

توسعه بانک داده چندمرجعی حرکت زمین با تأکید بر روش‌های پالایش و ادغام رکوردهای ایران، ترکیه و PEER

فرزاد مهدویان فرد^۱، مهدی زارع^{۲*}، حمید زعفرانی^۲ و مجتبی لبیب‌زاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۲ استاد، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵)

چکیده

هدف اصلی این مطالعه، بررسی جامع چالش‌ها و روش‌های پردازش و پالایش رکوردهای شتاب زمین‌لرزه و در نهایت، تدوین یک بانک داده معتبر و یکپارچه است. داده‌های مورد استفاده از سه منبع مختلف شامل رکوردهای ایران، ترکیه و بانک داده‌های بین‌المللی (PEER) در بازه زمانی ۲۰۲۴-۱۹۳۵ گردآوری شده‌اند. رکوردهای حرکت نیرومند زمین در ایران شامل ۱۹۱۳ تاریخچه زمانی از ۱۸۹ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بیش از ۵ و در فواصل تا ۸۰ کیلومتر است. مجموعه داده‌های دیگر نیز شامل رکوردهای حرکت نیرومند زمین ترکیه (AFAD) شامل ۵۷۶ تاریخچه زمانی از ۹۹ زمین‌لرزه و همچنین ۱۱۶ زمین‌لرزه پوسته‌ای کم‌عمق از سراسر جهان از پایگاه داده PEER است که شامل ۳،۱۱۴ تاریخچه زمانی با بزرگای گشتاوری بیش از ۵ و در فواصل حداکثر ۳۰ کیلومتر می‌باشند. در فرآیند پردازش رکوردها، ابتدا داده‌ها پاک‌سازی شده و رکوردهای ناقص یا معیوب (نظیر موارد دارای قطع در ثبت یا خطای دستگاه) حذف شده‌اند. سپس فیلتر اولیه‌ای به منظور حذف نویزهای ناخواسته اعمال گردیده است. در ادامه، تصحیح خط مبناء جهت رفع شیب‌های غیرواقعی تجمعی در مولفه‌های سرعت و جابجایی انجام گرفته است. علاوه بر این، نسبت سیگنال به نویز (SNR) در مرحله نهایی انتخاب رکوردها برآورد شده است. نتایج طیف‌های جابجایی بدست‌آمده مربوط به مراحل مختلف پردازش نشان می‌دهد که، در بازه تناوب‌های کوتاه و میانی (کمتر از ۲ ثانیه)، اختلاف بین منحنی‌های طیف پاسخ جابجایی ناچیز بوده و طیف نسبت به مراحل مختلف پردازش حساسیت کمتری دارد و به طور کلی ترکیب مراحل اصلاح خط‌پایه و فیلترگذاری کم‌فرکانس علی‌الخصوص برای بازه تناوبی بلند (بیشتر از ۲ ثانیه) تنها حالتی است که، طیفی پایدار و فاقد رشد مصنوعی را ارائه می‌دهد. بعلاوه اعمال همزمان یک فیلتر پایین‌گذر در کنار یک فیلتر بالاگذر (طیف پیشنهادی این مطالعه) می‌تواند پاسخ جابجایی در ناحیه بلندپریود را از نوسانات غیرواقعی و ناپایدار محافظت کند.

کلمه‌های کلیدی: پردازش، تصحیح خط مبناء، فیلتر باتروورث، رکوردهای جنبش قوی زمین، طیف پاسخ جابجایی

۱ مقدمه

پارامترهای ساختگاه از جمله سرعت موج برشی میانگین تا عمق ۳۰ متری (V_{S30}) و عمق لایه‌ای که در آن سرعت موج برشی به ۱ کیلومتر بر ثانیه می‌رسد (Z_{10}) مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، الگوریتم‌های خودکار جهت ارزیابی کیفیت داده‌ها، حذف نویز در فرکانس‌های پایین و بالا، و محاسبه پارامترهای اصلی حرکت زمین به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این منابع منطقه‌ای، پایگاه‌های داده بین‌المللی معتبر نظیر بانک اطلاعاتی NGA-West2 از بنیاد مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) به‌عنوان منبعی غنی برای مطالعات طیفی و برآورد روابط پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE) شناخته می‌شوند (کمبل و بزرگنیا، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴؛ آنتستا و همکاران، ۲۰۱۴).

اهمیت ایجاد یک پایگاه داده یکپارچه و باکیفیت در بسیاری از مطالعات لرزه‌ای به‌وضوح مشهود است. داده‌های شتاب تصحیح‌شده و همگن‌شده، امکان مدل‌سازی دقیق طیفی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین را فراهم می‌کنند. به‌عنوان نمونه، کلاویتی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند که مجموعه داده‌های باکیفیت می‌توانند در تحلیل‌های طیفی (نظیر روش‌های تجزیه طیفی) و توسعه‌ی توابع پیش‌بینی حرکت زمین نقش مؤثری ایفا کنند. علاوه بر این، وجود یک پایگاه داده چندمرجعی که شامل فراداده‌های کامل و دقیق باشد، پایه‌ای مستحکم برای ارزیابی احتمالاتی خطر زلزله (PSHA)، تحلیل‌های پاسخ دینامیکی سازه‌ها و مطالعات لرزه‌ای منطقه‌ای فراهم می‌کند. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که شرایط ساختگاه (مانند سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متر) و پارامترهای منبع زلزله، از پیش‌نیازهای اساسی برای مدل‌سازی دقیق محسوب می‌شوند، که وجود یک پایگاه داده‌ی منسجم و استاندارد می‌تواند از طریق در اختیار گذاشتن این اطلاعات، به دستیابی به چنین دقتی کمک کند (پرنزا و همکاران،

داده‌های خام حاصل از شتاب‌نگارها معمولاً شامل نویز و رانش خط‌مبناء هستند که باید پیش از استفاده، در مراحل اولیه پردازش به‌دقت بررسی و حذف شوند. این فرآیندها معمولاً شامل تصحیح خطاهای فرکانس بالا و پریرود بلند است که از مهم‌ترین نواقص موجود در رکوردهای شتاب زمین (شتاب‌نگاشت‌ها) محسوب می‌شوند و باید از طریق اصلاح خط‌مبناء و اعمال فیلترهای مناسب (نظیر فیلترهای بالاگذر یا پایین‌گذر) در یک بازه فرکانسی مشخص حذف گردند.

در سال‌های اخیر، تعداد ایستگاه‌های شتاب‌نگاری توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) تا حدودی افزایش یافته است، اما به‌دلیل لرزه‌خیزی پایین در برخی مناطق و یا نبود ایستگاه‌های نزدیک به گسل‌های فعال، تعداد رکوردهای زلزله ثبت‌شده در مجاورت این گسل‌ها همچنان اندک است. با گسترش شبکه‌های شتاب‌نگاری، امروزه منابع متعددی از داده‌های حرکت زمین در دسترس هستند؛ با این حال، تفاوت‌های ساختاری و محتوایی این منابع، ضرورت سازمان‌دهی و یکپارچه‌سازی آن‌ها را افزایش داده است. به‌عنوان مثال، پایگاه داده شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران شامل بیش از ۱۴۰۰۰ رکورد شتاب‌نگاری از بیش از ۱۵۰۰ ایستگاه فعال در گستره‌ای وسیع از رویدادها است. شکوهی‌راد و همکاران (۲۰۲۵) اکثر این رکوردها را به‌صورت یکپارچه و با روش‌های پردازش یکنواخت شامل فیلترگذاری بهینه و حذف نویز مبتنی بر تبدیل موجک پردازش کرده‌اند تا کیفیت فرکانسی مطلوب و قابل‌اعتماد حاصل شود.

از سوی دیگر، پایگاه داده بروز شده SMD-TR ترکیه که توسط سندیکایا و همکاران (۲۰۲۵) ارائه شده است، شامل بیش از ۹۵۰۰۰۰ تاریخچه زمانی است. در این پایگاه، داده‌های ایستگاه‌های AFAD برای تعیین

گسل‌های عمده قرار گیرد، که نشان‌دهنده‌ی سطح بالای لرزه‌خیزی در این منطقه است. در محدوده‌ی ایران، کمربند آلپ-همالیا با الگوهای متنوعی از فعالیت لرزه‌ای نمود پیدا می‌کند و شامل مجموعه‌ای از مناطق به‌شدت فعال است که در اطراف بلوک‌های نسبتاً پایدار قرار دارند. ویژگی‌های لرزه‌ای و زمین‌ساختی این سرزمین بارها مورد توجه پژوهش‌های گسترده‌ی داخلی و بین‌المللی قرار گرفته است. وجود زمین‌ساخت فعال، توپوگرافی جوان، و رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و ویرانگر در این پهنه، منجر به خسارات سنگین اقتصادی و تلفات انسانی فراوانی در کشور شده است. از دیدگاه زمین‌ساختی، ایران از چند زون و بلوک متمایز زمین‌ساختی تشکیل شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از، زون زاگرس، رشته‌کوه البرز، فلات مرکزی و دشت لوت و زون مکران. در مجموع، لرزه‌خیزی ایران نتیجه‌ی ترکیب پیچیده‌ای از برهم‌کنش صفحات، فعالیت چندگانه‌ی گسل‌ها، و تغییرشکل‌های پوسته‌ای پویا است که این کشور را در شمار مناطق با خطر بالای لرزه‌ای در سطح جهانی قرار می‌دهد. چنین ویژگی‌هایی، ضرورت انجام پژوهش‌های دقیق‌تر، پایش مستمر فعالیت‌های لرزه‌ای، و تدوین و به‌روزرسانی آیین‌نامه‌های مهندسی مقاوم در برابر زلزله را بیش از پیش آشکار می‌سازد. از این رو، ایجاد بانک داده‌های جامع از حرکات زمین ثبت‌شده امری حیاتی به‌نظر می‌رسد. شکل ۱، الگوی مکانی زمین‌لرزه‌های منتخب و گسل‌های فعال اصلی ایران را نشان می‌دهد.

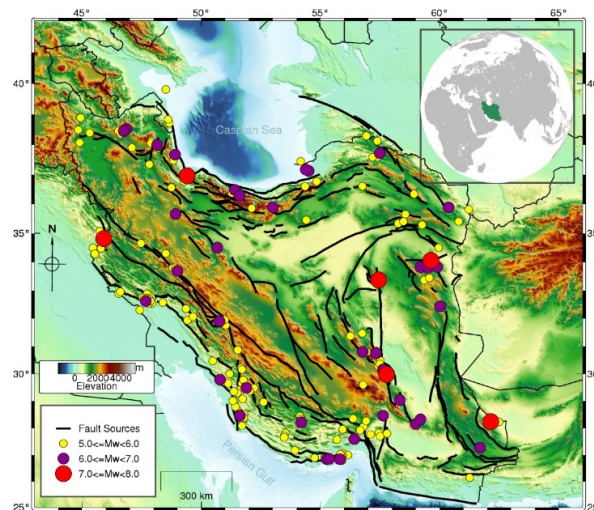
۳ آماده‌سازی داده‌های جنبش قوی زمین

این پژوهش بر پایه یک روند سیستماتیک و گام‌به‌گام شکل گرفته است با هدف ایجاد یک بانک داده‌ی جامع از حرکت‌های قوی زمین که بتواند واقعیت‌های لرزه‌ای ایران را با دقت بیشتر بازتاب دهد. در گام نخست،

۲۰۲۴؛ سندیکاپا و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج این پژوهش می‌تواند در مطالعات آینده از جمله بررسی اثرات محلی خاک و انجام تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش با یکسان‌سازی، تصحیح و استانداردسازی رکوردهای لرزه‌ای، پایگاه داده‌ای فراهم می‌کند که امکان استخراج طیف‌های پاسخ میانگین برای رده‌های مختلف خاک و برآورد دقیق ضریب تقویت ساختگاه را فراهم می‌سازد. ادغام رکوردهای ایران، ترکیه و PEER نیز امکان مقایسه رفتار ساختگاهی ایران با سایر مناطق پوسته‌ای و شناسایی ویژگی‌های منطقه‌ای تقویت ساختگاهی را مهیا می‌کند. این پایگاه داده ابزار ارزشمندی برای تولید طیف‌های تجربی خاک‌های سخت تا بسیار نرم و بازنگری ضرایب خاک در آیین‌نامه‌های ملی است. در این پژوهش، فرآیند پردازش و تصحیح رکوردهای خام شتاب‌نگاشت مربوط به ایران و ترکیه با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد معرفی شده توسط چیو (۱۹۹۷) و مقایسه با روش بور و همکاران (۲۰۰۲) و بور و بومر (۲۰۰۵)، انجام شد. لازم به ذکر است که داده‌های پایگاه PEER پیش‌تر توسط این مرکز مورد پردازش و تصحیح استاندارد قرار گرفته‌اند و بدون نیاز به اصلاح مجدد مورد استفاده قرار گرفتند.

۲ ساختار زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی ایران

ایران از دیدگاه زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی در میان دو صفحه‌ی زمین‌ساخت عربی و اوراسیا قرار گرفته است. این سرزمین بخشی از کمربند فعال آلپ-همالیا به‌شمار می‌رود و دارای ساختاری پیچیده متشکل از مجموعه‌ای از پوسته‌ها، بلوک‌ها و زون‌های زمین‌ساختی متفاوت است که حرکت نسبی آن‌ها نسبت به یکدیگر با نرخ چند میلی‌متر در سال انجام می‌شود. این پویایی زمین‌ساختی فعال سبب شده است که بخش عمده‌ای از سرزمین ایران در معرض تغییرشکل‌های دینامیکی و فعالیت گسترده‌ی



شکل ۱. توزیع زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در سراسر ایران؛ گسل‌های فعال اصلی نیز در نقشه نشان داده شده‌اند.

(بور و بومر، ۲۰۰۵). مطالعاتی مانند زعفرانی و همکاران (۲۰۱۸) و فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۸ و ۲۰۱۹) نشان داده‌اند که اصلاح دقیق و همگن‌سازی داده‌ها در سطح ملی نقش کلیدی در افزایش قابلیت اطمینان مدل‌های طیفی منطقه‌ای ایفا می‌کند.

در سال‌های اخیر، بانک‌های داده بزرگ مانند-NGA West2 مجموعه‌ای از رکوردهای پردازش شده یا نیمه‌پردازش شده را ارائه کرده‌اند که هم می‌توانند به‌عنوان مدلی برای پردازش داده‌ها استفاده شوند و هم به‌عنوان منبعی از رکوردها برای مطالعات منطقه‌ای به‌کار گرفته شوند. با این حال، در بسیاری از مناطق لرزه‌خیز مانند ایران، با وجود فعالیت لرزه‌ای قابل توجه، دسترسی به داده‌های باکیفیت از شتاب‌های قوی زمین به‌ویژه در دامنه‌های بزرگ، مقیاس $(M_w > 6.5)$ و در فاصله‌های نزدیک به گسل هنوز محدود است. این کمبود داده باعث می‌شود که مدل‌های طیف پاسخ یا روابط پیش‌بینی حرکت زمین بر اساس مجموعه کوچکی از داده‌های محلی ساخته شوند که از نظر آماری قابل اطمینان نیستند. برای غلبه بر این محدودیت، مطابق مطالعات پیشین (مانند آنتشا و همکاران، ۲۰۱۴؛ بزرگنیا و همکاران، ۲۰۱۴،

داده‌های وسیعی از زلزله‌های ثبت شده در ایران، ترکیه و سایر نقاط جهان گردآوری شد. سپس این داده‌ها به‌صورت سیستماتیک پردازش و طبقه‌بندی گردیدند تا امکان به‌کارگیری آن‌ها در مطالعات آتی فراهم شود؛ از جمله در محاسبه طیف‌های پاسخ شتاب (هال و همکاران، ۱۹۷۵؛ نیومارک و هال، ۱۹۸۷؛ امیری و همکاران، ۲۰۰۸؛ آملی و همکاران، ۲۰۱۱؛ قاسمی و همکاران، ۲۰۰۹؛ بهنام فر و همکاران، ۲۰۲۰؛ کالوی و اندروثی، ۲۰۲۲؛ مقدم و همکاران، ۲۰۲۴؛ فرانسیس و همکاران، ۲۰۲۵)، طیف‌های پاسخ جایجایی (بومر و النا‌شای، ۱۹۹۹؛ تولیس و فاجیولی، ۱۹۹۹؛ چوپرا و گوئل، ۲۰۰۱؛ فاجیولی و همکاران، ۲۰۰۴؛ بومر و مندیس، ۲۰۰۵)، تحلیل مخاطره لرزه‌ای و محاسبات عددی در شرایط مختلف ساختگاهی.

یکی از مهم‌ترین مراحل در هر پژوهش مرتبط با تحلیل حرکت زمین، آماده‌سازی و تصحیح دقیق داده‌های شتاب‌نگاشت‌های جنبش قوی زمین (زعفرانی و سقراط، ۲۰۱۷) است. کیفیت و دقت مرحله‌ی آماده‌سازی داده‌ها، تأثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای بر صحت مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین و طیف‌های طرح لرزه‌ای دارد

۳-۱-۱ بانک داده ایران

در گام نخست، مجموعه‌ای شامل ۱۹۱۳ تاریخچه زمانی شتاب جنبش قوی زمین از ۴۲۱ ایستگاه شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران وابسته به مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انتخاب شد. این رکوردها مربوط به ۱۸۹ زمین‌لرزه با بزرگی لحظه‌ای بیش از ۵، فاصله رومرکزی تا ۸۰ کیلومتر و شتاب بیشینه زمین بیش از ۲۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه هستند. جدول ۱ نیز مشخصات اصلی زمین‌لرزه‌های ایران در این مطالعه را خلاصه کرده است. تمامی این رخدادها زمین‌لرزه‌های کم‌عمق پوسته‌ای با عمق کانونی کمتر از حدود ۳۰ کیلومتر هستند، به استثنای چند زمین‌لرزه در منطقه مکران در جنوب شرقی ایران که عمق بیشتری دارند.

۳-۱-۲ بانک داده جهانی

بانک داده بعدی مورد استفاده در این مطالعه، بانک داده PEER NGA-West2 است. مجموعه داده‌های حرکت زمین این بانک شامل تعداد زیادی رکورد شتاب زمین از زلزله‌های کم‌عمق پوسته‌ای در سراسر جهان است. در این تحقیق، ۳۱۱۴ تاریخچه زمانی از بانک داده PEER با حداکثر فاصله گسیختگی ۳۰ کیلومتر انتخاب شد. این رکوردها مربوط به ۱۱۶ زلزله با بزرگی لحظه‌ای بیش از ۵ هستند که توسط ۷۷۲ ایستگاه شتاب‌نگار ثبت شده‌اند. جدول ۱ خلاصه‌ای از زلزله‌های انتخاب شده و ایستگاه‌های ثبت آن‌ها در نقاط مختلف جهان را ارائه می‌دهد. همچنین، طبقه‌بندی سایت‌ها بر اساس معیارهای استاندارد ۲۸۰۰ ایران و مقادیر سرعت موج برشی در جدول ۲ ارائه شده است. در این مطالعه، سازوکار کانونی زلزله‌ها در هر سه بانک داده به دو نوع تقسیم شد: امتدادلغز و معکوس زیرا در ایران گسل‌هایی با سازوکار نرمال وجود ندارد (مگی و همکاران، ۲۰۰۰؛ طالبیان و جکسون، ۲۰۰۴).

ادغام رکوردهای داخلی با داده‌های کشورهای همسایه و همچنین پایگاه‌های بین‌المللی، یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش پوشش فاصله‌ای، ساختگاهی و تنوع حرکات زمین است.

ترکیب داده‌های شتاب جنبش قوی زمین از مناطق با شرایط زمینساختی مشابه یک روش پذیرفته شده در مهندسی زلزله است، زیرا مدل‌های محلی پیش‌بینی حرکت زمین به‌طور کامل جامع نیستند و اغلب داده‌های نزدیک به گسل به گسل برای زلزله‌های بزرگ را در اختیار ندارند که این موضوع باعث افزایش عدم قطعیت می‌شود. برای رفع این محدودیت، رکوردهای نزدیک به گسل از زلزله‌های پوسته‌ای کم‌عمق در سایر مناطق معمولاً به مجموعه داده‌های محلی اضافه می‌شوند. برای مثال، رکوردهای کالیفرنیا به داده‌های ژاپن افزوده شدند (فوکوشیما و تاناکا، ۱۹۹۰) و رکوردهای غرب آمریکا همراه با زلزله ۱۹۷۸ طیس توسط ژائو و همکاران (۲۰۰۶) در نظر گرفته شدند. پروژه‌های بزرگ بین‌المللی مانند NGA-West2 نیز رکوردهای پوسته‌ای کم‌عمق جهانی را ترکیب می‌کنند تا کمبود داده‌های نزدیک به گسل برای زلزله‌های با بزرگی $M_w > 7$ را جبران کنند. این روش موجب بهبود پوشش داده‌ها، کاهش عدم قطعیت در مدل‌های حرکت زمین و افزایش دقت تخمین طیف پاسخ لرزه‌ای می‌شود.

۳-۱ مقدمه‌ای بر انواع بانک‌های داده

بانک داده مورد استفاده در این مطالعه ترکیبی از سه مجموعه داده شامل ایران، ترکیه و-NGA PEER (West2) است که از نظر کیفیت برای مطالعات لرزه‌نگاری مهندسی و مهندسی زلزله مناسب و قابل اعتماد محسوب می‌شوند. جزئیات این بانک‌های داده به شرح زیر است:

۳-۱-۳ بانک داده ترکیه

بانک داده AFAD ترکیه به عنوان مجموعه داده نهایی برای این مطالعه انتخاب شد، زیرا از نظر نزدیکی جغرافیایی و شباهت در رژیم لرزه‌ای با ایران همخوانی دارد. این بانک داده اطلاعاتی از منطقه‌ای با ویژگی‌های زمینساختی مشابه ایران ارائه می‌دهد. به طور مشخص، داده‌های ۹۹ زمین لرزه با بزرگای گشتاوی بیشتر از ۵ که توسط ۱۷۳ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت شده بودند، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. در مجموع، ۵۷۶

تاریخچه زمانی با فاصله تا ۳۰ کیلومتر از این بانک داده انتخاب شد. جدول ۱ اطلاعات دقیق مربوط به زلزله‌های پوسته‌ای کم عمق انتخاب شده که توسط ایستگاه‌های مختلف در ترکیه ثبت شده‌اند را ارائه می‌کند. ادامه جدول ۱ نیز برای زمین لرزه‌های با بزرگای گشتاوری کمتر از ۶ در پیوست قابل مشاهده است. همچنین دسته‌بندی سایت برای رکوردهای ترکیه نیز بر اساس جدول ۲ و معیارهای استاندارد ۲۸۰۰ ایران تعیین شد.

جدول ۱. مروری بر زمین لرزه‌های مطالعه شده در ایران، AFAD و PEER و ویژگی‌های آنها.

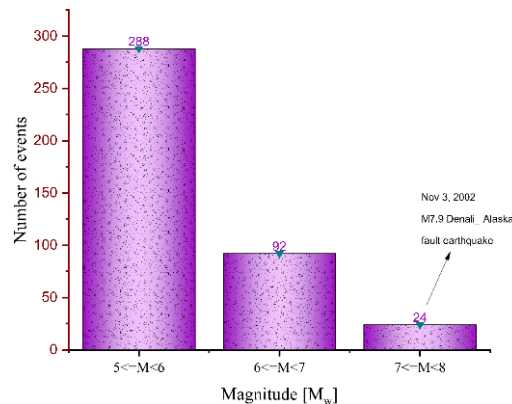
No	Earthquake Name	Date	Event Time	Latitude	Longitude	Mw	Depth	Reference
1	"Helena_Montana-01"	1935-10-31	18:37:54	46.6	-112	6	35	PEER
2	"Helena_Montana-02"	1935-10-31	18:37:54	46.6	-112	6	35	PEER
3	"Imperial Valley-02"	1940-05-19	4:36:42	32.99	-115.76	7	15	PEER
4	"Northern Calif-03"	1954-12-21	19:56:29	40.84	-123.89	6.5	15	PEER
5	"Parkfield"	1966-06-28	4:26:13	35.54	-120.53	6.2	19	PEER
6	"San Fernando"	1971-02-09	14:00:41	34.27	-118.41	6.6	8.4	PEER
7	"Managua_Nicaragua-01"	1972-12-23	6:29:44	12.24	-86.21	6.2	10	PEER
8	"Friuli_Italy-01"	1976-05-06	20:00:21	46.33	13.17	6.5	15	PEER
9	"Gazli_USSR"	1976-05-17	2:58:42	40.33	63.42	6.8	15.9	PEER
10	Qaen	1976-11-07	04:00:50AM	33.82	59.19	6.2	13	USGS
11	Khurgu	1977-03-21	09:18:00PM	27.59	56.42	6.7	12	USGS
12	Naqan	1977-04-06	01:36:00PM	31.9	50.76	6	15	USGS
13	Tabas	1978-09-16	03:35:57PM	33.37	57.44	7.4	34	USGS
14	"Tabas_Iran"	1978-09-16	15:35:56	33.22	57.48	7.4	17.5	PEER
15	Talesh	1978-11-04	03:22:20PM	37.67	48.9	6.1	26	USGS
16	Qaen	1979-01-16	09:50:00AM	33.8	59.5	6.5	11	USGS
17	"St Elias_Alaska"	1979-02-28	21:27:08	60.54	-141.71	7.5	19	PEER
18	"Imperial Valley-06"	1979-10-15	23:16:59	32.61	-115.69	6.5	11.6	PEER
19	Korizan-Khaf	1979-11-14	05:51:00AM	33.96	59.73	6.6	10	USGS
20	Qaen	1979-11-27	05:10:33PM	34.05	59.63	7.1	8	USGS
21	"Victoria_Mexico"	1980-06-09	3:28:20	32.24	-115.02	6.3	1.4	PEER
22	Delijan	1980-12-19	01:16:56AM	34.5	50.67	6.2	29	USGS
23	Golbaf	1981-06-	07:24:25AM	29.9	57.72	6.6	18	USGS

24	Sirch	11 1981-07-28	05:22:23PM	29.98	57.77	7	18	USGS
25	"Coalinga-01"	1983-05-02	23:42:40	36.23	-120.29	6.4	15.3	PEER
26	-	1983-07-05	12:01	40.3323	27.2101	6.1	6.9	ISC
27	-	1983-10-30	4:12	40.3522	42.1798	6.6	16.1	ISC
28	"Morgan Hill"	1984-04-24	21:15:20	37.27	-121.7	6.2	9.1	PEER
29	"Nahanni_Canada"	1985-12-23	5:16:05	62.11	-124.26	6.8	13.6	PEER
30	-	1986-05-05	3:35	38.0166	37.7898	6	4.4	ISC
31	"N. Palm Springs"	1986-07-08	9:20:44	34.01	-116.76	6.1	8.5	PEER
32	"Chalfant Valley-02"	1986-07-21	14:42:27	37.54	-118.46	6.2	10.5	PEER
33	"Superstition Hills-02"	1987-11-24	13:15:59	33	-115.94	6.5	7.5	PEER
34	"Superstition Hills-01"	1987-11-24	1:54:17	33.04	-115.77	6.2	2.3	PEER
35	"Spitak_Armenia"	1988-12-07	7:41:26	40.87	44.21	6.8	4.6	PEER
36	"Loma Prieta"	1989-10-18	0:04:17	36.99	-121.85	6.9	11	PEER
37	Firoozkooh	1990-01-20	01:27:10AM	35.89	53	6	25	USGS
38	Rudbar-Manjil	1990-06-20	09:00:11PM	36.96	49.41	7.4	18	USGS
39	"Manjil_Iran"	1990-06-20	21:00:13	37.01	49.38	7.4	15.3	PEER
40	OTLUKBELI	1992-03-13	17:18	39.7159	39.6292	6.6	22.6	ISC
41	"Erzican_Turkey"	1992-03-13	17:18:41	39.71	39.59	6.7	20.5	PEER
42	"Joshua Tree_CA"	1992-04-23	4:50:25	33.9	-116.49	6.1	9.7	PEER
43	"Cape Mendocino"	1992-04-25	18:06:06	40.35	-124.09	7	14.5	PEER
44	"Landers"	1992-06-28	11:57:38	34.14	-116.6	7.3	10.1	PEER
45	"Big Bear-01"	1992-06-28	15:05:32	34.11	-116.86	6.5	6.4	PEER
46	MENDERES	1992-11-06	19:08	38.1091	26.956	6	17.2	ISC
47	"Northridge-01"	1994-01-17	12:30:56	34.17	-118.58	6.7	18.3	PEER
48	"Northridge-02"	1994-01-17	12:30:56	34.17	-118.58	6.1	18.3	PEER
49	"Kobe_Japan"	1995-01-16	20:46:53	34.57	135.06	6.9	18.4	PEER
50	Bojnord	1997-02-04	10:37:47AM	37.71	57.49	6.4	10	IGUT*
51	Ardebil	1997-02-28	12:57:45PM	37.99	48.15	6	10	IGUT
52	Haji abad, South Khorasan	1997-05-10	7:57:29AM	33.83	59.89	6.9	10	USGS
53	Sirch	1998-03-14	7:40:27PM	30.16	57.62	6.2	9	IGUT
54	Sarbisheh, South Khorasan	1998-04-10	3:00:53PM	32.43	60.02	6.2	33	IGUT
55	Faryab, kerman	1999-03-04	5:38:26AM	28.46	57.62	6.1	10	IGUT
56	Baladeh, Fars	1999-05-06	11:00:53PM	29.49	51.89	6.1	12	IGUT
57	GÖLCÜK	1999-08-17	0:01	40.756	29.955	7.6	17	ISC

58	"Kocaeli_ Turkey"	1999-08-17	0:01:40	40.79	29.99	7.5	16.3	PEER
59	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999-09-20	17:47:20	23.81	120.77	7.6	25.4	PEER
60	"Chi-Chi_ Taiwan-03"	1999-09-20	18:16:21	23.82	121.05	6.2	43.4	PEER
61	"Chi-Chi_ Taiwan-04"	1999-09-20	21:46:45	23.6	120.69	6.2	19.8	PEER
62	"Chi-Chi_ Taiwan-06"	1999-09-25	23:52:51	23.82	121.07	6.3	22.7	PEER
63	"Hector Mine"	1999-10-16	9:46:46	34.57	-116.34	7.1	2.3	PEER
64	DÜZCE	1999-11-12	16:57	40.806	31.187	7.1	10.4	ISC
65	"Duzce_ Turkey"	1999-11-12	16:57:22	40.82	31.2	7.1	14.9	PEER
66	"Tottori_ Japan"	2000-10-06	4:30:19	35.27	133.28	6.6	9.8	PEER
67	Avaj, Qazvin	2002-06-22	2:58:20AM	35.66	48.92	6.4	6	IGUT
68	"Denali_ Alaska"	2002-11-03	22:12:42	63.51	-147.57	7.9	11.5	PEER
69	MERKEZ	2003-05-01	0:27	38.9987	40.4637	6.3	10	ISC
70	Shahr pir, Fars	2003-07-10	5:40:15PM	28.21	54.2	6	20	IGUT
71	"San Simeon_ CA"	2003-12-22	19:15:57	35.64	-121.14	6.5	12.2	PEER
72	Bam	2003-12-26	1:56:56AM	29.04	58.33	6.9	10	USGS
73	"Bam_ Iran"	2003-12-26	1:56:55	28.88	58.3	6.6	18.8	PEER
74	Pul, Mazandaran	2004-05-28	12:38:46PM	36.28	51.61	6.4	5	IGUT
75	Pul, Mazandaran	2004-05-28	7:47:03PM	36.48	51.4	6	6	IGUT
76	"Parkfield-02_ CA"	2004-09-28	17:15:25	35.76	-120.32	6	7.9	PEER
77	Anbar aloom, Golestan	2004-10-07	9:46:18PM	37.17	54.38	6.2	10	IGUT
78	Anbar aloom, Golestan	2005-01-10	6:47:30PM	37.12	54.5	6.1	9	IGUT
79	Khanook, kerman	2005-02-22	2:25:26AM	30.8	56.77	6.5	10	USGS
80	Hidouj, Sistan va Baluchestan	2005-03-13	3:31:23AM	27.27	61.69	6.2	54	IGUT
81	"Chuetsu-oki_ Japan"	2007-07-16	14:17:37	36.85	134.93	6.8	358.2	PEER
82	"Iwate_ Japan"	2008-06-13	23:43:46	39.03	140.81	6.9	12.5	PEER
83	Dargahan, Hormozgan	2008-09-10	11:00:40AM	26.83	55.81	6	10	IGUT
84	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010-04-04	22:40:43	32.27	-115.28	7.2	5.5	PEER
85	"Darfield_ New Zealand"	2010-09-03	16:35:45	-43.38	171.88	7	2.1	PEER
86	Mohammad abad-e rigan, kerman	2010-12-20	6:41:59PM	28.32	59.19	6.5	13	USGS
87	Mohammad abad-e rigan, kerman	2011-01-27	8:38:28AM	28.15	59	6.1	10	IGUT
88	"Christchurch_ New Zealand"	2011-02-21	23:51:42	-43.49	172.71	6.2	4.8	PEER
89	MERKEZ	2011-10-23	10:41	38.689	43.4657	7	19.02	AFAD
90	-/-/Türkiye	2012-06-10	12:44	36.3858	28.9153	6	6.82	AFAD
91	Varzaghan, East Azarbaijan	2012-08-11	12:34:34PM	38.45	46.75	6.2	4	IGUT
92	Ahar, East	2012-08-	12:23:16PM	38.52	46.86	6.1	9	IGUT

93	Azarbaijan Kaki, Bushehr	11 2013-04-09	11:52:50AM	28.46	51.62	6	11	IGUT
94	Khash, Sistan va Baluchestan	2013-04-16	10:44:20AM	28.24	62.14	7.7	92	USGS
95	EGE DENIZI	2014-05-24	9:25	40.2108	25.3073	6.5	25.02	AFAD
96	Murmuri, Ilam	2014-08-18	2:32:06AM	32.62	47.67	6	10	IGUT
97	Sefid sang, Khorasan Razavi	2017-04-05	6:09:08AM	35.89	60.37	6.1	6	IGUT
98	Izmir	2017-06-12	12:28	38.8488	26.3126	6.2	15.86	AFAD
99	Mugla	2017-07-20	22:31	36.9198	27.4435	6.5	19.44	AFAD
100	Azgele, Kermanshah	2017-11-12	6:18:16PM	34.81	45.91	7.3	18	USGS
101	Hojedk, kerman	2017-12-01	2:32:44AM	30.75	57.34	6.1	8	IGUT
102	Hojedk, kerman	2017-12-12	8:43:17AM	30.76	57.32	6.1	9	IGUT
103	Bozkurt	2019-08-08	11:25	37.851	29.584	6	10.92	DDA
104	Sivrice	2020-01-24	17:55	38.3593	39.063	6.8	8.06	DDA
105	Izmir	2020-10-30	11:51	37.879	26.703	6.6	14.9	AFAD
106	Bandare genaveh, Bushehr	2021-04-18	6:41:50AM	29.79	50.79	6	9	IGUT
107	Bandar khamir, Hormozgan	2022-07-01	9:32:06PM	26.83	55.27	6.1	12	IGUT
108	Bandar khamir, Hormozgan	2022-07-01	11:25:14PM	26.85	55.37	6.1	13	IGUT
109	Kahramanmaraş	2023-02-06	1:17	37.288	37.043	7.7	8.6	AFAD
110	Kahramanmaraş	2023-02-06	10:24	38.089	37.239	7.6	7	AFAD
111	Gaziantep	2023-02-06	1:28	37.304	36.92	6.6	6.2	AFAD
112	Yayladağı	2023-02-20	17:04	36.037	36.021	6.4	21.73	AFAD
113	"Montenegro_ Yugoslavia"	-	-	-	-	7.1	-	PEER
114	"Niigata_Japan"	-	-	-	-	6.6	-	PEER
115	"Basso Tirreno_ Italy"	-	-	-	-	6	-	PEER

* IGUT: Institute of Geophysics - University of Tehran



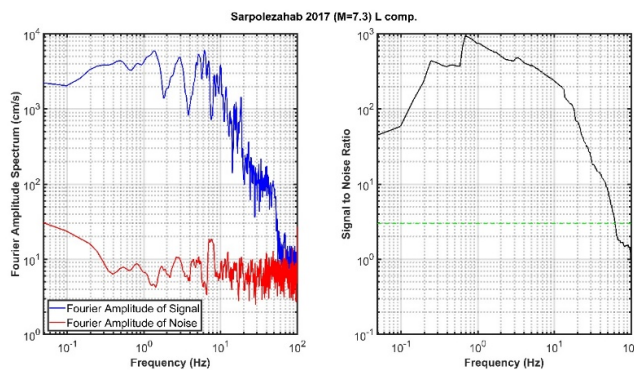
شکل ۲. تعداد زمین‌لرزه‌ها بر اساس بزرگی آن‌ها برای سه پایگاه داده استفاده شده در این مطالعه. زلزله آلاسکا با بزرگی ۷/۹ بزرگ‌ترین رخداد در این مجموعه داده‌ها است.

شکل مذکور پیداست، نسبت سیگنال به نویز برای این زلزله از حدود ۴۵ شروع شده و تا ۱.۵ ادامه می‌یابد. بیشتر بخش‌های این نسبت بالای ۳ دسی‌بل قرار دارد که نشان‌دهنده غالب بودن محتوای سیگنال نسبت به نویز است. با این حال، باید اشاره کرد که استفاده از نسبت سیگنال به نویز برای تعیین فرکانس‌های قطع شتاب‌نگاشت‌ها چندان دقیق و مناسب نیست. برای این مطالعه، فرکانس‌های قطع شتاب‌نگاشت‌ها برای اعمال در فیلتر باترورث بالاگذر با استفاده از کدهای نوشته‌شده و انجام تست‌های متعدد تعیین شد. در این فرآیند، پس از انتخاب چندین فرکانس، فرکانسی که کمترین مقدار را داشت و موجب تصحیح کامل خط منبای سیگنال می‌شد، به عنوان فرکانس قطع نهایی انتخاب گردید. جدول (ج) پیوست، فرکانس‌های قطع انتخابی برای رکوردهای مختلف مطالعه را نشان می‌دهد. برای زمین‌لرزه سرپل ذهاب، فرکانس قطع نهایی پس از انجام این تست‌ها برابر با ۰/۰۵ هرتز انتخاب شد. این در حالی است که این مقدار (۰/۰۵ هرتز) در نمودار SNR شکل ۳ قابل مشاهده نیست و حد پایین نمودار به این عدد نرسیده و نسبت ۳ دسی‌بل را قطع نمی‌کند. از این روش برای سایر شتاب‌نگاشت‌ها نیز استفاده شد، اما نتیجه مطلوبی حاصل نشد. بنابراین، روش SNR برای تعیین فرکانس‌های قطع توصیه نمی‌شود.

شکل ۲ رابطه بین تعداد زمین‌لرزه‌ها و بزرگی آن‌ها را برای سه منبع داده این مطالعه نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمین‌لرزه آلاسکا با بزرگی گشتاوری ۷/۹ بزرگ‌ترین رویداد در مجموعه داده‌های این مطالعه است.

۲-۳ نسبت سیگنال به نویز

نسبت سیگنال به نویز یک معیار طیفی است که کیفیت سیگنال شتاب را نسبت به سطح نویز زمینه ارزیابی می‌کند. در این روش، ابتدا یک بازه زمانی شامل سیگنال واقعی زلزله (مثلاً بخش موج S یا کل بازه لرزش) و یک بازه زمانی شامل نویز پیش از رویداد انتخاب می‌شود. سپس با انجام تبدیل فوریه بر هر بازه و محاسبه طیف حوزه فرکانسی هر یک، نسبت دامنه طیفی سیگنال به دامنه طیفی نویز در هر فرکانس به دست می‌آید. هدف این روش تعیین بازه فرکانسی است که در آن SNR در سطح مطلوب (≥ 3) قرار دارد و فرکانس‌های دیگر که دارای SNR پایین هستند، از تحلیل حذف می‌شوند (داگلاس و بور، ۲۰۱۱). شکل ۳ طیف دامنه فوریه سیگنال و نویز زمین‌لرزه سرپل ذهاب سال ۲۰۱۷ با بزرگی گشتاوری ۷/۳ را همراه با نمودار نسبت سیگنال به نویز آن را نشان می‌دهد. خط سبزچین مقدار نسبت سیگنال به نویز ۳ را مشخص کرده است. همان‌طور که از



شکل ۳. طیف دامنه فوریه مولفه‌های سیگنال و نویز در ایستگاه سرپل ذهاب برای زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ (M7.3) همراه با نمودار نسبت سیگنال به نویز متناظر.

۳-۳ طبقه‌بندی سایت

شرایط سایت استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، طبقه‌بندی ایستگاه‌های ثبت حرکت زمین بر اساس معیارهای مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام شده است. این طبقه‌بندی بر پایه‌ی میانگین سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری زمین (بر حسب متر بر ثانیه) صورت گرفته است (جدول ۲ را ببینید).

شبکه شتاب‌نگاری زلزله ایران شامل بیش از ۱۰۰۰ ایستگاه دیجیتال است که در مناطق مختلف کشور مستقر شده‌اند. با این حال، مقدار سرعت موج برشی میانگین در عمق ۳۰ متری زمین (V_{S30}) برای تعدادی از این ایستگاه‌ها تعیین نشده است. از این‌رو، پژوهشگران ایرانی از روش‌های جایگزین برای طبقه‌بندی نوع خاک و

جدول ۲. طبقه‌بندی ساختگاه‌ها در ایران بر اساس الزامات آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زمین‌لرزه (استاندارد ۲۸۰۰ ایران).

نوع خاک	توصیف لایه بندی زمین	سرعت موج برشی، V_{S30} (m/s)
I	سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاکهای سیمانته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر تا سطح زمین	$V_{S30} > 750$
II	خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل: شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد. سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده	$375 < V_{S30} < 750$
III	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر	$175 < V_{S30} < 375$
IV	خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیرچسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	$V_{S30} < 175$

طیفی R_{Hv} از طیف‌های هموار شده مؤلفه‌های افقی و عمودی محاسبه می‌شود که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$R_{Hv} = \frac{\sqrt{\frac{S_{H1}^2}{2\sqrt{T_{H1}}} + \frac{S_{H2}^2}{2\sqrt{T_{H2}}}}}{S_v(f)/\sqrt{T_V}} \quad (1)$$

در این رابطه، T_{H1} ، T_{H2} و T_V به ترتیب نشان‌دهنده بازه‌ی زمانی سیگنال‌ها برای دو مؤلفه‌ی افقی و یک مؤلفه‌ی عمودی هستند. از آن‌جا که پنجره‌های زمانی به‌صورت

برای رکوردهایی که داده‌ی مربوط به V_{S30} در دسترس نبود، طبقه‌بندی سایت‌ها با استفاده از روش تابع انتقال برآورد شد. در این روش، از نسبت طیفی H/V (یعنی نسبت طیف مؤلفه‌های افقی به مؤلفه عمودی) به‌عنوان تابع تقویت استفاده می‌شود. این تابع به‌منظور تعیین دوره تناوب یا فرکانس بنیادی هر سایت، بر اساس مطالعات زارع و همکاران (۱۹۹۹) و قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) به کار گرفته شده است. در روش H/V ، نسبت

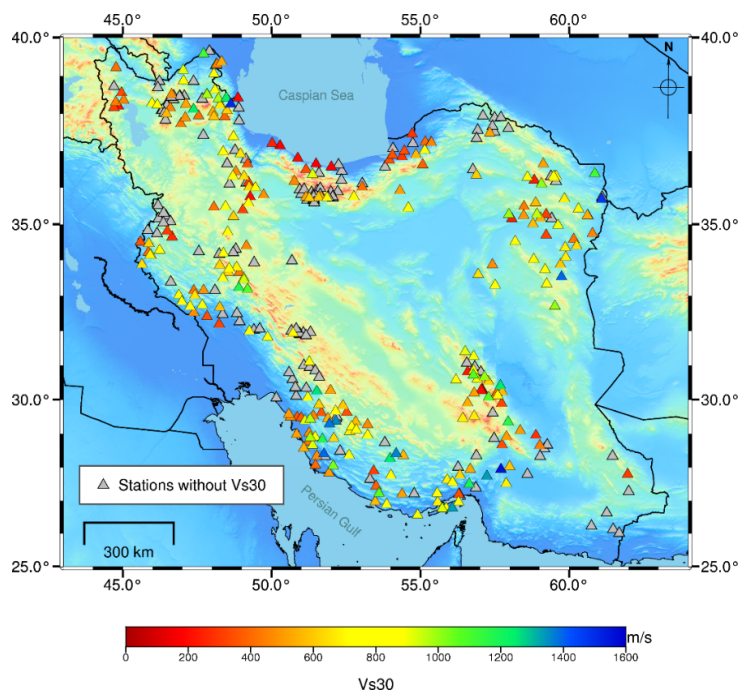
است.

شکل ۴، نقشه پراکندگی ایستگاه‌های ثبت حرکات زمین در این مطالعه را نشان می‌دهد؛ در این مطالعه برای ایستگاه‌های ایران، تعداد ۲۶۴ ایستگاه دارای مقدار V_{S30} مشخص و تعداد ۱۵۷ ایستگاه، فاقد این داده‌ها می‌باشند (که با نماد مثلث خاکستری مشخص شده‌اند). در این شکل همچنین تغییرات سرعت موج برشی بین ایستگاه‌های مختلف در سراسر ایران نمایش داده شده است. مقادیر V_{S30} در این ایستگاه‌ها از ۱۶۵ متر بر ثانیه در ایستگاه نوشهر تا ۱۵۶۴ متر بر ثانیه در ایستگاه کهنوج متغیر است. شکل ۵ نیز، پراکندگی رویدادهای ثبت شده را بر اساس طبقه‌بندی خاک (تعیین شده از بازه‌های مختلف V_{S30}) در قالب نمودار بزرگای گشتاوری در برابر فاصله‌ی رومرکزی نشان می‌دهد. همچنین در این شکل توزیع مقادیر V_{S30} مطابق با جدول ۲ ارائه شده است.

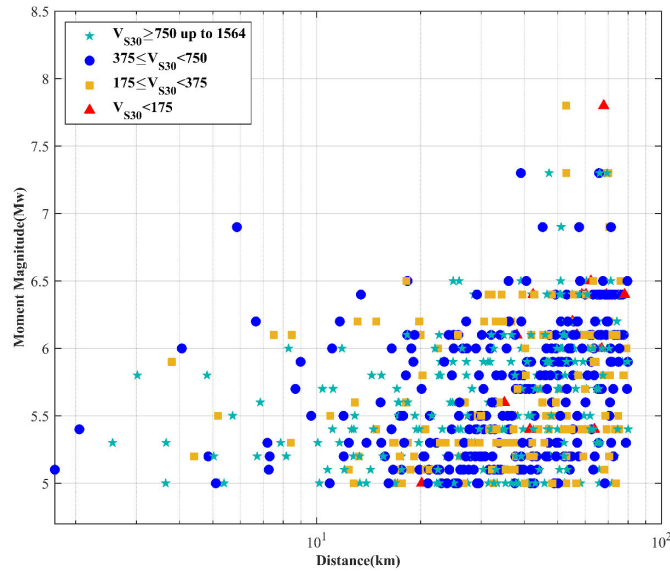
هم‌زمان بر روی تمامی مؤلفه‌ها اعمال می‌شوند، می‌توان این رابطه را به صورت ساده‌تری بازنویسی کرد (رابطه (۲)):

$$R_{hv} = \frac{[1/2(S_{H1}(f) + S_{H2}(f))]}{S_v(f)} \quad (2)$$

در پژوهش زارع و همکاران (۱۹۹۹)، خاک نوع ۱ شامل سایت‌هایی است که در آن‌ها هیچ‌گونه تقویت قابل توجهی در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۵ هرتز مشاهده نمی‌شود. خاک نوع ۲ به سایت‌هایی اطلاق می‌شود که نسبت طیفی H/V در آن‌ها دارای یک پیک اصلی بزرگ‌تر از ۳ در بازه‌ی فرکانسی ۵ تا ۱۵ هرتز است. خاک نوع ۳ شامل سایت‌هایی است که در آن‌ها پیک‌های در محدوده‌ی ۲ تا ۵ هرتز مشاهده می‌شود. در نهایت، خاک نوع ۴ به سایت‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها در فرکانس‌های پایین‌تر از ۲ هرتز به اوج می‌رسد، که معمولاً با وجود نهشته‌های ضخیم آبرفتی نرم همراه



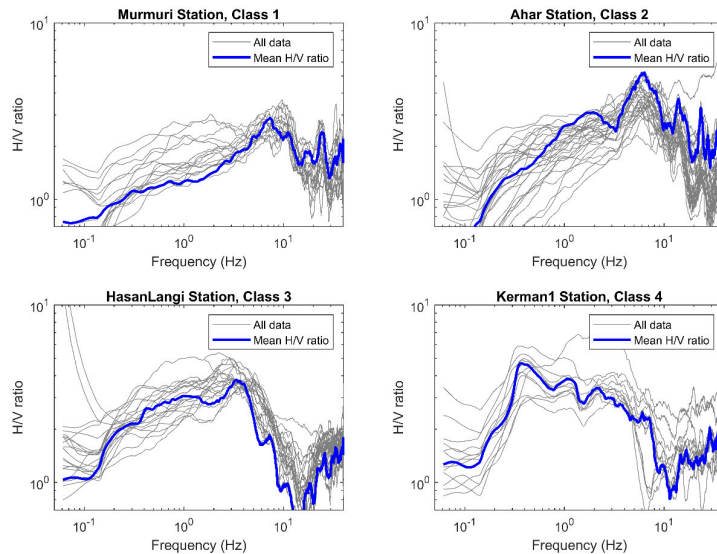
شکل ۴. نمایش سرعت موج برشی بین ایستگاه‌هایی با مقادیر اندازه‌گیری شده V_{S30} و ایستگاه‌هایی که فاقد داده V_{S30} هستند (مثلث‌های خاکستری).



شکل ۵. رابطه بین بزرگای گشتاوری و فاصله رومرکزی برای مجموعه داده‌های انتخاب‌شده ایران. نمادهای مختلف بیانگر مقادیر V_{S30} در ایستگاه‌های ثبت شتاب زمین در ایران هستند.

(ب) پیوست ارائه شده است. این جدول شامل موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها، نوع شتاب‌نگار، سرعت موج برشی، نوع خاک، و تعداد رکوردهای ثبت‌شده در هر ایستگاه در این مطالعه می‌باشد.

در شکل ۶ نیز نسبت‌های H/V در چهار ایستگاه شتاب‌نگاری ایران که هر کدام به یکی از چهار طبقه‌ی خاکی تعلق دارند، نمایش داده شده است. نتایج طبقه‌بندی سایت‌های ثبت شتاب زمین در ایران در جدول



شکل ۶. نتایج تحلیل نسبت طیفی (H/V) برای رکوردهای شتاب زمین بدست‌آمده از چهار ایستگاه نمونه، که هر یک نمایانگر یکی از رده‌های مختلف نوع زمین هستند.

۴ پردازش داده‌ها

بخش فرکانس بالا با استفاده از یک روش تکراری پیشرفته، توانسته‌اند جابه‌جایی‌های دائمی را با دقت قابل قبولی بازیابی کنند. همچنین، روش‌هایی مبتنی بر تبدیل موجک یا طیف هیلبرت برای تصحیح خودکار خط مبنا توسعه یافته‌اند که ضمن حذف رانش، جابه‌جایی‌های واقعی دائمی را نیز حفظ می‌کنند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

پس از انجام اصلاح خط مبنا، مرحله‌ی فیلترینگ برای حذف مؤلفه‌های فرکانسی نامطلوب در بازه‌های پایین و بالا انجام می‌شود. معمولاً از فیلتر میان‌گذر استفاده می‌شود تا نویزهای بلندمدت (در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱ هرتز) و همچنین نویزهای با فرکانس بالا (در نزدیکی حد نایکویست) به طور هم‌زمان کاهش یابند در این بخش، تمرکز بر کاهش نویز رکوردهای شتاب‌نگاری و بهبود نسبت سیگنال به نویز ($SNR > 3$) قرار دارد. برای دستیابی به این منظور، از یک فیلتر بالاگذر باترولث مرتبه چهار استفاده شد؛ به گونه‌ای که پایین‌ترین فرکانس قطع ممکن انتخاب شود تا بخش‌های بلندپریود سیگنال نیز حفظ گردد. فرکانس قطع هر شتاب‌نگاشت به‌صورت جداگانه تعیین شد تا پس از اعمال فیلتر، هیچ‌گونه انحرافی در خط پایه، چه در تاریخچه زمانی شتاب و چه در تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابجایی، رخ ندهد. بدین ترتیب، خط پایه با دقت بالا در اطراف صفر تثبیت شده است.

۵ نتایج

شکل ۷ اثر مراحل مختلف پردازش شامل عدم پردازش، اعمال فیلتر، اصلاح خط پایه، و ترکیب این دو را بر تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی رکورد زلزله‌ی سرپل‌ذهاب (M7.3, 2017) نشان می‌دهد. در حالت بدون فیلترگذاری، انتگرال‌گیری دوگانه شتاب خام منجر به ایجاد رانش شدید و غیرواقعی در جابجایی می‌شود که

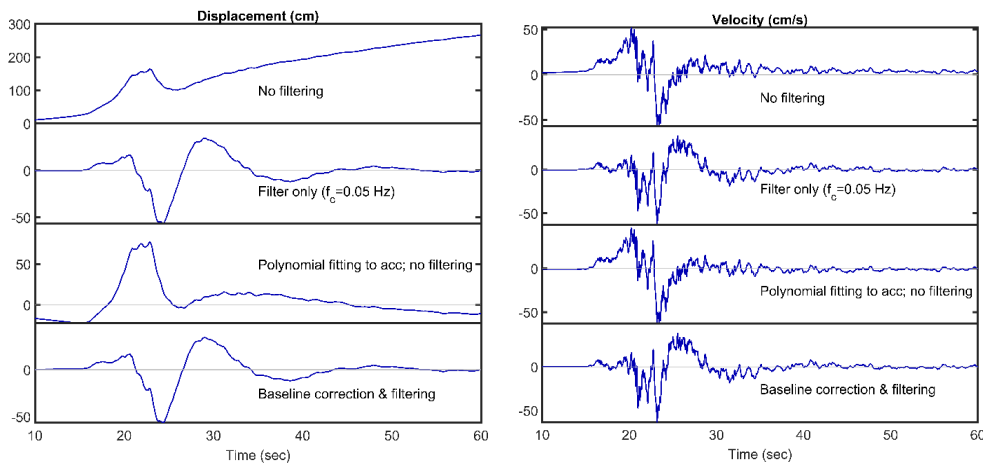
در این مطالعه برای دستیابی به مجموعه‌ای همگن و قابل اعتماد، تنها زلزله‌های پوسته‌ای کم‌عمق با بزرگای گشتاوری بیش از ۵ انتخاب شدند. در نهایت، بیش از ۵۶۰۰ تاریخچه زمانی شتاب مرتبط با ۴۰۴ زلزله از ۱۳۶۶ ایستگاه شتاب‌نگاری جمع‌آوری شد که پایه و اساس تحلیل‌های بعدی را تشکیل داد. داده‌های گردآوری‌شده نیازمند پردازش اولیه برای تضمین کیفیت و دقت بودند. هدف از این گام، اطمینان از ورود تنها رکوردهای سالم و معتبر به تحلیل‌ها بود تا نتایج نهایی از اعتبار کافی برخوردار باشند.

۴-۱ تصحیح خط مبنا

هدف از تصحیح خط مبنا، حذف تغییرات تدریجی بلندمدت (Drifts) در سیگنال شتاب است که بر اثر عواملی مانند گرم شدن حسگر، جابه‌جایی دستگاه یا نویز الکترونیکی ایجاد می‌شود. به طور معمول فرض می‌شود که در پایان زمین‌لرزه، سرعت زمین باید تقریباً برابر صفر باشد؛ بنابراین، هرگونه روند غیرصفر در انتهای رکورد نشان‌دهنده وجود خطای خط مبنا است. روش‌های کلیدی و متداول در منابع علمی برای رفع این مشکل، افزودن یک چندجمله‌ای (معمولاً از مرتبه دوم) به مؤلفه سرعت و سپس تفریق آن از داده اصلی است (قاسمی و همکاران، ۲۰۰۹). به عنوان مثال، بور و بومر (۲۰۰۵) با برازش یک چندجمله‌ای مناسب به سیگنال سرعت انتگرال‌گیری‌شده و سپس تفریق آن از سیگنال اولیه، خطای خط مبنا را اصلاح کرده‌اند.

در سال‌های اخیر، روش‌های پیشرفته‌تری نیز برای تصحیح خط مبنا ارائه شده‌اند. به عنوان نمونه، چانگ و همکاران (۲۰۲۵) با تقسیم رکورد خام به دو بخش شامل مؤلفه‌های فرکانس پایین (حاوی جابه‌جایی دائمی) و فرکانس بالا (شامل نویز و اغتشاشات)، و سپس پالایش

نوسانات کم‌فرکانس و رانش خفیف می‌شود. فیلترگذاری یا اصلاح پایه به‌تنهایی بخشی از خطا را کاهش می‌دهند، اما هیچ‌یک به‌تنهایی قادر به رفع کامل اثرات بلنددوره نیستند. مشابه جابجایی، تنها مرحله‌ای که سیگنال سرعت را واقع‌گرایانه و بدون خطای پایه ارائه می‌دهد، ترکیب اصلاح پایه و فیلترگذاری است. این رویکرد رفتار بلندمدت غیرواقعی را حذف کرده و قابل سیگنال‌های سرعت و جابجایی را به فرم فیزیکی و قابل استفاده در تحلیل‌های مهندسی، از جمله محاسبه طیف پاسخ، بازسازی می‌کند.



شکل ۷. تأثیر مراحل پردازش بر تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی رکورد شتابنگاشت زمین‌لرزه سرپل‌دهاب (M7.3, 2017). چهار حالت شامل: بدون پردازش، صرفاً فیلترگذاری، اصلاح خط پایه، و ترکیب اصلاح خط پایه و فیلترگذاری.

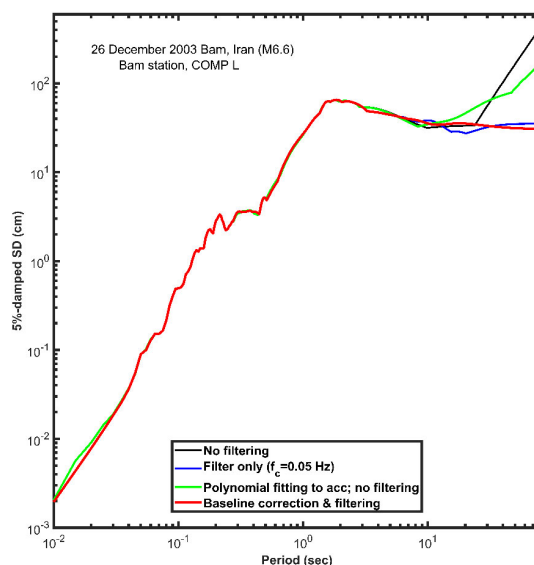
بازه عمدتاً تحت تأثیر محتوای فرکانس بالا و میانه رکورد است. برای این رکورد در تناوب‌های بلند (بیش از ۳-۲ ثانیه)، طیف‌های مربوط به عدم پردازش و تنها اصلاح خط پایه انحراف قابل توجهی نشان می‌دهند و مقادیر جابجایی طیفی به‌صورت ناپایدار و رو به افزایش ظاهر می‌شود. این رفتار ناشی از وجود شیفت پایه و مؤلفه‌های با فرکانس بسیار پایین در رکورد خام است. استفاده از فیلترگذاری به‌تنهایی تا حدی روند بلنددوره‌ای را کنترل می‌کند، اما ترکیب اصلاح خط پایه و فیلترگذاری

ناشی از مؤلفه‌های کم‌فرکانس و خطای پایه است. اعمال فیلترباتوروث بالاگذر، بخشی از این رانش را کاهش می‌دهد، اما به دلیل باقی ماندن خط پایه‌ی ناسازگار، جابجایی همچنان دچار انحراف است. اصلاح خط پایه به‌تنهایی روند بلندمدت سیگنال را تا حد زیادی حذف می‌کند، اما به دلیل وجود نویز کم‌فرکانس، شکل جابجایی هنوز کاملاً پایدار نیست. در نهایت، ترکیب اصلاح پایه و فیلترگذاری منجر به بازسازی جابجایی پایدار، بدون رانش و فیزیکی می‌شود که قابل اتکا برای تحلیل‌های مهندسی است. سیگنال سرعت نیز روندی مشابه نشان می‌دهد. نبود فیلتر یا اصلاح پایه سبب ایجاد

شکل ۸ طیف پاسخ جابجایی با میرایی ۵ درصد را برای مؤلفه افقی (مؤلفه L) ایستگاه بم مربوط به زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم (M6.6) را نشان می‌دهد. چهار وضعیت پردازش رکورد شامل بدون پردازش، فقط فیلترگذاری، تنها اصلاح خط پایه، و ترکیب اصلاح خط پایه و فیلترگذاری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که، در بازه تناوب‌های کوتاه و میانی (حدود ۰.۲ تا ۱ ثانیه)، اختلاف بین منحنی‌ها ناچیز بوده و طیف پاسخ نسبت به نوع پردازش حساسیت کمتری دارد؛ زیرا این

سازگاری دینامیکی را داشته و برای کاربردهای مهندسی، از جمله محاسبه جابجایی، قابل اعتمادتر است.

کم فرکانس (منحنی قرمز) تنها حالتی است که در کل دامنه تناوب، طیفی پایدار، فیزیکی و فاقد رشد مصنوعی ارائه می‌دهد. منحنی نهایی (اصلاح پایه + فیلتر) بیشترین



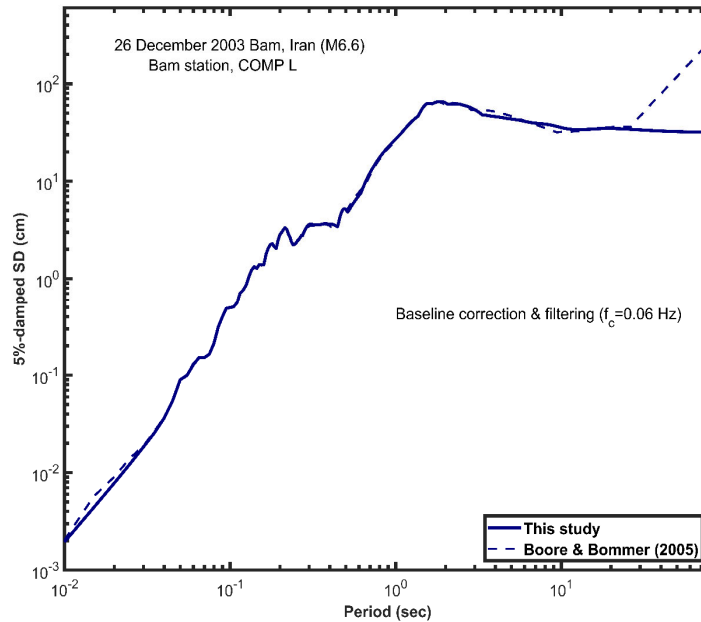
شکل ۸. نمایش طیف پاسخ جابجایی با میرایی ۵ درصد برای مؤلفه افقی ایستگاه بم مربوط به زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم (M6.6). چهار وضعیت پردازش رکورد شامل بدون پردازش، فقط فیلترگذاری، تنها اصلاح خط پایه، و ترکیب اصلاح خط پایه و فیلترگذاری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

دو پردازش حفظ شده است. در پیوندهای بلندتر از ۶-۵ ثانیه، اختلاف‌ها چشمگیرتر می‌شوند. منحنی مربوط به روش بور و بومر (۲۰۰۵) افزایش قابل توجهی را در انتهای طیف نشان می‌دهد؛ حال آنکه طیف این مطالعه رفتار کاملاً پایدارتر و کنترل‌شده‌تری دارد. این تفاوت معمولاً ناشی از حساسیت رکورد جابجایی به نوع فیلترگذاری، رانش تجمعی و انتخاب فرکانس قطع است (فرکانس قطع برای هر دو مطالعه یکسان است). به نظر می‌رسد از آنجا که در این مطالعه علاوه بر فیلتر بالاگذر از فیلتر پایین‌گذر (۲۵ هرتز) نیز استفاده شده است توانسته است پاسخ بلندپریود را از نوسانات غیرواقعی محافظت کند. از دید کاربردی، این پایداری در بلندپریود برای مطالعاتی که بر پاسخ سازه‌های بلند و تحلیل‌های مبتنی بر جابجایی تمرکز

در شکل ۹ طیف‌های ارائه‌شده رفتار دو رویکرد پردازش رکورد را برای مؤلفه افقی زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم (M6.6) نشان می‌دهند. در هر دو حالت، رکوردها پس از اعمال تصحیح خط پایه و فیلترگذاری پردازش شده‌اند، اما تفاوت در انتخاب نوع فیلترگذاری (بالاگذر و پایین‌گذر)، پارامترهای پردازش به‌ویژه فرکانس قطع فیلتر و روش حذف رانش بر پاسخ جابجایی بلندپریود اثر معناداری گذاشته است. در بازه پیوندهای کوتاه تا حوالی ۰/۵ ثانیه، دو منحنی تقریباً رفتار مشابهی دارند. در این محدوده، محتوای رکورد به‌طور غالب تحت تأثیر امواج با فرکانس‌های بالاتر است و بنابراین حساسیت کمتری به انتخاب فیلتر بالاگذر و روندزدایی دارد. این همخوانی تأیید می‌کند که بخش با فرکانس بالا به‌طور پایدار در هر

مانند بم، می‌تواند بر رفتار بخش بلندپریود طیف اثر مستقیم داشته باشد و بنابراین گزارش دقیق پارامترهای پردازش در تحلیل‌های مهندسی ضرورت دارد.

دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین مقایسه‌ای به خوبی نشان می‌دهد که انتخاب روش پردازش، به ویژه برای رکوردهای میدان نزدیک



شکل ۹. مقایسه طیف پاسخ جابجایی با میرایی ۵ درصد برای مؤلفه L زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم (M6.6) در ایستگاه بم. منحنی پیوسته نشان‌دهنده رکورد پردازش شده در این مطالعه و منحنی خط‌چین مربوط به طیف حاصل از روش پردازش ارائه شده توسط بور و بومر (۲۰۰۵) است.

پردازش این تحقیق و مطالعه بور و بومر (۲۰۰۵) اشاره کرد.

در این مطالعه، تعداد شتاب‌نگاشت‌های حذف شده از مجموعه داده‌های ایران، ترکیه و PEER برابر با ۴۶۲ مورد برآورد می‌شود. این شتاب‌نگاشت‌ها شامل رکوردهایی بودند که حتی با اعمال مقادیر مختلف فیلتر، امکان بازیابی آن‌ها با نسبت مناسب سیگنال به نویز وجود نداشت، یا رکوردهایی که زمین‌لرزه مسبب آن‌ها دارای سازوکار کانونی نرمال بوده و در نتیجه برای شرایط لرزه‌زمین‌ساختی ایران مناسب تلقی نمی‌شدند. همچنین، برای یکنواخت‌سازی نرخ نمونه‌برداری، فرآیند resampling با استفاده از نرم‌افزار SAC انجام شد. در مراحل کاهش سمبل از دستور DECIMATE بهره گرفته

۶ نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد تا با یکپارچه‌سازی داده‌های شتاب‌نگاری ملی (شبکه ISMN/BHRC) و بهره‌گیری از منابع بین‌المللی معتبر، ویژگی‌های رخدادها (مکان و بزرگی) و ایستگاه‌ها بازتعریف و پردازش شوند. علاوه بر این، در ایستگاه‌های موجود، مقادیر سرعت موج برشی اندازه‌گیری و روش‌های طبقه‌بندی ساختگاه‌ها از جمله روش قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) و روش پیشنهادی مبتنی بر نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) برای تمامی ایستگاه‌ها اعمال گردید. از جمله دستاوردهای مهم این پژوهش می‌توان به افزایش قابل توجه حجم داده‌ها (نسبت به پایگاه‌های قبلی)، یکسان‌سازی روش‌های تصحیح و فیلترگذاری و مقایسه طیف پاسخ جابجایی روش

بین منحنی‌های طیف پاسخ جابجایی ناچیز بوده و طیف نسبت به نوع پردازش حساسیت کمتری دارد. ترکیب اصلاح خط‌پایه و فیلترگذاری کم‌فرکانس تنها حالتی است که در کل دامنه تناوب، طیفی پایدار را ارائه می‌دهد. بعلاوه اعمال یک فیلتر پایین‌گذر در کنار یک فیلتر بالاگذر می‌تواند پاسخ جابجایی در ناحیه بلندپریود را از نوسانات غیرواقعی محافظت کند.

قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) سازمان مدیریت بحران و حوادث اضطراری ترکیه (AFAD)، مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) و سایر نهادهایی که داده‌های شتاب‌نگاری را در دسترس قرار دادند، اعلام می‌دارند. همچنین، از حمایت‌های مستمر پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT) صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

- Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 359-387.
- Amiri, G. G., Dana, F. M., & Sedighi, S. (2008). Determination of design acceleration spectra for different site conditions, magnitudes, safety levels and damping ratios in Iran. *International Journal of Civil Engineering*, 6(3).
- Amoly, R., Khosrojerdi, D., Shaiee, A., & Kamalian, M. (2011). Evaluation of design spectra in iranian seismic code. Conference: 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., Wooddell, K. E., Graves, R. W., Kottke, A. R., & Boore, D. M. (2014). NGA-West2

شد که شامل فیلترگذاری داخلی anti-aliasing است. در موارد افزایش سمپلینگ نیز از دستور INTERP استفاده شد. این روند باعث حفظ محتوای فرکانسی اصلی رکوردها و جلوگیری از پدیده الیاسینگ می‌شود. در نهایت، نرخ نمونه‌برداری تمامی رکوردها به‌طور یکنواخت روی ۲۰۰ هرتز تنظیم شد. در رکوردهای ایران، AFAD و PEER، زمان داده‌ها به‌طور پیش‌فرض بر اساس زمان UTC همگن‌سازی شده است. همچنین برای حذف آفت و روندهای ناخواسته، اصلاحات استاندارد شامل حذف میانگین، حذف روند خطی و تصحیحات پایه‌ای طبق روش چیو (۱۹۹۷) اعمال شد. طبقه‌بندی سایت‌ها برای رکوردهای ایران، ترکیه و PEER همگی بر اساس مقادیر V_{S30} (جدول ۲) و معیارهای استاندارد ۲۸۰۰ ایران تعیین شده است که در نهایت همه رکوردها به ۴ نوع خاک آیین‌نامه ایران دسته‌بندی شدند. مشخصات زمین‌لرزه‌ها همگی با مقیاس بزرگای گشتاوری M_w استاندارد شده‌اند.

برای یکنواخت‌سازی فرمت مولفه‌های رکوردهای AFAD با ساختار رکوردهای ایران، مولفه‌های E، N و U (با پسوند ascii) به ترتیب به مولفه‌های L، T و V با پسوند sac تبدیل شدند. همین فرایند برای رکوردهای PEER نیز به‌منظور هماهنگ‌سازی با فرمت رکوردهای ایران انجام شد. همچنین، تعیین نوع محل ایستگاه‌ها (سازه‌ای یا free-field) بر اساس اطلاعات موجود در فیلترهای وب‌سایت رسمی شبکه شتاب‌نگاری ایران و ترکیه انجام گرفت. محدودیت‌های اصلی مطالعه شامل (۱) تأثیر پالس‌های میدان نزدیک و کمبود رکوردهای ایران در این فواصل، (۲) خطاهای بالقوه ناشی از استفاده از Polynomial fitting برای اصلاح بیس‌لاین و (۳) احتمال رخداد Aliasing در رکوردهایی با نرخ نمونه‌برداری پایین است. نتایج مراحل پردازش نشان می‌دهد که، در بازه تناوب‌های کوتاه و میانی، اختلاف

- database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989-1005.
- Behnamfar, F., Babaei, A. H., & Ghandil, M. (2020). Smoothed response spectra including soil-structure interaction effects. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(1), 37-51.
- Bommer, J. J., & Elnashai, A. S. (1999). Displacement spectra for seismic design. *Journal of earthquake engineering*, 3(01), 1-32.
- Bommer, J. J., & Mendis, R. (2005). Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(2), 145-165.
- Boore, D. M., & Bommer, J. J. (2005). Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(2), 93-115.
- Boore, D. M., Stephens, C. D., & Joyner, W. B., (2002). "Comments on baseline correction of digital strong-motion data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 92, no. 4, pp. 1543-1560.
- Bozorgnia Y, Abrahamson NA, Atik LA, Ancheta TD, Atkinson GM, Baker JW, et al. (2014). NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra*;30(3):973-87.
- Calvi, G. M., & Andreotti, G. (2022). Effects of local soil, magnitude and distance on empirical response spectra for design. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(3), 1117-1144.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake spectra*, 24(1), 139-171.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.
- Chang, Z., Li, W., Goda, K., & Yan, Z. (2025). Automated Recovery of Permanent Displacement in Near-Fault Ground Motions with Fling-Step Effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Chiu, H.-C. (1997). "Stable baseline correction of digital strong-motion data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 87, no. 4, pp. 932-944.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2001). Direct displacement-based design: use of inelastic vs. elastic design spectra. *Earthquake spectra*, 17(1), 47-64.
- Colavitti, L., Bindi, D., Tarchini, G., Scafidi, D., Picozzi, M., & Spallarossa, D. (2024). A high-quality data set for seismological studies in the East Anatolian Fault Zone, Türkiye. *Earth System Science Data Discussions*, 2024, 1-32.
- Douglas, J., & Boore, D. M. (2011). High-frequency filtering of strong-motion records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(2), 395-409.
- Faccioli, E., Paolucci, R., & Rey, J. (2004). Displacement spectra for long periods. *Earthquake spectra*, 20(2), 347-376.
- Farajpour, Z., Pezeshk, S., & Zare, M. (2019). A new empirical ground-motion model for Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), 732-744.
- Farajpour, Z., Zare, M., Pezeshk, S., Ansari, A., & Farzanegan, E. (2018). Near-source strong motion database catalog for Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(4), 80.
- Francis, T., Sullivan, T., Hulsey, A., & Elwood, K. (2025). Recommendations for the shape of the design response spectrum in the New Zealand seismic loadings technical specification. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 58(2), 83-97. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.1692>
- Fukushima, Y., & Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the seismological Society of America*, 80(4), 757-783.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., & Koketsu, K. (2009). An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of seismology*, 13, 499-515.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., & Sinaeian, F. (2009). Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 121-132.
- Ghasemi, H., Zare, M., & Sinaeian, F. (2009). Smooth spectra Of horizontal and vertical ground motions for Iran. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 46(1), 1-17.
- Hall, W. J., Mohraz, B., & Newmark, N. M.

- (1975). *Statistical studies of vertical and horizontal earthquake spectra*. Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services.
- Maggi, A., Jackson, J., Priestley, K., & Baker, C. (2000). A re-assessment of focal depth distributions in southern Iran, the Tien Shan and northern India: Do earthquakes really occur in the continental mantle? *Geophysical Journal International*, 143(3), 629-661.
- Moghaddam, H., Darbani, M. S., Sadrara, A., & Hajirasouliha, I. (2024). Recommendation of new design spectra for Iran using modified Newmark method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108332.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1987). *Earthquake Spectra and Design*. Earthquake Engineering Research Institute. <https://books.google.com/books?id=SHBLAQAAIAAJ>
- Panzer, F., Bergamo, P., Danciu, L., & Fäh, D. (2024). Investigating worldwide strong motion databases to derive a collection of free-field records to select design-compatible waveforms for Switzerland. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(10), 4843-4872.
- Sandikkaya, M. A., Güryuva, B., Kale, Ö., Okçu, O., İcen, A., Yenier, E., & Akkar, S. (2024). An updated strong-motion database of Türkiye (SMD-TR). *Earthquake Spectra*, 40(1), 847-870.
- Shokouhirad, S., Ansari, A., & Ghafory-Ashtiany, M. (2025). The recently compiled strong motion databank of Iran. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(1), 1-24.
- Talebian, M., & Jackson, J. (2004). A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysical Journal International*, 156(3), 506-526.
- Tolis, S. V., & Faccioli, E. (1999). Displacement design spectra. *Journal of earthquake engineering*, 3(01), 107-125.
- Trifunac M. D. & Lee V., (1973). Routine computer processing of strong-motion accelerograms. California Institute of Technology Pasadena, California.
- Yang, H., Li, Y., Hu, L., Pan, W., & Ji, S. (2024). New baseline correction method for near-fault ground-motion records based on continuous wavelet transform. *Seismological Research Letters*, 95(2A), 607-625.
- Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., & Soghrat, M. (2018). Empirical equations for the prediction of PGA and pseudo spectral accelerations using Iranian strong-motion data. *Journal of Seismology*, 22, 263-285.
- Zafarani, H., & Soghrat, M. (2017). A selected dataset of the Iranian strong motion records. *Natural hazards*, 86, 1307-1332.
- Zare, M., Bard, P.-Y., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(2), 101-123.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., & Somerville, P. G. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.

Constructing a multi-source ground motion data bank: methodology for cleaning and integrating Iran, Turkey, and PEER records

Farzad Mahdavianfard¹, Mehdi Zare^{2*}, Hamid Zafarani² and Mojtaba Labibzadeh³

¹ Ph.D., Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

² Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Chamran University, Ahwaz, Iran

(Received: 08 November 2025, Accepted: 06 March 2026)

Summary

The primary objective of this study is to provide a comprehensive evaluation of the challenges and methodologies involved in processing and refining earthquake ground-motion records, ultimately leading to the development of a reliable and unified database. The data used in this research were compiled from three different sources, records from Iran, Turkey, and the international PEER database, covering the period from 1935 to 2024. The Iranian strong-motion dataset includes 1,913 time histories from 189 earthquakes with moment magnitudes greater than 5 and recorded at distances up to 80 km. The additional datasets consist of 576 time histories from 99 Turkish earthquakes (AFAD), as well as 116 shallow crustal earthquakes from around the world obtained from the PEER database, which together provide 3,114 time histories with moment magnitudes greater than 5 and recorded at distances of up to 30 km. In recent years, large databases such as NGA-West2 have provided a set of processed or semi-processed records that both provide a model for processing and are used as a source of records that can be used in regional studies. In many seismic regions, such as Iran, despite significant seismic activity, access to high-quality strong ground motion records, especially at high magnitudes ($M_w > 6.5$) and near-fault distances, remains limited. This data shortage causes response spectrum models or ground motion prediction relationships to be based on a small set of local data that are not statistically reliable. To overcome this limitation, one effective solution is to combine domestic (Iranian) data with records from neighboring countries, such as Turkey, and with international databases, such as PEER NGA-West2. During the record-processing workflow, the data were first cleaned, and incomplete or corrupted records (such as those with gaps or instrument malfunction) were removed. An initial filter was then applied to eliminate unwanted noise. Subsequently, baseline correction was performed to remove non-physical cumulative drifts in the velocity and displacement components. Furthermore, the signal-to-noise ratio (SNR) was estimated as the final criterion for record selection. Therefore, records with low SNR (weak signal or high noise) are eliminated. These steps lead to an integrated database of high-quality ground-motion records from these three sources, which can be used in future studies, such as seismic hazard analysis, seismic design, and numerical modeling. We included only healthy and valid records in the analysis to ensure the final results were sufficiently reliable. The processing results show that, within the short- and mid-period ranges, the differences between displacement response spectra are negligible, indicating limited sensitivity of the spectra to the processing approach used. The combination of baseline correction and low-frequency filtering appears to be the only approach that produces stable spectra across the entire period range, free from artificial long-period amplification. Additionally, applying a low-pass filter alongside a high-pass filter can effectively protect long-period displacement responses from non-physical oscillations.

Keywords: Processing, baseline correction, butterworth filter, strong ground motion records, displacement response spectrum

* Corresponding author:

mzare@iiees.ac.ir