

## ارزیابی تغییرات میزان جنبایی با برآورد و مقایسه نرخ گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناسی و ژئودتیک در تکه‌های گسل اردکول (خاور ایران)

مسعود حیدری آقاگل<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۲</sup> و سیدمرتضی موسوی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

نویسنده مسئول: heydarimasoud8@gmail.com\*

دریافت: ۹۷/۷/۱۶ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۹

### چکیده

گسل اردکول به طول ۱۲۵ کیلومتر با سازوکار امتدادلغز راست‌گرد در بخش شمال زمین‌درز سیستان جای دارد. این گسل در ۱۹۹۷/۰۵/۱۰ زمین‌لرزه‌ای به بزرگی  $M_w 7/3$  را در منطقه موجب شد و درازترین دگرریختی همراه با زمین‌لرزه را سده‌های اخیر ایران موجب گشت. مقایسه مقادیر گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناسی و ژئودتیک نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر نرخ گشتاور ارتباط مستقیمی با طول گسل دارند به نحوی که هرچه میزان طول گسل افزایش پیدا کند میزان گشتاور آن نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان انرژی بالاتری را آزاد می‌کند. بررسی نرخ تغییرات گشتاور گسل اردکول نشان می‌دهد که میزان آزاد شدن انرژی در بخش شمالی نسبت به بخش جنوبی بیشتر است این بدان معنا است که در تکه‌های شمالی تعداد زمین‌لرزه‌های بیش‌تری روی داده و در نتیجه تعداد سرشاخه‌های فعال گسل در این بخش بیش‌تر بوده است. به‌طور کل میزان گشتاور گسل اردکول از شمال به جنوب در حال کاهش بوده و در نتیجه در بخش جنوبی انرژی بیش‌تر ذخیره شده و یا صرف دگرشکلی شده است بنابراین تکه‌های جنوبی نسبت به تکه شمالی در خطر بروز زمین‌لرزه قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: اردکول، زمین‌درز سیستان، گشتاور لرزه‌ای، گشتاور زمین‌شناسی

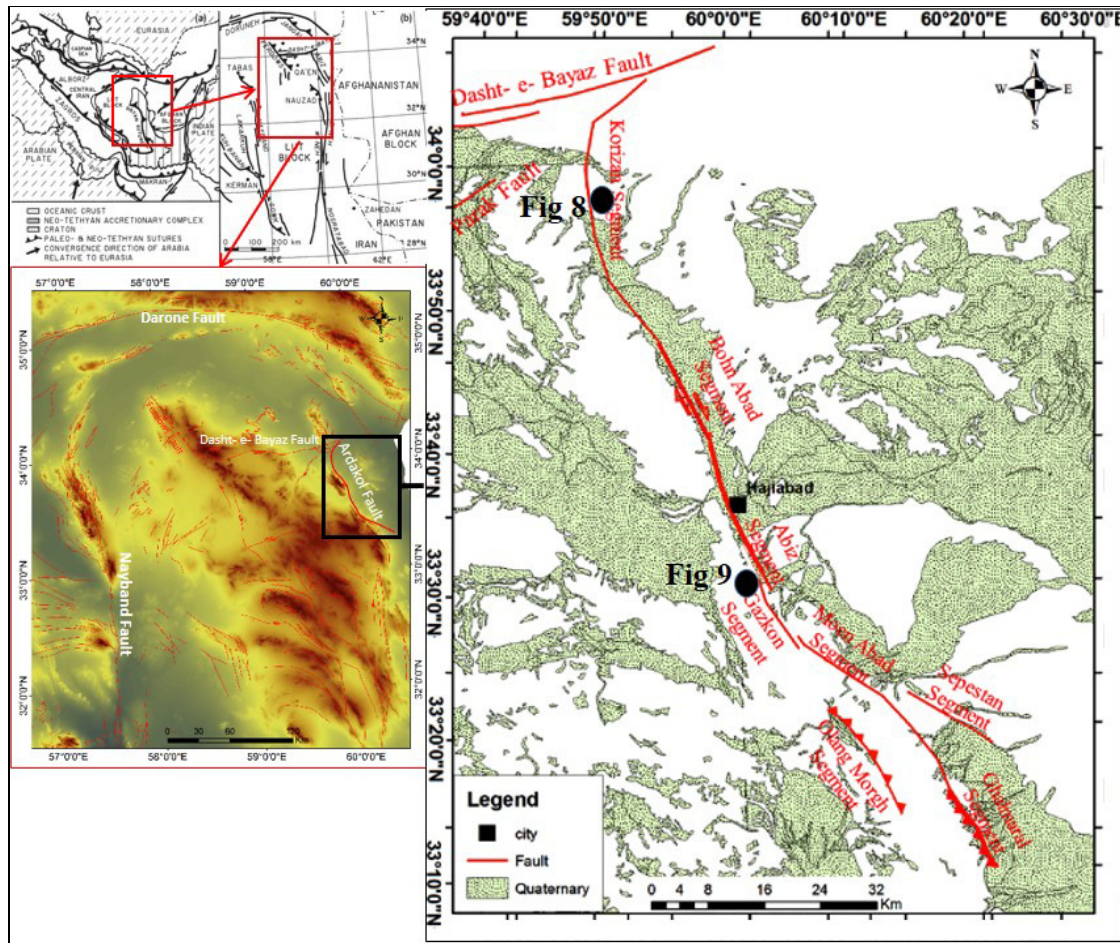
### مقدمه

گسل سبب بروز زمین‌لرزه‌های زیادی در این منطقه شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته برآورد اندازه کرنش در مناطق مختلف پوسته ایران نشان می‌دهد که بیش‌ترین دگرشکلی در پوسته ایران در گستره دشت بیاض و قائن در خاور ایران روی می‌دهد (نعمتی، ۱۳۹۷). دگرریختی توأم با زمین‌لرزه ۱۹۹۷/۰۵/۱۰ اردکول (با بزرگی بین  $7/2 - 6/3$ ) یکی از بزرگ‌ترین گسلش‌های سطحی ثبت‌شده در پوسته ایران است. این دگرریختی حاصل چهار رویداد لرزه‌ای بافاصله ۵۹ ثانیه در چهار تکه اصلی شمالی (از شش تکه اصلی) می‌باشد که سازوکار این چهار تکه بر اساس داده‌های حل سازوکار کانونی با یکدیگر متفاوت است (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹). بر اساس مطالعات بربریان، گشتاور لرزه‌ای ( $M_0$ ) این رویداد با توجه به امتداد گسل، شیب، ریک بردار لغزشی، بردار لغزشی و عمق کانونی،  $10^{18}$  نیوتن متر محاسبه شد. نرخ گشتاور زمین‌شناسی گسل اردکول (نرخ لغزش  $3.5 \text{ mm/yrs}$  (صبور، ۱۳۸۹) برابر با  $10^{17} \times 0.457$  ژول است (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹ و مهجن‌آبادی، ۱۳۸۹).

گسل اردکول در خاور ایران و در بخش شمالی زمین‌درز سیستان قرار دارد. این گسل در بخش شمالی گسل نهبندان باختری قرار دارد که مرز بین بلوک لوت و افغانستان را تشکیل می‌دهد گسل اردکول یک گسل امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه معکوس و شیب ۸۸ درجه به سمت جنوب باختر بوده (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹، قیطانچی و بایران‌نژاد، ۲۰۰۴ و حیدری، ۱۳۹۴) و به‌صورت یک شکستگی پیوسته نبوده بلکه در پهنه‌ای با طول ۱۲۵ کیلومتر و عرض ۱ تا ۵ کیلومتر از سری گسیختگی‌های ناپیوسته تشکیل شده است این گسل از ۶ تکه اصلی (کریزان ۲۸، بهن‌آباد ۸/۸، آبیژ ۳۲، گازکون ۲۰، معین‌آباد ۳۰/۴، قال ماران ۱۲ کیلومتر) و دو تکه فرعی (اولنگ مرغ ۱۲/۸ و سه پستان ۹/۶ کیلومتر) تشکیل شده است (خطیب و همکاران، ۱۳۷۸) (شکل ۱). گسل اردکول در پایانه شمالی خود به گسل خاوری-باختری دشت بیاض (چپ‌گرد با مؤلفه‌ی معکوس) می‌رسد که به دلیل همدرد بودن این دو گسل تشکیل یک منطقه ترافشاری را می‌دهد همدرد بودن این دو

گسل اردکول در ارتباط است؟، تغییرات میزان دگرشکلی بر روی تکه‌های گسل اردکول چگونه است؟، آیا تغییرات دگرشکلی با داده‌های صحرایی (نو زمین‌ساختی) همخوانی دارد؟

با توجه به مهاجرت کانون‌های زمین‌لرزه از شمال به جنوب (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵)، آیا مهاجرت صورت گرفته در گذشته نیز ادامه داشته است؟ آیا تغییرات نرخ گشتاور از شمال به جنوب در حال تغییر است؟، آیا تغییرات نرخ گشتاور با تغییرات نرخ فعالیت تکه‌های

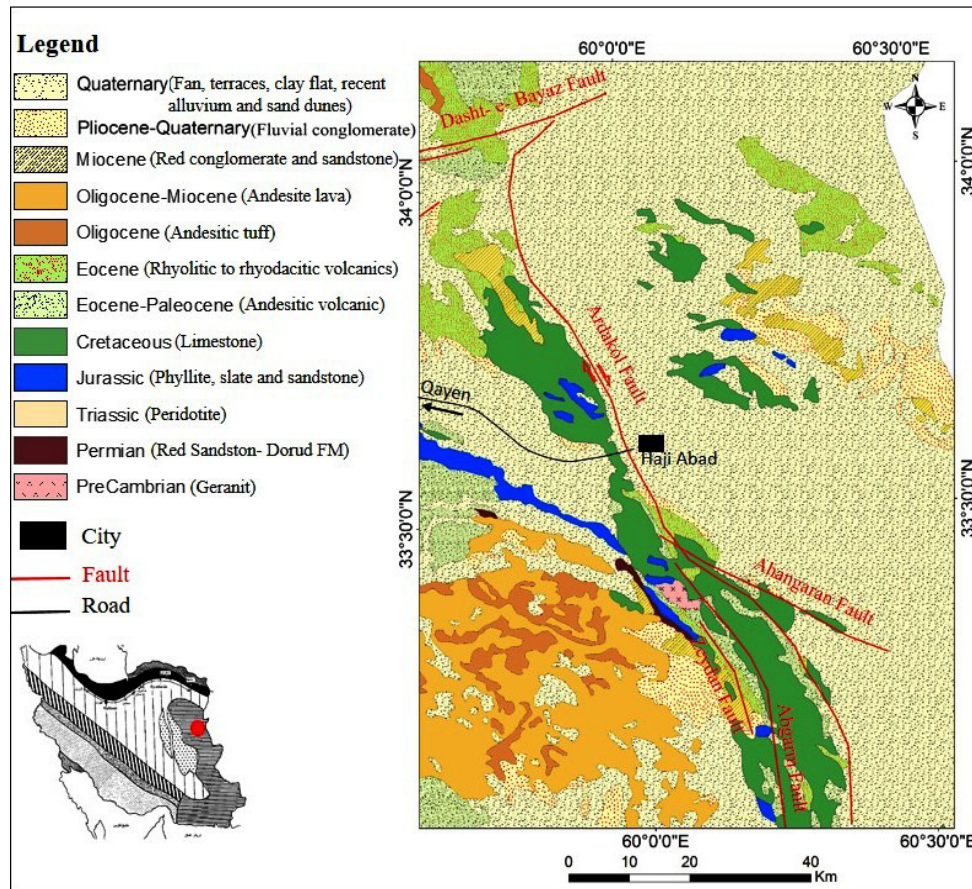


شکل ۱. (نگاره a) موقعیت محدوده مورد مطالعه در شرق ایران (بربریان و همکاران، ۱۹۹۹)، (نگاره b) مدل ارتفاع رقومی بخش بالایی بلوک لوت به همراه گسل‌های دربرگیرنده (کادر مشکی موقعیت منطقه مورد مطالعه در خاور بلوک لوت)، (نگاره c) تکه‌های ناپیوسته گسل اردکول به همراه واحدهای کواترنری منطقه مورد مطالعه (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵).

### موقعیت زمین‌ساختی منطقه

بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی نوگل‌سادات (۱۳۷۳)، گسل اردکول در خاور ایران و در بخش شمال لوت جنوبی (شمال خاور بلوک لوت) قرار دارد. پهنه لوت، با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر، خاوری‌ترین بخش خرده قاره ایران مرکزی است. مرز خاوری آن با گسل نهپندان باختری و حوضه فلیشی خاور ایران و مرز باختری آن با گسل نایبند و بلوک طبس مشخص می‌شود (آقانیاتی، ۱۳۸۳). در روی نقشه زمین‌ساختی ایران (اشتوکلین و

همکاران، ۱۳۵۲)، مرز شمالی این بلوک به فروافتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن به فرونشست جازموربان بسته می‌شود. از نظر فعالیت‌های زمین‌شناسی بلوک لوت به سه بخش لوت شمالی، لوت میانی و لوت جنوبی تقسیم می‌شود. سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر از واحدهای کواترنری (مناطق دشت) و آهک‌های کرتاسه بالایی و شیل‌ها و فیلیت‌های ژوراسیک بالایی (ارتفاعات باختر نسبت به پهنه‌ی گسلی اردکول) تشکیل شده است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵).

با بزرگای  $6/3$ ،  $7/2$  و  $5/2$  Mw نشان از پتانسیل بالای لرزه‌خیزی این گسل است. مهاجرت از شمال به جنوب کانون زمین‌لرزه‌های سال ۱۹۹۷، این امر را نشان داد که احتمالاً در گذشته نیز این مهاجرت صورت گرفته است (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵). با توجه به کانون‌های سطحی زمین‌لرزه ثبت شده بر روی گسل اردکول که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر کانون‌ها در بخش شمالی است احتمال اینکه در گذشته در بخش‌های شمالی این گسل نسبت به بخش‌های جنوبی تعداد زمین‌لرزه‌های بیشتری روی داده باشد، بیشتر است. به همین دلیل احتمال مهاجرت این کانون‌ها از بخش شمالی به بخش جنوبی وجود دارد (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵). تکه‌های گسل اردکول که در طی رخداد سال ۱۹۹۷ و ۱۹۷۹ فعال شدند، به دلیل قرار گرفتن در پایانه لغزش، هنوز باعث تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در بخش جنوبی نشده‌اند، انتظار می‌رود ادامه پیوند جنبشی این تکه‌های گسلی با سامانه به هم پیوسته شمالی و نیز برقراری پیوند جنبشی آن‌ها با قطعات جنوبی‌تر باعث

گسل اردکول از لحاظ جایگاه زمین‌ساختی در ادامه گسل نهبندان باختری و بخش شمالی زمین‌درز سیستان قرار دارد. پهنه ساختاری سیستان که شرقی‌ترین پهنه ساختاری ایران محسوب می‌شود، طبق تقسیم‌بندی زمین‌ساختی-رسوبی این منطقه به نام پهنه زمین‌درز سیستان معرفی شده است (تیرروله و همکاران، ۱۹۸۳). ایالت ساختاری سیستان در شرق ایران دارای روند شمالی-جنوبی است که نشان از زمین‌درز برخوردی تکه لوت و افغانستان است. سیستم گسلی نهبندان در مرز بین این ایالت ساختاری و پهنه لوت موجب دگرشکلی واحدهای سنگی در حاشیه و درون ایالت ساختاری سیستان شده است. بخش بالایی نهبندان دارای یک چرخش به سمت شمال باختر است که این سبب چرخش پادساعت‌گرد بلوک لوت شده است که این امر سبب دگرشکلی زیادی در منطقه شده است (تیرروله و همکاران، ۱۹۸۳؛ الکر و همکاران، ۲۰۰۴). گسل اردکول به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی بسیار فعال بوده و بروز زمین‌لرزه‌های سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۹۷ و ۲۰۱۲ به ترتیب



۱- یکی دیگر از روش‌های برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری زمین‌لرزه‌ها و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی است. با استفاده از روابط تجربی می‌توان نرخ گشتاور لرزه‌ای را در منطقه تعیین کرد. در برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی منطقه موردنظر استفاده می‌شود. کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌ای مورد استفاده در این پژوهش مربوط به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران می‌باشد و برای برخی از زمین‌لرزه‌ها از داده‌های سایت دانشگاه هاروارد<sup>۱</sup> و ISC<sup>۲</sup> استفاده شده است. زمین‌لرزه‌های تاریخی با توجه به کتاب (امبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲) است. روابطی که در اینجا استفاده شده عبارت‌اند از:

رابطه بر اساس  $M_b$  (جانسون، ۱۹۸۰)

$$\log(M_0/Nm) = 11.28 + 0.679m_b + 0.077m_b^2$$

رابطه بر اساس  $M_s$  (کالنگاموری، ۱۹۷۷)

$$\log(M_0/Nm) = 9.05 + 1.5M_s$$

۲- روش دیگری برای محاسبه نرخ گشتاور توسط وارد (۱۹۹۸) معرفی گردید. در این روش به داده‌هایی همچون طول گسل، شیب گسل، نرخ لغزش و ستبرای لایه لرزه‌زا منطقه نیازمندیم.

اگر ضخامت لایه لرزه‌زا در منطقه ثابت باشد نرخ گشتاور لرزه‌ای از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{M} = \mu \Sigma (L_i H_S \dot{\delta}_i / \cos \delta_i)$$

$\mu$  ضریب برشی،  $L_i$  طول گسل،  $\dot{\delta}_i$  نرخ لغزش گسل،  $\delta_i$  شیب گسل و  $H_S$  ضخامت لایه لرزه‌زا منطقه است. ضریب برشی برای سنگ‌های موجود در پوسته زمین  $3 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$  یا  $3 \times 10^{11} \text{ dyne cm}^{-2}$  می‌باشد. با توجه به اینکه ضخامت لایه لرزه‌زا در منطقه ثابت نیست به همین دلیل به طور میانگین ضخامت لایه لرزه‌زا را ۱۲ کیلومتر در نظر گرفته شد (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵).

### ۱-۱-۱- تعیین نرخ گشتاور لرزه‌ای

در تعیین گشتاور لرزه‌ای، برای تعیین مساحت سطح دگرریختی گسل اردکول از داده‌های کاتالوگ لرزه‌ای استفاده شد. سطح دگرریختی گسل اردکول در تکه‌های

بروز زمین‌لرزه‌هایی در آینده و رشد پهنه گسلی به سمت جنوب شود (اسلامی و همکاران، ۱۳۸۵ و رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶).

یکی از راه‌های بررسی مهاجرت کانون‌های لرزه‌ای و میزان تغییرات دگرریختی در یک منطقه بررسی میزان تغییر نرخ گشتاور زمین‌لرزه‌های روی داده بر روی گسل‌ها است (اسلامی و همکاران، ۱۳۸۵ و رشیدی و همکاران، ۱۳۹۶ و فیروز مهجن آبادی، ۱۳۸۹). تغییرات نرخ گشتاور نشان می‌دهد که در گذشته میزان تغییرات گشتاور، انرژی و دگرشکلی در بخش‌های مختلف گسل چگونه است و به این ترتیب می‌توان مناطق دارای پتانسیل لرزش را در گسل پیش‌بینی کرد.

### ۱- گشتاور

#### ۱-۱- گشتاور لرزه‌ای

گشتاور لرزه‌ای یک کمیت است که لرزه‌شناسان برای سنجش مقدار انرژی آزاد شده به وسیله یک زمین‌لرزه مورد استفاده قرار می‌دهند. گشتاور لرزه‌ای را می‌توان به این صورت تعریف کرد: برآورد اندازه گسیختگی لرزه‌ای که در اثر عملکرد زوج نیروها در سرتاسر سطح لغزش گسلی ایجاد شده است (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴).

گشتاور لرزه‌ای به صورت حاصل ضرب سه کمیت تعریف می‌شود، میانگین ضریب برشی سنگ‌ها، مساحتی که نیرو بر روی آن اعمال می‌شود و جابجایی و لغزشی که روی گسل اتفاق می‌افتد و به صورت زیر بیان می‌شود (جانسون، ۱۹۸۰) (شکل ۳).

$$M_0 = \mu A D$$

A: مساحت سطح گسیختگی، D: میانگین جابجایی در امتداد گسل،  $\mu$ : ضریب برشی سنگ‌ها (در پوسته  $3 \times 10^{11} \text{ dyne cm}^{-2}$  یا  $3 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$ ).

رابطه فوق برای گسل‌های دارای شیب قائم است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته بر روی تکه‌های گسل اردکول شیب این گسل نزدیک به قائم می‌باشد به همین دلیل می‌توان از این رابطه برای تعیین میزان گشتاور لرزه‌ای این گسل استفاده کرد (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵).

در این مطالعه از دو روش برای محاسبه میزان گشتاور لرزه‌ای استفاده شد که عبارتند از:

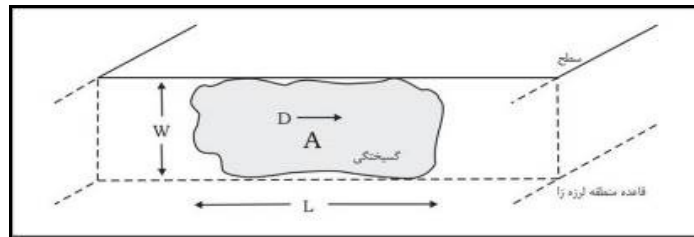
<sup>1</sup> Centroid Moment-Tensor

<sup>2</sup> International Seismological Centre

در زمین لرزه ۱۹۹۷ تکه‌های مختلف گسل اردکول دچار جابه‌جایی‌هایی شده‌اند، که میزان جابه‌جایی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. با داشتن میزان جابه‌جایی‌های صورت گرفته در این زمین‌لرزه در تکه‌های مختلف و با استفاده از فرمول و جایگذاری پارامترهای به‌دست‌آمده، نرخ گشتاور لرزه‌ای برای تکه‌های مختلف گسل اردکول به دست آمد (جدول ۱).

بر اساس نتایج حاصل از محاسبه گشتاور لرزه‌ای می‌توان دریافت که نرخ فعالیت گسل اردکول در بخش شمالی بیش‌تر از بخش جنوبی است. برای تأیید نرخ تغییرات گشتاور گسل اردکول، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مربوط به گسل و با استفاده از فرمول‌های گشتاور لرزه‌ای اقدام به محاسبه نرخ گشتاور لرزه‌ای و میزان آزاد شدن انرژی در کل گسل اردکول گردید (شکل ۵). با توجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که نرخ انرژی و گشتاور لرزه‌ای در بخش‌های بالایی گسل اردکول بیش‌ترین مقدار را داشته و این مقدار از سمت شمال به جنوب در حال کاهش است. بررسی تنش کولمب بر روی گسل اردکول نشان می‌دهد که بر اثر زمین‌لرزه‌های صورت گرفته از بخش شمالی و گسل دشت‌بیاض باربرداری (کاهش تنش) صورت گرفته و بر روی بخش‌های جنوبی بارگذاری (افزایش تنش) صورت گرفته است و سبب شده است مناطق جنوبی مستعد بروز زمین‌لرزه‌های بعدی باشند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۱).

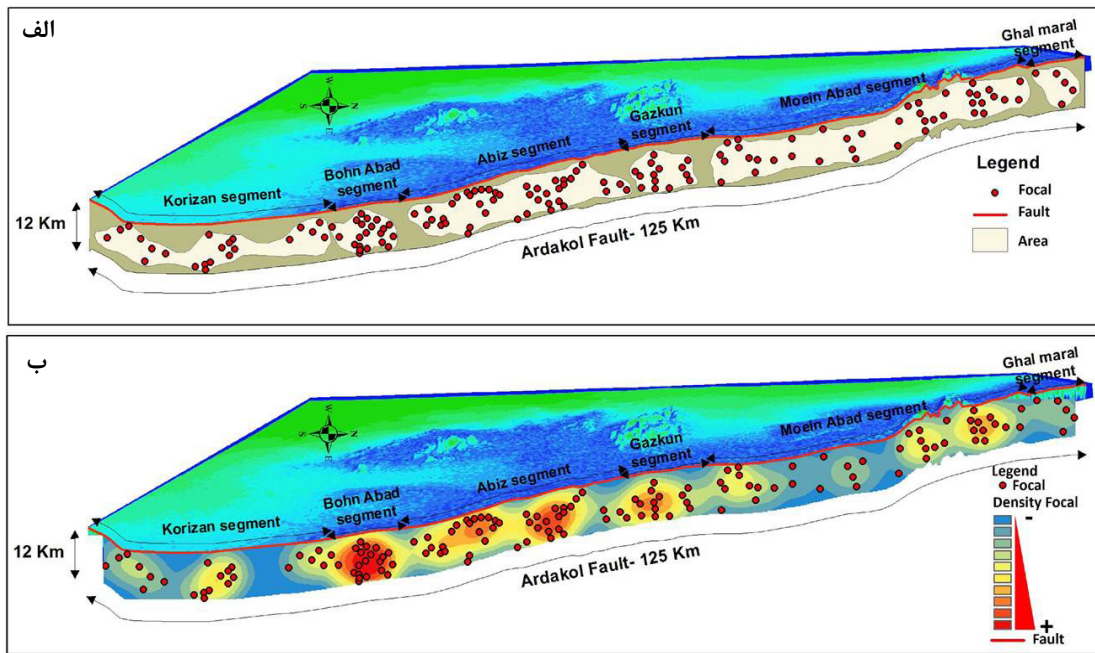
مختلف به‌طور جداگانه محاسبه گردید. به‌این‌ترتیب که بعد مشخص کردن داده‌های لرزه‌ای مربوط به هر تکه (زمین‌لرزه‌های رخ داده با بزرگی بیش‌تر از  $M_w 3$  بر روی هر یک از تکه‌های گسل اردکول)، با توجه به شیب گسل، عمق لایه لرزه‌زا (۱۲ km) و عرض پهنه برشی هر یک از تکه‌های گسل اردکول (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵)، داده‌های لرزه‌ای بر روی صفحه گسل با استفاده از نرم‌افزار متلب و GIS پلات گردید. سپس با تعیین محدوده مربوط به این مناطق آزاد شدن انرژی، مساحت هر یک از این مناطق دگرریختی مشخص گردید (شکل ۴ الف). برای تعیین مقدار جابه‌جایی گسل با استفاده از تعریف کمیت  $D$  عبارت است از میزان جابه‌جایی که یک گسل در طی هر رخداد زمین دارد، از زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ اردکول با بزرگی  $M_w 7/2$  استفاده گردید. این دگرریختی حاصل چهار رویداد لرزه‌ای بافاصله ۵۹ ثانیه در چهار تکه اصلی کریزان، بهن‌آباد، آبیز و قال‌مارال (از شش تکه اصلی) می‌باشد که سازوکار این چهار رویداد بر اساس داده‌های حل سازوکار کانونی با یکدیگر متفاوت است (بربریان، ۱۹۹۹). بررسی زمین‌لرزه‌های رخ داده بر روی تکه‌های گسل اردکول (کاتالوگ لرزه‌ای) نشان می‌دهد بیش‌ترین تمرکز مراکز زمین‌لرزه در بخش میانی تکه‌های می‌باشد این تأییدکننده‌ی فعالیت جداگانه تکه‌های گسل اردکول و فعال‌تر بودن بخش میانی هر تکه نسبت به حاشیه آن است (شکل ۴ ب).



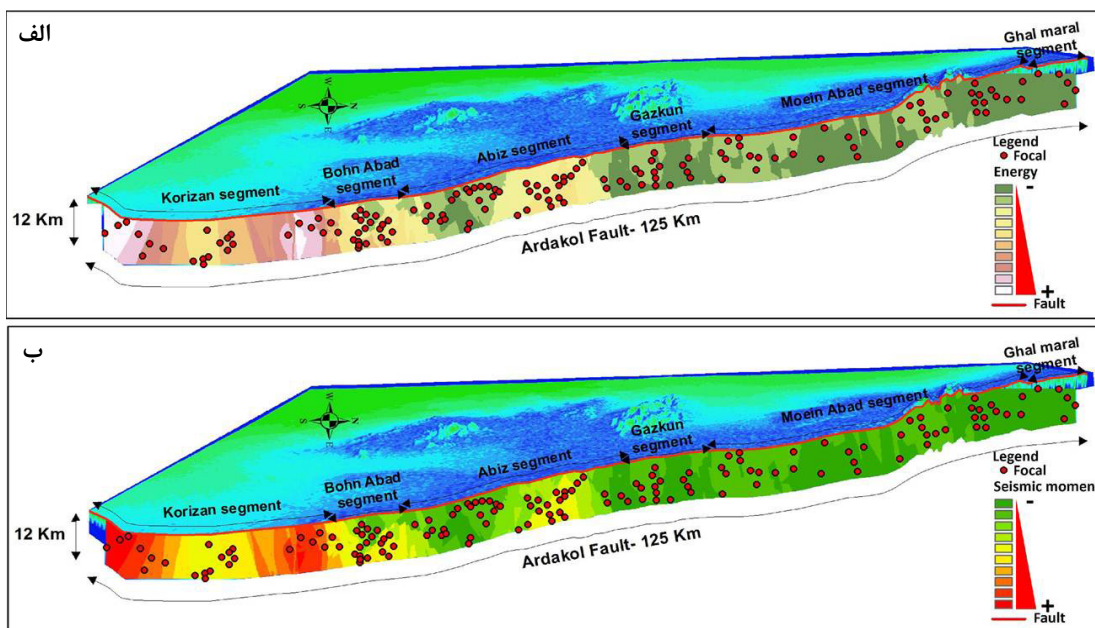
شکل ۳. نمایش عوامل مؤثر در محاسبه گشتاور لرزه‌ای.  $A$  مساحت سطح گسیختگی که از حاصل ضرب طول گسیختگی ( $L$ ) در ضخامت لایه لرزه‌زا ( $W$ ) به دست می‌آید،  $D$  میانگین جابه‌جایی در امتداد گسل و  $\mu$  ضریب برشی سنگ‌ها است (جانسون، ۱۹۸۰).

جدول ۱. گشتاور لرزه‌ای محاسبه‌شده برای هر تکه از گسل اردکول (روش ۱).

Fault	Area (Km <sup>2</sup> )	Offset Earthquake (cm)	Seismic moment
آبیز	229919.4	100	6.6E+17
کریزان	110501	140	4.09E+17
بهن‌آباد	45596.31	110	2.09E+17
گازکون	60361.78	62	1.32E+17
معین‌آباد	227894.6	88	6.91E+17
قال‌مارال	34116.15	210	3.5E+17



شکل ۴. الف) بلوک دیاگرام خروجی نرم‌افزار متلب با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پلات شده بر روی تکه‌های گسل اردکول (زمین‌لرزه‌های رخ داده در محدوده پهنه برشی تکه‌های گسل اردکول)، ب) بلوک دیاگرام تراکم داده‌های لرزه‌ای در هر تکه از گسل اردکول.



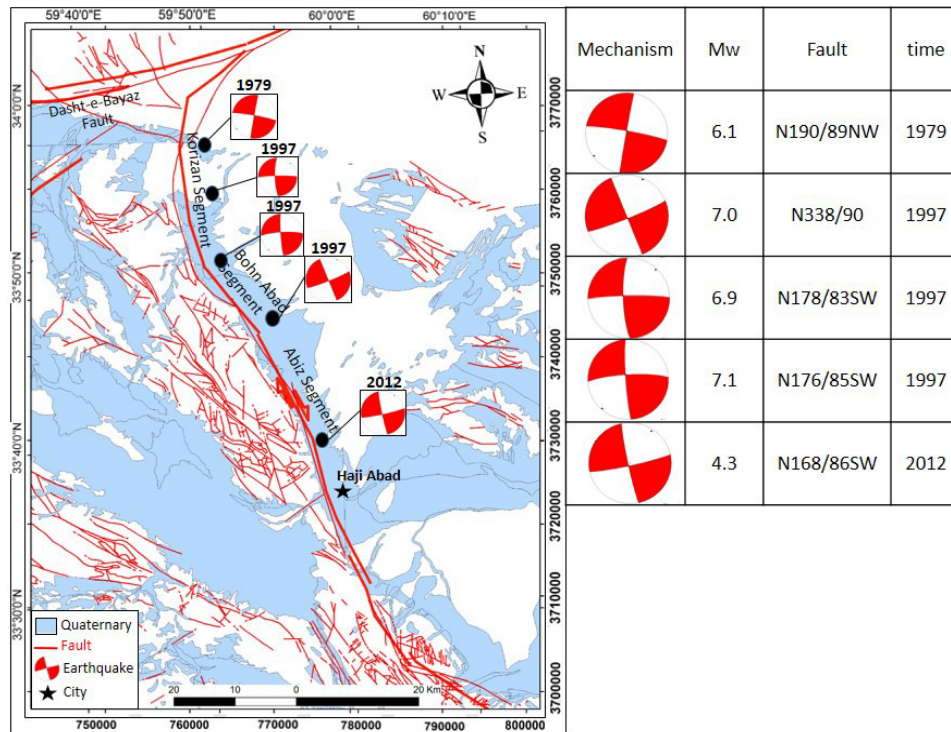
شکل ۵. الف) بلوک دیاگرام انرژی محاسبه شده برای کل گسل اردکول، ب) بلوک دیاگرام گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده برای کل گسل اردکول

استفاده از فرمول اقدام به محاسبه نرخ گشتاور لرزه‌ای هر تکه گردید. با استفاده از تحقیقاتی که قبلاً بر روی تکه‌های گسل اردکول صورت گرفته (خطیب و همکاران، ۱۳۷۸) و بررسی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به منطقه، طول تکه‌های مختلف تعیین گردید. (جدول ۲).

با بررسی داده‌های لرزه‌ای و با توجه به بروز زمین‌لرزه‌های اصلی (۱۹۷۹، ۱۹۹۷ و ۲۰۱۲) و همچنین مطالعات صورت گرفته بر روی تکه‌های گسل اردکول (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵)، عمق لایه لرزه‌زا برای منطقه ۱۲ کیلومتر در نظر گرفته شد. در این مرحله برای مقایسه گشتاور لرزه‌ای به‌دست‌آمده و بررسی صحت آن، با

البته در تکه قال مارال به دلیل عملکرد مؤلفه معکوس شیب گسل دارای مقدار کمتری است (شکل ۶، جدول ۳). پس از جایگذاری پارامترهای به‌دست‌آمده میزان گشتاور لرزه‌ای برای تکه‌های مختلف محاسبه گردید (جدول ۴).

برای محاسبه میزان تغییرات شیب گسل اردکول با استفاده از بازبیده‌های صحرایی، میزان شیب گسل اردکول در تکه‌های مختلف تعیین گردید. شیب گسل اردکول تقریباً ثابت و نزدیک به قائم است (N5W/88SW, R=5S) (خطیب و همکاران، ۱۳۷۸؛ حیدری، ۱۳۹۴).



شکل ۶. زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ داده در محدوده گسل اردکول به همراه سازوکار کانونی آن‌ها (خطیب و همکاران، ۱۳۷۸)

جدول ۲. طول هریک از تکه‌های گسلی اردکول (خطیب، ۱۳۷۸)

Fault	آبیز	کریزان	بهن‌آباد	گازکون	معین‌آباد	قال مارال
Length(Km)	32	28	8.8	20	3.4	12

جدول ۳. مشخصات ساختاری تکه‌های گسل اردکول براساس برداشت‌های صحرایی (خطیب و همکاران، ۱۳۷۸)

Fault	آبیز	کریزان	بهن‌آباد	گازکون	معین‌آباد	قال مارال
Fault	N169/89W	N185/88W	N175/87W	N183/87W	N178/88W	N173/69W

جدول ۴. گشتاور لرزه‌ای محاسبه‌شده با استفاده از طول هریک از تکه‌های گسل اردکول (روش ۲).

Fault	Offset Earthquake (cm)	Li (Km)	$\alpha^0$	Seismic moment
آبیز	100	32	89	6.6E+17
کریزان	140	28	81	4.09E+17
بهن‌آباد	110	8.8	86	2.09E+17
گازکون	62	20	85	1.32E+17
معین‌آباد	88	30.4	87	6.91E+17
قال مارال	210	12	55	3.5E+17

$\mu$  ضریب برشی،  $L_i$  طول گسل،  $\dot{S}$  نرخ لغزش گسل،  $\delta_i$  شیب گسل و  $H_S$  ضخامت لایه لرزه‌زای



## ۲-۱- برآورد نرخ گشتاور ژئودتیک در منطقه

طبق روابط ثابت شده کاسترو (۱۹۷۴) دو تنسور گشتاور لرزه‌ای و تنسور استرین با یکدیگر متناسب هستند اما از آنجا که تبدیل تنسور استرین به نرخ گشتاور لرزه‌ای منحصر به فرد نیست، لذا نتایج پژوهشگران مختلف با توجه به رابطه مورد استفاده متفاوت می‌باشد (نعمتی ۱۳۹۷). وارد (۱۹۹۸) این کمیت برای اولین بار با استفاده از داده‌های ژئودتیکی تعیین شد (پنجا و همکاران، ۲۰۰۶) و نرخ گشتاور ژئودتیکی را برای امریکا و اروپا از طریق فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\dot{M}_{\text{geodetic}} = 2\mu A H_s \dot{\epsilon}_{\text{max}}$$

$\mu$ : ضریب برشی سنگ‌ها (در پوسته  $3 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$  یا  $3 \times 10^{11} \text{ dyne cm}^{-2}$ )،  $A$ : مساحت سطح گسیختگی،  $H_s$ : عمق لایه لرزه‌زا و  $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$ : نرخ لغزش گسل.

با جایگزینی پارامترهای مربوط به گشتاور ژئودتیک، میزان این گشتاور برای تکه‌های گسلی اردکول محاسبه گردید. در این میان تکه کریزان با گشتاور ژئودتیک  $8.6E+16$  دارای بیش‌ترین و تکه قال مارال با  $5.79E+17$  کمترین نرخ گشتاور ژئودتیک را در منطقه مطالعاتی داشتند (جدول ۵).

## ۳-۱- برآورد نرخ گشتاور زمین‌شناسی در منطقه

نرخ گشتاور زمین‌شناسی با توجه به داده‌های گسلی و ضخامت لایه لرزه‌زا در منطقه به دست می‌آید (هانکس و همکاران، ۱۹۷۹). مقادیر به‌دست‌آمده نشان‌دهنده میزان پتانسیل و توانایی گسله‌ها برای آزاد نمودن انرژی الاستیک ذخیره شده است (پولی، ۱۹۸۳) این روش نسبت به دو روش دیگر محدوده زمانی بسیار طولانی‌تری از تاریخ زمین‌شناسی را شامل می‌شود.

به عبارتی گشتاور زمین‌شناسی، عبارت است از جابه‌جایی که توسط یک گسل در طول دوره زمین‌شناسی خود دارد. برای تعیین نرخ گشتاور زمین‌شناسی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدید صحرایی، بیش‌ترین جابه‌جایی صورت گرفته بر روی هر کدام از تکه‌های گسل اردکول مشخص گردید (جدول ۶). بر این اساس بیش‌ترین میزان جابه‌جایی بر روی گسل اردکول مربوط به سه تکه شمالی کریزان (شکل ۷)، بهن‌آباد و آبیز (شکل ۸) است.

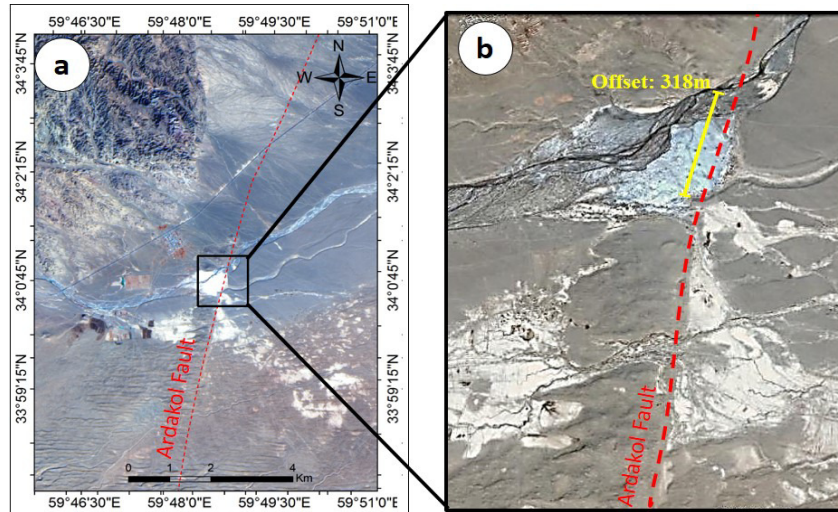
با استفاده از نرخ گشتاور زمین‌شناسی و میزان جابه‌جایی صورت گرفته بر روی گسل در طی بزرگ‌ترین رخداد زمین‌شناسی آن، می‌توان تعداد زمین‌لرزه‌هایی را که با آن بزرگی بر روی گسل رخ داده است به‌صورت فرضی بیان کرد. به همین دلیل با داشتن نرخ گشتاور زمین‌شناسی هر یک از تکه‌های گسل اردکول و میزان جابه‌جایی که بر روی تکه‌های آن در طی زمین‌لرزه سال ۱۹۹۹ با بزرگی  $7/3$  روی داد، حداقل تعداد زمین‌لرزه‌هایی را که با بزرگی بیش‌تر از ۷ بودند حدس زد (جدول ۷). بررسی شاخص‌های نوزمین‌ساختی (شاخص‌های در ارتباط با مخروط‌افکنه، حوضه‌های آبریز و بررسی‌های صحرایی) گسل اردکول نشان داد که میزان نتایج مقادیر به‌دست‌آمده نرخ استهلاك انرژی بر روی گسل اردکول به‌صورت خطی انجام شده است، اگرچه این استهلاك دارای مقادیر مختلفی است اما به‌طور کلی دارای یک توزیع خطی از سمت جنوب به شمال می‌باشد. افزایش میزان استهلاك به سمت جنوب نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان دگرشکلی در تکه‌های جنوبی و ذخیره انرژی در این بخش است ذخیره انرژی در بخش جنوبی سبب افزایش میزان خطر بروز زمین‌لرزه در بخش‌های جنوبی می‌باشد (خطیب و همکاران، ۱۳۸۵؛ حیدری، ۱۳۹۴).

جدول ۵. میزان گشتاور ژئودتیک محاسبه شده برای تکه‌های گسل اردکول

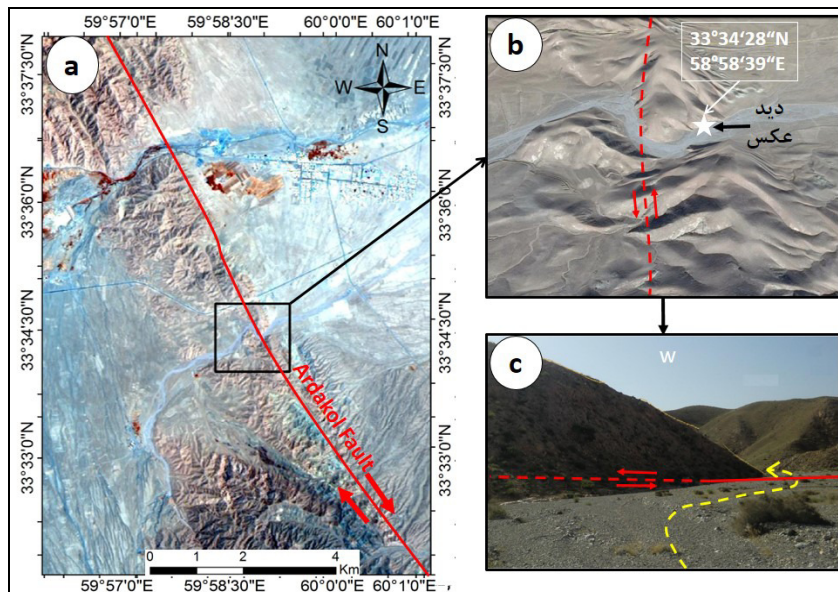
Fault	Area	$M_{\text{w geodatic}}$
آبیز	229919.4	5.79E+17
کریزان	110501	2.78E+17
بهن‌آباد	45596.31	1.15E+17
گازکون	60361.78	1.52E+17
معین‌آباد	227894.6	5.74E+17
قال مارال <sup>۱</sup>	34116.15	8.6E+17

<sup>۱</sup>  $4-17E+17 = 17 \times 10^{17}$





شکل ۷. (نگاره a): جابه‌جایی رودخانه به دلیل عملکرد راست‌گرد گسل اردکول. (نگاره b): انحراف مسیر اصلی رودخانه کریزان به اندازه ۳۱۸ متر



شکل ۸. (نگاره a): جابه‌جایی رودخانه حاجی‌آباد در بخش میانی تکه گسل آبیژ. (نگاره b): تصویر هوایی انحراف مسیر رودخانه حاجی‌آباد. (نگاره c): تصویر صحرایی محل انحراف راست‌گرد رودخانه حاجی‌آباد به اندازه ۲۴۰ متر

جدول ۶. میزان گشتاور زمین‌شناسی محاسبه‌شده برای تکه‌های گسل اردکول

Fault	آبیژ	کریزان	بهن‌آباد	گازکون	معین‌آباد	قال‌مارال
Offset Quaternary (m)	240	318	241	50	90	110

جدول ۷. تعداد زمین‌لرزه‌های محاسبه‌شده برای هر یک از تکه‌های گسل اردکول

Fault	Offset Eartquake (cm)	Offset Quaternary (m)	N
آبیژ	۱۰۰	۲۴۰	۲۴۰
کریزان	۱۴۰	۳۱۸	۲۲۷
بهن‌آباد	۱۱۰	۲۴۱	۲۱۹
گازکون	۶۲	۵۰	۸۰
معین‌آباد	۸۸	۹۰	۱۰۲
قال‌مارال	۲۱۰	۱۱۰	۵۲

## نتیجه‌گیری

برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای برای شش تکه اصلی گسل اردکول (کریزان ۲۸، بهن‌آباد ۸/۸، آبیژ ۳۲، گازکون ۲۰، معین‌آباد ۳۰/۴، قال‌مارال ۱۲ کیلومتر) به ترتیب ۴/۶۴، ۱/۵، ۶/۹، ۱/۱۲، ۶/۰۲ و ۲/۱۵ مترانیوتن به دست آمد. میزان گشتاور زمین‌شناسی به ترتیب ۳۱۸، ۲۴۱، ۲۴۰، ۵۰، ۹۰ و ۱۱۰ بوده که بر این اساس تعداد حداقل زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از ۷/۰ به ترتیب ۲۲۷، ۲۱۹، ۲۴۰، ۸۰، ۱۰۲ و ۵۲ است. محاسبه نرخ گشتاور ژئودتیک برای این تکه‌های به ترتیب ۲/۷۸، ۱/۱۵، ۵/۷۹، ۱/۵۲ و ۵/۷۴ به دست آمد. تغییرات نرخ گشتاور نشان داد که در بخش شمالی گسل اردکول نسبت به بخش جنوبی از میزان گشتاور بالاتری برخوردار بوده و میزان آزاد شدن انرژی در این بخش بیش‌تر است. آزاد شدن انرژی در گذشته به صورت زمین‌لرزه‌های بزرگی صورت گرفته که این زمین‌لرزه‌ها سبب فعال شدن شکستگی‌های جدیدی در کناره گسل اصلی شده است. با توجه به اینکه در بخش شمالی گسل اردکول انرژی بیش‌تر آزاد شده و کمتر صرف ذخیره و دگرشکلی شده است به همین دلیل امکان بروز زمین‌لرزه در این بخش کمتر بوده و در بخش‌های جنوبی به علت ذخیره انرژی مستعد بروز زمین‌لرزه‌های بعدی هستند از طرفی گسل اردکول در بخش شمالی توسط گسل دشت‌بیاض دچار یک قفل‌شدگی شده است از این رو در اثر بروز زمین‌لرزه بزرگ در این گسل، رشد گسل به سمت جنوب صورت گرفته و در بخش شمالی این رشد تنها به صورت مهاجرت صفحه گسل دیده می‌شود.

## منابع

- اسلامی، س. س.، خطیب، م. م. (۱۳۸۵) مهاجرت گسل در پهنه‌های گسلی امتدادلغز: مطالعه موردی: پهنه گسلی فعال اردکول- خاور ایران. فصلنامه علوم‌زمین، دوره ۱۶، شماره ۶۲، ۱۳۸-۱۵۷.
- اشتوکلین، ی.، افتخار نژاد، ج.، هوشمند زاده، ع. (۱۳۵۲) بررسی مقدماتی زمین‌شناسی در لوت مرکزی، شرق ایران. ترجمه توسط علی انتظام، افتخار نژاد. گزارش شماره ۲۲ سازمان زمین‌شناسی کشور. ص ۶۶.
- آقاباتی، ع. (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- حسن‌زاده، ح.، زارع، م.، قریشی، م. (۱۳۸۱) تغییرات تنش گسیختگی کولمب همراه با زمین‌لرزه سال ۱۳۷۶ شاسکوه قائنات (جنوب خراسان)، ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه کرمان.
- حیدری آقاگل، م.، خطیب، م. م.، موسوی، س. م. (۱۳۹۴) بررسی ساختاری شاسکوه با نگرشی بر لرزه‌خیزی منطقه، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بیرجند، ۲۲۰ ص.
- خطیب، م. م. (۱۳۷۸) رابطه بین عرض پهنه برشی و طول تکه‌های گسلی در گسل زمین‌لرزه‌ای اردکول، سومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال سوم، جلد سوم، ۱۸-۱.
- خطیب، م. م.، غلامی، ا. (۱۳۸۵) قطعه‌بندی گسل اردکول، دانشگاه بیرجند، جلد ۱، ۳۶-۱۹.
- رشیدی، ا.، خطیب، م. م.، جموری، ی.، موسوی، س. م.، نعمتی، م. (۱۳۹۶) برآورد پارامترهای دینامیکی زمین‌لرزه‌ها و نرخ گشتاور ژئودتیک در جنوب و باختر بلوک لوت، خاور ایران، مجله پژوهش‌های دانش زمین، سال هشتم، شماره ۳۰، ۱۹-۳۴.
- صبور، ن. (۱۳۸۹) کاربرد فراسنج‌های رسیدگی و ناهمواری در ارزیابی قابلیت لرزه‌زایی برخی از گسله‌های فلات ایران، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- فیروز مهجن‌آبادی، ق.، خطیب، م. م.، غلامی، ا. (۱۳۸۹) برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، زمین‌شناسی و ژئودتیک در شرق ایران، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم.
- نعمتی، م. (۱۳۹۷) بررسی روش‌های مختلف برآورد کرنش و تنش لرزه‌ای و برآورد نرخ کوتاه‌شدگی پوسته زمین در ایران با به کارگیری سازوکار زمین‌لرزه‌ها، دوفصلنامه علمی- ترویجی یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۲، شماره ۲۳، ۱۳۹-۱۲۸.
- نوگل‌سادات، م. ع. ا. (۱۳۷۳) نقشه تکتونیک ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Ambraseys, N. N., Melville, C. P. (1982) A history of Persian earthquakes. Cambridge University press, Cambridge, UK..
- Berberian, M. Jackson, J. A. Qorashi, M. Khatib, M. M. Priestley, K. Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M (1999) The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'enan) earthquakes (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. Geophys, 136: 671- 694.
- Gheytanchi, M. R., Bayram Nezhad, E (2004) Characteristics of the northwest seismological,

- network in iran, Journal of the Space Physics, 29 (2): 1-4.
- Hanks, T. C., Kanamori, H (1979) Amomentmagitude scale. Geophysics. Res, 84: 2348-2350.
- Johnson, C. E., and Hotton, L. K (1980) A study of aftershocks and prior seismicity, in the Imperial Valley, CA, earthquake of Oct. 15. 1979, U. S. Feological survey, Reston, Va., in press.
- Kalonganamori, H (1977) Seismic and aseismic slip along seduction zones and their tectonic implications. Maurice Ewing Ser, 1: 162-174.
- Pancha, a., Anderson, J. G., Krremer, C (2006) Comparison of seismic and geodetic scalar moment rates across the Basia and Rang province. Bulletine y of the seismological society of America, 96 (1): 11-32.
- Pulli, J. J (1983) Seismicity, earthquake mechanisms, and seismic wave attenuation in the northeastern united states, U. S. Feological survey, Reston, Va., in press.
- Tirrule, R., Bell, L. R., Griffins, R. J., and Camp, V.E (1983) The Sistan Suture zone of eastern Iran. G.S.A, 94: 134- 150.
- Walker, R. T. Jackson, J (2004) Active tectonic and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. Tectonics, 23: 1- 24.
- 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.
- Welles, D. L. and Coppersmith, K. J (1994) new empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture area and surface displacement, Bull. Seism. Soc. AM, 84: 974-1002.

## Estimation of motion variations by calculating and comparing Seismic moment, geological and geodetic moment in Ardakul fault parts (East of Iran)

M. Heydari Aghagol<sup>1\*</sup>, M. M. Khatib<sup>2</sup> and S. M. Mossavi<sup>3</sup>

1, 2, 3- Dept., of geology, Faculty of Science, Birjand University, Birjand

\* heydarimasoud8@gmail.com

Received: 2018/10/8 Accepted: 2019/1/9

### Abstract

Ardakol fault with the length of 125 km and dextral strike-slip mechanism is located in the northern part of Sistan suture zone. This fault caused an earthquake with the magnitude of 7/3 Mw in the region on 10/05/1997 and caused the longest coseismic rupture associated with earthquakes in recent Iranian centuries. Comparison of seismic moment, geological and geodetic values shows that the changes in moment ratio are directly related to the length of the fault, as the length of the fault increases, the moment increases as well, and as a result it releases higher levels of energy. The study of the moment and fractional changes for the Ardakul fault shows that the energy released rate in the northern part is higher than that of the southern section, which means that in the northern parts, more earthquakes occur and therefore the number of active faults is larger. In general, the seismic moment of the Ardakol fault is decreasing from north to south and as a result, more energy is stored in the South or deformation in the southern part, so, southern parts are in danger of more earthquakes.

**Keywords:** Ardakol, Sistan suture zone, seismic moment, geological moment