

## برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه برای ۸ شهر پرجمعیت ایران

سید حسن موسوی بفرولی<sup>۱\*</sup> و علیرضا بابائی ماهانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران  
<sup>۲</sup> شرکت مشاور ژئوفیزیک ماهان، بریتیش کلمبیا، کانادا

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲)

### چکیده

در این مقاله، برای هشت شهر اهواز، اصفهان، کرج، مشهد، قم، شیراز، تبریز و تهران با جمعیت بیش از یک میلیون نفر، برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه انجام شده است. ابتدا با بهره‌گیری از برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب تدوین شده و استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی تا انتهای سال ۲۰۱۸ در شعاع ۳۰۰ کیلومتری هریک از شهرها، پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به هرکدام تعیین شده است. از درخت منطقی برای استفاده از ۵ رابطه تضعیف جهانی و منطقه‌ای بور و همکاران (۲۰۱۴)، ادریس (۲۰۱۴)، کیل و همکاران (۲۰۱۵) و فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) با وزن برابر استفاده شده و منحنی‌های خطر برای بیشینه شتاب جنبش زمین و شتاب در پریودهای ۰/۱، ۰/۲ و ۱ ثانیه و شتاب طیفی هموار خطر زمین‌لرزه بر روی سنگ‌بستر (با سرعت موج برشی ۷۶۰ متر بر ثانیه) در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای هر شهر به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بیشترین خطر مربوط به شهرهای شیراز و تبریز و کمترین خطر مربوط به شهر اصفهان است. بیشینه شتاب جنبش زمین در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال برای هردو شهر به‌ترتیب،  $77 \text{ cm/s}^2$  و  $203 \text{ cm/s}^2$  و در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال برای شهر تبریز برابر  $535 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده و بیشینه شتاب جنبش زمین برای شهر اصفهان در شرایط ساختگاهی سنگ‌بستر برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به‌ترتیب  $29 \text{ cm/s}^2$ ،  $77 \text{ cm/s}^2$  و  $125 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده است. نتایج این مطالعه با نتایج کارهای سلحشور و همکاران (۲۰۱۸)، شهبازی و منصوری (۲۰۱۹) و موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳) مقایسه شده است. از مقایسه این نتایج به‌نظر می‌رسد راهکار مورد استفاده در برآورد خطر، بیشترین تأثیر را در مقادیر شتاب برآورد شده دارد.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد خطر زمین‌لرزه، جنبش نیرومند زمین، لرزه‌خیزی، ایران

## ۱ مقدمه

بیش از ۵۰ سال از معرفی روش کرنل (کرنل، ۱۹۶۸) که چارچوب ریاضی برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه (از این پس با PSHA معرفی می‌شود) را ارائه کرد، می‌گذرد. از آن زمان، تغییرات مختلفی در روش PSHA توسط چندین پژوهشگر ارائه شده است (مانند شی و همکاران، ۱۹۹۲؛ فرانکل، ۱۹۹۵؛ وو، ۱۹۹۶؛ کیجکو و گراهام، ۱۹۹۹؛ تسانگ و چندلر، ۲۰۰۶؛ وانگ، ۲۰۰۷) و چندین نرم‌افزار برای انجام PSHA توسعه داده شده است از جمله: FRISK، SEISRISK III، EqHaz، CRISIS، OpenQuake؛ که به ترتیب توسط: مک گوایر (۱۹۷۸)؛ بندر و پرکینس (۱۹۸۷)؛ آساتوریانس و اتکینسون (۲۰۱۳)؛ ارداز و همکاران (۲۰۱۳)؛ سیلوا و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است. با وجود برخی انتقادات به روش PSHA از طرف محققین (مانند کاستانوس و لومینتز، ۲۰۰۲ و مولارگیا و همکاران، ۲۰۱۷)، این روش به‌طور گسترده توسط سیاست‌گذاران در کاربردهای مختلف مانند الزامات ایمنی برای تأسیس نیروگاه‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (کلاگل، ۲۰۰۵؛ موسن و همکاران، ۲۰۰۵).

علاوه بر روش PSHA، دو روش دیگر تجربی-آماري (Empirical Statistical) و قطعی (Deterministic) نیز برای برآورد خطر زمین‌لرزه وجود دارد که در شرایط خاص از آنها استفاده می‌شود. روش تجربی-آماري ساده‌ترین روش برآورد خطر زمین‌لرزه است که در آن چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه تعیین نمی‌شوند. این روش مبتنی بر آمار زمین‌لرزه‌هاست و فرض بنیادی در این روش این است که زمین‌لرزه‌ها در مکان‌هایی اتفاق خواهند افتاد که قبلاً رخداد زمین‌لرزه را تجربه کرده است. بنابراین، رویداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگی قابل توجه در مکانی جدید، برآوردهای انجام‌شده قبلی را مختل خواهد کرد. در روش تجربی-آماري با استفاده از رابطه فراوانی-بزرگی

زمین‌لرزه‌ها و فرض پواسنی بودن رویدادها احتمال رویداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی‌های مختلف در مدت‌زمان موردنظر محاسبه می‌شود. در روش قطعی، از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، ابعاد آنها و ویژگی‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی آنها، به‌صورت منفرد برای برآورد بیشینه جنبش زمین در ساختگاه موردنظر استفاده می‌شود. این روش شامل چهار مرحله (۱) تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، (۲) تخمین بیشینه بزرگی زمین‌لرزه برای هر چشمه، (۳) استفاده از مناسب‌ترین رابطه تضعیف جنبش نیرومند زمین و (۴) برآورد خطر زمین‌لرزه در ساختگاه مورد نظر است. در این روش احتمال رویداد متناسب به چشمه‌ها تعیین نمی‌شود و نتایج به‌صورت قطعی ارائه می‌شود.

ایران به‌عنوان یکی از فعال‌ترین مناطق از نظر زلزله‌خیزی، تاریخچه مستند طولانی از زمین‌لرزه‌های بزرگ (برای مثال، بیش از ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگی  $Mw \geq 7$  از سال ۱۹۰۰ دارد (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲؛ میرزائی و همکاران، ۱۳۸۱؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ موسوی بفرولی و بابایی ماهانی، ۲۰۲۰). نزدیکی گسل‌های فعال به مناطق پرجمعیت، سطح قابل‌توجهی از خطر را برای بسیاری از مراکز شهری در ایران ایجاد می‌کند که در صورت همراه شدن با آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی، منجر به سطح بالایی از خطر و تلفات می‌شود (کواتا و همکاران، ۲۰۰۵؛ حاجی‌بابایی و همکاران، ۲۰۱۳؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۵). زمین‌لرزه ۱۹۹۰ رودبار-منجیل ( $Mw = 7.3$ ) و زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم ( $Mw = 6.6$ ) تنها دو نمونه از زمین‌لرزه‌های ویرانگر شهری در ایران هستند که جان ۸۰۰۰۰ نفر را گرفته است (بربریان و همکاران، ۱۹۹۲؛ بربریان، ۲۰۰۵). میزان بالای لرزه‌خیزی و وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در ایران به‌دلیل همگرایی قاره‌ای بین صفحات عربی و اوراسیا و تنوع

کرده‌اند (از این پس با MB2020 معرفی می‌شود) که فرصتی را برای بررسی پارامترهای لرزه‌خیزی و محاسبات خطر زمین‌لرزه در کشور را فراهم می‌کند. این کاتالوگ شامل ۱۷۱۲۳ زمین‌لرزه مستقل (پس از حذف رویدادهای وابسته) با بزرگی  $M_w$  بین ۲/۹ و ۸/۱ برای بازه زمانی بین قرن ۴ قبل از میلاد و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸ است. این کاتالوگ یک پیشرفت قابل توجه در مستندسازی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی در ایران از نظر تعداد رویدادها و در دسترس بودن مقیاس  $M_w$  برای رویدادهای کوچک‌تر در مقایسه با سایر کاتالوگ‌ها برای ایران است (به‌عنوان مثال: کریمی پریدری و همکاران، ۲۰۱۳؛ شاهوار و همکاران، ۲۰۱۳؛ موسوی‌بفروئی و همکاران، ۲۰۱۴؛ زارع و همکاران، ۲۰۱۴).

هدف این مقاله، ارائه نگاهی جدید به برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران با استفاده از داده‌های جدید در دسترس و راهکاری شبیه راهکارهای ارائه‌شده توسط فرانکل (۱۹۹۵) و وو (۱۹۹۶) است که در آنها چشمه‌های لرزه‌زا در اطراف ساختگاه موردنظر تعیین نمی‌شوند و فقط از اطلاعات زمین‌لرزه‌های رخ داده در اطراف آن برای برآورد احتمالاتی خطر استفاده می‌شود. در این کار که برای هشت شهر کشور با جمعیت بیش از ۱ میلیون نفر انجام شده است، از کد متلب که به‌منظور این مطالعه تدوین شده، استفاده شده است. از داده‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی برای تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی مربوط به هر شهر استفاده شده و سپس با استفاده از درخت منطقی و چهار رابطه تضعیف با وزن برابر، محاسبات PSHA انجام شده است.

## ۲ روش برآورد خطر زمین‌لرزه

روش سنتی PSHA شامل (۱) شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا، (۲) برآورد نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی‌های مشخص و فاصله تا ساختگاه موردنظر برای هر چشمه، (۳) انتخاب

زمین‌ساخت فعال فلات ایران مربوط می‌شود (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). کوتاه‌شدن و ضخیم‌شدن مداوم پوسته، با نرخ همگرایی کمتر از ۲ میلی‌متر در سال در ایران مرکزی تا بیشتر از ۲۵ میلی‌متر در سال در منطقه فرورانش مکران در جنوب شرقی ایران، به گسیختگی‌های معکوس و امتدادلغز متعدد در سراسر کشور تبدیل شده است (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ بربریان، ۲۰۱۴).

در خصوص برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران مطالعات زیادی انجام شده است. بربریان و مهاجر اشجعی (۱۹۷۷) و مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۷۸) برآورد قطعی خطر زمین‌لرزه را برای سطوح شدت انجام دادند. نمونه‌هایی از مطالعات بر پایه PSHA عبارت‌اند از: بزرگ‌نیا و مهاجر اشجعی (۱۹۸۲)، نوروزی و احمدی (۱۹۸۶)، توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹)، معین‌فر و همکاران (۲۰۰۰)، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۳)، یزدانی و کوثری (۲۰۱۳)، موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)، زارع (۲۰۱۷)، محصولی و همکاران (۲۰۱۸). جدیدترین نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه ایران توسط شهبازی و منصور (۲۰۱۹) منتشر شده است. کار آنها بر اساس یک مدل مبتنی بر رویداد شبکه‌ای از چشمه‌ها است که از ۴۷۴۰ زمین‌لرزه دستگاهی ثبت شده با بزرگی  $M_w \geq 5/4$  بین سالهای ۱۹۰۰ و ۲۰۱۷ استفاده می‌کند. علاوه بر این، پروژه مدل زمین‌لرزه خاورمیانه (از این پس با EMME معرفی می‌شود)، برآورد خطر زمین‌لرزه را برای ۱۱ کشور از جمله ایران ارائه می‌کند (سیستیان و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجا که پوسته فعال زیر فلات ایران هزاران رویداد را در هر سال ایجاد می‌کند، به‌روزرسانی منظم مطالعات PSHA با استفاده از داده‌های جدید برای برآورد روزآمد خطر و ارزیابی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله بسیار مهم است. اخیراً موسوی‌بفروئی و بابایی‌ماهانی (۲۰۲۰)؛ کاتالوگ به‌روز زمین‌لرزه‌های ایران را منتشر

تعداد بازه‌های فاصله  $NR$  را محاسبه می‌کند. همچنین در محاسبه  $\lambda$  اثر همه چشمه‌ها  $NS$  با یک جمع بر روی آنها در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه برای هشت شهر ایران با جمعیت بیش از یک میلیون نفر (اهواز، اصفهان، کرج، مشهد، قم، شیراز، تبریز و تهران) که مختصات مکانی و جمعیت این شهرها در جدول ۱ ارائه شده است با استفاده از محاسبات روش مرسوم احتمالاتی، برآورد خطر زمین‌لرزه انجام شده است. از آنجاکه در این مطالعه یکی از مراحل اصلی برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه یعنی تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه انجام نشده و فقط از اطلاعات زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی اطراف شهر استفاده شده است؛ می‌توان راهکار مورد استفاده را ترکیبی از روش‌های تجربی-آماري و احتمالاتی دانست. در بخش‌های بعد، هر یک از مراحل انجام کار توضیح داده شده و نتایج برای هر شهر ارائه شده است.

## ۱-۲ چشمه‌های لرزه‌زا

از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها شامل زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی در یک شعاع تعیین شده در اطراف هر شهر استفاده شده است. شکل ۱، لرزه‌خیزی را از کاتالوگ MB2020 در شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف تهران نشان می‌دهد. همین شعاع برای شهرهای دیگر هم اعمال شده است. فرض شده که زمین‌لرزه‌های با فواصل بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر سطح قابل توجهی از خطر را برای سایت‌های ما ایجاد نمی‌کند. بنابراین، برای برآورد خطر در هر شهر، یک چشمه دایره‌ای ( $i = 1$  در رابطه ۱) در نظر گرفته شده که پارامترهای لرزه‌خیزی برای آن بر اساس زمین‌لرزه‌های روی داده در آن تعیین شده است. همچنین در شکل ۱، موقعیت سایر شهرهای در نظر گرفته شده در این تحقیق و واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی بر اساس تقسیم‌بندی میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) نشان داده شده

معادلات مناسب پیش‌بینی جنبش زمین (از این پس با GMPE معرفی می‌شود) و (۴) محاسبه خطر است. کل فرایند محاسبات را می‌توان در دو رابطه (۱) و (۲) خلاصه کرد (به‌عنوان مثال: گرین و هال، ۱۹۹۴؛ کرامر، ۱۹۹۶؛ مک گوایر، ۲۰۰۴؛ استرلینگ، ۲۰۱۴):

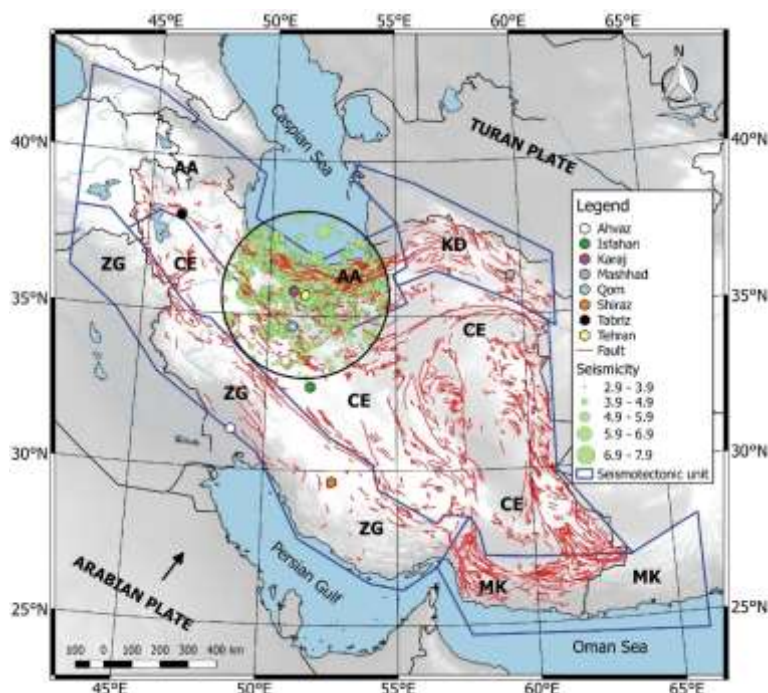
$$\lambda = \sum_{i=1}^{NS} v_i \sum_{j=1}^{NM} \sum_{k=1}^{NR} P[G > g | m_j, r_k] f_{M_i}(m_j) f_{R_i}(r_k) \Delta M \Delta R, \quad (1)$$

$$P_T = 1 - e^{-\lambda T}, \quad (2)$$

که در آنها  $\lambda$  نرخ سالیانه فزونی برای پارامتر جنبش زمین،  $G$ ، از یک مقدار آستانه (مثلاً  $100 \text{ cm/s}^2$ ) و  $P_T$  احتمال فزونی جنبش زمین در یک بازه زمانی محدود  $T$  (مثلاً ۵۰ سال) با فرض مدل پواسونی برای وقوع زمین‌لرزه است. در مدل پواسونی، وقوع هر زمین‌لرزه مستقل از وقوع حوادث دیگر در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، احتمال وقوع بیش از یک رویداد در یک دوره کوتاه ناچیز است (بیکر، ۲۰۱۳).  $\lambda$  (در نتیجه  $P_T$ ) معمولاً برای مقادیر آستانه مختلف محاسبه می‌شود که منجر به تولید یک منحنی خطر می‌شود که  $\lambda$  (یا  $P_T$ ) را به‌عنوان تابعی از  $\lambda$  نشان می‌دهد. روش دیگر برای نشان دادن خطر، تهیه طیف خطر یکنواخت (از این پس با UHS معرفی می‌شود) است که دامنه جنبش زمین را برای یک احتمال بیش از حد خاص (مثلاً ۱۰ درصد در ۵۰ سال یا دوره بازگشت ۴۷۵ سال) در مقابل دوره‌های ارتعاش برای سازه‌های با یک درجه آزادی ارائه می‌دهد. در رابطه (۱)،  $v_i$  نرخ فعالیت لرزه‌ای سالانه برای چشمه  $i$  است و  $P[G > g | m_j, r_k]$  احتمال فزونی جنبش زمین در ساختگاه موردنظر با توجه به وقوع رویداد با بزرگی  $m_j$  در فاصله  $r_k$  است.  $f_{M_i}(m_j)$  و  $f_{R_i}(r_k)$  توابع چگالی احتمال بزرگی و فاصله و  $\Delta M$  و  $\Delta R$  به ترتیب بازه‌های بزرگی و فاصله هستند. برای هر چشمه  $i$ ، رابطه (۱) مجموع احتمالات را بر روی تعداد بازه‌های بزرگی  $NM$  و

لرزه‌زمین‌ساختی AA و CE قرار می‌گیرند. در جدول ۱، مدت‌زمان کاتالوگ (بر حسب سال)، بزرگ‌ترین زمین‌لرزه و آخرین باری که زمین‌لرزه‌ای با  $M_w \geq 7$  در شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف هر شهر رخ داده، آمده است. برای تمام شهرهایی که در این مطالعه

است. در این تقسیم‌بندی، ایران به پنج واحد لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان (AA)، ایران مرکزی و شرق ایران (CE)، کپه داغ (KD)، مکران (MK) و زاگرس (ZG) تقسیم شده است. زمین‌لرزه‌هایی واقع در شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف تهران در واحدهای



شکل ۱. لرزه‌خیزی داخل دایره‌ای به شعاع ۳۰۰ کیلومتر اطراف تهران با استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های موسوی‌بفروئی و بابایی‌ماهانی (۲۰۲۰) به همراه موقعیت هشت شهر مورد نظر در این پژوهش و واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان (AA)، ایران مرکزی و شرق ایران (CE)، کپه داغ (KD)، مکران (MK) و زاگرس (ZG)، بر اساس تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) و گسل‌های نشان داده شده برگرفته از وب‌سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا.

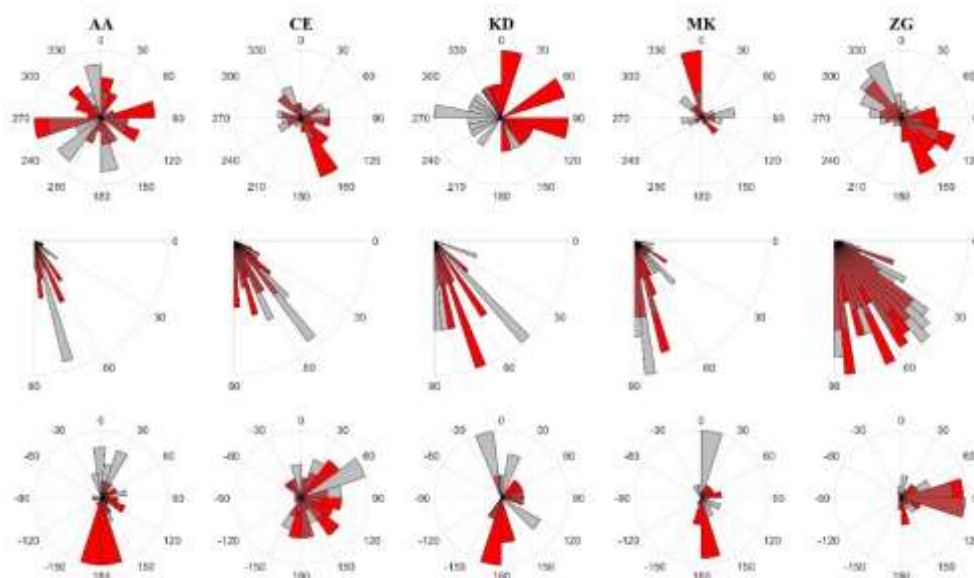
جدول ۱. اطلاعات لرزه‌خیزی شهرهای بالای ۱ میلیون نفر در ایران که در این مطالعه برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه برای آنها انجام شده است. جمعیت هر شهر از سرشماری ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران گرفته شده است (سالنامه آماری کشور ۱۳۹۵).  $a$  و  $b$ ، به ترتیب عرض‌ازمبدأ و شیب رابطه گوتنبرگ-ریشتر در رابطه ۳ و  $v$ ، نرخ رویداد سالیانه برای  $M_w \geq 5$  برای چشمه‌های لرزه‌ها اطراف هر شهر در شعاع ۳۰۰ کیلومتری را بیان می‌کند.

شهر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	جمعیت	بازه زمانی کاتالوگ به سال	بزرگ‌ترین زمین‌لرزه	زمان آخرین رویداد با بزرگی $M_w \geq 7$	$a$	$b$	$v$
اهواز	۳۱/۳۲	۴۸/۶۷	۱۱۸۴۷۸۸	۱۱۷۸	۷/۳	۱۹۰۹	۸/۶۰	۱/۶۱	۳/۴۲
اصفهان	۳۲/۶۵	۵۱/۶۷	۱۹۶۱۲۶۰	۱۲۷۵	۷/۳	۱۹۰۹	۷/۷۳	۱/۴۸	۲/۱۲
کرج	۳۵/۸۴	۵۰/۹۴	۱۶۱۵۲۱۸	۲۴۱۸	۷/۷	۱۹۹۰	۳/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۷
مشهد	۳۶/۲۶	۵۹/۶۲	۲۹۸۷۳۲۳	۲۰۲۸	۷/۶	۱۹۹۷	۳/۲۳	۰/۶۶	۰/۸۶
قم	۳۴/۶۴	۵۰/۸۷	۱۲۰۱۱۵۸	۲۴۱۸	۷/۷	۱۹۶۲	۴/۳۹	۰/۸۷	۱/۰۸
شیراز	۲۹/۵۹	۵۲/۵۸	۱۵۶۵۵۷۲	۱۰۴۰	۷/۱	۱۴۴۰	۸/۳	۱/۵۳	۴/۴۱
تبریز	۳۸/۱۰	۴۶/۲۷	۱۵۵۸۶۹۳	۱۸۷۹	۷/۷	۲۰۱۱	۴/۳۲	۰/۸۴	۱/۳۵

گشتاوری بین ۳/۷ و ۷/۶ را در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی نشان داده شده است که توسط مرکز لرزه‌نگاری ایران با وارون‌سازی تانسور ممان رویدادهای مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ فراهم شده است (از این پس با MTI IRSC معرفی می‌شود) (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹). شکل ۲ برای واحد لرزه‌زمین‌ساختی ZG، سازوکار معکوس واضحی در صفحات گسلی که در جهت شمال غربی- جنوب شرقی جهت گیری می‌کنند را نشان می‌دهد که با مشخصات گسل‌های اصلی در این منطقه سازگار است (شکل ۱). رویدادهای درون واحد لرزه‌زمین‌ساختی CE، طیفی از سازوکارها از امتداد لغز تا گسلش معکوس را نشان می‌دهند. برای واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی AA، KD و MK، سازوکار غالب امتداد لغز است.

گنجانده شده‌اند، حداقل ۱۰۰۰ سال داده زمین‌لرزه‌ای وجود دارد. علاوه بر این، تمام شهرها در تاریخ خود زمین‌لرزه بزرگ‌تر از  $M_w = 7$  را تجربه کرده‌اند و کوچک‌ترین بزرگی زمین‌لرزه در کاتالوگ ۲/۹ است که نزدیک به آستانه کامل بودن بزرگی‌ها در کاتالوگ MB2020 است.

با توجه به این که در روابط جدید تضعیف جنبش نیرومند زمین ضرایب مختلف برای انواع سازوکار کانونی در نظر گرفته شده است در این مطالعه برای هر یک از واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی سازوکار غالب تعیین شده و در محاسبات در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمودارهای گل سرخی امتداد، شیب و زاویه ریک برای هر دو صفحه سازوکار کانونی زمین‌لرزه با بزرگی



شکل ۲. نمودارهای گل سرخی ویژگی‌های دو صفحه گسل بر اساس داده‌های حل تانسور ممان زمین‌لرزه‌های ایران (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹)، به تفکیک واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان (AA)، ایران مرکزی و شرق ایران (CE)، کپه داغ (KD)، مکران (MK) و زاگرس (ZG)، بر اساس تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸). سطر بالا امتداد گسل، سطر وسط شیب گسل و سطر پایین زاویه ریک گسل را نشان می‌دهد. رنگ‌های تیره‌تر بیانگر همپوشانی داده‌هاست.

رخدادهای پوسته کم عمق با عمق کمتر از ۲۰ کیلومتر باشد. این با وجود یک لایه لرزه‌زا با ضخامت تقریبی ۱۵ کیلومتر که با مدل‌سازی شکل موج تعیین شده، همخوانی

شکل ۳-الف نمودار میله‌ای عمق زمین‌لرزه را در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی از مجموعه داده‌های MTI IRSC نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد بیشتر لرزه‌خیزی ایران ناشی از

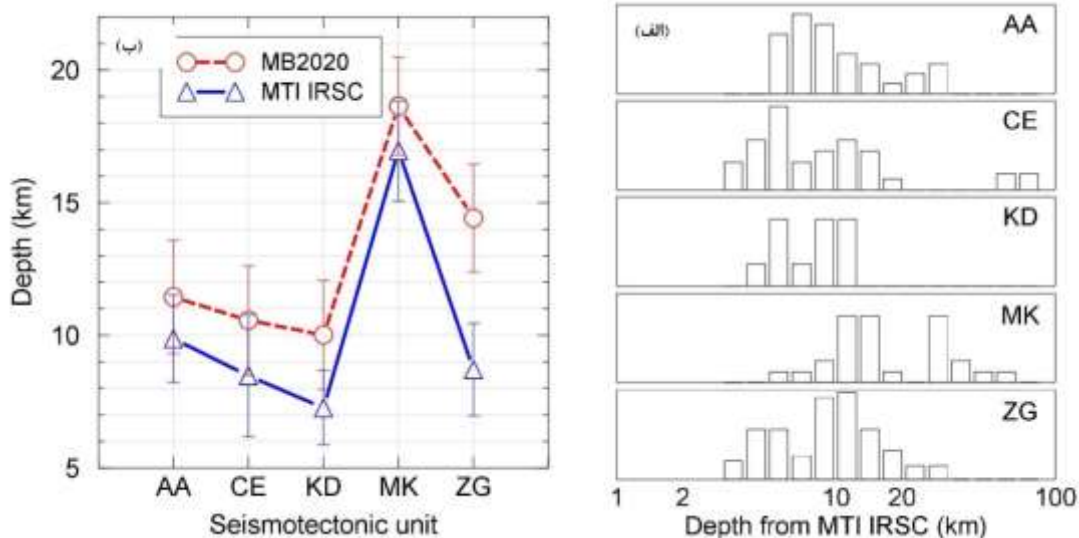
موسوی‌بفروئی و بابایی‌ماهانی (۲۰۲۰) نشان می‌دهد. هر دو منبع مقدار میانگین بزرگ‌تری را برای عمق رویدادها در واحد لرزه‌زمین‌ساختی MK در مقایسه با سایر واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی می‌دهند. اطلاعات به‌دست آمده در خصوص عمق رویدادها در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی در محاسبه فاصله نقاط مختلف چشمه از ساختگاه و در روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین استفاده شده است.

برای به‌دست آوردن نرخ فعالیت لرزه‌ای سالانه برای هر چشمه، از برازش داده‌های زمین‌لرزه‌ای با رابطه (۳)، توزیع فراوانی-بزرگی گوتنبرگ-ریشر استفاده شده است (گوتنبرگ و ریشر، ۱۹۴۲، ۱۹۴۴، ۱۹۵۶):

$$\log(N) = a - bm, \quad (3)$$

که در آن  $N$  تعداد تجمعی سالانه زمین‌لرزه‌هایی بزرگی بزرگ‌تر یا مساوی  $m$  است و  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که باید با استفاده از رویکرد حداقل مربعات معمولی تعیین شوند. رابطه گوتنبرگ-ریشر (رابطه ۳)، برای توزیع تجمعی فراوانی-بزرگی برای برازش داده‌های

دارد (جکسون و مکزی، ۱۹۸۸؛ هاتزفلد و همکاران، ۲۰۰۳؛ بربریان، ۲۰۱۴). لرزه‌خیزی در واحد لرزه‌زمین‌ساختی MK دامنه وسیع‌تری از اعماق را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از مناطق فرورانش است. رویدادهای سمت راست نمودار مربوط به واحد لرزه‌زمین‌ساختی CE جدا از بقیه عمق‌ها در این واحد، شبیه رویدادهایی با کانون‌های زمین‌لرزه نزدیک به واحد لرزه‌زمین‌ساختی MK هستند و عمق آنها بین ۵۵ تا ۸۵ کیلومتر است که به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از بقیه عمق‌ها در واحد لرزه‌زمین‌ساختی CE با عمق کمتر از ۲۰ کیلومتر است. وقوع این رویدادها در اعماق بیشتر احتمالاً از فرورفتن قطعه ناشی از فرورانش به سمت شمال مکران نشأت می‌گیرند که با عمق قطعه در شمال-شمال غربی واحد MK مطابقت دارد (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲). بدون در نظر گرفتن رویدادهای با عمق بیشتر از ۲۰ کیلومتر در واحد لرزه‌زمین‌ساختی CE، شکل ۳-ب مقادیر میانگین عمق را با استفاده از کاتالوگ‌های MTI IRSC و



شکل ۳. عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها. (الف) نمودار میله‌ای عمق زمین‌لرزه‌ها در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی بر اساس وارون‌سازی تانسور ممان (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹)، (ب) میانگین و انحراف معیار عمق زمین‌لرزه‌ها در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی بر اساس وارون‌سازی تانسور ممان (حسینی و همکاران، ۲۰۱۹)، (MTI IRSC) و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های موسوی‌بفروئی و بابایی‌ماهانی (۲۰۲۰). واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی البرز-آذربایجان (AA)، ایران مرکزی و شرق ایران (CE)، کپه داغ (KD)، مکران (MK) و زاگرس (ZG)، بر اساس تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸).

در اطراف هر شهر از سال ۱۹۲۵). احتمال این که بزرگی  $m_j$  نقطه میانی در بازه بزرگی بین  $m_j - \frac{\Delta M}{2}$  و  $m_j + \frac{\Delta M}{2}$  باشد از طریق  $f_M(m_j)\Delta M$  تعیین می شود که در آن  $\Delta M$  برابر  $\frac{m_{max}-m_0}{NM}$  است. شکل ۴-الف، خط گوتنبرگ-ریشتر (رابطه ۳) متناسب با توزیع بزرگی-فاصله زمین لرزه‌ها در شعاع ۳۰۰ کیلومتری هر شهر و احتمال وقوع برای هر بازه بزرگی ( $NM=30$ ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-الف و جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار  $b$  برای لرزه‌خیزی اطراف اهواز، شیراز و اصفهان بالاتر است، زیرا اکثر رویدادهای اطراف این شهرها در داخل واحد لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس رخ می‌دهد که دارای بالاترین مقدار  $b$  در بین تمام واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی در کشور است. این منجر به احتمال رویداد بزرگی کمتر برای این شهرها با افزایش بزرگی می‌شود که در شکل ۴-ب قابل مشاهده است. موارد دیگر که در شکل ۴ مشاهده می‌شود این است که  $m_{max}$  برای شهرهای اهواز، شیراز و اصفهان تقریباً ۶٫۵ است اما برای سایر شهرها بزرگ‌تر از ۷ است.

مربوط به رویدادهای بزرگ‌تر از  $M_w = 5$  استفاده شده است. علاوه بر این، اگرچه محدوده زمانی داده‌ها در اطراف هر شهر حداقل هزار سال است (جدول ۱)، برای اطمینان از دقت نتایج، تنها از داده‌هایی استفاده شده که پس از سال ۱۹۲۵ رخ داده است؛ به این دلیل که قبل از این زمان، آستانه کامل بودن داده‌ها بزرگ‌تر از مقدار در نظر گرفته شده در این مطالعه است و منظور کردن آنها منجر به دست کم گرفتن نرخ رویداد سالانه می‌شود (موسوی بفرولی و بابایی ماهانی، ۲۰۲۰). بنابراین، نرخ فعالیت لرزه‌ای سالانه  $v_i$  در معادله ۱ برای چشمه  $i$  (محدوده ۳۰۰ کیلومتری اطراف هر شهر) از طریق رابطه (۳) به دست می‌آید. جدول ۱، مقادیر  $a$ ،  $b$  و  $U$  برای چشمه‌های لرزه‌ای اطراف هر شهر را نشان می‌دهد.

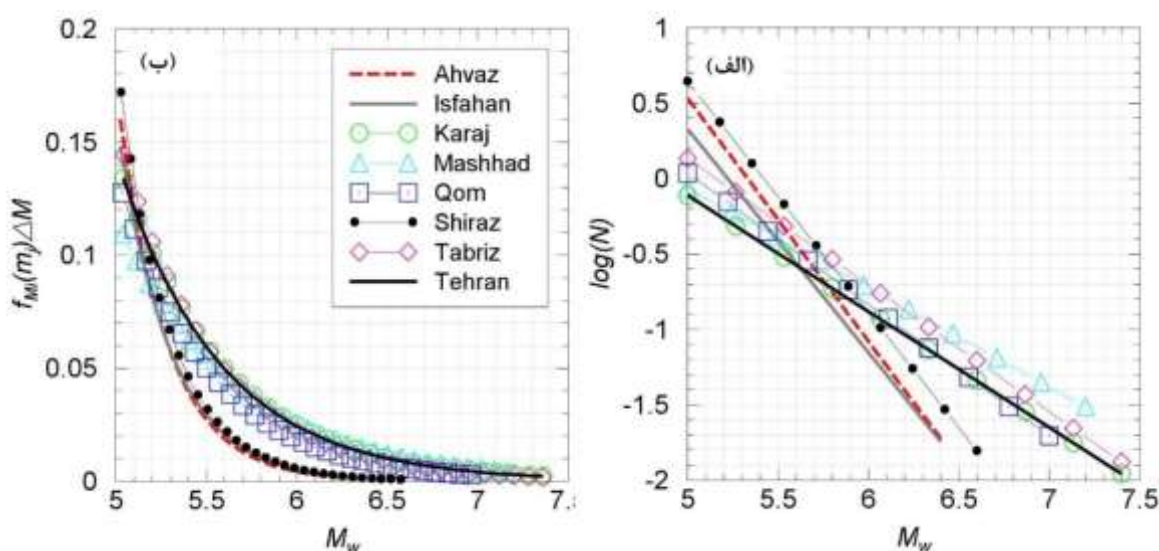
تابع توزیع احتمال برای بزرگی با رابطه (۴) محاسبه

$f_M(m_j) =$  (کرامر، ۱۹۹۶):

$$\frac{\beta e^{-\beta(m_j-m_0)}}{1-e^{-\beta(m_{max}-m_0)}} \quad (4)$$

که در آن  $\beta = b \times \ln(10)$  و  $m_{max}$  از کاتالوگ

MB2020 به دست آمده است (بیشینه بزرگی زمین لرزه



شکل ۴. (الف) خط برازش شده گوتنبرگ-ریشتر با داده‌های زمین لرزه‌های داخل دایره به شعاع ۳۰۰ کیلومتر اطراف هریک از شهرهای مورد مطالعه، که در آن  $N$ ، فراوانی تجمعی رویداد سالیانه زمین لرزه است. (ب) احتمال رویداد  $f_M(m_j)\Delta M$  در رابطه ۱ برای هر بازه بزرگی.

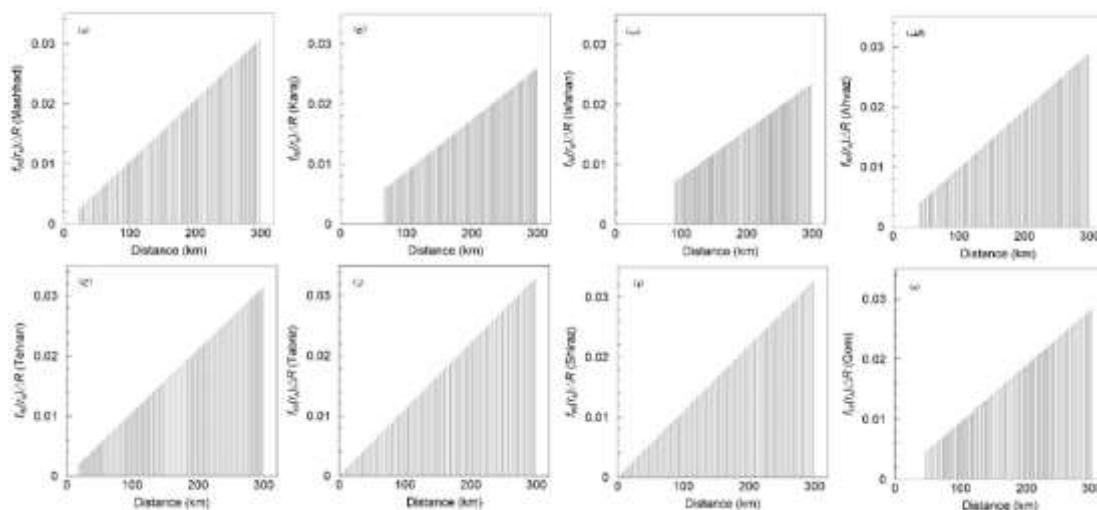


۲-۲ انتخاب رابطه تضعیف جنبش نیرومند زمین در این پژوهش از چهار رابطه پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین (GMPE) استفاده شده است؛ بور و همکاران (۲۰۱۴؛ B14)، ادیس (۲۰۱۴؛ I14)، کیل و همکاران (۲۰۱۵؛ K15) و فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹؛ F19). روابط B14 و I14 هر دو از جمله روابط تضعیفی هستند که در پروژه نسل جدید روابط پیش‌بینی با استفاده از داده‌های جهانی از جمله ایران، برای زمین‌لرزه‌های پوسته کم عمق در مناطق تکتونیکی فعال به‌دست آمده‌اند (بزرگ‌نیا و همکاران، ۲۰۱۴)؛ رابطه K15 برای ایران و ترکیه با استفاده از مجموعه داده‌های جنبش نیرومند زمین در پروژه EMME به‌دست آمده و رابطه F19 با استفاده از داده‌های جنبش نیرومند زمین ایران به‌دست آمده است (فرج‌پور و همکاران، ۲۰۱۸). همه روابط تضعیف مورد استفاده در اینجا ضرایب مختلفی را برای نوع گسل (معکوس، امتداد لغز، نرمال و مایل) را ارائه می‌دهند. بر اساس سازوکار غالب در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی

برای مدل‌سازی احتمال وقوع برای هر فاصله چشمه تا ساختگاه، فرض می‌شود که احتمال وقوع زمین‌لرزه در هر نقطه از شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف هر شهر به یک اندازه است. رابطه (۵) به‌عنوان تابع توزیع احتمال برای فاصله استفاده شده است (بیکر، ۲۰۱۳):

$$f_R(r_k) = \begin{cases} \frac{2r_k}{300^2} & \text{if } 0 \leq r_k < 300 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $r_k$  نقطه میانی در بازه فاصله بین  $r_k - \frac{\Delta R}{2}$  و  $r_k + \frac{\Delta R}{2}$  است. فاصله  $\Delta R$  با رابطه  $(r_{max} - r_0) / NR$  محاسبه می‌شود که  $r_0$  و  $r_{max}$  به ترتیب حداکثر فاصله (۳۰۰ کیلومتر) و حداقل فاصله چشمه تا ساختگاه هستند. در نهایت، احتمال این که فاصله  $r_k$  در بازه مربوطه باشد از طریق  $f_R(r_k) \Delta R$  تعیین می‌شود (رابطه ۱). شکل ۵ احتمال وقوع را برای هر بازه فاصله ( $NR=60$ ) نشان می‌دهد. رویدادها در مقایسه با سایر شهرها در فاصله کمتری از شهرهای شیراز، تبریز و تهران رخ می‌دهند. برای اصفهان، نزدیک‌ترین رویداد در فاصله ۹۰ کیلومتری رخ می‌دهد.



شکل ۵. احتمال رویداد  $f_R(r_k) \Delta R$  در رابطه ۱ از لرزه‌خیزی درون هر بازه فاصله برای هریک از ۸ شهر مورد مطالعه. (الف) اهواز (ب) اصفهان (ج) کرج (د) مشهد (ه) قم (و) شیراز (ز) تبریز (ح) تهران.

گسل بر روی افق ( $R_{jb}$ ) است. در جدول ۲ محدوده کاربرد این روابط تضعیف را از نظر برش، بزرگی، فاصله و سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالای ستون خاک ( $V_{S30}$ ) خلاصه شده است. از آنجایی که معیار فاصله چشمه تا سایت مورد استفاده در این محاسبات، فاصله کانونی ( $R_{epi}$ ) است، مقادیر  $R_{epi}$  به معیارهای فاصله مناسب در روابط تضعیف ( $R_{jb}$  و  $R_{epi}$ ) تبدیل شده است. مطالعات متعددی در مورد تبدیل‌های معیار فاصله بین چشمه و ساختگاه انجام شده است (به‌عنوان مثال، چربام و همکاران، ۲۰۰۴)؛ اما در این مطالعه، از منطق ساده و عملیاتی پیشنهاد شده توسط اتکینسون (اتکینسون، ۲۰۱۲) برای یک گسلش امتدادلغز قائم استفاده شده است. ابتدا، طول ( $L$ ) و عرض ( $W$ ) گسل را بر اساس بزرگی زمین‌لرزه با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط ولز و کوپراسمیت، روابط (۶) و (۷) تعیین شده است (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴):

$$L = 10^{(-2/44+0/59M_w)} \quad (6)$$

$$W = 10^{(-1/01+0/32M_w)} \quad (7)$$

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از ضرایب سازوکار امتداد لغز برای برآورد خطر شهرهای تهران، تبریز، کرج، قم، مشهد و اصفهان که در واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی AA، CE، KD و MK قرار گرفته‌اند استفاده شده و از ضرایب برای گسلش معکوس برای برآورد خطر شهرهای شیراز و اهواز که در واحد لرزه‌زمین‌ساختی ZG قرار گرفته‌اند استفاده شده است. هر دو رابطه B14 و K15 شامل ضرایب خاص منطقه هستند. رابطه B14 شامل ضرایب برای سه گروه (۱) کالیفرنیا، نیوزلند و تایوان، (۲) چین و ترکیه و (۳) ایتالیا و ژاپن است و رابطه K15 شامل ضرایب برای ترکیه و ایران است. در اینجا از رابطه B14 بدون در نظر گرفتن ضریب منطقه خاصی استفاده شده و از ضرایب ایران در رابطه K15 استفاده شده است.

معیارهای فاصله بین چشمه و ساختگاه به‌صورت متفاوت در این روابط تضعیف استفاده شده است. معیار فاصله در روابط I14 و F19 نزدیک‌ترین فاصله ساختگاه از صفحه گسیختگی ( $R_{rup}$ ) است و در روابط B14 و K15 معیار فاصله، نزدیک‌ترین فاصله به تصویر صفحه

جدول ۲. ویژگی‌های روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین مورد استفاده در این مطالعه،  $V_{S30}$  (m/s)، سرعت متوسط موج برشی در ۳۰ متر بالایی خاک بر حسب متر بر ثانیه؛ PGA، PGV، PSA به ترتیب، بیشینه شتاب، بیشینه سرعت و شتاب طیفی؛  $R_{jb}$ ، نزدیک‌ترین فاصله به تصویر صفحه گسلش بر روی زمین و  $R_{rup}$ ، نزدیک‌ترین فاصله به صفحه را بیان می‌کند.

$V_{S30}$ (m/s)	بازه فاصله بر حسب کیلومتر و نوع آن	$M_w$ بازه بزرگی	پارامتر جنبش نیرومند زمین و مربوطه	رابطه تضعیف
۱۵۰ تا ۱۵۰۰	$R_{jb}$ ۰/۱ تا ۴۰۰	۳/۰ تا ۸/۵	PGA, PGV, PSA ۰/۰۱ تا ۱۰	بور و همکاران، ۲۰۱۴
۴۵۰ تا ۲۰۰۰	$R_{rup}$ ۰/۱ تا ۱۵۰	۵/۰ تا ۷/۹	PGA, PSA ۱۰ تا ۰/۰۲	ادریس، ۲۰۱۴
۱۵۰ تا ۱۲۰۰	$R_{jb}$ ۱ تا ۲۰۰	۴/۰ تا ۸/۰	PGA, PGV, PSA ۴ تا ۰/۰۱	کیل و همکاران، ۲۰۱۵
۱۵۰ تا ۱۵۰۰	$R_{rup}$ ۱ تا ۴۰۰	۴/۸ تا ۷/۵	PGA, PSA ۴ تا ۰/۰۴	فرچ‌پور و همکاران، ۲۰۱۹

که در آن  $D_{surf}$  برابر  $R_{jb}$  در روابط تضعیف B14 و K15 در نظر گرفته شده است. برای تخمین  $R_{rup}$  به عمق بالای گسیختگی ( $Z_{TOR}$ ) نیاز است که با رابطه زیر تعیین می‌شود:

سپس با استفاده از رابطه (۸) مقدار متوسط برای نزدیک‌ترین فاصله یک ساختگاه تا تصویر خط گسل بر روی افق به دست آمده است (اتکینسون، ۲۰۱۲):

$$(8) D_{surf} = \max\{(R_{epi} - 0/3 \times L) \cdot 0.1\}$$

نظر گرفته شده است. همچنین گسلش امتداد لغز با زاویه شیب ۹۰ درجه برای واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی AA، CE، KD و MK و گسلش معکوس با زاویه شیب ۴۵ درجه برای واحد لرزه‌زمین‌ساختی ZG در نظر گرفته شده است.

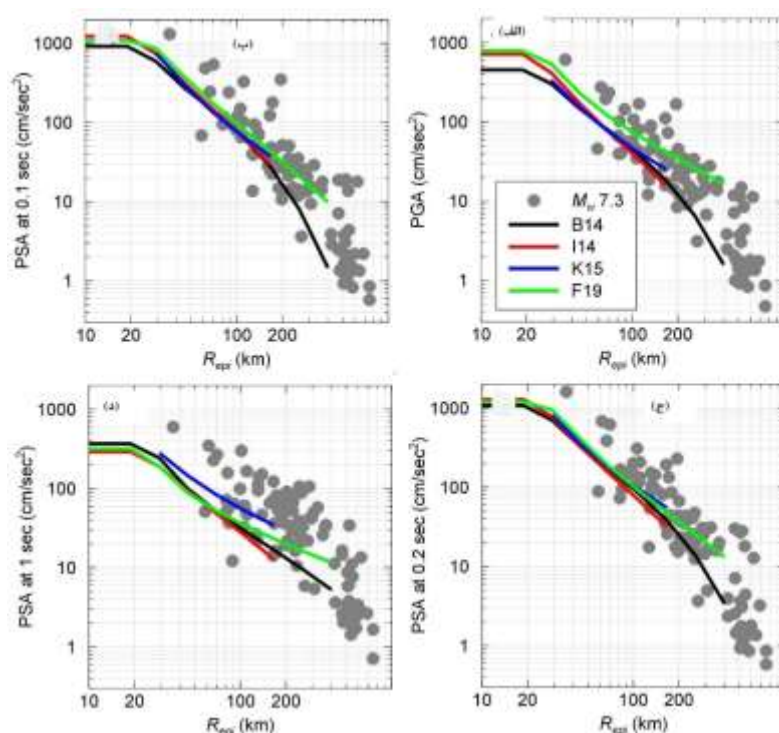
شکل ۶ دامنه‌های جنبش نیرومند زمین برآورد شده، بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (PSA) در پریودهای ۰/۱، ۰/۲ و ۱/۰ ثانیه برای شرایط سنگ‌بستر I14، B14، با استفاده از روابط تضعیف I14، K15 و F19 در مقابل  $R_{epi}$  را نشان می‌دهد. مقادیر، بر اساس محدوده فاصله قابل استفاده در روابط تضعیف همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده، رسم شده است.

$$Z_{TOR} = h - 0/5W \quad (9)$$

که در آن  $h$  عمق کانونی است. بنابراین،  $R_{rup}$  با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$R_{rup} = \sqrt{D_{surf}^2 + Z_{TOR}^2} \quad (10)$$

به دو دلیل به عمق کانونی زمین‌لرزه نیاز است؛ دلیل اول محاسبه  $R_{rup}$  برای روابط I14 و F19 و دلیل دوم همبستگی عمق کانونی و شیب صفحه گسل در رابطه F19 است. بر اساس موقعیت شهرها، از مقدار میانگین عمق زمین‌لرزه‌ها در هر واحد لرزه‌زمین‌ساختی استفاده شده است (داده‌های MTI IRSC؛ شکل ۳-ب)؛ بر این اساس، برای واحد AA عمق ۱۰ کیلومتر، برای واحد CE عمق ۸ کیلومتر، برای واحد KD عمق ۷ کیلومتر، برای واحد MK عمق ۱۷ کیلومتر و برای واحد ZG عمق ۹ کیلومتر در



شکل ۶. مقادیر برآورد شده از (الف) بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (PSA) (ب) در پریود ۰/۱ ثانیه (ج) در پریود ۰/۲ ثانیه (د) در پریود ۱ ثانیه همگی بر حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، با استفاده از روابط تضعیف جنبش نیرومند زمین؛ بور و همکاران (B14؛ ۲۰۱۴)، ادریس (I14؛ ۲۰۱۴)، کیل و همکاران (K15؛ ۲۰۱۵) و فرج‌پور و همکاران (F19؛ ۲۰۱۹)، برای شرایط ساختگاه سنگ‌بستر در مقایسه با جنبش‌های نیرومند ثبت شده از زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ کرمانشاه  $M_W = ۳/۷$  فاصله از رومرکز زمین‌لرزه است. داده‌های زمین‌لرزه کرمانشاه برگرفته از کار بابایی‌ماهانی و کاظمیان (۲۰۱۸).

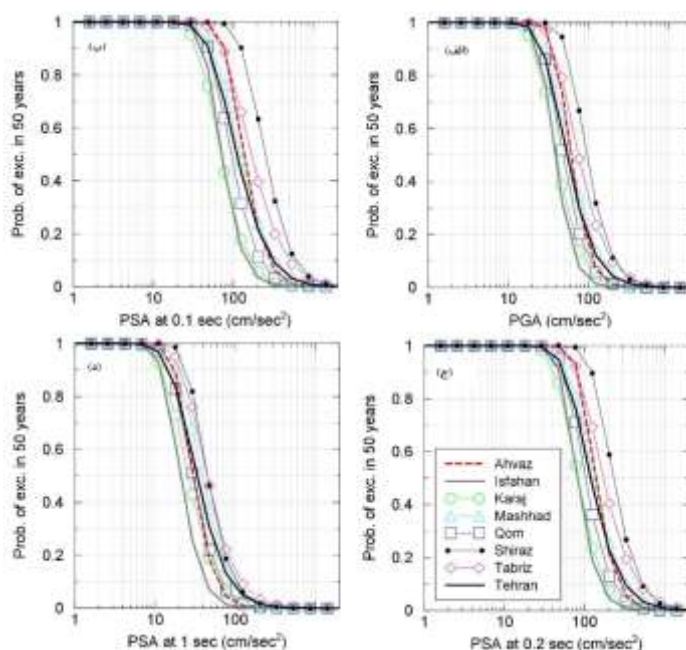
انحراف معیار از مقدار میانگین برای هر رابطه تضعیف محاسبه می‌شود. خطر کلی ارائه شده برابر مجموع وزنی هر سناریوی رابطه تضعیف است. در اینجا منحنی خطر برای شرایط سنگ‌بستر برای PGA و PSA در پیرودهای ۰/۰۴، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۱/۰ و ۳/۰ ثانیه ارائه شده است. علاوه بر این، UHS برای سه دوره بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای هر یک از ۸ شهر نشان داده شده است.

شکل ۷ منحنی‌های خطر میانگین را نشان می‌دهد که احتمال فزونی جنبش زمین ( $P_T$  در رابطه ۲) در ۵۰ سال برای PGA و PSA در پیرودهای ۰/۱، ۰/۲ و ۱/۰ ثانیه است و شکل ۸ طیف خطر یکنواخت UHS را برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال را نشان می‌دهد. هردو شکل، نتایج را برای هر شهر و جنبش زمین روی سنگ‌بستر ( $V_{S30} = 760 \text{ m/s}$ ) را نشان می‌دهند. در مجموع به نظر می‌رسد بالاترین سطح خطر مربوط به شهرهای شیراز و تبریز باشد. برای دوره بازگشت ۵۰ سال، بیشینه شتاب جنبش زمین در شهرهای شیراز و تبریز با  $77 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده است؛ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال نیز بیشینه شتاب جنبش زمین به‌طور مساوی در شهرهای شیراز و تبریز با  $203 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده و برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، بیشینه شتاب جنبش زمین در تبریز با  $535 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده است. توجه داشته باشید که نتایج ارائه شده برای دامنه‌های جنبش زمین در شرایط ساختمانی سنگ‌بستر است که تأثیر شرایط ساختمانی محلی متفاوت از سنگ‌بستر را در نظر نمی‌گیرد. در مجموع به نظر می‌رسد شهر اصفهان کمترین دامنه جنبش زمین را به‌ویژه برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در تمامی پیرودها را تجربه می‌کند. برای ساختمانهای واقع در مرکز کشور و دور از گسل‌های فعال (شکل ۱)، شتاب‌های نسبتاً کم در مقایسه با سایر شهرها پیش‌بینی می‌شود.

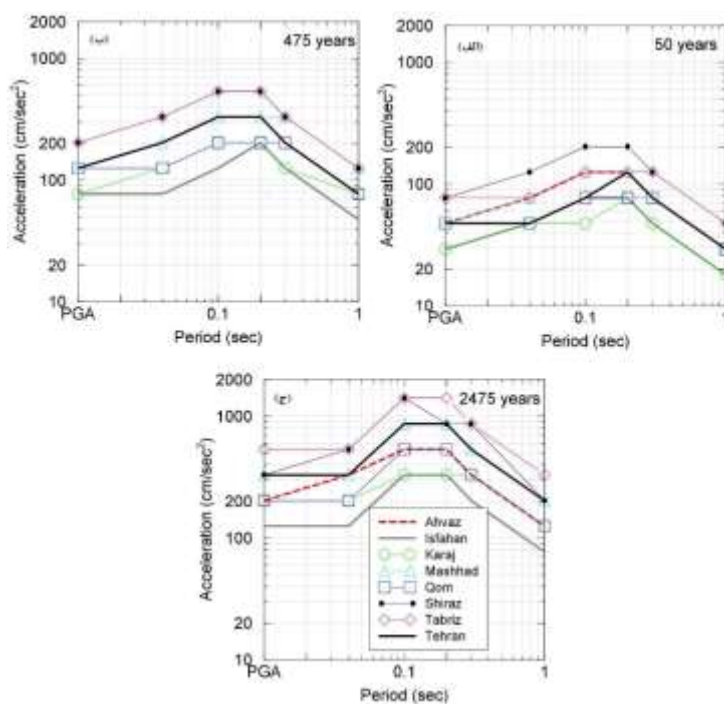
همچنین حرکات زمین ثبت شده از زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ کرمانشاه در غرب ایران با  $M_W = 3.7$  از مجموعه داده بابایی ماهانی و کاظمیان (۲۰۱۸) ترسیم شده است. برای این زمین‌لرزه که در واحد لرزه‌زمین‌ساختی ZG روی داده، عمق ۹ کیلومتر و سازوکار گسلش معکوس با زاویه شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. تطابق خوبی بین حرکات مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده با روابط تضعیف مختلف وجود دارد. در پیرو ۱ ثانیه، به دلیل شرایط ساختمانی متفاوت با سنگ‌بستر، حرکات زمین به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از مقادیر برآورد شده با روابط تضعیف است. تقویت خطی دامنه‌های حرکات زمین به‌ویژه در ایستگاه‌های دارای شرایط خاک نرم بویژه در فواصل بزرگ‌تر از ۱۰۰ کیلومتر، در طی وقوع این زمین‌لرزه مشاهده شده است (بابایی ماهانی و کاظمیان، ۲۰۱۸).

### ۳-۲ محاسبات خطر زمینلرزه

محاسبه خطر شامل حل عددی معادلات ۱ و ۲ و تولید منحنی‌های خطر برای PGA و PSA در پیرودهای مختلف است. یک عامل تأثیر گذار مهم در محاسبات خطر، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی است که تأثیر قابل توجهی بر نتایج دارد؛ از جمله تأثیری که در تغییر دامنه‌های جنبش زمین در اثر رویداد بزرگ‌ترین زمین‌لرزه ممکن در یک ناحیه لرزه‌زا دارد. رویکردی که به‌طور گسترده برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های شناختی (عدم قطعیت‌های ناشی از عدم آگاهی ما در مورد یک پدیده) استفاده می‌شود استفاده از درخت منطقی است. در اینجا عدم قطعیت‌های شناختی مرتبط با تغییر دامنه‌های جنبش زمین ناشی از چهار رابطه تضعیف توصیف شده در بخش ۲-۲، از طریق وزن‌دهی برابر (۰,۲۵) در درخت منطقی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که عدم قطعیت تصادفی برای دامنه‌های جنبش زمین از طریق تعداد



شکل ۷. منحنی‌های خطر، احتمال فزونی در ۵۰ سال برای (الف) بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (PSA) (ب) در پریود ۰٫۱ ثانیه (ج) در پریود ۰٫۲ ثانیه (د) در پریود ۱ ثانیه همگی بر حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه بر روی سنگ‌بستر برای هریک از ۸ شهر مورد مطالعه.



شکل ۸. طیف خطر یکنواخت (UHS) برای دوره‌های بازگشت (الف) ۵۰ سال (ب) ۴۷۵ سال و (ج) ۲۴۷۵ سال بر روی سنگ‌بستر برای هریک از ۸ شهر مورد مطالعه. PGA بیشینه شتاب جنبش زمین است.

## ۳ نتایج

در این مطالعه به برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه (PSHA) در ایران با توجه به داده‌های جدید نگاه شده است و راهکار مورد استفاده شبیه راهکارهای ارائه شده توسط فرانکل (۱۹۹۵) و وو (۱۹۹۶) است که در آنها چشمه‌های لرزه‌زا در اطراف ساختگاه مورد نظر تعیین نمی‌شوند و فقط از اطلاعات زمین‌لرزه‌های رخ داده در اطراف آن برای برآورد احتمالاتی خطر استفاده می‌شود. به‌طور خاص، از کاتالوگ جامع زمین‌لرزه‌های اخیر موسوی بفرولی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰) برای محاسبه PSHA در هشت شهر با جمعیت بیش از یک میلیون نفر (اهواز، اصفهان، کرج، مشهد، قم، شیراز، تبریز و تهران) استفاده شده است. با استفاده از کد متلب که برای انجام این تحقیق تدوین شده است، اطلاعات زمین‌لرزه‌ها در شعاع ۳۰۰ کیلومتری اطراف هر شهر در نظر گرفته شده و پارامترهای لرزه‌خیزی به دست آمده است. منحنی خطر و طیف خطر یکنواخت را برای بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) و شتاب طیفی (PSA) در پریودهای ۰/۱، ۰/۰۴، ۰/۳، ۰/۲، ۱/۰ و ۳/۰ ثانیه برای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال ارائه شده است. برای محاسبات خطر، از چهار رابطه پیش‌بینی جنبش زمین؛ بور و همکاران (۲۰۱۴)، ادیس (۲۰۱۴)، کیل و همکاران (۲۰۱۵) و فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) با وزن‌های مساوی استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشینه شتاب جنبش زمین مربوط به شهرهای شیراز و تبریز است که در شرایط ساختگاهی سنگ‌بستر برای هر دو شهر برای دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال به ترتیب  $77 \text{ cm/s}^2$  و  $203 \text{ cm/s}^2$  و برای شهر تبریز برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال  $535 \text{ cm/s}^2$  برآورد شده است و همچنین کمترین خطر زمین‌لرزه در بین این ۸ شهر برای شهر اصفهان تعیین شده است. بیشینه شتاب جنبش زمین برای شهر اصفهان در شرایط ساختگاهی سنگ‌بستر برای دوره‌های بازگشت ۵۰،

۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب  $29 \text{ cm/s}^2$ ،  $77 \text{ cm/s}^2$  و  $\text{cm/s}^2$  ۱۲۵ برآورد شده است.

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با کارهای قبلی، از مقادیر مربوط به بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) بر روی سنگ‌بستر برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در کارهای موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳)، سلحشور و همکاران (۲۰۱۸) و شهبازی و منصوری (۲۰۱۹) استفاده شده است. در مواردی که مقادیر PGA مربوط به مختصات مورد نظر در هریک از ۸ شهر به‌طور دقیق ارائه نشده است با ژئورفرنس کردن نقشه‌های ارائه شده، مقدار PGA در هر شهر به‌صورت بازه تعیین شده و نتایج در جدول ۳ آمده است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که نتایج این مطالعه با نتایج کارهای سلحشور و همکاران (۲۰۱۸) و شهبازی و منصوری (۲۰۱۹) که به ترتیب از روش بیزین (Bayesian approach) و روش مونت کارلو (Monte-Carlo method) استفاده کرده‌اند، نزدیک‌تر است و نسبت به کار موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳) که در آن از روش احتمالاتی اصلاح شده استفاده شده، مقادیر شتاب کمتری برآورد شده است. از مقایسه این نتایج به نظر می‌رسد که راهکار مورد استفاده در برآورد خطر، بیشترین تأثیر در مقادیر شتاب برآورد شده دارد. در راهکار مورد استفاده در این مطالعه و کارهای سلحشور و همکاران (۲۰۱۸) و شهبازی و منصوری (۲۰۱۹)، تنها از داده‌های کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها جهت تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی استفاده شده و با استفاده از روابط تضعیف، برآورد خطر انجام شده است در حالی که در کار موسوی بفرولی و همکاران (۱۳۹۳) علاوه بر استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها از شواهد زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و دیگر اطلاعات لرزه‌زمین‌ساختی نیز برای تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و پارامترهای لرزه‌خیزی آنها استفاده شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات قبلی. مقادیر مربوط به بیشینه شتاب جنبش زمین (PGA) بر روی سنگ‌بستر برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال برای هریک از ۸ شهر مورد مطالعه، همگی بر حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه. مقادیری که از نقشه استخراج شده، به صورت یک بازه ارائه شده است.

شهر	مطالعه حاضر	شهبازی و منصوری (۲۰۱۹)	سلحشور و همکاران (۲۰۱۸)	موسوی‌بفروئی و همکاران (۱۳۹۳)
اهواز	۱۱۵	۱۰۰-۱۵۰	۳۵-۶۰	۲۶۰
اصفهان	۷۷	۵۰-۱۰۰	۴۶	۱۱۲
کرج	۸۷	۱۰۰-۱۵۰	۶۰-۱۰۰	۲۵۰
مشهد	۱۲۵	۱۰۰-۱۵۰	۱۰۰-۱۶۵	۲۳۱
قم	۱۱۸	۱۵۰-۲۰۰	۱۰۰-۱۶۵	۱۷۵
شیراز	۲۰۳	۲۰۰-۲۵۰	۱۰۰-۱۶۵	۳۰۵
تبریز	۲۰۳	۲۰۰-۲۵۰	۱۳۸	۳۵۴

احتمالاتی مرسوم برآورد می‌کند.

## ۵ منابع

مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷، سالنامه آماری ایران - ۱۳۹۵:

انتشارات دفتر ریاست، روابط عمومی و همکاری‌های

بین الملل، تهران، ۹۳۵ص.

موسوی‌بفروئی، 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(۴)، ۱۵-۳۸.

میرزائی، ن.، قیطانچی، م. ر.، ناصریه، س.، رئیسی، م.،

ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱. پارامترهای مبنایی

زمین‌لرزه‌های ایران: تهران، انتشارات دانش‌نگار، ۱۸۴

ص.

Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, A history of Persian earthquakes: Cambridge University Press, Cambridge, 240 pages.

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**, 516-524.

Babaie Mahani, A., and Kazemian, J., 2018, Strong ground motion from the November 12, 2017, M 7.3 Kermanshah earthquake in western Iran: Journal of Seismology **22**, 1339-1358.

Baker, J. W., 2013, Introduction to probabilistic

اگرچه راهکار به کار گرفته شده با روش احتمالاتی انطباق کامل ندارد، به نظر نگارندگان و در مقایسه با کارهای کم‌ویش مشابه انجام‌شده در مطالعات پیشین در جاهای دیگر دنیا (برای دوری از مشکلات تعیین چشمه براساس شواهد زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساختی)، نتایج برای کاربرد در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در شهرهای هدف قابل قبول است و این راهکار برای مکان‌هایی که شواهد زمین‌شناسی و داده‌های زمین‌لرزه‌ای کافی در دسترس نیست، می‌تواند جایگزین روش احتمالاتی مرسوم شود. این نتیجه‌گیری با نتیجه حاصل از مطالعه بیووال و همکاران (۲۰۰۶) که به منظور مقایسه نتایج برآورد احتمالاتی خطر زمین‌لرزه از راهکار مرسوم با در نظر گرفتن مدل چشمه‌ها (کرنل، ۱۹۶۸) و راهکار هموارسازی (smoothing method) بدون در نظر گرفتن مدل چشمه‌ها (وو، ۱۹۹۶) مطابقت دارد. بیووال و همکاران (۲۰۰۶) که مقادیر حاصل از برآورد احتمالاتی خطر در فرانسه با استفاده از دو راهکار را مقایسه کردند به این نتیجه رسیدند که راهکار وو (۱۹۹۶) که در آن چشمه‌ها مدل نمی‌شوند و فقط از اطلاعات زمین‌لرزه‌های منطقه استفاده می‌شود، فقط برای مناطق با سطح خطر پایین و متوسط مناسب است و این راهکار برای مناطق با سطح خطر بالا، مقادیر خطر پایین‌تری نسبت به راهکار

- Baltay, A., Boore, D. M., Campbell, K. W., Chiou, B. S. J., Darragh, R., Day, S., Donahue, J., Graves, R. W., Gregor, N., Hanks, T., Idriss, I. M., Kamai, R., Kishida, T., Kottke, A., Mahin, S. A., Rezaeian, S., Rowshandel, B., Seyhan, E., Shahi, S., Shantz, T., Silva, W., Spudich, P., Stewart, K. P., Watson-Lamprey, J., Wooddell, K., and Youngs, R., 2014, NGA-West2 Research Project: Earthquake Spectra **30**, 973-987.
- Byrne, D. E., Sykes, L. R., and Davis, D. M., 1992, Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone: *J. Geophys. Res.* **97**, 449-478.
- Castaños, H., and Lomnitz, C., 2002, PSHA: is it science?: *Engineering Geology* **66**, 315-317.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: *Bulletin of Seismological Society of America*: **58**, 1583-1606.
- Farajpour, Z., Zare, M., Pezeshk, S., Ansari, A., and Farzanegan, E., 2018, Near-source strong motion database catalog of Iran: *Arab. J. Geosci.* **11**, article 80, <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3413-x>
- Farajpour, Z., Pezeshk, S., and Zare, M., 2019, A new empirical ground-motion model for Iran: *Bulletin of Seismological Society of America* **109**, 732-744.
- Frankel, A., 1995, Mapping seismic hazard in the central and eastern United States: *Seismological Research Letters* **66**, 8-21.
- Ghodrati Amiri, G., Motamed, R., and Rabet Es-haghi, H., 2003, Seismic hazard assessment of metropolitan Tehran, Iran: *Journal of Earthquake Engineering* **7**, 347-372.
- Green, A. R., and Hall, W. J., 1994, An overview of selected seismic hazard analysis methodologies. A report on a research project, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1942, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: *Bulletin of Seismological Society of America* **32**, 163-191.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1944, Frequency of earthquakes in California: *Bulletin of Seismological Society of America* **34**, 185-188.
- seismic hazard analysis. White Paper Version 2.0.1, 79 pages.
- Beauval, C., Scotti, O., and Bonilla, F., 2006, The role of seismicity models in probabilistic seismic hazard estimation: comparison of a zoning and a smoothing approach: *Geophysical Journal International*, **165**, 2, 584-595. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02945.x>
- Bender, B., and Perkins, D. M., 1987, SEISRISK III-a computer program for seismic hazard estimation: *Bulletin 1772*, United States Geological Survey, Department of Interior, USA.
- Berberian, M., and Mohajer-Ashjai, A., 1977, Seismic risk map of Iran, a proposal, contribution to the seismotectonics of Iran, Part III: *Geological Survey of Iran* **40**, 121-150.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Sciences* **18**, 210-265.
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J. A., Priestley, K., and Wallace, T., 1992, The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance: *Bulletin of Seismological Society of America* **82**, 1726-1755.
- Berberian, M., 2005, The 2003 Bam urban earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block, southeast Iran: *Earthquake Spectra* **21**, S35-S99.
- Berberian, M., 2014, Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian plateau: a historical, social, and physical approach: Elsevier, first edition, 776 pages.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. M., 2014, NGA West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes: *Earthquake Spectra* **30**, 1057-1085.
- Bozorgnia, Y., and Mohajer-Ashjai, A., 1982, Seismic risk investigation of major cities of Iran: *Journal of the Earth and Space Physics* **11**, 15-38.
- Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Al Atik, L., Ancheta, T. D., Atkinson, G. M., Baker, J. W.,



- Klügel, J. U., 2005, Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants: *Engineering Geology* **78**, 285-307.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering: Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*, William J. Hall, Editor, New Jersey.
- Kuwata, Y., Takada, S., and Bastami, M., 2005, Building damage and human casualties during the Bam-Iran earthquake: *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* **6**, 1-19.
- Mahsuli, M., Rahimi, H., and Bakhshi, A., 2018, Probabilistic seismic hazard analysis of Iran using reliability methods: *Bulletin of Earthquake Engineering* **17**, 1117-1143.
- McGuire, R. K., 1978, FRISK-a computer program for seismic risk analysis. Open-File Report 78-1007, United States Geological Survey, Department of Interior, USA
- McGuire, R. K., 2004, *Seismic hazard and risk analysis: Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*, Oakland, 240 pages.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Research* **7**, 465-495.
- Moinfar, A. A., Naderzadeh, A., and Maleki, E., 2000, A new seismic hazard map for the implementation in the national physical planning of Iran. in: Balassanian S., Cisternas A.,
- Mohajer-Ashjai, A. A., and Nowroozi, A. A., 1978, Observed and probable intensity zoning of Iran: *Tectonophysics* **49**, 149-160.
- Moradi, M., Delavar, M. R., and Moshiri, B., 2015, A GIS-based multi-criteria decision-making approach for seismic vulnerability assessment using quantifier-guided OWA operator: a case study of Tehran, Iran: *Annals of GIS* **21**, 209-222.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., and Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for the Iranian plateau: *Annals of Geophysics* **57**, S0653.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., and Babaie Mahani, A., 2020, A comprehensive earthquake catalogue
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper): *Bulletin of Seismological Society of America* **46**, 105-145.
- Hajibabae, M., Amini-Hosseini, K., and Ghayamghamian, M. R., 2013, A new method for assessing the seismic risk of urban fabrics in Iran: *Journal of the Earth and Space Physics* **15**, 47-68.
- Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K., and Chafory-Ashtyany, M., 2003, Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros mountain belt (Iran): *Geophys. J. Int.* **155**, 403-410.
- Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H., 2003, Major active faults of Iran: *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, Iran.
- Hosseini, H., Pakzad, M., and Naserieh, S., 2019, Iranian Regional Centroid Moment Tensor Catalog: Solutions for 2012-2017, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 286, 29-41.
- Idriss, I. M., 2014, An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes: *Earthquake Spectra* **30**, 1155-1177.
- Jackson, J. A., and McKenzie, D. P., 1988, The relationship between plate motions and seismic tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East: *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **93**, 45-73.
- Kale, O., Akkar, S., Ansari, A., and Hamzehloo, H., 2015, A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5%-damped response spectrum: investigation of possible regional effects: *Bulletin of the Seismological Society of America* **105**(2A), 963-980.
- Karimiparidari, S., Zare, M., Memarian, and H., Kijko, A., 2013, Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes: *Journal of Seismology* **17**, 897-911.
- Kijko, A., and Graham, G., 1999, "Parametric-historic" procedure for probabilistic seismic hazard analysis-Part II: assessment of seismic hazard at specified site: *Pure and Applied Geophysics* **154**, 1-22.

- Iran: Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00292-w>
- Shahvar, M. P., Zare, M., and Castellaro, S., 2013, A unified seismic catalog for the Iranian Plateau (1900-2011): *Seismological Research Letters* **84**, 233-249.
- Shi, Z., Yan, J., and Gao, M., 1992, Research on the principle and methodology of seismic zonation: *Acta Seismologica Sinica* **5**, 305-314.
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., and Pinho, R., 2014, Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment: *Natural Hazards* **72**, 1409-1427.
- Stirling, M. W., 2014, The continued utility of probabilistic seismic-hazard assessment. in *Earthquake Hazard, Risk and Disasters*, Chapter 13, pages 359-376. Elsevier.
- Tavakoli, B., and Ghafory-Ashtiany, M., 1999, Seismic hazard assessment of Iran: *Annals of Geophysics* **42**, 1013-1021.
- Tsang, H. H., and Chandler, A. M., 2006, Site-specific probabilistic seismic-hazard assessment: direct amplitude based approach: *Bulletin of Seismological Society of America* **96**, 392-403.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chéry, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, F., Ritz, J.F., Sedighi, M., and Tavakoli, F. 2004, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data: *Earth and Planetary Science Letters* **223**, 177-185.
- Wang, Z., 2007, Seismic hazard and risk assessment in the intraplate environment: The New Madrid seismic zone of the central United States. in Stein, S., and Mazzotti, S., ed., *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*: Geological Society of America Special Paper **425**, 363-374.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of Seismological Society of America* **84**, 974-1002.
- Woo, G., 1996, Kernel estimation method for the Iranian Plateau (400 B.C. to December 31, 2018): *Journal Seismology* <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>
- Mulargia, F., Stark, P. B., and Geller, R. J., 2017, Why is probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) still used?: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **264**, 63-75.
- Musson, R. M. W., Toro, G. R., Coppersmith, K. J., Bommer, J. J., Deichmann, N., Bungum, H., Cotton, F., Scherbaum, F., Slejko, D., and Abrahamson, N. A., 2005, Evaluating hazard results for Switzerland and how not to do it: a discussion of "Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants" by J.U. Klügel: *Engineering Geology* **82**, 43-55.
- Nowroozi, A. A., and Ahmadi, G., 1986, Analysis of earthquake risk in Iran based on seismotectonic provinces: *Tectonophysics* **122**, 89-114.
- Ordaz, M., Martinelli, F., D'Amico, V., and Meletti, C., 2013, CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment: *Seismological Research Letters* **84**, 495-504.
- Salahshoor, H., Lyubushin, A., Shabani, E., and Kazemian, J., 2018, Comparison of Bayesian estimates of peak ground acceleration ( $A_{max}$ ) with PSHA in Iran. *J Seismol* **22**, 1515-1527.
- Scherbaum, F., Schmedes, J., and Cotton, F., 2004, On the conversion of source-to-site distance measures for extended earthquake source models: *Bulletin of Seismological Society of America* **94**, 1053-1069.
- Sesetyan, K., Danciu, L., Demircioğlu, M., Giardini, D., Erdik, M., Akkar, S., Gülen, L., Zare, M., Adamia, S., Ansari, A., Arakelyan, A., Askan, A., Avanesyan, M., Babayan, H., Chelidze, T., Durgaryan, R., Elias, A., Hamzehloo, H., Hessami, K., Kalafat, D., Kale, O., Karakhanyan, A., Asif Khan, M., Mammadli, T., Al-Qaryouti, M., Sayab, S., Tsereteli, N., Utkucu, M., Varazanashvili, O., Waseem, M., Yalçın, H., and Yılmaz, M., T., 2018, The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**, 3535-3566.
- Shahbazi, P., and Mansouri, B., 2019, Grid source event-based seismic hazard assessments of

- 2014, Recent developments of the Middle East catalog: *Journal of Seismology* **18**, 749-772.
- Zare, M., 2017, Seismic hazard zoning in Iran: A state-of-the-art on the studies during four decades: *Journal of the Earth and Space Physics* **19**, 71-101.
- seismic hazard area source modeling: *Bulletin of Seismological Society of America*, **86**, 2, 353-362.
- Yazdani, A., and Kowsari, M., 2013, Bayesian estimation of seismic hazards in Iran: *Scientia Iranica* **20**, 422-430.
- Zare, M., Amini, H., Yazdi, P., Sesetyan, K., Demircioglu, M. B., Kalafat, D., Erdik, M., Giardini, D., Asif Khan, M., and Tsereteli, N.,

## Probabilistic seismic hazard assessment for 8 densely-populated cities of Iran

Seyed Hasan Mousavi-Bafrouei<sup>1\*</sup> and Alireza Babaei Mahani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran

<sup>2</sup> Mahan Geophysical Consulting Inc., Columbia, Canada

(Received: 29 May 2021, Accepted: 21 October 2021)

### Summary

In this study, we used the recent comprehensive earthquake catalogue of Mousavi-Bafrouei and Babaei Mahani (2020), including historical and instrumental earthquakes until the end of 2018, to calculate Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) at eight metropolitans with a population of more than 1 million. These metropolitans include Ahvaz, Isfahan, Karaj, Mashhad, Qom, Shiraz, Tabriz, and Tehran. Our approach was implemented using a MATLAB code that was compiled for the purpose of this study. The historical seismicity within a 300-km radius was considered around each city, and the seismicity parameters were obtained in each case. We provided the hazard curve and uniform hazard spectrum for peak ground acceleration (PGA) and pseudo-response spectral acceleration (PSA) at periods of 0.04, 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, and 3.0 sec for the return periods of 50, 475, and 2475 years, respectively. For hazard calculations, we used four ground motion prediction equations with equal weights; Boor et al. (2014), Idriss (2014), Kale et al. (2015), and Farajpour et al. (2019). Our PSHA results show that the highest hazard occurs in the cities of Shiraz and Tabriz, whereas the lowest hazard level happens in the city of Isfahan. Specifically, the largest PGA values at the bedrock ( $V_{s30} = 760$  m/sec) condition and for the return periods of 50, 475, and 2475 years are  $77 \text{ cm/sec}^2$  (Shiraz and Tabriz),  $203 \text{ cm/sec}^2$  (Shiraz and Tabriz), and  $535 \text{ cm/sec}^2$  (Tabriz), respectively. On the other hand, the smallest PGA values for the same return periods occur for the city of Isfahan at  $29 \text{ cm/sec}^2$ ,  $77 \text{ cm/sec}^2$ , and  $125 \text{ cm/sec}^2$ . We also compared our results with other PSHA studies obtained by other researchers, including Mousavi Befrouei et al. (2014), Salahshour et al. (2018), and Shahbazi and Mansouri (2019). In general, we found that our results show lower values in terms of ground motion amplitudes. For example, Mousavi-Bafrouei et al. (1393) obtained higher values by up to ~30% than those obtained in this study. This difference is probably due to the inclusion of different datasets for source characterization and calculation of seismicity parameters. In the approach used in this study and the works of Salahshour et al. (2018) and Shahbazi and Mansouri (2019), historical seismicity is the only source of information for the determination of seismic sources and their parameters, which resulted in similar ground motion values. However, Mousavi Befrouei et al. (2014) used geological, geophysical, and seismotectonic evidence along with historical seismicity for source characterization.

**Keywords:** Seismic hazard assessment, strong ground motion, seismicity, Iran.

\*Corresponding author:

mousavi@ardakan.ac.ir