

برآورد احتمالاتی خطر زمین لرزه با شبیه سازی 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

۳- دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

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

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

واژگان کلیدی

برآورد خطر زمین لرزه
شبیه سازی مونت کارلو
خوشه بندی K-means
بهینه سازی توده ذرات
زاگرس

چکیده

برای ارزیابی بیشینه شتاب جنبش زمین در حوزه زمان و نیز حوزه بسامد در گستره کرمانشاه، برآورد احتمالاتی با شبیه سازی مونت کارلو و به کارگیری مدل ۷ خوشه ای تعیین شده برای چشمه زمین لرزه با ترکیب خوشه بندی K-means و وزن دار و بهینه سازی توده ذرات (PSO)، انجام شده است. مقادیر بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) در دوره های 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 زلزله خیزترین بخش های زاگرس است، محاسبه شده است. برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، بیشینه شتاب جنبش زمین معادل ۰/۳۱g برای ازگله، میان راهان، حمیل، نهاوند، مریوان و بیجار به دست آمده است. همچنین، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در شهر کرمانشاه، مقادیر $SA=0/5$ ، $PGA=0/15g$ در دوره ۰/۲ ثانیه و $SA=0/05$ در دوره ۲ ثانیه است. نتایج، با نقشه پهنه بندی خطر نسبی زمین لرزه در ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم) و پژوهش های پیشین، مقایسه شده است.

برآورد خطر زمین‌لرزه تخمین بیشینه مقدار جنبش زمین در ساختمان یا منطقه موردنظر در پنجره زمانی مشخص است. نتایج برآورد خطر زمین-لرزه 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 ساختمان 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 اجتناب ناپذیر است، به تدریج شبیه‌سازی مونت کارلو به محاسبات تحلیل خطر زمین‌لرزه راه پیدا کرد. (Shapira, 1983., Johnson and koyangi, 1983).
اولیه رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو را برای تحلیل خطر زمین‌لرزه معرفی کردند و نشان دادند که چگونه می‌توان از شبیه‌سازی فهرست زمین-لرزه‌ها، برای تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لرزه استفاده کرد.

شبیه‌سازی مونت کارلو 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 مونت-کارلو 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 مونت کارلو می‌تواند از رابطه‌های بازگشتی گوتنبرگ-ریشتر 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).

برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت-کارلو، 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 گسل-های 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 مونت کارلو انجام شده است.

۲- فهرست زمین‌لرزه‌ها

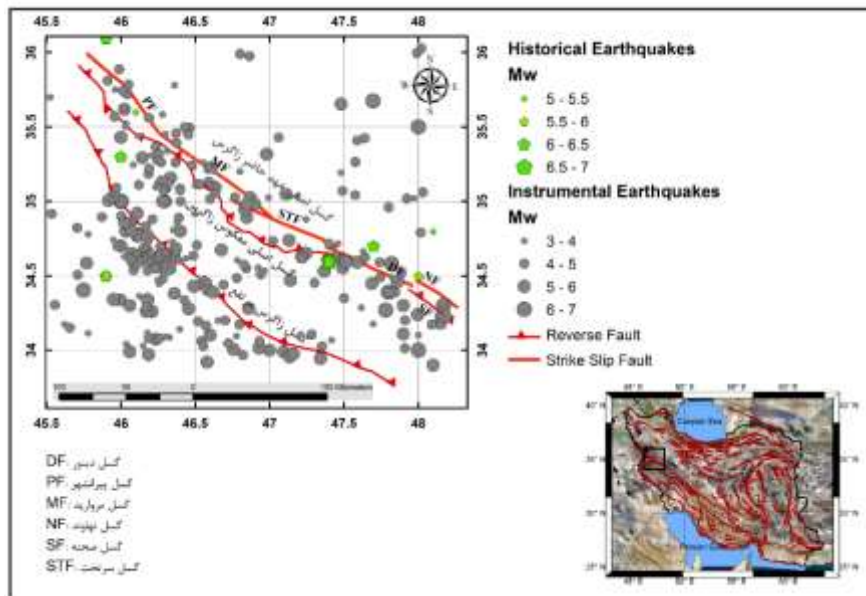
تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو به خصوص در نواحی‌ای که دارای لرزه‌خیزی پایین هستند و تعیین مکان و هندسه چشمه‌های لرزه‌ها با دشواری همراه است و یا تعداد رویدادها به گونه‌ای است که تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی مشکل است، می‌تواند نتایج بهتری را نسبت به روش‌های مرسوم تحلیل خطر (احتمالاتی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

تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه به روش مونت کارلو، 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 گسل-های 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 مونت کارلو انجام شده است.

تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه به روش مونت کارلو، 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 گسل-های 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 مونت کارلو انجام شده است.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱۰، شماره ۱، ۱۴۰۳.

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.



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

دگرشکلی فشاری ادامه‌دار است که کوتاه‌شدگی پی‌سنگ بر روی گسل-های نرمال جنبش معکوس‌یافته را تجربه می‌کند (Jackson., 1980; Barbarian., 1995; Moulmar 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 (Chalco 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 (چالکو و براود، ۱۹۷۴؛ بربریان، ۱۹۹۵). بیشتر پژوهشگران (مانند بربریان، ۱۹۹۵؛ جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ جکسون و مکنزی، ۱۹۸۴) بر این باورند که گسل اصلی عهد حاضر زاگرس

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

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 سهندج-سیرجان، زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده است. کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همالیا 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 (Mirzaee and Gheytauchi., 2002). این کمربند زون گسترده‌ای از

means وزن دار و بهینه سازی توده ذرات (PSO) الگوریتمی ارائه دادند که با تحلیل داده های زمین لرزه ای، خوشه های بهینه سراسری را شناسایی و بر اساس خوشه های بدست آمده و لرزه زمین ساخت منطقه، چشمه های بالقوه زمین لرزه تعیین می شود. در واقع، با اعمال الگوریتم PSO-WK-means بر توزیع مکانی زمین لرزه ها، تعداد بهینه خوشه ها با توجه به شاخص های اعتبارسنجی به صورت خودکار تعیین می شود و داده ها را با کمترین دخالت کاربر خوشه بندی می کند. در منطقه مورد مطالعه، با توجه به اینکه زون لرزه زا 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 لرزه ها در نظر گرفته شده است.

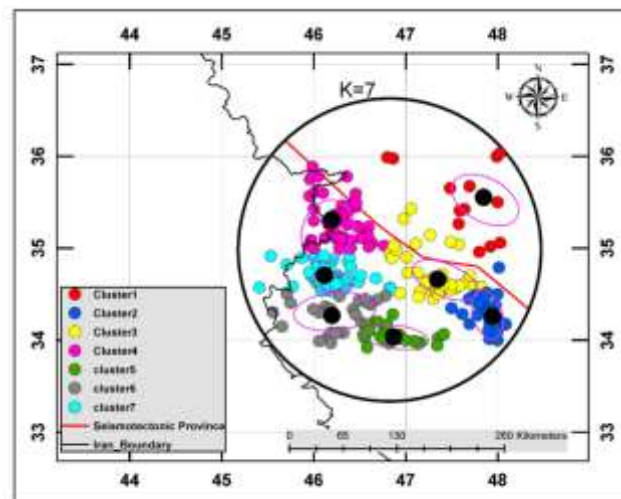
در این پژوهش، از مدل ۷ خوشه ای برای چشمه بالقوه زمین لرزه که از اعمال الگوریتم PSO-WK-means و شاخص اعتبارسنجی دیویس-بولدین بر زمین لرزه های دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۹) با اعمال Mc به دست آمده، استفاده شده است. این مدل با توجه به به مقدرهای بهینه شاخص های اعتبارسنجی دیویس-بولدین و اندازه گیری CS و میزان شباهت با تکتونیک منطقه انتخاب شده است (شکل ۲) و تطابق خوبی با لرزه زمین ساخت منطقه مورد مطالعه دارد (شیخ حسینی و همکاران، ۲۰۲۱).

به سوی جنوب تا عرض 31 درجه گسترش دارد، اما، به نظر بیکر و همکاران (۱۹۹۳) نشانه هایی وجود دارد که ممکن است این گسل به سمت جنوب شرقی گسترش بیشتری داشته باشد.

۴- تعیین چشمه های بالقوه زمین لرزه با تحلیل خوشه بندی

K-means وزن دار و بهینه سازی توده ذرات (PSO)

تعیین چشمه های بالقوه زمین لرزه اولین گام در تحلیل خطر زمین لرزه است و تأثیر عمده ای در نتایج نهایی تحلیل خطر دارد. در روش های احتمالاتی و قطعی تحلیل خطر، چشمه های بالقوه زمین لرزه با توجه به نقشه های زمین شناسی، لرزه زمین ساختی، ژئودتیک و ... توسط پژوهشگران تعیین می شوند و در مواردی مدل های خیلی متفاوت برای چشمه های یک منطقه خاص ارائه می شود. در واقع، یک رویکرد هماهنگ برای توسعه مدل چشمه بالقوه زمین لرزه موجود نیست، زیرا اطلاعات زمین شناسی و لرزه زمین ساختی موجود از منطقه ای به منطقه ای دیگر متفاوت است و در بسیاری از مناطق کره زمین مانند مناطق درون صفحه ای و کم زمین لرزه، این اطلاعات به اندازه کافی موجود نیست. شیخ حسینی و همکاران (۲۰۲۱) چشمه های بالقوه زمین لرزه را با روش خوشه بندی تعیین کردند. آنها با ترکیب روش های خوشه بندی K-



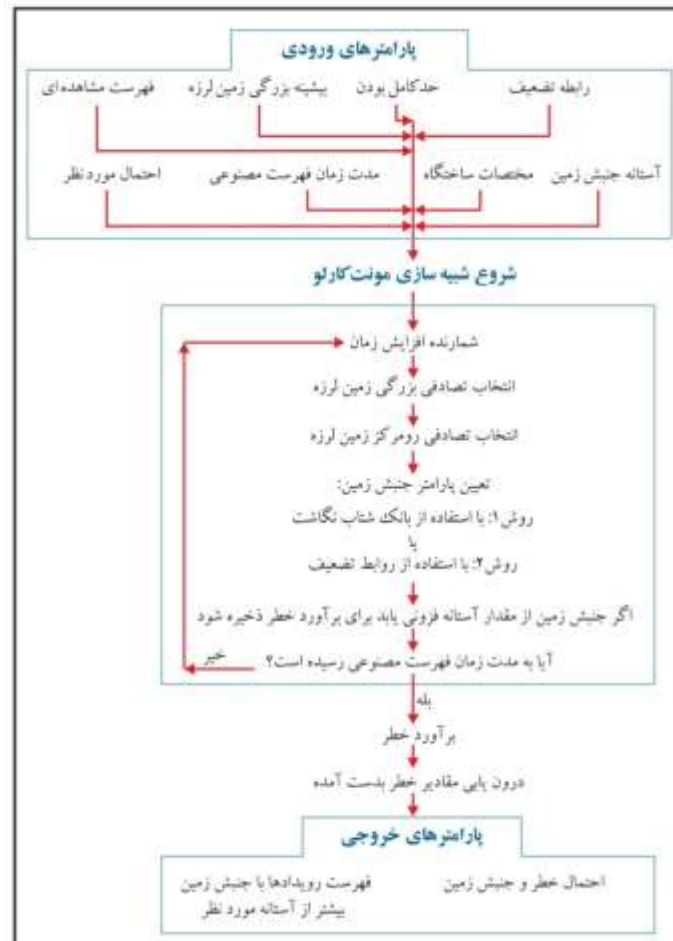
شکل ۲: خوشه های تعیین شده با الگوریتم PSO-WK-means برای زمین لرزه های دستگاهی (۱۹۰۰-۲۰۱۹) با اعمال Mc

در حدود دو دهه گذشته بر پایه داده های شتاب نگاری ایران، و همچنین، ترکیب داده های ایران با مناطق مشابه، چندین رابطه تضعیف جنبش زمین ارائه شده است. برای نمونه، نوروزی (۲۰۰۵) رابطه تضعیف را برای PGA، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۱۰)، زعفرانی و همکاران

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.

(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)

۶- شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل احتمالاتی خطر زمین-لرزه

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

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 تا ۳۰۰ کیلومتر و بزرگی‌های ۳/۳ تا ۷/۵-۸/۵، بسته به سازوکار چشمه، معتبر است. در این پژوهش، با توجه به ژرفا و بازه بزرگی زمین‌لرزه‌های گستره مورد مطالعه، از رابطه‌های تضعیف کمبل و بزرگنیا (۲۰۱۴) استفاده شده است.

Δt باشد، پس زمین‌لرزه n ام در فهرست مصنوعی در زمان $(n-1)\Delta t$ رخ می‌دهد.

۷- برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با بکارگیری شبیه سازی 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-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:

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 به کارگیری رابطه(های) 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 نمونه‌برداری 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.

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

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

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 شده‌است. مقادیر PGA و SA در دوره‌های ۰/۲ و ۲ ثانیه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۴۷۵ سال (به ترتیب معادل ۶۳٪ و 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).

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

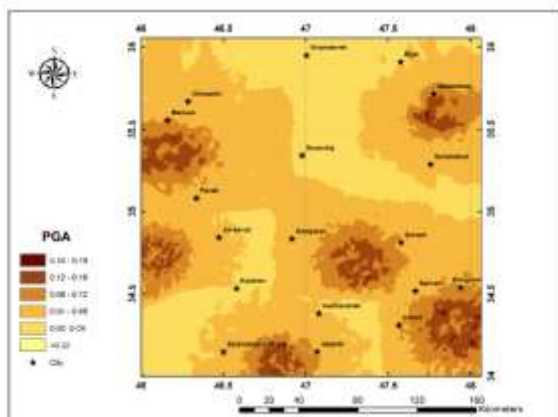
$$M_{\min} \leq m \leq M_{\max}.$$

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

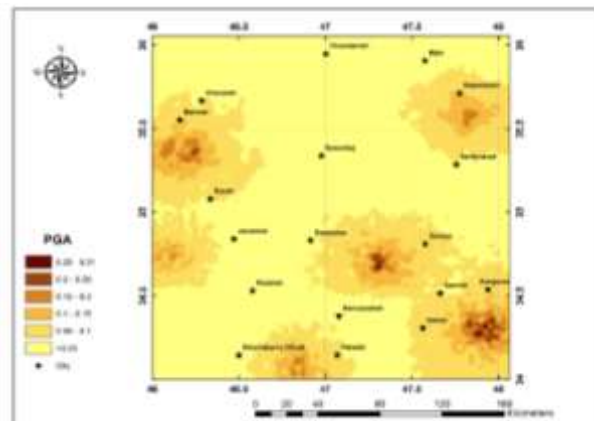
که در آن، $M_{\min}$ ، بزرگی آستانه و $M_{\max}$ ، بیشینه بزرگی زمین‌لرزه ممکن است. رابطه ۲ به طور گسترده در برآورد خطر زمین‌لرزه بکار می‌رود.

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

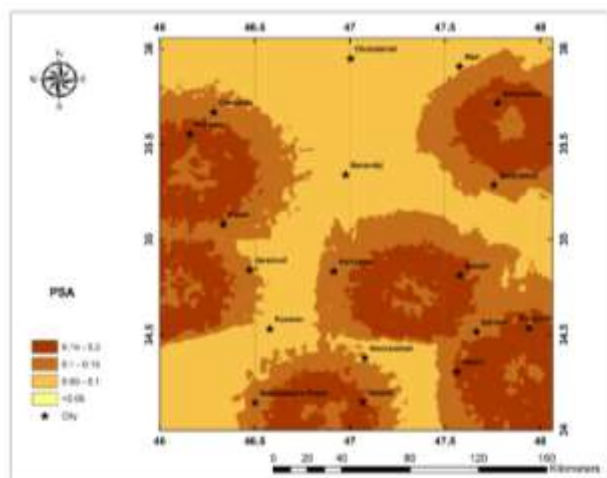
جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز برای برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با بکارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو



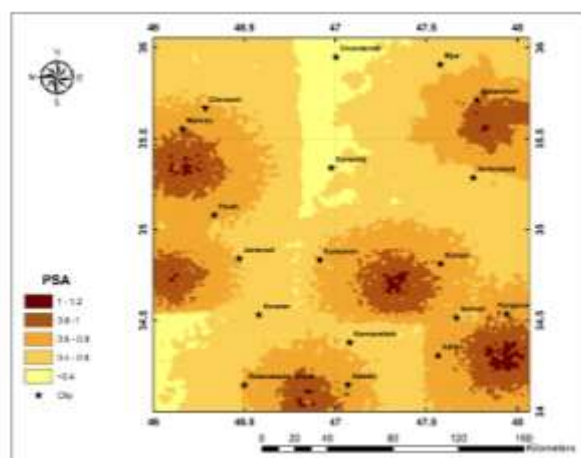
شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین بر حسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



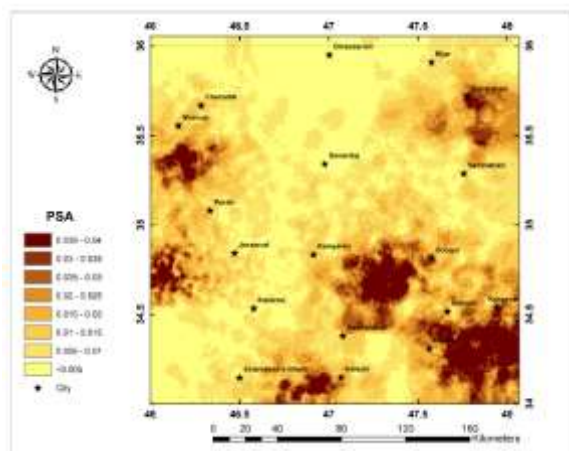
شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین بر حسب g در ایران برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



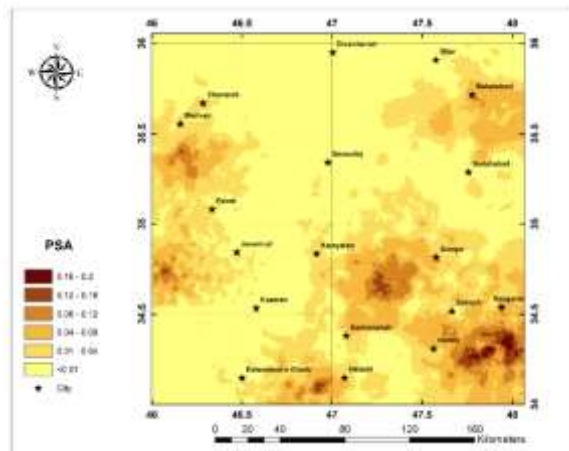
شکل ۶: نقشه پهنه بندی شتاب طیفی در دوره ۰/۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



شکل ۷: نقشه پهنه بندی 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 پهنه بندی شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۵۰ سال (۶۳٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر



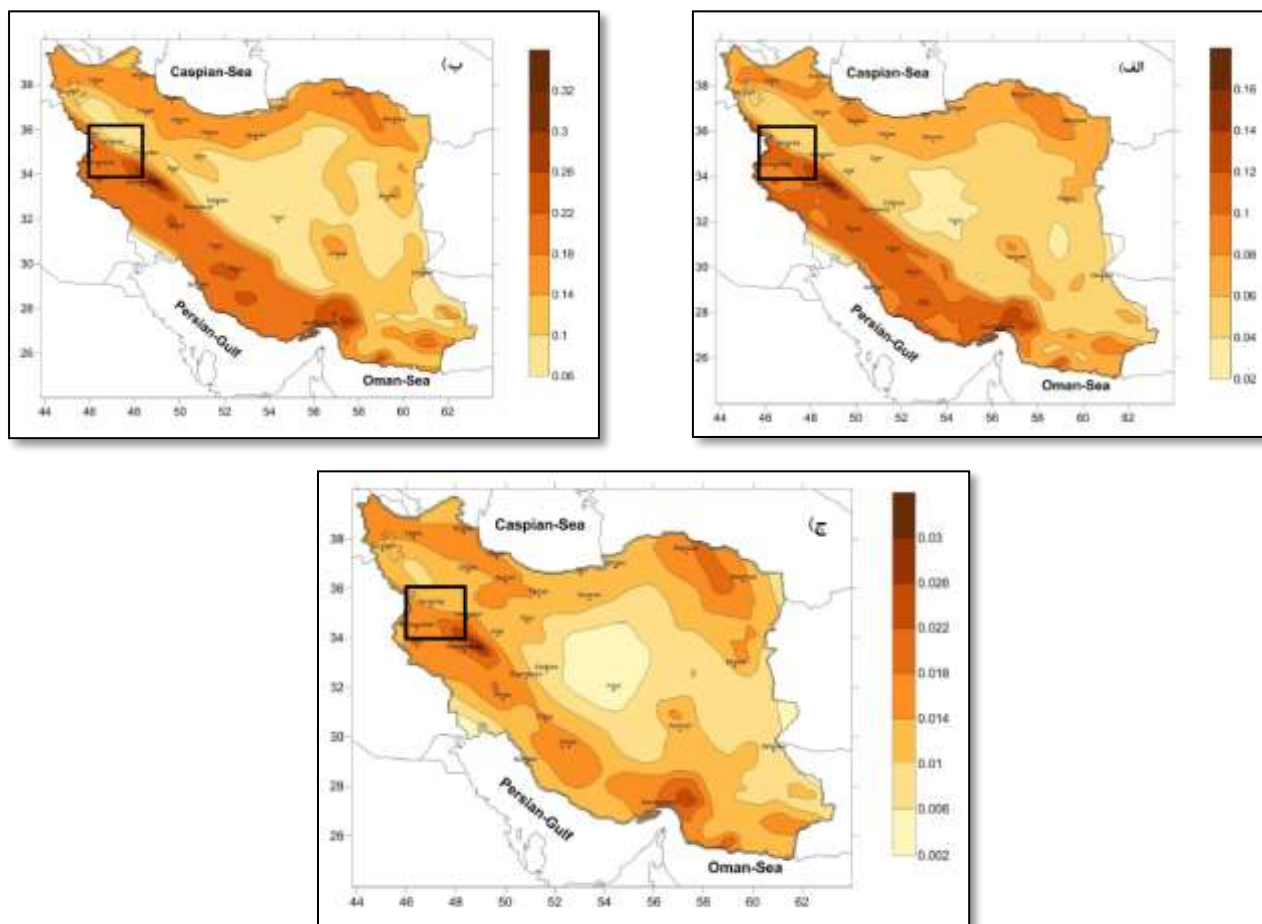
شکل ۹: نقشه پهنه بندی شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه بر حسب g برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) در سنگ بستر

حسینی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، به دلیل تاثیر فاصله در الگوریتم اجرایی، مکان های اطراف مراکز خوشه ها و رویدادهایی که فاصله کمتری از مرکز خوشه (ساختمان) دارند، مقدار خطر بیشتری را نشان می دهند. بنابراین، در شکل های ۴ تا ۹، مشاهده می شود که مکان های اطراف مراکز خوشه ها مقدار خطر بیشتری را نشان می دهند

بیشترین میزان خطر برآورد شده مربوط به سامانه گسلی عهد حاضر زاگرس (MRF) در مرز میان ایالت لرزه زمین ساخت زاگرس و ایران مرکزی است. همچنین، میزان خطر در مراکز خوشه و نواحی نزدیکتر به آن ها بیشتر است. در واقع، با استفاده از روش K-means وزن دار و خوشه بندی رویدادها به روش WK-means PSO و وزن داده ها (بزرگی ها)، مرکز خوشه به سمت رویداد بزرگتر کشیده می شود (شیخ

جدول ۲: مقادیر جنبش زمین ارزیابی شده روی سنگ بستر در شهر کرمانشاه برای دوره بازگشت های 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 بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)	0.099	0.233	0.191	0.468	0.015	0.043
حمزه لو و همکاران (۲۰۱۲)	-	0.25-0.35	-	0.5-0.7	-	-
آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰	-	0.30-0.35	-	-	-	-



شکل ۱۰: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی در ایران، بر حسب T_R 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 ۰٫۲ ثانیه ج) شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه. گستره مورد مطالعه در این پژوهش با مربع مشکی مشخص شده است.

نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده به روش مونت کارلو 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 $SA = 0/12$ ، $PGA = 0/1g$ در دوره ۰٫۲ ثانیه و $SA = 0/02$ در دوره ۲ ثانیه است و در کار موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)، مقادیر $SA = 0/191$ ، $PGA = 0/099g$ در دوره ۰٫۲ ثانیه و $SA = 0/015$ در دوره ۲ ثانیه برای دوره بازگشت ۵۰ ساله است و برای 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 دو نقشه بیشینه مقدار PGA بصورت تقریبی در مرز میان ایالت لرزه-زمین‌ساختی زاگرس و ایران مرکزی تعیین شده است. درواقع، با توجه به

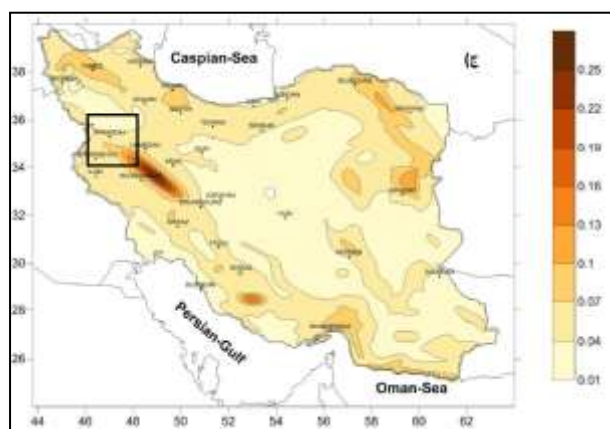
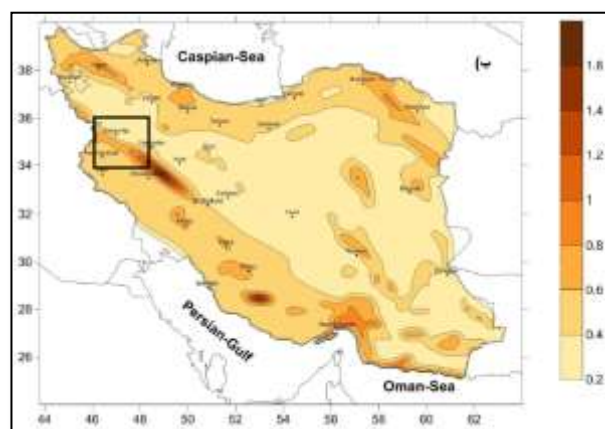
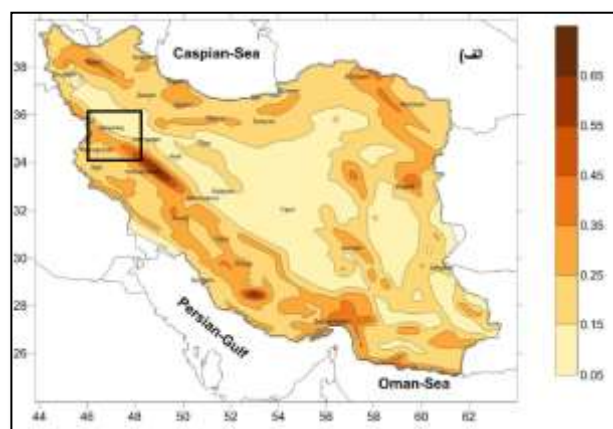
شیخ حسینی و همکاران، برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو در گستره کرمانشاه و پیرامون، صفحات ۹۵-۱۱۰.

کوچک است و برآورد خطر در هر خوشه به صورت مجزا انجام شده است، نقشه‌ها جزئیات بیشتری را به نمایش می‌گذارند.

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 اینکه، در این پژوهش، با توجه به اینکه وسعت منطقه مورد مطالعه

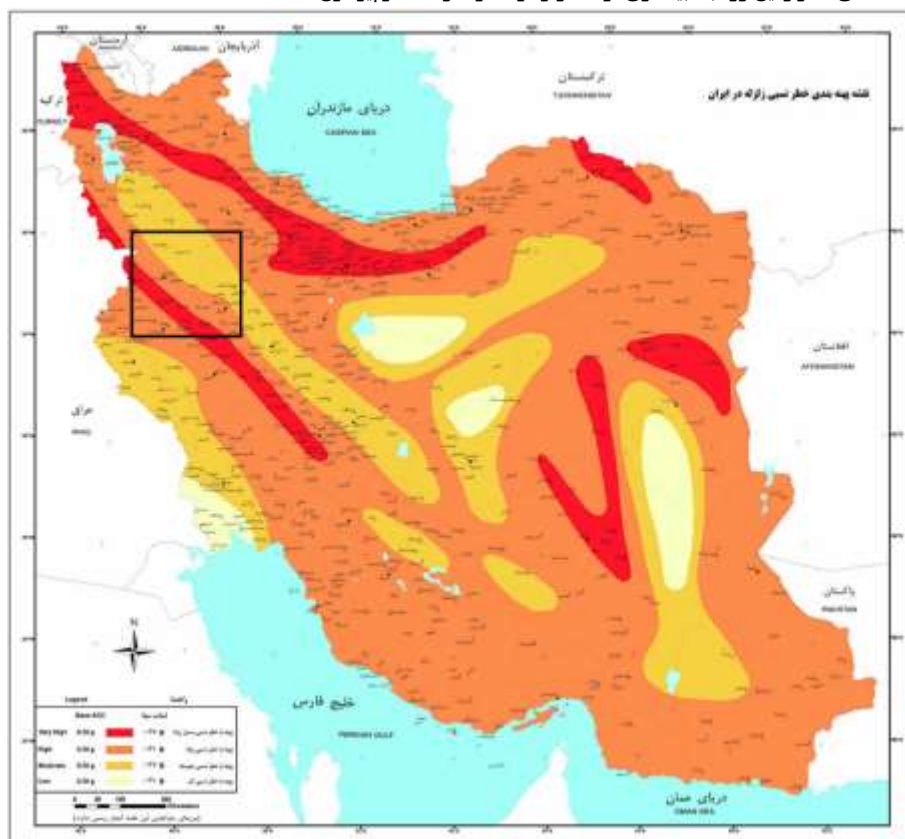
جدول ۳: مقادیر جنبش زمین ارزیابی شده روی سنگ بستر در شهر صحنه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۴۷۵ سال در مطالعات مختلف

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 بفروئی 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	-	-	-	-

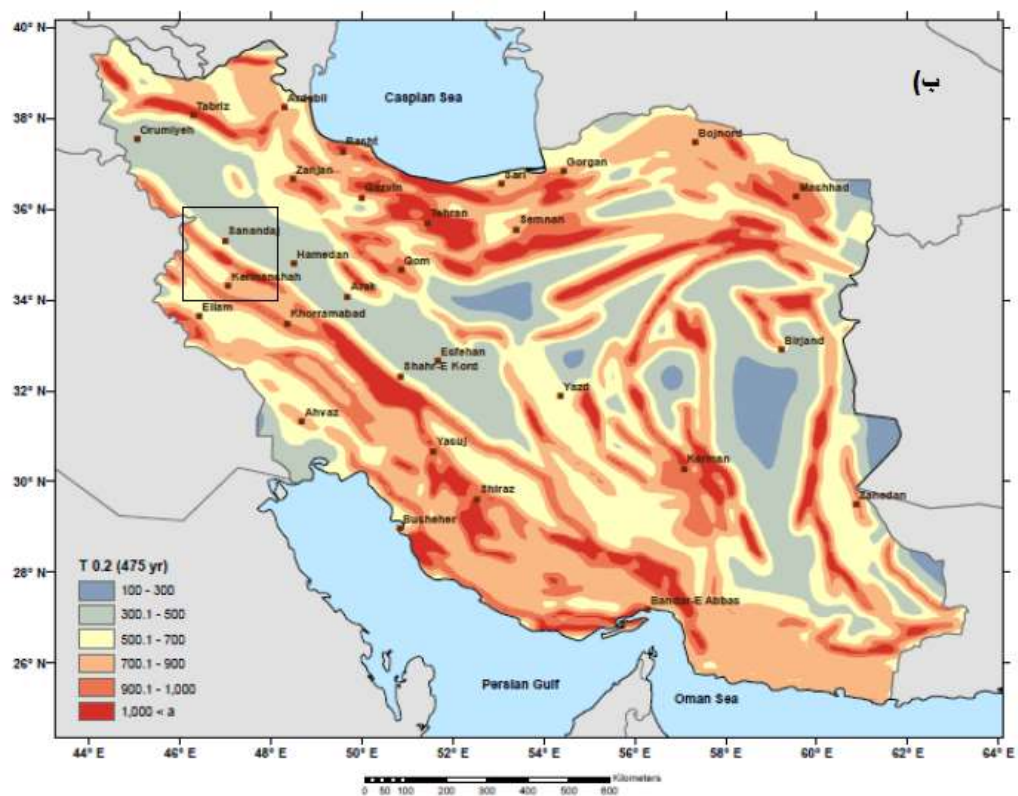
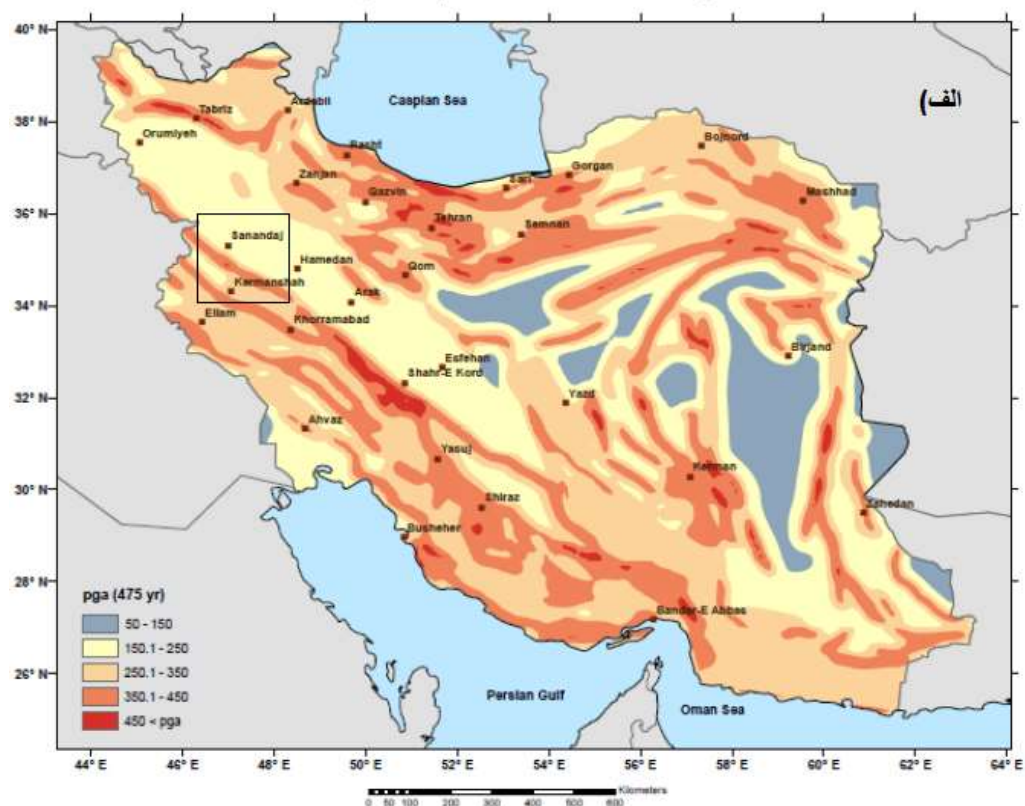


شکل ۱: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی در ایران، بر حسب g. برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال فزونی در ۵۰ سال) (موسوی بفروئی و همکاران، ۱۳۹۳). الف) بیشینه شتاب جنبش زمین در سنگ بستر ب) شتاب طیفی در دوره ۰.۲ ثانیه ج) شتاب طیفی در دوره ۲ ثانیه. گستره مورد مطالعه در این پژوهش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

شیخ حسینی و همکاران، برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه با شبیه‌سازی مونت کارلو در گستره کرمانشاه و پیرامون، صفحات ۹۵-۱۱۰.



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.



شکل ۱۳: نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه 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

با شبیه‌سازی مونت کارلو 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 $PGA=0/16g$ برای دوره بازگشت ۵۰ سال و ۰/۰۵g تا $PGA=0/31g$ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال) در مرز میان ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس و ایران مرکزی است. در شهر کرمانشاه، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، مقادیر $SA=0/5$ ، $PGA=0/15g$ و $SA=0/05$ و $PGA=0/15g$ در دوره ۰/۲ ثانیه و ۲ ثانیه است. تهیه فهرست مصنوعی از هر زیرفهرست تفاوت‌های لرزه‌خیزی منطقه‌ای موجود در فهرست مشاهده‌ای را حفظ کرده و اعمال الگوریتم مونت کارلو 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 بفروئی، 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.
- 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

- 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 Monkarezi, 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.
- Weatherill, G. and Burton, P. W., 2010, An alternative
- Seismological Society of America, 89(4), 854-866.
- 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.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N. and Shabani, E., 2014,

- 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.
- 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