

چکیده

در این مقاله بررسی آماری وابستگی منطقه‌ای جنبش‌های قوی زمین در سه منطقه تکنیکی (۱) البرز-آذربایجان-کپه‌داغ، (۲) ایران مرکزی و (۳) زاگرس با استفاده از روش تحلیل واریانس^۱ (ANOVA) مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحلیل‌ها از مؤلفه‌های افقی شتاب طیفی در طیف وسیعی از پریود (۰/۱ تا ۵ ثانیه) استفاده شد. بانک داده جنبش قوی زمین ایران متشکل از ۱۹۴۳ زوج رکورد شتاب حاصل از ۴۲۶ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری ۴/۵ تا ۷/۷ می‌باشد که توسط ۶۸۰ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت شدند. در این مطالعه به منظور ترکیب مقادیر شتاب طیفی افقی از پارامتر $GMRoI_{50}$ [۱] که مستقل از جهت قرارگیری سنسورهای ثبت شتاب‌نگاشت نسبت به یکدیگر است استفاده شد. برای اولین بار مشخصات نظیر فاصله گسیختگی (نزدیک‌ترین فاصله به صفحه گسیختگی) و مکانیسم گسلش برای تمامی زلزله‌ها برآورد شد. برای ۶۳ ایستگاه مقدار سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{S30}) با استفاده از فرکانس اصلی ساختمان و رویکرد مبتنی بر روش نسبت طیفی افقی به عمودی [۲] تعیین شد. نتایج حاصل از این تکنیک حاکی از امکان ترکیب داده‌های ثبت شده در سه منطقه تکنیکی و تشکیل پایگاه جنبش قوی زمین واحد برای کل ایران می‌باشد. تعداد ۵۹۰۲ رکورد از ۲۱۷ زلزله در کالیفرنیا از بانک NGA-West2 استخراج و امکان ترکیب آنها با رکوردهای ایران از طریق تحلیل واریانس ارزیابی شد. در مورد تشابه جنبش‌های قوی ایران و کالیفرنیا نمی‌توان اظهار نظر قطعی داشت و داده‌های بیشتری از ایران مورد نیاز می‌باشد.

واژگان کلیدی: بانک داده‌های جنبش قوی زمین، روابط کاهندگی، وابستگی منطقه‌ای، تحلیل واریانس، ایران، کالیفرنیا.

بررسی آماری وابستگی منطقه‌ای جنبش‌های قوی زمین در ایران و کالیفرنیا با استفاده از تحلیل واریانس

عاطفه درزی

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

محمد رضا ذوالفقاری (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، mzolfaghari@catrisks.com

۱- مقدمه

فرایند انتخاب مناسب‌ترین رابطه کاهندگی هستند که با ساختار تکنیکی، لرزه‌زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی منطقه مورد بررسی سازگار باشد. باید در نظر داشت که برآورد دقیق‌تر و پایدارتر از معادله پیش‌بینی جنبش قوی زمین مستلزم بانک داده کامل از منطقه مورد نظر می‌باشد. هرچه تعداد رکوردهای مورد استفاده جهت تخمین رابطه کاهندگی بیشتر باشد، ضرایب برآورد شده از برازش بر روی داده‌ها، منطقی‌تر و صحیح‌تر خواهند بود. اما سؤالی که در سال‌های اخیر بسیار مورد بحث قرار گرفته ارائه راه‌حل‌های مناسب برای منطقه‌ای است که با داده ناکافی مواجه است. با افزایش داده‌های مورد استفاده در برازش، می‌توان

یکی از عناصر کلیدی در فرایند برآورد احتمالی خطر در یک ساختمان مدل‌های تخمین جنبش قوی زمین هستند. استفاده از روابط تجربی تخمین جنبش قوی زمین که تحت عنوان توابع کاهندگی شناخته شده‌اند امروزه در برآورد خطر احتمالی زلزله منشأ ورود دو نوع عدم قطعیت ذاتی و معرفتی در فرایند تحلیل خطر هستند. از آنجایی که توسعه چنین توابعی با استفاده از تحلیل‌های آماری بر داده‌های شتاب‌نگاری یک منطقه صورت می‌گیرد، وجود عدم قطعیت در نتایج نهایی امر ذاتی بوده که معمولاً توسط توزیع‌های پارامتریک حول مقادیر میانی ارائه می‌شوند. از این رو بخش دیگری از عدم قطعیت‌ها مرتبط به

روش آماری را از سایر روش‌ها ممتاز می‌سازد، عدم وابستگی آن به مراحل استخراج معادله پیش‌بینی جنبش‌های زمین است. در نتیجه روش مناسبی جهت برآورد وابستگی منطقه‌ای جنبش‌های زمین از دو منطقه با تکنیک مشابه می‌باشد. در نهایت می‌توان به امکان ترکیب این دو بانک زلزله جهت تشکیل یک کاتالوگ مکمل برای توسعه رابطه کاهندگی پی برد. لذا بررسی دقیق این مسئله در مطالعات خطر بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

داگلاس [۳] با استفاده از این تحلیل به مقایسه جنبش‌های زمین پنج منطقه محلی در اروپا پرداخت. امبرسیز و همکاران [۱۶] یک رابطه کاهندگی را برای منطقه غرب اوراسیا با استفاده از داده‌های خاورمیانه و غرب اروپا ارائه دادند. آنها مشخصاً اعلام کردند که با توجه به تفاوت قابل توجه زلزله‌های کالیفرنیا به علت کاهندگی سریع‌تر در اروپا، از تجمیع این داده‌ها جهت برازش رابطه کاهندگی غرب اروپا صرف نظر شد.

در ایران، قاسمی و همکاران [۱۴] و صدقاتی و پزشکی [۱۷] با استفاده از تحلیل واریانس به بررسی وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های زمین ثبت شده در ایران پرداختند و به تغییرپذیری منطقه‌ای قابل توجهی دست نیافتند. قاسمی و همکاران [۱۴] این تحلیل را برای کل داده‌های ایران (۷۱۶ رکورد) از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۷ و رکوردهای اوراسیا غربی و کوبه (۱۷۷ رکورد) تکرار کرده و دریافتند که می‌توان داده‌های اوراسیا غربی و کوبه را به داده‌های ایران افزود و بر این اساس یک رابطه کاهندگی تجربی برای ایران پیشنهاد دادند. صدقاتی و پزشکی [۱۷] تعداد ۱۱۵۷ رکورد از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۳ از سراسر ایران را مورد بررسی قرار دادند. باید توجه داشت که تکنیک تحلیل واریانس را نمی‌توان بر فواصل بزرگ-فاصله‌ای که در آن داده هم‌پوشان از دو منطقه مدنظر وجود ندارد اعمال کرد. لذا تعداد اندک داده‌های هم‌پوشان منجر به نتایج ضعیف می‌شود. در این راستا، تعداد ناکافی داده‌ی مورد استفاده در تحقیق قاسمی و همکاران [۱۴] و صدقاتی و پزشکی [۱۷] منجر به بروز ضعف‌هایی از جمله تقسیم ایران تنها به دو گروه تکتونیکی،

محدودیت‌های منتج از بانک داده ضعیف را برطرف کرد. به‌عنوان مثال می‌توان رابطه کاهندگی طیفی را با عدم قطعیت کمتر و قابل استفاده در بازه وسیع‌تری از بزرگای گشتاوری، فاصله منبع تا سایت و پریرود طیفی استخراج کرد. محققان بر این باورند که زمین‌لرزه‌هایی که در مناطق با لرزه‌زمین‌ساخت مشابه رخ می‌دهند، دارای رفتار لرزه‌ای مشابهی نیز هستند و در نتیجه امکان ترکیب این داده‌ها در یک بانک داده‌ای واحد وجود دارد [۳-۴]. به‌عنوان نمونه می‌توان به پروژه‌های NGA-West2 اشاره کرد که در آن معادلات پیش‌بینی جنبش زمین ارائه شده بر مبنای زلزله‌هایی که در مناطق پوسته کم‌عمق فعال (نظیر ایران، کالیفرنیا، ژاپن) [۵] رخ دادند، استخراج شدند. در برخی مطالعات صورت گرفته در ایران، رکوردهای جنبش قوی زمین به دو گروه البرز-ایران مرکزی و زاگرس تقسیم و برای هر منطقه رابطه کاهندگی جداگانه‌ای پیشنهاد شد. زارع و همکاران [۶]، قدرتی‌امیری و همکاران [۷] و صفاری و همکاران [۸] از این جمله‌اند. زعفرانی و همکاران [۹] و زعفرانی و حسنی [۱۰] افت تنش‌های متفاوتی را برای دو منطقه شمال ایران (۱۳۵ بار) و زاگرس (۶۶ بار) یافتند. این در حالی است که در بسیاری از مدل‌های ارائه شده تفاوت منحنی‌های کاهندگی هر منطقه با در نظر گرفتن انحراف معیار هر رابطه قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همچنین بعضی محققان معتقدند که در یک چارچوب بزرگ منطقه‌ای، کل ایران می‌تواند به صورت یک واحد رفتار کند [۱۱]. در این راستا چند محقق نظیر زعفرانی و همکاران [۱۲-۱۳] و قاسمی و همکاران [۱۴] یک رابطه کاهندگی برای کل ایران استخراج کردند. لذا بررسی وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این موضوع توسط اتکینسون و موریسون [۱۵] و داگلاس [۳] نیز مورد تأکید قرار گرفت.

کاربرد روش تحلیل واریانس در مطالعات لرزه‌شناسی مهندسی نخستین بار توسط داگلاس [۳] ارائه شد. این روش بر مبنای مقایسه واریانس لگاریتمی داده‌های جنبش قوی زمین در بازه مشخصی از فاصله و بزرگای می‌باشد. آنچه استفاده از این

ناکامل بودن مجموعه داده‌ی مورد برآزش در یک منطقه را با داده‌های منطقه‌ی دیگر رفع کرد. در این صورت این امر منجر به کاهش عدم قطعیت و یا انحراف معیار معادله‌ی استخراج شده از بانک داده‌ای ترکیبی می‌شود.

در این مطالعه ابتدا به معرفی زمین ساخت ایران و مشخصات کامل بانک داده‌های جمع آوری شده می‌پردازیم. سپس به معرفی و ارائه آمار داده‌های جنبش قوی زمین در کالیفرنیا و مقایسه آن با بانک داده‌های منتخب ایران پرداخته می‌شود. در بخش بعد با انجام تحلیل واریانس به تفسیر نتایج حاصله و میزان وابستگی منطقه‌ای جنبش‌های قوی زمین در سه منطقه مهم تکتونیکی در ایران (به نام ۱) البرز- آذربایجان- کپه داغ، (۲) ایران مرکزی و (۳) زاگرس پرداخته شد. در بخش نهایی مقاله این تحلیل بر روی داده‌های کالیفرنیا و ایران صورت گرفت و سپس به تفسیر نتایج استخراج شده پرداختیم.

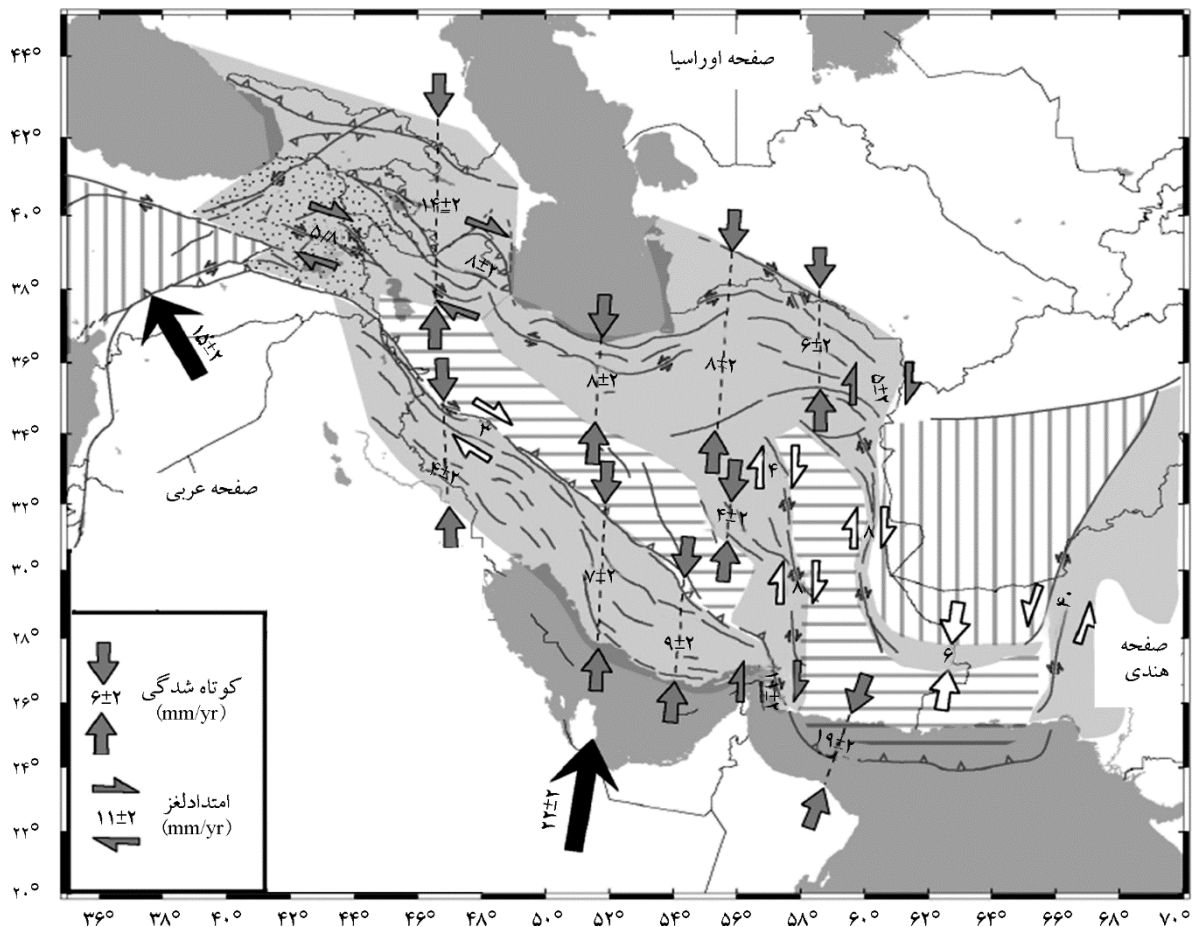
۲- زمین ساخت ایران

کشور ایران منطقه‌ای است با لرزه‌خیزی بالا که بر روی نوار لرزه‌خیز آلپ- هیمالیا واقع شده و همچنین از جنوب با صفحه عربستان و هند و از شمال با صفحه توران و آسیای مرکزی تلاقی دارد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شد بر اساس داده‌های ژئودتیکی همگرایی بین صفحه عربستان و اوراسیا در حدود 22 mm/yr در طول جغرافیایی 52°E برآورد شده است. این تقارب در پوسته قاره‌ای ایران به صورت زیر نمایان می‌شود: (۱) چین خوردگی و گسلش فشاری، که منجر به ضخیم شدن و کوتاه شدن مستمر پوسته قاره‌ای می‌شود، (۲) گسلش امتدادلغز و (۳) فرورانش لیتوسفر اقیانوسی دریای عمان به زیر مکران [۱۹]. در شرق ایران این کوتاه‌شدگی در هر دو گستره فرورانش مکران و در کوه‌های کپه‌داغ با حدود 6 mm/yr توزیع شده است. حسامی و خرمی [۲۰] نشان دادند که در البرز شرقی 5 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ‌گرد و 2 mm/yr کوتاه‌شدگی وجود دارد. در غرب ایران این کوتاه‌شدگی در زاگرس با حدود 8 mm/yr و در کوه‌های البرز با حدود 5 mm/yr توزیع شده است.

اعمال تحلیل بر تعداد محدودی از فواصل بزرگا- فاصله با حداقل بزرگای ۵ ریشتر، تقسیم رکوردها در فواصل بزرگا و فاصله‌ی نسبتاً بزرگ (به عنوان مثال، ۱۰ کیلومتر و ۰/۵ واحد بزرگا در مطالعه صدافتی و پزشک [۱۷]) و همچنین تعداد محدود پررود طیفی شده است.

در این مطالعه جهت رفع نواقص مطالعه گذشته، با جمع آوری و پردازش تعداد قابل توجهی از داده‌های شتاب‌نگاری در مناطق مختلف تکتونیکی ایران، امکان اعمال این تکنیک بر سه منطقه تکتونیکی شمال ایران، ایران مرکزی و زاگرس در بازه‌های بزرگا- فاصله بیشتر و پررود طیفی خیلی کوتاه و خیلی بلند نیز فراهم شده است. با در نظر گرفتن موارد ذکر شده صراحتاً نتایج قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. کالیفرنیا از جمله مناطقی است که از لحاظ ویژگی‌های زمین‌ساختی بسیار شبیه به ایران می‌باشد [۴]. عمده زمین‌لرزه‌های هر دو منطقه از نوع پوسته‌ای کم‌عمق می‌باشند. با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس، می‌توان به بررسی میزان وابستگی منطقه‌ای و متعاقباً امکان ترکیب داده‌های جنبش زمین در ایران و کالیفرنیا نیز پرداخت. در این تحقیق وجود دو بانک داده‌ای جامع ایران و کالیفرنیا منجر به بروز تعداد قابل توجهی از پنجره بزرگا- فاصله‌ی متشکل از داده‌های هم‌پوشان از هر دو منطقه شده است. اعمال این تکنیک با چنین بانک داده‌ای غنی نتایج مستدل و پایداری را به همراه خواهد داشت.

در صورت وجود شواهدی چشمگیر از وابستگی منطقه‌ای، جنبش‌های زمین در مناطق مورد مطالعه با یکدیگر متفاوت می‌باشند و برای جلوگیری از پیش‌بینی نادرست جنبش زمین، می‌بایست از ترکیب این داده‌ها جلوگیری به عمل آید و از طریق شبیه‌سازی رکوردهای جنبش زمین، نظیر مطالعه حمزه‌لو و معهود [۱۸]، به تکمیل بانک داده‌ی مورد نیاز پرداخت که روشی پیچیده‌تر است. در صورت مشاهده شواهد اندکی از وابستگی منطقه‌ای، می‌توان داده‌های دو منطقه‌ی مورد بررسی را با یکدیگر ترکیب کرد و در مطالعات آتی توسعه مدل‌های پیش‌بینی جنبش زمین به کار برد تا بتوان محدودیت کمبود و یا



شکل (۱): نرخ لغزش در فلات ایران بر مبنای اندازه‌گیری‌های GPS توسط ورنانت و همکاران [۲۱].

است، بر روی گسل عهد حاضر مشاهده می‌شود که از نظر ساختاری، مکانیسم زمین‌لرزه‌ها و پتانسیل لرزه‌خیزی از نوار تراست زاگرس کاملاً متمایز است [۲۳]. بخش مرکزی زاگرس سیستم امتدادلغز راست گرد کازرون با راستای N-S می‌باشد که از لحاظ لرزه‌خیزی فعال‌تر از دیگر بخش‌های زاگرس است [۲۴]. پهنه سنندج - سیرجان با روند NW-SE یک بخش داخلی از پهنه زاگرس با طول ۱۵۰۰ کیلومتر است که اکثر گسل‌های این ناحیه دارای مکانیسم راست گرد و تراست هستند. زلزله ۱۹۰۹/۰۱/۲۳ سیلاخور از جمله زمین‌لرزه‌های مخرب این ناحیه است [۲۳]. گسل‌های باریک و طویل با مکانیسم امتدادلغز در شرق ایران متفاوت از سایر مناطق است. زلزله ۱۹۹۷/۵/۱۰ زیرکوه و ۱۹۹۰/۳/۱۵ نه^۳ از جمله زلزله‌های مخرب این منطقه هستند. ورنانت و همکاران [۲۱] با اندازه‌گیری‌های GPS بر این باورند

ورنانت و همکاران [۲۱] نرخ لغزش امتدادلغز را در شمال غربی ایران 8 ± 2 mm/yr برآورد کردند که به‌طور عمده در طول گسل فعال شمال تبریز رخ می‌دهد. علاوه بر آن میسون و همکاران [۲۲] 2 mm/yr حرکت امتداد لغز راست گرد و 2 mm/yr کوتاه‌شدگی را در زنجان برآورد کردند. منطقه ایران مرکزی با نرخ 15 mm/yr از شمال به سمت اوراسیا در حرکت بوده و به‌عنوان یک بلوک صلب نسبت به اوراسیا حرکت می‌کند، درحالی‌که شرق ایران با نسبت کمتری (9 mm/yr) حرکت می‌کند.

نوار تراست زاگرس با طول ۱۲۰۰ کیلومتر از جنوب شرق ترکیه تا گسل میناب در شرق تنگه هرمز امتداد می‌یابد. بیش از نیمی از زلزله‌های ایران با بزرگای کوچک تا متوسط در گستره زاگرس رخ دادند. در بخش شمال غرب زاگرس وجود یک تقسیم‌شدگی^۲ که ترکیبی از مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز

تهیه شده حذف شدند. همچنین رکورد با بزرگا، موقعیت جغرافیایی زلزله و ایستگاه نامشخص حذف شدند. با ترسیم رکوردهای سرعت و جابه‌جایی از طریق انتگرال‌گیری از رکورد شتاب، در اکثر رکوردها جابه‌جایی خط پایه قابل مشاهده است. در نتیجه تصحیح خط مبنا [۲۸] برای همه شتاب‌نگاشت‌ها انجام شد. سپس روش اصلاح شده موجک که توسط انصاری و همکاران [۲۹-۳۰] توسعه داده شد، جهت حذف نوفه‌ی موجود در شتاب‌نگاشت‌های خام مورد استفاده قرار گرفت. برخلاف روش‌های مرسوم فیلترینگ [۳۱]، این روش می‌تواند نوفه را در همه بازه‌های فرکانسی مدنظر مهندسان کاهش دهد و همچنین نوفه ایستا در حوزه زمان را شناسایی و حذف کند. به‌طور معمول رکوردهای دارای نوفه شدید از مجموعه رکوردهایی که برای توسعه رابطه کاهندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند حذف می‌شوند. اما با استفاده از این روش امکان تصحیح تعداد زیادی از این رکوردها که دارای انرژی زیاد هستند فراهم شده است. برای مطالعه دقیق‌تر رکوردهای غیراستاندارد به مقاله داگلاس [۳۲] ارجاع داده می‌شود.

در نهایت بانک داده‌ای جنبش قوی زمین ایران از ۱۹۴۳ زوج رکورد افقی شتاب تشکیل شده است که توسط ۶۸۰ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت شدند. این بانک به‌نوبه خود کامل‌ترین بانک زلزله تهیه شده با تعداد قابل توجهی رکورد از سراسر ایران می‌باشد. این رکوردها از ۴۲۶ زلزله با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴/۵ که در بازه سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۴ رخ دادند، حاصل شدند. شتاب طیفی با میرایی ۵ درصد برای همه شتاب‌نگاشت‌ها از پریود ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه با فواصل مساوی محاسبه شد. پارامتر اندازه $GMRotI_{50}$ که توسط بور و همکاران [۱] پیشنهاد شد، به‌منظور ترکیب مقادیر طیفی در راستای افقی مورد استفاده قرار گرفت. در واقع یک چرخش مستقل از پریود به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که توزیع میانگین هندسی مستقل از پریود در بازه پریود مورد استفاده حداقل گردد. این پارامتر مستقل از پریود و آزمون قرارگیری سنسورهای افقی نسبت به یکدیگر می‌باشد که در پروژه‌های NGA-West1 نیز مورد استفاده قرار گرفت. توزیع جغرافیایی زلزله‌های بانک داده‌ی تهیه شده در این

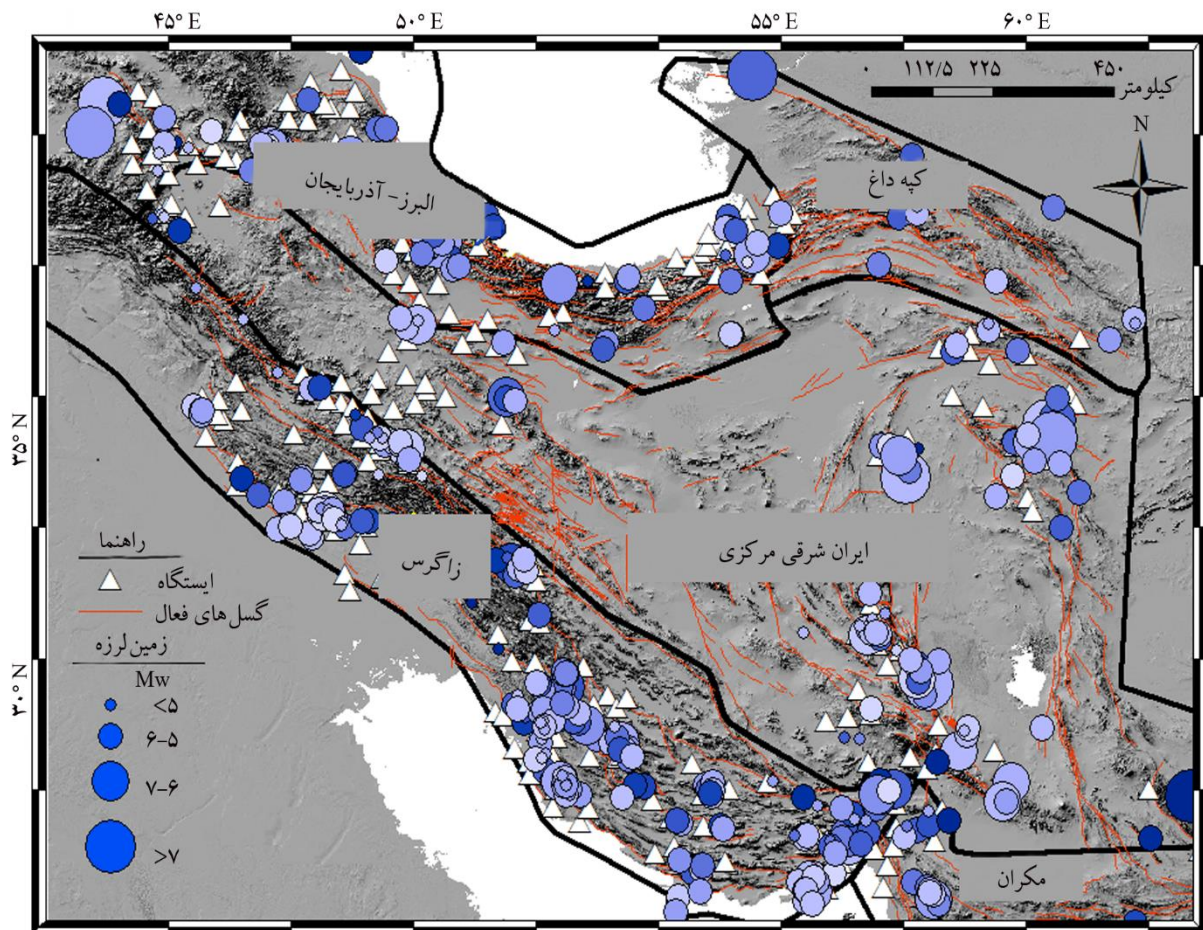
که بلوک مرکزی ایران کاملاً صلب است اما حساسی و خرمی [۲۰] معتقدند 3 mm/yr کوتاه‌شدگی در بلوک مرکزی توزیع شده است. مکانیسم اکثر گسل‌های این منطقه نظیر کوه بنان، انار، نایبند، گوک و رفسنجان امتدادلغز راست گرد بوده و در برخی نقاط مؤلفه تراست مشاهده می‌شود. زلزله ۲۰۰۵/۲/۲۲ داهوئی، زلزله ۱۹۸۱/۶/۱۱ گلباف و ۲۰۰۳/۱۲/۲۶ بم از جمله زلزله‌های مخرب جنوب شرقی کوه بنان می‌باشند که از چندین گسل فعال تراست تشکیل شده است [۲۵]. در لبه شمالی البرز گسل‌ها با مکانیسم غالب معکوس دارای شیب رو به جنوب بوده و در لبه جنوبی البرز حرکت فشاری معکوس به همراه مؤلفه کوچک چپ‌گرد با شیب رو به شمال وجود دارد. با توجه به حرکت فشاری بلوک ایران مرکزی نسبت به صفحات ثابت افغانستان و ترکمنستان حدود ۲۰۰-۳۰۰ کیلومتر کوتاه‌شدگی در منطقه کپه‌داغ در شمال شرقی ایران رخ داده است. مکانیسم اکثر گسل‌های این منطقه امتدادلغز راست گرد به همراه مؤلفه معکوس می‌باشد [۲۶]. از جمله زلزله‌های مخرب شمال ایران، زلزله‌های ۱۸۹۳/۱۱/۱۷ قوچان، ۱۹۹۰/۶/۲۰ منجیل می‌باشند.

۳- اطلاعات شتاب‌نگاری ایران

۳-۱- بانک داده جنبش قوی زمین و پردازش رکوردهای خام

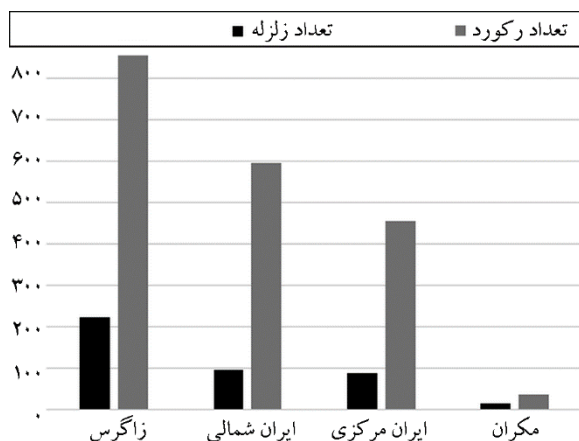
ابتدا ۳۲۰۰ رکورد خام حاصل از ۷۵۴ زمین‌لرزه توسط ۸۸۴ ایستگاه شتاب‌نگاری از شبکه شتاب‌نگاری ایران (Iran Strong Motion Network, ISMN) تهیه شد. از سال ۱۳۷۱ و پس از زلزله ۱۳۶۹/۳/۳۱ منجیل-رودبار بسیاری از شتاب‌نگارهای آنالوگ جایگزین و تعداد زیادی دستگاه‌های دیجیتال توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی [۲۷] نصب و تائون حفاظت شدند. عمده رکوردهای تهیه شده در این مطالعه توسط شتاب‌نگارهای دیجیتال SSA-2 و تعداد بسیار محدودی از زلزله‌های قدیمی نظیر ۱۹۷۸ طبس با استفاده از دستگاه آنالوگ SMA-1 ثبت شدند.

در این مطالعه رکوردهایی که دارای تنها یک مؤلفه افقی بودند و رکوردهای دارای نوفه‌ی شدید از مجموعه رکورد اولیه



شکل (۲): توزیع جغرافیایی زلزله‌های بانک داده‌ای جمع‌آوری شده در این مقاله بر روی نقشه توپوگرافی ایران؛ خطوط قرمز نشان‌دهنده گسل‌های فعال ایران [۳۳] می‌باشد. قطر دایره و رنگ آن به ترتیب متناسب با بزرگای گشتاوری و عمق کانونی هر زلزله است. رنگ تیره‌تر بیانگر زلزله عمیق‌تر است. ایستگاه‌های شتاب‌نگاری با مثلث سفید مشخص شده‌اند.

از ۱۵ زلزله ثبت شده است و بیشترین تعداد رویداد ثبت شده در منطقه فعال زاگرس و پس از آن بخش شمالی ایران می‌باشد.



شکل (۳): هیستوگرام تعداد زلزله و تعداد رکورد در مناطق لرزه‌زمین‌ساخت ایران.

مقاله همراه با نقشه گسل‌های فعال ایران [۳۳] در شکل (۲) نشان داده شده است. مثلث‌های سفید نشان‌دهنده ایستگاه‌هایی است که ثبت‌کننده زلزله‌های مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشند.

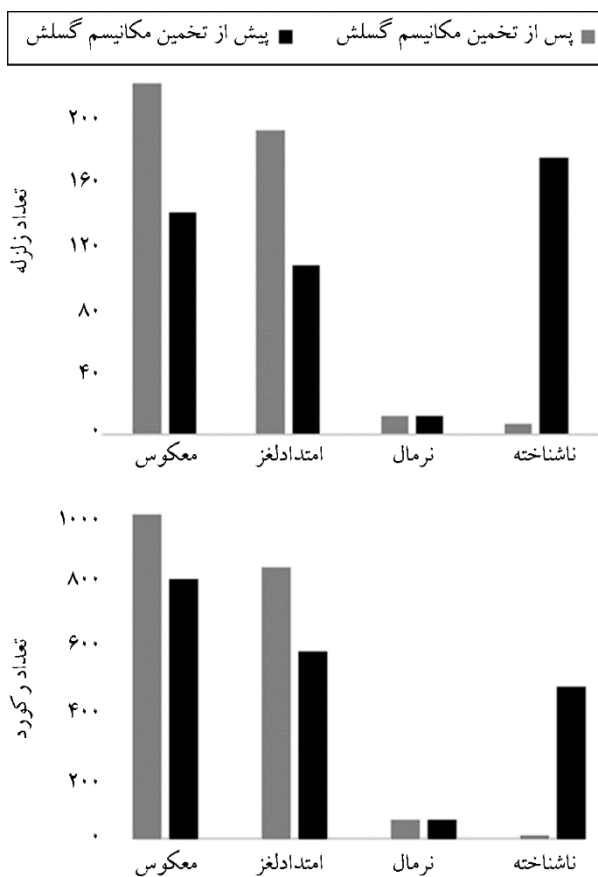
مطابق شکل (۲)، ایران به پنج منطقه لرزه‌زمین‌ساخت (میرزایی و همکاران [۳۴]) به نام‌های زاگرس، البرز-آذربایجان، کپه‌داغ، ایران مرکزی و مکران تقسیم شده است. تعداد زلزله‌های نشان داده شده در منطقه تکنونیک کپه‌داغ بسیار اندک است. در نتیجه در ادامه این مطالعه زلزله‌های کپه‌داغ با زلزله‌های منطقه البرز-آذربایجان ترکیب می‌شوند. در هیستوگرام شکل (۳) تعداد رکورد و تعداد زلزله در مناطق تکنونیک زاگرس، البرز-آذربایجان-کپه‌داغ، ایران مرکزی و مکران نشان داده شد. در منطقه مکران تنها ۳۷ رکورد

۳-۲- مشخصات بانک داده جمع‌آوری شده

در این مطالعه پارامترهای معرف منبع، مسیر و ساختگاه برای همه رکوردها مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تعاریف استفاده شده تعیین مقدار شدند. از آنجایی که بزرگای گشتاوری مفهوم فیزیکی زمین‌لرزه را در خود دارد و اشباع نمی‌شود، این بزرگا برای همه زلزله‌ها برآورد شد. این بزرگا برای ۳۹۶ زلزله مستقیماً از پایگاه‌های کاتالوگ جهانی CMT هاروارد^۴ [۳۵] و مرکز ملی اطلاعات زلزله (NEIC)^۵ [۳۶] استخراج شد. برای ۳۰ زلزله‌ی باقیمانده (۲۲۰ رکورد) بزرگای سطحی و حجمی از پایگاه مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (ISC)^۶ [۳۷] استخراج شد و با استفاده از روابط پیشنهادی شاهوار و همکاران [۳۸] به بزرگای گشتاوری تبدیل شد.

به‌عنوان پارامتر معرف فاصله منبع تا ساختگاه، فاصله جویز-بور (R_{JB})، فاصله افقی تا تصویر افقی صفحه گسیختگی [۳۹] و همچنین فاصله گسیختگی (R_{rup})، نزدیک‌ترین فاصله تا صفحه گسیختگی (گسل) برای تمامی رکوردها محاسبه شد. کاکلامانوس و همکاران [۴۰] با تعریف زاویه چشمه تا سایت (α)، و پارامترهای چشمه نظیر عرض صفحه گسیختگی، زاویه شیب (dip) و همچنین عمق تا بالای صفحه گسیختگی (Z_{TOR}) توانستند الگوریتمی جهت محاسبه فاصله گسیختگی پیشنهاد دهند. در گذشته به علت عدم وجود اطلاعات کافی از صفحه گسلی، فاصله گسیختگی تنها برای تعداد محدودی از زلزله‌های بزرگ برآورد می‌شد. زاویه شیب و مکانیسم گسیختگی زلزله بر مبنای مشخصات صفحه گسل اصلی زلزله (زاویه امتداد، شیب و لغزش دو صفحه گسلی) موجود در سایت هاروارد [۳۵] برای ۶۰ درصد زلزله‌های کاتالوگ (۷۵ درصد از رکوردها با تعداد ۱۴۶۶) تعیین شد. برای باقیمانده‌ی زلزله‌ها (۱۷۲ زلزله) که بیشتر زلزله‌هایی با بزرگای کمتر از ۵ هستند، این اطلاعات از محتمل‌ترین گسل مسبب زلزله تخمین زده شد. محتمل‌ترین گسل مسبب هر زلزله بر اساس بررسی موقعیت مکانی، مکانیسم کانونی و امتداد پس‌لرزه‌های زلزله اصلی، تکتونیک منطقه، مشخصات نزدیک‌ترین گسل‌های فعال اطراف رومرکز زلزله و

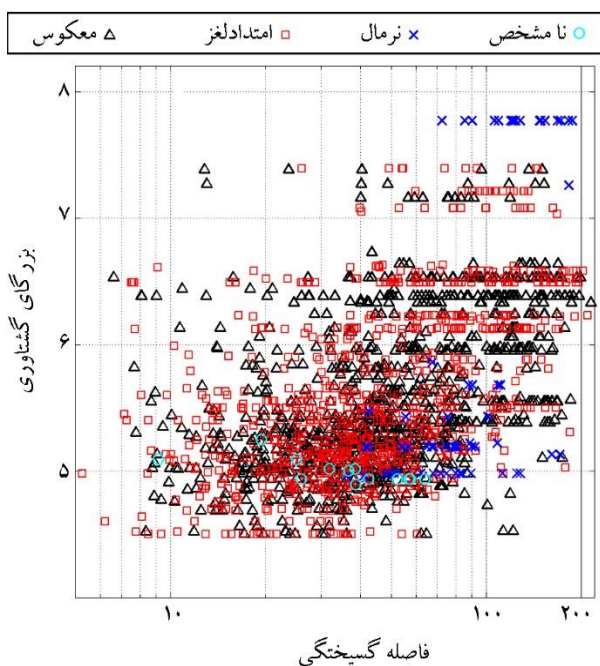
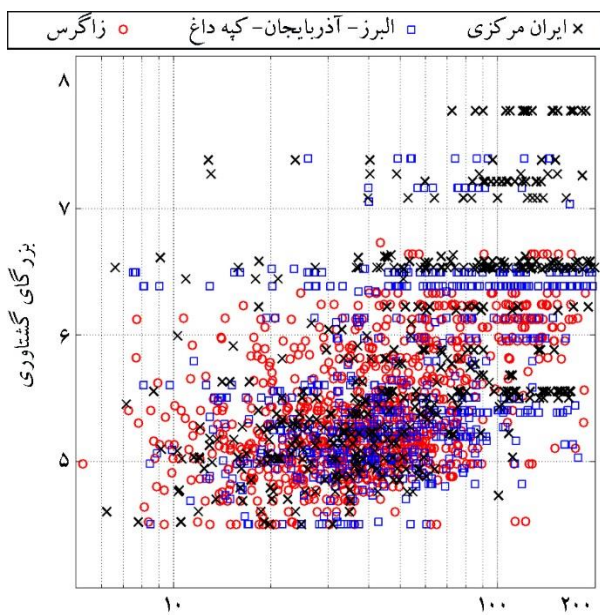
زلزله‌های پیشین آن منطقه، برآورد شده است. لازم به ذکر است که مشخصات مکانیسم گسلش گسل‌های فعال ایران از بانک دیجیتال ذوالفقاری و درزی [۳۳] استخراج شده است. هیستوگرام شکل (۴) فراوانی رکوردها (پایین) و زلزله‌ها (بالا) را قبل و بعد از فرآیند تخمین مکانیسم گسلش نشان می‌دهد. تعداد اندک داده (۶۴ رکورد از ۱۱ زلزله) با گسلش نرمال مشهود است. همچنین توجه شود که مکانیسم گسلش تنها شش زلزله کوچک ($M_w \sim 5$) پس از فرآیند تخمین همچنان ناشناخته باقی ماند.



شکل (۴): فراوانی زلزله و رکوردهای ایران قبل و پس از بررسی و پیش‌بینی مکانیسم گسلش.

در صورت نامشخص بودن شیب محتمل‌ترین گسل مسبب، مقدار شیب زلزله از مکانیسم کانونی آن زلزله تخمین زده شد به گونه‌ای که گسل‌های امتدادلغز با شیب ۹۰ درجه فرض شدند. طبق بررسی آماری محققان گذشته، مقدار میانگین

با استفاده از رابطه پیشنهادی درزی و همکاران [۲] تخمین زده شد. این رابطه بر اساس بیشترین همبستگی میان V_{S30} اندازه گیری شده ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ایران و فرکانس اصلی متناظرشان به دست آمد. شایان ذکر است که در ۱۷۴ ایستگاه (۲۳۱ رکورد) که شرایط فوق‌الذکر را ندارند اطلاعات خاک به صورت «نامشخص» در شکل (۶) نشان داده شد.



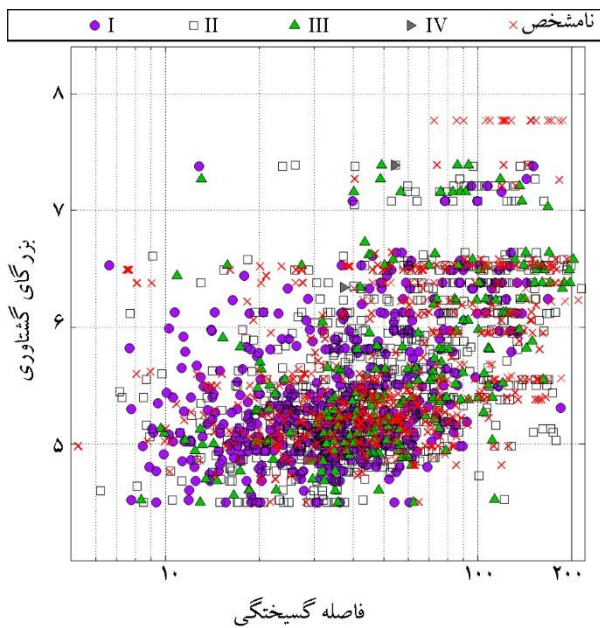
شکل (۵): توزیع بزرگا- فاصله داده‌های ایران بر حسب سه منطقه لرزه‌زمین‌ساخت در ایران (بالا) و مکانیسم گسلش (پایین).

مقادیر شیب در رخدادهایی با گسلش نرمال ۵۰ درجه و با گسلش معکوس ۴۰ درجه برآورد شد [۴۰] که در این مطالعه نیز همین مقادیر در نظر گرفته شد. همچنین برای رخدادهایی با مکانیسم مایل مقدار شیب ۴۵ درجه فرض شد. عمق تا بالای صفحه گسیختگی (Z_{TOR}) نیز بر مبنای الگوریتم ارائه شده توسط شربام و همکاران [۴۱] تعیین شد.

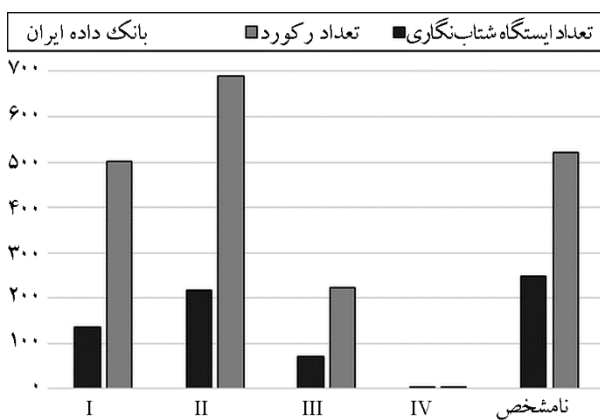
در شکل (۵) توزیع بزرگای گشتاوری- فاصله گسیختگی بر حسب منطقه تکتونیکی البرز- آذربایجان- کپه داغ، ایران مرکزی و زاگرس در سمت بالا و بر حسب مکانیسم گسلش در سمت پایین نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود بزرگ‌ترین زلزله رخ داده با بزرگای بیش از ۷/۵ با مکانیسم نرمال در ناحیه ایران مرکزی رخ داد. با توجه به تعداد بسیار کم زلزله‌های نرمال، داده‌های مرتبط در تحلیل واریانس لحاظ نشدند. حدود ۴۵ درصد از زلزله‌های بانک داده نهایی در این مطالعه امتدادلغز و ۵۱ درصد آنها معکوس می‌باشند.

همان‌طور که در هیستوگرام شکل (۶) مشاهده می‌شود بیش از ۶۳ درصد ایستگاه‌های مورد استفاده در بانک داده مورد مطالعه (۴۳۳ از ۶۸۰ ایستگاه) دارای مقدار مشخصی از سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{S30}) می‌باشند که عمدتاً با استفاده از روش شکست لرزه‌ای اندازه‌گیری شده‌اند. نسبت طیفی افقی به عمودی (HVSr) [۴۲] برای باقیمانده ایستگاه‌ها (۲۴۷ ایستگاه) محاسبه شد و میزان کیفیت منحنی‌های مربوطه بر اساس راهنمای SESAME [۴۳] بررسی شد که در سال ۲۰۰۴ ارائه گردید و تنها منحنی‌های قابل اعتماد جهت برآورد فرکانس اصلی (f_0) ساختگاه مدنظر قرار گرفتند. به‌عنوان مثال تخمین f_0 در ایستگاه‌هایی که دارای چندین اوج و یا یک اوج گسترده بر روی بازه وسیعی از فرکانس هستند بسیار دشوار و غیرقابل اعتماد می‌باشد. با استفاده از تکنیک پیشنهادی درزی و همکاران [۲] مقدار دقیق f_0 ساختگاه‌ها به‌طور خودکار برآورد شد. سپس برای ۶۳ ایستگاه (از ۲۴۷) که $f_0 > 1 \text{ Hz}$ تعیین شد و تعداد رکورد ثبت شده در آنها بیش از سه رکورد بود، مقدار V_{S30}

این رده‌های ساختمانی در شکل‌های (۷) و (۸) به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، رده II و I بیشترین تعداد ایستگاه را به خود اختصاص می‌دهند و کمترین آن رده IV با تنها چهار ایستگاه می‌باشد. در شکل (۸) بیشترین رکوردهای مشخص در توزیع داده‌ها به طبقه I و II اختصاص دارد و بزرگ‌ترین زلزله (Mw ۷/۷) توسط ایستگاهی با اطلاعات نامشخص ثبت شده است.

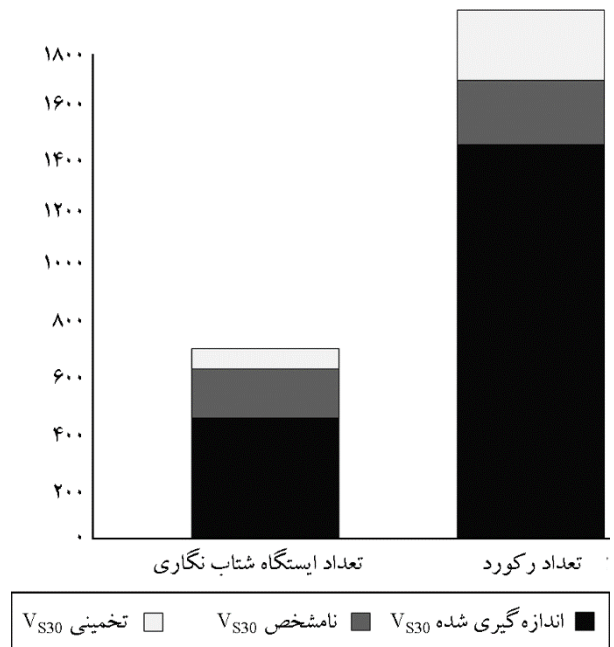
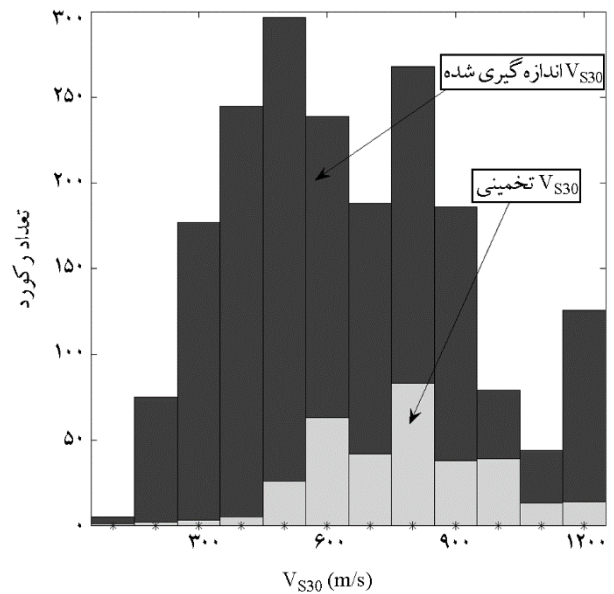


شکل (۷): توزیع بزرگا-فاصله رکوردهای ایران بر حسب رده‌های ساختمانی.



شکل (۸): فراوانی تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه ایران و رکوردهای ثبت شده در آنها بر حسب رده‌های ساختمانی بر مبنای V_{S30} اندازه‌گیری شده.

تمامی ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ایران بر اساس استاندارد زلزله ۲۸۰۰ ایران به چهار طبقه دسته‌بندی شدند که عبارتند از: طبقه I ($V_{S30} > 750$ m/s)، طبقه II ($375 < V_{S30} < 750$ m/s)، طبقه III ($175 < V_{S30} < 375$ m/s) و طبقه IV ($V_{S30} < 175$ m/s). توزیع بزرگا-فاصله و هیستوگرام تعداد ایستگاه‌ها و رکوردهای طبقه‌بندی شده بر حسب



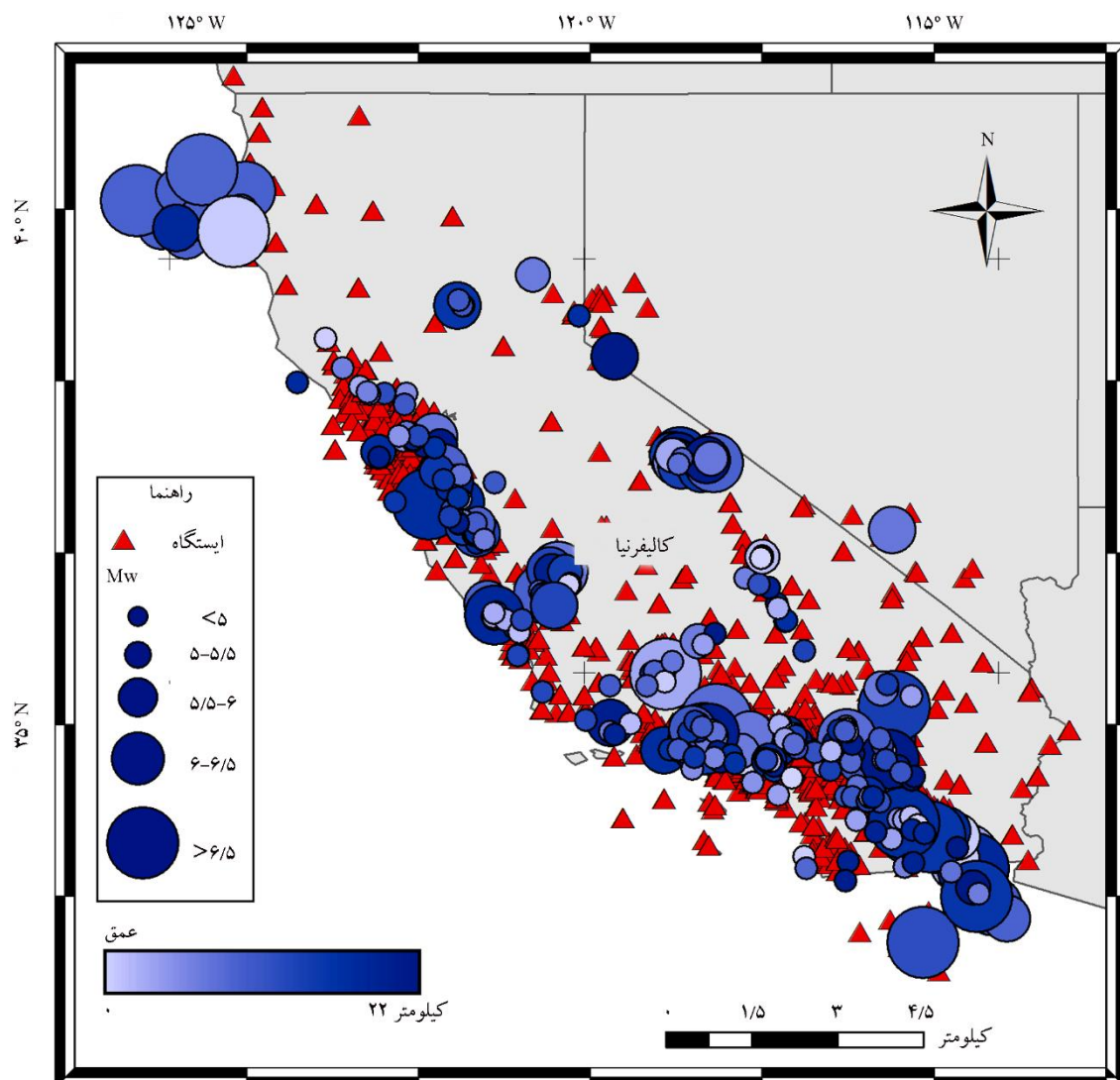
شکل (۹): توزیع فراوانی رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری با مقدار اندازه‌گیری شده V_{S30} و مقدار تخمین زده شده از فرکانس اصلی (بالا). تعداد ایستگاه‌ها و رکوردها V_{S30} با اندازه‌گیری شده (رنگ مشکی V_{S30} ، تخمینی از فرکانس اصلی (طوسی روشن) و بدون اطلاعات V_{S30} (طوسی تیره) (پایین).

۴- بانک داده‌های جنبش قوی زمین برای کالیفرنیا

کاتالوگ داده‌های کالیفرنیا از پایگاه داده‌ای NGA-West2 [۵] استخراج شده است. این زمین‌لرزه‌ها با بزرگای گشتاوری بیش از ۴/۵ در خلال سال‌های ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۶ رخ دادند. توزیع جغرافیای این زلزله‌ها (دایره) و ایستگاه‌های ثبت‌کننده آنها (مثلث قرمز) در شکل (۹) نشان داده شده است. قطر دایره و رنگ آن به ترتیب متناسب با بزرگای گشتاوری و عمق کانونی هر زلزله می‌باشد. زلزله عمیق‌تر با آبی تیره‌تر نشان داده شده است. حداکثر عمق زلزله‌های بانک کالیفرنیا ۲۲ کیلومتر می‌باشد حال آنکه زلزله‌های ثبت شده در ایران بیشتر دارای عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر بوده و تا ۸۴ کیلومتر برای زلزله نرمال نیز مشاهده شده است.

توزیع بزرگا-فاصله رکوردهای کالیفرنیا به تفکیک مکانیسم گسلش در سمت راست شکل (۱۰) نشان‌دهنده‌ی توزیع نسبتاً یکنواخت رکوردهای امتدادلغز و معکوس است. همچنین این توزیع به تفکیک طبقه‌بندی بر اساس سیستم NEHRP [۴۴] در سمت چپ شکل (۱۰) مشخص شده است. طبقه‌بندی NEHRP چنین است:

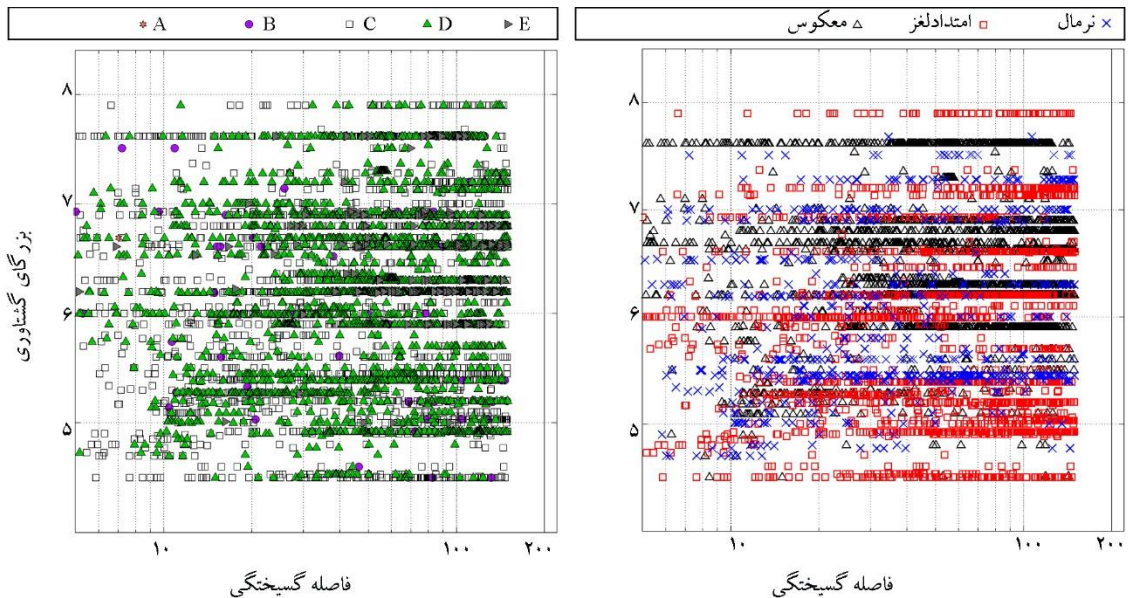
گروه A ($V_{S30} > 1500 \text{ m/s}$)، گروه B ($760 < V_{S30} < 1500$)، گروه C ($360 < V_{S30} < 760$)، گروه D ($180 < V_{S30} < 360$) و گروه E ($V_{S30} < 180$). عمده رکوردها در گروه D و C قرار گرفتند. محدوده بزرگای گشتاوری و فاصله گسیختگی این بانک داده به ترتیب عبارتند از ۷/۸-۴/۴ و ۱۵۰-۵ کیلومتر.



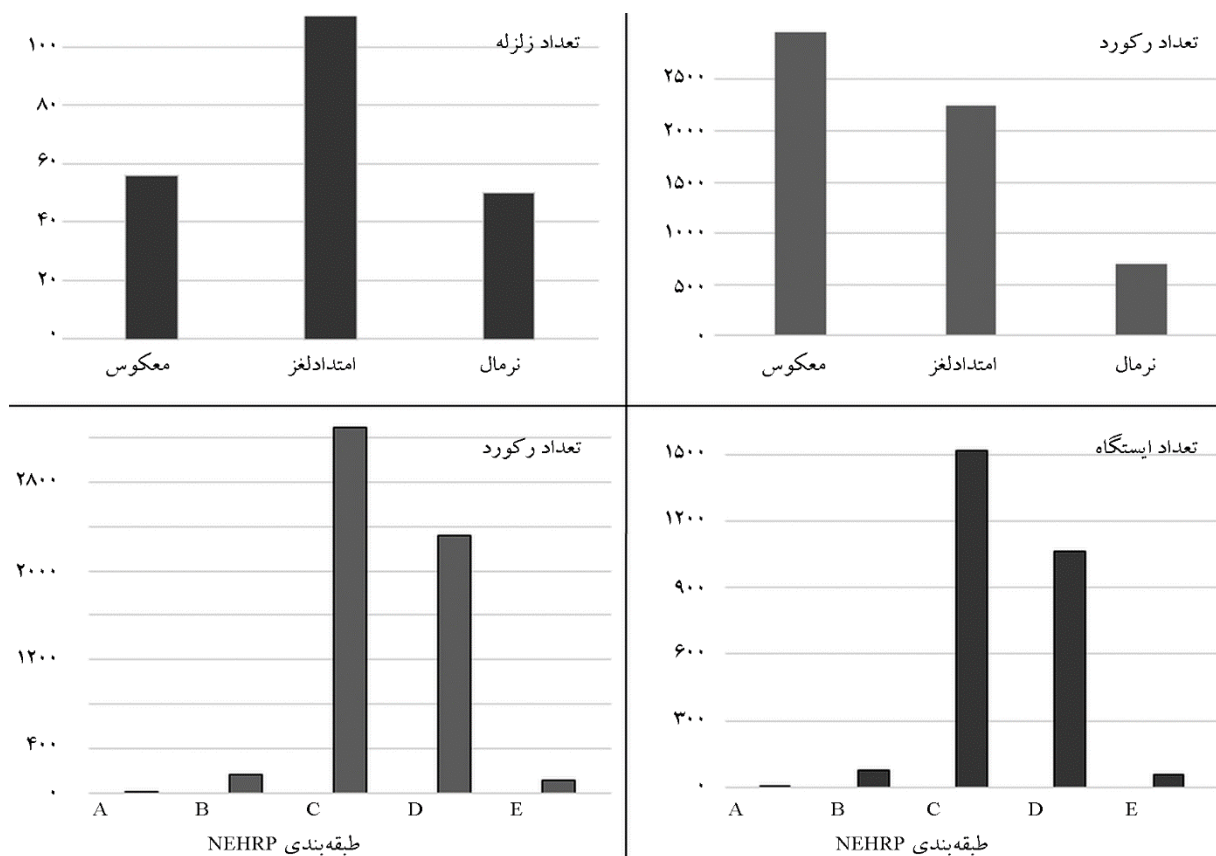
شکل (۹): توزیع جغرافیایی زلزله‌های کالیفرنیا استخراج شده از بانک داده‌ای NGA-West2.

مطالعه در کالیفرنیا بر حسب طبقه‌بندی NEHRP در ردیف دوم شکل (۱۱) نشان داده شده است. تعداد ۷۶، ۶۰ و ۵ ایستگاه به ترتیب

هیستوگرام تعداد رکورد و زلزله‌های کالیفرنیا بر حسب مکانیسم گسلس در ردیف اول و هیستوگرام تعداد رکورد و ایستگاه‌های این



شکل (۱۰): توزیع رکوردهای کالیفرنیا، بر حسب مکانیسم گسلس (راست) و طبقه‌بندی ساختمانی ایستگاه‌های ثبت کننده رکورد (چپ).



شکل (۱۱): هیستوگرام تعداد رکورد و زلزله‌های کالیفرنیا بر حسب مکانیسم گسلس در ردیف اول. هیستوگرام تعداد رکورد و ایستگاه بر حسب طبقه‌بندی NEHRP، به ترتیب از سنگ به خاک نرم: A، B، C، D، E در ردیف دوم مشخص شدند.

در طبقه‌های E، B و A قرار می‌گیرند. طبقه A و B از سیستم طبقه‌بندی NEHRP معادل طبقه I از استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌باشد.

۵- انجام تحلیل واریانس

در این مطالعه به بررسی میزان وابستگی منطقه‌ای میان زلزله‌های دو منطقه با ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی مشابه می‌پردازیم. تحلیل واریانس یک طرفه راه‌حل مناسبی به منظور بررسی میانگین‌های لگاریتمی دامنه جنبش زمین می‌باشد. فرض صفر در این تحلیل آماری این است که میانه دامنه جنبش‌های زمین مساوی هستند. اگر نسبت تخمین واریانس از جنبش‌های زمین از مقدار بحرانی F برای سطح اهمیت ۵ درصد بیشتر باشد، فرض صفر رد شده است، که به معنای وجود وابستگی منطقه‌ای زیاد است. این حالت بیانگر عدم تشابه زلزله‌های دو منطقه است. در صورتی که میزان وابستگی منطقه‌ای کم باشد، فرض صفر برقرار است. در این حالت بانک داده‌ای که از ترکیب داده‌های دو منطقه تشکیل شده، می‌تواند با رفع محدودیت ناکافی بودن داده‌های اولیه در توسعه روابط پیش‌بینی جنبش زمین آتی مورد استفاده قرار گیرد و با کاهش انحراف معیار مدل استخراج شده به تخمین‌های قابل اعتمادتری از پیش‌بینی پارامترهای طیفی دست یافت. همچنین می‌توان رابطه کاهندگی آتی را برای بازه‌های وسیع‌تری از بزرگا، فاصله و پیرو طیفی برآورد کرد. باید توجه داشت که اعمال تحلیل واریانس دو طرفه نیاز به تعداد قابل توجهی رکورد از مناطق مدنظر دارد که در این مطالعه امکان بررسی آن وجود ندارد.

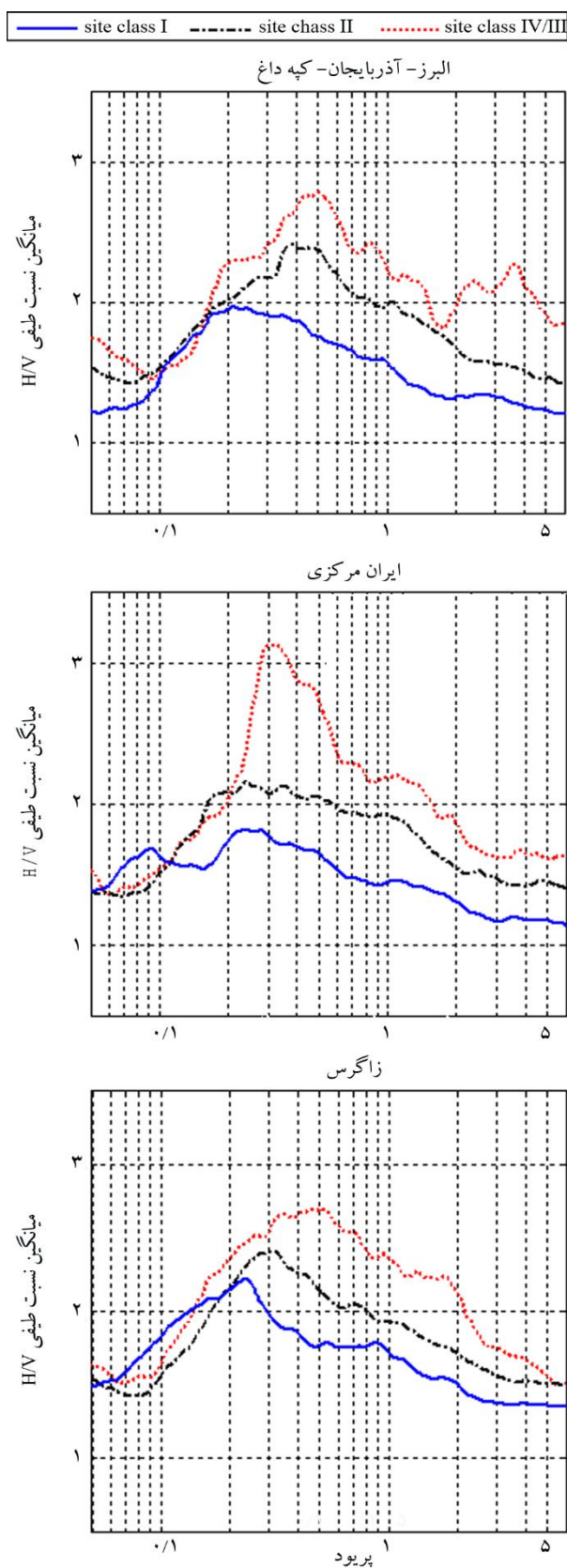
در این مطالعه سعی بر آن است تا با حذف اثر مکانیسم گسل و اثر ساختگاه از دامنه جنبش‌های زمین و همچنین با تقسیم رکوردها در بازه‌های کوچک بزرگای گشتاور و فاصله گسیختگی به درک درستی از میزان وابستگی منطقه‌ای جنبش‌های زمین دست یابیم. این تحلیل برای هفت شتاب طیفی در پیروهای کوتاه، متوسط و بلند صورت گرفته است. جهت نمایش گرافیکی خروجی تحلیل واریانس در هر پنجره، مقدار

میانگین لگاریتمی دامنه‌ی هر پارامتر شتاب طیفی در محور عمودی و پیروهای اتخاذ شده در محور افقی نمایش داده می‌شود. برای حذف اثر ساختگاه بر دامنه جنبش‌های زمین و متعاقباً نتایج تست‌های وابستگی منطقه‌ای، همه داده‌های مشاهده شده از هر منطقه را به طبقه ساختگاهی سنگ انتقال می‌دهیم. در خروجی گرافیکی نتایج تحلیل آماری، به ازای هر پیرو شاهد هفت زوج علامت برای هفت پیرو طیفی اتخاذ شده هستیم. هر زوج علامت با دو رنگ نشان داده می‌شود که هر رنگ متعلق به یکی از دو منطقه تکتونیکی مورد تحلیل است. اگر یک زوج علامت به شکل نقطه نمایش داده شود، نشان‌دهنده‌ی وابستگی منطقه‌ای ناچیز و امکان ترکیب دو بانک داده در پیرو مدنظر و در بازه بزرگا- فاصله مشخص شده می‌باشد. در صورتی که یک زوج علامت به صورت صلیب (+) نشان داده شود، بیانگر وجود وابستگی منطقه‌ای حائز اهمیت و عدم امکان ترکیب داده‌های دو منطقه در آن پیرو و بازه بزرگا- فاصله مربوطه می‌باشد.

۵-۱- وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های قوی زمین در سه

منطقه تکتونیکی ایران

در این بخش بر آنیم تا از تحلیل واریانس به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت کمی کردن وابستگی منطقه‌ای محتمل در مناطق مختلف لرزه‌زمین‌ساختی در ایران استفاده کنیم. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد، ابتدا ایران به پنج منطقه تکتونیکی مختلف تقسیم گردید. سپس با توجه به تعداد کم زلزله‌های ثبت شده در کپه‌داغ، داده‌های این منطقه با زلزله‌های منطقه البرز-آذربایجان ترکیب شد و بخش ایران شمالی را به وجود آورد. در این بخش داده‌های جنبش زمین ثبت شده در منطقه مکران به علت تعداد بسیار اندک زلزله‌های رخ داده و همچنین ساختار تکتونیکی کاملاً متفاوت (فرورانشی) از بانک داده‌های ورودی تحلیل حذف شدند. در نتیجه سه مجموعه داده جنبش‌های زمین به نام‌های ایران شمالی، ایران مرکزی و زاگرس که همگی از نوع کم عمق



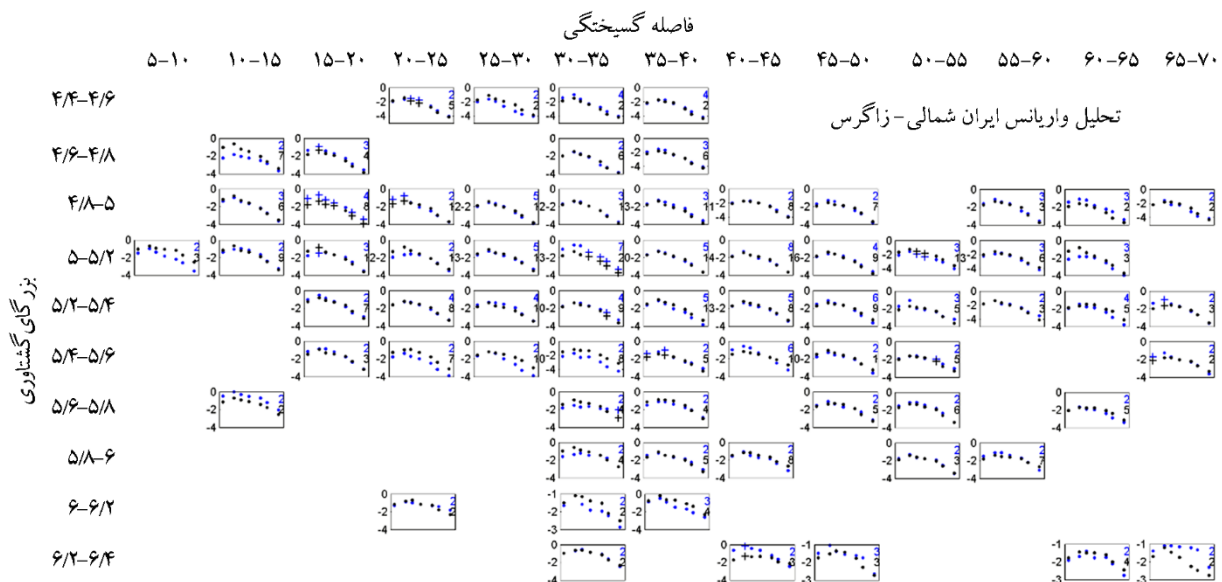
شکل (۱۲): میانگین منحنی نسبت طیفی افقی به عمودی بر حسب سه گروه خاک I، II و ترکیب ایستگاه‌های گروه III و IV (III/IV) برای سه منطقه مختلف تکتونیکی در ایران.

پوسته‌ای می‌باشند، دو به دو مقایسه شدند تا امکان ترکیب این مجموعه داده‌ها و تشکیل یک بانک داده‌ای غنی بررسی شود. به علت تعداد کم زلزله‌های نرمال و همچنین رکورد با فاصله بیش از ۱۲۰ کیلومتر، داده‌های مربوطه از بانک داده‌ای ورودی تحلیل حذف شدند. در نتیجه بانک داده نهایی برای کل ایران شامل ۱۷۰۰ رکورد با $M_w > 4/5$ و $R_{RUP} < 120$ km می‌باشد. همه داده‌ها با فواصل بزرگای گشتاوری ۰/۲ و فاصله گسیختگی ۵ کیلومتر در پنجره‌های گوناگون تقسیم‌بندی شدند. در هر پنجره در صورت وجود هم‌پوشانی بیش از دو رکورد از هر منطقه، تحلیل واریانس در آن پنجره اعمال شد. اثر ساختگاه بر دامنه و محتوای فرکانسی جنبش زمین تأثیر محسوسی دارد. برای محاسبه دامنه تشدید ساختگاه‌های ایران در پیوندهای مدنظر و پیاده‌سازی آن در تحلیل واریانس، میانگین نسبت طیفی افقی به عمودی برای ایستگاه‌های طبقه‌بندی شده بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ ایران و به تفکیک مناطق لرزه‌زمین‌ساختی (شکل ۱۲) برآورد شد. با توجه به تعداد بسیار اندک ایستگاه شتاب‌نگاری با V_{S30} کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه (طبقه خاک IV)، ایستگاه‌های این گروه با طبقه III ترکیب شدند. میانگین طیفی هر گروه خاک برای سه منطقه تکتونیکی مورد بررسی در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش نرمی خاک، دامنه اوج منحنی نسبت طیفی افزایش یافته و در پیوند بلندتر به وقوع می‌پیوندد. هرچند مطالعات تجربی نشان دادند که منحنی‌های نسبت طیفی حد پایینی از دامنه تشدید واقعی را نشان می‌دهند [۴۵]، ولی با توجه به نسبی بودن مقایسه صورت گرفته در تحلیل واریانس، این مسئله تغییری در تفسیر نتایج نهایی تست‌ها به وجود نمی‌آورد. توجه داشته باشید که برای ۶۳ ایستگاه که مشخصات V_{S30} آنها موجود نیست، این مقدار بر اساس معادله پیشنهادی درزی و همکاران [۲] بر مبنای فرکانس اصلی آن ایستگاه تخمین زده شد. در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر در مورد این تکنیک محاسبه فرکانس اصلی به مقاله درزی و همکاران [۲] رجوع کنید.

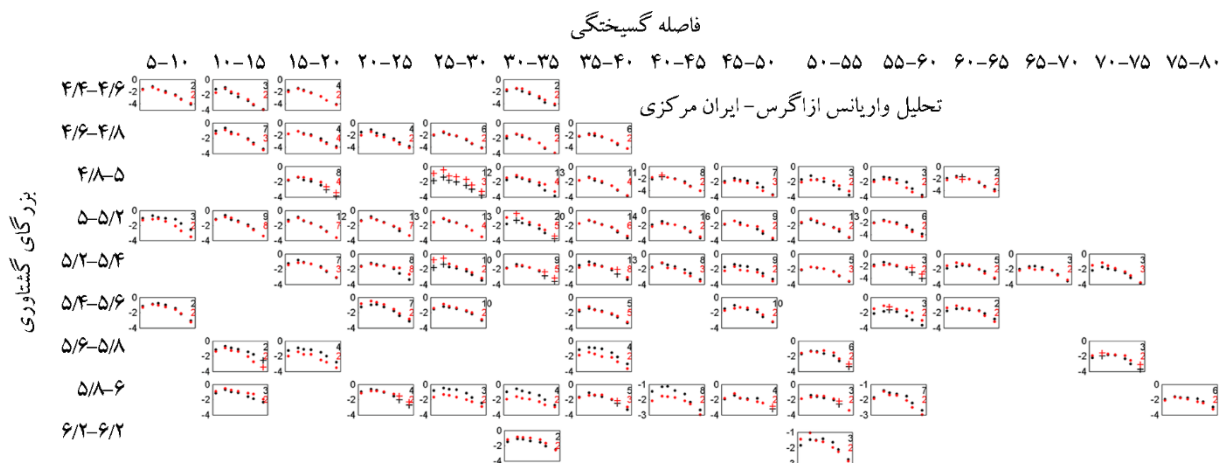
بازه‌های بزرگا-فاصله بسیار کاهش یافت. سپس بر آن شدید تا این تحلیل را بار دیگر بدون تقسیم داده بر حسب مکانیسم گسلش تکرار کنیم. این بار به نتایج خروجی مشابه دست یافتیم، درحالی که تعداد داده هم‌پوشان و پنجره‌های خروجی بزرگا-فاصله بسیار بیشتر از حالت قبل بوده است.

نتایج حاصل از انجام تحلیل واریانس برای مناطق ایران شمالی و زاگرس در شکل (۱۳) و به همین ترتیب برای زاگرس و ایران مرکزی در شکل (۱۴) و ایران شمالی و ایران مرکزی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

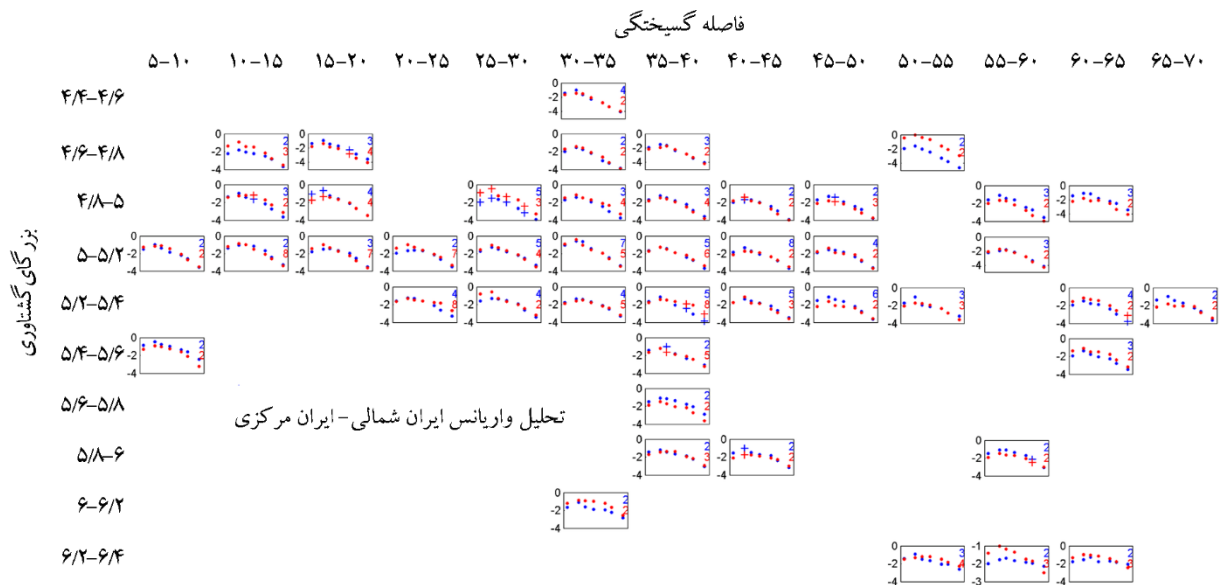
یادآور می‌شویم که بسیاری محققان نظیر بومر و همکاران [۴۶] با ارزیابی جامع اثر مکانیسم گسلش دریافتند که دامنه شتاب طیفی حاصل از زلزله‌های معکوس حدوداً ۲۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از شتاب طیفی از زلزله‌های امتدادلغز هستند. در نتیجه جهت مقایسه‌ی هرچه دقیق‌تر جنبش‌های زمین در مناطق مورد مطالعه، ابتدا همه داده‌ها بر حسب دو مکانیسم گسلش اصلی (امتدادلغز و معکوس) تفکیک و سپس در هر گروه گسلش با یکدیگر مقایسه شدند. با توجه به تقسیم داده به دو گروه، تعداد داده و در نتیجه تعداد رکورد هم‌پوشان و



شکل (۱۳): خروجی گرافیکی تحلیل واریانس برای مقایسه جنبش‌های زمین در منطقه ایران شمالی (رنگ آبی) و زاگرس (رنگ مشکی).



شکل (۱۴): خروجی گرافیکی تحلیل واریانس برای مقایسه جنبش‌های زمین در منطقه زاگرس (رنگ مشکی) و ایران مرکزی (رنگ قرمز).



شکل (۱۵): خروجی گرافیکی تحلیل واریانس برای مقایسه جنبش‌های زمین در منطقه ایران شمالی (رنگ آبی) و ایران مرکزی (رنگ قرمز).

شده است در این مرحله تعداد ۷۰ بازه بزرگا-فاصله و در هر یک برای هفت شتاب طیفی مختلف (در مجموع ۴۹۰ تحلیل واریانس) اعمال شد. از نتایج شکل (۱۳) چنین استنباط می‌شود که تنها در یک یا دو پیوند مشخص از تعداد محدودی بازه بزرگا-فاصله تفاوت آماری قابل توجهی میان جنبش‌های قوی زمین وجود دارد و در مابقی پنجره‌ها رکوردهای جنبش زمین در دو منطقه فوق‌الذکر به‌طور قابل ملاحظه‌ای مشابه یکدیگر هستند. تعداد تحلیل‌هایی که تفاوت آماری قابل ملاحظه‌ای را در هر شتاب طیفی از کلیه بازه‌های مورد تحلیل نشان می‌دهند در جدول (۱) نشان داده شده است. به‌طور کل از ۴۹۰ تحلیل واریانس صورت گرفته تنها ۲۶ مورد آن حاکی از اختلاف جنبش‌های زمین را در منطقه ایران شمالی و زاگرس بوده است، در نتیجه می‌توان آنها را به‌صورت یک بانک داده مشترک در نظر گرفت.

در هر پنجره جفت علامت اول از سمت چپ بیانگر میانگین لگاریتمی مؤلفه افقی شتاب طیفی در پیوند ۰/۰۱ ثانیه می‌باشند. به همین ترتیب جفت علامت دوم، سوم تا هفتم بیانگر میانگین لگاریتمی شتاب طیفی در پیوندهای ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ ثانیه هستند. لازم به ذکر است که با توجه به حجم بالای نتایج خروجی، تنها بخشی از آن در شکل‌های زیر نشان داده شد. در شکل (۱۳) نتایج تحلیل واریانس برای زلزله‌های امتدادلغز مناطق ایران شمالی با رنگ آبی و زاگرس با رنگ مشکی نشان داده شده است. اعداد مشاهده شده در سمت راست هر پنجره نشان‌دهنده تعداد رکوردهای اخذ شده از هر منطقه در هر بازه فاصله-بزرگا هستند. علامت + نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان جنبش‌های زمین دو منطقه می‌باشد و علامت نقطه نشان‌دهنده اختلاف ناچیز می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده

جدول (۱): نتایج تحلیل واریانس برای تمامی بازه‌های بزرگا-فاصله‌ی هفت شتاب طیفی مورد بررسی.

مناطق تکتونیکی	تعداد تحلیل واریانس صورت گرفته در هر شتاب طیفی	۰/۰۱	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۱	۲	۵	تعداد کل نقاط با وابستگی منطقه‌ای
ایران شمالی-زاگرس	۷۰ (۴۹۰ شتاب طیفی)	۴	۶	۴	۴	۲	۳	۳	۲۶ از ۴۹۰
ایران مرکزی-زاگرس	۶۶ (۴۶۲ شتاب طیفی)	۲	۵	۳	۱	۱	۸	۱۰	۳۰ از ۴۶۲
ایران شمالی-ایران مرکزی	۴۵ (۳۱۵ شتاب طیفی)	۲	۴	۲	۲	۲	۲	۲	۱۶ از ۳۱۵

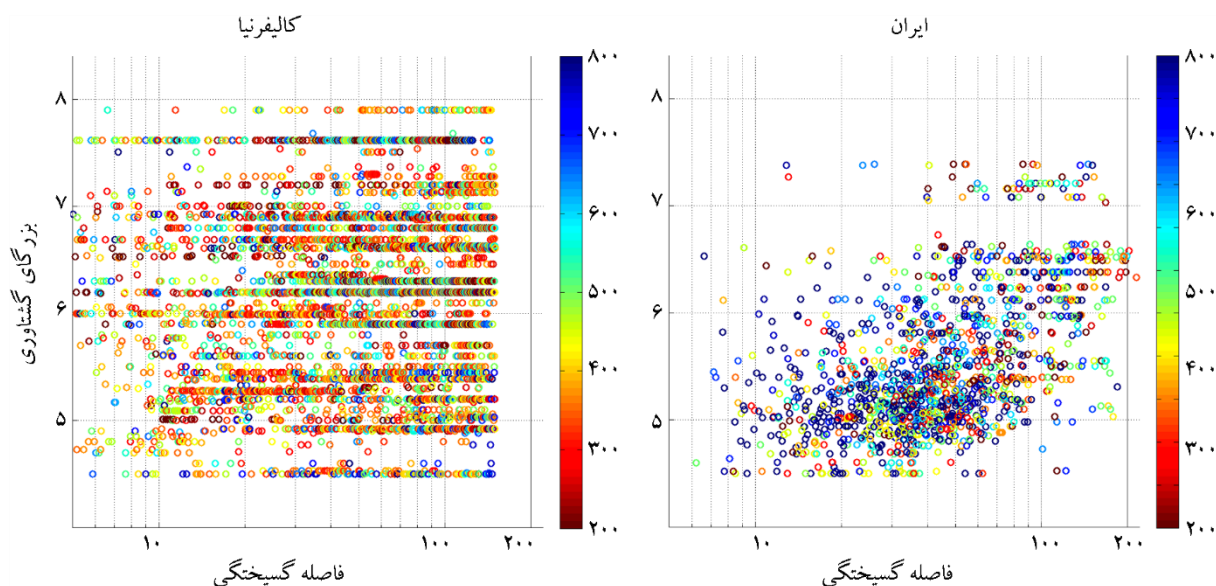
نتایج حاصل از تحلیل‌های شرح داده شده در بخش فوق وابستگی منطقه‌ای را در تعداد بسیار اندکی از فواصل بزرگا-فاصله و در تعداد محدودی از شتاب‌های طیفی مشخص برای مناطق ایران شمالی، ایران مرکزی و زاگرس نشان می‌دهد. بنابراین ما معتقدیم که وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های زمین که تاکنون از مناطق مختلف لرزه‌زمین‌ساختی در ایران جمع‌آوری شده، ناچیز بوده و می‌توان رکوردهای ثبت شده در مناطق مختلف ایران را به صورت یک بانک داده واحد در نظر گرفت. در بخش بعدی مقاله کل داده‌های ایران در غالب یک بانک جامع با داده‌های کالیفرنیا مقایسه می‌شوند.

۵-۲- وابستگی منطقه‌ای میان داده‌های جنبش قوی ایران و کالیفرنیا

در شکل (۱۶) و شکل (۵) مشاهده می‌شود که در بازه بزرگای ۶/۵ تا ۷/۱ در بانک داده‌های ایران تقریباً هیچ زلزله‌ای رخ نداده است. این در حالی است که در کاتالوگ داده‌های کالیفرنیا (شکل ۱۰) این خلأ مملو از داده می‌باشد. با توجه به توزیع غیریکنواخت داده‌های ایران بر حسب بزرگا و فاصله و همچنین خلأ مذکور، ترکیب این داده‌ها با رکوردهایی که در مناطقی با زمین‌ساخت مشابه ایران ثبت شدند می‌تواند راهگشای مناسبی برای ارائه رابطه کاهندگی قوی تری باشد. در نتیجه در این بخش تحلیل واریانس به فواصل بزرگا-فاصله با داده‌های هم‌پوشان کافی از ایران و کالیفرنیا اعمال شده است تا میزان تفاوت آماری میان این جنبش‌ها بررسی شود. در شکل (۱۶) توزیع بزرگا-فاصله رکوردهای ایران و کالیفرنیا بر حسب مقدار V_{S30} در رنگ‌های مختلف نمایش داده شده است. فراوانی رنگ‌های آبی در رکوردهای ایران و رنگ‌های نارنجی در رکوردهای کالیفرنیا بیانگر این موضوع است که شتاب‌نگاشت‌های ایران توسط دستگاه‌هایی که روی خاک سخت تری قرار گرفتند ثبت شدند. این امر در هیستوگرام شکل (۸) برای ایران و شکل (۱۱) برای کالیفرنیا نیز مشهود است، زیرا تعداد زیادی از ایستگاه‌های کالیفرنیا

در شکل (۱۴) دو عدد قرار گرفته در سمت راست پنجره‌ها بیانگر تعداد رکورد برای مناطق زاگرس (عدد بالانتر) و ایران مرکزی (عدد پایین تر) هستند. همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است در این مرحله تعداد ۶۶ بازه بزرگا-فاصله و در هر یک برای هفت شتاب طیفی مختلف اعمال شد. تعداد تحلیل‌هایی که تفاوت آماری قابل ملاحظه‌ای را در هر شتاب طیفی نشان می‌دهند در جدول (۱) نشان داده شده که در مجموع ۴۶۲ تحلیل واریانس اعمال شده، تنها در ۳۰ شتاب طیفی مختلف (بیشتر در پروده‌های بلند ۲ و ۵ ثانیه) تفاوت چشمگیری میان جنبش‌های این دو منطقه مشاهده شد. همچنین، از نتایج شکل (۱۴) چنین بر می‌آید که تنها در بازه ۲۵-۳۰ کیلومتر و بزرگای ۴/۸-۵، دامنه شتاب‌های طیفی در همه پروده‌های طیفی به صورت صلیب بوده که این موضوع حاکی از اختلاف زیاد و متعاقباً عدم امکان اختلاط داده‌های زاگرس و ایران مرکزی در این دو بازه می‌باشد. ولی با توجه به اینکه تعداد رکوردهای موجود در این بازه (۱۵ رکورد) کمتر از ۲ درصد از کل رکوردهای این دو منطقه را تشکیل می‌دهند، این اختلاف قابل اغماض می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود ۴۵ بازه بزرگا-فاصله مورد تحلیل قرار گرفت و پنجره‌های خالی در این مقایسه بیشتر از تحلیل‌های پیشین می‌باشد. این امر نشان‌دهنده‌ی تعداد کمتر داده مشترک (کمتر از سه رکورد هم‌پوشان) برای بازه‌های بزرگا-فاصله معین شده می‌باشد. بررسی‌های آماری فوق نشان می‌دهد که تنها در یک پنجره (فاصله گسیختگی ۲۵-۳۰ کیلومتر و بزرگای ۴/۸-۵، مشابه بخش پیشین) در چهار شتاب طیفی اختلاف آشکاری وجود دارد. حال آنکه در باقی پنجره‌ها تنها در یک یا دو پرئود خاص از تعداد محدود بازه بزرگا-فاصله، وابستگی منطقه‌ای حائز اهمیت شمرده شده است. به بیان دقیق‌تر، فقط ۱۶ شتاب طیفی (جدول ۱) از مجموع ۳۱۵ شتاب طیفی مورد آزمایش در این بخش دارای اختلاف زیاد می‌باشند که این تعداد اندک نیز قابل چشم‌پوشی هستند. خلاصه نتایج حاصل از تحلیل واریانس در جدول (۱) نشان داده شده است.



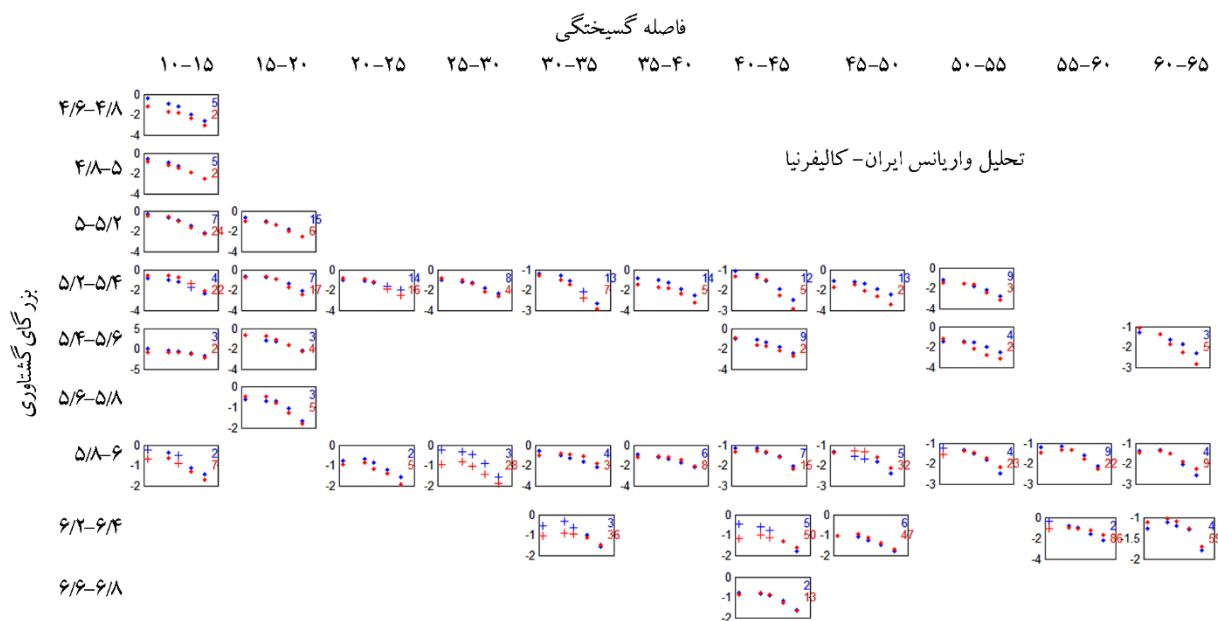
شکل (۱۶): توزیع رکوردهای ایران و کالیفرنیا بر حسب مقدار V_{S30} ایستگاه ثبت کننده‌ی هر رویداد.

وابستگی منطقه‌ای ممکن شود و نتیجه‌گیری دقیقی حاصل شود. بدین منظور همه داده‌های ایران و کالیفرنیا هر یک به دو مجموعه داده با مکانیسم امتداد لغز و معکوس تقسیم شدند و تحلیل واریانس به‌طور جداگانه بر هر مجموعه اعمال شد. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب نتایج حاصل از تحلیل واریانس بر روی شتاب طیفی (در پیوندهای ۰/۱، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ ثانیه) حاصل از زلزله‌های معکوس و امتداد لغز را نشان می‌دهد. داده‌های ایران با رنگ آبی و کالیفرنیا با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

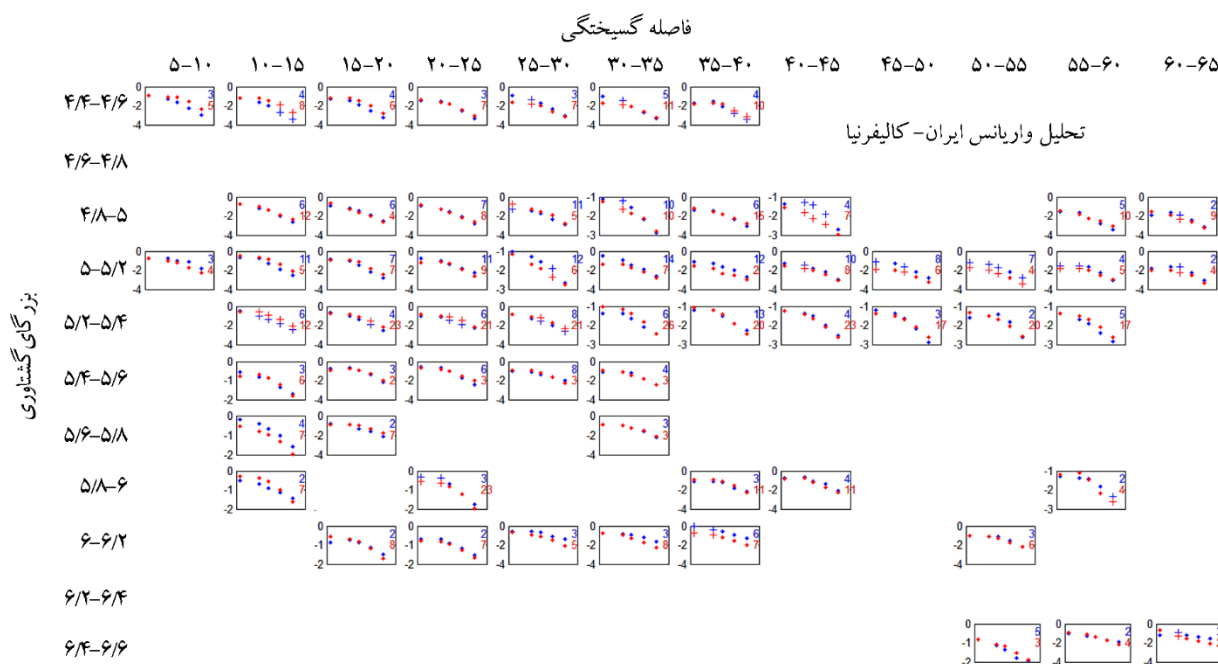
در شکل (۱۷) مقایسه نتایج تحلیل واریانس در بازه‌های مختلف از بزرگای ۴/۶ تا ۶/۸ برای جنبش‌های زمین با گسلش معکوس نشان داده شده است. با توجه به خروجی زیاد تحلیل تا فواصل ۱۵۰ کیلومتر، تنها بخشی از این نتایج در این مقاله گزارش می‌شود. مطابق نتایج حاصله تنها در پنجره‌های زیر اختلاف جنبش‌های زمین ایران و کالیفرنیا محسوس می‌باشد: بازه‌ی بزرگای ۵/۸-۶ در فواصل ۲۵-۳۰ و پیوندهای کوتاه (۰/۱، ۰/۱، ۰/۳ ثانیه) در بازه بزرگای ۶/۴-۶/۲ در فواصل ۳۰-۳۵ و ۴۰-۴۵ کیلومتر. به جز موارد فوق در مابقی فواصل تشابه قابل توجهی میان جنبش‌های زمین ایران و کالیفرنیا وجود دارد.

در گروه D (خاک نرم) و تعداد اندکی در طبقه A و B (خاک سخت) از سیستم طبقه‌بندی NEHRP [۴۴] قرار دارند، حال آنکه ایستگاه‌های اندکی از ایران در طبقه IV از استاندارد ۲۸۰۰ ایران (خاک نرم، معادل طبقه D از NEHRP) و بخش زیادی از ساختمان‌های ایران در گروه I (معادل طبقه A و B) واقع شدند. در ابتدا داده‌ها به فواصل بزرگای گشتاوری ۰/۵ و فاصله گسیختگی ۵ کیلومتر تقسیم‌بندی می‌شوند. در هر پنجره بزرگا-فاصله در صورت وجود هم‌پوشانی بیش از دو رکورد از هر منطقه، تحلیل واریانس در آن پنجره انجام می‌شود. تحلیل واریانس مطابق آنچه در بخش قبل شرح داده شد بر داده‌های ایران و کالیفرنیا نیز اعمال شد. با استفاده از تابع تشدید ساختمان که توسط سیهان و استوارت [۴۷] برای استفاده در ۲۰۱۴-NGA [۴۸] تعیین شد، داده‌های مشاهده شده در کالیفرنیا به سایت فرضی با مشخصه سرعت موج برشی ۷۶۰ متر بر ثانیه که به عنوان سرعت مرجع سایت سخت شناخته می‌شود، انتقال می‌یابد. بدین صورت اثر ساختمان از رکوردهای کالیفرنیا حذف شد.

در این بخش تعداد زیاد داده ایران و کالیفرنیا، موجب شد تا امکان لحاظ کوچک‌ترین عامل تأثیرگذار در نتایج تحلیل



شکل (۱۷): تحلیل واریانس جنبش‌های قوی زمین با مکانیسم معکوس برای دو منطقه ایران (آبی) و کالیفرنیا (قرمز).



شکل (۱۸): تحلیل واریانس جنبش‌های قوی زمین با مکانیسم امتدادلغز برای دو منطقه ایران (آبی) و کالیفرنیا (قرمز).

فاصله ۴۵-۴۰ کیلومتر و همچنین در تعداد اندکی از پریودهای طیفی پراکنده در بازه‌های مختلف تفاوت جنبش‌های زمین کالیفرنیا و ایران با گسلش امتدادلغز مشهود می‌باشد. حال آنکه در تعداد قابل توجهی از بازه‌های مورد تحلیل، تشابه جنبش‌های دو منطقه در پریودهای بلند و کوتاه بیشتر به چشم می‌آید و

در شکل (۱۸) تحلیل واریانس بر جنبش‌های زمین با گسلش امتدادلغز و در بازه‌های مختلف بزرگا- فاصله از بزرگای ۴/۴ تا ۶/۶ اعمال شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در بازه‌هایی نظیر بازه‌ی بزرگای ۵/۲-۵/۴ و فواصل ۱۰-۱۵ کیلومتر؛ بزرگای ۵-۵/۲ و فواصل ۵۰-۶۰ کیلومتر؛ بزرگای ۴/۸-۵ و

حاصل از مناطق فوق‌الذکر بوده است. بنابراین نگارندگان بر این عقیده هستند که این سه مجموعه داده می‌توانند با یکدیگر ترکیب شده و یک بانک داده‌ای غنی و واحد را جهت پیش‌بینی جنبش‌های آتی تشکیل دهند. نتایج حاصله از تحلیل صورت گرفته در این مطالعه تأییدی بر نتایج مطالعه قاسمی و همکاران [۱۴] و صدیقی و پزشک [۱۷] می‌باشد. همچنین برخلاف قدرتی‌امیری و همکاران [۷] و صفاری و همکاران [۸]، در توافق با نظر درزی و همکاران [۴۹] و ذوالفقاری و درزی [۵۰]، بر اساس داده‌های موجود از زلزله‌های ایران لزومی بر ارائه روابط کاهندگی جداگانه برای مناطق مختلف تکنیکی وجود ندارد. در بخش‌هایی از این مطالعه به بررسی امکان ترکیب رکوردهای ثبت شده از زلزله‌های کالیفرنیا با داده‌های ایران پرداخته شد. طبق نتایج حاصله در سه بازه بزرگا-فاصله اختلاف قابل توجهی میان جنبش‌های امتدادلغز در این دو منطقه مشاهده شد. این امر مانع ابراز نظر قطعی در مورد امکان ترکیب کامل داده‌های ایران و کالیفرنیا در تمامی بازه‌های بزرگا و فاصله صرف نظر از نوع گسلش آنها می‌شود. لذا برای اظهار نظر صحیح‌تر، داده‌های کامل تری از جنبش‌های قوی زمین در ایران مورد نیاز است.

سپاسگزاری

در پایان نگارندگان از همکاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جهت تهیه شتاب‌نگاشت‌های خام زلزله تشکر و قدردانی می‌نمایند. همچنین از دکتر جان داگلاس برای مطرح کردن ایده انجام این مقاله و از دکتر انوشیروان انصاری برای دسترسی به کد پردازش داده و کمک‌های بی‌دریغشان قدردانی می‌شود. از داوران محترم نیز که نظراتشان موجب بهبود کیفیت مقاله شد کمال تشکر را دارند.

مراجع

- Boore, D.M., Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N.A. (2006) Orientation-independent measures of ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 1502-1511.
- Darzi, A., Pilz, M., Zolfaghari, M.R., and Fah, D.

به‌طور حتم می‌توان جنبش‌هایی از کالیفرنیا که در این بازه‌ها قرار می‌گیرند را به رکوردهای ایران افزود. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل واریانس صورت گرفته در این بخش، به‌طور کل تعداد داده‌هایی که اختلاف حائز اهمیتی از دامنه شتاب طیفی میان دو منطقه ایران و کالیفرنیا را نشان می‌دهند نسبت به تعداد کل داده‌های دو منطقه، بسیار کم می‌باشند. بر این باوریم که جهت برآورد دقیق‌تر از میزان وابستگی منطقه‌ای داده‌های امتدادلغز از این دو منطقه، بانک داده‌ای غنی‌تری از ایران مورد نیاز است.

۶- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه سعی بر آن شد تا با استفاده از تحلیل آماری واریانس به بررسی کمی وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های زمین از مناطق تکنیکی مختلف و امکان ترکیب آنها در یک بانک داده‌ای واحد پرداخته شود. این تحلیل میان سه منطقه لرزه‌زمین ساخت در ایران به نام‌های البرز- آذربایجان- کپه‌داغ (ایران شمالی)، ایران مرکزی و زاگرس به صورت دو به دو اعمال شد. بدین منظور در این مطالعه سه مجموعه بانک داده جنبش قوی زمین برای سه منطقه فوق‌الذکر از ایران تهیه و به روش نوفه‌زدایی موجک پردازش شد. این بانک جامع متشکل از ۱۹۴۳ زوج شتاب‌نگاشت افقی می‌باشد که از ۴۲۶ زلزله حاصل شدند و در ۶۸۰ ایستگاه ثبت شده‌اند.

همچنین تلاش بسیاری شد تا این بانک جمع‌آوری شده از لحاظ اطلاعات لرزه‌ای نظیر بزرگای گشتاوری، فاصله گسیختگی، مکانیسم کانونی زلزله و مشخصات طبقه‌بندی خاک بسیار غنی‌تر از مطالعات پیشین [۷، ۸، ۱۴، ۱۷] باشد. با استفاده از فرکانس اصلی ساختگاه، مقدار V_{S30} برای ۶۳ ایستگاه شتاب‌نگاری تخمین زده شد. در مجموع در این مطالعه تعداد ۴۹۰، ۴۶۲ و ۳۱۵ تحلیل واریانس بر روی شتاب طیفی مختلف واقع در بازه‌های متفاوت بزرگا-فاصله با همپوشانی بیش از سه رکورد به ترتیب برای ارزیابی وابستگی منطقه‌ای زوج مناطق ایران شمالی- زاگرس، ایران مرکزی- زاگرس و ایران شمالی- ایران مرکزی صورت گرفت؛ که در هر سه سناریو بیش از ۹۵ درصد تحلیل‌های انجام شده حاکی از تفاوت بسیار ناچیزی از وابستگی منطقه‌ای میان جنبش‌های زمین

13. Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., and Soghrat, M.R. (2017) Empirical equations for the prediction of PGA and pseudo spectral accelerations using Iranian strong-motion data. *Journal of Seismology*.
14. Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., and Koketsu, K. (2009) An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of Seismology*, **13**(4), 499-515.
15. Atkinson, G. and Morrison, M. (2009) Regional variability in ground motion amplitudes along the west coast of North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 2393-2409.
16. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., and Smit P.M. (2005) Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bull. Earthq. Eng.*, **3**(1), 1-53.
17. Sedaghati, F. and Pezeshk, S. (2016) Investigation of regional differences in strong ground motions for the Iranian plateau. *World Acad. Sci. Eng. Tech., Int. J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys. Eng.*, **10**(6), 591-594.
18. Hamzeloo, H. and Mahood, M. (2012) Ground-motion attenuation relationship for east central Iran. *Bull Seismol. Soc. Am.*, **102**(6), 2677-2684.
19. Hessami, K. and Jamali, F. (2006) Explanatory Notes to the Map of Major Active Faults of Iran. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*.
20. Hessami, K. and Khorrami, F. (2011) *Determination of Slip Rate Along Active Faults of Central Alborz Using GPS Measurements*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) report (in Persian).
21. Vernant, P.H., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chery, J. (2004) Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, **157**(1), 381-398.
22. Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., and Vernant, P. (2006) Extension in NW Iran driven by the (2019) An automatic procedure to determine the fundamental site resonance: application to the Iranian strong motion network. *Pure Appl. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02153-z>.
3. Douglas, J. (2004) An investigation of analysis of variance as a tool for exploring regional differences in strong ground motions. *Journal of Seismology*, **8**(4), 485-496.
4. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S., and Hadi, G. (2010) A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau. *J. Earthq. Eng.*, **14**(2), 278-292.
5. The NGA-West 2 ground motion database. [Online]. Available: [http:// peer.berkeley.edu/ngawest2/](http://peer.berkeley.edu/ngawest2/). [2014, April].
6. Zare, M., Bard, P.Y., and Ghafory-Ashtiany, M. (1999) Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **18**, 101-123.
7. Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., Mirza Hessabi, M., and Razavian Amrei, S.A. (2010) Ground-motion prediction equations of spectral ordinates and Arias intensity for Iran. *J. Earthq. Eng.*, **14**(1), 1-29.
8. Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., and Mahdavian, A. (2012) Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran. *Earthquake Spectra*, **28**(1), 257-276.
9. Zafarani, H., Hassani, B., and Ansari, A. (2012) Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **42**, 197-218.
10. Zafarani, H. and Hassani, B. (2013) Site response and source spectra of S-waves in the Zagros region, Iran. *Journal of Seismology*, **17**, 645-666.
11. Chandra, V.J., McWhorten, G., and Nowroozi, A. (1979) Attenuation of intensities in Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **69**, 237-250.
12. Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, A., and Ansari, A. (2008) Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **28**, 550-576.

- motion record? *Bull. Earthquake Eng.*, **1**, 141-56.
33. Zolfaghari, M.R. and Darzi, A. (2014) Design and Development of A GIS-Based Seismo-tectonic Source Model for Iran. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEE)*, Istanbul, Turkey.
 34. Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y.T. (1998) Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic Provinces. *J. Earthq. Predict Res.*, **7**, 465-495.
 35. Harvard Seismology, Centroid Moment Tensor (CMT) Catalog Search. [Online]. Available: www.seismology.harvard.edu [2014, April].
 36. NEIC global catalog, National Earthquake Information Center [Online]. Available: http://gldss7.cr.usgs.gov/neis/FM/fast_moment.html [2014, April].
 37. ISC, International seismological Centre. [Online]. Available: <http://www.isc.ac.uk> [2014, April].
 38. Shahvar, M.P., Zare, M., and Castellaro, S. (2013) A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900-2011). *Seismol. Res. Lett.*, **84**(2), 233-249.
 39. Joyner, W.B. and Boore, D.M. (1981) Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **71**, 2011-2038.
 40. Kakkamanos, J., Baise, L.G., and Boore, D.M. (2011) Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, **27**, 1219-1235.
 41. Scherbaum, F., Schmedes, J., and Cotton, F. (2004) On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**, 1053-1069.
 42. Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the ground surface. *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, **30**, 25-33.
 43. Bard, P.Y. and SESAME manual (2004) Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration. European Commission Research General Directorate Project.
 23. Berberian, M. (1995) Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*. **241**(3-4), 193-195, 197, 199-224.
 24. Authemayou, C., Bellier, O., Chardon, D. and Benedetti, L. Malekzade, Z., Claude, C., Angeletti, B., Shabanian, E., and Abbassi, M.R. (2009) Quaternary slip-rates of the Kazerun and the Main Recent Faults: active strike-slip partitioning in the Zagros fold-and-thrust belt. *Geophys. J. Int.*, **178**, 524-540.
 25. Fattahi, M., Walker, R.T., Talebian, M., Sloan, R.A., and Rasheedi, A. (2011) The structure and late Quaternary slip rate of the Rafsanjan strike-slip fault, SE Iran. *Geosphere*, **7**(5), 1159-1174.
 26. Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M.J., Jackson, J., and Copley, A. (2010) Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene. *Geophys. J. Int.*, **181**(3), 1214-1246.
 27. Building and Housing Research Center (BHRC). [Online]. Available: <http://site.bhrc.ac.ir/portal/english/Home.aspx> [2015, August].
 28. Boore, D.M., Stephens, C.D., and Joyner, W.B. (2002) Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 1543-1560.
 29. Ansari, A., Noorzad, A., and Zare, M. (2007) Application of wavelet multi-resolution analysis for correction of seismic acceleration records. *J. Geophys. Eng.*, **4**, 1-16.
 30. Ansari, A., Noorzad, A., Zafarani, H., and Vahidifard, H. (2010) Correction of highly noisy strong motion records using a modified wavelet denoising method. *Soil Dyn Earthqu Eng.*, **30**, 1168-1181.
 31. Boore, D.M. and Bommer, J.J. (2005) Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **25**, 93-115.
 32. Douglas J. (2003) What is a poor quality strong-

Analysis of Variance	۱- تحلیل واریانس
Partitioning	۲- تقسیم‌شدگی
Neh	۳- نه
Harvard Global CMT Catalog	۴- کاتالوگ جهانی CMT هاروارد
National Earthquake Information Center	۵- مرکز ملی اطلاعات زلزله
International Seismological Centre (ISC)	۶- مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی
Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio	۷- نسبت طیفی افقی به عمودی

نشانه‌گذاری

V_{soil}	سرعت موج برشی خاک
V_{stone}	سرعت موج برشی ستون سنگی
S	فاصله مرکز به مرکز ستون سنگی
D	قطر ستون سنگی
H	ارتفاع ستون سنگی
L	ارتفاع لایه خاک
A	ضریب بزرگنمایی فرکانس اصلی ساختمان
f_S	فرکانس اصلی ساختمان بهسازی شده با ستون سنگی
f_0	فرکانس اصلی ساختمان بدون بهسازی
A_S	مساحت هر ستون سنگی
A	سطح بارگیر هر ستون سنگی
I	یمان اینرسی هر ستون سنگی

44. National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP) (2009) Building Seismic Safety Council (BSSC).
45. Chatelain, J.L., Guillier, B., Cara, F., Duval, A.M., Atakan K., Bard, P.Y., and Azzara R. (2008) Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull. Earthq. Eng.* **6**(1), 33-74.
46. Bommer, J.J., Douglas, J. and Strasser, F.O. (2003) Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. *Bull. Earthq. Eng.*, **1**(2), 171-203.
47. Seyhan, E. and Stewart, J.P. (2014) Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West 2 data and simulations. *Earthq. Spectra*, **30**(3), 1241-1256.
48. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., and Atkinson, G.M. (2014) NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-Damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, **30**(3), 1057-1085.
49. Darzi, A., Zolfaghari, M.R., Cauzzi, C., and Fah, D. (2018) An empirical ground motion model for horizontal PGV, PGA and 5%-damped elastic response spectra (0.01-10 s) in Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, <https://doi.org/10.1785/0120180196>.
50. Zolfaghari, M.R. and Darzi, A. (2019) Ground-motion models for predicting vertical components of PGA, PGV and 5%-damped spectral acceleration (0.01–10 s) in Iran. *Bull. Earthq. Eng.*

فهرست علائم

GMRotI	Geometrical Mean Rotation-Independent	میانگین هندسی مستقل از چرخش سنسورهای ثبت رکوردهای افقی
V_{S30}	Average Shear-Wave Velocity Over the Top 30 m	سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی
NGA	Next Generation Attenuation Relationship	روابط کاهش‌دهی نسل آتی
mm/yr	Millimeter per Year	میلی‌متر بر سال
N-S	North-South	راستای شمالی - جنوبی
NW-SE	North West-South East	راستای شمال غربی - جنوب شرقی
GPS	Geographical Positioning System	سیستم مکان‌یابی جغرافیایی
ISMN	Iran Strong Motion Network	شبکه جنبش‌های قوی ایران
SSA-2	Digital Strong Motion Accelerograph	نوعی شتاب‌نگار دیجیتال
SMA-1	Analogue Strong Motion Accelerograph	نوعی شتاب‌نگار آنالوگ

ادامه فهرست علائم

NEIC	National Earthquake Information Center	مرکز اطلاعات زلزله ملی
ISC	International Seismological Centre	مرکز لرزه‌شناسی بین‌المللی
R_{JB}	Joyner-Boore Distance	فاصله جوی‌نر-بور
R_{rup}	Rupture Distance	فاصله گسیختگی
α	Source to Site Angle	زاویه چشمه تا سایت
Dip	Dip Angle	زاویه شیب
Z_{TOR}	Depth to Top of Rupture	عمق تا بالای صفحه گسیختگی
Mw	Moment Magnitude	بزرگای گشتاوری
H/V or HVSR	Horizontal -to-Vertical Spectral Ratio	نسبت طیفی افقی به عمودی
SESAME	Site Effects Assessment Using Ambient Excitations	ارزیابی اثر ساختگاه با استفاده از برانگیختگی‌های محیطی
f_0	Fundamental Frequency	فرکانس اصلی
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program	برنامه ملی کاهش خطر زلزله

A Statistical Investigation on Regional Dependency of Strong Ground-Motions in Iran and California

Atefe Darzi¹ and Mohammad R. Zolfaghari^{2*}

1. Ph.D. Graduate, Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Civil Engineering Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: mzolfaghari@catrisks.com

Iran is one of the most seismically active regions in the world with many historical and instrumental recorded earthquakes. Despite such high seismicity, the number of strong ground motion records available for main tectonic regions in Iran is not sufficient for reliable regional-dependent ground motion prediction equations (GMPEs). Moreover, it is generally acknowledged that sparse sampling and poor distribution of data result in limited applicability of GMPEs with regard to source-to-site distance and magnitude ranges. In order to cope with the lack of data, supplementary earthquake ground motions (GM) recorded in certain regions of the world with similar tectonic regimes can be combined into one dataset. Therefore, we aimed to explore the possibility of combining Iran and California datasets through assessment of the regional dependency of strong GMs. For this purpose, the statistical technique known as Analysis of Variance (ANOVA) is applied to both large sets of strong GMs from Iran and California. Analysis of variance does not rely on deriving GMPEs which makes it a strong and reliable technique for understanding of regional differences. California dataset comprises of 5902 records obtained from 218 earthquakes which are extracted from NGA-West2 database. The Iranian database used in the present study was obtained from Iran Strong Motion Network (ISMN) in unprocessed format. Data are processed using modified wavelet de-noising approach by which large numbers of noisy acceleration records that are usually discarded from datasets, can be corrected. The database comprises of 1943 pairs of horizontal acceleration time series obtained from 426 earthquakes with moment magnitudes ranging from 4.5 to 7.4 and distances up to 200 km. As source-to-site distance measure, closest distance to the fault rupture plane (denoted as R_{rup}) is computed for all records. Due to paucity of normal-faulting earthquakes in Iran, we excluded such events from our database.

The large number of strong motion datasets from both regions available in present research enables us to perform the analysis of variance technique to many intervals with overlapping data from both regions. Consequently, more reliable results can be concluded compared to previous researches. We applied ANOVA to 5%-damped horizontal component of elastic response spectral acceleration at six different vibration periods (0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 and 5 seconds) and at intervals of to 5 km and 0.2 Mw. In order to combine two horizontal components, a single period-independent rotation measure ($GMRotI_{50}$) is used.

To provide more reliable results, site response effect on GM amplitudes is reduced using averaged horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) for stations grouped by Iranian building design code based on time-averaged shear-wave velocity in the top 30 m (V_{S30}). For stations with unknown V_{S30} values, the V_{S30} -prediction equation proposed by Darzi et al. (2019) is applied to Iranian strong-motion stations having fundamental frequency greater than 1 Hz. Note that due to small number of stations in class IV, they are combined with class III.

This study first investigates the possibility of classifying the Iranian database into three tectonic regions of Northern Iran, East-Central Iran and Zagros. The ANOVA technique is applied to Mw- R_{rup} intervals with sufficient data from these regions two by two; however, the results did not show any strong regional-dependency, indicating that the nation-wide data could be considered as a single dataset. Then, the regional differences between GM amplitudes from Iran and California are evaluated using ANOVA technique. High evidence of regional dependency was revealed in some magnitude and distance ranges, supporting regional classification of dataset to prevent biased predictions. Based on these analyses, there is little evidence of regional difference for reverse-faulting events except for $M_w = 5.8-6$ and $R_{rup} = 25-30$ km across all periods and for $M_w = 6.2-6.4$ and $R_{rup} = 30-35$ km at short periods.

For strike-slip events, there seems to be three intervals showing high regional dependence of GMs. To conclude, authors believe that supplementary data is required to make a definitive statement in the whole magnitude and distance range. In case of negligible regional differences, such investigation would be beneficial for development of future GMPEs in Iran to overcome incompleteness of data and existence of gaps in distance-magnitude intervals.

Keywords: Iran; California; Regional Dependency; Analysis of Variance; Strong Ground Motion Database; Attenuation Relationships.