

## بررسی فعالیت زمین ساختی قطعات گسلی با استفاده از شاخص های ریخت زمین ساختی و فرکتال آبراهه ها مطالعه موردی: گسل فعال اسماعیل آباد (شرق ایران)

مسلم اسدی قجرلو<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۱</sup>، سید مرتضی موسوی<sup>۲</sup>، حسام یزدانپناه<sup>۱</sup>

۱. گروه زمین شناسی دانشگاه بیرجند، ایران  
۲. گروه پژوهشی علوم زمین دانشگاه بیرجند، ایران

### چکیده:

گسل اسماعیل آباد با روند شمالی- جنوبی ( $N10^{\circ}W, 80^{\circ}W$ ) (از شاخه های پهنه گسلی نهندان) با طول ۴۰ کیلومتر در ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب نهندان قرار دارد. بررسی نحوه توزیع فعالیت قطعات گسلی در راستای این گسل به عنوان یک گسل قطعه-قطعه و جهت مطالعه موردی زمین ساخت فعال در بخش میانی پهنه گسلی نهندان مورد توجه قرار گرفته است. بر مبنای ناپیوستگی هندسی ۷ قطعه گسلی (به ترتیب از شمال گسل به سمت جنوب S1 تا S7) در راستای سامانه گسل مشخص شده است. به علت برجسته بودن شاخص های ریخت زمین ساختی و نو زمین ساختی، جهت بررسی فعالیت تکتونیکی گسل اسماعیل آباد، تغییرات این شاخص ها در راستای قطعات گسلی محاسبه شده است که عبارتند از: میزان تغییرات شاخص سینوسیته جبهه کوهستان ( $1/19-1/03$ )، مسطح شدگی جبهه کوهستان ( $0/51-0/80$ )، نسبت پهنای به ارتفاع دره ( $2/13-0/98$ )، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره ( $0/58-0/30$ )، شاخص سینوسیته رود ( $1/13-1/06$ ) شاخص گرادیان طولی رودخانه ( $288-103$  متر)، و فرکتال آبراهه ها ( $2-1/982$ ). با توجه به ارزیابی قطعات مختلف سامانه ی گسلی اسماعیل آباد، قطعه گسلی حبیب (قطعه S3) به طول  $3/8$  کیلومتر، و روند  $N12^{\circ}W$  در بخش میانی گسل، فعالترین بخش گسل معرفی می گردند.

**کلید واژه:** قطعه بندی گسل، ریخت زمین ساخت، فرکتال آبراهه، گسل اسماعیل آباد، زمین ساخت فعال.

## ۱- مقدمه:

پهنه‌های گسلش بر اساس ویژگی‌های ساختاری و هندسی قابل تقسیم به بخش‌های متوالی تحت عنوان قطعات گسلی (Fault segment) هستند (Barka and Kadinsky, 1988). با توجه به اهمیتی که قطعات گسلی و حوضه‌های ارتباطی (Segment linkage) آنها (به عنوان نقاط بحرانی گسل) در لرزه خیزی، رشد گسل، توزیع کانسارهای معدنی و... دارند (Kaningham et al., 2007)، به عنوان یک مسئله اساسی، مورد توجه پژوهشگران مختلف می‌باشد. امروزه، قطعات گسلی و مرز بین آنها با کمک روش‌های مختلفی از جمله: مطالعه عمق پهنه لرزه خیز، خمش‌های فشاری یا کششی (Restraining and releasing bend)، گره‌ها (Tang et al., 1984) پرش‌های نردبانی شکل (En-echelon step)، انشعابات گسلی (Fault splay)، خاتمه گسلی (Fault termination) (Machette et al., 1991)، انقطاع در روند ساختاری پی‌سنگ، مکانیسم زمین لرزه، فعالیت‌های لرزه‌ای گذشته (Schwart and Coppersmith, 1984)، تحلیل فرکتالی (Sukmono et al., 1997)، ریخت زمین ساخت (Morphotectonic) و ... بررسی می‌شوند. برخی از این مطالعات عبارتند از: مطالعه شاخصه‌های ریخت زمین ساختی قطعات مختلف سامانه گسلی کوهبنان و تقسیم بندی آن به ۴ دسته خیلی فعال تا فعالیت کم (رادفر و همکاران، ۱۳۸۴)؛ معرفی سه قطعه گسلی در گسل قم-زفره در گستره میان زفره تا کاشان با استفاده از تفاوت‌های نو زمین ساختی، تغییر در روند عمومی پهنه گسلی و شواهد ساختاری (جمالی و همکاران، ۱۳۸۷)؛ شناسایی تعداد ۴ قطعه گسلی در راستای گسل ناپیند با استفاده از ناپیوستگی هندسی و بعد فرکتالی، و معرفی راندگی اسفندیار با استناد به داده‌های بعد فرکتالی و شاخصه‌های ریخت زمین ساختی، به عنوان فعالترین قطعه (محمد خانی، ۱۳۸۸)؛ تقسیم‌بندی گسل جنوب بیرجند بر اساس ناپیوستگی به ۶ قطعه گسلی، همچنین معرفی فعالترین قطعه با تکیه بر بعد فرکتالی، بررسی گستره سطحی، بلوغ و کرنش هر قطعه و نقشه‌های کنترولی شاخصه‌های ریخت زمین ساختی قطعات مختلف (عرب خزائی، ۱۳۸۹)؛ قطعه‌بندی گسل امتداد لغز چپگرد در بتیک جنوبی در اسپانیا با بررسی

طول رودخانه‌ها، تراکم آنها، جهت انحراف و طرح آبراهه‌ها و تاثیر تغییرات شیب توپوگرافی بر جهت‌گیری آبراهه‌ها (Both Rea et al., 2004)؛ معرفی ۵ قطعه گسل فعال و سه قطعه کوچکتر در حاشیه گرابن سیمیتلی در بلغارستان بر اساس تلفیق نقشه‌برداری صحرائی، تحلیل ساختاری و تصاویر ماهواره‌ای (Athanassios et al., 2005). هدف از انجام این پژوهش معرفی قطعات مختلف سامانه گسلی اسماعیل آباد و ارزیابی میزان فعالیت زمین ساختی قطعات مختلف آن می‌باشد. به طور کلی زلزله‌های اخیر در راستای گسل‌های نبوده و بیشتر در سرشاخه‌های گسلی تراکم دارند. همچنین در زلزله‌های تاریخی ثبت شده نیز در راستای این گسل گزارشی مشاهده نشده است. از طرفی با توجه به تغییرات ریخت زمین ساختی از قبیل بریده شده و جابه‌جایی آبراهه‌ها، حفر بالادست مخروطه افکنه‌ها، برخاستگی دوطرف گسل ... این گسل جزء گسل‌های فعال قرار دارد در صورتی که عملکر لرزه‌ای قابل توجهی دیده نمی‌شود. در این مقاله با قطعه بندی و بررسی زمین ساخت فعال در راستای قطعات مختلف مقدمه‌ای جهت بررسی دقیق تر عملکرد لرزه خیزی این گسل فراهم خواهد شد. همچنین این گسل هم راستا با زون گسلی نهپندان است و الگوی فعالیت آن می‌تواند به عنوان مدلی برای تحلیل فعالیت‌های لرزه‌ای گسل‌های شمالی جنوبی پهنه گسلی نهپندان باشد.

## ۲- جایگاه زمین ساختی و زمین‌شناسی گسل اسماعیل آباد:

زون زمین درز سیستان در شرق ایران (Tirrul et al., 1983)، حاوی پهنه گسلی پی سنگی نهپندان با روند شمالی- جنوبی و به طول ۷۰۰ کیلومتر می‌باشد (خطیب، ۱۳۷۷). از جمله سرشاخه‌های این پهنه گسلی، گسل فعال اسماعیل آباد می‌باشد (Nogole Sadat, 1978). گسل اسماعیل آباد با طول ۴۰ کیلومتر، سازوکار امتدادلغز راستگرد با مولفه جزئی معکوس و موقعیت کلی صفحه گسلی  $N10^{\circ}W, 80^{\circ}W$  (موسسوی، ۱۳۷۸) در ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب نهپندان رخنمون دارد. این گسل در بخش میانی زون زمین درز سیستان و در کمپلکس نه قرار دارد (شکل ۱).

واحدهای سنگی مرتبط با گسل اکثراً به سن ائوسن و جوانتر بوده که شامل: رسوبات عهد حاضر (Q<sup>1</sup>)، کنگلومرای نئوژن (Ng<sup>cm</sup>)، شیل‌های ائوسن (E<sup>sh</sup>)، واحد‌های آذرین بازالتی (E<sup>ob</sup>) و آندزیتی (a) و... می‌باشد (شکل ۱).

### ۳- قطعه بندی گسل اسماعیل آباد:

پهنه‌های گسلش براساس ویژگی‌های ساختاری و هندسی به یک سری بخش‌های پشت سرهم تحت عنوان قطعات گسلی تقسیم می‌شوند (Barka and Kadinsky- Cade, 1988). مطالعه امتداد، پهنه گسلی، توپوگرافی دوطرف گسل و ... در تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و نقشه‌های زمین‌شناسی، نشان دهنده قطعه-قطعه بودن گسل اسماعیل آباد است. به دلیل فقدان داده‌های لرزه‌ای و ژئوفیزیکی مناسب از گسل اسماعیل آباد و رخنمون بسیار واضح این گسل در سطح زمین، از روش ناپیوستگی هندسی جهت قطعه‌بندی گسل اسماعیل آباد استفاده شده است. ناپیوستگی‌های هندسی به طور خلاصه شامل: خم گسلی، پرش گسلی، انشعاب گسلی و اختتام گسلی می‌باشد (Sanders and Magistrale, 1977). در خم‌های گسلی، بخش‌های خمیده‌ای، دو بخش گسل با امتداد غیر یکسان را به هم وصل می‌کند. در پرش‌های گسلی، یک قطعه گسل در آن پایانه قطعه گسل نردبانی شکل بعدی با همان راستا در آن آغاز می‌شود (Twiss and Moores, 1992). لذا بر اساس ناپیوستگی هندسی، گسل اسماعیل آباد به هفت قطعه گسلی تقسیم شده است. کلیه قطعات مولفه راستالغز راستگرد با مولفه جزئی معکوس داشته و از شمال تا جنوب عبارتند از:

### ۴- ارزیابی فعالیت گسل اسماعیل آباد:

با توجه به اینکه تفاوت سنگ شناسی، در مقدار شاخصه‌های ریخت زمین‌ساختی تاثیر گذار می‌باشد، قطعات گسلی با توجه به سنگ شناسی محل رخنمون، به دو گروه مختلف تقسیم شده‌اند. گروه ۱: قطعات گسلی (S1, S3 & S4) که از میان شیل‌های ائوسن و واحدهای سخت‌تر رخنمون دارند و گروه ۲: قطعات گسلی (S2, S5, S6 & S7) که از میان واحدهای کنگلومرای و عهد حاضر عبور می‌کنند.

### ۴-۱ شاخصه‌های ریخت زمین‌ساختی:

در سالهای اخیر محققین در کنار بررسی و شواهد کیفی، سعی در کمی نمودن رفتار حرکات زمین‌ساختی مناطق داشته و در این راستا نشانگرهای گوناگونی را تحت عنوان علائم و شواهد ریخت زمین‌ساختی ارائه نموده‌اند. به عبارت دیگر، ریخت زمین‌ساخت دانش ارتباط میان

قطعه گسلی حییب (S3): این قطعه گسلی روند N8°W داشته و در میان کنگلومرای نئوژن و رسوبات عهد حاضر رخنمون دارد، طول تقریبی ۳/۸ کیلومتر است (شکل ۲- ج و جدول ۱).

قطعه گسلی شوراب (S4): این قطعه گسلی طول تقریبی ۴/۳ کیلومتر، روند N7°W داشته و در میان کنگلومرای نئوژن و رسوبات عهد رخنمون دارد (شکل ۲- د و جدول ۱).

قطعه گسلی سیکویی (S5): این قطعه گسل با روند N2°W و طول تقریبی ۳ کیلومتر در میان کنگلومرای نئوژن و رسوبات عهد حاضر رخنمون دارد (شکل ۲- ه و جدول ۱).

قطعه گسلی مرد عرب (S6): این قطعه گسلی در میان واحدهای سخت ائوسن رخنمون دارد. طول تقریبی آن ۶/۵ کیلومتر است و روند N10°W دارد (شکل ۲- ی و جدول ۱).

قطعه گسلی بیچند (S7): طول تقریبی این قطعه گسلی ۶ کیلومتر و موقعیت صفحه گسلی به صورت N0°E, 75W و ریک بردار لغزش صفحه گسل Rake=40°N است. این قطعه گسلی در میان واحدهای سخت ائوسن رخنمون دارد (شکل ۲).

قطعه گسلی حاجی آباد (S1): این قطعه گسلی با روند N5°W، و طول تقریبی ۶ کیلومتر در میان کنگلومرای نئوژن رخنمون داشته و شمالی‌ترین قطعه گسل اسماعیل آباد است (شکل ۲- الف و جدول ۱).

قطعه گسلی اسماعیل آباد (S2): طول تقریبی این قطعه گسلی ۴/۶ کیلومتر بوده و در میان واحدهای سخت ائوسن رخنمون دارد. روند این قطعه گسلی N5°W می‌باشد (شکل ۲- ب و جدول ۱).

که در آن  $L_f$  طول سطح در پیشانی کوهستان و  $L_s$  طول خط مستقیم پیشانی کوهستان است (شکل ۷). در جبهه کوه های فعال درصد رخ دار شدن نزدیک به ۱۰۰٪ بوده و با کاهش فعالیت مقدار  $F\%$  نیز کاهش می یابد (Welles and Bullard, 1988).

با توجه به این شاخص، قطعه گسلی سیکویی (S5) به ۶۴/۶۹٪ از میان گروه ۱ و قطعه گسلی حیب (S3) با مقدار ۸۰٪ از میان گروه ۲ به عنوان فعالترین قطعات معرفی می شوند میانگین  $F\%$  برای کل گسل اسماعیل آباد برابر ۶۴/۸۳٪ است (جدول ۲).

**۲- شاخص های مورفولوژی مقطع دره:** در این میان نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (Valley Floor to Valley Height Ratio) و شاخص نسبت  $V$  (Ratio) از مهمترین شاخصه ها هستند.

۲- الف) شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره به صورت زیر محاسبه می شود:

$$VF = 2V_{fw} / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]$$

$VF$  نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن و  $V_{FW}$  پهنای کف دره به متر و  $Eld$ ,  $Erd$  به ترتیب ارتفاع دیواره سمت راست و دیواره سمت چپ دره و  $Esc$  ارتفاع کف دره از سطح آب های آزاد می شود. زیاد بودن شاخص  $V_f$  نشان دهنده بالا آمدگی کم کوهستان است؛ در حالی که کم بودن مقدار  $V_f$  منعکس کننده دره های عمیق است که در آن رودخانه ها به عمل حفر بستر خود می پردازند و معمولاً همراه بالا آمدگی زمین ساختی می باشد (Burbank and Anderson, 2001).

طبق اندازه گیری های صورت گرفته این شاخص، قطعه گسلی اسماعیل آباد (S2) از گروه ۱ و قطعه گسلی حیب (S3) از گروه ۲ به عنوان فعالترین قطعات معرفی می شوند (شکل های ۳ و ۴ و جدول ۲).

۲- ب) محاسبه شاخص نسبت  $V$ : این شاخص به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_v/A_c = V$$

در این فرمول  $AV$ ، مساحت دره در مقطع قائم و  $AC$ ، مساحت نیم دایره محاط کننده دره است. مقادیر بالای این

ساختارهای زمین شناسی و ریخت موجود روی زمین است که باعث شناخت بهتر ما از فرآیندهای تکتونیکی با کاربرد اصول ریخت زمین ساخت خواهد شد (Adams et al., 1999). به منظور ارزیابی درجه نسبی فعالیت زمین ساختی یک ناحیه معمولاً نتایج حاصل از چند شاخص با یکدیگر ترکیب می شوند.

شاخص های ریخت زمین ساختی که در ارزیابی فعالیت زمین ساختی قطعات گسلی اسماعیل آباد استفاده شده عبارتند از:

### ۱- شاخص های مورفولوژی جبهه کوهستان: از این

دسته شاخصه ها می توان به شاخص سینوسیتی جبهه

کوهستان (Mountain Front Sinosity) و شاخص مسطح شدگی جبهه کوهستان (Percent Faceting of Mountain Front) اشاره کرد.

۱- الف) شاخص سینوسیتی پیشانی کوهستان به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s$$

که در این رابطه  $S_{mf}$  سینوسیتی پیشانی کوه،  $L_{mf}$  طول پیشانی کوهستان در مسیر اتصال کوهستان-آبرفت و  $L_s$  طول خط مستقیم پیشانی کوهستان می باشد. پیشانی کوه هایی که با بالا آمدگی فعال همراهند، تقریباً مستقیم است ( $S_{mf} \approx 1$ ). افزایش این کمیت عکس حالت فوق یعنی غلبه فرسایش بر بالا آمدگی می باشد و مفهوم آن کاهش شدت فعالیت زمین ساختی است (Bull and Mc Fadden, 1997).

مقدار این شاخص برای قطعات مختلف بین ۱/۴ - ۱/۰۳ تغییر کرده و برای کل گسل نیز ۱/۱۵ می باشد. این مقادیر نشان دهنده قرار گیری گسل اسماعیل آباد در گروه یک فعالیت زمین ساختی است. از گروه اول، قطعه گسلی مرد عرب (S6) و از گروه دوم قطعه گسلی حیب (S3) به عنوان فعالترین قطعات معرفی می گردند (شکل های ۳ و ۴ و جدول ۲).

۱- ب) مسطح شدگی پیشانی کوهستان به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Facet\% = L_f / L_s$$

۳-ب) محاسبه شاخصه گرادیان طولی رودخانه: نحوه محاسبه این شاخص به صورت زیر است:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L$$

در آن،  $\Delta H$  اختلاف ارتفاع دو نقطه از رودخانه،  $\Delta L$  فاصله آن دو نقطه،  $L$  فاصله وسط آن قطعه تا خط تقسیم آب است. شاخص شیب رود برای نشان دادن تغییرات گرادیان نیمرخ طولی رود مورد استفاده قرار می‌گیرد و باور بر این است که عامل بازتاب دهنده میزان قدرت رودخانه می‌باشد. شاخص نسبت به تغییرات شیب بسیار حساس است و برای ارزیابی میزان فعالیت زمین‌ساختی، مقاومت سنگ و مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر بالای  $SL$  نشان از پیشانی کوهستان فعال است (Hack, 1996; Keller; Pinter, 1996). (1973).

مقدار میانگین شاخصه گرادیان رودخانه برای کل گسل اسماعیل آباد برابر ۲۸۸ متر است. طبق داده‌های این شاخص، در قطعات موجود در واحدهای سخت ائوسن، قطعه گسلی مرد عرب (S6) و در قطعات موجود در واحد های کنگلومرای نئوژن و رسوبات عهد حاضر، قطعه گسلی شوراب (S4) به عنوان فعالترین قطعه معرفی می‌شوند (جدول ۳).

### ۴-۲ هندسه فرکتال آبراهه‌ها در راستای گسل

#### اسماعیل آباد:

هندسه فرکتال نمایش کمی الگوی پیچیده گسل‌ها را میسر می‌سازد (Mandelbrot, 1982). در پهنه‌های گسلی، بعد فرکتالی با پارامترهای ساز و کار گسلش چون: وضعیت تنش، شدت گسلش و تراکم انرژی شکستگی رابطه دارد (Sukmono et al., 1997). تفاوت در ابعاد فرکتالی نشانگر تفاوت در زمین‌ساختی قطعات مختلف یک پهنه گسلش بوده و امکان تفکیک قطعات مختلف از روی تفاوت ابعاد فرکتالی فراهم می‌باشد. توزیع فرکتالی گسل‌ها و یا ابعاد فرکتال یک گسل بیانگر نحوه فعالیت گسل و گسترش آن می‌باشد (Turcotte, 1992). مدل‌های فرکتالی زیادی برای توزیع گسل‌ها در سطح پوسته زمین در یک منطقه ارائه شده است (King, 1986; Turcotte, 1988). در این میان گویا ترین روش را برای توزیع فرکتالی

شاخص، نشان دهنده دره‌های عریض است و هر چه این مقدار به ۱ نزدیک و یا کوچکتر از ۱ شود از عرض دره کم و بر عمق آن افزوده می‌گردد که بیانگر عمل حفر آب‌های جاری و ایجاد دره‌های تنگ و عمیق است و نشانگر شدت فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد (Bull and Mc Fadden, 1997).

مقدار شاخص ۷ برای گسل در راستای قطعات مختلف گسلی محاسبه (جدول ۲) و در دو گروه، واحد‌های سخت ائوسن و واحد‌های کنگلومرایی و رسوبات عهد حاضری مقایسه شد. در گروه اول، قطعه گسلی اسماعیل آباد (S2) و در گروه دوم، قطعه گسلی حیب (S3) به عنوان فعالترین قطعات معرفی می‌گردند (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۲).

### ۳- شاخص‌های مورفولوژی کانال رودخانه

**های اصلی:** شاخص سینوسیته رود (River Channel sinuosity index) و شاخصه گرادیان طولی رودخانه ( $SL$  Index) از جمله شاخصه‌های مورفولوژی رودخانه هستند.

۳-الف) محاسبه شاخص سینوسیته رود: این شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = C / V$$

در این فرمول  $V$ ، طول مستقیم مسیر محاسبه پیچ و خم و  $C$ ، طول پیچ و خم محاسبه شده است. بطور کلی در نواحی با شیب زیاد که می‌تواند به علت فعالیت زمین‌ساختی زیاد باشد، رودخانه دارای کانال و مسیری مستقیم و شاخص پیچ و خم رودخانه به یک نزدیک می‌شود. و با کاهش مقدار شیب، رودخانه به حالت مناندری و شاخص پیچ و خم رود از یک بیشتر می‌شود. هرچه این مقدار به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده فعالیت بیشتر زمین‌ساختی است (Adams et al., 1999).

مقدار میانگین سینوسیته رود برای کل گسل اسماعیل آباد برابر ۱/۰۸ است. طبق داده‌های این شاخص، در قطعات موجود در واحدهای سخت ائوسن، قطعه گسلی مرد عرب (S6) و در قطعات موجود در واحدهای کنگلومرای نئوژن و رسوبات عهد حاضر، قطعه گسلی حاجی آباد (S1) به عنوان فعالترین قطعه معرفی می‌شوند (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۳).

گسل، محاسبه ضریب D ( بعد فرکتالی) طی مراحل محاسبه عبارتند از:

- ترسیم ساختار مورد استفاده جهت تحلیل فرکتالی که به عنوان نمونه می توان به آبراهه اشاره کرد؛

- شبکه بندی منطقه مورد مطالعه به اندازه های مربعی (s)؛

- شمارش تعداد مربع های حاوی ساختار مورد نظر (Ns) در هر مقیاس های مختلف (برای محاسبه بعد فرکتالی لازم است که حداقل در پنج شبکه با طول های متفاوت، مقدار (Ns) شمارش شود.)؛

- ترسیم نموداری با محور عرضی برابر LOG(Ns) و محور طولی برابر LOG(1/s) و در نهایت محاسبه بعد فرکتالی از رابطه زیر:

$$\text{LOG}(N_s) = a + D \text{LOG}(1/S)$$

در این معادله، D معدل ضریب خط و برابر بعد فرکتالی است (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶؛ Hiraia, 1989). با در نظر گرفتن وضعیت سنگ شناسی یکسان، هرچه بعد فرکتالی بیشتر باشد، نشان دهنده آرامش حوضه و کاهش فعالیت زمین ساختی قطعات گسلی است (Turcotte, 1988).

در مرحله اول، بعد فرکتالی برای کل گسل محاسبه محاسبه شده است. برای محاسبه بعد فرکتالی آبراهه برای کل گسل، ابتدا آبراهه های مجاورت گسل در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، در هفت مرحله شبکه بندی و تعداد مربع های حاوی آبراهه در هر مرحله شمارش گردید. سپس با محاسبه مقدار لگاریتمی بعد فرکتالی در نمودار لگاریتمی به مقدار ۱/۶۸۱۹ و ضریب همبستگی ۰/۹۹۵۷ بدست آمد (شکل ۶، شکل ۷ و جدول ۴).

سپس بعد فرکتالی در طول گسل محاسبه شده است. برای محاسبه بعد فرکتالی در طول گسل اسماعیل آباد، ابتدا الگوی پراکندگی آبراهه های مجاور گسل اسماعیل آباد، به ۵ مربع اصلی (Na) در شمال تا مربع اصلی Ne در جنوب گسل) با طول اضلاع هر کدام ۵ کیلومتر تقسیم و هر کدام در ۵ مرحله شبکه بندی گردید. سپس برای هر مربع اصلی به روشی که در بالا شرح داده شده، بعد فرکتالی محاسبه شد. آبراهه های Na، Nd و Ne در واحد های سخت ائوسن و غالب آبراهه های Nb و Nc از واحد های کنگلومرایی و رسوبات عهد حاضری عبور می کند. در نتیجه در گروه های جداگانه مقایسه خواهند شد. در گروه اول Na کمترین

بعد فرکتالی را داشته و معادل قطعه حاجی آباد است. در گروه دوم، Nb کمترین بعد فرکتالی را داشته و معادل قطعه اسماعیل آباد و حبیب است. در نتیجه با توجه به این شاخص، این قطعات فعالترین بخش گسل اسماعیل آباد هستند (شکل ۸ و جدول ۵).

به منظور مقایسه ابعاد فرکتالی در دو سمت گسل، محدوده عبور گسل اسماعیل آباد به ۲۶ شبکه با ابعاد یکسان و طول ضلع اولیه ۳ کیلومتر تقسیم گردید ۱۳ قسمت در سمت غربی (Nw1-13) و ۱۳ قسمت در سمت شرقی (Ne1-13). هر کدام از این مربع ها در ۵ مرتبه مورد شبکه بندی قرار گرفته اند. در نهایت، نمودار لگاریتم-لگاریتم هر کدام ترسیم و بعد فرکتالی در هر یک از این شبکه ها محاسبه شد (شکل ۹ و جدول ۶).

در این مرحله نیز مقایسه بخش شرقی و غربی در سنگ شناسی یکسان بایستی صورت پذیرد. از ۱۳ جفت مربع تعداد ۶ مربع دارای واحد سنگی مشابه است. که در ۵ مورد از این شش مربع، قسمت شرقی گسل بعد فرکتالی کمتر و در نتیجه فعالیت بیشتری دارد.

با در نظر گرفتن تشابه سنگ شناسی، بیشترین تفاوت بعد فرکتالی به مقدار ۰/۵۴۹، در مربع اصلی ۵ (در بخش میانی گسل) و کمترین تفاوت نیز برابر ۰/۰۰۲، در قطعه گسلی حاجی آباد در انتهای شمالی گسل می باشد. به عبارتی دیگر تفاوت در عرض بعد فرکتالی در بخش میانی گسل بیشترین مقدار است.

به منظور مقایسه قطعات گسلی مختلف بعد فرکتالی هر کدام از هفت قطعه گسلی اسماعیل آباد در یک مربع اصلی قرار داده و محاسبه شده است. در مرحله بعد، هر کدام از این مربع ها در ۵ مرحله، شبکه بندی و بعد فرکتالی هر قطعه گسلی محاسبه شد.

مربع های در برگیرنده قطعات گسلی با توجه به واحد های سنگی در بر گیرنده به دو گروه تقسیم شدند. در گروه اول که واحد های سخت ائوسن را در بر می گیرند، قطعه گسلی بیچند و در گروه دوم که کنگلومرایی نئوزن و رسوبات کوآتر نری را پوشش می دهند، قطعه گسلی اسماعیل آباد کمترین بعد فرکتالی و در نتیجه بیشترین میزان فعالیت زمین ساختی را خواهند داشت (جدول ۷).

## ۵- نتیجه گیری:

گسل اسماعیل آباد با استفاده از ناپیوستگی هندسی به ۷ قطعه گسلی (S1 تا S7) با سازوکار راستگرد با مولفه جزئی معکوس تقسیم شده است. فعالیت زمین‌ساختی گسل اسماعیل آباد و قطعات گسلی آن بر مبنای شاخصه‌های ریخت زمین‌ساختی بررسی شده است. این شاخصه‌ها و مقدار آنها برای گسل اسماعیل آباد عبارتند از: شاخص سینوسیته جبهه کوهستان (۱/۱۵۴)؛ مسطح شدگی جبهه کوهستان (۰/۶۴/۸۲)؛ نسبت پهنای به ارتفاع دره (۱/۵۲)؛ نسبت V (۰/۴۳/۴۵)؛ شاخص سینوسیته رود (۱/۶۸) و شاخص گرادیان طول رودخانه (۲۸۸ متر). همچنین از فرکتال آبراهه‌ها جهت محاسبه بعد فرکتالی گسل اسماعیل آباد و قطعات گسلی آن استفاده شده و مقدار آن برای کل گسل

اسماعیل آباد ۱/۶۸۹ می‌باشد. مقایسه شاخصه‌های ریخت زمین‌ساختی و بعد فرکتالی قطعات گسلی مختلف اسماعیل آباد نشان می‌دهد که قطعه گسلی حیب (قطعه گسلی S3) یا بخش میانی گسل به عنوان فعالترین قطعه معرفی می‌گردد. بخش شرقی گسل نیز نسبت به بخش غربی فعالیت بیشتری دارد.

**قدردانی:** از دانشجویان کارشناسی ارشد دانشگاه بیرجند، آقایان محمد نادى، حیدر جلیلیان، مهدی یوسفی، مصطفی مژدی و میثم مهدی پور، بخاطر همراهی در برداشت‌های صحرائی و همچنین آقایان محمد امیر علیمی و بابک طاهرخانی دانشجویان دکتری دانشگاه بیرجند تشکر می‌نمایم.

## منابع:

- ارجمندزاده ر.، کریمپور م. ح.، مظاهری س. ا.، سانتوز ژ. ف.، مدینا ج.، همام س. م.، ۱۳۸۹. فرورانش دوسویه نامتقارن؛ نظریه جدید در مورد محیط تکتونوماگمایی و متالورژی بلوک لوت، شرق ایران؛ نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- افتخارنژاد ج.، ۱۳۵۹. تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲
- آقاناتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- جمالی، ف.، حسامی آذر، خ.، قرشی، م.، ۱۳۸۷. گسل‌های جنب و قطعه‌بندی گسلی قم-زفره در گستره میان زفره تا شمال کاشان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۸.
- خطیب، م.، ۱۳۷۷. هندسه پایانه گسل‌های امتداد لغز (با نگاهی ویژه به گسل‌های خاور ایران)، رساله دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی.
- رادفر، ش.، پور کرمانی، م.، ۱۳۸۴. ریخت زمین‌ساخت گسل کوهبنان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۸.
- شهریاری، س. و خطیب، م.، ۱۳۷۶. تحلیل فرکتالی سیستم گسل نهبندان، فصلنامه علمی - پژوهشی علوم زمین، شماره ۲۴-۲۳.
- فخاری، س.، ۱۳۸۵. تحلیل خطر زمین لرزه با استفاده از GIS و روش محاسباتی و بررسی چین خوردگی در ارتباط با
- گسلش در دشت بیرجند، پایان‌نامه تحصیلی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند. عرب خزائی، م.، ۱۳۸۹. تحلیل لرزه زمین‌ساختی گسل جنوب بیرجند به کمک شواهد ریخت زمین‌ساختی و نوزمین‌ساختی، پایان‌نامه تحصیلی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند. محمد خانی، س.، ۱۳۸۸. قطعه‌بندی پهنه گسلش نای‌بندان (چهار گوش نایبندان)، پایان‌نامه تحصیلی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.
- Adams, K. D., Wesnousky, S.G., and Bill, B. G., 1999. Isostatic rebound, active faulting, and potential geomorphic effects in the Lake Lahontan basin, Nevada and California, Geological Society of America Bulletin, V. 111, p. 1739-1756.
- Athanassios G., Stefan S., George D., Nikolai D., Sotiris S., Christina T., Georgi F., and Spyros P., 2005. Active fault segmentation in southwest Bulgaria and Coulomb stress triggering of the 1904 earthquake sequence, Journal of Geodynamics, V. 40, p. 316-333.
- Barka, A. A. and Kadinsky-cade, k., 1988. Strike-slip geometry in Turkey and its influence on earthquake activity, Journal of Tectonics V. 7, p. 663-684.
- Booth-Rea, G., Azanon J-M., Azor, A., Garcia-Duen, V., 2004. Influence of strike-slip fault segmentation on drainage evolution and topography a case study: the Palomares Fault Zone (southeastern Betics, Spain), Journal of Structural Geology V. 26, p. 1615-1632.
- Bull, W.B. and MC Fadden, L. D., 1997. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. Proceeding of 8th Annual Geomorphology Symposium, New York.
- Dickinson, W. R., and Selly, D. R., 1979. Structure and stratigraphy of forearc region: American

- Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 63, p. 2-31.
- Hack, J. T., 1973. Stream – profile analysis and stream – gradient indices: United States Geological Survey Journal Research, V. 1, P. 421-429.
- Hiraia. T., 1989. Fractal Dimantion of fault system in Hapan: Fractal structure in Roke fracture Geomtry at various scales, Journal of Pure and Applied Geophysics. Vol. 131, No. 1, p. 157-170.
- King, G., 1986. Speculation on the geometry of the initiation and termination process of earthequack ruptre and its relation to morphology and geological structure, Journal of Pure and Aplied. Geophysics., Vol. 124, p. 567-85.
- Keller, E. A and Pinter, N., 1996. Active tectonic (Earthquake, Uplift and landscape). Prentice – Hall Inc.
- King, G., and Yielding, G., 1984 .Initiation propagation and termination in the 1980 EL Asnam (Algeria) earthequack Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society Vol. 77, N. 3, p. 915-933.
- Mandelbrot. B. B., 1982. The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman, San Francisco, Californua., Moore, G. F., Billman, H. B., Hehanussa, P. E., and Karig, D. E., and Karig, D. E., 1980. Sedimentology and paleobathymetry of neogene trench-slope deposits, Nias Island, Indonesia: Journal of Geology, V. 88, p. 161-180.
- Sanders. C. and Magistrale. H., 1997. Segmentation of the northen San Jacinto Fault Zone, southern California. Journal of Geophysich. Research. Vol. 102, No. B12, PP. 27453-27464.
- Sukmono, M. T. Z., Hendrajaya, L., Kadir, W. G. A., Santoso, D. and Dubois, J., 1997. Fractal pattern of the Sumatra fault seismicity and its possible Aplication to earth quale prediction Bulletin of seismological society of America V.87, p. 1685-1690.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J., and Camp V. E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran, Geological Society of America. Bulletin. V. 94, p. 134– 150.
- Nogole Sadat, M. A., 1978. Les zones de decrochement et les virgations structurals en Iran. Coceequences des resultants de l'analyse structural de la region de Qom, [Ph.D.These]: University of Grenoble, 201p.
- Twiss, R. J., Moores, E. M., 1992. Structural geology. University of California at Davis, freeman and company. New yourk.
- Turcotte, D. L., 1992. Fractals and chaos in Geology and Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Turcotte, D. L., 1988. Fractals in Geology and Geophysics, Pure and Applied Geophysics, V. 131, p. 171-196.
- Welles, S. G. and Bullard, T. F., 1988. Regional variation in tectonic geomorphology along a segmented convergent. Plate boundary Pacific coast of cista rica: Geomorphology. V. 1, p. 239-265