

تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی برای یک ناحیه‌ی خاص با تبدیل موجک

امید بهار* (استادیار)

امین محمودیان اقدم (کارشناس ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)
دوری ۲ - ۲۹، شماری ۳، ص. ۶۳-۵۵

کلید موفقیت در تحلیل‌های تاریخی‌چهره‌ی زمانی تا اندازه‌ی زیادی به میزان دسترسی به شتاب‌نگاشت‌های متناسب با شرایط خاک محلی بستگی دارد. اما در بیشتر موارد، نگاشت‌های ثبت‌شده در یک ناحیه‌ی خاص بسیار کم است. در این نوشتار، روشی جدید بر مبنای تبدیل موجک برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی یک ناحیه‌ی خاص پیشنهاد شده است. تجزیه‌ی نگاشت‌های حقیقی ثبت‌شده در یک ناحیه به سطوح مختلف، سیگنال‌های پایه با خصوصیات فیزیکی معنی‌داری ارائه می‌کند؛ که ترکیب مجدد و متفاوت آنها نگاشت‌های جدیدی متأثر از مشخصه‌های منطقه به دست می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان تعداد بسیار زیادی نگاشت مصنوعی از تعداد محدودی نگاشت ثبت‌شده به دست آورد. برای نشان دادن کارایی روش از نگاشت‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های شبکه‌ی لرزه‌نگاری Smart۱ کشور تایوان استفاده شده است. شتاب‌نگاشت تولیدشده از لحاظ مشخصه‌های آماری، طیفی، و تاریخی‌چهره‌ی زمانی با نگاشت‌های حقیقی مقایسه و با استفاده از آن رفتار لرزه‌ی یک سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه بررسی شده است. نتایج ارزیابی، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: تبدیل موجک، شبکه‌ی Smart۱، نگاشت ثبت‌شده، سیگنال‌های پایه، سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی فولادی.

۱. مقدمه

استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با توجه به نیاز سازه‌های ویژه در ارزیابی‌های تحلیل تاریخی‌چهره‌ی زمانی به‌خصوص تحلیل‌های غیرخطی، به جز نواحی خاصی از جهان که نگاشت‌های ثبت‌شده‌ی زیادی دارند، اجتناب‌ناپذیر است. تاکنون روش‌های زیادی برای تولید شتاب‌نگاشت با خصوصیات کنترل‌شده ارائه شده است. می‌توان روش‌های تولید شتاب‌نگاشت را با توجه به حوزه‌ی مورد استفاده در فرایند تولید آنها در ۳ گروه جای داد: ۱. روش‌های حوزه‌ی زمان: سیگنال‌های تولیدشده با این روش حاوی اطلاعات کاملی هستند، اما تحلیل این نوع سیگنال‌ها بسیار دشوار است. مانند روش نویز سفید فیلترشده، روش کانایی-تاجیمی، و روش میانگین متحرک خودکاهنده‌ی ARMA؛^[۱] ۲. روش‌های حوزه‌ی بسامد: در این روش محتوای بسامدی مبنای شبیه‌سازی است و معمولاً سیگنال‌ها از روی هم‌گذاری موج‌های سینوسی با فازهای تصادفی تولید می‌شوند. روش تبدیل فوری که یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل سیگنال‌ها است، در این گروه قرار دارد؛ ۳. روش‌های حوزه‌ی زمان-بسامد: از روش‌های معمول این گروه می‌توان تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه (حالت خاص تبدیل گابور)، توزیع ویگنر-ویل و تبدیل موجک را نام برد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۵/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۲/۱۳، پذیرش ۱۳۹۱/۵/۷.

سیگنال‌ها به ۲ بخش ایستا و ناپایستا تقسیم می‌شوند. علی‌رغم آنکه فاز حاصل از تبدیل فوری به زمان انتقال بسامد در سیگنال مرتبط است، ولی این روش قادر به بررسی سیگنال‌های غیرایستا که محتوای بسامدی آنها در طول سیگنال تغییر می‌کند و قسمت اعظم سیگنال‌های طبیعی را نیز تشکیل می‌دهند، نیست. بنابراین برای بررسی این سیگنال‌ها لازم است از تبدیلی با تمرکز هم‌زمان در هر ۲ حوزه‌ی زمان و بسامد استفاده کرد.^[۳] موجک روشی در حوزه‌ی زمان-بسامد است که برای بررسی و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ناپایستا بسیار مناسب است. موجک برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ ارائه شد.^[۴] ساده‌ترین سیستم موجک که تا به حال به وجود آمده، تابع وزن هار است. که با ترکیب توابع وزن و موجک، مجموعه‌ی بزرگی از توابع را بسط داد و مدل کرد. پس از آن تغییرات زیادی در طی سال‌ها در زمینه‌های مختلف گسترش کاربرد ویولت به وجود آمد.

در سال ۱۹۹۴ نیز از روش موجک برای تحلیل سیگنال‌های لرزه‌ی استفاده شد که بعدها کاربردهای مهندسی یافت.^[۵] در زمینه‌ی تحلیل امواج زلزله، کارهای مؤثری در استفاده از تحلیل موجک در مسائل مهندسی زلزله انجام شده است. مثلاً در سال ۲۰۰۲ با استفاده از تبدیل موجک، شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده به چندین تاریخی‌چهره‌ی زمانی بدون هم‌پوشانی تجزیه شده است.^[۶] سپس هر یک از این تاریخی‌چهره‌ی زمانی‌ها با مقیاس مناسب از طیف پاسخ هماهنگ شد. همچنین

در سال ۲۰۰۴، با استفاده از موجک با ایده‌ی حفظ خصیصه‌های گذرای محلی و تغییرات لحظه‌ی در محتوای بسامدی چندین زلزله‌ی نزدیک گسل، مجموعه‌ی از نگاشت‌های جنبش قوی زمین با خصوصیات نالیستی مشابه زلزله‌های حقیقی مورد استفاده تولید شد.^[۷] در همان سال روشی مبتنی بر تبدیل پیوسته‌ی موجک برای تخمین چگالی در حال تغییر طیف توان نگاشت هدف برای رسیدن به وضوح ارتقاء یافته‌ی زمانی در مؤلفه‌های بسامد بالا ارائه شد.^[۸] در سال ۲۰۰۵ نیز روشی مشابه^[۶] برای تولید نگاشت‌های با انطباق طیفی ارائه شد.^[۹] همچنین در سال ۲۰۰۵ پژوهشگری در رساله‌ی دکتری خود خصوصیات جنبش زمین را با استفاده از تحلیل‌های موجکی مورد بررسی قرار داد و براساس آن نگاشت‌های جدیدی تولید و سپس پاسخ‌های تصادفی خاک ساختگاه را ارزیابی کرد.^[۱۰] در پژوهشی دیگر نیز در مقایسه‌ی روش‌های تبدیل فوری، تبدیل فوری‌ی پنج‌جری، روش تبدیل هیلبرت-هوانگ و تبدیل موجک بر روی داده‌های تاریخی‌ی زمانی زلزله‌ی چی-چی تایوان (۱۹۹۹) انجام و مشخص شد که روش تبدیل هیلبرت-هوانگ روشی کارآمد برای تحلیل امواج زلزله محسوب می‌شود؛ اما روش تبدیل موجک جواب‌های بهتر و مشخص‌تری به‌دست می‌دهد.^[۱۱] این درحالی است که روش موجک در ابتدا و انتهای موج در بسامدهای پایین، اندکی ناپایداری از خود نشان می‌دهد. از طرفی دیگر، در روش تبدیل فوری‌ی پنج‌جری به سختی می‌توان بسامدهای غالب را در زمان‌های مختلف شناسایی کرد و نتایج حاصله، پراکندگی زیادی از خود نشان می‌دهند. پس از آن روش پیشنهادی سوارز و مونته‌جو با ارزیابی پراکندگی پاسخ‌های غیرخطی دینامیکی سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت.^[۱۲] در سال ۲۰۰۸ نیز روشی غیرپارامتری با استفاده از تبدیل موجک برای تولید زلزله‌ی مصنوعی مطابق با طیف طرح ارائه شد که در آن هر ضریب موجک زلزله‌ی مصنوعی با نسبت وزنی مجموع ضرایب موجک در هر یک از محدوده‌های بسامدی سیگنال زلزله به‌دست می‌آید.^[۱۳] مجدداً در همان سال، روش ساخت نگاشت‌های با انطباق طیفی محدود ارائه شد.^[۱۴] برخی پژوهشگران نیز با استفاده‌ی توأم از تبدیل موجک و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، نگاشت‌های منطبق با طیف طرح ارائه کردند.^[۱۵] همچنین در سال ۲۰۱۱، با استفاده از تئوری بسته‌ی موجک، به منظور مدل‌کردن تقریبی چگالی در حال تغییر طیف توان، دامنه‌ی موج سری‌های زمانی با وضوح ثابت در دامنه‌های زمان و بسامد کنترل شد.^[۱۶] به این ترتیب خصوصیات نالیستی گذرا و طیفی سیگنال‌های اصلی را در هر دو دامنه‌ی زمان و بسامد حفظ کردند.

در این نوشتار برخلاف روش‌های مشابه پیشین، روشی جدید بر مبنای تبدیل موجک برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی یک ناحیه‌ی خاص با داشتن تعداد محدودی نگاشت ثبت‌شده در همان ناحیه پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، ابتدا تعدادی از نگاشت‌های ثبت‌شده به سطوح مختلف سیگنال‌های پایه‌ی خود تجزیه می‌شوند. هر کدام از این سطوح یکی از خواص فیزیکی معنی‌دار مرتبط با آن منطقه‌ی خاص را دارد. لذا با ترکیب تصادفی آنها از سیگنال‌های مختلف، نگاشت جدیدی به‌دست می‌آید که متأثر از خصوصیات خود منطقه است. بدین ترتیب می‌توان تعداد بسیار زیادی نگاشت مصنوعی از تعداد محدود نگاشت ثبت‌شده در یک ناحیه‌ی مشخص به‌دست آورد. برای نشان دادن کارایی روش از نگاشت‌های زلزله‌ی ۵/۸ ریشتری ثبت‌شده‌ی کشور تایوان (۱۹۸۵) توسط ایستگاه‌های شبکه‌ی لرزه‌نگاری Smart۱ استفاده شده است. این مجموعه در یک زلزله‌ی مشخص به‌طور هم‌زمان در نقاط زیادی در یک ناحیه با مشخصات تقریباً ثابت خاک ثبت شده است. کشور تایوان، جزیره‌ی واقع در شرق آسیاست که مساحتی برابر ۳۵۹۸۰ کیلومتر مربع دارد، تایوان جزو کشورهای زلزله‌خیز است که

شبکه‌ی شتاب‌نگاری وسیع و پیشرفته‌ی Smart۱ را دارد. زلزله‌ی ۱۹۸۵/۶/۱۲ با بزرگای موج سطحی (موج رایلی) Ms ۵/۸ برای بررسی انتخاب شده است. شتاب‌نگاشت‌ها از ایستگاه‌های O۰۷، O۰۸، M۰۷، M۰۸، I۰۷، I۰۸، C۰۰ به‌صورت سه مؤلفه‌ی ثبت شده‌اند، برداشت شده‌اند. نوع خاک در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی از نوع خاک یک‌دست عمیق از نوع D است که میانگین سرعت برشی در عمق ۳۰ متر (VS۳۰) آن برابر ۲۴۷/۵ متر بر ثانیه است. ایستگاه‌های مورد مطالعه از لحاظ مشخصات به هم شبیه هستند و می‌توان از همه‌ی آنها با مشخصات ثابت نام برد. در انتها رفتار لرزه‌ی یک سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی فولادی تحت نگاشت‌های مصنوعی تولیدشده و حقیقی ثبت‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. تبدیل موجک

آنالیز موجک، مانند آنالیز فوری با بسط توابع به سیگنال‌های پایه سر و کار دارد، ولی این بسط برحسب موجک‌ها انجام می‌شود. موجک، تابع مشخص مفروضی با میانگین صفر است و بسط برحسب انتقال‌ها و اتساع‌های این تابع انجام می‌شود. برخلاف چند جمله‌ی‌های مثلثاتی، موجک‌ها در فضا به‌صورت موضعی بررسی می‌شوند. به این ترتیب که ارتباط نزدیک‌تری بین بعضی توابع و ضرایب آنها ممکن و پایداری عددی بیشتری در بازسازی و محاسبات فراهم می‌شود. کاربردهای مبتنی بر تبدیل سریع فوری را می‌توان با استفاده از موجک‌ها فرمول‌بندی کرد و اطلاعات موضعی بیشتری از آنها به‌دست آورد. روش موجک با داشتن پنجره‌ی متغیر می‌تواند با عریض‌کردن پنجره‌ها در تحلیل بسامدهای پایین، وضوح بسامدی مناسبی را به‌دست آورد. همچنین برای وضوح زمانی در بسامدهای بالا از پنجره‌های باریک‌تر استفاده می‌شود. تابع اولیه که به‌منزله‌ی تابع پنجره استفاده می‌شود، موجک مادر نامیده می‌شود و توابع پنجره‌ی دیگر از مقیاس و جابجایی این تابع در روی سیگنال موردنظر به‌دست می‌آید. بنابراین تابع موجک مادر، $\psi(t)$ می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۱ انتخاب شود و تمامی موجک‌های دیگر با مقیاس و انتقال این تابع به‌دست آید.

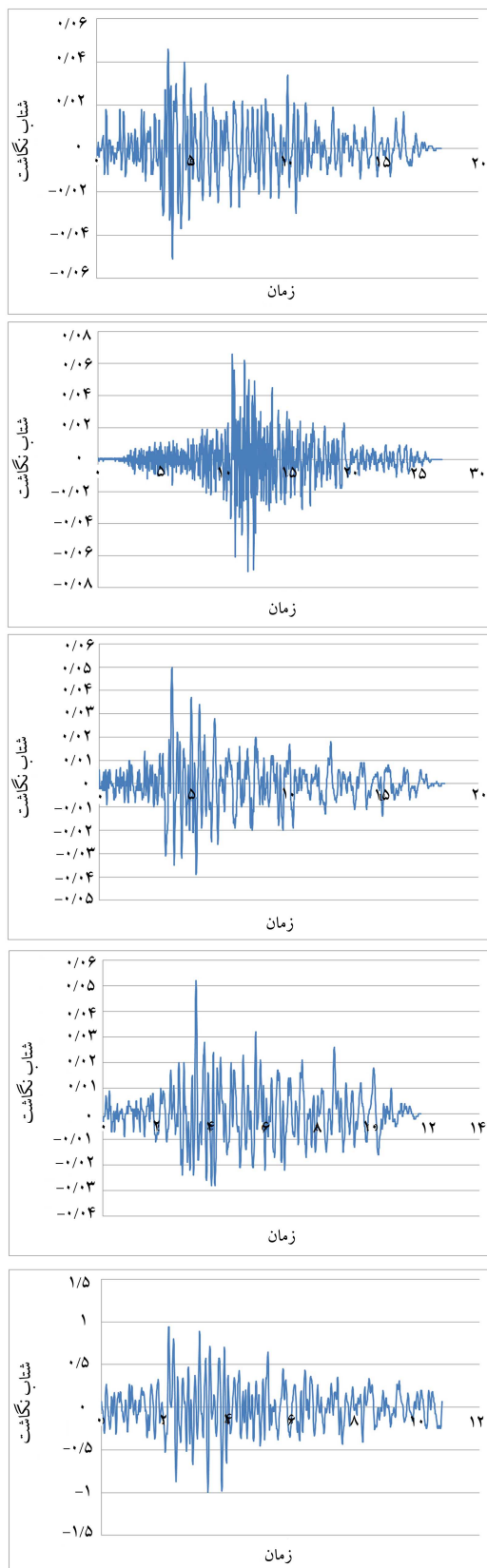
$$W_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه، τ و s متغیرهای تابع هستند. تغییر این پارامترها می‌تواند توابع مختلفی از تابع پایه ایجاد کند. تغییر s شکل موج را در طول محور زمان کشیده و فشرده می‌کند. بنابراین تغییر s به صورت هم‌زمان کانال بسامدی تحلیل را تغییر می‌دهد، در صورتی که تغییر τ باعث حرکت شکل موج در طول محور زمان می‌شود. تبدیل موجک سیگنال، $x(t)$ ، درواقع میزان همبستگی میان مدل پیشنهادی و سیگنال اصلی را ارائه می‌کند، و از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$C_{(s,\tau)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) W_{s,\tau}(t) dt \quad (2)$$

۳. روند تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

در روند تولید نگاشت‌های جدید، اولین گام انتخاب و آماده‌سازی شتاب‌نگاشت مورد بررسی است. شتاب‌نگاشت تولیدی از شتاب‌نگاشت‌های چند ایستگاه به نام‌های



شکل ۱. شتاب نگاشت های مؤلفه های شمالی - جنوبی ایستگاه های (به ترتیب از بالا به پایین): $C00$, $I01$, $M01$, $M07$ و تصحیح شده ی $I01$ در زلزله ی ۱۲/۶/۱۹۸۵، شبکه ی smart۱، نتایوان.

$C00$, $I01$, $M01$ و $M07$ به دست آمده است. برای اینکه از مشخصه های اصلی سیگنال مورد بررسی استفاده شود، بهتر است محدوده ی طول مؤثر آنها محاسبه شود. این کار با استفاده از روش تریفوناک و برادی که براساس انرژی تجمعی سیگنال به دست آمده بین ۵ و ۹۵ درصد انرژی کل سیگنال است، انجام پذیرفته است. [۱۷] پس از آن شتاب نگاشت به پیشینه ی شتاب خود، نرمال و تصحیح خط مینا برای آن انجام می شود. در شکل ۱، مؤلفه های شمالی - جنوبی شتاب نگاشت های ثبت شده در ایستگاه های مختلف نشان داده شده است.

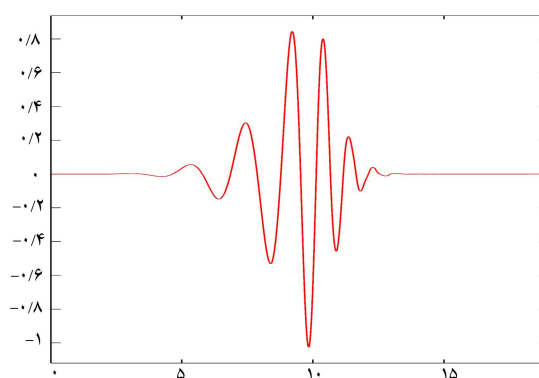
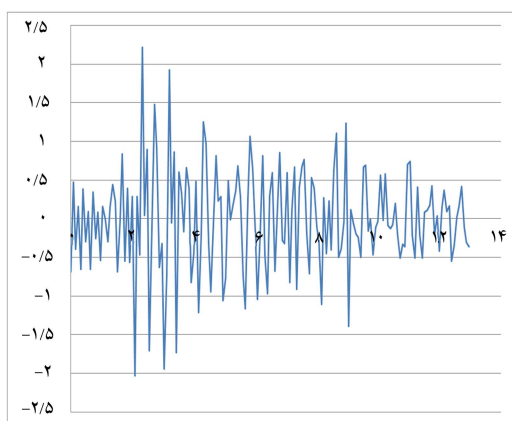
۱.۳. تجزیه ی سیگنال شتاب نگاشت

برای تجزیه ی سیگنال های اصلاح شده از تبدیل موجک استفاده شده است. در مرحله ی اول سیگنال اصلی به ۲ جزء جدید شامل: ۱. سیگنال تقریب با بسامدهای پایین و ۲. سیگنال جزئیات با بسامدهای بالا تجزیه می شود. بیشترین خصوصیات شتاب نگاشت را سیگنال تقریب دارد و سیگنال جزئیات مراتب پایین تر را که اطلاعات فیزیکی خاص تری از ویژگی های محلی و منطقه یی شتاب نگاشت دارد، در خود حفظ می کند. در مراحل بعدی سیگنال، تقریب مرحله ی گذشته مجدداً به ۲ سیگنال جدید تقریب و جزئیات از مراتب پایین تر تجزیه می شوند. این مراحل به دفعات می تواند ادامه یابد. در واقع در هر مرحله، تقریب دامنه ی بسامدی سیگنال تقریب مرحله ی پیشین به ۲ قسمت تجزیه می شود. برای تجزیه ی سیگنال ها بسته به خصوصیات سیگنال اصلی و مشخصه های آن از موجک های مادر متفاوتی مانند هار، کلاه مکزیک، سیملت، کویفلت، مورلت و دابچیز با مرتبه های مختلف می توان استفاده کرد. با انجام تحلیل های مختلف با موجک های مادر متفاوت بر روی سیگنال های زلزله، استفاده از موجک دابچیز مرتبه ی ۱۰ و ادامه ی تجزیه تا ۳ مرحله مناسب تشخیص داده شد؛ به طوری که می توان گفت سطح محاسبات و دقت بررسی در حد قابل قبولی است. در شکل ۲، موجک دابچیز مرتبه ی ۱۰ و در شکل ۳، نمودار درختی تجزیه ی موجک تا مرحله ی سوم نشان داده شده است.

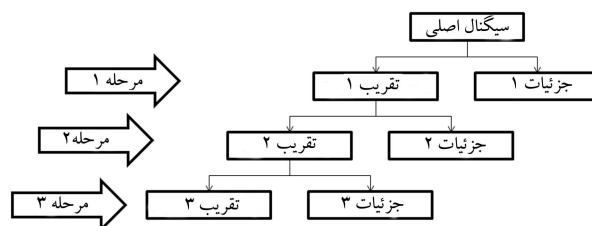
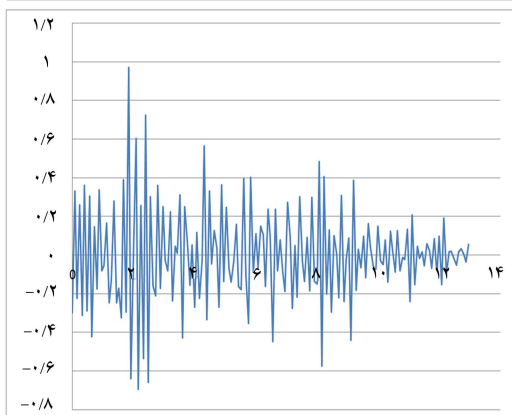
به عبارت دیگر، هر سیگنال زلزله به یک سیگنال تقریب مرحله ی سوم و ۳ سیگنال جزئیات مربوط به هر مرحله تجزیه شده است. برای نمونه در شکل ۴ به ترتیب از بالا به پایین سطوح تقریب و جزئیات مراحل سوم تا اول مؤلفه ی شمالی - جنوبی شتاب نگاشت ثبت شده در ایستگاه $C00$ ارائه شده است.

۲.۳. انتخاب سیگنال های پایه

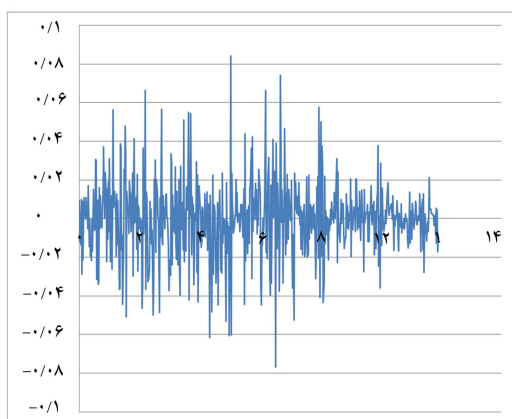
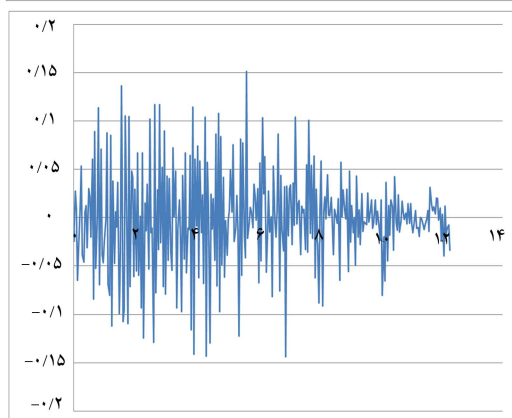
هر مرحله از تجزیه، یک سطح تجزیه نامیده می شود، که در آن سیگنال به ۲ بخش شامل تقریب و جزئیات تقسیم می شود. سیگنال های تجزیه شده در هر سطح، در عین حال که دامنه ی بسامدی محدود و مشخصی دارند به خصوصیات خاص و منحصر به فردی از ساختگاه و ناحیه ی مورد بررسی اشاره دارند. این خصوصیات می تواند مواردی مانند: جنس لایه ها، بافت و دانه بندی خاک محلی، ضخامت و نوع قرارگیری لایه ها بر روی یکدیگر، و چگالی یا میزان تراکم لایه ها باشد. لذا سیگنال های سطوح تجزیه در عین سیگنال پایه بودن، متأثر از این مشخصه های منحصر به فرد ساختگاه نیز هستند. از آنجا که در ابتدای شروع عملیات تجزیه، تمامی نگاشت ها نرمال شده اند؛ سطوح متناظر از سیگنال های مختلف، ضرایب یکسانی دارند. این ضرایب در هنگام بازسازی مجدد سیگنال ها نقش عمده یی بازی می کنند. همسانی این ضرایب این امکان را به وجود می آورد که بتوان در ترکیب مجدد سیگنال های پایه از سیگنال های سطوح متناظر در نگاشت های دیگر نیز استفاده کرد. در این نوشتار برای



شکل ۲. موجک مادر دابچیز، مرتبه‌ی ۱۰.



شکل ۳. نمودار درختی تجزیه‌ی موجک تا مرحله‌ی سوم.



شکل ۴. شتاب‌نگاشت ایستگاه C° ، (به ترتیب از بالا به پایین): سیگنال تقریب مرحله‌ی سوم، سیگنال جزئیات مرحله‌ی سوم تا اول.

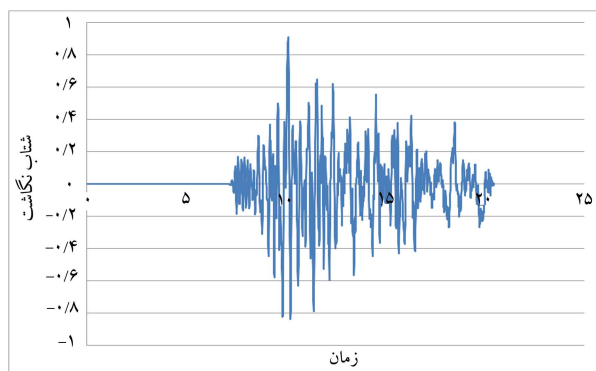
ترکیب از یک روند تصادفی استفاده شده است؛ به طوری که در هر سطح، یک عضو به طور اتفاقی از میان سیگنال‌های تجزیه در آن سطح از کل نگاشت‌های مجموعه انتخاب شده است. به این ترتیب اگر تعداد اعضای مجموعه شتاب‌نگاشت‌های یک ساختگاه N عدد باشد که هر کدام از آنها تا سطح M تجزیه شوند، تعداد N^{M+1} حالت مختلف برای ترکیب‌های تصادفی و ساخت نگاشت‌های مصنوعی جدید قابل وقوع است. در این بررسی از بین ۷ ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت، ۴ انتخاب تصادفی به این شرح انجام شده است: ۱. سیگنال تقریب (سطح سوم) از ایستگاه $M^{\circ} 7$ ؛ ۲. سیگنال جزئیات سطح سوم از ایستگاه C° ؛ ۳. سیگنال جزئیات سطح دوم از ایستگاه $I^{\circ} 1$ ؛ ۴. سیگنال جزئیات سطح اول از ایستگاه $M^{\circ} 1$ که به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۸ ارائه شده‌اند.

۳.۳. آماده‌سازی سیگنال‌های تجزیه و تولید سیگنال جدید

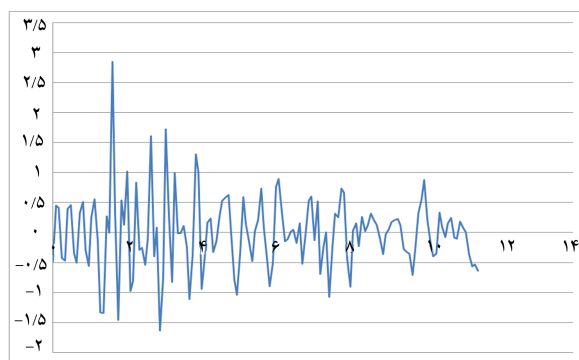
در روند آماده‌سازی برای تولید سیگنال جدید، ابتدا باید طول سیگنال‌های تجزیه‌شده برای ترکیب متناسب شوند. برای افزایش طول سیگنال، روش‌های متفاوتی مانند: تکرار خود سیگنال یا معکوس آن در ابتدا یا انتهای رکورد یا اضافه کردن صفر به قسمت‌های مختلف سیگنال وجود دارد. بعد از بررسی روش‌های متفاوت، روش افزودن صفر به ابتدای سیگنال مناسب تشخیص داده شد. پس از افزایش طول سیگنال‌های تجزیه، با اعمال موجکی که با آن عمل تجزیه انجام شده بود، یعنی موجک دابچیز مرتبه‌ی ۱۰، سیگنال‌ها با هم ترکیب شدند و شتاب‌نگاشت مصنوعی جدید به دست آمد. شکل ۹، شتاب‌نگاشت تولیدشده را نشان می‌دهد.

از آنجا که در روند بازسازی، طول سیگنال‌های تجزیه با اعمال صفرافزایش یافته است، لازم است بر روی شتاب‌نگاشت مصنوعی تولیدشده عملیات محاسبه‌ی طول مؤثر، نرمال‌سازی و اصلاح خط مبنا نیز انجام شود. در شکل ۱۰، شتاب‌نگاشتی که عملیات تصحیح روی آن انجام شده است، نشان داده شده است.

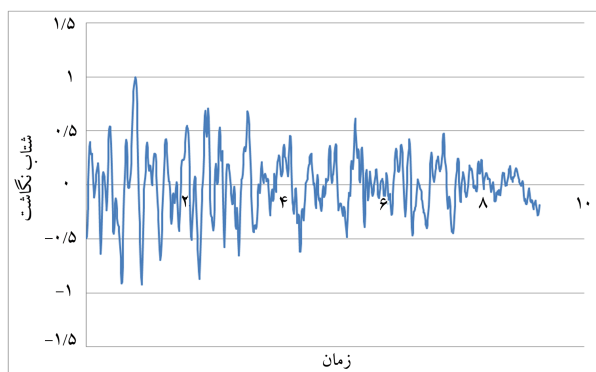
در بخش‌های بعدی تأثیرپذیری نگاشت تولیدشده از نگاشت‌های اصلی، میزان مشابهت یا تفاوت آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



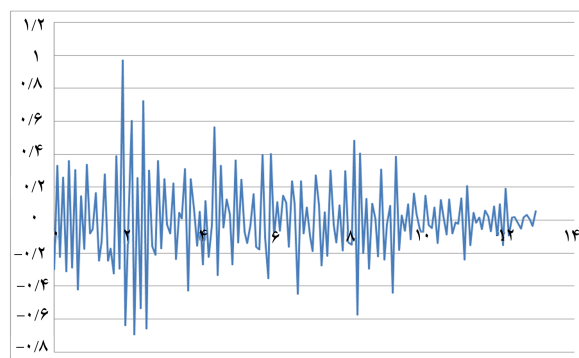
شکل ۹. شتاب نگاشت مصنوعی تولیدشده.



شکل ۵. سیگنال تقریب از تجزیه‌ی شتاب نگاشت ایستگاه $M^{\circ}7$.



شکل ۱۰. شتاب نگاشت مصنوعی تصحیح شده.



شکل ۶. سیگنال جزئیات سطح سوم از تجزیه‌ی شتاب نگاشت ایستگاه $C^{\circ}0$.

۴. مقایسه‌ی پارامترهای شتاب نگاشت مصنوعی و

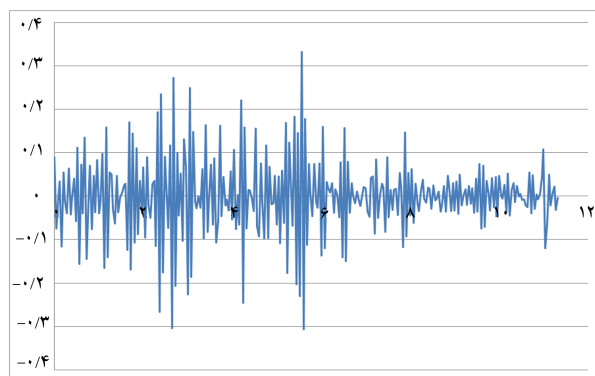
شتاب نگاشت‌های اصلی

در ادامه، مشخصه‌های زمانی مانند: بیشینه‌ی شتاب، سرعت و جابجایی، مدت دوام، تاریخچه‌ی زمانی سرعت و جابجایی، مشخصه‌های بسامدی مانند طیف توان و طیف پاسخ و بالاخره شدت آریاس نگاشت تولیدشده با موارد مشابه از نگاشت‌های اصلی مقایسه شده است.

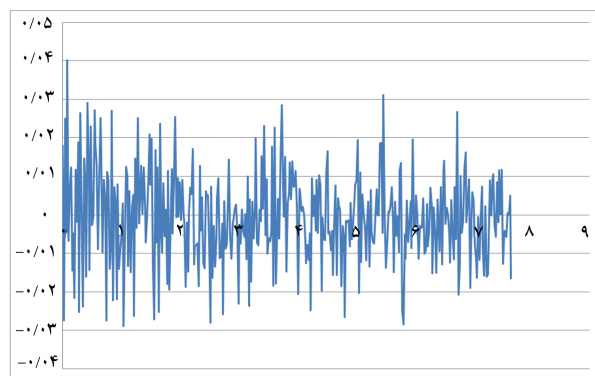
۱.۴. مشخصه‌های دامنه‌ی زمان

در ابتدا مقادیر بیشینه‌ی شتاب، سرعت، جابجایی و نیز مدت دوام نگاشت‌های حقیقی و تولیدشده پس از انجام تصحیحات لازم و نرمال‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. شتاب بیشینه‌ی همه‌ی نگاشت‌ها به عدد یک نرمال شده‌اند، اما اختلاف‌های قابل توجهی در بیشینه‌ی سرعت و جابجایی آنها مشاهده می‌شود. از مشخصه‌های ارائه‌شده در جدول می‌توان حدس زد که نگاشت تولیدشده از نظر قدرت تأثیر در سازه‌ها، از نگاشت‌های حقیقی مؤثرتر باشد.

تاریخچه‌ی زمانی سرعت نگاشت تولیدشده‌ی مصنوعی در کنار نگاشت‌های حقیقی در شکل ۱۱ ارائه شده است. به صورت بصری می‌توان مشاهده کرد که شباهت کلی نمودار سرعت نگاشت تولیدشده با یک فاز تأخیری، با سیگنال تقریب سازنده‌ی آن بسیار زیاد است. طبیعتاً تغییرات دامنه‌ی قله‌ها و جزئیات نمودار سرعت از دیگر سیگنال‌های جزئیات نگاشت‌های اصلی تأثیر پذیرفته است. شاید بتوان مقدار بالای بیشینه‌ی سرعت نگاشت تولیدشده را در جدول ۱ به همین موضوع مربوط دانست.



شکل ۷. سیگنال جزئیات سطح دوم از تجزیه‌ی شتاب نگاشت ایستگاه $I^{\circ}1$.



شکل ۸. سیگنال جزئیات سطح اول از تجزیه‌ی شتاب نگاشت ایستگاه $M^{\circ}1$.

جدول ۱. مقادیر بیشینه‌ی شتاب، سرعت و جابجایی و مدت دوام شتاب‌نگاشت‌های تصحیح‌شده‌ی ایستگاه‌های $C^{\circ 0}$ ، $I^{\circ 1}$ ، $M^{\circ 1}$ ، $M^{\circ 7}$ و شتاب‌نگاشت تولیدشده.

تولید شده	$M^{\circ 7}$	$C^{\circ 0}$	$I^{\circ 1}$	$M^{\circ 1}$
PGA (g)	۷۸/۵	۶۲/۲	۵۵/۰	۴۴/۱
PGV (cm/sec)	۴۷/۲	۳۴/۴	۶۵/۰	۱۵/۶
PGD (cm)	۹/۱۰	۱۱/۷۵	۱۰/۸۱	۷/۴۹
مدت دوام (sec)				

تاریخچه‌ی زمانی جابجایی شتاب‌نگاشت تولیدی نیز در کنار نگاشت‌های حقیقی در شکل ۱۲ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که شباهت نمودار جابجایی نگاشت تولیدشده با سیگنال تقریباً تا اندازه‌ی کاهش یافته است. اما از طرف دیگر شباهت با سیگنال جزئیات سطح دوم تجزیه، یعنی $I^{\circ 1}$ ، بسیار زیاد شده است. به همین دلیل شاید بتوان مقدار بالای بیشینه‌ی جابجایی نگاشت تولیدشده را در جدول ۱ به همین موضوع مربوط دانست.

در واقع، این موارد از ابتدا قابل پیش‌بینی نبوده است؛ چراکه در این نوشتار سطوح مختلف سیگنال‌های تجزیه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. اما این نکته حائز اهمیت است که با افزایش سطوح تجزیه‌ی سیگنال‌های اصلی می‌توان تأثیرپذیری سیگنال مصنوعی تولیدشده از اجزاء سیگنال‌های اصلی را تا حد زیادی کاهش داد.

۲.۴. مشخصه‌های دامنه‌ی بسامد

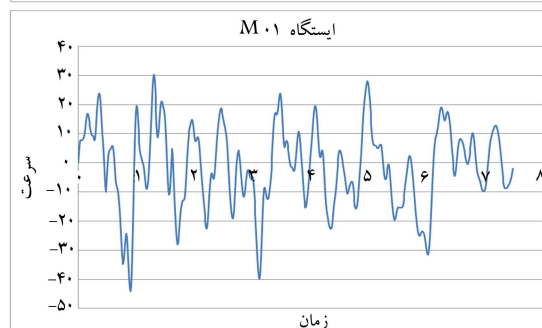
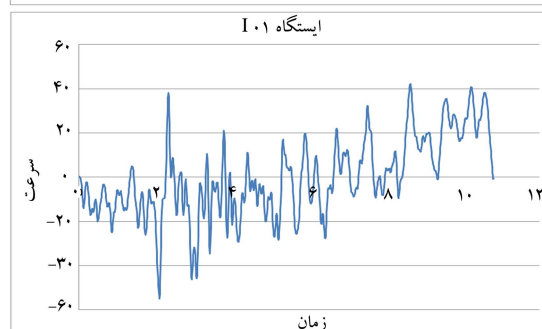
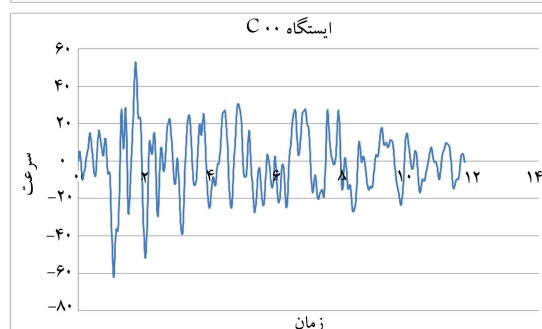
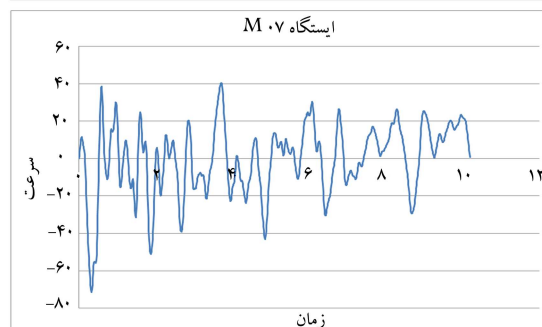
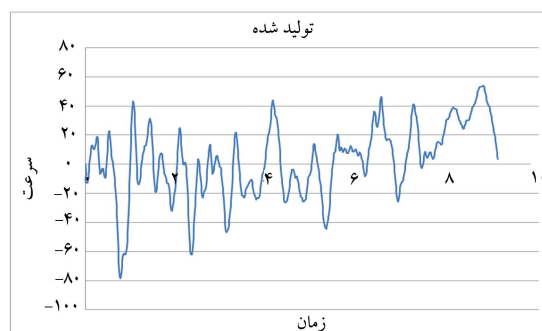
با ترسیم نمودارهای طیف توان سیگنال‌ها و مقایسه‌ی محتوای بسامدی آنها میزان شباهت با تفاوت بسامدی سیگنال مصنوعی تولیدشده با سیگنال‌های اصلی را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. طیف توان یک سیگنال براساس تعریف، مربع نرم دامنه‌ی فوریه‌ی سیگنال در هر بسامد و نمادی از میزان انرژی سیگنال در آن بسامد است. نمودار طیف توان شتاب‌نگاشت مصنوعی تولیدشده در کنار شتاب‌نگاشت‌های سازنده‌ی آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که بیشترین شباهت محتوای بسامدی سیگنال مصنوعی تولیدشده در بسامدهای پایین با سیگنالی است که سیگنال تقریباً از آن برداشت شده است.

البته روش پیشنهادی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی شباهت یا متفاوت بودن بسامدی را ملاک عمل قرار نمی‌دهد، بلکه بر این اصل استوار است که هرگونه ترکیبی از سیگنال‌های پایه‌ی یک ساختمان، یکی از احتمال‌های وقوع است. در واقع، این نوشتار بیشتر به نحوه‌ی تولید نگاشت جدید و خصوصیات آن توجه دارد. لذا در اینجا این احتمال دور از ذهن نخواهد بود که رفتار یک سازه در مقابل شتاب‌نگاشت مصنوعی تولیدشده‌ی فعلی، مشابه پاسخ در مقابل سیگنال $M^{\circ 7}$ باشد.

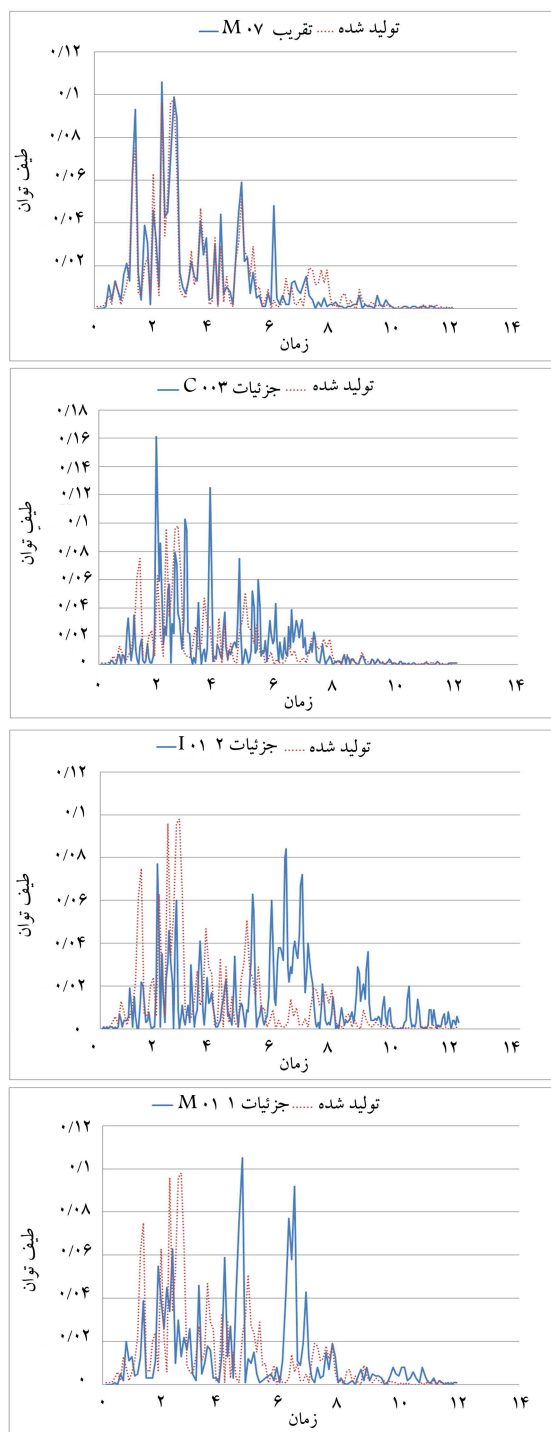
برای کاهش شباهت رفتاری سیگنال تولیدشده با سیگنال تقریب می‌توان با حرکت به سمت سطوح بالاتر تجزیه‌ی سیگنال، کنترل بیشتری بر انتخاب دامنه‌های بسامدی از سیگنال‌های سازنده اعمال کرد.

۳.۴. طیف پاسخ

طیف پاسخ یک زلزله‌ی خاص، مقدار پاسخ بیشینه‌ی یک سازه با یک درجه‌ی آزاد با دوره‌های تناوب مختلف در یک نسبت میرایی ثابت، مانند ۵٪، را نسبت

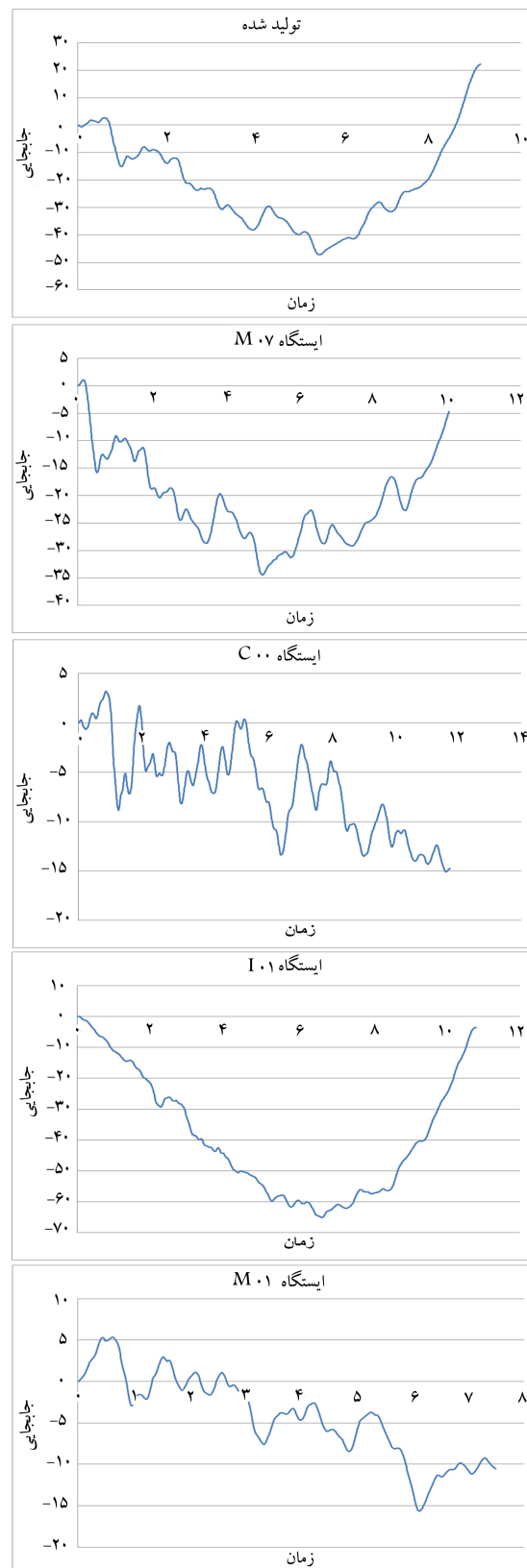


شکل ۱۱. نمودار سرعت نگاشت مصنوعی و نگاشت‌های حقیقی؛ از بالا به پایین: تولید شده‌ی ایستگاه $M^{\circ 7}$ ، ایستگاه $C^{\circ 0}$ ، ایستگاه $I^{\circ 1}$ و ایستگاه $M^{\circ 1}$.

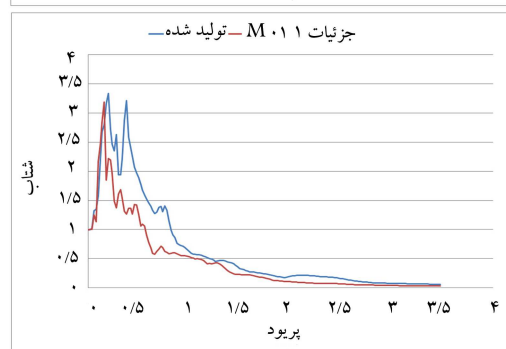
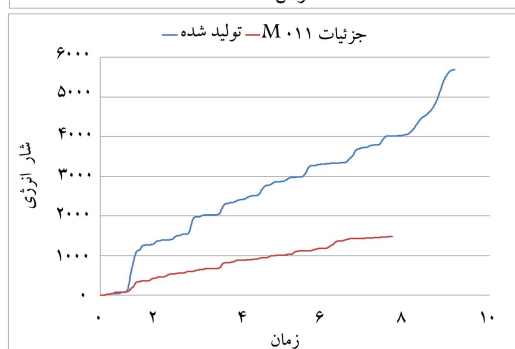
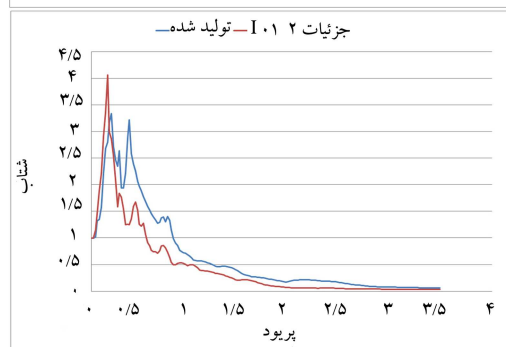
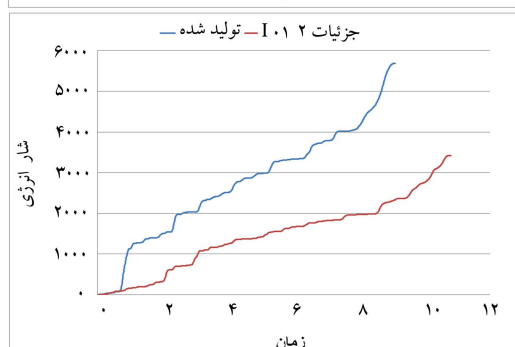
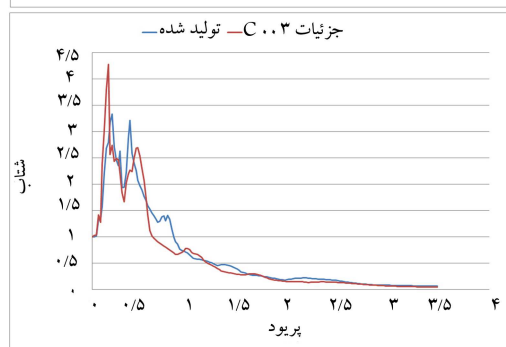
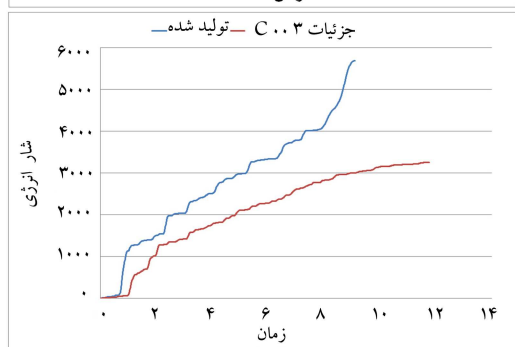
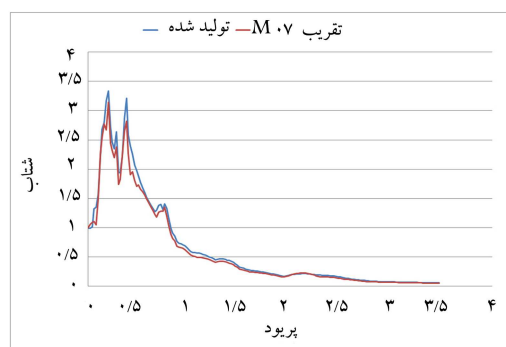
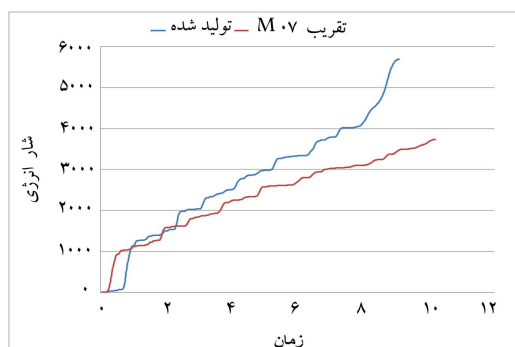


شکل ۱۳. طیف توان نگاشت مصنوعی و سیگنال‌های سازنده.

به نگاشت زلزله نشان می‌دهد. شکل ۱۴، طیف پاسخ شتاب نگاشت مصنوعی تولیدشده را در کنار طیف پاسخ شتاب نگاشت‌های حقیقی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود رفتار خطی یک سازه با دوره‌ی تناوب مشخص در مقابل سیگنال‌هایی که از بخش جزئیات آنها استفاده شده است، می‌تواند اختلاف قابل‌ملاحظه‌یی با رفتار آن سازه در مقابل سیگنال تولیدشده داشته باشد. این مسئله در مورد سیگنال تقریب لزوماً این‌گونه نیست.



شکل ۱۴. نمودار جابجایی نگاشت مصنوعی و نگاشت‌های حقیقی، از بالا به پایین: تولید شده‌ی ایستگاه M0.7، ایستگاه C0.0، ایستگاه I0.1 و ایستگاه M0.1.



شکل ۱۵. نمودار شار انرژی نگاشت تولید شده و نگاشت‌های حقیقی.

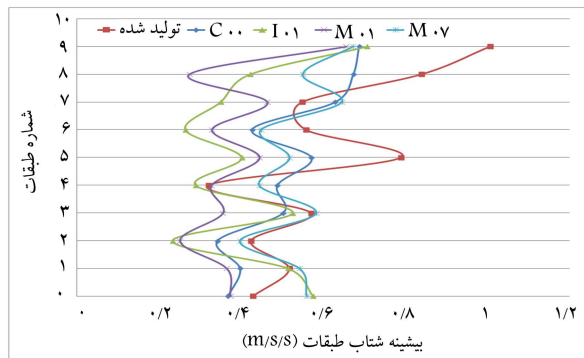
شکل ۱۴. پاسخ طیفی نگاشت مصنوعی و سیگنال‌های سازنده.

۴.۴. شار انرژی

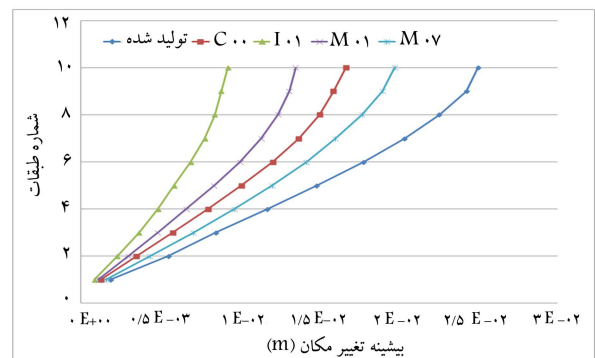
شار انرژی از دیگر مشخصه‌های یک نگاشت زلزله محسوب می‌شود، که نماینده‌ی از میزان نرخ انرژی انتقالی در هر لحظه از زمین به سازه است. این مقادیر برای نگاشت تولیدشده و زلزله‌های حقیقی محاسبه‌شده در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. قدرت بیشتر نگاشت تولیدشده نسبت به نگاشت‌های حقیقی کاملاً مشهود است. لذا می‌توان انتظار داشت در مورد سازه‌ها، توان و قدرت تخریبی بیشتری بر آنها اعمال کند.

۵.۴. پاسخ یک سازه نمونه

برای ارزیابی شدت و قدرت نگاشت مصنوعی تولیدشده پاسخ یک قاب دوبعدی فولادی ۱۰ طبقه با ۳ دهانه که عرض دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع کلیه طبقات یکسان و مساوی ۳ متر است، مورد بررسی قرار گرفته است. بیشینه‌ی پاسخ تغییرمکان، گریز نسبی و شتاب طبقات سازه در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ ارائه شده است. پاسخ‌ها نشان‌دهنده‌ی توان بالای نگاشت تولیدشده نسبت به نگاشت‌های حقیقی است. افزایش گریز نسبی طبقه در طبقات میانی و پاسخ شتاب در طبقات بالای سازه



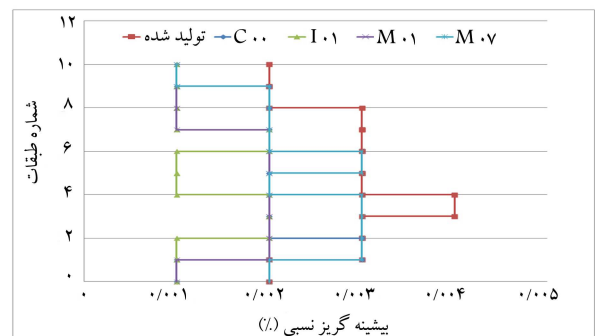
شکل ۱۸. بیشینه‌ی شتاب طبقات یک سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه: تحت نگاشت مصنوعی و نگاشت‌های حقیقی.



شکل ۱۶. بیشینه‌ی تغییر مکان طبقات یک سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه: تحت نگاشت مصنوعی و نگاشت‌های حقیقی.

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، روش جدیدی برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی بر مبنای تبدیل موجک ارائه شده است. در این روش با تجزیه‌ی سیگنال‌های حقیقی یک منطقه‌ی خاص به سطوح مختلف، سیگنال‌های پایایی به‌دست می‌آید که در هر سطح دارای محدوده‌ی بسامدی مشخصی هستند. بدین ترتیب می‌توان با ترکیب تصادفی سیگنال‌های تجزیه در سطوح یکسان، سیگنال جدیدی به‌دست آورد که از خصوصیات منطقه تأثیر پذیرفته و خاص همان منطقه است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که مشخصه‌های سیگنال تولیدی در عین متفاوت بودن چندان از مشخصه‌های سیگنال‌های اصلی دور نیست. برای ارزیابی شدت و قدرت نگاشت مصنوعی تولیدشده رفتار یک سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی فولادی ارزیابی شد. پاسخ‌ها نشان‌دهنده‌ی توان بالای نگاشت تولیدشده نسبت به نگاشت‌های حقیقی است. این بررسی نشان می‌دهد که با داشتن تعداد محدودی شتاب‌نگاشت برای یک منطقه‌ی مشخص با استفاده از این روش می‌توان شتاب‌نگاشت‌هایی با ویژگی‌های متفاوت تولید کرد. از آنجا که این نگاشت‌های مصنوعی از ترکیب سیگنال‌های پایایی نگاشت‌های حقیقی ثبت‌شده در همان ناحیه‌ی خاص تولید شده‌اند، نگاشت‌های قابل وقوع در آن ناحیه هستند که به‌طور طبیعی می‌توانند قوی‌تر یا ضعیف‌تر از نگاشت‌های حقیقی باشند. در این نوشتار ترکیب سیگنال‌های پایایی به‌صورت تصادفی انجام شده است، اما می‌توان برای گزینش سطوح ترکیب حالت‌های دیگری را نیز در نظر گرفت که در حال بررسی است.



شکل ۱۷. بیشینه‌ی گزینش نسبی طبقات یک سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه: تحت نگاشت مصنوعی و نگاشت‌های حقیقی.

قابل توجه است. به این ترتیب نتایج ضمنی که از مقایسه‌ی شار انرژی نگاشت‌ها به‌دست آمده بود، صحیح به نظر می‌رسد. از آنجا که این نگاشت مصنوعی از ترکیب سیگنال‌های پایایی نگاشت‌های حقیقی ثبت‌شده در یک ناحیه‌ی خاص تولید شده است، یکی از نگاشت‌های قابل وقوع در آن ناحیه است که به‌طور طبیعی می‌تواند قوی‌تر یا ضعیف‌تر از نگاشت‌های حقیقی باشد. این مسئله به نحوه‌ی انتخاب و ترکیب سیگنال‌های پایایی مربوط است، که فراتر از بحث‌های این نوشتار است.

منابع (References)

1. Rajasekaran, S., Latha, V. and Lee, S.C. "Generation of artificial earthquake motion records using wavelet and principal component analysis", *Earthquake Engineering*, **10**(5), pp. 665-691 (2006).
2. Daubechies, I. "Ten lectures on wavelet", SIMA, Philadelphia, PA, Notes from the 1990 CBMS-NSF Conference on wavelets and applications at Lowell, MA (1992).
3. Carmona, R., Hawang, W.L. and Torresani, B. "Practical time-frequency analysis", Practical Time-Frequency Analysis: Gabor and Wavelet Transforms, with an Implementation in S (Wavelet Analysis and Its Applications), pp. 170-175 (1998).
4. Haar, A. "Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme", *Mathematische Annalen*, **69**, pp. 331-371 (1910).
5. Newland, D.E. "Harmonic and musical wavelets", *Proc. Royal Society of London*, **A 444**, pp. 605-620 (1994).
6. Mukherjee, S. and Gupta, V.K. "Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories", *Soil Dy-*

- namics and Earthquake Engineering*, **22**(9-12), pp. 799-804 (2002).
7. Legrue, J. and Menun, C. "Simulation of nonstationary ground motions using wavelets", The 13th WCEE, Vancouver, Canada, paper No. 296 (1-6 Aug. 2004).
8. Spanos, P.D. and Failla, G. "Evolutionary spectra estimation using wavelets", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(8), p. 952 (2004).
9. Sua'rez, L.E. and Montejo, L.A. "Generation of artificial earthquakes via the Wavelet transform", *International Journal of Solids and Structures*, **42**, pp. 5905-5919 (2005).
10. Sarica, R.Z. "Wavelet analysis for seismic ground motion, simulation, and stochastic site response", Ph.D. Thesis, North Carolina State University (2005).
11. Bazrafshan, M. and Bagheripour, M.H. "Time history analysis Using Wavelete theory", 4th National Congress of Civil Engineering, Tehran University (In Persain)(May 2008).
12. Bahar, O. and Taherpour, A. "Nonlinear dynamic time history analysis of a 16- story MR concrete frame under acceleration records generated by wavelete transform", *Civil Engineering Sharif* **26-2**(1), pp. 37 (In Persain) (June- July 2010).
13. Sasaki, F., Yokoyama, K., Tamaoki, T., Tanabe, A., Mizumachi, W. and Yamada, M. "Generation of artificial earthquake motion using observed earthquake motions", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (12-17 October 2008).
14. Bahar, O. and Taherpour, A. "Nonlinear dynamic behavior of RC buildings against accelerograms with partial compatible spectrum", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (12-17 October 2008).
15. Ghodrati Amiri, G. and Bagheri, A. "New method for generation of artificial earthquake record", The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India (1-6 October 2008).
16. [http://www.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Yamamoto_Baker_\(2011\)_GM_Simulation_ICASP.pdf](http://www.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Yamamoto_Baker_(2011)_GM_Simulation_ICASP.pdf).
17. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. "Study of the duration of strong earthquake ground motion", *BSSA*, **66**(4), pp. 139-162 (1975).

GENERATION OF ARTIFICIAL ACCELOGRAMS FOR A SPECIFIC AREA USING WAVELET TRANSFORM

O. Bahar(corresponding author)

omidbahar@iiees.ac.ir

A. M. Aghdam

mahmoodian.amin@gmail.com

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 55-64, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 6 August 2011; received in revised form 4 March 2012; accepted 28 July 2012.

Abstract

The successful time history analysis mostly depends on the accessibility of the adequate ground acceleration records given for a specific site soil condition. But, except for a few regions in the world, in most cases, limited numbers of seismic records are available. Designers overcome this limitation by using artificial records that may be constructed by combining sine waves with different phase and amplitudes, or matching spectra with a specific design spectrum. Although, these procedures are acceptable from a mathematical overview, they are not satisfactory procedures for the designer to obtain the best or even probable acceleration records for the considered region. So, these procedures, by generating a lot of artificial records, solve the designer's problem. But, using these acceleration records to evaluate the earthquake response of a structure in order to design, rehabilitate or strengthen may lead the designers or clients to make a wrong decision.

In this paper, a new innovative method, based on the wavelet transform to generate artificial acceleration records for a specific area, is presented. First, each seismic record is decomposed to its basis signals. Each basis signal, besides the specific limited frequency domain, includes the unique physical phenomenon of the area. In other words, each basis signal inherently defines specific characteristics of the region. This is based on the number, type, and mechanical, geotechnical and seismic properties of the soil layers in the region, and also probable scenarios of the passing seismic waves. Hence, as a second step, by randomly combining these basis signals, we obtain other possible seismic records of that area. Therefore, we can generate many artificial seismic records using only limited site specific recorded ground motion. In order to explain the method, the acceleration earthquakes of the Smart1 earthquake network station

of Taiwan, recorded during a 5.8 magnitude earthquake on the Richter scale, in 1985, are used. Similar and different features of the artificial records are compared with that of the real seismic records. Finally, the performance of a 10-story steel frame against artificial and real acceleration records is compared together. Artificial records may or may not be stronger than real accelerograms, but they, specifically, are the probable acceleration records of that particular area.

Key Words: Wavelet transform, Smart1 network, acceleration record, artificial record, basis signal.