

فشرده‌سازی داده‌های شتاب‌نگاری ثبت‌شده در ایران توسط آنالیز موجک

افشین پورتقی^۱ و رضا صالح‌جلالی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی عمران- سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

(دریافت: ۹۶/۱۱/۲۹، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیده

هدف از این تحقیق ارائه داده‌های شتاب‌نگاری ثبت‌شده در ایران به‌صورت فشرده توسط موجک می‌باشد. با توجه به امکان فشرده‌سازی داده‌های لرزه‌ای و ارائه آن‌ها به‌صورت مجموع آثار تعدادی از موجک‌ها و اهمیتی که این موجک‌ها در شناخت طبیعت حرکت زمین و بسط الگوریتم‌های جدید جهت ساخت زلزله‌های مصنوعی دارند، در این مقاله فشرده‌سازی ۸۰۶ رکورد سه مؤلفه‌ای حاصل از زلزله‌های رخ‌داده در ایران طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۳ با استفاده از تبدیل موجک سریع انجام‌گرفته است. فشرده‌سازی داده‌ها با استفاده از بسط سرعت حرکت زمین برحسب سری موجک‌های متعامد و متعاقباً بازسازی سیگنال اصلی توسط موجک‌هایی که دارای حداکثر انرژی می‌باشند صورت گرفته است. در این راستا از موجک کوئفلت^۱ که متعامد، هموار و تقریباً متقارن است جهت انجام تقریب‌های حاصل از بازسازی ۱٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪، ۸٪ و ۱۲٪ از بیش‌ترین ضرایب مربوط به بسط استفاده گردیده است. کارایی روش به‌کار گرفته‌شده از طریق مقایسه تعدادی از شاخص‌های لرزه‌ای حاصل از سیگنال‌های اصلی و فشرده‌سازی شده و بررسی میزان خطاها مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص‌های به‌کار گرفته‌شده شامل انرژی ورودی زلزله، حداکثر توان ورودی زلزله و زمان خرابی نوسانگر غیرخطی می‌باشند. نتایج حاکی از میزان همبستگی بالا میان شاخص‌های حاصل از داده‌های اصلی و فشرده‌سازی شده با در نظر گرفتن تعداد کمی از موجک‌ها می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لرزه، تبدیل موجک، انرژی، توان، پاسخ لرزه‌ای غیرخطی، زمان خرابی.

۱- مقدمه

سایر روش‌های قدیمی تکامل یافته‌تر و کارآمدتر می‌باشد، توانایی تجزیه امواج لرزه‌ای به فرکانس‌های متفاوت را دارد و می‌تواند فرکانس‌های متفاوت را با هم ترکیب کند. لذا با استفاده از این ویژگی تبدیلات تحلیل‌های دوگانه در حوزه زمان- فرکانس امکان‌پذیر می‌گردد. با این توصیف تبدیل موجک می‌تواند خصوصیات نهفته شده در حرکت زمین را هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس شناسایی کند (Todorovska و Trifunac, ۲۰۰۷ و موسوی خلخالی و همکاران، ۱۳۹۶). فشرده‌سازی رکورد زلزله با در نظر گرفتن اطلاعات زمانی آن می‌تواند به صورت تعدادی موجک نمایان گردد. چراکه بر اساس آزاد شدن انرژی تجمعی زلزله در نقاط مختلف سطح گسل موجک‌های مختلف ایجاد شده و این موجک‌ها در طی مسیرهای مختلف دچار کاهندگی، پراکنش و تفرق گردیده و با اختلاف فاز به محل ثبت رکورد می‌رسند. لیکن مجموع موجک‌های پراانرژی می‌تواند

در سال‌های اخیر از آنالیز فوری به‌طور گسترده‌ای در تجزیه- و تحلیل امواج زلزله استفاده شده است. نیاز به آنالیز تمام بازه زمانی وقوع زلزله جهت دستیابی به محتوای فرکانسی و عدم قابلیت تعیین زمان وقوع یک فرکانس خاص از جمله معایب روش آنالیز فوری در مبحث امواج تصادفی می‌باشند. از مزایای مهم تبدیل موجک در مقایسه با تبدیل فوری، توانایی آن در تحلیل موضعی است. به‌عبارتی دیگر موجک‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا به‌واسطه یک پنجره، مقطع کوچکی از یک موج طولانی در حوزه زمان مورد بررسی قرار گیرد. تحلیل موجک در مقایسه با سایر روش‌های تحلیل امواج زلزله قادر به نمایش وجوهی از اطلاعات مانند تغییرات ناگهانی و ناپوستگی در مشتقات بالاتر است. تبدیل موجک در بحث پردازش سیگنال در مراجع متعددی در دسترس می‌باشد و در بسیاری از کارهای مربوط به زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این از آنجایی که روش موجک نسبت به

مورد ایران و ارائه یک مجموعه فشرده از داده‌های شتاب‌نگاری ثبت‌شده در این کشور است تا در تحقیقات آتی بتوان خصوصیات زلزله‌های قوی در ایران را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. در این تحقیق داده‌های شتاب‌نگاری ثبت‌شده در ایران شامل ۸۰۶ رکورد سه مؤلفه‌ای حاصل از زلزله‌های رخ داده طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۳ توسط موجک کویفلت ۵ به صورت فشرده ارائه می‌گردد. سطح فشرده‌سازی به صورت نسبت تعداد موجک‌های به کار رفته در رکورد فشرده‌شده به تعداد موجک‌های لازم برای معرفی دقیق رکورد اصلی تعریف می‌گردد. این فشرده‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود که جنبه‌های مهندسی اولیه پاسخ غیرخطی از قبیل انرژی ورودی زلزله، حداکثر توان ورودی زلزله و زمان خرابی سازه حفظ گردد.

۲- تئوری موجک

تبدیل گسسته موجک سیگنال S با عبور دادن آن از مجموعه ای از فیلترها حاصل می‌شود. در تجزیه تراز اول سیگنال به طور هم‌زمان از یک فیلتر بالاگذر و یک فیلتر پایین گذر عبور داده می‌شود. سیگنال عبور کرده از فیلتر بالاگذر در اصطلاح سیگنال جزئیات و سیگنال عبور کرده از فیلتر پایین گذر سیگنال تقریب خوانده می‌شود. از آنجایی که هر یک از این دو خروجی نیمی از محتوای فرکانسی سیگنال ورودی را دارند فرکانس قرائت به نصف کاهش داده می‌شود. سیگنال تقریب حاوی مؤلفه‌های مقیاس بالا (فرکانس پایین) و سیگنال جزئیات حاوی مؤلفه‌های مقیاس پایین (فرکانس بالا) سیگنال است. این تجزیه به طور متناوب برای افزایش دقت فرکانسی انجام می‌شود به طوری که سیگنال تقریب در هر مرحله از زوج فیلترهای بالا و پایین گذر عبور داده شده و به دو سیگنال جزئیات و تقریب جدید تجزیه می‌گردد و در ادامه فرکانس قرائت به نصف کاهش داده می‌شود. این عمل در قالب یک نمودار شاخه‌ای مطابق شکل (۱) قابل نمایش است که هر کدام از گره‌های آن یک زیرفضا با خاصیت موضعی زمانی-فرکانسی متفاوت را ارائه می‌دهد. این نمودار درختی بانک فیلتر خوانده می‌شود. تبدیل موجک حاصل تطابق بین محتوای فرکانسی سیگنال و مقیاس‌های مختلف تابع موجک است. این عمل با تقسیم سیگنال اصلی به مؤلفه‌هایی با فرکانس پایین و بالا انجام می‌شود تا منجر به کاهش نمونه‌ها گردد. در هر قسمت مؤلفه فرکانس پایین یک تقریب با رزولوشن پایین و مؤلفه با فرکانس بالا شامل جزئیات سیگنالی می‌باشد که حذف گردیده است. لذا بسط موجک تقسیم سیگنال در زیرپهنایها و بسط هر یک از آنها در یک سری از توابع موجک‌ها است که همگی دارای فرکانس متناظر مرکزی مرتبط با یک زیرپهنای می‌باشند بازسازی الگوریتم هرمی که به عبارتی تبدیل موجک سریع نیز نامیده می‌شود به صورت شماتیک در شکل (۱) نمایش داده شده است.

به‌عنوان تقریبی از رکورد واقعی تلفی گردند (Todorovska و همکاران، ۲۰۰۹).

Kaushik و همکاران (۲۰۱۶) با به کارگیری روشی موجک اقدام به شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها در نقاط مختلف نمودند که در آن فرمول‌بندی‌های انجام‌شده به منظور تجزیه تصادفی در دامنه موجک انجام پذیرفته است. Li و Wang (۲۰۱۶) نیز با به کارگیری روش موجک بسته‌ای، طیف‌های سازگار با حرکت زمین را ایجاد و شبیه‌سازی نموده‌اند به گونه‌ای که داده‌های به دست آمده خصوصیات زمانی و فرکانسی داده‌ها را به طور کامل در برداشته و بیش‌ترین خطای هم‌پوشانی داده‌های شبیه‌سازی شده با طیف واقعی کمتر از ۶٪ گردیده است.

فدوی امیری و همکاران (۱۳۹۶) با به کارگیری ترکیبی از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، الگوریتم ژنتیک و تحلیل سری‌های زمانی، ارتقاء قابل توجهی را از نظر سرعت و دقت در تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف برای شرایط ساختگاهی مختلف مشاهده کردند.

کاتبی و شعاعی پرچین (۱۳۹۶) با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم رقابت استعماری به محاسبه نیروهای بهینه کنترل با هدف برقراری تعادل بین کاهش پاسخ و انرژی کنترلی پرداخته‌اند. کرمی محمدی و خلج (۱۳۹۶) با ابزار تغییرات انحنای طول تیر و با محاسبه دیاگرام انحنای، روش‌های پردازش سیگنال همچون تبدیل موجک مفصل خمیری ایجادشده در تیر ساده تحت اثر زلزله را شناسایی نموده‌اند.

هدف از فشرده‌سازی داده‌های زلزله کاهش حجم آن جهت آنالیز سریع و صرفه‌جویی در زمان تحلیل نمی‌باشد بلکه هدف اصلی انتخاب یک زیر مجموعه یا تعدادی موجک جهت شناخت طبیعت حرکت زمین می‌باشد تا در این راستا و در گام بعدی تحقیق بتوان توزیع آماری این موجک‌ها را برحسب پارامترهایی از قبیل بزرگ، فاصله رومرکزی، شرایط سایت و ... توصیف نمود. از مزایای مهم تبدیل موجک در مقایسه با تبدیل فوریه، توانایی آن در تحلیل موضعی است. به عبارتی دیگر موجک‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا به واسطه یک پنجره، مقطع کوچکی از یک موج طولانی در حوزه زمان مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا و با توجه به تحقیقات انجام‌شده توسط Todorovska و همکاران (۲۰۰۹) از موجک‌های کویفلت به دلیل عملکرد مناسب، دارا بودن شکلی نسبتاً هموار، تقریباً متقارن و متعامد استفاده گردیده است. با این روش فشرده‌سازی رکوردهای زلزله‌های کالیفرنیا توسط نویسندگان این مقاله و طی یک کار تحقیقاتی مشترک با محققین دانشگاه USC انجام گردیده و چگونگی توزیع آماری این موجک‌ها و ارتباطشان با مشخصه‌های فیزیکی زلزله‌ها در حال بررسی می‌باشد. با توجه به تفاوت ساختار تکنیکی مناطق زلزله‌خیز دنیا از یکدیگر، نوآوری و ایده اصلی این مقاله انجام تحقیقاتی مشابه در

ضرایب بالا می‌باشد انجام می‌گردد (Vetterli و همکاران، ۱۹۹۵، Todorovska، ۲۰۰۱، Hao و Todorovska، ۲۰۰۳).

هدف از این تحقیق ارائه داده‌های شتاب‌نگاری ثبت شده در ایران توسط تعدادی موجک می‌باشد به نحوی که هم‌پوشانی مناسبی را برای داده‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی ارائه نموده و به خوبی بتواند پاسخ غیرخطی نوسانگر را پیش‌بینی نماید. در این راستا از بین توابع موجک، از موجک‌های کویفلت^۴ به دلیل عملکرد مناسب، دارا بودن شکلی نسبتاً هموار، تقریباً متقارن و متعامد استفاده گردیده است (Daubechies، ۱۹۹۲، Todorovska و همکاران، ۲۰۰۹). شکل (۲) فیلترهای تجزیه و بازسازی بالاگذر و پایین‌گذر موجک کویفلت ۵ را نشان می‌دهند. محور افقی در شکل‌های مذکور نشان‌دهنده تعداد نمونه‌ها (samples) می‌باشد. به‌منظور ارزیابی کیفیت روش فشرده‌سازی، مقدار انرژی، بیشینه توان ورودی زلزله و همچنین زمان خرابی نوسانگر غیرخطی تحت رکورد واقعی و رکورد فشرده‌سازی شده با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. انرژی یک زلزله از انتگرال مجذور سرعت در مدت زمان وقوع زلزله و توان زلزله نیز از مشتق انرژی حاصل به صورت زیر تعریف می‌گردند:

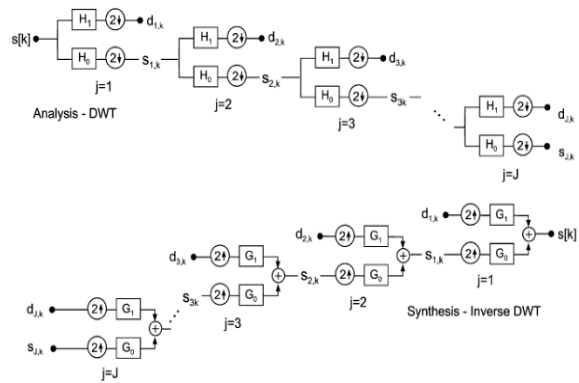
$$en(t_0) = \int_0^{t_0} v^2(t) dt \quad (2)$$

$$p(t) = \frac{d}{dt} en(t) \quad (3)$$

که در آن $v(t)$ سرعت حرکت زمین بوده و t_0 مدت زمان وقوع زلزله می‌باشد. توان ورودی زلزله به‌منظور کنترل خرابی ناشی از امواج غیرخطی منتشرشده در سازه اهمیت بسزایی دارد.

سیستم یک درجه آزادی غیرخطی معادل یک سازه به‌صورت آونگ وارونه با جرم و ارتفاع معادل m_b و H_e توسط فنر دورانی غیرخطی با سختی اولیه k و میراگر دورانی خطی با ضریب میرایی C به زمین متصل بوده و در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. پارامترهای نوسانگر طوری تعیین می‌گردند که بیانگر یک ساختمان N طبقه برشی با ارتفاع H و با فرکانس اصلی ω_0 و درصد میرایی ξ باشد. با این شروط مقادیر سختی و میرایی نوسانگر به ترتیب $\frac{k}{m_b H_e^2} = \omega_0^2$ و $\frac{c}{m_b H_e^2} = 2\xi\omega_0$ تعیین می‌گردند. با فرض این که مود اول ساختمان N طبقه مود حاکم باشد ارتفاع معادل نوسانگر برابر $H_e \approx 0.64H$ خواهد بود. پیروید اصلی ساختمان برشی N طبقه تقریباً برابر $T_0 \approx N/10$ بوده و با فرض ارتفاع طبقات برابر $3/5$ متر خواهیم داشت (Todorovska و همکاران، ۲۰۰۹):

$$H_e = 0.64 \times 3.5 \times 10 \times T_0 \quad (4)$$



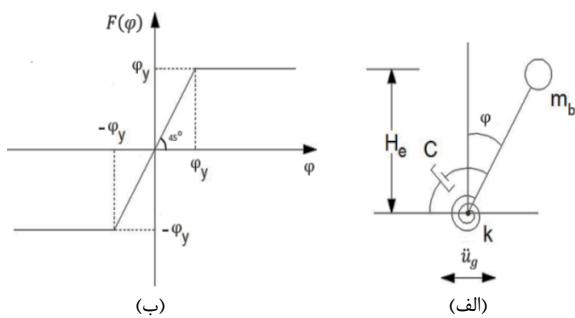
شکل ۱- الگوریتم هرمی تجزیه و بازسازی در تبدیل موجک سریع (Misiti و همکاران، ۱۹۹۷)

قسمت فوقانی این نمودار نشان‌دهنده بخش تجزیه یا تبدیل مستقیم بوده و بخش پایینی آن نشان‌دهنده بخش بازسازی ترکیبی یا تبدیل معکوس می‌باشد. اصول تبدیل موجک گسسته به روشی تحت عنوان تنظیم زیرپهنانها^۲ بر می‌گردد. در هر بار تجزیه یک پهنای فرکانسی از سیگنال اصلی جدا شده و باقی‌مانده در سیگنال تقریب ذخیره می‌شود. بنابراین سیگنال اصلی را نیز می‌توان از حاصل جمع سیگنال‌های به‌دست‌آمده استخراج نمود. عملیات تجزیه تا سطحی که اطلاعات قابل ملاحظه‌ای در سیگنال تقریب باقی نماند ادامه داده می‌شود. ویژگی مهم توابع پایه موجک متعامد آن است که بر اساس تساوی پارسوال^۳ انرژی سیگنال را به‌صورت انرژی هر یک از ترازها و ضرایب موجک آن‌ها تعیین می‌کند و به‌صورت رابطه زیر قابل بیان است:

$$\|s[n]\|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |s[n]|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^{N/2^j} |d_{j,k}|^2 + \sum_{k=1}^{N/2^j} |s_{j,k}|^2 \quad (1)$$

برای یک سیگنال فیلتر شده با فرکانس بالا مثل مثل شتاب زمین‌لرزه و دارای زیر پهنانهای متعدد (مقدار بزرگ J)، آخرین زیر پهنای دارای فرکانس پایین و انرژی ناچیزی بوده و ضرایب بسط $s_{j,k} \approx 0$ می‌باشند. بسط کامل شامل N عبارت است که سیگنال اصلی را توصیف می‌کند. تقریب کاهش زیرمجموعه‌ای از این عبارات می‌باشد که با حذف ضرایب دارای فرکانس پایین به دست آمده است. ابعاد و اندازه سیگنال می‌تواند تا زمانی کاهش یابد که اطلاعات مهم سیگنال را به واسطه تقریب آستانه‌ای حفظ نماید. این امر ضرورتاً شامل حذف عبارات مربوط به انرژی پایین است که دارای مقادیر $|d_{j,k}|$ کوچک‌تر می‌باشند و به منظور فراهم کردن شرایط تبدیل موجک هموار، این مقادیر کوچک نیز در حد امکان تغییر می‌یابند. بنابراین تقریب سیگنال با انرژی‌های بالا که شامل

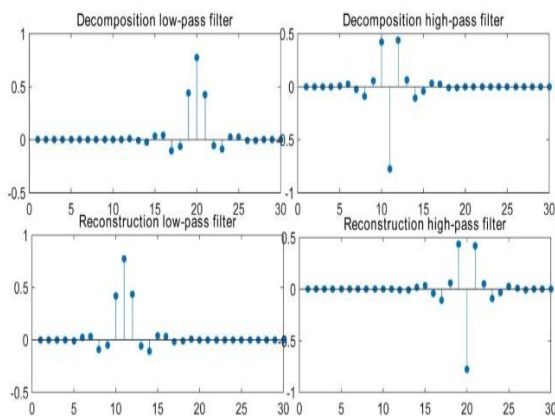
وزن که منجر به واژگونی (خرابی) نوسانگر می‌گردد در نظر گرفته شده است (Jalali و Trifunac، ۲۰۰۸).



شکل ۳- نوسانگر غیرخطی (Jalali و Trifunac، ۲۰۰۸)

۳- داده‌های شتاب‌نگاری ایران

در این تحقیق از ۸۰۶ رکورد سه مؤلفه‌ای حاصل از ۴۹۱ زلزله رخ داده در ایران بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۳، شامل ۳۰۵ ایستگاه مختلف، که توسط شبکه شتاب‌نگاری کشور (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴) به ثبت رسیده استفاده شده است. شکل (۴) محل ایستگاه‌های ثبت رکورد و مراکز زلزله را بر روی نقشه ایران نشان می‌دهد. از ۸۰۶ رکورد مورد استفاده ۵۹ رکورد آنالوگ و ۷۴۷ رکورد دیجیتال می‌باشند. شتاب‌نگاشت‌های موجود طی فرآیندی شامل تصحیح خط مبنا و حذف خطای فرکانس بالا (به‌وسیله اعمال فیلتر اورمزیبی^۵) مورد پردازش قرار گرفته‌اند (Lee و Trifunac، ۱۹۹۰). جدول (۱) جزئیات نمونه‌ای از داده‌های شتاب‌نگاری در نظر گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فیلترهای تجزیه و بازسازی بالاگذر و پایین‌گذر موجک Coiflet5 که محور افقی تعداد نمونه‌ها می‌باشد (Misiti و همکاران، ۱۹۹۷)

رفتار غیرخطی فنر دورانی نوسانگر به‌صورت ارتجاعی کاملاً خمیری (الاستو-پلاستیک) مطابق شکل (۳-ب) فرض می‌گردد که در آن زاویه دوران جاری‌شدگی نوسانگر می‌باشد. زاویه خرابی (واژگونی) استاتیکی φ_s را می‌توان با توجه به معادله تعادل استاتیکی نوسانگر به‌قرار زیر تعیین نمود:

$$k\varphi_y = m_b g H_e \sin \varphi_s \quad (5)$$

برحسب فرکانس طبیعی ω_0 :

$$\sin \varphi_s = \frac{\omega_0^2 H_e \varphi_y}{g} \quad (6)$$

زاویه دوران جاری‌شدگی φ را می‌توان به‌صورت زیر تعیین نمود:

$$\varphi_y = \frac{a_y}{\omega_0^2 H_e} \quad (7)$$

که a_y برابر شتابی است که به‌صورت استاتیکی موجب جاری شدن نوسانگر گردیده و مقدار آن برای ساختمان توسط تحلیل پوش‌آور به‌دست می‌آید. بنابراین معیار خرابی (واژگونی) استاتیکی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varphi > \varphi_s \quad (8)$$

از آنجایی که حرکت زلزله به‌صورت رفت و برگشتی است لذا جهت سادگی و نیز اطمینان از خرابی، معیار خرابی دینامیکی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود (Todorovska و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\varphi > 2\varphi_s \quad (9)$$

با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ (غیرخطی هندسی و مصالح) و در نظر گرفتن اثرات وزن، معادله حرکت نوسانگر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\cos^2 \varphi \ddot{\varphi} + 2\xi \omega_0 \dot{\varphi} + \omega_0^2 F(\varphi) = \frac{g}{H_e} \sin \varphi + \sin \varphi \cos \varphi \ddot{\varphi}^2 - \frac{\ddot{u}_g}{H_e} \cos \varphi \quad (10)$$

که مطابق شکل (۳) تابع بی‌بعد $F(\varphi)$ به‌صورت الاستو-پلاستیک و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F(\varphi) = \begin{cases} \varphi & |\varphi| < \varphi_y \\ +\varphi_y & \varphi > \varphi_y \\ -\varphi_y & \varphi < -\varphi_y \end{cases} \quad (11)$$

معادله دیفرانسیل غیرخطی (۱۳) به روش رانگ-کوتای^۵ مرتبه چهار حل می‌گردد. طبق معادله فوق ناپایداری دینامیکی ناشی از

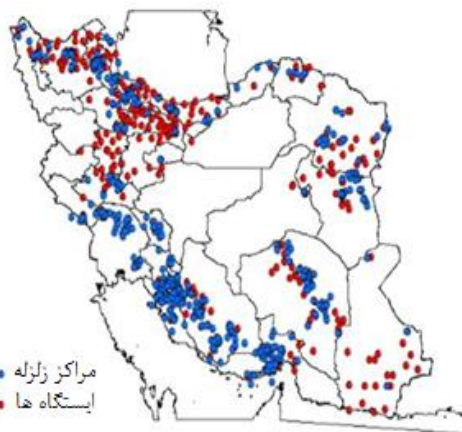
به دست آوردن شتاب، از آن‌ها به عنوان داده‌های ورودی برای محاسبه پاسخ نوسانگر غیرخطی استفاده می‌گردد. تراز تقریب به- عنوان درصدی از تعداد موجک‌هایی که سیگنال را به صورت دقیق ارائه می‌کنند بیان می‌شود. تعداد موجک‌هایی که برای بیان دقیق یک سیگنال مورد نیاز است متناسب با مدت زمان زلزله می‌باشد. در این تحقیق تقریب‌های یک تا ۸ درصد از ضرایب بالای موجک مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- جزئیات نتایج برای یک نمونه رکورد

جزئیات نتایج برای مؤلفه افقی طولی زلزله طیس با بزرگای $6/4^\circ$ ثبت شده در ایستگاه با عرض و طول جغرافیایی رومرکزی $33/37^\circ$ و $57/44^\circ$ و با فاصله رومرکزی $52/60$ کیلومتر و همچنین در این قسمت نشان داده شده است. مدت زمان زلزله $48/98$ ثانیه می‌باشد. همچنین از زلزله رودبار- منجیل نیز جهت مشاهده بهتر زمان خرابی در ثانیه‌های بالاتر با بزرگای $7/7$ ثبت شده در ایستگاه با عرض و طول جغرافیایی رومرکزی $36/96^\circ$ و $49/41^\circ$ و با فاصله رومرکزی 19 کیلومتر استفاده شده است. شکل (۵) ضرایب تبدیل موجک مؤلفه افقی طولی سرعت زلزله طیس با تقریب 8% را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع ضرایب بسط سری موجک به صورت میله‌ای و در طی زمان برای هر کدام از زیربازه‌های جزئی (d1-d6) و زیر بازه باقی‌مانده (A6) نشان داده شده است. به عبارت دیگر شکل (۵) بیانگر موقعیت موجک‌های به کار گرفته شده جهت تقریب رکورد واقعی در زمان و در فرکانس می‌باشد. بر اساس تساوی پارسوال (معادله (۴)) مربع ضرایب موجک میزان مشارکت آن‌ها را در انرژی سیگنال نشان می‌دهد. در بالای شکل (۵) نیز رکورد سرعت واقعی و تقریب زده شده جهت مقایسه نشان داده شده است.

جدول (۲) توزیع ضرایب بالای موجک را در زیربازه‌های مختلف جهت تقریب مؤلفه افقی طولی سرعت زلزله طیس به ازای سطح تقریب 1% ، 2% ، 4% ، 6% و 8% نشان می‌دهد. تعداد کل ضرایب استفاده شده در تقریب نیز در ردیف پایین جدول آورده شده است. همان طوری که ملاحظه می‌گردد هیچ ضریبی از زیر بازه‌های (d1(12.5-25 Hz) و d2(6.25-12.5 Hz) در تقریب سیگنال مشارکت نداشته‌اند.

شکل (۶) مقایسه‌ای بین رکوردهای واقعی و تقریبی را به ازای سطح تقریب 1% نشان می‌دهد. شکل (۶-الف) نشان‌دهنده تاریخچه شتاب و شکل (۶-ب) نشان‌دهنده تاریخچه سرعت می‌باشند. همان طوری که دیده می‌شود تطابق و هم‌پوشانی سیگنال سرعت بهتر از سیگنال شتاب می‌باشد چراکه آستانه- گذاری بر سیگنال سرعت اعمال شده و شتاب با مشتق‌گیری از



شکل ۴- محل ایستگاه‌های ثبت رکورد و مراکز زلزله

برای داده‌های شتاب‌نگاری در نظر گرفته شده فاصله رومرکزی^۷ و عمق کانونی زیر 150 کیلومتر و محدوده بزرگای در مقیاس سطحی (Ms) بین $2/8$ تا $7/7$ می‌باشد.

۴- تحلیل نتایج

پاسخ نوسانگر غیرخطی به روش عددی رانگ- کوتای مرتبه چهارم با شرایط اولیه صفر و گام زمانی $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ ثانیه محاسبه گردیده است. پاسخ نوسانگر به ازای پریودهای 0.25 ، 0.5 ، 1 و 2 ثانیه و درصد میرایی $\xi = 5\%$ تعیین گردیده است. با انجام تحلیل- های متعدد و بررسی پاسخ‌ها و به منظور جاری شدن نوسانگر، مقدار $a_y = 1 \text{ cm/s}^2$ برای شتاب تسلیم در نظر گرفته شده است طوری که نوسانگر تحت اثر وزن دچار ناپایداری دینامیکی یا خرابی (واژگونی) می‌گردد. بدین ترتیب مجموعه‌ای از داده‌های شتاب‌نگاری خواهیم داشت که سبب ناپایداری در نوسانگر گردیده و می‌توان زمان وقوع خرابی (واژگونی) آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری اخذ شده از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی توسط فیلتر میان‌گذر اورمزی تصحیح گردیده‌اند بدین ترتیب که فرکانس قطع پایین فیلتر، کنترل‌کننده تصحیح خط مبنا و متغیر بوده و بسته به نسبت طیف فوریه سیگنال به طیف فوریه نویز دستگاه شتاب‌نگار تعیین می‌گردد (Hao و Todorovska، ۲۰۰۳).

فرکانس قطع بالای فیلتر نیز با توجه به خطای عددی‌سازی و خطای دستگاهی تعیین می‌گردد. بسط موجک توسط جعبه‌ابزار موجک نرم‌افزار متلب^۸ صورت گرفته بدین صورت که داده‌های سرعت مستخرج از شتاب‌نگاشت‌ها در شش تراز پایه ارتونرمال^۹ موجک کوپفلت ۵ (در L2) بسط داده شده و با استفاده از ضرایب موجک با بزرگ‌ترین دامنه بازسازی می‌شوند. با مشتق‌گیری از سرعت داده‌های بازسازی‌شده (با سری موجک‌های کوتاه شده) و

9. Orthonormal

7. Epicentral distance

8. MATLAB

سرعت به دست می‌آید. همچنین سیگنال سرعت در زیربازه‌های تمام یا قسمتی از ضرایب موجک در این زیربازه‌ها حذف خواهند شد (جدول (۲)).

جدول ۱- جزئیات نمونه‌ای از داده‌های شتاب‌نگاری در نظر گرفته شده در این تحقیق

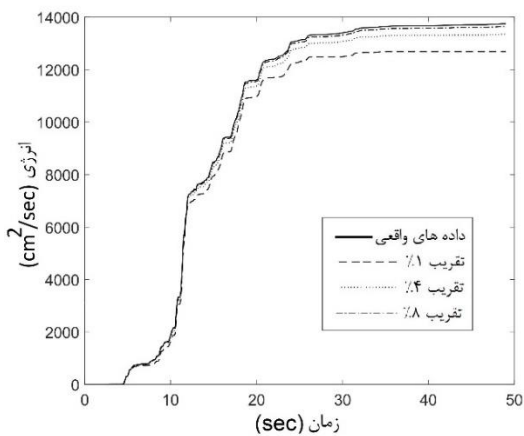
نام زلزله (تعداد ایستگاه)	زمان رخداد زلزله	عرض جغرافیایی رومرکزی (درجه)	طول جغرافیایی رومرکزی (درجه)	عمق کانونی (کیلومتر)	بزرگا (Ms)
فائن (۳)	۱۹۷۶/۱۱/۰۷-۰۴:۰۰	۳۳/۸۲	۵۹/۱۹	۶	۶/۴
خورگو (۳)	۱۹۷۷/۰۳/۲۱-۲۱:۱۸	۲۷/۵۹	۵۶/۴۲	۲۴	۶/۹
قائنات (۲)	۱۹۷۷/۰۴/۰۶-۱۳:۳۶	۳۱/۹	۵۰/۷۶	۴۳	۶/۱
طبس (۶)	۱۹۷۸/۰۹/۱۶-۱۵:۳۵	۳۳/۳۷	۵۷/۴۴	۳۴	۷/۴
کاریزان (۵)	۱۹۷۹/۱۱/۱۴-۰۲:۲۱	۳۴/۰۳	۵۹/۸۱	۳	۶/۷
کلی- بنیاباد (۱۱)	۱۹۷۹/۱۱/۲۷-۱۷:۱۰	۳۴/۰۵	۵۹/۶۳	۹	۷/۱
گلباف (۲)	۱۹۸۱/۰۶/۱۱-۰۷:۲۴	۲۹/۹	۵۷/۷۲	۳۱	۶/۶
سیرج (۵)	۱۹۸۱/۰۷/۲۸-۱۷:۲۲	۲۹/۹۹	۵۲/۷۷	۱۱	۷
رودبار- منجیل (۷)	۱۹۹۰/۰۶/۲۰-۲۱:۰۰	۳۶/۹۶	۴۹/۴۱	۱۹	۷/۷
فیروزآباد (۱)	۱۹۹۴/۰۳/۰۱-۰۳:۴۹	۲۹/۰۹	۵۲/۶۱	۱۲	۶
زنجران (۶)	۱۹۹۴/۰۶/۲۰-۰۹:۰۹	۲۸/۹۶	۵۲/۶۱	۸	۵/۷
گرمخان (۷)	۱۹۹۷/۰۲/۰۴-۱۰:۳۷	۳۷/۷۱	۵۷/۴۹	۱۴	۶/۶
سرعین (۱۴)	۱۹۹۷/۰۲/۲۸-۱۲:۵۷	۳۷/۹۹	۴۸/۱۵	۲۸	۶/۱
زیرکوه قائنات- ارده کل (۱۰)	۱۹۹۷/۰۵/۱۰-۵۷/۰۷	۳۳/۸۳	۵۹/۸۹	۱۰	۷
گلباف (۳)	۱۹۹۸/۰۳/۱۴-۱۸:۴۰	۳۰/۱۶	۵۷/۶۲	۱۰	۶/۷
کاره یاس (۶)	۱۹۹۹/۰۵/۰۶-۲۳:۰۰	۲۹/۴۹	۵۱/۸۹	۲	۶/۳
چنگوره- آواج (۲۰)	۲۰۰۲/۰۶/۲۲-۰۲:۵۸	۳۵/۶۶	۴۸/۹۲	۱۲	۶/۴
بم (۸)	۲۰۰۳/۱۲/۲۶-۰۱:۵۶	۳۹/۰۴	۵۸/۲۳	۷	۶/۸
کجور- فیروزآباد (۴۸)	۲۰۰۴/۰۵/۲۸-۱۲:۳۸	۳۶/۲۸	۵۱/۶۱	۱۶	۶/۳
زرنند (۱۱)	۲۰۰۵/۰۲/۲۲-۰۲:۲۵	۳۰/۸	۵۶/۷۷	۱۰	۶/۴
قشم- خلیج فارس (۵)	۲۰۰۵/۱۱/۲۷-۱۰:۲۲	۲۶/۷۸	۵۵/۹	۲۲	۵/۸
قشم (۱)	۲۰۰۵/۱۱/۲۷-۱۶:۳۰	۲۶/۷۷	۵۵/۷	۱۱	۵/۳
سیلاخور (۱۷)	۲۰۰۶/۰۳/۳۱-۰۱:۱۷	۳۳/۶۹	۴۹	۹	۵/۹
کاهک (۱۰)	۲۰۰۷/۰۶/۱۸-۱۴:۲۹	۳۴/۵۶	۵۰/۹۱	۷	۵/۱
مسجد سلیمان (۱)	۲۰۰۹/۱۰/۰۴-۲۱:۵۰	۳۱/۹۴	۴۹/۴۲	۱۰	۴/۷
پاکدشت- ری (۴)	۲۰۰۹/۱۰/۱۷-۱۰:۵۳	۳۵/۵۸	۵۱/۵۹	۱۲	۳/۷
تریت حیدریه (۹)	۲۰۱۰/۰۷/۳۰-۱۳:۵۰	۳۵/۲۸	۵۹/۲۶	۲۰	۵
کازرون (۵)	۲۰۱۰/۰۹/۲۷-۱۱:۲۲	۲۹/۷۸	۵۱/۷۶	۱۸	۵/۵
سپیدان (۱)	۲۰۱۱/۰۱/۰۵-۰۵:۵۵	۳۰/۱۶	۵۱/۷	۱۲	۵
محمدآباد ریگان (۵)	۲۰۱۱/۰۱/۲۷-۰۸:۳۸	۲۸/۱۵	۵۹	۱۲	۶/۲
بابامنیر (۳)	۲۰۱۱/۰۳/۰۵-۱۱:۲۴	۳۰	۵۱/۱۹	۸	۴/۸
شرق ترکیه (۲)	۲۰۱۱/۱۰/۲۳-۱۰:۴۱	۳۸/۵۱	۴۳/۴۶	۶	۵/۵
نیشابور (۳)	۲۰۱۲/۰۱/۱۹-۱۲:۳۵	۳۶/۳۴	۵۸/۹۲	۱۶	۵
مرمری (۱)	۲۰۱۲/۰۵/۰۳-۱۰:۰۹	۳۲/۸۸	۴۷/۷۲	۱۰	۴/۸
اهر- ورزقان ۱ (۲۳)	۲۰۱۲/۰۸/۱۱-۱۲:۲۳	۳۸/۵۲	۴۶/۸۶	۱۲	۶/۶
اهر- ورزقان ۲ (۲۷)	۲۰۱۲/۰۸/۱۱-۱۲:۳۴	۳۸/۴۵	۴۶/۷۵	۱۹	۶/۵
گشت (۲)	۲۰۱۳/۰۴/۱۶-۱۰:۳۴	۲۸/۲۴	۶۲/۱۴	۷۰	۷/۷

توسط آستانه‌گذاری است که مؤلفه‌های با فرکانس بالا و دامنه کوچک حذف و مؤلفه‌های با دامنه بزرگ حفظ می‌شوند (Todorovska و همکاران، ۲۰۰۹). شکل (۷) تغییرات انرژی ورودی را بر حسب زمان برای رکورد واقعی (۱۰۰٪) و تقریب‌های مختلف مؤلفه افقی طولی زلزله طیس نشان می‌دهد. با افزایش درصد تقریب مطابقت خطوط با منحنی انرژی رکورد واقعی بیشتر می‌گردد.

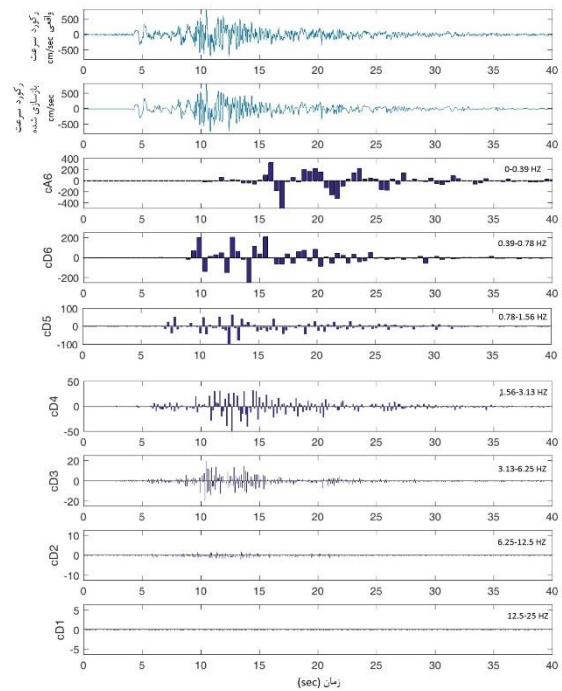
شکل (۸) نیز مقایسه بین ورودی رکوردهای واقعی و تقریبی را با سطح تقریب ۱٪ نمایش می‌دهد. در محدوده خطی پاسخ، تغییرات کوچک در داده‌های حرکت زمین منجر به تغییرات کوچک در پاسخ نوسانگر می‌شود. لیکن در حالت غیرخطی این امر صادق نیست. برای نوسانگر الاستو-پلاستیک در نظر گرفته شده در این تحقیق از زمان خرابی یا ناپایداری (واژگونی) نوسانگر به‌عنوان معیاری جهت ارزیابی روش فشرده‌سازی به‌کمک موجک استفاده گردیده است.

جدول ۲- توزیع ضرایب بالای موجک در تقریب مؤلفه افقی طولی سرعت زلزله طیس به ازای سطوح مختلف تقریب

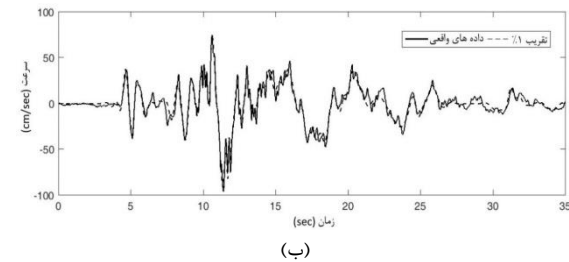
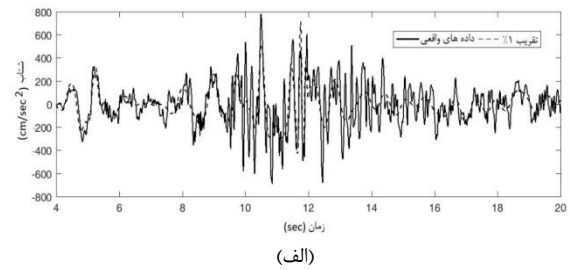
تقریب	محدوده فرکانس (هرتز)						
	پایین	۱٪	۲٪	۴٪	۶٪	۸٪	۱۲٪
D1	۱۲/۵۰	۲۵/۰۰	۰	۰	۰	۰	۰
D2	۶/۲۵	۱۲/۵۰	۰	۰	۰	۰	۰
D3	۳/۱۳	۶/۲۵	۰	۰	۰	۰	۶۷
D4	۱/۵۶	۳/۱۳	۱	۱۱	۳۶	۷۸	۱۰۷
D5	۰/۷۸	۱/۵۶	۵	۱۷	۴۶	۶۷	۸۱
D6	۰/۳۹	۰/۷۸	۲۰	۲۹	۴۰	۴۸	۵۳
A6	۰/۰۰	۰/۳۹	۲۴	۴۴	۶۶	۷۶	۱۰۵
تعداد کل ضرایب استفاده شده							۵۰
							۱۰۱
							۲۰۲
							۳۰۴
							۴۰۵



شکل ۷- تغییرات انرژی بر حسب زمان برای رکورد واقعی و تقریبی مؤلفه افقی طولی زلزله طیس

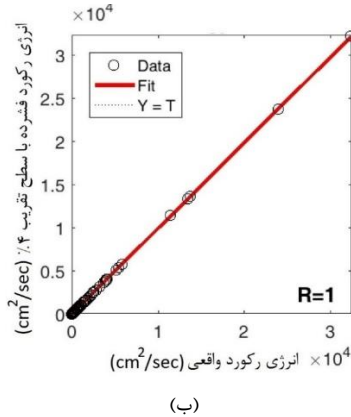
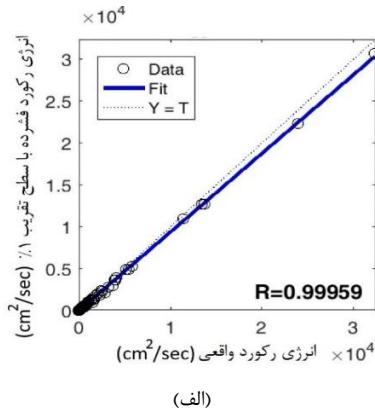


شکل ۵- ضرایب بسط موجک با سطح تقریب ۸٪ برای مؤلفه افقی طولی سرعت زلزله طیس ترسیم‌شده بر حسب زمان و در زیربازه‌های مختلف. رکورد واقعی و تقریب زده شده نیز در بالای شکل نشان داده شده است

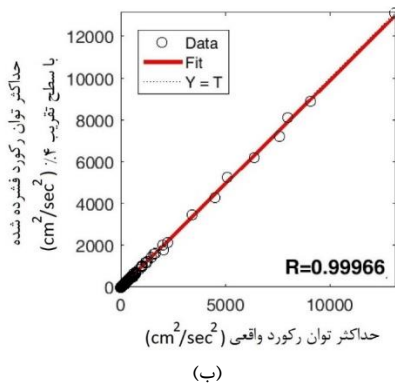
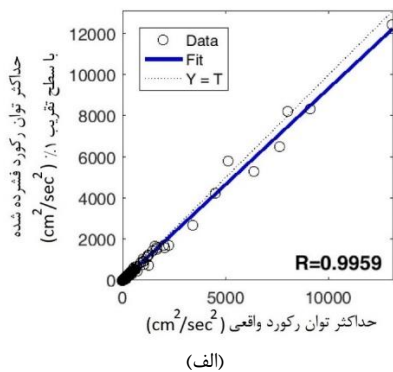


شکل ۶- مقایسه بین رکوردهای واقعی و تقریبی مؤلفه افقی طولی شتاب و سرعت زلزله طیس به ازای سطح تقریب ۱٪

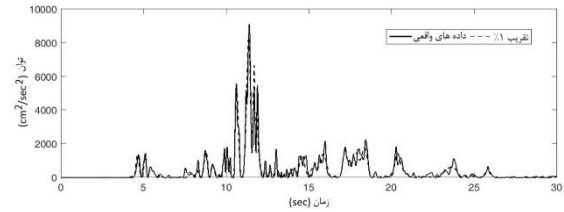
با فرکانس بالا و دامنه کوچک حذف گردیده و هموار گشته‌اند لیکن موجک‌های با دامنه بزرگ همچنان در سیگنال تقریبی (حتی شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد اگرچه در این سطوح از تقریب‌ها موجک‌های در سیگنال شتاب تقریبی) به‌خوبی نمایش داده شده و حضور دارند و این امر از مشخصه فشرده‌سازی رکورد



شکل ۱۰- همبستگی بین انرژی رکوردهای واقعی و تقریبی (فشرده) برای داده‌های شتاب‌نگاری ایران به ازای سطوح تقریب ۱٪ و ۴٪.

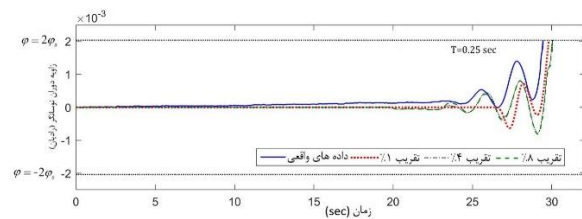


شکل ۱۱- همبستگی حداکثر توان رکوردهای واقعی و تقریبی (فشرده) برای داده‌های شتاب‌نگاری ایران به ازای سطوح تقریب ۱٪ و ۴٪.



شکل ۸- تغییرات توان برحسب زمان برای رکورد واقعی و تقریبی مؤلفه افقی طولی زلزله طیس با سطح تقریب ۱٪.

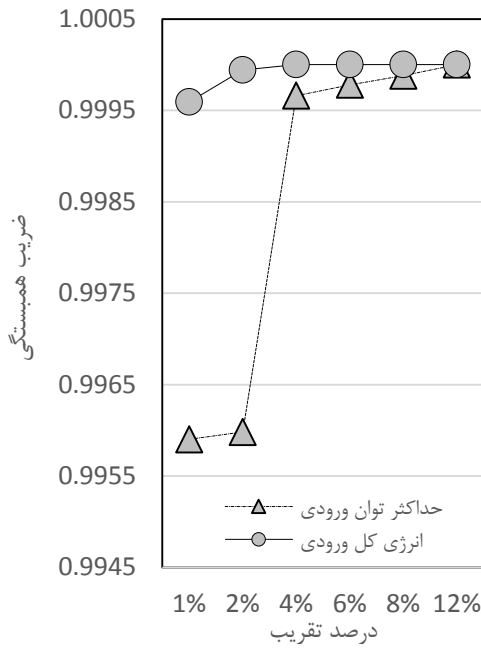
در این راستا یک نوسانگر خیلی ضعیف با $a_y=1\text{cm/s}^2$ انتخاب گردیده طوری که تحت اکثر رکوردهای انتخابی دچار واژگونی (خرابی) گردیده است. شکل (۹) مقایسه بین پاسخ غیرخطی نوسانگر تحت مؤلفه افقی طولی زلزله بم را تا زمان خرابی ($\varphi=\pm 2\varphi_s$) و با سطوح تقریب ۱٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۰۰٪ نشان می‌دهد. نوسانگر دارای پریود ۰/۲۵ ثانیه می‌باشد.



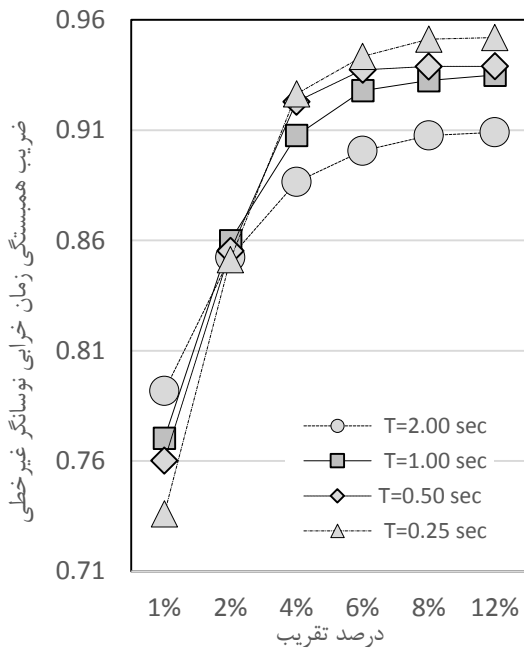
شکل ۹- مقایسه بین پاسخ غیرخطی نوسانگر تحت رکورد واقعی و تقریبی مؤلفه افقی طولی زلزله رودبار- منجیل با سطوح تقریب ۱٪، ۴٪، ۸٪ نوسانگر دارای پریود ۰/۲۵ ثانیه و شتاب تسلیم $a_y=1\text{cm/s}^2$ می‌باشد (شکل بالا کل زمان زلزله تا زمان خرابی و شکل پایین بخش مربوط به خرابی با بزرگ‌نمایی مناسب)

۲-۴- نتایج آماری حاصل از تبدیل مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ایران

جهت ارزیابی روش فشرده‌سازی با تبدیل موجک نتایج آماری حاصل از تبدیل مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ثبت شده در ایران، که شامل ۸۰۶ رکورد سه مؤلفه‌ای حاصل از ۴۹۱ زلزله رخ داده طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۳ می‌باشد (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴) در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) ارائه شده است. شکل (۱۰) همبستگی بین انرژی رکوردهای واقعی و فشرده (تقریبی) و شکل (۱۱) همبستگی بین حداکثر توان رکوردهای واقعی و فشرده را برای مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ایران و به ازای سطوح تقریب ۱٪ و ۴٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد حتی با در نظر گرفتن ۱٪ ضرایب بالای موجک، همبستگی بالایی بین انرژی و حداکثر توان رکوردهای واقعی و فشرده وجود دارد. شکل (۱۲) همبستگی بین زمان خرابی (واژگونی) نوسانگر غیرخطی با پریود ۰/۵ ثانیه تحت رکوردهای واقعی و تقریبی برای مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ایران و به ازای سطوح تقریب ۱٪ و ۴٪ را نشان می‌دهد.



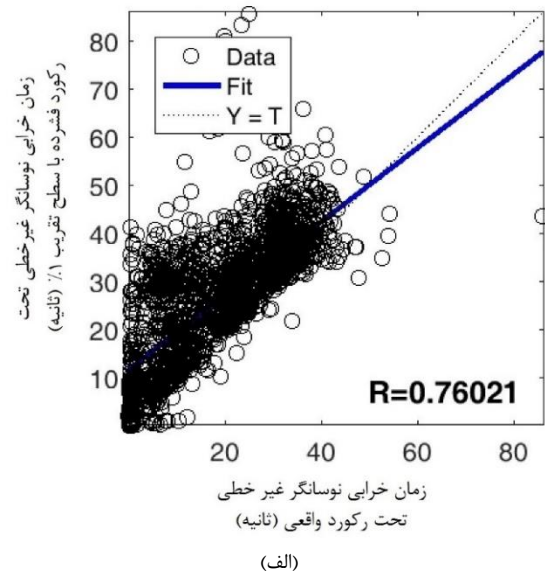
(الف)



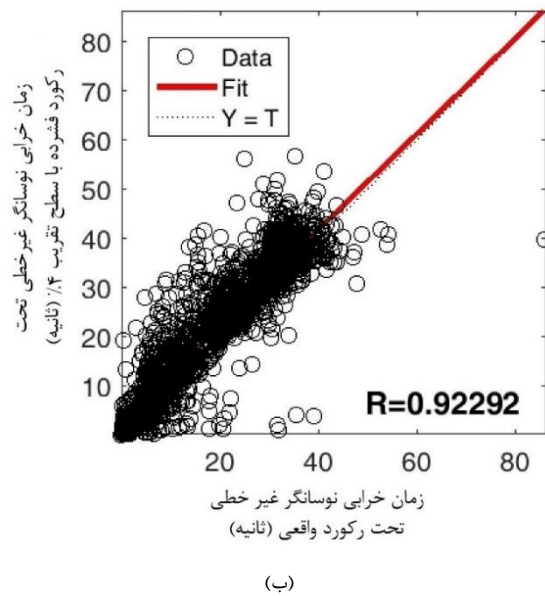
(ب)

شکل ۱۳- الف) ضریب همبستگی حداکثر توان ورودی و انرژی، ب) ضریب همبستگی زمان خرابی نوسانگر غیرخطی به ازای پریودهای مختلف T=0.25, 0.5, 1, 2 sec

همان طوری که قبلاً ذکر شد در محدوده غیرخطی پاسخ، تغییراتی هرچند کوچک در داده‌های حرکت زمین می‌تواند منجر به تغییراتی قابل توجه در پاسخ نوسانگر گردد. از مشخصه فشرده‌سازی رکورد است که پالس‌های با فرکانس بالا و دامنه کوچک حذف و پالس‌های با دامنه بزرگ حفظ می‌شوند و تبدیل موجک فرکانس و زمان وقوع این پالس‌ها را در طی رکورد



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- همبستگی بین زمان خرابی (واژگونی) نوسانگر غیرخطی با پریود T=0.5 sec تحت رکوردهای واقعی و تقریبی (فشرده) برای مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ایران در سطوح تقریب ۱٪ و ۴٪

شکل (۱۳) نیز ضرایب همبستگی انرژی، حداکثر توان و زمان خرابی نوسانگر غیرخطی به ازای پریودهای مختلف تحت رکوردهای واقعی و تقریبی (فشرده) برای مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ایران را به ازای سطوح مختلف تقریب نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌گردد ضریب همبستگی انرژی و حداکثر توان حتی به ازای سطح تقریب ۱٪ بسیار بالا بوده (R=0.99) و با افزایش سطح تقریب سریعاً افزایش می‌یابد و در سطح تقریب ۴٪ به یک نزدیک می‌شود.

کرمی محمدی ر، خلج م، "شناسایی مفصل خمیری در تیر ساده تحت اثر زلزله با محاسبه دیاگرام انحنای"، مقاله علمی-پژوهشی مهندسی شریف، ۱۳۹۶، ۱۰۴-۹۹.

فدوی امیری م ر، سلیمانی ابوری س ع، حسن پور ح، شامخی امیری م، "شبیه سازی شتابنگاشت مصنوعی زلزله سازگار با طیف ساختمانگاه با استفاده از تحلیل سری های زمانی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۶، ۴ (۳)، شماره پیاپی ۱۳، ۸۰-۶۸.

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴، <http://www.bhrc.ac.ir>

موسوی خلخالی س ع، پورشاه م، افشین ح، چنقلو م ر، "معرفی یک روش مناسب برای ارزیابی سریع آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های مسکونی در تبریز"، نشریه علمی- پژوهشی عمران و محیط زیست، انتشار آنلاین.

Daubechies I, "Ten lectures on wavelets", Society for Industrial Application of Mathematics (SIAM), Philadelphia, Pennsylvania, 1992.

Jalali RS, Trifunac MD, "A note on strength-reduction factors for design of structures near earthquake faults", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28, 212-222.

Kaushik SVK, Gupta RC, George, "Wavelet-based generation of spatially correlated accelerograms", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 87, 116-124.

Lee VW, Trifunac MD, "Automatic Digitization and Processing of Accelerograms Using PC", Department of Civil Engineering, Report 90-03, Univ. Southern California, Los Angeles, California, 1990.

Li Y, Wang G, "Simulation and generation of spectrum-compatible ground motions based on wavelet packet method", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 87, 44-51.

Luciano Telesca Vincenzo Lapenna Nikos Alexis Multiresolution wavelet analysis of earthquakes Chaos, Solitons & Fractals Volume 22, Issue 3, November 2004, Pages 741-748.

Mallat SG, "Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L_2(R)$ ", Transactions of the American Mathematical Society, 1989, 315, 69-87.

Todorovska MI, Meidani H, Trifunac MD, "Wavelet approximation of earthquake strong ground motion-goodness of fit for a database in terms of predicting nonlinear structural response", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29, 742-751.

Todorovska MI, Trifunac MD, "Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building I: the data and time-frequency analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27 (6), 564-76.

Todorovska MI, "Estimation of instantaneous frequency of signals using the continuous wavelet transform", Department of Civil Engineering, Report CE01-07,

در نظر می گیرد. به عبارت دیگر مدت زمان رکوردهای اصلی و فشرده شده یکسان بوده لیکن در رکورد فشرده شده فقط پالس های قوی و پرانرژی در زمان منحصر به خود حضور دارند و نتایج نشان می دهند که همبستگی برای زمان خرابی نوسانگر نسبت به انرژی و حداکثر توان کم تر بوده لیکن به ازای سطح تقریب بیش از ۰.۲٪ ضریب همبستگی زمان خرابی نوسانگر به ازای تمام پیوندهای در نظر گرفته شده بیش از ۰/۸۵ می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق جهت فشرده سازی داده های شتابنگاری ثبت شده در ایران توسط موجک از توابع پایه کوپفلت ۵ که متعامد، تقریباً متقارن و هموار می باشند استفاده گردیده و سرعت حرکت زمین برحسب این توابع بسط داده شده است. جهت تقریب رکورد اصلی از توابع موجکی که حاوی بیشترین انرژی زلزله یا به عبارت دیگر دارای بزرگترین ضریب هستند استفاده گردیده و درصد موجک های به کار گرفته شده در تقریب بیانگر سطح تقریب می باشد. جهت صحت سنجی روش به کار گرفته شده، انرژی، حداکثر توان ورودی و نیز زمان خرابی نوسانگر غیرخطی تحت رکوردهای واقعی و تقریبی برای مجموعه داده های شتابنگاری ثبت شده در ایران با یکدیگر مقایسه گردیده اند. نتایج همبستگی بسیار بالایی را ($R > 0.99$) برای انرژی و حداکثر توان ورودی ناشی از رکوردهای واقعی و تقریبی حتی با سطح تقریب ۰.۱٪ نشان می دهد. ضریب همبستگی برای زمان خرابی نوسانگر غیرخطی تحت رکوردهای واقعی و فشرده، که در اثر وزن دچار ناپایداری دینامیکی می گردد، کوچک تر بوده لیکن به ازای سطح تقریب بیش از ۰.۲٪ مقدار آن بیش از ۰/۸۵ می باشد.

۶- تقدیر و تشکر

از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که مجموعه داده های شتابنگاری ایران را در اختیار محققین این مقاله قرار داده است و همچنین از پروفیسور M. D. Trifunac و پروفیسور M. I. Todorovska از اساتید دانشگاه کالیفرنیا جنوبی (USC) به دلیل مساعدت و همکاری در امر تصحیح و پردازش داده های زلزله ایران تشکر و قدردانی می گردد.

۷- مراجع

کاتبی ج، شعاعی پرچین م، "کنترل بهینه ارتعاشات سازه ها با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم رقابت استعماری"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی شریف، زمستان ۱۳۹۶، ۳۳ (۲)، شماره ۴/۱، ۱۳۵-۱۴۳.

University of Southern California, Los Angeles, CA, 2001.

Todorovska MI, Hao TY, "Information granulation and dimensionality reduction of seismic vibration monitoring data using orthonormal discrete wavelet transform for possible application to data mining", Report CE 03-02, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, 2003.

Todorovska MI, Hao TY, "Information granulation and dimensionality reduction of seismic vibration monitoring data using orthonormal discrete wavelet transform for possible application to data mining", Report CE 03-02, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, 2003

Vetterli M, Kovaċ eJ, "Wavelets and sub-band coding "Upper Saddle River", N J: Prentice-Hall PTR, 1995.

Misiti M, Misiti Y, Oppenheim G, Poggi JM, "Wavelet Toolbox User Guide For use in MATLAB", the Math Works, Inc. 1997.

EXTENDED ABSTRACTS

Iran Accelerograph Data Contraction Using Wavelet Analysis

Afshin Pourtaghi, Reza Saleh Jalali*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 19 February 2018; Accepted: 25 April 2019

Keywords:

Earthquake, Wavelet analysis, Energy, Power, Nonlinear seismic response, Collapse time.

1. Introduction

The main purpose of this paper is to find an approximation of Iran strong motion records by a relatively small number of pulses (i.e. wavelets in an orthogonal wavelet family) considering wavelet importance in introducing the nature of ground strong motion. The Coiflet 5 wavelet family is used, which is orthogonal, smooth and nearly symmetric. Such representation is obtained by the expansion of velocity in orthogonal wavelet series using the Fast Wavelet Transform, and approximation by only the largest energy terms in the series. The goodness of the approximation is examined. The efficiency of the procedure is assessed by comparison some seismic indices such as input seismic energy, peak power and nonlinear oscillator collapse time which are achieved from the main and contracted signals.

2. Methodology

2.1. Wavelet series representation of discrete time signals

For a basis of compactly supported wavelets, the coefficients of the expansion are computed by the pyramid algorithm, which consists of splitting the original signal in a low- and high-frequency component followed by downsampling by a factor of two, and further recursively splitting the lower frequency component, J times total. In each splitting, the low-frequency component is a lower-level resolution approximation, and the high-frequency component contains the detail of the signal that was removed. Hence, the wavelet expansion is nothing else but splitting the signal in subbands, and expanding each subband in a series of wavelet functions, which are shifts of one another, and all have central frequency corresponding to the one of the subband (Todorovska et al., 2009).

2.2. Measures of goodness of fit in terms of nonlinear oscillator response

As measures of goodness of the approximation, the energy and peak power of the input ground motion and subsequently the corresponding times of collapse of a nonlinear oscillator excited by such motions from the exact signal and from the approximation are compared. These quantities were estimated as follows.

3. Results and discussion

3.1. Detailed results for a sample record

Fig. 1 shows a wavelet map of the coefficients for the Tabas record of the top 8% of the wavelet coefficients. Such maps show the wavelet coefficients (coefficients of expansion in wavelet series) plotted as vertical bars versus the central time (centroid in the time domain) of the corresponding wavelet, for each of the detail subbands (cD1-cD6) and the remaining smooth subband (cA6). The frequency bounds indicated for

* Corresponding Author

E-mail addresses: afshinpourtaghi@gmail.com (Afshin Pourtaghi), saleh@guilan.ac.ir (Reza Saleh Jalali).

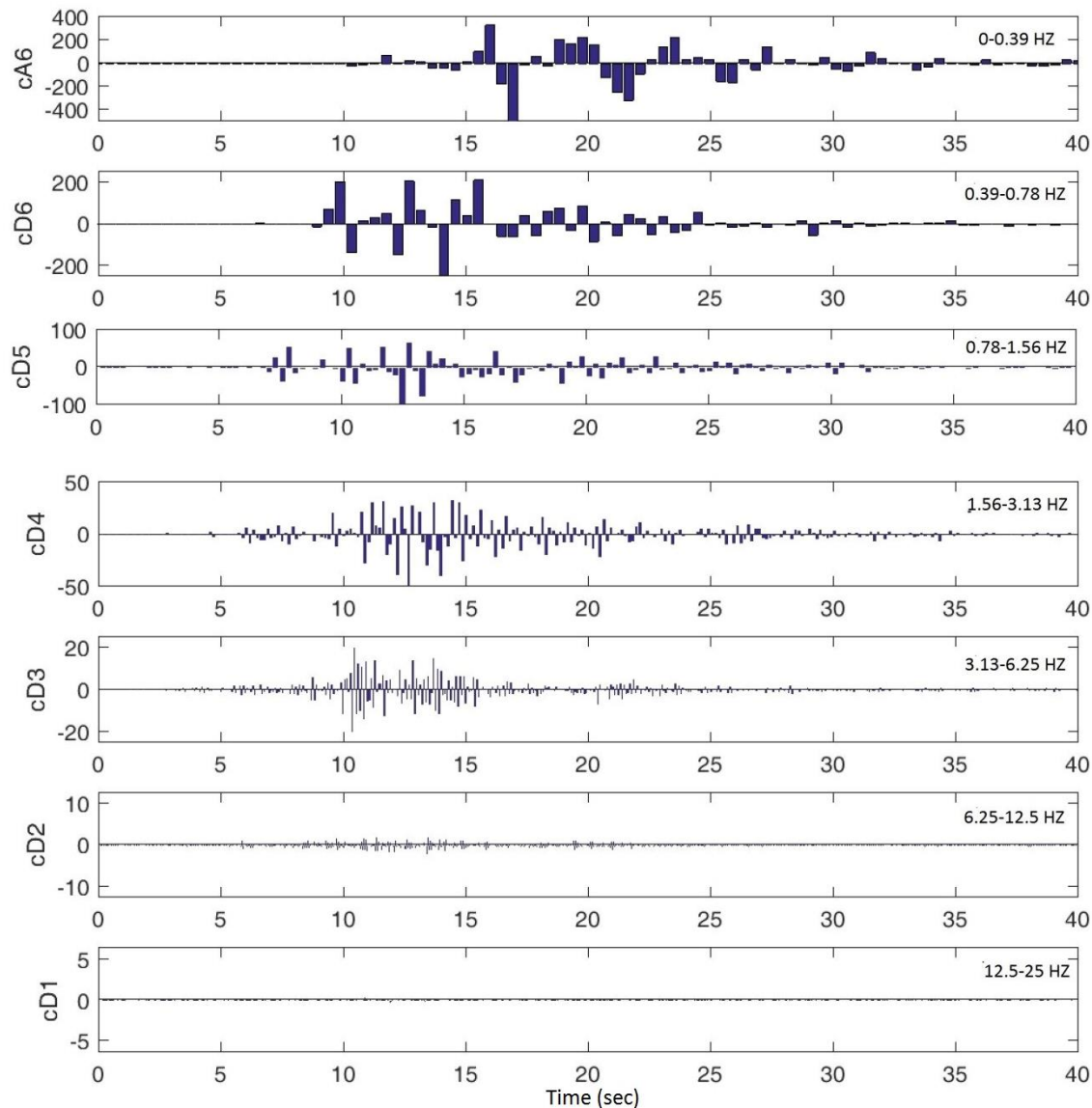


Fig. 1. The top 8% wavelet coefficients of the expansion of the velocity of component Tabas strong motion record, plotted versus their central time for each sub band.

Each subband are those for ideal (box) filters. The actual filters decay gradually across the ideal bounds to avoid the Gibbs effect, and consequently there is some partial overlap between these intervals for the actual filters used. The wavelet maps, therefore, show the position of the wavelets used for the approximation both in time and in frequency. According to the Parseval equality, the square of these coefficients would be the contribution of the corresponding term in the series to the energy of the (velocity) signal. Such a map, therefore, indicates the distribution of the energy of the signal on the time–frequency plane.

Comparing the exact and approximated motions for the 1% and 4% level approximations of the acceleration, velocity, power and energy time history, it can be seen that the agreement is better for the velocity than for the acceleration signals, which is due to the fact that the thresholding was applied to the velocity signal, from which the acceleration was then derived by differentiation, and that the velocity signal has less energy in the higher-frequency subbands, leading to all or most coefficients in these subbands being eliminated by the thresholding. These plots also show that, while the low-amplitude high-frequency pulses are smoothed in such low approximation levels, the largest amplitude pulses are still represented quite well even in the acceleration signals. This is characteristic to data compression by thresholding, in which the high-frequency components are filtered where they are small but are preserved where they are significant. It can be also seen that the growth of energy of the input ground motion with time, for the actual and approximations by 1%, 4%, 6% and 8% of the coefficients will be closer by further increasing the number of coefficients. The comparison between the power versus time for the exact signal and the 1% approximation demonstrates good fitness of them. Consequently it is obvious that this approximation represents quite well the peaks in the power time history,

and in particular the largest peaks. For collapse times of nonlinear SDOF oscillator in the linear range of response, small difference in the input motion implies small difference in the response of the oscillator. However, that does not hold for the nonlinear range. For the bi-linear oscillator considered in this study, the agreement of the time of collapse was chosen as a measure of the goodness of fit, and a weak oscillator was chosen for this test that would fail for most of the records in the database. Figure 2 depicts the correlation coefficients distribution of peak power, total energy and collapse time of nonlinear oscillator in different periods for actual and contracted signals of 806 records. This figure illustrates high correlation of these indices that can be confirm the procedure efficiency and capability.

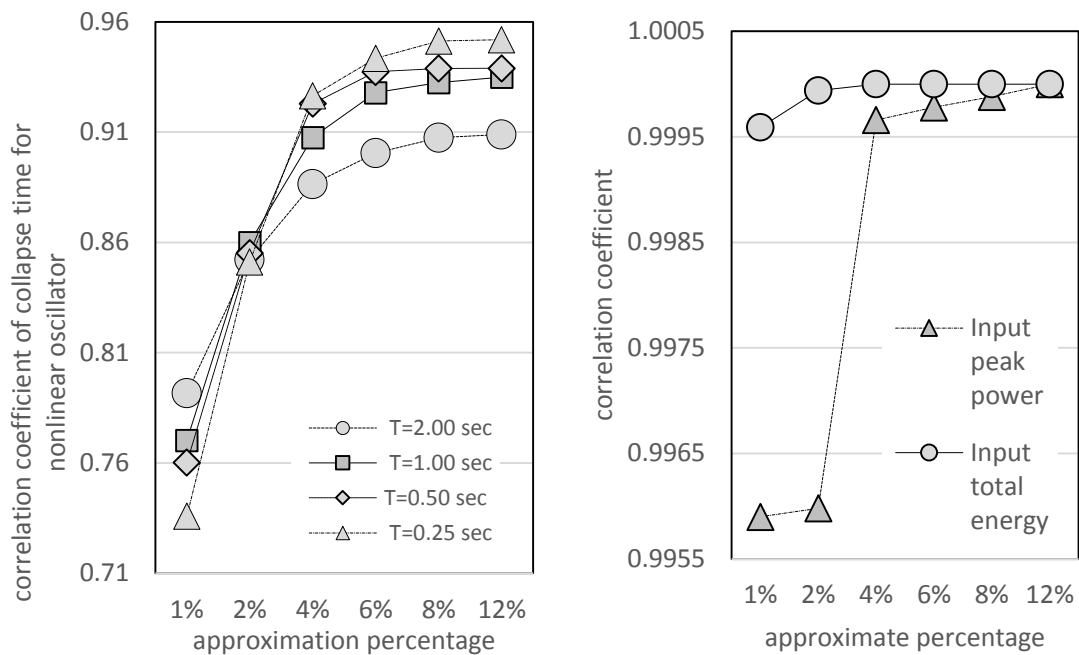


Fig. 2. Correlation coefficient of peak power and total energy (right side) and correlation coefficient of nonlinear oscillator collapse time for different periods of $T=0.25, 0.5, 1$ and 2 sec (left side).

4. Conclusions

The paper objective is to find an approximation of Iran strong motion records by a relatively small number of pulses (i.e. wavelets) such that would produce a reasonably good fit for different indices such as acceleration, velocity, peak power and total energy and subsequently would predict closely the response of a nonlinear oscillator. To satisfy the first requirement, Coiflet wavelets (Mallat, 1989), which are orthogonal, nearly symmetric, and relatively smooth. The orthogonality property is convenient for the evaluation of the energy directly in the wavelet transform domain, the symmetry is desirable to reduce phase distortions in the approximation, and the smoothness is desirable because it helps achieve better fit for strong motion records with smaller number of wavelets. It is concluded that expansion of strong motion records in a wavelet basis is an efficient tool for extraction of pulses from a strong motion record, and representation of strong motion records as a sum of a relatively small number of pulses. This efficiency (good approximation by a small number of pulses) is due to the fact that the basis functions are localized in time (besides in frequency), resembling in nature the strong motion records.

5. References

- Mallat SG, "Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L_2(\mathbb{R})$ ", Transactions of the American Mathematical Society 1989, 315, 69-87.
- Todorovska MI, Meidani H, Trifunac MD, "Wavelet approximation of earthquake strong ground motion goodness of fit for a database in terms of predicting nonlinear structural response", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29, 742-751.