

استفاده از تبدیل موجک ایستا (SWT) در شناسایی ترک سدهای بتنی قوسی، تحت آنالیز فرکانسی

محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۱*}، ابوالفضل شمسایی^۲، محمدامین حصاری^۳

۱- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲- استاد دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علوم تحقیقات تهران

۳- دانشجوی دکتری عمران- آب، دانشگاه علوم تحقیقات تهران

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۴/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۹/۲۶

چکیده- این پژوهش به تشخیص ترک در سازه سد به وسیله آنالیز موجک (Wavelet) پرداخته است. نمونه مطالعه شده، سد بتنی دوقوسی کارون ۱ (شهید عباس‌پور) با ارتفاع ۲۰۰ متر است. این سد به دلیل تفاوت شعاع‌ها و زوایای داخلی و خارجی و عدم تقارن مرکز قوس‌های داخلی و بیرونی در ترازهای مختلف از پیچیده‌ترین سدها است. بر این اساس با داشتن مشخصات هندسی سد مذکور از روی نقشه‌های طراحی مربوطه و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی، با نرم افزار ABAQUS در دو حالت بدنه بدون ترک و ترکدار سد، مدل‌سازی شده است. با استفاده از پاسخ آنالیز فرکانسی سد با نرم افزار ABAQUS، امکان تشخیص ترک موجود در سازه سد با آنالیز موجک (Wavelet) در جعبه ابزار نرم افزار MATLAB بررسی شده است.

کلیدواژگان: سد بتنی قوسی، آنالیز فرکانسی، ترک، آنالیز موجک، آباکوس، مطلب

۱- مقدمه

هم‌زمان با پیشرفت فناوری طراحی و تولید قطعات پیچیده، لزوم استفاده از روش‌های علمی برای کاهش هزینه و زمان و همچنین پاسخ‌گویی به مشکلات و نیازهای صنایع در این زمینه مطرح است. بنابراین روش المان محدود به عنوان یک روش برای حل مسائل متعدد مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی یا غیرخطی به کار گرفته می‌شود [۱]. در میان نرم‌افزارهای روش المان محدود، نرم افزار آباکوس^۱

به دلیل دقت بالای محاسباتی، سهولت در دستیابی و فهم نحوه کارکرد برنامه‌های آن، توانایی مونتاژ قطعات در محیط جداگانه، سادگی ایجاد تماس بین سطوح و امکان تحلیل بارگذاری دینامیکی [مانند زلزله و امواج آب] روی انواع سازه‌ها، به عنوان یک نرم‌افزار بسیار دقیق تحقیقاتی و کاربردی در صنعت و دانشگاه شناخته شده است [۲]. در دو دهه گذشته، آنالیز مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مهندسی تبدیل شده است. آنالیز مودال، فرایند

1- ABAQUS

تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها و به‌کارگیری آن‌ها برای ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی به مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند. شکل مودهای ارتعاشی وابسته به دینامیک سیستم است و به‌وسیله‌ی خواص فیزیکی (جرم، سختی، میرایی) و نحوه توزیع فضایی آن‌ها تعیین می‌شوند. پیش‌بینی پاسخ یک سازه به ارتعاشات محیطی و یا بارهای خارجی کاربردهای زیادی دارد. این پیش‌بینی بر اساس یک مدل ریاضی دقیق که می‌تواند به کمک آنالیز مودال استخراج شود انجام می‌شود. آنالیز مودال به عنوان یک تست غیرمخرب و کارا، اطلاعات ارزشمندی برای نگه‌داری و تصمیم‌گیری‌های اقتصادی سازه‌های حجیم مانند سدها ارائه می‌دهد [۳].

تشخیص عیوب سازه همواره در صنایع جزء مسائل مهم در اولویت بوده است. خرابی‌ها ممکن است به‌صورت پیش‌رونده مانند کاهش سختی و مقاومت در اثر رشد ترک رخ دهند [۴]. برای تشخیص وجود آسیب، لازم است آثار وقوع آن بررسی شود. طبق اصول تئوری سازه، پاسخ استاتیکی و دینامیکی هر سازه با سختی آن رابطه دارد؛ در نتیجه هر گونه تغییر ناگهانی در سختی، با تغییر در پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه همراه خواهد بود. این امر امکان تعیین آسیب سازه را با بررسی تغییر پاسخ سازه قبل و بعد از ایجاد آن، فراهم می‌کند. متدهای پایش سلامت سازه‌ها موضوع تحقیقات پر دامنه‌ای است که تاکنون انجام شده است [۵].

روش جدید و کارا که در سال‌های اخیر برای تشخیص آسیب سازه مورد توجه قرار گرفته است، روش موجک

است. این روش با مباحث زمان و فرکانس ارتباط تنگاتنگی داشته و توانایی بسیار بالایی در شناسایی محل آسیب دارد. اولین مقاله‌های منتشرشده درباره‌ی کشف ترک با استفاده از روش موجک. مقاله لیو و وانگ در سال ۱۹۹۸ است [۵]. در این مقاله تلاش برای شناسایی ترک در تیر با تکیه‌گاه ساده ارائه شده است. مقاله دیگری در سال ۲۰۰۴ به‌وسیله‌ی لی و همکاران ارائه شد که در آن متدی را برای شناسایی مشخصات آسیب بر اساس اجزای محدود موجکی^۲ ارائه داده‌اند [۶]. در این روش به شناسایی نقاط آسیب مانند ترک‌خوردگی تیر پرداخته شده است.

اما در این میان تشخیص خرابی موجود در سازه عظیم و مهمی همچون سد بر پایه آنالیز موجک بی‌توجهی شده است. بر این اساس با در دست داشتن مشخصات هندسی سد موردی کارون ۱ از روی نقشه‌های طراحی مربوطه و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سد، در دو حالت سالم و ترک‌دار با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. شرایط تکیه‌گاهی و مشخصات فیزیکی برای هر دو حالت یکسان است. به‌طور کلی موارد زیر انجام شده است:

- ✓ مدل کردن سد و خرابی
- ✓ مش‌بندی
- ✓ برداشت پاسخ سد با یک سری داده
- ✓ انتخاب نوع تحلیل، تنظیم پارامترها و انجام تحلیل
- ✓ انجام آنالیز موجک روی داده‌ها
- ✓ بررسی امکان شناسایی آسیب در سد سالم و ترک‌دار
- ✓ مقایسه و نتایج

تحقیقات مرتبط

به‌طور کلی تحقیقات انجام شده درباره‌ی آنالیز مودال در ارتباط با سد، چندان گسترده نبوده اما می‌توان به مقایسه مودال کوپلی و غیرکوپلی در آنالیز لرزه‌ای سد بتنی وزنی

در دامنه زمانی، سامی و لطفی [۷]، آنالیز مودال سیستم سد-فونداسیون در دامنه زمانی به وسیله توافقی و اوماچی [۸] و آنالیز لرزه‌ای سیستم سد و مخزن به وسیله کالایر و همکاران [۹] اشاره کرد.

در سال‌های گذشته برای رسیدن به هدف شناسایی مشخصات ترک، پژوهش‌های فراوانی انجام شده است که در ادامه به مهم‌ترین این تلاش‌ها اشاره می‌شود:

دیمارگوناس به عنوان ایده اولیه، ترک را به صورت نرمیت موضعی مدل کرد و سختی معادل را با آزمایش‌هایی به دست آورد [۱۰]. چاندراس این روش را برای مطالعه پاسخ دینامیکی تیر ترک خورده به کار برد [۱۱]. لیانگ و همکارانش مسئله مشابهی را مطالعه کردند و نشان دادند که معادله مشخصه می‌تواند برای محاسبه مقدار سختی برای یک فرکانس طبیعی و موقعیت ترک، حل شود [۱۲]. بنکس و همکاران روش دیگری را برای شناسایی آسیب پیشنهاد دادند. آن‌ها از تغییرات سختی و نسبت میرایی برای شناسایی آسیب سازه‌ای استفاده کردند [۱۳]. روتولو و سورس روشی را ارائه دادند که از پارامترهای مودال برای تخمین اندازه و موقعیت ترک در یک تیر دارای ترک دوپل استفاده قرار می‌کند [۱۴]. شیفرین و روتولو روشی را برای مطالعه تاثیر تعداد ترک روی فرکانس‌های طبیعی ارائه کردند [۱۵].

در پژوهش انجام شده به وسیله چانگ و چن در سال ۲۰۰۳، محل آسیب روی یک تیر دوسرگردار با تبدیل موجک روی پاسخ ارتعاشی مودهای اول، دوم و سوم به دست آمد. برای محاسبه شکل مد ارتعاشی از روش تحلیلی استفاده شده و ترک با فنر پیچشی معادل جایگزین شد [۱۶]. در مقاله دیگری که به وسیله ی اواسنا و سوارز در سال ۲۰۰۳ نوشته شده است، از هر دو روش DWT و CWT برای کشف محل ترک و از روش اجزاء محدود برای

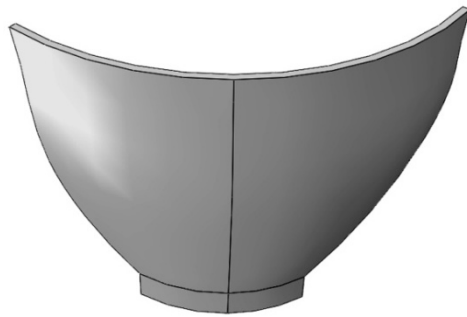
محاسبه پاسخ ارتعاشی و استاتیکی تیر دوسرگردار استفاده شده است. در این مقاله موجک bior6.8 بهترین موجک برای کشف اغتشاش در سیگنال معرفی شده است [۱۷].

در مقاله‌ای که به وسیله ی کیم و ملهم در سال ۲۰۰۳ منتشر شد، دو نوع سازه بتنی شامل دال بتنی و تیر بتنی با مقیاس کامل، بررسی شده است. پاسخ تیر با دو روش Continuous (CWT) و Fast Fourier Transform (FFT) Wavelet Transform بررسی و ارزیابی شده است. از واکنش دینامیکی سازه در برابر ضربه به عنوان پاسخ تیر برای آنالیز موجک استفاده شده است [۱۸]. از مهم‌ترین مقاله‌هایی که به کشف ترک در تیرها با استفاده از CWT پرداخته است و به مبانی ریاضی و چرایی برخی پدیده‌ها توجه کرده، مقاله‌ی جنتایل و مسینا در سال ۲۰۰۳ است. در این مقاله نویسندگان به مرور مبانی تئوریک تبدیل موجک پرداخته‌اند. موجک Haar به عنوان ساده‌ترین تابع موجک برای انجام تحلیل انتخاب شده است [۱۹]. مقاله دیگری در سال ۲۰۰۴ به وسیله ی لی و همکاران ارائه شد که در آن روشی را برای شناسایی مشخصات آسیب بر اساس اجزای محدود موجکی (Wavelet Finite Element Method (WFEM ارائه دادند. در این روش به شناسایی نقاط تکین مانند ترک خوردگی تیر پرداخته شده است [۲۰].

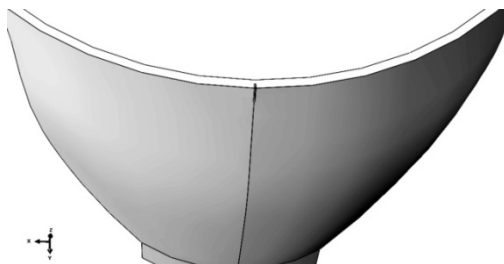
به نظر می‌رسد در زمینه آنالیز مودال سد بتنی بویژه نوع قوسی آن و همچنین شناسایی ترک در آن، تحقیقات مشابهی موجود نیست.

۲- مدل سازی بدنه سد با نرم افزار آباکوس

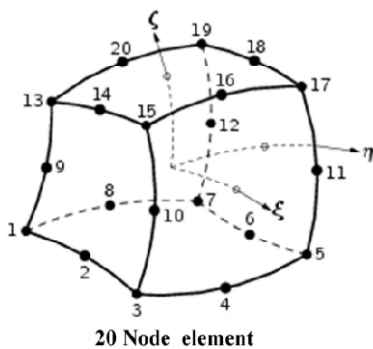
برای مدل سازی نیاز به نمونه موردی مناسب است که می‌تواند مدل واقعی یا شبیه سازی شده از نمونه باشد. بدیهی است که مدل نمونه واقعی به خاطر ایجاد مدل هندسی و نیز آنالیز، مشکل تر و پیچیده تر ولی نتایج حاصل به همان اندازه دقیق تر و



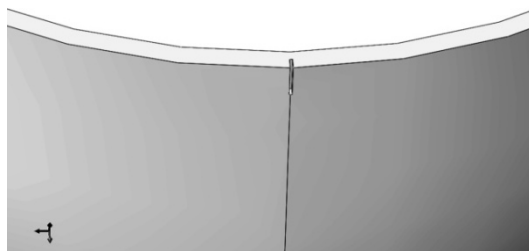
شکل (۱) مدل مش‌بندی شده بدنه سد سالم



شکل (۲) مدل بدنه سد ترک‌دار



شکل ۳. المان SOLID سه‌بعدی ۲۰گره‌ای (C3D20RH)



شکل (۴) جزئیات مش‌بندی نمونه ترک‌خورده در نرم‌افزار ABAQUS

۳- آنالیز فرکانسی سد

برای بررسی رفتار دینامیکی سد، ابتدا باید فرکانس مودهای

به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. ضمن این‌که می‌توان با بررسی مدل سد و پیش‌بینی رفتار سازه، نقاط ضعف احتمالی تحت بارهای وارد شده را شناسایی کرده و تمهیدات لازم برای رفع یا ترمیم آن اندیشید. بر این اساس اطلاعات سد بتنی دوقوسی کارون ۱ تهیه شده و مدل واقعی این سد دقیقاً از روی نقشه‌های طراحی، مدل‌سازی شده است. در این سد، شعاع‌های داخلی و خارجی و همچنین زاویه داخلی و خارجی قوس‌های آن در ترازهای مختلف، متفاوت است. ضمن این‌که سد نسبت به محوری که از مرکز قوس‌ها می‌گذرد، متقارن نیست. بنابراین تمام پیچیدگی‌های یک سد را داراست. مشخصات سد مذکور در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی سد کارون ۱

نوع سد	بتنی دوقوسی
طول تاج	۳۷۲ متر
ارتفاع از پی	۲۰۰ متر
ضخامت در پی	۳۳/۵ متر
ضخامت در تاج	۶ متر
تراز آب	۱۷۷/۵ متر
ضریب پواسن بتن	۰/۲
چگالی بتن	۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

برای انجام تحلیل‌ها، بدنه سد با مشخصات مکانیکی و شرایط تکیه‌گاهی ثابت در دو حالت سالم (شکل ۱) و آسیب‌دیده (شکل ۲) در نظر گرفته شده که با نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و در باند فرکانسی (۱۰۰-۰) تحت آنالیز فرکانسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی هندسه سد از المان SOLID سه‌بعدی ۲۰گره‌ای (C3D20RH) که سطوح آن انحنای درجه ۲ دارند، استفاده شده تا بتواند با هندسه سد تطبیق داشته باشد. ابعاد ترک $۱۰ \times ۴ \times ۰/۲$ متر در تراز تاج و در نقطه وسط بالادست سد در نظر گرفته شده است [شکل ۴].

جدول (۲) فرکانس چهار مود اول دو نمونه سالم و ترک خورده

نمونه	فرکانس مود اول	فرکانس مود دوم	فرکانس مود سوم	فرکانس مود چهارم
سالم	۱/۸۶۸۰	۲/۱۴۵۵	۲/۹۸۶۰	۳/۳۴۲۳
ترک خورده	۱/۸۶۱۴	۲/۱۳۵۴	۲/۹۷۳۵	۳/۳۱۸۱

۴- تعریف ریاضی تابع موجک^۱

واژه Wavelet از دو جزء wave به معنی موج (اشاره به شکل ارتعاشی تابع) و let به مفهوم کوچکی و گذرا بودن تشکیل شده و به معنی موج کوچک یا موج گذرا است. به نظر می‌رسد، بهترین معادل فارسی پیشنهاد شده برای آن، واژه "موجک" باشد. واژه مادر به این مسئله اشاره می‌کند که توابع ساخته شده با طول متفاوت برای پیمایش سیگنال و محاسبه ضرایب موجک، از یک تابع اصلی یا موجک مادر منشعب است.

تابع موجک، تابعی است که دو ویژگی مهم دارد: نوسانی و کوتاه مدت بودن. $\psi(x)$ تابع موجک است اگر و فقط اگر تبدیل فوریه آن به $\psi(x)$ ، شرط زیر را ارضا کند:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|^2} d\omega < +\infty \quad (1)$$

این شرط با عنوان شرط پذیرفتگی (Admissibility) برای موجک $\psi(x)$ شناخته می‌شود. رابطه بالا را می‌توان معادل با فرمول زیر دانست (به عبارت دیگر برای این که موجک شرط بالا را داشته باشد، باید معادله زیر برقرار شود):

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

این ویژگی تابع با میانگین صفر، چندان محدودکننده نبوده و توابع بسیاری را می‌توان بر اساس آن، تابع موجک نامید. $\psi(x)$ تابع موجک مادر است و توابع مورد استفاده

ارتعاش سد محاسبه شود تا بتوان با داشتن ضرایب میرایی سازه بر اساس میرایی رایلی محاسبه شود که به آن میرایی وابسته به فرکانس نیز می‌گویند. میرایی سیستم با یک ترکیب خطی از ماتریس جرم و ماتریس سختی طبق فرمول ۱ به دست می‌آید که ضرایب این ترکیب خطی از روی فرکانس مودهای سد محاسبه می‌شوند.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

α و β ضرایب ترکیب خطی رایلی است که از فرمول‌های (۲) و (۳) به دست می‌آیند:

$$\alpha = 2\xi \omega_i \omega_j / (\omega_i + \omega_j) \quad (2)$$

$$\beta = 2\xi / (\omega_i + \omega_j) \quad (3)$$

در فرمول‌های بالا، ξ نسبت میرایی است که در آنالیز فرکانسی برابر ۰.۵٪ در نظر گرفته شده است. ω_i و ω_j فرکانس زاویه‌ای دو مود از مودهای ارتعاشی است. در آنالیز سد کارون ۱، ضرایب میرایی رایلی از روی فرکانس‌های اولین و سومین مود ارتعاشی سد و نسبت میرایی بحرانی ۰.۵٪ محاسبه شده است: $\alpha = 0.1149$ و $\beta = 0.0206$.

با داشتن فرکانس‌ها، ضرایب میرایی سد که در آنالیز دینامیکی مورد نیاز است، محاسبه شد. در این حالت، سد را بدون تکیه‌گاه‌ها مدل‌سازی کرده و شرایط مرزی به صورت بسته شدن حرکت در گره‌های تکیه‌گاهی اعمال شده است. مقادیر فرکانس چهار مود اول ارتعاشی نمونه سالم و ترک‌خورده در جدول (۲) ارائه شده است.

پاسخ سد از دو آنالیز فرکانسی به دست آمده بررسی و مشاهده شد که فرکانس‌ها در نمونه ترک‌دار، کاهش پیدا کرده است.

در تحلیل با دو عمل ریاضی انتقال و مقیاس در طول سیگنال مورد تحلیل، تغییر اندازه و محل می‌یابند.

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3)$$

در نهایت، ضرایب موجک در هر نقطه از سیگنال (b) و برای هر مقدار از مقیاس (a) با رابطه زیر (برای تبدیل پیوسته موجک) محاسبه می‌شود:

$$WT(a,b) = Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (4)$$

برای تبدیل مقیاس به فرکانس می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$F_a = \frac{F_c}{a \Delta} \quad (5)$$

که F_a فرکانس متناظر با مقیاس a ، F_c فرکانس اصلی هر تابع موجک (که فرکانس مرکزی آن موجک نامیده می‌شود) و Δ پریود نمونه‌برداری است.

اما در تبدیل موجک، هنگام استفاده از یک تابع، خاصیت محوشوندگی ممان‌های آن اهمیت زیادی دارد. $-k$ امین ممان یک موجک $\psi(x)$ برابر است با:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx = 0 \quad (6)$$

بنابراین یک موجک در صورتی که رابطه زیر در آن صدق کند، دارای m ممان محوشدنی (Vanishing Moments [VM]) است:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx = 0 \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (7)$$

از این رابطه نتیجه می‌شود که هر تابع موجک حداقل یک ممان محوشونده دارد.

در تحلیل سیگنال از فرم دیگری از WT با نام Discrete Wavelet Transform که به اختصار DWT گفته می‌شود، نیز استفاده می‌شود. در DWT پارامترهای انتقال و مقیاس به صورت غیر پیوسته انتخاب می‌شوند، به طوری که:

$$a = 2^{-j}, \quad b = 2^{-j} k \quad (8)$$

که j و k اعداد صحیح است. در نتیجه با جای‌گذاری به جای a و b خواهیم داشت:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (9)$$

با توجه به رابطه مشخص‌کننده یک تابع موجک، می‌توان دریافت که توابع بسیاری وجود دارند که دارای این ویژگی‌ها باشند. در مورد مشخصات این توابع به دلیل محدودیت فضایی مقاله، در این جا به عنوان نمونه، به مشخصات کلی دو تابع موجک اشاره می‌شود.

تابع موجک Haar: تابع موجک هار ساده‌ترین و جزء اولین موجک‌ها است که به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq x < 0.5 \\ -1 & \text{for } 0.5 \leq x < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

تابع موجک Morlet: تابع موجک مورلت با رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\psi(x) = \exp(i \omega_0 x) \exp\left(-x^2 / 2\sigma^2\right) \quad (11)$$

دامنه تابع نرمال شده است، بنابراین $\psi(0) = 1$ است، و σ معیار گسترش زمانی است [۲۱، ۲۲].

۵- پنجره گرافیکی تبدیل موجک ایستا^۱ SWT

مجموعه فرکانس‌هایی که در یک دوره کوتاه زمانی در سیگنال اجرا می‌شود می‌تواند با مجموعه فرکانس‌ها در

زمانی دیگر یکسان باشد. این گونه سیگنال را ایستا گویند. پنجره SWT در شکل (۵) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۵) در پنجره گرافیکی می توان موارد زیر را شناسایی کرد:

۱- سیگنال ورودی

۲- سیگنال بدون اغتشاش^۱

۳- سیگنال فقط با اغتشاش

۴- تجزیه شده سیگنال اغتشاش دار

۵- تجزیه شده سیگنال بدون اغتشاش

توضیح: اندیس مربوط به سیگنال های تجزیه شده (d_1, d_2) مربوط به شماره رده انتخابی است.

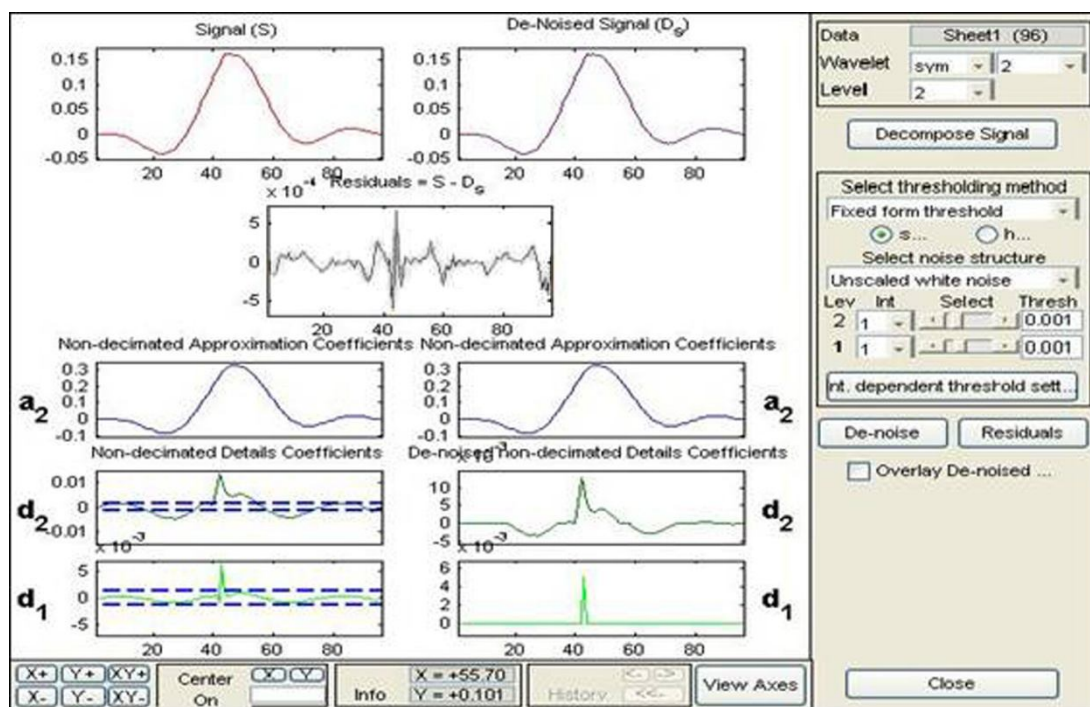
۶- آنالیز سد سالم با موجک

پس از تحلیل سد با استفاده از نرم افزار ABAQUS، پاسخ حاصل از آن برای آنالیز موجک در نرم افزار MATLAB و در جعبه ابزار ویژه موجک به کار گرفته شد. بدین صورت که تغییر مکان ها در جهت عرضی سد (U_1) و جهت طولی مخزن (U_2) در مود اول ارتعاشی و در ۹۶ نقطه از سد سالم در تراز تاج با فواصل یکسان برداشت شده است. این پاسخ با فرکانس $1/8780$ هرتز، با انواع موجک ها در مقیاس های مختلف آنالیز شده که در این جا به دلیل محدودیت فضای مقاله فقط نتایج حاصل از آنالیز با یک موج Db 2 (با مقیاس ۲) در شکل (۶) برای (U_1) و شکل (۷) برای (U_2) نشان داده شده است.

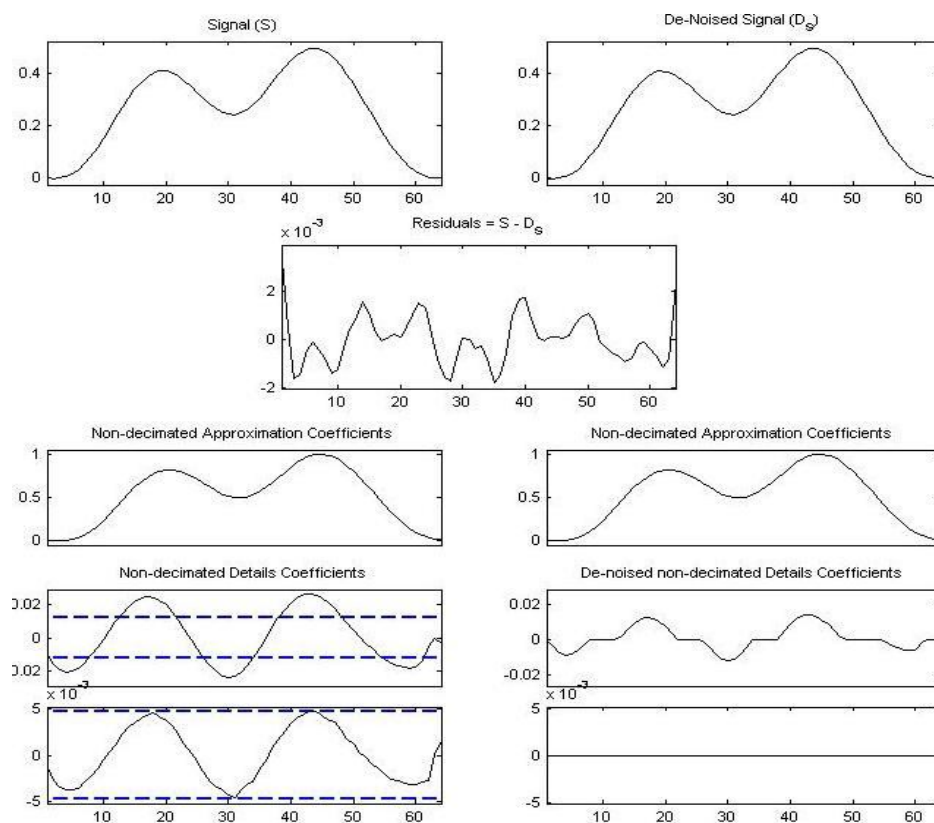
۷- آنالیز سد ترک دار با موجک

به طور مشابه، بعد از مدل سازی سد و خرابی با نرم افزار ABAQUS، پاسخ نمونه ترک دار یعنی تغییر مکان ها در جهت عرضی سد (U_1) و جهت مخزن (U_2) ، در مود اول ارتعاشی و در ۹۶ نقطه از سد در تراز تاج با فواصل یکسان برداشت

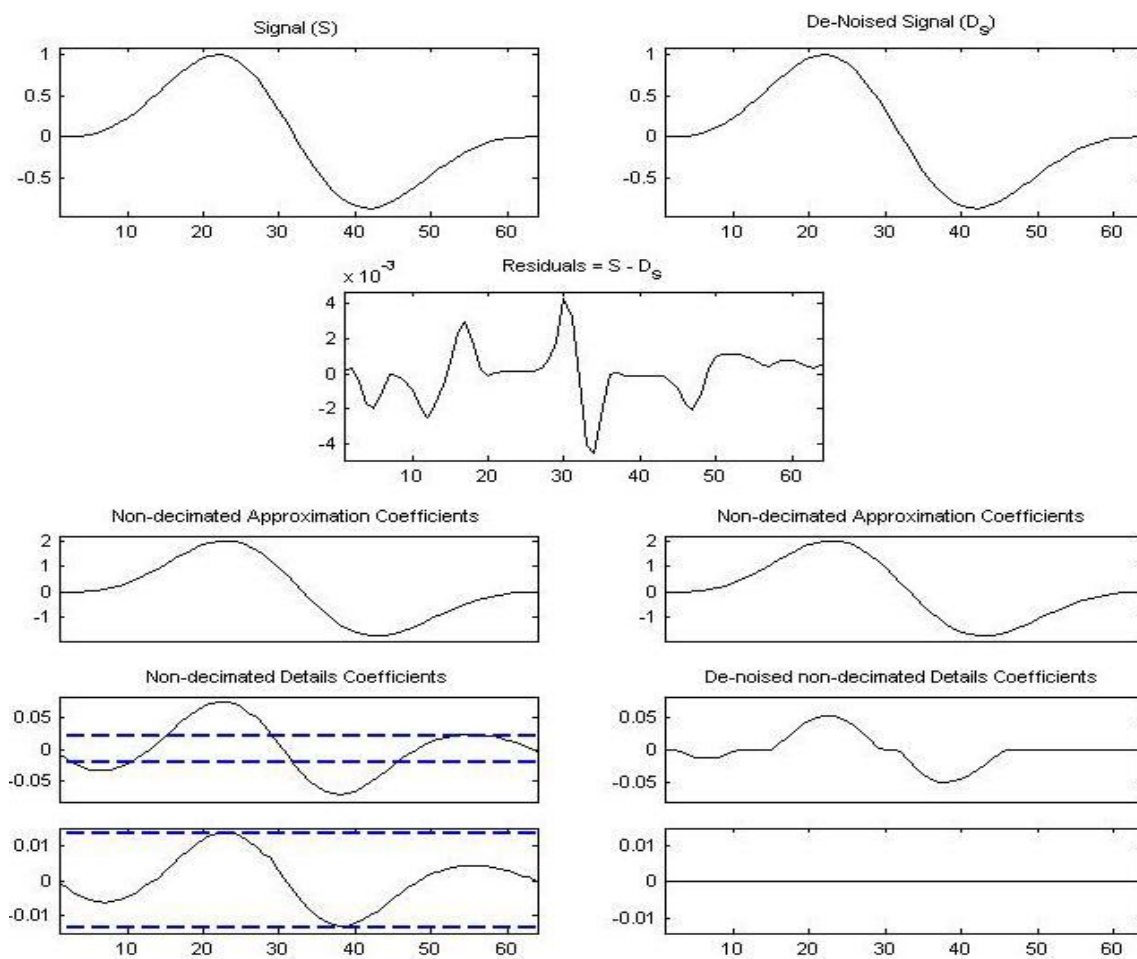
شده است. مدل آنالیز سد ترک دار در شکل (۸) نشان داده شده است. این پاسخ به وسیله نرم افزار MATLAB در جعبه ابزار ویژه موجک با موجک Db2 آنالیز شده که نتایج در شکل های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. در شکل (۱۱) نیز به عنوان نمونه دیگر از موجک Ciof 2 استفاده شده است. همان طوری که در شکل ها مشخص است، نمودارها شامل یک جهش قابل ملاحظه در محل ترک در سد است، در حالی که در حالت نمونه سالم هیچ گونه اغتشاش یا ناهمبستگی در نمودارها دیده نمی شود. به عبارت دیگر همان طوری که قبلاً گفته شد محل ترک، وسط تراز تاج یعنی در مکان نقطه ۴۸ (وسط ۹۶ نقطه) در نظر گرفته شده که در عمل با توجه به شکل ها محل اغتشاش دقیقاً در محل ترک موجود در سد است. استفاده از تبدیل موجک برای کشف محل خرابی به دلیل خصوصیتی است که SWT را برای تشخیص خرابی از دیگر روش ها متمایز می کند. تبدیل موجک دارای خاصیت وضوح متغیر برای فرکانس های مختلف است. در حالی که مقدار فرکانس های بالا و محل فرکانس های پایین را با وضوح کمتری ارائه می دهد. این خاصیت SWT در مورد کشف محل آسیب مطلوب است زیرا ترک باعث تغییر در فرکانس های بالا می شود و برای تشخیص محل آسیب فقط به شناسایی محل این تغییرات نیاز است که به خوبی با SWT قابل دسترسی است. تنها نقطه ضعف مشاهده شده در این پژوهش، وجود جهش (البته نه به شدت جهش در محل ترک) در نزدیکی تکیه گاه ها در حالت ترک دار است. به عنوان نمونه در شکل های ۶، ۷، ۹ و ۱۱ در نمودارهای سوم، به عبارت دیگر در نمودار دارای اغتشاش $(S - D_s)$ که از جدا کردن سیگنال بدون اغتشاش از سیگنال مادر یا سیگنال ورودی به دست می آید، در هر دو انتها جهشی دیده می شود که لزوم تحقیق بیشتر و ارائه روش هایی برای حذف یا کاهش این اثر در شرایط انتهایی ضروری به نظر می رسد.



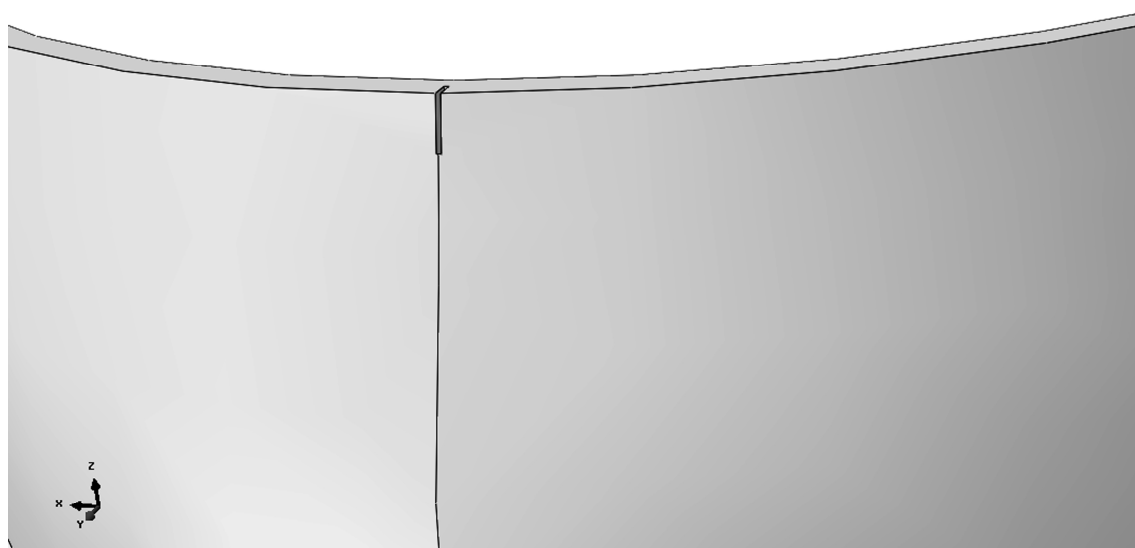
شکل (۵) پنجره در نرم افزار MATLAB



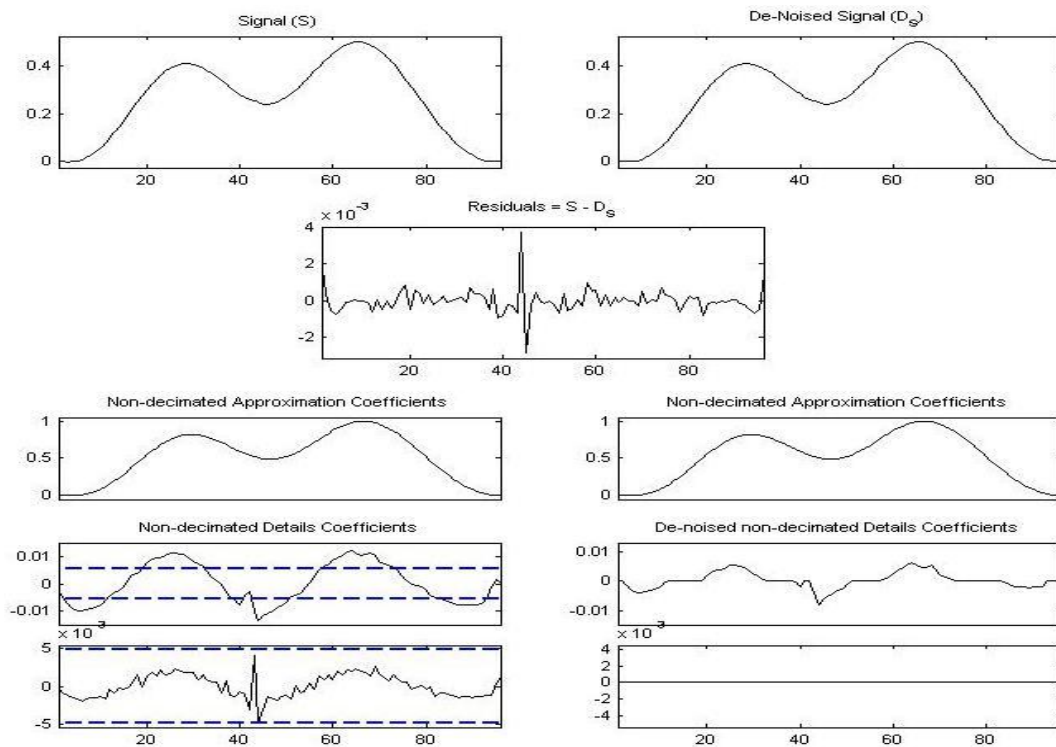
شکل (۶) گراف برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Db2 (Mode1-U1)



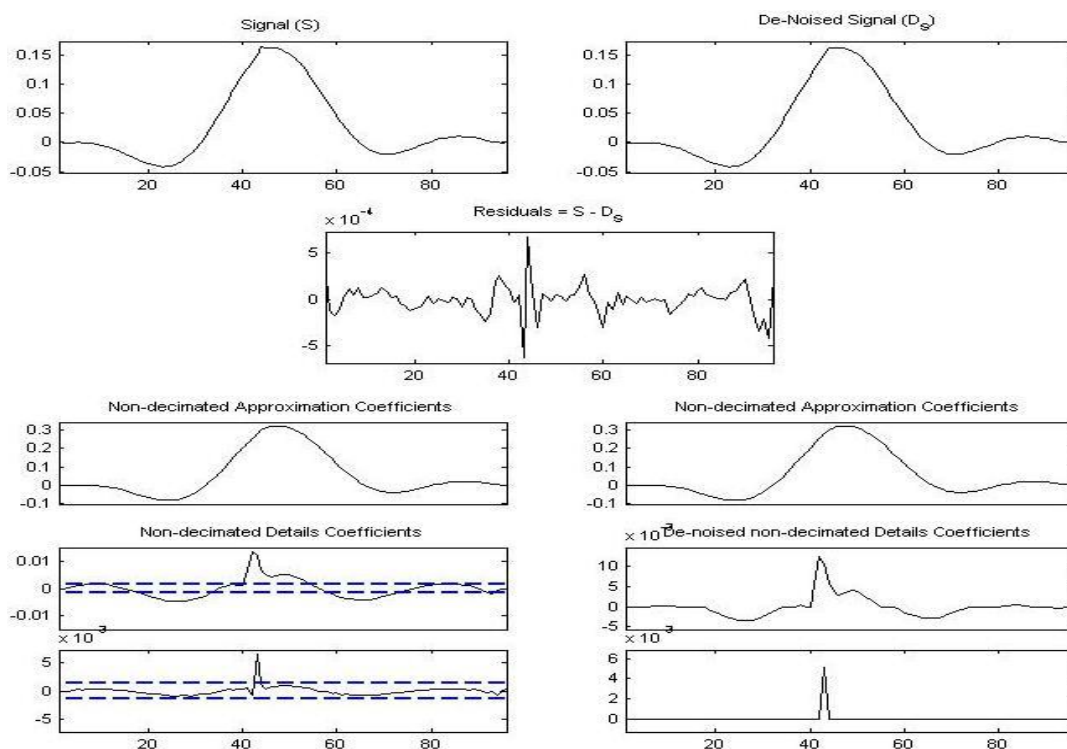
شکل (۷) گراف (V) برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Db2 (Mode1-U2)



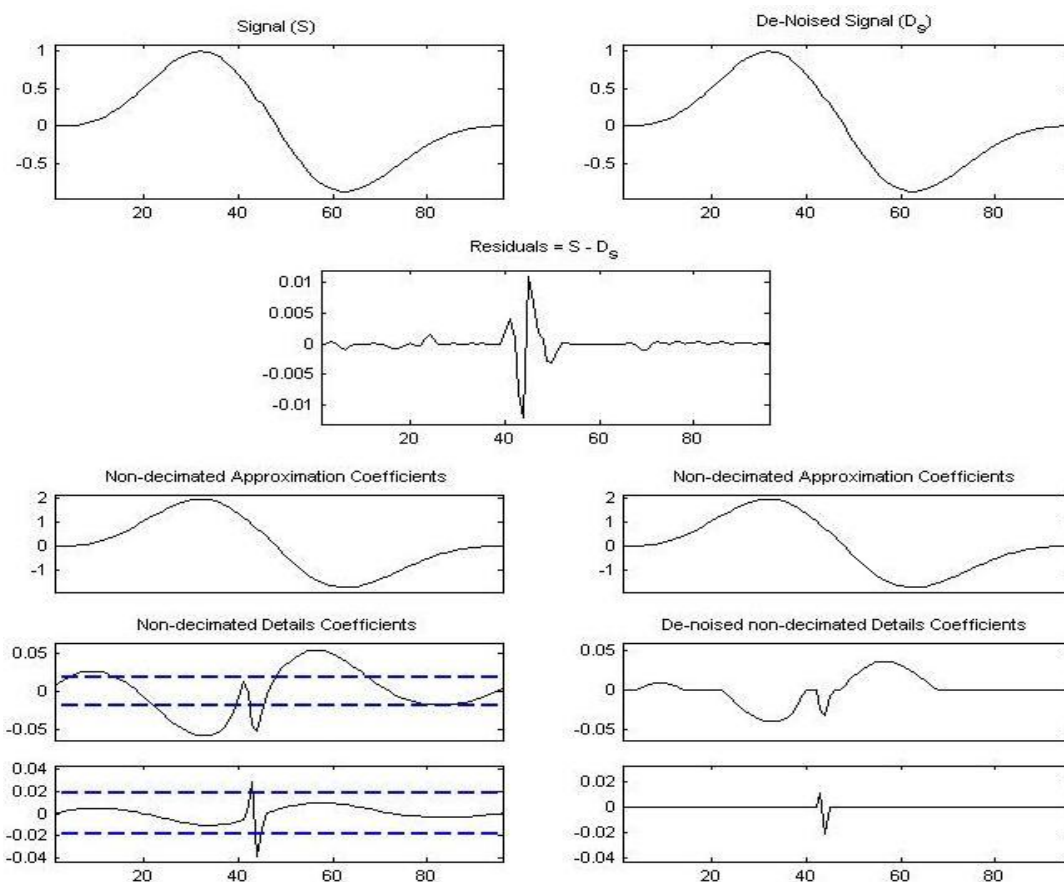
شکل (۸) مدل آنالیز سد ترک‌دار با نرم‌افزار ABAQUS



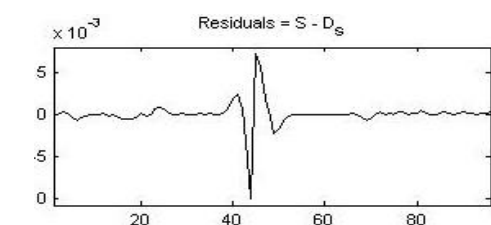
شکل (۹) گراف برای پاسخ نمونه ترک‌خورده تحت موجک آنالایزر Db 2 (Model-U1)



شکل (۱۰) گراف برای پاسخ نمونه ترک‌خورده تحت موجک آنالایزر Db 2 (Model-U2)

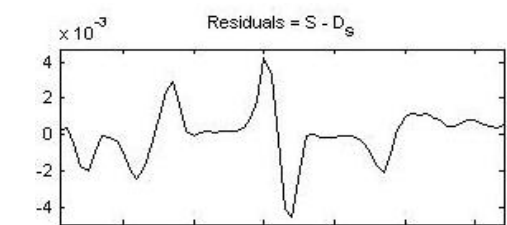


شکل (۱۱) گراف برای پاسخ نمونه ترک‌خورده تحت موجک آنالایزر Ciof2 (Model-U2)



شکل (۱۳) SWT برای نمونه ترک‌دار تحت موجک آنالایزر Haar

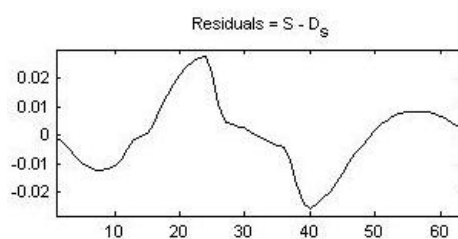
(Model-U2)



شکل (۱۴) SWT برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Bior

(Model-U2)

در ادامه به دلیل محدودیت فضای مقاله، نتایج آنالیز با سایر موجک‌ها، فقط در حالت اغتشاش‌دار (noise) در دو حالت نمونه سالم و ترک‌دار در جهت مخزن (U2) در شکل‌های (۱۲) تا (۱۹) آورده می‌شود. همان طوری که در شکل‌ها مشخص است امکان شناسایی محل ترک ممکن شده است.



شکل (۱۲) SWT برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Haar

(Model-U2)

۸- نتیجه‌گیری

۱. تبدیل موجک، قابلیت بالایی در تحلیل سیگنال پاسخ دینامیکی یا استاتیکی دارد. این قابلیت در شناسایی انواع ناپیوستگی یا ناهماهنگی مانند کاهش ناگهانی سختی نمایان است و از روی گراف ضرایب موجک پیوسته به صورت یک یا چند نقطه نزدیک به هم دارای اغتشاش یا مقادیر ناهماهنگ با نقاط دیگر قابل تشخیص است. بر این اساس روش موجک از روش‌های بسیار کارا در زمینه کشف آسیب به‌شمار می‌آید.

۲. تأثیر آسیب روی گراف ضرایب موجک در مقیاس‌های پایین، فشرده‌تر است و محل اغتشاش را با وضوح بالاتری نشان می‌دهد. در حالی‌که افزایش مقیاس که متناظر با کاهش فرکانس است، باعث پهن‌تر شدن اغتشاش شده و باعث وضوح کمتر می‌شود.

۳. انتخاب مقیاس مناسب در آنالیز موجک اهمیت بسیار بالایی دارد. بنابراین مقیاس‌های بالا برای شناسایی آسیب‌های کوچک و مقیاس‌های پایین برای تشخیص آسیب‌های نزدیک تکیه‌گاه توصیه می‌شود.

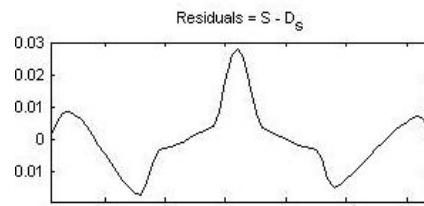
۴. با بررسی انواع موجک در مقیاس‌های مختلف، موجک‌های Haar، Db، Coif، Bior، Sym و Dmey به‌عنوان موجک‌های مفید در تشخیص ترک معرفی می‌شوند. در این میان با توجه به پژوهش حاضر، موجک‌های Db، Coif و Sym با کارایی بهتر در شناسایی ترک نسبت به بقیه موجک‌ها معرفی می‌شوند.

۹- مراجع

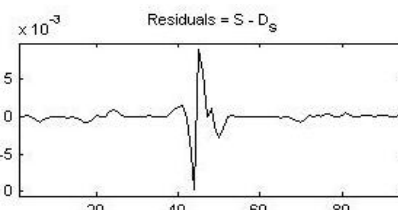
- [1] Bathe K., J.; "Finite Element Procedures", 1996, Prentice Hall Inc.
- [2] "ABAQUS Analysis User's Manual", 2006 (V6.6).
- [3] Chiu J.K, Cermak J.E and Chou L.S; "Random decrement based method for modal parameter



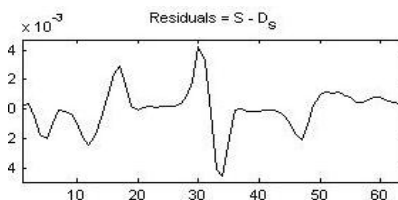
شکل (۱۵) برای پاسخ نمونه ترک‌دار تحت موجک آنالایزر Bior (Mode1-U2)



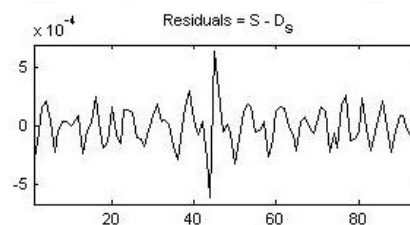
شکل (۱۶) برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Sym (Mode1-U2)



شکل (۱۷) برای پاسخ نمونه ترک‌دار تحت موجک آنالایزر Sym (Mode1-U2)



شکل (۱۸) برای پاسخ نمونه سالم تحت موجک آنالایزر Dmey (Mode1-U2)



شکل (۱۹) برای پاسخ نمونه ترک‌دار تحت موجک آنالایزر Demy (Mode1-U2)

- experimental validation", *Journal of Sound and Vibration* 206, 1997, pp 359-374.
- [15] Shifrin E.I., Ruotolo R.; "Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks", *Journal of Sound and Vibration* 222, 1999, pp 409-423.
- [16] Chang C.C., Chen L.W.; "Detection of the location and size of cracks in the multiple cracked beam by spatial Wavelet based approach", *Mechanical Systems and Signal Processing* 19, 2003, pp 139-155.
- [17] Ovanesova A.V., Suarez L.E.; "Applications of Wavelet Transforms to damage detection in frame structures, *Engineering Structures*", 2003.
- [18] Kim H., Melhem H.; "Damage detection in Concrete by Fourier and Wavelet Analyses", *Journal of Engineering Mechanics* 129, 2003, pp 571-577.
- [19] Gentile A., Messina A.; "On the Continuous Wavelet Transforms applied to discrete Vibration data for detecting open cracks in damaged beams", *International Journal of Solids and Structures* 40, 2003, pp 295-315.
- [20] Li B., Chen X.F., Ma J.X., He Z.J.; "Detection of crack location and size in structures using Wavelet Finite Element methods", *Journal of Sound and Vibration*, 2004,.
- [21] Daubechies I.; "Ten lectures on Wavelets", CBMS-NSF Conference Series 61, Philadelphia, 1992, PA: SIAM.
- [22] Mallat S.G.; "A Wavelet tour of Signal processing", 2nd ed, 1999, London: Academic Press.
- identification of a dynamic system using acceleration responses", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007.
- [4] Gudmaunson, P.; "Engine Frequency Changes of Structures Due to Cracks", notches or other geometrical changes. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 30, 1982, pp 339-353.
- [5] Banks H.T., Inman D.J., Leo D.J., Wang, Y.; "An experimentally validated damage detection theory in smart structures", *Journal of Sound and Vibration* 191, 1996, pp 859-880.
- [6] Li B., Chen X.F., Ma J.X., He Z.J.; "Detection of Crack Location and Size in Structures Sing Wavelet Finite Element Methods", *Journal of Sound and Vibration*. 2004.
- [7] Samii A., Lotfi V.; "Comparison of coupled and decoupled modal approaches in seismic analysis Of concrete gravity dams in timedomain", *Finite Elements in Analysis and Design* 43, 2007, 1003-1012.
- [8] Touhei T., Ohmachi T.; "Modal analysis of a dam-foundation system based on an FE-BE method in the time domain", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(1), 1994, pp 1-15.
- [9] Calayir Y., Dumano lu A., Bayraktar A.; "Earthquake analysis of gravity dam -reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches", Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering, 61080, 2007, Trabzon, Turkey.
- [10] Dimarogonas A.D., Paipets S.A.; "Analytical Methods in Rotor Dynamic Elsevier Applied Science", 1986, London.
- [11] Chondros T.; "Dynamic Response of Cracked Beams", M. Sc. Thesis, university of patras, , 1977, Greece.
- [12] Liang R.Y., choy F.K., Hu J.; "Detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies", *Journal of the Franklin Institute* 328, 1981, pp 505-518.
- [13] Banks H.T., Inman D.J., Leo D.J., Wang Y.; "An experimentally validated damage detection theory in smart structures", *Journal of Sound and Vibration* 191, 1996, pp 859-880.
- [14] Ruotolo R., Surace C.; "Damage assessment of multiple cracked beams: numerical result and

Application of Stationary Wavelet Transform (SWT) to the Crack Detection in Concrete Arch Dams by Frequency Analysis

M. A. Lotfollahi-Yaghin^{1*}, A. Shamsai², M. A. Hesari³

1- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, University of Science and Research, Tehran, Iran

3- PhD Candidate, Faculty of Engineering, University of Science and Research, Tehran, Iran

lotfollahi@tabrizu.ac.ir

Abstract:

In this paper, crack detection possibility in an arch dam structure is investigated by wavelet transform analysis. An arch dam is a solid concrete dam, curved upstream in plan. In addition to resisting part of the pressure of the reservoir by its own weight, it obtains a large measure of stability by transmitting the remainder of the water pressure and other loads by arch action into the canyon walls. The complete necessity of high safety, economical design, complex of designing and its application increase the importance of concrete arch dams. Successful arch action is dependent on a unified monolithic structure, and special care must be taken in the construction of an arch dam to ensure that no structural discontinuities such as open joints or cracks exist at the time the structure assumes its water load.

According to the principles of theory of structures, there is a relationship between the dynamic and static responses and, consequently, the stiffness. Any sudden change in stiffness leads to dynamic and static response variation. This condition will help to estimate the damage and to investigate the structural response before and after the failure. Wavelet analysis has recently been considered for damage detection and structural health monitoring (SHM). It provides a powerful tool to characterize local features of a signal. The basis function in wavelet analysis is defined by two parameters: scale and translation. This property leads to a multi-resolution representation for stationary signals. It has high ability in analysis of static and dynamic response signals. Stationary wavelet transform (SWT) can show the location of frequency changes. That these locations are the points that they have been damaged.

The case study is the concrete curvature arch of KAROON-1 (Shahid Abbaspour) dam with the height of 200 m. This dam is considered as one of the most complex dams because of different external and internal radii and angles, as well as asymmetrical center of the external and internal arches in different levels. Using the geometrical dimensions of the above-mentioned dam- from respective design sheets- and its mechanical and physical properties, the dam with and without crack was modeled by the ABAQUS FE software package. After frequency analysis of the dam by ABAQUS for both safe and cracked models in the same frequency mode, displacement responses at the cracked level (crest) were extracted along the reservoir's longitudinal axis. Afterwards, the responses were used for the wavelet analysis by the wavelet toolbar of the MATLAB software and the detection of crack in the dam structure was investigated with SWT. The results of wavelet analysis showed that the graphs have considerable rise at or around the crack location. But there was no noise or any harmony in the graphs of the safe dam. Hence, detecting the location of crack in dam structures is possible with wavelet transform.

Keywords: Concrete arch dam, Frequency analysis, Crack, Wavelet analysis, ABAQUS, MATLAB.