده از تبدیل موجک ملاحظه شد که این تبدیل، توانایی کشف آسیب‌های جزئی را دارد. موجک مورد استفاده، موجک bior بوده



شکل ۱۷. تبدیل موجک مود سوم تیر با موجک ۳/۵ bior.



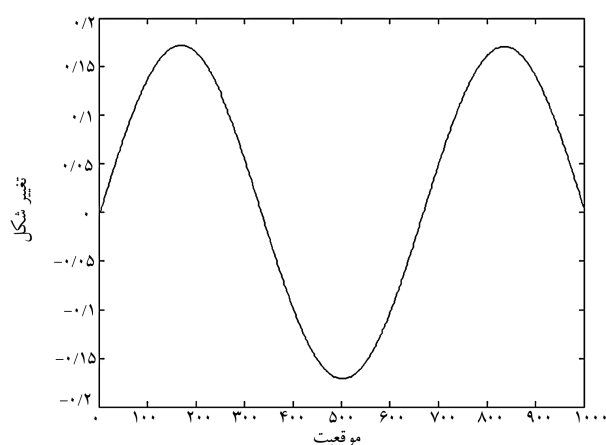
شکل ۱۸. تبدیل موجک مود چهارم تیر با موجک ۲/۲ bior.

تبدیل موجک مثال قبل تحت مقیاس‌های بالا و پایین مورد بررسی قرار گرفته است، تا اثرات مقیاس روشن‌تر شود (شکل‌های ۱۹ تا ۲۴). محل آسیب، المان ۲۵۰ است.

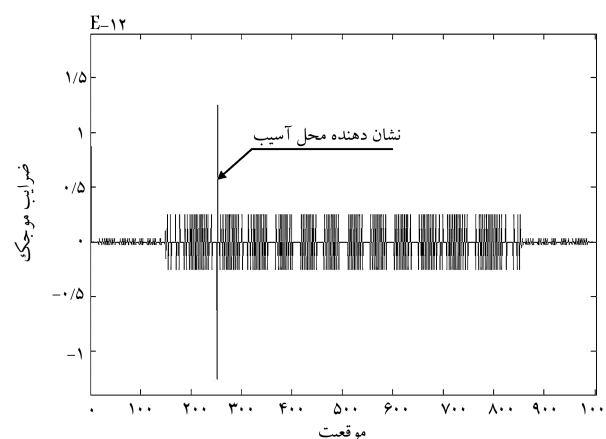
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقیاس‌های بالا و پایین تفاوت‌هایی با هم دارند. با انتخاب مقیاس‌های بالا، اثرات قطع سیگنال در دو انتهای نمودار موجک به وجود می‌آید (شکل‌های ۲۰، ۲۲ و ۲۴) که به صورت پرشی در دو انتها است، برای رفع این مشکل می‌توان مقیاس را تغییر داد (شکل‌های ۱۹، ۲۱ و ۲۳). راه دیگری که برای رفع مشکل پرش دو انتها وجود دارد، این است که سیگنال را در دو انتها بسط دهیم. با توجه به اثرات مقیاس می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر آسیب در نمودار ضرایب موجک در مقیاس‌های پایین فشرده است و محل اغتشاش را با وضوح بالاتری نشان می‌دهد. در حالی که افزایش مقیاس باعث وضوح کمتر می‌شود. بنابراین مقیاس‌های بالا برای شناسایی آسیب‌های کوچک و مقیاس‌های پایین برای تشخیص آسیب‌های نزدیک تکیه‌گاه توصیه می‌شود.

۲.۵. مثال ۲. کشف آسیب در قاب دو بُعدی

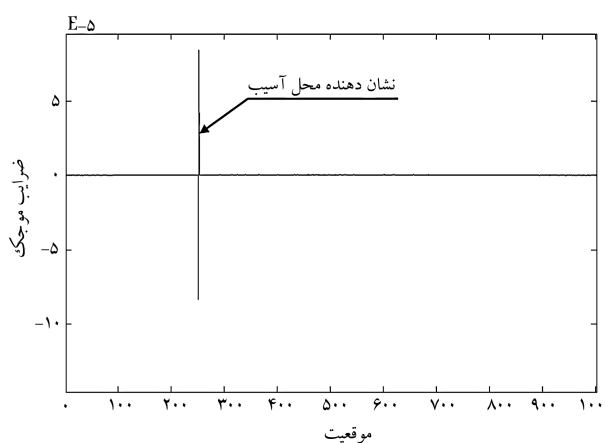
در این مثال قاب یک طبقه در معرض بار گسترده‌بی قرار دارد که به صورت جانبی به آن وارد می‌شود (شکل ۲۵). مشخصات هندسی قاب بدین صورت است: طول تیر $L = 600$ cm، ارتفاع ستون $h = 300$ cm، وزن مخصوص KN/m^3



شکل ۱۴. شکل مودی چهارم تیر آسیب‌دیده.

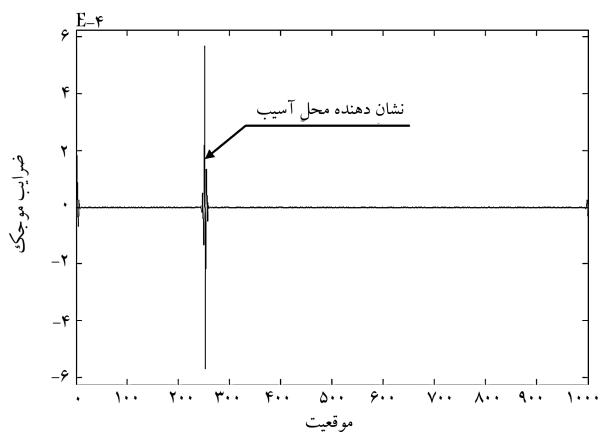


شکل ۱۵. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۳/۷ bior.

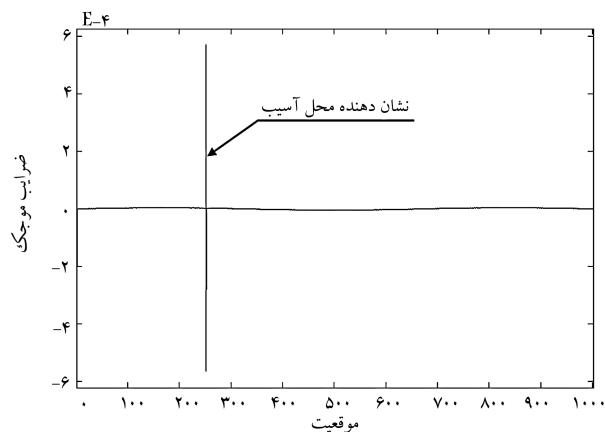


شکل ۱۶. تبدیل موجک مود دوم تیر با موجک ۶/۸ bior.

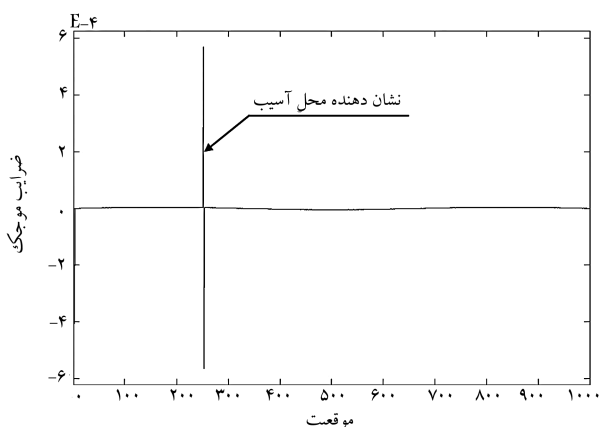
که سیگنال قطع می‌شود، مانند محل تکیه‌گاه‌ها، این نقاط در مواردی به صورت محل‌های ناپیوسته شناسایی می‌شود و در نمودار ضرایب موجک نقاط ذکر شده اغتشاش‌دار خواهند بود. به عبارتی دیگر، تبدیل موجک، همان تحلیلی که از محل‌های ناپیوستگی یا آسیب‌دیده دارد، نسبت به نقاط قطع سیگنال هم همان رفتار را دارد. این مشکل هنگامی جدی‌تر خواهد شد که آسیب‌هایی نزدیک تکیه‌گاه به وجود آید. با انتخاب درست مقیاس، می‌توان بر این مورد غلبه کرد. برای بررسی اثر مقیاس،



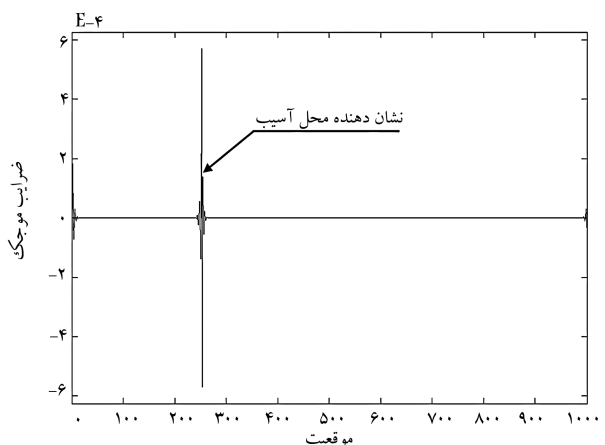
شکل ۲۲. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۸ sym.



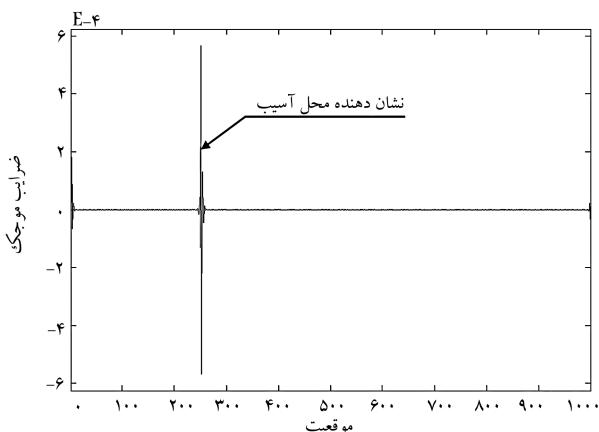
شکل ۱۹. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۲ db.



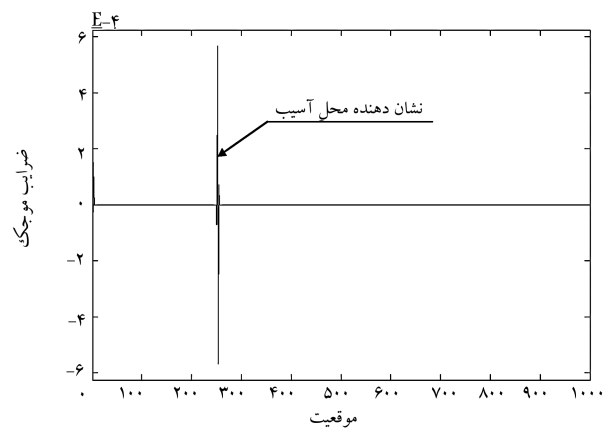
شکل ۲۳. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۱/۱ bior.



شکل ۲۰. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۹ db.



شکل ۲۴. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۶/۸ bior.

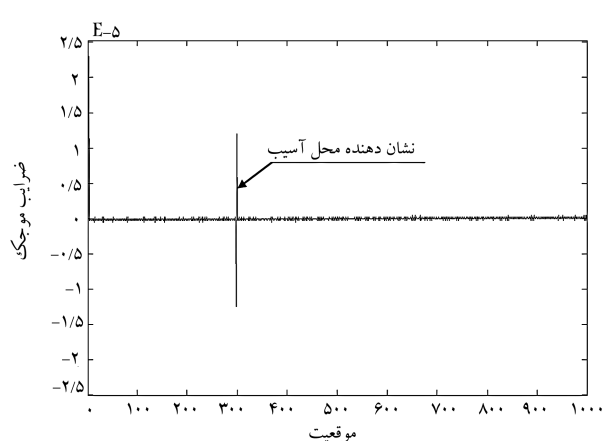


شکل ۲۱. تبدیل موجک مود اول تیر با موجک ۲ sym.

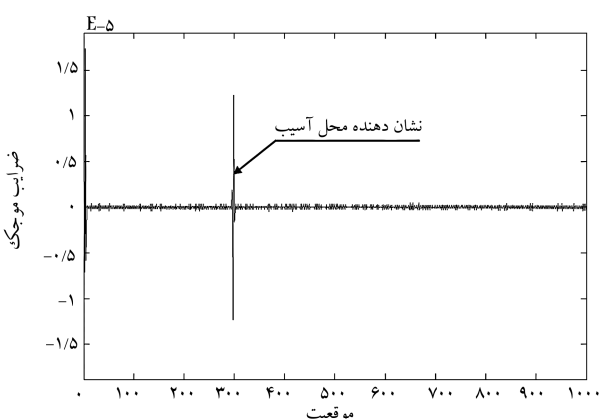
که با توجه به بررسی آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل موجک ایستا و گسسته به خوبی قادر به نشان دادن آسیب هستند. تغییرات ناگهانی ابتدا و انتهای در برخی از شکل‌ها به دلیل قطع ناگهانی سیگنال در آن نواحی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برخی از موجک‌ها محل آسیب را با حساسیت بالاتری نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند به دلیل شباهت شکل آن موجک با سیگنال مورد نظر باشد، به همین دلیل بهتر است برای سیگنال‌های مختلف هر سه نوع تبدیل موجک با مقیاس و موجک‌های متفاوت بررسی شوند.

$\lambda = 23/563$ ، مدول کشسانی $E = 24855578 \text{ KN/m}^2$ ، نسبت پواسون $\nu = 0/2$. همانند مثال قبل، نتایج آنالیز مودال این مثال نیز حاصل یک تحلیل ریاضی است. قسمت تیر قاب به 1000 المان تقسیم و سپس المان 300 با کاهش جزئی مساحت به عنوان محل آسیب دیده معرفی شده است. پاسخ تیر قسمت افقی قاب مورد نظر پس از آنالیز مودال، تحت تبدیل موجک قرار گرفته است (شکل‌های ۲۶ الی ۲۹).

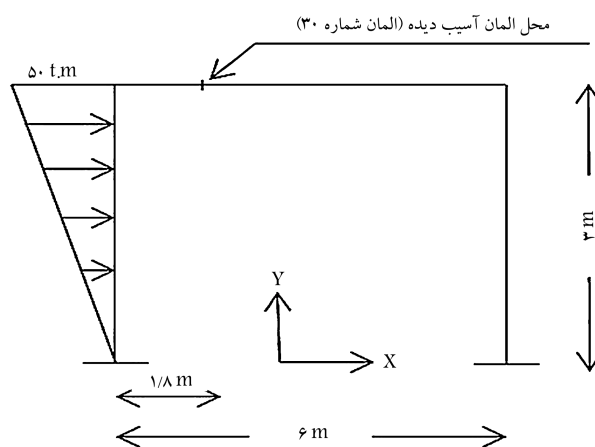
در این مثال از هر دو نوع تبدیل موجک ایستا و گسسته استفاده شده است،



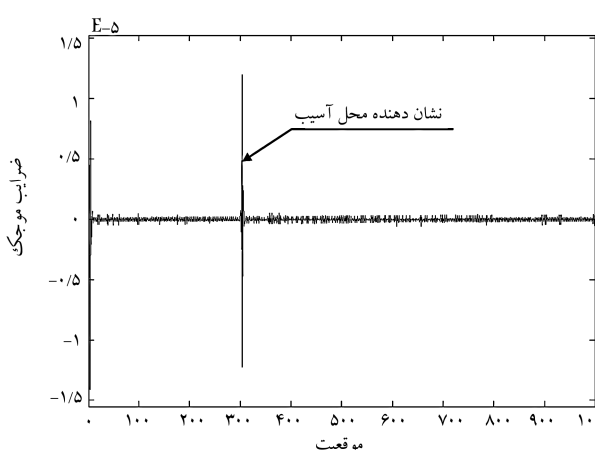
شکل ۲۸. تبدیل موجک ایستا با موجک ۱ db.



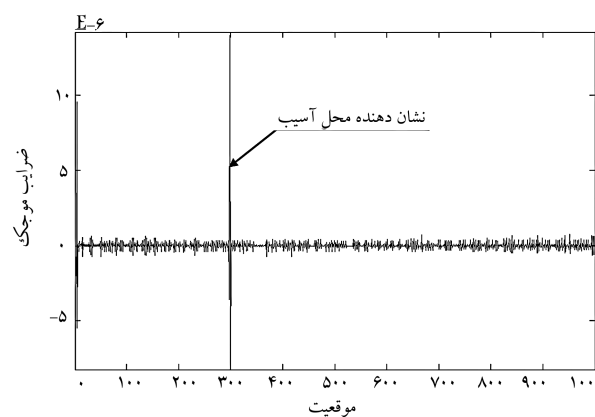
شکل ۲۹. تبدیل موجک ایستا با موجک ۲ sym.



شکل ۲۵. هندسه‌ی قاب دو بَعْدی.



شکل ۲۶. تبدیل موجک گسسته با موجک ۳/۵ bior.



شکل ۲۷. تبدیل موجک گسسته با موجک ۴ sym.

۳.۵. مثال ۳. کشف آسیب در پل کابلی

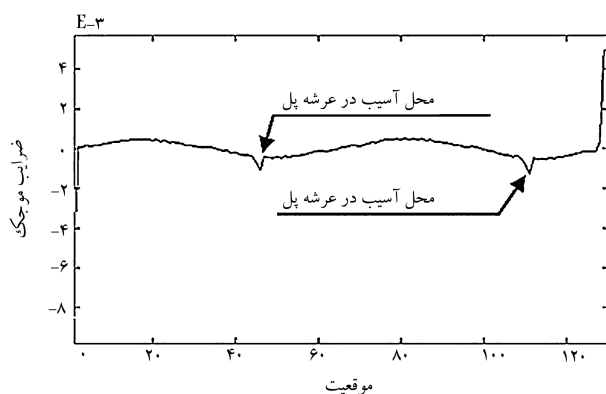
در دو مثال قبل مشاهده شده است که تبدیل موجک، قابلیت کشف آسیب در تیر و قاب یا سازه‌های کوچک را با دقت بالایی دارد. در سازه‌های بزرگی مانند پل‌ها و سدها نیز کشف آسیب بسیار حائز اهمیت است. پل نمونه‌ی مورد استفاده در این نوشتار، پل هشتم اهواز است، که به صورت کابلی اجرا شده است. این پل که به منظور کاهش بار ترافیکی بر روی رودخانه کارون طراحی شده است، بزرگ‌ترین پل کابلی

ایران است که با بهره‌برداری از آن، از ترافیک سنگین موجود بر روی پل‌های منتهی به مرکز شهر کاسته می‌شود.

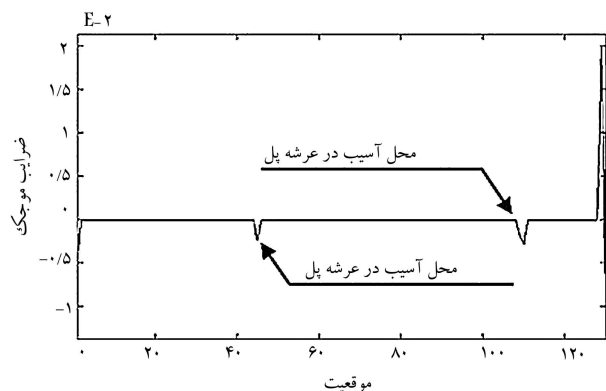
طول بخش فلزی این پل ۶۴۱ متر و بخش بتنی آن ۴۱۶ متر است، که در مجموع ۱۰۵۷ متر طول دارد و عرض آن نیز ۲۰/۶۰ متر با ۱۳ متر سواره‌رو و دو پیاده‌رو به عرض مجموعاً ۷ متر است. دهانه‌ی اصلی این پل با ۲۱۲ متر و کوله‌های این پل نیز از نوع دیوار بتنی بسته است و ۱۱ عدد پایه و ۲۲ عدد ستون دارد. همچنین پل یادشده دارای دو عدد پیلون اصلی به ارتفاع ۸۱/۱۰ متر است. بتن مصرفی در عرشه از کابل ۱ تا ۲۶، از رده‌ی ۴۰۰ با کمینه‌ی عیار ۴۵۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن و از کابل ۲۶ تا وسط دهانه از رده‌ی ۵۰۰ با عیار ۵۵۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن است. همچنین بتن مصرفی در کلیه‌ی قسمت‌های پیلون‌ها، از رده‌ی ۴۰۰ با کمینه‌ی عیار ۴۵۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن است. مصالح مربوط به کابل‌ها از نوع رشته‌ی بافته‌ی ۷ سیمی به قطر ۱۵/۷۵ میلی‌متر با سطح مقطع برابر ۱۵۰ میلی‌متر مربع و مقاومت گسیختگی ۲۷۹ کیلو نیوتن است. پل کابلی، مطابق با نقشه‌های آن در نرم‌افزار Sap ۲۰۰۰ مدل شده است (شکل ۳).

پاسخ سازه نیز، تغییر شکل‌های حاصل از آنالیز مودال است. این تذکر لازم است که به دلیل بزرگ بودن طول پل، با داده‌های بسیاری از آنالیز مودال مواجه شده‌ایم. بدین منظور بعد از انجام آنالیز مودال روی کل سازه، برای راحتی کار، فقط نتایج قسمتی از عرشه‌ی پل جدا و نتایج آنالیز موجک روی این محدوده نشان داده شده است (شکل ۳۱).

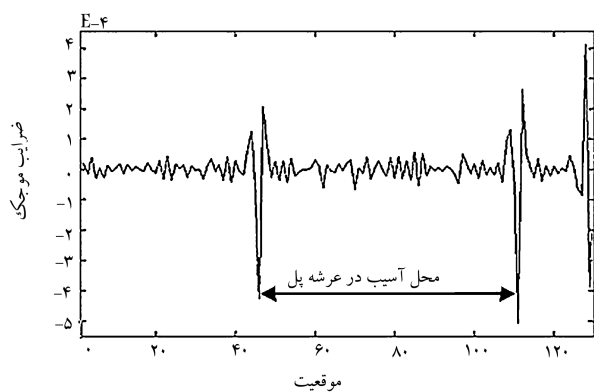
پاسخ سازه که به تبدیل موجک معرفی می‌شود، نتایج حاصل از آنالیز مودال



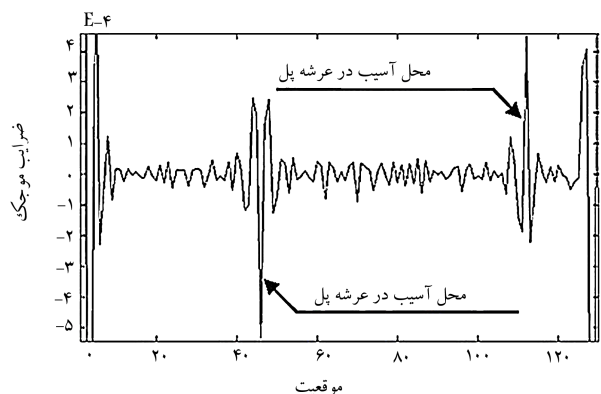
شکل ۳۳. تبدیل موجک ایستا با موجک ۱ haar.



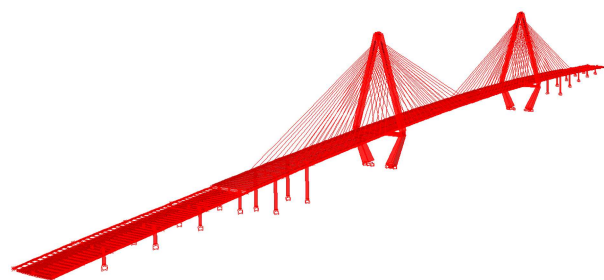
شکل ۳۴. تبدیل موجک ایستا با موجک ۲ db.



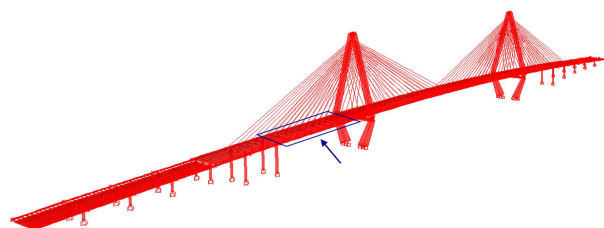
شکل ۳۵. تبدیل موجک ایستا با موجک ۲/۲ bior.



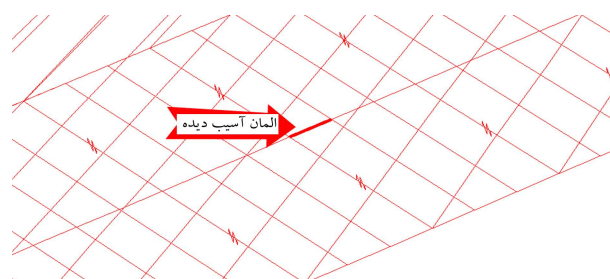
شکل ۳۶. تبدیل موجک گسسته با موجک ۶ db.



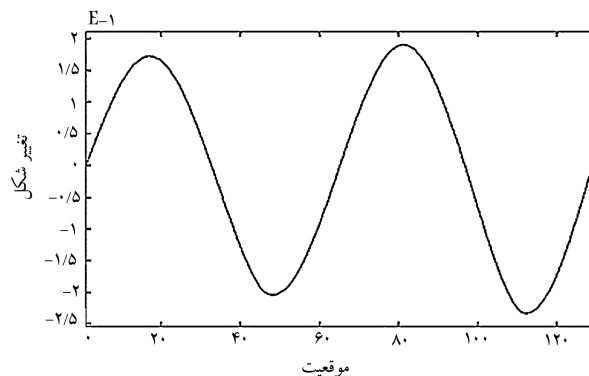
شکل ۳۷. پل کابلی.



شکل ۳۸. محدوده‌ی انتخابی برای کشف آسیب.

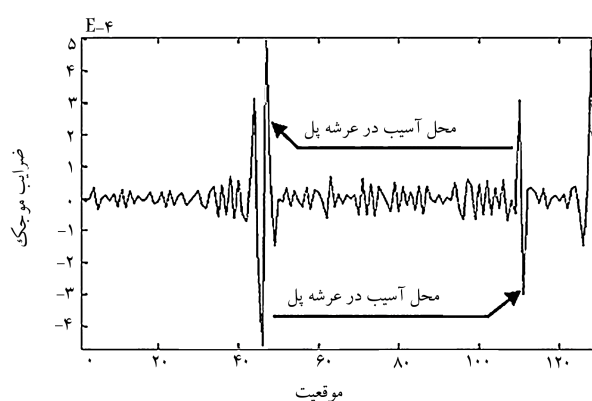


شکل ۳۹. نمونه‌ی از المان آسیب دیده.

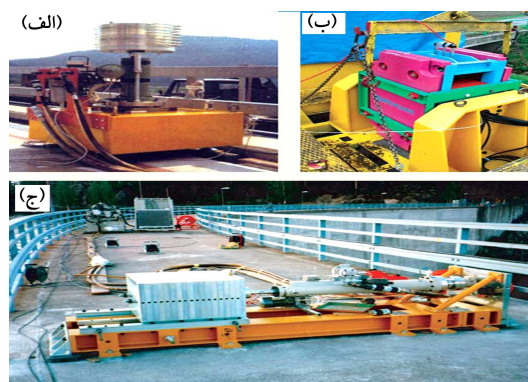


شکل ۴۰. شکل مودی عرشه‌ی پل آسیب دیده.

روی پل است. برای واردکردن آسیب، در محدوده‌ی ذکرشده دو المان انتخاب و سختی آنها کاهش داده شده است (شکل ۳۲). پس از انجام آنالیز، نتایج برای ۱۳۰ المان در محدوده‌ی موردنظر استخراج شده است (شکل ۳۳). المان آسیب دیده المان‌های ۴۵ و ۱۱۰ هستند. مطابق شکل مذکور، ظاهراً این شکل با حالت سالم آن تفاوتی ندارد و بیانگر این نکته است که شناسایی آسیب در مراحل اولیه‌ی پیدایش آنها به کمک روش‌های معمول و با استفاده از شکل‌های مودی ساده ممکن نیست. اما در ادامه، نتایج حاصل از تبدیل موجک برای شکل مودی پل آسیب دیده که توانمندی این روش را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است (شکل‌های ۳۴ الی ۳۸).



شکل ۳۸. تبدیل موجک گسسته با موجک bior ۳/۵.



شکل ۳۹. آزمایش مودال تجربی سد.



شکل ۴۰. آزمایش مودال تجربی پل کابلی.

با توجه به نتایج تبدیل موجک می‌توان اظهار داشت که این روش، روشی بسیار کارا در کشف آسیب‌های بسیار کوچک در هر سازه‌ای است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این آنالیز توانایی کشف آسیب‌های چندگانه را با تقریب قابل قبولی دارد. هر دو تبدیل موجک گسسته و ایستا در کشف آسیب موفق عمل کرده‌اند، اما در تمامی موارد و برای انواع سیگنال‌های معیوب چنین نیست و بهتر است که هر سه نوع تبدیل موجک، تحت موجک‌ها و مقیاس‌های مختلف بررسی شوند. از میان موجک‌های مادر به نظر می‌رسد که موجک bior نسبت به موجک‌های دیگر، محل آسیب را با کیفیت بالاتری آشکار می‌سازد. علاوه بر عرشه‌ی پل، کابل‌ها و پایلون‌های پل نیز در معرض آسیب قرار گرفته‌اند، که می‌توان با استفاده از روش تبدیل موجک و حتی به کمک اطلاعات حاصل از آزمایش‌های مودال تجربی که روی سازه‌های بزرگ صورت می‌گیرد (شکل‌های ۳۹ و ۴۰)، نیز به کشف آسیب در آنها پرداخت.

۶. نتیجه‌گیری

وجود آسیب در سازه‌ها می‌تواند منجر به گسیختگی سازه و خسارت‌های جبران‌ناپذیری شود. به این منظور بهتر است که آسیب‌ها در مراحل اولیه‌ی شکل‌گیری و رشد کشف شوند تا نسبت به پیش‌روی آن‌ها جلوگیری به عمل آید. در این میان روش آنالیز موجک به دلیل توانایی بالا و حساس بودن به محل ناپیوستگی‌ها، می‌تواند آسیب‌های کوچک را کشف کند، در حالی که روش‌های دیگر کشف آسیب در پیدا کردن همان آسیب‌های جزئی، ناتوان هستند. در این مطالعه، توانایی آنالیز موجک در کشف آسیب با ذکر مثال‌هایی نشان داده شده است، که شناسایی و کشف محل دقیق آسیب‌های بسیار کوچک از مزایای این روش محسوب می‌شود. برای کشف یک آسیب، انتخاب موجک مادر و مقیاس آن اهمیت بسیاری دارد، که در کشف آسیب باید به این مورد توجه داشت. این موضوع در کشف آسیب‌های نزدیک تکیه‌گاه‌ها یا آسیب‌های کوچک مهم‌تر می‌شود. این آنالیز قابلیت بالایی در تحلیل سیگنال پاسخ سازه دارد. این قابلیت در شناسایی انواع ناپیوستگی یا ناهماهنگی مانند کاهش ناگهانی سختی نمایان است و از روی نمودار، ضرایب موجک به صورت یک یا چند نقطه‌ی نزدیک به هم دارای اغتشاش یا مقادیر ناهماهنگ با نقاط دیگر قابل تشخیص است. بر این اساس، روش آنالیز موجک را می‌توان از روش‌های بسیار کارا در زمینه‌ی کشف آسیب به‌شمار آورد.

پانویس‌ها

1. Haar
2. Morlet
3. Biorthogonal
4. Daubechies
5. Symlet

منابع (References)

1. Khajavi, K. "Identification of boundary condition of structures based on respons of structure", MSc thesis, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz (2008).
2. Zhongm, S. and Oyadiji, S.O. "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers and*

- Structures*, **89**(1-2), pp. 127-148 (January 2011).
3. Hou, Z., Noori, M. and Amand, R. "Wavelet-based approach for structural damage detection", *J. of Engineering Mechanics*, **126**(7), pp. 677-683 (July 2000).
4. Ko, J.M., Sun, Z.G. and Ni, Y.Q. "Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge", *J. Engineering Structures*, **24**(7), pp. 857-868 (2002).
5. Ovanesova, A.V. and Suarez, L.E. "Application of wavelet transforms to damage detection in frame structures", *J. Engineering Structures*, **26**(1), pp. 39-49 (2004).
6. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *J. Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
7. Han, J.G., Ren, W.X. and Sun, Z.S. "Wavelet packet based damage identification of beam structures", *Int. J. of Solids and Structures*, **42**(26), pp. 6610-6627 (2005).
8. Bajaba, N.S. and Alnefaie, K.A. "Multiple damage detection in structures using wavelet transforms", *Emirates Journal for Engineering Research*, **10**(1), pp. 35-40 (2005).
9. Kim, B.H., Park, T. and Voyiadjis, G.Z. "Damage estimation on beamlike structures using the multi-resolution analysis", *Int. J. of Solids and Structures*, **43**(14-15), pp. 4238-4257 (2006).
10. Rucka, M. "Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **49**(2), pp. 399-417 (2011).
11. Lotfollahi Yaghin, M.A. and Kohderagh, M. "Using of continue wavelet analysis in detection of damage structural elements by finite elements methods", 5th International Congress on Civil Engineering (2010).
12. Lotfollahi Yaghin, M.A. and Kohderagh, M. "Using of wavelet packet analysis for detection of position and deepness of crack in bent beams by finite elements methods", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **44**(3), pp. 447-456 (2010).
13. Lotfollahi-Yaghin, M.A., Shamsai, A. and Hesari, M.A. "Application of stationary wavelet transform (SWT) to the crack detection in concrete arch dams by frequency analysis", *The Modares Journal Of Civil Engineering*, **11**(3), pp. 27-39 (2011).
14. Golmohamadi, M., Badri, H. and Ebrahimi, A. "Damage diagnosis in bridges using wavelet", *IACSIT Coimbatore Conferences, IPCSIT*, **28**, pp. 202-207 (2012).
15. Bagheri, A. and Kourehli, S. "Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**(2), pp. 289-304 (2013).
16. Hansang, K. and Hani, M. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (February 2004).
17. Hester, D. and González, A. "A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 145-166 (April 2012).
18. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. and Poggi, J.-M., "Wavelet Toolbox for Use with MATLAB", Wellesley-Cambridge Press, pp. 3-17 (2006).
19. Fu, Z.-F. and He, J., *Modal Analysis*, Translator: Zia-eirad, Saeed, Isfahan, Danesh Pajooohan Barin Scientific Institute Publication, pp. 1-4 (1384).
20. Zhong, S. and Oyadiji, S.O. "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers and Structures*, **89**(1-2), pp. 127-148 (January 2011).