

بر آورد جنبایی گسل‌های فعال در جنوب و باختر بلوک لوت بر پایه گشتاورهای زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودتیک

احمد رشیدی^{۱*}، محمدمهدی خطیب^۲، سیدمرتضی موسوی^۳ و یحیی جمور^۴

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۴دانشیار، آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه‌برداری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۶

چکیده

در منطقه جنوب و باختر بلوک لوت، نرخ گشتاور ژئودتیک بیشتر از نرخ گشتاور لرزه‌ای و زمین‌شناسی است. بر پایه نوع دگرشکلی و هندسه گسل‌ها، منطقه مورد مطالعه به چهار بخش شمالی، مرکزی، جنوبی و جنوب خاوری (جنوب بلوک لوت) تقسیم‌بندی شد. در این مناطق، مقادیر به دست آمده از هر سه نوع نرخ گشتاور با همدیگر مقایسه شدند. بیشترین مقدار نرخ گشتاور ژئودتیک به ترتیب در بخش شمالی، مرکزی، جنوبی، جنوب خاوری به دست آمد. مقادیر نرخ گشتاور ژئودتیک در بخش شمالی: $2.28E+18 \text{ Nm.yr}$ ، بخش مرکزی: $1.86E+18 \text{ Nm.yr}$ ، بخش جنوبی: $1.20E+18 \text{ Nm.yr}$ و بخش جنوب خاوری: $1.10E+18 \text{ Nm.yr}$ است. بیشترین مقدار نرخ گشتاور لرزه‌ای به ترتیب در بخش مرکزی، جنوب خاوری، جنوبی، شمالی به دست آمد. مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای در بخش مرکزی: $5.62316E+17 \text{ Nm.yr}$ ، جنوب خاوری: $2.05331E+17 \text{ Nm.yr}$ ، جنوبی: $1.18984E+17 \text{ Nm.yr}$ و شمالی: $1.03408E+17 \text{ Nm.yr}$ است. بر پایه پهنه‌بندی گشتاور لرزه‌ای صورت گرفته، بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای به ترتیب در امتداد گسل‌های گوک، شهداد، داوران، خاور کرمان، ماهان، بم، کوهناب، داهوئیه و شمال فاریاب است که همه آنها مسبب زمین‌لرزه‌های بزرگ در منطقه مورد مطالعه بوده‌اند. بیشترین مقدار نرخ گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب در بخش جنوبی، شمالی، مرکزی و جنوب خاوری به دست آمد. مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای بخش جنوبی $4.16246E+15 \text{ Nm.yr}$ ، بخش شمالی $2.74157E+15 \text{ Nm.yr}$ ، بخش مرکزی $2.5895E+15 \text{ Nm.yr}$ و بخش جنوب خاوری $1.08894E+15 \text{ Nm.yr}$ است. در منطقه مورد مطالعه بیشترین نرخ گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب مرتبط با گسل باختر سبزواران، جیرفت، راور، دلفراد، کوهناب، نایبندان، بم، گوک و داوران است. با توجه به مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی و ژئودتیک در بخش‌های چهارگانه منطقه مورد بررسی و آزاد شدن بیشترین انرژی لرزه‌ای در بخش‌های مرکزی و جنوب خاوری، به نظر می‌رسد، در آینده بیشترین احتمال رخداد لرزه‌ای و آزاد شدن ناگهانی انرژی به ترتیب مرتبط باشد با بخش‌های شمالی، جنوبی، مرکزی، جنوب خاوری. بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای یا به عبارتی انرژی آزاد شده در منطقه (بر پایه سال‌های موجود در کاتالوگ لرزه‌ای) عبارتند از: سال ۱۹۸۱، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۵. در منطقه مطالعاتی، نسبت نرخ گشتاور ژئودتیک به نرخ گشتاور لرزه‌ای بیش از ۷/۹ به دست آمد. این نسبت بیانگر نقش مهم دگرشکلی میان‌لرزه‌ای در منطقه است. بر پایه نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به ژئودتیک می‌توان به این نتیجه رسید که بخش شمالی و جنوبی به ترتیب با نسبت بیش از ۰/۴ و ۰/۹ جزو مناطق با واکنش کند و بخش مرکزی و بخش جنوب خاوری به ترتیب با نسبت ۰/۳۰ و ۰/۱۸ جزء مناطق با واکنش به نسبت سریع هستند. نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای زمین‌لرزه‌های دستگاهی ۰/۹۳ درصد است. این مقدار نشان‌دهنده این است که ۰/۹۳ درصد از انرژی پتانسیل گسل‌های منطقه به‌صورت انرژی لرزه‌ای در طی سال‌های موجود در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای (از سال ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۵) آزاد شده و هنوز بخش زیادی از انرژی الاستیکی موجود در منطقه آزاد نشده است و منطقه پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارد.

کلیدواژه‌ها: انرژی لرزه‌ای، دگرشکلی میان‌لرزه‌ای، جنوب و باختر بلوک لوت، گشتاور لرزه‌ای، نرخ گشتاور.

*نویسنده مسئول: احمد رشیدی

E-mail: arashidi@birjand.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

گستره مورد بررسی میان عرض جغرافیایی 29° تا 33° شمالی و طول جغرافیایی 56° تا 30° $30' 58''$ خاوری (بخش باختر بلوک لوت) و همچنین در 28° تا 29° شمالی و 56° تا 30° $30' 58''$ خاوری (بخش جنوب و جنوب باختر بلوک لوت) قرار گرفته است (شکل ۱-الف). سامانه گسل امتداد لغز روی لبه باختری و جنوب باختری بلوک لوت، از سه سامانه گسلی تشکیل شده است (شکل ۱-ب). سامانه گسل نایبند در شمال، گوک در میانه و سبزواران در جنوب. انتهای شمالی این سامانه گسلی با گسل‌های راندگی طیس در مجاورت کوه‌های شتری و انتهای جنوبی آن در کوه‌های مکران به پایان می‌پذیرد (Walker and Jackson, 2004).

جابه‌جایی امتداد لغز راست‌گرد در امتداد سامانه گسل نایبندان حدود ۱۵ کیلومتر (Walker et al., 2003)، سامانه گسل گوک حدود ۱۲ کیلومتر (Walker et al., 2003) و بر روی سامانه گسل سبزواران بیش از ۷ کیلومتر (در این مطالعه) اندازه‌گیری شده است. نرخ لغزش (بر پایه شواهد زمین‌شناسی) در طی کواترن پستین (late Quaternary) بر روی گسل نایبندان حدود $1.8 \pm 0.7 \text{ mm/y}$ (Foroutan et al., 2014)، بر روی گسل گوک حدود $3.8 \pm 0.7 \text{ mm/y}$ (Walker et al., 2010) و بر روی گسل سبزواران حدود $5.7 \pm 1.7 \text{ mm/y}$

۲- موقعیت زمین‌شناسی و ساختاری منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی آقنابتی (۱۳۸۵) بخشی از بلوک لوت و ایران مرکزی (زیرپهنه‌های بلوک طیس، بلوک پشت بادام، کمان ماگمایی تیس جوان و کمان ماگمایی مکران) است که دربرگیرنده واحدهای زمین‌شناختی با سن مختلف است و تاکنون متأثر از بسیاری رخداد‌های زمین‌ساختی بوده است.

۴- روش انجام کار

به کمک عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری و ۱:۵۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح و به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و مطالعه تصاویر ماهواره‌ای گوگل (کویک‌برد با تفکیک مکانی مختلف)، تصاویر توپوگرافی، لندست RGB و دیگر تصاویر ماهواره‌ای در طی عملیات صحرایی نقشه‌ساختاری گسل‌های جنبای منطقه به دست آمد.

برای تعیین جنبایی و توان لرزه‌خیزی گسل‌های موجود در منطقه، از داده‌های حاصل از محاسبه انواع نرخ گشتاور (زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودتیک) استفاده شد. در این روش می‌توان به بررسی انرژی پرداخت و به این نتیجه رسید که بیشترین انرژی تجمع یافته و آزاد شده مربوط به کدام بخش منطقه و مرتبط با فعالیت کدام گسل و به چه مقدار است و اینکه کدام بخش منطقه پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارد و احتمال خطر لرزه‌ای و آزاد شدن انرژی در آینده در آن بیشتر است.

برای تعیین نرخ گشتاور سه روش وجود دارد؛ زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودتیک. مقایسه این سه روش می‌تواند الگوهای متفاوتی از فعالیت‌های زمین‌ساختی و چگونگی آزاد شدن انرژی را در منطقه آشکار کند.

برای تعیین گشتاور ژئودتیک از بردارهای سرعت به دست آمده برای هر ایستگاه اندازه‌گیری سامانه تعیین موقعیت جهانی استفاده شد که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور به صورت دائمی و موقت کار گذاشته شده است. با استفاده از ایستگاه‌های موجود، شبکه‌بندی ژئودینامیکی منطقه انجام و بر پایه روابط مربوط به آن، نرخ گشتاور ژئودتیک به دست آمد.

نرخ گشتاور زمین‌شناختی با استفاده از ویژگی‌های هندسی گسل‌ها به دست می‌آید. این نرخ گشتاور توانایی بالقوه گسل‌ها در آزاد ساختن انرژی الاستیکی ذخیره شده در آنها را آشکار می‌کند. طول گسل، شیب گسل و نرخ لغزش از جمله ویژگی‌های هندسی است که باید به دست آورده می‌شود. بنابراین در ابتدای کار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای موجود و مطالعات پیشین انجام شده، به گردآوری داده‌های موجود پرداخته شد. در این مطالعه، ویژگی‌های هندسی بسیاری از گسل‌های منطقه شناسایی شد که داده‌های آنها موجود نبود. نرخ لغزش که از مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی در روابط محاسبه نرخ گشتاور زمین‌شناسی است؛ با مطالعات زیادی در این پژوهش همراه بود.

نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی قابل دسترس (از سایت پژوهشکده لرزه‌شناسی و مهندسی زمین‌لرزه، دانشگاه هاروارد (Centroid Moment Tensor) و مرکز لرزه‌نگاری بین‌المللی (International Seismological Centre)) برای زمین‌لرزه‌های مختلف با استفاده از روابط مربوطه به دست آمد.

گشتاور لرزه‌ای بهترین روش اندازه‌گیری انرژی آزاد شده در هنگام رویداد زمین‌لرزه است. در حالت کلی دو روش برای به دست آوردن گشتاور لرزه‌ای وجود دارد: ۱) تحلیل ویژگی‌های موج لرزه‌ای که از لرزه‌نگار به دست می‌آید؛ ۲) اندازه‌گیری ابعاد لغزشی گسل در صحرا که این روش را بیشتر می‌توان برای زمین‌لرزه‌هایی استفاده کرد که در گذشته رخ داده‌اند.

گشتاور لرزه‌ای چون گسل‌های مدفون و پوشیده را هم بازتاب می‌دهد، تفکیک فضایی برابر یا حتی بهتری نسبت به روش زمین‌شناختی و ژئودتیک دارد. از مشکلات و موانعی که این روش دارد؛ می‌توان به محدودیت زمانی نمونه‌گیری اشاره کرد و اینکه اگر در طی یک کاتالوگ، زمین‌لرزه‌ای روی یک ساختار روی نداده باشد؛ ساختار ناشناخته باقی می‌ماند. همچنین نبود داده‌های لرزه‌ای کافی در منطقه می‌تواند در نتایج حاصل مؤثر باشد. بنابراین استفاده از هر سه روش گشتاور (لرزه‌ای، زمین‌شناختی، ژئودتیک) برای برآورد میزان جنبایی گسل‌ها و آزادسازی انرژی اهمیت دارد.

در این منطقه از زمان‌های گذشته تاکنون، هر ساله به دلیل عملکرد گسل‌های فعال زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ رخ داده است. برآورد میزان جنبایی این گسل‌ها، دارای اهمیت زیادی در محاسبه مخاطرات لرزه‌خیزی است. این برآورد، تابع متغیرهایی مانند گشتاورهای لرزه‌ای، زمین‌شناختی و ژئودتیک است. رابطه میان انواع گشتاورها و میزان جنبایی بر پایه زمین‌لرزه‌های گذشته و همچنین حرکات تدریجی در پوسته زمین، ابزار مناسبی برای این مطالعات است. با توجه به شواهد تاریخی و دستگاهی مبنی بر زمین‌لرزه‌های مخرب در محدوده مورد مطالعه، لزوم شناخت مناطق پرخطر زمین‌لرزه با محاسبه گشتاورهای زمین‌شناختی، لرزه‌ای و ژئودتیک امری ضروری است که در این نوشتار به آن پرداخته می‌شود.

در منطقه مورد مطالعه هیچ گونه پژوهشی در ارتباط با موضوع پژوهش صورت نگرفته است. از مطالعاتی که پیرامون این موضوع در ایران و دیگر مناطق جهان صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

اسدی سرشار و همکاران (۱۳۸۹) نرخ‌های گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناختی و ژئودتیک البرز مرکزی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بخش‌های شمالی البرز مرکزی پتانسیل لرزه‌خیزی بالاتری دارند. خرمی و همکاران (۱۳۹۰) زمین‌ساخت جنبای را در منطقه البرز، با استفاده از مشاهدات GPS مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که آهنگ کرنش به سوی نواحی جنوب و جنوب باختری پهنه البرز کاهش می‌یابد. طالبیان (۱۳۹۱) گشتاورهای لرزه‌ای، ژئودتیک و زمین‌شناختی در البرز خاوری و کپه‌داغ را به دست آورد و آنها را با هم مقایسه کرد. وی در مطالعه خود به این نتیجه رسید که در منطقه البرز خاوری و کپه‌داغ می‌توان با اطمینان از نتایج حاصل از مقایسه گشتاورها در برآورد خطر زمین‌لرزه استفاده کرد. جمور و همکاران (۱۳۹۱) برآورد آهنگ GPS حرکات زمین‌ساخت نوار شمالی تهران را با نگرشی ویژه به گسل شمال تهران مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که بخش خاوری نوار شمالی تهران از بخش باختری آن کمی فعال‌تر است که با نتایج مطالعات زمین‌شناسی هم‌مخوانی دارد. تکامل ساختاری در شمال Aegean با استفاده از مقایسه داده‌های ژئودتیک، لرزه‌ای و زمین‌شناختی توسط Kreemer et al. (2004) بررسی شده است. آنها همچنین تکامل نرخ کرنش سه‌بعدی را با استفاده از شواهد GPS و شواهد ژئودتیکی برای منطقه Aegean به دست آوردند. مقایسه گشتاورهای لرزه‌ای و ژئودتیک بر پایه فعالیت‌های لرزه‌ای در یک دوره ۶۰ ساله در Long Valley Caldera در کالیفرنیا توسط Newman et al. (2001) بررسی شده است. آنها به کمک نتایج خود رفتار پوسته را از دید لرزه‌خیزی مطالعه کردند. پتانسیل لرزه‌ای در ایتالیا با استفاده از محاسبه و مقایسه نرخ‌های کرنش ژئودتیک و لرزه‌ای توسط Angelica et al. (2013) به دست آمده است. آنها در این مطالعه، با استفاده از محاسبات خود منطقه را از دید لرزه‌خیزی بررسی و مناطق با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا را مشخص کردند.

۳- مفهوم گشتاور

در دینامیک دورانی، گشتاور نیرویی است که مقدار حرکت زاویه‌ای یک سامانه را تغییر می‌دهد و به صورت حاصل ضرب نیرو در فاصله از مرکز چرخش بیان می‌شود. دیمانسیون یا ابعاد فیزیکی، گشتاور نیرو \times فاصله است و برحسب واحدهای اصلی سامانه متریک به صورت ML^2T^{-2} یا $M \cdot L \cdot T$ به ترتیب ابعاد فیزیکی جرم، طول و زمان هستند) بیان می‌شود. واحد گشتاور در سامانه متریک (SI)، نیوتن متر (Nm) یا ژول (J) و در سامانه cgs، دین سانتی‌متر (dyne-cm) است. هر dyne-cm برابر 10^{-7} ژول یا Nm است. گشتاور از دید واحد اندازه‌گیری و ابعاد فیزیکی معادل کار و انرژی است؛ بنابراین با اندازه‌گیری گشتاور می‌توان مقدار انرژی را در یک سامانه تعیین کرد. دو نیرو مساوی و در خلاف سوی یکدیگر نیز سبب ایجاد گشتاور می‌شوند. زمین‌لرزه‌ها نیز به وسیله زوج نیروهای داخلی و از تأثیر رودرروی بلوک‌های زمین در دو سوی سطح گسل ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر وقتی زمین‌لرزه‌ای روی می‌دهد؛ گسل خوردگی ایجاد می‌شود که عامل ایجاد آن یک نیروی برشی یا دو نیروی مساوی و در خلاف جهت هم هستند که زوج نیرو نامیده می‌شوند.

۵- محاسبه نرخ گشتاور ژئودینامیک در منطقه مورد مطالعه

روش‌های ژئودزی یک رابطه کمی میان لرزه‌شناسی تاریخی، زمین‌شناسی ساختمانی، دیرینه لرزه‌شناسی و مدل‌سازی تغییر شکل به وجود می‌آورد. ژئودزی به دلیل قابلیت استفاده در مناطق گسترده و در مناطق دارای گسل‌های ناشناخته و نهفته بسیار مورد توجه است. طراحی شبکه ژئودینامیک سراسری ایران از سال ۱۳۸۳ آغاز شده است. این طرح سترگ و بسیار با ارزش می‌تواند گامی مهم در شناخت بهتر تغییر شکل زمین‌ساختی و کاهش بلایای طبیعی در کشور و نیز ارتقای سطح علمی آن به شمار رود.

نرخ گشتاور ژئودینامیک که بر پایه تانسور نرخ و انتش به دست آمده از بردارهای سرعت ایستگاه‌های GPS تعیین می‌شود؛ نمایانگر میزان دگرشکلی میان‌لرزه‌ای (Interseismic) است که در حال حاضر در منطقه رخ می‌دهد. بنابراین با استفاده از بردارهای سرعت به دست آمده برای هر ایستگاه GPS می‌توان به تانسور نرخ و انتش (که نشان‌دهنده میزان تغییر شکل است) دست یافت و با توجه به رابطه ۱، نرخ گشتاور ژئودینامیک را به دست آورد.

رابطه میان تانسور نرخ و انتش و نرخ گشتاور ژئودینامیک در زیر آورده شده است (Ward, 1998):

$$\dot{M} = \mu A H_s \dot{\epsilon} = (1/T) \sum_{n=1}^m M_n \quad (1)$$

میانگین نرخ و انتش حجمی به صورت خطی با مجموع تانسور گشتاور لرزه‌ای M_n برابر است. در فرمول بالا \dot{M} نرخ گشتاور ژئودینامیک، M_n تانسور گشتاور لرزه‌ای، $\dot{\epsilon}$ تانسور نرخ و انتش، μ ضریب صلیب لایه الاستیک، A مساحت شبکه و H_s ستبرای لرزه‌ای است که و انتش الاستیک در آن جمع و در هنگام زمین‌لرزه آزاد می‌شود. T نیز تعداد سال‌های مشاهدات ژئودینامیکی سرعت ایستگاه‌هاست. با مقادیر معلوم یا مفروض A ، H_s و μ و محاسبه تانسور نرخ و انتش ($\dot{\epsilon}$) می‌توان پتانسیل لرزه‌خیزی را درون شبکه‌های ژئودینامیکی منطقه تعیین کرد.

بر پایه ایستگاه‌های موجود در منطقه، شبکه‌بندی ژئودینامیکی انجام شد (شکل ۲). سعی شد با توجه به هندسه گسل‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه و چگونگی پراکندگی ایستگاه‌ها، بهترین شبکه‌بندی انجام شود. به دلیل کم بودن ایستگاه‌های GPS و متعادل نبودن پراکندگی آنها مثلث‌ها کاملاً همگن به دست نیامدند. به کمک ایستگاه‌های موجود ۲۱ مثلث رسم شد و نرخ گشتاور ژئودینامیک برای این مثلث‌ها به دست آمد. با توجه به این شبکه‌بندی که در آن همه جوانب در نظر گرفته شده است؛ منطقه مورد مطالعه به چهار بخش: شمالی، میانی، جنوبی و جنوب‌خاوری تقسیم‌بندی شد.

طبق رابطه ۱ برای محاسبه نرخ گشتاور ژئودینامیک برای هر مثلث، به بزرگ‌ترین مقدار ویژه تانسور و انتش نیاز است. در ابتدا ماتریس نرخ و انتش به کمک بردارهای سرعت حرکت (بر پایه روش Finite Element) برای هر مثلث نوشته می‌شود و سپس بزرگ‌ترین مقدار ویژه این تانسور به دست می‌آید. برای بالا بردن دقت برای محاسبه تانسورهای نوشته شده از نرم‌افزار مطلب کمک گرفته شد. در جدول ۱ بزرگ‌ترین مقدار ویژه هر تانسور و نرخ گشتاور ژئودینامیک به همراه دیگر متغیرهای مورد نیاز آورده شده است.

نرخ گشتاور ژئودینامیک برای بخش شمالی منطقه (بر پایه مثلث‌های ۱ تا ۶) $1.86E+18 \text{ Nm.yr}$ ، برای بخش میانی منطقه (بر پایه مثلث‌های ۷ تا ۱۴) $1.20E+18 \text{ Nm.yr}$ و برای جنوب منطقه مورد مطالعه (بر پایه مثلث‌های ۱۵ تا ۱۹) $1.20E+18 \text{ Nm.yr}$ و برای بخش جنوب‌خاور منطقه (بر پایه مثلث‌های ۲۰ و ۲۱) $1.10E+18 \text{ Nm.yr}$ به دست آمد (جدول ۲).

طبق محاسبات انجام شده، بیشترین مقدار نرخ گشتاور ژئودینامیک به ترتیب در بخش شمالی، مرکزی، جنوبی و جنوب‌خاوری به دست آمد. این محاسبات همخوانی قابل قبولی با توزیع فراوانی و بزرگی زمین‌لرزه‌هایی دارد که در دهه‌های اخیر در منطقه روی داده است. مقدار نرخ گشتاور ژئودینامیک برای کل منطقه مورد مطالعه $6.44E+18 \text{ Nm.yr}$ به دست آمد.

۶- محاسبه نرخ گشتاور لرزه‌ای در منطقه مورد مطالعه

برای محاسبه نرخ گشتاور لرزه‌ای به کاتالوگ زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه نیاز است. زمین‌لرزه‌های مورد استفاده از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۳ از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، از سال ۱۹۲۳ تا ۲۰۰۶ از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زمین‌لرزه‌شناسی و مهندسی زمین‌لرزه ایران که بر پایه M_L است و از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران که بر پایه M_N و کامل‌ترین مرجع برای دریافت زمین‌لرزه‌های ایران از سال ۲۰۰۶ است؛ گرفته شد. در پایان پس از انجام تصحیحات لازم بر روی زمین‌لرزه‌های دریافت شده، در مجموع ۶۴۸۴ زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۲ دریافت شد که تنها ۵۴۹ تا از آنها بزرگ‌تر از ۴ بودند.

با استفاده از روابط تجربی می‌توان گشتاور لرزه‌ای را در منطقه تعیین کرد. گشتاور لرزه‌ای که به این روش به دست می‌آید؛ تنها مؤلفه لرزه‌ای تغییر شکل را نشان می‌دهد. این روش به دلیل اینکه گسل‌های مدفون و پوشیده را هم بازتاب می‌دهد؛ تفکیک فضایی برابر یا حتی بهتری نسبت به روش زمین‌شناختی دارد. همچنین در این روش پتانسیل زمین‌لرزه‌ای در نزدیکی مکان‌هایی متمرکز می‌شود که در آنجا زمین‌لرزه رخ داده است. از مشکلات و موانعی که این روش دارد می‌توان به محدودیت زمانی نمونه‌گیری اشاره کرد و اینکه اگر در طی یک کاتالوگ، زمین‌لرزه‌ای روی یک ساختار رخ نداده باشد؛ ساختار ناشناخته باقی می‌ماند. بنابراین محاسبه نرخ گشتاور ژئودینامیک و زمین‌شناسی در کنار این داده‌ها برای تحلیل پایانی لازم است.

با توجه به روابط تجربی موجود میان بزرگ‌های مختلف (M_w, M_s, m_b, M_L) و گشتاور لرزه‌ای اسکالر، گشتاور لرزه‌ای برای هر زمین‌لرزه به دست آمد.

رابطه کلی میان گشتاور و بزرگ‌ها به صورت زیر است:

$$\text{Log} M_0 = C_m + d \quad (2)$$

روابطی که در اینجا استفاده شده اند عبارتند از:

$$\text{رابطه بر پایه } m_b \text{ (Jahnston, 1996)}$$

$$\text{Log}(M_0/N_m) = 11.28 + 0.679m_b + 0.077m_b^2 \quad (3)$$

$$\text{رابطه بر پایه } M_s \text{ (Hanks and Kanamori, 1979)}$$

$$\text{Log}(M_0/N_m) = 9.05 + 1.5M_s \quad (4)$$

$$\text{رابطه بر پایه } M_w \text{ (Kanamori, 1977)}$$

$$M_w = 2/3 \text{ Log}(M_0/(N_m)) - 6 \quad (5)$$

M_N برای بزرگ‌های میان ۳/۵ تا ۶ تقریباً مقداری برابر با M_L به دست می‌دهد. به طوری که فرض $M_N = M_L$ برای بزرگ‌های ۳/۵ تا ۶ برای کل ایران فرضی منطقی است (رضاپور، ۱۳۸۲). برای بزرگ‌های M_L نیز با توجه به این موضوع که در مقادیر بزرگ‌ها تا مقدار حدود $M_w, M_s = 6$ عموماً با M_L و M_b برابر است (Heaton et al., 1986)؛ می‌توان بزرگ‌های محلی و بزرگ‌های گشتاور را نیز معادل یکدیگر گرفت و از روابطی که برای بزرگ‌های گشتاوری وجود دارد؛ برای بزرگ‌های محلی نیز استفاده کرد.

برای دانستن اینکه در منطقه مورد مطالعه زمین‌لرزه‌های بالاتر از چه مقدار برای به دست آوردن نرخ گشتاور لرزه‌ای استفاده شود؛ به صورت جداگانه همبستگی زمین‌لرزه‌های بالاتر از ۴، ۵ و ۶ برای کل منطقه به دست آمد. در هر سه مورد مقدار همبستگی بالاتر از ۷ به دست آمد؛ که مقداری واقعی و قابل قبول است. بنابراین برای انجام محاسبات دقیق، زمین‌لرزه‌های بالاتر از ۴ ملاکی برای اندازه‌گیری نرخ گشتاور لرزه‌ای (برای منطقه مورد مطالعه) در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط گفته شده برای برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، مقدار گشتاور لرزه‌ای برای ۵۴۹ زمین‌لرزه روی داده در منطقه به دست آمد.

برای تبدیل گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور می‌توان از چندین روش استفاده کرد:

۱) رسم نمودار گشتاور تجمعی در برابر سال‌های موجود در کاتالوگ و اندازه‌گیری شیب خط که نشان‌دهنده مقدار نرخ گشتاور است (Pancha et al., 2006).

۲) به دست آوردن نرخ گشتاور با میانگین‌گیری زمین‌لرزه‌های موجود در کاتالوگ یا به عبارتی تقسیم مجموع گشتاور زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه بر تعداد سال‌های موجود در کاتالوگ (Ward, 1998).

۸- نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌های تاریخی موجود در منطقه

۶ زمین لرزه تاریخی از سال ۱۲۳۳ تا سال ۱۷۷۶ در بخش شمالی و مرکزی منطقه مورد مطالعه گزارش شده است (Ambraseys and Melville, 1982). در بخش‌های جنوبی و جنوب خاوری منطقه، زمین لرزه تاریخی گزارش نشده است. در جدول ۷ ویژگی‌های زمین لرزه‌های تاریخی آورده شده است.

۹- نرخ گشتاور لرزه‌ای برای کل منطقه مورد مطالعه

نرخ گشتاور به دست آمده برای کل منطقه مورد مطالعه برای زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴، ۵ و ۶ به وسیله هر دو روش رسم نمودار گشتاور تجمعی در برابر سال‌های موجود در کاتالوگ و میانگین‌گیری زمین لرزه‌های موجود در کاتالوگ به دست آمد. مقادیر به دست آمده در جدول ۹ آورده شده است.

۱۰- محاسبه نرخ گشتاور زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه

نرخ گشتاور زمین‌شناسی میزان توانایی گسل‌های منطقه را در فعالیت‌های زمین‌ساختی و زمین لرزه‌ای نشان می‌دهد. برای برآورد نرخ گشتاور زمین‌شناسی دقیق در یک منطقه باید داده‌های زمین‌شناسی کافی در مورد گسل‌های منطقه وجود داشته باشد. البته باید در نظر گرفت که در هیچ‌کجای دنیا داده‌های زمین‌شناسی کافی و دقیق در مورد گسل‌ها وجود ندارد و با توجه به اینکه برخی گسل‌ها ناشناخته یا مدفون در ژرفا هستند؛ به‌طور معمول امکان برآورد دقیق نرخ گشتاور زمین‌شناسی وجود ندارد و این امر موجب بروز اختلافاتی نسبت به دو روش لرزه‌ای و ژئودتیک می‌شود که طبیعی است. اما به هر حال برآورد نرخ گشتاور زمین‌شناسی نسبت به دو روش دیگر برتری‌هایی دارد که عبارتند از:

(۱) پتانسیل لرزه‌ای که بر این اساس به دست می‌آید؛ نزدیک گسل‌های شناخته شده قرار می‌گیرد.

(۲) با روش‌های قدیمی تحلیل خطر لرزه‌ای تطابق خوبی نشان می‌دهد.

(۳) این روش محدوده زمانی بسیار طولانی‌تری از تاریخچه زمین‌شناسی را شامل می‌شود و محدودیت زمانی روش‌های لرزه‌ای و ژئودتیک را ندارد.

برای به دست آوردن نرخ گشتاور زمین‌شناسی به داده‌هایی همچون طول، شیب و نرخ لغزش گسل و ستبرای لایه لرزه‌ها منطقه نیاز است. نرخ گشتاور زمین‌شناسی از رابطه ۶ به دست می‌آید (Ward, 1998):

$$\dot{M} = \mu \Sigma (L_i H_i S_i / \cos \delta_i) \quad (6)$$

که در آن μ ضریب برشی، L_i طول گسل، S_i نرخ لغزش گسل، δ_i شیب گسل و H_i ستبرای لایه لرزه‌های منطقه مورد مطالعه است. با توجه به ژرفای کانون زمین لرزه‌ها می‌توان بیشترین ژرفایی را که تغییر شکل به‌صورت شکننده رخ می‌دهد و ستبرای لایه لرزه‌ها است؛ تعیین کرد. ستبرای لایه لرزه‌ها در محدوده مورد مطالعه با توجه به ژرفای کانونی زمین لرزه‌های روی داده مقدار میانگین ۱۵ کیلومتر است. ضریب برش برای سنگ‌های موجود در پوسته زمین $3 \times 10^{10} \text{ Nm}^2$ یا $3 \times 10^{11} \text{ dyneCm}^2$ است. اگر پهنای فروشیبی (Down dip fault) هر یک از گسل‌ها به‌صورت مجزا مشخص باشد؛ می‌توان از رابطه ۷ نیز برای تعیین نرخ گشتاور زمین‌شناسی استفاده کرد:

$$\dot{M} = \mu \Sigma (L_i S_i W_i^{DD}) \quad (7)$$

W^{DD} پهنای فروشیبی گسل است. پهنای فروشیبی گسیختگی در یک منطقه از پراکنندگی ژرفی پس لرزه‌ها برآورد می‌شود؛ در غیر این صورت از ستبرای منطقه لرزه‌ها یا ژرفای کانون ژرفی زمین لرزه‌ها و شیب صفحه گسلی که همان رابطه ۶ است، به دست می‌آید. از آنجا که داده‌های مناسبی از پس لرزه‌ها برای همه گسل‌های فعال در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد؛ در این مطالعه از رابطه ۶ برای تعیین گشتاور زمین‌شناسی کمک گرفته شد.

از جمله متغیرهایی که در تعیین نرخ گشتاور زمین‌شناسی نیاز به مطالعه زیادی داشت شیب گسل‌ها و تعیین نرخ لغزش گسل‌های موجود در منطقه بود که در طی عملیات صحرایی و مطالعه منابع مختلف به دست آمد. نرخ لغزش شماری از گسل‌ها

همان‌طور که گفته شد زمین لرزه‌های بالاتر از ۴ روی داده در منطقه برای اندازه‌گیری گشتاور لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در ادامه نرخ گشتاور لرزه‌ای برای بخش‌های شمالی، میانی، جنوبی و جنوب خاوری منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

۶-۱. نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌ها با بزرگای بالاتر از ۴ برای بخش شمالی منطقه مورد مطالعه

از ۱۹۳۰ میلادی تاکنون بر پایه کاتالوگ زمین لرزه‌های تهیه شده، ۱۲۳ زمین لرزه بزرگ‌تر از ۴ در این بخش از منطقه قرار می‌گیرد. با توجه به روابط گفته شده نرخ گشتاور لرزه‌ای به وسیله هر دو روش رسم نمودار گشتاور تجمعی و روش میانگین‌گیری به دست آمد که نتایج آن در جدول ۳ و شکل ۳ آورده شده است.

۶-۲. نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌ها با بزرگای بالاتر از ۴ برای بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه

از سال ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۵ میلادی بر پایه کاتالوگ لرزه‌ای، ۱۵۳ زمین لرزه بزرگ‌تر از ۴ در این بخش از منطقه قرار می‌گیرد. بر پایه روابط گفته شده نرخ گشتاور لرزه‌ای در این منطقه بر پایه دو روش گفته شده به دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۴ آورده شده است.

۶-۳. نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌ها با بزرگای بالاتر از ۴ برای بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه

از سال ۱۹۵۰ میلادی تا ۲۰۱۵ بر پایه کاتالوگ لرزه‌ای، ۲۱۳ زمین لرزه بزرگ‌تر از ۴ در این بخش از منطقه قرار می‌گیرد. با توجه به روابط گفته شده نرخ گشتاور لرزه‌ای در این منطقه بر پایه دو روش گفته شده به دست آمد که نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۵ آورده شده است.

۶-۴. نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌ها با بزرگای بالاتر از ۴ برای بخش جنوب خاور منطقه مورد مطالعه

از سال حدود ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۵ میلادی در بخش جنوب خاور منطقه مورد مطالعه (جنوب بلوک لوت) ۶۰ زمین لرزه بزرگ‌تر از ۴ روی داده است. با توجه به زمین لرزه‌های روی داده در منطقه، نرخ گشتاور لرزه‌ای به دست آمده و در جدول ۶ و شکل ۶ آورده شده است.

نرخ گشتاور لرزه‌ای در طی سال‌های ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۵ میلادی به ترتیب در بخش‌های مرکزی، جنوب خاوری، جنوبی و شمالی بیشترین مقدار را دارد.

۷- پهنه‌بندی گشتاور لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه

در منطقه مورد مطالعه بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای در طی سال‌های ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۵ میلادی به ترتیب مربوط به بخش‌های مرکزی، جنوب خاوری، شمالی و جنوبی بوده است. بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای یا به عبارتی انرژی آزاد شده در منطقه (برپایه سال‌های موجود در کاتالوگ لرزه‌ای) عبارتند از: ۱۹۸۱ مقدار $3.73479E+19 \text{ Nm}$ ، ۱۹۹۸ مقدار $8.60273E+18 \text{ Nm}$ ، ۲۰۰۳ مقدار $5.75762E+18 \text{ Nm}$ ، ۲۰۱۰ مقدار $5.74095E+18 \text{ Nm}$ ، ۲۰۱۱ مقدار $5.62341E+18 \text{ Nm}$ ، ۱۹۹۹ مقدار $4.44559E+18 \text{ Nm}$ و ۲۰۰۵ مقدار $4.13174E+18 \text{ Nm}$ (شکل ۷).

پهنه‌بندی تغییرات گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌های روی داده در منطقه در شکل ۸ آورده شده است. روی این نقشه، گسل‌های منطقه نیز نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود؛ بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای آزاد شده روی گسل‌های بخش مرکزی از جمله گسل گوک، داوران، ماهان، راین، بردسیر متمرکز شده است. پس از آن بیشترین گشتاور لرزه‌ای در بخش جنوب خاوری دیده می‌شود که در ارتباط با گسل‌های بم و کهورک است. پس از بخش جنوب خاوری، بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای مربوط به بخش شمالی منطقه و بیشترین انرژی آزاد شده در اثر فعالیت گسل‌های جورجافک و کوهبنان و گره گسلی شهادت است. در پایان گشتاور لرزه‌ای آزاد شده در بخش جنوبی دیده می‌شود که بیشتر مرتبط با گسل شمال فاریاب و پهنه‌های گسلی میان گسل شمال فاریاب و گسل اسفندقه (چاه مزرعه) است.

جنوبی $1.18984E+17$ و شمالی $1.03408E+17$ است. بر پایه پهنه‌بندی گشتاور لرزه‌ای صورت گرفته، بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای به ترتیب در امتداد گسل‌های گوک، راندگی‌های شهداد، گسل داوران، خاور کرمان، ماهان، بم، کوهبنان، داهویی و شمال فاریاب بوده است که همه آنها مسبب زمین‌لرزه‌های بزرگ در منطقه مورد مطالعه بوده‌اند. گسل‌های دیگر حتی با نرخ لغزش بالا مانند گسل سبزواران و نایبندان سهم کمتری در گشتاور لرزه‌ای داشته‌اند.

نرخ گشتاور زمین‌شناسی شامل دگرشکلی لرزه‌ای و غیرلرزه‌ای در یک بازه زمانی بسیار طولانی‌تر نسبت به دو روش دیگر است؛ بیشترین مقدار نرخ گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب در بخش‌های جنوبی، شمالی، مرکزی، جنوب خاوری به دست آمد. مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای بخش‌های جنوبی $4.16246E+15$ Nm.yr، شمالی $2.74157E+15$ Nm.yr، مرکزی $2.5895E+15$ Nm.yr و جنوب باختری $1.08894E+15$ Nm.yr است. نرخ گشتاور زمین‌شناسی، پتانسیل گسل‌ها برای آزاد کردن انرژی الاستیکی ذخیره شده در سنگ‌های پوسته زمین را نشان می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه بیشترین نرخ گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب مرتبط با گسل باخترسبزواران ($1.37042E+15$ Nm.yr)، جیرفت ($1.0296E+15$ Nm.yr)، راور ($9.46139E+14$ Nm.yr)، دلفارد ($9.17697E+14$ Nm.yr)، کوهبنان ($5.53951E+14$ Nm.yr)، نایبندان ($5.47488E+14$ Nm.yr)، بم ($5.35512E+14$ Nm.yr)، گوک ($3.95646E+14$ Nm.yr) و داوران ($3.11358E+14$ Nm.yr) است. دیگر گسل‌ها سهم کمتری در آزاد کردن انرژی دارند. در جدول ۱۰ مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای همه گسل‌های شناخته شده منطقه آورده شده است.

با توجه به مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی و ژئودتیک در بخش‌های چهارگانه منطقه مورد بررسی و آزاد شدن بیشترین انرژی لرزه‌ای در بخش‌های مرکزی و جنوب خاوری، به نظر می‌رسد که پتانسیل لرزه‌خیزی حال حاضر و احتمال خطر لرزه‌ای و آزاد شدن انرژی در آینده به ترتیب در بخش‌های شمالی بیشتر از جنوبی، مرکزی و جنوب خاوری است.

بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای یا به عبارتی انرژی آزاد شده در منطقه (بر پایه سال‌های موجود در کاتالوگ لرزه‌ای) عبارتند از: ۱۹۸۱ مقدار $3.73479E+19$ Nm، ۱۹۹۸ مقدار $8.60273E+18$ Nm، ۲۰۰۳ مقدار $5.75762E+18$ Nm، ۲۰۱۰ مقدار $5.74095E+18$ Nm، ۲۰۱۱ مقدار $5.62341E+18$ Nm، ۱۹۹۹ مقدار $4.44559E+18$ Nm و ۲۰۰۵ مقدار $4.13174E+18$ Nm.

با توجه به اینکه تأثیر زمین‌لرزه‌های رخ داده بر روی داده‌های ژئودتیک لندف شده‌اند؛ نرخ گشتاور ژئودتیک شامل دگرشکلی میان‌لرزه‌ای (Interseis-mic) است. در منطقه مطالعاتی بیشترین نرخ گشتاور، نرخ گشتاور ژئودتیک است؛ بنابراین در این منطقه دگرشکلی میان‌لرزه‌ای بیشتر از دگرشکلی لرزه‌ای رخ می‌دهد.

نسبت نرخ گشتاور ژئودتیک به نرخ گشتاور لرزه‌ای بیش از ۷/۹ به دست آمد. این نسبت بیانگر نقش مهم دگرشکلی میان‌لرزه‌ای در منطقه است. به عبارتی دگرشکلی میان‌لرزه‌ای ۷/۹ برابر بیشتر از دگرشکلی لرزه‌ای در این منطقه است.

دگرشکلی میان‌لرزه‌ای پیش از حال حاضر را می‌توان در امتداد گسل‌های نایبندان، سبزواران، دلفارد، جبال‌بارز و شماری دیگر از گسل‌های منطقه دنبال کرد. با وجود جابه‌جایی و برخاستگی‌های قابل تأمل در امتداد این گسل‌ها، زمین‌لرزه بزرگی که مسبب آن باشند؛ رخ نداده است.

نسبت نرخ گشتاور ژئودتیک به زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه بسیار بالاست (بیش از ۶۰۸/۵ برابر). یکی از دلایل این اختلاف می‌تواند مربوط به دوره‌ای بودن فعالیت‌های زمین‌شناسی باشد. به این معنا که مناطق مختلف در دوره‌های زمانی گوناگون در شرایط متفاوتی از فعالیت‌های زمین‌ساختی قرار دارند. در دوره‌ای ممکن است در اوج فعالیت‌ها و در دوره‌ای دیگر در پایین‌ترین سطح و یا در میان این دو باشند. بنابراین بسته به هر مرحله از فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه، این

که به دست نیامده بود؛ با استفاده از داده‌های GPS با دقت بالا به دست آمد. برای شماری از گسل‌های فرعی‌تر موجود در منطقه تعیین نرخ لغزش با استفاده از داده‌های GPS امکان نداشت.

در جدول ۱۰ نرخ گشتاور زمین‌شناسی به همراه نرخ لغزش گسل‌ها و دیگر متغیرها مورد نیاز برای محاسبه آورده شده است.

برای بخش شمالی منطقه مورد مطالعه با توجه به گسل‌های باغین، بهاباد، داوران، جورجافک، کوهبنان، لکرکوه، نایبندان و راور، نرخ گشتاور زمین‌شناسی $2.74157E+15$ Nm.yr برآورد شد. در بخش میانی منطقه با در نظر گرفتن گسل‌های بم، باغین، بردسیر، دلفارد، دازین، شرق ابارق، شرق کرمان، گوک، لاله‌زار، ماهان، نسک، راین، ساردوییه (سریزان)، شهداد و سیرج، این مقدار برابر $2.5895E+15$ Nm.yr به دست آمد. برای بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه با توجه به گسل‌های آب‌باد، انجیرک، بم، چاه مزرعه (اسفندقه)، دلفارد، ده‌سرد، دهنو، خاور سبزواران، حجت‌آباد، جبال‌بارز، جیرفت، شمال فاریاب، سورو و باختر سبزواران، مقدار نرخ گشتاور زمین‌شناسی $4.16246E+15$ Nm.yr تعیین شد. برای بخش جنوب خاور منطقه مورد مطالعه (یا به عبارتی جنوب پهنه لوت) نیز با توجه به گسل‌های بم، جبال‌بارز، جنوب کهورک، گبران و شندق، مقدار نرخ گشتاور زمین‌شناسی $1.08894E+15$ Nm.yr به دست آمد.

بنابراین بیشترین میزان نرخ گشتاور زمین‌شناسی (به عبارتی انرژی ذخیره شده) مربوط به بخش جنوبی و کمترین میزان آن مربوط به جنوب خاور منطقه مورد مطالعه (جنوب پهنه لوت) است (جدول ۱۱). به‌طور کلی بیشترین میزان نرخ گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب مربوط به بخش‌های جنوبی، شمالی، مرکزی و جنوب خاوری است. میزان نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای کل منطقه مقدار $1.05825E+16$ Nm.yr به دست آمد.

مقادیر نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای بیشتر گسل‌های منطقه ارتباط مستقیمی با نرخ لغزش آنها دارد. برای نمونه، گسل باختر سبزواران و گسل جیرفت با بیشترین نرخ لغزش در منطقه، بالاترین میزان نرخ گشتاور زمین‌شناسی را نشان می‌دهند. دیگر گسل‌های منطقه نیز مانند دلفارد، کوهبنان، گوک و بم نرخ لغزش و نرخ گشتاور زمین‌شناسی بالایی دارند. این گسل‌ها مسبب زمین‌لرزه‌های بسیاری در منطقه بوده‌اند. در جدول ۱۰ مقادیر نرخ لغزش گسل‌ها به همراه نرخ گشتاور زمین‌شناسی آنها آورده شده است.

۱۱- نتیجه‌گیری

در منطقه مورد بررسی، نرخ گشتاور ژئودتیک بیشتر از نرخ گشتاور لرزه‌ای و زمین‌ساختی است. نرخ گشتاور ژئودتیک، لرزه‌ای و زمین‌ساختی برای کل منطقه مورد مطالعه به ترتیب عبارتند از: $8.1204E+17$ Nm.yr، $6.44E+18$ Nm.yr و $1.05825E+16$ Nm.yr.

با توجه به سازوکار متفاوت زمین‌لرزه‌های رخ داده، متفاوت بودن نوع دگرشکلی و هندسه گسل‌ها، منطقه مورد مطالعه به چهار بخش شمالی، مرکزی، جنوبی و جنوب خاوری (جنوب بلوک لوت) تقسیم‌بندی و مقادیر هر سه نوع نرخ گشتاور در این مناطق با همدیگر مقایسه شد.

بیشترین مقدار نرخ گشتاور ژئودتیک به ترتیب در بخش‌های شمالی، مرکزی، جنوبی و جنوب خاوری به دست آمد. مقادیر نرخ گشتاور ژئودتیک در بخش شمالی $2.28E+18$ Nm.yr، در بخش مرکزی $1.86E+18$ Nm.yr، در بخش جنوبی $1.20E+18$ Nm.yr و در بخش جنوب خاوری $1.10E+18$ Nm.yr است.

نرخ گشتاور لرزه‌ای که تنها مؤلفه لرزه‌ای دگرشکلی را در طی سال‌های موجود در کاتالوگ و در یک بازه زمانی میان‌مدت بر روی گسل‌های آشکار و پنهان نمایان می‌کند؛ به ترتیب در بخش‌های شمالی، جنوبی، جنوب خاوری، مرکزی بیشتر می‌باشد. مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه روش میانگین‌گیری گشتاورهای لرزه‌ای، در بخش‌های: مرکزی $5.62316E+17$ Nm.yr، جنوب خاوری $2.05331E+17$ Nm.yr.

۰/۹۳ درصد است. این مقدار نشان‌دهنده این است که ۰/۹۳ درصد از انرژی پتانسیل گسل‌های منطقه به‌صورت انرژی لرزه‌ای در طی سال‌های موجود در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای (از سال ۱۹۱۱ تا ۲۰۱۵) آزاد شده و هنوز بخش بزرگی از انرژی الاستیکی موجود در منطقه آزاد نشده است و منطقه پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارد.

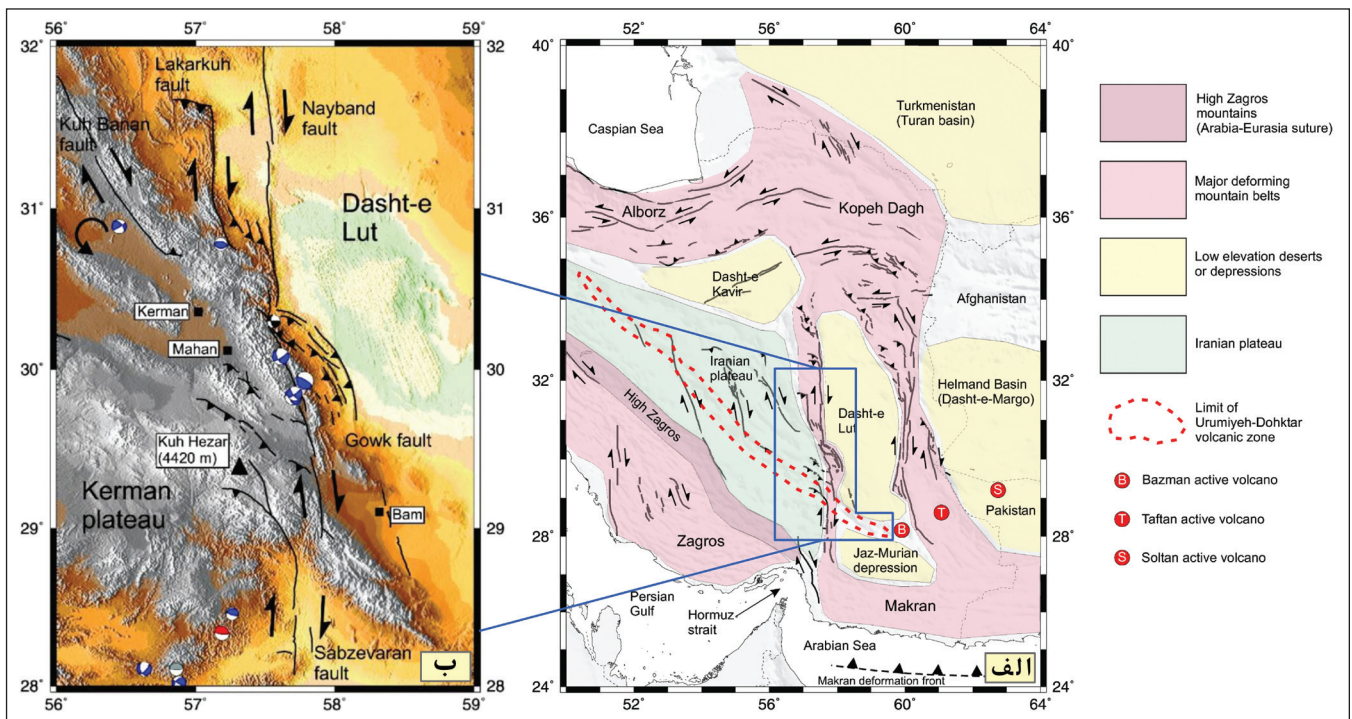
سیاسگزاری

از خانم دکتر زهرا موسوی (عضو هیئت علمی دانشگاه زنجان)، خانم مهندس مریم اسدی‌سرشار (دانشجوی دکترای دانشگاه شیراز) و خانم Walpersdorf (از دانشگاه Joseph Fourier فرانسه) که در این پژوهش ما را یاری کردند؛ سیاسگزاری می‌شود.

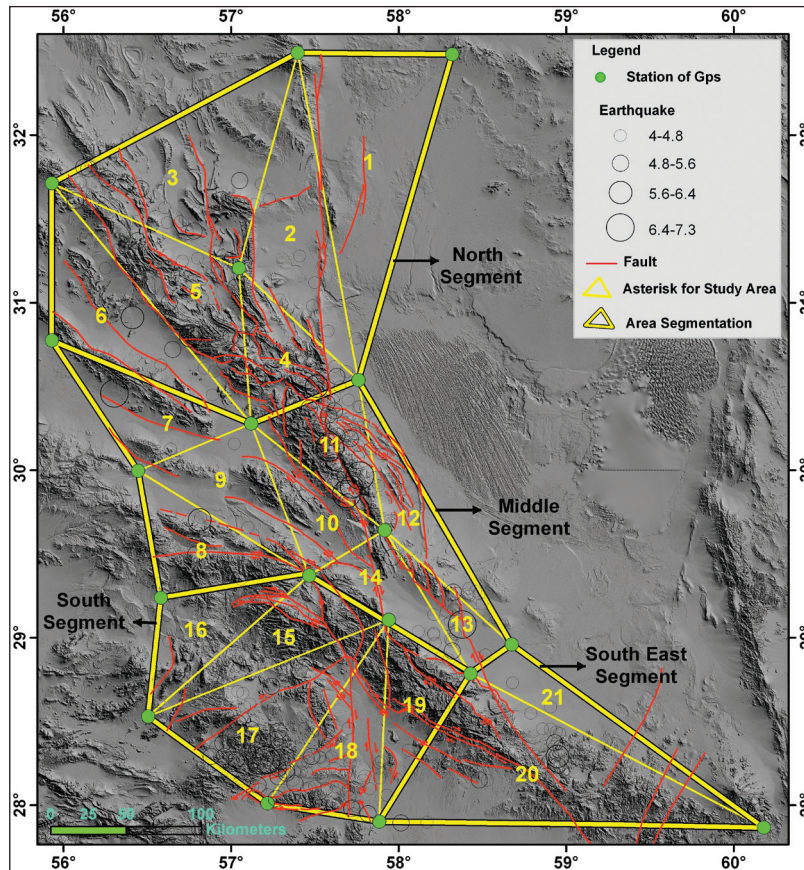
اختلاف ممکن است کمتر یا بیشتر شود. دلیل دیگر می‌تواند ناقص بودن اطلاعات زمین‌شناسی در مورد گسل‌ها باشد.

بر پایه نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به ژئودتیک در چهار بخش منطقه مورد مطالعه می‌توان به این نتیجه رسید که بخش شمالی و جنوبی به ترتیب با نسبت بیش از ۰/۰۴ و ۰/۰۹ جزو مناطق با واتنش کند و بخش مرکزی و بخش جنوب خاوری به ترتیب با نسبت ۰/۳۰ و ۰/۱۸ جزو مناطق با واتنش به نسبت سریع به شمار می‌آیند (Ward, 1998): نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به ژئودتیک در نواحی با واتنش سریع به‌طور طبیعی بیش از نواحی با واتنش کند است).

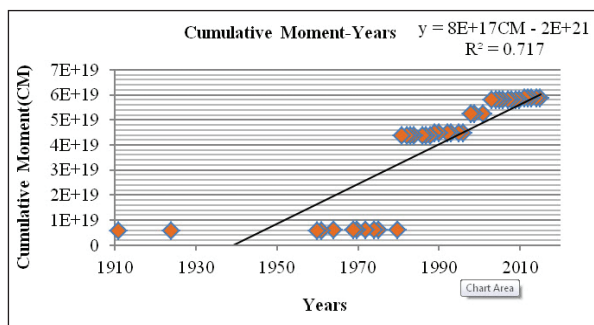
نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای زمین‌لرزه‌های دستگامی



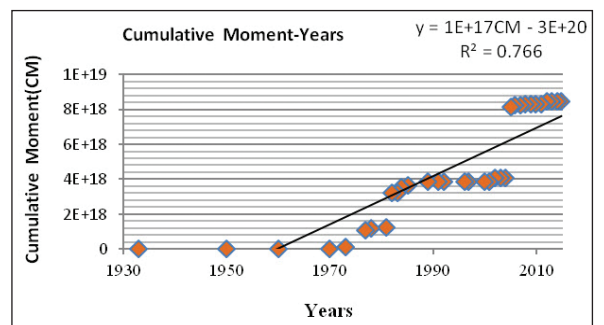
شکل ۱- الف) شکل نمادین از پهنه‌های ساختاری ایران. کادر آبی رنگ محدوده مورد مطالعه است که بخش باختر، جنوب باختر و جنوب دشت لوت را شامل می‌شود؛ ب) سامانه گسل امتدادلغز در لبه باختری و جنوب باختری دشت لوت. سامانه گسلی نایبند در شمال، گوک در میانه و سبزواران در جنوب.



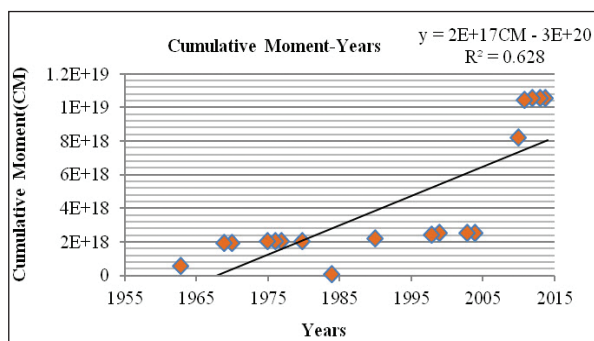
شکل ۲- شبکه‌بندی ژئودینامیکی منطقه مورد مطالعه به همراه گسل‌ها و زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴.۴. با توجه به هندسه گسل‌های موجود در منطقه، زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه و پراکندگی ایستگاه‌های GPS، منطقه شبکه‌بندی شد. بر پایه این شبکه‌بندی منطقه به چهار بخش شمالی، میانی، جنوبی و جنوب خاوری تقسیم شد.



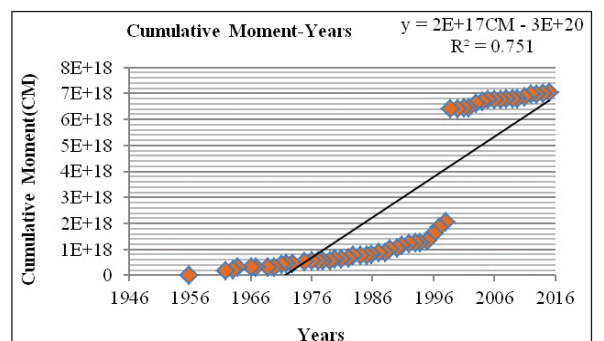
شکل ۴- نرخ گشتاور لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌های دستگاهی برای بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه (با استفاده از روش رسم نمودار).



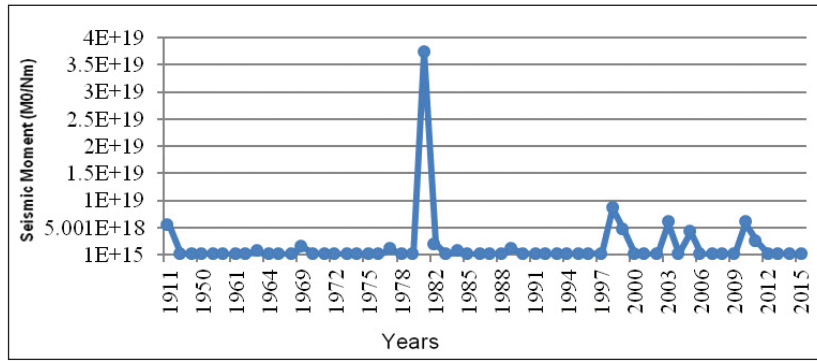
شکل ۳- نرخ گشتاور لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌های دستگاهی برای بخش شمالی منطقه مورد مطالعه (با استفاده از روش رسم نمودار).



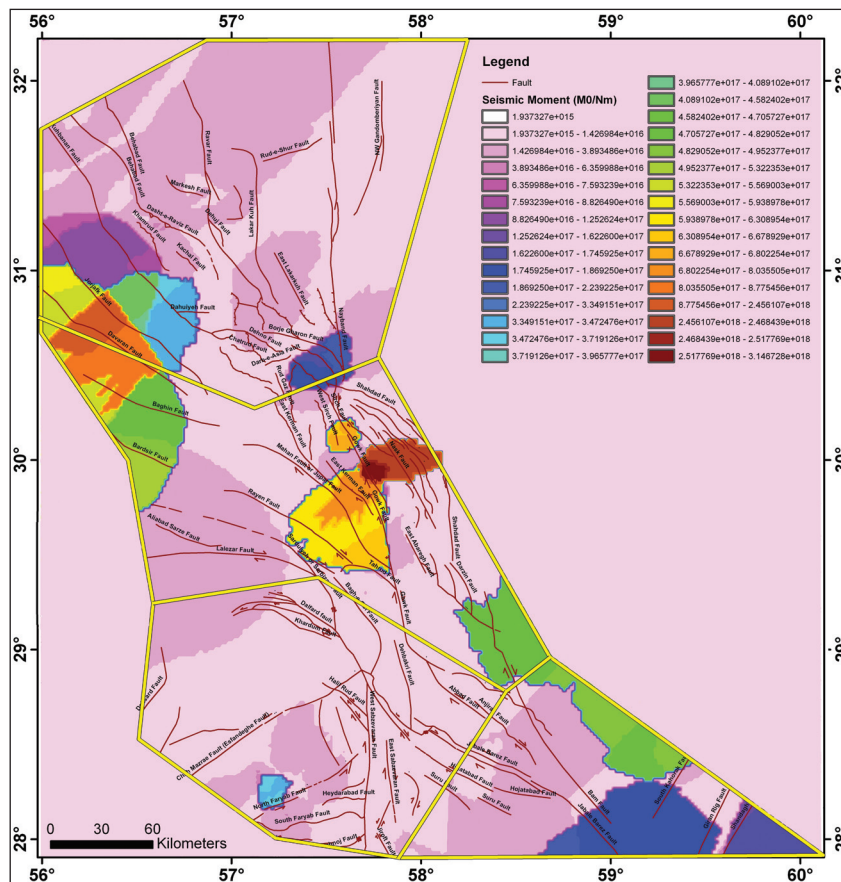
شکل ۶- نرخ گشتاور لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌های دستگاهی برای بخش جنوب خاوری منطقه مورد مطالعه (با استفاده از روش رسم نمودار).



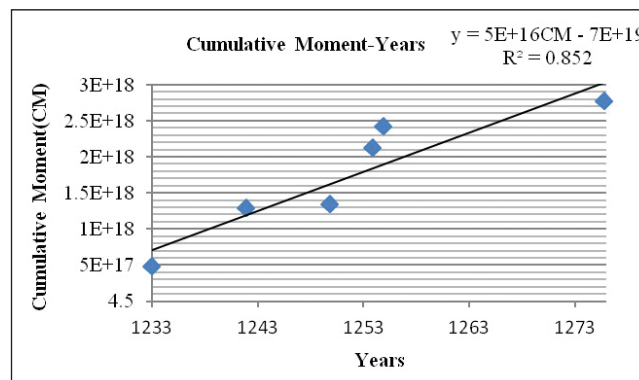
شکل ۵- نرخ گشتاور لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌های دستگاهی برای بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه (با استفاده از روش رسم نمودار).



شکل ۷- تغییرات گشتاور لرزه‌ای در طول زمان کاتالوگ لرزه‌ای مورد استفاده (۱۹۱۱-۲۰۱۵). بیشترین مقدار گشتاور لرزه‌ای به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۱، ۱۹۹۸، ۲۰۱۰، ۲۰۰۳، ۲۰۱۱، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۵ بوده است.



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی گشتاور لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه. بر پایه پهنه‌بندی انجام شده و مقادیر گشتاور لرزه‌ای به دست آمده بیشترین گشتاور لرزه‌ای به ترتیب در مرکز، جنوب خاور، شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه رخ داده است.



شکل ۹- نرخ گشتاور لرزه‌ای برای زمین لرزه‌های تاریخی با استفاده از روش رسم نمودار.

جدول ۱- مقادیر تانسور نرخ و انش و نرخ گشتاور ژئودتیک به دست آمده برای شبکه های ژئودینامیک منطقه به همراه متغیرهای مورد نیاز.

Name of Triangular	Area(km ²)	μ	Hs(Km)	Amount of Strain rate tensor	\dot{M} = Geodetic moment rate (Nm.y)
1	9375.05165	3.00E+11	15	1.8684	1.58E+17
2	6102.02291	3.00E+11	15	4.5491	2.50E+17
3	8481.265369	3.00E+11	15	9.3905	7.17E+17
4	3262.313445	3.00E+11	15	9.218	2.71E+17
5	5248.801409	3.00E+11	15	2.7691	1.31E+17
6	5950.586442	3.00E+11	15	14.0879	7.54E+17
7	3569.063499	3.00E+11	15	2.8575	9.18E+16
8	3704.574926	3.00E+11	15	1.8007	6.00E+16
9	3779.180145	3.00E+11	15	1.9126	6.51E+16
10	2698.353877	3.00E+11	15	21.3865	5.19E+17
11	3274.630455	3.00E+11	15	9.3169	2.75E+17
12	3095.614447	3.00E+11	15	6.9081	1.92E+17
13	1628.835163	3.00E+11	15	33.6713	4.94E+17
14	2711.183755	3.00E+11	15	6.5728	1.60E+17
15	3528.25948	3.00E+11	15	9.5338	3.03E+17
16	3322.48577	3.00E+11	15	4.4617	1.33E+17
17	6268.465875	3.00E+11	15	9.214	5.20E+17
18	4407.236097	3.00E+11	15	3.1665	1.26E+17
19	3275.300577	3.00E+11	15	4.1378	1.22E+17
20	11126.07703	3.00E+11	15	3.29	3.29E+17
21	2896.7205	3.00E+11	15	29.7453	7.75E+17

جدول ۲- نرخ گشتاور ژئودتیک در بخش های مختلف منطقه مورد مطالعه.

نام منطقه	مقدار نرخ گشتاور ژئودتیک	واحد نرخ گشتاور ژئودتیک
قطعه شمالی	2.28E+18	Nm.yr
	2.28E+25	Dyne-Cm.yr
قطعه میانی	1.86E+18	Nm.yr
	1.86E+25	Dyne-Cm.yr
قطعه جنوبی	1.20E+18	Nm.yr
	1.20E+25	Dyne-Cm.yr
قطعه جنوب خاوری	1.10E+18	Nm.yr
	1.10E+25	Dyne-Cm.yr

جدول ۳- مقادیر نرخ گشتاور لرزه ای بر پایه زمین لرزه های دستگاهی (با بزرگای بالاتر از ۴) برای بخش شمالی منطقه مورد مطالعه.

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور لرزه ای با استفاده از روش میانگین گیری	نرخ گشتاور لرزه ای با استفاده از روش رسم نمودار
Nm.yr	1.03408E+17	1E+17
Dyne-Cm.yr	1.03408E+24	1E+24

جدول ۴- مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه زمین‌لرزه‌های دستگامی (با بزرگای بالاتر از ۴) برای بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه.

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش رسم نمودار	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش میانگین‌گیری
Nm/yr	8E+17	5.62316E+17
Dyne-Cm/yr	8E+24	5.62316E+24

جدول ۵- مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه زمین‌لرزه‌های دستگامی (با بزرگای بالاتر از ۴) برای بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه.

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش رسم نمودار	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش میانگین‌گیری
Nm/yr	2E+17	1.18984E+17
Dyne-Cm/yr	2E+24	1.18984E+17

جدول ۶- مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای بر پایه زمین‌لرزه‌های دستگامی (۲۰۱۵-۱۹۱۱) با بزرگای بزرگ‌تر از ۴ برای بخش جنوب خاوری منطقه مورد مطالعه.

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش رسم نمودار	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش میانگین‌گیری
Nm/yr	2E+17	2.05331E+17
Dyne-Cm/yr	2E+24	2.05331E+24

جدول ۷- زمین‌لرزه‌های تاریخی روی داده در منطقه مورد بررسی.

گشتاور لرزه‌ای (Mo/Nm)	زمان رخداد زمین‌لرزه	بزرگی بر حسب m_b	نام زمین‌لرزه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام منطقه
4.77058E+17	۱۲۳۳/۰۸	۵/۷	هورچند	۳۴۱۸۶۶۵	۵۵۵۷۴۷	قطعه شمالی
3.72759E+17	۱۲۷۶/۰۳/۰۲	۵/۷	چرود - کرمان	۳۴۲۰۳۶۷	۵۰۰۰۰۰	
6.6287E+16	۱۲۵۰/۰۵/۲۴	۵/۲	-	۳۴۳۳۲۹۶	۵۰۰۰۰۰	
7.81371E+17	۱۲۵۴/۰۲	۵/۹	کوهبنان - چور	۳۴۳۱۸۳۶	۴۰۹۳۲۱	
2.91263E+17	۱۲۵۵	۵/۶	سیرج - حسن‌آباد	۳۳۲۰۶۳۶	۵۰۹۶۴۳	قطعه مرکزی
7.81371E+17	۱۲۴۲/۰۱	۵/۹	چرود - کرمان	۳۳۲۹۸۷۰	۵۰۹۶۳۵	

جدول ۸- مقادیر نرخ گشتاور لرزه‌ای زمین‌لرزه‌های تاریخی موجود در منطقه (۱۲۷۶-۱۲۳۳).

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش رسم نمودار	نرخ گشتاور لرزه‌ای با استفاده از روش میانگین‌گیری
Nm/yr	5E+16	6.44211E+16
Dyne-Cm/yr	5E+23	6.44211E+23

جدول ۹- نرخ گشتاور لرزه‌ای برای کل منطقه مورد مطالعه برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴، ۵ و ۶.

واحد نرخ گشتاور	نرخ گشتاور با استفاده از روش میانگین‌گیری	نرخ گشتاور با استفاده از روش رسم نمودار	بزرگی زمین‌لرزه
Nm/yr	8.12E+17	1.00E+18	زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴
		1.00E+25	
Dyne-Cm/yr	8.12E+24	7.00E+17	زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵
		7.00E+24	
Nm/yr	6.81E+17	6.00E+17	زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶
		6.00E+24	
Dyne-Cm/yr	6.81E+24		

جدول ۱۰- ویژگی‌های گسل‌های موجود در منطقه و نرخ گشتاور هر کدام از گسل‌ها.

Fault Name	$\mu(NM2-)$	Li-Length (Km)	Hs(Km)	δ -Slip (Rate (m.yr)	Reference for Slip Rate (m.yr)	Dip Fault	Cos (Dip Fault)	$\dot{M}(Nm.yr)$
Abbad Fault	3×10^{10}	46.081787	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	45	0.707	9.09252E+12
Anjirak Fault	3×10^{10}	49.394197	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	55	0.573	1.20253E+13
Bam Fault	3×10^{10}	102.937233	15	2	طالیان و همکاران (۱۳۸۸)	80	0.173	5.35512E+14
Baghin Fault	3×10^{10}	75.76039396	15	0.5	Gps بر پایه داده‌های	45	0.707	2.41105E+13
Bardsir	3×10^{10}	53.15489073	15	0.5	Gps بر پایه داده‌های	45	0.707	1.69163E+13
Behabad Fault	3×10^{10}	64.4991811	15	1.5	Allen et al. (2010)	80	0.173	2.51659E+14
.Chah Mazrae or Esfandeghe F	3×10^{10}	141.1	15	0.2	Gps بر پایه داده‌های	70	0.342	3.71316E+13
Dalfard Fault	3×10^{10}	135.693656	15	2.6	Gps بر پایه داده‌های	80	0.173	9.17697E+14
Darzin Fault	3×10^{10}	33.165349	15	0.4	Gps بر پایه داده‌های	80	0.173	3.45073E+13
Davaran Fault	3×10^{10}	133	15	0.9	Berberian and Yeats (1999)	80	0.173	3.11358E+14
Dahsard Fault	3×10^{10}	43.23255196	15	0.5	Gps بر پایه داده‌های	70	0.342	2.84425E+13
Dehno Fault	3×10^{10}	67.604791	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	30	0.866	1.08901E+13
East Abaregh Fault	3×10^{10}	24.537197	15	0.4	Gps بر پایه داده‌های	80	0.173	2.553E+13
East Kerman Fault	3×10^{10}	101.997582	15	1.5	Gps بر پایه داده‌های	60	0.5	1.37697E+14
East Sabzevaran Fault	3×10^{10}	51.735552	15	2.7	شفیعی بافتی و همکاران (۱۳۸۸)	55	0.573	1.09701E+14
Gowk Fault	3×10^{10}	132.576232	15	3.8	Walker et al. (2010)	55	0.573	3.95646E+14
Hojatabad Fault	3×10^{10}	65.170809	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	50	0.642	1.41609E+13
Jebale Barez Fault	3×10^{10}	88.610421	15	0.31	Gps بر پایه داده‌های	60	0.5	2.47223E+13
Jiroft Fault	3×10^{10}	69.4431339	15	5.7	Regard et al. (2005)	80	0.173	1.0296E+15
Jorjafk Fault	3×10^{10}	135.5955993	15	0.5	Gps بر پایه داده‌های	70	0.342	8.92076E+13
Kuhbanan Fault	3×10^{10}	186.515514	15	3.3	شاهسیندزاده و شفیعی بافتی (۱۳۸۴)	60	0.5	5.53951E+14
Lakar Kuh Fault	3×10^{10}	85.916313	15	0.2	شفیعی بافتی (۱۳۸۴)	64	0.438	1.7654E+13
Lalezar Fault	3×10^{10}	145.0552867	15	0.15	Gps بر پایه داده‌های	65	0.422	2.01084E+13
Mahan Fault	3×10^{10}	110.224752	15	0.2	Gps بر پایه داده‌های	60	0.5	1.78564E+13
Nask Fault	3×10^{10}	63.224442	15	0.4	Gps بر پایه داده‌های	50	0.642	1.77265E+13
Naybandan Fault	3×10^{10}	231.161395	15	1.8	Fourotan et al. (2014)	70	0.342	5.47488E+14
North Faryab Fault	3×10^{10}	103.504992	15	0.2	Gps بر پایه داده‌های	80	0.173	5.38465E+13
Ravar Fault	3×10^{10}	132.381629	15	0.5	شفیعی بافتی و شاهسیندزاده (۱۳۸۹)	88	0.034	9.46139E+14
Rayen Fault	3×10^{10}	79.486541	15	0.2	Gps بر پایه داده‌های	50	0.642	1.00287E+13
Sarduiyeh or Sarbizan Fault	3×10^{10}	104.9	15	1	Gps بر پایه داده‌های	80	0.173	2.72861E+14
Shandagh Fault	3×10^{10}	76.03480703	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	87	0.052	2.10558E+14
Shahdad Fault	3×10^{10}	126.322989	15	2	Mohajel (2009)	8	0.99	1.09097E+14
Sirch Fault	3×10^{10}	28.761752	15	2.4	Walker et al. (2003)	55	0.573	5.42106E+13
Suru Fault	3×10^{10}	50.609124	15	.0	Gps بر پایه داده‌های	40	0.766	9.21667E+12
West Sabzevaran Fault	3×10^{10}	144.9174611	15	4.3	Rigard et al. (2005)	78	0.207	1.37042E+15
South Kahorak Fault	3×10^{10}	86.07501949	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	87	0.052	2.38362E+14
Giran Rig Fault	3×10^{10}	77.89285688	15	0.3	Gps بر پایه داده‌های	87	0.052	2.15703E+14

جدول ۱۱- نرخ گشتاور زمین‌شناسی برای بخش‌های چهارگانه منطقه مورد مطالعه.

نام منطقه	نرخ گشتاور زمین‌شناختی	واحد نرخ گشتاور زمین‌شناختی
بخش شمالی	2.74157E+15	Nm.yr
	2.74157E+22	Dyne-Cm.yr
بخش مرکزی	2.5895E+15	Nm.yr
	2.5895E+22	Dyne-Cm.yr
بخش جنوبی	4.16246E+15	Nm.yr
	4.16246E+22	Dyne-Cm.yr
بخش جنوب خاوری	1.08894E+15	Nm.yr
	1.08894E+ 22	Dyne-Cm.yr

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۵- زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- اسدی سرشار، م.، بحرودی، ع.، قرشی، م. و قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۹- مقایسه نرخ‌های گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناسی و ژئودیتیک در البرز مرکزی. فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۵، صص. ۱۹ تا ۲۴.
- جموری، ی.، هاشمی طباطبایی، س.، صدیقی، م. و نانکلی، ح. ر.، ۱۳۹۱- برآورد نرخ Gps حرکات زمین‌ساخت نوار شمالی تهران بزرگ با نگرشی ویژه به گسل شمال تهران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۳، ۲۱۱ تا ۲۱۸.
- خرمی، ف.، حسامی، خ.، نانکلی، ح. ر. و توکلی، ف.، ۱۳۹۰- بررسی زمین‌ساخت جنبا در منطقه البرز با استفاده از مشاهدات شبکه دائمی Gps. فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۲، صص. ۲۲۳ تا ۲۳۰.
- رضاپور، م.، ۱۳۸۲- بررسی داده‌های ثبت شده و تعیین بزرگی در شبکه لرزه‌نگاری تهران، فصلنامه فیزیک زمین و فضا، شماره ۸۲، صص. ۵۵ تا ۶۵.
- شاهپسندزاده، م. و شفیع بافتی، ا.، ۱۳۸۴- بررسی میزان جابه‌جایی و آهنگ لغزش در بخش میانی پهنه گسلی کوهبنان (منطقه زرنند) جنوب خاور ایران مرکزی، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره ۲۸ و ۲۹، صص. ۶۳ تا ۷۱.
- شفیع بافتی، ا. و شاهپسندزاده، م.، ۱۳۸۹- بررسی ریخت‌زمین‌ساخت و لرزه‌زمین‌ساخت پهنه گسلی راور، جنوب ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۵، صص. ۵۷ تا ۶۶.
- شفیع بافتی، ا.، ۱۳۸۴- اندازه‌گیری واتنش در ناحیه شمال کرمان بر پایه اندازه‌گیری‌های Gps و شواهد زمین‌ساختی، رساله دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.
- شفیع بافتی، ا.، جعفری، ح. ر. و شاهپسندزاده، م.، ۱۳۸۸- زمین‌ساخت جنبا و برآورد خطر زمین‌لرزه در منطقه ی سبزواران، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۳، صص. ۲۳۸ تا ۲۲۹.
- طالبیان، م.، ۱۳۹۱- مقایسه گشتاور لرزه‌ای، ژئودیتیک و زمین‌شناسی در البرز خاوری و کپه‌داغ. فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۶، صص. ۱۸۳ تا ۱۹۲.
- طالبیان، م.، طباطبایی، س.، فتاحی، م.، قرشی، م.، بیت‌اللهی، ع.، قلندرزاده، ع. و ریاحی، م. ر.، ۱۳۸۸- برآورد نرخ لغزش گسل‌های پیرامون بم و کاربرد آن در ارزیابی خطر زمین‌لرزه. فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۴، ۱۵۶-۱۴۹.

References

- Allen, M., Kheirkhah, M., Emami, M. H. and Jones, S. J., 2010- Right- lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia- Eurasia collision zone. *Geophys. J. Int.* 1- 20.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes. Cambridge University press, Cambridge, UK.
- Angelica, C., Bonforte, A., Distefano, G., Serpelloni, E. and Gresta, S., 2013- Seismic potential in Italy from integration and comparison of seismic and geodetic strain rates. *Tectonophysics*, 608, 996-1006.
- Berberian, M. and Yeats, R. S., 1999- Patterns of historical rupture in the Iranian Plateau. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 89 (1), 120-139.
- Foroutan, M., Meyer, B., Sebrier, M., Nazari, H., Murray, A. S., Dortz, K. Le., Shokri, M. A., Arnold, M., Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K., Solaymani Azad Sh. and Bolourchi, M. J., 2014- Late Pleistocene-Holocene right-slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lutblock, Iran, *Geophysical Research*, 119, 3517-3560.
- Hanks, T. C. and Kanamori, H., 1979- A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350.
- Heaton, T. H., Tajima, F. and Mori, A. W., 1986- Estimating ground motions recorded accelerograms. *Surveys in Geophysics*, 8, 25-83.
- Jahnston, A., 1996- Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-III. New Madride 1811-1812, Chaleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophys. J. Int.*, 126, 314-344.
- Kanamori, H., 1977- Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications. *Maurice Ewing Ser*, 1, 162-174.
- Kreemer, C., Chamot-Rooke, N. and Pichon, X. L., 2004- Constraints on the evolution and vertical coherency of deformation in the Northern Aegean from a comparison of geodetic, geologic and seismologic data, *Earth and Planetary Science*, 225, 329-346.
- Mohajjel, M., 2009- Thin-skinned deformation near Shahdad, southeast Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36, 146-155.
- Newman, A. V., Dixon, T. H., Ofoegbu, G. I. and Dixon, J. E., 2001- Geodetic and seismic constraints on recent activity at Long Valley Caldera, California: evidence for viscoelastic rheology, *Volcanology and Geothermal Research*, 105, 183-206.
- Pancha, A., Anderson, J. G. and Kreemer, C., 2006- Comparison of seismic and geodetic scalar moment rates across the Basin and Range province. *Bulletine of the seismological society of America*, 96, No. 1, 11-32.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Boulès, D., Bonnet, S., Abbassi, M. R., Braucher, R., Mercier, J., Shabanian, E., Soleymani, Sh. and Fegghi, Kh., 2005- Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros-Makran transfer zone: role of the Minab-Zendan fault system in accommodation Arabia-Eurasia convergence in southeast Iran. *Geophys. J. Int.*, 162, 177-203.
- Walker, R. and Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23, TC5010.
- Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., Rashidi, A., Fattahi, M. and Bryant, C., 2010- Holocene slip-rate on the Gowk strike-slip fault and implications for the distribution of tectonic strain in eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, 181, 221-228.
- Walker, R., Jackson, J. and Baker, C., 2003- surface expression of thrust faulting in eastern Iran: souece parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences, *Geophysical Journal International*, 152, 749-765.
- Ward, S. N., 1998- On the consistency of earthquake rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States. *Geophys. Jour. Int.*, 134, 172-187.

Estimation of the active faults, based on Seismic, geologic and geodetic moment rates in the South and West of Lut block

A. Rashidi^{1*}, M. M. Khatib², S. M. Mosavi³ and Y. Jamor⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

²Professor, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

³Assistant Professor, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

⁴Associate Professor, Geomatics College, National Cartographic Center of I.R., Tehran, Iran

Received: 2015 November 25

Accepted: 2016 July 16

Abstract

In the S,W Lut Block, geodetic moment rate is more than seismic and geological moment rates. Depending on the type of deformation and geometry of the faults, the study area divided to the 4 parts : northern, central, southern and southeastern (South Lut Block) parts. Values of three types of moment rates in these area are comparing with each other. The most of geodetic moment rate was obtained respectively in northern, central, southern, southeastern parts of the study area. Geodetic moment rate in the northern part is $2.28E+18$ Nm.yr, the central part is $1.86E+18$ Nm.yr, the southern part is $1.20E+18$ Nm.yr and in the southeastern is $1.10E+18$ Nm.yr. The most of seismic moment rate was obtained respectively in central, southeastern, southern, northern parts of the study area. Seismic moment rate in the central part is $5.62316E+17$ Nm.yr, in the southeast part is $2.05331E+17$ Nm.yr, in the southern part is $1.18984E+17$ Nm.yr and in the northern part is $1.03408E+17$ Nm.yr. According to Seismic map, maximum seismic moment, respectively is along Gowk, Shahdad, Davaran, East Kerman, Mahan, Bam, Kuhbanan, Dahueiyeh, North Faryab Faults. These faults are responsible for large earthquakes in the study area. The most of geological moment rate was obtained respectively in southern, northern, central, southeastern parts of the study area. Values of geological moment rate for the southern part is $4.16246E+15$ Nm.yr, northern part is $2.74157E+15$ Nm.yr, centra part is $2.5895E+15$ Nm.yr and in the southeastern is $1.08894E+15$ Nm.yr. In the study area, maximum geological moment rate is respectively related to west Sabzevaran, Jiroft, Raver, Dalfard, Kuhbanan, Naybandan, Bam, Gowk, Davaran faults. According to values of geological and geodetic moment rates in the four parts of study area and based on the value of the release seismic energy in the central and southeastern parts, it seems that in the next time, the most of seismic potential and seismic hazard are respectively in the northern, southern, central, southeastern parts of the study area. In study area, maximum seismic moment are at years 1981, 1998, 2003, 2010, 2011, 1999, 2005 respectively. Ratio of the geodetic moment rate to the seismic moment rate obtained more than 7.9. This ratio reflects the important role of interseismic deformation in this area. According to the ratio seismic moment rate to geodetic moment rate, in four parts of the study area, can be conclude that the northern and southern parts with ratio: 0.04 and 0.09 are slow strain areas and the central and southeastern parts with ratio 0.30 , 0.18 are fast strain areas. Ratio of seismic moment rate to geological moment rate is 0.93%. This value indicates that 0.93% potential of the faults for seismic energy has been released and not been released a big part of the elastic energy in the area.

Key words: Seismic Energy, Interseismic Deformation, South and West of Lut Block, Seismic Moment, Moment Rate.

For Persian Version see pages 211 to 222

*Corresponding author: A. Rashidi; E-mail: arashidi@birjand.ac.ir