



برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو در گستره کرمانشاه و پیرامون

زهره شیخ حسینی^۱، نوربخش میرزائی^۲، رضا حیدری^{۱*} و حامد منکرسی^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲- مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: r.heidari61@gmail.com

چکیده

برای ارزیابی بیشینه شتاب جنبش‌زمین در حوزه زمان و نیز حوزه بسامد در گستره کرمانشاه، برآورد احتمالاتی با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و به‌کارگیری مدل ۷ خوشه‌ای تعیین شده برای چشمه زمین‌لرزه با ترکیب خوشه‌بندی K-means وزن‌دار و بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، انجام شده است. مقادیر بیشینه شتاب جنبش‌زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) در دوره‌های ۰/۲ و ۲ ثانیه و میرایی ۵٪، برای دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۶۳٪ و ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) برای گستره ۴۶ تا ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۴ تا ۳۶ درجه عرض شمالی، که از زلزله‌خیزترین بخش‌های زاگرس است، محاسبه شده است. برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، بیشینه شتاب جنبش‌زمین معادل $0.31g$ برای ازگله، میان‌راهان، حمیل، نهاوند، مریوان و بیجار به‌دست آمده است. همچنین، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در شهر کرمانشاه، مقادیر $SA=0.05$ ، $PGA=0.15g$ در $SA=0.05$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0.05$ در دوره ۲ ثانیه است. نتایج، با نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم) و پژوهش‌های پیشین، مقایسه شده است.

واژگان کلیدی

برآورد خطر زمین‌لرزه
شبیه‌سازی مونت‌کارلو
خوشه‌بندی K-means
بهینه‌سازی توده ذرات
زاگرس

رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو را بررسی و بیان کرد که مهمترین مزیت روش مونت‌کارلو، یکپارچه‌سازی عدم قطعیت پارامترهای مورد نیاز برای برآورد خطر زمین‌لرزه است. (Han and Choy, 2008) الگوریتمی تقریباً مشابه با الگوریتم (Ibel and Kafka, 1999) برای تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارائه کردند. تفاوت اصلی الگوریتم هان و چوی با الگوریتم ایبل و کافکا در نحوه تولید فهرست مصنوعی است. در این روش، ابتدا تابع توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها بدست آمده و پس از هموارسازی این تابع توزیع، مکان رویدادها بصورت تصادفی تولید و بزرگی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از رابطه بازگشتی گوتنبرگ-ریشر ایجاد می‌شوند. آن‌ها با استفاده از این روش برای شهر سئول، که به دلیل کمبود داده‌های زمین‌لرزه‌ای، محاسبات تحلیل خطر با مشکل مواجه بود، طیف خطر زمین‌لرزه را تهیه کردند. ودریل و برتون (Veredbi and Brantun, 2010) چشمه‌های زمین‌لرزه را از طریق خوشه‌بندی رویدادهای زمین‌لرزه با روش K-means تعیین کردند و با شبیه‌سازی مونت‌کارلو برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه برای منطقه اژه را انجام دادند. آساتوریانس و اتکینسون (Asatourian and Aitcinson 2013) برنامه EqHaz را برای تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه به روش مونت‌کارلو ارائه دادند. این برنامه برای بهینه‌سازی سرعت محاسبات و انعطاف‌پذیری و به‌کارگیری در مناطق با لرزه‌خیزی متوسط طراحی شده است. انصاری و همکاران (Ansari., et al., 2015) یک روش خوشه‌بندی فازی را بر اساس ترکیبی از دو الگوریتم Gath-Giva و C-means برای خوشه‌بندی داده‌های زمین‌لرزه‌ای به‌کار گرفتند و مدل احتمالی از چشمه‌های زمین‌لرزه‌ای و تابع چگالی احتمال از مکان زمین‌لرزه‌ها ارائه دادند. آنها، همچنین، با شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر اساس الگوریتم ایبل و کافکا تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه را برای شهر تبریز انجام دادند.

در این پژوهش، برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت‌کارلو، بر مبنای رویکرد ایبل و کافکا، برای گستره ۴۶ تا ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۴ تا ۳۶ درجه عرض شمالی، که از دیدگاه زمین‌ساختی و زلزله‌خیزی از فعال‌ترین بخش‌های زاگرس است و در اثر جنبش گسل‌های صحنه و نه‌اوند، زمین‌لرزه‌های بزرگ ویرانگری را تجربه کرده است، مورد نظر است. در این راستا، از مدل ۷ خوشه‌ای به‌دست آمده از ترکیب خوشه‌بندی K-means وزن‌دار و بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، برای چشمه زمین‌لرزه استفاده شده است. تعداد بهینه خوشه‌ها با اعمال الگوریتم PSO-WK-means بر توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها و با توجه به شاخص‌های اعتبارسنجی به‌صورت خودکار تعیین و بر اساس آنها برآورد احتمالاتی خطر با شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است.

۲- فهرست زمین‌لرزه‌ها

برآورد خطر زمین‌لرزه تخمین بیشینه مقدار جنبش زمین در ساختگاه یا منطقه مورد نظر در پنجره زمانی مشخص است. نتایج برآورد خطر زمین‌لرزه از مهم‌ترین و پایه‌ای‌ترین داده‌ها در مهندسی زلزله برای محاسبه سطح مشخصی از خسارت و آسیب‌پذیری در طراحی سازه‌ها است؛ اما، وجود عدم قطعیت‌ها در تعیین پارامترهای مشخصه زمین‌لرزه، رابطه‌های تضعیف، پیش‌بینی زمان زمین‌لرزه‌های آینده، بزرگی، مسافت چشمه تا ساختگاه و موارد دیگر، باعث پیچیدگی محاسبات و لزوم ارائه روش‌های جدید شده است (Thenhaus, 2003). با توجه به اینکه در برآورد خطر زمین‌لرزه به روش‌های مرسوم قطعیتی و احتمالاتی، وجود عدم قطعیت در تعیین هندسه چشمه و پارامترهای لرزه‌خیزی اجتناب‌ناپذیر است، به تدریج شبیه‌سازی مونت‌کارلو به محاسبات تحلیل خطر زمین‌لرزه راه پیدا کرد. (Shapira, 1983., Johnson and koyangi, 1983) ساختار اولیه رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو را برای تحلیل خطر زمین‌لرزه معرفی کردند و نشان دادند که چگونه می‌توان از شبیه‌سازی فهرست زمین‌لرزه‌ها، برای تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لرزه استفاده کرد.

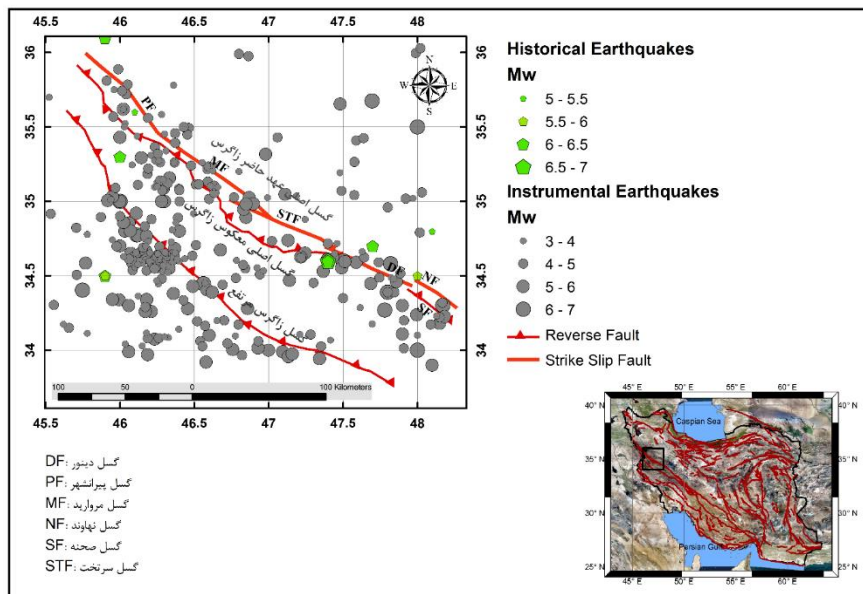
شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از چندین بار نمونه‌گیری تصادفی از یک فهرست زمین‌لرزه برای ایجاد فهرست مصنوعی استفاده می‌کند (یزدانی و همکاران، ۲۰۱۲) و اغلب برای شبیه‌سازی‌های سامانه‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی اغلب در مطالعه مسائلی که در آن تعداد درجات آزادی زیاد است و یا مسائلی که در آن‌ها عدم قطعیت زیادی در پارامترهای ورودی وجود داشته باشد، کاربرد دارد. روش‌های استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای برآورد خطر زمین‌لرزه به طور کلی دو نوع است: در روش اول فهرست مصنوعی زمین‌لرزه‌ها را می‌توان با نمونه‌برداری تصادفی از فهرست زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده تولید کرد؛ به این معنا که فهرست مصنوعی با استفاده از توزیع داده‌های مشاهده شده تهیه می‌شود و هر رویداد بیش از یکبار شانس انتخاب شدن را دارد (Ibel and Kafka, 1999). بنابراین، عدم قطعیت‌های مربوط به تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی (λ و β) کنترل می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌تواند از رابطه‌های بازگشتی گوتنبرگ-ریشر یا هر رابطه پارامتری که جنبش زمین را به عنوان تابعی از بزرگی، فاصله و دیگر متغیرها توصیف می‌کند، استفاده کند (Han and Choy, 2008).

تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت‌کارلو به خصوص در نواحی‌ای که دارای لرزه‌خیزی پایین هستند و تعیین مکان و هندسه چشمه‌های لرزه‌ها با دشواری همراه است و یا تعداد رویدادها به گونه‌ای است که تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی مشکل است، می‌تواند نتایج بهتری را نسبت به روش‌های مرسوم تحلیل خطر (احتمالاتی و قطعیتی) ارائه کند (Ibel and Kafka, 1999) و شفاف‌تر از روش (Kernl, 1968,).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.

موسوی‌بفروئی و همکاران (۲۰۱۴) برگرفته شده است و پارامترهای زمین‌لرزه‌های از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹، از پایگاه داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) و مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (ISC: International Seismological Center) برگرفته شده است. نقشه رومرکز زمین‌لرزه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای برآورد خطر زمین‌لرزه، تهیه فهرست کامل و قابل‌اعتماد زمین‌لرزه‌ها ضروری است. در این پژوهش، فهرست زمین‌لرزه‌های گسترده مورد مطالعه شامل ۵۰۰ رویداد تاریخی و دستگاهی از هزاره سوم قبل از میلاد تا سال ۲۰۱۹ است. زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی (زمین‌لرزه‌های دستگاهی با بزرگی $M_w \geq 2.5$) تا سال ۲۰۱۲ از فهرست زمین‌لرزه‌های



شکل ۱: نقشه گسل‌های اصلی و رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی (با بزرگی $M_w \geq 3$) تا سال ۲۰۱۹.

(Mirzaee and Gheytnchi., 2002). این کمربند زون گسترده‌ای از دگرشکلی فشاری ادامه‌دار است که کوتاه‌شدگی پی‌سنگ بر روی گسل-های نرمال جنبش معکوس‌یافته را تجربه می‌کند (Jackson., 1980; Barbarian., 1995; Moulnar and Chen., 1982). دو گسل اصلی در مرز شمال شرقی زاگرس قرار دارد: (۱) گسل اصلی معکوس زاگرس که با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی از غرب ایران تا شمال بندرعباس ادامه دارد، (۲) سامانه‌ای از گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد جوان در شمال شرقی زاگرس، که گسل اصلی عهد حاضر زاگرس (MRF) نامیده شده است (Chalnco and Brad., 1974). گسل اصلی عهد حاضر زاگرس با روند شمال غربی-جنوب شرقی، زون مرزی شمال شرقی زاگرس است که به طور گسترده‌ای موازی با گسل اصلی معکوس زاگرس و جوان‌تر از آن است. این ساختار لرزه‌زمین‌ساختی اصلی شامل چندین قطعه گسلی اصلی فعال مانند دورود، نهاوند، گارون، صحنه، مروارید و پیرانشهر، با سطوح مختلف لرزه‌خیزی است. فعالیت زمین‌لرزه‌ای شدیدتر در زاگرس در امتداد گسل اصلی عهد حاضر، بین ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض شمالی در قطعه‌های گسلی دورود، نهاوند و صحنه متمرکز شده است، درحالی‌که قطعه‌های مروارید و پیرانشهر به سمت شمال، سکون (آرامش) لرزه‌ای نسبی را نشان می‌دهند (چالنگو و براود، ۱۹۷۴؛ بربریان، ۱۹۹۵). بیشتر پژوهشگران (مانند بربریان، ۱۹۹۵؛ جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ جکسون

آستانه کامل بودن داده‌ها در دوره دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۹)، $M_c = 3.9$ ، با استفاده از بسته نرم‌افزاری ZMAP (Vimer, 2001) و روش Maximum Curvature (MAXC) (Viss et al., 1999; Vimer and Viss., 2000) محاسبه شده است. در این روش، افزودن ضریب تصحیح $+0.2$ به مقدار M_c محاسبه شده توسط (Viss et al., 1999) پیشنهاد شده است.

۳- جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل استان کرمانشاه و بخشی از استان کردستان است. این محدوده شامل بخش‌هایی از سه زون ساختاری اصلی سنندج-سیرجان، زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده است. کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا یکی از جوان‌ترین و فعال‌ترین مناطق برخورد قاره‌ای روی زمین است (Snider and Branzgi., 1986) که از کوه‌های توروس در جنوب شرقی ترکیه تا گسل میناب در شرق تنگه هرمز در جنوب ایران گسترش دارد

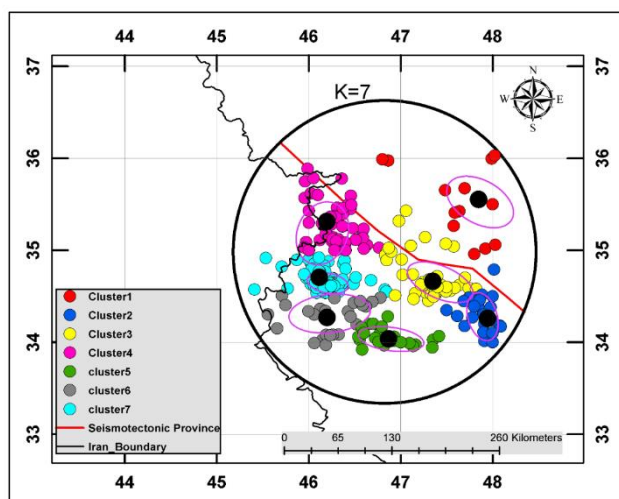
خوشه‌بندی تعیین کردند. آنها با ترکیب روش‌های خوشه‌بندی-K means وزن‌دار و بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) الگوریتمی ارائه دادند که با تحلیل داده‌های زمین لرزه‌ای، خوشه‌های بهینه سراسری را شناسایی و بر اساس خوشه‌های بدست آمده و لرزه‌زمین‌ساخت منطقه، چشمه‌های بالقوه زمین لرزه تعیین می‌شود. در واقع، با اعمال الگوریتم PSO-WK-means بر توزیع مکانی زمین لرزه‌ها، تعداد بهینه خوشه‌ها با توجه به شاخص‌های اعتبارسنجی به صورت خودکار تعیین می‌شود و داده‌ها را با کمترین دخالت کاربر خوشه‌بندی می‌کند. در منطقه مورد مطالعه، با توجه به اینکه زون لرزه‌زا در زاگرس حداکثر تا عمق ۲۰ کیلومتر گسترش دارد و امکان تفکیک دقیقتر به صورت جانبی وجود ندارد، با فرض ثابت بودن این عمق، تنها توزیع مکانی رومرکز زمین لرزه‌ها در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، از مدل ۷ خوشه‌ای برای چشمه بالقوه زمین لرزه که از اعمال الگوریتم PSO-WK-means و شاخص اعتبارسنجی دیویس-بولدین بر زمین لرزه‌های دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۹) با اعمال Mc به دست آمده، استفاده شده است. این مدل با توجه به به مقادیرهای بهینه شاخص‌های اعتبارسنجی دیویس-بولدین و اندازه‌گیری CS و میزان شباهت با تکنونیک منطقه انتخاب شده است (شکل ۲) و تطابق خوبی با لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه دارد (شیخ حسینی و همکاران، ۲۰۲۱).

و مکنزی، ۱۹۸۴) بر این باورند که گسل اصلی عهد حاضر زاگرس به سوی جنوب تا عرض 31 درجه گسترش دارد، اما، به نظر بیکر و همکاران (۱۹۹۳) نشانه‌هایی وجود دارد که ممکن است این گسل به سمت جنوب شرقی گسترش بیشتری داشته باشد.

۴- تعیین چشمه‌های بالقوه زمین لرزه با تحلیل خوشه‌بندی K-means وزن دار و بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)

تعیین چشمه‌های بالقوه زمین لرزه اولین گام در تحلیل خطر زمین لرزه است و تأثیر عمده‌ای در نتایج نهایی تحلیل خطر دارد. در روش‌های احتمالاتی و قطعیتی تحلیل خطر، چشمه‌های بالقوه زمین لرزه با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی، لرزه‌زمین‌ساختی، ژئودتیکی و ... توسط پژوهشگران تعیین می‌شوند و در مواردی مدل‌های خیلی متفاوت برای چشمه‌های یک منطقه خاص ارائه می‌شود. در واقع، یک رویکرد هماهنگ برای توسعه مدل چشمه بالقوه زمین لرزه موجود نیست، زیرا اطلاعات زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساختی موجود از منطقه‌ای به منطقه‌ای دیگر متفاوت است و در بسیاری از مناطق کره زمین مانند مناطق درون صفحه ای و کم‌زمین لرزه، این اطلاعات به اندازه کافی موجود نیست. شیخ حسینی و همکاران (۲۰۲۱) چشمه‌های بالقوه زمین لرزه را با روش



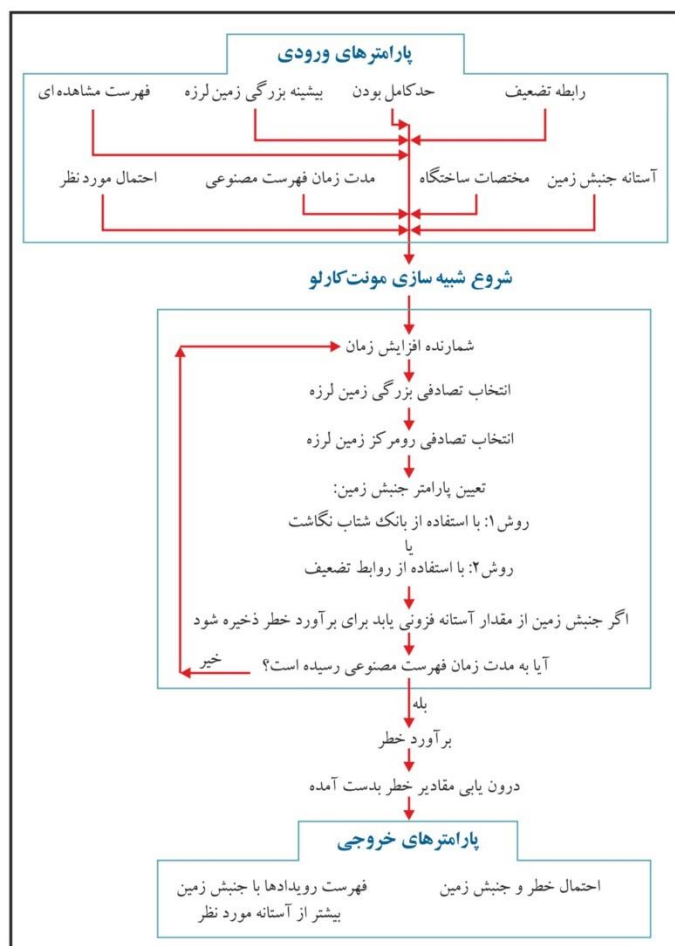
شکل ۲: خوشه‌های تعیین شده با الگوریتم PSO-WK-means برای زمین لرزه‌های دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۹) با اعمال Mc

در حدود دو دهه گذشته بر پایه داده‌های شتاب‌نگاری ایران، و همچنین، ترکیب داده‌های ایران با مناطق مشابه، چندین رابطه تضعیف جنبش زمین ارائه شده است. برای نمونه، نوروزی (۲۰۰۵) رابطه تضعیف را برای

۵- انتخاب رابطه تضعیف جنبش نیرومند

Attenuation) را در ایران، بررسی کرده‌اند. آن‌ها مدل‌های تضعیف بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، کمبل و بزرگنیا (۲۰۰۸) و چپو و یانگز (۲۰۰۸) را برای داده‌های شبکه شتاب‌نگاری ایران به کار بردند و در ارزیابی رابطه‌ها، برای رویدادهایی که سازوکار گسلش و سطح گسیختگی آن‌ها تعیین شده بود، نوع گسلش و فاصله ساختگاه از سطح گسیختگی را نیز در نظر گرفتند و نتایج حاصل را مقایسه کردند. بر اساس کار تحقیقاتی آن‌ها هر سه مدل تضعیف بدون شک می‌توانند در ایران به کار روند.

PGA، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۱۰)، زعفرانی و همکاران (۲۰۰۸)، زعفرانی و سقراط (۲۰۱۲) و سقراط و همکاران (۲۰۱۲) برای SA و PGA، همچنین، قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) برای SA، رابطه‌های طیفی را برای دو گروه سنگ و خاک ارائه کردند. در این تحقیقات، رابطه‌های تضعیف با در نظر گرفتن فاصله، بزرگی زمین‌لرزه، دوره طبیعی لایه خاک و جنس خاک تهیه شده است و از پارامترهایی مانند سازوکار گسلش صرف نظر شده است. شجاع طاهری و همکاران (۲۰۱۰) میزان کارایی مدل‌های تضعیف نسل جدید (Next Generation)



شکل ۳: روندنمای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو (ایبل و کافکا، ۱۹۹۹)

این پژوهش، با توجه به ژرفا و بازه بزرگی زمین‌لرزه‌های گسترده مورد مطالعه، از رابطه‌های تضعیف کمبل و بزرگنیا (۲۰۱۴) استفاده شده است.

۶- شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل احتمالاتی خطر زمین-

لرزه

کمبل و بزرگنیا (۲۰۱۴) رابطه‌های جدیدی ارائه کردند که قیدهای (constraint) بهتری را نسبت به رابطه‌های کمبل و بزرگنیا (۲۰۰۸) در مقیاس بزرگی و تضعیف زمین‌لرزه‌های کوچک فراهم می‌کنند. همچنین، این رابطه‌ها در برآورد جنبش افقی ناشی از زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای کم-عمق در قلمرو زمین‌ساختی فعال برای فاصله گسیخت ۰ تا ۳۰۰ کیلومتر و بزرگی‌های ۳/۳ تا ۷/۵-۸/۵، بسته به سازوکار چشمه، معتبر است. در

در این فهرست مصنوعی، توزیع زمانی زمین‌لرزه‌ها بر اساس میانگین تکرار زمانی هر زمین‌لرزه در هر بزرگی ممکن است. به این معنا که میانگین تکرار زمانی زمین‌لرزه‌ها در سال برای فهرست مصنوعی تعیین می‌شود و متقابلاً این تعداد میانگین تکرار زمانی زمین‌لرزه‌ها است. این میانگین تکرار زمانی زمین‌لرزه‌ها به عنوان افزایش زمانی رویدادها در فهرست مصنوعی در نظر گرفته می‌شود. اگر میانگین زمانی زمین‌لرزه‌ها Δt باشد، پس زمین‌لرزه n ام در فهرست مصنوعی در زمان $(n-1)\Delta t$ رخ می‌دهد.

۷- برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با بکارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو در کرمانشاه

الگوریتم محاسباتی مونت کارلو ایبل و کافکا (۱۹۹۹) یکی از بهترین الگوریتم‌ها برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو در برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه است. در این رویکرد، از کل فهرست مشاهده‌ای به صورت تصادفی نمونه‌برداری می‌شود و فرض بر این است که لرزه‌خیزی حداقل از لحاظ سازوکار گسلی و آهنگ کرنش یکنواخت است.

همانطور که در بخش ۴ ذکر شد، مدل ۷ خوشه‌ای (شیخ حسینی و همکاران، ۲۰۲۱) برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه در برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو به کار می‌رود. این مدل با اعمال الگوریتم خوشه‌بندی PSO-WK-means بر فهرست مشاهده‌ای تهیه شده است و با توجه به خوشه‌های ایجاد شده، فهرست زمین‌لرزه‌ها به زیرفهرست‌ها تقسیم می‌شود (برای توضیح بیشتر رجوع شود به شیخ حسینی و همکاران، ۲۰۲۱). تهیه فهرست مصنوعی از هر زیرفهرست این اطمینان را می‌دهد که فهرست مصنوعی ایجاد شده، تفاوت‌های لرزه-خیزی منطقه‌ای موجود در فهرست مشاهده‌ای را حفظ می‌کند. بنابراین، الگوریتم مونت کارلو برای هر خوشه (زیرفهرست) اعمال شده است. در این راستا، کد مورد نظر در محیط اکسل نوشته شده است و مراحل اجرای آن به صورت زیر است:

الف) تهیه فهرست مصنوعی با نمونه‌برداری تصادفی: برای هر یک از خوشه‌ها نمونه‌برداری تصادفی با جایگزینی انجام و فهرست مصنوعی برای هر خوشه تولید می‌شود، بدان معنا که در هر خوشه از رومرکز زمین‌لرزه (طول و عرض جغرافیایی) و بزرگی زمین‌لرزه بطور مجزا نمونه‌برداری تصادفی با جایگزینی انجام می‌شود. نمونه‌برداری تصادفی به دو صورت با جایگزینی و بدون جایگزینی انجام می‌شود. در نمونه‌برداری تصادفی با جایگزینی، هر عضو بیش از یکبار شانس انتخاب شدن را دارد، در صورتی که در نمونه‌برداری تصادفی بدون جایگزینی، هر عضو فقط یکبار شانس انتخاب شدن را دارد. در نمونه‌برداری تصادفی مکان زمین-

شبیه‌سازی مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از بیشمار نمونه-گیری تصادفی از فهرست زمین‌لرزه‌ها استفاده می‌کند و دقت نتایج به دو ویژگی مهم بستگی دارد؛ اول، انتخاب پارامترهای ورودی که باید کاملاً تصادفی باشد و دوم، ورودی‌ها باید به قدری زیاد باشند که بتوان به نتایج آن اتکا کرد. با توجه به اینکه در روش‌های مرسوم تحلیل خطر برای هر ناحیه، تعیین هندسه چشمه‌ها و پارامترهای لرزه‌خیزی با عدم قطعیت زیادی مواجه است، به تدریج شبیه‌سازی مونت کارلو به تحلیل خطر زمین‌لرزه راه پیدا کرد. ایبل و کافکا (۱۹۹۹) به بررسی کارآمدی روش مونت کارلو در تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه پرداختند و نشان دادند که این روش می‌تواند نتایج بهتری را نسبت به روش‌های مرسوم احتمالاتی، بویژه در نواحی با لرزه‌خیزی پایین، ارائه کند.

در اجرای الگوریتم ایبل و کافکا (شکل ۳)، ابتدا مدت زمانی برای فهرست مصنوعی در نظر گرفته می‌شود و یک شمارنده، زمان را افزایش می‌دهد و به دنبال آن رومرکز زمین‌لرزه را به صورت تصادفی از فهرست مشاهده‌ای انتخاب می‌کند. سپس، بزرگی زمین‌لرزه‌ها به صورت تصادفی از یک تابع توزیع تجمعی حاصل از رابطه بازگشتی گوتنبرگ-ریشتر یا از لرزه‌خیزی مشاهده شده در منطقه انتخاب می‌شوند. در گام بعد، فاصله رومرکز انتخاب شده تا ساختگاه محاسبه می‌شود تا برای تعیین میزان جنبش زمین (مانند شتاب) ناشی از هر رویداد در ساختگاه مورد نظر، با بکارگیری رابطه‌های تضعیف مناسب، استفاده شود. پس از محاسبه پارامتر جنبش زمین، وقتی زمان به انتهای مدت زمان فهرست مصنوعی رسید اجرای الگوریتم پایان می‌یابد و برآورد خطر با استفاده از معادله زیر انجام می‌شود (ایبل و کافکا، ۱۹۹۹).

$$p(a > a_0) = 1 - \exp\left(\frac{-T}{T_0} \sum_i H[a_i - a_0]\right). \quad (1)$$

$$(H[x] = 1 \text{ if } x \geq 0. \text{ and } 0 \text{ otherwise}).$$

که در آن، H تابع پله هویساید است و تعداد رویدادهایی را می‌شمارد که دارای شرط $a > a_0$ هستند و T_0 مدت زمان فهرست مصنوعی است.

پیاده‌سازی معادله ۱ در دنیای واقعی نیازمند این است که ساده‌سازی‌هایی در تولید فهرست مصنوعی انجام شود. نکته مهم این است که فهرست زمین‌لرزه بلندمدت (هزار تا ده‌ها هزارسال) برای تحلیل زمین-لرزه‌ای موردنیاز است. در واقع باید فهرست مصنوعی بلندمدت با نمونه-برداری از فهرست مشاهده‌ای با شبیه‌سازی مونت کارلو ساخته شود. در تولید فهرست مصنوعی فرض می‌شود که بزرگی و رومرکز رویدادها را می‌توان بطور مستقل از هم از یک فهرست مشاهده‌ای انتخاب کرد. وقتی که بزرگی و رومرکز بطور تصادفی از میان صدها رویداد در فهرست مشاهده‌ای انتخاب شوند، تقریباً همیشه بزرگی و فاصله از رویدادهای مختلفی می‌آیند.

جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با بکارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو

Cluster	N	M_{max}	a	b-value	σb
1	12	6.5	4.495	0.81	+0.23
2	25	7.5	4.067	0.64	+0.14
3	43	7	4.060	0.60	+0.09
4	51	7	5.546	0.98	+0.20
5	22	6.5	6.200	1.01	+0.07
6	28	6.5	4.318	0.73	+0.11
7	154	6.5	6.664	1.15	+0.09

لرزه، هر رومرکز (طول و عرض جغرافیایی) زمین‌لرزه با یک توزیع یکنواخت در محدوده خوشه موردنظر به صورت تصادفی ایجاد می‌شود.

برای نمونه‌برداری بزرگی می‌توان از تابع توزیع تجمعی که از رابطه بازگشتی گوتنبرگ-ریشتر (۱۹۴۴) به دست می‌آید نیز استفاده کرد:

$$f(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m-M_{min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{max}-M_{min})]} \quad (2)$$

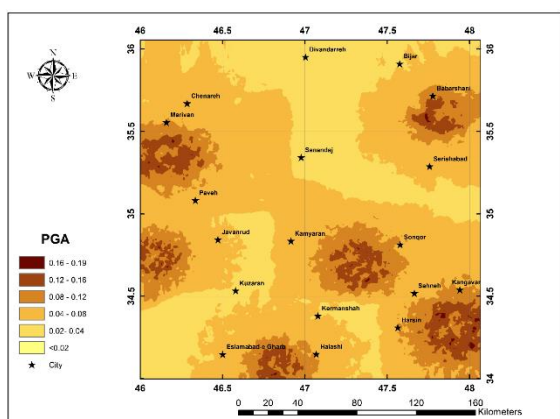
$$M_{min} \leq m \leq M_{max}$$

$$\beta = b \ln(10).$$

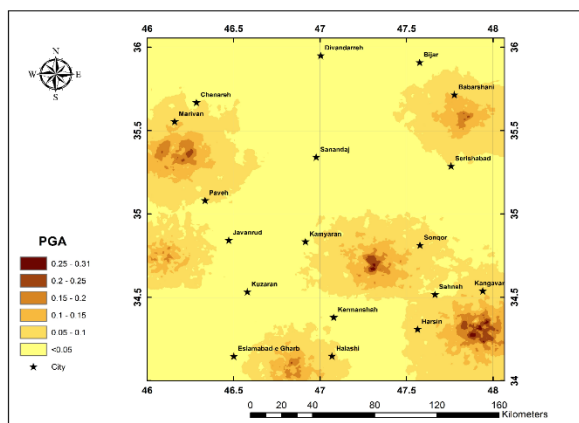
که در آن، M_{min} ، بزرگی آستانه و M_{max} ، بیشینه بزرگی زمین‌لرزه ممکن است. رابطه ۲ به طور گسترده در برآورد خطر زمین‌لرزه بکار می‌رود.

در اینجا، $M_{min} = M_c$ ، مقدار M_{max} برای هر خوشه با روش کیجکو (۲۰۰۴) و مقدار b برای هر خوشه با بسته نرم‌افزاری ZMAP محاسبه شده است. مقادیر برای هر خوشه در جدول ۱ آمده است.

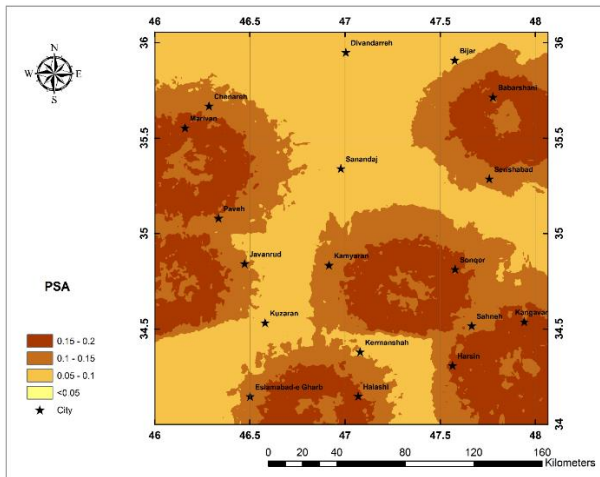
ب) استفاده از رابطه تضعیف و محاسبه مقدار جنبش نیرومند: از رابطه تضعیف کمبل و بزرگنیا (۲۰۱۴)، مقدار جنبش نیرومند برای کاتالوگ‌های مصنوعی محاسبه و با رابطه ۱ احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با شتاب بزرگتر از مقادیر فرضی a_0 ، در یک دوره زمانی T محاسبه شده است. مقادیر PGA و SA در دوره‌های ۰/۲ و ۲ ثانیه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۰/۶۳٪ و ۰/۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال)، برای میرایی ۵٪ محاسبه شده و بر اساس نتایج، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تهیه شده است (شکل‌های ۴ تا ۹).



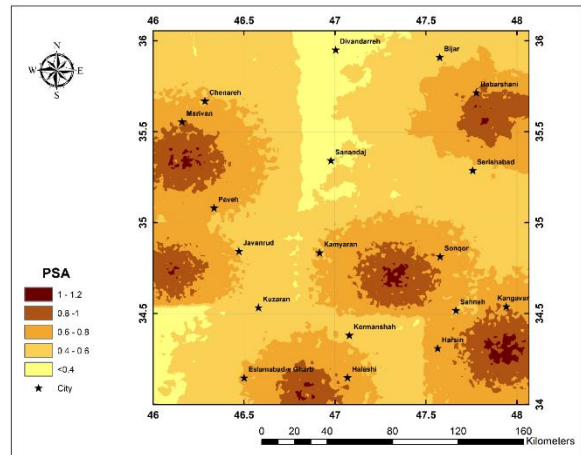
شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین بر حسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۰/۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



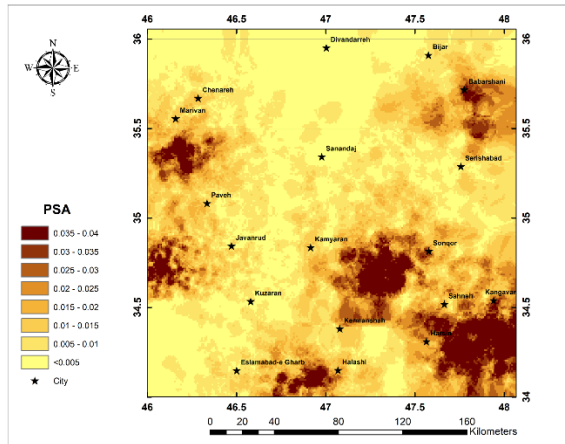
شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین بر حسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۰/۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



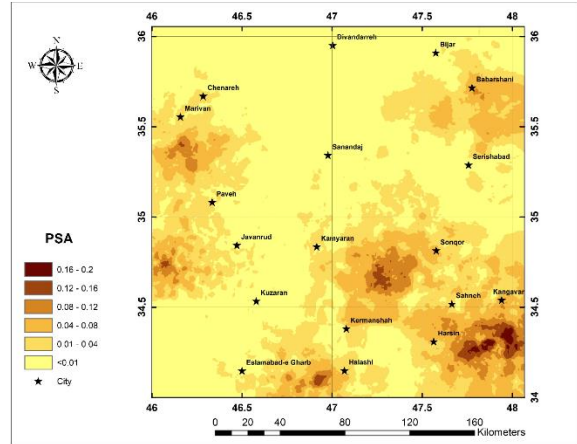
شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره ۰/۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره ۰/۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



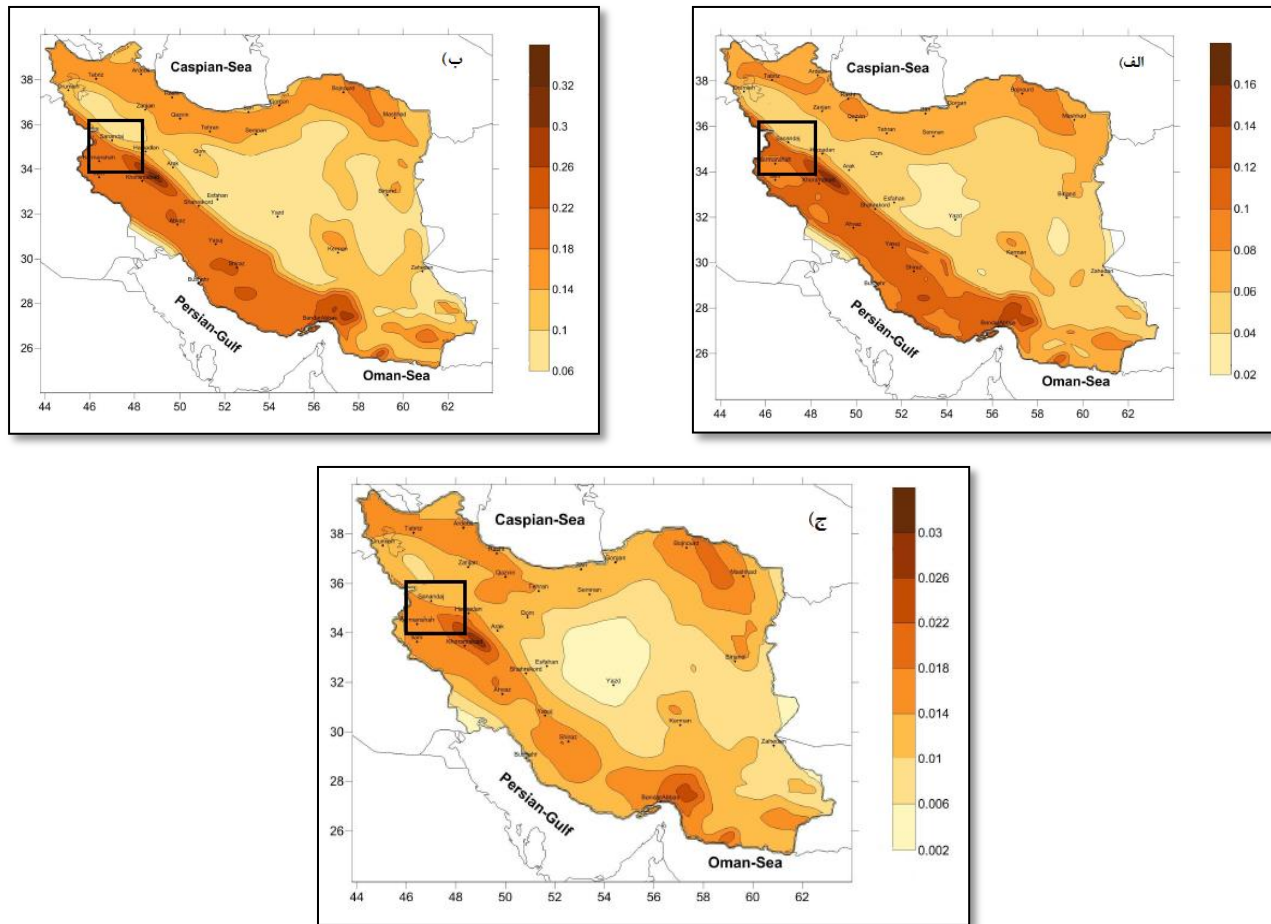
شکل ۹: نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر

الگوریتم اجرایی، مکان‌های اطراف مراکز خوشه‌ها و رویدادهایی که فاصله کمتری از مرکز خوشه (ساختگاه) دارند، مقدار خطر بیشتری را نشان می‌دهند. بنابراین، در شکل‌های ۴ تا ۹، مشاهده می‌شود که مکان‌های اطراف مراکز خوشه‌ها مقدار خطر بیشتری را نشان می‌دهند

بیشترین میزان خطر برآورد شده مربوط به سامانه گسلی عهد حاضر زاگرس (MRF) در مرز میان ایالت لرزه‌زمین‌ساخت زاگرس و ایران مرکزی است. همچنین، میزان خطر در مراکز خوشه و نواحی نزدیکتر به آن‌ها بیشتر است. در واقع، با استفاده از روش K-means وزن‌دار و خوشه‌بندی رویدادها به روش WK-means PSO و وزن داده‌ها (بزرگی‌ها)، مرکز خوشه به سمت رویداد بزرگتر کشیده می‌شود (شیخ حسینی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، به دلیل تاثیر فاصله در

جدول ۲: مقادیر جنبش زمین ارزیابی شده روی سنگ بستر در شهر کرمانشاه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۴۷۵ سال در مطالعات مختلف

Reference	PGA(g)		SA(0.2s)g		SA(2s)g	
	50yr	475yr	50yr	475yr	50yr	475yr
پژوهش حاضر	0.1	0.15	0.12	0.5	0.02	0.05
موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳)	0.099	0.233	0.191	0.468	0.015	0.043
حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲)	-	0.25-0.35	-	0.5-0.7	-	-



شکل ۱۰: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی در ایران، بر حسب ج. برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) (موسوی‌بفروئی و همکاران، ۱۳۹۳). الف) بیشینه شتاب جنبش زمین در سنگ بستر ب) شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه. ج) شتاب طیفی در دوره ۰.۲ ثانیه. گستره مورد مطالعه در این پژوهش با مربع مشکی مشخص شده است.

دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در شهر کرمانشاه، مقادیر $PGA=0/15g$ ، $SA=0/5$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0/05$ در دوره ۲ ثانیه است و در کار موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)، مقادیر $PGA=0/233g$ ، $SA=0/468$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0/043$ در دوره ۲ ثانیه است. در کار حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲؛ شکل ۱۳)، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در شهر کرمانشاه، $PGA=0/25g$ تا $PGA=0/35g$ و $SA=0/5$ تا $SA=0/7$ در دوره ۰/۲ ثانیه است. همچنین، از مقایسه مقادیر PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ سال (شکل ۵)، با نقشه پهنه‌بندی خطر در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) (شکل ۱۲)، در هر

نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده به روش مونت‌کارلو با نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در کار موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳) (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰؛ شکل ۱۲) و حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲؛ شکل ۱۳) مقایسه شده است (جدول ۲ و ۳). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در شهر کرمانشاه، مقادیر $PGA=0/1g$ ، $SA=0/12$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0/02$ در دوره ۲ ثانیه است و در کار موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)، مقادیر $PGA=0/099g$ ، $SA=0/191$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0/015$ در دوره ۲ ثانیه برای دوره بازگشت ۵۰ ساله است و برای

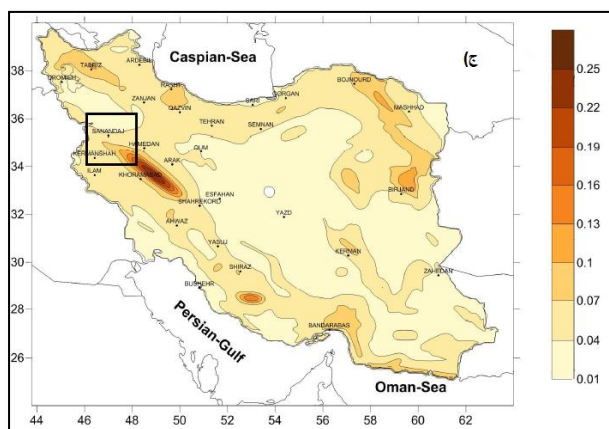
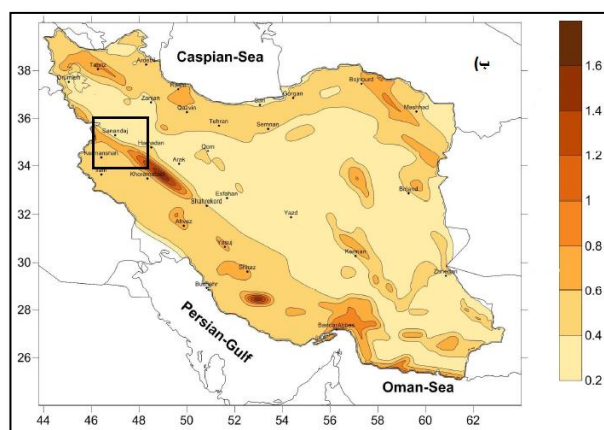
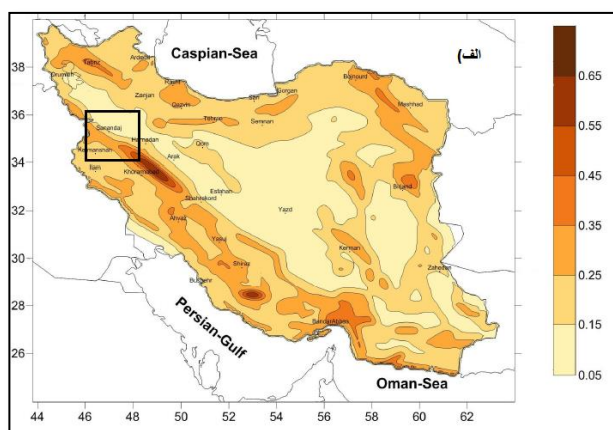
شیخ حسینی و همکاران، برآورد احتمالاتی خطر زمین لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو در گستره کرمانشاه و پیرامون، صفحات ۱۷۳-۱۸۷.

اینکه، در این پژوهش، با توجه به اینکه وسعت منطقه مورد مطالعه کوچک است و برآورد خطر در هر خوشه به صورت مجزا انجام شده است، نقشه‌ها جزئیات بیشتری را به نمایش می‌گذارند.

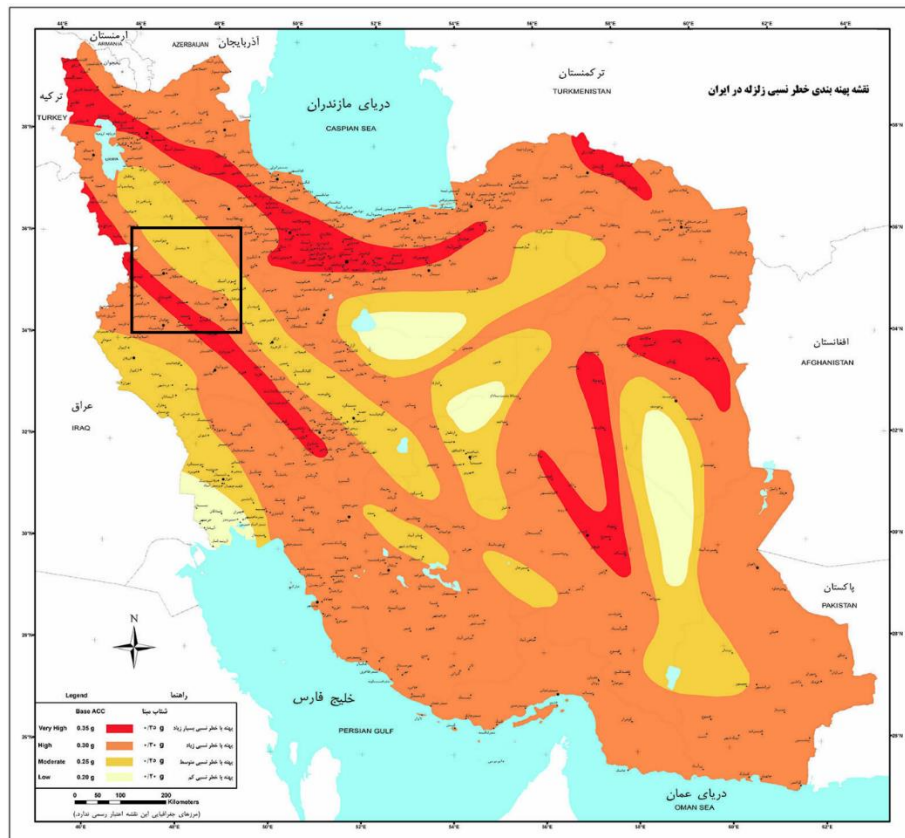
دو نقشه بیشینه مقدار PGA بصورت تقریبی در مرز میان ایالت لرزه- زمین‌ساختی زاگرس و ایران مرکزی تعیین شده‌است. در واقع، با توجه به جدول‌های ۲ و ۳، نتایج بدست آمده در این پژوهش، در مقایسه با کارهای قبلی، به استثنای شتاب طیفی در پریود ۲ ثانیه و دوره بازگشت ۵۰ سال که سطح شتاب بالاتر را نشان می‌دهد، مطلوب است. ضمن

جدول ۳: مقادیر جنبش زمین ارزیابی شده روی سنگ بستر در شهر صحنه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۴۷۵ سال در مطالعات مختلف

Reference	PGA(g)		SA(0.2s)g		SA(2s)g	
	50yr	475yr	50yr	475yr	50yr	475yr
پژوهش حاضر	0.08-0.12	0.2-0.25	0.15-0.2	0.6-0.8	0.04-0.08	0.08-0.12
موسوی بفرونی و همکاران (۱۳۹۳)	0.1-0.12	0.25-0.35	0.18-0.22	0.8-0.1	0.018-0.022	0.13-0.16
حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۲)	-	0.35-0.45	-	0.9-1	-	-
آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰	-	0.30-0.35	-	-	-	-

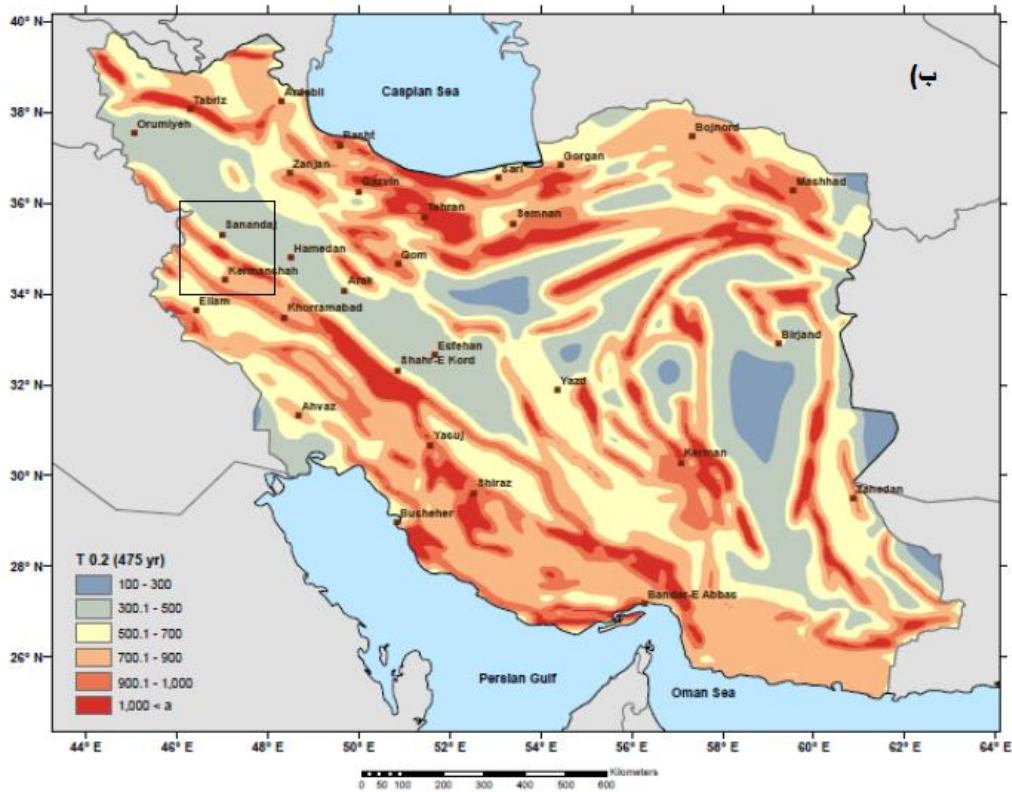
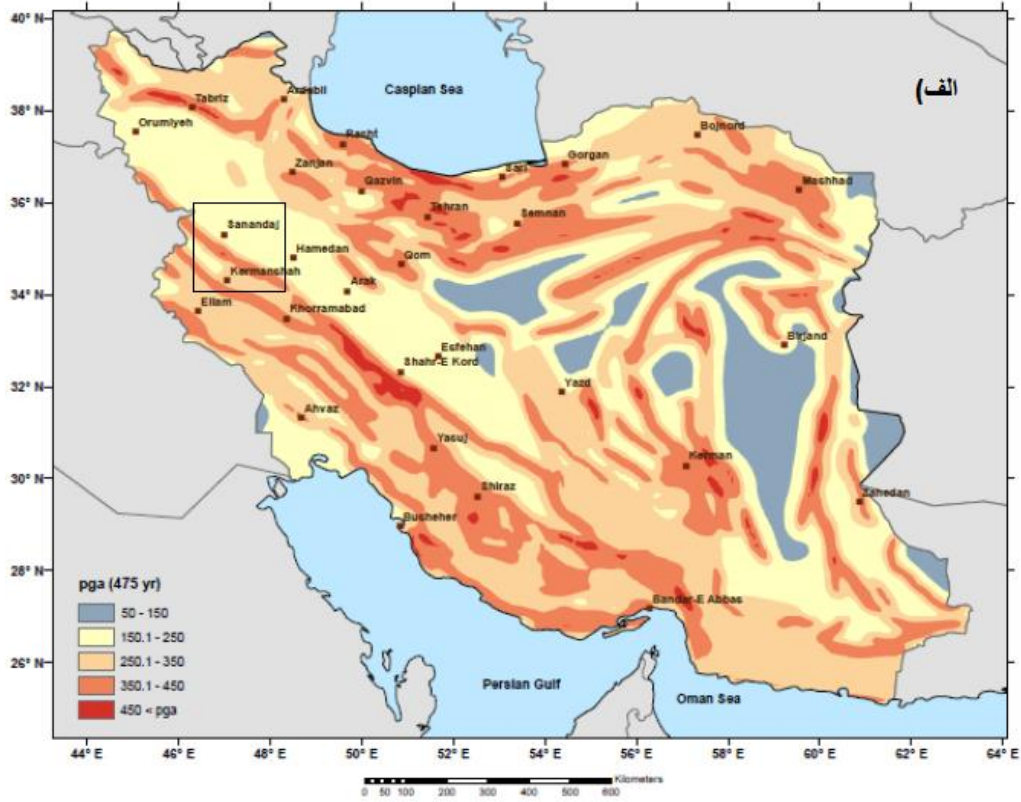


شکل ۱: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی در ایران، بر حسب g. برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) (موسوی بفرونی و همکاران، ۱۳۹۳). الف) بیشینه شتاب جنبش زمین در سنگ بستر (ب) شتاب طیفی در دوره ۰.۲ ثانیه (ج) شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه. گستره مورد مطالعه در این پژوهش با مربع مشکی مشخص شده است.



شکل ۱۲: نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران، برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم (کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳). گستره مورد مطالعه در این پژوهش با مربع مشکی مشخص شده است.

شیخ حسینی و همکاران، برآورد احتمالاتی خطر زمین لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو در گستره کرمانشاه و پیرامون، صفحات ۱۷۳-۱۸۷.



شکل ۱۳: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لرزه در ایران برحسب cm/s^2 برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال. الف) بیشینه شتاب جنبش زمین در سنگ بستر (ب) شتاب طیفی در دوره ۰/۲ ثانیه (حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۱۲). گستره مورد مطالعه در این پژوهش با مربع مشکی مشخص شده است.

۸- نتیجه‌گیری

Assatourians, K. and Atkinson, G. M., 2013, EqHaz: An open-source probabilistic seismic-hazard code based on the Monte Carlo simulation approach: *Seismological Research Letters*, 84(3), 516-524.

Ansari, A., Firuzi, E. and Etemadsaeed, L., 2015, Delineation of Seismic Sources in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis Using Fuzzy Cluster Analysis and Monte Carlo Simulation: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 2174-2191.

Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran. In: Gupta H. K., Delany, F. M. (eds.) *Zagros-Hindukush-Himalaya Geodynamic evolution*, Am: Geophys, Union and Geol, Soc Am, Geodyn, Ser, 3, 33-69.

Berberian, M., 1995, Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics: *Tectonophysics*, 241(3-4), 193-224.

Boore, D. M. and Atkinson, G. M., 2008, Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s: *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.

Baker, C., Jackson, J. and Priestley K., 1993, Earthquakes on the Kazerun Line in the Zagros mountains of Iran: strike-slip faulting within a fold-and-thrust belt: *Geophysical Journal International*, 115(1), 41-61.

Campbell, K. W. and 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.

Chiou, B. S. J. and Youngs, R. R., 2008, An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra: *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.

Campbell, K. W. and 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.

Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.

Ebel J. E. and Kafka, A. L., 1999, A Monte Carlo approach to seismic hazard analysis: *Bulletin of the*

با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل ۷ خوشه‌ای حاصل از ترکیب خوشه-بندی K-means وزن‌دار و بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، برای چشمه‌های زمین‌لرزه‌زا در گستره کرمانشاه و نواحی پیرامون، شامل بخش‌هایی از استان‌های کردستان و همدان، بیشینه شتاب جنبش‌زمین، PGA، و شتاب طیفی، SA، در دوره‌های ۰/۲ و ۲ ثانیه و میرایی ۵٪، برای دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۶۳٪ و ۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال)، به روش احتمالاتی محاسبه شده و بر اساس نتایج، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تهیه شده است. بیشینه خطر برآورد شده مربوط به سامانه گسلی عهد حاضر زاگرس (MRF) (۰/۰۸g) تا PGA=۰/۱۶g برای دوره بازگشت ۵۰ سال و ۰/۰۵g تا PGA=۰/۳۱g برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال) در مرز میان ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس و ایران مرکزی است. در شهر کرمانشاه، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، مقادیر SA=۰/۰۵، PGA=۰/۱۵g در دوره ۰/۲ ثانیه و SA=۰/۰۵ در دوره ۲ ثانیه است. تهیه فهرست مصنوعی از هر زیرفهرست تفاوت‌های لرزه‌خیزی منطقه‌ای موجود در فهرست مشاهده‌ای را حفظ کرده و اعمال الگوریتم مونت‌کارلو برای هر زیرفهرست، نتایج مطلوبی را ارائه داده است. با توجه به اینکه وسعت منطقه مورد مطالعه کوچک است و برآورد خطر در هر خوشه به صورت مجزا انجام شده است، نقشه‌ها جزئیات بیشتری را نشان می‌دهند. در واقع، با مقایسه نقشه‌های تهیه شده با پژوهش‌های پیشین و با توجه به بکارگیری چشمه‌های حاصل از خوشه‌بندی در برآورد خطر زمین‌لرزه که به طور خودکار و بدون دخالت کاربر تعیین شده، نتایج تقریباً مطلوب است و این روش در مناطقی که اطلاعات کافی در دسترس نیست، می‌تواند ابزاری کارآمد در شناسایی چشمه‌های بالقوه و برآورد خطر زمین‌لرزه باشد.

۹- منابع

کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران.

موسوی بفرولی، س.، ح.، میرزائی، ن.، شعبانی، ا. و اسکندری قادی، م.، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها: مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰، ۳۸-۱۵.

- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N. and Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for Iranian plateau: *Annals of Geophysics*, under review.
- Musson, R. M. W., 1999a, Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region: *Annali Di Geofisica*, 42, 1109-1124.
- Musson, R. M. W., 1999b, Determination of design earthquakes in seismic hazard analysis through Monte Carlo simulation: *Journal of Earthquake Engineering*, 3, 463-474.
- Mirzaei, N. and Gheitanchi, M. R., 2002, Seismotectonics of Sahneh fault, middle segment of main recent fault, Zagros mountains, western Iran: *Journal of the Earth and Space Physics*, 28(1), 1-8.
- Nowroozi, 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, 109-128.
- Shapira, A., 1983, Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process: *Tectonophysics*, 95(1-2), 75-89.
- Soghrat, M. R., Khaji, N. and Zafarani, H., 2012, Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model: *Geophysical Journal International*, 188(2), 645-679.
- Shoja Taheria, J., Naserieh, S. and Hadic, G., 2010, A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau: *Journal of Earthquake Engineering*, 14(2), 278-292.
- Sheikhhosseini, Z. Mirzaei, N., Heidari, R., and Monkaresi, H. 2021, Delineation of potential seismic sources using weighted K-means cluster analysis and particle swarm optimization (PSO): *Acta Geophysica*, 69(6), 1-12.
- Snyder, D. B. and Barazangi, M., 1986, Deep crustal structure and flexure of the Arabian plate beneath the Zagros collisional mountain belt as inferred from gravity observations: *Tectonics*, 5(3), 361-373.
- Tchalenko, J. S. and Braud, J., 1974, Seismicity and structure of the Zagros (Iran): the Main Recent Fault between 33 and 35 N: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 277(1262), 1-25.
- Thenhaus, P. C. and Campbell, K. W., 2003, Seismic hazard analysis: *Earthquake Engineering handbook*, 8(1-2), 1-50.
- Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A. and Dana, F. M., 2007, Attenuation relationships for Iran: *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 469- 492.
- 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, 1-29.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K., 2009, An empirical spectral ground motion model for Iran: *Journal of Seismology*, 13, 499-515.
- Han, S.W. and Choi, Y. S., 2008, Seismic hazard analysis in low and moderate seismic region-Korean peninsula: *Structural Safety*, 30, 543-558.
- Hamzehloo, H., Alikhanzadeh, A., Rahmani, M. and Ansari, A., 2012, Seismic hazard maps of Iran, In: *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal.
- Jackson, J. A., 1980, Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts: *Nature*, 283(5742), 343-346.
- Johnson, C. E. and Koyanagi, R. Y., 1988, A Monte-Carlo approach applied to the estimation of seismic hazard for the state of Hawaii: *Seismological Research Letters*, 59(1), 18.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984, Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan: *Geophysical Journal International*, 77, 185-264.
- Jackson, J. Haines, J. and Holt, W., 1995, The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100 (B8), 15205-15219.
- Kijko, A., 2004, Estimation of the maximum earthquake magnitude, Mmax: *Pure and Applied Geophysics*, 161, 1655-1681.
- McGuire, K. K., 1976, FORTRAN computer program for seismic risk analysis: Open-File report 76- 67, United States Department of the Interior, Geological Survey-102pp.
- Molnar, P. and Chen, W. P., 1982, Seismicity and mountain building, In Hsued K J (ed.) *Mountain Building Processes*, Academic Press, London, 41-57.

- of Monte-Carlo simulations in seismic hazard analysis in Tehran and surrounding areas: International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects, 25(2), 159-166.
- Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, A. S. and Ansari, A., 2008, Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran: Soil Dynam, Earthquake Eng., 28(7), 550-576.
- Zafarani, H. and Soghrat, M., 2012, Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method: Bull, Seism. Soc. Am., 102(5), 2031-2045.
- Weatherill, G. and Burton, P. W., 2010, An alternative approach to probabilistic seismic hazard analysis in the Aegean region using Monte Carlo simulation: Tectonophysics, 492(1-2), 253-278.
- Wiemer, S. and Wyss, M., 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan: Bulletin of the Seismological Society of America, 90(4), 859-869.
- Wiemer, S., 2001, A software package to analyze seismicity: ZMAP: Seismological Research Letters, 72(3), 373-382.
- Wyss, M. A., Hasegawa, Wiemer, S. and Umino N., 1999, Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, m7.1 off-sanriku earthquake, japan: Annali Di Geofisica, 42(5), 851-869.
- Yazdani, A., Shahpari, A. and Salimi, M.R., 2012, The use



Probabilistic seismic hazard analysis by Monte Carlo simulation in Kermanshah region

Zohreh Sheikhhosseini¹, Noorbakhsh Mirzaei², Reza Heidari¹ and Hamed Monkaresi³

1- Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Computer Engineering and Information Technology, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 4 December 2022; Accepted: 25 January 2023

Corresponding author: r.heidari@srbiau.ac.ir

Keywords

Seismic hazard analysis

Weighted K-means clustering analysis

Monte Carlo simulation

Particle swarm optimization (PSO)

Extended Abstract

Summary

The area bounded in 46°-48° E and 34°-36° N is selected for probabilistic seismic hazard analysis of Kermanshah region utilizing the Monte Carlo method. Potential seismic sources model includes 7 clusters obtained from the combination of weighted K-means clustering and particle swarm optimization (PSO) method. The peak ground horizontal acceleration (PGA) and spectral acceleration (SA) for 5% damping ratio at 0.2 and 2 seconds corresponding to

10% and 63% probability of exceedances within 50 years are calculated for the region.

Introduction

Natural disasters are an integral part of human life; therefore, it is necessary to minimize the seismic vulnerability of structures. The study region is one of the most seismically active parts of the Zagros continental collision zone, which has experienced destructive earthquakes due to movements of Sahneh and Nahavand segments of the Zagros Main Recent Fault. Due to the fact that determination of the geometry of seismic sources and seismicity parameters in the conventional methods of seismic hazard and risk analysis is faced with inevitable uncertainties, the Monte Carlo method of probabilistic seismic hazard analysis is used to evaluate the levels of ground motion, in given time periods, using a synthetic earthquake catalog. Potential seismic sources are delineated using weighted K-means cluster analysis and PSO method. Predicted ground motion values are consistent with the ground motion levels in the more reliable recently published seismic hazard zoning maps for Iran.

Methodology and Approaches

The PSO method, which is a global random optimization technique, is considered as an appropriate tool for improving K-means clustering algorithm. The optimal number of clusters (7 clusters) is determined automatically by applying the PSO-weighted K-means algorithm to the spatial distribution of earthquakes. Two validity indexes, Davies–Bouldin's measure and Chou–Su–Lai's measure, were used to determine the optimal number of clusters in the optimization algorithms. A synthetic catalog is prepared by random sampling with replacement of the observed earthquakes, in which each member has a chance to be selected more than once. The Monte Carlo method of probabilistic seismic hazard analysis is used to determine the level of ground motion likely to be exceeded in given time-periods.

Results and Conclusions

With the Monte Carlo simulation and a model including 7 clusters obtained by combining weighted K-means clustering and the PSO method, the peak ground horizontal acceleration (PGA) and spectral accelerations (SA) for 5% damping ratio at 0.2 and 2 seconds corresponding to 10% and 63% probability of exceedances within 50 years (475-years and 50 years mean return periods, respectively) have been calculated for Kermanshah and adjacent regions. Resultant peak ground horizontal acceleration is equal to 0.35 g in Ezgeleh, Miyanrahan, Homeil. Nahavand, Marivan and Bijar areas. In the city of Kermanshah, PGA= 0.15 g and SA=0.5 g in the period of 0.2 seconds, and SA= 0.05 g in the period of 2 seconds. The applied method can provide more acceptable results than traditional PSHA in low seismicity areas.