

جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای، شماره ۲۲، بهار ۱۳۹۶

وصول مقاله: ۱۳۹۵/۴/۲۰

تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷

صفحات: ۱۴۵ - ۱۵۸

## مقایسه پویایی بخش‌های مختلف گسل شکرآب (شمال بیرجند) بر مبنای ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها با استفاده از GIS

مهدی یوسفی<sup>۱</sup>، دکتر محمد مهدی خطیب<sup>۲</sup>، دکتر ابراهیم غلامی<sup>۳</sup>

### چکیده

راندگی شکرآب، دارای روند باختری - خاوری با شیب ۶۰ درجه شمالی و در فاصله ۴ کیلومتری در شمال شهر بیرجند قرار دارد. پهنه گسلی فعال شکرآب به‌عنوان یک منبع لرزه‌ای برای شهر بیرجند است. به‌دلیل اینکه گسل شکرآب از قطعات مختلف تشکیل شده است، ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها در سه بخش شرقی، غربی و مرکزی محاسبه شد. همچنین، به‌علت رخداد مهاجرت عرضی در این گسل، ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها در دو بخش شمالی و جنوبی منطقه محاسبه شد. میانگین ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها به‌منظور مقایسه پویایی تکتونیکی در این پهنه گسلی، در بخش شمالی و بخش جنوبی به میزان ۱/۱۱ و ۱/۰۶ است؛ به‌دلیل تراکم خطی آبراهه‌ها و دانسیته سطحی کمتر در بخش جنوبی، این اعداد فعالیت تکتونیکی بیشتر در بخش جنوبی نسبت به بخش شمالی گسل را نشان می‌دهند. در تقسیم‌بندی طولی گسل به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی و با توجه به کمتر بودن بُعد فرکتالی آبراهه‌ها در بخش‌های شرقی و غربی به ترتیب به میزان ۱/۳۲۰ و ۱/۳۹۳ نسبت به بخش مرکزی به میزان ۱/۴۳۶، بیانگر فعالیت تکتونیکی بیشتر در طرفین گسل نسبت به بخش مرکزی است. توسعه و پیشرفت دگرریختی حال حاضر از بخش مرکزی، به سمت بخش‌های شرقی و غربی گسل می‌باشد. کلید واژگان: بُعد فرکتالی آبراهه‌ای، خاور ایران، گسل شکرآب، فعالیت گسل.

geomehdisa31@yahoo.com

mkhtib@birjand.ac.ir

Egholami@birjand.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند (نویسنده مسؤل)

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

## مقدمه

واژه «فرکتال» مشتق شده از واژه لاتین «فراکتوس» به معنای سنگ است که به شکل نامنظم، شکسته شده و خرد شده است و در سال ۱۹۷۶ توسط ریاضیدان لهستانی به نام بنوئیت مندلیبرات وارد دنیای ریاضیات شد (چرچی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱). روش فرکتال، روشی ساختاری است که علاوه بر ارتباط فضایی و تغییرپذیری در داده‌های برداشت شده، اختصاصات مستقل از مقیاس و ویژگی‌های هندسی آنومالی‌ها را نیز مدنظر قرار می‌دهد. هندسه فرکتال برخلاف هندسه اقلیدسی، علاوه بر بحث در خصوص ابعاد صحیح (یک، دو، سه)، به بررسی ابعاد غیر صحیح و توصیف پدیده‌های طبیعی نیز می‌پردازد (cheng, 1997: 61). با پیدایش هندسه فرکتال، استفاده از مدل‌های فرکتال و مولتی فرکتال در علوم مختلف مطرح شد. به کمک هندسه فرکتال می‌توان به توصیف پدیده‌های زمین‌شناسی غیر منظم و الگوی توزیع فضایی آنها (Cheng 1995: 836)، بررسی میزان و شدت شکستگی‌ها (Laubach & Ward, 2006: 79)، میزان جابجایی گسل‌ها (Pickering et al, 1997: 89)، بزرگی و شدت زمین‌لرزه‌ها (Dimri, 2005: 7)، ابعاد ذرات خرد شده سنگ‌ها (Korvin, 1992: 200)، توزیع ضخامت رگه‌ها (Monecke et al, 2005: 371)، تعیین مشخصات کانی‌سازی و ذخایر معدنی (Sanderson et al, 1994: 172) و ... پرداخت. یک توزیع فرکتالی می‌تواند بیانگر نحوه توزیع متغیرها و اندازه متغیرها نسبت به کل فضای اشغال شده باشد؛ به عنوان مثال، رابطه بین توپوگرافی ایجاد شده در اثر فرایندهای تکتونیکی، مانند گسل‌ها و راندگی‌ها، چین‌ها و خمش‌ها و یا میزان فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری را می‌توان با استفاده از تحلیل فرکتالی مورد بررسی قرار داد (Okubo and Aki, 1987: 332). یکی از روش‌های بررسی توزیع ناحیه‌ای آبراهه‌ها، تحلیل فرکتالی آنها است. تحلیل آبراهه‌ها و وضعیت تراکم آنها در صورتی که شواهد مناسبی از تکتونیک ناحیه در دسترس نباشد، می‌تواند کلیدی برای شناسایی پویایی یک

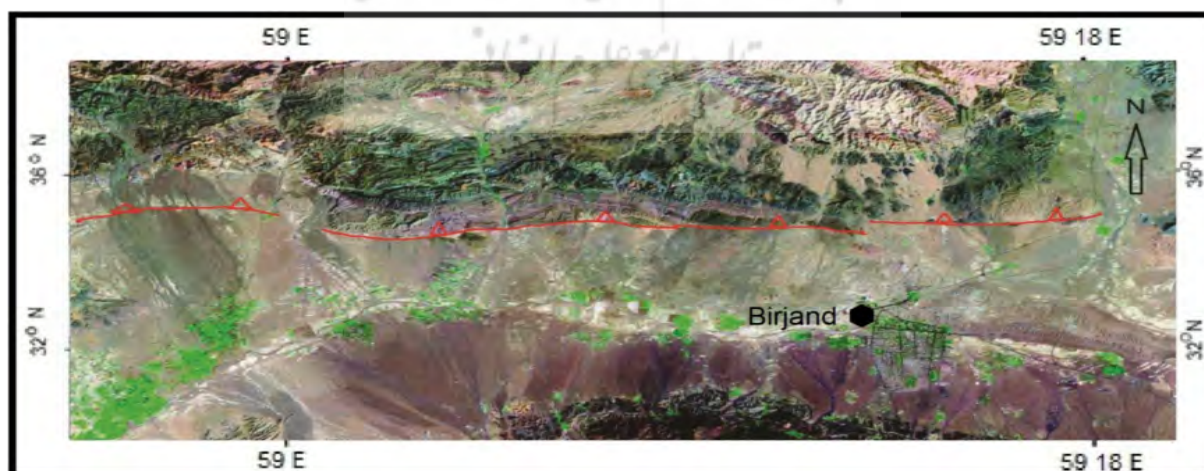
منطقه باشد. آبراهه‌های همراه با یک سیستم گسله فعال، اطلاعات ساختاری مفیدی را نشان می‌دهند (Hovius, 1996: 36). شبیه‌سازی بر مبنای ریاضی الگوی آبراهه‌ها، می‌تواند دید مناسبی از این دست ارائه دهد (Tomkin and Braun, 1999: 2). طرح آبراهه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف مانند آب و هوا، تغییرات سنگ‌شناسی و فرایندهای تکتونیکی قرار می‌گیرند که مهمترین این عوامل ذکر شده، فرایندهای تکتونیکی است (Hack, 1973: 423). هندسه طرح آبراهه‌ها در یک منطقه، بیانگر میزان فعالیت تکتونیکی و تکوین عناصر ساختاری آن منطقه است (Adams, 1999: 1743). مطالعه الگوهای آبراهه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب در مناطقی که حرکات زمین‌ساختی باعث بالآمدگی و فرونشست نسبی شده است، مورد استفاده قرار گیرد. توزیع آبراهه‌ها در این مناطق به‌گونه‌ای است که منطبق بر بالآمدگی یا فرونشست می‌باشد؛ برای مثال یک آبراهه ممکن است با عبور از یک زون گسله، دسته‌ای، شاخه‌شاخه و یا دچار تغییر مسیر شود. البته عوامل غیر تکتونیکی از جمله آب و هوا، لیتولوژی و توپوگرافی می‌توانند نقش مهمی در نحوه انتشار الگوی آبراهه‌ها داشته باشند (Leeder and Jackson, 1993: 85). توزیع فرکتالی آبراهه‌ها توسط (Turcotte, 1992: 180) ارائه شده است. در این الگوها با استفاده از تکنیک مربع‌شمار (Box-Counting) ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها را در جهت توزیع پراکندگی در مناطق فعال محاسبه می‌کنند. اصول این روش، ترسیم نمودارهای لگاریتمی است که در آن تعداد مربع‌های حاوی آبراهه NS، بر حسب طول شبکه اندازه‌گیری (S) رسم شده است. هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی میزان پویایی نوزمین‌ساختی بخش‌های مختلف گسل شکرآب به کمک مقایسه ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها در آنهاست. در نوشتار حاضر، به‌علت رخداد مهاجرت عرضی در این گسل، ابتدا پهنه مورد مطالعه به دو بخش شمالی-جنوبی تقسیم‌بندی شد و ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها در این دو بخش محاسبه و با هم مقایسه شدند. در مرحله

نهبندان در مرز بین این ایالت ساختاری و پهنه لوت موجب دگرشکلی واحدهای سنگی در حاشیه و درون ایالت ساختاری سیستان شده است (نبوی، ۱۳۵۵: ۵۷). سیستم گسل نهبندان با سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد و روند کلی شمالی- جنوبی دارای سرشاخه‌های فرعی زیادی است. پایانه شمالی این گسل با چرخش به سمت غرب روندهای شمال غرب- جنوب شرق، شرقی- غربی و شمال شرق- جنوب غربی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، پهنه سیستان در بخش شمالی با تغییر جهت به طرف غرب به صورت تداخلی وارد قطعه لوت می‌شود (خطیب، ۱۳۷۷: ۱۸-۴۵). پهنه گسلی شکرآب شامل چندسری گسل موازی هم و از سری گسل‌های شرقی غربی مربوط به پایانه گسل نهبندان می‌باشد که دارای مؤلفه تراستی با شیب به سمت شمال است (رشیدی، ۱۳۹۰: ۴۵). بررسی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی ثبت شده در منطقه شکرآب، نشان از فعالیت مخرب با مکانیزم راندگی و چپگرد دارد (علیمی و همکاران، ۱۳۹۳: ۴۲) (شکل ۲). با وجود نقش انکارناپذیر گسل شکرآب در دگرریختی کلی منطقه، اثر سطحی این گسل به دلیل پوشیده شدن با آبرفت‌های عهد حاضر در اکثر نقاط قابل دیدن نیست.

بعد، به منظور تعیین میزان پویایی نوزمین ساختی گسل شکرآب، براساس ویژگی‌های ساختاری، ناپیوستگی‌های هندسی و ریخت‌شناسی، پهنه مورد اشاره در تقسیم‌بندی طولی به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی تفکیک شد و ابعاد فرکتالی در این بخش‌ها با هم مقایسه شدند. در پایان با توجه به ارتباط بین طرح کلی آبراهه‌ها و بُعد فرکتالی در بخش‌های مختلف پهنه گسلی، تحلیل کلی از میزان برخاستگی و فعالیت تکتونیکی و همچنین تعیین بخش‌های فعال گسل ارائه می‌شود.

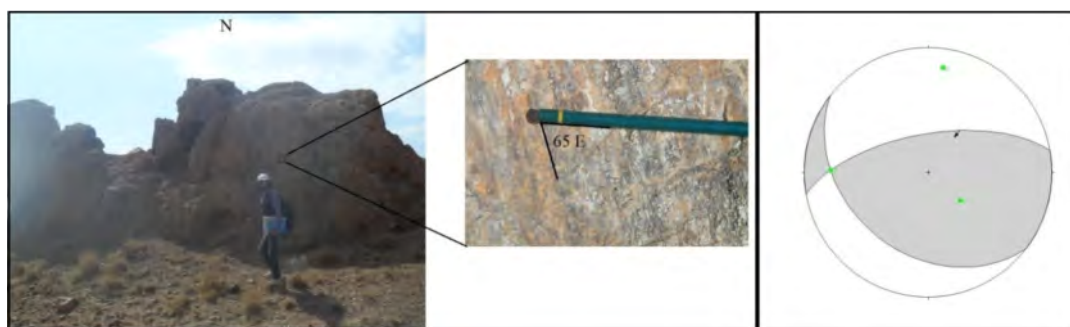
### وضعیت زمین‌شناختی

گسل شکرآب با فاصله کمینه ۴ کیلومتر از مرکز شهر بیرجند، به عنوان یک منبع فعالیت لرزه‌ای برای این شهر شمرده می‌شود (شکل ۱). پهنه گسلی شکرآب در بین طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ} 18'$  تا  $59^{\circ} 18'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $32^{\circ} 54' 32''$  تا  $32^{\circ} 56' 30''$  شمالی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در ایالت ساختاری سیستان واقع شده است. ایالت ساختاری سیستان در شرق ایران با روند کلی شمالی جنوبی، نشانگر زمین درز برخوردی بلوک‌های لوت و افغان است (Tirrule et al, 1983:135). وجود سیستم گسلی



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای از موقعیت پهنه گسلی شکرآب واقع در شمال شهر بیرجند

تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۲)



شکل ۲. آثار خش گسلس برداشت شده مکانیزم راندگی همراه با مؤلفه امتداد لغز چپگرد در سیستم شکرآب را تأیید می‌کند تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۲)

### روش تحقیق

مبنای روش مطالعه در فرکتال، محاسبه ابعاد فرکتالی برای عناصر هندسی است. براساس مفاهیم هندسی اقلیدسی ابعاد عناصر هندسی اعداد صحیح ۰، ۱، ۲ و ۳ برای نقطه، خط، صفحه و حجم می‌باشند که هر کدام بیانگر عناصر هندسی نامحدود هستند. در طبیعت مادی همه عناصر محدود و عملاً پاره خط، پاره صفحه و یا پاره حجم هستند؛ بنابراین، ابعاد هندسی اقلیدسی به خوبی نمی‌توانند بیانگر ویژگی پدیده‌ها با هم و یا مقایسه آنها با یکدیگر باشند؛ ولی ابعاد فرکتالی می‌توانند اعداد اعشاری باشند. بدین ترتیب، محدودیتی در اندازه‌گیری هیچ کدام از فرایندهای طبیعی با این روش وجود ندارد (خطیب، ۱۳۷۹: ۲۵؛ شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶: ۳۷). رابطه کلی برای محاسبه ابعاد فرکتالی عبارت است از:  $N_n = C/R_n^D$ . در رابطه بالا  $N_n$  تعداد متغیرهای معلوم برای یک پدیده،  $C$  ثابت،  $R_n$  بُعد خطی ویژه و  $D$  بُعد فراکتالی می‌باشد (Turcotte, 1992: 174). روش متداول در محاسبه بُعد فرکتالی مبتنی بر الگوی شمارش سلولی (Box-Counting) است که در آن شمارش سلول‌های مشابه (هم‌اندازه) که ارزش رقومی آنها متفاوت از یکدیگر باشد، امکان محاسبه بُعد فرکتال را ارائه می‌دهد (Turcotte, 1986: 263; Bamsly et al, 1988: 311). اصول این روش ترسیم نمودارهای لگاریتمی - لگاریتمی است که در آن تعداد مربع‌های حاوی آبراهه ( $N$ ) برحسب طول شبکه اندازه‌گیری ( $S$ ) یا عکس آن ( $1/S$ ) ترسیم شده‌اند. شیب منحنی‌های ترسیم شده بین ۱ و ۲

خواهد بود. برای هر کدام از منحنی‌های فرکتالی رابطه زیر صادق است:

$$\text{Log}(N) = a + K \log 1/S$$

که در آن ( $K$ ) شیب خط و نشان‌دهنده بُعد فرکتالی آبراهه‌ها است (Mandelbort, 1983: 124). در این نوشتار کوشش شده است تا پویایی پهنه‌گسلی شکرآب با بررسی توزیع ابعاد فرکتال در بخش‌های مختلف آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. برای به دست آوردن ابعاد فرکتالی آبراهه‌های منطقه با استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه پراکندگی آبراهه‌ها در پهنه شکرآب تهیه شد. در این روش، در محیط GIS نقشه را به شبکه‌های مختلف تقسیم کرده و تعداد مربع‌های حاوی ساختار آبراهه ( $N$ ) و اندازه مربع‌ها ( $S$ ) را به دست آورده و نمودار ( $\text{Log} N$ ) را در برابر ( $\text{Log} 1/S$ ) رسم شد. برای هر الگوی فرکتالی که در آن، این کار انجام شود، منحنی حاصل و یا قسمتی از آن خطی می‌شود که طبق معادله بالا،  $K$  همان بُعد فرکتالی است. شبکه‌بندی آبراهه‌ها و محاسبه ابعاد فرکتالی آنها با استفاده از نرم‌افزار GIS، به دلیل سهولت و دقت بسیار بالا، روش مناسبی برای انجام این کار است (کلانتری، ۱۳۸۸: ۱۰۶).

### بحث

#### بررسی بُعد فرکتالی آبراهه‌ها در گسل شکرآب به منظور تعیین پویایی زمین‌ساختی

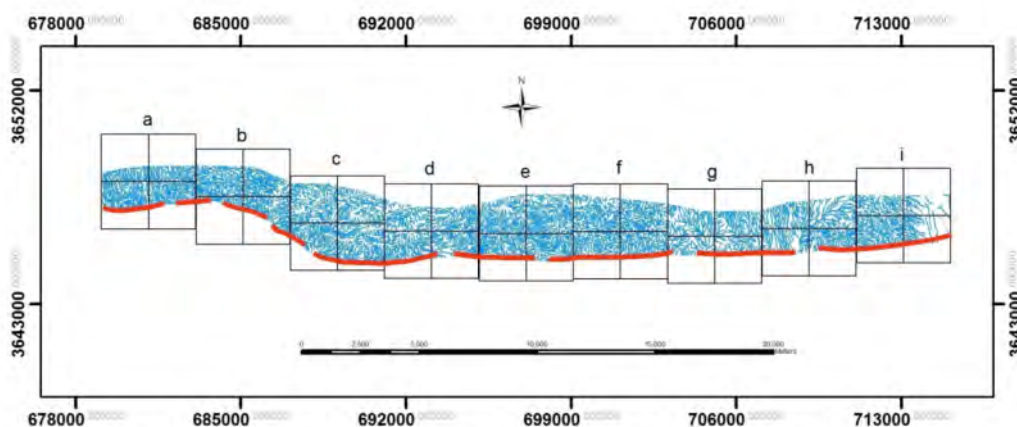
معمولاً برای بررسی و مقایسه پویایی یک پهنه گسلی، علاوه بر محاسبه بُعد فرکتالی آبراهه‌ها، سایر اندیس‌های مورفوتکتونیک گسل، محاسبه می‌شوند. محاسبه چهار شاخص ریخت زمین‌ساختی در این

گسل به صورت شمالی- جنوبی (از سمت کوهستان به طرف دشت)، گسل به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم شد (یوسفی، ۱۳۹۲: ۶۵) و ابعاد فراکتالی آبراهه‌ای به منظور ارزیابی میزان فعالیت زمین‌ساختی در این بخش‌ها نسبت به هم مقایسه شد. در ابتدا گسل به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم شد و هر بخش به طور جداگانه شبکه‌بندی گردید. برای این کار فایل‌های حاوی قطعات گسل شکرآب و فایل رقومی شده آبراهه‌های منطبق بر مرزهای پهنه شکرآب را در محیط GIS فراخوانی شده، شبکه‌بندی‌ها و همچنین محاسبه ابعاد فرکتال آبراهه‌ها در این بخش‌ها صورت پذیرفت.

#### بررسی بُعد فرکتال در بخش شمالی گسل شکرآب

محدوده بخش شمالی از خط اثر گسل اصلی شکرآب تا مرز شمالی پهنه را شامل می‌شود. این محدوده قطعات و سرشاخه‌های شمالی پهنه را دربر می‌گیرد که با توجه به طول و عرض قطعات گسلی در این بخش، به ۹ مربع اولیه (a-i) با اضلاعی به طول ۴ کیلومتر شبکه‌بندی شد. در مرحله بعد، هر مربع اولیه به چهار مربع نسل دوم با ابعاد ۲ در ۲ کیلومتر تقسیم شد. به همین صورت در مراحل بعد، ابعاد مربع‌ها با نصف شدن طول مربع در هر مرحله نسبت به مرحله قبل، به ترتیب ۱ کیلومتر، ۰/۵۰ کیلومتر و نهایتاً ۰/۲۵۰ کیلومتر تقسیم‌بندی شدند و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در هر مرحله شمارش شد؛ برای مثال، در مربع اولیه (a) واقع در بخش شمالی به ابعاد ۴ کیلومتر، یک مربع وجود دارد که در آن ۱ عنصر آبراهه وجود دارد. در مرحله بعد، با تبدیل شدن مربع اولیه (a) به ۴ مربع ۲ در ۲ کیلومتری و شمارش مربع‌های حاوی آبراهه، ۴ مربع موجود حاوی آبراهه هستند. این کار تا تبدیل شدن مربع اولیه با ابعاد ۴ کیلومتر به ۲۵۶ مربع به طول ۰/۲۵۰ کیلومتری ادامه می‌یابد که در این مرحله ۱۱۸ مربع وجود دارند که حاوی آبراهه هستند. برای ۹ مربع اولیه بخش شمالی گسل (a-i)، این تقسیم‌بندی و شمارش مربع‌های حاوی آبراهه انجام شد (شکل ۳).

پهنه‌گسلی شامل شاخص طول- گرادیان رودخانه (SL) ، نسبت عرض دره به ارتفاع دره در آبراهه‌ها (Vf)، هیپسومترى نسبت ارتفاع (Er) و سینوسیتة پیشانی کوهستان (Smf) مقادیر بالایی را برای شاخص SL (۴۰۴ تا ۱۰۲۰) و Er (۰/۴۷ تا ۰/۸۱) و مقادیر پایینی را برای Vf (۰/۲۲ تا ۱/۱۴) و Smf (۱/۰۳ تا ۱/۷۲) نشان می‌دهند که دلالت بر پویایی پهنه شکرآب به‌ویژه در دو بخش شرقی و غربی آن دارند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۵-۵۳)؛ از این رو می‌توان رده ۱ پویایی نوزمین‌ساختی را برای منطقه در نظر گرفت. همچنین شواهد نوزمین‌ساختی از جمله برش در رسوبات کواترنری، جابه‌جایی متناوب چپگرد آبراهه‌ها، وجود کج‌شدگی در رسوبات کواترنری، گسترش مخروطه‌افکنه‌های جوانتر (Qf1) که در رأس پیشانی کوهستان تشکیل شده‌اند، وجود سه نسل از تراس‌های رودخانه‌ای بریده شده و همچنین وجود پرتگاه‌های گسلی، حاکی از فعالیت گسل در طی کواترنر هستند (Walker and Khatib, 2006: 17-18)؛ بنابراین، در این نوشتار، پویایی گسل شکرآب با استفاده از محاسبه ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها در بخش‌های مختلف پهنه‌گسل انجام می‌گیرد. با استفاده از جدیدترین عکس‌های هوایی تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱/۴۰۰۰۰، رقومی‌سازی و نقشه تراکم آبراهه‌ها بر روی پهنه‌گسلی شکرآب انجام شد. اختلاف تراکم آبراهه‌ها در دامنه‌های شمالی و جنوبی و همچنین اختلاف تراکم از خاور به باختر، مرتبط با نحوه فعالیت گسل و میزان برخاستگی زمین‌ساختی است. در این بررسی با شبکه‌بندی نقشه‌های آبراهه‌ای ۱/۴۰۰۰۰، بُعد فرکتالی آبراهه به صورت زیر محاسبه شد: برای محاسبه شاخص فوق به نحوی که همه قطعات گسلی پوشش داده شود، شبکه‌بندی در امتداد گسل بر روی نقشه حاوی عنصر آبراهه ترسیم شد. براساس ویژگی‌های ساختاری، ناپیوستگی‌های هندسی و ریخت‌شناسی، پهنه‌گسلی شکرآب به سه بخش عرضی شرقی، مرکزی و غربی و همچنین به دلیل توسعه پرتگاه‌های موازی با گسل اصلی و رخداد مهاجرت



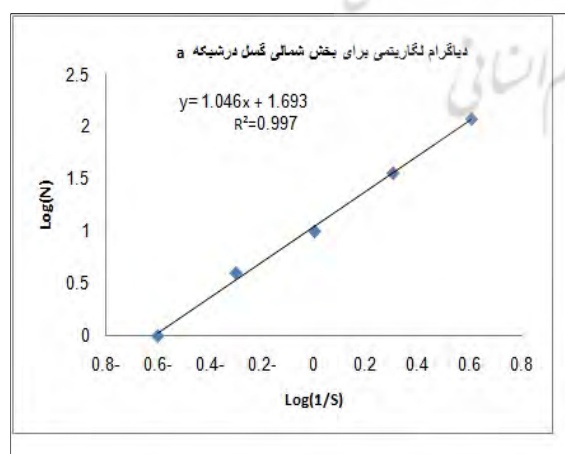
شکل ۳. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش شمالی گسل به منظور محاسبه بُعد فرکتالی تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

در جدول ۱ ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که شمالی گسل نشان داده شده است. حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۹ شبکه (a-i) در بخش

جدول ۱. ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۹ شبکه (a-i) در بخش شمالی گسل شکرآب.

R(Km)	Na	Nb	Nc	Nd	Ne	Nf	Ng	Nh	Ni
۴R1=	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲R2=	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۱ R3=	۱۰	۱۲	۱۶	۱۴	۱۵	۱۶	۱۲	۱۲	۱۲
۰/۵۰R4=	۳۶	۳۷	۵۶	۴۵	۵۲	۴۹	۴۰	۴۲	۳۹
۰/۲۵۰R5=	۱۱۸	۱۲۹	۲۰۱	۱۵۷	۱۸۵	۱۷۴	۱۴۴	۱۵۱	۱۴۴

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)



شکل ۴. نمودار  $\log N - \log 1/S$  برای به دست آوردن بُعد فرکتالی

در بخش شمالی گسل شکرآب

(به عنوان مثال برای شبکه a در این بخش از گسل طبق نمودار

برابر با ۱/۰۴۶ است).

تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

برای هر کدام از مربع‌های اولیه نمودار  $\log N - \log 1/S$  ترسیم شد که برای نمونه نمودار مربوط به شبکه (a) در شکل ۴ نشان داده شده است. بُعد فرکتالی برای هر مربع (a-i) محاسبه شد. در نهایت، میانگین بُعد فرکتالی آبراهه‌ها در بخش شمالی برابر ۱/۱۱ با ضریب همبستگی بسیار بالا  $R^2 = 0,997$  به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر فرکتال آبراهه‌ای برای ۹ شبکه (a-i) در بخش شمالی گسل شکرآب

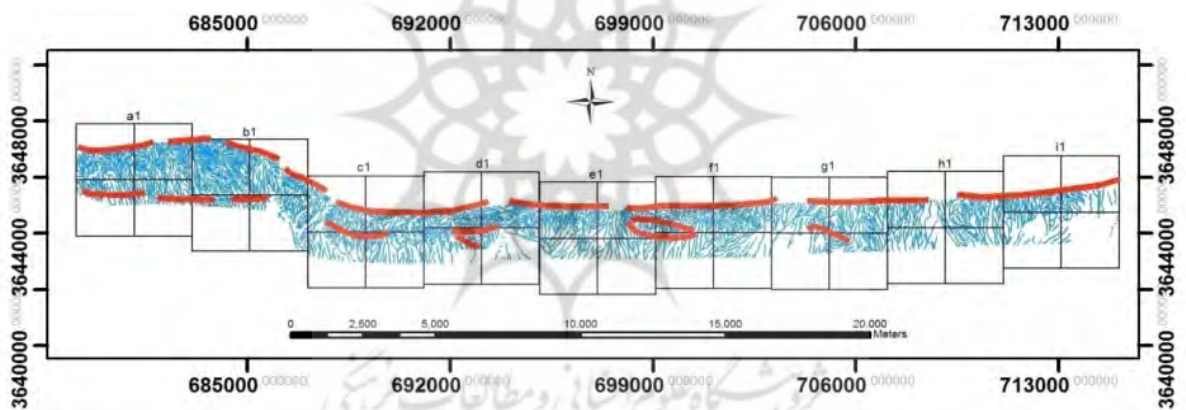
نام شبکه	i	h	g	f	e	d	c	b	a	میانگین بُعد فرکتالی
بُعد فرکتال	۱/۰۸۶	۱/۰۹۶	۱/۰۸۸	۱/۱۴۷	۱/۱۵۲	۱/۱۱۹	۱/۱۷۱	۱/۰۷۲	۱/۰۴۶	۱/۱۱

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

### بررسی بُعد فرکتال در بخش جنوبی گسل شکرآب

محدوده بخش جنوبی گسل شکرآب از خط اثر گسل اصلی شکرآب تا مرز جنوبی پهنه است. محدوده جنوبی سرشاخه‌ها و قطعات گسلی و همچنین نهشته‌های کواترنری در دشت را شامل می‌شود که خطوط اثر گسل در آن مشهود باشد. این بخش به ۹ مربع اولیه (a<sub>1</sub>-i<sub>1</sub>) با اضلاعی به طول ۴ کیلومتری

تقسیم شد و مراحل تقسیم‌بندی و رسم نمودارها مانند بخش شمالی انجام شد. تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در هر مرحله شمارش گردید. تمامی مراحل انجام گرفته در بخش شمالی که شامل تقسیم‌بندی مربع‌ها و شمارش مربع‌های حاوی آبراهه است، در بخش جنوبی هم صورت گرفت که نتایج آن در زیر ارائه می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش جنوبی گسل به منظور محاسبه بُعد فرکتالی

تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

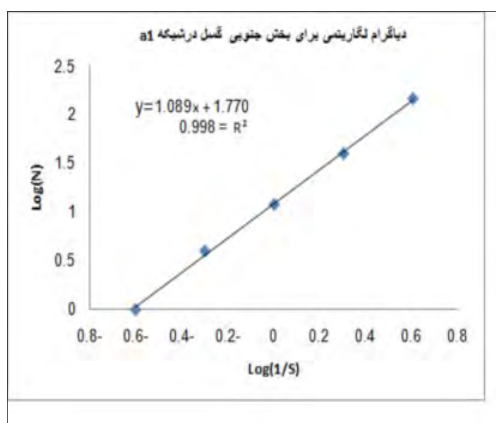
بخش جنوبی گسل نشان داده شده است.

در جدول ۳ ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۹ شبکه (a<sub>1</sub>-i<sub>1</sub>) در

جدول ۳. ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۹ شبکه (a<sub>1</sub>-i<sub>1</sub>) در بخش جنوبی گسل شکرآب

R(Km)	Na <sub>1</sub>	Nb <sub>1</sub>	Nc <sub>1</sub>	Nd <sub>1</sub>	Ne <sub>1</sub>	Nf <sub>1</sub>	Ng <sub>1</sub>	Nh <sub>1</sub>	Ni <sub>1</sub>
۴R <sub>1</sub> =	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲R <sub>2</sub> =	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۱R <sub>3</sub> =	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۱	۹	۱۲	۱۰	۱۱
۰/۵۰R <sub>4</sub> =	۳۶	۴۰	۴۱	۳۸	۳۸	۳۴	۳۸	۳۵	۳۵
۰/۲۵۰R <sub>5</sub> =	۱۴۶	۱۵۱	۱۳۹	۱۲۰	۱۲۴	۱۲۹	۱۱۷	۱۸	۹۱

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)



شکل ۶. نمودار  $\log N - \log 1/S$  برای به‌دست آوردن بُعد فرکتالی

در بخش جنوبی گسل شکرآب

(به عنوان مثال برای شبکه  $a_1$  در این بخش از گسل طبق

نمودار برابر با  $1/0.89$  است)

تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

جدول ۴. مقادیر فرکتال آبراه‌های برای ۹ شبکه ( $a_1 - i_1$ ) در بخش جنوبی گسل شکرآب

نام شبکه	$i_1$	$h_1$	$g_1$	$f_1$	$e_1$	$d_1$	$c_1$	$b_1$	$a_1$	میانگین بُعد فرکتالی
بُعد فرکتال	۱/۰۲۹	۱/۰۴۳	۱/۰۶۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶۳	۱/۰۶۸	۱/۰۸۷	۱/۰۷۲	۱/۰۸۹	۱/۰۶

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

گسلی متناوب و موازی با گسل اصلی در بخش جنوبی نشان می‌دهد. با ترسیم مقاطعی عرضی به‌صورت عمود بر امتداد گسل و بررسی مکانیزم پرتگاه‌ها، مشاهده شد که هرچه از سمت شمال به سمت جنوب حرکت کنیم، گسلش در واحدهای جوان تر رخ می‌دهد. در ۴ مقطع عرضی ترسیم شده بر روی گسل، با حرکت از سمت شمال به جنوب، افزایش شیب در سطوح پرتگاه‌ها را شاهد هستیم. این موارد به همراه وجود رشته قنوات جدیدتر در جنوب گسل شکرآب و همچنین حرکات چپگرد و پلکانی در آبراه‌ها و وجود آثار گسلش پنهان در نهشته‌های کواترنری که در دشت جنوبی کوه شکرآب واقع شده‌اند، بیانگر رشد و مهاجرت عرضی پرتگاه‌های گسلی در سیستم شکرآب از سمت شمال به سمت جنوب (از کوهستان به طرف دشت) است (یوسفی، ۱۳۹۲: ۹۰). موارد بالا و کمتر بودن بُعد فرکتال در بخش جنوبی نسبت به بخش شمالی گسل، در نهایت پویایی زمین‌ساختی بالاتر در

برای هر کدام از مربع‌های اولیه نمودار  $\log N - \log 1/S$  ترسیم شد که برای نمونه، نمودار مربوط به شبکه ( $a_1$ ) در شکل ۶ نشان داده شده است. بُعد فرکتالی برای هر مربع به‌دست آمده است که میانگین بُعد فرکتالی در بخش جنوبی گسل برابر  $1/0.6$  است (جدول ۴).

در مناطقی که فعالیت زمین‌ساختی بیشتر باشد، به‌علت نرخ زیاد برخاستگی، آبراه‌ها فرصت پیچ و تاب خوردگی و افزایش سطحی را ندارند و به‌صورت خطی خود را نشان می‌دهند. برعکس در مناطقی با نرخ برخاستگی و فعالیت زمین‌ساختی کمتر، به‌دلیل فرصت کافی که برای پخش شدن وجود دارد، آبراه‌ها بیشتر به افزایش سطح و مئاندری شدن میل دارند که در هنگام شمارش مربع‌های حاوی آبراه‌های در روش فرکتالی، مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. با محاسبه ابعاد فرکتالی آبراه‌ها در این پهنه گسلی، مقادیر بالاتر در بخش شمالی به میزان  $1/11$  نسبت به بخش جنوبی به میزان  $1/0.6$  به‌دلیل خطی شدن آبراه‌ها و دانسیته تراکمی سطحی کمتر در بخش جنوبی است که حاکی از فعالیت تکتونیکی بیشتر این بخش نسبت به بخش شمالی گسل است. بالاتر بودن میزان فعالیت زمین‌ساختی در جنوب گسل شکرآب نسبت به بخش شمالی، خود را با ظهور پرتگاه‌های

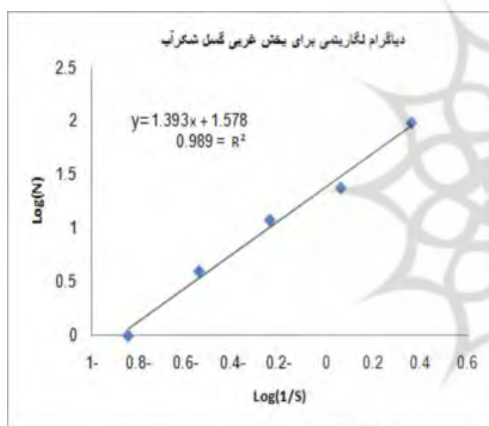


جدول ۵. ابعاد و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه برای شبکه مربوط به بخش غربی گسل شکرآب

R (Km)	N (west)
$\sqrt{R1=}$	۱
$\sqrt[3]{R2=}$	۴
$\sqrt[4]{R3=}$	۱۲
$\sqrt[5]{R4=}$	۲۴
$\sqrt[6]{R5=}$	۹۸

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

برای مربع‌های بخش غربی نمودار  $\log N - \log 1/S$  رسم شد. میانگین بُعد فرکتالی در بخش غربی گسل برابر  $1/393$  است. (شکل ۸).



شکل ۸. نمودارهای  $\log N - \log 1/S$  برای به‌دست آوردن بُعد فرکتالی در بخش غربی گسل شکرآب تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

بررسی بُعد فرکتال در بخش مرکزی گسل شکرآب

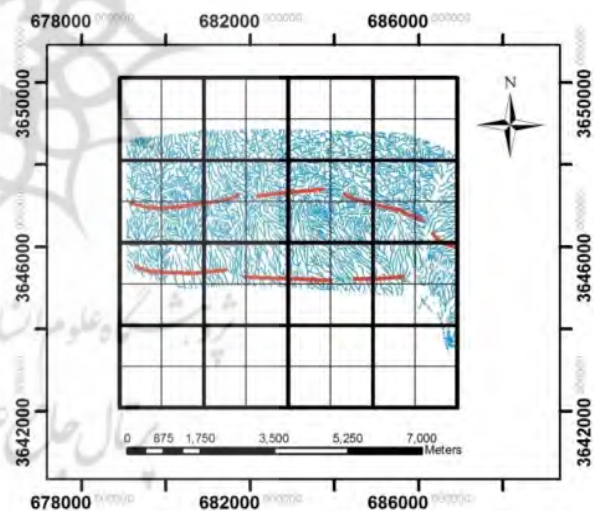
در بخش مرکزی به‌نحوی که قطعات و سرشاخه‌های گسل در این قسمت گسل را دربر گیرد و با توجه به ابعاد این بخش، سه شبکه (A, B, C) به ابعاد اولی  $G$   $5/356$  کیلومتر در ۵ مرحله به چهارگوش‌هایی با طول‌های  $2/678$ ،  $1/339$ ،  $0/6695$ ،  $0/33475$  کیلومتری شبکه‌بندی شد و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در هر مرحله شمارش گردید. با ترسیم نمودار لگاریتمی  $Ns$  به  $1/S$  مقدار بُعد فرکتالی آن  $1/436$  به‌دست آمد (شکل ۹).

بخش جنوبی نسبت به بخش شمالی گسل را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد، با توجه به اینکه گسل شکرآب از قطعات مختلفی تشکیل شده است و براساس ویژگی‌های ساختاری، ناپیوستگی‌های هندسی و ریخت‌شناسی، پهنه‌گسلی شکرآب به سه بخش طولی شرقی، مرکزی و غربی تفکیک شد و شبکه‌بندی به‌صورت زیر انجام گرفت:

بررسی بُعد فرکتال در بخش غربی گسل شکرآب

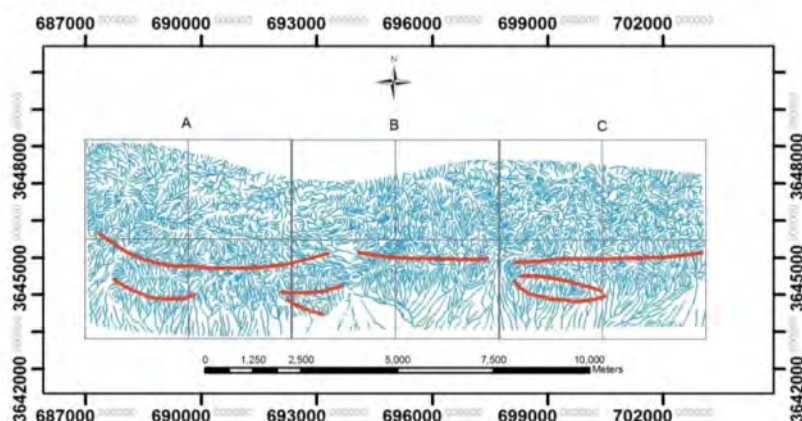
در بخش غربی یک شبکه به ابعاد اولیه ۷ کیلومتر در ۵ مرحله به چهارگوش‌هایی با طول‌های  $3/5$ ،  $1/75$ ،  $0/875$ ،  $0/4375$  کیلومتری شبکه‌بندی شد و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در هر مرحله شمارش گردید. با ترسیم نمودار لگاریتمی  $Ns$  به  $1/S$  مقدار بُعد فرکتالی آن  $1/393$  به‌دست آمد (شکل ۷).



شکل ۷. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش غربی به‌منظور محاسبه بُعد فرکتالی

تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

در جدول ۵ ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای بخش غربی گسل نشان داده شده است.



شکل ۹. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش مرکزی به منظور محاسبه بُعد فرکتالی تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

برای هر کدام از مربع‌های اولیه، نمودار  $\log N - \log 1/S$  رسم شد (شکل ۱۰). بُعد فرکتالی برای هر مربع به دست آمده است که میانگین بُعد فرکتالی در بخش مرکزی برابر  $1/436$  است (جدول ۷).

در جدول ۶ ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۳ شبکه (A-C) در بخش مرکزی گسل نشان داده شده است.

جدول ۷. مقادیر فرکتال آبراهه‌ای برای ۹ شبکه (A-C) در بخش مرکزی گسل شکرآب

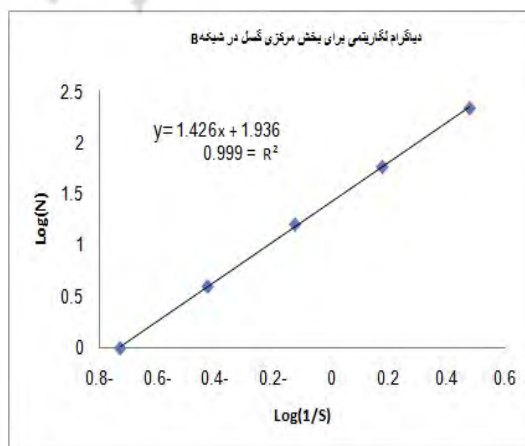
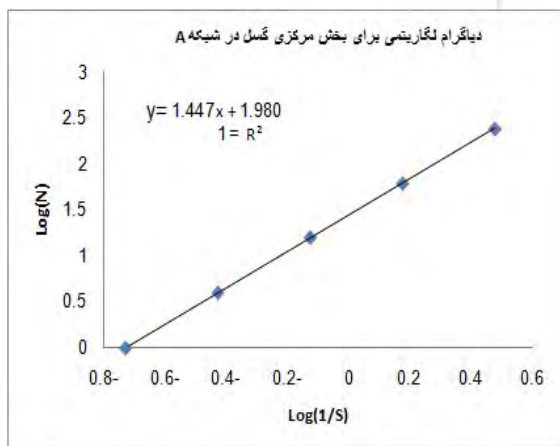
نام شبکه	A	B	C	میانگین بُعد فرکتالی
بُعد فرکتالی	$1/447$	$1/426$	$1/435$	$1/436$

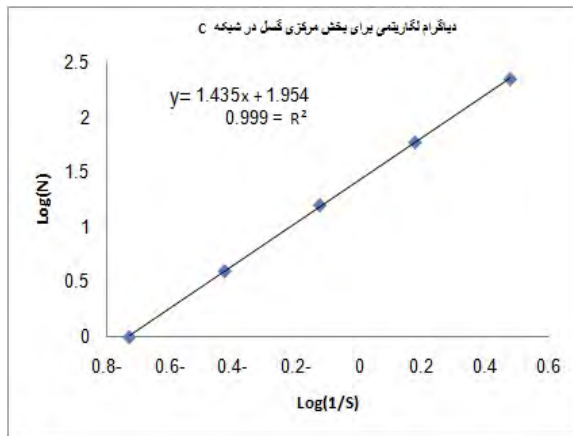
منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

جدول ۶. ابعاد و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه برای ۳ شبکه (A-C) در بخش مرکزی گسل شکرآب

R (Km)	NA	NB	NC
$5/356R1=$	۱	۱	۱
$2/678R2=$	۴	۴	۴
$1/339R3=$	۱۶	۱۶	۱۶
$0/6695R4=$	۶۲	۵۸	۶۰
$0/33475R5=$	۲۴۳	۲۱۶	۲۲۶

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)



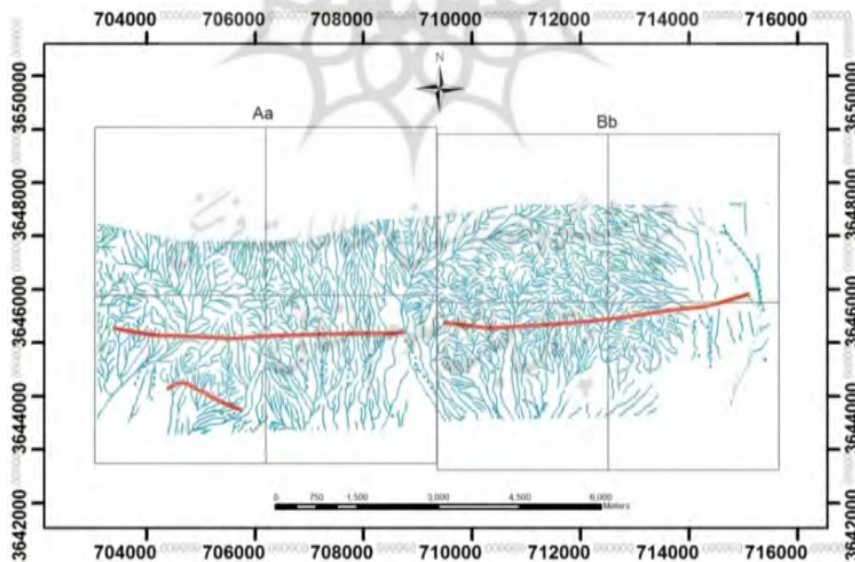


شکل ۱۰. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش مرکزی به منظور محاسبه بُعد فرکتالی تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

کیلومتر در ۵ مرحله به چهار گوش‌هایی با طول‌های ۳/۱۵، ۱/۵۷۵، ۰/۷۸۷۵ و ۰/۳۹۳۷۵ کیلومتر شبکه‌بندی شد و تعداد مربع‌های حاوی عناصر آبراهه در هر مرحله شمارش گردید (شکل ۱۱).

### بررسی بُعد فرکتال در بخش شرقی گسل شکرآب

در بخش شرقی به‌نحوی که قطعات و سرشاخه‌های گسل در این قسمت گسل را دربر گیرد و با توجه به ابعاد این بخش، دو شبکه (Aa-Bb) به ابعاد اولیه ۶/۳



شکل ۱۱. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش شرقی به منظور محاسبه بُعد فرکتالی تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

بخش شرقی گسل نشان داده شده است.

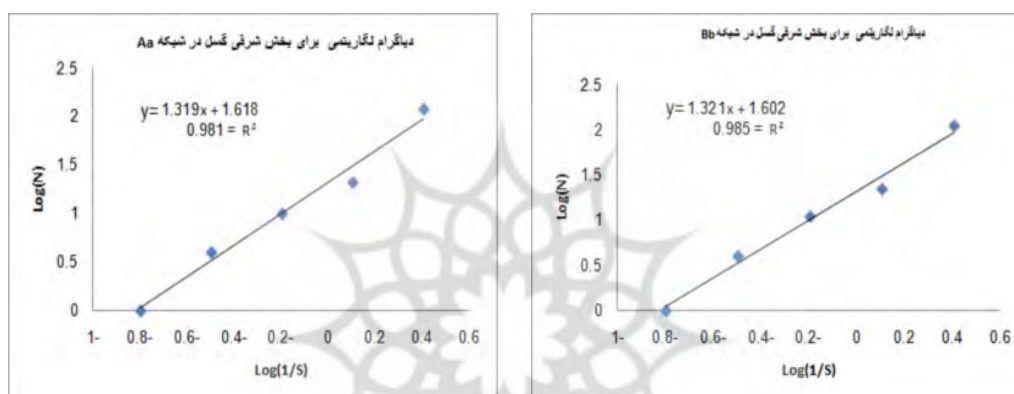
در جدول ۸ ابعاد مربع‌ها (R) و تعداد مربع‌هایی که حاوی آبراهه هستند (N)، برای ۲ شبکه (Aa-Bb) در

برای هر کدام از مربع‌های اولیه، نمودار  $\log N - \log 1/S$  رسم گردید (شکل ۱۲). بُعد فرکتالی برای هر مربع به دست آمده است که میانگین بُعد فرکتالی در بخش شرقی برابر  $1/320$  است (جدول ۹).

جدول ۸. ابعاد و تعداد مربع‌های حاوی آبراهه برای ۲ شبکه در بخش شرقی گسل شکرآب (Aa-Bb)

R (Km)	NAa	NBb
$6/3R1=$	۱	۱
$3/15R2=$	۴	۴
$1/575R3=$	۱۶	۱۶
$0/7875R4=$	۶۲	۵۸
$0/39375R5=$	۲۴۳	۲۱۶

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)



شکل ۱۲. شبکه‌بندی انجام شده بر روی بخش شرقی به منظور محاسبه بُعد فرکتالی تهیه و ترسیم: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

جدول ۹. مقادیر فرکتال آبراهه‌ای برای ۲ شبکه (Aa-Bb) در بخش شرقی گسل شکرآب

نام شبکه	Bb	Aa	میانگین بُعد فرکتالی
بعد فرکتال	$1/321$	$1/319$	$1/320$

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

شرقی و غربی گسل از بخش میانی بیشتر هستند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۴). همچنین، با توجه به میانگین بُعد فرکتال آبراهه‌ها در بخش‌های شرقی، مرکزی و غربی که به ترتیب برابر با  $1/436$ ،  $1/320$  و  $1/393$  هستند و پایین‌تر بودن بُعد فرکتالی در بخش‌های شرقی و غربی نسبت به مرکز گسل که دلیل بر خطی شدن آبراهه‌ها و دانسیته تراکمی سطحی کمتر در بخش‌های غربی و شرقی است، می‌توان نتیجه گرفت و تأکید کرد که فعالیت تکتونیکی و برخاستگی زمین‌ساختی در بخش‌های شرقی و غربی نسبت به بخش مرکزی بیشتر است.

مقایسه فعالیت تکتونیکی گسل در بخش‌های مختلف و شواهد به دست آمده نشان می‌دهد که دگرریختی عهد حاضر از مرکز گسل به طرفین یعنی بخش‌های شرقی و غربی پیشروی دارد؛ به طوری که در بخش‌های شرقی و غربی پیشانی کوه‌ها به خط مستقیم نزدیک‌تر، رودها دارای سینوسیته کمتری هستند و دره‌ها تنگ‌تر می‌شوند. شواهد نوزمین‌ساختی از قبیل ظهور پرتگاه‌های گسلی، برش در رسوبات کواترنری، پشته‌های مسدودکننده، نسل‌های متعدد تراس‌های رودخانه‌ای و کج‌شدگی در رسوبات کواترنری که مؤید حرکات تکتونیکی عهد حاضر هستند، در بخش‌های

## نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از محاسبه ابعاد فرکتالی آبراهه‌ها و با تلفیق آن‌ها با هم، یک مقایسه نسبی از فعالیت تکتونیکی در منطقه شکرآب ایجاد شد. با استفاده از نظرات (Hovius, 1996, Leeder and Jackson, 1993, Tomkin and Braun, 1999) که بر این باورند؛ هرچه بُعد فرکتالی آبراهه به ۱ نزدیک تر باشد به معنای تراکم کمتر و در نتیجه بر خاستگی و پویایی بیشتر تکتونیکی است، می‌توان همه بخش‌های گسل شکرآب را به دلیل دارا بودن مقادیر پایین ابعاد فرکتالی آبراهه‌ای، مناطق فعال تکتونیکی معرفی کرد. در جدول ۱۰ میانگین بُعد فرکتال آبراهه‌ها محاسبه شده برای دامنه شمالی، جنوبی و بخش شرقی، مرکزی و غربی گسل آورده شده است. در مناطقی که بالآمدگی و فعالیت دیده شود، به دلیل اینکه آبراهه‌ها فرصت چندانی برای شاخه‌شاخه شدن و در حقیقت افزایش طول در یک مساحت معین را ندارند، آب‌های جاری به سرعت و به صورت آبراهه‌هایی با شیب تند از حوضه خارج می‌شوند؛ در نتیجه محدوده‌ای کم تراکم را ایجاد می‌کنند و به عبارت دیگر، بعد فرکتالی در آن قسمت کمتر است. همچنین، در مناطقی که فعالیت تکتونیکی کمتر است، به دلیل فرصت بیشتر برای پخش شدن آبراهه‌ها و افزایش تراکم آنها در سطح، بُعد فرکتالی بیشتر است. در تقسیم‌بندی گسل شکرآب به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی و مقایسه ابعاد فرکتالی آنها، به این نتیجه می‌رسیم که با توجه به کمتر بودن بُعد فرکتالی آبراهه‌ها در بخش شرقی و غربی نسبت به بخش میانی گسل، میزان فعالیت تکتونیکی در بخش‌های شرقی و غربی گسل از بخش مرکزی بیشتر است. مقایسه ابعاد فرکتال آبراهه‌ها و به تبع آن جنبایی گسل در بخش‌های مختلف و شواهد به دست آمده، نشان می‌دهند که دگرریختی عهد حاضر از مرکز گسل به طرفین یعنی به سمت بخش‌های شرقی و غربی گسل پیشروی دارد؛ به طوری که در بخش‌های شرقی و غربی پیشانی کوه‌ها به خط راست نزدیک‌تر، رودها سینوسیته کمتر دارند و دره‌ها تنگ‌تر می‌شوند.

شواهدی از قبیل ظهور پرتگاه‌های گسلی، برش در رسوبات کواترنری، پشته‌های مسدودکننده، نسل‌های متعدد تراس‌های رودخانه‌ای و کج‌شدگی در رسوبات کواترنری که مؤید حرکات تکتونیکی عهد حاضر هستند، در بخش‌های شرقی و غربی گسل از بخش میانی بیشتر هستند. همچنین، در تقسیم‌بندی پهنه‌گسلی شکرآب به دو بخش شمالی و جنوبی اعداد و نتایج نشان می‌دهند که با توجه به تراکم کمتر آبراهه‌ها و خطی بودن آنها و در نتیجه، کمتر بودن بُعد فرکتالی در بخش جنوبی نسبت به بخش شمالی، میزان فعالیت تکتونیکی در بخش جنوبی از بخش شمالی بیشتر است. بالاتر بودن میزان فعالیت زمین‌ساختی در جنوب گسل شکرآب نسبت به بخش شمالی، خود را با ظهور پرتگاه‌های گسلی متناوب و موازی با گسل اصلی و آثار گسلش پنهان در نهشته‌های کواترنری که در دشت جنوبی کوه شکرآب واقع شده‌اند، نشان می‌دهند.

جدول ۱۰. مقادیر محاسبه شده ابعاد فرکتالی در گسل شکرآب

منطقه گسل	دامنه شمالی	دامنه جنوبی	بخش شرقی	بخش مرکزی	بخش غربی
میانگین بُعد فرکتالی	۱۱,۱	۱۰,۶	۱/۳۲۰	۱/۴۳۶	۱/۳۹۳

منبع: (نگارندگان؛ ۱۳۹۴)

## منابع

- چرچی، عباس؛ خطیب، محمد مهدی؛ برجسته، آرش (۱۳۹۰). استفاده از تحلیل فرکتالی برای تعیین پویایی تکتونیک شمال منطقه لالی در شمال شرق خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران. شماره ۱. صص ۳۷-۴۷.
- خطیب، محمد مهدی (۱۳۷۷). هندسه پایانه گسل‌های امتداد لغز. پایان‌نامه دکتری. دانشگاه شهید بهشتی.
- خطیب، محمد مهدی (۱۳۷۹). تحلیل فراکتالی توزیع شکستگی‌ها در گستره گسل لرزه‌زای اردکول. پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله پژوهشکده زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. شماره ۳. صص ۲۵-۳۰.

- Hack, J.T. (1973). Stream- profile analysis and stream- gradient indices, US Geological Survey Journal Research, Vol:1, PP:421-429.
- Hovius.N. (1996). Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts. Basin Research. Vol: 8, PP:29-44.
- Korvin, G. (1992). Fractal models in the earth sciences, Elsevier Science Publishers B. Vol, PP:191-230.
- Laubach, S. E. and Ward, M. E. (2006). Diagenesis in porosity evolution of opening-mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico, Tectonophysics, Vol: 419, PP: 75-97.
- Leeder, M., Jackson, j. (1993). The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basins, with examples from the Western united states and central Greece, Basin Research, Vol:5, PP:79-102.
- Mandelbrot, B.B. (1983). The Fractal Geometry of Nature, W.H.Freeman NewYork.
- Monecke, T., Monecke, J., Herzig, P.M., Gemmell, J. B., and Mönch, W. (2005). Truncated fractal frequency distribution of element abundance data: a dynamic model for the metasomatic enrichment of base and precious metals, Earth and Planetary Science Letters, Vol: 232 (3- 4), PP: 363-378.
- Okubo, P., Aki, K. (1987). Fractal geometry in San Andreas Fault System, Journal of Geophysical Resarch, Vol: 92, No.B1, PP:331-344.
- Pickering, G., Peacock, D. C. P., Sanderson, D. J., and Bull, J. M. (1997). Modeling tip zones to predict the throw and length characteristics of faults, AAPG Bulletin, Vol: 81, PP: 82-99.
- Sanderson, D. J., Roberts, S., and Gumiel, P. (1994). A fractal relationship between vein thickness and gold grade in drill core from La Codosera, Spain, Economic Geology, Vol: 89 (1), PP: 168-173.
- Tirrule.R., Bell.L.R., Griffis, R.J., and Camp, V. .E. (1983). The Sistan suture zone of eastern Iran, G.S.A, Vol:94, PP:134-150.
- Tomkin.j.H, Braun.J. (1999). Simple models of drainage reorganization on a tectonically active ridge system, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol:42, PP:1-10.
- Turcotte, D.L. (1986). Fractals Model for Crustal Deformationn, Tectenophys, Vol:132, PP:261-269.
- Turcotte, D.L. (1992). Fractals in Geology and Geophysics, PAG, V:131, PP:171-196.
- Walker, R.T., and Khatib, M.M. (2006). Active faulting in the Birjand region of eastern Iran, Tectonics, Vol:25, PP: 1-17.
- رشیدی، احمد (۱۳۹۰). تحلیل هندسی- جنبشی عناصر ساختاری کوه کمر حاجی (شمال غرب بیرجند، شرق ایران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند. صص ۶۰-۴۵.
- شهریاری، سهراب؛ خطیب، محمد مهدی (۱۳۷۶). تحلیل فرکتالی گسل نه‌بندان. مجله علوم زمین سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی. شماره ۲۳-۲۴. صص ۳۳-۴۰.
- علیمی، محمدمین؛ خطیب، محمد مهدی؛ حسامی‌آذر، خالد؛ هیهات، محمودرضا (۱۳۹۳). ارزیابی لرزه زمین‌ساختی راندگی‌ها و پهنه‌های گسلی پنهان در گستره مختاران- خاور ایران. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز. شماره ۱۲. صص ۵۲-۴۱.
- کلانتری، مجتبی (۱۳۸۸). تعیین ارتباط حرکتی بین گسل سفیدآبه و گسل زاهدان به کمک شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی و داده‌های سائزموکتونیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه زاهدان.
- نبوی، محمدحسن (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- یوسفی، مهدی (۱۳۹۲). تحلیل مهاجرت پرتگاه‌های گسلی فعال شکرآب با استفاده از داده‌های ریخت‌زمین‌ساختی و نوزمین‌ساختی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.
- یوسفی، مهدی؛ خطیب، محمد مهدی؛ غلامی، ابراهیم؛ موسوی، سیدمرتضی (۱۳۹۳). ارزیابی فعالیت گسل شکرآب (شمال بیرجند) بر مبنای داده‌های ریخت‌زمین‌ساختی. فصلنامه پژوهش‌های دانش‌زمین. شماره ۱۴. صص ۶۵-۵۳.
- Adams, K.D., Wesnousky, S.G., and Bills, B.G. (1999). Isostatic rebound, active faulting and potential geomorphic effects in the Lake Lahontan basin, Nevada and California. Geological Society of America Bulletin, Vol:111, PP:1739-1756.
- Bamsly, M.F., Devanery, R.L., Mandelbrot, B.B., Peitgen, H.O., Saupe,D., and Voss, R.F. (1988). The science of Fractal Images, Sprringer,Verlage, New York, Inc, P:311.
- Cheng, Q. (1995). The perimeter-area fractal model and its application to geology, Mathematical Geology, Vol: 27 (1), PP: 69-82.
- Cheng, Q. (1997). Fractal/multifractal modeling and spatial analysis, In: Glahn, V.P. (Ed.), Proceedings IAMG'97, Vol: 1, 1, PP:57-72.
- Dimri, V. P. (2005). Fractals in geophysics and seismology: an introduction, In: Dimri, V. P. (Ed.), Fractal Behaviour of the Earth System, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, PP: 1-22.