



فصلنامه زمین ساخت

زمستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۸

doi 10.22077/jt.2025.9346.1202

مقاله پژوهشی

لرزه زمین ساخت منطقه لکر کوه - راور، ایران مرکزی

احمد رشیدی^{۱*}، زهرا قادرپور^۲

۱- دانشیار تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

چکیده:

منطقه مورد پژوهش در زون ایران مرکزی و در بخش شمالی استان کرمان واقع است. گسل‌های فعال منطقه از جمله گسل‌های لکر کوه، راور، بهاباد، کوهبنان و نایبند، مسبب رخداد زمین‌لرزه‌های مهم بوده‌اند. در این پژوهش ویژگی‌های جنبشی گسل‌ها، میزان جابجایی افقی و برخاستگی آنها، تاثیر برهمکنش آنها و مناطق پرخطر زمین‌لرزه مشخص و نقشه‌های هم‌شتاب لرزه‌ای و هم‌شدت شکستگی تهیه گردید. نتایج نشان می‌دهد بیشینه شتاب افقی وارد بر منطقه بین $0/53 \text{ g}$ تا $0/56 \text{ g}$ می‌باشد. بزرگی زمین‌لرزه احتمالی برای گسل‌های اصلی (کوهبنان، بهاباد، نایبند و راور) $M_s 7/6$ تا $M_s 7/8$ برآورد گردید. مقادیر سرعت و جابجایی لرزه‌ای در محدوده 535 cm/s تا 1645 cm/s و 7 cm تا 27 cm تخمین زده شد. براساس نقشه شدت شکستگی، پایانه شمالی گسل بهاباد، بخش میانی گسل‌های نایبند شرقی و راور و بخش‌های جنوبی گسل‌های بهاباد و راور دارای بیشترین شدت شکستگی هستند. براساس انطباق میان بیشینه شتاب لرزه‌ای و شدت شکستگی، این بخش‌ها بعنوان پهنه‌های پرخطر زمین‌لرزه در منطقه پیشنهاد می‌گردند.

کلمات کلیدی: چشمه لرزه‌زا، تکنیک فعال، لرزه زمین ساخت، لکر کوه - راور، ایران مرکزی.

*ایمیل: arashidia@yahoo.com

تلفن تماس: ۰۹۱۳۰۵۰۵۴۴۷



Seismotectonic of the Lakarkuh- Ravar region in Central Iran

Ahmad Rashidi^{1*}, Zahra Ghaderpour²

1- Associate Professor of Tectonics, Department of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

The study area is located within the Central Iran structural zone, in the northern part of Kerman Province. The active faults of the region, including the Lakarkuh, Ravar, Bahabad, Kuhbanan, and Nayband faults, have been responsible for several significant earthquakes. In this research, the kinematic characteristics of the faults, including horizontal displacement, vertical uplift, their mutual interactions, and the seismically hazardous zones were analyzed. Seismic hazard and fracture intensity maps were also prepared. The results indicate that the maximum horizontal ground acceleration in the region ranges between 0.53 g and 0.56 g. The expected earthquake magnitude for the main faults (Kuhbanan, Bahabad, Nayband, and Ravar) is estimated to be between Ms 6.7 and Ms 7.8. The estimated seismic velocity and displacement values range from 535 cm/s to 1645 cm/s, and from 7 cm to 27 cm, respectively. Based on the fracture intensity map, the northern termination of the Bahabad Fault, the central segments of the eastern Nayband and Ravar faults, and the southern parts of the Bahabad and Ravar faults exhibit the highest fracture intensities. According to the spatial correlation between peak ground acceleration and fracture intensity, these segments are proposed as the seismically high-risk zones of the study area.

Keywords: Seismogenic source, Active tectonics, Seismotectonic, Lakarkuh - Ravar, Central Iran.

*Email: arashidia@yahoo.com

Tel: +989130505447

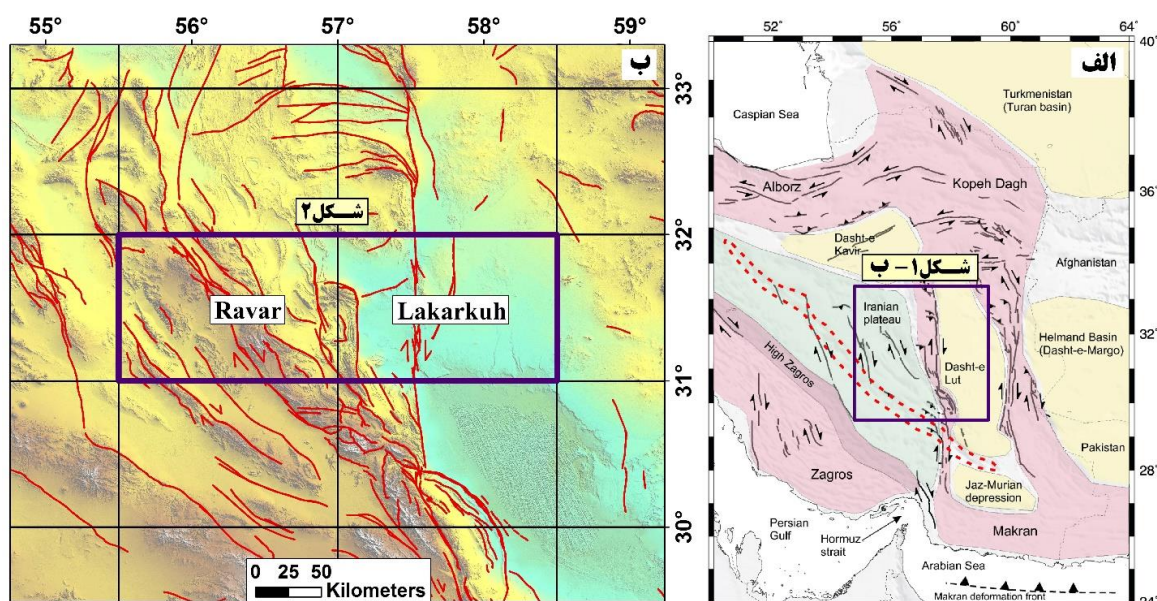
۱- مقدمه

منطقه مورد پژوهش، در محدوده نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ لکرکوه و راور، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱° تا ۳۲° درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۵°۳۰' تا ۵۸° درجه خاوری، واقع است (شکل ۱). این منطقه بخشی از زون ایران مرکزی در شمال استان کرمان است که در نزدیکی حاشیه کوه‌های شرق ایران و بلوک لوت واقع است. به علت صرف نیروهای فشاری ناشی از همگرایی صفحه‌های عربی - مکران و اوراسیا در امتداد گسل‌های پی سنگی مهمی مانند نایبند، لکرکوه و راور این منطقه دارای زمین ساختی پیچیده و فعال است. دگرشکلی این منطقه متأثر از گسل‌های فعال و شاخه‌های فرعی آن‌ها می‌باشد. اکثر گسل‌های مهم منطقه روند شمالی جنوبی و شمال باختری - جنوب خاوری دارند.

پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر بررسی لرزه‌خیزی تک‌گسل‌ها (مانند نایبند و کوهبنان) یا تحلیل کیفی خطر زمین‌لرزه متمرکز بوده‌اند. به‌طور خاص، واکر و

جکسون (Walker & Jackson, 2004)، امینی و همکاران (Amini et al., 2007) و بربریان و بیتس (Berberian & Yeats, 1999) نشان داده‌اند که گسل‌های اصلی شرق ایران از مهم‌ترین منابع لرزه‌زا محسوب می‌شوند. با این حال، بررسی هم‌زمان چند گسل‌ها، برآورد کمی پارامترهای لرزه‌ای و پهنه‌بندی خطر بر پایه داده‌های زمین‌ساختی و لرزه‌ای در سطح منطقه کمتر انجام شده است.

در این پژوهش، با ترکیب داده‌های لرزه‌ای، تحلیل فضایی در محیط GIS و روش‌های درون‌یابی (کریجینگ)، پارامترهایی مانند بیشینه شتاب، سرعت و جابه‌جایی برآورد و پهنه‌های پرخطر بر اساس تراکم شکستگی‌ها مشخص می‌گردند. نوآوری اصلی مطالعه، رویکرد یکپارچه به برهمکنش گسل‌های فعال و ارزیابی کمی لرزه‌خیزی در مقیاس منطقه‌ای است که می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت ریسک و کاهش خسارات احتمالی در شمال استان کرمان باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه پژوهش. الف) نقشه زیر زون‌های مهم ایران. ب) موقعیت منطقه لکرکوه - راور بر روی ایندکس نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰.

۲- لرزه‌زمین ساخت گستره مورد مطالعه

ایران در محل برخورد سه صفحه بزرگ عربی، هند و اوراسیا قرار دارد و همین موقعیت، آن را به یکی از مناطق لرزه‌ای فعال کره زمین تبدیل کرده است. فعالیت‌های زمین ساختی در ایران عمدتاً به شکل

کوتاه‌شدگی گسترده در زون‌های زمین ساختی زاگرس، البرز، مکران و کپه‌داغ دیده می‌شود (Mirzaei et al., 1998). طبق مطالعات GPS، نرخ همگرایی صفحات عربستان و اوراسیا در طول جغرافیایی ۶۰ درجه شرقی، حدود 26 ± 10 میلی‌متر در سال است که حدود ۹۰



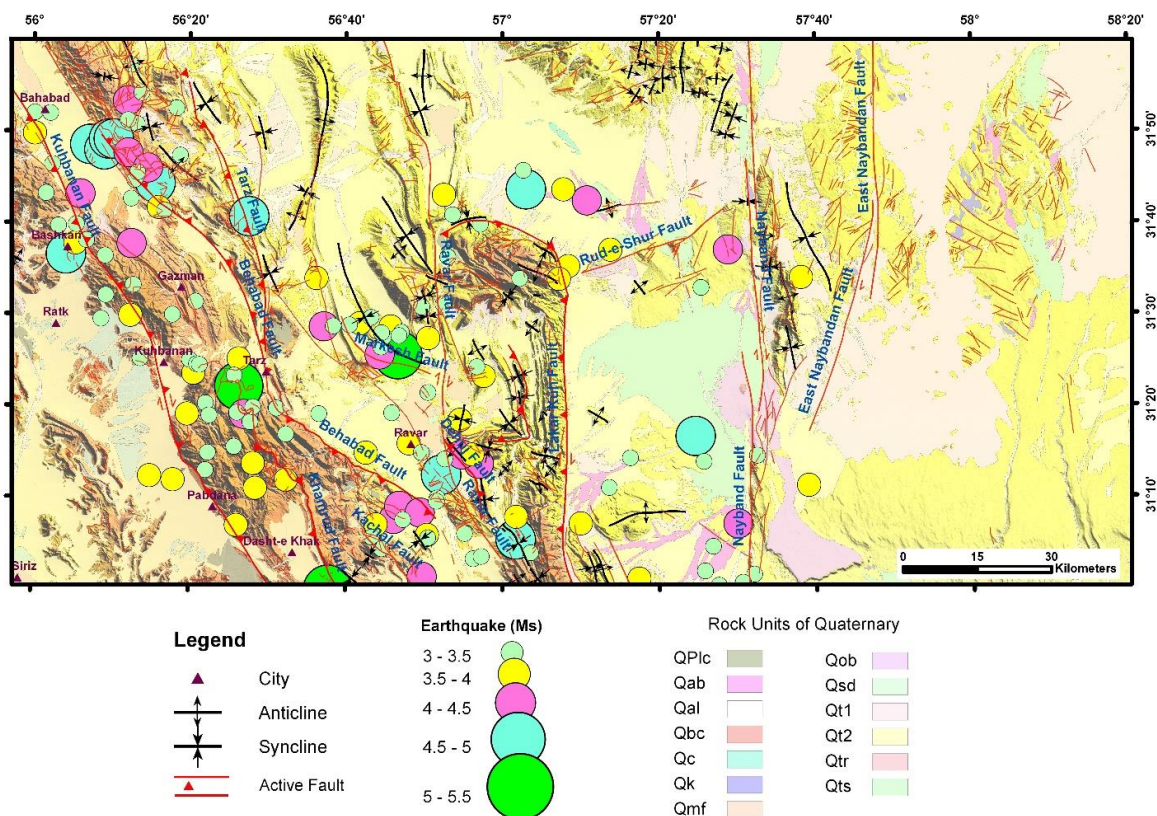
آن‌ها را آشکار می‌سازد. به‌طور مشخص، زلزله‌های ثبت‌شده در پهنه کوهبنان هم‌راستا با گسل کوهبنان دیده می‌شوند. همچنین بیشترین تراکم زمین‌لرزه‌ها در امتداد پهنه گسلی کوهبنان، بخش‌های شمالی گسل بهاباد، اطراف ناودیس مارکش، پیرامون بخش جنوبی گسل راور و در دشت شمال‌شرقی گسل کوهبنان (پیرامون گسل رودشور) قابل مشاهده است. این تمرکز و هم‌راستایی زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که گسل‌های اصلی منطقه، کنترل‌کننده پراکندگی و الگوی لرزه‌خیزی در محدوده مورد مطالعه هستند (شکل ۲).

۳- داده‌ها و روش مطالعه

برای انجام پژوهش، عکس‌های هوایی ۱/۵۰۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور و ۱/۵۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور، نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تصاویر ماهواره‌ای کوئیک برد، لندست و... استفاده شده است. به کمک نقشه‌ها و عکس‌های فراهم شده، نقشه ساختاری تهیه و گسل‌ها تا حد امکان تدقیق سازی شدند. به منظور تعیین خطر زمین لرزه، گسل‌های فعال در محدوده مطالعاتی از گسل‌های غیر فعال تفکیک گردیدند. با بررسی اصل تقاطع ساختاری گسل‌ها، چگونگی تأثیر متقابل گسل‌ها بر یکدیگر در فرآیند تجمع کرنش ناحیه ای مورد مطالعه قرار گرفتند. برای محاسبه پتانسیل لرزه خیزی منطقه مطالعاتی و محاسبه پارامترهای لرزه‌ای آن، زمین لرزه‌های دستگاهی در محدوده مورد مطالعه گردآوری گردید. داده‌های زلزله خیزی از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (کاتالاک انگهدال، ۲۰۰۶)، شبکه لرزه نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و CMT دانشگاه هاروارد دریافت شد. در این تحقیق روش کریجینگ ساده برای پهنه بندی میزان هم شدت شکستگی و هم شتاب لرزه ای بکار گرفته شده است. در این پژوهش، زمین‌لرزه‌های با بزرگی کمتر از ۴٫۵ از داده‌ها حذف شدند. برای پردازش و تحلیل داده‌ها از برنامه‌های Excel و نرم‌افزارهای GIS، ArcMap، ArcView، Surfer، Global Mapper و ENVI استفاده گردید. همچنین، در محیط GIS روش

درصد آن به‌صورت دگرشکلی غیرلرزه‌ای و مابقی به شکل انرژی لرزه‌ای آزاد می‌شود (Jackson et al., 1995). در این میان، ناحیه ایران مرکزی به‌عنوان یکی از بخش‌های مهم زمین ساختی، بین سه زون برخوردی زاگرس، البرز و فرورانش مکران قرار دارد (Rashidi, 2021; Fig.1a). زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران مرکزی معمولاً دارای عمق کانونی کم و شدت نسبتاً زیاد هستند و به‌طور کلی فعالیت لرزه‌ای در آن نسبت به نواحی زاگرس و کپه‌داغ کمتر است (دانشجو، ۱۳۷۸). در شرق و جنوب شرق ایران، گسل‌های امتدادلغز راست‌بُر با روند شمالی - جنوبی تا شمال‌غربی - جنوب‌شرقی نقش مهمی در تغییر شکل‌های لرزه‌ای میان بلوک‌های ساختاری داشته‌اند (Berberian et al., 2001; Rashidi et al., 2018; Ezati et al., 2022; Gholami et al., 2023). گرچه فعالیت‌های لرزه‌ای تاریخی اندکی در این منطقه ثبت شده‌اند (Ambraseys and Melville, 1982)، بیشتر گسل‌های فعال آن دارای شواهد آشکاری از جابجایی‌های کوتاه‌تری هستند و آثار آن‌ها به‌وضوح در تصاویر ماهواره‌ای دیده می‌شود (Walker et al., 2010). این ویژگی باعث شده که روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر و سنجش‌ازدور برای نقشه‌برداری گسل‌ها در این منطقه بسیار مؤثر واقع شوند (Berberian et al., 2001).

منطقه لکرکوه و راور (شکل ۲) در مرز دو زیر واحد مهم خردقاره ایران مرکزی، یعنی بلوک لوت در شرق و فرونشست طبس در غرب واقع شده‌اند (آفانباتی، ۱۳۸۵; Berberian et al., 2001). ساختارهای منطقه (مانند چین‌ها و...) تحت تأثیر گسل‌های امتدادلغز راست‌بُر با روند کلی NW-SE مانند گسل لکرکوه، کوهبنان، N-S مانند نایبند و دیگر شاخه‌های مرتبط شکل گرفته‌اند. مطالعات در منطقه پژوهش (لکرکوه و راور؛ شکل ۲)، نرخ‌های بالای لغزش، وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و تغییرات مورفولوژیکی ناشی از فعالیت‌های گسلی را نشان داده‌اند (Berberian et al., 2001 Talebian et al., 2014; Foroutan et al., 2006; al.). الگوی پراکندگی زمین‌لرزه‌ها در منطقه نشان می‌دهد که زلزله‌ها عمدتاً به‌صورت خطی و در امتداد گسل‌ها متمرکز شده‌اند (شکل ۲). این گسل‌ها ممکن است شناخته‌شده یا ناشناخته باشند، اما روند و تجمع زمین‌لرزه‌ها نقش



شکل ۲: نقشه روکانون زمین لرزه ها به همراه گسل های فعال و واحدهای کواترنری نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ لکروکه - راور. جزئیات را در نقشه های زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ لکروکه - راور (تهیه شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور) ببینید.

ناحیه یا چشمه مورد نظر است.

گریچینگ ساده برای پهنه بندی گستره مطالعاتی به کار گرفته شد.

$$\log N = a - bM_s$$

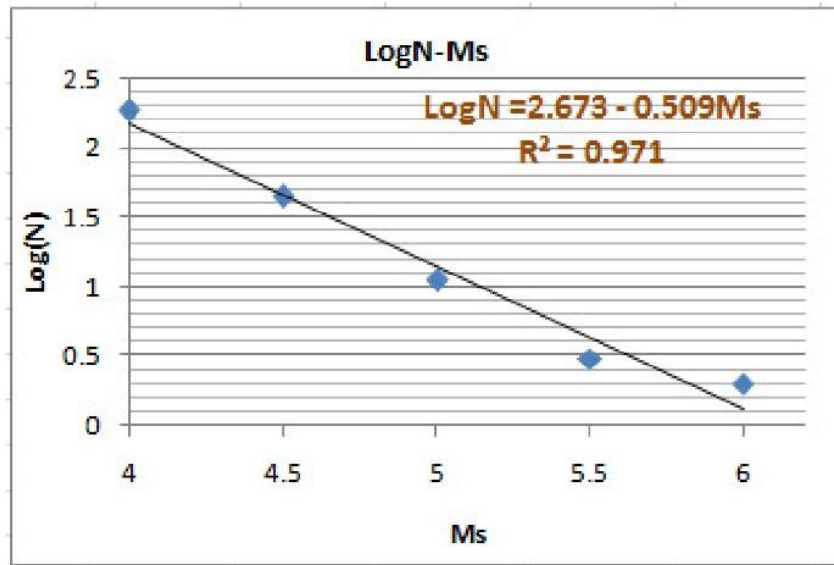
در این پژوهش، پس از جمع آوری زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی، فرمول لرزه خیزی منطقه استخراج گردید (شکل ۳).

۴- پردازش و تحلیل داده ها

۴-۱- تعیین مدل مناسب برای محاسبه پارامترهای لرزه خیزی منطقه

عمومی ترین روش برای مطالعه ی میزان لرزه خیزی یک ناحیه، بررسی آماری فراوانی و پراکنش زمین لرزه ها نسبت به بزرگی و فاصله در محدوده زمانی کاتالوگ لرزه ای است. بدین منظور که باید رابطه بین وضعیت لرزه خیزی در پیرامون یک چشمه لرزه را به صورت ریاضی و معنی دار به شکلی از رابطه بین بزرگی - فراوانی رویداد زمین لرزه ها تعریف نمود، به طوری که رابطه بین بزرگی و فراوانی زمین لرزه ها مشخص شود. مناسب ترین روش برای بیان رابطه بین فراوانی زمین لرزه (N) و بزرگی آن (Ms) رابطه گوتنبرگ - ریشتر (Gutenberg and Richter, 1944) می باشد که ضریب های ثابت آن (a,b) نشانگر وضعیت لرزه خیزی

۴-۲- برآورد بیشینه بزرگی زمین لرزه احتمالی در اثر عملکرد گسل های منطقه از آنجا که توان لرزه زایی گسل ها با طول بخش شکسته شده و جابجا شده آن در ارتباط است، رابطه مستقیمی میان توان لرزه زایی و درازای گسل های کواترنر وجود دارد. در این برآورد داده هایی چون سازوکار گسلش، سیمای هندسی گسل (خم دار بودن گسل، چند شاخه بودن و...) و ویژگی های لرزه زمین ساختی گستره را نباید از نظر دور داشت. در ادامه روابط تجربی مرتبط با پارامترهای جنبشی گسل های جنبا آورده شده است.



شکل ۳: نمودار و رابطه گوتنبرگ - ریشتر بدست آمده برای منطقه پژوهش.

$$M_s = 1.6 \square \square \square L + 0.72$$

Press (1967)

$$M_s = 1.1 \square \square \square LR + 0.10$$

Selmons (1978)

$$M_s = \log \frac{L}{V} + 0.4$$

Mohajere Ashjaei and Norozi (1982)

$$M_s = 1.429 \log L + 4.629$$

Ambraseys & Melville (1982)

$$M_s = 1.22 \square \square \square L + 0$$

Wells & Coppersmith (1994)

رابطه پیشنهادی سلمونز (Selmons, 1982)، برای گسل‌ها با سازوکار مختلف:

$$M_s = 1.404 + 1.169 \log L$$

برای گسل‌های راستالغز

$$M_s = 2.021 + 1.142 \log L$$

برای گسله های فشاری

$$M_s = 0.809 + 1.341 \log L$$

برای گسله های کششی

(Melville, 1982) که در آن I_0 شدت نسبی زمینلرزه در کانون است.

$$I_0 = 1.04 \square \square + 2.6$$

$$I_0 = 1.3 \square \square + 0.09$$

LR و L درازای میانگین گسل فعال بر حسب کیلومتر و M بزرگای زمین لرزه می باشد.

به کمک فرمول‌های تجربی ذکر شده در بالا، توان لرزه‌زایی گسل‌های فعال منطقه برآورد و در جدول (۱) آورده شده است.

۲- رابطه تجربی مهاجر اشجعی و نوروزی (Mohajere Ashjaei and Norozi, 1978)

$$I_0 = 1.7 \square \square - 2.8$$

مقادیر شدت نسبی در کانون (I_0) برای گسل‌های فعال گستره مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

۴-۳- برآورد میزان شدت زمینلرزه‌های حاصل از فعالیت گسل‌های منطقه

در این مقاله برای بدست آوردن رابطه میان بزرگی زمینلرزه و حداکثر شدت زمین لرزه که در اثر گسل‌های فعال منطقه در کانون سطحی زمینلرزه ایجاد می‌شوند، از روابط تجربی زیر استفاده شد:

۱- رابطه تجربی آمبرسیز و ملویل (Ambraseys and)



جدول ۱: برآورد بیشینه توان لرزه‌زایی گسل‌های جنبای منطقه. S: سلمونز (۱۹۷۸)، M&A: آمبرسز و ملویل (۱۹۸۲)، W&C: ولز و کوپرسمیت (۱۹۹۴)، M&N: (مهاجر اشجعی و نوروزی)، P: پرس (۱۹۶۷).

Name	Length (km, approx.)	Ms (S, 1978)	Ms (A&M, 1982)	Ms (W&C, 1994)	Ms (M&N, 1982)	Ms (P,1967)	Ms (average)
Behabad Fault	~120-140	7.7	7.9	7.8	7.4	8.1	7.8
Dehuj Fault	~80-100	6.6	6.5	6.6	6.4	7.1	6.6
East Lakarkuh Fault	~60-80	6.9	6.8	6.9	6.6	7.4	6.9
East Nayband Fault	~۱۸۰-۲۰۰	7.3	7.4	7.3	7.0	7.8	7.4
Godare Lakarkuh Fault	~۴۰-۶۰	7.1	7.2	7.2	6.9	7.6	7.2
Kachal Fault	~50-70	6.5	6.3	6.5	6.3	7.0	6.5
Khamrud Fault	~۱۴۰-۱۶۰	6.9	6.9	6.9	6.7	7.4	6.9
Kuhbanan Fault	~۲۵۰-۲۸۰	7.7	7.9	7.8	7.4	8.1	7.8
Lakar Kuh Fault	~۱۰۰-۱۲۰	7.4	7.6	7.5	7.2	7.9	7.5
Markesh Fault	~۹۰-۱۱۰	6.7	6.6	6.7	6.5	7.2	6.7
Nayband Fault	~۳۵۰-۴۰۰	7.7	7.9	7.8	7.4	8.1	7.7
Ravar Fault	~150-170	7.5	7.7	7.6	7.2	8.0	7.6
Rud-e-Shur Fault	~۲۰۰-۲۲۰	6.8	6.8	6.8	6.6	7.3	6.9
Takdar Fault	~70-90	7.1	7.1	7.2	6.9	7.6	7.2
West Nayband Fault	~۱۲۰-۱۴۰	6.8	6.7	6.8	6.6	7.3	6.8

جدول ۲: برآورد شدت نسبی در کانون (I_0) برای گسل‌های فعال گستره مورد مطالعه. N&M: مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۷۸)، M&A: آمبرسز و ملویل (۱۹۸۲).

Fault	توان لرزه‌زایی گسل‌ها (Ms)	شدت زمینلرزه در محل کانون زمینلرزه (I_0)		
		I_0 (A&M, ۱۹۸۲)	I_0 (M&N, ۱۹۷۸)	I_0 (Average)
Behabad Fault	7.8	10.23	10.46	10.35
Dehuj Fault	6.6	8.67	8.42	8.55
East Lakarkuh Fault	6.9	9.06	8.93	9.00
East Nayband Fault	7.4	9.71	9.78	9.75
Godare Lakarkuh Fault	7.2	9.45	9.44	9.45
Kachal Fault	6.5	8.54	8.25	8.40
Khamrud Fault	6.9	9.06	8.93	9.00
Kuhbanan Fault	7.8	10.23	10.46	10.35
Lakar Kuh Fault	7.5	9.84	9.95	9.90
Markesh Fault	6.7	8.80	8.59	8.70
Nayband Fault	7.7	10.10	10.29	10.20
Ravar Fault	7.6	9.97	10.12	10.05
Rud-e-Shur Fault	6.9	9.06	8.93	9.00
Takdar Fault	7.2	9.45	9.44	9.45
West Nayband Fault	6.8	8.93	8.76	8.85



۴-۴- برآورد میزان بیشینه سرعت و جابه‌جایی (افقی و قائم) حاصل از فعالیت گسل‌های منطقه در کانون زمینلرزه

سرعت افقی و قائم (بر حسب سانتیمتر بر ثانیه) و حداکثر جابه‌جایی افقی و قائم (بر حسب سانتی‌متر) در کانون زمینلرزه براساس فرمول‌های تریفوناک و برادی (Trifunac and Brady, 1975) محاسبه و در جدول (۳) ارائه گردید.

$$\text{Log}V_h = 0.63 + 0.25I.$$

$$\text{Log}V_v = -1.1 + 0.28I.$$

$$\text{Log}D_h = -0.53 + 0.19I.$$

$$\text{Log}D_v = -1.13 + 0.24I.$$

جدول ۳: برآورد مقادیر سرعت و جابه‌جایی افقی و قائم برای گسل‌های فعال منطقه.

Fault	10 (Average)	حداکثر سرعت قائم و افقی (Cm/S)			
		Vv (Cm/S)	Vh (Cm/S)	Dh (Cm/S)	Dv (Cm/S)
Behabad Fault	10.35	1645.32	62.60	27.26	22.53
Dehuj Fault	8.55	583.78	19.62	12.40	8.33
East Lakarkuh Fault	9.00	756.40	26.22	15.10	10.69
East Nayband Fault	9.75	1164.80	42.52	20.97	16.17
Godare Lakarkuh Fault	9.45	980.05	35.04	18.39	13.70
Kachal Fault	8.40	535.49	17.81	11.62	7.67
Khamrud Fault	9.00	756.40	26.22	15.10	10.69
Kuhbanan Fault	10.35	1645.32	62.60	27.26	22.53
Lakar Kuh Fault	9.90	1269.84	46.84	22.39	17.57
Markesh Fault	8.70	636.43	21.61	13.24	9.05
Nayband Fault	10.20	1509.21	56.83	25.53	20.74
Ravar Fault	10.05	1384.36	51.59	23.91	19.09
Rud-e-Shur Fault	9.00	756.40	26.22	15.10	10.69
Takdar Fault	9.45	980.05	35.04	18.39	13.70
West Nayband Fault	8.85	693.83	23.80	14.14	9.84

$$\text{Log}a_h = 0.3I. - 0.14$$

(Trifunac and Brady, 1975)

$$\text{Log}a_v = 0.3I. - 0.18$$

(Trifunac and Brady, 1975)

$$\text{Log}a_h = 0.25I. - 0.25$$

(McGuire, 1978)

برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در منطقه، اطلاعات کافی در مورد زمینلرزه‌های منطقه و گسل‌ها (مانند طول گسل، مؤلفه جنبشی گسل، آخرین جنبش بر روی گسل) فراهم گردید. با استفاده از روابط تجربی موجود در ارتباط با طول گسل و توان لرزه‌زایی آنها (بخش‌های قبلی مقاله را ببینید)، بیشینه شتاب ثقل افقی وارد بر نقاط

۴-۵- برآورد میزان بیشینه شتاب افقی و قائم حاصل از فعالیت گسل‌های منطقه در کانون زمینلرزه

بیشینه شتاب افقی در محل کانون زمینلرزه‌های منطقه با استفاده از فرمول‌های تجربی تریفوناک و برادی (Trifunac and Brady, 1975) و مک‌گیور (McGuire, 1978) محاسبه و در جدول (۴) ارائه گردید.

براساس محاسبات حاصله از پارامترهای جنبشی زمینلرزه‌ها، میزان جنبایی گسل‌های کوهبنان، بهاباد، نایبند و راور، نسبت به سایر گسل‌های فعال منطقه بیشتر می‌باشد.

۴-۶- پهنه بندی شدت زمین لرزه در منطقه

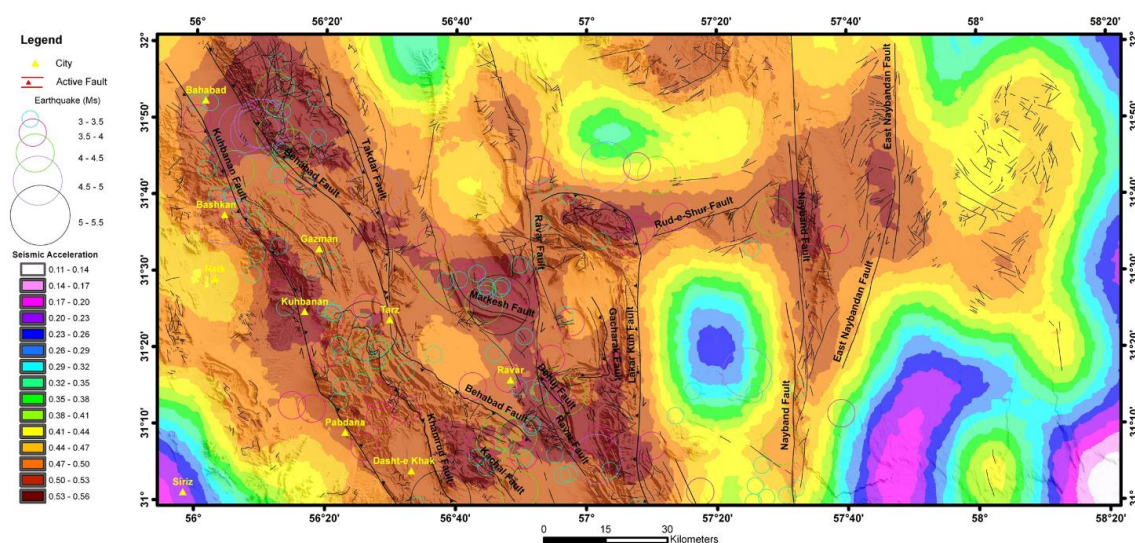


جدول ۴: برآورد بیشینه شتاب ثقل افقی و قائم در کانون زمینلرزه‌ها، Mc (T&B (Trifunac and Brady, 1975):
(McGuire, 1978)

Fault	I0 (Average)	مؤلفه افقی شتاب (Cm.S2) براساس فرمول تجربی (B&T)	مؤلفه قائم شتاب (Cm.S2) براساس فرمول تجربی (B&T)
Behabad Fault	10.35	1233.104833	841.3951416
Dehuj Fault	8.55	355.6313186	242.6610095
East Lakarkuh Fault	9	485.2885002	331.1311215
East Nayband Fault	9.75	814.704284	555.9042573
Godare Lakarkuh Fault	9.45	662.2165037	451.8559444
Kachal Fault	8.4	320.6269325	218.7761624
Khamrud Fault	9	485.2885002	331.1311215
Kuhbanan Fault	10.35	1233.104833	841.3951416
Lakar Kuh Fault	9.9	903.6494737	616.5950019
Markesh Fault	8.7	394.4573021	269.1534804
Nayband Fault	10.2	1111.731727	758.577575
Ravar Fault	10.05	1002.305238	683.9116473
Rud-e-Shur Fault	9	485.2885002	331.1311215
Takdar Fault	9.45	662.2165037	451.8559444
West Nayband Fault	8.85	437.5221052	298.5382619

برای منطقه تهیه گردید. در این مطالعه، روش درون یابی کریجینگ ساده انتخاب شد. این روش، کمترین خطا را نسبت به روش‌های دیگر همچون روش معکوس فاصله، کریجینگ جهانی و... دارد. در نقشه پهنه بندی بدست آمده (شکل ۳)، پایانه شمالی گسل بهاباد، بخش میانی گسل نایبند شرقی و گسل راور، بخش‌های جنوبی گسل‌های بهاباد و راور بیشترین شدت لرزه ای را نشان می دهند.

مختلف منطقه، تعیین گردید. در این مطالعه، برای ایجاد شبکه محاسباتی، محدوده مورد نظر با شبکه بندی 22× کیلومتر تقسیم شد و ابزار Geostatistical Analyst برای تحلیل‌های زمین آماری در محیط نرم افزاری ArcGIS طراحی شده است. از این ابزار برای ارزیابی خصوصیات آماری اطلاعات مانند: تغییرات فضایی و وابستگی فضایی داده‌ها و تعیین روند کلی اطلاعات استفاده می شود. با بهره گیری از این نرم افزار نقشه پهنه بندی خطر زمینلرزه

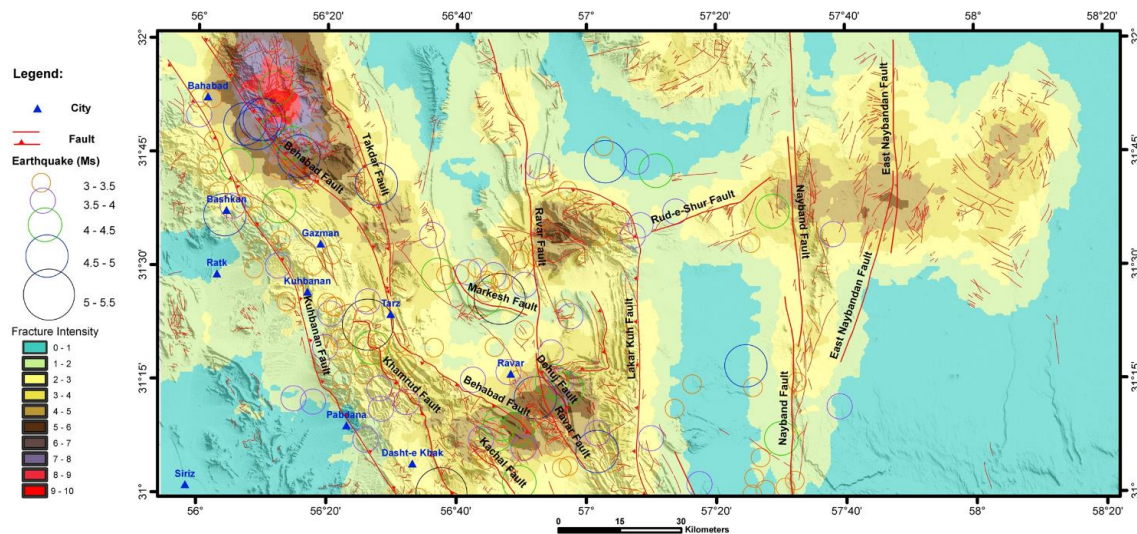


شکل ۴: نقشه پهنه بندی شدت زمین لرزه در منطقه لکرکوه - راور.

۷-۴- پهنه بندی شدت شکستگی در منطقه

نقشه پهنه بندی شدت شکستگی جهت مقایسه با نتایج حاصله از تحلیل خطر زمینلرزه تهیه می شود. این نقشه می تواند گویای پاره ای از مسائل لرزه زمین ساختی مانند ارتباط شکستگی ها و برهمکنش آنها در منطقه باشد. منطقه مورد مطالعه به دلیل قرار گرفتن در حاشیه باختری و جنوبی پهنه لوت، در اثر نیروهای فشاری وارده، به شدت دچار خردشدگی شده اند. برای پهنه بندی شدت شکستگی در منطقه، از نقشه های زمین

شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شد. پس از رقوم سازی تمامی گسل های شناسایی شده در منطقه با استفاده از نرم افزارهای ArcGIS و Arc View پهنه بندی بر اساس روش کریجینگ ساده ترسیم گردید. نقشه هم شدت، بیشترین شدت شکستگی را در نزدیکی پایانه شمالی گسل بهاباد و بخش های جنوبی گسل های بهاباد و راور همچنین بخش میانی گسل راور و بخش میانی گسل نایبند شرقی نشان می دهد.



شکل ۵: نقشه پهنه بندی شدت شکستگی در منطقه لکرکوه - راور.

۵- بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بیشینه شتاب لرزه ای، بیشینه سرعت و جابه جایی افقی و قائم در گسل های فعال منطقه لکرکوه-راور مقادیر بالایی دارند و بیشترین توان لرزه زایی به گسل های کوهبنان، بهاباد، نایبند و راور اختصاص دارد. نقشه های شدت شکستگی مشخص کرد که بخش هایی از گسل ها، از جمله پایانه شمالی گسل بهاباد، بخش های میانی گسل های نایبند شرقی و راور و بخش های جنوبی گسل های بهاباد و راور دارای بیشترین تراکم گسلی هستند. این یافته ها با مطالعات پیشین مانند (Berberian & Yeats 1999) و (Walker & Jackson 2004) تا حد زیادی همخوانی دارند. در مقایسه با گزارش Berberian & Yeats (1999)، پهنه های پرخطر در این پژوهش گسترده تر برآورد شدند که می تواند ناشی از به کارگیری داده های جدید و تحلیل های فضایی دقیق تر باشد. این

نتایج نشان می دهد که گسل های اصلی منطقه نقش تعیین کننده ای در کنترل لرزه خیزی دارند. همچنین مشاهده شد که در برخی مناطق، هم پوشانی کامل بین شدت شکستگی و شتاب لرزه ای وجود ندارد. این تفاوت می تواند ناشی از پنهان بودن برخی گسل ها یا عدم فعالیت لرزه ای برخی گسل های شناخته شده باشد. بنابراین، برای ارزیابی دقیق خطر زمین لرزه در منطقه، ترکیب داده های زمین شناسی، زمین ساختی و لرزه خیزی ضروری است. یافته های این پژوهش علاوه بر تأیید نتایج مطالعات پیشین، اطلاعات کمی و کیفی جدیدی درباره پهنه های پرخطر و توان لرزه زایی گسل های منطقه ارائه می دهد و می تواند در مدیریت ریسک و برنامه ریزی شهری و روستایی در شمال استان کرمان مورد استفاده قرار گیرد. با محاسبه بیشینه بزرگی زمین لرزه (Ms)، شدت زمین لرزه در کانون (I0) و محل سازه (IR)، حداکثر



- S.J. 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone. *Journal of Geophysical*, 184, 555-574.
- Allen, M.B., Jackson, J., Walker, R.T., Berberian, M., & Priestley, K. 2002. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian Basin. *Geology*, 30(9), 775-778.
- Ambraseys, N.N., & Melville, C.P. 1982. A history of Persian earthquakes. Cambridge University press, Cambridge, UK.
- Amini, K., Jafari, M. K., Hosseini, M., Mansouri, B., & Hosseini, S. 2007. Development of urban planning guidelines for improving emergency response capacities in seismic areas of Iran. *Disasters*, 32(4), 485-504.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B.E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J., & Baker, C. 2001. The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Journal of Geophysical*, 146, 371-398.
- Berberian, M., & Yeats, R. S. 1999. Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 120-139.
- Chandra, S., Spencer, N.W., Krankowsky, D., & Lammerzahn, P. 1976. A Comparison of Measured and Inferred Temperatures From Aeros-B. *Geophysical Research*, 3, doi: 10.1029/GL003i012p00718.issn: 0094-8276.
- Engdahl, E.R., Jackson, J.A., Myers, S.C., Bergman, E.A. & Priestley, K. 2006. Relocation and سرعت و جابجایی افقی و قائم، و بیشینه شتاب افقی و قائم ناشی از فعالیت گسل‌های فعال منطقه، توان لرزه‌زایی گسل‌ها به صورت کمی برآورد شد. بیشترین توان لرزه‌زایی به ترتیب مربوط به گسل‌های کوهبنان ($M_s \approx 7.8$)، بهاباد (7.8)، نایبند (7.7) و راور (7.6) است، در حالی که گسل‌هایی مانند دهج و کچال توان لرزه‌زایی کمتری نشان دادند ($M_s \approx 6.5-6.6$). نقشه شدت شکستگی نشان داد که بالاترین میزان شکستگی در پایانه شمالی گسل بهاباد، بخش میانی گسل‌های نایبند شرقی و راور، و بخش‌های جنوبی گسل‌های بهاباد و راور رخ داده است. بیشینه شتاب افقی در این مناطق بین 0.53 تا 0.56 g برآورد شد. به دلیل پنهان بودن تعدادی از گسل‌ها، گاهی ممکن است در مناطقی که شتاب لرزه‌ای زیاد است، شدت شکستگی پایین باشد یا در مناطقی که گسل وجود دارد (شدت شکستگی بالا است)، ممکن است گسل فعال لرزه‌ای نباشد و شتاب لرزه‌ای پایین بدست آید. این مقادیر با مناطق دارای بیشترین شکستگی هم‌پوشانی دارند. بیشینه سرعت قائم و افقی در کانون زمین‌لرزه برای گسل‌های فعال بین 53.5 (گسل کچال) تا 164.5 cm/s (گسل‌های بهاباد و کوهبنان) و 17 (گسل کچال) تا 62 cm/s (گسل‌های بهاباد و کوهبنان) محاسبه شد، در حالی که حداکثر جابجایی افقی و قائم بین 11 (گسل کچال) تا 27 cm (گسل‌های بهاباد و کوهبنان) و 7 (گسل کچال) تا 22 cm (گسل‌های بهاباد و کوهبنان) بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که پهنه‌های پایانه شمالی گسل بهاباد، بخش‌های میانی و شمالی گسل کوهبنان، بخش میانی گسل‌های نایبند شرقی و راور، و بخش‌های جنوبی گسل‌های بهاباد و راور به عنوان پهنه‌های پرخطر زمین‌لرزه در منطقه لکرکوه - راور شناسایی می‌شوند.
- ۶- مراجع**
- آقاباتی، علی. (۱۳۸۵). زمین‌شناسی ایران. تهران: نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- دانشجو، ف. (۱۳۷۸). مبانی مهندسی زلزله و آنالیز ریسک. انتشارات دانش فردا.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Emami, M.H., & Jones,

- 7, 465–495.
- Mohajer Ashjai, A., & Nowroozi, A.A. 1978. Observed and probable Intensity Zoning of Iran. *Tectonophysics*, 49.
- Press, F. 1967. Dimentions of the source for small shallow earthquakes, Proc. VESIAC Conf. on the source mechanism of shallow seismic events. VESIAC rep. 7885-1-X PRU-Pruhonice, Czechoslovakia.
- Rashidi Boshrabadi, A., Khatib, M.M., Raeesi, M., Mousavi & S.M., Djamour, Y. 2018. Geometric-kinematic characteristics of the main faults in the W-SW of the Lut Block (SE Iran). *J. Afr. Earth Sci.* 139, 440–462.
- Rashidi, A., 2021. Geometric and kinematic characteristics of the Khazar and North Alborz Faults: Links to the structural evolution of the North Alborz-South Caspian boundary, Northern Iran. *J. Asian Earth Sci.* 213, 104755 <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104755>.
- Slemmons, D.B. 1978. Faults and earthquake magnitude, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S. Misc, 166, 1-73.
- Slemmons, D.B. 1982. Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. In *Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference* (Vol. 1, pp. 119–130).
- Talebian, M., Jackson, J., Ghorashi, M., & Bergman, E. 2006. The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 22 February 2005 in central Iran: reactivation of an out-of-sequence thrust. *Geophysical Journal International*, 165(1), 319–329.
- assessment of seismicity in the Iran region: *Journal of Geophys*, 167, 761-778.
- Ezati, M., Rashidi, A., Gholami, E., Mousavi, S.M., Nemati, M., Shafieibafti, S., & Derakhshani, R. 2022. Paleostress Analysis in the Northern Birjand, East of Iran: Insights from Inversion of Fault-Slip Data. *Minerals*, 12, 1606.
- Foroutan, M., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Murray, A.S., Le Dortz, K., Shokri, M.A., Arnold, M., Aumaître, G., Bourlès, D., Keddadouche, K., Solaymani Azad, S., & M.J. Bolourchi. 2014. Late Pleistocene-Holocene right slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lut block, Iran. *Journal of Geophys*, 119(4), 3517-3560.
- Gholami, E., Vaghari, P., Khatib, M. M., & Faghih, A. 2023. Morphotectonic analysis of sub-basins along the north termination of Anar Fault, Yazd Block, Iran. *Geotectonics*, 57(5), 524–538.
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.
- Jackson, J., Haines, A.J., & Holt, W.E. 1995. The accommodation of Arabia–Eurasia plate convergence in Iran. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8), 15,205–15,219.
- McGuire R.K. 1978. FRISK: Computer program for seismic risk analysis using faults as earthquake sources. Open File Report No 78-1007, U.S.G.S., Denver.
- Mirzaei, N., Gao, M. T., & Chen, Y. T. 1998. Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces. *Journal of Earthquake Prediction Research*,



- Trifunac, M. D., & Brady. A. G. 1975. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 139-162.
- Walker, R., & Jackson, J. 2004. Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23(6), TC6013.
- Walker, R., Gans, P., Allen, M.B., Jackson, J., Khatib, M.M., Marsh, N., & Zarrinkoub, M. 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Journal of Geophysical*, 177, 783-805.
- Walker, R.T., Talebian, M., Sloan, R.A., Rasheedi, A., Fattahi, M., & Bryant, C. 2010. Holocene slip-rate on the Gowk strike-slip fault and implications for the distribution of tectonic strain in eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 181(1), 221-228.
- Walker, R.T. 2006. A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. *Journal of Structural Geology*, 28(4), 654-668.
- Wells, D.L., & Coppersmith, K. J. 1994. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin Of Seismological Soc. of America*, 84, 974-1002.

