



فصلنامه زمین ساخت

بهار ۱۴۰۱، سال ششم، شماره ۲۱

doi 10.22077/JT.2023.5640.1143

بررسی پارامترهای لرزه خیزی با کمک برآورد نرخ گشتاورهای زمین شناسی و لرزه‌ای در شرق ایران

مهناز صباحی^{۱*}، دکتر محمدمهدی خطیب^۲

۱- دانشجوی دکتری تکنونیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استاده، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

چکیده:

محاسبه گشتاورهای زمین شناسی و لرزه ای از جمله روش های ارزیابی میزان فعالیت های زمین ساختی مناطق مختلف است. در این پژوهش به کمک برآورد نرخ گشتاورهای زمین شناسی و لرزه ای توان لرزه ای و همچنین ترسیم نقشه همشتاب لرزه ای، لرزه خیزی شرق ایران مورد بررسی قرار گرفت است. نتایج نشان می دهد بیشترین مقدار گشتاور زمین شناسی مرتبط با گسل سبزواران است که مقدار آن $10^{18} \times 2/61544$ بدست آمده است و کمترین مقدار آن مربوط با گسل جازموریان است که مقدار آن $10^{15} \times 9/91367$ است. با توجه به نقشه همشتاب بدست آمده مقادیر حداکثر شتاب (0.747423) در اطراف گسل های مهم سراوان، بم پشت، آساگی، پیشگیرام، زاهدان و گوک مشاهده گردید. بر اساس نمودار نرخ گشتاور لرزه ای محاسبه شده، مقدار نرخ گشتاور لرزه ای در منطقه مورد بررسی برابر است با $10^{18} \times 1/4166$. همچنین نقشه پهنه بندی نرخ گشتاور لرزه ای نشان می دهد مقادیر بیشینه نرخ گشتاور لرزه ای در مجاورت سیستم های گسلی سفیدآبه-زاهدان، کهورک، نره نو، گوک و شهداد است که بیشترین مقدار آن برابر است با $10^{20} \times 2/26248$ و کمترین مقدار آن در بخش شمالی منطقه در مجاورت گسل نرگس مشاهده می شود که مقدار آن $10^{19} \times 1/77828$ بدست آمده است.

واژه های کلیدی: پارامترهای لرزه خیزی، نرخ گشتاور زمین شناسی، نرخ گشتاور لرزه ای، همشتاب لرزه ای، شرق ایران.

*ایمیل: sabahi.mahnaz@birjand.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۲۹۶۱۵۶۲۳



Investigation of seismicity parameters with the help of estimating geological and seismic torque rates in the east

Mahnaz Sabahi^{1*}, Mohammad Mehdi Khatib²

1. Ph.D Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

Calculation of geological and seismic moments is one of the methods in evaluating the level of tectonic activities in different regions. In this study the seismic potential in eastern Iran was assessed using geological and seismic moment rates. Results show that the maximum geological moment for the Sabzevaran fault is 2.61544×10^{18} and the minimum value, 9.91367×10^{15} , belongs to the Jazmourian fault. Based on the obtained iso-acceleration map, the average and maximum acceleration values (0.747423) have been observed around the important Saravan, Bam posht, Asagi, Pishgiram, Zahedan and Gowk. The calculated cumulative geological moment rate for the studied region is 1.4166×10^{18} . According to the cumulative geological moment rate map, the maximum value of the cumulative geological moment rate of 2.26248×10^{20} was observed in the vicinity of the Sefidabeh-Zahedan, Kahurak, Narreh Now, Gowk, and Shahdad fault systems. The minimum cumulative geological moment rate, 1.77828×10^{19} , was detected in the northern region of the Narges fault.

Keywords: seismic parameters, geology Moment Rate, seismic Moment Rate, seismic acceleration, Eastern Iran.

*Email: afaghhih@shirazu.ac.ir

Tel: +989173003631

مقدمه

آمارای زمین لرزه‌ها و بررسی گشتاورهای زمین‌شناسی و لرزه‌ای یک منطقه، کمک شایانی در جهت آگاهی از پتانسیل لرزه‌خیزی منطقه و ارائه الگوی مناسب برای توسعه شهری می‌کند. هدف از این تحقیق شناسایی نواحی با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا در منطقه مورد مطالعه با بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیک و گسل‌های منطقه مورد مطالعه است.

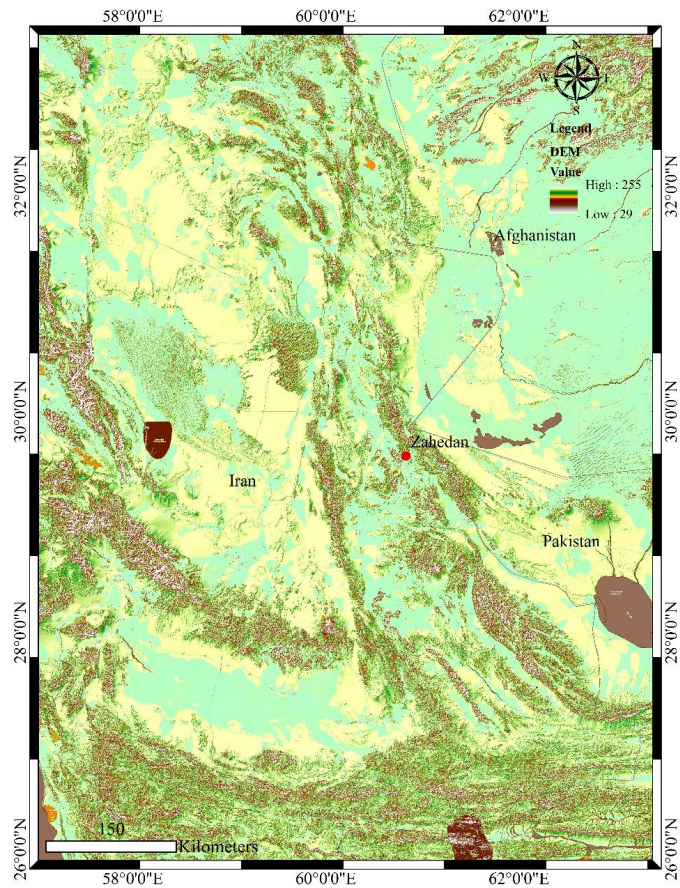
۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۳۰۰ کیلومتر مربع در شرق ایران بین طول‌های جغرافیایی ۵۷/۷۸ تا ۶۱/۶۶ درجه خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۲۹/۳۹ تا ۳۳/۸۵ درجه شمالی واقع شده است که از شرق به مرز کشورهای افغانستان و پاکستان و از غرب به گسل‌های تقریباً شمالی جنوبی سبزواران و گوک منتهی می‌شود. شمال محدوده مطالعاتی به گسل‌های تقریباً شمالی جنوبی آواز و نرگس و جنوب آن به دریای عمان محدود می‌شود (شکل ۱).

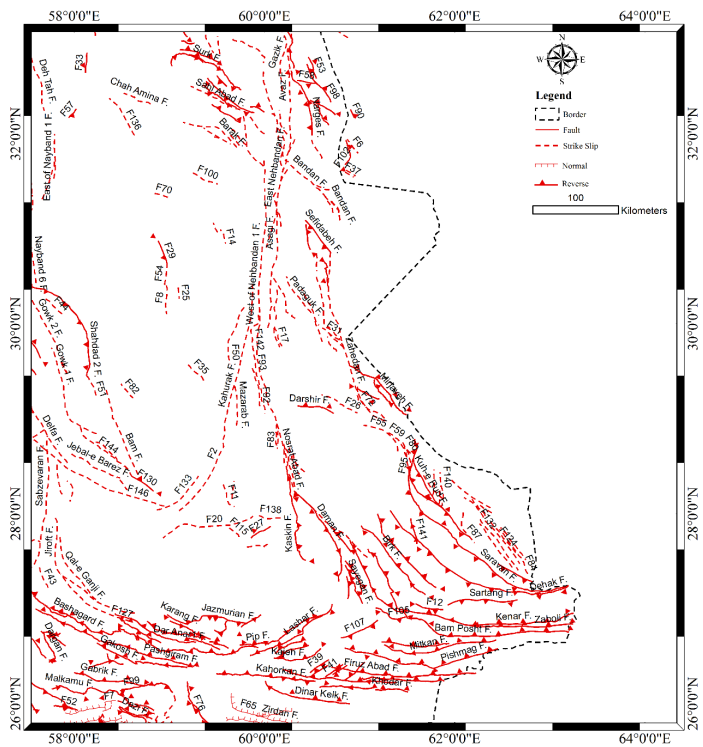
۲- روش کار

در این مطالعه به منظور محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی ابتدا کاتالوگ لرزه‌ای منطقه مورد بررسی از سایت ISC تهیه شده است که این کاتالوگ شامل زمین لرزه‌های سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ است. در مرحله اول با استفاده از کاتالوگ تهیه شده، عمق کانونی زمین لرزه‌ها، پارامترهای لرزه‌خیزی *a* و *b*، دوره بازگشت زمین لرزه‌ها، ریسک زمین لرزه‌ها و پارامترهای *MCE* و *DBE* محاسبه شده است. در مرحله بعد نقشه گسل‌های فعال منطقه که دارای طول بیشتر از ۲۰ کیلومتر هستند براساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای (گوگل ارث) در نرم افزار GIS ترسیم شده است (شکل ۲). سپس با استفاده از نرم افزارهای GIS و Arcview نقشه هم شتاب برای منطقه مورد بررسی تهیه گردید. همچنین به منظور درک بهتر از وضعیت لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه، گشتاورهای لرزه‌ای و زمین‌شناسی محاسبه شده است. گشتاور لرزه‌ای با استفاده از کاتالوگ تهیه شده و فرمول‌های مربوطه محاسبه شده است. نرخ گشتاور زمین‌شناسی با استفاده از ویژگی‌های هندسی گسل‌های فعال منطقه که از کتاب‌ها، مقالات و پایان‌نامه‌ها جمع‌آوری گردیده است به دست آمده است.

ایران از لحاظ تکتونیک در بخشی از کمربند فعال آلپ-همالیا واقع است که به وسیله بلوک‌های صلب عربستان در جنوب باختری، توران در شمال خاوری و هلمند در خاور احاطه شده است (جکسون و همکاران، ۱۹۸۴، ۱۹۹۵). ایالت‌های ساختاری سیستان و مکران در شرق جنوب شرق ایران واقع شده‌اند. پهنه مکران متاثر از یک رژیم تنش اصلی که ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی عمان در راستای شمالی به زیر پوسته قاره‌ای ایران می‌باشد. نواحی فرورانش معمولاً از پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی برخوردارند و هرچه از گودال اقیانوسی به سمت کمان ماگمایی پیش می‌رویم، عمق زمین لرزه‌ها بیشتر می‌شود (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲؛ ظریفی، ۲۰۰۶). سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌های کم عمق (عمق‌های کمتر از ۴۵ کیلومتر) نشان می‌دهد که جهت محور تنش فشارشی از باختر به خاور دارای دوران در جهت عقربه‌های ساعت است که در آن میدان تنش در مکران باختری تحت تأثیر زون برخوردی اوراسیا-عربستان و میدان تنش در مکران خاوری تحت تأثیر زون برخوردی هند-اوراسیا قرار دارند (ساکانی و همکاران، ۲۰۱۸). ایالت ساختاری سیستان در بخش شمالی، نزدیک به عرض ۳۴ درجه به یک سیستم از گسل‌های شرقی-غربی راست‌الغز-چپ‌گرد (دشت بیاض) منتهی می‌شود که تصور می‌شود با چرخش ساعت‌گرد خود، برش‌های شمالی-جنوبی را جذب می‌کنند. به طرف جنوب و در عرض جغرافیایی ۲۷ درجه زمین‌درز سیستان به درون رشته ساحلی شرقی-غربی مکران و در مکانی که دریای عرب به طرف شمال فرورانده می‌شود، فرو می‌رود. برخورد صفحه عربی به ایران همراه با فرورانش دریای عمان به زیر ایران در جنوب ایران سبب تشکیل گسل‌های امتدادلغز بزرگی در خاور ایران شده است. عملکرد این گسل‌ها سبب ایجاد دگرشکلی‌ها و زمین لرزه‌های بزرگی در شرق ایران شده است (تیروول و همکاران، ۱۹۸۳). دگرشکلی فعال کنونی سیستان تحت تأثیر گسل‌هایی با امتدادهای شمال تا شمال غربی، راست‌الغز راست‌گرد و تراست‌های با روند شمال غربی-جنوب شرقی است که ناشی از دگرشکلی فلات ایران تحت تأثیر حرکت صفحه عربی است (واکر و همکاران، ۲۰۰۴). مطالعه



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی (شرق ایران).



شکل ۲. نقشه گسل‌های فعال منطقه مورد مطالعه.

پژوهش ابتدا زمین‌لرزه‌های گستره مورد مطالعه از سایت ISC تهیه شده و سپس پارامترهای زیر محاسبه شده است. شکل ۴ هیستوگرام بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هر دو نمودار توزیع نرمال زمین‌لرزه‌ها را برحسب بزرگای آن‌ها نشان می‌دهند.

۳-۲- بررسی ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌ها

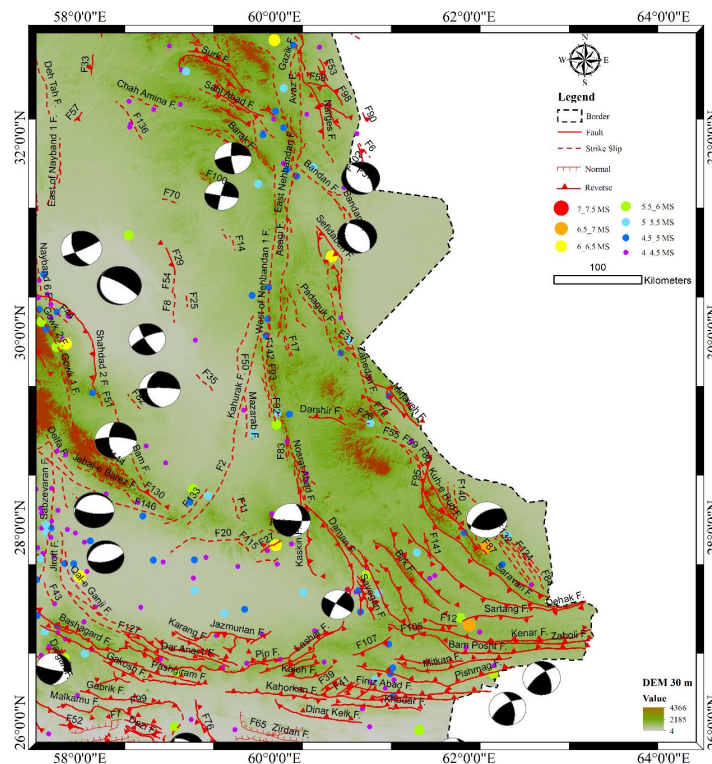
ژرفای کانونی زمین‌لرزه بیانگر فاصله قائم از سطح زمین به کانون یک زمین‌لرزه است جایی که مکان به وجود آمدن و آزادسازی انرژی یک زمین‌لرزه است. از آنجا که این پارامتر نشان‌دهنده عمق لرزه‌خیزی یک منطقه است از اهمیت خاصی برخوردار است. شکل ۵ توزیع آماری ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌های منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

۳- برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

رایج‌ترین شیوه بررسی لرزه‌خیزی یک ناحیه مطالعه آماری فراوانی رویداد زمین‌لرزه‌ها نسبت به بزرگای و همچنین مشاهده پراکندگی بزرگای زمین‌لرزه‌ها در حوزه زمان است. پراکندگی رابطه بزرگای-فراوانی زمین‌لرزه‌های محدوده مورد مطالعاتی بعد از حذف پیش‌لرزه و پس‌لرزه به همراه تصویر DEM و فوکال مکانیسم زمین‌لرزه‌های محدوده مطالعاتی در شکل ۳ نشان داده شده است.

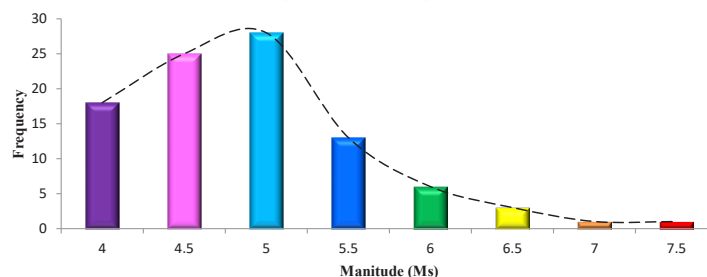
۳-۱- بررسی آماری ویژگی‌های لرزه‌خیزی و برآورد پارامترها

شناخت میزان لرزه‌خیزی و تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی یک گستره بر اساس جمع‌آوری فهرست زمین‌لرزه‌ها و مطالعه پیشینه لرزه‌خیزی در آن انجام می‌گیرد. در این

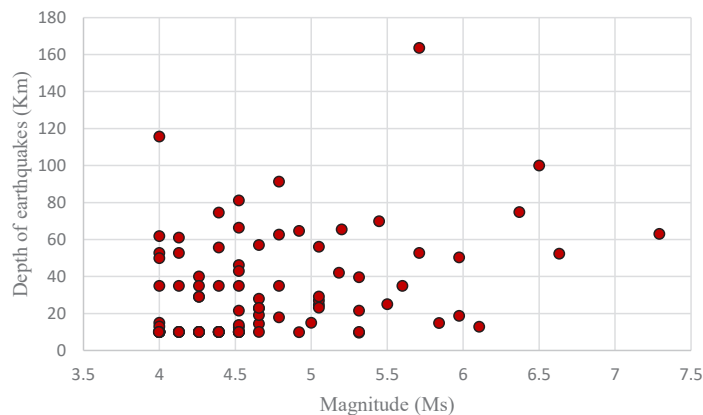


شکل ۳. پراکندگی زمین‌لرزه‌ها (بعد از حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها) در گستره منطقه مورد مطالعه.

Histogram of Magnitude



شکل ۴. هیستوگرام بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۵. توزیع بزرگی زمین‌لرزه‌ها نسبت به عمق در منطقه مورد مطالعه.

۴- روش کلاسیک گوتنبرگ-ریشتر

این روش معروف‌ترین و رایج‌ترین روش برای توصیف میزان لرزه‌خیزی یک ناحیه است، زیرا در این روش وضعیت لرزه‌خیزی به صورت ریاضی بیان می‌شود و رابطه بزرگی- فراوانی رویداد زمین‌لرزه‌ها طبق فرمول زیر تعریف می‌شود که ضرایب ثابت آن نشانگر وضعیت لرزه‌خیزی ناحیه مورد مطالعه است (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۴۲، ۱۹۵۶).

$$\log N_c = a - b.M_s \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن N_c : فراوانی تجمعی، a و b : ضرایب ثابت (a): نشانگر تعداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگای بیش از صفر و b : نشانگر فراوانی نسبی رویداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگای گوناگون است) و M_s : بزرگای زمین‌لرزه است.

در این پژوهش زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M_s \geq 4$ ، یک دوره ۱۲۰ ساله از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ برای شرق ایران مشخص شده است. سپس با محاسبه $\log N_c$ و ترسیم آن بر حسب M_s ، پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه یعنی a و

b به دست آمده است (جدول ۱).

در نهایت با رسم منحنی نیمه لگاریتمی، فرمول لرزه‌خیزی منطقه حاصل می‌شود (شکل ۶). در این منحنی، لگاریتم تعداد زمین‌لرزه‌ها بر روی محور Y و بزرگی زمین‌لرزه بر روی محور X ترسیم شده‌اند. فرمول لرزه‌خیزی به دست آمده برای منطقه مطالعاتی به شکل زیر است. با توجه به فرمول لرزه‌خیزی حاصل شده $(\log N_c = 2.0236 - 0.6497M_s)$ ، در این منطقه مقادیر پارامترهای a برابر $2/0236$ و b برابر $0/6497$ است. ضرایب لرزه‌خیزی a و b پارامترهای لرزه‌خیزی هستند، به نحوی که a را به ویژگی‌های زمین ساختی ناحیه مرتبط می‌دانند و b شیب خط در نمودار $\log N$ است. ضریب a معیاری از اندازه لرزه‌خیزی گستره مورد مطالعه و ضریب b معیاری از ویژگی لرزه‌خیزی آن است. در واقع a با آهنگ کلی رویدادها و b با آهنگ نسبی درجه‌های گوناگون بزرگی متناسب است.

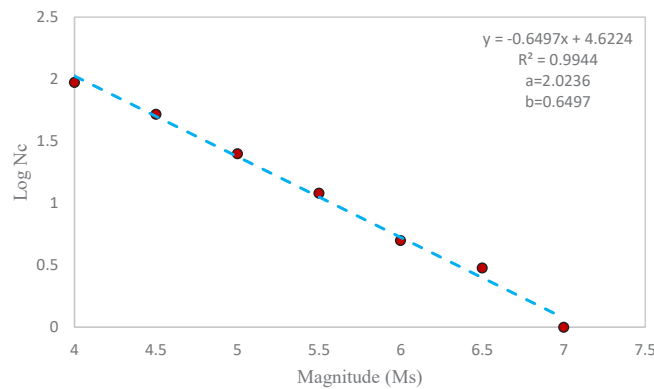
جدول ۱. بزرگی زمین‌لرزه‌ها و لگاریتم فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه.

Ms	N	Log N
>4	94	1.973127854
>4.5	52	1.716003344
>5	25	1.397940009
>5.5	12	1.079181246
>6	5	0.698970004
>6.5	3	0.477121255
>7	1	0

برای محاسبه زمان وقوع دو حادثه مشابه استفاده کرد. بنا بر تعریف متوسط فاصله زمانی بین یک رویداد مشخص و رویدادی بزرگ‌تر یا معادل آن را دوره

۴-۱- تعیین دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها

در آمار و احتمالات فرمولی خاص وجود دارد که از آن بنام دوره بازگشت یاد می‌کنند. از این فرمول می‌توان



شکل ۶. نمودار $\text{Log } N_c$ در برابر M_s به منظور محاسبه فرمول لرزه‌خیزی گوتنبرگ-ریشتر.

بازگشت (T) می‌نامند که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (نوروزی و همکاران، ۱۹۸۶):

$$T = 1/N \quad (\text{رابطه ۲})$$

بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگای M_s بزرگ‌تر از ۶ ارائه شده است.

$$T = 10^{-a+bM} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با توجه به اینکه $\text{Log } N = a - b.M_s$ ، لذا در جدول ۲ دوره

جدول ۲. برآورد دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگی مختلف برای منطقه مورد مطالعه.

Magnitude (M_s)	6.5	6.4	6.6	6.1	6.0	7.3
T (Year)	158.29	130.17	193.10	87.74	72.04	517.64

۲-۴- محاسبه ریسک

از رابطه زیر محاسبه شده است و نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

$$R = 1 - \exp(-T \times 10^{a-b.M_s}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

ریسک زمین‌لرزه برای ۱۰۰ سال با استفاده از پارامترهای لرزه‌خیزی به دست آمده از رابطه گوتنبرگ-ریشتر و کاتالوگ زمین‌لرزه تهیه شده از سایت ISC و با استفاده

جدول ۳. برآورد ریسک وقوع زمین‌لرزه برای بازه‌های ۱۰ تا ۱۰۰ سال آتی.

ID	M_s	T(yr)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	4	Risk (%)	93	99.51	99.97	100	100	100	100	100	100	100
2	4.5		71.6	91.93	97.71	99.35	99.82	99.95	99.99	100	100	100
3	5		44.89	69.63	83.26	90.77	94.92	97.2	98.46	99.15	99.53	99.74
4	5.5		24.57	43.11	57.09	67.63	75.59	81.58	86.11	89.52	92.1	94.04
5	6		12.5	23.43	33	41.37	48.69	55.11	60.71	65.62	69.92	73.68
6	6.5		6.12	11.87	17.26	22.33	27.09	31.55	35.74	39.67	43.37	46.83
7	7		2.95	5.81	8.58	11.27	13.89	16.42	18.89	21.28	23.59	25.85
8	7.5		1.41	2.79	4.16	5.5	6.83	8.14	9.43	10.7	11.96	13.2

شدیدترین جنبش زمین در ساختگاه می‌شود. در اثر رویداد این زمین‌لرزه ممکن است، سازه به‌طور جدی آسیب ببیند ولی نباید سازه فروریخته و جان انسان را به خطر اندازد.

DBE، زمین‌لرزه‌ای است که در زمان عمر مفید سازه، احتمال رویداد آن قابل انتظار است. این زمین‌لرزه بیشترین نیروها را بر سازه وارد می‌نماید و باید سازه به‌گونه‌ای طراحی شود که نیروهای ناشی از این

۳-۴- برآورد پارامترهای MCE و DBE

میزان شتاب حرکت افقی زمین معمولاً در دو مرز با احتمال خطر ۱۰ و ۶۴ درصد انتخاب می‌شوند، که مرز نخست (۱۰ درصد احتمال رویداد) را بیشینه زمین‌لرزه ممکن یا باورکردنی^۱ (MCE) و مرز دوم (۶۴ درصد احتمال رویداد) را زمین‌لرزه پایه طرح^۲ (DBE) می‌نامند. MCE، زمین‌لرزه‌ای است که باعث ایجاد

۱ (Maximum Credible Earthquake, MCE)

۲ (Design Basic Earthquake, DBE)

بیشینه زمین‌لرزه پذیرفتنی (MCE) کنترل و پیش‌بینی کرد. برای منطقه مورد مطالعه برآورد DBE و MCE برای عمر مفید ۱۰ تا ۲۰۰ سال محاسبه گردید که در جدول ۴ آورده شده است.

۵- محاسبه توان لرزه‌زایی گسل‌های منطقه مورد مطالعه

جهت محاسبه توان لرزه‌زایی گسل‌ها و پارامترهای مربوطه از روابط ارائه‌شده توسط محققین گذشته استفاده شده که نتایج آن برای تعدادی از گسل‌های شناخته شده در منطقه مورد بررسی در جدول ۶ آورده شده است.

رویداد این زمین‌لرزه را تحمل کرده، پایداری خود را نگه‌داشته و آسیبی نبیند. در واقع این پارامتر نشان‌دهنده این است که سازه، در برابر ماکزیمم زمین‌لرزه‌ای که رخ می‌دهد، ۶۴٪ احتمال ویرانی دارد. بدیهی است که در بیشتر نقاط کشور ما، طراحی برای مرز خطر کمتر، یعنی احتمال رویداد (MCE) سنگین و پرهزینه خواهد بود. در نتیجه بنا بر پیشنهادها مهندسی تجربی، می‌توان سازه‌های معمولی را بر پایه احتمال رویداد زیادتر یعنی ۵۰ درصد خطر یا کمی بیشتر (DBE) طراحی نمود و سپس با قبول امکان خسارت محدود، وضعیت پایداری عمومی سازه‌ها را در صورت رویداد

جدول ۴. برآورد DBE و MCE برای عمر مفید ۱۰ تا ۲۰۰ سال.

T (year)	DBE (64%)	MCE (10%)	T (year)	DBE (64%)	MCE (10%)
10	4.6	6.2	110	6.2	7.8
20	5.1	6.6	120	6.3	7.8
30	5.4	6.9	130	6.4	7.9
40	5.6	7.1	140	6.4	7.9
50	5.7	7.2	150	6.4	8.0
60	5.8	7.4	160	6.5	8.0
70	5.9	7.5	170	6.5	8.1
80	6.0	7.5	180	6.6	8.1
90	6.1	7.6	190	6.6	8.1
100	6.2	7.7	200	6.6	8.2

حداکثر جابجایی قائم (D_v):

$$D_v = 10^{(-1.13+0.28I_0)} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

همچنین McGuire (۱۹۷۴) به منظور محاسبه بیشینه جابجایی (D_{Max}) روابط تجربی زیر ارائه کرد.

$$D_{Max} = 0.393e^{(0.999M_s)}(25 + R)^{-0.88} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

چندین رابطه تجربی به منظور محاسبه بیشینه شتاب گرانش زمین (a_{Max}) ارائه گردیده و به شرح زیر است. رابطه Estova (۱۹۷۰):

$$a_{Max} = 1.08e^{(0.5M_s)}(25 + R)^{-1.32} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

رابطه Dams & Moore:

$$a_{Max} = 1.08e^{(0.58M_s)}(25+R)^{-1.32} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

رابطه روشندل و نعمت ناصر (۱۹۷۸):

$$a_{Max} = 5.2e^{(0.5M_s)}(25 + R)^{-1.52} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

روابط تجربی متعددی به منظور محاسبه توان لرزه‌زایی گسل‌ها (M_s)، شدت نسبی زمین‌لرزه (I_0)، کاهش شدت زمین‌لرزه (I_R) مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. در سال ۱۹۷۵، Trifunac and Brady در راستای محاسبه شتاب افقی و قائم در کانون، سرعت افقی و قائم و همچنین حداکثر جابجایی افقی و قائم روابط زیر را ارائه کرده‌اند.

شتاب افقی (A_h) در کانون:

$$A_h = 10^{(-0.041+0.3I_0)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

شتاب قائم (A_v) در کانون:

$$A_v = 10^{(-0.18+0.3I_0)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

سرعت افقی (V_h):

$$V_h = 10^{(0.63+0.25I_0)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

سرعت قائم (V_v):

$$V_v = 10^{(-1.1+0.28I_0)} \quad (\text{رابطه ۸})$$

حداکثر جابجایی افقی (D_h):

$$D_h = 10^{(-0.53+0.19I_0)} \quad (\text{رابطه ۹})$$

جدول ۶. توان لرزه زایی گسل های منطقه مورد مطالعه.

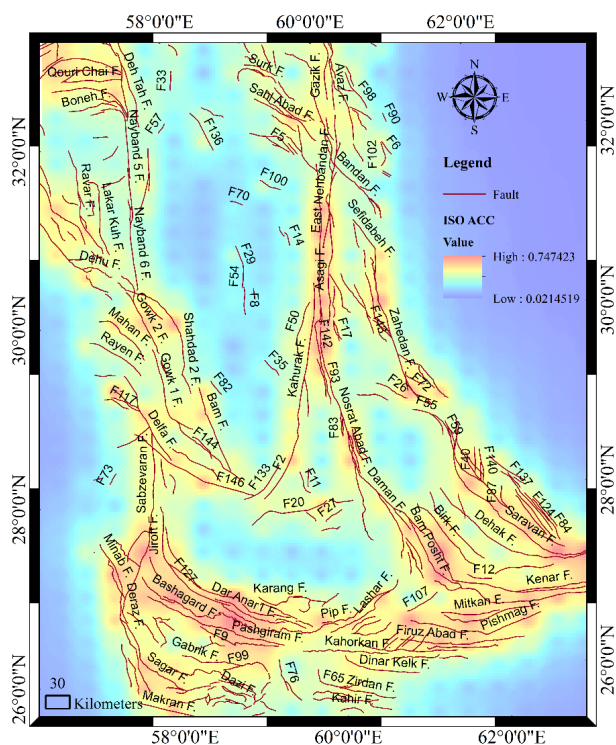
Name	Length (Km)	Distance from Zahedan (Km)	Mechanism	M (Stemmons)	Ms (AVG.)	I0 (AVG.)	IR (Ambraseys and Melville)	Ah	Av	Vh	Vv	Dh	Dv	Dmax (McGuire) (cm/s ²)	a max (Estova) (cm/s ²)	a max (Dems and Moore) (cm/s ²)	a max (Rowshandel and Nemat-Nasser) (cm/s ²)	Maximum a max (cm/s ²)
								(cm/s ²)		(cm/s)		(cm)						
Birk F.	108.00	180.38	Reverse and Thrust	7.4	7.4	10	6	855.94	547.57	63.39	42.06	20.81	16.02	5.82	0.04	0.07	0.06	0.07
Esmacil Abad F.	66.59	252.44	Right Lateral	7.2	7.1	9	5	660.70	422.67	51.09	33.03	17.67	13.03	3.48	0.02	0.04	0.04	0.04
Deh Morad F.	37.90	322.64	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	4	488.60	312.58	39.73	24.92	14.59	10.23	2.13	0.01	0.03	0.02	0.03
Jazmurian F.	42.40	312.20	Reverse and Thrust	7.0	6.9	9	4	518.85	331.93	41.77	26.36	15.16	10.74	2.32	0.02	0.03	0.02	0.03
West of Nehbandan 2 F.	28.40	235.35	Right Lateral	6.8	6.7	9	4	418.66	267.83	34.93	21.58	13.23	9.04	2.37	0.02	0.03	0.03	0.03
Pip F.	116.70	272.29	Reverse and Thrust	7.4	7.4	10	5	892.19	570.76	65.62	43.72	21.37	16.56	4.38	0.02	0.04	0.04	0.04
Dehak F.	53.61	168.21	Reverse and Thrust	7.1	7.0	9	5	588.29	376.35	46.38	29.64	16.41	11.87	4.28	0.03	0.06	0.06	0.06
Halil Rud F.	23.10	322.81	Right Lateral	6.7	6.6	9	4	374.83	239.79	31.86	19.46	12.34	8.28	1.65	0.01	0.02	0.02	0.02
Ahmad Abad F.	27.20	238.98	Reverse and Thrust	6.7	6.7	9	4	409.09	261.71	34.27	21.12	13.04	8.88	2.29	0.02	0.03	0.03	0.03
East Nehbandan F.	166.10	166.25	Right Lateral	7.6	7.6	10	6	1077.78	689.49	76.81	52.15	24.08	19.27	7.74	0.05	0.09	0.08	0.09
Zahedan F.	216.00	4.60	Right Lateral	7.7	7.7	10	12	1240.53	793.61	86.37	59.47	26.33	21.56	45.78	0.59	1.10	1.45	1.45
Kahnow F.	44.20	221.13	Reverse and Thrust	7.0	6.9	9	5	530.53	339.40	42.55	26.92	15.37	10.93	3.13	0.02	0.04	0.04	0.04
Hassan Abad F.	30.95	299.74	Reverse and Thrust	6.8	6.7	9	4	438.38	280.45	36.30	22.52	13.62	9.38	2.04	0.02	0.03	0.02	0.03
Darshir F.	39.50	48.33	Reverse and Thrust	6.9	6.9	9	7	499.54	319.57	40.47	25.44	14.80	10.41	8.57	0.12	0.20	0.24	0.24
Pishmag F.	170.50	323.52	Reverse and Thrust	7.6	7.6	10	5	1092.97	699.21	77.72	52.84	24.30	19.48	4.63	0.02	0.04	0.03	0.04
Karvandar F.	78.90	165.42	Right Lateral	7.3	7.2	9	6	723.51	462.85	55.11	35.95	18.71	14.01	5.29	0.04	0.07	0.07	0.07
Tigh-e Noab F.	31.80	287.90	Reverse and Thrust	6.8	6.8	9	4	444.79	284.55	36.74	22.83	13.75	9.49	2.14	0.02	0.03	0.02	0.03
Narges F.	37.00	321.88	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	4	482.36	308.58	39.31	24.63	14.47	10.13	2.11	0.01	0.03	0.02	0.03
Tamam Deh F.	24.50	249.82	Left Lateral	6.7	6.6	9	4	386.82	247.46	32.70	20.04	12.59	8.49	2.09	0.02	0.03	0.03	0.03
Dahaneh Baghi F.	39.70	93.66	Right Lateral	6.9	6.9	9	6	500.89	320.44	40.56	25.51	14.82	10.44	5.63	0.06	0.11	0.11	0.11
Jebal-e Barez F.	59.30	263.67	Right Lateral	7.1	7.1	9	5	620.93	397.23	48.51	31.17	16.98	12.39	3.17	0.02	0.04	0.03	0.04
Torshab F.	30.00	283.51	Right Lateral	6.8	6.7	9	4	431.13	275.81	35.80	22.18	13.48	9.26	2.10	0.02	0.03	0.02	0.03
Sardab F.	25.30	316.23	Reverse and Thrust	6.7	6.6	9	4	393.54	251.76	33.18	20.37	12.72	8.61	1.76	0.01	0.02	0.02	0.02
Sefidabeh F.	45.37	140.47	Reverse and Thrust	7.0	6.9	9	6	537.98	344.16	43.05	27.27	15.51	11.05	4.50	0.04	0.07	0.07	0.07
Narges F.	44.34	277.78	Reverse and Thrust	7.0	6.9	9	4	531.43	339.97	42.61	26.96	15.39	10.94	2.61	0.02	0.03	0.03	0.03
Mitkan F.	123.00	321.70	Reverse and Thrust	7.5	7.5	10	5	917.66	587.06	67.18	44.89	21.75	16.94	3.93	0.02	0.04	0.03	0.04
Gazidari F.	27.54	282.96	Right Lateral	6.7	6.7	9	4	411.82	263.46	34.46	21.25	13.10	8.92	2.01	0.02	0.03	0.02	0.03
Sartang F.	75.00	291.29	Reverse and Thrust	7.2	7.2	9	5	704.14	450.46	53.87	35.05	18.39	13.71	3.30	0.02	0.04	0.03	0.04
Kuh-e Bazu F.	63.42	316.14	Reverse and Thrust	7.2	7.1	9	4	643.67	411.78	49.99	32.24	17.38	12.76	2.83	0.02	0.03	0.03	0.03
Chah-e Karim Abad F.	17.12	283.09	Right Lateral	6.5	6.4	8	4	319.28	204.26	27.87	16.76	11.15	7.28	1.57	0.01	0.02	0.02	0.02
Barak F.	43.10	283.92	Right Lateral	7.0	6.9	9	4	523.42	334.85	42.08	26.58	15.24	10.81	2.53	0.02	0.03	0.03	0.03
Avaz F.	63.39	319.49	Right Lateral	7.2	7.1	9	4	643.50	411.67	49.98	32.23	17.37	12.75	2.80	0.02	0.03	0.03	0.03
Saheb Dad Khan F.	64.00	53.66	Right Lateral	7.2	7.1	9	7	646.81	413.79	50.19	32.38	17.43	12.81	10.34	0.12	0.21	0.24	0.24
Doparkuh F.	34.35	99.80	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	6	463.52	296.53	38.02	23.73	14.11	9.81	5.00	0.06	0.10	0.10	0.10
Saravan F.	280.50	105.04	Reverse and Thrust	7.9	7.9	10	7	1426.80	912.78	97.04	67.77	28.77	24.12	14.24	0.09	0.17	0.16	0.17
Chehel Kureh F.	57.10	81.39	Right Lateral	7.1	7.1	9	7	608.49	389.27	47.70	30.59	16.77	12.20	7.47	0.08	0.14	0.15	0.15
Dough F.	54.20	306.64	Right Lateral	7.1	7.0	9	4	591.74	378.56	46.61	29.80	16.47	11.93	2.68	0.02	0.03	0.03	0.03
Bandan F.	29.00	176.87	Left Lateral	6.8	6.7	9	5	423.37	270.85	35.26	21.80	13.33	9.12	3.00	0.03	0.05	0.05	0.05
Mamar F.	30.39	146.90	Reverse and Thrust	6.8	6.7	9	5	434.12	277.72	36.00	22.32	13.54	9.31	3.54	0.04	0.06	0.06	0.06
Deh Garm F.	18.50	262.76	Right Lateral	6.6	6.5	8	4	332.81	212.91	28.85	17.42	11.44	7.53	1.74	0.02	0.03	0.02	0.03
Gowk 1 F.	119.13	265.95	Right Lateral	7.5	7.4	10	5	902.08	577.10	66.23	44.17	21.52	16.71	4.51	0.02	0.05	0.04	0.05

Name	Length (Km)	Distance from Zahedan (Km)	Mechanism	M (Slemmons)	Ms (AVG.)	I0 (AVG.)	IR (Ambraseys and Melville)	974.07	623.15	70.60	47.46	22.59	17.77	10.56	0.08	0.15	0.15	0.15
								Ah	Av	Vh	Vv	Dh	Dv					
								(cm/s ²)		(cm/s)		(cm)						
Asagi F.	137.50	95.22	Right Lateral	7.5	7.5	10	7											
Mazarab F.	48.00	115.30	Right Lateral	7.0	7.0	9	6	554.48	354.72	44.15	28.05	15.81	11.32	5.36	0.05	0.09	0.09	0.09
Zahu F.	59.70	253.74	Right Lateral	7.1	7.1	9	5	623.15	398.65	48.66	31.28	17.02	12.43	3.28	0.02	0.04	0.03	0.04
Kuh-e Sahebadd F.	46.60	61.15	Right Lateral	7.0	7.0	9	7	545.76	349.14	43.57	27.64	15.65	11.18	8.10	0.10	0.17	0.19	0.19
Narreh Now F.	54.22	166.28	Right Lateral	7.1	7.0	9	5	591.86	378.63	46.61	29.81	16.48	11.93	4.34	0.04	0.06	0.06	0.06
Gazu F.	55.70	134.89	Reverse and Thrust	7.1	7.0	9	6	600.46	384.13	47.18	30.21	16.63	12.07	5.16	0.05	0.08	0.08	0.08
Daman F.	121.90	149.93	Reverse and Thrust	7.5	7.5	10	6	913.25	584.24	66.91	44.68	21.69	16.88	7.14	0.05	0.09	0.08	0.09
Kajeh F.	55.10	325.04	Reverse and Thrust	7.1	7.0	9	4	596.98	381.91	46.95	30.05	16.57	12.01	2.57	0.02	0.03	0.02	0.03
Nasfandeh F.	16.88	231.82	Right Lateral	6.5	6.4	8	4	316.88	202.72	27.70	16.64	11.09	7.24	1.83	0.02	0.03	0.02	0.03
Nosrat Abad F.	192.00	84.56	Right Lateral	7.7	7.7	10	7	1164.72	745.11	81.94	56.07	25.30	20.50	13.62	0.10	0.19	0.19	0.19
Kuh-e Zar F.ne	36.80	309.38	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	4	480.96	307.69	39.21	24.56	14.45	10.10	2.17	0.02	0.03	0.02	0.03
Karang F.	59.90	315.12	Reverse and Thrust	7.1	7.1	9	4	624.29	399.38	48.73	31.33	17.04	12.45	2.75	0.02	0.03	0.02	0.03
Sayegan F.	50.00	226.07	Reverse and Thrust	7.0	7.0	9	5	566.73	362.56	44.96	28.63	16.03	11.52	3.28	0.02	0.04	0.04	0.04
Chahan F.	15.60	233.42	Reverse and Thrust	6.5	6.4	8	4	303.78	194.34	26.74	16.00	10.80	7.00	1.75	0.02	0.03	0.03	0.03
Mahdaneh F.	23.95	169.10	Reverse and Thrust	6.7	6.6	9	5	382.15	244.48	32.37	19.82	12.49	8.41	2.81	0.03	0.05	0.05	0.05
Lah Kuh Sefid F.	51.32	243.70	Right Lateral	7.0	7.0	9	5	574.72	367.67	45.49	29.00	16.17	11.65	3.13	0.02	0.04	0.04	0.04
Kahurak F.	148.00	108.53	Right Lateral	7.6	7.6	10	7	1013.22	648.19	72.96	49.23	23.16	18.34	10.00	0.07	0.13	0.13	0.13
Kenar F.	272.50	208.45	Reverse and Thrust	7.9	7.9	10	6	1404.87	898.74	95.80	66.79	28.49	23.82	8.39	0.04	0.08	0.07	0.08
Lashar F.	95.40	285.58	Reverse and Thrust	7.3	7.3	10	5	800.93	512.39	59.98	39.53	19.96	15.19	3.79	0.02	0.04	0.03	0.04
Zaboli F.	110.00	322.50	Reverse and Thrust	7.4	7.4	10	5	864.39	552.98	63.91	42.45	20.94	16.15	3.70	0.02	0.03	0.03	0.03
Padaguk F.	52.50	75.90	Right Lateral	7.1	7.0	9	7	581.73	372.15	45.95	29.33	16.30	11.76	7.50	0.08	0.14	0.16	0.16
Qarib Abad F.	27.10	22.74	Reverse and Thrust	6.7	6.7	9	8	408.29	261.20	34.21	21.08	13.02	8.86	10.30	0.18	0.32	0.41	0.41
Sahl Abad F.	74.93	289.48	Right Lateral	7.2	7.2	9	5	703.78	450.23	53.85	35.04	18.39	13.70	3.31	0.02	0.04	0.03	0.04
East of Hosein Abad F.	14.30	212.81	Left Lateral	6.4	6.3	8	4	289.95	185.49	25.72	15.31	10.49	6.74	1.80	0.02	0.03	0.03	0.03
Maskutan F.	26.40	297.69	Reverse and Thrust	6.7	6.7	9	4	402.61	257.56	33.81	20.80	12.91	8.76	1.89	0.01	0.03	0.02	0.03
Kaskin F.	111.80	130.98	Reverse and Thrust	7.4	7.4	10	6	871.93	557.80	64.38	42.79	21.06	16.26	7.55	0.06	0.10	0.10	0.10
Rapar Kuh F.	20.94	121.40	Right Lateral	6.6	6.5	8	5	355.64	227.51	30.49	18.53	11.93	7.94	3.36	0.04	0.07	0.07	0.07
Dasht Kuh F.	34.70	183.19	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	5	466.06	298.16	38.20	23.85	14.16	9.85	3.20	0.03	0.05	0.05	0.05
Shahdad 2 F.	132.97	261.86	Reverse and Thrust	7.5	7.5	10	5	956.76	612.07	69.56	46.67	22.33	17.52	4.83	0.03	0.05	0.04	0.05
Mirjaveh F.	86.70	7.52	Reverse and Thrust	7.3	7.3	10	10	760.96	486.81	57.47	37.69	19.32	14.58	26.31	0.41	0.74	0.99	0.99
Bandan F.	23.80	185.72	Left Lateral	6.7	6.6	9	5	380.87	243.65	32.28	19.75	12.46	8.38	2.61	0.03	0.04	0.04	0.04
Estin F.	17.28	206.90	Right Lateral	6.5	6.4	8	4	320.88	205.28	27.99	16.83	11.18	7.31	2.03	0.02	0.03	0.03	0.03
Kuharud F.	16.13	313.74	Reverse and Thrust	6.5	6.4	8	3	309.26	197.84	27.14	16.26	10.92	7.10	1.40	0.01	0.02	0.02	0.02
Bonza F.	33.40	318.99	Reverse and Thrust	6.8	6.8	9	4	456.63	292.12	37.55	23.40	13.98	9.69	2.02	0.01	0.02	0.02	0.02
Heidar Abad F.	21.88	181.82	Right Lateral	6.6	6.6	8	5	364.10	232.93	31.09	18.94	12.11	8.09	2.54	0.03	0.04	0.04	0.04
Padgan F.	71.90	318.11	Reverse and Thrust	7.2	7.2	9	4	688.40	440.39	52.87	34.32	18.13	13.46	3.00	0.02	0.03	0.03	0.03
Bam F.	112.00	242.03	Right Lateral	7.4	7.4	10	5	872.77	558.34	64.43	42.83	21.07	16.27	4.71	0.03	0.05	0.04	0.05
Bog F.	35.50	29.66	Reverse and Thrust	6.9	6.8	9	8	471.79	301.82	38.59	24.12	14.27	9.95	10.51	0.17	0.29	0.36	0.36
Kuh-e Rud F.	109.00	123.45	Reverse and Thrust	7.4	7.4	10	6	860.17	550.28	63.65	42.26	20.88	16.09	7.78	0.06	0.11	0.10	0.11
Bandan F.	47.70	183.10	Left Lateral	7.0	7.0	9	5	552.62	353.53	44.02	27.96	15.78	11.29	3.77	0.03	0.05	0.05	0.05
Bam Posht F.	193.60	196.37	Reverse and Thrust	7.7	7.7	10	6	1169.91	748.43	82.25	56.30	25.37	20.57	7.37	0.04	0.07	0.07	0.07
West of Nehbandan 1 F.	166.00	102.59	Right Lateral	7.6	7.6	10	7	1077.43	689.27	76.79	52.14	24.08	19.26	11.05	0.08	0.15	0.15	0.15
Chagai Volcanic Arc and Calc Alkaline Mag. Belt	156.82	33.44	Thrust	7.6	7.6	10	9	1045.11	668.60	74.87	50.68	23.62	18.80	21.33	0.22	0.41	0.48	0.48

شد. سپس داده‌های گسل‌ها و Fishnet تهیه‌شده در نرم‌افزار Arcview وارد شده و در این نرم‌افزار فاصله هر گسل تا مرکز هر یک از سلول‌ها مشخص گردیده است. داده‌های اکسل به‌دست‌آمده و داده‌های از پیش موجود (توان لرزه‌زایی گسل‌ها) مرتب و به فرمت دلخواه تبدیل شده است و در نرم‌افزار GIS نقشه هم شتاب با استفاده از ابزار IDW تهیه گردید (شکل ۷).

۶- پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه

در ابتدا گسل‌های فعال منطقه با طول بیشتر از ۱۰ کیلومتر از نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای استخراج و توان لرزه‌زایی برای این گسل‌ها محاسبه شده است. این گسل‌ها در نرم‌افزار GIS پردازش و از اکستنشن Fishnet برای شبکه‌بندی منطقه استفاده



شکل ۷. نقشه هم شتاب شرق ایران به همراه گسل‌های فعال منطقه.

می‌آید که توانایی بالقوه گسل‌ها در آزادسازی انرژی الاستیکی ذخیره‌شده در آن‌ها را آشکار می‌کند. طول گسل، شیب گسل و نرخ لغزش از جمله ویژگی‌های هندسی موردنیاز جهت محاسبه گشتاور زمین‌شناختی است (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی قابل‌دسترس (از سایت ISC) برای زمین‌لرزه‌های مختلف با استفاده از روابط مربوطه به دست می‌آید که نرخ این گشتاور انرژی آزادشده در هنگام رخداد زمین‌لرزه را مشخص می‌کند.

۷-۱- برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای در منطقه مورد مطالعه

برای محاسبه نرخ گشتاور لرزه‌ای از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های روی‌داده در منطقه استفاده شده است.

۷-۲- بررسی نرخ گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش برای بررسی جنبایی و توان لرزه‌خیزی گسل‌های موجود در منطقه، از داده‌های بدست‌آمده از محاسبه نرخ گشتاور زمین‌شناختی و لرزه‌ای استفاده شده است. با محاسبه و مقایسه این گشتاورها می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین انرژی تجمع یافته و آزادشده مربوط به کدام بخش از منطقه و مرتبط با فعالیت کدام گسل و به چه مقدار است. همچنین می‌توان مناطقی با پتانسیل لرزه‌خیزی بالاتر را که احتمال خطر لرزه‌ای در آینده در آن‌ها بیشتر است را شناسایی کرد. برای بدست آوردن این گشتاورها از روش‌های زیر استفاده شده است. نرخ گشتاور زمین‌شناختی با استفاده از ویژگی‌های هندسی گسل‌ها به دست



روابطی که در اینجا استفاده شده‌اند عبارت‌اند از:

رابطه بر پایه M_B (جانستون، ۱۹۹۶):

$$\log(M_0/N_m) = 11.28 + 0.679M_b + 0.077M_b^2 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

رابطه بر پایه M_S (هنکس و کاناموری، ۱۹۷۹):

$$\log(M_0/N_m) = 9.05 + 1.5M_S \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

رابطه بر پایه M_W (کاناموری، ۱۹۷۷):

$$M_W = 2/3 \log(M_0/N_m) - 6 \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

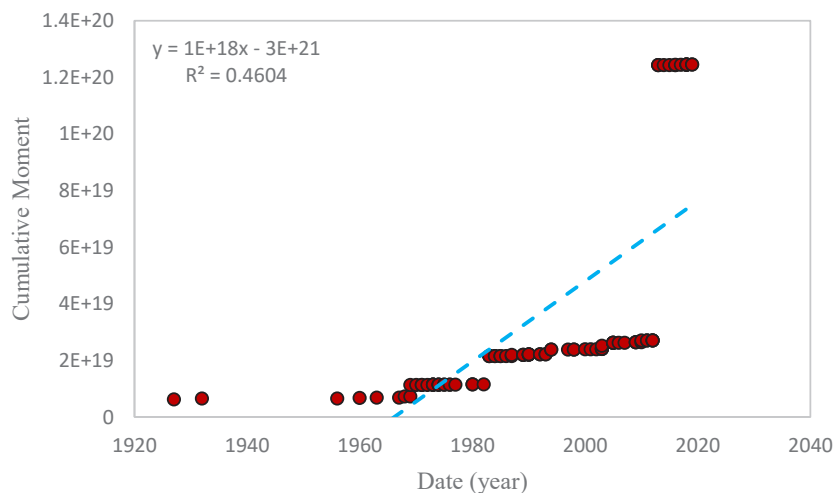
در این پژوهش، از زمین لرزه‌هایی با بزرگی بالاتر از ۴ برای اندازه‌گیری نرخ گشتاور لرزه‌ای (برای منطقه مورد مطالعه) استفاده شده است. با استفاده از روابط گفته‌شده برای برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، مقدار گشتاور لرزه‌ای برای ۴۰۹ زمین لرزه (بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) روی داده در منطقه مورد مطالعه به دست آمده است. برای تبدیل گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور می‌توان از روش ترسیم نمودار گشتاور تجمعی در برابر سال‌های موجود در کاتالوگ و اندازه‌گیری شیب خط که نشان دهند مقدار نرخ گشتاور است (پانچا و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده شده است و نتیجه آن در شکل ۸ و جدول ۷ ارائه شده است.

زمین لرزه‌های مورد استفاده از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ از سایت مرکز لرزه‌نگاری جهانی (ISC) تهیه شده است. با استفاده از روابط تجربی می‌توان گشتاور لرزه‌ای را در منطقه تعیین کرد. گشتاور لرزه‌ای که از این طریق به دست می‌آید، تنها مؤلفه لرزه‌ای دگربختی را نشان می‌دهد. در این روش پتانسیل لرزه‌ای در نزدیکی مکان‌هایی که در آنجا زمین لرزه رخ داده است متمرکز می‌شود. این روش به دلیل اینکه گسل‌های پنهان و پوشیده را هم بازتاب می‌دهد، تفکیک فضایی برابر یا حتی بیشتری نسبت به روش زمین‌شناختی دارد. از ایرادات این روش می‌توان به محدودیت زمانی نمونه‌گیری اشاره کرد و اینکه اگر در طی یک کاتالوگ، زمین لرزه‌ای روی یک ساختار رخ نداده باشد، ساختار ناشناخته باقی می‌ماند. با توجه به روابط تجربی موجود میان بزرگی‌های مختلف (M_S , M_B , M_L) و M_W و گشتاور لرزه‌ای اسکالر، گشتاور لرزه‌ای برای هر زمین لرزه به دست آمده است.

رابطه کلی میان گشتاور و بزرگی به صورت زیر است

(هنکس و کاناموری، ۱۹۷۹):

$$\log M_0 = Cm + d \quad (\text{رابطه ۱۵})$$



شکل ۸. نرخ گشتاور لرزه‌ای منطقه.

جدول ۷. نرخ گشتاور لرزه‌ای در منطقه مورد بررسی.

واحد	مقدار گشتاور لرزه‌ای	منطقه
Nm/yr	$1/4166 \times 10^{18}$	شرق ایران

مورد مطالعه است.

با توجه به ژرفای کانون زمین‌لرزه‌ها می‌توان بیشترین ژرفایی را که تغییر شکل به‌صورت شکننده رخ می‌دهد و ستبرای لایه لرزه‌زا است، تعیین کرد. ستبرای لایه لرزه‌زا در محدوده مورد مطالعه با توجه به مطالعات جکسون و مکنزی (۱۹۸۸)، ظریفی و همکاران (۲۰۱۴) و مینز (۱۹۷۶) و همچنین ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌های روی‌داده، مقدار میانگین ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ضریب برش برای سنگ‌های موجود در پوسته زمین $3 \times 10^{10} \text{ N.m}^{-2}$ است. در جدول ۸ نرخ گشتاور زمین‌شناسی به همراه مقادیر نرخ لغزش گسل‌ها و دیگر متغیرها آورده شده است. در جدول ۹ مقدار نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای محدوده مورد مطالعه آمده است.

۲-۲- نرخ گشتاور زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه

نرخ گشتاور زمین‌شناسی نشان‌دهنده میزان توانایی گسل‌های منطقه در فعالیت‌های زمین‌ساختی و زمین‌لرزه‌ای را آشکار می‌کند. برای برآورد نرخ گشتاور زمین‌شناسی در یک منطقه باید داده‌های زمین‌شناسی کافی در مورد گسل‌های منطقه وجود داشته باشد. برای به دست آوردن نرخ گشتاور زمین‌شناسی به داده‌هایی همچون طول، شیب و نرخ لغزش گسل و ستبرای لایه لرزه‌زا منطقه نیاز است. نرخ گشتاور زمین‌شناسی از رابطه زیر به دست می‌آید (وارد، ۱۹۹۸):

$$\dot{M} = \mu \sum (L_i H_s \dot{S}_i / \cos \delta_i) \quad (\text{رابطه } 30)$$

که در آن μ ضریب برشی، L_i طول گسل، S نرخ لغزش گسل، δ_i شیب گسل و H_s ستبرای لایه لرزه‌زا منطقه

جدول ۸. اطلاعات گسل‌های مورد استفاده در محاسبه نرخ گشتاور زمین‌شناسی.

Fault Name	μ (N.m^{-2})	Length (Km)	Hs (Km)	Slip Rate (Mm/Year)	Dip Fault (Degree)	M (Nm/yr)
Nosrat Abad	3×10^{10}	192	15	5	75	1.66912e+18
Sefidabeh F.	3×10^{10}	45.366	15	1.5	45	4.33061e+16
East Nehbandan F.	3×10^{10}	166.1	15	2.7	70	5.90057e+17
Gowk 1 F.	3×10^{10}	119.13	15	3.8	50	3.1692e+17
Asagi F.	3×10^{10}	137.5	15	2.5	30	1.78618e+17
West Of Nehbandan	3×10^{10}	166	15	2.3	80	9.89414e+17
Zahedan F.	3×10^{10}	216	15	1.5	85	1.67287e+18
Kuharud F.	3×10^{10}	16.13	15	5	78	1.74557e+17
Saravan F.	3×10^{10}	239	15	2.7	55	5.06271e+17
Jazmurian F.	3×10^{10}	42.4	15	0.38	43	9.91367e+15
Lashar F.	3×10^{10}	95.4	15	15	65	1.52372e+18
Esmacil Abad F.	3×10^{10}	66.59	15	0.4	85	1.37526e+17
Bam	3×10^{10}	101	15	2	80	5.23472e+17
Sabzevaran	3×10^{10}	212	15	5.7	78	2.61544e+18
Shahdad	3×10^{10}	75	15	2	8	2.70165e+17

جدول ۹. نرخ گشتاور زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی.

واحد	مقدار گشتاور زمین‌شناسی	منطقه
Nm/yr	$1/1019 \times 10^{19}$	شرق ایران

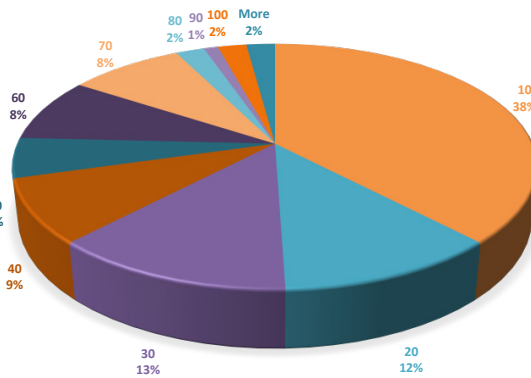
با توجه به مطالعه انجام گرفته در این پروژه مشخص گردید که بزرگای زمین‌لرزه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند. علاوه بر این بیشترین شتاب افقی محتمل برای محدود مورد مطالعاتی 0.747423 برابر شتاب ثقل زمین و ناشی از فعالیت گسل زاهدان با توان لرزه‌زایی حدود $7/7$ ریشتر است. بیشترین گشتاور لرزه‌ای یا انرژی آزاد شده در منطقه مورد بررسی برابر با $9/7283 \times 10^{19}$ است که مربوط به زمین‌لرزه $7/3$ ریشتری سال ۲۰۱۳ بوده که گسل مسبب آن گسل سراوان است. با توجه به شکل

۸- بحث و نتایج

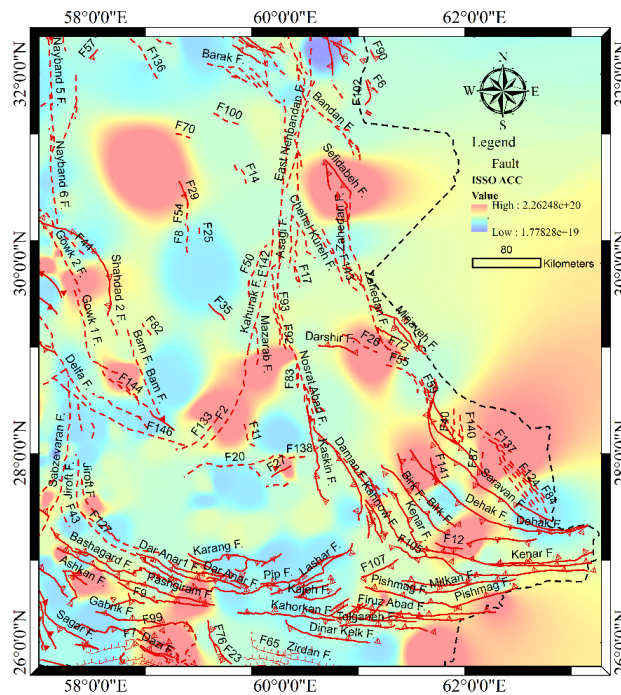
با توجه به مطالعه انجام گرفته زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد بررسی در اعماق کمتر از ۱۰ کیلومتر دارای بیشترین فراوانی (۳۸٪) هستند (شکل ۹). زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ به ترتیب دارای دوره بازگشت حدود ۴، ۸، ۱۷، ۳۵، ۷۲ و ۱۵۸ سال هستند؛ همچنین برای بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در پهنه مورد بررسی ($M_s=7/3$)، دوره بازگشت حدود ۵۱۸ سال تخمین زده شده است.

مستقیمی با نرخ لغزش آن‌ها دارد. برای نمونه، گسل باختر سبزواران با نرخ لغزش بالا در منطقه، بالاترین میزان نرخ گشتاور زمین‌شناسی برابر با $۲/۶۱۵۴۴ \times ۱۰^{۱۸}$ را نشان می‌دهند. دیگر گسل‌های منطقه نیز مانند لشر، نصرت‌آباد و زاهدان نرخ گشتاور زمین‌شناسی بالایی دارند.

۱۰ بیشترین مقادیر گشتاور لرزه‌ای تجمعی در مجاورت سیستم‌های گسلی سراوان، بزم پشت، آساگی، پیشگیران زاهدان و گوک است. لازم به ذکر است که بیشترین گشتاور لرزه‌ای تجمعی ($۲/۲۶۲۴۸ \times ۱۰^{۲۰}$) مشاهده شده در مجاورت گسل سراوان مشاهده می‌شود. مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای بیشتر گسل‌های منطقه ارتباط



شکل ۹. نمودار دایره‌ای فراوانی عمق‌های زمین‌لرزه‌های رخ داده در شرق ایران.



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی گشتاور لرزه‌ای تجمعی منطقه مورد مطالعه بر پایه پهنه‌بندی انجام‌شده و مقادیر گشتاور لرزه‌ای به دست آمده.

۶/۵ به ترتیب دارای دوره بازگشت حدود ۴، ۸، ۱۷، ۳۵، ۷۲ و ۱۵۸ سال هستند؛ همچنین برای بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در محدوده مورد بررسی ($MS=۷/۳$)، دوره بازگشت حدود ۵۱۸ سال تخمین زده شده است. با توجه به اینکه ریسک وقوع زمین‌لرزه‌ها در ۱۰۰

۹- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش مقادیر a ، b به ترتیب برابر $۰/۶۴۹۷$ و $۲/۰۲۳۶$ است که توان لرزه‌ای منطقه با b نسبت معکوس و با a رابطه مستقیم دارد و زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و



Byrne, D. E., Sykes, L. R., & Davis, D. M. (1992). Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 97(B1), 449–478.

Ešteva, L., (1970). Seismic risk and seismic design. Ed, R.J. Hansen, *Seismic design for Nuclear Power Plants*. The M.I.T. Press, Pp 142-182.

Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1942. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological society of America*, 32(3), pp.163-191

Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). *Bulletin of the seismological society of America*, 46(2), pp.105-145

Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), pp.2348-2350.

Jackson, J. and McKenzie, D., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal International*, 93(1), pp.45-73.

Jackson, J., & McKenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77(1), 185–264.

Jackson, J., Haines, J., & Holt, W. (1995). The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8).

Johnston, A.C., 1996. Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions—III. New Madrid 1811–1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophysical Journal International*, 126(2), pp.314-344.

Kanamori, H., 1977. Seismic and aseismic

سال آینده با بزرگای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ به ترتیب برحسب درصد برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ۹۹/۷۴، ۹۴/۰۴، ۷۵/۰۵ و ۴۶/۸۳ است، برای بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در منطقه مورد بررسی ($M_s=7/3$)، ریسک وقوع مجدد در ۱۰۰ سال آینده برابر ۱۷/۵۷٪ محاسبه شده است.

ضریب DBE که به عنوان زمین لرزه مبنای طرح و سازه تعریف می شود برای عمرهای مفید ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ به ترتیب ۵/۷، ۶/۲، ۶/۴، ۶/۶ است و ضریب MCE که بیشینه زمین لرزه باور کردنی است برای عمرهای مفید ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ به ترتیب ۷/۲، ۷/۷، ۶/۴، ۶/۶ است.

با توجه به نقشه همشتاب بدست آمده مقادیر متوسط و حداکثر شتاب ($0/747423$) در اطراف گسل‌های مهم از جمله سراوان، بم پشت، آساگی، پیشگیرام زاهدان و گوک مشاهده گردید. همچنین نتایج نرخ گشتاور لرزه ای که بیانگر میزان انرژی آزاد شده در هنگام زمین لرزه است و از طریق کاتالوگ لرزه ای می آید در پهنه مورد مطالعه برابر با $10^{18} \times 1/4166$ است. بیشترین مقدار نرخ گشتاور زمین شناسی که پتانسیل گسل ها را در آزاد سازی انرژی الاستیک ذخیره شده در سنگ های پوسته را نشان می دهد در منطقه مورد مطالعه برابر است با $10^{18} \times 2/61544$ که مرتبط با گسل سبزواران است و کمترین مقدار مرتبط با جازموریان است که برابر $10^{15} \times 9/91367$ است. بنابراین بیشترین شتاب و گشتاور لرزه ای در منطقه متأثر از برخورد گسل های امتداد لغز شمالی-جنوبی به گسل های تراستی شمال غربی-جنوب شرقی است. همچنین گسل هایی که گشتاور زمین شناسی بالایی از خود نشان می دهند اما گشتاور لرزه ای متوسط تا پایین دارند بیانگر تجمع تنش و افزایش سطح خطر لرزه ای است.

منابع

رشیدی، احمد، خطیب، جمور، یحیی، موسوی، سیدمرتضی و نعمتی، ۲۰۱۷. برآورد پارامترهای دینامیکی زمین لرزه‌ها و نرخ گشتاور ژئودتیک در جنوب و باختر بلوک لوت، خاور ایران. پژوهشهای دانش زمین، ۸(۳۰)، صص ۳۴-۱۹.

Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982- A History of Persian earthquakes. Cambridge University Press, Cambridge.

- relation of seismoscope response with earthquake magnitude and Modified Mercalli Intensity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(2), pp.307-321.
- Walker, R., Jackson, J. and Baker, C., 2004. Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 157(1), pp.265-282.
- Ward, S.N., 1998. On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States. *Geophysical Journal International*, 134(1), pp.172-186.
- Zarifi, Z. (2007). Unusual subduction zones: case studies in Colombia and Iran.
- Zarifi, Z., Nilfouroushan, F. and Raeesi, M., 2014. Crustal stress map of Iran: insight from seismic and geodetic computations. *Pure and Applied Geophysics*, 171, pp.1219-1236.
- slip along subduction zones and their tectonic implications. *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins*, 1, pp.163-174.
- McGuire, R.K., 1974. Seismic structural response risk analysis, incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance. Report R74-51, Structures Publication, (399).
- Means, W.D. (1976). *Stress And Strain: Basic Concepts Of Continuum Mechanics for geologists*. Springer, New York.
- Nowroozi, A.A. and Ahmadi, G., 1986. Analysis of earthquake risk in Iran based on seismotectonic provinces. *Tectonophysics*, 122(1-2), pp.89-114.
- Pancha, A., Anderson, J.G. and Kreemer, C., 2006. Comparison of seismic and geodetic scalar moment rates across the Basin and Range Province. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), pp.11-32.
- Rowshandel, B. and Nemat-Nasser, S., 1978. A tentative study of seismic risk in Iran. Department of Civil Engineering, Northwestern University.
- Saccani, E., Delavari, M., Dolati, A., Marroni, M., Pandolfi, L., Chiari, M., & Barbero, E. (2017). New insights into the geodynamics of Neo-Tethys in the Makran area: Evidence from age and petrology of ophiolites from the Coloured Mélange Complex (SE Iran).
- Slemmons, D.B. and McKinney, R., 1977. Definition of "active Fault". Department of Defense, Department of the Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J., & Camp, V. E. (1983). The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1), 134-150.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G., 1975. On cor-