

پارامترهای لرزه‌خیزی و احتمال رخداد زمین‌لرزه‌ها در شرق ایران (بلوک لوت)

سید حسن موسوی بفرولی^۱ و سید هادی دهقان منشادی^{۲*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

^۲ استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵)

چکیده

گستره وسیعی از سرزمین ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند کوه‌زایی آلپ- هیمالیا، از نظر خطر زمین‌لرزه جزء مناطق زلزله‌خیز جهان محسوب می‌شود و بین مناطق مختلف آن تفاوت‌های زیادی از لحاظ لرزه‌زمین‌ساختی به چشم می‌خورد. تفاوت‌های لرزه‌زمین‌ساختی شرق ایران (بلوک لوت) نسبت به نواحی اطراف آن در حدی است که می‌توان آن را به صورت مستقل بررسی کرد. نگاهی اجمالی بر نقشه‌های لرزه‌زمین‌ساختی این منطقه نشان می‌دهد فعالیت گسل‌های امتدادلغز و معکوس در اطراف بلوک لوت باعث رخداد زمین‌لرزه‌های فراوان و ویرانگر شده است، اما در بخش‌های داخلی این بلوک پایداری نسبی برقرار است به گونه‌ای که می‌توان آن را ریزصفحه‌ای صلب در نظر گرفت. در این تحقیق با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه، پارامترهای لرزه‌خیزی پهنه شرق ایران شامل بلوک لوت تعیین شده است. با استفاده از به‌روزترین کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها، داده‌ها به یک دسته تاریخی و چهار دسته دستگاهی تقسیم شد. برای هر یک از چهار دسته داده دستگاهی، آستانه کامل بودن داده‌ها تعیین و با در نظر گرفتن عدم قطعیت بزرگا، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه برآورد شد. بر این اساس مقدار b برابر $1/06$ و نرخ رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر یا مساوی $3/1$ تقریباً برابر 58 به دست آمده است که نشان‌دهنده لرزه‌خیزی زیاد منطقه است. در نهایت، احتمال فزونی رویداد سالیانه برحسب بزرگا برای دوره‌های بازگشت 50 ، 475 و 2475 سال برآورد شده است. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج مطالعاتی که با داده‌های مشابه و روشی یکسان برای کل ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران انجام شده است، این موضوع را تأیید می‌کند که می‌توان از نظر لرزه‌خیزی، بلوک لوت و حاشیه آن را مستقل از بخش‌های دیگر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: بلوک لوت، پارامترهای لرزه‌خیزی، نرخ رویداد سالانه، مقدار b ، لرزه‌زمین‌ساخت

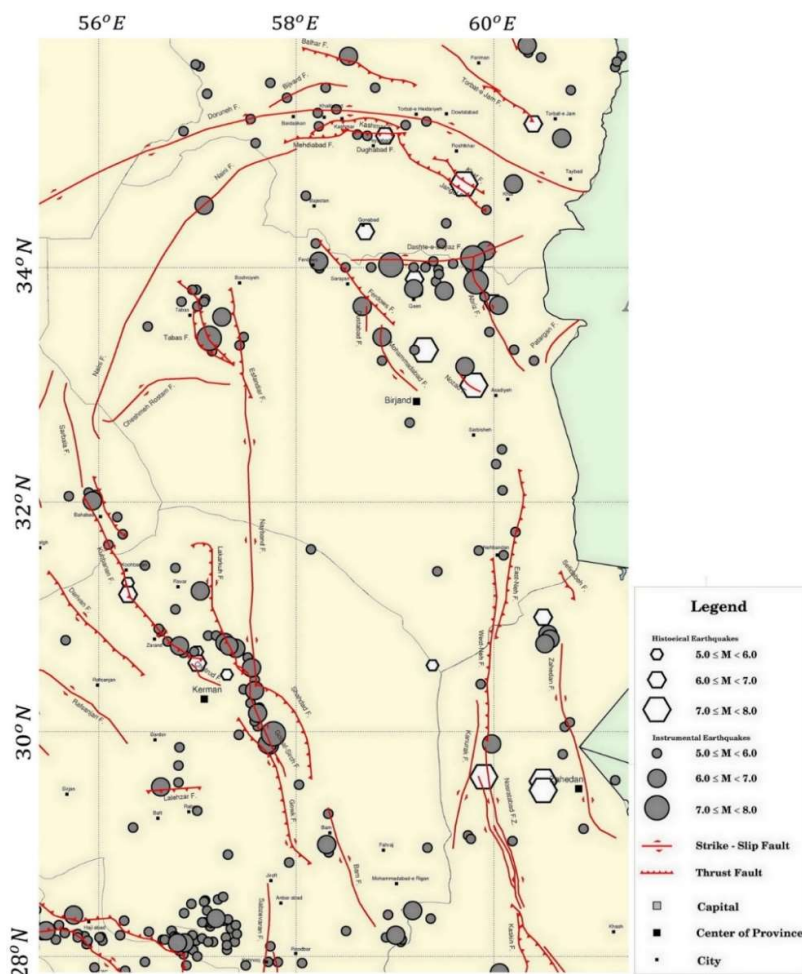
۱ مقدمه

صورت پادساعت گرد اتفاق می‌افتد (جکسون و مکزی، ۱۹۸۴ و واکر و جکسون، ۲۰۰۴). آهنگ جابه‌جایی در شمال بلوک لوت کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در گسل درونه به 5 mm/yr و در ادامه تا مرزهای ترکمنستان به صفر می‌رسد (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). این ویژگی‌ها سبب رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ متعدد در حاشیه بلوک لوت و افزایش سطح خطر زمین‌لرزه برای نواحی جمعیتی هم‌جوار شده است.

برای مطالعه رفتار پیچیده پوسته فلات ایران الگوهای متعدد زمین‌ساختی جوان ناحیه‌ای بر اساس نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای ارائه شده است (نوروزی، ۱۹۷۶؛ بربریان، ۱۹۷۶ و میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸). میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) ایران را به پنج ایالت لرزه‌زمین‌ساختی عمده تقسیم کرده‌اند. در این تقسیم‌بندی، بلوک لوت در بخش شرقی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران قرار دارد. نوروزی (۱۹۷۶) با توجه به توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها، تغییرات زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی منطقه، توزیع گنبد‌های نمکی، مسیر ساختارهای زمین‌شناسی و گسل‌های فعال، ایران را به ۲۳ ایالت لرزه‌زمین‌ساختی تقسیم کرده است. بر اساس این تقسیم‌بندی، بلوک لوت از جمله ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی واقع در شرق ایران است. از ویژگی‌های بارز بلوک لوت ایجاد گسلش سطحی ناشی از اغلب زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه است. این موضوع ما را در مقایسه نتایج مطالعات زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها با مشاهدات زمین‌شناسی، جهت تعیین مرزهای صفحه لوت یاری می‌دهد.

در مرز غربی بلوک لوت گسل نایبند و در مرز شمالی، گسل‌های دشت بیاض، اسفندیار و فردوس وجود دارند. در مرز شرقی بلوک لوت گسل فشاری مرکب نهبندان وجود دارد. این گسل مرکب از یک سری قطعات شمالی-جنوبی است که در بخش جنوبی و شمالی به دلیل تغییر در

کشور ایران از نظر لرزه‌خیزی یکی از مناطق فعال جهان است. توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها حاکی از وجود گسل‌ها و پهنه‌های زمین‌ساختی فعال و پیچیده در این منطقه است. افزایش و تجمع نیروها در فلات ایران در اثر حرکت شبه‌جزیره عربستان به سمت شمال شرق و حرکت شبه‌قاره هند به سمت شمال دلیل اصلی لرزه‌خیزی این منطقه است (بربریان، ۱۹۸۱). با تجزیه و تحلیل زمین‌لرزه‌های موجود در فلات ایران و مناطق مرزی، لرزه‌خیزی این نواحی طی سال‌های گذشته بررسی شده است. این قسمت از کمربند آلپ-همالی که به صورت نوار پهنی از لرزه‌خیزی پراکنده تعریف شده است، شامل کمربند‌های فعال متعددی است که بلوک‌های به نسبت ثابت کوچکی را ایجاد کرده‌اند (بربریان، ۱۹۸۱). صفحه عربستان در طول جغرافیایی 56°E با آهنگ 25 mm/yr در راستای $N10^{\circ}\text{E}$ به سمت ایران در حرکت است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). این همگرایی در تنگه هرمز ($26/5^{\circ}\text{N}$ ، $56/5^{\circ}\text{E}$)، به سمت شمال-شمال شرق متمایل می‌شود. در اثر این همگرایی، ایران مرکزی با آهنگ $16 \pm 2 \text{ mm/yr}$ در طول جغرافیایی بین 56°E تا 62°E به سمت بلوک افغانستان حرکت می‌کند که بخشی از صفحه پایدار اوراسیا محسوب می‌شود (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). این حرکت سبب وقوع جنبش‌های برشی راست‌گرد در نواحی شرقی ایران شده است. در حال حاضر، این جنبش برشی با راستای شمالی-جنوبی بین گسل‌های امتدادلغز راست‌گردی مانند نایبند، گوک، لکرکوه و نهبندان تقسیم می‌شود. گسل‌های مذکور اطراف دشت لوت را احاطه کرده‌اند. بلوک احاطه‌شده با این گسل‌های امتدادلغز در جنوب عرض جغرافیایی 34°E دوران پادساعت‌گرد دارد (مک‌کلاسی و همکاران، ۲۰۰۳؛ واکر و جکسون، ۲۰۰۴ و می‌پر و لی‌دورتز، ۲۰۰۷). این دوران در شمال عرض جغرافیایی 34°E به دلیل ایجاد سامانه‌های گسلی چپ‌لغز مانند درونه و دشت بیاض، به



شکل ۱. گسل‌های اطراف بلوک لوت و توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها برگرفته از مرکز لرزه‌نگاری کشوری (irsc.ut.ac.ir) با تغییر.

آن راستای چیره شمالی- جنوبی است. داخل پهنه برشی، گسل‌های فرعی با امتداد شمال خاوری- جنوب باختری، شمال باختری- جنوب خاوری و حتی خاوری- باختری نیز وجود دارند (واکر و جکسون، ۲۰۰۴). سامانه‌های گسلی راستالغز راست‌گرد در پهنه ساختاری لوت از اصلی‌ترین شاخصه‌های زمین‌ساختی این منطقه هستند (بربریان و بیس، ۲۰۰۱). بر اساس مطالعه واکر و همکاران (۲۰۰۳)، عمق بیشتر زمین‌لرزه‌ها در شرق ایران بین ۸ تا ۱۰ کیلومتر است. مطالعات گرانی‌سنجی و توموگرافی لرزه‌ای عبادی و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد ضخامت پوسته در این منطقه حدود ۴۳ کیلومتر است. مطالعات توموگرافی

جهت راستای شاخه‌های فرعی گسل، روند آن شمال غرب- جنوب شرق می‌شود (شکل ۱). نوروزی (۱۹۷۲) با استفاده از نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای، گسل فردوس را به علت جابه‌جایی وسیع ایجادشده در اثر زمین‌لرزه ۱۹۶۸ دشت بیاض، مرز شمالی صفحه لوت در نظر گرفته است. گسل نهپندان یا گسل نه که از سهل‌آباد در شمال تا نصرت‌آباد در جنوب کشیده شده است، یکی از بزرگ‌ترین گسل‌های فعال راستالغز راست‌بر است که به صورت یک پهنه گسلی در مرز خاوری بلوک لوت قرار دارد (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲). این گسل در برخی نقاط با مؤلفه فشاری یا معکوس همراه است و راستای

شدید لرزه‌ای در این منطقه به ایجاد دو زمین‌لرزه عمده یکی زمین‌لرزه طیس در سال ۱۳۵۷ و دیگری زمین‌لرزه قائنات در آبان و آذر ۱۳۵۸ منجر شده است. آخرین زمین‌لرزه مخرب این منطقه که جان ده‌ها هزار نفر را گرفت، زمین‌لرزه پنجم دی‌ماه ۱۳۸۲ بم است. در مطالعه حاضر، کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی این منطقه تهیه و با استفاده از آن پارامترهای لرزه‌خیزی و نرخ وقوع زمین‌لرزه‌ها برآورد شده است.

جدول ۱. مشخصات تعدادی از زمین‌لرزه‌های به‌نسبت بزرگ در اطراف دشت لوت (موسوی بفرونی و بابایی ماهانی، ۲۰۲۰)

شماره	تاریخ وقوع (شمسی)	محل وقوع	بزرگای گشتاوری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۱۳۲۶/۷/۱	جنوب فردوس	۶/۹	۵۸/۶۴	۳۳/۶۰
۲	۱۳۴۷/۶/۹	دشت بیاض	۷/۱	۵۸/۹۵	۳۴/۰۴
۳	۱۳۵۷/۶/۲۵	طیس	۷/۳	۵۷/۳۸	۳۳/۲۴
۴	۱۳۵۷/۱۰/۲۶	قائن	۶/۵	۵۹/۴۷	۳۳/۹۱
۵	۱۳۵۸/۸/۲۳	کوریزان - خواف (قائنات)	۶/۵	۵۹/۷۳	۳۳/۹۵
۶	۱۳۵۸/۹/۶	کولی - بنیاباد (قائنات)	۷	۵۹/۷۶	۳۴/۰۵
۷	۱۳۶۰/۳/۲۱	گلباف	۶/۶	۵۷/۶۹	۲۹/۸۶
۸	۱۳۶۰/۵/۶	سیرج	۷/۲	۵۷/۷۷	۲۹/۹۷
۹	۱۳۷۶/۲/۲۰	قائن	۷/۲	۵۹/۸۱	۳۳/۸۴
۱۰	۱۳۷۶/۱۲/۲۳	گلباف - فندقا	۶/۶	۵۷/۵۹	۳۰/۱۴
۱۱	۱۳۸۲/۱۰/۵	بم	۶/۶	۵۸/۲۸	۲۸/۹۰
۱۲	۱۳۸۳/۱۲/۴	زرنند	۶/۴	۵۶/۷۸	۳۰/۷۲
۱۳	۱۳۸۹/۹/۲۹	محمدآباد ریگان (فهرج)	۶/۵	۵۹/۱۷	۲۸/۴۳

۲ کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها

گزارش مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (ISC) است. در صورت نبودن زمین‌لرزه‌ای در کاتالوگ ISC، از داده‌های مرکز اطلاعات زمین‌لرزه‌ای ملی آمریکا (USGS/NEIC) و در غیراین صورت به ترتیب از داده‌های شبکه لرزه‌نگاری کشور ایران (IRSC) و داده‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) استفاده شده است. بر اساس روابط معرفی شده در مطالعه موسوی بفرونی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰) بزرگای زمین‌لرزه‌ها به M_w یک‌دست شده است. به‌منظور حذف رویدادهای وابسته برای داده‌های چهار سال آخر منتهی به ۲۰۲۲، از راهکار

شادمنامن و همکاران (۲۰۱۱) عمق موهو را در ایران مرکزی و بلوک لوت بین ۳۵ تا ۴۰ کیلومتر برآورد کرده است. وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد و مخرب در این منطقه نمایانگر فعالیت لرزه‌ای حاشیه بلوک لوت است. مطابق جدول ۱ ثبت زمین‌لرزه بزرگ دستگاهی در شرق ایران با وقوع زمین‌لرزه جنوب فردوس در سال ۱۳۲۶ شروع شده است. پس از آن، زمین‌لرزه سال ۱۳۴۷ دشت بیاض و ادامه فعالیت

منبع اصلی داده‌های زمین‌لرزه‌ها در این مطالعه، کاتالوگ موسوی بفرونی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰) است. تمام زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی تا سال ۲۰۱۸ مربوط به منطقه مورد مطالعه که بین طول جغرافیایی ۵۶/۵ تا ۶۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ تا ۳۵/۵ درجه عرض شمالی در شرق ایران واقع است، از این کاتالوگ استخراج شده‌اند. زمین‌لرزه‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ بر اساس اولویت‌های معرفی شده در پژوهش موسوی بفرونی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰) جمع‌آوری شده‌اند. اولویت اول،

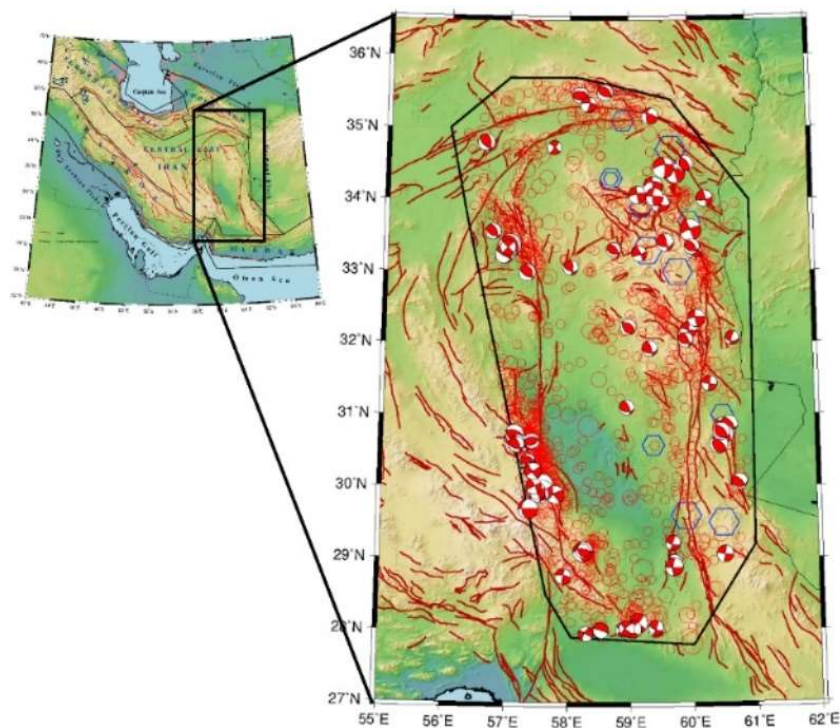
کرد. این تقسیم‌بندی با روند توسعه شبکه لرزه‌نگاری جهانی و کشور مطابقت دارد.

۳ تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی

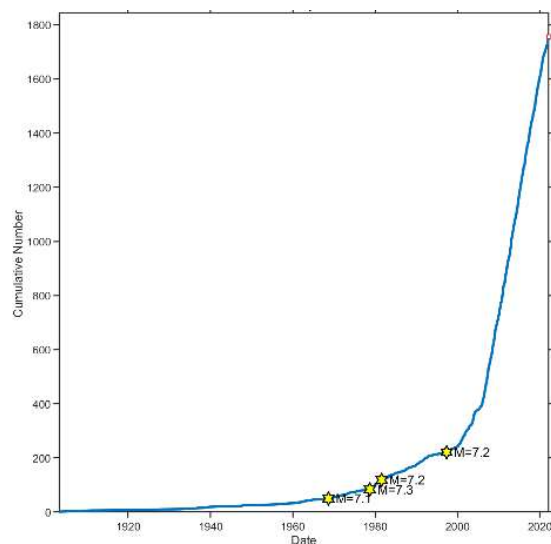
با استفاده از روش بیشترین انحنا در نرم‌افزار Zmap، آستانه کامل بودن داده‌ها برای هر یک از چهار بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۳، ۱۹۶۴ تا ۱۹۹۹، ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ تعیین شد. برای نمونه، نمودارهای مربوط به بازه زمانی بین ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آمده است. در شکل ۴ نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها نسبت به بزرگای آنها نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، آستانه کامل بودن داده‌ها در این بازه زمانی، بزرگای به نسبت دقیق ۳/۱ تعیین شده است. در این شکل پارامترهای لرزه‌خیزی *a* و *b* نیز بر اساس داده‌های همین بازه زمانی تعیین شده‌اند که به دلیل استفاده نکردن از همه داده‌های منطقه،

پنجره‌های مختلط ارائه شده در موسوی بفرئی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است. به این ترتیب از بین ۲۵۷ رویداد بزرگ‌تر از ۳ در منطقه مورد مطالعه در این چهار سال، تعداد ۸۲ رویداد (تقریباً ۳۲٪) به عنوان رویدادهای وابسته شناسایی و حذف شده است. با کنار هم قرار دادن رویدادهای مستقل از کاتالوگ موسوی بفرئی و بابائی ماهانی (۲۰۲۰) و داده‌های گردآوری شده در این پژوهش، در مجموع برای منطقه مورد مطالعه کاتالوگی شامل ۱۷۶۰ زمین‌لرزه مستقل تاریخی و دستگاهی فراهم شده است (شکل ۲).

برای تعیین آستانه کامل بودن داده‌ها نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌های دستگاهی برحسب سال رسم شده است (شکل ۳). با توجه به تغییرات شیب نمودار می‌توان داده‌های دستگاهی را به چهار بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۳، ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۰، ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۲ تقسیم‌بندی



شکل ۲. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.



شکل ۳. نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌های دستگاهی برحسب سال برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.

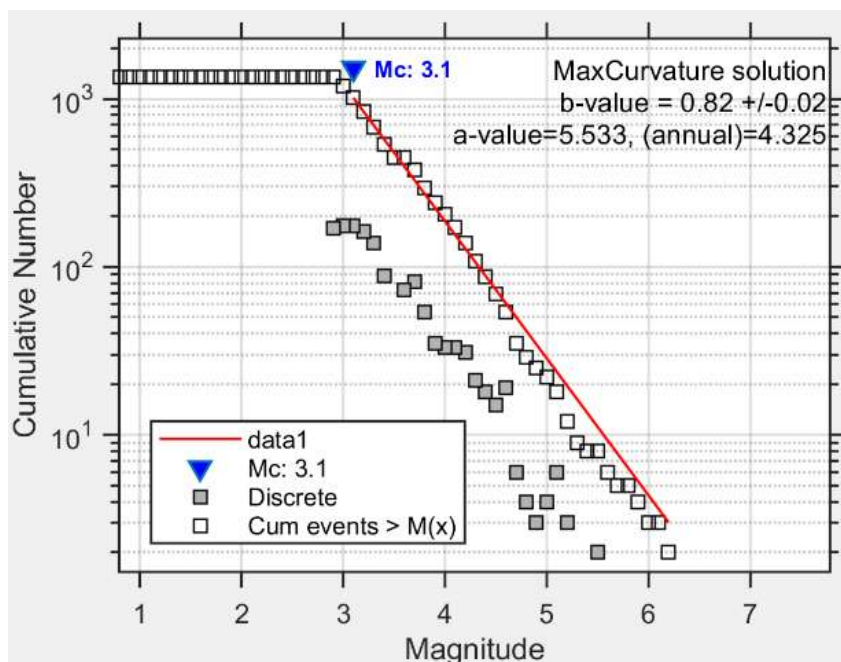
(۲۰۰۵) تعداد ۱۴۰ زمین‌لرزه با بزرگای ۴ تا ۶/۶ و برای دسته چهارم (سال‌های ۲۰۰۶ تا پایان ۲۰۲۲) تعداد ۱۰۰۱ زمین‌لرزه با بزرگای ۳/۱ تا ۶/۵ در محاسبات برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه وارد شده است.

با استفاده از راهکار کیکو و سلفول (۱۹۹۲) جهت تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران، پارامتر b یا همان شیب خط گوتبرگ-ریشتر که بیانگر نسبت فراوانی رویدادهای کوچک‌تر به بزرگ‌تر است، برابر با $1/0.6 \pm 0/0.3$ ($\beta = 2/43 \pm 0/0.6$) به دست آمد. همچنین پارامتر نرخ رویداد سالیانه (λ) برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۳/۱ برابر با $58/2 \pm 7/567$ و بیشینه بزرگای زمین‌لرزه منطقه $M_{max} = 7/9 \pm 0/45$ برآورد شد.

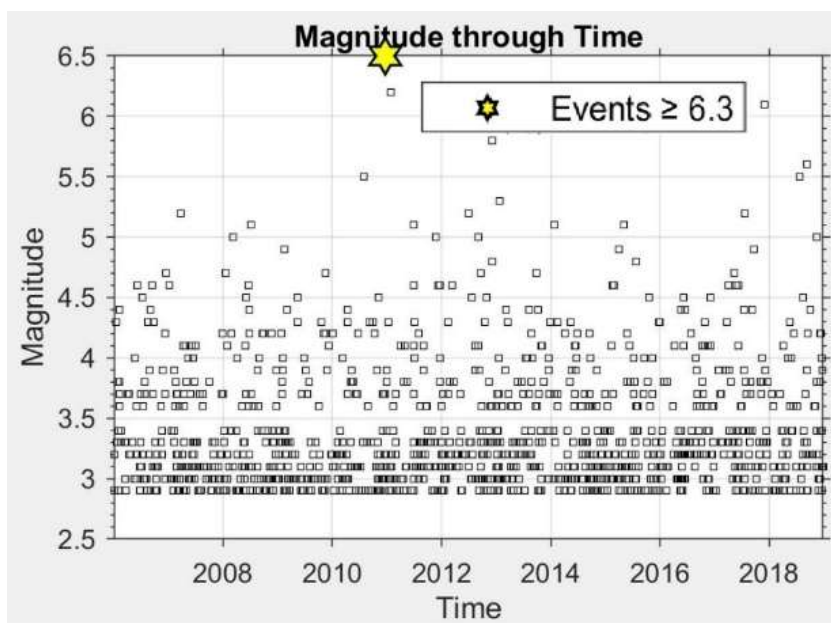
مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج کار موسوی بفرونی و بابائی ماهانی (۲۰۲۰) که بر اساس داده‌های مشابه و با استفاده از روشی یکسان انجام شده است، این موضوع را تأیید می‌کند که می‌توان بلوک لوت و حاشیه آن را از نظر لرزه‌خیزی مستقل از دیگر بخش‌های ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران دانست.

اطمینان‌پذیری آنها کم است. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار بزرگای زمین‌لرزه‌های منطقه برحسب زمان در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ و نمودار پراکندگی مکانی رویدادها با در نظر گرفتن عمق آنها در همان بازه زمانی نشان داده شده است.

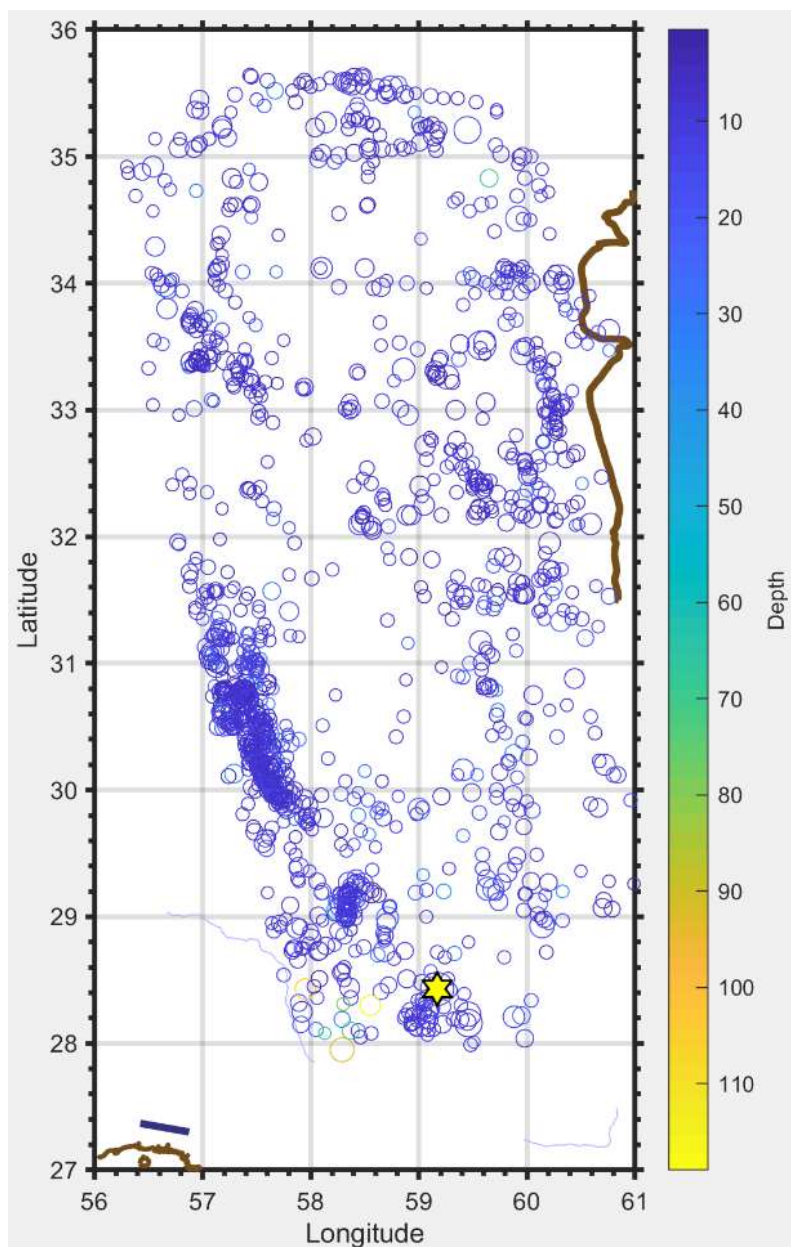
برای تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی از راهکار کیکو و سلفول (۱۹۹۲) استفاده شده است. در این راهکار علاوه بر استفاده از داده‌های نا کامل تاریخی، از چند دسته داده دستگاهی با آستانه کامل بودن متفاوت استفاده می‌شود و به این ترتیب تمام اطلاعات موجود از زمین‌لرزه‌ها در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی به کار می‌روند. در این محاسبه، از تعداد ۱۶ زمین‌لرزه تاریخی از سال ۷۳۴ تا ۱۸۷۷ میلادی با بزرگای بین ۵/۶ و ۷/۶ و عدم قطعیت ۰/۷ استفاده شده است. اولین دسته داده دستگاهی (سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۳) شامل ۲۳ زمین‌لرزه بود که بزرگای آنها در محدوده آستانه کامل بودن داده‌ها یعنی ۵/۷ تا ۶/۹ بود. به همین ترتیب برای دسته دوم (سال‌های ۱۹۶۴ تا ۱۹۹۹) تعداد ۱۰۷ زمین‌لرزه با بزرگای ۴/۷ تا ۷/۳، برای دسته سوم (سال‌های ۲۰۰۰ تا



شکل ۴. نمودار فراوانی تجمعی نسبت به بزرگای رویداد مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.



شکل ۵. نمودار بزرگای رویداد برحسب زمان مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.



شکل ۶. رومرکز زمین‌لرزه‌ها و عمق رویدادها بر اساس رنگ‌بندی مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۲ برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.

ماهانی (۲۰۲۰) برای ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران مقدار b را برابر 0.96 و نرخ رویداد سالانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر یا مساوی $2/9$ را تقریباً برابر 187 به‌دست آورده‌اند که با استفاده از این دو پارامتر و رابطه

منطقه دشت لوت و حاشیه آن که در این مطالعه بررسی شده است، بخشی از ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران است. مساحت کل این ایالت $2/5$ برابر مساحت منطقه مورد مطالعه است. موسوی بفرونی و بابائی

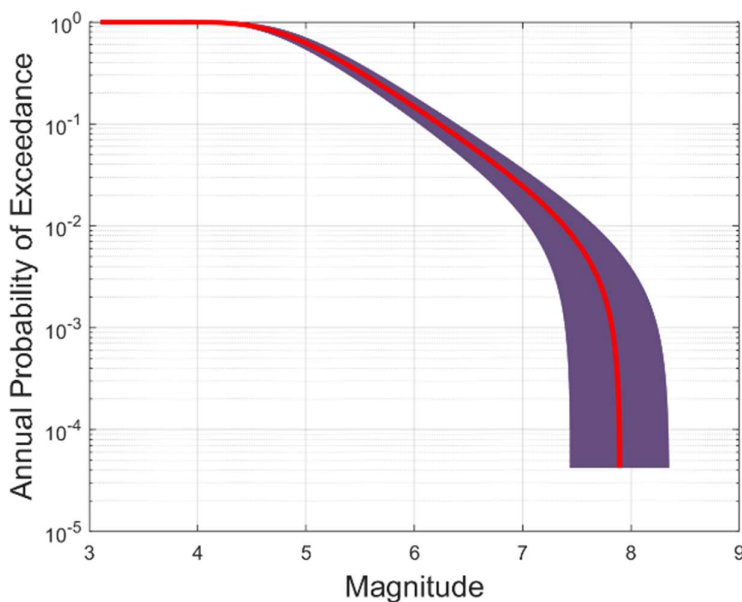
دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای منطقه مورد مطالعه رسم شده است.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

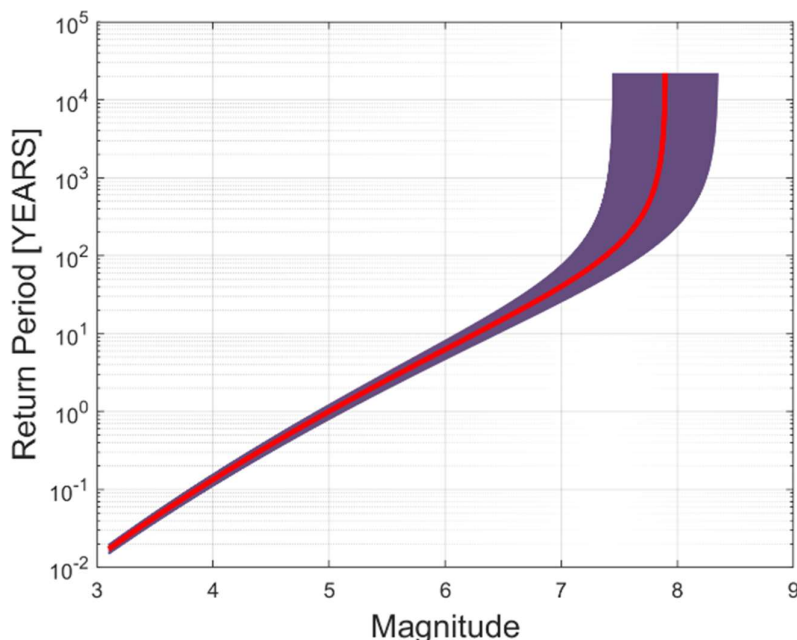
با توجه به شرایط لرزه‌زمین‌ساختی متنوع در ایران، تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای تعداد و مکان ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران انجام شده است. در مطالعات بسیاری از پژوهشگران (برای نمونه، میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸) بلوک لوت بخشی از ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی-شرق ایران محسوب می‌شود. برخی نیز (برای نمونه، نوروزی، ۱۹۷۶) بلوک لوت را یک ایالت لرزه‌زمین‌ساختی مستقل در نظر می‌گیرند. بررسی‌های آماری زمین‌لرزه‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد بیش از ۵۰ درصد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از $M_w 6/5$ فلات ایران در اطراف بلوک لوت رخ می‌دهد. از طرفی، در مطالعات صورت گرفته برای محاسبه آهنگ جابه‌جایی پوسته در ایران نیز بلوک لوت که با گسل‌های امتدادلغز نهندان، نایبند، درونه، دشت بیاض، اسفندیار، فردوس، لکرکوه و گوک احاطه شده است،

خطی گوتنبرگ-ریشر، نرخ رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر یا مساوی ۳/۱ برای این ایالت برابر ۱۲۰ محاسبه می‌شود. اگر بر اساس نسبت مساحت کل ایالت به مساحت منطقه مورد مطالعه که ۲/۵ است، نرخ رویداد تعیین شده برای ایالت به ۲/۵ تقسیم شود، عدد ۴۸ به دست می‌آید که کوچک‌تر از نتیجه مطالعه حاضر (۵۸) است. از مقایسه نتایج این مطالعه با کار موسوی بفرولی و بابائی ماهانی (۲۰۲۰) می‌توان دریافت که هم مقدار b و هم نرخ رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از یک مقدار خاص حاصل از این مطالعه بیشتر از مقادیر متناظر کل ایالت است. این موضوع تأییدکننده تفاوت چشمگیر در پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران و بلوک لوت و حاشیه آن است که بخشی از همان ایالت محسوب می‌شود.

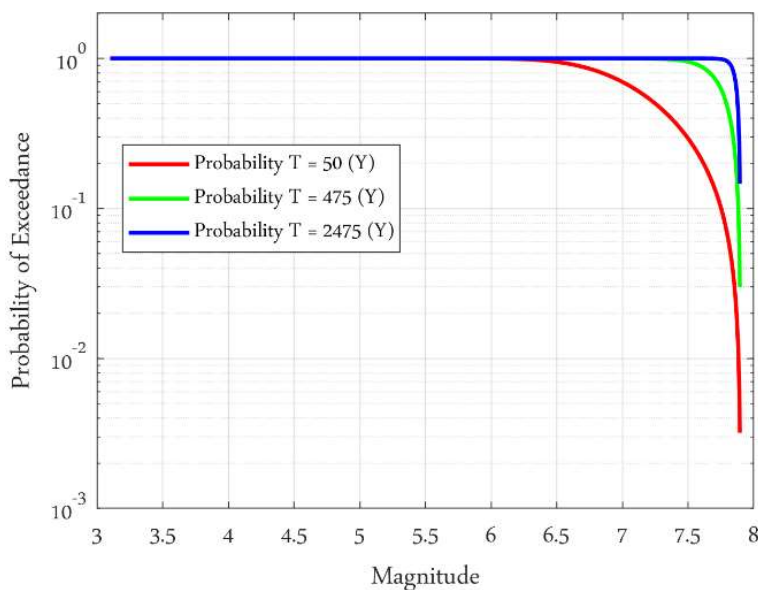
در شکل ۷ نمودار احتمال فزونی رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگای رویداد و در شکل ۸ نمودار دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگا برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن نشان داده شده است. در شکل ۹ نمودار احتمال فزونی رویداد سالیانه برحسب بزرگا برای



شکل ۷. نمودار احتمال فزونی رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگا برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.



شکل ۸. نمودار دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگای برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.



شکل ۹. نمودار احتمال فزونی رویداد سالیانه برحسب بزرگای دوره‌های بازگشت ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای منطقه دشت لوت و حاشیه آن در شرق ایران.

یا مساوی $\frac{3}{1}$ تقریباً برابر ۵۸ به‌دست آمده‌است که نشان‌دهنده لرزه‌خیزی زیاد منطقه است؛ یعنی در نقاطی از حاشیه دشت لوت که شهرهای پرجمعیت قرار گرفته است، همچون گذشته پتانسیل ایجاد خسارت و تلفات فراوان در اثر وقوع زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ وجود دارد.

همانند صفحه‌ای مستقل عمل می‌کند (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). در این مطالعه با استفاده از به‌روزترین کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه‌ای شامل دشت لوت و حاشیه آن برآورد شده است که بر این اساس مقدار b برابر $\frac{1}{0.6}$ و نرخ رویداد سالیانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر

- Journal of Structural Geology, **23**(2-3), 563-584.
- Ebadi, S., Safari, A., Barzaghi, R., and Bahroudi, A., 2020, A recovered moho model by integrated inversion of gravity and seismic depths in Iran: *Heliyon*, **6**(3), e03636.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., et al., 2019, An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities: *Geophysical Journal International*, **217**(2), 832-843.
- 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**, 120-134.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., and Tealeb, A., 2003, GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions: *Geophysical Journal International*, **155**, 126-138.
- Meyer, B., and Le Dortz, K., 2007, Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene: *Tectonics*, **26**, 1-20
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Research*, **7**, 465-495.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., and Babaie Mahani, A., 2020, A comprehensive earthquake catalogue for the Iranian Plateau (400 B.C. to December 31, 2018): *Journal of Seismology*, **24**(3), 709-724, <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., and Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau: *Annals of Geophysics*, **57**, S0653, doi:10.4401/ag-6395.
- Nowroozi, A. A., 1972, Focal mechanism of earthquakes in Persia, Turkey, West Pakistan and Afghanistan and plate tectonics of the Middle East: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**, 832-850.
- Nowroozi, A. A., 1976, Seismotectonic provinces of Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**, 1249-1276.
- Shadmanaman, N., Shomali, H., and Hemin, K., 2011, New constraints on upper-mantle S-velocity structure and crustal thickness of the Iranian Plateau using partitioned waveform inversion: *Geophysical Journal International*, **184**, 247-267.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., et al., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophysical Journal International*, **157**, 381-398.
- Walker, R., Jackson, J., and Baker, C., 2003, Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences: *Geophysical Journal International*, **152**, 749-765.
- Walker, R., and Jackson, J., 2004, Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in Central and Eastern Iran: *Tectonics*, **23**, TC5010.
- موسوی بفرولی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰)، مقدار b را برای ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران برابر ۰/۹۶ به‌دست آورده‌اند. تفاوت معنی‌دار در مقدار b حاصل از این مطالعه با مقدار b به‌دست‌آمده در پژوهش موسوی بفرولی و بابایی ماهانی (۲۰۲۰)، این موضوع را تأیید می‌کند که می‌توان از نظر لرزه‌خیزی، بلوک لوت و حاشیه آن را مستقل از بخش‌های دیگر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران در نظر گرفت.

منابع

شیخ‌الاسلامی، م.، جوادی، ح.، اسدی سرشار، م.، آقا‌حسینی، ا.، کوه‌پیمای، م.، وحدتی دانشمند، ب.، ۱۳۹۲، دانشنامه گسله‌های ایران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین، تهران، ایران.

Berberian, M., 1976, Contribution to the seismotectonics of Iran, part II: Geological Survey of Iran, Report **39**, 516pp.

Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran in Zagros-Hindu-Kush-Himalaya, in Gupta, H. K., Delany, F. M., eds., *Geodynamic Evolution*, Geodynamics Series 3: American Geophysical Union, Washington DC, 33-69.

Berberian, M., and Yeats, R. S., 2001, Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau:

Seismicity parameters and probability of earthquakes in the east of Iran (Lut block)

Seyed Hasan Mousavi-Bafrouei¹ and Seyed Hadi Dehghan-Manshadi^{2*}

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran

² Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

(Received: 17 February 2023, Accepted: 26 June 2022)

Summary

Most of the areas of the Iranian Plateau are high seismicity regions and there is a considerable difference between them. These differences in the eastern Iranian Plateau including the Lut block compared to the surrounding areas are so substantial that can be studied independently. A brief look at the seismic maps of this region shows that around the Lut block, the activity of strike-slip and reverse faults has caused many and devastating earthquakes but in the inner parts, it can be considered as a small rigid plate regarding the relative stability. In this research, using the most updated catalog as the main source, a catalog of 1760 historical and instrumental declustered earthquakes was provided for the area bounded in 56.5° - 61° E and 28° - 35.5° N in eastern Iran. The data was divided into a historical part and four instrumental parts of 1900 to 1963, 1964 to 1999, 2000 to 2005 and 2006 to 2022. Using the maximum curvature method for each of the four time intervals, the data completeness thresholds were determined to be 5.7, 4.7, 4 and 3.1, respectively. The seismicity parameters were estimated taking into account the uncertainty of the magnitudes. Substantially, the estimated b-value is equal to 1.06 and the mean annual occurrence rate for magnitude equal or greater than 3.1 is 58. The maximum magnitude of the earthquakes is estimated to be 7.9, which indicates the high seismicity of the region. The probability of annual exceedance for different magnitudes is estimated for the return periods of 50, 475, and 2475 years. Comparing the results of this study with the results of the other studies performed based on the same data and the same method for the Central-East Iran seismotectonic province confirms that the seismicity of the Lut block and its margin can be determined independently from the other parts of the Central-East Iran seismotectonic province.

Keywords: Lut block, seismicity parameters, b-value, annual occurrence rate, seismotectonics.

*Corresponding author:

shdehghan@ut.ac.ir