

برآورد نرخ وقوع زمین‌لرزه بر اساس تغییر شکل پوسته ایران

علیرضا لطفی^۱، حمید زعفرانی^{۲*} و علیرضا خداوردیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۲ استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۳ محقق پسا دکتری، ETH، زوریخ، سوئیس

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸)

چکیده

فلات ایران یکی از مناطق لرزه‌خیز در جهان است که در بیشتر نواحی آن، دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های بزرگ بیش از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ سال است. اغلب، برآورد نرخ وقوع زمین‌لرزه با استفاده از آمار زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در کاتالوگ‌های لرزه‌ای صورت می‌پذیرد؛ بنابراین هرچه این کاتالوگ‌ها به واقعیت نزدیک‌تر باشند، برآورد نرخ وقوع نیز واقع‌بینانه‌تر است. عواملی چون کامل نبودن کاتالوگ‌ها، دوره بازگشت بلندمدت زمین‌لرزه‌های بزرگ و ثبت دستگامی کوتاه‌مدت ناکافی (در حدود صد سال) باعث برآورد نه‌چندان مطمئن نرخ وقوع زمین‌لرزه‌ها می‌شود. به منظور کاهش عدم قطعیت‌های موجود در برآورد نرخ وقوع زمین‌لرزه‌ها و افزایش اعتماد به نتایج، امروزه از مدل‌های نوین توسعه‌یافته استفاده می‌شود که ورودی آنها ترکیب داده‌هایی مانند اطلاعات لرزه‌خیزی، زمین‌شناسی و ژئودتیکی است. این مدل‌های نوین می‌توانند باعث افزایش دانش و پاسخ به مسائل مرتبط با توزیع مکانی-زمانی زمین‌لرزه‌ها و کاهش عدم قطعیت نتایج شوند؛ از این رو با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران و کاستی‌های اطلاعات زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده، هدف از این پژوهش برآورد نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل پوسته ایران برای اولین بار است. برای این منظور از نتایج مدل تغییر شکلی جامع فلات ایران استفاده شد که خروجی اصلی آن نرخ کرنش پیوسته است. در این مطالعه نرخ کرنش به دست آمده از اطلاعات تغییر شکلی، به ممان لرزه‌ای و سپس نرخ وقوع زمین‌لرزه‌ها تبدیل شده است. مقایسه نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل با برآورد نرخ وقوع بلندمدت مبتنی بر کاتالوگ‌های موجود نشان می‌دهد در تمام ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساخت ایران، نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل بیش از نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ است که می‌تواند تأثیر چشمگیری در نتایج برآورد خطر لرزه‌ای داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: فلات ایران، مدل تغییر شکلی، نرخ ممان لرزه‌ای، نرخ کرنش، نرخ وقوع زمین‌لرزه

۱ مقدمه

زمین لرزه یکی از بلاهای طبیعی است که سالانه به خسارات فراوان جانی و مالی در سراسر جهان منجر می‌شود. در قرن بیستم، زمین لرزه‌ها سالانه باعث کشته شدن ۱۷ هزار تن در سرتاسر جهان شدند (اسکوئورن و چن، ۲۰۰۲). فلات ایران، واقع در کمربند زمین لرزه آلپ-همیالیا، یکی از مناطق فعال لرزه‌خیز در جهان است که زمین‌ساختی پیچیده دارد (تاتار و همکاران، ۲۰۰۲؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ کویلی و جکسون، ۲۰۰۶؛ صادقی باقرآبادی و همکاران، ۲۰۱۷ و موقری و همکاران، ۲۰۲۱). از زمین لرزه‌های بزرگ و مخرب در ایران و منطقه می‌توان به زمین لرزه سال ۱۹۹۰ رودبار ($M_w 7/3$) اشاره کرد که باعث کشته شدن ۴۰ هزار تن و بی‌خانمان شدن ۵۰۰ هزار تن شد. همچنین زمین لرزه سال ۲۰۰۳ بم ($M_w 6/5$) باعث کشته شدن حدود ۲۶ هزار تن و زخمی شدن ۳۰ هزار تن شد (بربریان و والکر، ۲۰۱۰ و خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۶). این رخدادها نشان می‌دهد برآورد خطرهای احتمالی ناشی از زمین لرزه برای برنامه‌ریزی کاهش خطرپذیری ضروری است. ضعف در ارزیابی میزان احتمالی خسارات جانی و مالی باعث می‌شود اجرای راهبردهای کاهش خطرپذیری ناکارآمد باشند و به سبب آن، خسارت زیادی در اثر زمین لرزه به وجود آید؛ بنابراین مدل‌های برآورد خطر لرزه‌ای می‌توانند در شناسایی مناطقی که بیشتر در معرض خطر زمین لرزه هستند و برنامه‌ریزی جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لرزه در آن مناطق مفید باشند (سیلوا، ۲۰۱۸).

یکی از بانک‌های اطلاعاتی مهم که برای برآورد نرخ وقوع زمین لرزه‌ها استفاده می‌شود، کاتالوگ‌های دستگاهی و تاریخی زمین لرزه‌ها است. تهیه کاتالوگ کامل زمین لرزه‌ها گامی اساسی در تعریف منابع لرزه‌ای و تعیین نرخ وقوع زمین لرزه است (فیلد و همکاران، ۲۰۱۴،

۲۰۱۵؛ خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ دانچیو و همکاران، ۲۰۱۸ و سسیتیان و همکاران، ۲۰۱۸). بووال و همکاران (۲۰۰۸) کمترین بازه زمانی برای تخمین نرخ وقوع زمین لرزه مطمئن در یک مکان را تعیین کردند و نشان دادند جهت وقوع زمین لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، دست کم ۱۲ هزار سال مشاهده برای تخمین نرخ وقوع زمین لرزه با عدم قطعیت ۲۰٪ لازم است تا نرخ وقوع، مستقل از سطح فعالیت لرزه‌ای باشد. به عبارت دیگر، زمین لرزه‌های بزرگ بر وضعیت تنش استاتیکی تأثیر گذار هستند؛ از این رو ممکن است بزرگا و زمان وقوع زمین لرزه را برای گسل‌های دیگر تغییر دهند و باعث تغییر نرخ وقوع زمین لرزه نسبت به زمان شوند (اشتاین، ۱۹۹۹). دسته‌بندی موقعیت زمین لرزه‌های رخ داده روی گسل‌های مجاور نیز نشان‌دهنده تعامل تنش بین گسل‌های منفرد است (کوپراسمیت، ۱۹۸۹ و مارکو و همکاران، ۱۹۹۶). همچنین شبیه‌سازی‌های فیزیکی بلندمدت زمین لرزه نشان می‌دهد فعل و انفعالات یک گسل بر نرخ وقوع زمین لرزه‌های بزرگ تأثیر گذار است و برای تحلیل خطر لرزه‌ای باید نرخ لرزه‌خیزی بلندمدت در نظر گرفته شود (خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۶ الف، ج).

مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی، باستان‌شناسی و سوابق تاریخی در فلات ایران (دمارتینی و همکاران، ۱۹۹۸؛ لو دورتز و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۱؛ فروتن و همکاران، ۲۰۱۲، ۲۰۱۴؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و همکاران، ۲۰۱۴) نشان می‌دهد دوره بازگشت زمین لرزه‌های بزرگ می‌تواند بیش از دو هزار سال باشد (بربریان و بیتس، ۱۹۹۹، ۲۰۰۱؛ بیلهم، ۲۰۰۴ و حسامی و همکاران، ۲۰۱۳). زمین لرزه سال ۱۹۹۰ منجیل (بربریان و واکر، ۲۰۱۰) و زمین لرزه سال ۲۰۰۳ بم (بربریان، ۲۰۰۵) دو نمونه از رخدادهایی با دوره بازگشت چندین هزار ساله هستند؛ لذا کاتالوگ‌های لرزه‌ای کوتاه‌مدت که حاوی تعداد کمی از زمین لرزه‌های بزرگ هستند، برای برآورد نرخ وقوع زمین لرزه‌های

۲ مدل جامع تغییر شکلی و نرخ کرنش برای

ایران

همانند سایر نقاط جهان، داده‌های زمین‌شناسی و ژئودتیکی فلات ایران، داده‌های تکمیلی مطالعات لرزه‌ای برای پژوهشگران محسوب می‌شوند و همواره با آمار زمین لرزه‌های مشاهده‌شده مقایسه می‌شوند (ذوالفقاری، ۲۰۰۹). داده‌های زمین‌شناسی را می‌توان از دو دسته مطالعات جمع‌آوری کرد: ۱) مطالعاتی که مناطق بزرگ را زیر پوشش قرار می‌دهند و معمولاً گسل‌های فعال را با هندسه ساده‌شده در سراسر فلات ایران شناسایی می‌کنند (بربریان و بیستس، ۲۰۰۱؛ باچمانوف و همکاران، ۲۰۰۴؛ آلن و همکاران، ۲۰۱۱ و یمینی فرد و همکاران، ۲۰۱۲)؛ ۲) مطالعاتی که مشخصات هندسی و سازوکار دقیق‌تر گسل‌ها را در مناطق مختلف ایران شناسایی می‌کنند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳، ۲۰۱۳). از داده‌های ژئودتیکی، به‌ویژه سرعت‌های استخراج‌شده از جی‌پی‌اس، برای مطالعه سینماتیک فلات ایران و ارزیابی نرخ لغزش گسل و نرخ کرنش خارج از گسل استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های جی‌پی‌اس در سال ۱۹۹۹ در ایران آغاز و اولین مطالعات برای تعیین کمیت زمین‌ساخت فعال فلات ایران با استفاده از اندازه‌گیری‌های منطقه‌ای جی‌پی‌اس در سال ۲۰۰۲ شروع شد (تاتار و همکاران، ۲۰۰۲). سپس مدل‌های اولیه برای کل فلات ایران ساخته شدند و سینماتیک امروزی فلات ایران با استفاده از داده‌های ژئودتیکی تعیین شد (تاتار و همکاران، ۲۰۰۲؛ نیلفروشان و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴ الف، ب؛ ماسون و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۴؛ بیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ حسامی و همکاران، ۲۰۰۶؛ والپرزدورف و همکاران، ۲۰۰۶؛ نانکلی، ۲۰۱۴؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۳؛ توکلی و همکاران، ۲۰۰۸ و جمور و همکاران، ۲۰۱۱).

مدل‌های تغییر شکلی ارائه‌شده، که کل یا بخشی از

بلندمدت کافی نیستند (برد و کریمر، ۲۰۱۴). بدیهی است کاتالوگ‌های لرزه‌ای موجود، محدودیت نمونه‌گیری زمانی دارند و استفاده از زمین لرزه‌های ثبت‌شده به‌تنهایی در تحلیل خطر احتمالاتی ممکن است نتایج اعتماد-ناپذیری داشته باشد. امروزه داده‌های زمین‌شناسی و ژئودتیکی، برخی از این نواقص را برطرف کرده‌اند. یکی از مدل‌های تحلیل خطر لرزه‌ای که بر اساس داده‌های ژئودتیکی ارائه شده است، مدل خطر لرزه‌ای احتمالاتی غرب کانادا (مازوتی و همکاران، ۲۰۱۱) است. در این مدل برای به‌دست آوردن نرخ کرنش منطقه‌ای، از برداشت‌های ۱۷۹ ایستگاه سامانه موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System, GPS) استفاده شد. برآورد نرخ ممان مبتنی بر جی‌پی‌اس و مقادیر بیشینه شتاب زمین (Peak Ground Acceleration, PGA) با نتایج مبتنی بر کاتالوگ همخوانی داشتند. نرخ ممان مبتنی بر جی‌پی‌اس و مقادیر PGA به‌ترتیب ۶ تا ۱۵۰ و ۲ تا ۵ برابر بیشتر از مقادیری بود که از مدل مبتنی بر کاتالوگ زمین لرزه به‌دست آمد. این واقعیت نشان می‌دهد برای به‌دست آوردن نرخ ممان بلندمدت، طول مدت برداشت کاتالوگ‌های لرزه‌ای، کوتاه‌تر از میزان مورد نیاز است. برای مثالی دیگر می‌توان مدل پیش‌بینی گسیختگی یکنواخت زمین لرزه کالیفرنیا (Uniform California Earthquake Rupture Forecast, UCERF) را مطرح کرد. مدل‌های تغییر شکلی شاخه مهمی از UCERF هستند. در UCERF3، سه مدل تغییر شکلی با وارون کردن داده‌های ژئودتیکی و زمین‌شناسی به همراه قیود زمین‌شناسی ایجاد شده است. در مدل UCERF با استفاده از مدل‌های گسلی و تغییر شکلی، احتمال و نرخ بلندمدت وقوع زمین لرزه‌ها در کالیفرنیا طی یک دوره مشخص تعیین شده است (پترسون و همکاران، ۲۰۰۷؛ فیلد و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و فیلد، ۲۰۱۵).

فلات ایران را پوشش می‌دهند، در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول مدل‌های جهانی است که به دلیل گسترده بودن داده‌های ژئودتیکی، چشم‌انداز گسترده‌ای را از سینماتیک امروزه فلات ایران، حرکت صفحات در خاورمیانه و تغییر شکل کلی در کمربندهای مختلف فعال فراهم می‌کند (نیلفروشان و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴ ب و ماسون و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷)؛ برای مثال، ورنانت و همکاران (۲۰۰۴ ب) برای اولین بار از این داده‌ها برای تعیین سینماتیک فلات ایران با مدل‌های تغییر شکلی استفاده کردند. ایشان با استفاده از شبکه‌ای متشکل از ۲۷ ایستگاه دائمی و ۲۰ ایستگاه موقت جی‌پی‌اس در سراسر ایران، سینماتیک صفحه‌ای و تغییر شکل پوسته‌ای در خاورمیانه را با کمک اندازه‌گیری‌های جی‌پی‌اس در ایران و شمال عمان ارائه دادند. دسته دوم مدل‌های منطقه‌ای هستند که برای مناطق کوچک‌تر فعال لرزه‌ای ساخته شده‌اند و اطلاعات دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. چندین منطقه مختلف ایران در مدل‌های منطقه‌ای بررسی شده است. توکلی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از داده جی‌پی‌اس و با فرض شناخته بودن همه گسل‌های مرزی بلوک‌های صلب و استفاده از این نکته که ایستگاه‌های جی‌پی‌اس، بسیار دورتر از ناحیه تغییر شکل کشسان، در لبه گسل‌ها واقع شده‌اند، توزیع حرکت امتداد لغز راست‌بر را در زاگرس از گسل فعال اصلی عهد حاضر (Main Recent Fault, MRF) تا سامانه گسلی کازرون تبیین کردند. نتایج نشان داد نرخ لغزش مبتنی بر جی‌پی‌اس با نرخ لغزش زمین‌شناسی سازگار است. این سازگاری بر سرعت‌های طولانی مدت پایدار دلالت دارد. برای شمال غرب ایران، جمور و همکاران (۲۰۱۱) سینماتیک امروزی فلات ایران را با استفاده از شبکه جی‌پی‌اس دائمی ایران ارائه دادند. نانکلی (۲۰۱۱) مدل سه‌بعدی مشابهی را برای نرخ لغزش گسل کازرون و گسل‌های اصلی منطقه زاگرس ارائه داد. هدف از آن مطالعه، استفاده از داده‌های

جی‌پی‌اس و مدل‌سازی مکانیکی سه‌بعدی گسل‌های موجود جهت تعیین نرخ لغزش بلندمدت گسل کازرون و گسل‌های اصلی زاگرس بود. برای قسمت‌های شمال شرقی فلات ایران، موسوی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از صفحه‌های کشسان مجزا به همراه چند گسل واقع در مرز صفحات، مدلی را برای محدوده البرز شرقی تا شرق کپه داغ ارائه دادند. آنها سینماتیک غالب مناطق گسلی در شمال شرق ایران و حرکت بلوک خزر جنوبی (SCB South Caspian Basin) را نسبت به مناطق اطراف ارزیابی کردند. برای شرق ایران، والپرزدورف و همکاران (۲۰۱۴) داده‌های جی‌پی‌اس را بررسی و سینماتیک امروزی و نرخ لغزش را در بیشتر گسل‌های لرزه‌زا تعیین کردند. ایشان لغزش‌های بزرگی را در گسل‌های لوت شرقی، لوت غربی و کوهبنان شناسایی کردند. در این مناطق، سوابق لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی این گسل‌ها ثبت شده است. بنا بر عقیده ایشان، اگرچه وجود تعدادی از گسل‌های ثانویه، این سناریو را پیچیده می‌کند، مدل مناسبی برای سینماتیک کنونی شرق ایران ارائه شده است. مطالعات فوق از روش مدل‌سازی بلوک برای تعیین سینماتیک عهد حاضر استفاده کرده‌اند. این روش با اینکه یکی از رایج‌ترین روش‌های تهیه مدل عددی برای مطالعه بهتر تغییر شکل‌ها در یک منطقه است، ضعف‌هایی نیز دارد. برخی از اشکالاتی که برای این روش مدل‌سازی وجود دارد عبارت‌اند از: ۱) به دلیل وجود گسل‌های کوچک در منطقه، در تعریف برخی از بلوک‌ها با استفاده از مدل بلوک صلب، ضعف وجود دارد؛ ۲) به علت ساده‌سازی، مدل‌سازی مجموعه‌ای از گسل‌های فعال امتداد لغز با تنها یک گسل مرزی اجرا شده است؛ ۳) ایستگاه‌های جی‌پی‌اس هم‌اکنون نیز بسیار پراکنده هستند و این پراکندگی در اطراف گسل‌های فرعی بیشتر است؛ بنابراین نرخ لغزش برای تعداد کمی از گسل‌های فرعی به دست می‌آید، در حالی که بسیاری از گسل‌های فرعی

زمین‌لرزه مرتبط است. با فرض رابطه دو کراندار گوتنبرگ - ریشتر، که متداول‌ترین توزیع فروانی - بزرگ است، نرخ ممان لرزه‌ای را می‌توان برآورد کرد:

$$\dot{M}_0 = \lambda(m_0) \cdot \int_{m_0}^{m_{\max}} f_m(m) M_0(m) dm, \quad (2)$$

که $\lambda(m_0)$ نرخ وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای مساوی یا بزرگ‌تر از بزرگای کمینه (m_0) و m_{\max} بزرگای بیشینه است. $M_0(m)$ ممان لرزه‌ای است که زمین‌لرزه‌ای با بزرگای m آزاد می‌کند و با رابطه شناخته‌شده هنکس و کاناموری (۱۹۷۹) برآورد می‌شود:

$$M_0(m) = 10^{cm+d}, \quad (3)$$

که c برابر با $1/5$ است. d برای تخمین ممان لرزه‌ای در واحد نیوتن - متر (N.m) و دین - سانتی‌متر (dyne.cm) به ترتیب $9/05$ و 16 فرض می‌شود. $f_m(m)$ تابع چگالی احتمال فراوانی - بزرگ است که برای توزیع دو کراندار گوتنبرگ - ریشتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_m(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m-m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad \text{for } m_0 \leq m \leq m_{\max},$$

که $\beta = b \ln 10$ شیب توزیع گوتنبرگ - ریشتر است. با توجه به روابط (۱) تا (۴)، اگر β ، m_0 و m_{\max} برای منطقه مورد مطالعه موجود باشند، که از نرخ کرنش به دست آمده است، می‌تواند به $\lambda(m_0)$ تبدیل شود. با هدف ارزیابی خطر لرزه‌ای منطقه‌ای، تغییرات مکانی β و m_{\max} ، که پارامترهای منطقه‌ای هستند، از تغییرات مکانی نرخ لرزه‌خیزی کمتر است و می‌توان آنها را از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده برای یک منطقه معین تخمین زد (کیکو و سلول، ۱۹۸۹، ۱۹۹۰، ۱۹۹۲؛ کیکو، ۲۰۰۴ و کیکو و همکاران، ۲۰۱۶)؛ از این رو تخمین β و m_{\max} از آمار زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده مناسب است و تخمین $\lambda(m_0)$ می‌تواند با استفاده از معادلات مذکور، مبتنی بر کرنش باشد.

فلات ایران باید در یک مدل‌سازی مناسب مبتنی بر تغییر شکل لحاظ شوند (خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۵).

جامع‌ترین مدل تغییر شکل فلات ایران را خداوردیان و همکاران (۲۰۱۵) ارائه کردند. در آن مدل، جریان حرکتی بلندمدت پوسته فلات ایران با استفاده از مجموعه داده‌های مختلف از جمله به‌روزترین موقعیت گسل‌ها، نرخ انحراف زمین‌شناسی گسل، سرعت جی‌پی‌اس، جهت‌های اصلی تنش و شرایط مرزی سرعت برآورد شده است. ورودی این مدل، نرخ لغزش زمین‌شناسی بلندمدت بر اساس اطلاعات موجود جمع‌آوری شده برای ۳۳ گسل از ۱۷۱ گسل و سرعت ژئودتیکی ۲۳۹ ایستگاه است. نتایج اصلی مدل خداوردیان و همکاران (۲۰۱۵)، نرخ کرنش و نرخ لغزش گسل‌ها است. برای صحت‌سنجی نتایج، آنها نرخ لغزش برآوردشده گسل‌ها را با نرخ لغزش مبتنی بر سرعت‌های ژئودتیکی، نرخ لغزش گزارش‌شده در سایر مطالعات و نرخ لغزش مبتنی بر مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی، که در مدل از آنها استفاده نشده است، مقایسه کردند. استفاده از تعداد فراوانی از داده‌های جی‌پی‌اس در فلات ایران، استفاده کمتر از فرضیات ساده‌کننده نسبت به سایر مدل‌ها، استفاده از مجموعه داده‌های ورودی مختلف و سازگاری نتایج، دلایل انتخاب این مدل برای محاسبه نرخ ممان و نرخ وقوع در این مطالعه است.

۳ روش‌شناسی

نخستین گام برای برآورد نرخ وقوع زمین‌لرزه، تخمین نرخ ممان لرزه‌ای (\dot{M}_0) از نرخ کرنش با استفاده از رابطه زیر است (لیو و برد، ۲۰۰۸):

$$\dot{M}_0 = 2 \langle cz \rangle \mu A \text{Max}(|\dot{\epsilon}_1|, |\dot{\epsilon}_2|, |\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2|), \quad (1)$$

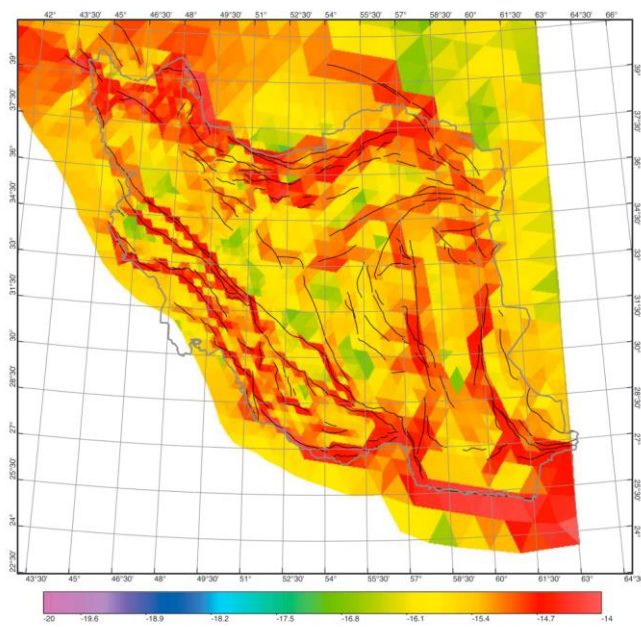
که $\langle cz \rangle$ ضخامت لایه لرزه‌زا، μ سختی متوسط پوسته و A مساحت منبع مورد مطالعه است. $\dot{\epsilon}_1$ و $\dot{\epsilon}_2$ مؤلفه‌های اصلی تانسور نرخ کرنش هستند. استوارت و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند نرخ ممان، با توزیع نرخ وقوع

۴ نرخ ممان لرزه‌ای کل برای فلات ایران

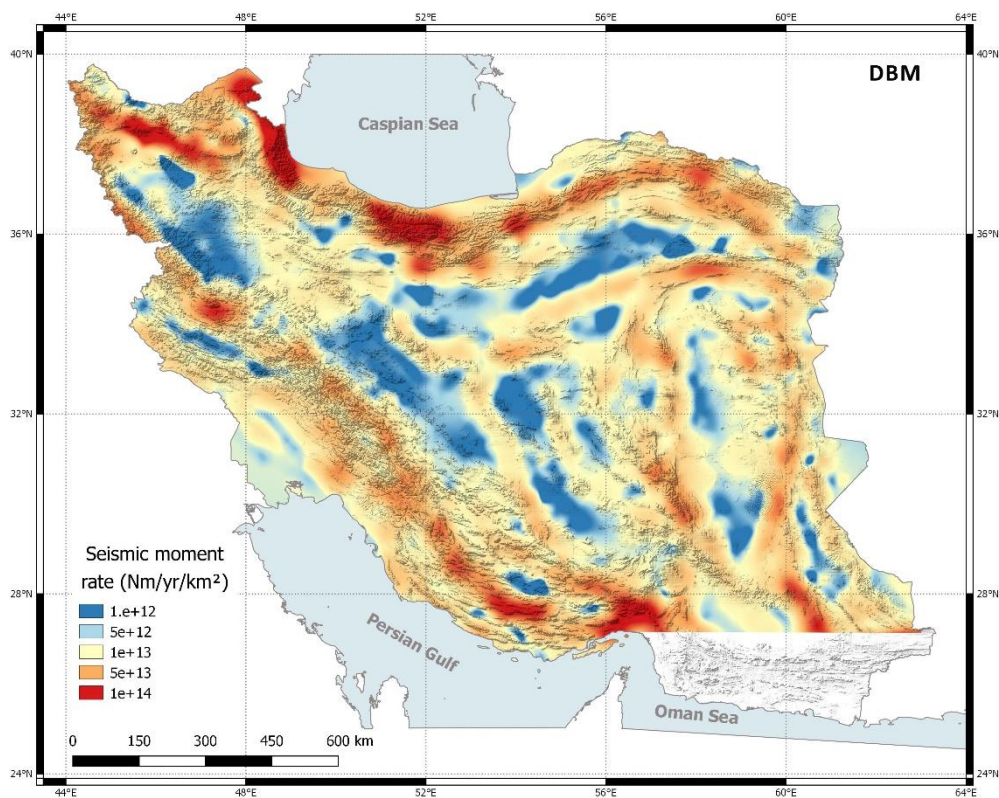
برای تعیین نرخ ممان کل مبتنی بر تغییر شکل، دو مدل تغییر شکلی در پژوهش حاضر انتخاب شد. مدل اول به‌روزترین و جامع‌ترین مدل مبتنی بر تغییر شکل (DBM) (Deformation-Based Model) فلات ایران (خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۵) است. نرخ ممان کل با استفاده از نرخ کرنش، که خروجی این مدل است (شکل ۱)، با به‌کارگیری رابطه (۱) و فرض $\mu=27/VGPa$ (برد و کاگان، ۲۰۰۴) برآورد و در شکل ۲-الف نشان داده شده است. شایان ذکر است با توجه به فرورائشی بودن ناحیه مکران و متفاوت بودن مشخصات زمین‌ساختی آن، نرخ وقوع زمین‌لرزه برای مکران در مطالعه‌ای مجزا برآورد شده است. مقادیر زیاد نرخ ممان در امتداد گسل‌ها متمرکز شده است که در کمربندهای فعال لرزه‌ای مانند کوه‌های زاگرس، البرز و کپه داغ واقع شده‌اند. نرخ ممان در ایران مرکزی و شرقی مانند بلوک مرکزی ایران و بلوک کویر لوت، کم و در امتداد گسل‌های اطراف کویر

لوت، زیاد است.

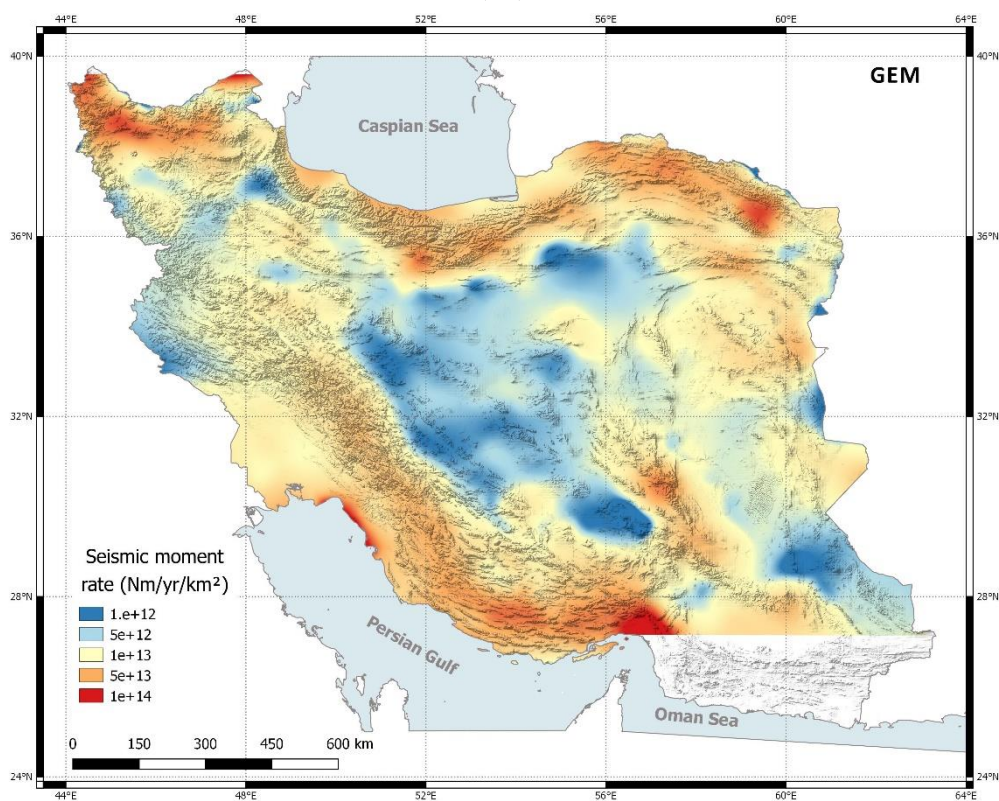
مدل تغییر شکلی دوم موجود برای فلات ایران، مدل نرخ کرنش ارائه‌شده در چارچوب مدل جهانی زمین‌لرزه (Global Earthquake Model, GEM) است (کریم‌ر و همکاران، ۲۰۱۴ الف، ب). شکل ۲-ب توزیع مکانی $\dot{M}_0^{D,total}$ به‌دست آمده از نرخ کرنش GEM را برای ایران نشان می‌دهد که با استفاده از رابطه (۱) حاصل شده و کاملاً مبتنی بر اطلاعات ژئودتیک است. مقایسه شکل ۲-الف با شکل ۲-ب نشان می‌دهد هر دو مدل DBM و GEM نرخ ممان‌های بیشتری را برای ایالت‌های لرزه‌ای البرز، آذربایجان، کپه داغ و زاگرس ارزیابی می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود در DBM از جایی که نرخ لغزش زمین‌شناسی برای گسل‌های فعال در ایران مرکزی (برای مثال گسل دهشیر، انار، نایند، نهبندان و نصرت آباد) در نظر گرفته شده است، نرخ ممان بیشتری برای ایران مرکزی و شرقی دیده می‌شود.



شکل ۱. لگاریتم بیشترین نرخ کرنش اصلی در فلات ایران (خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۵).



(الف)



(ب)

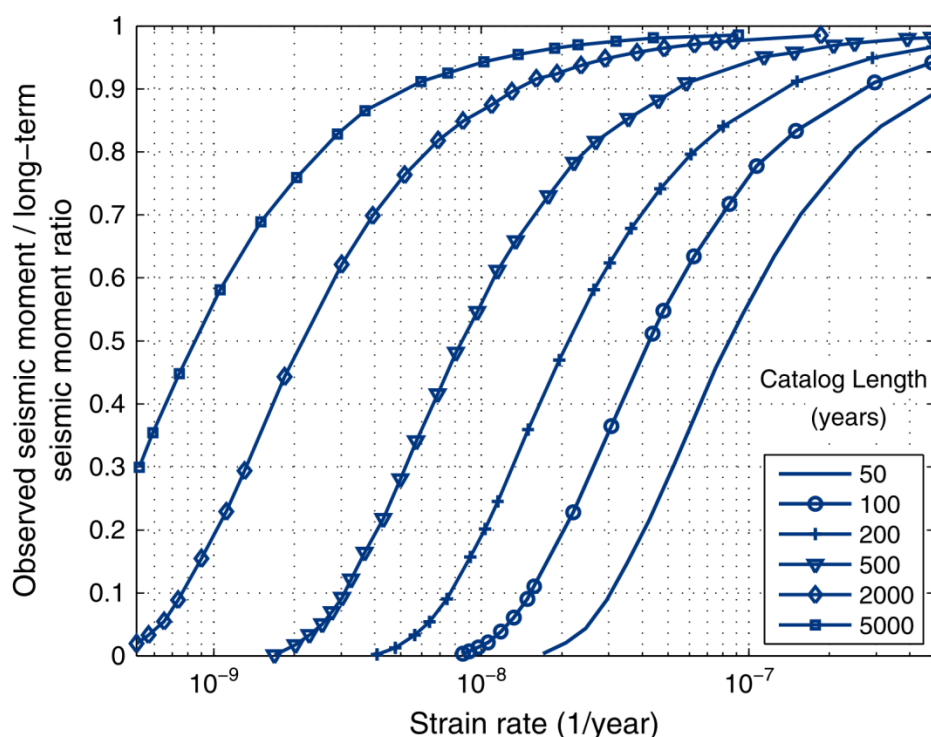
شکل ۲. نرخ ممان کل ($\dot{M}_0^{D,total}$) برای فلات ایران مبتنی بر (الف) DBM (خداوردیان و همکاران، ۲۰۱۵) (ب) GEM (کریم و همکاران، ۲۰۱۴ الف، ب).

نرخ ممان کل، که بر اساس نرخ کرنش در بخش قبل تخمین زده شده است، شامل تغییر شکل لرزه‌ای و غیرلرزه‌ای است. لازم است سهم نرخ ممان لرزه‌ای مبتنی بر تغییر شکل (\dot{M}_0^D) در نرخ ممان کل برآورد شود و پیش از محاسبه نرخ وقوع زمین لرزه، بخش غیرلرزه‌ای آن از $\dot{M}_0^{D, total}$ حذف شود. این موضوع یکی از مسائل و چالش‌های اصلی در برآورد نرخ وقوع با استفاده از اطلاعات تغییر شکلی است. وارد (۱۹۹۸) با توجه به نرخ کرنش و همچنین طول دوره مشاهدات لرزه‌ای، تخمین‌های مناسبی را جهت تعیین سطح کامل بودن ممان لرزه‌ای مشاهده‌شده (observed seismic moment rate) نسبت به ممان لرزه‌ای بلندمدت ارائه داد.

نواحی با کرنش کمتر در مقایسه با نواحی با کرنش بیشتر، نیازمند کاتالوگ طولانی‌تری برای ثبت زمین لرزه‌ها هستند (شکل ۳)؛ برای مثال برای دستیابی به سطح کامل

وضوح (resolution) و دقت نقشه نرخ ممان حاصل از DBM بیشتر از مدل GEM است؛ زیرا (۱) در DBM از داده‌های مختلف از جمله امتداد گسل‌ها، سرعت جی‌پی‌اس، نرخ انحراف زمین‌شناسی گسل‌ها، جهت‌های اصلی تنش و شرایط مرزی سرعت استفاده شده است، در حالی که تنها ورودی GEM، سرعت جی‌پی‌اس است؛ (۲) روش قدرتمندتر و اطلاعات به‌روزشده‌تری (جدیدترین برآورد منطقه‌ای داده‌های جی‌پی‌اس، مترکم‌ترین آزمون تنش‌های اصلی و هندسه و سینماتیک گسل‌های فعال) در DBM نسبت به GEM به‌کاررفته است؛ لذا در این پژوهش از نرخ ممان به‌دست‌آمده از مدل DBM برای برآورد نرخ وقوع زمین لرزه مبتنی بر تغییر شکل استفاده شده است.

۵ نرخ لرزه‌خیزی مبتنی بر تغییر شکل و مقایسه آن با نرخ لرزه‌خیزی مبتنی بر کاتالوگ برای فلات ایران



شکل ۳. نسبت ممان لرزه‌ای مبتنی بر کاتالوگ به ممان لرزه‌ای بلندمدت برحسب نرخ کرنش و طول کاتالوگ زمین لرزه (وارد، ۱۹۹۸).

جدول ۱. سهم تغییر شکل لرزه‌ای (η) ایالت‌های لرزه‌زمن ساخت فلات ایران برای طول دوره کاتالوگ ۱۰۰ ساله، ۲۰۰ ساله و میانگین آنها.

ایالت لرزه‌زمن ساخت	η_{100}	η_{200}	η_{ave}
البرز	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۷
آذربایجان	۰/۸۹۳	۰/۷۶۹	۰/۸۳۱
ایران مرکزی	۱	۰/۹	۰/۹۵
ایران شرقی	۱	۰/۹	۰/۹۵
کپه داغ	۰/۶۲۴	۰/۹۴	۰/۷۸۲
زاگرس	۰/۳۸۹	۰/۲۷۵	۰/۳۳۲

آذربایجان بخش عمده‌ای از کرنش انباشته شده را در قالب زمین لرزه آزاد می‌کنند. علاوه بر این، تقریباً کل تغییر شکل‌ها در ایران شرقی و مرکزی از نوع لرزه‌ای است. پس از آنکه مقادیر η تعیین شد، می‌توان سهم لرزه‌ای از نرخ ممان کل مبتنی بر تغییر شکل را برآورد و به دنبال آن، نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل را محاسبه کرد.

به منظور مقایسه نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل و نرخ وقوع بلندمدت مبتنی بر کاتالوگ، از پارامترهای لرزه‌خیزی بلندمدت (λ^C ، β و m_{max}) استفاده شده است که خداوردیان و همکاران (۲۰۱۶ ب) تخمین زده‌اند. این پارامترهای لرزه‌ای برای شبکه‌ای از نقاط $1/0^\circ \times 1/0^\circ$ برای سراسر فلات ایران و بر اساس زمین لرزه‌های ثبت شده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری استخراج شده‌اند. با استفاده از پارامترهای لرزه‌خیزی بلندمدت می‌توان نرخ ممان لرزه‌ای بلندمدت مبتنی بر کاتالوگ (\dot{M}_0^C) را نیز استخراج کرد.

نرخ وقوع بلندمدت مبتنی بر کاتالوگ زمین لرزه‌هایی با بزرگای برابر یا بزرگ‌تر از $4/0 M_w$ (λ_4^C)، \dot{M}_0^C ، نرخ وقوع زمین لرزه‌های مبتنی بر تغییر شکل با بزرگای برابر یا بزرگ‌تر از $4/0 M_w$ (λ_4^D) و \dot{M}_0^D برای برخی نواحی در ایالت‌های لرزه‌زمن ساخت مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای مقایسه دقیق‌تر نرخ وقوع زمین لرزه مبتنی بر کاتالوگ و تغییر شکل، در شکل ۴ توزیع فراوانی - بزرگای برای نقاط منتخب در هر ایالت نشان داده.

بودن ۲۰ درصدی ممان کلی، برای مناطق با نرخ کرنش در حدود $10^{-9} \text{ year}^{-1}$ ، کاتالوگ دو هزار ساله نیاز است ولی برای منطقه‌ای با نرخ کرنش در حدود $10^{-8} \text{ year}^{-1}$ ، کاتالوگ صد ساله کافی خواهد بود. از نمودار وارد جهت حل مسئله اشاره شده و تعیین سهم لرزه‌ای تغییر شکل‌ها می‌توان استفاده کرد. برای این منظور باید برای هر ایالت فلات ایران، با استفاده از رابطه (۳) مقدار نرخ ممان لرزه‌ای مشاهده شده برای زمین لرزه‌های ثبت شده محاسبه شود؛ از این رو کاتالوگ یکپارچه زمین لرزه برای فلات ایران که خداوردیان و همکاران (۲۰۱۶ ب) جمع‌آوری کرده‌اند (از سال ۷۳۴ قبل از میلاد تا سال ۲۰۱۱ میلادی) تا سال ۲۰۱۹ به روزرسانی شد. پس از آن با توجه به میانگین نرخ کرنش در هر ایالت، طول دوره ثبت کاتالوگ و نرخ ممان لرزه‌ای مشاهده شده، نرخ ممان لرزه‌ای بلندمدت تخمین زده می‌شود. سرانجام، می‌توان نسبت نرخ ممان لرزه‌ای بلندمدت برآورد شده به نرخ ممان کل مبتنی بر تغییر شکل را برآورد کرد. این نسبت (η) نشان‌دهنده نسبت تغییر شکل لرزه‌ای به تغییر شکل کل است. در جدول ۱ مقادیر η برای ایالت‌های لرزه‌زمن ساختی فلات ایران با توجه به مطالعه خداوردیان و همکاران (۲۰۱۵) و بر اساس اطلاعات به‌روز شده در این پژوهش، برای کاتالوگ زمین لرزه در بازه‌های ۱۰۰ ساله و ۲۰۰ ساله محاسبه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، زاگرس تغییر شکل غیرلرزه‌ای فراوانی دارد در حالی که البرز، کپه داغ و

جدول ۲. پارامترهای لرزه‌خیزی و نرخ ممان لرزه‌ای، برآوردشده از مدل مبتنی بر تغییر شکل و کاتالوگ.

ایالت لرزه‌زمین ساخت	طول و عرض جغرافیایی	β	m_{\max}	λ_4^C	\dot{M}_0^C (Nm/yr $\cdot 10^{13}$)	λ_4^D	\dot{M}_0^D (Nm/yr $\cdot 10^{13}$)	$\frac{\lambda_4^D}{\lambda_4^C}$	$\frac{\dot{M}_0^D}{\dot{M}_0^C}$
البرز	(۳۶ و ۵۱)	۲/۶۲	۷/۸۰	۶/۷۲	۵/۴۰	۳۲/۴۹	۲۵/۰۰	۴/۸۴	۴/۶۳
آذربایجان	(۳۸ و ۴۷)	۲/۲۷	۷/۸۰	۴/۳۲	۸/۲۸	۲۵/۹۹	۴۸/۴۲	۶/۰۲	۵/۸۵
ایران مرکزی	(۳۱ و ۵۴)	۲/۳۴	۶/۶۸	۲/۰۶	۰/۹۱	۲۸/۹۸	۱۲/۰۸	۱۴/۰۷	۱۳/۲۸
ایران شرقی	(۳۲ و ۵۴)	۲/۵۹	۶/۲۷	۱/۹۴	۰/۴۰	۶۴/۳۷	۱۲/۵۴	۳۳/۱۸	۳۱/۳۵
کپه داغ	(۳۷ و ۵۹)	۲/۱۸	۷/۷۰	۵/۰۵	۱۰/۷۰	۱۱/۶۵	۲۴/۱۸	۲/۳۱	۲/۲۶
زاگرس	(۲۸ و ۵۴)	۲/۵۷	۷/۱۸	۲۱/۳۰	۱۰/۹۰	۲۷/۶	۱۳/۱۶	۱/۳۰	۱/۲۱

در این جدول β شیب توزیع گوتنبرگ-ریشتر، m_{\max} بزرگای بیشینه، λ_4^C نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ، \dot{M}_0^C نرخ ممان لرزه‌ای مبتنی بر کاتالوگ، λ_4^D نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل و \dot{M}_0^D نرخ ممان لرزه‌ای مبتنی بر تغییر شکل است.

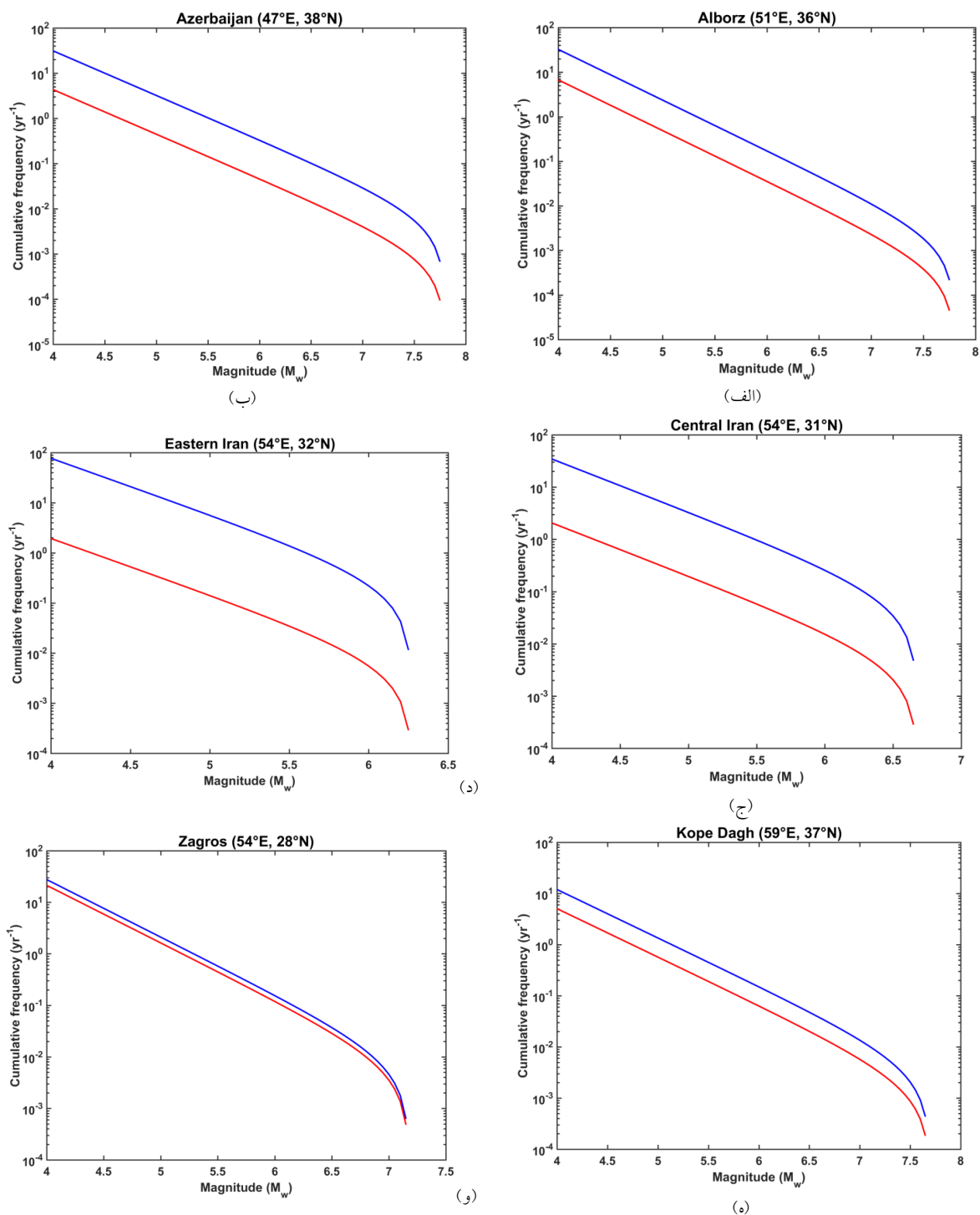
به‌طور چشمگیری بیشتر از نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ است. برای مناطق نمونه در این دو ایالت، مقادیر $\lambda_4^D / \lambda_4^C$ به ترتیب ۱۴/۰۷ و ۳۳/۱۸ برآورد شده است.

همان‌طور که مشاهده شد، در مقایسه با ایالت‌های دیگر، در زاگرس سازگاری بین توزیع فراوانی-بزرگای مبتنی بر تغییر شکل و کاتالوگ بیشتر است. برای ایران مرکزی و ایران شرقی، تفاوت معنی‌داری بین توزیع فراوانی-بزرگای مبتنی بر تغییر شکل و کاتالوگ مشاهده می‌شود. دوره بازگشت زمین‌لرزه در این مناطق از صدها سال تا هزاران سال متغیر است (بربریان و بیستس، ۲۰۰۱) و زمین‌لرزه‌های کمی به‌ویژه در ایران مرکزی ثبت شده است؛ در نتیجه، برای ایالت‌هایی که زمین‌لرزه‌های مکرر متوسط با دوره بازگشت‌های کوتاه‌تری دارند، نرخ وقوع زمین‌لرزه مبتنی بر کاتالوگ و تغییر شکل نزدیک به یکدیگر است. برای ایالت‌هایی که زمین‌لرزه‌های بزرگ با دوره بازگشت‌های طولانی مدت دارند، نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل، مقادیر بیشتری نسبت به نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ دارد.

۶ نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، برای همه ایالت‌های فلات ایران، نرخ وقوع زمین‌لرزه مبتنی بر تغییر شکل بیشتر از نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ برآورد شده است. این موضوع می‌تواند به خطر

شده است. به‌طور کلی برای همه ایالت‌های فلات ایران، نرخ وقوع زمین‌لرزه مبتنی بر تغییر شکل بیشتر از نرخ وقوع مبتنی بر کاتالوگ برآورد شده است و این موضوع ممکن است تأثیر چشمگیری بر نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای داشته باشد. کمترین میزان $\lambda_4^D / \lambda_4^C$ مربوط به زاگرس (شکل ۴-و) و کپه داغ (شکل ۴-ه) است که برای مناطق نمونه منتخب در این دو ایالت به ترتیب برابر ۱/۳۰ و ۲/۳۱ برآورد شده است. در این ایالت‌ها زمین‌لرزه‌هایی با دوره بازگشت به نسبت کوتاه رخ می‌دهند (طالبیان و جکسون، ۲۰۰۴ و کلانه و آق آتابای، ۲۰۱۶)؛ در نتیجه، کمترین اختلاف بین نرخ وقوع زمین‌لرزه‌های مبتنی بر تغییر شکل و مبتنی بر کاتالوگ انتظار می‌رود. در مقایسه با زاگرس، زمین‌لرزه‌هایی با دوره بازگشت بیشتر، در البرز (شکل ۴-الف) و آذربایجان (شکل ۴-ب) رخ می‌دهند. کاتالوگ برای این مناطق کامل نیست؛ بنابراین مقادیر $\lambda_4^D / \lambda_4^C$ بیشتری برای ایالت‌های لرزه‌زمین ساخت البرز و آذربایجان مشاهده می‌شود. برای مناطق نمونه منتخب در البرز و آذربایجان، مقادیر به ترتیب ۴/۸۴ و ۶/۰۲ برآورد شده است. بیشترین مقدار $\lambda_4^D / \lambda_4^C$ برای ایران مرکزی (شکل ۴-ج) و ایران شرقی (شکل ۴-د) برآورد شد، جایی که زمین‌لرزه‌های بزرگ با دوره بازگشت‌های طولانی اتفاق می‌افتد و نرخ وقوع مبتنی بر تغییر شکل



شکل ۴. توزیع فراوانی-بزرگای زمین لرزه در دایره‌ای به مرکز نوشته شده در بالای هر نمودار و شعاع ۲۰۰ کیلومتر واقع در ایالت‌های مختلف لرزه‌زمین‌ساخت.

لرزه‌ای بیشتر به ویژه در مناطقی با زمین لرزه‌های با دوره بازگشت طولانی‌تر منجر شود. در زاگرس و کپه داغ، نرخ فعالیت لرزه‌ای بیشتری مشاهده می‌شود و کاتالوگ‌های

لرزه‌ای کامل‌تر است؛ بنابراین تخمین نرخ لرزه‌خیزی مبتنی بر تغییر شکل، اختلاف کمتری با نمونه‌های به دست آمده از کاتالوگ‌های لرزه‌ای دارد. در البرز و

آذربایجان نرخ لرزه‌خیزی مبتنی بر تغییر شکل، بزرگ‌تر از نرخ مبتنی بر کاتالوگ است؛ زیرا در مقایسه با زاگرس، زمین‌لرزه‌های بزرگ در این مناطق در فاصله زمانی طولانی‌تری رخ می‌دهند و کاتالوگ‌های لرزه‌ای برای این ایالت‌ها ناقص‌تر هستند. بیشترین تفاوت میان نرخ لرزه‌خیزی مبتنی بر تغییر شکل و کاتالوگ برای ایران مرکزی و شرقی مشاهده می‌شود. در این دو ایالت، زمین‌لرزه‌های بزرگ با دوره بازگشت طولانی مدت رخ می‌دهد.

منابع

- Alinaghi, A., Koulakov, I., and Thybo, H., 2007, Seismic tomographic imaging of P-and S-waves velocity perturbations in the upper mantle beneath Iran: *Geophysical Journal International*, **169**(3), 1089-1102.
- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H., and Jones, S. J., 2011, Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia—Eurasia collision zone: *Geophysical Journal International*, **184**(2), 555-574.
- Bachmanov, D., Trifonov, V., Hessami, K. T., Kozhurin, A., Ivanova, T., Rogozhin, E., Hademi, M., and Jamali, F., 2004, Active faults in the Zagros and central Iran: *Tectonophysics*, **380**(3-4), 221-241.
- Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V., and Bellier, O., 2006, Active deformation in Zagros—Makran transition zone inferred from GPS measurements: *Geophysical Journal International*, **165**(1), 373-381.
- Beauval, C., Bard, P.-Y., Hainzl, S., and Gueguen, P., 2008, Can strong-motion observations be used to constrain probabilistic seismic-hazard estimates?: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(2), 509-520.
- 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**(S1), 35-99.
- Berberian, M., 2014, Patterns of historical earthquake ruptures on the Iranian plateau: *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, **17**, 439-518.
- Berberian, M., Petrie, C. A., Potts, D., Chaverdi, A. A., Distingu, A., Zarchi, A. S., Weeks, L., Ghassemi, P., and Noruzi, R., 2014, Archaeoseismicity of the mounds and monuments along the Kazerun Fault (western Zagros, Sw Iranian Plateau) since the Chalcolithic Period: *Iranica Antiqua*, **49**, 1-81.
- Berberian, M., and Walker, R., 2010, The Rudbār Mw 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran: *Geophysical Journal International*, **182**(3), 1577-1602.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(1), 120-139.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 2001, Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau: *Journal of Structural Geology*, **23**(2), 563-584.
- Bilham, R., 2004, Earthquakes in India and the Himalaya: Tectonics, geodesy and history: *Annals of Geophysics*, **47**(2-3).
- Bird, P., and Kagan, Y. Y., 2004, Plate-tectonic analysis of shallow seismicity: Apparent boundary width, beta, corner magnitude, coupled lithosphere thickness, and coupling in seven tectonic settings: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**(6), 2380-2399.
- Bird, P., and Kreemer, C., 2014, Revised tectonic forecast of global shallow seismicity based on version 2.1 of the Global Strain Rate Map: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(1), 152-166.
- Copley, A., and Jackson, J., 2006, Active tectonics of the Turkish-Iranian plateau: *Tectonics*, **25**(6).
- Coppersmith, K., 1989, On spatial and temporal clustering of paleoseismic events: *Seismological Research Letters*, **59**, 299-304.
- Danciu, L., Şeşetyan, K., Demircioglu, M., Gülen, L., Zare, M., Basili, R., Elias, A., Adamia, S.,

- Tsereteli, N., and Yalçın, H., 2018, The 2014 earthquake model of the middle east: seismogenic sources: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(8), 3465-3496.
- De Martini, P. M., Hessami, K., Pantosti, D., D'Addezio, G., Alinaghi, H., and Ghafory-Ashtiani, M., 1998, A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran): *Tectonophysics*, **287**(1-4), 187-199.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R., and Tavakoli, F., 2011, NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network: *Earth and Planetary Science Letters*, **307**(1-2), 27-34.
- Field, E. H., 2015, UCERF3: A new earthquake forecast for California's complex fault system: US Geological Survey.
- Field, E. H., Arrowsmith, R. J., Biasi, G. P., Bird, P., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Jackson, D. D., Johnson, K. M., Jordan, T. H., and Madden, C., 2014, Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3)—The time-independent model: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(3), 1122-1180.
- Field, E. H., Biasi, G. P., Bird, P., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Jackson, D. D., Johnson, K. M., Jordan, T. H., Madden, C., and Michael, A. J., 2015, Long-term time-dependent probabilities for the third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3): *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(2A), 511-543.
- Field, E. H., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Frankel, A. D., Gupta, V., Jordan, T. H., Parsons, T., Petersen, M. D., Stein, R. S., and Weldon, R., 2009, Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 2 (UCERF 2): *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(4), 2053-2107.
- Foroutan, M., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Murray, A., Le Dortz, K., Shokri, M., Arnold, M., Aumaître, G., and Boursès, D., 2014, Late Pleistocene-Holocene right slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lut block, Iran: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**(4), 3517-3560.
- Foroutan, M., Sébrier, M., Nazari, H., Meyer, B., Fattahi, M., Rashidi, A., Le Dortz, K., and Bateman, M., 2012, New evidence for large earthquakes on the Central Iran plateau: palaeoseismology of the Anar fault: *Geophysical Journal International*, **189**(1), 6-18.
- Hanks, T. C., and Kanamori, H., 1979, A moment magnitude scale: *Journal of Geophysical Research*, **84**, 2348-2350.
- Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H., 2003, Major active faults of Iran: *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran.
- Hessami, K., Mobayyen, F., and Tabassi, H., 2013, The map of active faults of Iran: *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran.
- Hessami, K., Nilforoushan, F., and Talbot, C. J., 2006, Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements: *Journal of the Geological Society*, **163**(1), 143-148.
- Kalaneh, S., and Agh-Atabai, M., 2016, Spatial variation of earthquake hazard parameters in the Zagros fold and thrust belt, SW Iran: *Natural Hazards*, **82**(2), 933-946.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., and Rahimian, M., 2015, Long term fault slip rates, distributed deformation rates and forecast of seismicity in the Iranian Plateau: *Tectonics*, **34**(10), 2190-2220.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., and Rahimian, M., 2016a, Using a physics-based earthquake simulator to evaluate seismic hazard in NW Iran: *Geophysical Journal International*, **206**(1), 379-394.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., Rahimian, M., and Dehnamaki, V., 2016b, Seismicity parameters and Sspatially smoothed seismicity model for Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**(3), 1133-1150.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., Schultz, K., and Rahimian, M., 2016c, Recurrence time distributions of large earthquakes in Eastern Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**(6), 2624-2639.
- Kijko, A., 2004, Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} : Pure and

- Applied Geophysics, **161**(8), 1655-1681.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1989, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes: Bulletin of the Seismological Society of America, **79**(3), 645-654.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1990, Estimation of earthquake hazard parameters for incomplete and uncertain data files: Natural Hazards, **3**(1), 1-13.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity: Bulletin of the Seismological Society of America, **82**(1), 120-134.
- Kijko, A., Smit, A., and Sellevoll, M. A., 2016, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part III. Incorporation of uncertainty of earthquake-occurrence model: Bulletin of the Seismological Society of America, **106**(3), 1210-1222.
- Kreemer, C., Blewitt, G., and Klein, E. C., 2014a, A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model: Geochemistry, Geophysics, Geosystems, **15**(10), 3849-3889.
- Kreemer, C., Klein, G., Shen, Z., Wang, M., Estey, L., Wier, S., and Boler, F., 2014b, Global geodetic strain rate model: GEM Technical Report.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sébrier, M., Braucher, R., Nazari, H., Benedetti, L., Fattahi, M., Bourlès, D., Foroutan, M., and Siame, L., 2011, Dating inset terraces and offset fans along the Dehshir Fault (Iran) combining cosmogenic and OSL methods: Geophysical Journal International, **185**(3), 1147-1174.
- Le Dortz, K., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Braucher, R., Fattahi, M., Benedetti, L., Foroutan, M., Siame, L., and Bourlès, D., 2009, Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, Central Iran: Geophysical Journal International, **179**(2), 700-710.
- Liu, Z., and Bird, P., 2008, Kinematic modelling of neotectonics in the Persia-Tibet-Burma Orgen: Geophysical Journal International, **172**(2), 779-797.
- Marco, S., Stein, M., Agnon, A., and Ron, H., 1996, Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **101**(B3), 6179-6191.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignières, M., Nankali, H., and Van Gorp, S., 2007, Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran: Geophysical Journal International, **170**(1), 436-440.
- Masson, F., Chéry, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., and Ghafory-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data: Geophysical Journal International, **160**(1), 217-226.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., and Vernant, P., 2006, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin: Earth and Planetary Science Letters, **252**(1), 180-188.
- Masson, F., Lehujeur, M., Ziegler, Y., and Doubre, C., 2014, Strain rate tensor in Iran from a new GPS velocity field: Geophysical Journal International, **197**, 10-21.
- Mazzotti, S., Leonard, L., Cassidy, J., Rogers, G., and Halchuk, S., 2011, Seismic hazard in western Canada from GPS strain rates versus earthquake catalog: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **116**(B12).
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., and Shabani, E., 2015, A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau: Annals of Geophysics, **57**(6).
- Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R., Tavakoli, F., Pathier, E., Nankali, H., Nilfouroushan, F., and Djamour, Y., 2013, Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region: Earth and Planetary Science Letters, **377**, 287-298.
- Movaghari, R., JavanDoloei, G., Yang, Y., Tatar, M., and Sadidkhoy, A., 2021, Crustal radial

- anisotropy of the Iran plateau inferred from ambient noise tomography: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **126**(4), e2020JB020236.
- Nankali, H., 2011, Slip rate of the Kazerun fault and Main Recent fault (Zagros, Iran) from 3D mechanical modeling: *Journal of Asian Earth Sciences* **41**(1), 89-98.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., and Tavakoli, F., 2003, GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran: *Journal of Geodesy*, **77**(7-8), 411-422.
- Petersen, M. D., Cao, T., Campbell, K. W., and Frankel, A. D., 2007, Time-independent and time-dependent seismic hazard assessment for the State of California: Uniform California Earthquake Rupture Forecast Model 1.0: *Seismological Research Letters* **78**(1), 99-109.
- Sadeghi-Bagherabadi, A., Sobouti, F., Ghods, A., Chen, L., Talebian, M., Motaghi, K., Jiang, M., He, Y., and Ai, Y., 2017, Seismic anisotropy and mantle deformation in western Iran inferred from shear-wave splitting analysis: EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Scawthorn, C., and Chen, W.-F., 2002, *Earthquake Engineering Handbook*: CRC press.
- Şeşetyan, K., Danciu, L., Tümsa, M. B. D., Giardini, D., Erdik, M., Akkar, S., Gülen, L., Zare, M., Adamia, S., and Ansari, A., 2018, The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(8), 3535-3566.
- Silva, V., 2018, Critical issues on probabilistic earthquake loss assessment: *Journal of Earthquake Engineering*, **22**(9), 1683-1709.
- Stein, R. S., 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence: *Nature*, **402**(6762), 605.
- Stewart, J. P., Chiou, S.-J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G., and Abrahamson, N. A., 2002, Ground motion evaluation procedures for performance-based design: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9-12), 765-772.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran: *Geophysical Journal International*, **156**(3), 506-526.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Martinod, J., Walpersdorf, A., Ghafari-Ashtiany, M., and Chéry, J., 2002, The present-day deformation of the central Zagros from GPS measurements: *Geophysical Research Letters*, **29**(19), 33-31-33-34.
- Tavakoli, F., Walpersdorf, A., Authemayou, C., Nankali, H., Hatzfeld, D., Tatar, M., Djamour, Y., Nilforoushan, F., and Cotte, N., 2008, Distribution of the right-lateral strike-slip motion from the Main Recent Fault to the Kazerun Fault System (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities: *Earth and Planetary Science Letters*, **275**(3-4), 342-347.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J.-F., Sedighi, M., and Tavakoli, F., 2004a, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data: *Earth and Planetary Science Letters*, **223**(1-2), 177-185.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., and Bayer, R., 2004b, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophysical Journal International*, **157**(1), 381-398.
- Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chéry, J., and Masson, F., 2006, Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran): *Geophysical Journal International*, **167**(3), 1077-1088.
- Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., Hatzfeld, D., Aghamohammadi, A., Bigot, A., and Djamour, Y., 2014, Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**(2), 1359-1383.
- Ward, S. N., 1998, On the consistency of earthquake moment rates, geological fault

data, and space geodetic strain: the United States: *Geophysical Journal International*, **134**(1), 172-186.

Yaminifard, F., Sedghi, M. H., Gholamzadeh, A., Tatar, M., and Hessami, K., 2012, Active faulting of the southeastern-most Zagros (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure: *Journal of Geodynamics*, **55**, 56-65.

Zolfaghari, M. R., 2009, Geodetic deformation vs. seismic strain deduced by historical earthquakes across the Alborz Mountains: *Journal of Seismology*, **13**(4), 647-663.

Estimation of earthquake occurrence rate based on the crust deformation of Iran

Alireza Lotfi¹, Hamid Zafarani^{2*} and Alireza Khodaverdian³

¹ Ph.D. student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

² Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

³ Postdoctoral researcher, ETH, Zurich, Switzerland

(Received: 24 July 2021, Accepted: 30 August 2021)

Summary

The Iranian Plateau is one of the most seismically active regions in the world, where the recurrence time of large-magnitude events is often more than a thousand years. The Mw 7.3, 1990 Rudbar earthquake, which caused 40,000 deaths and 500,000 homeless, and the Mw 6.5, 2003 Bam earthquake, which caused around 26,000 losses and 30,000 wounded, are two of the largest and the most destructive earthquakes in the region. Seismic hazard assessment is useful in the classification of areas that are more prone to earthquake losses. The earthquake occurrence rate is an important factor in seismic hazard analysis, which is commonly based on the earthquake catalogs. Hence, providing complete and reliable catalogs is necessary to achieve more accurate estimates. Unfortunately, factors such as the incompleteness of catalogs, the long-term recurrence time of large earthquakes, and the inadequate short-term instrumental record of about 100 years have resulted in unreliable earthquake occurrence rates estimates. To reduce uncertainties, some models have been developed for some places in the world such as California, Canada, Japan, New Zealand, and Italy based on the combination of various data as inputs, such as seismicity information, geological data such as fault slip rates, and geodetic information such as GPS data. The utilization of these models can increase the knowledge about the spatio-temporal distribution of earthquakes and reduce the uncertainty of results. The purpose of this study is to convert the strain rate into the earthquakes occurrence rate for some zones in Iran. Strain rates are derived from the available comprehensive deformation model of the Iranian Plateau, in which the long-term crustal flow of the Iranian Plateau is computed by using various data sets, including the latest fault traces, geologic fault offset rates, GPS velocities, principal stress directions, and velocity boundary conditions. In the comprehensive deformation model of the Iranian Plateau, based on the existing information on relative displacement of geologic features, the long-term geological offset rates for 33 of 171 fault traces were collected as input. Moreover, geodetic velocities of 239 GPS benchmarks were considered. Comparison with the results of the existing catalogs shows that for the whole Iranian Plateau, the occurrence rate based on strain is higher than the occurrence rate based on the catalog. We expect that utilizing the occurrence rate based on strain in the hazard model in further studies can have a significant effect on the ground motion parameters for Iran in comparison with previous catalog-based seismic hazard assessments.

Keywords: Iranian Plateau, deformation model, seismic moment rate, strain rate, earthquake occurrence rate