

یادداشت پژوهشی

چکیده

در این مقاله ضرایب ثابت روابط کاهندگی شتاب موجود که توسط محققین مختلف برای فلات ایران ارائه شده بود برای استان مازندران مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت. تعداد شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این مقاله ۱۰۵ رکورد با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴ بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۶ بوده است که از این تعداد ۷۱ رکورد متعلق به زمین‌هایی با بستر سنگی با سرعت موج برشی بیشتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه و ۳۴ رکورد متعلق به زمین‌هایی با بستر خاکی با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه و کمتر بوده است. شتاب‌نگاشت‌هایی که نیاز به اصلاح داشتند، توسط فیلتر چیبشف (Chebyshev Filter) اصلاح گردیدند. همچنین تصحیح خطای خط مبنا بر روی این شتاب‌نگاشت‌ها انجام گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های لرزه‌ای استان مازندران در تمامی مدل‌ها منجر به نتایج همگن می‌گردد که بیانگر دقت ضرایب ثابت به دست آمده در این پژوهش می‌باشد؛ اما با توجه به اهمیت انحراف معیار در استفاده از روابط کاهندگی شتاب زمین در تحلیل خطر زلزله، روابط ارائه شده نیاز به انحراف معیار دارند که در تحقیقات آتی به دست خواهند آمد. نتایج این تحقیق اهمیت مطالعه بیشتر بر روی کاهندگی مناطق مختلف فلات ایران را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: زمین‌لرزه، تحلیل خطر زلزله، رابطه کاهندگی شتاب، تصحیح شتاب‌نگاشت.

بررسی کاهندگی شتاب بر اساس داده‌های شتاب‌نگاری استان مازندران

حامد طالبی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله دانشگاه مازندران

احسان جهانی (نویسنده مسئول)

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران،

e.jahani@umz.ac.ir

۱- مقدمه

از زلزله با تغییرات پارامترهایی مانند فاصله از منبع، بزرگای زلزله، نوع خاک، سازوکار گسلش و غیره است [۱]. فرم کلی روابط کاهندگی به صورت ساده می‌تواند با معادله (۱) بیان شود:

$$\ln(A) = C + f(m) + f(r) + f(soil) + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن A دامنه حرکت زمین است که می‌تواند شتاب حرکت زمین یا دامنه‌ی طیفی باشد. $f(m)$ تابعی از بزرگای، $f(r)$ تابعی از فاصله‌ی محل ثبت رکورد تا منبع و $f(soil)$ تابعی از شرایط محیطی سایت می‌باشد. C یک مقدار ثابت است و ε عبارت خطای تصادفی است که دارای میانگین صفر و انحراف معیار $\sigma_{\ln(A)}$ است [۲].

در سال ۱۹۹۴ رمزی و شنک [۳] برای منطقه‌ی فلات ایران اقدام به ارائه‌ی مدل کاهندگی کردند. آنها ساختگاه را از نظر

استان مازندران یکی از استان‌های شمالی کشور ایران می‌باشد که مساحت آن ۲۳۷۵۶ کیلومتر مربع و موقعیت جغرافیایی آن بین ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. گسل‌های شمال البرز و خزر از جمله مهم‌ترین گسل‌های این استان هستند که شرق تا غرب استان را در بر می‌گیرند. با توجه به گسترش ساخت‌وسازها یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای محاسبه‌ی شتاب مبنای طرح و ویژه‌ی ساختگاه، تحلیل خطر لرزه‌ای ساختگاه می‌باشد که این کار با توجه به وضعیت لرزه‌خیزی منطقه و استفاده از علم آمار و احتمالات صورت می‌پذیرد. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تحلیل خطر لرزه‌ای رابطه‌ی کاهندگی مورد استفاده در این روش است. رابطه‌ی کاهندگی مبین میزان تغییرات شتاب ناشی

به صورت رابطه‌ی کاهندگی طیفی بود که با ضرایبی از هم متمایز می‌شدند. آنها برای این کار کاتالوگی شامل ۳۵۱ رکورد متعلق به سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۹ را جمع‌آوری کردند و همچنین ایران را از نظر مناطق لرزه‌ای به دو قسمت زاگرس و ایران مرکزی تقسیم کردند. در تحقیق آنها خاک همانند آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران به چهار قسمت دسته‌بندی شد. سقراط و ضیایی فر [۱۱] در سال ۲۰۱۶ رابطه‌ای را به منظور پیش‌بینی شتاب افقی و قائم ناشی از زلزله برای مناطق شمالی ایران ارائه دادند. آنها خاک را همانند آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران به چهار نوع تقسیم کردند. همچنین در بانک اطلاعات داده‌های لرزه‌ای آنها ۳۲۵ رکورد زلزله موجود بوده است.

علاوه بر روابط کاهندگی شتاب که در بالا ذکر شده‌اند محققین بسیاری نیز در راستای ارائه‌ی روابط کاهندگی طیفی مربوط به ایران پژوهش‌هایی را انجام دادند که از جمله آنها می‌توان به زارع [۱۲]، خادمی [۶]، قاسمی و همکاران [۱۳] قدرتی امیری و همکاران [۱۴] صفاری و همکاران [۱۰] و سقراط و ضیایی فر [۱۱] اشاره کرد. اولین رابطه‌ی کاهندگی طیفی در فلات ایران توسط زارع [۱۲] در سال ۱۹۹۹ ارائه شد.

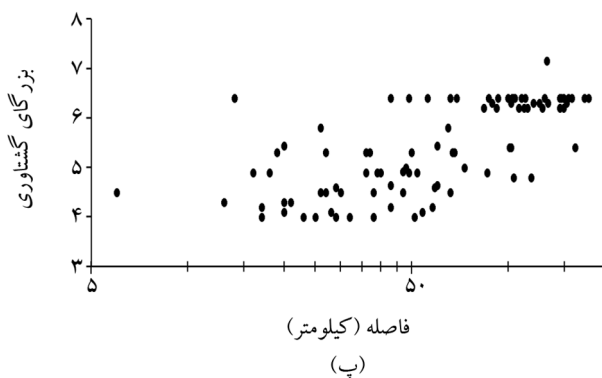
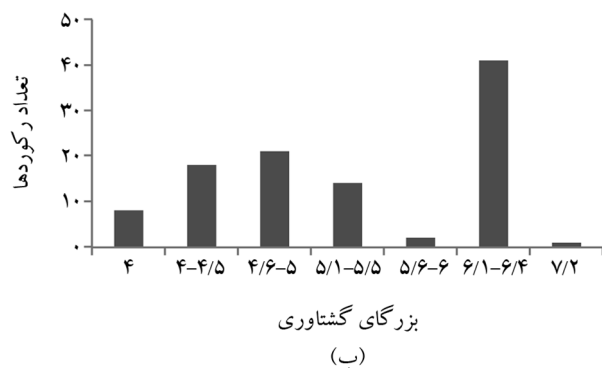
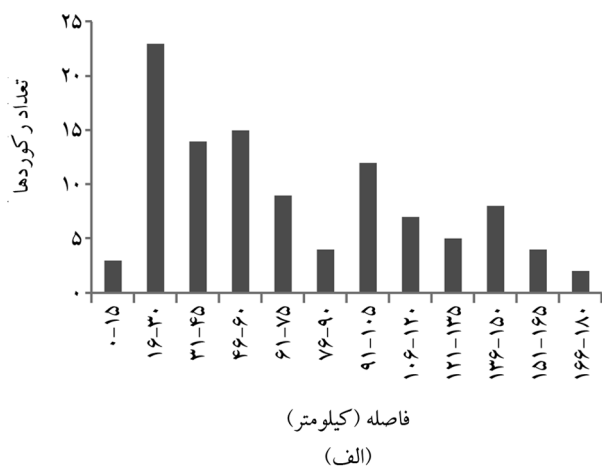
نکته‌ی حائز اهمیت در تحلیل خطر لرزه‌ای، استفاده از رابطه‌ی کاهندگی مناسب با شرایط ساختگاه است [۱۵]. استفاده از آن دسته روابط کاهندگی که متعلق به منطقه‌ی مورد مطالعه نباشند می‌تواند موجب ارائه‌ی طیفی اشتباه و در نتیجه طراحی نادرست سازه شود. از آنجایی که هیچ‌یک از روابط موجود به صورت ویژه به بررسی شرایط استان مازندران در خصوص چگونگی کاهش امواج زلزله نپرداخته‌اند، در این تحقیق به صورت خاص از اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های استان مازندران استفاده شده است. همچنین مقایسه‌ای بین روابط کاهندگی موجود در منطقه‌ی البرز مرکزی در شرایط ساختگاه‌های مختلف و نیز شتاب‌های افقی و قائم انجام شد.

۲- بانک اطلاعاتی حرکت قوی زمین و پردازش داده‌ها

در این تحقیق از ۱۰۵ شتاب‌نگاشت متعلق به استان مازندران

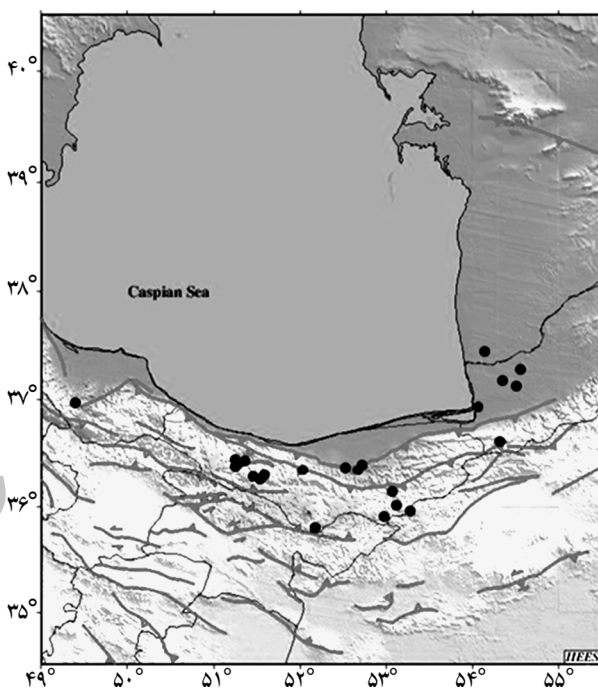
نوع خاک به دو قسمت بستر خاکی و بستر سنگی تقسیم کردند. زارع و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۹ یک رابطه‌ی کاهندگی برای فلات ایران ارائه کردند که در آن فلات ایران را به دو ناحیه‌ی البرز مرکزی و زاگرس تقسیم‌بندی کردند. آنها بستر را مانند زارع و همکاران [۵] از نظر نوع خاک به چهار ناحیه به صورت خاک نوع یک با سرعت موج برشی بیش از ۷۰۰ متر بر ثانیه، خاک نوع دو با سرعت موج برشی ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر بر ثانیه، خاک نوع سه با سرعت موج برشی ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر بر ثانیه، و خاک نوع چهار با سرعت موج برشی کمتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه تقسیم‌بندی کردند (منظور از سرعت موج برشی، سرعت در ۳۰ متر ابتدایی خاک می‌باشد). در مدل ارائه شده توسط خادمی [۶] خاک همانند آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران به چهار نوع I، II، III و IV تقسیم‌بندی شد. او در این تحقیق از ۱۵۰ رکورد استفاده کرد. نوروزی [۷] در سال ۲۰۰۵ رابطه‌ای پیشنهاد داد که در آن از سه تحلیل مختلف استفاده کرد. به این ترتیب در ابتدا رابطه را بدون در نظرگیری شرایط ساختگاه مدل‌سازی کرد و ضرایبی را ارائه داد. بار دوم با تقسیم‌بندی شرایط ساختگاه به دو نوع سنگ و خاک ضرایب جدیدی ارائه کرد و در نوبت سوم در مدل‌سازی شرایط ساختگاه را فقط در یک گروه جای داد. مهدویان [۸] از نظر لرزه‌خیزی ایران را به دو ناحیه‌ی زاگرس و بقیه‌ی مناطق تقسیم‌بندی کرده است. قدرتی امیری و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ مدل دیگری برای کشور ایران ارائه کردند. در این مدل پارامترهای بزرگ و فاصله به صورت مستقیم در مدل کاهندگی در نظر گرفته شدند. علاوه بر آن تأثیر نوع بستر و همچنین سازوکار گسل‌ها و شرایط تکتونیکی با تقسیم‌بندی داده‌ها در گروه‌های مختلف و به دست آوردن مدل‌ها برای هر گروه لحاظ گردیده است. مدل‌های به دست آمده برای نواحی زاگرس و همچنین البرز و ایران مرکزی برای شرایط مختلف ساختگاهی برای پارامترهای سرعت حداکثر و شتاب حداکثر مؤثر برای مؤلفه‌های افقی و قائم به دست آمده است. در سال ۲۰۱۲ صفاری و همکاران [۱۰] رابطه‌ای برای ایران ارائه کردند که هم قابل استفاده به صورت رابطه‌ی کاهندگی شتاب و هم

فاصله‌ی ۶ کیلومتری از منبع زلزله اتفاق افتاده است. تعداد ۳۴ شتاب‌نگاشت (۳۳ درصد) از شتاب‌نگاشت‌های گردآوری شده مربوط به بستر با سرعت موج برشی کمتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه می‌باشد که به نام خاک نام‌گذاری شده‌اند و ۷۱ شتاب‌نگاشت (۶۷ درصد) مربوط به بستر با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه و بیشتر است که به نام سنگ نام‌گذاری شده‌اند. شکل (۲) نمودارهایی از تعداد رکوردها را برحسب بزرگا و فاصله نشان می‌دهد.



شکل (۲): (الف) فراوانی زلزله‌ها در فواصل مختلف، (ب) فراوانی زلزله‌ها از نظر بزرگا و (پ) نمایش بزرگا در فواصل مختلف (محور افقی لگاریتمی است).

که در بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۶ جمع‌آوری شده‌اند استفاده گردید. همه‌ی این رکوردها در ایستگاه‌های استان مازندران ثبت شده‌اند اما محل رویداد برخی از زمین‌لرزه‌ها در خارج از این استان بوده است. شکل (۱) نقشه‌ی منطقه به همراه زلزله‌های انتخاب شده را نمایش می‌دهد. شتاب‌نگاشت‌ها از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که متولی جمع‌آوری شتاب‌نگاشت‌های کشور می‌باشد، گردآوری شده است.



شکل (۱): رخدادهای زمین‌لرزه در منطقه‌ی مورد مطالعه

برخی از رخدادهای زلزله تنها در یک ایستگاه به ثبت رسیدند که در نتیجه فقط یک رکورد از آنها در بانک داده‌ها موجود می‌باشد. به علت عدم اطمینان از صحت این رکوردها، چنین شتاب‌نگاشت‌هایی از کاتالوگ حذف گردیدند. بزرگ‌ترین زلزله‌ی موجود در کاتالوگ دارای بزرگای گشتاوری ۷/۲ ریشتر و کوچک‌ترین آن دارای بزرگای گشتاوری ۴ ریشتر بوده است. بزرگای گشتاوری کوچک‌تر از ۴ درجه به دلیل اهمیت کمترشان در امور مهندسی، از کاتالوگ حذف شدند. دورترین شتاب‌نگاشت در فاصله‌ی ۱۷۸ کیلومتر از مرکز زلزله قرار دارد. همچنین نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت موجود در کاتالوگ در

۳- اصلاح ضرایب روابط کاهندگی موجود

پس از جمع آوری داده‌های شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز برای تحقیق و اصلاح آنها نوبت به تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS رسید. برای این کار مدل ارائه شده توسط محققین مختلف در نرم‌افزار SPSS با استفاده از داده‌های جمع آوری شده‌ی مربوط به استان مازندران به صورت مجدد بازنویسی و مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از معرفی داده‌های لرزه‌ای استان مازندران به نرم‌افزار مذکور از رگرسیون غیرخطی استفاده شد. بدین صورت که حداکثر شتاب هر شتاب‌نگاشت به عنوان متغیر وابسته و مقادیر بزرگ و فاصله به عنوان دو متغیر مستقل به نرم‌افزار معرفی شدند. سپس همه‌ی مدل‌هایی که بحث شدند مورد تحلیل قرار گرفته و ضرایب پیشنهادی توسط نرم‌افزار به عنوان ضرایب جدید مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه به بررسی ضرایب ارائه شده توسط محققین و ضرایب به دست آمده با استفاده از مدل ریاضیاتی همین محققین برای شتاب‌نگاشت‌های استان مازندران می‌پردازیم.

۳-۱- نوری [۷]

در سال ۲۰۰۵ نوری اقدام به ارائه‌ی رابطه‌ی کاهندگی برای فلات ایران کرد. او برای این کار از ۱۷۸ رکورد که بارد و همکاران [۱۸] آنها را تدوین کردند استفاده کرد. ۱۱۷ رکورد از آن جدول مربوط به ساختگاه سنگی، ۵۲ رکورد مربوط به ساختگاه رسوبی، ۷۰ رکورد مربوط به ساختگاه شنی و ماسه‌ای و ۳۹ رکورد نیز مربوط به ساختگاه با خاک‌های نرم می‌شوند؛ اما به نظر نویسنده چنین تقسیم‌بندی برای انجام تحلیل‌ها کافی نبودند؛ بنابراین وی سه تحلیل مستقل از هم انجام داد. در اولین تحلیل، وضعیت ساختگاه در نظر گرفته نشد. در دومین تحلیل گروه‌های ۱ و ۲ با هم ادغام و به عنوان سنگ در نظر گرفته شدند و گروه‌های ۳ و ۴ نیز پس از ادغام به نام خاک نام گذاری شدند که این کار با ایده‌ی کمپیل و بزرگ‌نیا [۱۹] همخوانی بیشتری دارد. در سومین تحلیل هم همه‌ی گروه‌ها با هم در یک تحلیل قرار گرفتند و نتایج حاصل از آن اعلام شد.

اگرچه شتاب‌نگاشت‌های حرکت قوی زمین، زمین‌شناسان و مهندسان را نسبت به طبیعت لرزش زمین در زمین‌لرزه‌ها آگاه می‌کنند، اما اطلاعاتی که از این شتاب‌نگاشت‌ها استخراج می‌شوند محدود هستند زیرا به علت نوفه‌های موجود در شتاب‌نگاشت‌ها هیچ وقت نمی‌توان ادعا کرد که شتاب‌نگاشت‌ها تعریف دقیقی از حرکت زمین ارائه می‌دهند [۱۶]. داده‌های خام حاصل از دستگاه‌های ثبت حرکات زمین دارای خطاهایی هستند که بایستی منابع ایجاد خطا و میزان آن با دقت ارزیابی شده و تصحیحات لازم بر روی آنها صورت گیرد تا داده‌های تصحیح شده‌ی حاصل را بتوان در تحلیل سازه‌ها به کار برد؛ اما تصحیح رکوردها بر روی حداکثر شتاب یک شتاب‌نگاشت تأثیر چندانی ندارد؛ زیرا تأثیر وجود نوفه در شتاب‌نگاشت، تنها زمانی مشخص می‌شود که به منظور به دست آوردن تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی، از سری زمانی شتاب انتگرال گرفته شود [۱۶].

در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌ها، گاهی با مشکلی به نام انحراف از خط مبنا روبرو می‌شویم. در این پژوهش قبل از فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌ها، این انحراف تصحیح گردید. تصحیح خط مبنا در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار سائزموسینگنال (SeismoSignal) انجام شد.

همچنین یکی از مهم‌ترین خطاهای وارد شده در شتاب‌نگاشت‌ها خطاهای فرکانس‌های بالا و پایین هستند [۱۷] که جهت حذف آنها لازم است شتاب‌نگاشت‌ها در یک باند فرکانسی معین از فیلترهای خاص عبور داده شوند. برخی از شتاب‌نگاشت‌های موجود در کاتالوگ تهیه شده، توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی فیلتر شده‌اند و مقدار بیشینه شتاب تصحیح شده آنها در سایت این مرکز موجود می‌باشد که از همان مقادیر در این تحقیق استفاده شد. برای شتاب‌نگاشت‌هایی که فیلتر نشده بودند بر حسب مورد بسته به نوع دستگاه ثبت رکورد و نوع خاک محدوده‌ی فرکانسی مناسب انتخاب شد. فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌ها در محدوده‌های فرکانسی مطلوب نیز با استفاده از نرم‌افزار سائزموسینگنال انجام پذیرفت.

$$Iny = C_1 + C_2 M + C_3 \ln[R + C_4 \exp[M]] + C_5 R + \sigma_{Iny} \quad (3)$$

PGA در مقاله‌ی قدرتی با y نشان داده شده است و واحد آن برحسب $\frac{cm}{s^2}$ می‌باشد. در این مدل پارامترهای بزرگا و فاصله به صورت مستقیم در مدل کاهندگی در نظر گرفته شدند. همچنین تأثیر نوع بستر و همچنین سازوکار گسل‌ها و شرایط تکتونیکی با تقسیم‌بندی داده‌ها در گروه‌های مختلف و به دست آوردن مدل‌ها برای هر گروه لحاظ گردیده است. مدل‌های به دست آمده برای نواحی زاگرس و همچنین البرز و ایران مرکزی برای شرایط مختلف ساختمانی و برای مؤلفه‌های افقی و قائم به دست آمده است. برای مؤلفه‌های افقی حداکثر دو مؤلفه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل از داده‌هایی با فاصله‌ی کانونی $4/5 < Ms < 7/5$ و بزرگا بر اساس موج سطحی $5 < R < 15$ استفاده شده است. در این مدل شرایط ساختمانی با سرعت موج برشی بیشتر یا مساوی ۳۷۵ متر بر ثانیه سنگ و شرایط ساختمانی با سرعت موج برشی کمتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه خاک فرض شده است. ضرایب قدرتی امیری برای کاهش شتاب افقی و قائم زلزله برای منطقه البرز در جدول (۳) آورده شده است:

جدول (۳): ضرایب ارائه شده توسط قدرتی امیری [۹]

σ	C_3	C_2	C_1	
۰/۵۳	-۱/۰۳	۰/۷۳۲	۳/۰۳	قائم خاک
۰/۴۹	-۰/۹۹۶	۰/۶۳۵	۳/۴۶	قائم سنگ
۰/۴۹۶	-۰/۹۵	۰/۶۷۸	۳/۶۵	افقی خاک
۰/۴۸۷	-۰/۹۶	۰/۶۲۳	۴/۱۵	افقی سنگ

ضرایب به دست آمده از اصلاح مدل قدرتی امیری بعد از تحلیل‌ها در جدول (۴) آورده شده‌اند.

جدول (۴): ضرایب به دست آمده از مدل قدرتی امیری

C_3	C_2	C_1	
-۰/۵۷۵	۰/۶۵۹	۱/۳۰۴	قائم خاک
-۱/۵۳۹	۱/۱۶۱	۲/۱۳۳	قائم سنگ
-۰/۷۵۹	۱/۲۲	-۰/۵۲	افقی خاک
-۱/۰۲۳	۰/۸۸۹	۲/۵۹۶	افقی سنگ

حاصل تحلیل دوم از کار نوروزی با کار نویسندگان این مقاله همخوانی داشته بنابراین دومین تحلیل از کار نوروزی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس رابطه (۲) توسط نوروزی ارائه شد.

$$\ln(PGH, V) = C_1 + C_2^*(Mw - 6) + C_3^* \ln(\sqrt{EPD^2 + 10^2}) + C_4^* S \quad (2)$$

معادله (۲) حداکثر شتاب افقی (PGH) و قائم (PGV) را معرفی می‌کند که واحدها برحسب $\frac{cm}{s^2}$ است. در این معادله منظور از Mw بزرگای گشتاوری می‌باشد و همچنین EPD برای نمایش فاصله‌ی رومرکزی تعریف شده است. در این معادله اگر ساختمانی در بستر خاکی واقع شده باشد $S=1$ و اگر در بستر سنگی واقع شده باشد $S=0$ خواهد بود. مقادیر C_1 تا C_4 ضرایب ثابت رابطه‌ی کاهندگی ارائه شده توسط نوروزی هستند که در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول (۱): ضرایب ارائه شده توسط نوروزی برای فلات ایران [۲]

C_4	C_3	C_2	C_1	
۰/۲۱۴	-۱/۱۰۱	۱/۲۳۱	۷/۴۱۶	قائم خاک
۰	-۱/۱۰۱	۱/۲۳۱	۷/۴۱۶	قائم سنگ
۰/۴۱۴	-۱/۱۴۲	۱/۲۵۵	۸/۲۸۳	افقی خاک
۰	-۱/۱۴۲	۱/۲۵۵	۸/۲۸۳	افقی سنگ

پس از تحلیل‌های انجام شده با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای استان مازندران ضرایب ثابت جدیدی برای این منطقه به دست آمدند که نتایج آن در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول (۲): ضرایب به دست آمده با استفاده از مدل نوروزی

C_4	C_3	C_2	C_1	
۰	-۰/۵۹۵	۰/۶۵۳	۵/۳۶	قائم خاک
۰	-۱/۹۲۵	۱/۰۲۲	۱۰/۵۷	قائم سنگ
۰	-۰/۷۷۱	۱/۱۹۷	۶/۸۸	افقی خاک
۰	-۱/۱۹	۰/۸۴۳	۸/۶۳۳	افقی سنگ

۳-۲- قدرتی امیری و همکاران [۹]

قدرتی امیری و همکاران [۹] نیز بعد از تحقیقات فراوان معادله (۳) را به عنوان مدل کاهندگی برای ایران ارائه کردند.

۳-۳- صفاری و همکاران [۱۰]
جدول (۵): ضرایب ارائه شده توسط صفاری و همکاران [۱۰]

g	f	c_3	c_2	c_1	d	b	a	حداکثر شتاب
۰/۰۲	۰/۰۳	۱/۵۳	۱/۳۵	۱/۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴۵	۰/۳۸	

پس از بررسی‌های انجام شده، ضرایب پیشنهادی برای مدل صفاری برای منطقه‌ی مازندران در جدول (۶) آورده شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که تحقیق حاضر مربوط به استان مازندران می‌باشد (ناحیه البرز) در معادله (۵) گسلس به صورت معکوس فرض شده است. همچنین در این تحقیق ترم مربوط به اشباع‌شدگی در مناطق حوزه‌ی نزدیک در نظر گرفته نشده است.

جدول (۶): ضرایب به‌دست آمده با استفاده از مدل صفاری و همکاران [۱۰]

c	b	a	
۱	-۰/۰۰۳	۰/۳۰۹	قائم خاک
۰/۵۹۲	۰/۰۰۶	۰/۴۷۱	قائم سنگ
۰/۱۷	-۰/۰۰۲	۰/۵۱۲	افقی خاک
۱/۱۱	۰/۰۰۰۲	۰/۳۸۵	افقی سنگ

۳-۴- سقراط و ضیایی فر [۱۱]

سقراط و ضیایی فر در سال ۲۰۱۶ دو رابطه‌ی کاهندگی را برای مناطق لرزه‌ای آذربایجان- البرز و کپه‌داغ که توسط میرزایی و همکاران [۲۰] معرفی شده بود ارائه کردند. آنها شرایط بستر را همانند آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران به چهار نوع خاک تقسیم‌بندی کردند. همچنین در بانک اطلاعات داده‌های لرزه‌ای آنها ۳۲۵ رکورد زلزله مربوط به ۵۵ زلزله موجود بوده است. شایان ذکر است که رابطه‌ی آنها هم به صورت PGA و هم به صورت رابطه‌ی کاهندگی طیفی می‌باشد که با ضرایبی از هم متمایز شده‌اند. در تحقیق حاضر از مدل ۱ ارائه شده توسط سقراط و ضیایی فر استفاده شد. مدل ارائه شده توسط آنها به صورت معادله (۶) می‌باشد.

$$\log_{10}(Y) = b_1 + b_2 M_w + b_3 M_w^2 + (b_4 + b_5 M_w) \times \log_{10} \sqrt{R^2 + b_6^2} + S_i + f_s F_S + f_{rv} F_{RV} + f_{uu} F_U \quad (6)$$

در معادله (۶) منظور از Y متغیر پاسخ است که می‌تواند PGA یا طیف شتاب یکنواخت (PSA) بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه

صفاری و همکاران در سال ۲۰۱۲ اقدام به ارائه‌ی رابطه‌ی برای پیش‌بینی حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت زمین و طیف شتاب مختص کشور ایران کردند. کاتالوگ زلزله‌های آنها شامل ۳۵۱ رکورد از ۷۸ زلزله‌ای که دارای بزرگای ممانی بیشتر از ۵ هستند و در بین سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۹ ثبت شده‌اند، می‌باشد. در کاتالوگ آنها فواصل رکوردها تا منبع زلزله بین ۴ تا ۱۹۰ کیلومتر می‌باشد. دو تصحیح شامل اصلاح خط مبنا و فیلتر شتاب‌نگاشت بر روی رکوردهای آنها انجام پذیرفت. محدوده‌ای که آنها برای باند فرکانسی میان‌گذر انتخاب کردند بسته به نوع دستگاه (آنالوگ یا دیجیتال بودن) بین ۰/۲ هرتز تا ۲۰ هرتز می‌باشد. آنها نوع بستر را همانند آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران به چهار قسمت تقسیم‌بندی کردند؛ اما از آنجایی که هیچ رکوردی با سرعت موج برشی کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه (خاک نوع IV) در کاتالوگ موجود نبود، طبقه‌بندی خاک برای سه نوع خاک صورت گرفت.

مدل ارائه شده توسط آنها در معادله (۵) آورده شده است. در معادله (۵) منظور از A پارامتر حرکت زمین، M_w بزرگای ممانی، X فاصله منبع زلزله تا ایستگاه، g ، f ، d ، c ، b ، a ، ضرایب تحلیل رگرسیون هستند. c_1 ، c_2 و c_3 به ترتیب ضرایبی برای بسترهای نوع I و II و III هستند. ضریب f برای در نظرگیری سازوکار گسلس است. زمانی که سازوکار گسلس معکوس باشد، $F=0$ و در صورت شیب لغز بودن گسل، $F=1$ در نظر گرفته می‌شود. ضریب g نیز ضریبی برای ایالت لرزه‌ای است. در منطقه البرز و ایران مرکزی $Z=0$ و در ناحیه زاگرس $Z=1$ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر $d \times 10^{e.M}$ ، برای در نظرگیری اشباع‌شدگی حرکت زمین در مناطق حوزه نزدیک استفاده شده است. ضرایب محاسبه شده در تحقیق آنها در جدول (۵) آورده شده است.

$$\log A(T) = a(T) \cdot M_w - b(T) \cdot X - \log(X + d(T) \cdot 10^{e(T) \cdot M_w}) + \sum_{i=1}^3 c_i(T) \cdot \delta_i + f \cdot F + g \cdot Z \quad (5)$$

جدول (۸): ضرایب به‌دست آمده توسط مدل سقراط و ضیایی فر

b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	
۰/۴۵۶	۰/۱۴۵	-۱/۴۱۸	-۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۶۵۸	قائم خاک
۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۴	-۱/۵۶۷	۰/۱۳۹	-۱/۰۳۱	۵	قائم سنگ
۰/۵۲	۰/۱۳۲	-۱/۵۶۷	-۰/۱۰۳	۱/۶۰۷	-۲/۹۴۷	افقی خاک
۰/۰۸۱	-۰/۱۵۸	-۰/۱	-۰/۰۸۸	۱/۵۴۴	-۲/۵۸۹	افقی سنگ

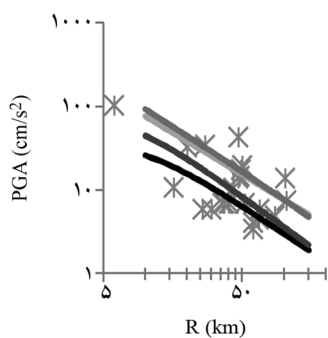
شکل‌های (۳) و (۴) نمایانگر توزیع داده‌ها و ضریبی که قبلاً توسط محققین پیشنهاد شد به ترتیب برای زلزله‌هایی با بزرگای ۵ و ۶ می‌باشند. همچنین شکل‌های (۵) و (۶) توزیع داده‌ها و ضرایب به‌دست آمده در این تحقیق را برای زلزله‌هایی با بزرگای ۵ و ۶ نمایش می‌دهند. هدف از ترسیم این چهار شکل بررسی داده‌های منطقه با ضرایب قبلی و جدید است. همان‌گونه که از شکل‌های (۵) و (۶) مشخص است، توزیع داده‌ها با خطوط برازش همخوانی دارد.

باشد. R متغیری برای تعریف فاصله و b_1 تا b_6 ضرایب رگرسیون هستند. نوع بستر برای بسترهای نوع ۱ تا ۴ به ترتیب با S_1 تا S_4 معرفی می‌گردند. پارامترهای f_s ، f_{rv} و f_{uu} برای در نظرگیری سازوکار گسلش می‌باشند. این پارامترها برای گسل شیب‌لغز به صورت $f_{rv} = f_{uu} = 0$ و $f_s = 1$ ، برای گسل معکوس $f_{rv} = f_{uu} = 0$ و $f_s = 1$ و برای گسلی که سازوکار گسلش مشخص نباشد به صورت $f_{rv} = f_{uu} = 0$ و $f_s = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

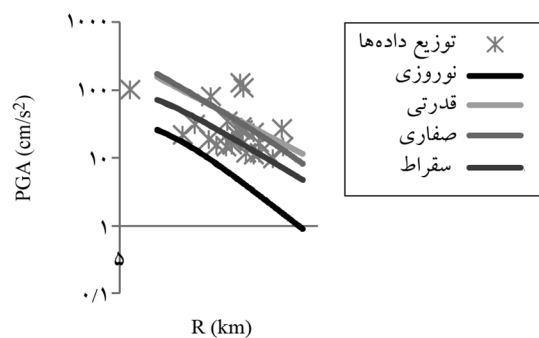
همچنین ضرایب پیشنهاد شده توسط این محققین در جدول (۷) آورده شده است. در این تحقیق پس از تحلیل‌های انجام شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای استان مازندران و مدل سقراط و ضیایی فر [۱۱]، ضرایب جدید در جدول (۸) گردآوری شدند.

جدول (۷): ضرایب ارائه شده توسط سقراط و ضیایی فر [۱۱]

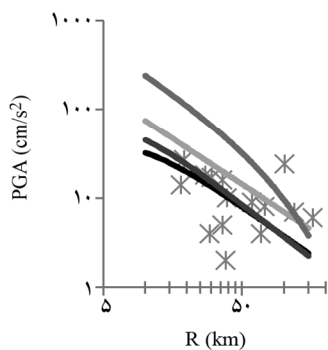
f_{uu}	f_{rv}	f_s	s_4	s_3	s_2	s_1	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	
-۰/۰۰۸	-۰/۱۲	-۰/۱۴	-۰/۰۲۱	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۲۵	۷/۵	۰/۰۶	-۱/۴۱	-۰/۱۳	۱/۶۹	-۲/۲۴	شتاب افقی
۰/۵۹۴	۰/۵۲۳	۰/۵۲۷	۰/۳۸۲	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۷	۷/۵	۰/۱۱	-۱/۷۳	-۰/۰۵	۰/۶۳۹	-۰/۳۶	شتاب قائم



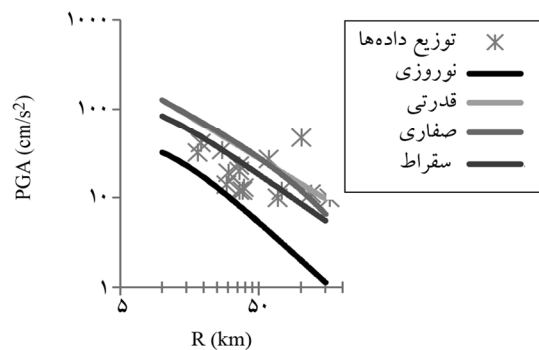
(ب) شتاب قائم در بستر سنگی



(الف) شتاب افقی در بستر سنگی

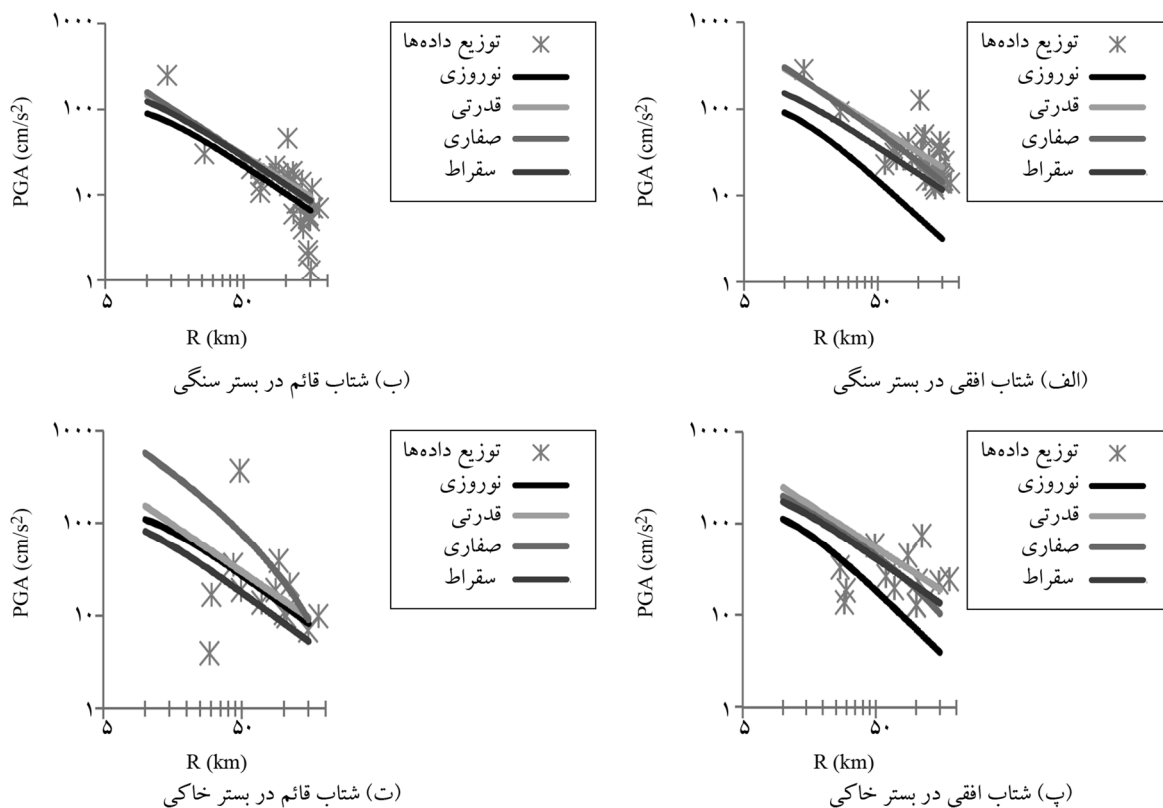


(ت) شتاب قائم در بستر خاکی

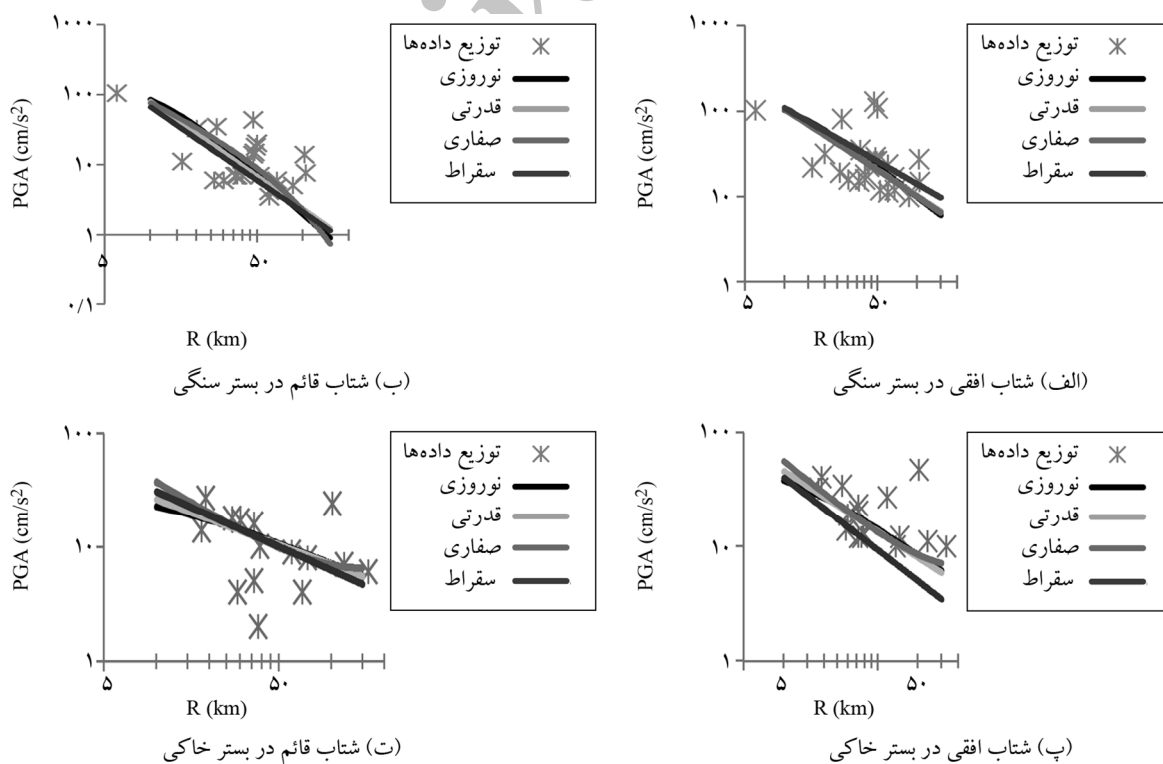


(پ) شتاب افقی در بستر خاکی

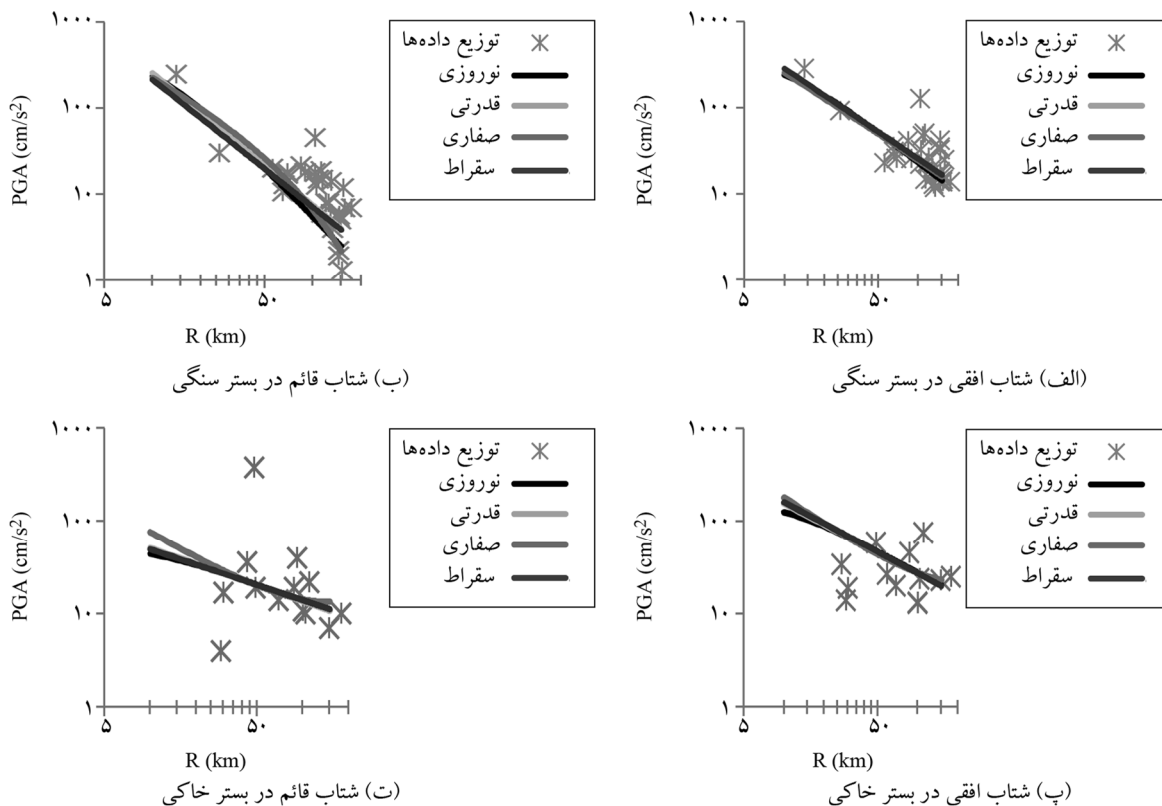
شکل (۳): توزیع داده‌ها و ضرایب قبلی برای زلزله‌ی ۵ ریشتر



شکل (۴): توزیع داده‌ها و ضرایب قبلی برای زلزله‌ی ۶ ریشتر



شکل (۵): توزیع داده‌ها و ضرایب جدید به‌دست آمده برای زلزله‌ی ۵ ریشتر



شکل (۶): توزیع داده‌ها و ضرایب جدید به دست آمده برای زلزله‌ی ۶ ریشتر

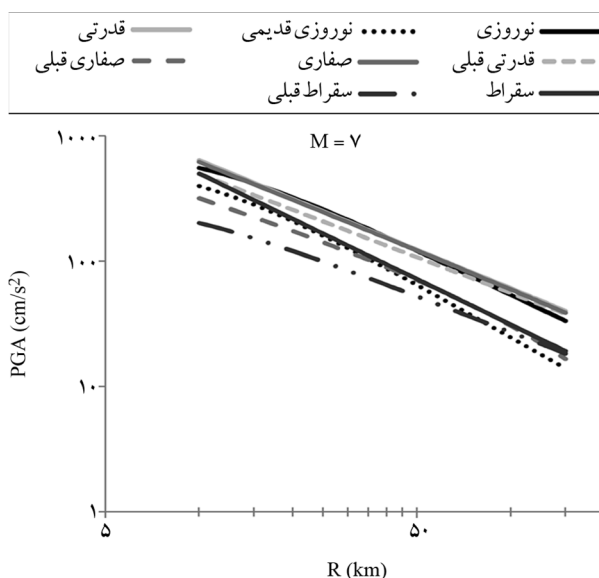
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق در مجموع از ۱۰۵ شتاب‌نگاشت ثبت شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استفاده گردید. بعد از فیلتر کردن شتاب‌نگاشت‌های مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار سائزموسیگنال، بیشینه شتاب ثبت شده‌ی هر شتاب‌نگاشت برای انجام رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار SPSS مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقادیر جدیدی برای ضرایب ثابت هر رابطه‌ی کاهندگی محاسبه گردید. با توجه به اهمیت انحراف معیار در روابط کاهندگی، روابط ارائه شده در این تحقیق برای کاربرد در تحلیل خطر زلزله نیاز به انحراف معیار دارند که در تحقیقات آتی به دست خواهند آمد.

سپاسگزاری

در پایان از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به علت در اختیار قرار دادن رکوردهای شتاب‌نگاری و همچنین از داوران محترم به علت پیشنهادهای مفید و مثمر ثمر در راستای بهبود کیفیت مقاله، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

در شکل (۷) نیز مقایسه‌ای بین ضرایب جدید و قدیمی مدل‌های کاهندگی مورد مطالعه انجام شد. این شکل برای امواج افقی در بستر سنگی و برای زلزله‌ای با بزرگای گشتاوری ۷ رسم شده است.



مراجع

11. Soghrat, M.R. and Ziyaeifar, M. (2016) Ground motion prediction equations for horizontal and vertical components of acceleration in Northern Iran. *Journal of Seismology*, 10.1007/s10950-0169586-4.
12. Zaré, M. (1999) *Study on Strong Ground Motion in Iran from Catalogue to Attenuation Relationships*. Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
13. 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.
14. 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. *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(1), 1-29.
15. Ambraseys, N.N. and Boomer, J.J. (1991) The attenuation of ground acceleration in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **20**(12), 1179-1202.
16. Boor, D.M. and Bommer, J.J. (2005) Processing of strong-motion accelerograms: needs, option and consequences. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **25**, 93-115.
17. Akkar, S. and Bommer, J.J. (2006) Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **35**, 1145-1165.
18. Bard, P.Y., Zare, M., and Ghafory-Ashtiany, M. (1998) The Iranian acceleration data bank: a revision and data correction. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **1**(1), 1-22.
19. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2003) Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(1), 314-331.
20. Mirzaei, N., Mengtan, G., and Yuntai, C. (1998) Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. *Journal of Earthquake Predict Research*, **7**, 465-495.
1. Sinaiean, F. (2006) *Study on Iran Strong Motion Records*. Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
2. Sedaghati, F., Ansari, A., and Farjoodi, J. (2010) Presentation attenuation relationships using logical fuzzy theory and a comparison with usual relations for Iran plateau. *Fifth National Congress of Civil Engineering*, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran (in Persian).
3. Ramazi, H.R. and Schenk, V. (1994) Preliminary results obtained from strong ground motion analyses of Iranian earthquakes, *Proceedings of the XXIV General Assembly of the ESC, Vol. III*.
4. Zare, M., Ghafory-Ashtiany, M., and Bard, P. (1999) Attenuation law for the strong motions in Iran. *Proceedings of the Third International Conf on Seismology and Earthquake Engineering*.
5. Zare, M., Bard, P., and Ghafory-Ashtiany, M. (1999) Site characterization for the Iranian Strong Motion Network. *Soil Dynamics and Engineering*, **18**(18), 101-123.
6. Khademi, M.H. (2002) Attenuation of peak and spectral acceleration in the Persian plateau. *Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering*.
7. Nowroozi, A.A. (2005) Attenuation relations for peak horizontal and vertical accelerations of earthquake ground motion in Iran: A preliminary analysis. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **7**(2), 109-128.
8. Mahdavian, A. (2006) Empirical evaluation of attenuation relations of peak ground acceleration in the Zagros and central Iran. *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.
9. Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A., and Manouchehri, D. (2007) Attenuation relationship for Iran. *Earthquake Engineering*, **11**, 469-492.
10. 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.