

روش جدید تشخیص آسیب بر مبنای تبدیل موجک در قاب‌های خمشی ساختمانی

فردین رئوفی (دانشجوی دکتری)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

امید بهار* (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوری ۲-۴۹، شماره ۳، ص. ۱۲۷-۱۳۶، (پادداشت نوی)

در این نوشتار، روشی جدید بر مبنای پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل موجک برای تعیین زمان و موقعیت وقوع آسیب، در قاب‌های خمشی ارائه شده است. اغلب روش‌های قبلی تعیین زمان و مکان آسیب براساس اندازه‌گیری تغییرات مشخصات ارتعاشی سیستم نظیر بسامد و مدهای نوسان با استفاده از تبدیلات فوریه، فوریه‌ی زمان کوتاه، و موجک بوده است. بنابراین، به مشخصات سازه‌ی قبل از آسیب هم نیاز است. در روش پیشنهادی، مستقیماً از پاسخ دورانی گره‌های قاب یعنی دوران، سرعت زاویه‌ای، و شتاب زاویه‌ای برای استخراج اطلاعات مربوط به آسیب استفاده شده است. این توابع حاوی اطلاعات بیشتری نسبت به دیگر پاسخ‌ها هستند، به‌طوری‌که می‌توان تحلیل آسیب را براساس اولین سطح تجزیه‌ی موجک انجام داد.

واژگان کلیدی: تشخیص آسیب، تبدیل موجک، پردازش سیگنال، قاب خمشی.

۱. مقدمه

قاب‌های خمشی یکی از سیستم‌های مقاومی هستند که امروزه به‌صورت گسترده در سازه‌های ساختمانی به‌کار می‌روند. مقاومت قاب در مقابل بارهای جانبی مانند زلزله و باد در اثر مقاومت خمشی تیرها و ستون‌ها تأمین می‌شود. قاب‌ها مانند دیگر سیستم‌های مقاوم، در هنگام زلزله در معرض آسیب‌های سازه‌ای قرار می‌گیرند. یکی از روش‌های مطمئن برای تشخیص آسیب، مطالعه و بررسی پاسخ است. تحلیل موردی براساس تحلیل موجک پاسخ‌های لرزه‌ای بر روی یک ساختمان ۶ طبقه‌ی بتنی واقع در کالیفرنیا، جنوبی انجام شده است.^[۱] از تحلیل موجک همچنین برای تعیین موقعیت ترک در اجزای تیر و قاب تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی استفاده شده است. ایده‌ی اصلی، ایجاد ناپیوستگی ناشی از ترک در پاسخ بوده است.^[۲] در این روش مستقیماً پاسخ در محل آسیب ثبت می‌شود که کارایی روش را محدود می‌کند. در گذشته از این شیوه برای تشخیص ترک در چرخ‌دنده‌ها (جعبه دنده) در مهندسی مکانیک استفاده می‌شده است. در مورد آسیب‌های سازه‌ای اولین تلاش‌ها در رابطه با ارزیابی ترک در تیرها بوده است. از چرخش در مفصل‌های خمیری تشکیل‌شده در تیر و ستون یک قاب می‌توان به‌منزله‌ی معیاری برای شروع آسیب در عضو سازه‌ای استفاده کرد. برای این کار باید منحنی لنگر انحنای عضو تحلیل شود. با استفاده از این منحنی، ظرفیت چرخش خمیری مقطع قابل محاسبه است. اندیس آسیب براساس همین ایده‌ی ارائه‌شده و حاوی مقادیر کمی برای برآورد خسارت سازه و عضو است. این اندیس براساس بیشینه‌ی دوران مفصل خمیری محاسبه می‌شود.^[۳] همچنین معیارهای رفتار غیرخطی اعضا براساس ضوابط اداره‌ی

* نویسنده مسئول

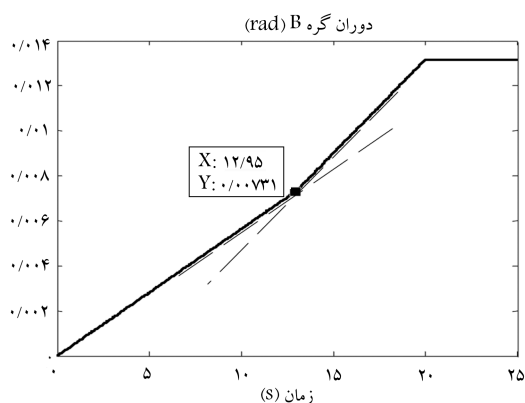
تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۷/۱۷، پذیرش ۱۳۹۱/۳/۲.

f.raufi@srbiau.ac.ir
omidbahar@iiees.ac.ir

فدرال مدیریت بحران امریکا (FEMA ۳۵۶)^[۴] می‌تواند مبنایی برای محاسبه‌ی سطح آسیب باشد.^[۵] ضریب آسیب بر مبنای رفتار خمیری اعضا به‌خاطر مفهوم فیزیکی قابل درک و همچنین سادگی روابط مربوط مورد توجه قرار گرفته است.^[۶] بنابراین در هر قسمت از سازه که رفتار از حالت کشسانی به رفتار غیرارتجاعی تغییر یابد، می‌توان گفت که آن مقطع در معرض شروع آسیب است.^[۷] در این تحقیق از طریق تحلیل موجک، میزان آسیب در قاب‌های مقاوم خمشی که تحت اثر زلزله قرار گرفته‌اند، بررسی شده است. تحلیل موجک بر روی پاسخ گره‌های قاب به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخی‌ی زمانی غیرخطی انجام شده است. همان‌طور که خواهیم دید، پاسخ‌های دورانی گره‌های قاب حاوی اطلاعات بیشتری نسبت به پاسخ‌های مربوط به طبقات (افقی) در رابطه با مشخصات آسیب هستند. توانایی تبدیل موجک در کشف اطلاعات موضعی در قالب چند مثال ارائه شده است. در روش ارائه‌شده فقط با داشتن پاسخ‌های گره‌ای و بدون نیاز به مشخصات هندسی و مکانیکی سازه قبل و بعد از آسیب، می‌توان برآورد دقیقی از زمان و مکان آسیب به‌دست آورد.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق به تاریخی‌ی زمانی پاسخ سازه‌های قابی با توجه به ارتباط چرخش مفصل خمیری و توسعه‌ی آسیب در اعضا توجه شده است. هدف این نوشتار، نشان‌دادن پاسخ‌های ثبت‌شده در یک ساختمان تحت اثر زلزله است که می‌تواند حاوی اطلاعاتی در مورد تشکیل مفصل‌های خمیری باشند و از توانایی تبدیل موجک در کشف این اطلاعات استفاده شده است.



شکل ۳. پاسخ دورانی گره B در حالت تشکیل مفصل خمیری در یک عضو متصل به گره (شیب تابع پاسخ ثابت نیست).

پاسخ دورانی، تابع مناسبی برای بررسی آسیب در قاب‌های خمشی باشد. بنابراین دامنه‌ی تحقیق گسترش داده می‌شود و در ادامه‌ی کار، هدف انجام تحلیل‌هایی برای بارهای نوسانی است و در حالت کلی بارگذاری -- مانند اثر شتاب‌نگاشت یک زلزله -- اتفاقی خواهد بود.

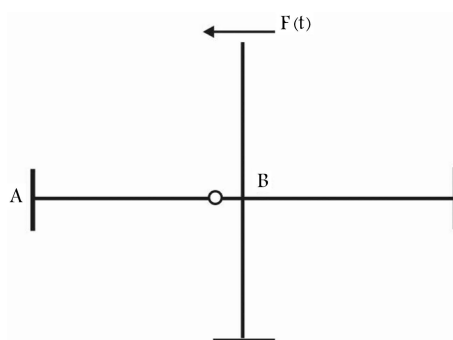
با این هدف تحلیل بر روی چندین قاب خمشی و تحت اثر چندین بارگذاری لرزه‌یی تکرار می‌شود. گرچه در ابتدا و با یک نگاه کلی به تابع پاسخ، اطلاعات به وضوح دو حالت قبلی مشاهده نمی‌شود، ولی با کمک‌گرفتن از تبدیل موجک و تغییر فضای مشاهده‌ی تغییرات در سطوح تجزیه، پاسخ به‌وضوح پدیدار می‌شود. همه‌ی این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تابع پیشنهادی همانند حالت استاتیکی و بارگذاری غیرایستا قابلیت بسیار مناسبی برای تشخیص آسیب در قاب‌های خمشی دارد و نه فقط می‌تواند زمان شروع آسیب را دقیقاً مشخص کند، بلکه می‌تواند اطلاعات کاملی در مورد موقعیت و شدت آسیب فراهم کند. برای تعیین موقعیت آسیب از طیف دامنه‌ی مربوط به جزئیات خروجی گره‌ها استفاده شده است.^[۸] به این مفهوم که فرض شده است آسیب ایجاد شده باید بیشترین اثر را در پاسخ گره‌ی نزدیک‌تر ایجاد کند. بنابراین پس از تعیین زمان آسیب از روی اولین سطح تجزیه‌ی موجک، طیف دامنه در طول یک پنجره‌ی زمانی به عرض ۱۰ برابر زمان نمونه‌گیری سیگنال و به مرکز زمان محاسبه شده در گام قبل، برای هر ۲ گره مجاور مقایسه شده است. طیف با دامنه‌ی بزرگ‌تر مربوط به گره‌یی است که آسیب در مجاورت آن رخ داده است. این طیف با استفاده از تبدیل فوریه‌ی تابع خود همبستگی محاسبه می‌شود. این روش در مورد تمامی مدل‌های در نظر گرفته شده محل شروع آسیب را به خوبی نشان می‌دهد. در اینجا تشخیص پارامتری که هم به سادگی قابل اندازه‌گیری و استخراج باشد و هم دارای دقت کافی برای تعیین موقعیت آسیب باشد، عامل مهمی است. به زبان دیگر با داشتن پاسخ مربوط به هر گره می‌توان قضاوت قابل قبول مهندسی در مورد آسیب دیدن تمامی اعضای متصل به آن داشت. در روش ارائه شده، آسیب را می‌توان در زمان شروع آن تشخیص داد. این حساسیت به‌خصوص برای ساختمان‌های مهم و حیاتی در هنگام وقوع زلزله و بعد از آن، اهمیت روش را روشن می‌سازد. تحلیل ارائه شده توسط برخی محققین،^[۱] دارای این حساسیت نیست و تشخیص آسیب براساس پاسخ‌های یک سازه‌ی شدیداً آسیب دیده انجام شده است که در نهایت قابلیت مقاوم‌سازی را نداشته و تخریب شده است. اغلب روش‌ها،^[۲] نیاز به داشتن پاسخ در موضع آسیب است، که در عمل کارایی روش را محدود می‌سازد. همچنین در روش ارائه شده، نیازی به داشتن مشخصات سازه‌ی قبل و بعد از آسیب نیست؛ که خود از مزایای روش ارائه شده است.

در ابتدا مسئله برای حالت اعمال بار استاتیکی مورد توجه قرار گرفته است. از تحلیل کلاسیک سازه‌ها به یاد داریم که سختی خمشی در یک نقطه از یک عضو خمشی عبارت از لنگر لازم برای ایجاد دورانی واحد در آن نقطه است. برای مثال، چنانچه گره‌ی B گره‌یی از یک قاب خمشی فرض شود (شکل ۱)، سختی دورانی این گره برابر مجموع سختی خمشی ۴ عضو متصل به این نقطه است. وجود مفصل در یک عضو باعث کاهش سختی خمشی آن عضو می‌شود، یعنی سختی کاهش می‌یابد و به دنبال آن کاهش سختی دورانی گره‌ی B رخ خواهد داد که به مفهوم افزایش در مقدار دوران عضو است. به عبارت دیگر، با تغییر در مقدار دوران گره، اثر ایجاد مفصل مشاهده خواهد شد.

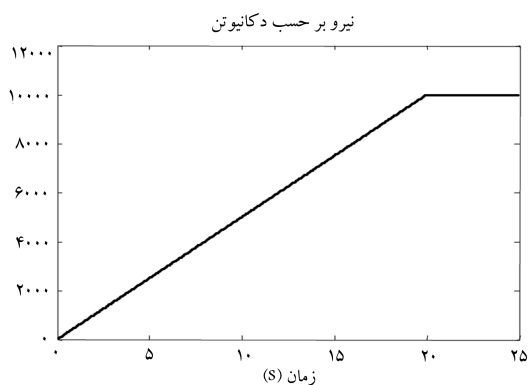
برای حالت بار غیرایستا (همان مثال قبل)، مقدار بار با نرخ مشخص و تا حدی معین افزایش داده می‌شود (شکل ۲). دو حالت وجود دارد: ۱. با افزایش بار و رسیدن به مقدار نهایی، در هیچ‌کدام از اعضا مفصلی تشکیل نشود. در این حالت تاریخچه‌ی زمانی پاسخ دورانی گره‌ی B مانند بارگذاری به صورت خطی و با شیبی ثابت افزایش می‌یابد. ۲. حین افزایش بار، مفصل خمیری در یکی از اعضا ایجاد می‌شود. دوباره پاسخ دورانی بررسی می‌شود و با توجه به مثال قبلی (حالت استاتیکی بارگذاری)، افزایش دوران پس از ایجاد مفصل خمیری مورد انتظار خواهد بود. این موضوع در افزایش شیب تابع پاسخ به خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۳). مهم این است که تغییر شیب تابع پاسخ، دقیقاً در زمان ایجاد مفصل خمیری ایجاد شود.

ثابت $t = 12.95$: زمان تشکیل مفصل

با مشاهده‌ی این نتایج در مورد بارهای ایستا و غیرایستا انتظار بر این است که تابع



شکل ۱. وجود مفصل در یک عضو متصل به گره قاب خمشی که باعث کاهش سختی گره متصل به آن می‌شود.



شکل ۲. بارگذاری یکنوا با نرخ ثابت.

۳. تبدیل موجک

است. [۸] همان‌طور که در ادامه و در مثال‌ها خواهیم دید، در اولین مرحله‌ی تجزیه‌ی موجک پاسخ (اولین سطح تجزیه)، اولین مراحل توسعه‌ی آسیب به‌طور واضح آشکار می‌شود و نیازی به انجام محاسبات بیشتر برای استخراج جزئیات سطوح بالاتر نیست که این از مزایای کاربرد تبدیل موجک در این تحقیق است. روابط تبدیل موجک به این صورت است (روابط ۱ و ۲): [۱۰]

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

$$C(a,b) = c(j,k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f(n) \psi_{j,k}(n) \quad (2)$$

در این روابط، C تبدیل گسسته‌ی موجک، $f(t)$ سیگنال، ψ موجک مادر، a پارامتر مقیاس و b مربوط به انتقال است (در تبدیل گسسته‌ی موجک این پارامترها به‌صورت گسسته تغییر می‌کنند).

چنانچه ضریب مقیاس و ضریب انتقال به‌صورت رابطه‌ی ۳ تعریف شوند، این تحلیل دودویی هم نامیده می‌شود:

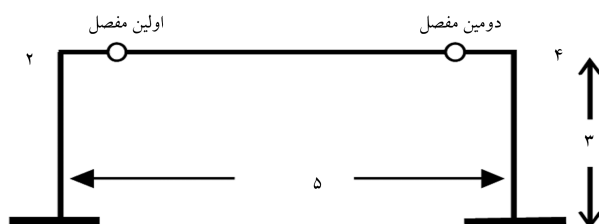
$$a = 2^j, \quad b = 2^j \times k \quad (3)$$

۴. تحلیل عددی و ارائه‌ی نتایج

برای نشان‌دادن قابلیت روش ارائه‌شده در این نوشتار، چندین مدل قاب خمشی متفاوت بررسی می‌شود. قاب‌ها براساس AISC (۱۹۸۹) و از پروفیل‌های فولادی IPE با مقاومت جاری شدن ۲۴۰۰ و مقاومت نهایی ۳۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع طراحی شده‌اند. بارگذاری قاب‌ها شامل بارهای ثقلی و بارگذاری جانبی (تاریخچه‌ی زمانی) و میرایی ۵٪ فرض شده است. نتایج براساس تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (SAP۲۰۰۰) ارائه و مفصل‌ها به‌صورت متمرکز و در انتهای اعضا تعریف شده‌اند. در ادامه، ۵ نمونه از مدل‌های بررسی‌شده برای تشریح روش آورده شده و نتایج تحلیل در ابتدا برای بارگذاری تناوبی و در ادامه برای بارگذاری لرزه‌یی نشان داده شده است. بارگذاری تناوبی یک بار سینوسی و بارگذاری لرزه‌یی مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی راند ولی^۴ (۱۹۸۴) و زلزله‌ی طَبَس (۱۳۵۷) در نظر گرفته شده است.

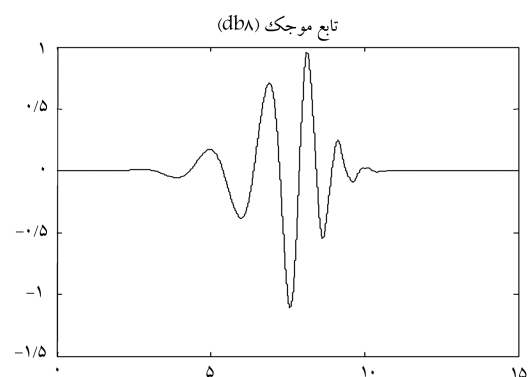
۱.۴. مثال ۱. قاب خمشی پرتال تحت برانگیزش تناوبی

اولین مثال یک قاب خمشی پرتال است (شکل ۶)، که تحت بارگذاری گسترده‌ی یکنواخت قائم به‌شدت ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر در حد فاصل گره‌های ۲ و ۴ قرار دارد و هم‌زمان تحت اثر یک برانگیزش تناوبی سینوسی قرار گرفته است. این برانگیزش با دوره‌ی تناوب یک ثانیه به‌صورت مقیاس‌شده به واحد نشان داده شده است (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اولین مفصل در نزدیکی

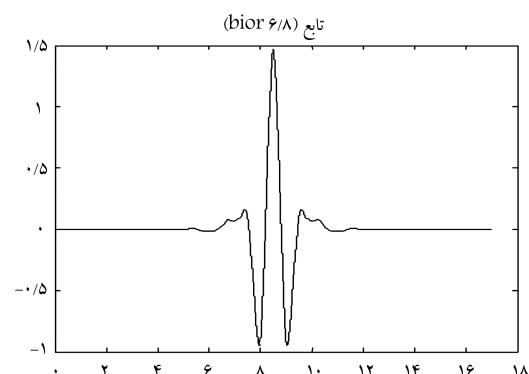


شکل ۶. قاب خمشی پرتال.

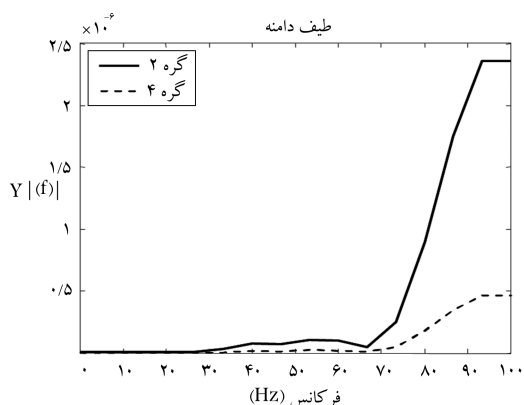
تشخیص خسارت، یکی از حوزه‌های مهم کاربردی تحلیل موجک است. به‌خصوص شناسایی مراحل اولیه‌ی شروع آسیب حائز اهمیت است. موجک ابزاری جدید برای برآورد خسارت است. موجک‌ها^۱ دسته‌یی از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه‌ی سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های بسامدی آن به‌کار می‌روند. تبدیل موجک، تجزیه‌ی یک تابع بر مبنای توابع موجک است. توابع موجک دارای باند محدود هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی بسامد هستند که به‌صورت عددی و یا تحلیلی ساخته می‌شوند. این توابع به‌صورت متقارن، متقارن معکوس، حقیقی، و یا مجازی موجود هستند. موجک‌ها، که با عنوان موجک‌های دختر شناخته می‌شوند، نمونه‌های انتقال‌یافته و مقیاس‌شده از یک تابع موجک مادر است. موجک مادر، تابع نوسانی شدیداً میرا و با طول متناهی است. ارتباط تبدیل موجک و مبحث فیلتر بانک و همچنین امکان انجام تحلیل سریع موجک از دیگر مزایای این تبدیل است. ضرایب موجک حاوی اطلاعات زیادی در مورد محتویات سیگنال هستند. امروزه این تبدیل دارای کاربردهای بسیاری در اغلب رشته‌های علمی است و همچنان بر دامنه‌ی این کاربردها افزوده می‌شود. انتخاب تابع موجک مادر، اولین گام در تحلیل موجک است. انتخاب این تابع بستگی به مسئله‌ی موردنظر دارد و می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد. در این تحقیق از تابع موجک دابیشز^۲ ۸ و بایور^۳ ۶٫۸ استفاده شده است (شکل‌های ۴ و ۵). [۹، ۱۱] در این تحقیق از تبدیل موجک گسسته استفاده شده است، به این ترتیب که سری زمانی پاسخ گره‌یی به‌تدریج به چند سری زمانی مجزا تجزیه می‌شود؛ به‌طوری که بتوان از جمع آن‌ها به سری زمانی اولیه دست یافت. هر مرحله‌ی تجزیه در واقع به مفهوم عبور سری زمانی از فیلتر متناظر با موجک انتخابی



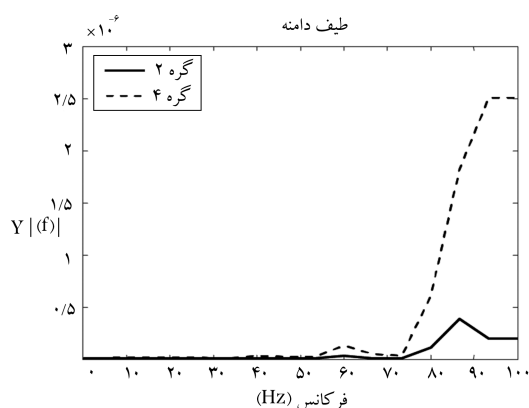
شکل ۴. تابع موجک دابیشز ۸.



شکل ۵. تابع موجک بایور ۶٫۸.



شکل ۹. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی گره‌های ۲ و ۴ (در زمان تشکیل اولین مفصل).



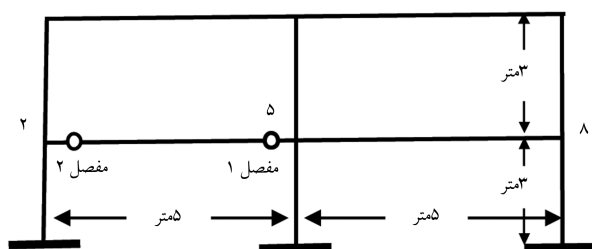
شکل ۱۰. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی گره‌های ۲ و ۴ (در زمان تشکیل دومین مفصل).

گره‌های ۲ و ۴ استفاده شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰). همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، طیف دامنه‌ی اولین جزئیات تبدیل موجک پاسخ دورانی در یک پنجره‌ی زمانی به مرکزیت $t_1 = 0.17$ ثانیه، برای گره ۲ مقدار بیشتری نسبت به گره ۴ نشان می‌دهد؛ بنابراین اولین مفصل در مجاورت گره ۲ تشکیل شده است. به همین ترتیب مقایسه‌ی طیف دامنه به مرکزیت $t_2 = 0.74$ ثانیه مقدار بیشتری برای گره ۴ نشان داده است که به مفهوم تشکیل مفصل دوم در مجاورت گره ۴ است (شکل ۱۰).

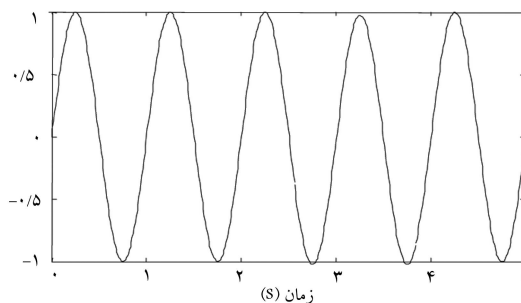
۲.۴. مثال ۲. قاب خمشی ۲ طبقه‌ی ۲ دهانه: برانگیزش هارمونیک

سینوسی

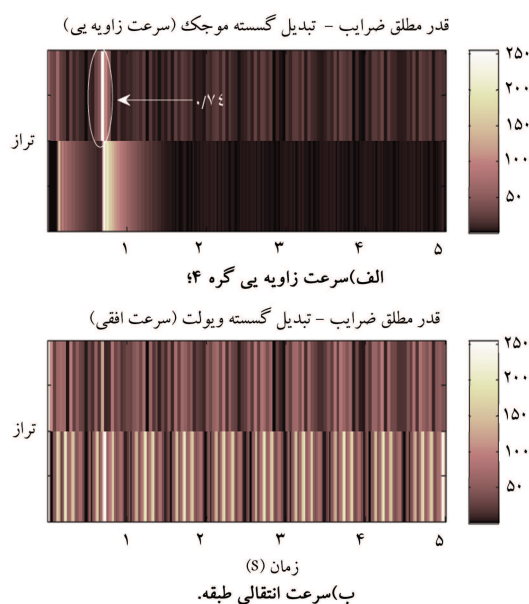
در این مثال، بار ثقلی طبقات، مشابه مثال قبلی، بار گسترده‌ی یکنواخت است. برانگیزش جانبی هم یک حرکت هماهنگ سینوسی است که به تکیه‌گاه قاب اعمال شده است. در این مثال (مطابق شکل ۱۱)، مختصات مکانی و زمانی تشکیل



شکل ۱۱. قاب خمشی ۲ دهانه - ۲ طبقه.



شکل ۷. برانگیزش سینوسی با دامنه‌ی یک و تناوب یک ثانیه.



شکل ۸. مقایسه‌ی جزئیات برای سطوح تجزیه‌ی یک و دو.

گره‌ی ۲ و در زمان 0.17 ثانیه و دومین مفصل در مجاورت گره‌ی ۴ و در زمان 0.74 ثانیه تشکیل شده است. بنابراین مختصات مکانی و زمانی مفصل‌ها به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ است:

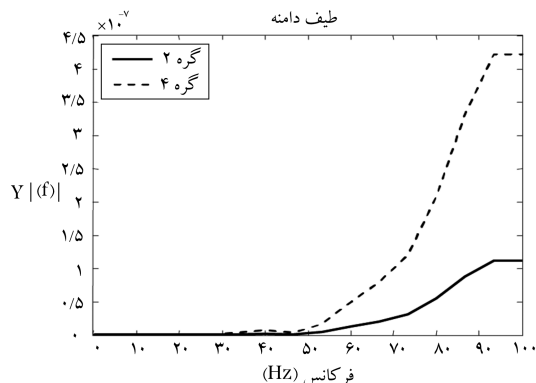
$$(4) \quad \text{ثانیه } 0.17 = t_1 : \text{مفصل اول مجاور گره ۲}$$

$$(5) \quad \text{ثانیه } 0.74 = t_2 : \text{مفصل دوم مجاور گره ۴}$$

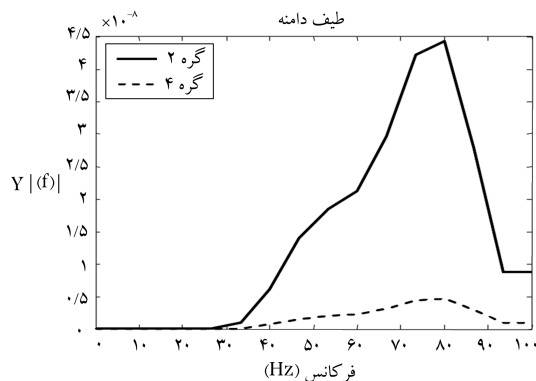
برای نشان دادن مزیت پاسخ‌های دورانی نسبت به پاسخ‌های انتقالی در تشخیص شروع آسیب، مقایسه‌ی نتایج حاصل از تبدیل موجک بر روی یک تابع دورانی و یک تابع انتقالی برای این مثال آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، در فضای ضرایب موجک، مزیت تابع پاسخ دورانی قابل مشاهده است. قدرمطلق ضرایب در زمان شروع آسیب به‌طور ناگهانی تغییر کرده است (شکل ۸ الف)، در صورتی که این تغییرات موضعی در تجزیه‌ی موجک سرعت انتقالی طبقه نامحسوس است (شکل ۸ ب). برای پاسخ دورانی، ضرایب موجک غیرجواب تاریک‌ترند و این در حالی است که ضرایب جواب حتی روشن‌تر شده‌اند. این ضرایب براساس یک تحلیل گسسته‌ی موجک به‌دست آمده‌اند. گرچه در این شکل، دو سطح تجزیه آورده شده است، ولی از روی شکل مشخص است که یک سطح هم برای قضاوت کاملاً کفایت می‌کند. از این تحلیل، زمان تشکیل مفصل خمیری به‌دست آمده است.

برای تعیین موقعیت آسیب از مقایسه‌ی دامنه‌ی طیف مربوط به جزئیات خروجی

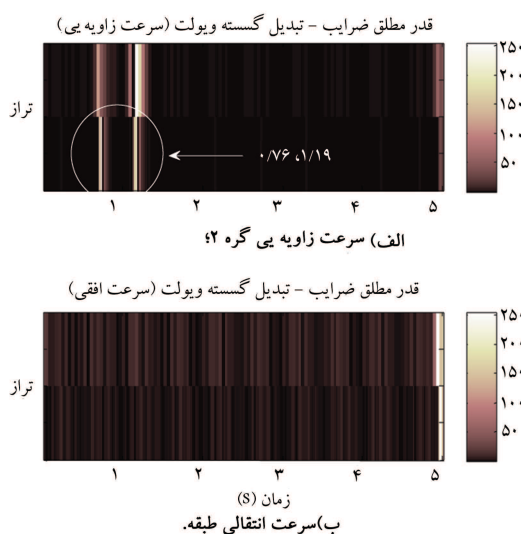
آسیب به طور ناگهانی تغییر کرده است (شکل ۱۶ الف). در صورتی که این اطلاعات موضعی در تجزیه ی موجک سرعت انتقالی طبقه قابل مشاهده نیست (شکل ۱۶ ب). این ضرایب براساس یک تحلیل گسسته ی موجک به دست آمده است و گرچه در این شکل، دو سطح تجزیه آورده شده؛ از روی شکل مشخص است که یک سطح هم برای قضاوت کفایت می کند.



شکل ۱۴. مقایسه ی طیف دامنه ی گره های ۲ و ۵ قاب ۲ طبقه و ۲ دهانه (در زمان تشکیل اولین مفصل).



شکل ۱۵. مقایسه ی طیف دامنه ی گره های ۲ و ۵ قاب ۲ طبقه و ۲ دهانه (در زمان تشکیل دومین مفصل).



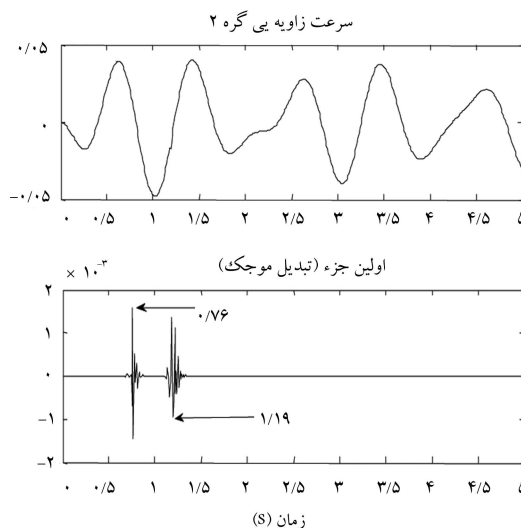
شکل ۱۶. مقایسه ی جزئیات برای سطوح تجزیه ی ۱ و ۲.

مفصل ها به صورت روابط ۶ و ۷ است:

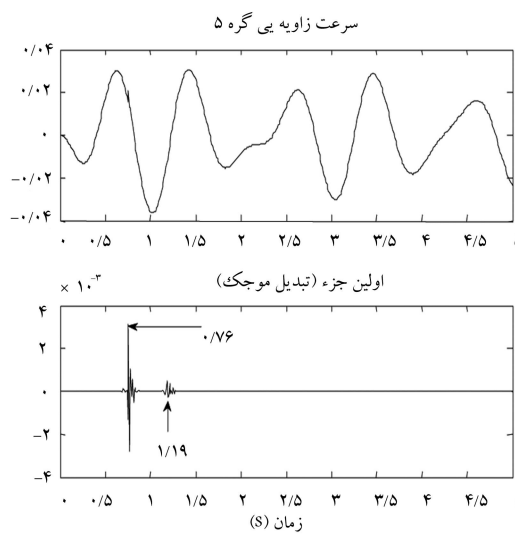
$$(۶) \quad t_1 = 0.76 \text{ ثانیه} : \text{مفصل اول مجاور گره ۵}$$

$$(۷) \quad t_2 = 1.19 \text{ ثانیه} : \text{مفصل دوم مجاور گره ۲}$$

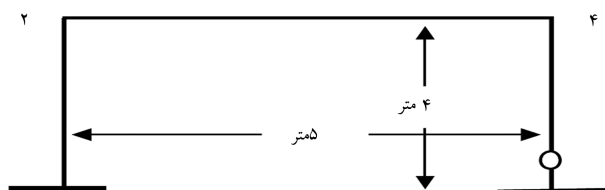
استخراج تغییرات موضعی در تابع پاسخ با استفاده از تبدیل موجک، در شکل های ۱۲ و ۱۳ دیده می شود. در این مثال هم مانند مثال قبلی زمان شروع آسیب از روی این شکل ها قابل تعیین است. نتایج مربوط به تعیین موقعیت براساس شکل های ۱۴ و ۱۵ است. از مقایسه ی طیف دامنه ی مربوط به اولین جزئیات به دست آمده از تبدیل موجک (شکل های ۱۲ و ۱۳) مشاهده می شود که اولین مفصل در مجاورت گره شماره ۵ و مفصل خمیری دوم در مجاورت گره شماره ۲ تشکیل شده است. برای نشان دادن مزیت پاسخ های دورانی نسبت به پاسخ های انتقالی در تشخیص شروع آسیب، مقایسه ی نتایج حاصل از تبدیل موجک بر روی یک تابع دورانی و یک تابع انتقالی برای این مثال آورده شده است (شکل ۱۶). مطابق این شکل، در فضای ضرایب موجک این مزیت قابل مشاهده است، به طوری که قدرمطلق ضرایب، در زمان شروع



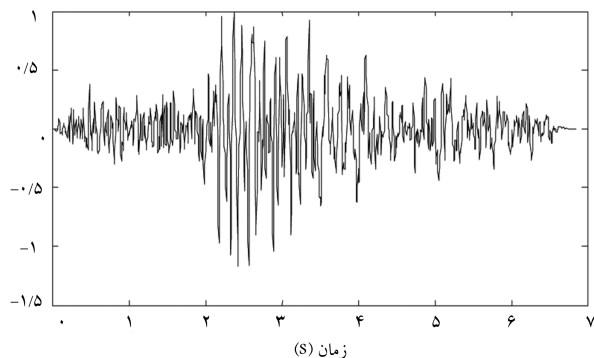
شکل ۱۲. سرعت زاویه یی گره ۲ و جزئیات اولین تجزیه.



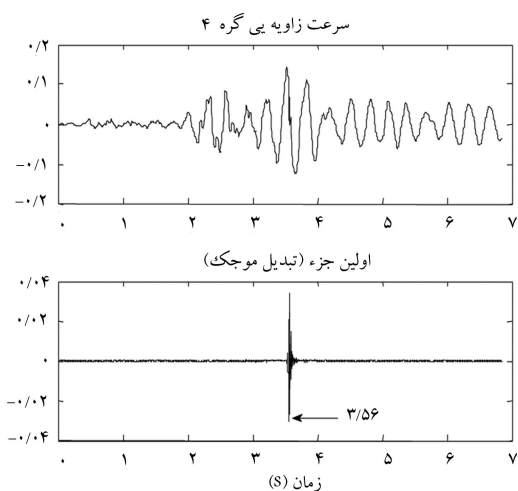
شکل ۱۳. سرعت زاویه یی گره ۵ و جزئیات اولین تجزیه.



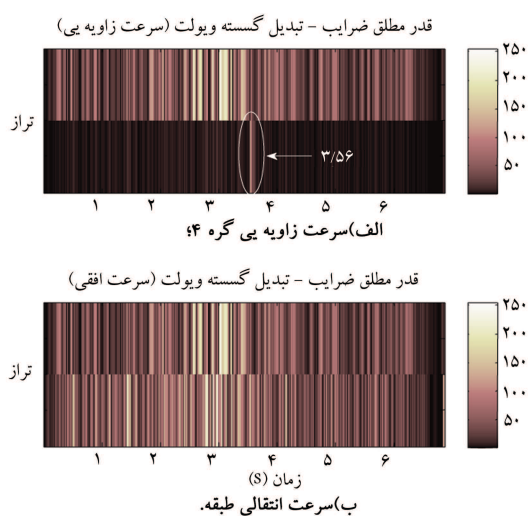
شکل ۱۸. قاب خمشی پرتال تحت بار گسترده‌ی ثقلی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر.



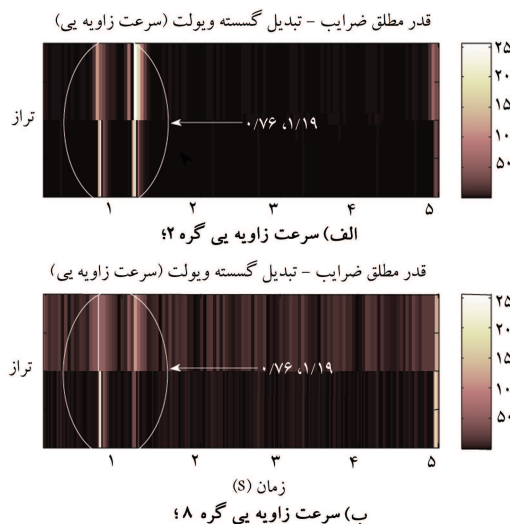
شکل ۱۹. تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌ی راند ولی.



شکل ۲۰. سرعت زاویه‌ی بی گره ۴ و جزئیات حاصل تجزیه‌ی موجک (دائیش ۸).



شکل ۲۱. مقایسه‌ی جزئیات برای سطوح تجزیه‌ی ۱ و ۲.

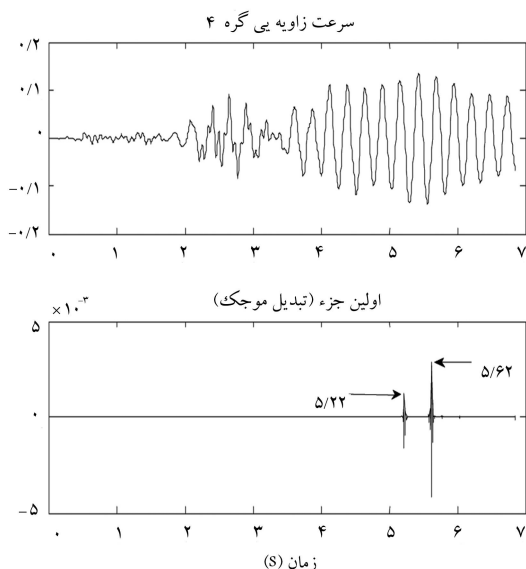


شکل ۱۷. مقایسه‌ی جزئیات سطوح تجزیه‌ی ۱ و ۲.

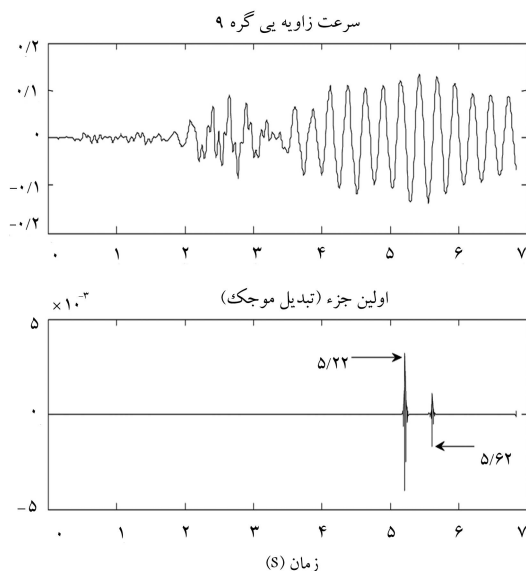
حال این سؤال مطرح است که آیا تاریخچه‌ی اطلاعات ثبت شده در گره ۸ هم همین نتایج را به دست می‌دهد؟ و در مورد تعیین موقعیت آسیب، آیا گزینیه دیگری یعنی شروع مفصل خمیری در سمت راست گره ۵ (سمت گره ۸) مطرح می‌باشد؟ و آیا اینکه این روش ما را به جوابی یکتا هدایت می‌کند؟ برای پاسخ به این سؤالات، تحلیل موجک برای ۲ سمت گره ۵ در شکل ۱۷ آورده شده است؛ یعنی گره‌ی که در یک سمت آن تیر با ۲ مفصل خمیری وجود دارد و در سمت دیگر آن تیر سالم مانده است. مطابق این شکل، پاسخ گره ۸ متأثر از شروع تشکیل مفصل در سمت دیگر بوده است. این تأثیر ناشی از ارتباط اعضاست و مفصل در حد فاصل گره‌های ۲ و ۵ تشکیل شده است. به تفاوت رنگ زمینه با رنگ قسمت‌هایی که با دایره مشخص شده است، توجه شود. باز هم آسیب اول که در زمان ۰/۷۶ ثانیه رخ داده است، به خاطر نزدیکی تریبون به گره ۸ تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. یعنی نه فقط ضرابی که جواب نیستند کمتر شده‌اند، بلکه مقدار ضرایب مربوط به جواب نیز افزایش یافته است (به تفاوت سایه و روشن در شکل ۱۷ توجه شود).

۳.۴. مثال ۳. قاب خمشی پرتال: برانگیزش زلزله‌ی راند ولی (شتاب بیشینه‌ی ۰/۳ g)

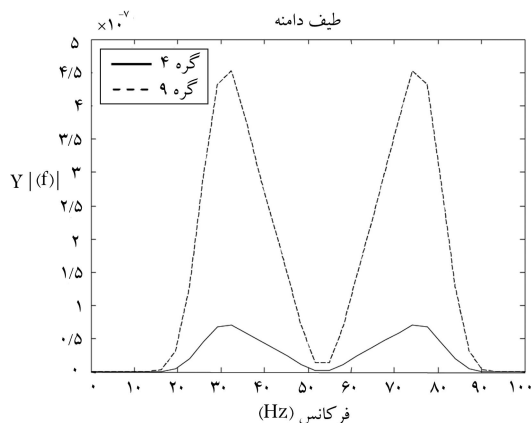
در این مثال قاب پرتال تحت برانگیزش زلزله‌ی راند ولی تحلیل شده است (شکل ۱۸). این شتاب اتفاقی مربوط به زلزله‌ی راند ولی (۱۹۸۴، کالیفرنیا) است (شکل ۱۹). در این شکل، تابع شتاب نشان داده شده برحسب مقدار بیشینه‌ی خود نرمال شده است. دوباره برای نشان دادن مزیت پاسخ‌های دورانی نسبت به پاسخ‌های انتقالی در تشخیص شروع آسیب، مقایسه‌ی نتایج حاصل از تبدیل موجک بر روی یک تابع دورانی و یک تابع انتقالی برای این مثال آورده شده است (شکل‌های ۲۰ و ۲۱). مطابق این شکل‌ها، قدر مطلق ضرایب در زمان شروع آسیب به طور ناگهانی تغییر کرده است (شکل ۲۱ الف)، در صورتی که این اطلاعات در تجزیه‌ی موجک سرعت انتقالی طبقه قابل مشاهده نیست (شکل ۲۱ ب). این ضرایب براساس یک آنالیز گسسته‌ی موجک به دست آمده‌اند. گرچه در این شکل‌ها، ۲ سطح تجزیه آورده شده است؛ ولی از روی آن‌ها مشخص است که یک سطح هم برای قضاوت کاملاً کفایت می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشخص است، شروع خرابی در زمان ۳/۵۶ ثانیه از لحظه‌ی شروع برانگیزش است، که با نتیجه‌ی حاصل از آنالیز عددی



شکل ۲۴. سرعت زاویه بی گره ۴ و جزئیات حاصل تجزیه موجک (دایبیش ۸).



شکل ۲۵. سرعت زاویه بی گره ۹ و جزئیات حاصل تجزیه موجک (دایبیش ۸).



شکل ۲۶. مقایسه طیف دامنه بی گره های ۴ و ۹ قاب ۴ طبقه (در زمان تشکیل اولین مفصل).

مدل قاب انطباق کامل دارد. از طرفی از مقایسه ی توان خروجی سری های زمانی مربوط به گره های ۴ و ۲ به خوبی مشخص است که مفصل خمیری در ستون سمت گره ۴ واقع شده است (شکل های ۱۸ و ۲۲).

۴.۴. مثال ۴. قاب خمشی ۴ طبقه: برانگیزش زلزله ی راند ولی (شتاب پیشینه ی $0.85g$)

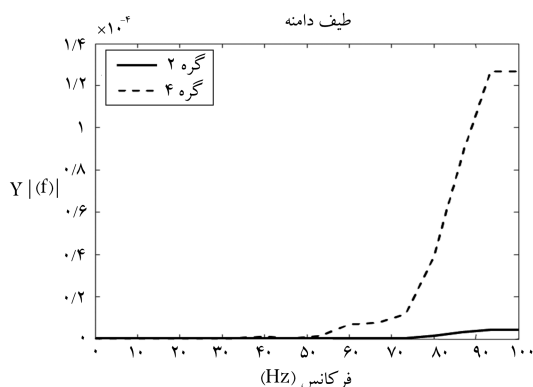
این قاب در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در این مثال بار ثقلی طبقات مشابه مثال قبلی، بار گسترده ی یکنواخت و مختصات مکانی و زمانی تشکیل مفصل ها به صورت رابطه های ۸ و ۹ است:

$$(8) \quad \text{ثانیه } t_1 = 5/22 : \text{ مفصل اول مجاور گره ۹}$$

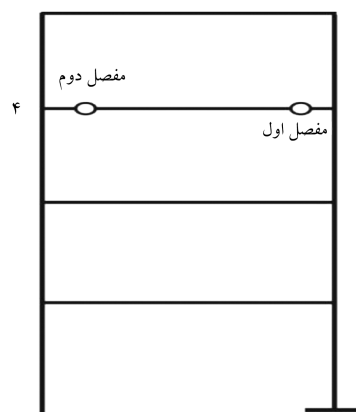
$$(9) \quad \text{ثانیه } t_2 = 5/62 : \text{ مفصل دوم مجاور گره ۴}$$

همان طور که در شکل های ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است، اولین تجزیه ی گسسته ی موجک برای پاسخ تاریخی زمانی سرعت گره یی (گره های ۴ و ۹)، به طور کاملاً واضح زمان شروع تشکیل مفصل های خمیری را نشان می دهد.

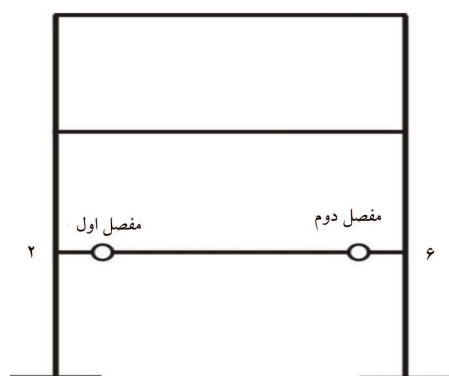
نتایج مربوط به تعیین موقعیت براساس شکل های ۲۶ و ۲۷ است. از مقایسه ی طیف دامنه در این شکل ها مشاهده می شود که مفصل شماره ی ۱ یا اولین مفصل در مجاورت گره ۹ تشکیل شده است و مفصل خمیری دوم در مجاورت گره ۴ تشکیل می شود.



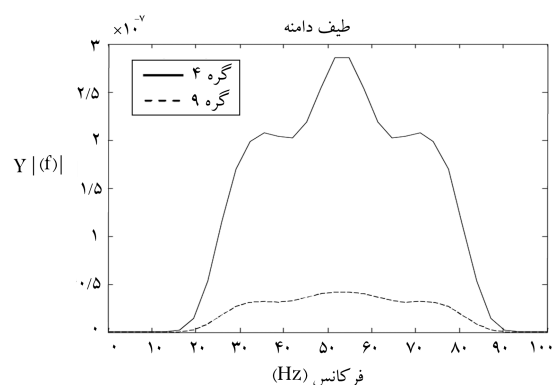
شکل ۲۷. مقایسه ی طیف دامنه ی گره های ۴ و ۹.



شکل ۲۸. قاب خمشی ۴ طبقه، تحت بار گسترده ی ثقلی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر با طول دهانه ی ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر.



شکل ۲۹. قاب خمشی ۳ طبقه، تحت بار گسترده‌ی ثقلی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر، با طول دهانه‌ی ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر.



شکل ۲۷. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی گره‌های ۴ و ۹ قاب ۴ طبقه (در زمان تشکیل دومین مفصل).

۵.۴. مثال ۵. قاب خمشی ۳ طبقه: برانگیزش زلزله‌ی طیس (شتاب بیشینه‌ی $g/0.2$)

در این مثال از مودلفه‌ی افقی شتاب نگاشت زلزله‌ی طیس (۱۳۵۷) که در شکل ۲۸ نشان داده شده، یک قاب سه طبقه برای برانگیزش اتفاقی استفاده شده است (شکل ۲۹). در این شکل تابع شتاب نشان داده شده برحسب بیشینه‌ی خود نرمال شده است.

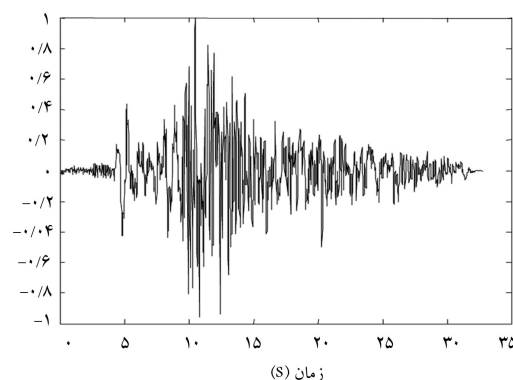
در این مثال بار ثقلی طبقات مشابه مثال قبلی، بار گسترده‌ی یکنواخت است. مختصات مکانی و زمانی تشکیل مفصل‌ها به صورت رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ است (شکل ۲۹).

$$(10) \quad \text{ثانیه } t_1 = 14/14 : \text{ مفصل اول مجاور گره ۲}$$

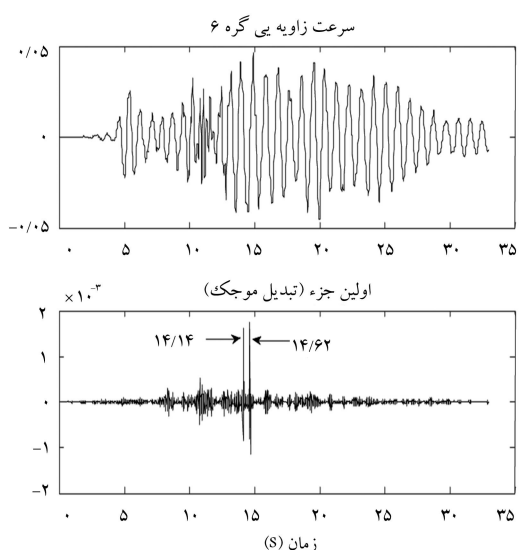
$$(11) \quad \text{ثانیه } t_2 = 14/62 : \text{ مفصل دوم مجاور گره ۶}$$

همان‌طور که در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نشان داده شده است، اولین تجزیه‌ی گسسته‌ی موجک برای پاسخ تاریخی‌ی زمانی سرعت گره‌ی (گره‌های ۶ و ۲)، به‌طور کاملاً واضح شروع تشکیل مفصل‌های خمیری را نشان می‌دهد.

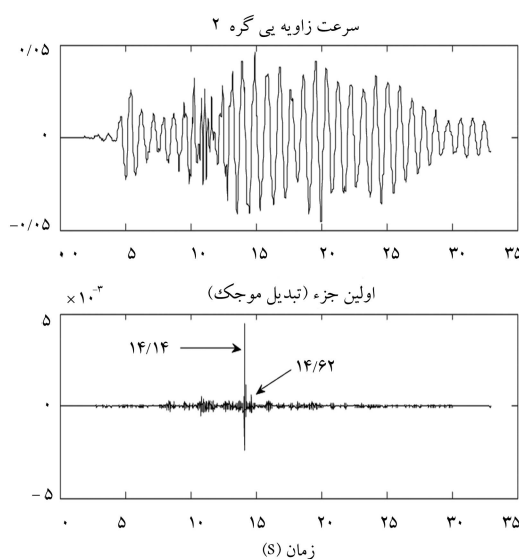
نتایج مربوط به تعیین موقعیت براساس شکل‌های ۳۲ و ۳۳ است. از مقایسه‌ی دامنه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که مفصل شماره‌ی ۱ یا اولین مفصل در مجاورت گره ۲ تشکیل می‌شود و مفصل خمیری دوم در مجاورت گره ۶ تشکیل می‌شود.



شکل ۲۸. تاریخی‌ی زمانی زلزله‌ی طیس.



شکل ۳۰. سرعت زاویه‌ی گره ۶ و جزئیات حاصل تجزیه‌ی موجک (دایبشنز ۸).



شکل ۳۱. سرعت زاویه‌ی گره ۲ و جزئیات حاصل تجزیه‌ی موجک (دایبشنز ۸).

تمرکز اطلاعات، برآورد دقیق زمان آسیب را میسر می‌کند. در تمامی مثال‌ها، مکان آسیب از مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی مربوط به تبدیل موجک پاسخ دورانی ۲ گرهی مجاور به دست آمده و چون تفاوت طیف دامنه زیاد است، بنابراین هیچ شبیهی در مورد تعیین مکان آسیب به وجود نیامده است. به عبارت دیگر به طور قاطع هم زمان و هم مکان آسیب تعیین شده است.

۵. نتیجه‌گیری

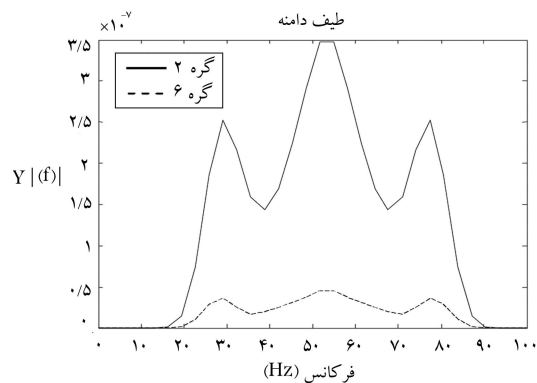
همان‌طور که مشاهده شد، پاسخ‌های مربوط به مؤلفه‌های دورانی گره‌های یک قاب خمشی حاوی اطلاعات مفیدی در باره‌ی مختصات آسیب است. گرچه با استفاده از پاسخ‌های دوران و یا شتاب زاویه‌یی هم می‌توان نتایج مشابهی به دست آورد، ولی تحلیل مدل‌های مختلف قاب خمشی نشانگر آن است که سرعت زاویه‌یی گره‌ها نسبت به دیگر پاسخ‌های گره‌یی نتایج بهتری به دست می‌دهد. با داشتن پاسخ مربوط به یک گرهی قاب می‌توان در مورد همه‌ی تیرها و ستون‌های متصل به آن، تحلیل آسیب انجام داد. برای تعیین زمان و موقعیت آسیب می‌توان از تبدیل گسسته‌ی موجک استفاده کرد. خوشبختانه با اولین سطح تجزیه به جواب‌های دقیقی دست می‌یابیم که نشان‌دهنده‌ی عملکرد سریع و ساده‌ی روش ارائه شده است. یعنی اینکه نیازی به ادامه و عمق دادن به سطوح تجزیه نداریم که خود باعث افزایش بار محاسباتی روش است. گرچه سری‌های زمانی که از سطوح بالاتر تجزیه به دست می‌آیند، باز هم حاوی اطلاعات هستند؛ ولی به این نتیجه رسیدیم که مؤلفه‌ی سرعت زاویه‌یی پاسخ و اولین سطح تجزیه‌ی آن، بهترین انتخاب برای حصول جواب است. از دیگر مزایای این روش قابلیت دستیابی به زمان وقوع آسیب است، به این خاطر که مختصات آسیب مستقیماً از پاسخ لرزه‌یی به دست آمده‌اند، نه پاسخ ثانویه‌ی ناشی از تحریک مجدد سازه‌ی آسیب دیده در زلزله. از طرفی این روش با توجه به توانایی در کشف زمان و مکان آسیب در مراحل اولیه‌ی تشکیل آن برای رصد کردن سلامت ساختمان‌های با اهمیت زیاد و خیلی زیاد پیشنهاد می‌شود، که مطابق اغلب آیین‌نامه‌های زلزله‌ی خدمت‌رسانی آن‌ها در هنگام وقوع زلزله و بعد از آن مورد توجه است. همچنین باید به محدود کردن درجات آزادی دورانی سازه‌ها، همانند جابجایی، در آیین‌نامه‌های زلزله توجه شود.

پانویس‌ها

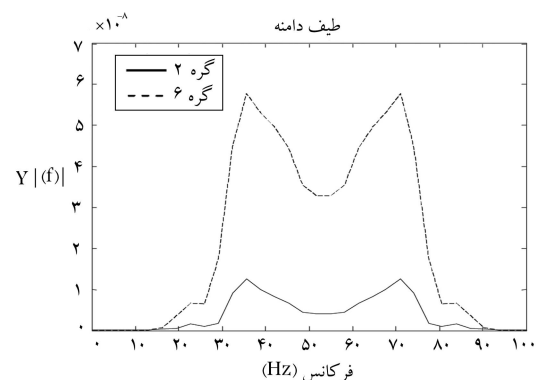
1. wavelets
2. Daubechies
3. Biorthogonal
4. Round Valley

منابع (References)

1. Todorovska, M.I. and Trifunac, M.D., "Structural health monitoring by detection of abrupt changes in response using wavelets: Application to a 6 story RC building damaged by an earthquake", *Proc. 37th Joint Panel*



شکل ۳۲. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی گره‌های ۲ و ۶ قاب ۳ طبقه (در زمان تشکیل اولین مفصل).



شکل ۳۳. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی گره‌های ۲ و ۶ قاب ۳ طبقه (در زمان تشکیل دومین مفصل).

همان‌طور که در مثال‌های فوق نشان داده شد، روش ارائه شده مستقل از تعداد دهانه، تعداد طبقات، و نوع تحریک تکیه‌گاهی، قابلیت کشف زمان و مکان آسیب را داراست. تبدیل موجک پاسخ دورانی گره‌ها فقط در زمان تشکیل مفاصل دارای تغییرات واضح بود و در دیگر قسمت‌ها دارای دامنه‌ی نزدیک به صفر است. این

Meeting on Wind and Seismic Effects, Japan, U.S.-Japan Natural Resources Program (UJNR), p. 20 (2005).

2. Ovanosova, A.V. and Sua'rez, L.E. "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures", *Eng. Structures*, **26**(1), pp. 39-49 (2004).
3. Campbell, S.D., Richard, R.M. and Partridge, J.E. "Steel moment frame damage predictions using low-cycle fatigue", *The 14th World Conference on Earthquake Eng., China* (2008).
4. FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC (2000).
5. Jankovic, S. and Stojadinovic, B. "Determining inter-story drift capacity of R/C frame building", *The 14th*

- World Conference on Earthquake Eng.*, China (2008).
6. Arjomandi, K., Estekanchi, H. and Vafai, A. "Correlation between structural performance levels and damage indexes in steel frames subjected to earthquakes", *Scientia iranica Transaction A: Civil Eng.*, **16**(2), pp. 147-155 (2009).
 7. Farrar, C.R. et al., *Nonlinear System Identification for Damage Detection*, Los Alamos National Laboratory, LA-14353 (2007).
 8. Weeks, M., *Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*, Infinity Science Press, Massachusetts (2007).
 9. Raghu Prasad, B.K., Lakshmanan, N., Muthumani, K. and Gopalakrishnan, N. "Enhancement of damage indicators in wavelet and curvature analysis", *Sadhana*, **31**, pp. 463-486 (2006).
 10. Misisti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. and Poggi, J., *Wavelets and Their Application*, ISTE Ltd, UK (2007).

A NEW WAVELET BASED-METHOD FOR DAMAGE DETECTION OF MOMENT-RESISTING FRAME STRUCTURES

F. Raufi

f.raufi@srbiau.ac.ir

Science and Research Branch

Islamic Azad University

O. Bahar(corresponding author)

omidbahar@iiees.ac.ir

International Institute of Earthquake

Engineering and Seismology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 127-136, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 18 June 2011; received in revised form 28 December 2011; accepted 22 May 2012.

Abstract

In this study, in order to determine the time and location of damage occurrence in moment-resisting frames, a method, based on a general concept of signal processing methods, is presented. Most previously presented methods aimed at finding the time and location of damage by considering occurrence changes in structural responses using Fourier, short time Fourier or wavelet transform methods. Vibration properties of the system may be addressed as the vibration modal frequencies or modal shapes of the structure. In the proposed method, wavelet analysis of more complex responses of the structure, i.e. rotational, angular velocity or acceleration responses of the joints (nodes of the frame), is employed to extract information about damage. These functions contain more information, such that wavelet analysis may be conducted based on only the first level of signal decomposition. To determine the location of damage, the concept of an amplitude spectrum is used, which is achieved from comparison of the amplitude spectra of the rotational responses of the two

adjacent nodes. Since, by occurring damage, there is a large difference between these amplitude spectra, there is no doubt that the location of damage in this method will be found. In this research, there is no need to know the primary system properties, and this is the main advantage of the method. The other advantage is that the time of damage is achievable, because its time and location is directly computed from the measured earthquake responses; there is no need to conduct any (ambient or forced) vibration tests. Extensive analyses indicate the accuracy and power of the proposed method to successfully determine the time and location of damage during different loadings. According to the ability of this method to detect specifications of damage at early stages, it is recommended for the health monitoring of important structures, whose performances are strongly considered during and after strong ground motion earthquakes.

Key Words: damage detection, wavelet transform, signal processing, moment frame.