

مقایسه‌ی تحلیل استاتیکی و مودال در شناسایی آسیب سد وزنی با استفاده از تبدیل موجک

سید روح‌الله حسینی واعظ* (دانشیار)

طاهره عرف‌زاده (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۸) ۴۳-۳۳
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۳۳-۴۳

در هر سازه‌ی عمرانی ممکن است در اثر بارگذاری حدی، مانند زلزله و بادهای شدید، آسیب‌های سازه‌یی ایجاد شود که این آسیب‌ها می‌توانند منجر به شکست‌های سازه‌یی فاجعه‌بار شوند. این در حالی است که اهمیت ارزیابی ایمنی در سازه‌هایی نظیر سد‌های بتنی بزرگ که حضور آسیب در آن‌ها علاوه بر ایجاد خسارت‌های اقتصادی، ایمنی ساکنان پایین‌دست سدها را نیز به خطر می‌اندازد، بیش از پیش اهمیت می‌یابد. رویکرد کنترلی سازه، پایش سلامت سازه نامیده شده است. یکی از روش‌های جدید و مفید برای تشخیص آسیب در فرایند پایش سلامت سازه، روش تبدیل موجک است. در پژوهش حاضر، به منظور کارآمدی روش ارائه شده برای تشخیص موقعیت آسیب در سدهای بتنی وزنی، نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی و مودال سد بتنی وزنی کوبنا، تحت تبدیل موجک قرار گرفته و موقعیت آسیب‌های فرضی در نظر گرفته شده در سد، شناسایی شده‌اند. براساس نتایج به دست آمده، مشاهده شد که در فرایند شناسایی آسیب بر روی داده‌های استاتیکی، عواملی همچون نزدیکی ترک به موقعیت نقاط نمونه‌برداری در میزان ضرایب موجک تأثیر گذار است.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، سدهای بتنی وزنی، تبدیل موجک، آنالیز مودال، تحلیل استاتیکی.

hoseinivaez@qom.ac.ir
t.arezade@stu.qom.ac.ir

۱. مقدمه

امکان وقوع آسیب در اغلب سازه‌های عمرانی به دلیل زوال آن‌ها در طول زمان و یا بارهای اضافی تحمیل شده به سازه‌ها توسط باد، زلزله و ترافیک غیرقابل اجتناب است. از آنجا که وجود آسیب‌های سازه‌یی نظیر ترک‌ها و درزها در سازه ممکن است عمر مفید سازه را کاهش دهند و در نهایت منجر به شکست‌های سازه‌یی فاجعه‌بار شوند، لزوم شناسایی آسیب در مراحل اولیه‌ی شکل‌گیری به‌ویژه در سازه‌های مهم، نظیر سدهای بتنی بزرگ که هرگونه آسیب در آن‌ها علاوه بر ایجاد خسارت‌های اقتصادی، ایمنی ساکنان پایین‌دست سدها را نیز به خطر می‌اندازد، بیش از پیش اهمیت می‌یابد.

سدهای وزنی از جمله سازه‌هایی هستند که به خاطر نوع سازه، اغلب در زمینه‌ی مهندسی حفاظت آب استفاده می‌شوند.^[۱] در سدهای بتنی وزنی حتی در شرایط عادی سرویس دهی، با توجه به مقاومت کششی پایین بتن، ترک‌های سطحی کوچکی مشاهده می‌شود که معمولاً سلامت سد را تهدید نمی‌کنند، اما هنگامی که ترک تا عمق سد منتشر شود، به ترک‌های کوچک دیگر متصل می‌شوند و شبکه‌یی از ترک‌ها را

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۳/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۱/۸/۱۳۹۶، پذیرش ۲۶/۳/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1971.2043

تشکیل می‌دهند که در این حالت مشکلات جدی در ایمنی سد را به وجود می‌آورند. از طرفی، در طول زلزله‌ی شدید ممکن است که در سد ترک‌های سازه‌یی ایجاد شود، که رشد و توسعه‌ی آن‌ها می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد.^[۲]

پایش سلامت سازه (SHM)^۱ به عنوان فرایندی قابل اعتماد، کارآمد و مقرون به صرفه، به منظور بهبود ایمنی و نگهداری سازه‌های جدید و موجود معرفی شده است. 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 است.^[۳] گام اصلی در فرایند پایش سلامت، شناسایی آسیب در سازه است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و شناسایی وجود آسیب، اطلاعات پایش سلامت با استفاده از روش‌های مختلف، تجزیه و تحلیل می‌شوند تا موقعیت مکانی یا زمانی و در صورت امکان، شدت آسیب به دست آید. برخی از روش‌های مذکور عبارتند از: پردازش سیگنال با استفاده از روش‌های بهبودیافته LMD^۲ و EMD^۳،^[۴] بهینه‌سازی معکوس،^[۵] و روش تبدیل موجک.

روش جدید و مفید برای شناسایی حضور آسیب و بررسی موقعیت مکانی یا زمانی آن در سازه‌ها، روش تبدیل موجک است. این تبدیل‌ها یک تابع ریاضی یا سیگنال فیزیکی را از یک محدوده به محدوده‌ی دیگر منتقل می‌کنند تا اطلاعات

پنهان درون تابع یا سیگنال اصلی را بدون از دست دادن وضوح مقیاس آشکار کند. این مسئله، موجک را ابزاری ایده آل برای پرداختن به آسیب سازه‌یی خصوصاً برای سازه‌های بزرگ و پیچیده از جمله سدهای بتنی میدل می‌کند.

در سال‌های پیشین، پژوهشگران بسیاری از تبدیل موجک برای شناسایی حضور و موقعیت آسیب در سازه‌های تیری شکل، [۸-۱۱] صفحات، [۱۲] و قاب‌ها، [۱۳] استفاده کرده‌اند. مطالعاتی نیز در زمینه‌ی شناسایی آسیب در سازه‌های بزرگ، نظیر برج کنترل فرودگاه و توربین‌های بادی انجام شده است. [۱۴، ۱۵]

در پژوهش حاضر، ابتدا تحلیل استاتیکی بر روی مونولیت سد بتنی وزنی کوینا انجام و با اعمال تبدیل موجک به نمودارهای تغییر مکان تاج سد در اثر بارگذاری‌های استاتیکی، موقعیت آسیب‌های فرضی در نظر گرفته شده در بدنه‌ی سد شناسایی شده است. سپس مدل المان محدود سد، تحت آنالیز مودال قرار گرفته، موجک به نمودارهای ۴ مود اول سد اعمال و فرایند شناسایی آسیب انجام شده است. در نهایت، نتایج تشخیص خرابی از داده‌های استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر مقایسه و معایب و محاسن هر کدام بیان شده است.

۲. پایش سلامت در سدها

نظارت بر سلامت سدهای بتنی به بررسی سد اشاره می‌کند که بیانگر روند ارزیابی یکپارچگی سد از طریق تشخیص هرگونه اختلالی در اسرع وقت است که می‌تواند شاخص برخی از خطرهای باشد، تا اقدام‌های اصلاحی مناسب انجام شود. به منظور ارزیابی یکپارچگی ساختار سد، نظارت‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی سازه سد انجام می‌شود. بنابراین از طریق آزمایش‌های میدانی، خصوصیات استاتیکی و دینامیکی سازه تحت شرایط محیطی تعیین می‌شود. پایش استاتیکی سدها، شامل اندازه‌گیری نیروهای استاتیکی، مانند: درجه حرارت محیط، سطح مخزن، بازو بسته شدن اتصال‌ها، ترک باز شده، تغییر مکان‌ها و کرنش‌هایی تحت یک بارگذاری معلوم است که به دقت به وسیله‌ی دستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. بسیاری از اطلاعات جمع‌آوری شده از دستگاه‌های مختلف هستند، بنابراین تفسیر آن‌ها در پایش سلامت سدهای بتنی مهم است. در بخشی از توصیه‌های کمیته‌ی ICOLD^۴، عملکرد سدها تحت ارتعاش‌ها محاسبه شده است. ارتعاش‌های مذکور ممکن است ناشی از باد، موج‌های آب و زمین لرزه باشد. در نظارت دینامیکی، پاسخ‌های سازه به صورت شتاب ناشی از ارتعاشات اندازه‌گیری می‌شود. شتاب‌ها با استفاده از آزمایش‌های ارتعاش و محیطی به دست می‌آیند. خصوصیات دینامیکی (بسامدهای طبیعی و تغییر شکل‌های مودی و غیره) می‌توانند پس از به دست آمدن شتاب در روش تحلیل مودال استفاده شوند. در استخراج خصوصیات دینامیکی از داده‌های ارتعاش محدود سدها، فرایند حوزه‌ی بسامد به صورت گسترده استفاده می‌شود زیرا استخراج خصوصیات دینامیکی از این طریق ساده است. [۱۶]

۳. تئوری تبدیل موجک

در میان روش‌های مختلف ارزیابی سلامت سازه‌ها، روش تحلیل موجک به عنوان روشی مفید برای شناسایی آسیب استفاده می‌شود. در نمودارهای استخراج شده از تحلیل سازه‌ها، آسیب به عنوان ناپوستگی ظاهر می‌شود. در این حالت، تبدیل موجک بدون از دست دادن محتوای بسامدی سیگنال، قادر به شناسایی ناپوستگی‌های ذکر شده است. تابع پایه‌ی موجک که به نام موجک مادر نیز معروف است، به صورت

رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که در آن، a و b به ترتیب، پارامترهای مقیاس و انتقال و x متغیر زمانی و یا مکانی هستند. تابع پایه‌ی موجک دو خاصیت مهم دارد: [۱۷]

۱. تابع پایه، تابعی متناوب است که میانگین آن برابر صفر است. بر این اساس، تابع $\psi(x)$ تابع موجک مادر است اگر و فقط اگر تبدیل فوری $\psi(\omega)$ به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف شده باشد:

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

این شرط ایجاب می‌کند که رابطه‌ی ۳ نیز برقرار باشد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(u) du = 0 \quad (3)$$

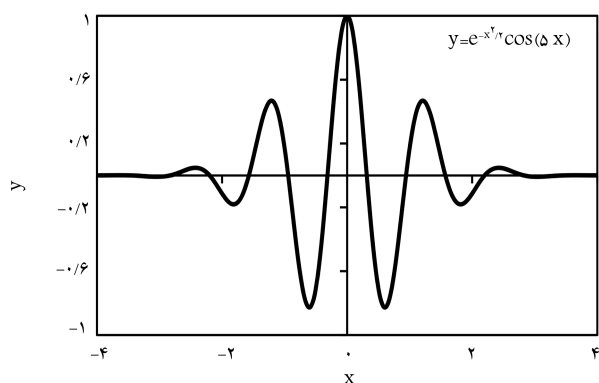
رابطه‌ی ۳، نشان دهنده‌ی نوسانی بودن تابع موجک است.

۲. تابع موجک پایه از نظر زمانی باید به طرز مناسبی محدود شده باشد. در مقایسه‌ی این ویژگی با توابع پایه‌ی تبدیل فوری مشخص می‌شود که تابع پایه در تبدیل موجک، فقط در پنجره‌ی زمانی محدودی غیر صفر است و در خارج از این پنجره، مقداری برابر صفر دارد. شکل ۱، نمودار تابع حقیقی موجک مادر مورلت^۵ را نشان می‌دهد.

دو نوع کلی تبدیل‌های موجک عبارت‌اند از: تبدیل موجک پیوسته (CWT)^۶ و تبدیل موجک گسسته (DWT)^۷. برای هر سیگنال $f(x)$ ، CWT به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

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

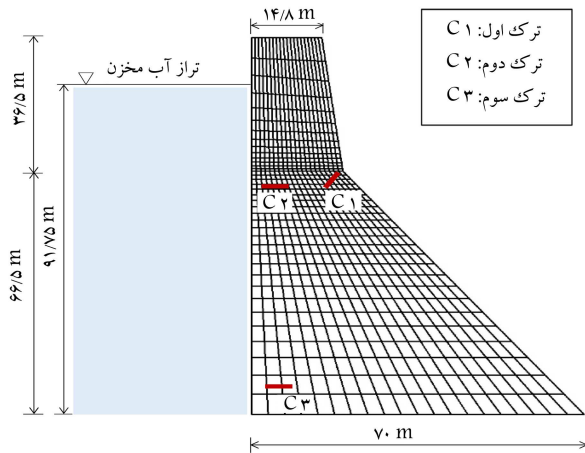
که در آن، $C(a,b)$ ضریب تبدیل موجک و $\psi^*(\omega)$ پیچش مختلط تابع پایه‌ی $\psi(x)$ است. با تغییر پارامترهای a و b ، سیگنال تجزیه و تحلیل می‌شود و در نهایت ضرایبی از موجک به دست می‌آید که با بررسی آن‌ها می‌توان ویژگی‌های محلی سیگنال، شامل وجود آسیب را استخراج کرد. تبدیل موجک پیوسته، یک سری داده‌های اضافی از سیگنال را نیز در حین تحلیل ارائه می‌دهد. بنابراین، تبدیل دیگری را می‌توان به کار برد که با تجزیه‌ی سیگنال، فقط اطلاعات خاص مورد نظر را نمایش



شکل ۱. تابع حقیقی موجک مورلت.

جدول ۱. مشخصات مصالح بتن بدنه سد.

مدول کشسانی (E)	$31027 (MPa)$
ضریب پواسون (ν)	0.2
چگالی (ρ)	$2643 (kg/m^3)$



شکل ۲. مدل المان محدود مونولیت سد کوینا.

۲.۴. تحلیل استاتیکی

در تحلیل استاتیکی، مدل اجزاء محدود با بررسی مش بهینه، ۸۱۹ نقطه‌ی گره‌یی و ۷۶۰ المان چهارضلعی ۴ گره‌یی دارد. المان‌ها از نوع تنش صفحه‌یی درجه اول با انتگرال‌گیری کاهش یافته هستند که در نرم‌افزار آباکوس^۸ با نام CPS۲R شناخته می‌شوند. مصالح بتن به صورت همگن و هم‌گرا بوده و رفتار بتن، کشسانی خطی فرض شده است. مشخصات بتن به کار رفته در تحلیل، در جدول ۱ مشاهده می‌شود. در تحلیل مذکور از آثار مخزن و پی صرف‌نظر شده است. بنابراین شرط مرزی موجود، فقط شرایط گیرداری کامل (صلب) برای پایه‌ی سد است. بارهای وزن و فشار هیدرواستاتیک آب در وجه بالادست، به بدنه‌ی سد اعمال شد. در این حالت، نیروی وزن به صورت یکنواخت به کل بدنه‌ی سد اعمال، نیروی آب مخزن در ارتفاع ۹۱٫۷۵ متر از کف مخزن محاسبه و به وجه بالادست سد اعمال شده است. پس از انجام تحلیل، تغییرشکل بدنه‌ی سد در حالت سالم تحت بارگذاری استاتیکی اعمالی نسبت به حالت اولیه‌ی سد در شکل ۳ الف ملاحظه می‌شود. در شکل ۳ ب، کانتور تغییرشکل بدنه‌ی سد در راستای محور x مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی جابه‌جایی در تاج سد در گره‌ی شماره ۵ رخ داده و مقدار تغییرشکل آن برابر 0.033 متر یا 0.33 سانتی‌متر بوده است.

۳.۴. تحلیل دینامیکی

برای انجام تحلیل دینامیکی، ابعاد و مشخصات هندسی و همچنین خصوصیات مصالح، به ترتیب براساس شکل ۱ و جدول ۱ است. در طراحی مش برای تحلیل‌های دینامیکی، الگوی مش بندی استفاده می‌شود، که بتواند به طریق مناسب شکل مودهایی که قرار است در طی تحلیل تحریک شوند، را بیان کند. از این رو، بهتر است مش بندی در تحلیل‌های دینامیکی ریزتر از تحلیل‌های استاتیکی در نظر گرفته شود. بنابراین در بخش حاضر، 6120 المان و 6335 گره برای بدنه‌ی مونولیت سد در حالت سالم در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی گیردار و المان‌های CPS۲R، مشابه تحلیل استاتیکی در نظر گرفته شده است. از دیگر مفروضات در بخش حاضر، مخزن خالی

دهد. در DWT، ضرایب موجک در نقاط گسسته‌یی از سیگنال محاسبه می‌شوند. بنابراین پارامترهای مقیاس و انتقال در این تبدیل به صورت رابطه‌ی ۵ تغییر می‌کنند:

$$a = a_0^m, a_0 > 1$$

$$b = n.b_0^m, b_0 > 0, \forall m, n \in Z \quad (5)$$

در نهایت سیگنال $f(x)$ به صورت رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$f(x) = \sum_{m,n \in Z} c(m,n) \cdot \psi_{m,n}(x) \quad (6)$$

و یا رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$f(x) = A_n(x) + \sum D_n(x) \quad (7)$$

که در رابطه‌ی ۶، ضرایب موجک و در رابطه‌ی ۷، $A_n(x)$ و $D_n(x)$ به ترتیب ضرایب تقریب و جزئیات و n سطح تجزیه‌ی تبدیل موجک گسسته هستند. با توجه به روابط ارائه شده، DWT سیگنال را به مجموعه‌یی از تقریب‌ها و جزئیات تجزیه می‌کند. در تبدیل موجک گسسته در سطح اول، سیگنال به A_1 و D_1 تجزیه می‌شود. در سطوح بعدی، سیگنال به دست آمده از ضرایب تقریب سطح اول تجزیه می‌شود و مجدداً ضرایب تقریب و جزئیات جدید به دست می‌آید. این فرایند می‌تواند تا صفرشدن مقدار ضرایب تقریب ادامه یابد. ضرایب تقریب، شامل مقادیر بسامد پایین سیگنال هستند. در حالی که جزئیات مقادیر بسامد بالای سیگنال را در بر می‌گیرد. محتوای بسامد بالا در سیگنال، شامل نویزها و ناپیوستگی‌های ممکن است.^[۱۸] بنابراین، آنچه در بررسی شناسایی آسیب در سیگنال‌ها اهمیت دارد، ضرایب جزئیات به دست آمده از تبدیل مذکور است.

۴. شبیه‌سازی عددی

۴.۱. سد بتنی وزنی کوینا

سد کوینا، سد بتنی وزنی مستقیم با ارتفاع 103 متر و عرض پایه 70 متر است که بر روی رودخانه کوینا در کشور هندوستان قرار دارد. در ۱۱ دسامبر ۱۹۶۷، زلزله‌یی شدید به بزرگی 6.5 ریشتر با بیشینه‌ی شتاب اندازه‌گیری شده‌ی $0.49g$ و $0.34g$ در راستای افق و قائم آسیب‌های جدی به سازه سد وارد کرد.^[۱۹] سد کوینا از معدود سدهای بتنی است که تحت زلزله‌ی واقعی دچار ترک خوردگی شده است. از این رو مورد توجه بسیاری از پژوهشگران جهت مطالعات گسترده قرار گرفته است.^[۲۰-۲۲] برای شروع به مدل‌سازی، تصمیم‌گیری در نوع مدل‌سازی دوبعدی یا سه‌بعدی مسئله و دست‌یابی به بهترین نتیجه از تحلیل مورد نظر اهمیت دارد. در ابتدای شروع زلزله، ارتعاش‌ها با دامنه‌های کم صورت می‌پذیرد. در این حالت، سد وزنی، حتی اگر لغزش‌هایی میان مونولیت‌های آن صورت گیرد، همانند یک جسم جامد پیوسته عمل می‌کند. با بیشترشدن دامنه‌ی ارتعاش، نیروهای اینرسی بسیار بیشتر از نیروهای برشی که از طریق درز میان مونولیت‌های سد منتقل می‌شود، خواهند بود. در نتیجه مونولیت‌ها تمایل دارند به صورت مستقل ارتعاش کنند. این مسئله با خرد شدن بتن و افزایش نشست آب از درزهای سد کوینا در طول زلزله‌ی کوینا مشاهده شد. در نتیجه به نظر می‌رسد که مدل‌سازی دوبعدی تک‌تک مونولیت‌ها برای پیش‌بینی پاسخ سدهای وزنی به تحریکات شدید زلزله بهتر از مدل‌سازی سه‌بعدی باشد.^[۲۳،۲۰] مدل المان محدود بلندترین بلوک غیر از سرریز سد، به همراه ترک‌های فرضی برای شناسایی آسیب به صورت دوبعدی مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مقایسه‌ی بسامدهای طبیعی مدل المان محدود و مرجع [۲۱].

بسامدهای طبیعی (Hz)			
شماره مود	۱	۲	۳
پژوهش حاضر	۳,۰۰۲	۷,۹۴۹	۱۰,۸۴۸
	۳,۰۰۲	۷,۹۵۳	۱۰,۸۴۸
			۱۵,۶۴۰
			۱۵,۶۳۵

جدول ۳. سناریوهای خرابی تعریف شده.

سناریوی خرابی	موقعیت ترک
سناریوی خرابی ۱	ترک اول در فاصله ۳۶,۵۵ متری از تاج سد در وجه پایین دست
سناریوی خرابی ۲	ترک دوم در فاصله ۴۱,۳۰ متری از تاج سد در وجه بالادست
سناریوی خرابی ۳	ترک سوم در فاصله ۹۷,۲۸ متری از تاج سد در وجه بالادست
سناریوی خرابی ۴	ترکیب سناریوهای خرابی ۱ و ۲
سناریوی خرابی ۵	ترکیب سناریوهای خرابی ۲ و ۳
سناریوی خرابی ۶	ترکیب سناریوهای خرابی ۱، ۲ و ۳

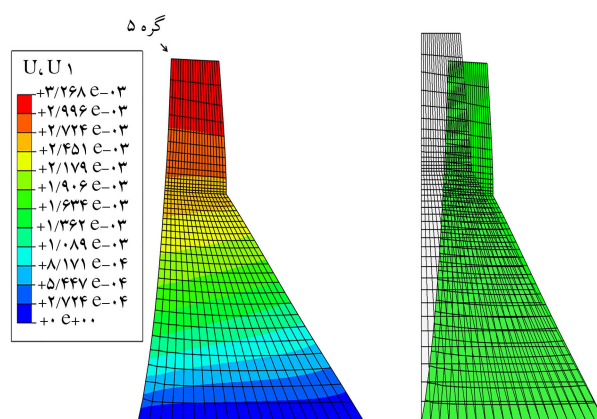
دو حالت بعدی، ترک‌های افقی هستند که در نزدیکی وجه بالادست سد تعیین شده است. سناریوهای خرابی با توجه به موقعیت ترک‌ها در شکل مذکور، براساس جدول ۳ تعریف شده است.

به منظور بررسی تأثیر مقدار فشار هیدرواستاتیک در امکان شناسایی موقعیت آسیب‌ها توسط تحلیل موجک، در تحلیل استاتیکی ۳ ارتفاع برای مخزن فرض شده است. این تذکر لازم است که فرایند شناسایی آسیب به این صورت است که در نمودارهای به دست آمده بعد از اعمال موجک به سیگنال‌های مورد نظر، اغتشاش‌هایی در نواحی وجود آسیب در نمودار مشاهده می‌شود. وجود آشفتگی به این معناست که موجک در موقعیت ترک، مقداری قابل ملاحظه دارد؛ در حالی که در بقیه‌ی نقاط، مقداری برابر صفر یا نزدیک به صفر دارد.

در شکل ۴، نمودار تغییر مکان به دست آمده از تحلیل استاتیکی سد کونیا در ۳ ارتفاع از مخزن نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هیچ‌گونه آشفتگی در نمودارها، مبنی بر حضور آسیب وجود ندارد. داده‌های به دست آمده در نمودارهای شکل مذکور، با استفاده از تبدیل موجک گسسته‌ی $6/8$ bior در یک سطح تجزیه و تحلیل شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در فاصله‌ی ۳۶,۵۵ متر از تاج سد، نمودار دچار آشفتگی شده و موجک در هر سه ارتفاع، آسیب فرضی در سناریوی خرابی اول را شناسایی کرده است. از آنجایی که در نمودارهای مذکور مقدار ضریب موجک قابل ملاحظه است، می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع مخزن، در امکان شناسایی آسیب توسط تبدیل موجک تأثیری ندارد.

در نمودار جابه‌جایی سناریوهای خرابی‌های ۲ و ۳، مشابه سناریوی خرابی ۱، آشفتگی که نشان‌دهنده‌ی حضور آسیب در بدنه‌ی سد باشد، مشاهده نشد. در حالی که براساس شکل ۶، موجک گسسته موقعیت آسیب در سناریوی خرابی ۲ را با دقت نسبتاً بالایی شناسایی کرده است. این تذکر لازم است که در تجزیه‌ی نمودار تغییر مکان سناریوی خرابی ۳ نیز مشابه سناریوهای خرابی‌های ۱ و ۲، ترک فرضی با مقدار ضریب بالایی توسط موجک گسسته شناسایی شد.

با مقایسه‌ی مقدار ضریب به دست آمده از تحلیل موجک سناریوهای خرابی‌های



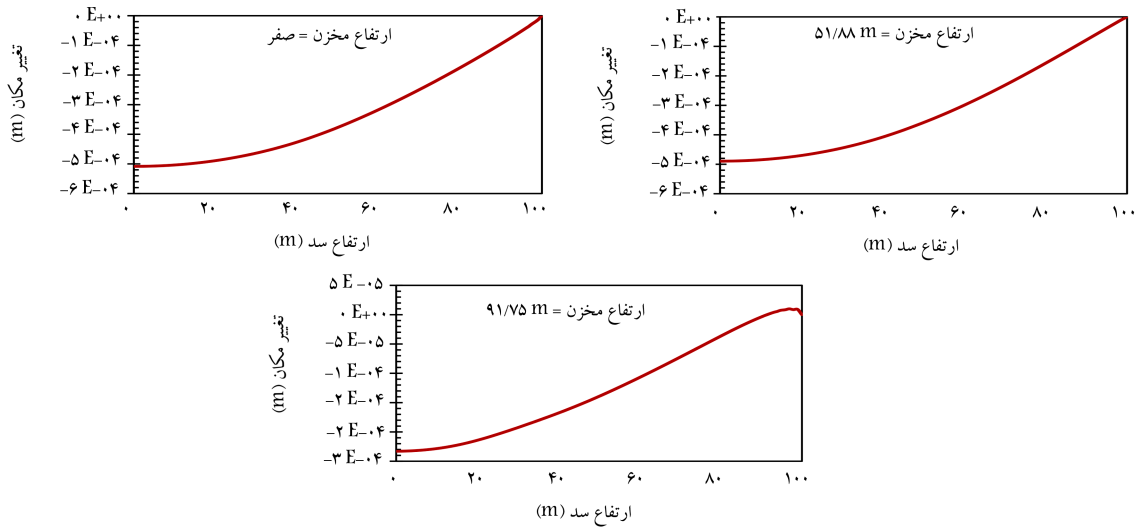
شکل ۳. تغییر شکل بدنه سد؛ (الف) تغییر شکل بدنه سد؛ (ب) کانتور تغییر شکل بدنه سد در راستای محور X.

شکل ۳. تغییر شکل بدنه سد.

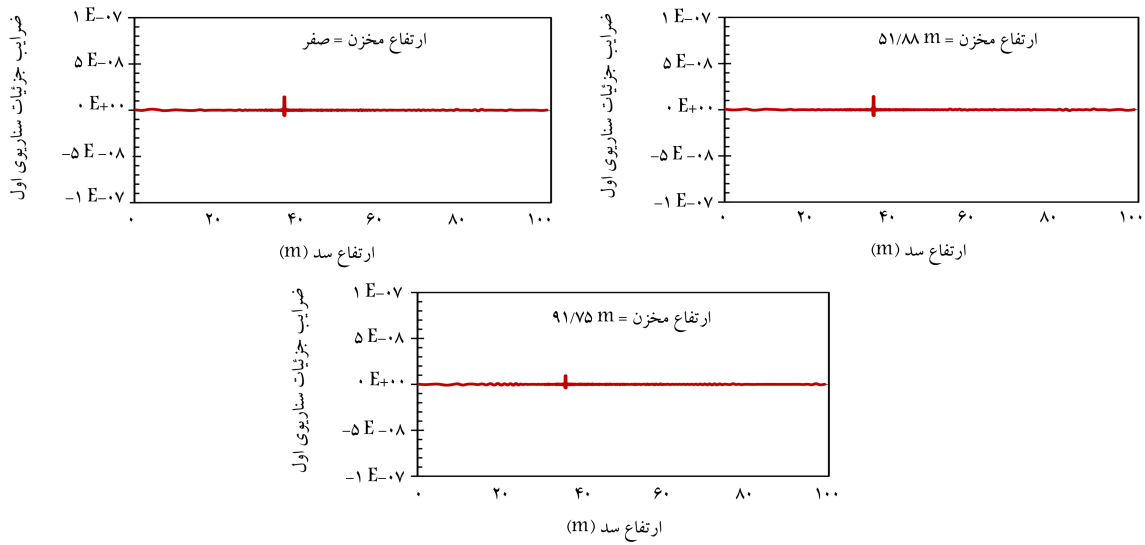
برای سد است. همچنین، از آنجا که استخراج بسامدها و شکل مودهای طبیعی سد مدنظر است، بارگذاری خارجی اعمال نشده است. پس از انجام آنالیز، شکل‌های ۴ مود اول سد استخراج شده است. به منظور اعتبارسنجی، مقادیر ۴ بسامد طبیعی اول مدل المان محدود مونولیت سد و مرجع [۲۱]، برای حالت سالم در جدول ۲ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع اخیر، به دست آمده است.

۵. شناسایی آسیب

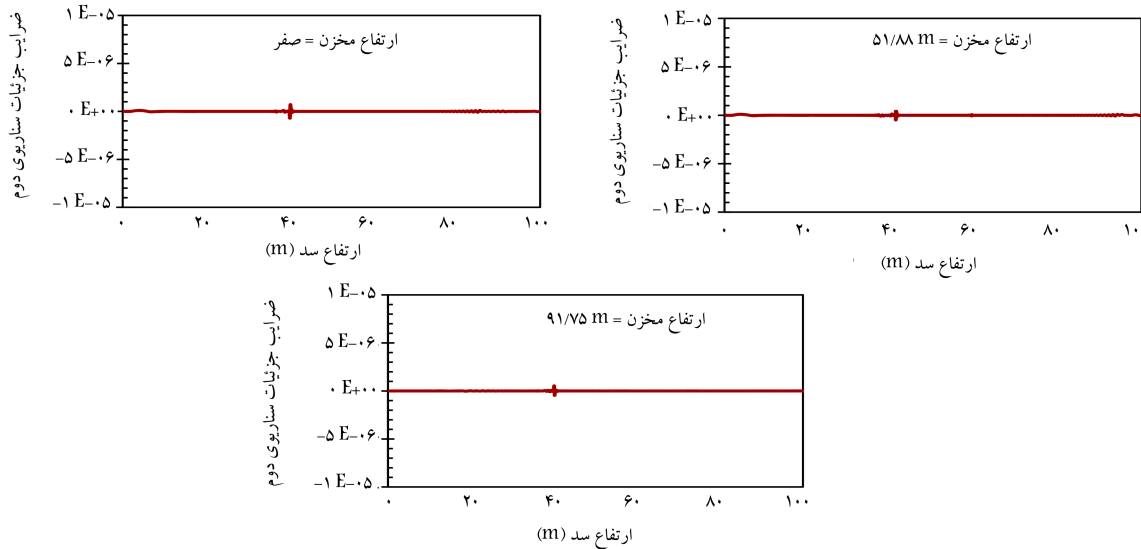
با توجه به شکل ۲، سه ترک با طول‌هایی برابر $2/0$ متر در موقعیت‌های مختلف، در مدل المان محدود سد بتنی وزنی کونیا فرض شده است. حالت اول، ترک موربی است که در نزدیکی محل تغییر شیب وجه پایین دست سد در نظر گرفته شده و



شکل ۴. نمودارهای تغییرمکان استاتیکی سد در سناریوی خرابی ۱.



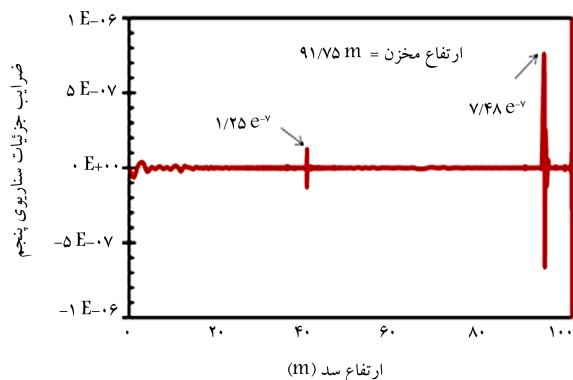
شکل ۵. شناسایی آسیب در سناریوی خرابی ۱ توسط موجک گسسته‌ی ۶/۸.



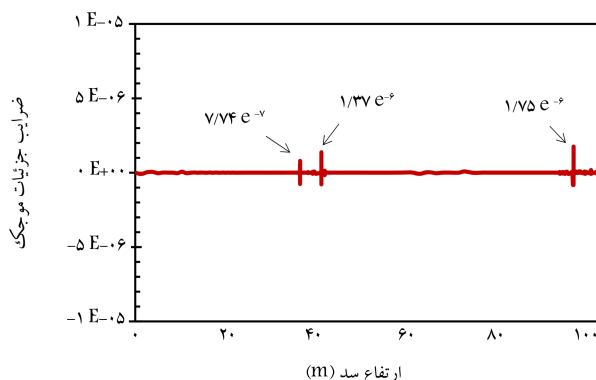
شکل ۶. شناسایی آسیب در سناریوی خرابی ۲ توسط موجک گسسته‌ی ۶/۸.

جدول ۴. مقایسه‌ی ضرایب موجک در سناریوی خرابی‌های ۱ و ۲.

ارتفاع مخزن	ضرایب موجک	
	سناریوی خرابی ۱	سناریوی خرابی ۲
۹۱٫۷۵ متر	$9,43 \times 10^{-9}$	$5,24 \times 10^{-7}$
۵۱٫۸۸ متر	$1,43 \times 10^{-8}$	$4,11 \times 10^{-7}$
صفر	$1,44 \times 10^{-8}$	$6,89 \times 10^{-7}$



شکل ۵. شناسایی آسیب در سناریوی خرابی ۵.

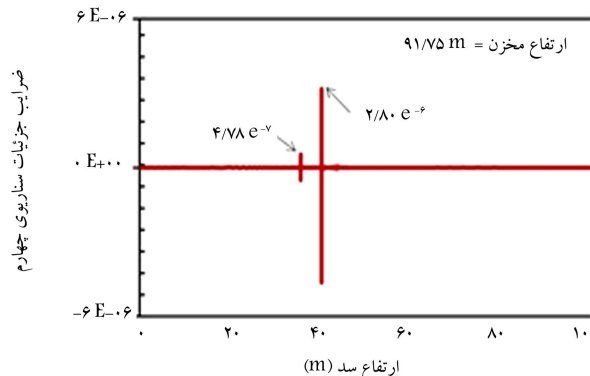


شکل ۶. شناسایی آسیب و مقدار ضرایب موجک در سناریوی خرابی ۶.

از آنالیز مودال سد به منظور شناسایی موقعیت و شدت آسیب استفاده شده است. شکل ۱۰، نمودار جزئیات در یک سطح تجزیه برای ۴ مود اول سد در سناریوی خرابی ۱ را نشان می‌دهد. در تجزیه‌ی سیگنال‌های مودی در بخش حاضر از موجک گسسته‌ی bior3/9 استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، موجک به‌دقت قادر به شناسایی آسیب در ناحیه‌ی ترک خورده در هر ۴ مود است. همچنین با بالا رفتن مرتبه‌ی مود، ضریب موجک افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی حساسیت موجک به مودهای مرتبه‌ی بالاتر است. اغتشاشات به‌وجود آمده در ابتدا و انتهای نمودارهای جزئیات موجک، ناشی از ورود و خروج موجک به سیگنال مورد بررسی است که در اصطلاح آثار انتهایی نامیده می‌شوند. این مسئله با برون‌یابی نمودار در نتایج موجک پیوسته برطرف شده است.

با توجه به نمودار جزئیات در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در سطح سوم تجزیه، موقعیت آسیب به‌راحتی قابل شناسایی است. همچنین ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب موجک در ناحیه‌ی وجود ترک، بیشتر از آثار انتهایی سیگنال است. بنابراین، نزدیک بودن آسیب به انتهای سیگنال، خللی در فرایند شناسایی ایجاد نکرده است. همچنین از شکل ۱۱ برداشت می‌شود که با بالا رفتن سطح تجزیه، امکان شناسایی آسیب کاهش می‌یابد. این مسئله به دلیل تجزیه‌ی ضرایب تقریب در هر سطح تجزیه در تبدیل موجک گسسته است. بنابراین سطح تجزیه‌ی بهینه، اولین سطحی انتخاب می‌شود که ناحیه‌ی وجود آسیب توسط موجک گسسته شناسایی می‌شود. در این سناریوی خرابی براساس شکل ۱۱، سطح سوم تجزیه به‌عنوان سطح تجزیه‌ی بهینه انتخاب شده است.

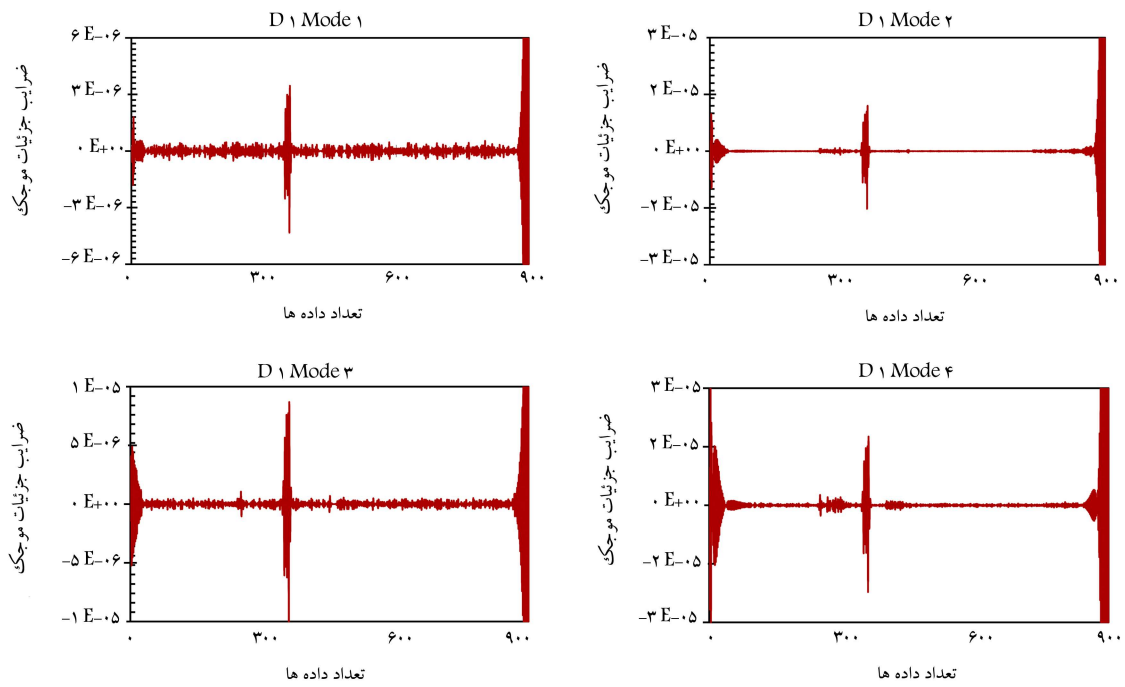
به‌منظور بررسی اثر موقعیت ترک‌ها نسبت به یکدیگر در مراحل شناسایی آسیب، ترکیب سناریوهای خرابی توسط موجک پیوسته‌ی bior3/9 ارزیابی شد. در تحلیل



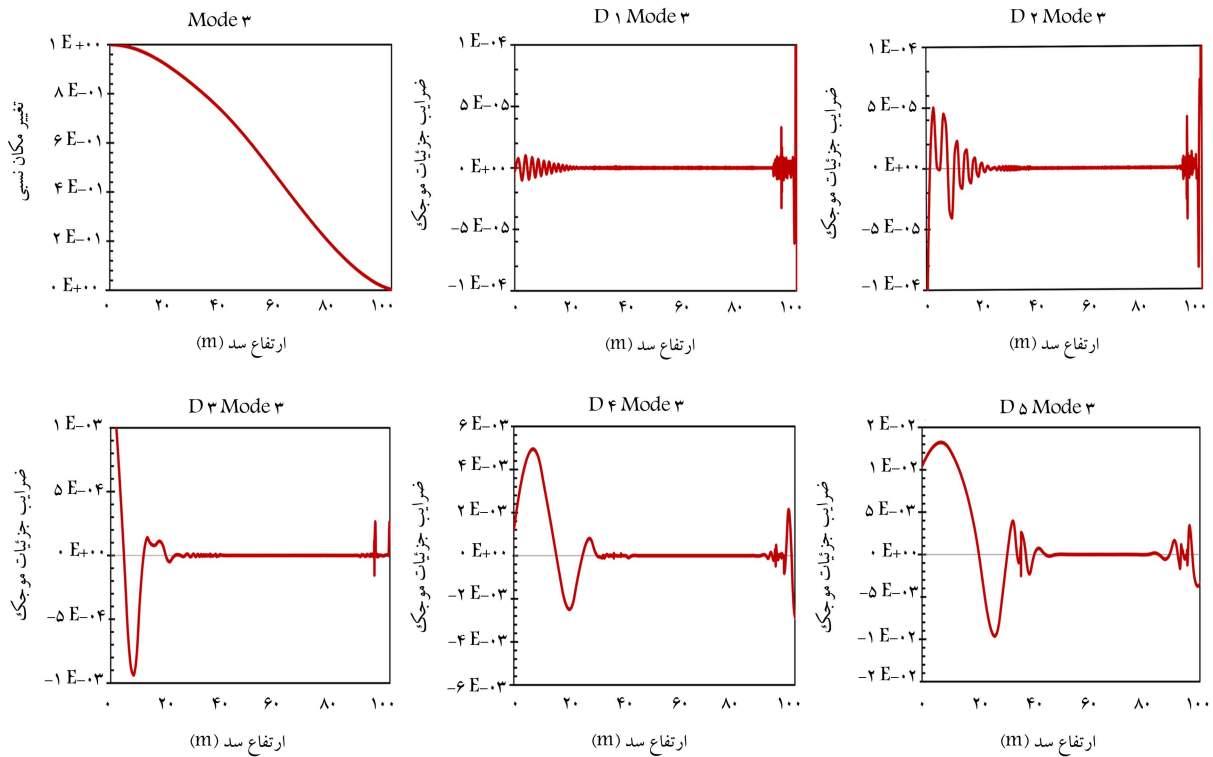
شکل ۷. مقدار ضرایب موجک در سناریوی خرابی ۴.

۱ و ۲ در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در ارتفاع‌های یکسان، مقدار موجک در سناریوی خرابی ۲ بیشتر از سناریوی خرابی ۱ است. از آنجایی که داده‌های نمونه‌برداری، از نقاط گره‌یی در وجه بالادست سد به‌دست آمده‌اند؛ براساس مقادیر جدول مذکور ملاحظه می‌شود که در ارتفاع یکسان، ترکی که به وجه بالادست نزدیک‌تر است، مقدار ضریب موجک بیشتری نسبت به ترک مفروض در وجه پایین دست خواهد داشت. این نتیجه را می‌توان در شکل ۷ نیز ملاحظه کرد، که مطابق آن در سناریوی خرابی ۴ نیز که ترکیب سناریوهای ۱ و ۲ است، مقدار ضریب موجک در ناحیه‌ی نزدیک به وجه بالادست بیشتر است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که در تحلیل استاتیکی، فاصله‌ی محل آسیب به موقعیت نقاط نمونه‌برداری، در میزان شناسایی خرابی توسط تبدیل موجک تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه میزان ارتفاع مخزن در دقت شناسایی آسیب اثری ندارد، بنابراین در ادامه، فرایند شناسایی آسیب در سناریوهای خرابی مختلف در تحلیل استاتیکی، فقط در یک ارتفاع از مخزن بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، ترک در نظر گرفته‌شده در فاصله‌ی ۹۷٫۲۸ متری از تاج سد با شدت بیشتری نسبت به ترک مفروض در فاصله‌ی ۴۱٫۳۰ متری تاج سد توسط موجک گسسته‌ی bior6/8 شناسایی شده است.

در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود ترکی که به تکیه‌گاه سد نزدیک‌تر است، مقدار ضریب موجک بالاتری نسبت به دو ترک دیگر دارد. از شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل موجک به نزدیک بودن آسیب به تکیه‌گاه در تحلیل استاتیکی حساس است. با توجه به مشاهده‌هایی که از ترک خوردن بدنه‌ی سد کوینا بعد از زلزله به‌دست آمده است و همچنین براساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های مکانیک شکست توسط پژوهشگران بر روی سد وزنی کوینا، این‌گونه برداشت می‌شود که ناحیه‌ی تغییر شیب در وجه پایین دست نسبت به نواحی دیگر آسیب‌دیده، بحرانی‌تر است. [۲۲] این در حالی است که در فرایند شناسایی آسیب بر روی داده‌های استاتیکی، عواملی همچون نزدیکی ترک به موقعیت نقاط نمونه‌برداری و فاصله‌ی آسیب نسبت به تکیه‌گاه در میزان ضرایب موجک تأثیر می‌گذارد. بنابراین در بخش بعدی، داده‌های به‌دست آمده



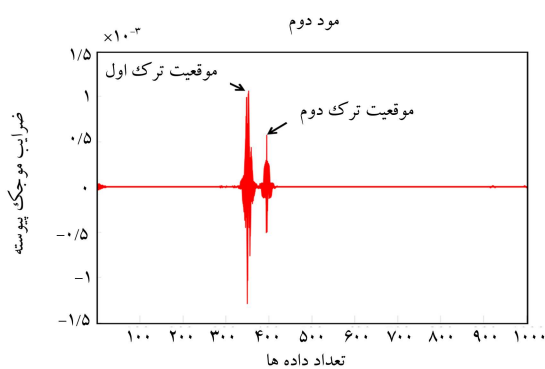
شکل ۱۰. نمودار جزئیات موجک گسسته در ۴ مود اول سناریوی خرابی.



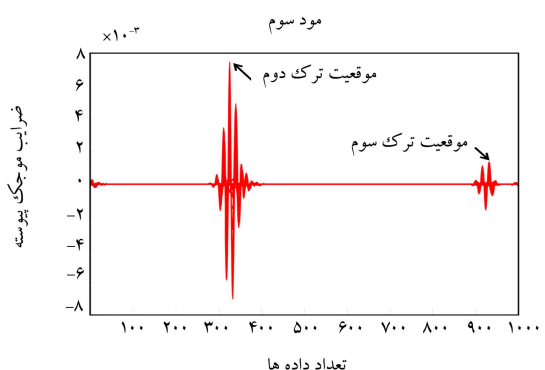
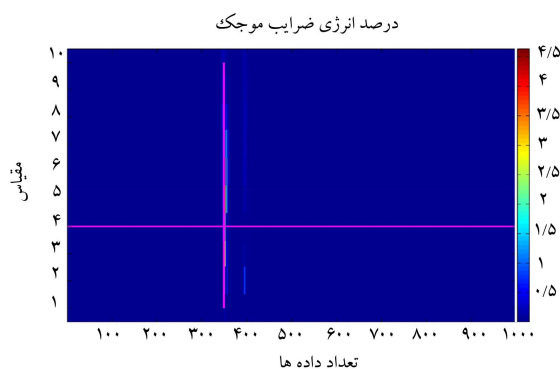
شکل ۱۱. نمودار پاسخ، تقریب و جزئیات در ۵ سطح تجزیه‌ی موجک گسسته در مود سوم سناریوی خرابی ۳.

ترک در نزدیکی تغییر شیب بالادست بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تحلیل داده‌های مودال، شناسایی آسیب به نزدیکی ترک به نکیه‌گاه بستگی ندارد. همچنین در کلیه‌ی نتایج موجک پیوسته می‌توان دریافت که شناسایی آسیب در مقیاس‌های پایین رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال، در شکل مذکور، شناسایی ترک دوم در مقیاس ۱۳ انجام شده است.

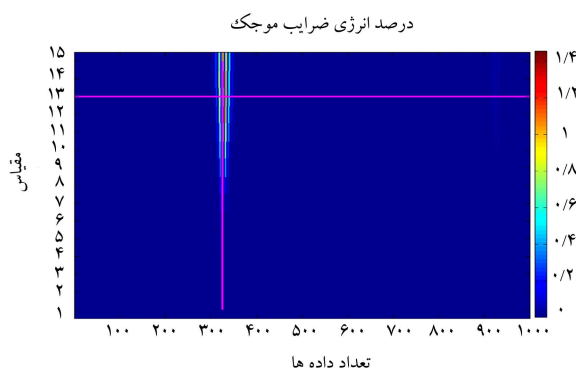
مذکور، مقدار پارامتر مقیاس برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در شکل ۱۲ در ناحیه‌ی تغییر شیب وجه پایین دست، اثر آسیب مشاهده شده در مقدار ضرایب موجک، بیشتر بوده و در مقیاس ۴، ترک اول با دقت قابل قبولی شناسایی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ضرایب موجک برای شناسایی



شکل ۱۲. شناسایی موقعیت آسیب در مود دوم سناریوی خرابی ۴ توسط موجک پیوسته.



شکل ۱۳. شناسایی آسیب در مود سوم سناریوی خرابی ۵ توسط موجک پیوسته.



۲. موجک به نزدیکی آسیب به تکیه‌گاه در نمودارهای مودی حساس نبوده و در ترکیب سناریوها، ترکی را که در ناحیه‌ی تغییرشیب وجه پایین دست سد قرار دارد، با شدت بیشتری شناسایی کرده است.

۳. انتخاب موجک مادر، سطوح تجزیه‌ی مناسب در تحلیل موجک گسسته و مقیاس صحیح در تبدیل موجک پیوسته در دقت و کارآمدی روند شناسایی خرابی مؤثر است. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که در سطوح بالاتر تجزیه‌ی سیگنال توسط موجک گسسته، امکان شناسایی موقعیت آسیب وجود ندارد.

۷. نتیجه‌گیری

در میان روش‌های مختلف پایش سلامت سازه، تبدیل موجک به‌عنوان روشی مفید برای شناسایی وجود و موقعیت آسیب در سازه‌ها معرفی شده است. در همین راستا، پژوهش حاضر به ارزیابی آسیب در سد بتنی کوینا با استفاده از الگوریتمی بر پایه‌ی تبدیل موجک پرداخته است. در روش ارائه‌شده، ورودی آنالیز موجک جهت پردازش، داده‌های تغییرمکانی به‌دست آمده از تحلیل‌های استاتیکی و آنالیز مودال در سد مورد مطالعه است.

در فرایند شناسایی آسیب، خرابی به‌صورت اغتشاش‌هایی در موقعیت ترک در نمودار ضرایب موجک ظاهر می‌شود. در پژوهش حاضر مشاهده شد که فرایند شناسایی آسیب در تجزیه‌ی نمودارهای مودی سد بتنی کوینا با استفاده از تبدیلات موجک، دقیق‌تر و مناسب‌تر از تجزیه نمودارهای استاتیکی است. همچنین ملاحظه شد که آنالیز موجک استفاده‌شده، قابلیت شناسایی چند آسیب به‌صورت هم‌زمان را دارد.

۶. تحلیل نتایج

در فرایند شناسایی آسیب توسط تبدیل موجک از نمودارهای استاتیکی و مودی سد بتنی کوینا، این نتایج به‌دست آمده است:

۱.۶. نتایج تحلیل استاتیکی

با توجه به تجزیه‌ی نمودارهای استاتیکی سناریوهای مختلف تعریف‌شده در سد بتنی کوینا توسط تبدیلات موجک، مشاهده شد که:

۱. ارتفاع مخزن در دقت تشخیص موقعیت آسیب توسط موجک تأثیر ندارد.
۲. فاصله‌ی آسیب تا نقاط نمونه‌برداری در نتایج حاصل از تبدیل موجک مؤثر است.
۳. ضریب موجک در ترکی که به تکیه‌گاه سد نزدیک‌تر است، مقدار بیشتری داشته و با دقت بیشتری نسبت به ترک‌های دیگر شناسایی شده است.

۲.۶. نتایج تحلیل دینامیکی

در تجزیه‌ی نمودارهای ۴ مود اول سد بتنی کوینا توسط موجک گسسته و پیوسته، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. شناسایی آسیب از داده‌های مودال با دقت بیشتری صورت می‌گیرد. به‌طوری که در ناحیه‌ی از بدنه‌ی سد که نسبت به خرابی بحرانی‌تر است؛ موجک، مقدار ضریب بزرگ‌تری را نشان می‌دهد.

پانوشتها

1. structural health monitoring
2. local mean decomposition
3. empirical mode decomposition
4. international committee of large dams
5. Morlet wavelet
6. continuous wavelet transform
7. discrete wavelet transform
8. Abaqus

منابع (References)

1. Wang, S. and Ren, Q. "Dynamic response of gravity dam model with crack and damage detection", *Science China Technological Sciences*, **54**(3), pp. 541-546 (2011).
2. Joghataie, A. and Dizaji, M.S. "Reducing extent of cracks and increasing time to failure of concrete gravity dams by optimization of properties of layers of concrete", *Scientia Iranica: Transaction A, Civil Engineering*, **21**(1), pp. 67-81 (2014).
3. Nair, K.K. and Kiremidjian, A.S. "Derivation of a damage sensitive feature using the Haar wavelet transform", *Journal of Applied Mechanics*, **76**(6), 9 p. (2009).
4. Li, Y., Xu, M., Wang, R. and et al. "A fault diagnosis scheme for rolling bearing based on local mean decomposition and improved multiscale fuzzy entropy", *Journal of Sound and Vibration*, **360**, pp. 277-299 (2016).
5. Li, Y., Xu, M., Wei, Y. and et al. "An improvement EMD method based on the optimized rational Hermite interpolation approach and its application to gear fault diagnosis", *Measurement*, **63**, pp. 330-345 (2015).
6. Hoseini Vaez, S.R. and Fallah Hossein abadi, N. "Damage detection of thin plates using GA-PSO algorithm based on modal data", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **42**(3), pp.1251-1263 (2017).
7. eh, A., Hoseini Vaez, S.R., Hosseini, P. and et al. Kav "Detection of damage in truss structures using Simplified Dolphin Echolocation algorithm based on modal data", *Smart Structures and Systems*, **18**(5), pp. 983-1004 (2016).
8. Chang, C.-C. and Chen, L.-W. "Vibration damage detection of a Timoshenko beam by spatial wavelet based approach", *Applied Acoustics*, **64**(12), pp. 1217-1240 (2003).
9. Gokdag, 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**(3), pp. 1158-1180 (2009).
10. Khorram, A., Rezaeian, M. and Bakhtiri-Nejad, F. "Multiple cracks detection in a beam subjected to a moving load using wavelet analysis combined with factorial design", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, **40**, pp. 97-113 (2013).
11. Ravanfar, S.A., Abdul Razak, H., Ismail, Z. and et al. "An improved method of parameter identification and damage detection in beam structures under flexural vibration using wavelet multi-resolution analysis", *Sensors (Basel, Switzerland)*, **15**(9), pp. 22750-22775 (2015).
12. Huang, Y., Meyer, D. and Nemat-Nasser, S. "Damage detection with spatially distributed 2D continuous wavelet transform", *Mechanics of Materials*, **41**(10), pp. 1096-1107 (2009).
13. Ovanesoava, A. and Suarez, L. "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures", *Engineering Structures*, **26**(1), pp. 39-49 (2004).
14. Liu, X., Leimbach, K.R., Hartmann, D. and et al. "Signal analysis using wavelets for structural damage detection applied to wind energy converters", *The 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (2012).
15. Vafaei, M. and Adnan, A.B. "Seismic damage detection of tall airport traffic control towers using wavelet analysis", *Structure and Infrastructure Engineering*, **10**(1), pp. 106-127 (2014).
16. Bukenya, P., Moyo, P., Beushausen, H. and et al. "Health monitoring of concrete dams: a literature review", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **4**(4), pp. 235-244 (2014).
17. Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of Solids and Structures*, **40**(13), pp. 3557-3569 (2003).
18. Al-Khalidy, A. "Health monitoring of dynamic systems using wavelet analysis", PHD Thesis, Comcll Uniuersity (2002).
19. Wang, G., Zhang, S., Wang, C. and et al. "Seismic performance evaluation of dam-reservoir-foundation systems to near-fault ground motions", *Natural Hazards*, **72**(2), pp. 651-674 (2014).
20. Chopra, A.K. and Chakrabarti, P. "Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **9**(4), pp. 363-383 (1981).
21. Sarkar, R., Paul, D. and Stempniewski, L. "Influence of reservoir and foundation on the nonlinear dynamic response of concrete gravity dams", *ISET Journal of Earthquake Technology*, **44**(2), pp. 377-389 (2007).
22. Sun, D. and Ren, Q. "Seismic damage analysis of concrete gravity dam based on wavelet transform", *Shock and Vibration*, **2016**(9), pp. 1-8 (2016).
23. Rea, D., Liaw, C.Y. and Chopra, A.K. "Mathematical models for the dynamic analysis of concrete gravity dams", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **3**(3), pp. 249-258 (1974).