

تحلیل پتانسیل لرزه‌خیزی گسل مشاء-فشم براساس تغییرات پارامترهای لرزه‌خیزی

فاطمه چنگی^۱، حسین حاجی‌علی‌بیگی^{۲*} و سلما امی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ استادیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴)

چکیده

شمال شهر تهران تحت تأثیر گسل‌های فعال، در زمره مناطق خطرپذیر زلزله قرار دارد. گسل مشاء-فشم از جمله چشمه‌های لرزه‌خیز این منطقه است که جایگاه زمین‌ساختی و پیشینه فعالیت این گسل، نقش اساسی در ارزیابی خطر زمین‌لرزه پایتخت دارد. تمرکز بالای جمعیت در شهر تهران بر آسیب‌پذیری این شهر افزوده است. بنابراین، مطالعه تغییرات لرزه‌خیزی و بررسی ویژگی‌های هندسی، سینماتیکی و روابط ساختاری کنونی چشمه‌های لرزه‌زا به ویژه در بخش‌های مرکزی و شرقی آن، برای شناخت زمین‌ساخت فعال منطقه و برآورد دقیق‌تر خطر لرزه‌ای ضروری است. با توجه به پتانسیل لرزه‌زایی قابل توجه گسل مشاء-فشم، این مطالعه به شناخت رفتار لرزه‌خیزی و الگوی تنش حاکم بر آن پرداخته است. این مطالعه با برآورد بزرگای بیشینه و بررسی تغییرات پارامترهای لرزه‌خیزی رابطه گوتنبرگ-ریشتر به تحلیل لرزه‌خیزی این منطقه پرداخته است. یافته‌های این مطالعه، روند تغییرات پارامتر b در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ میلادی در ناحیه گسل مشاء-فشم نشان می‌دهد که کاهش پارامتر b شیب منحنی گوتنبرگ-ریشتر، پیش از رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ قابل توجه بوده و حاکی از تجمع تنش در طول گسل و آمادگی برای رخداد یک زلزله متوسط و بزرگ است. نقشه توزیع این پارامتر نشان‌دهنده فراوانی رویدادها در مناطق کاهش پارامتر b است. همچنین، برآورد بزرگای بیشینه نشان می‌دهد که روش‌های Tate-Pisarenko, Kijko-Sellevoll, Gibowicz-Kijko-Bayes همگی مقدار $M_{max} \approx 7.6$ را ارائه می‌دهند، در حالیکه روش غیرپارامتری گاوسی مقدار پایین‌تری برابر با $M_{max} \approx 7.1$ را تخمین می‌زند. یافته‌ها بینش‌های کلیدی درباره رفتار لرزه‌ای منطقه بر اساس تغییرات پارامترهای لرزه‌خیزی و مقادیر احتمال رخدادهای بزرگ در شمال تهران را، ارائه می‌کنند.

کلمه‌های کلیدی: پارامترهای لرزه‌خیزی، پارامتر b ، بیشینه بزرگای لرزه‌زایی، رابطه گوتنبرگ-ریشتر، گسل مشاء-فشم

مقدمه

ایران در یکی از فعال‌ترین نواحی زمین‌ساختی جهان واقع شده است و موقعیت آن در محل برخورد دو صفحه زمین‌ساختی عربی و اوراسیا، منشأ اصلی رخدادهای زمین‌ساختی و زمین‌لرزه‌های فراوان در پهنه این سرزمین است. برخورد این دو صفحه که با سرعت میانگین حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر در سال در حال وقوع است، باعث فشردگی و چین‌خوردگی بخش‌های وسیعی از پوسته قاره‌ای ایران شده و سامانه‌های گسلی متعددی را در قالب پهنه‌هایی چون زاگرس، البرز، مکران، ایران مرکزی و کوه‌های خاوری ایران پدید آورده است (Vernant et al., 2004; Allen et al., 2004). این ویژگی زمین‌ساختی موجب شده است که ایران از نظر لرزه‌خیزی نیز در رده کشورهای با خطر بالا قرار گیرد.

تحلیل خطر لرزه‌ای و مطالعه تغییرات لرزه‌خیزی در برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه و آمادگی در برابر خطر زلزله، اهمیت چشمگیری دارند. تحلیل پارامترهای لرزه‌خیزی مانند ضرایب a و b از رابطه گوتنبرگ-ریشتر، به درک بهتر توزیع مکانی و عمقی رویدادهای لرزه‌ای کمک می‌کند (ویمر و ویس، ۲۰۰۰). تغییرات پارامتر b ، به ویژه در مقایسه‌های زمانی، می‌تواند به عنوان شاخصی برای بررسی تحولات تنش‌های زمین‌ساختی و ارزیابی احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر در آینده تلقی شود. کاهش ناگهانی این پارامتر، معمولاً نمایانگر افزایش تنش‌های تجمع‌یافته در ناحیه و در نتیجه، هشداردهنده‌ی احتمال بالاتر وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌مقیاس در آینده‌ای نزدیک است. پایش پیوسته تغییرات پارامتر b می‌تواند به عنوان ابزاری کمی و کاربردی در ارزیابی روندهای پیش‌نشانگر و مدیریت خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد (لاسیدون و همکاران، ۲۰۲۳). بررسی هم‌زمان پارامتر b و نرخ لرزه‌خیزی زمینه‌ای نشان می‌دهد که مناطقی که دارای مقدار پایین پارامتر b (کمتر از ۰/۹) و

نرخ بالای رخداد زلزله هستند، در آینده نزدیک مستعد وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۵). تحلیل‌های زمانی و مکانی مقدار پارامتر b پیش از سه زمین‌لرزه بزرگ اخیر در ایتالیا نشان می‌دهد که مقدار b در روزها یا ماه‌های منتهی به زلزله‌های اصلی کاهش یافته و این کاهش در مرکز و اطراف کانون زمین‌لرزه قابل مشاهده بوده است. مطالعه فوق تأکید می‌کند که تغییرات پارامتر b می‌تواند ابزار مفیدی برای پایش خطر لرزه‌ای و هشدار پیش‌لرزه‌ای باشد (لاسیدون و همکاران، ۲۰۲۳). بررسی تغییرات زمانی و مکانی پارامتر b در بازه‌ای ۲۲ ساله (بین سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۲۱ میلادی) در کشور تایوان نشان داد که ۷۰ درصد از زمین‌لرزه‌های بزرگ در نواحی‌ای رخ داده‌اند که مقدار عددی پارامتر b در آن‌ها به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از میانگین بوده است (امی و زعفرانی، ۲۰۱۶). بنابراین، نقشه‌های مکانی پارامتر b می‌تواند به عنوان ابزار مکمل در تحلیل خطر زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل تغییرات مقدار پارامتر b در نواحی اطراف زلزله‌های $M_w=6.8$ و $M_w=6.9$ منطقه میاگی ژاپن در فاصله چند سال پیش از وقوع آن‌ها نشان داد که مقدار پارامتر b در این نواحی از حدود ۱/۰ به زیر ۰/۷ کاهش یافته و این کاهش دست‌کم دو تا سه سال پیش از رخداد اصلی شروع شده است (نانجو و یوشیدا، ۲۰۲۱). محققان بر این باورند که کاهش مقدار پارامتر b نشان‌دهنده افزایش تنش‌های فشاری در پوسته زمین است و می‌تواند به عنوان شاخصی برای پایش رفتار لرزه‌ای مناطق فعال مورد استفاده قرار گیرد.

تخمین دقیق بزرگای بیشینه برای یک منطقه لرزه‌زا از اهمیت بالایی در تحلیل خطر لرزه‌ای و شناسایی ویژگی‌های زمین‌ساختی آن برخوردار است (بیکر و کورنل، ۲۰۰۸). تاکنون روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای برآورد این پارامتر توسعه یافته‌اند که در اغلب آن‌ها،

مقدار بزرگای پیشینه به صورت مستقیم و صرفاً بر اساس پیشینه لرزه‌ای منطقه، با استفاده از کاتالوگ رخدادهای زمین‌لرزه‌ای و به کارگیری فرآیندهای آماری مناسب، تخمین زده می‌شود. در رویکردهای آماری متداول، تخمین بزرگای پیشینه عمدتاً بر پایه برون‌یابی روابط کلاسیک خطی-لگاریتمی گوتنبرگ-ریشتر انجام می‌گیرد (گوتنبرگ و ریشتر ۱۹۴۴؛ یوتسو، ۱۹۶۵). در این راستا، روش‌های آماری متعددی بر اساس فرضیات مختلف درباره مدل‌های پراکندگی آماری و ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه ارائه شده‌اند (کیجکو، ۲۰۰۴). رویکردی دیگر، مبتنی بر نظریه آماری مقادیر کرائنگین متغیرهای تصادفی است که از اواسط قرن بیستم به طور گسترده در مطالعات لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (گامبل، ۱۹۵۸؛ پیسارنکو و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، برخی از روش‌های مبتنی بر آمار بیزی به ویژه در شرایطی که کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها کامل نباشد یا تعداد رخدادهای ثبت شده محدود باشد، کارایی بیشتری دارند (کیجکو و سینگ، ۲۰۱۱). با وجود تفاوت در مبانی نظری و آماری این رویکردها، در تمامی آن‌ها بزرگ‌ترین بزرگا‌های مشاهده شده و ثبت شده در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در برآورد بزرگای پیشینه محتمل ایفا می‌کنند (کیجکو و گراهام، ۱۹۹۸؛ یوتسو، ۱۹۶۵).

تمرکز بالای جمعیت و آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران را در شمار پرخطرترین پایتخت جهان قرار داده است (امی و امینی، ۲۰۲۴).

در ارتباط با تحلیل خطر لرزه‌ای، در شمال تهران و البرز مرکزی تاکنون توسط پژوهش‌های متعددی انجام شده است. زعفرانی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از منطق فازی، خطر لرزه‌ای تهران را ارزیابی کردند و گسل مشاء-فشم را یکی از چشمه‌های اصلی با پتانسیل تولید زلزله بزرگ دانستند. غفوری‌آشتیانی و همکاران (۲۰۲۰)

در مطالعه‌ای جامع، سناریوهای زلزله‌ای گسل مشاء-فشم را مدل‌سازی کردند و احتمال رخداد زلزله با بزرگای $M_w > 7$ را قابل توجه ارزیابی نمودند. همچنین، مومنی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی لرزه‌خیزی بلندمدت گسل مشاء-فشم، تحت تأثیر آتشفشان دماوند، پتانسیل لرزه‌زایی این گسل را بالا ارزیابی کرده و خطر آن برای تهران را مورد تأکید قرار دادند. کامران‌زاد و همکاران (۲۰۲۰) در ارزیابی خطر لرزه‌ای تهران، سناریوی گسل مشاء-فشم را یکی از مهم‌ترین چشمه‌ها دانستند که می‌تواند $PGA = 0.45-0.5g$ در بخش‌های شمالی و شرقی تهران ایجاد کند. در پژوهشی دیگر، خلیل‌خواه و همکاران (۲۰۲۴)، با مدل‌سازی stochastic finite-fault برای سناریوی گسل مشاء-فشم، خسارات احتمالی ساختمانی و جانی قابل توجهی (حدود ۱۶۰۰۰ نفر تلفات احتمالی) را برای تهران پیش‌بینی کردند.

مطالعه تغییرات لرزه‌شناسی و شناسایی چشمه‌های لرزه‌خیزی در این زون لرزه‌زا گامی ارزنده در جهت تدقیق تحلیل خطر زلزله در تهران است. گسل مشاء-فشم یک گسل بزرگ امتدادلغز چپ‌بر است که در شرق تهران، پایتخت پرجمعیت ایران، واقع شده یکی از چشمه‌های فعال لرزه‌ای این منطقه است. این گسل امتدادلغز چپ‌گرد چندین زمین‌لرزه بزرگ را تجربه کرده است. این گسل در حاشیه جنوبی البرز قرار دارد و بخشی از سامانه تقسیم تغییرشکل (partitioning system) به شمار می‌رود که همراه با گسل‌های معکوس خزر و شمال تهران، حرکت مایل (oblique motion) در البرز مرکزی را جذب می‌کند. چندین زمین‌لرزه تاریخی به گسل‌های مشاء-فشم و شمال تهران نسبت داده شده است، از جمله سه رویداد بزرگ که در امتداد گسل مشاء-فشم در سال‌های ۹۵۸، ۱۶۶۵ و ۱۸۳۰ میلادی رخ داده‌اند که بزرگای آن‌ها $M_w = 6.5$ برآورد شده است (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲؛ بربریان و همکاران، ۱۹۸۲).

اگرچه اسناد تاریخی وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ را نشان می‌دهند، این سوابق احتمالاً کامل نیستند. بر اساس اهمیت این گسل در رخداد زلزله تهران و اهمیت تغییرات پتانسیل لرزه‌خیزی در پایتخت ایران، این مطالعه به تحلیل تغییرات لرزه‌خیزی براساس پارامترهای لرزه‌خیزی در این منطقه و برآورد میزان بیشینه بزرگای زلزله بر اساس کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی منسوب به این چشمه لرزه‌زا، پرداخته است.

مواد و روش

ویژگی‌های زمین‌شناسی گسل مشاء-فشم

رشته‌کوه البرز، یک کمر بند کوهزایی فعال است که حوضه اقیانوسی خزر جنوبی را احاطه کرده و می‌توان آن را بخش شمالی کمر بند کوهزایی آلپ-همالیا در غرب آسیا دانست (اشتوکلین، ۱۹۷۴). این رشته‌کوه با روندی قوسی شکل بیش از ۹۰۰ کیلومتر امتداد دارد و به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود. طولانی‌ترین بخش آن، البرز مرکزی، حدود ۶۰۰ کیلومتر در امتداد جنوبی دریای خزر از قزوین تا دامغان گسترش دارد. البرز غربی، از قزوین تا تالش و البرز شرقی از دامغان تا رشته‌کوه کپه‌داغ، تعریف می‌شود. گسل مشاء-فشم به عنوان بزرگ‌ترین گسل در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، حدود ۱۷۵ کیلومتر طول دارد (Landgraf et al., 2009; Momeni et al., 2022; Stöcklin, 1974). این گسل نخستین بار به صورت یک گسل معکوس با شیب به سمت شمال توصیف شد (اشتری و همکاران، ۲۰۰۵). مطالعات نو زمین‌ساختی و لرزه‌شناسی نشان می‌دهد که تغییر شکل کنونی در البرز میان گسل‌های راندگی موازی با روند رشته‌کوه و گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد تقسیم شده است (هالینگزورس و همکاران، ۲۰۰۸؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). در مقیاس محلی، گسل مشاء-فشم بزرگ‌ترین گسل در سامانه پیچیده گسل‌های پیرامون

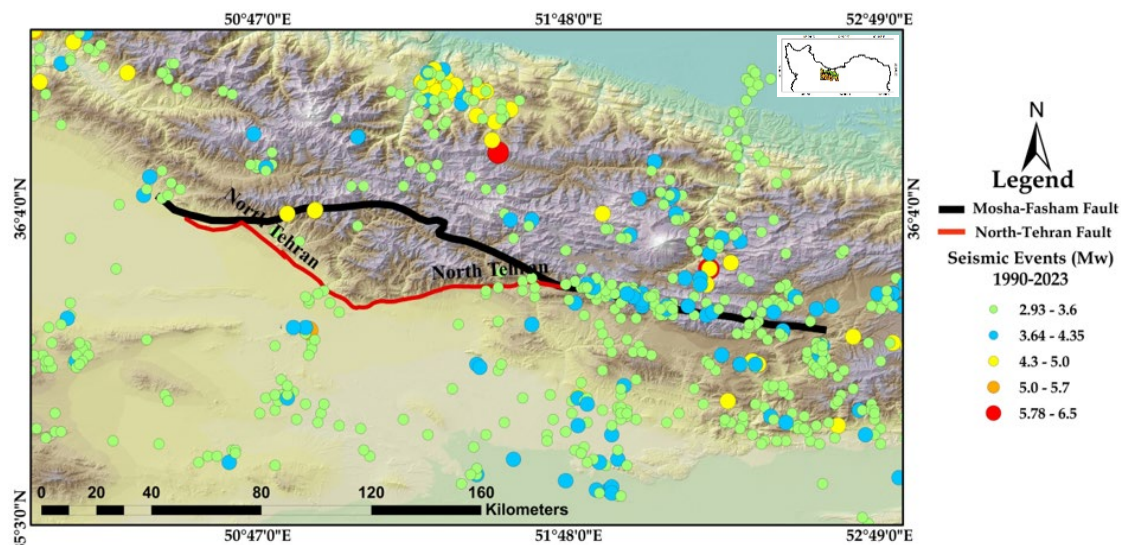
شهر تهران است. این گسل در مقیاس کوچک‌تر، الگوی ۷ شکل البرز را بازتاب می‌دهد، به گونه‌ای که در بخش غربی، گسل‌هایی با روند WNW-ESE و در بخش شرقی، گسل‌هایی با روند ENE-WSW قرار دارند و حرکت مایل را بین گسل‌های معکوس و امتدادلغز چپ‌بر تقسیم می‌کنند (جکسون ۱۹۹۲؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲).

اطلاعات اندکی تاریخی درباره لرزه‌خیزی مرتبط با این سامانه گسلی، شواهدی از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ و جابه‌جایی قابل توجه در امتداد گسل مشاء-فشم را نشان می‌دهد (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲). در طی سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ میلادی، یک شبکه موقت شامل حدود ۲۰ ایستگاه لرزه‌نگاری سیار، به مدت چند هفته، بر روی گسل مشاء-فشم نصب شد. داده‌های زمین‌لرزه‌ای ثبت شده توسط این شبکه‌ها نشان می‌دهد که هر دو گسل مشاء-فشم و گرمسار، با شیب به سمت شمال، گسل‌های فعالی هستند که واحد مولفه‌های حرکت امتدادلغز چپ‌بر نیز می‌باشند (اشتری و همکاران، ۲۰۰۵).

کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها

براساس طول و عرض جغرافیایی محدوده مورد مطالعه این پژوهش که به ترتیب ۵۰ الی ۵۳ درجه عرض‌های شرقی و ۳۵ الی ۳۶ درجه طول‌های شمالی است (شکل ۱)، گردآوری اطلاعات زمین‌لرزه‌ای منطقه انجام شده است. برای تدوین کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای و تخمین پارامترهای لرزه‌خیزی داده‌های زمین‌لرزه‌ای از ماه نوامبر سال ۱۹۹۰ میلادی تا ماه نوامبر سال ۲۰۲۳ میلادی گردآوری شده است.

کاتالوگ لرزه‌ای مورد استفاده در این پژوهش، عمدتاً بر پایه کاتالوگ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT)، تهیه شده است. برای زمین‌لرزه‌های پیش از و ماهانی (۲۰۲۰) بهره گرفته شد.



شکل ۱. نمایش محدوده مورد مطالعه شامل گسل‌های مشاء-فشم و شمال تهران (رویدادهای زمین‌لرزه‌ای ثبت شده شامل بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ میلادی است). برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود..

بزرگای کامل بودن (Magnitude of Completeness)، یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در تحلیل آماری داده‌های زمین‌لرزه‌ای به‌شمار می‌رود. این مقدار حداقل بزرگی زمین‌لرزه‌هایی را تعیین می‌کند که شبکه‌ی لرزه‌نگاری مشخص قادر به ثبت قابل اعتماد آن‌ها در یک محدوده‌ی زمانی و مکانی خاص است. اهمیت تعیین دقیق بزرگای کامل بودن (M_c) در آن است که محاسبات پارامترهای لرزه‌خیزی مانند ضریب a و b در رابطه گوتنبرگ-ریشتر، تنها زمانی معتبر خواهند بود که مجموعه داده‌ها شامل رخدادهایی با بزرگای برابر یا بزرگ‌تر از M_c باشند (ویمر و ویس، ۲۰۰۰).

بنابراین مقدار بزرگای کامل بودن M_c در این مطالعه براساس روش بیشینه مقدار انحنا تعیین شده که مقدار $3/2$ را نشان می‌دهد. برای دقت بیشتر مقادیر بزرگای کمتر از این مقدار از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای حذف گردید. همچنین به منظور افزایش دقت تحلیل‌ها و جلوگیری از تأثیرگذاری رخدادهای وابسته (نظیر پس‌لرزه‌ها و خوشه‌های لرزه‌ای)، فرایند خوشه‌زدایی (Declustering) بر روی کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها اعمال شده است. در این

به منظور اصلاح، تکمیل و اطمینان از صحت داده‌ها و همچنین حذف رخداد‌های تکراری و تصحیح مختصات مکانی و بزرگای زمین‌لرزه‌ها، اطلاعات با بولتن پژوهشکده زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (HIES)، مقایسه و تصحیح گردید. داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های تاریخی نیز از منابع معتبر منتشرشده توسط امبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) استخراج شد. در نهایت، تمامی بزرگای‌های گزارش‌شده، با استفاده از روابط تبدیل ارائه‌شده توسط شاهوار و همکاران (۲۰۱۳) به بزرگای گشتاوری (M_w) تبدیل شدند.

داده‌های ثبت شده در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای، بیشترین تراکم فعالیت لرزه‌ای را بر روی بخش شرقی از گسل نمایش می‌دهد که پیوستگاه گسل مشاء-فشم با گسل شمال تهران می‌باشد (شکل ۱)، طبق پژوهش تحلیل ساختاری و جنبشی گستره بین گسل مشاء-فشم و گسل شمال تهران این فعالیت‌ها بر روی فرودپایه گسل شمال تهران به وقوع پیوسته است (آلن و همکاران، ۲۰۰۴؛ تاتار و همکاران، ۲۰۰۴).

تخمین بزرگای بیشینه

تخمین بیشینه بزرگای گسل که معرف بیشینه توان لرزه‌زایی چشمه لرزه‌زا است، اطلاعات ارزشمند زمین‌ساختی و زمین‌شناسی را به همراه دارد. نوپوف و کاگان (۱۹۷۷) نشان دادند که اگر رابطه (۱) بزرگا-تعداد گوتنبرگ-ریشتر

$$\log_{10} E = c + dM \quad (2)$$

که در آن c و d ثابت هستند، می‌توان نشان داد که انرژی لرزه‌ای کل آزادشده در واحد زمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{\text{total}} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \, dN(E) \propto E_{\min}^b \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E^{-b} dE \quad (3)$$

که در آن E_{total} انرژی لرزه‌ای کل آزاد شده در یک بازه زمانی معین، E انرژی لرزه‌ای یک زمین‌لرزه تکی بر حسب ژول، $dN(E)$ تعداد دیفرانسیلی زمین‌لرزه‌هایی که انرژی‌شان بین E و $E+dE$ قرار دارد، $E_{\min}$ و $E_{\max}$ به ترتیب انرژی حداقل و حداکثر در نظر گرفته شده در کاتالوگ لرزه‌ای، b مقدار (b-value) قانون گوتنبرگ-ریشتر، d ضریب مقیاس‌بندی رابطه انرژی-بزرگا. در صورتی که $d \approx 1.5$ و $b \approx 1$ و اگر $E_{\max} \rightarrow \infty$ فرض شود، انتگرال فوق واگرا خواهد شد و مقدار انرژی کل آزاد شده نامحدود می‌شود. بنابراین، برای جلوگیری از این ناپایداری فیزیکی، لازم است حد بالایی برای انرژی بیشینه $E_{\max}$ و به طور معادل بزرگای بیشینه $M_{\max}$ تعریف شود. بر این اساس، در این پژوهش برای تحلیل خطر لرزه‌ای و برآورد بزرگای بیشینه محتمل، از چهار روش آماری معتبر استفاده شده است که هر یک رابطه‌ای مشخص میان بزرگا، فراوانی رخداد و احتمال تجاوز از آستانه‌های معین ارائه می‌کنند.

روش بی‌زین Kijko-Gibowicz-Bayes

مطالعه به منظور خوشه‌زدایی از کاتالوگ از روش Reasenberg (ریزنبرگ، ۱۹۸۵) بهره گرفته شده است.

پارامترهای لرزه‌خیزی

رابطه خطی فراوانی زلزله‌هایی با بزرگای M به صورت رابطه (۱) توصیف می‌شود. ضرایب این رابطه برای ارزیابی پتانسیل لرزه‌خیزی به کار می‌رود (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۴۴):

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

که در آن M بزرگای زلزله است که بر اساس M_w یا M_s در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین N تعداد زمین‌لرزه‌های مساوی یا بزرگ‌تر از M در بازه زمانی بانک داده‌ها (کاتالوگ) لرزه‌ای است. a و b ، پارامترهای لرزه‌خیزی هستند، به نحوی که a را به ویژگی‌های زمین‌ساختی ناحیه مرتبط می‌دانند (آنجانا و لاسیتا، ۲۰۲۳) و پارامتر b شیب خط در نمودار $\log N = M$ است. با توجه به این رابطه 10^a بیانگر تعداد تعداد زلزله‌های با بزرگای بزرگ‌تر یا مساوی صفر می‌باشد که به سطح لرزه‌خیزی موسوم است. ضریب b نشانگر نسبت تعداد زلزله‌های کوچک و بزرگ است به صورتی که هرچه b بیشتر باشد نمایانگر تعداد کمتر زلزله‌های با بزرگای بیشتر در آن ناحیه است. این پارامتر معرف ناهمگنی در محیط لرزه‌زا است (امی و زعفرانی، ۲۰۱۶؛ زنگنه و صفاری، ۲۰۲۵؛ آنجانا و لاسیتا، ۲۰۲۳). قبل و بعد از یک زلزله بزرگ با فازهای لرزه‌ای سکون و فعالیت زمین‌لرزه‌ای در تغییرات مقدار پارامتر b منعکس می‌شود و این تغییرات الگوی لرزه‌خیزی را توصیف می‌کند. از آنجا که جنبش‌های شدیدتر در یک ساختگاه به وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر مربوط است، لذا اطلاعات در مورد مقدار b در تحلیل خطر زمین‌لرزه ارزش فوق‌العاده‌ای دارد، به همین دلیل پارامتر b را ضریب لرزه‌خیزی منطقه نیز می‌نامند.

$$M_{\max} = M_n - \frac{1}{\beta} \ln(-\ln p) \quad (6)$$

که در آن M_n ، بزرگ‌ترین زمین‌لرزه مشاهده شده و $\beta = b \ln 10$ ، همچنین p سطح احتمال تجاوز (معمولاً ۰/۹۵ یا ۰/۹۹) است.

روش غیرپارامتریک (گاوسی)

در این روش، بدون فرض شکل خاصی برای توزیع بزرگ‌ها، از برآورد چگالی احتمال به صورت گاوسی استفاده می‌شود. تخمین بزرگای بیشینه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_{\max} = M_n + \sigma \sqrt{2 \ln n} \quad (7)$$

که در آن M_n ، بزرگ‌ترین بزرگای ثبت شده، σ ، انحراف معیار بزرگ‌ها و n ، تعداد رخداد های لرزه‌ای است (کیجکو، ۲۰۰۴).

بحث و نتایج

برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

ضرایب لرزه‌خیزی a و b در رابطه گوتنبرگ-ریشتر، بر پایه توزیع فراوانی تجمعی بزرگی زمین‌لرزه‌ها استخراج شده‌اند و بیانگر نرخ لرزه‌زایی و الگوی توزیع بزرگی رخدادها در محدوده مورد مطالعه می‌باشند. این پارامترها علاوه بر محاسبه مستقیم از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار تخصصی ZMAP (ویمر، ۲۰۰۱) نیز برآورد شده‌اند که امکان تحلیل آماری دقیق‌تر کاتالوگ، ارزیابی کیفیت داده‌ها و بررسی تغییرات زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی را فراهم می‌سازد.

تحلیل تغییرات زمانی شیب منحنی گوتنبرگ-ریشتر، پارامتر b در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این پارامتر در طول دوره زمانی بررسی شده رفتار

یکنواختی نداشته و چندین افت معنادار را تجربه کرده است. این افت‌ها عموماً با دوره‌هایی هم‌زمان هستند که در آن‌ها نسبت رخداد های با بزرگی متوسط تا نسبتاً

در این روش، توزیع بزرگ‌های زمین‌لرزه‌ها با استفاده از توزیع‌های کران‌دار (نظیر گامبل یا لاپلاس تعمیم‌یافته) مدل‌سازی شده و عدم قطعیت پارامترها به صورت صریح در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی، امکان محاسبه احتمال وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بزرگ‌تر از مقدار مشخص را فراهم می‌کند (کیجکو و سینک، ۲۰۱۱). تخمین به روش بیزین بزرگای بیشینه به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$\hat{M}_{\max} = \sum_{i=1}^n w_i M_i + k S \quad (4)$$

که در آن $\hat{M}_{\max}$ بزرگای بیشینه تخمینی، آماری اختصاص‌یافته به بزرگای i امین رویداد ثبت شده، M_i بزرگای رخداد های ثبت شده، n تعداد رخدادها، S انحراف معیار بزرگ‌ها و k ضریب تصحیح وابسته به مدل توزیع و سطح اطمینان است.

روش Kijko-Sellevoll

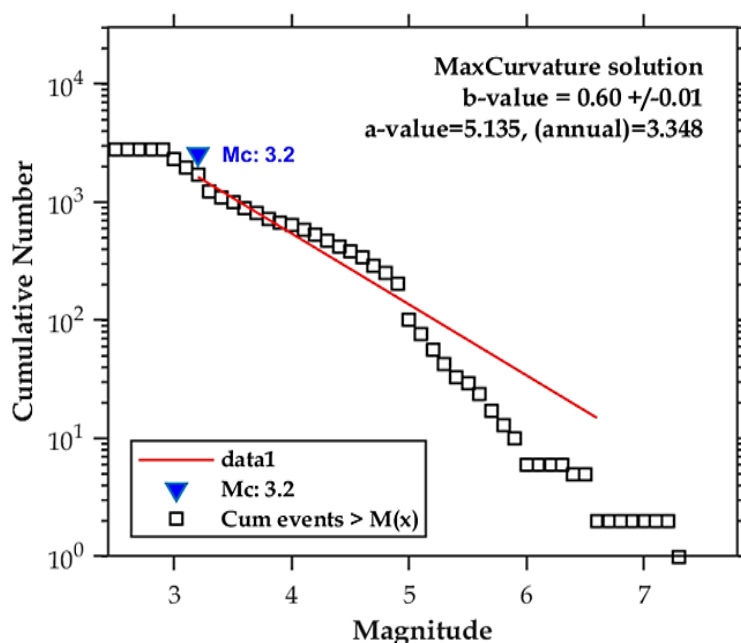
این روش یک رویکرد بیزی مبتنی بر توزیع دو کراندار گوتنبرگ-ریشتر است که در آن عدم قطعیت پارامتر b لحاظ نمی‌شود (کیجکو و سلول، ۱۹۸۹). تخمین بزرگای بیشینه از حل تکراری رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$M_{\max} = M_{\text{obs}} + \frac{1}{b \ln 10} \left[\frac{1}{\ln} + \exp(-b \ln 10 (M_{\max} - M_c)) \right] \quad (5)$$

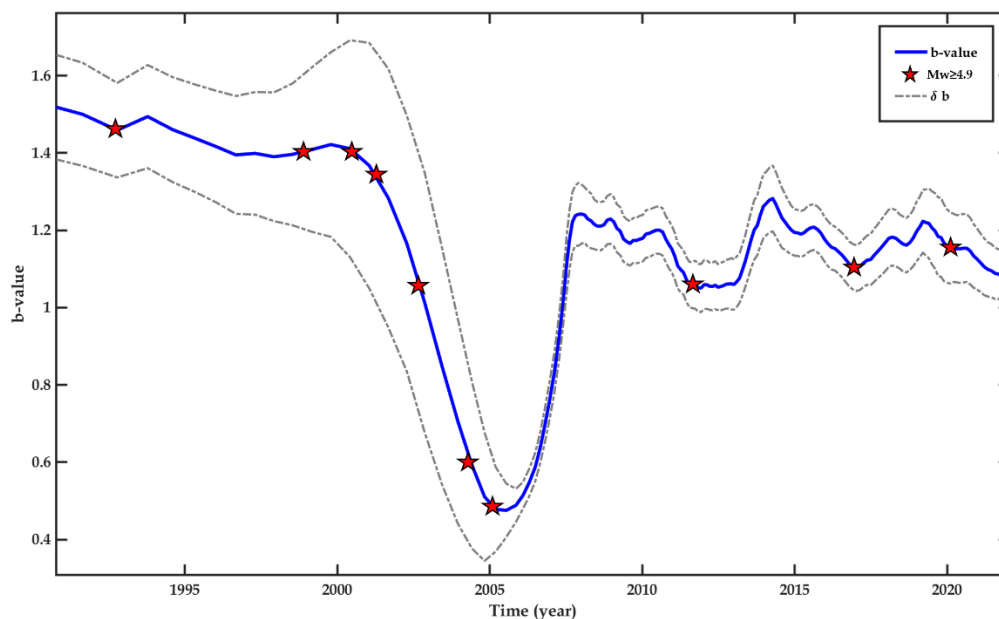
که در آن، M_{obs} ، بزرگ‌ترین بزرگای مشاهده شده، M_c ، بزرگای کامل بودن، b پارامتر گوتنبرگ-ریشتر n ، تعداد زمین‌لرزه‌ها است.

روش Tate-Pisarenko

این روش بر پایه نظریه مقادیر حدی (Extreme Value Theory) توسعه یافته و تنها از بزرگ‌ترین رخداد های ثبت شده استفاده می‌کند (کیجکو و گراهام، ۱۹۹۸). تخمین بزرگای بیشینه به صورت ذیل بیان می‌شود:



شکل ۲. نمایش مقادیر پارامترهای لرزه‌خیزی a و b و مقدار بزرگای کامل بودن M_c . برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.



شکل ۳. نمودار تغییرات مقدار پارامتر b نسبت زمان. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

استانداردسازی داده‌های دیجیتال از شبکه‌های محلی، دقت مکانی و زمانی رویدادها را بهبود بخشید و آستانه ثبت زلزله‌های کوچک‌تر را کاهش داد. این اصلاح، پایه‌ای برای مطالعات دقیق‌تر خطر لرزه‌ای و تحلیل‌های آماری شد (Soroush & Rahimi, 2022; Naserieh et al., 2025).

بزرگ افزایش یافته و شیب منحنی گوتنبرگ - ریشتر (b -value) در برخی بازه‌های زمانی کاهش را از روند میانگین خود نشان می‌دهد. از سال ۲۰۰۶ میلادی، با تأسیس مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC) و گسترش شبکه لرزه‌نگاری دیجیتال، اصلاح اساسی در کاتالوگ زلزله‌های ایران انجام شد. این مرکز با آرشیو و

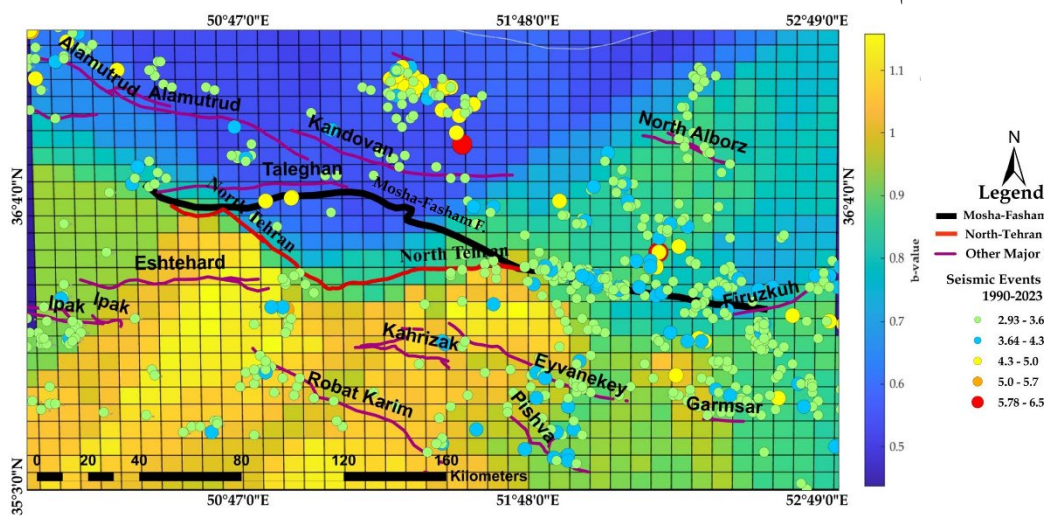
یکی از نخستین افت‌های قابل توجه پارامتر b در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ میلادی مشاهده می‌شود. بررسی کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای نشان می‌دهد که این کاهش با وقوع چندین زمین‌لرزه با بزرگی متوسط (از $M_w \approx 4$ تا $M_w \approx 5$) در این دوره هم‌زمان بوده است. از جمله رخدادهای شاخص این بازه می‌توان به زمین‌لرزه با بزرگای $M_w = 5.03$ در ۱۶ مه ۲۰۰۱ و همچنین مجموعه‌ای از رویدادها در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۶ (از جمله زمین‌لرزه‌های $M_w = 4.8$ در ۲۰ فوریه ۲۰۰۵، $M_w = 4.9$ در ۲۵ مارس ۲۰۰۵ و $M_w = 4.2$ در ۲۰ دسامبر ۲۰۰۶) اشاره کرد. این رویدادها با افزایش سهم زمین‌لرزه‌های متوسط نسبت به زمین‌لرزه‌های کوچک، منجر به کاهش مقدار پارامتر b و رسیدن آن به مقادیری نزدیک به $b \approx 0.6$ شده‌اند؛ این کاهش‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تغییر موقت در رژیم تنش منطقه باشد، هرچند برای نتیجه‌گیری قطعی در مورد تغییر رژیم لرزه‌ای، نیاز به داده‌های لرزه‌نگاری طول‌مدت‌تر و مطالعات تنش کرنشی وجود دارد (شولز، ۲۰۱۹). به‌طور گسترده گزارش شده است که پارامتر b پایین‌تر با تنش تفاضلی بالاتر یا شرایط شکست همگن‌تر مرتبط است؛ شرایطی که می‌تواند احتمال گسیختگی‌های بزرگ‌تر را افزایش دهد (Scholz, 2015; Nanjo, 2020). همچنین برخی چارچوب‌های آزمایشگاهی/نظری و مدل‌های اپیدمیک رخدادهای لرزه‌ای از این ایده پشتیبانی می‌کنند که b می‌تواند مانند یک «شاخص تنش» رفتار کند و با نزدیک شدن سامانه به وضعیت بحرانی کاهش یابد (Sornette, 2002; Scholz, 2015 & Helmstetter). از دیدگاه مکانی نیز این تغییرات ممکن است ناهمگن باشند؛ یعنی کاهش b عمدتاً نزدیک به ناحیه‌ی هیپوسنتر آینده رخ دهد، در حالی که مناطق پیرامونی رفتار متفاوتی نشان دهند (Xie, & Xie et al., 2022; Li) (2024).

شواهد موجود نشان می‌دهد که کاهش b -value می‌تواند پیش از برخی زلزله‌های متوسط رخ دهد و اغلب به‌عنوان یک نشانگر موضعی مرتبط با تنش تفسیر می‌شود (Xie, 2024; & Al-Arifi, 2011; Xie et al., 2022; Li) (Scholz, 2015). با این حال، ظهور این تغییرات به عوامل متعددی وابسته است: کامل بودن کاتالوگ، مقیاس مکانی پنجره تحلیل، انتخاب بازه بزرگی، و ویژگی‌های تکنیکی منطقه بستگی دارد (Papadopoulos et al., 2018; Nanjo, 2020). برخی زلزله‌های متوسط، ممکن است پیش از رخداد اصلی افت b -value (به‌خصوص به‌صورت موضعی در نزدیکی ناحیه کانونی) مشاهده شود؛ گرچه این پدیده جهانی و همیشگی نیست و برای آشکارسازی معتبر، به تحلیل دقیق روی کاتالوگ‌های باکیفیت و روش‌های آماری مناسب نیاز دارد (Scholz, 2015; Nanjo, 2020; Xie et al., 2022). در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۳ میلادی نیز افت‌های مشخص و تکرار شونده‌ای در مقدار b مشاهده می‌شود. یکی از افت‌های اصلی در سال ۲۰۱۲ رخ داده است که هم‌زمان با ثبت رخدادها ۱۱ ژانویه ۲۰۱۲ ($M_w = 4.9$) است که با ۵ رویداد دنبال شده است (13 ژانویه ۲۰۱۲ ($M_w = 4.29$), 22 آوریل ۲۰۱۲ ($M_w = 4.21$), 30 آوریل ۲۰۱۲ ($M_w = 4.29$), 27 ژوئیه ۲۰۱۲ ($M_w = 4.29$), 6 اوت ۲۰۱۲ ($M_w = 4.29$)). وقوع این رویدادها باعث آزاد شدن مقادیر قابل توجهی انرژی در پوسته زمین شده و با تغییر نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های کوچک به متوسط، کاهش محسوس مقدار b را به دنبال داشته است. از آنجا که پارامتر b مستقیماً به توزیع بزرگی زمین‌لرزه‌ها وابسته است، افزایش سهم رخدادهای بزرگ‌تر به طور طبیعی منجر به کاهش این شاخص می‌شود. پس از یک دوره نسبتاً پایدار که در آن زمین‌لرزه‌های با بزرگی متوسط فراوانی بیشتری داشته‌اند، افت بعدی در سال ۲۰۱۷ میلادی مشاهده

تا نسبتاً بزرگ و تغییر در الگوی آزادسازی انرژی در پوسته زمین نسبت داد. این نتایج با مطالعات پیشین که کاهش مقدار b را به عنوان شاخصی از تغییر رژیم تنش و افزایش احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر تفسیر می‌کنند، هم‌خوانی دارد (نانجو و یوشیدا، ۲۰۲۱). با این حال، لازم به تأکید است که این تغییرات ماهیتی آماری داشته و باید در کنار سایر شواهد لرزه‌زمین‌ساختی و مدل‌های فیزیکی نظیر تنش کلمب تفسیر شوند.

تحلیل مکانی تغییرات مقدار پارامتر b ، از طریق تقسیم منطقه مورد مطالعه به شبکه‌ای از سلول‌های مجزا و محاسبه مقدار b در هر سلول میسر شده است (شکل ۴)، توزیع مکانی پارامتر b در محدوده گسل مشاء-فشم و نواحی پیرامونی آن نمایش داده شده است. این نقشه با نرم‌افزار ZMAP و با تعداد رویداد ۳۶ به دست آمده است.

می‌شود. این کاهش می‌تواند با وقوع چندین زمین‌لرزه با بزرگی $M_w \geq 4$ در این سال مرتبط باشد که از جمله رخداد شاخص آن می‌توان به زمین‌لرزه با بزرگی $M_w = 4.29$ در ۲۰ دسامبر ۲۰۱۷ میلادی اشاره کرد. در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۳ میلادی نیز افت قابل توجه دیگری در نمودار b دیده می‌شود. بررسی کاتالوگ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۲ میلادی، پنج زمین‌لرزه با بزرگی M_w بیش از ۴ و در سال ۲۰۲۳ میلادی نیز پنج رویداد با بزرگی $M_w \geq 4$ رخ داده است. از میان این رویدادها، زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M_w = 4.61$ در ۱۴ ژوئن ۲۰۲۲ میلادی و با بزرگی $M_w = 4.45$ در ۱۹ ژوئیه ۲۰۲۳ میلادی، به‌عنوان مهم‌ترین رخدادها در این بازه زمانی شناخته می‌شوند که احتمالاً نقش اصلی را در کاهش مقدار پارامتر b ایفا کرده‌اند. به طور کلی، افت‌های مشاهده شده در پارامتر b در بازه‌های زمانی مختلف را می‌توان به افزایش سهم زمین‌لرزه‌های با بزرگی متوسط



شکل ۴. نقشه توزیع فضایی پارامتر b در گستره مورد مطالعه (رومکزهای رخدادهای زمین‌لرزه‌ای بازه‌ی زمانی از سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ میلادی را شامل می‌شود). گسل مشاء-فشم با خط مشکی ضخیم نمایش داده شده است. در بخش‌هایی که تراکم بالای رویدادهای لرزه‌ای وجود دارد، گسل ممکن است تا حدی پوشیده شود. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

مطالعه نشان می‌دهد که نواحی با مقادیر پایین ($0/4$) تا ($0/6$) عمدتاً در بخش‌های شمالی تمرکز دارند؛ مقادیری

مقادیر b در این نقشه (شکل ۴) بین حدود $0/4$ تا $1/2$ متغیر است. بررسی توزیع مکانی پارامتر b در گستره مورد

رخداد زلزله‌های نسبتاً بزرگ‌تر را دارند (Scholz, 2019).

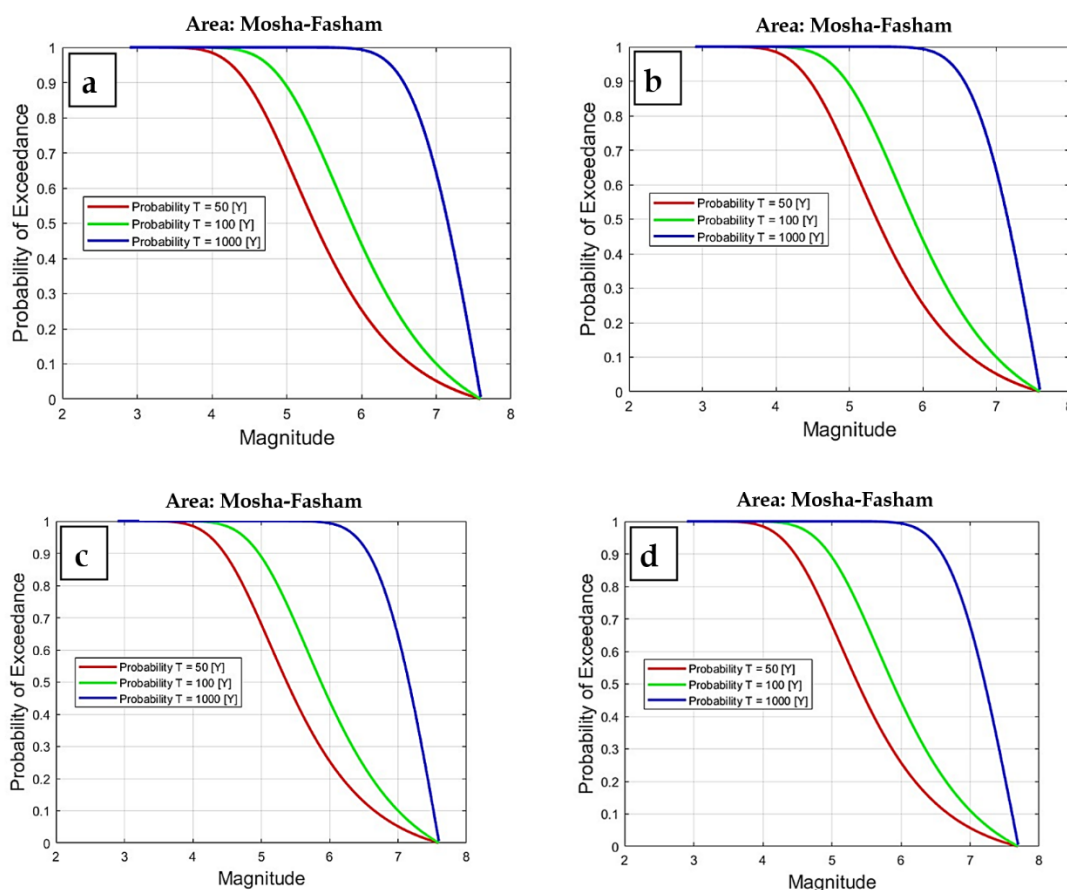
مقدار پایین‌تر پارامتر b بیانگر آن است که نسبت وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ به زمین‌لرزه‌های کوچک در این بخش بیشتر بوده و در نتیجه پتانسیل لرزه‌زایی آن افزایش یافته است. بخشی از تغییرات مشاهده شده در پارامتر b تنها ناشی از تراکم گسل‌ها نبوده و می‌تواند عوامل دیگری را نیز در برگیرد. از جمله این عوامل می‌توان به ناهمگنی‌های سنگ‌شناسی اشاره کرد که بر رفتار شکست سنگ‌ها و در نتیجه بر الگوی آزادسازی انرژی لرزه‌ای مؤثر هستند. به طور کلی، مقدار پایین‌تر b در بخش بالایی گسل مشاء-فشم، علاوه بر تراکم بالای گسل‌ها، حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی و لرزه‌ای است که همگی در شکل‌گیری ویژگی‌های لرزه‌خیزی این بخش نقش دارند. پارامتر a در قانون گوتنبرگ-ریشتر (Gutenberg-Richter, 1944) نشان‌دهنده سطح کلی فعالیت لرزه‌ای (seismicity rate) یا بهره‌وری لرزه‌ای (productivity) یک منطقه است. مقدار پارامتر a ، لگاریتم تعداد کل زمین‌لرزه‌ها (بالای بزرگی صفر یا حداقل ثبت‌شده) را در یک منطقه و بازه زمانی معین بازنمایی می‌کند و تحت تأثیر عواملی همچون مساحت منطقه، مدت دوره مشاهده، و ویژگی‌های تکتونیکی قرار دارد (Gutenberg & Richter, 1944; Scholz, 2015). در حالی که پارامتر b -value عمده‌تاً با نسبت زمین‌لرزه‌های کوچک به بزرگ و سطح تنش تفاضلی مرتبط است، تغییرات پارامتر a می‌تواند اطلاعات مکملی در مورد نرخ وقوع رویدادها و بهره‌وری لرزه‌ای فراهم کند؛ با این حال، در مطالعات پیش‌لرزه‌ای، تمرکز اصلی معمولاً بر تغییرات b -value است (Nanjo, 2020; Xie et al., 2022).

که معمولاً بیانگر تمرکز بالای تنش در پوسته و سهم بیشتر زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر نسبت به رویدادهای کوچک‌تر است و می‌تواند ناشی از فعالیت گسل‌های اصلی، قفل‌شدگی بخشی از پهنه گسلی و یا نرخ بالای تجمع انرژی کرنشی در این نواحی باشد (شولز، ۲۰۱۹). در مقابل، بخش عمده منطقه در بازه مقادیر متوسط (۰/۶ تا ۰/۸) قرار می‌گیرد که عموماً معرف شرایط تنش نسبتاً متعادل و توزیع ترکیبی زمین‌لرزه‌های کوچک و متوسط است و می‌تواند نشان‌دهنده نبود تمرکز تنش‌های بالا یا پایداری نسبی در سامانه گسلی باشد. از سوی دیگر، نواحی با مقادیر بالای پارامتر b (۰/۹ تا ۱/۲) که عمده‌تاً در بخش‌های جنوبی (جنوب، جنوب‌باختری و جنوب‌خاوری) و به صورت پراکنده در سایر نقاط مشاهده می‌شوند، معمولاً با فراوانی بیشتر زمین‌لرزه‌های کوچک همراه‌اند؛ وضعیتی که می‌تواند به وجود شکستگی‌های ریز، ناهمگنی‌های ساختاری، دگرشکلی پلاستیک موضعی یا آزادسازی تدریجی انرژی تنش نسبت داده شود و در چنین شرایطی احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ نسبتاً کمتر ارزیابی می‌شود؛ الگویی که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (چیا، ۲۰۱۹).

در شکل ۴ کاملاً مشهود است که در بخش‌هایی از منطقه (به‌ویژه شرق و شمال) که کاهش مقدار b مشاهده می‌شود، نسبت رخدادهای با بزرگی بالاتر افزایش یافته است، هرچند تعداد کل رویدادها لزوماً بیشتر نشده است. در مقابل، در نواحی با مقدار بالاتر b ، تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده و بزرگی آن‌ها به‌طور نسبی کمتر بوده است. در حالی که در بخش شرقی و اطراف گسل مشاء-فشم که تراکم بالاتری از رویدادهای لرزه‌ای مشاهده می‌شود، مقادیر پایین‌تری از پارامتر b ثبت شده است. این الگو نشان می‌دهد که نواحی با b -value پایین‌تر، پتانسیل

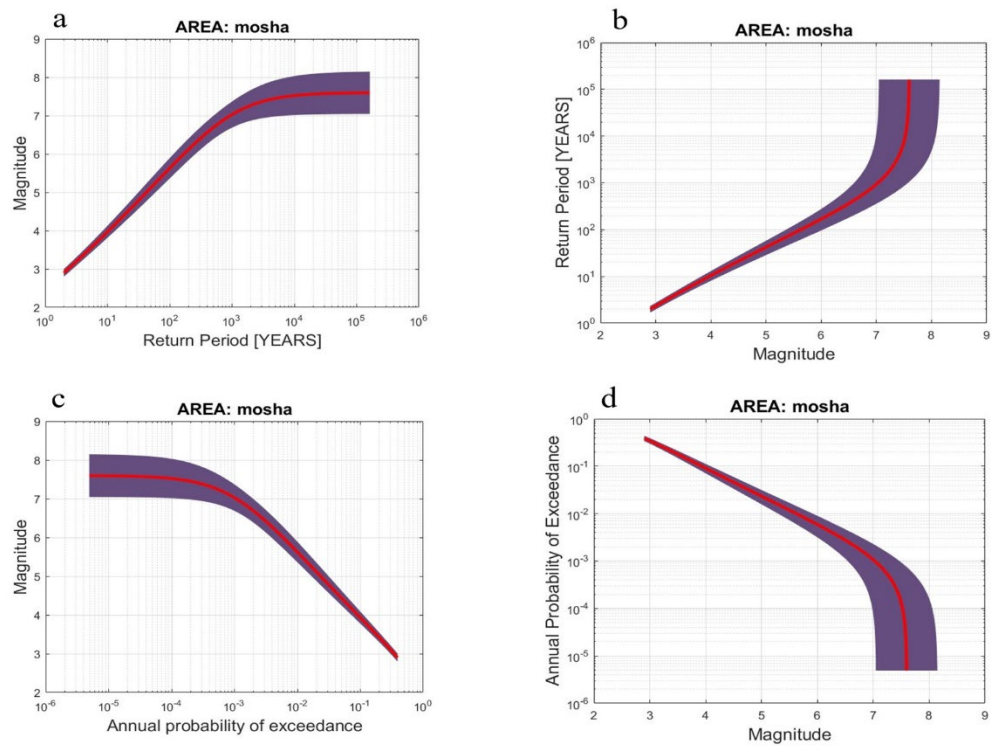
۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله، بر اساس روش‌های پیش‌تر ارائه شده، برآورد شده است (شکل ۵). همچنین، مقادیر پارامترهای لرزه‌ای شامل مقدار پارامتر b ، نرخ فعالیت لرزه‌ای $\lambda(M_{\min})$ ، بزرگای کامل بودن $M_{\min}$ و بزرگای بیشینه محتمل $M_{\max}$ در جدول ۱ گزارش شده‌اند

برآورد بیشینه توان لرزه‌زایی گسل مشاء-فشم به منظور برآورد احتمال رویدادهای متوسط و بزرگ و تخمین بزرگای بیشینه در راستای شناخت ماهیت لرزه‌زایی این منطقه لرزه‌خیز، احتمال وقوع رویدادهای زمین‌لرزه‌ای با بزرگای محتمل در بازه‌های زمانی ۵۰،

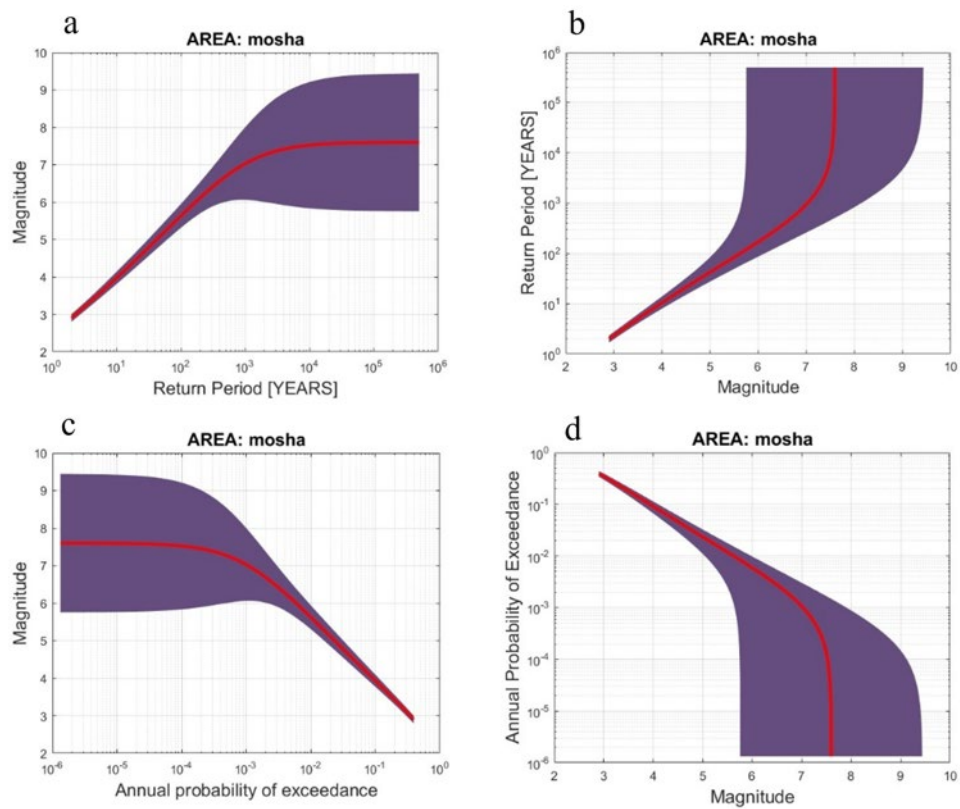


شکل ۵. نمودار برآورد احتمال وقوع رخدادهای زمین‌لرزه‌ای در بازه‌های زمانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله و تخمین بزرگای بیشینه براساس روش‌های تخمین

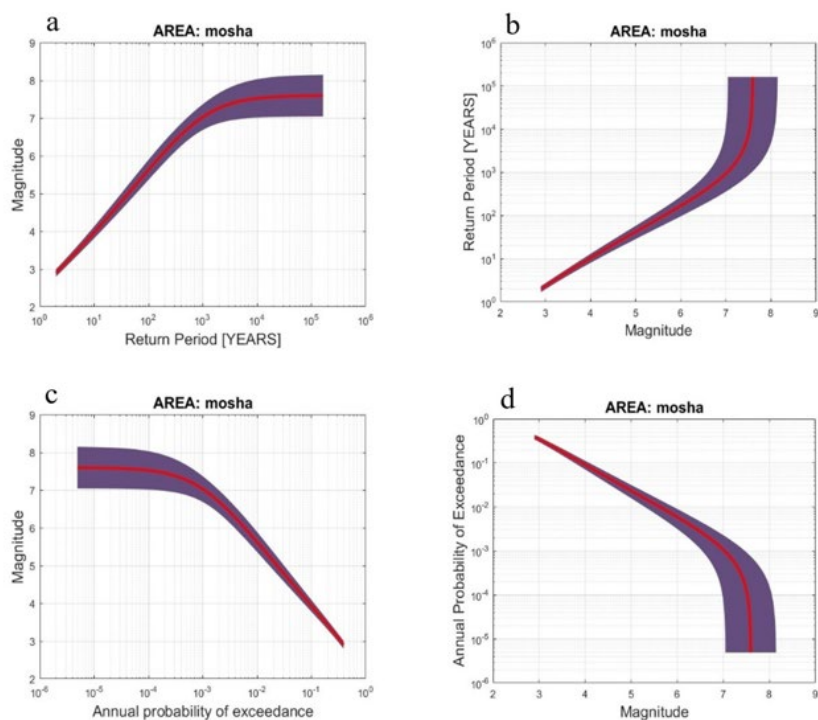
a: Kijko-sellevoll-bayas .b: Kijko-Sellevoll .c: Tate-pisarenko .d: Non-parametric



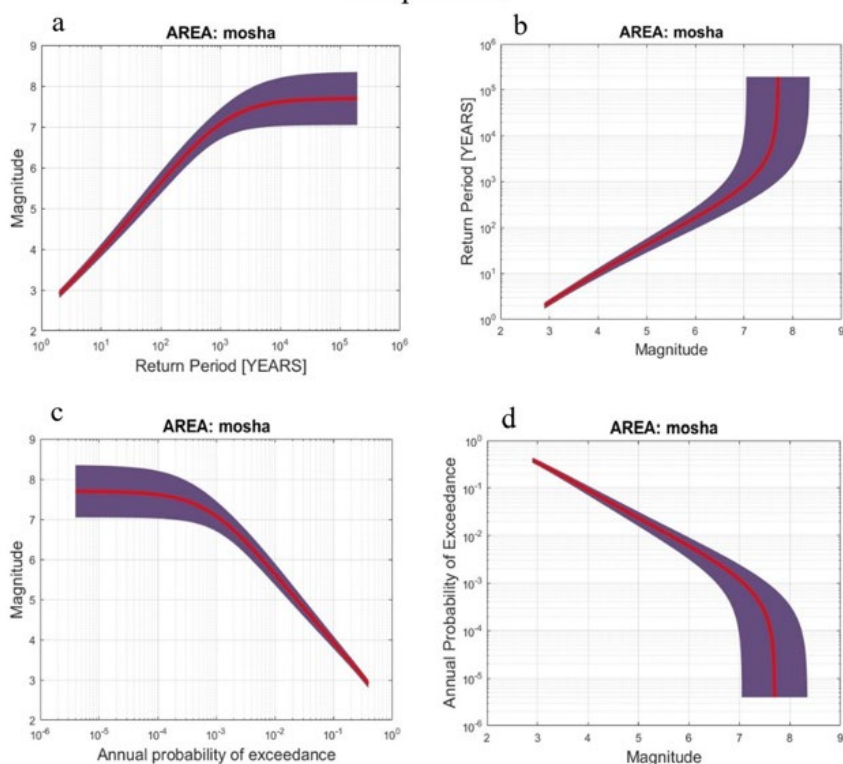
Kijko-sellevoll



kijko-sellevoll-bayas



Tate-pisarenko



غیرپارامتریک (گوسی)

شکل ۶. نمودار برآورد براساس روش‌های تخمین Kijko-sellevoll-bayas، Kijko-sellevoll و غیرپارامتریک (گوسی). a: نمودار بزرگ-دوره‌بازگشت، b: نمودار دوره‌بازگشت-بزرگ، c: بزرگ بر حسب احتمال وقوع سالانه، d: احتمال وقوع سالانه بر حسب بزرگ.

شکل ۶ نتایج چهار نمودار کلیدی حاصل از تحلیل لرزه‌خیزی گستره مورد مطالعه را بر اساس روش‌های منتخب نمایش می‌دهد. این نمودارها که روابط میان بزرگی زمین‌لرزه، دوره بازگشت و احتمال عبور سالانه را، همراه با ناحیه عدم قطعیت نشان می‌دهند. نتایج بیانگر آن است که با افزایش بزرگی، دوره بازگشت به طور چشمگیری افزایش یافته و احتمال عبور سالانه کاهش می‌یابد؛ به طوری که زمین‌لرزه‌های با بزرگی کوچک فراوان‌تر و دارای دوره بازگشت کوتاه‌تری هستند، در حالی که رخدادهای بزرگ مقیاس نادر بوده و با دوره‌های بازگشت بسیار طولانی و احتمال عبور سالانه ناچیز، به ویژه برای بزرگی‌های $M_w > 7$ ، همراه‌اند. نواحی عدم قطعیت پیرامون منحنی‌های مرکزی نیز بیانگر دامنه تغییرپذیری و محدودیت‌های آماری برآوردها هستند که در تفسیر نتایج خطر لرزه‌ای باید مورد توجه قرار گیرند. بر اساس نتایج حاصل از روش Kijko-Sellevoll، احتمال وقوع حداقل یک زمین‌لرزه با بزرگی $M_w \geq 7$ در بازه‌های زمانی بلند مدت (در حد هزار سال) بسیار بالا و نزدیک به یک است. مطابق شکل ۵، احتمال وقوع چنین رخدادی در بازه ۵۰ ساله حدود ۰/۰۵، در بازه ۱۰۰ ساله حدود ۰/۱ و در بازه ۱۰۰۰ ساله تقریباً برابر با ۱ برآورد شده است. این نتایج نشان می‌دهد که از دیدگاه آماری، وقوع حداقل یک زمین‌لرزه با بزرگی $M_w \geq 7$ در گستره مورد مطالعه در مقیاس زمانی هزار سال، بسیار محتمل است. بر اساس جدول ۱، مقدار بزرگای بیشینه محتمل برای گسل مشاء-فشم طبق این روش برابر با $M_{max} = 7.60 \pm 0.04$ می‌باشد. طبق نتایج روش Kijko-Sellevoll-Bayes، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w = 7$ در بازه زمانی ۵۰ ساله حدود ۰/۰۴، در بازه ۱۰۰ ساله حدود ۰/۱ و در بازه ۱۰۰۰ ساله حدود ۰/۶۲ برآورد شده است (شکل ۵). مقدار بزرگای بیشینه محاسبه شده با این روش نیز برابر با $M_{max} = 7.60 \pm 1.83$ می‌باشد که

نشان‌دهنده دامنه عدم قطعیت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها است.

احتمال وقوع زمین‌لرزه با بزرگای $M_w = 7$ بر اساس روش Tate-Pisarenko نیز برای بازه‌های زمانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله به ترتیب حدود ۰/۰۴، ۰/۱ و ۰/۶۵ برآورد شده است. مطابق جدول ۱، بزرگای بیشینه محتمل $M_{max} = 7.60 \pm 0.01$ شده با این روش برابر با $M_{max} = 7.60 \pm 0.01$ می‌باشد که کمترین میزان واریانس را در میان روش‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است واریانس پایین تنها نشان‌دهنده پایداری آماری است و لزوماً به معنای واقعی‌تر بودن جواب نیست.

در روش غیرپارامتریک (گاوسی)، بر خلاف روش‌های پارامتریک، تحلیل بدون فرض قبلی درباره توزیع آماری داده‌ها انجام می‌شود. نتایج این روش بیانگر کاهش یکنواخت احتمال وقوع با افزایش بزرگی زمین‌لرزه است. بر اساس این روش، مقدار بزرگای بیشینه محتمل برابر با $M_{max} = 7.10 \pm 0.20$ به دست آمده است که نسبت به سایر روش‌ها مقدار محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهد. مطابق نمودار تحلیل خطر (شکل ۵)، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w = 7$ در بازه‌های زمانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله به ترتیب حدود ۰/۰۶، ۰/۱ و ۰/۷ برآورد شده است.

به طور کلی، روش‌های به کار رفته برای برآورد بیشینه توان لرزه‌زایی گسل مشاء-فشم، هر یک بر پایه مفروضات آماری متفاوتی عمل می‌کنند و از این رو، نمی‌توان هیچ یک از آن‌ها را به عنوان برآورد قطعی و یگانه بزرگای بیشینه در نظر گرفت. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که تمامی روش‌های پارامتریک مقدار نسبتاً پایداری در حدود $M_{max} \approx 7.6$ ارائه می‌دهند، در حالی که روش غیرپارامتریک (گاوسی) مقدار کوچک‌تری در حدود $M_{max} \approx 7.1$ برآورد می‌کند. در میان روش‌های بررسی شده، روش Tate-Pisarenko به دلیل کمترین

جدول ۱. بیشینه بزرگای لرزه‌خیزی محتمل و پارامترهای لرزه‌ای گسل مشاء-فشم

روش	پارامتر b	نرخ سالانه رخداد زلزله های بزرگ‌تر از M_{min}	حداقل بزرگی رویدادهای زمین‌لرزه‌ایوارد شده به مدل	بیشینه بزرگی قابل انتظار در منطقه با توجه به داده های تاریخی و عدم قطعیت
Gibowicz-Kijko-Bayes	0.68 ± 0.07	0.501 ± 0.065	۳/۲۰	7.6 ± 0.52
Kijko-Sellevoll	0.68 ± 0.06	0.501 ± 0.065	۳/۲۰	7.6 ± 0.4
Kijko-Sellevoll-Bayes	0.68 ± 0.07	0.501 ± 0.065	۳/۲۰	7.6 ± 1.83
Tate-Pisarenko	0.68 ± 0.06	0.501 ± 0.065	۳/۲۰	7.6 ± 0.1
Non-Parametric	0.68 ± 0.06	0.501 ± 0.065	۳/۲۰	7.1 ± 0.20

واریانس در تخمین بزرگای بیشینه، از پایداری آماری بیشتری برخوردار است.

زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی و لرزه‌ای است که همگی در شکل‌گیری ویژگی‌های لرزه‌خیزی این بخش نقش دارند (Scholz, 2019).

جمع‌بندی

تحلیل لرزه‌خیزی در امتداد گسل مشاء-فشم با هدف برآورد پارامترهای کلیدی a و b انجام شد که به عنوان شاخص‌های بنیادی نرخ لرزه‌زایی و توزیع بزرگی زمین‌لرزه‌ها، نقش مهمی در تفسیر رفتار لرزه‌ای منطقه ایفا می‌کنند. با استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای گردآوری‌شده، تغییرات زمانی و مکانی پارامتر b برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد که نوسانات مکانی این پارامتر، به‌گونه‌ای است که مقادیر کمتر b عمدتاً با تمرکز بیشتر فعالیت زمین‌لرزه‌ای و افزایش سهم زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ‌تر مرتبط هستند، در حالی که مقادیر بالاتر b غالباً نشان‌دهنده غالب بودن رخداد‌های کوچک‌تر می‌باشند (شولز، ۲۰۱۵).

بررسی تغییرات زمانی پارامتر b نشان می‌دهد که در انتهای سال ۲۰۲۳ میلادی، این شاخص به یکی از کمینه‌های نسبی خود رسیده است؛ وضعیتی که شباهت‌هایی با افت مشاهده شده در سال ۲۰۱۸ میلادی دارد. اگرچه این مقدار در زمره کمترین مقادیر تاریخی قرار نمی‌گیرد، اما کاهش آن نسبت به سال ۲۰۲۰ میلادی، می‌تواند بیانگر تغییر در رژیم تنش و افزایش سهم رخداد‌های با بزرگی متوسط باشد. چنین تغییراتی، مطابق با مطالعات پیشین، می‌توانند به عنوان نشانه‌ای آماری از تحول در وضعیت لرزه‌ای منطقه تفسیر شوند، هرچند به‌تنهایی مبنای پیش‌بینی قطعی زلزله محسوب نمی‌شوند (شولز، ۲۰۱۵).

در کنار تحلیل پارامترهای لرزه‌خیزی، برآورد حداکثر بزرگای محتمل زمین‌لرزه (M_{max}) با بهره‌گیری از روش‌های مختلف آماری انجام شد. نتایج نشان داد که اغلب روش‌های پارامتری، از جمله Gibowicz-Kijko-Bayes، Kijko-Sellevoll و Tate-Pisarenko، به مقدار همگرا و پایدار $M_{max} \approx 7.6$ دست یافته‌اند که بیانگر انسجام برآوردها و پایداری نتایج است. در مقابل، روش غیرپارامتری گاوسی مقدار پایین‌تری

توزیع مکانی پارامتر b مقادیر پایین‌تری را در بخش شمالی و شرقی گسل مشاء-فشم آشکار می‌سازد. این الگو می‌تواند بازتابی از تمرکز بالاتر تنش و پتانسیل لرزه‌زایی بیشتر برای وقوع رویدادهایی با بزرگای متوسط و بزرگ در این بخش باشد. بطور کلی، مقدار پایین‌تر b در بخش بالایی گسل مشاء-فشم، علاوه بر تراکم بالای گسل‌ها، حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل

منابع

- Al-Arifi, N. (2011). Changes in local B-value prior to moderate local earthquakes: Gulf of Aqabah, northern Red Sea. *International Journal of the Physical Sciences*. <https://doi.org/10.5897/ijps11.979>
- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2).
- Ambraseys, N. N., & Melville, C. P. (2005). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge university press.
- Anjana, A. P., & Lasitha, S. (2023). Seismotectonics of Andaman-Sumatra Region: Seismic Quiescence and B Value as Possible Precursors. *Indian Journal of Science and Technology*, 16(8), 557-569.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., & Kamalian, N. (2005). Microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics*, 395(3-4), 193-208.
- Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2008). Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions. *Engineering structures*, 30(4), 1048-1057.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J., & Berberian, M. (1982). Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society*, 139(5), 605-614.
- Chen, X., Li, Y., & Chen, L. (2022). Analysis of seismic strain release related to the tidal stress preceding the 2008 Wenchuan earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2543-2022>
- Chiba, K. (2019). Spatial and temporal distributions of b-values related to long-term slow-slip and low-frequency earthquakes in the Bungo Channel and Hyuga-nada regions, Japan. *Tectonophysics*, 757, 1-9.
- Enescu, B., & Ito, K. (2014). Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake. *Earth, Planets and Space*. <https://doi.org/10.1186/BF03352077>
- Ghafory-Ashtiany, M., Jafari, M. K., & Mousavi, M. (2020). Seismic hazard analysis for Tehran metropolis. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(5), 789-812.
- Görgün, E. (2013). Analysis of the b-values before and after the 23 October 2011 $M_w 7.2$

($M_{max}=7.10\pm0.20$) ارائه می‌دهد که احتمالاً ناشی از انعطاف‌پذیری بیشتر این رویکرد و عدم اتکای آن به فرضیات صریح درباره شکل توزیع بزرگی‌ها است. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده نقش مهم مفروضات آماری و کیفیت داده‌ها در تخمین M_{max} می‌باشد.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب تحلیل تغییرات پارامتر b با برآوردهای چندروشی M_{max} می‌تواند تصویر جامع‌تری از توان لرزه‌زایی گسل مشاء-فشم ارائه دهد. با توجه به مجاورت این گسل با مناطق پرجمعیتی نظیر تهران، لواسان، فشم و شمیرانات، نتایج حاصل اهمیت ویژه‌ای برای مدیریت بحران، برنامه‌ریزی شهری، و طراحی و تقویت سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه دارد. از این‌رو، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی علمی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای و تصمیم‌گیری در راستای ارتقای تاب‌آوری اجتماعی و زیرساختی در این ناحیه مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

انجام مراحل این پژوهش مبتنی بر اعتبار پژوهشی به شماره ۶۰۰/۴۵۲۸/د دانشگاه شهیدبهشتی است که به دکتر حاجی‌علی‌بیگی اختصاص داده شده است. نویسندگان بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهیدبهشتی و مسئولین محترم دانشکده علوم‌زمین به دلیل مساعدت و تأمین هزینه‌های انجام این پژوهش تشکر می‌کنند. همچنین نویسندگان از مسئولین محترم مجله ژئوفیزیک ایران، جهت انجام فرآیند داوری و چاپ این مقاله نهایت سپاسگزاری را می‌دارند. از داوران محترم که با ارائه پیشنهادات و نظرات خود موجب ارتقاء کیفیت علمی این مقاله شدند، نیز صمیمانه قدردانی می‌گردد.

- Van-Erciş, Turkey earthquake. *Tectonophysics*.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.030>
- Gumbel, E. J. (1958). Statistics of extremes columbia university. *New York*.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California.
- Helmstetter, A., & Sornette, D. (2002). Subcritical and supercritical regimes in epidemic models of earthquake aftershocks. *Journal of Geophysical Research*.
<https://doi.org/10.1029/2001JB001580>
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., & Nazari, H. (2008). Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma. *Geology*, 36(10), 763-766.
- Iaccarino, A. G., & Picozzi, M. (2023). Detecting the preparatory phase of induced earthquakes at The Geysers... *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
<https://doi.org/10.1029/2023JB026429>
- Jackson, J. (1992). Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B9), 12471-12479.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., & Berberian, M. (2002). Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophysical Journal International*, 148(2), 214-245.
- Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M. (2020). Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 430.
- Katsumata, K. (2011). Precursory seismic quiescence before the $M_w = 8.3$ Tokachi-oki, Japan, earthquake... *Journal of Geophysical Research*.
<https://doi.org/10.1029/2010JB007964>
- Kheirkhah, N., et al. (2024). Comprehensive seismic loss model of Tehran, Iran in the case of Mosha fault seismic scenario using stochastic finite-fault method. *Buildings*, 14(2), 470.
- Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 161(8), 1655-1681.
- Kijko, A., & Graham, G. (1998). Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis Part I: estimation of maximum regional magnitude m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 152(3), 413-442.
- Kijko, A., & 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., & Singh, M. (2011). Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica*, 59(4), 674-700.
- Lacidogna, G., Borla, O., & De Marchi, V. (2023). Statistical seismic analysis by b-value and occurrence time of the latest earthquakes in Italy. *Remote Sensing*, 15(21), 5236.
- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., Tabatabaei, S. H., & Shahpasandzadeh, M. (2009). Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Mosha Fasham Fault, Alborz mountains Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime. *Geophysical Journal International*, 177(2), 676-690.
- Li, Q., & Xie, Z. (2024). Analysis of spatiotemporal variations in b-values before the 6.8-magnitude earthquake in Luding, Sichuan, China, on September 5, 2022. *Acta Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01369-5>
- Momeni, S., & Madariaga, R. (2022). Long-term triggered seismicity on the Mosha fault by Damavand volcano, Iran: Implications on the seismic hazard of Tehran metropolis. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 945297.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., & Mahani, A. B. (2020). A comprehensive earthquake catalogue for the Iranian Plateau (400 BC to December 31, 2018). *Journal of Seismology*, 24(3), 709-724.
- Nanjo, K. Z. (2020). Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? *Nature Communications*.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16867-5>
- Nanjo, K. Z., & Yoshida, A. (2021). Changes in the b value in and around the focal areas of the M 6.9 and M 6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan, in 2021. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 176.
- Knopoff, L., & Kagan, Y. (1977). Analysis of the theory of extremes as applied to earthquake problems. *Journal of Geophysical Research*, 82(36), 5647-5657.
- Nanjo, K. Z., & Yoshida, A. (2021). Changes in the b value in and around the focal areas of

- the M 6.9 and M 6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan, in 2021. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 176. Naserieh, S., Moradi, A., Mirzaei, N., Dezvareh, M., Karkooti, E., Ghofrani, H., & Rahmati, M. (2025). Identifying and removing quarry and mine blasts from the Iranian seismological center's (IRSC) earthquake catalog (2006–2024). *Journal of Seismology*, 29(4), 713–730.
- Ommi, S., & Amini, H. (2024). Priority of developing public open spaces based on seismic resilience assessment for Tehran, Iran. *Acta Geophysica*, 72(5), 3007–3020.
- Ommi, S., & Zafarani, H. (2016). Analyses of seismicity parameters of the August 11th, 2012, Ahar-Varzaghan earthquakes in north-western Iran.
- Papadopoulos, G. A., Minadakis, G., & Orfanogiannaki, K. (2018). Short-Term Foreshocks and Earthquake Prediction. In *Geophysical Monograph*. <https://doi.org/10.1002/9781119156949.ch8>
- Pisarenko, V. F., Sornette, A., Sornette, D., & Rodkin, M. V. (2008). New approach to the characterization of M max and of the tail of the distribution of earthquake magnitudes. *Pure and Applied Geophysics*, 165(5), 847–888.
- Reasenber, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479–5495.
- Scholz, C. H. (2015). On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1399–1402.
- Scholz, C. H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge university press.
- Shahvar, M. P., Zare, M., & Castellaro, S. (2013). A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900–2011). *Seismological Research Letters*, 84(2), 233–249.
- Soroush, M., & Rahimi, H. (2022). Bayesian estimation of the spatiotemporal evolution of completeness magnitude in the Iranian earthquake catalog. *Journal of Seismology*, 26(3), 473–481.
- Stöcklin, J. (1974). Possible ancient continental margins in Iran. In *The geology of continental margins* (pp. 873–887). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., & Ghafory-Ashtiany, M. (2004). Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity. *Geophysical Journal International*, 156(2), 255–266.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log n = a + bM$ showing the magnitude frequency relation for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 13, 99–103.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., & Chéry, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran. *Geophysical Journal International*, 157(1), 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the seismological society of America*, 90(4), 859–869.
- Xie, Z., Lyu, Y., & Li, X. (2022). Temporal and spatial changes in the b-value prior to the 2021 Luxian MS 6.0 earthquake in Sichuan, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 934–948.
- Xie, Z., Lyu, Y., & Li, X. (2022). Temporal and spatial changes in the b-value prior to the 2021 Luxian M_s 6.0 earthquake in Sichuan, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2059019>
- Zafarani, H., Noorzad, A., & Ansari, A. (2018). Seismic hazard assessment using fuzzy logic and seismic sources in the Tehran region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 1–12.
- Zangeneh, H., & Saffari, H. (2025). Investigation of Spatial and Temporal Variations in Seismic Parameters (a-Value, b-Value, and Seismic Quiescence) in the Eastern Tehran Region. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1–17.
- Zhang, L., Liao, W., Chen, Z., Li, J., Yao, Y., Tong, G., Zhao, Y., & Zhou, Z. (2022). Variations in seismic parameters for the earthquakes during loading and unloading periods in the Three Gorges Reservoir area.

Scientific Reports.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-15362-9>
Zhang, Y., Wang, R., Shi, H., Miao, M., Zhuang, J., Chang, Y., ... & Han, P. (2025). Earthquake forecasting based on b value and background seismicity rate in Yunnan Province, China. *Entropy*, 27(2), 20.

Assessment of the Seismic Potential of the Mosha-Fasham Fault Based on Variations in Seismicity Parameters

Fatemeh Changi ¹, Hossein Hajjalibeigi,^{2*} and Salma Ommi ³

¹ M.Sc., Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 20 April 2026, Accepted: 26 July 2026)

Summary

Northern Tehran is situated within a tectonically active domain and ranks among the most seismically vulnerable regions of the country. The Mosha-Fasham Fault constitutes one of the principal seismogenic sources affecting this area. The study area of this research extends between longitudes 49°–54° E and latitudes 35°–37° N, within the Central Alborz Mountains. It is located in the southern part of the Alborz range, north of Tehran Province, and is characterized by mountainous topography, steep slopes, and deeply incised valleys. Owing to its particular tectonic setting, this area is among the most critical zones for seismotectonic and geomorphological investigations. Its geotectonic setting, structural architecture, and documented history of activity play a fundamental role in seismic hazard assessment for the capital. The high population density of Tehran further amplifies its seismic risk and potential socio-economic consequences. Accordingly, investigating temporal variations in seismicity, together with the geometric, kinematic, and present-day structural relationships of active seismogenic sources—particularly along the central and eastern segments of the fault system—is essential for deciphering the active tectonic regime and refining probabilistic seismic hazard evaluations. Given the considerable seismic potential of the Mosha-Fasham Fault, this study focuses on characterizing its seismic behavior and the prevailing stress regime. Seismicity analysis was conducted through estimation of maximum expected magnitude (M_{max}) and examination of spatiotemporal variations in the parameters of the Gutenberg-Richter frequency-magnitude relationship. The results indicate that temporal fluctuations of the b-value between 1990 and 2023 along the Mosha Fault zone reveal a systematic decrease in the b-value preceding moderate to strong earthquakes. Temporal variations of the b-value indicate that this parameter reached one of its relative minima by the end of 2023, which may reflect increased stress accumulation and a higher probability of larger-magnitude earthquakes. Such reductions in the slope of the Gutenberg-Richter distribution are interpreted as indicative of stress accumulation along the fault plane and increasing likelihood of forthcoming moderate to large seismic events. Spatial distribution maps of the b-value further demonstrate clustering of seismic events within zones characterized by reduced b-values. Estimation of maximum magnitude shows that the Gibowicz-Kijko-Bayes, Kijko-Sellevoll, Tate-Pisarenko, and non-parametric Gaussian approaches consistently yield $M_{max} \approx 7.6$, whereas the Gaussian non-parametric method provides a slightly lower estimate of $M_{max} \approx 7.1$. Overall, these findings provide critical insights into the seismotectonic behavior of the Mosha Fault system, highlighting the diagnostic significance of b-value variations and maximum magnitude estimates for assessing the probability of large seismic events and improving seismic hazard appraisal in northern Tehran; Therefore, incorporating these results into policy-making, urban planning, and seismic risk reduction strategies in the surrounding areas of this fault is essential.

Keywords: Seismicity parameters, b-value, maximum seismogenic magnitude, Gutenberg-Richter relationship, Mosha-Fasham Fault

* Corresponding author:

h-alibeigi@sbu.ac.ir