

پردازش پاسخ سازه‌ها با کمک تبدیل موجک برای تشخیص آسیب‌های رخ داده در اثر زلزله

عاطفه عموزاده^۱، محمدرضا فدوی امیری^{۲*}، علی زارع حسین زاده^۳ و غلامرضا قدرتی امیری^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-زلزله، موسسه‌ی آموزش عالی علوم و فناوری آریان، بابل

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه شمال، آمل

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه علم و صنعت

۴- استاد، قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۴/۳۰]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۹/۳]

fadavi@shomal.ac.ir

چکیده- هدف اصلی این مقاله، تشخیص آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها در حین وقوع زلزله است. این کار، با پردازش سیگنال‌های مربوط به پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی سازه به کمک تبدیل موجک و واکاوی ضرایب جزئیات به دست آمده، صورت می‌پذیرد. بر این اساس، معیوب بودن کل سازه و لحظه‌ی رخداد آسیب، با ظهور تغییرات ناگهانی در ضرایب گفته شده، تشخیص داده می‌شود. هم‌چنین، محل آسیب، از طریق بررسی بیشینه مقادیر متناظر با تغییرات به وجود آمده در ضرایب موجک، تعیین می‌شود. به‌منظور بررسی کارایی روش یاد شده در شناسایی آسیب‌ها، سناریوهای آسبی مختلفی روی سه مثال عددی تحت زلزله‌های نورتریج و ال-سترو، مطالعه شده است. در اولین مثال، کاهش یکنواخت سختی، به‌عنوان آسیب رخ داده در یک قاب برشی ۴ طبقه، در نظر گرفته شده است. نمونه دوم، به شناسایی آسیب‌های احتمالی در یک تیر ساده، با در نظر داشتن پاسخ‌های تاریخیچه‌ی زمانی متناظر با درجات آزادی انتقالی اختصاص یافته است. در آخرین نمونه، برای بررسی آسیب‌هایی با سازوکار پیچیده‌تر، سختی سازه‌ی آسیب دیده به صورت مدل رفتاری متناظر با سختی دو خطی، تعریف و روش گفته شده، برای شناسایی آسیب‌ها پیاده‌سازی شده است. نتایج به دست آمده، حاکی از توانایی روش مطالعه شده در تشخیص آسیب-دیدگی سازه‌ها تحت اثر زلزله و قابلیت بالای آن در تعیین محل و زمان رخداد آسیب‌ها، بدون نیاز به اطلاعات سازه‌ی اولیه، است.

واژگان کلیدی: پایش سلامتی سازه‌ها، شناسایی آسیب، پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی، تبدیل موجک، مدل رفتاری سختی دوخطی.

۱- مقدمه

آسیب^۱ را می‌توان به صورت تغییرات رخ داده در مشخصات فیزیکی سازه‌ها تعریف کرد که به موجب آن، ممکن است رفتار واقعی سازه با رفتار مورد انتظار طراح، مغایرت پیدا کند. این قضیه، نه تنها باعث عملکرد نامناسب سازه می‌شود، بلکه ممکن است در درازمدت، به انهدام آن منجر شود. بنابراین شناسایی زود هنگام وجود آسیب در سازه‌ها، از اهمیت بسیار زیادی

برخوردار است. پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای نیل به این هدف مطرح کرده‌اند که از جمله ابتدائی‌ترین آن‌ها، می‌توان به روش‌های صوتی^۲ و یا اولتراسونیک^۳، اشاره کرد. این روش-ها که تحت عنوان «روش‌های محلی»^۴ در نظر گرفته می‌شوند، بر پایه‌ی بررسی موضعی محل تقریبی آسیب در سازه، استوار است. بنابراین، لازم است که از قبل، اطلاعاتی پیرامون

2 Acoustic

3 Ultrasonic

4 Local Methods

1 Damage

محدوده‌ی آسیب در دست باشد. حال آنکه در بیشتر موارد، این موضوع، امری بعید است. «روش‌های کلی»^۱، برخلاف روش‌های شناسایی محلی، نیازی به دانستن محدوده‌ی آسیب نداشته و از عکس‌العمل‌های کلی سازه برای تشخیص آسیب استفاده می‌کنند. این روش‌ها، با پایش تغییرات بوجود آمده در عکس‌العمل‌های دینامیکی یا استاتیکی، به تشخیص تغییرات رخ داده در مشخصات فیزیکی سازه‌ها می‌پردازند [۱]. به‌عنوان نمونه، برخی از پژوهشگران، با تعریف مساله‌ی تشخیص آسیب، به صورت یک مساله‌ی معکوس^۲، اقدام به شناسایی آسیب نموده‌اند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مراجع [۲-۷] اشاره کرد. بیشتر این روش‌ها، بر پایه‌ی آنالیز اطلاعات مودال^۳ استوار است و با بررسی تغییرات رخ داده در این اطلاعات، ضمن حل مساله‌ی معکوس، محل و شدت آسیب را در سازه‌ها تعیین می‌نمایند.

دسته‌ی دیگری از پژوهشگران، با استفاده از پردازش سیگنال-های ثبت شده از سازه‌ها، به تشخیص محل آسیب‌های احتمالی می‌پردازند [۸-۱۱]. این دسته از روش‌ها، قادرند تا به صورت آنالین رخداد آسیب را گزارش دهند. به طور کلی اساس این روش‌ها، بر پایه‌ی استخراج پاسخ‌های حوزه‌ی فرکانسی از روی پاسخ‌های حوزه‌ی زمان، استوار است. گرچه این‌کار به وسیله‌ی تبدیل‌های ریاضی مانند تبدیل فوریه، امکان‌پذیر است، لیکن مزایای متعدد تبدیل موجک^۴، باعث شده است تا بیشتر پژوهشگران از این تبدیل برای شناسایی آسیب‌ها استفاده کنند. تبدیل موجک، تبدیلی است که ضمن استخراج مشخصات فرکانسی یک سیگنال در یک بازه‌ی کوتاه، چگونگی تغییرات این اجزای فرکانسی را با گذشت زمان، بیان می‌نماید. اولین بار، قابلیت تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی به وسیله‌ی نیولند به کار گرفته شد [۱۲]. اگرچه نیولند به‌طور مشخص از تبدیل موجک برای آشکارسازی آسیب در سازه‌ها استفاده نکرد، ولی معرفی این روش سرآغاز مطالعات بعدی در

زمینه‌ی شناسایی آسیب در سازه‌های موجود در مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا، شد. کیم و ملهم در سال ۲۰۰۳، به منظور شناسایی آسیب در سازه‌های بتنی، واکنش دینامیکی تیرهای بتنی بزرگ‌مقیاس را ضربه، با کمک تبدیل موجک پیوسته و تبدیل فوریه سریع، بررسی کردند [۱۳]. اواسنا و سوارز در سال ۲۰۰۴ به بررسی کاربرد تبدیل موجک در شناسایی ترک‌های بوجود آمده در تیرها و قاب‌های مسطح تحت شرایط متفاوت بارگذاری پرداختند [۱۴]. قدرتی امیری و همکاران، در سال ۲۰۱۰ با استفاده از بردارهای شکل مودی و تبدیل موجک گسسته، توانستند آسیب‌های ایجاد شده در صفحات^۵ را شناسایی کنند [۱۵]. آن‌ها، آسیب را به صورت کاهش ضخامت با طول و عمق دلخواه در نظر گرفته بودند. باقری و کورهللی در سال ۲۰۱۳ روشی برای شناسایی آسیب-های رخ داده در اثر وقوع زمین‌لرزه با استفاده از تبدیل ویولت گسسته ارائه کردند [۱۶]. آن‌ها توانستند توالی زمانی رخداد آسیب را در دیوارهای برشی و مثال مبنای کارگروه پایش سلامتی سازه‌ها، تعیین کنند. به‌تازگی، قدرتی امیری و همکاران، ضمن ارائه‌ی مدل اجزای محدود تیر با کمک موجک B-spline، به تشخیص ترک‌های رخ داده در تیرها، با کمک همین موجک پرداختند [۱۷]. آن‌ها، برای مدل‌سازی ترک، از فنرهای پیچشی استفاده کردند.

با بررسی پژوهش‌های بالا، ملاحظه می‌شود که تبدیل موجک قادر است آسیب‌های رخ داده در یک سازه را از طریق بررسی پاسخ دینامیکی سازه‌ی آسیب دیده، تحت یک تحریک خارجی، تشخیص دهد. در این مقاله به بررسی قابلیت تبدیل موجک در شناسایی آسیب‌های رخ داده در لحظه‌ی خاصی از یک زلزله، پرداخته می‌شود و با واریسی ضرایب جزئیات^۶ موجک، علاوه بر تشخیص وجود آسیب و توالی زمانی آن، محل دقیق رخداد آسیب بر اساس بررسی مقادیر بیشینه‌ی ضرایب موجک، تشخیص داده می‌شود. سناریوهای آسیبی متعددی در سه نمونه عددی مختلف، در اثر وقوع زلزله‌های

1 Global Methods

2 Inverse Problem

3 Modal Data

4 Wavelet

5 Plates

6 Detail Coefficients

برخی از مزایای تبدیل موجک را دارد، اما پاره‌ای از قابلیت‌های ویژه‌ی تئوری موجک، باعث کارایی ممتاز و قابل توجه آن در زمینه‌ی پایش سلامتی سازه‌ها شده است که از آن جمله، می‌توان به توانایی آن در گزارش رفتار محلی سیگنال پردازش شده، اشاره کرد.

۳- شناسایی آسیب با کمک تبدیل موجک

در این قسمت، جزییات روش شناسایی آسیب با کمک تبدیل موجک ارائه می‌شود. معادله‌ی حرکت حاکم بر سیستم سازه‌ای با N درجه‌ی آزادی را تحت اثر زلزله، می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ ، به ترتیب، ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی کل سازه، است. همچنین $\{F(t)\}$ بردار متناظر با نیروی زلزله است. بدیهی است که در این رابطه، شرایط اولیه‌ی ارتعاش، (شامل جابه‌جایی، سرعت و شتاب اولیه) برابر با صفر است.

ممکن است در حین رخداد یک زلزله، در لحظه و یا لحظات خاصی، آسیب‌هایی در بخش‌های مختلف سازه بوجود آیند [۹ و ۱۶]. این آسیب‌ها، می‌توانند به صورت کاهش یکنواخت سختی در بخش‌های آسیب‌دیده در نظر گرفته شوند. چنین آسیبی را می‌توان برای عضو و یا المان i -ام، به صورت زیر تعریف کرد:

$$[K]_i^d = (1 - \alpha_i) [K]_i \quad (2)$$

که در آن، α_i میزان کاهش سختی (بر حسب درصد) است. هم‌چنین بالانویس d برای نشان دادن حالت آسیب‌دیده به کار رفته است. گرچه امکان دارد در طول یک زلزله آسیب به صورت تغییرات یکنواخت سختی در یک لحظه‌ی مشخص، اتفاق نیفتد؛ اما این سازوکار برای رخداد آسیب‌هایی که با چشم غیرمسلح امکان شناسایی آن‌ها وجود ندارد، قابل توجیه است و در پژوهش‌های مختلفی مانند [۹، ۱۶، ۲۰ و ۲۱] پذیرفته شده است. به عبارت دیگر، جایگاه اصلی پذیرش چنین مدلی برای آسیب و تحقیق روشی برای شناسایی آن، با توجه به مقاصد

ال-سنتر و (۱۹۴۰) و نورث‌ریچ (۱۹۹۴)، مطالعه می‌شود. نمونه‌ی اول، به ارزیابی روش، در شناسایی آسیب‌های یکنواخت در یک قاب برشی اختصاص دارد و در آن، چالش‌های مختلفی را مطالعه کرده است. در نمونه‌ی دوم، ضمن تعمیم روش برای شناسایی آسیب در سازه‌های پیچیده‌تر با در نظر داشتن تعداد محدودی از سنسورهای ثبت پاسخ، دو قاعده‌ی کلی برای قضاوت پیرامون سلامت اجزای سازه‌ای ارائه می‌شود. در پایان، در نمونه‌ی سوم، یک مدل آسیب دوخطی برای مدل‌سازی واقعی‌تر رفتار سازه‌ی آسیب‌دیده تحت زلزله پیشنهاد می‌شود و کارایی روش در شناسایی آسیب‌هایی با سازوکار پیچیده‌تر تحت اثر شتابنگاشت‌های زلزله و نوفه‌ی سفید^۱، مطالعه می‌شود. نتایج به دست آمده، حاکی از آن است که روش یاد شده قادر است آسیب‌های مدل‌سازی شده‌ای را که در حین یک زلزله حادث می‌شود، بدون نیاز به اطلاعات سازه‌ی اولیه و با دقت قابل قبولی، شناسایی کند.

۲- مروری بر تبدیل موجک

تبدیل موجک، تبدیلی است که مشخصات فرکانسی سیگنال را در یک بازه‌ی کوتاه استخراج نموده و چگونگی تغییر این اجزای فرکانسی را با گذشت زمان، بیان می‌کند. در این تبدیل یکسری بردارهای پایه ایجاد می‌شوند که تصویر سیگنال بر این پایه‌ها، معادل با جزء فرکانسی سیگنال است. باید توجه داشت که به‌خاطر تغییر بردارهای پایه در رزولوشن‌های فرکانسی مختلف، می‌توان اجزای فرکانسی متناظر با هر رزولیشن را استخراج کرد [۱۸]. با توجه به محدودیت‌های موجود در آنالیز فوریه و فوریه‌ی زمان-کوتاه، تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های حاوی ناپیوستگی و قله‌های متعدد نسبت به روش‌های سنتی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با کمک تئوری موجک، می‌توان جزئیات فرکانسی متناظر با هر لحظه از یک فرآیند غیرایستا^۲ را به دست آورد [۱۹]. گرچه تبدیل فوریه نیز

1 White Noise
2 Non-stationary

افزایش عمر سازه‌ها، قابل توجه است. احتمال دارد که وجود این گونه آسیب در سازه‌ای نوساز که برای اولین بار چنین آسیبی را تجربه می‌نماید، تأثیری در رفتار کلی سازه در شرایط عمومی نداشته باشد، اما شناسایی نکردن این آسیب گفته شده، رفتار ضعیف و عملکرد نامناسب سازه را در صورت بارگذاری بحرانی مجدد (مانند وقوع زلزله‌ای دیگر) به دنبال خواهد داشت که این امر می‌تواند منجر به انهدام کامل سازه شود.

کاهش سختی یک المان، در ماتریس سختی کل سازه تأثیر خواهد داشت پس، سازه بعد از آن لحظه، با سختی کاهش یافته‌ای ادامه‌ی زلزله را تجربه خواهد کرد. بنابراین معادله‌ی حرکت سازه‌ی آسیب دیده را در مقیاس زمانی معادل با بعد از رخداد آسیب (t_d) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$[M] \{\ddot{x}^d(t_d)\} + [C] \{\dot{x}^d(t_d)\} + [K] \{x^d(t_d)\} = \{F(t_d)\} \quad (3)$$

بدیهی است که در این حالت، شرایط اولیه‌ی ارتعاش صفر نبوده و معادل با آخرین لحظه‌ی قبل از رخداد آسیب است. پس از استخراج پاسخ‌های سازه، از تئوری موجک گسسته، برای پردازش سیگنال استفاده می‌شود. فرض می‌شود که سیگنال تحت آنالیز، پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی $x(t)$ است.

ایده‌ی اصلی تبدیل موجک گسسته، مشابه تبدیل موجک پیوسته است. پس، در ادامه، به اختصار، به مفاهیم مرتبط اشاره می‌کنیم.

تبدیل موجک پیوسته، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4)$$

که در آن a و b ، به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال و ψ^* مزدوج مختلط تابع پایه‌ی ψ است. تابع پایه، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (5)$$

در آنالیز موجک گسسته، سیگنال‌ها می‌توانند با تقریبات^۱ و

جزئیات، نمایش داده شوند. تقریبات، مقیاس بالا و مولفه‌های فرکانس پائین سیگنال است. این در حالی است که جزئیات، مقیاس پائین و مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال را شامل می‌شوند [۱۸]. در تبدیل موجک گسسته، جزئیات در مرحله‌ی j -ام ($D_j(t)$)، به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$D_j(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

که در آن $\mathbb{Z}$ ، مجموعه‌ی اعداد صحیح مثبت و $\psi_{j,k}$ ، تابع موجک پایه است. همچنین، cD_j ، ضرایب موجک در مرحله‌ی j -ام است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$cD_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (7)$$

تقریب در مرحله‌ی j -ام نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (8)$$

که در آن ϕ تابع مقیاس و cA_j ضرایب مقیاس در مرحله‌ی j -ام است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$cA_j(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \phi_{j,k}(t) dt \quad (9)$$

لازم به توضیح است که سیگنال $x(t)$ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$x(t) = A_j + \sum_{j \leq J} D_j \quad (10)$$

در این مقاله، از مقادیر «جزئیات» برای تشخیص آسیب استفاده می‌شود. پس در ادامه، برای مقادیر «جزئیات»، کوتاه، عنوان «ضرایب D » را به کار می‌بریم.

*** تشخیص وجود آسیب و تعیین زمان رخداد آن- رخداد آسیب** به صورت تغییرات ناگهانی در ضرایب D قابل تشخیص است. بدیهی است لحظه‌ای که این تغییرات بوجود آمده، متناظر با زمان رخداد آسیب خواهد بود.

*** تعیین محل آسیب- المانی که دارای بزرگترین ضریب D است**، المان آسیب‌دیده خواهد بود. به عنوان نمونه، اگر ضرایب D ، نشان‌دهنده‌ی وجود n تا آسیب باشند، برای تشخیص محل آسیب j -ام (DL_j)، در سازه‌ای با N_e المان، تعریف می‌کنیم:

$$DL_j = \max \{D_{1,j}, D_{2,j}, \dots, D_{N_e,j}\} \quad (11)$$

این سازه در مجموع، دارای چهار درجه‌ی آزادی انتقالی است و فرض بر این است که در تراز هر طبقه، حسگر ثبت پاسخ-های تاریخیچه‌ی زمانی، تعبیه شده است. سناریوهای آسیبی مطالعه شده در این نمونه، به شرح زیر است:

- سناریوی ۱: ۲۵٪ کاهش سختی در طبقه‌ی سوم، در ثانیه‌ی ششم از زلزله‌ی نورتریج؛
 - سناریوی ۲: ۳۰٪ کاهش سختی در طبقه‌ی اول، در ثانیه‌ی پنجم از زلزله‌ی ال-سنترو؛
 - سناریوی ۳: ۲۰٪ کاهش سختی در طبقه‌ی سوم، در ثانیه‌ی ششم و ۳۰٪ کاهش سختی در طبقه‌ی دوم، در ثانیه‌ی دهم از زلزله‌ی نورتریج.
- همان‌گونه‌که در بخش‌های قبلی اشاره شد، در روش یاد شده پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی سازه، به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. در این نمونه به‌منظور بررسی تأثیر پاسخ‌های مختلف سازه روی نتایج به دست آمده و مطالعه‌ی کارایی تبدیل موجک در پردازش پاسخ‌های مختلف، از تاریخیچه‌ی زمانی‌های «جابه‌جایی» و «سرعت» استفاده می‌شود. هم‌چنین، لازم به توضیح است که تمام تحلیل‌ها، با مدل‌سازی در فضای نرم افزار متلب صورت پذیرفته است.

که در آن D_{ij} بیانگر بیشینه ضریب جزییات برای سیگنال متناظر با i -امین المان، در لحظه‌ای معادل با رخداد j -امین آسیب است. در مطالعات عددی پیرامون این رابطه، بیشتر بحث خواهد شد.

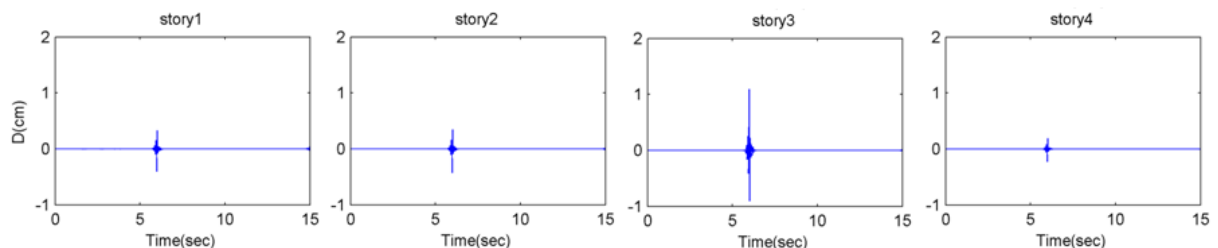
۴- مطالعات عددی

در این بخش، به بررسی کارایی روش مطرح شده، در شناسایی آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها پرداخته می‌شود. در نمونه‌های اول و دوم، به‌ترتیب، یک قاب برشی چهار طبقه و یک تیر بتنی ده المانه، بررسی می‌شود. در این دو نمونه، آسیب به صورت کاهش یکنواخت سختی تعریف شده است. نمونه‌ی سوم، به ارزیابی قابلیت روش ارائه شده تحت اثر رخداد انواع پیچیده-تری از آسیب در یک سیستم یک درجه آزادی، اختصاص یافته است.

۴-۱- قاب برشی ۴ طبقه

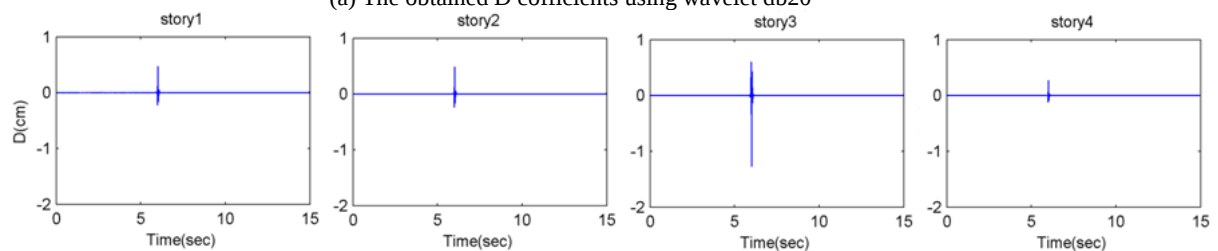
به‌عنوان اولین نمونه، یک قاب برشی ۴ طبقه، بررسی می‌شود. مشخصات این قاب، عبارتست از: جرم کلیه‌ی طبقات با هم مساوی و برابر با ۷۲۰۰ کیلوگرم؛ سختی تمام طبقات با هم برابر و معادل با ۱۹۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر و میرایی معادل با ۰.۵٪.

شکل (۱) نتایج پردازش پاسخ‌های جابه‌جایی قاب برشی چهار طبقه در سناریوی آسیب اول



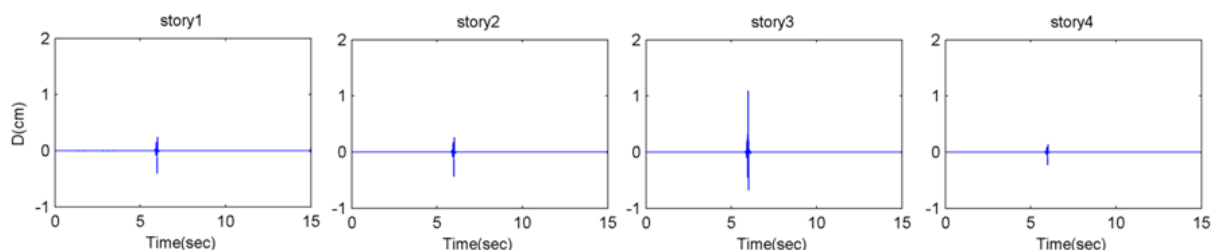
(الف) ضرایب D به دست آمده از موجک پایه‌ی db20

(a) The obtained D coefficients using wavelet db20



(ب) ضرایب D به دست آمده از موجک پایه‌ی bior5.5

(b) The obtained D coefficients using wavelet bior5.5



(ج) ضرایب D به دست آمده از موجک پایه‌ی coif4

(c) The obtained D coefficients using wavelet coif4

Fig. 1. Results of processing displacement responses of the four-story shear frame for the first damage scenario

سه گانه، در شکل‌های (۱-الف تا ۱-ج) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، نمودارهای ضرایب D به دست آمده از آنالیز پاسخ تمامی طبقات، رخداد آسیب را در ثانیه‌ی ششم گزارش داده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آنالیز پاسخ تاریخی‌چهی زمانی متناظر با یکی از درجات آزادی هم، به تنهایی قادر است تا معیوب بودن کل سازه و نیز زمان رخداد آسیب را گزارش دهد. به بیان دیگر، وجود یک حسگر برای تشخیص معیوب بودن کل سازه و تعیین توالی زمانی رخداد آسیب، کافی است. اما جهت تشخیص محل دقیق آسیب، لازمست تا به تعداد المان‌های موجود، حسگر نصب شود. چرا که محل آسیب، از طریق مقایسه‌ی مقادیر ماکزیمم ملاحظه شده در بین ضرایب D، قابل تعیین خواهد بود. به عنوان نمونه، در شکل‌های (۱-الف تا ۱-ج) ملاحظه می‌شود که ضریب D بیشینه‌ای که در طبقه‌ی سوم دیده می‌شود، مقدار بزرگتری نسبت به مقادیر متناظر در سایر طبقات دارد و این، به معنای آسیب دیده بودن طبقه‌ی سوم است.

نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی سناریوی اول، با آنالیز پاسخ تاریخی‌چهی زمانی سرعت، برای موجک‌های سه گانه، در شکل‌های (۲-الف تا ۲-ج) ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که در این حالت هم، بیشینه مقدار ضریب D، معیوب بودن کل سازه، زمان و محل رخداد آسیب را نشان داده است. مقایسه‌ی بین موجک‌های استفاده شده برای تحلیل پاسخ‌های جابه‌جایی و سرعت، حاکی از آن است که در هر دو حالت، هر سه نوع موجک استفاده شده، توانسته‌اند نتایج را با دقت قابل قبولی، گزارش دهند پس ترجیحی در انتخاب موجک پایه، وجود

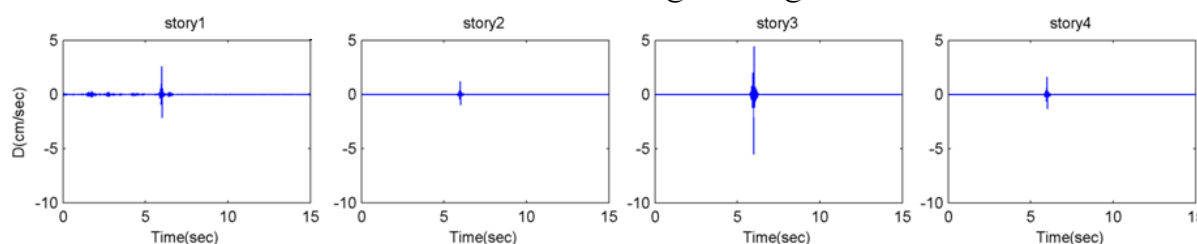
پس از اجرای سناریوها، سیگنال‌ها با کمک تبدیل موجک پردازش شده، ضرایب D مربوطه استخراج می‌شود. در این بخش، سه نوع موجک پایه‌ی Daubechies wavelet، Biorthogonal Spline و Coiflet wavelet استفاده می‌شود. گرچه در برخی از کاربردهای تبدیل موجک (مانند تولید ارتعاشات مصنوعی)، تشابه ظاهری سیگنال تحت پردازش با موجک پایه، به عنوان معیار قابل قبولی برای انتخاب موجک پایه مناسب مطرح است؛ اما در بحث آنالیز پاسخ‌ها برای شناسایی تغییرات ناگهانی، قاعده‌ی خاصی در انتخاب موجک‌های پایه وجود ندارد. بر این اساس، سه موجک پایه‌ی معرفی شده، به عنوان نماینده‌ای از مناسب‌ترین و پرکاربردترین موجک‌ها، مطالعه و ارزیابی می‌شود. در این مقاله، تجزیه‌ی پاسخ‌ها تا سطح یک ادامه می‌یابد. پس موجک‌های پایه‌ی استفاده شده، عبارتند از: db20، bior5.5، coif4 و biorth5.5. بدیهی است که مقدار(های) ماکزیمم موجود در بین ضرایب D، معیوب بودن سازه را نشان خواهد داد. همچنین، لحظه‌ای که این مقدار(ها) مشاهده می‌شود، متناظر با زمان رخداد آسیب خواهد بود. در ادامه، به بررسی نتایج به دست آمده از سناریوهای مطالعه شده، می‌پردازیم.

به عنوان نمونه، در سناریوی اول، سازه در ثانیه‌ی ششم از زلزله‌ی نورتریج، دچار ۲۵٪ آسیب در طبقه‌ی سوم شده است پس، سختی طبقه‌ی سوم سازه، از ثانیه‌ی ششم تا پانزدهم، معادل با ۷۵٪ مقدار اولیه است. در مدل‌سازی عددی، این آسیب به صورت کاهش یکنواخت سختی طبقه‌ی سوم، در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از این سناریو، در حالت استفاده از پاسخ تاریخی‌چهی زمانی جابه‌جایی، برای موجک‌های

شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در این حالات هم مانند بحثی که در مورد سناریوی اول صورت گرفت، ضرایب موجک قادرند تا آسیب را با دقت قابل قبولی تشخیص دهند. همچنین مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از دیدگاه نوع پاسخ استفاده شده برای انجام آنالیز، حاکی از آن- است که با وجود موفق بودن هر دو پاسخ استفاده شده (جابه‌جایی و سرعت)، پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی جابه‌جایی، وجود آسیب را واضح‌تر نشان می‌دهد. این نکته، از بررسی ضرایب موجک گزارش شده‌ی متناظر با طبقه‌ی اول در شکل (۳-ب)، قابل نتیجه‌گیری است.

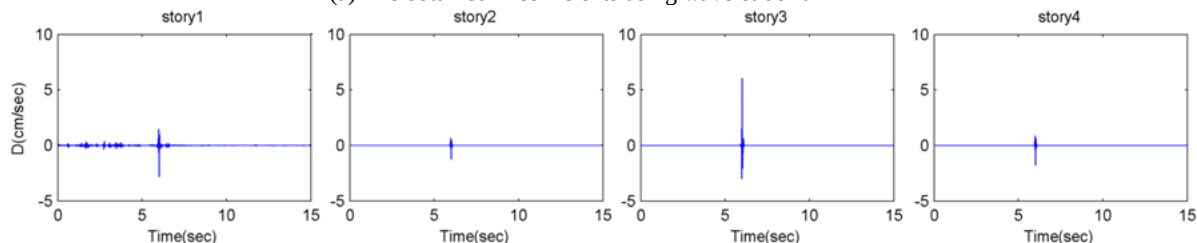
ندارد. علت این امر، با توجه به ماهیت روش استفاده شده برای مدل‌سازی آسیب قابل توجه است. با رخداد آسیب به صورت کاهش یکنواخت سختی (رابطه‌ی ۲) در یک لحظه‌ی خاص، گرچه نماد آشکاری در ظاهر پاسخ حوزه‌ی زمانی سازه ایجاد نمی‌شود، اما تغییرات قابل توجهی در بعد فرکانسی پاسخ‌ها بوجود می‌آید که لحظه‌ی رخداد این تغییرات، با تجزیه‌ی پاسخ‌ها به کمک هر سه موجک پایه‌ای مطرح شده، قابل استخراج است. بر این اساس و برای اختصار، در سایر مطالعات، از موجک پایه‌ای db20 استفاده می‌شود. نتایج به دست آمده از بررسی سناریوهای دوم و سوم، با آنالیز پاسخ- های تاریخیچه‌ی زمانی جابه‌جایی و سرعت، به ترتیب در

شکل (۲) نتایج پردازش پاسخ‌های سرعت قاب برشی چهار طبقه در سناریوی آسیب اول



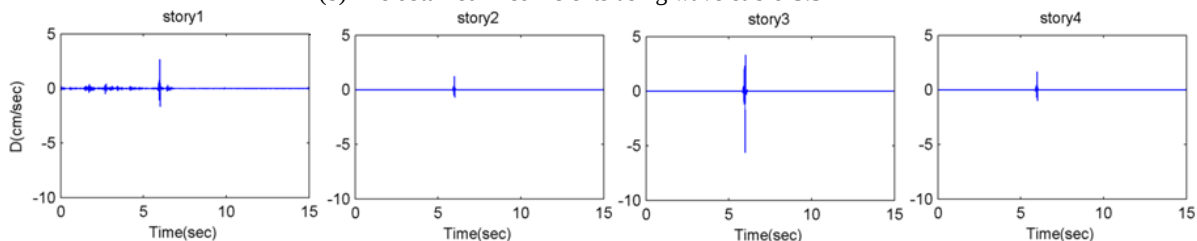
(الف) ضرایب D به دست آمده از موجک پایه‌ی db20

(a) The obtained D coefficients using wavelet db20



(ب) ضرایب D به دست آمده از موجک پایه‌ی bior5.5

(b) The obtained D coefficients using wavelet bior5.5

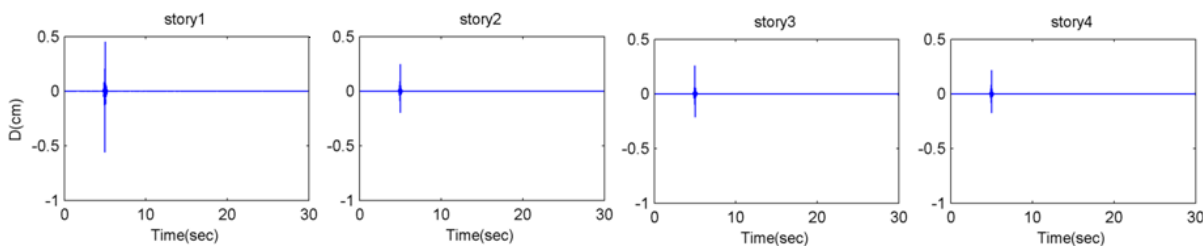


(ج) ضرایب D مربوط به انجام آنالیز موجک با استفاده از موجک پایه‌ی coif4

(c) The obtained D coefficients using wavelet coif4

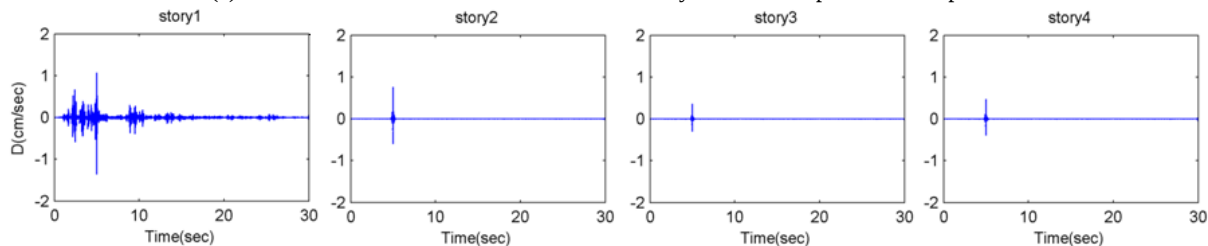
Fig. 2. Results of processing velocity responses of the four-story shear frame for the first damage scenario

شکل (۳) نتایج به دست آمده از پردازش پاسخ‌های تاریخی زمانی قاب برشی چهار طبقه در سناریوی آسیب دوم، با موجک پایه‌ی db20



(الف) ضرایب D به دست آمده از آنالیز موجک روی پاسخ جابه‌جایی

(a) The obtained D coefficients from wavelet analysis on the displacement response

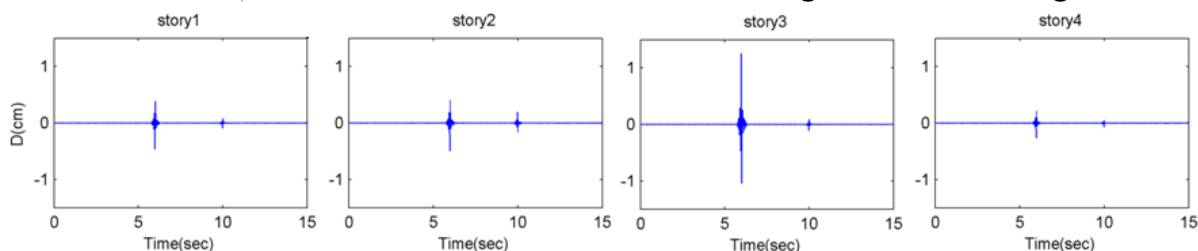


(ب) ضرایب D به دست آمده از آنالیز موجک روی پاسخ سرعت

(b) The obtained D coefficients from wavelet analysis on the velocity response

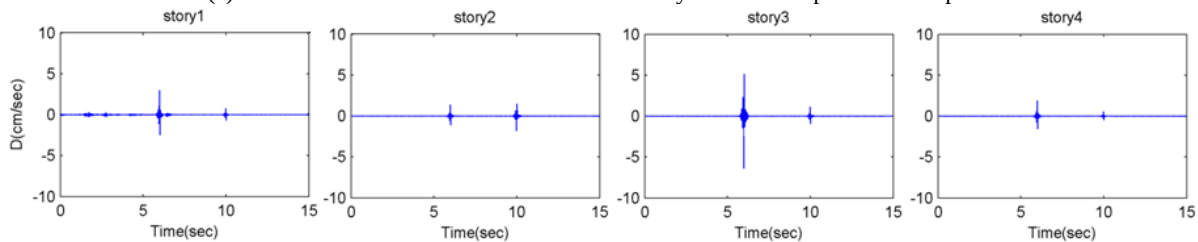
Fig. 3. The obtained results from processing the time history responses of the four-story shear frame for the second damage scenario, using wavelet db20

شکل (۴) نتایج به دست آمده از پردازش پاسخ‌های تاریخی زمانی قاب برشی چهار طبقه در سناریوی آسیب سوم، با موجک پایه‌ی db20



(الف) ضرایب D به دست آمده از آنالیز موجک بر روی پاسخ جابه‌جایی

(a) The obtained D coefficients from wavelet analysis on the displacement response



(ب) ضرایب D به دست آمده از آنالیز موجک روی پاسخ سرعت

(b) The obtained D coefficients from wavelet analysis on the velocity response

Fig. 4. The obtained results from processing the time history responses of the four-story shear frame for the third damage scenario, using wavelet db20

های رخ داده در یک تیر ساده‌ی بتنی می‌پردازیم. مانند نمونه‌ی قبل، مدل آسیبی که در اینجا ارزیابی می‌شود، به صورت کاهش یکنواخت سختی در المان آسیب‌دیده، است. مدل اجزای محدود تیر مطالعه شده، در شکل (۵) نشان داده شده است. این

۴-۲- تیر ساده‌ی بتنی

در نمونه‌ی قبل، به بررسی کارایی تبدیل موجک در تعیین معیوب بودن قاب برشی، توالی زمانی و محل رخداد آسیب در اثر وقوع زلزله پرداخته شد. در این نمونه، به تشخیص آسیب-

المان، بیشتر از میانگین ضرایب ماکزیمم متناظر با تمام درجات آزادی نامقید سازه (در همان لحظه) باشد، المان گفته شده آسیب دیده است.

قاعده‌ی (۲): در المان‌هایی که دارای درجه آزادی انتقالی مقید است (مانند المان‌های ختم‌شونده به تکیه‌گاه‌ها)، چنانچه ماکزیمم مقدار ضریب D متناظر با درجه آزادی نامقید، بیشتر از میانگین ضرایب ماکزیمم متناظر با تمام درجات آزادی نامقید سازه (در همان لحظه) باشد، المان گفته شده آسیب دیده است.

در واقع، قواعد بالا را می‌توان تعمیم روش استفاده شده در نمونه اول، برای تشخیص آسیب با کمک اطلاعات ثبت شده‌ی محدود، برای سازه‌های پیچیده‌تر دانست. نتایج به دست آمده از بررسی سناریوهای این نمونه، در شکل‌های (۶ و ۷)، نشان داده شده است. نظر به اینکه در هر گره فقط پاسخ جابه‌جایی انتقالی لحاظ شده است، پس، ضرایب D مانند هر درجه‌ی آزادی غیر مقید، با شماره‌ی همان درجه‌آزادی نشان داده شده است. هم-چنین، مقدار میانگین ماکزیمم ضرایب موجک در لحظه‌ی مربوطه، با خط چین مشخص شده است. در شکل (۶) ملاحظه می‌شود که ضریب جزییات در ثانیه‌ی پنجم دارای تغییرات ناگهانی است. پس، سازه در این لحظه دچار آسیب شده است. از طرفی، طبق قاعده‌ی (۱)، می‌توان تشخیص داد که ضریب موجک متناظر با ثانیه‌ی پنجم، در گره‌های چهارم و پنجم، دارای بیشینه مقداری بزرگتر از میانگین ماکزیمم ضرایب است. بنابراین المان بین این دو گره (یعنی المان چهارم) آسیب دیده است.

هم‌چنین، بر اساس شکل (۷)، سازه در سناریوی دوم، دو آسیب را تجربه کرده است که آسیب متناظر با ثانیه‌ی دهم، طبق قاعده‌ی (۱)، در المان چهارم و آسیب رخ داده در ثانیه‌ی بیست و چهارم، بر اساس قاعده‌ی (۲)، در المان دهم، حادث شده است.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش یاد شده قادر است تا معیوب بودن کل سازه، زمان رخداد و موقعیت آسیب را در سازه‌های پیچیده و با نصب تعداد محدود و مناسبی از حسگرها، بدون نیاز به اطلاعات سازه‌ی اولیه و با دقت قابل

تیر، دارای ۱۰ المان و ۱۱ گره، و هر گره‌ی آن دارای دو درجه-ی آزادی انتقالی و دورانی است. پس در کل، دارای ۲۰ درجه‌ی آزادی است. مشخصات این تیر، عبارتست از: مدول الاستیسیته $E = 25 \text{ GPa}$ ، چگالی $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ ، سطح مقطع $A = 0.3 \text{ m}^2$ ، ممان اینرسی $I = 0.01228 \text{ m}^4$ و میرایی معادل ۰.۵٪.

در این نمونه، دو سناریوی آسیب زیر بررسی می‌شود:

- **سناریوی ۱:** ۲۰٪ کاهش سختی در المان چهارم، در ثانیه‌ی پنجم از زلزله‌ی نورتریج؛

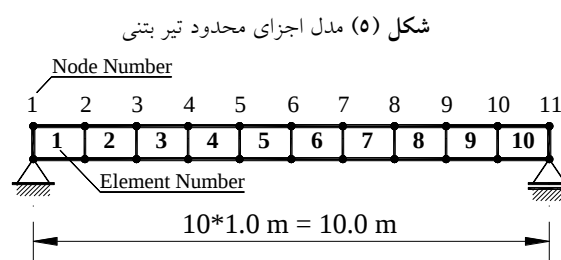


Fig. 5. Finite element model of the concrete beam

- **سناریوی دوم:** ۳۰٪ کاهش سختی در المان چهارم، در ثانیه‌ی دهم و ۱۵٪ کاهش سختی در المان دهم در ثانیه‌ی بیست و چهارم از زلزله‌ی ال-سنترو.

در این نمونه، فرض می‌شود که فقط در امتداد درجات آزادی قائم غیر مقید (یعنی در امتداد درجات آزادی قائم گره‌های ۲ تا ۱۰) حسگرهای ثبت پاسخ سازه، تعبیه شده است. هم‌چنین، از پاسخ تاریخیچه‌زمانی جابه‌جایی و موجک db20 استفاده شده است.

تعیین آسیب دیدگی کل سازه و تشخیص زمان رخداد آسیب، مانند نمونه قبل است. این در حالی است که روند تشخیص محل دقیق آسیب، به‌خاطر اینکه هر المان به وسیله‌ی اطلاعات مربوط به دو درجه‌ی آزادی قائم متناظر با گره‌های سمت چپ و راست خود ارزیابی می‌شود، اندکی متفاوت است. به‌بیان دیگر، روند تشخیص محل دقیق آسیب، بر اساس قواعد زیر انجام می‌پذیرد:

قاعده‌ی (۱): در المان‌هایی که دارای درجه آزادی انتقالی مقید نیستند (مانند المان‌های میانی تیر)، چنانچه ماکزیمم مقدار ضریب D مربوط به هر دو درجه آزادی موجود در دو سر

قبول، تعیین نماید.

کاهش سختی متناظر با ارتعاشات جهت منفی x (یعنی $k^d(x^-)$ ،

یکسان نیست و بین آن‌ها، رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$k^d(x^+) = k_1^d + k_2^d \quad (12)$$

$$k^d(x^-) = k_1^d$$

به بیان دیگر، داریم:

$$k^d(x^+) = k^d(x^-) + k_2^d \quad (13)$$

که در آن:

$$(k_1^d), (k_2^d), (k_1^d + k_2^d) < k^u \quad (14)$$

این مدل رفتاری، نه تنها شرایط واقعی تری را نسبت به مدل آسیب یکنواخت ارائه می‌کند، بلکه باعث می‌شود تا در مدل-سازی پاسخ‌های ثبت شده از سنسور، تأثیر محتوای شتاب‌نگاشت ورودی روی رفتار سازه، در نظر گرفته شود. بنابراین، با در نظر گرفتن مدل رفتاری دوخطی فوق، می‌توان تصور واقعی تری را از رفتار سازه تحت ارتعاشات ورودی، ارائه کرد.

۳-۴- سازه‌ی یک‌درجه آزادی با مدل رفتاری سختی دو خطی

برای حالت آسیب‌دیده

در نمونه‌های قبلی، آسیب مدل‌سازی شده به صورت کاهش یکنواخت سختی در نظر گرفته شد رابطه‌ی (۲). در این نمونه، به منظور مدل‌سازی آسیب‌هایی با سازوکار پیچیده‌تر، خرابی را به صورت مدل رفتاری معادل با سختی دوخطی، تعریف می‌کنیم. این مدل را می‌توان ساختاری کاملاً ساده شده از رفتار متناظر با باز و بسته شدن ترک در نظر گرفت. جزئیات این مدل برای سیستم یک‌درجه آزادی، در شکل (۸) نشان داده شده است.

همان‌گونه که از این شکل مشخص است، سختی سازه‌ی سالم برابر با k^u است پس سازه‌ی سالم در ارتعاشات مثبت و منفی، دارای رفتار یکسانی از نظر میزان سختی مؤثر، است. با رخداد آسیب، سختی کلی سازه، کاهش پیدا می‌کند، اما، میزان کاهش سختی در ارتعاشات جهت مثبت x (یعنی $k^d(x^+)$ ، با میزان

شکل (۶) نتایج به دست آمده از پردازش پاسخ‌های تاریخی‌چیزی زمانی جابه‌جایی تیر بتنی برای سناریوی آسیب اول

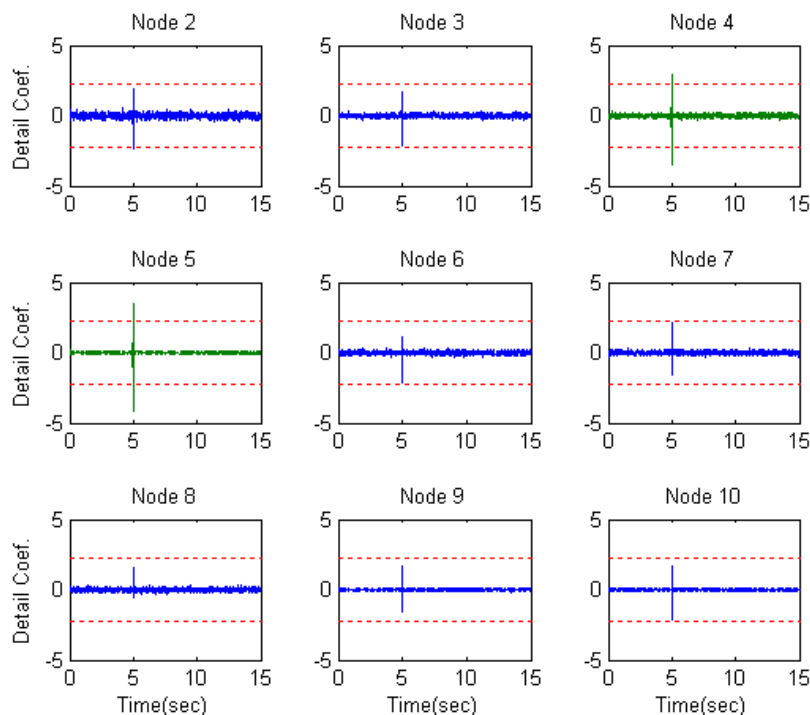


Fig. 6. The obtained results from processing the displacement time history responses of the concrete beam for the first damage scenario

شکل (۷) نتایج به دست آمده از پردازش پاسخ‌های تاریخی زمانی جابه‌جایی تیر بتنی برای سناریوی آسیب دوم

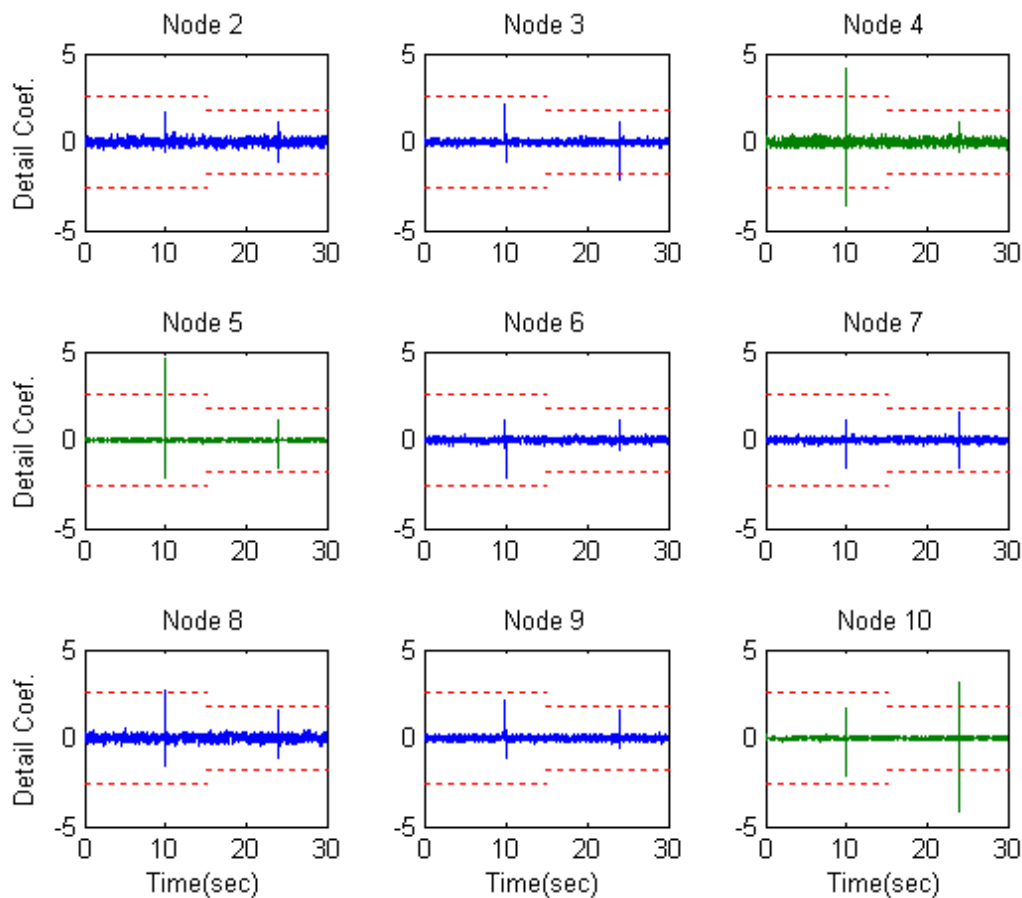


Fig. 7. The obtained results from processing the displacement time history responses of the concrete beam for the second damage scenario

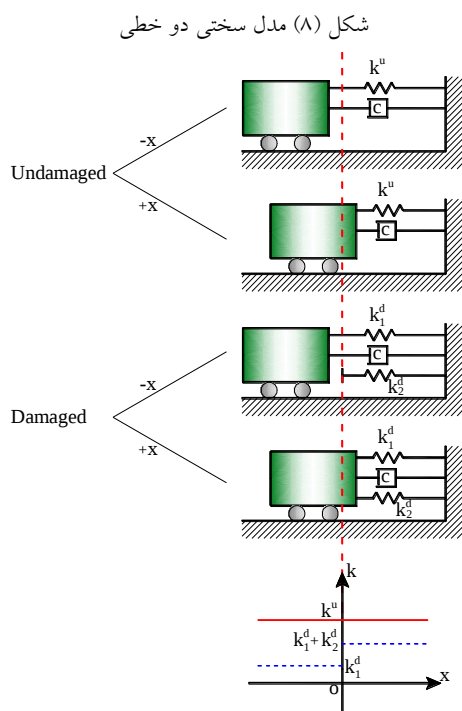


Fig. 8. Bilinear stiffness model

در نمونه‌ای که در این بخش مطالعه می‌شود، از مدل رفتاری دوخطی بالا برای مدل‌سازی آسیب استفاده می‌شود. مشخصات سازه‌ای سیستم یک‌درجه آزادی مطالعه شده، شامل جرمی معادل با ۱۰ تن و میرایی ۰.۵٪ است. همچنین، سختی اولیه برابر است با: $k^u = 100000 \text{ N/m}$. دو سناریوی آسیبی تحت اثر زلزله-ی نورتریج، بصورت زیر تعریف می‌شود:

- **سناریوی (۱):** رخداد آسیب در ثانیه‌ی دهم با مشخصات زیر:

$$(k_1^d)_a = 40000 \text{ N/m}; (k_2^d)_a = 40000 \text{ N/m}$$

- **سناریوی (۲):** رخداد سناریوی (۱)، و توالی آن با رخداد آسیبی دیگر در ثانیه‌ی سیزدهم با مشخصات زیر:

$$(k_1^d)_b = 25000 \text{ N/m};$$

$$(k_2^d)_b = 25000 \text{ N/m}$$

(۱۰). گفتنی است که چگالی طیف توان^۱ این شتابنگاشت برای فرکانس‌های صفر تا ۱۲۰ هرتز، مقداری ثابت و برابر با $6.31 \times 10^{-4} \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ است.

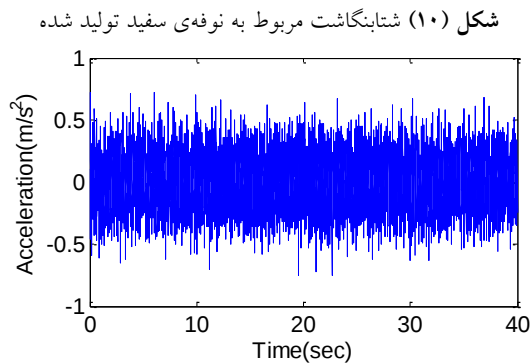


Fig. 10. Accelerogram of the generated White Noise signal

شکل (۱۱) نتایج بدست آمده از پردازش پاسخ‌های تاریخی زمانی جابجایی برای سناریوی (۲) در نوسان‌گر یک‌درجه آزادی با مدل‌سازی آسیب تحت شتابنگاشت‌های زلزله‌ی ال-سنترو و نوفه‌ی سفید

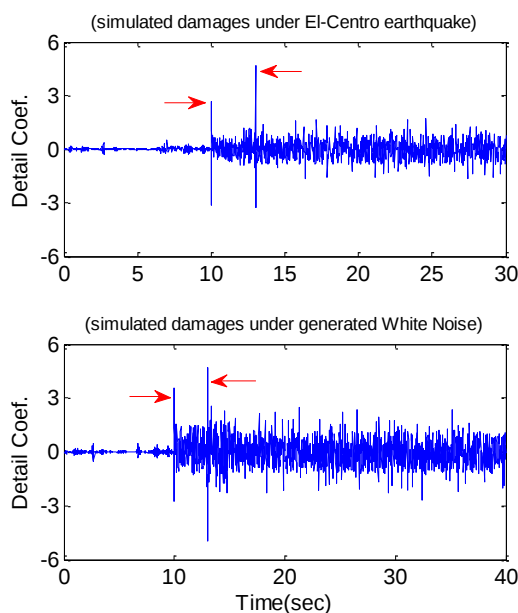


Fig. 11. The obtained results from processing the displacement time history responses for the second damage pattern of the single DOF scillator by modeling damage under acelerograms of the El-Centro earthquake and White Noise signal

در شکل (۱۱)، نتایج حاصل از شناسایی آسیب برای سناریوی (۲) با در نظر گرفتن شتابنگاشت‌های (الف و ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که واضح است، با وجود ماهیت متفاوت

برای تشخیص آسیب، از پاسخ تاریخی‌چهی زمانی جابه‌جایی سازه استفاده شده است. هم‌چنین، آنالیز سیگنال، با موجک پایه‌ی db20 صورت پذیرفته است. شکل (۹) نشان‌دهنده‌ی نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی روش برای شناسایی آسیب است. ملاحظه می‌شود که در هر دو سناریو، روش پیشنهادی توانسته است زمان رخداد آسیب را با دقت بالایی تشخیص دهد. هم‌چنین، از بررسی شکل، می‌توان تغییر رفتار نوسان‌گر را بعد از شروع رفتار دوخطی، از روی نوسانات ضرایب D تشخیص داد.

شکل (۹) نتایج به دست آمده از پاسخ‌های تاریخی‌چهی زمانی جابه‌جایی برای سناریوهای (۱ و ۲) در نوسان‌گر یک‌درجه آزادی

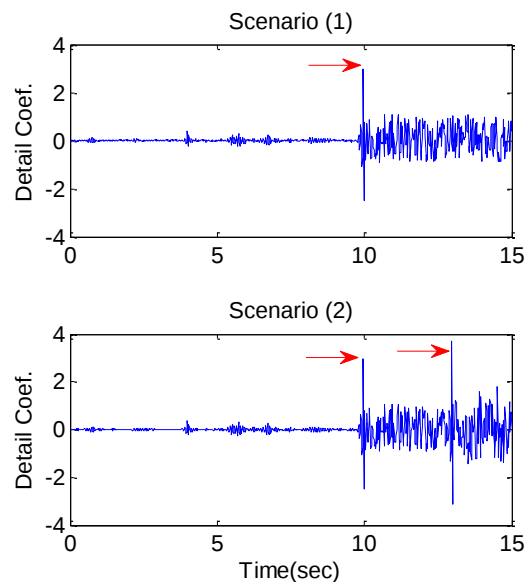


Fig. 9. The obtained results from processing the displacement time history responses of the single DOF scillator

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، با اعمال مدل آسیب دوخطی مطرح شده، محتوای شتابنگاشت زلزله روی رفتار سازه و سطح پاسخ آن، تأثیر می‌گذارد. پس، به‌منظور بررسی کارایی مدل آسیب دوخطی، تحت شتاب‌های ورودی مختلف، سناریوی (۲) مطرح شده، با دو شتابنگاشت دیگر، بررسی می‌شود. این شتابنگاشت‌ها عبارتند از: (الف) شتابنگاشت متناظر با زلزله‌ی ال-سنترو، (ب) شتابنگاشتی از نوع نوفه‌ی سفید با دوام ۴۰ ثانیه شکل

۴- به منظور بررسی کارایی روش یاد شده در شناسایی آسیب‌های پیچیده‌تر، مدل رفتاری سختی دوخطی برای سازه‌ی آسیب دیده، تعریف و بر اساس نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش، ملاحظه شد که در این حالت نیز می‌توان توالی زمانی رخداد آسیب را با دقت بالایی تعیین کرد.

بر این اساس، نتیجه گرفته می‌شود که با استفاده از تبدیل موجک گسسته و بررسی ضرایب جزئیات متناظر با آن، می‌توان وجود، زمان و محل رخداد آسیب‌های بوجود آمده در سازه‌های مهندسی (تحت اثر زلزله) را با دقت قابل قبولی تعیین کرد.

References

۶- مراجع

- [1] Doebling S. W., Farrar C. L. & Prime M. B. 1998 Summery review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, **30**, 91-105.
- [2] Chou J. H. & Ghaboussi J. 2001 Genetic algorithm in stuctural damage detection. *Computers and Structures*, **79**(14), 1335-1353.
- [3] Perera R., Fang S. E. & Huerta C. 2009 Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**(3), 752-768.
- [4] Yang Q. W. & Liu J. K. 2009 Damage identification by the eigenparameter decomposition of structural flexibility change. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **78**(4), 444-459.
- [5] Ghodrati Amiri G., Seyed Razzaghi S. A. & Bagheri A. 2011 Damage detection in plates based on pattern search and genetic algorithms. *Smart Structures and Systems*, **7**(2), 117-132.
- [6] Saada M. M., Arafa M. H. & Nassef A. O. 2013 Finite element model updating approach to damage identification in beams using particle swarm optimization. *Engineering Optimization*, **45**(6), 677-696.
- [7] Tabrizian Z., Ghodrati Amiri G. & Hosseinzali Beigy M. 2014 Charged system search algorithm utilized for structural damage detection. *Shock and Vibration*, **2014**: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2014/194753/>.
- [8] Garstecki A., Knitter-Piatkowska A., Pozorski Z. & Ziopaja K. 2004 Damage detection using parameter dependent dynamic experiments and wavelet transformation. *Journal of Civil Engineering and Management*, **10**(3), 191-197.
- [9] Hera A. & Hou Z. 2004 Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring Benchmark Studies. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **130**(1), 96-104.
- [10] Loutridis S., Douka E. & Trochidis A. 2004 Crack identification in double-cracked beams using wavelet

شتاب‌نگاشت‌های ورودی، روش توانسته است رخداد آسیب دوگانه (با مدل رفتاری دوخطی) را با دقت قابل قبولی شناسایی کند. لازم به گفتن است که در حالت استفاده از ورودی نوفه‌ی سفید، نوسانات مبین رفتار دوخطی، با شدت بیشتری نمایان شده است که این امر بخاطر ماهیت شتاب ورودی توجیه‌پذیر است. با این وجود، با بررسی تغییرات ضرایب موجک، می‌توان رخداد آسیب‌های اصلی را به درستی تشخیص داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای شناسایی آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها تحت اثر زلزله، از تبدیل موجک استفاده شد. تغییرات ناگهانی در ضرایب جزئیات موجک گسسته، به عنوان مشخصه‌ی اصلی نمایان‌کننده‌ی آسیب در نظر گرفته شد. به منظور بررسی کارایی این روش، سناریوهای آسیمی متعددی روی سه مثال عددی مختلف، مطالعه شد. هم‌چنین مطالعاتی پیرامون چالش‌هایی مانند کارایی روش در حالت نصب تعداد محدودی از حسگرها و قابلیت آن در شناسایی آسیب‌هایی با سازوکار پیچیده‌تر، صورت پذیرفت. ملاحظه شد که با واریسی ضرایب جزئیات موجک، می‌توان اطلاعات کاملی پیرامون سلامت کل سازه، زمان رخداد آسیب و محل آن، به دست آورد. برخی از مهم‌ترین مزایا و نتایج به دست آمده، به شرح زیر است:

۱- در پیاده‌سازی این روش به اطلاعات سازه‌ی اولیه نیازی نیست؛

۲- آسیب‌دیدگی کل سازه و زمان رخداد آسیب را می‌توان با بررسی ضرایب D متناظر با پاسخ تاریخی‌چهی زمانی یکی از درجات آزادی سازه، تعیین نمود. به علاوه، با نصب تعداد محدود و کافی از حسگرها، با در نظر داشتن دو قاعده‌ی اصلی ارائه شده در بخش (۴-۲)، می‌توان محل آسیب را هم با دقت قابل قبولی تعیین کرد. اساس این قواعد، بر پایه‌ی شناسایی و مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی ضرایب D استوار است؛

۳- ملاحظه شد که پاسخ تاریخی‌چهی زمانی جابه‌جایی قوت و پایداری بیشتری را در شناسایی آسیب‌ها از خود نشان می‌دهد؛

- [16] Bagheri A. & Kourehli S. S. 2013 Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis. *Asian Journal of civil engineering (BHRC)*, **14**(2), 289-304.
- [17] Ghodrati Amiri G., Jalalinia M., Zare Hosseinzadeh A. & Nasrollahi A. 2015 Multiple crack identification in Euler beams by means of B-spline wavelet. *Archive of Applied Mechanics*, **85**(4), 503-515.
- [18] Benedetto J. J. & Frazier M. W. 1994 *WAVELETS: mathematics and application*. CRC Press, Boca Raton.
- [19] Mertins A. 1999 *Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications*. Wiley, New Jersey.
- [20] Li H., Deng X. & Dai H. 2007 Structural damage detection using the combination method of EMD and wavelet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(1), 289-306.
- [21] Park S. K., Park H. W., Shin S. & Lee H. S. 2008 Detection of abrupt structural damage induced by an earthquake using a moving time window technique. *Computers and Structures*, **86**(11-12), 1253-1265.
- analysis. *Journal of Sound and Vibration*, **277**(4-5), 1025-1039.
- [11] Ziopaja K., Pozorski Z. & Garstecki A. 2011 Damage detection using thermal experiments and wavelet transformation. *Inverse Problems in Science and Engineering*, **19**(1), 127-153.
- [12] Newland D. E. 1993 *An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*. Longman, New York.
- [13] Melhem H. & Kim H. 2003 Damage detection in concrete by Fourier and Wavelet analysis. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, **129**(5), 571-577.
- [14] Ovanesova A. V. & Sua' rez L. E. 2004 Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, **26**(1), 39-49.
- [15] Ghodrati Amiri G., Bagheri A., Seyed Razzaghi S. A. & Asadi A. 2010 Structural damage detection in plates using wavelet transform. In: *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, N. Ghafoori (ed.), CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 415-419.

Processing of Structural Responses via Wavelet Transform for Detecting Damages under Earthquake Excitation

A. Amoozadeh¹, M. Fadavi Amiri^{2*}, A. Zare Hosseinzadeh³, and G. Ghodrati Amiri⁴

1- M.Sc., Earthquake Engineering, Aryan Institute of Science & Technology, Babol

2- Faculty member, Shomal University, Amol

3- M.Sc., Earthquake Engineering, Iran University of science & Technology, Tehran

4- Prof., Center of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran

fadavi@shomal.ac.ir

Abstract:

Structural damage identification can be considered as the main step in Structural Health Monitoring (SHM). There are many different methods which use structural dynamic responses for damage prognosis. Although some of them are concentrated on solving an inverse problem for damage identification, others suggest a direct procedure for defect detection. Despite the good performance of these methods in damage identification, researchers are attempting to find efficient and simple methods for damage identification with high level of accuracy. This paper presents a reference-free method for structural damage identification under earthquake excitation. Damages are defined by some changes in the special instants during an earthquake occurrence, and structural time history responses are used as an input signal for discrete wavelet analysis. Finally the “detail coefficients” are inspected for determination of the damage characteristics including the appearance, the time sequence, and the location of damage(s). Although the peak values in the detail coefficients can show the existence and time sequence of damage, these peak values must be inspected for determining the damage location and finding the maximum value. As a result, the element associated with a signal which has the maximum peak value, can be considered as the damaged element. Applicability of the presented method is demonstrated by studying three numerical examples. The first is devoted to damage identification in a four-story shear frame. It is assumed that all of the stories are equipped by sensors for recording structural responses. Three different damage scenarios with single and multiple damage cases are studied under two samples of earthquake records, namely El-Centro (1940), and Northridge (1994) earthquakes. In addition, the effects of using different wavelet mother functions and different input signals, such as displacement and velocity responses, are investigated in this research. Obtained results emphasize on the applicability of the presented method in damage identification. In the second example, a simple concrete beam is considered with ten elements for simulating two different damage scenarios. In this case, applicability of the method is inspected by considering only the transitional degrees of freedom (DOF) as the equipped DOFs by sensors. This can be interpreted as using limited number of sensors. In addition, the displacement time histories are used for damage identification. In order to reach a clear strategy in damage localization, two rules are proposed for judging about elements’ health. The rules are based on seeking maximum values of the wavelet coefficients in the damaged instants. Obtained results show the reliable performance of the presented method in finding time sequence of damage occurrence and damage location. In the third example, applicability of the presented method is investigated in the presence of complex damage models by defining bilinear stiffness reduction. Although the damage can cause some reduction in the effective stiffness of damaged structures of this case, the reduction is different in positive and negative displacements. Two different damage scenarios are simulated on a single DOF structure under different excitations, namely earthquake excitations and generated White Noise excitation. Obtained results reveal the robustness of the presented method in damage prognosis in the presence of complex damage models.

Keywords: Structural health monitoring, damage detection, time history response, wavelet transform, bilinear stiffness model.