

# تحلیل ساختاری و ژئودینامیکی سیستم گسلی تفت، براساس هندسه و چگالی فرکتالی سیستم گسلی

## آن، غرب و جنوب غرب یزد

حسین حاجی‌علی‌بیگی

استادیار گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

مهناز ندایی

استادیار گروه زمین شناسی دانشگاه پیام نور بیرجند

بابک سامانی

استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

وحید آرامشیان

دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته نکتونیک، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

[h-alibeigi@sbu.ac.ir](mailto:h-alibeigi@sbu.ac.ir)

### چکیده

منطقه مطالعاتی این پژوهش در نزدیکی شهر تفت، واقع در ۳۵ کیلومتری غرب و جنوب غرب شهر یزد، و در استان یزد واقع شده است. سیستم گسلی تفت در این منطقه مشتمل بر سه پهنه گسلی اصلی، تفت-هامانه، زردشتی و میل سفید می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از روش مربع شمار الگوی گسلس این منطقه به لحاظ هندسه فرکتالی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین چگالی فرکتالی بعنوان یک عامل موثر در شناسایی رفتار فرکتالی گسل‌ها در این پژوهش معرفی می‌شود. با توجه به ابعاد فرکتالی بدست آمده، دو پهنه گسلی میل سفید و تفت-هامانه شباهت ساختاری زیادی دارند. پهنه گسلی زردشتی با بعد فرکتالی زیاد دارای گستره سطحی زیاد و بلوغ کمتر می‌باشد. براساس چگالی فرکتالی، پهنه گسلی میل سفید دارای بلوغ بوده و از انشعابات کمتری برخوردار است. در پهنه گسلی تفت-هامانه چگالی فرکتالی بیانگر بلوغ و رشد نسبی گسل بطور هم اندازه می‌باشد. پهنه گسلی زردشتی در حال رشد بوده و در مراحل نابالغ بسر می‌برد. با توجه به قرارگیری پهنه گسلی زردشتی در مجاورت خرد قاره ایران مرکزی و مقادیر بعد و چگالی فرکتالی محاسبه شده برای این پهنه گسلی که موید رشد آن و وجود انشعابات متعدد برای این پهنه گسلی است، به نظر می‌رسد که تغییر شکل در حال مهاجرت به سمت لبه جنوب شرق منطقه مطالعاتی در مجاورت خرد قاره ایران مرکزی می‌تواند ناشی از عملکرد این پهنه گسلی باشد. این شرایط ژئودینامیکی به لحاظ کاربردی بسیار اهمیت داشته و ضروری است که در تحلیل‌های سائزموکتونیک، ساختاری و تقسیم‌بندی استرین منطقه تفت مورد توجه قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** هندسه فرکتالی، چگالی فرکتالی، سیستم گسلی تفت، استان یزد

### مقدمه

واژه فرکتال که حدود ۶۰ سال قبل توسط (مندلبرو ۱۹۸۳) برای بیان اشکال یا پدیده‌های طبیعی که طول شاخص ندارند و خودهمسان هستند به کار برده شد. این موضوع ناگهان در طی چند سال مورد توجه محققان قرار گرفت. به طوری که ریاضیات محض را به علوم طبیعی و علوم کامپیوتر پیوند زد. در طی ۲۰ تا ۳۰ سال اخیر هندسه فرکتالی و مفهوم آن ابزار اصلی اغلب علوم طبیعی بوده است (آرامشیان، ۱۳۹۵). بر اساس نظر (مندلبرو ۱۹۸۳) گسل‌ها یکی از اشیاء و اشکال نامنظم طبیعی هستند که از یک هندسه ناقلاقدسی تبعیت می‌کنند و می‌توان آنها را با هندسه فرکتال توضیح داد.

در این هندسه با تعیین بعد فرکتالی ساختارهایی مانند گسل‌ها، محور چین‌ها، و آبراهه‌ها این امکان وجود دارد که خصوصیات مانند عرض زون خرد شده، میزان جابه‌جایی گسل‌ها و محل و موقعیت گسل‌ها و چین‌های مدفون را مشخص کرد (Turcotte, 1997; Vere-Jones, 1992; Xiao et al., 2012).

روش‌های فرکتالی به دلایل بسیاری از جمله در نظر گرفتن توزیع فضایی داده‌های شکل هندسی ساختارها و همچنین استفاده از تمام داده‌های

بدون تغییر اساسی در ماهیت آنها، کاربردهای بسیار زیادی در مطالعات زمین‌شناسی داشته و توسط محققین این علوم بارها بکار گرفته شده‌اند (Chen et al., 1994; Chen 1999; Davis, 2002; Li et al., 2003; Afzal et al., 2011; Afzal et al., 2012; Hassanpour and Afzal, 2013; Nouri et al., 2013 و همکاران، ۱۳۹۰ و ادیب و همکاران، ۱۳۹۵).

ساختارهای گسلی، بدون توجه به مقیاس مشاهده، سربهای فرکتالی و ساختارهای پیچیده‌ای هستند که خودهمسان می‌باشند (King and Clark, 1984). بنابراین بر اساس این نظریه سطح گسلی مشخصی وجود ندارد (King and Yielding, 1983).

در همین ارتباط تغییر شکل شکننده لیتوسفر و بطور کلی شدت استرس بحرانی و انرژی به خصوصیات هندسی گسل بستگی دارند. بر اساس نظر کینگ و کلارک (King and Clark, 1984) بی‌نظمی استرس ناشی از بی‌نظمی هندسی گسل در سطح است و لغزش یا افت استرس در صفحات گسلی بطور فرکتالی توزیع یافته است. در نتیجه توزیع زمانی و مکانی زمین لرزه‌ها، نتیجه خودهمسانی در هر سری فرکتالی از گسل‌هاست. در واقع نحوه

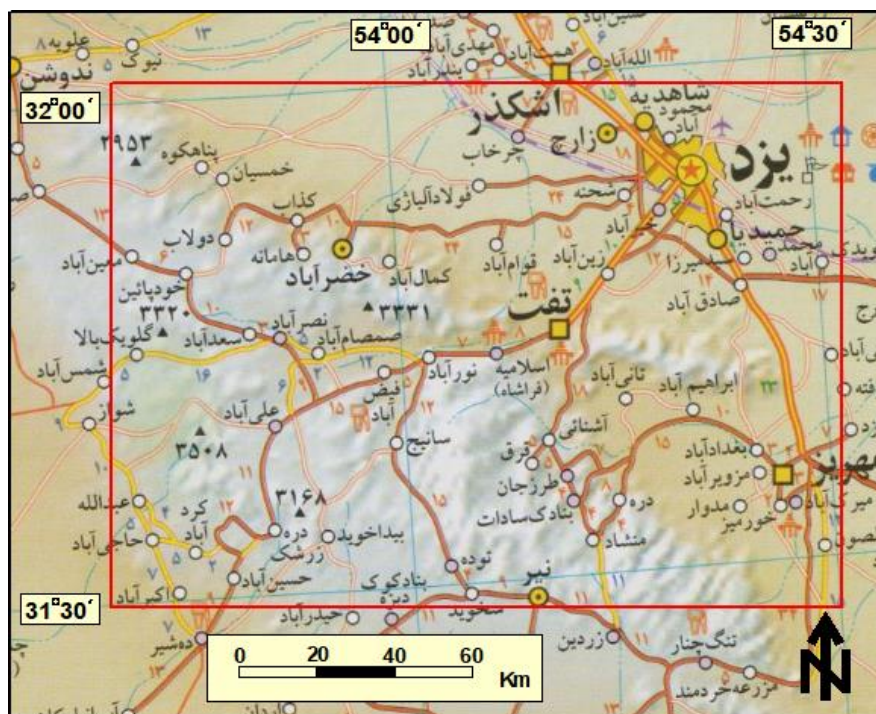
نیز استفاده کرد (Sukmono et al; 1996). اگر رفتار فرکتالی در طی یک چرخه لرزه‌ای در اختیار باشد، در این صورت این امکان وجود دارد که هندسه فرکتالی گسل الگوی لرزه‌خیزی گسل را ایجاد کند و بنابراین درک این هندسه به پیش‌بینی زلزله نیز کمک می‌نماید.

سیستم گسلی مورد نظر این پژوهش در منطقه تفت، واقع در غرب و جنوب‌غرب یزد قرار دارد. این سیستم گسلی مشتمل بر سه پهنه گسلی اصلی، تفت-هامانه، زردشتی و میل سفید است. در این پژوهش بررسی این سیستم گسلی بر اساس هندسه فرکتالی، با استفاده از روش مربع‌شمار (Box-Counting) و همچنین چگالی فرکتالی صورت خواهد گرفت. پارامتر چگالی فرکتالی که برای اولین بار در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، پارامتر موثرتری از بعد فرکتالی است که در تحلیل فرکتالی گسل‌ها معرفی شده و برای الگوی رفتاری سیستم گسلی منطقه تفت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### جایگاه زمین‌شناختی و تکتونیک منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه با موقعیت جغرافیایی  $54^{\circ}30'$  و  $53^{\circ}45'$  طول شرقی و  $32^{\circ}00'$  و  $31^{\circ}30'$  عرض شمالی در نزدیکی شهر تفت، در استان یزد واقع شده است (شکل ۱).

آزاد شدن استرین در سیستم گسلی مربوط به هندسه پیچیده گسلی است و پدیده‌های لرزه‌زا از خصلت خودهمسانی گسلها پیروی می‌کنند. درجه بی‌نظمی گسلی که توسط بعد فرکتالی  $D$  تعیین می‌شود، می‌تواند با پارامترهای گسلش نظیر شرایط استرس، درجه تراکم انرژی گسلش و شکستگی مربوط باشد (Velde et al., 1990; Nagahama et al., 1994). بنابراین برای فهم مکانیک گسلش نظیر تجمع استرس و ناهمگن شدن آن، باید موضوع پیچیدگی هندسه سطح گسلی را پذیرفت (Pollard and Segal, 1987). مناطق با هندسه پیچیده‌تر، با مقادیر بزرگتر بعد فرکتالی مشخص می‌شوند (Okubo and Aki, 1987). مقادیر  $D < 1$  جایجایی غالب توسط گسل‌های بزرگ و به تعداد کم و مقادیر  $D > 1$  جایجایی غالب توسط گسل‌های کوچک با تعداد زیاد را نشان می‌دهد. به این ترتیب جایجایی کل با جمع یا ترکیب هر دو بدست می‌آید. جایجایی تابعی از قانون توان است و تخمین صحیحی از کشش و یا انقباض در آن قسمت را در اختیار قرار می‌دهد (Jackson and Sanderson, 1992; Walsh et al, 1991). تغییر بعد فرکتالی در قطعات فرعی گسل‌ها به غیریکنواختی هندسه فرکتالی گسلی در طول آن تفسیر می‌شود (Scholz and Aviles, 1986). لذا روش فرکتالی می‌تواند ابزار نیرومندی برای تحلیل تنوع هندسه گسلی بوده و در نتیجه می‌توان از آن برای تحلیل فرایندهای ژئودینامیکی



شکل ۱. نقشه راهها و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر تفت، در استان یزد (برگرفته از نقشه اطلس راههای ایران، ۱۳۸۰). موقعیت منطقه مورد مطالعه با کادر مشخص شده است.

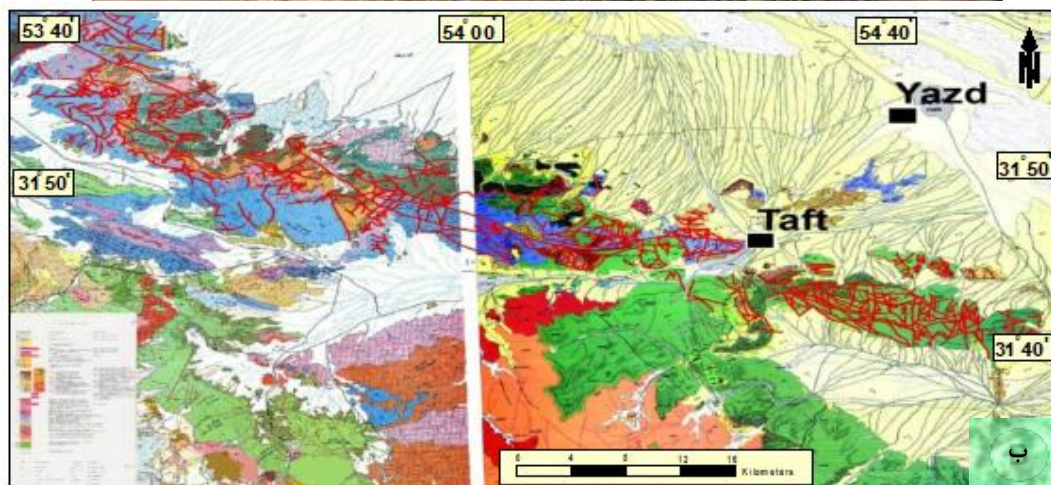
مختلف، شکستگی‌ها و گسل‌های بزرگ و مهمی در این منطقه شکل گرفته است. وجود نوارهای افیولیتی و سیماهای خطی آتشفشانی گواهی بر عمق زیاد فرایندهای گسلش در این منطقه می‌باشد (Kargarabafghi et al., 2011).

این منطقه بخشی از استان یزد است که در حاشیه کویر مرکزی ایران و تقریباً در میانه فلات مرکزی ایران قرار دارد (سامانی و چرچی، ۱۳۹۴). منطقه مطالعاتی از لحاظ تکتونیک، ساختاری و چینه‌شناسی در منطقه تکتونیک ایران مرکزی واقع شده است. منطقه ایران مرکزی با قدمتی طولانی به صورت یک خرده‌قاره تکتونیک در طی فعالیت‌های تکتونیک و وقایع کوهزایی نقش بسیار اساسی در شکل‌گیری سیماهای تکتونیک امروزی فلات ایران بازی کرده است. طی رخداد فازهای تکتونیک متعدد و

دار کرتاسه روی سازند جمال با دگرشیبی قرار گرفته‌اند. رویداد تکتونیکی سیمین پسین در ایران مرکزی بسیار اهمیت داشته که علاوه بر چین-خوردگی سنگهای قدیمی‌تر از کرتاسه، و نفوذ ماگمای اسیدی و گسل‌های اصلی و فرعی، موجب فعالیت مجدد گسل‌های با روند شمالی-جنوبی قدیمی که به احتمال زیاد مربوط به ساختار پالئوژوئیک پیشین و کامبرین بوده‌اند، شده است که در راستای برخی از آنها در دوره ترسیر توده ماگمایی بازیک و دایکها جایگزین شده است. کرتاسه پایینی با سنگ‌های تخریبی موجود در پایه خود به‌گونه‌ای پیشرونده روی سنگ‌های نفوذی شیرکوه جای می‌گیرد. رویداد معادل لازمید که نشان‌های آن به صورت دگرشیبی میان سنگ‌های قدیمی‌تر و کنگلومرا و ماسه سنگ‌های سازند کرمان در بیشتر جاهای ایران شناخته شده است، اهمیت خاصی دارد. زیرا موجب فعالیت‌های آتشفشانی نیز شده و گدازه‌ها و پرتابه‌های بازیک و اسیدی را در ایران مرکزی ایجاد کرده است. این جنبشها همراه با چین-خوردگی، فرسایش، حمل و نقل و برجای‌گذاری نهشته‌های تخریبی کنگلومرای هم ارز کرمان آغاز و سپس با جای‌گیری نهشته‌های رسوبی-آتشفشانی ائوسن زیرین تا میانی دنبال می‌شود. احتمالاً جای‌گزینی توده-های نیمه ژرف در میان سنگ‌های کرتاسه در ناحیه دره زنجیر (معدن چینی ده بالا) نیز در همین ارتباط است (عندلیبی، ۱۳۶۸).

به‌جز بخشی کوچک از این منطقه مطالعاتی، مانند شمال‌غرب این منطقه و یال شمالی ناودیس مهریز، بر اساس شکل ساختارها، منطقه‌ای پر تکاپو را می‌سازند که نتیجه آن، جابه‌جایی همه واحدهای سنگی و گسلیده بودن آن‌هاست. کهن‌ترین سنگ‌های پدیدآورنده پی سنگ ناحیه، با سازند کهر در البرز مقایسه شده و واحدهای چینه شناسی وابسته به پالئوژوئیک با رخساره سکوی قاره‌ای روی آن جای می‌گیرند. رخداد آسنیتیک با یک ناپیوستگی خفیف همراه است و در گذر از سنگ‌های وابسته به پرکامبرین به سازند کربناته سلطانیه، در ناحیه مزرعه حاجی-حسین (رستم آباد)، مشهود است. جای گرفتن سنگ‌های پرمین بالایی با حضور سنگ ماسه‌ای روی نهشته‌های کربناته کربنیفر و نبود نهشته‌های پرمین پایینی، شاید بتواند گواهی بر عملکرد رخداد هرسنین بوده باشد (عندلیبی، ۱۳۶۸).

هم‌زمان با خروج حوضه از آب و تأثیر نیروهای کششی در پرمین بالایی، همراه با تکاپوی ولکانیسم در افق‌های لاتریتی پوشش ولکانیکی به-خوبی در معرض دید قرار می‌گیرد. پیامد رخداد سیمین پسین، ناحیه بررسی شده با تکاپوی ماگمایی روبرو بوده است که سرانجام آن تزریق توده نفوذی گرانیت، گرانودیوریتی شیرکوه در میان سنگ‌های وابسته به سازند شمشک است که در گستره‌ای وسیع نمایان شده است. سنگ‌های فسیل-



شکل ۲. نمایش منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر تفت همراه با گسل‌های ترسیم شده در تصویر ماهواره‌ای الف: (برگرفته از Google map) و در نقشه‌های زمین‌شناسی ب: (برگرفته از حاج ملا علی، ۱۳۷۹ و علوی نایینی، ۱۳۷۲).

وجود نهشته‌های تخریبی نوژن از یک سو و نبود نهشته‌های وابسته به ائوسن بالا-الیگوسن، از سوی دیگر شاید بتواند نشان‌گر رخداد پیرنین در منطقه باشد. چنین به نظر می‌رسد این عملکرد که با بالا آمدگی و بلافاصله با تخریب نیز همراه بوده است، موجب بر جای گذاری نهشته‌های تخریبی نوژن شده باشد. وجود شیب کم (۵ درصد) در کنگلومرای جوان (هم ارز کنگلومرای کهریزک) موجود در منطقه نشان از بازپسین حرکات و جنبش‌های آلپ پایانی با سازوکار خفیف در ناحیه بررسی شده است (عنصلیبی، ۱۳۶۸).

### زمین شناسی ساختاری

گسل‌ها در منطقه مطالعاتی (شکل ۲) این پژوهش مشتمل بر دو دسته گسل‌های اصلی و گسل‌های فرعی هستند (آرامشیان، ۱۳۹۵)، که در این مقاله تنها به شرح مختصری در باره آنها پرداخته می‌شود: گسل‌های فرعی: در یک نگاه گسل‌های فرعی فراوانی در ناحیه دیده می‌شود که همه آنها از دو روند غالب پیروی می‌کنند، گسل‌های با راستای شمال غربی-جنوب شرقی از نوع امتداد لغز راست بر و گسل‌های شمال شرقی -جنوب غربی که جوان تر از گسل‌های نوع اول بوده، دارای حرکت چپ بر هستند (آرامشیان، ۱۳۹۵).

گسل‌های اصلی: سیستم‌های گسلی اصلی در منطقه عبارتند از: گسل تفت- هامانه: این گسل از شمال تفت و تا پایانه مرکزی میکروپلیت ایران مرکزی، در غرب دیده می‌شود. سازوکار آن از نوع امتداد لغز راست بر است. از شمال تفت تا بخش‌های مرکزی دارای روند شرقی-غربی، است به سوی شمال غربی تغییر جهت می‌دهد. ادامه گسل تفت بسوی شرق توسط نهشته‌های آبرفتی پوشیده و از دید پنهان می‌شود. در دو سوی این گسل به ویژه بخش شمالی، واحدها سنگی توسط این گسل به شدت گسلیده و جابجا شده‌اند.

گسل زردشتی: این احتمال وجود دارد که گسل زردشتی دنباله گسل تفت باشد که به سوی جنوب شرقی تغییر جهت داده است. سازوکار این گسل که از نوع نرمال با افتادگی حدود ۵۰ متر بسوی جنوب می‌باشد. گسل دارای امتداد شمال غربی -جنوب شرقی و شیبی حدود ۸۵ درجه به سوی جنوب-جنوب غربی دارای می‌باشد.

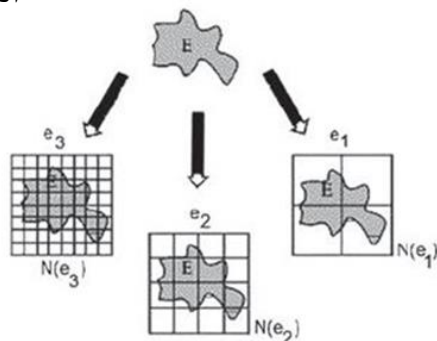
گسل میل سفید: این گسل در ادامه بخش شمال غربی گسل تفت - هامانه قرار گرفته و دارای روندی شمال غربی-جنوب شرقی است. سازوکار این گسل شبیه به گسل تفت-هامانه است (آرامشیان، ۱۳۹۵).

### روش کار

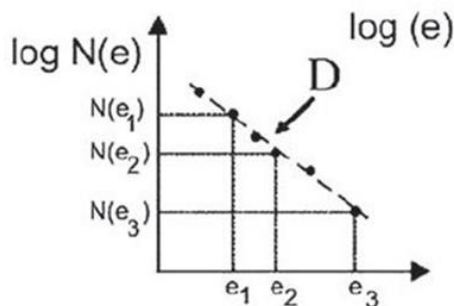
بر اساس تئوری فرکتالی، بعد شکستگیها و گسلها کسری است و تراکم آنها را در فضایی با سیستم متریک مشخص می‌شود. بعد فرکتالی اندازه گیری شده برای یک زون گسلی، نمایانگر پیچیدگی ساختار گسلی و ترکیبی از بی‌نظمی حاکم بر گسل و شرایط قطعه قطعه شدگی (Segmentation) آن گسل می‌باشد. بعد فرکتالی D حضور شاخه‌ها و انشعابات اطراف گسل را تعیین می‌کند و رابطه بین گسل اصلی و گسل‌های فرعی موجود در یک سیستم گسلی را بیان می‌نماید. در واقع این امکان وجود دارد که توزیع مکانی ساختار پیچیده شکستگی‌ها و گسل‌ها در یک زون برشی را بتوان با بعد فرکتال بیان نمود. همچنین اختلاف در پیچیدگی یک سیستم گسلی بین قطعات مختلف آن، با اختلاف در بعد فرکتالی بدست آمده برای آن سیستم مشخص می‌شود. مناطق گسلی با هندسه پیچیده تر گسلی، واجد بعد فرکتالی بزرگتر هستند (Okubo and Aki 1987). روشهای متعددی برای اندازه‌گیری بعد فرکتالی توسط مندلیبروت (۱۹۸۳) بیان شده است که در این پژوهش از روش الگوریتم مربع شمار برای بدست آوردن بعد فرکتالی سیستم گسلی تفت استفاده خواهد شد.

برای انجام این روش ابتدا فضای E بعدی اقلیدسی مفروض را به مربعاتی با طول ضلع  $r$  تقسیم کرده، سپس تعداد مربعاتی که برای پوشش کامل پدیده مورد نظر لازم است شمارش می‌گردد (شکل ۳). این تعداد با  $N(L)$  نشان داده می‌شود. بعد فرکتالی از وابستگی پوشش مربعاتی  $N_{Box}(L)$  در  $L$  متغیر بدست می‌آید. اگر منحنی خودهمسان با طول ماکزیمم  $l_{max}$  باشد، مقیاس کوچکتر  $rl_{max} = L$  که  $r < 1$  و منحنی شامل  $N = \frac{1}{r^D}$  قطعه از طول  $L$  می‌باشد، بنابراین  $D \geq 1$  و  $\frac{1}{LD-1} \propto$  باشد، در این صورت می‌توان روابط ۱ تا ۳ را نوشت (Voss, 1985).

الف



ب



شکل ۳. نمایش روش موسوم به روش مربع شمار (Box-counting) برای تعیین بعد فرکتالی. الف: نمایش نحوه تقسیم بندی فضای E بعدی اقلیدسی مفروض به مربعات با طول ضلع  $r$ ، ب: ترسیم نمودار و بدست آوردن بعد فرکتال برای فضای مفروض (برگرفته از: Rodríguez Pascua et al; 2003).

در رابطه ۵ نماد  $N_{Box}$ ، تعداد مربعات شامل گسل در شبکه به طول  $r$ ،  $N_{Total}$ ، تعداد کل مربعات به طول  $r$  و  $p$  چگالی فرکتالی می‌باشد.

#### هندسه فرکتال سیستم گسلی در منطقه مورد مطالعه

برای تحلیل و بررسی فرکتال سیستم گسلی تفت دو سری نقشه با دو مقیاس مختلف در این پژوهش استفاده شد. علت کاربرد دو مقیاس مختلف این است که معلوم شود که آیا ابعاد فرکتالی در دو مقیاس یکی هستند یا خیر. به عبارت دیگر آیا سیستم گسلی مونو فرکتالی است یا مولتی فرکتالی. بنابراین با توجه به وابستگی ابعاد فرکتالی به مقیاس مطالعه، تصمیم گرفته شد که مطالعات انجام شده در این دو مقیاس  $1:100,000$  و  $1:250,000$  انجام شود. بر همین اساس نقشه‌های بکارگرفته شده در این تحقیق، شامل نقشه‌های خضرآباد و یزد در مقیاس  $1:100,000$  (حاج ملا علی، ۱۳۷۹ و علوی نایینی، ۱۳۷۲) و نقشه‌های یزد و آباد در مقیاس  $1:250,000$  (عنبدلیبی، ۱۳۶۸ و سلیمی، ۱۳۶۸) می‌باشند. در مرحله اول، پس از زمین مرجع (Georeferencing) کردن نقشه‌های یاد شده در محیط نرم افزار ArcGIS، تمام گسلها و شکستگی‌های موجود در سرتاسر منطقه مطالعاتی ترسیم شدند. تصویر گسل‌های منطقه در دو مقیاس مفروض در نهایت برای تحلیل و بررسی فرکتال سیستم گسلی تفت مورد استفاده قرار گرفت. (شکل‌های ۴ و ۵)

$$L \cdot N = L \frac{L^{max}^D}{L} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$N_{Box}(L) = \left( \frac{L^{max}}{L} \right)^D \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$N_{Box}(L) \propto \frac{1}{L^D} = L^{-D} \quad (\text{رابطه ۳})$$

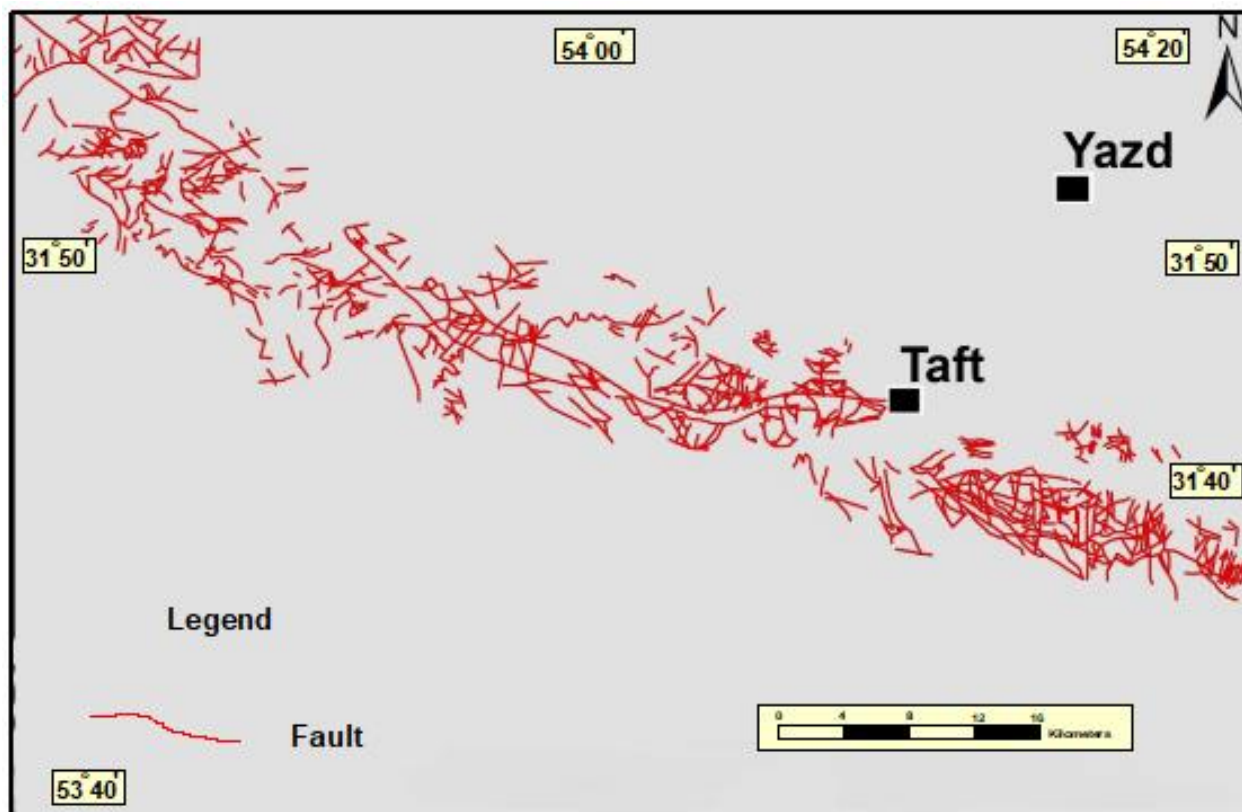
و در صورتی که شکل مورد نظر با انشعابات فراوان در اختیار باشد و  $N_{Box}$  تابعی از اندازه مربعات باشد، می‌توان رابطه ۴ را برای سیستم مفروض نوشت (ندایی، ۱۳۷۸).

$$N_{Box}(r) \propto r^{-D} \quad (\text{۴})$$

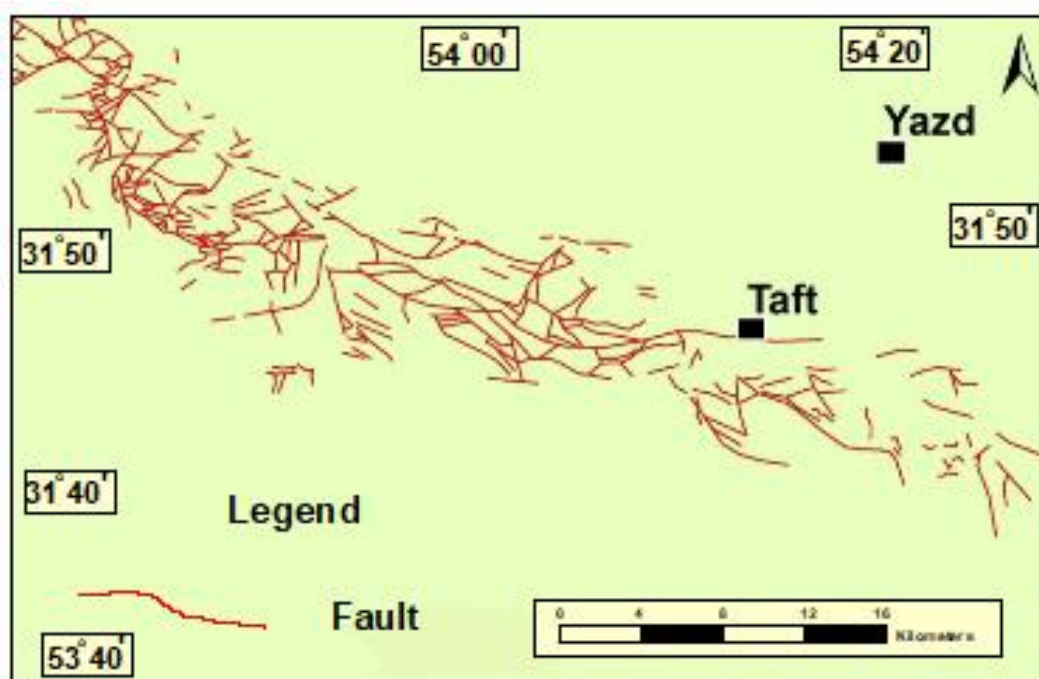
هنگامی که پارامتر  $r$  تغییر می‌کند، تعداد تجمعی هم تغییر می‌کند و بنابراین بعد  $D$  توزیع یک شکل در صفحه را مشخص می‌نماید. وقتی  $D$  یک عدد صحیح باشد با بعد تجربی مطابق می‌شود. این روش نه تنها برای نقاط پراکنده کاربرد دارد بلکه برای اشکال پیچیده‌تر با انشعابات زیاد هم بکار می‌رود.

برای مقایسه الگوی رفتاری الگوهای مفروض می‌توان از پارامتر چگالی فرکتالی که برای اولین بار در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهره جست. چگالی فرکتالی از رابطه ۵ بدست می‌آید (ندایی، ۱۳۷۸).

$$\frac{N_{Box}}{N_{Total}}(r)r^{-p} \quad (\text{رابطه ۵})$$



شکل ۴. نقشه گسل‌های ترسیم شده منطقه در مقیاس  $1:100,000$ . برای تهیه این نقشه علاوه بر مراجعه به نقشه زمین شناسی با مقیاس  $1:100,000$  (یزد و خضرآباد)، به نقشه گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) مراجعه شده است.



شکل ۵. نقشه گسل‌های ترسیم شده در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰. برای تهیه این نقشه علاوه بر مراجعه به نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (یزد و آباده)، به نقشه گسل های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) مراجعه شده است.

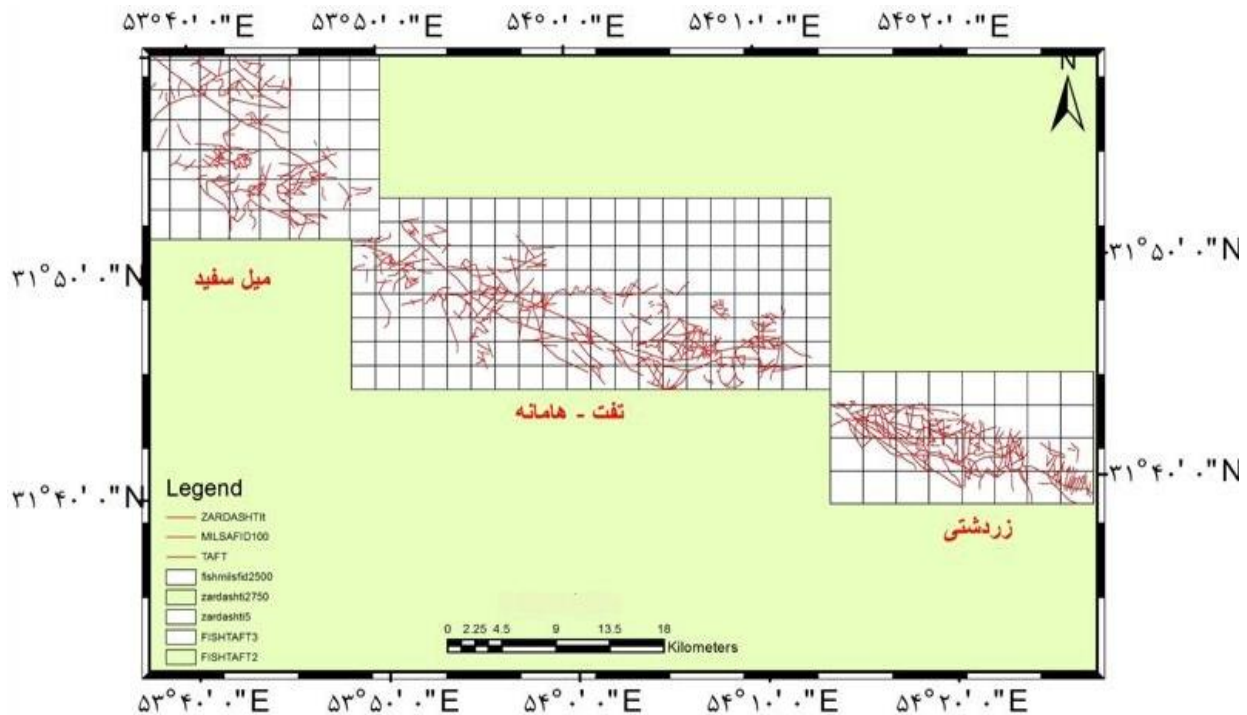
لازم به ذکر است که از محاسبه بعد فرکتالی پهنه زردشتی به علت نقشه نشدن کامل گسل‌ها در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ صرف نظر شده است. با توجه به ابعاد فرکتالی بدست آمده به نظر می رسد که بتوان گفت که دو پهنه میل سفید و تفت-هامانه شباهت ساختاری زیادی دارند و پهنه زردشتی با بعد فرکتالی زیاد دارای گستره سطحی زیاد و بلوغ کمتر می باشد، ولی هنوز الگوی رفتار این گسلها نامعلوم است.

#### چگالی فرکتال سیستم گسلی تفت

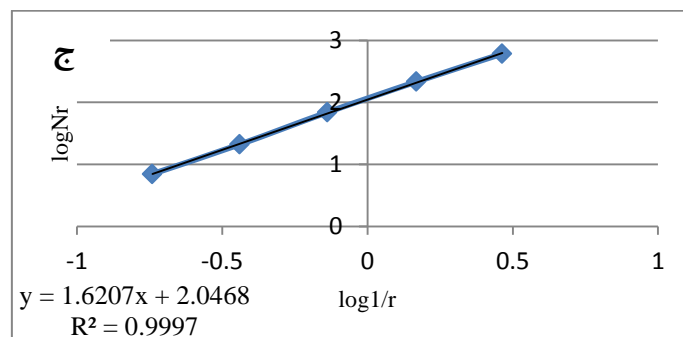
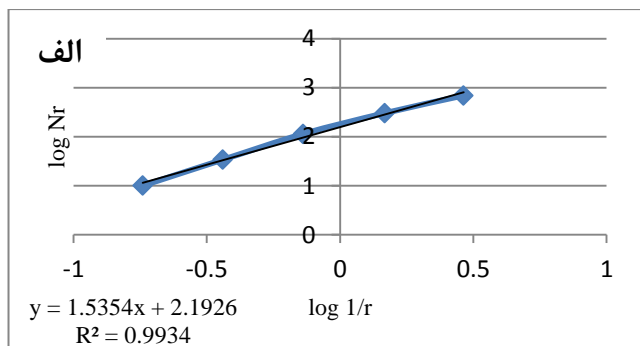
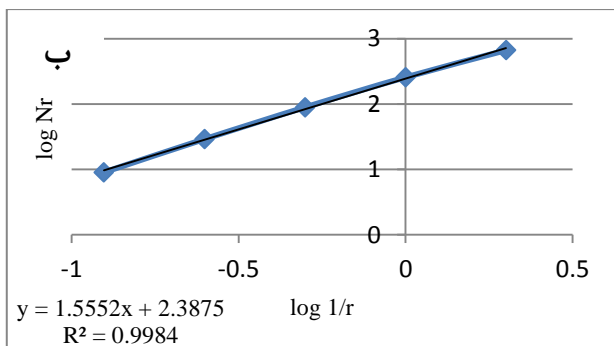
برای مقایسه الگوی رفتاری پهنه‌های گسلی منطقه مورد مطالعه با یکدیگر، از پارامتر چگالی فرکتالی نیز استفاده می‌شود. در این پژوهش این پارامتر برای مشخص شدن نحوه انشعاب و تراکم گسلها در مقیاس-های مختلف بکار گرفته می‌شود.

همانند بعد فرکتالی، این مقادیر نیز برای هر پهنه گسلی بدست آمده و در یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی نسبت به اندازه مربعات ترسیم گردید (شکل ۹). نتایج حاصله از این شمارش برای هر سه پهنه گسلی میل سفید، تفت-هامانه و زردشتی با توجه به نمودارهای ترسیمی (شکل ۹) حکایت از آن دارد که هر کدام از پهنه‌ها دارای ویژگی رفتاری خاص خود هستند. به طوری که می‌توان هر پهنه از پهنه دیگر بواسطه آن ویژگی رفتاری متمایز نمود.

پس از مرحله ترسیم گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه مطالعاتی، بر اساس هندسه ظاهری گسل‌ها و شکستگی‌های ترسیم شده و روندهای مختلف موجود در ساختار کلی این سیستم گسلی، منطقه به سه پهنه تقسیم شد (شکل ۶). پهنه‌های سه‌گانه مذکور از شمال غرب به جنوب شرق شامل پهنه‌های میل سفید، تفت-هامانه و زردشتی می باشند. برای بدست آوردن بعد فرکتالی هر بخش از سیستم گسل، از روش مربع بندی استفاده گردید. عملیات شبکه بندی به صورت مجزا، برای هر پهنه با اندازه مربعات از یک چهارم اندازه طول سیستم گسل شروع شده و هر بار نصف شد. برای هر پهنه با استفاده از لگاریتم طول ضلع مربع و لگاریتم تعداد مربعات واجد گسل و شکستگی، نمودار مربوطه رسم شد. سپس شیب نمودار که همان بعد فرکتالی است، محاسبه گردید. شکل های ۷ و ۸ ابعاد فرکتالی بدست آمده در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ را نشان می دهد. نتایج حاصله در (جدول ۱) درج شده است. بر این اساس بعد فرکتالی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای پهنه میل سفید ۱/۵۳، برای پهنه تفت-هامانه ۱/۵۵ و برای پهنه زردشتی ۱/۶۲ محاسبه شده است (شکل ۷ و جدول ۱). همچنین، بر همین اساس، بعد فرکتالی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ برای پهنه میل سفید ۱/۴۸ و برای پهنه تفت-هامانه ۱/۴۷ محاسبه شده است (شکل ۸ و جدول ۱).



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی انجام شده برای پهنه‌های گسلی میل‌سفید، تفت-هامانه و زردشتی در منطقه مطالعاتی.

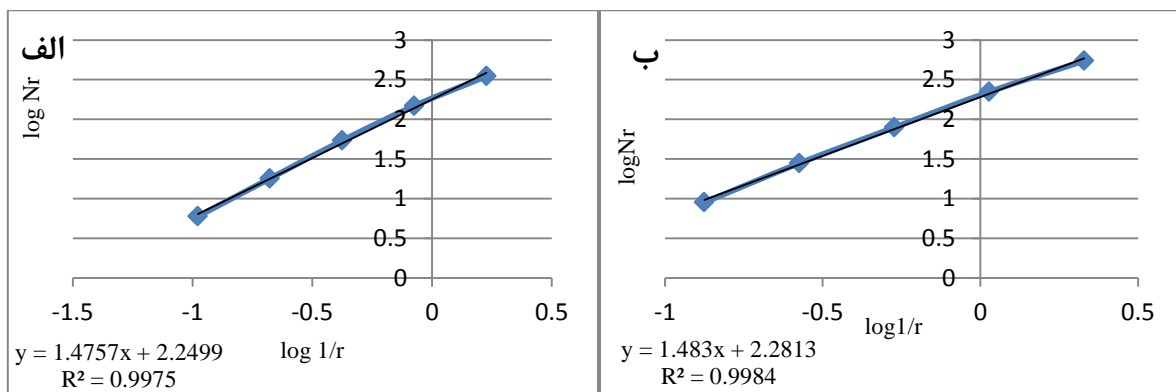


شکل ۷. ابعاد فرکتالی بدست آمده در مقیاس ۱ : ۱۰۰۰۰۰ که بر اساس ترسیم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تعداد مربعات شامل گسل در مقابل اندازه مربعات بدست آمده است. الف) بعد ۱/۵۳ با ضریب اطمینان ۹۹/۳٪ برای پهنه میل‌سفید ب) بعد ۱/۵۵ با ضریب اطمینان ۹۹/۸٪ برای پهنه تفت-هامانه ج) بعد ۱/۶۲ با ضریب اطمینان ۹۹/۹٪ برای پهنه زردشتی. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود.

در پهنه گسلی میل سفید در اندازه‌های بزرگتر مربعات شبکه‌بندی، نسبت تعداد مربعات شامل گسل، به تعداد کل مربعات بالا، و در اندازه‌های کوچکتر مربعات شبکه‌بندی، این نسبت کوچک است. این بدان معنی است که پهنه گسلی دارای بلوغ بوده و از انشعابات کمتری برخوردار است. پهنه گسلی تفت-هامانه با نسبت تقریباً خطی برای تمام اندازه مربعات شبکه مشخص می‌شود. به نحوی که تراکم گسلها در تمام اندازه‌های شبکه‌بندی ثابت است. این مسئله بیانگر بلوغ و رشد نسبی گسل بطور هم اندازه می‌باشد. اما در پهنه زردشتی شیب منفی نمودار بیانگر این است که تراکم گسل در اندازه مربعات کوچکتر شبکه‌بندی بیشتر از مربعات با اندازه بزرگتر است و این بدان معنی است که گسل در حال رشد بوده و در مراحل نابالغ بسر می‌برد.

(شکل ۷) ابعاد فرکتالی بدست آمده در مقیاس  $1:100000$  که بر اساس ترسیم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تعداد مربعات شامل گسل در مقابل اندازه مربعات بدست آمده است. الف) بعد  $1/53$  با ضریب اطمینان  $99/3\%$  برای پهنه میل سفید ب) بعد  $1/55$  با ضریب اطمینان  $99/8\%$  برای پهنه تفت-هامانه ج) بعد  $1/62$  با ضریب اطمینان  $99/9\%$  برای پهنه زردشتی. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود.

(شکل ۸) ابعاد فرکتالی بدست آمده در مقیاس  $1:250000$  که بر اساس ترسیم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تعداد مربعات شامل گسل در مقابل اندازه مربعات بدست آمده است. الف) بعد  $1/48$  با ضریب اطمینان  $99/8\%$  برای پهنه میل سفید ب) بعد  $1/47$  با ضریب اطمینان  $99/7\%$  برای پهنه تفت-هامانه. از محاسبه بعد فرکتالی پهنه زردشتی به علت نقشه نشدن کامل گسلها در این مقیاس صرفه نظر شده است.



(شکل ۸) ابعاد فرکتالی بدست آمده در مقیاس  $1:250000$  که بر اساس ترسیم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تعداد مربعات شامل گسل در مقابل اندازه مربعات بدست آمده است. الف) بعد  $1/48$  با ضریب اطمینان  $99/8\%$  برای پهنه میل سفید ب) بعد  $1/47$  با ضریب اطمینان  $99/7\%$  برای پهنه تفت-هامانه. از محاسبه بعد فرکتالی پهنه زردشتی به علت نقشه نشدن کامل گسلها در این مقیاس صرفه نظر شده است. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود.

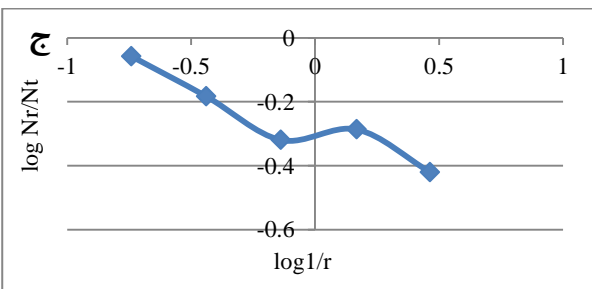
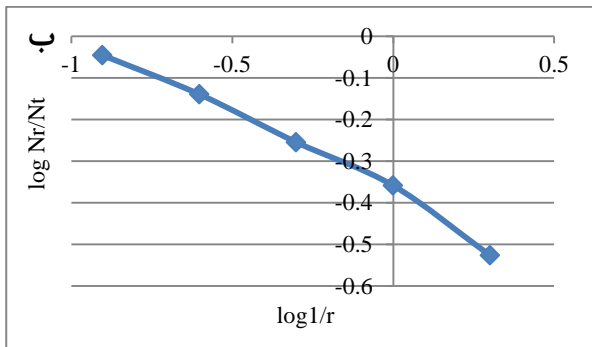
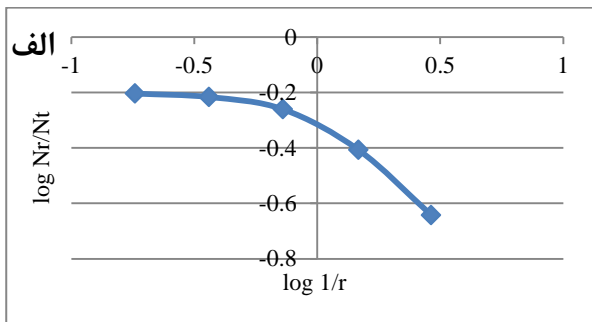
جدول ۱. بعد فرکتال برای سه پهنه زردشتی، تفت-هامانه و میل سفید در دو مقیاس  $1:100000$  و  $1:250000$ .

			پهنه
میل سفید	تفت-هامانه	زردشتی	مقیاس
$1/53$	$1/55$	$1/62$	$1:100000$
$1/48$	$1/47$	-	$1:250000$



## بحث

مدل تکتونیکی فشارش مذکور باعث چرخش استوانه (یا همان خرد قاره ایران مرکزی) گردیده است. این مدل همچنین توده‌های آمیزه رنگین در ایران مرکزی را ناشی از کافت خوردگی در اثر فرورانش مورب صفحه عربی و سیستم فشارشی ناشی از آن و اعمال کشش مربوطه توسط گسل‌های امتداد لغز معرفی می‌نماید و همخوانی نداشتن این آمیزه‌ها با زمین درز نئوتتیس را دلیل این مدعا می‌داند. با توجه به اینکه پهنه گسلی زردشتی در مجاورت خرد قاره ایران مرکزی واقع شده بوده و با توجه به تفاوت‌های رفتاری بدست آمده از چگالی فرکتالی برای پهنه‌های مختلف (میل سفید بالغ، تفت-هامانه با بلوغ و رشد برابر و زردشتی در حال رشد و نابالغ)، و مقادیر محاسبه شده بعد و چگالی فرکتالی در این پژوهش برای این پهنه گسلی، موید میزان بالای رشد این پهنه گسلی و وجود انشعابات متعدد را برای این پهنه گسلی است تایید می‌نماید، به نظر می‌رسد که تغییر شکل در حال مهاجرت به سمت لبه جنوب شرق قیچی در مجاورت خرد قاره ایران مرکزی و دور شدن از محل لولای قیچی در مدل مفروض را می‌توان ناشی از عملکرد این پهنه گسلی دانست.



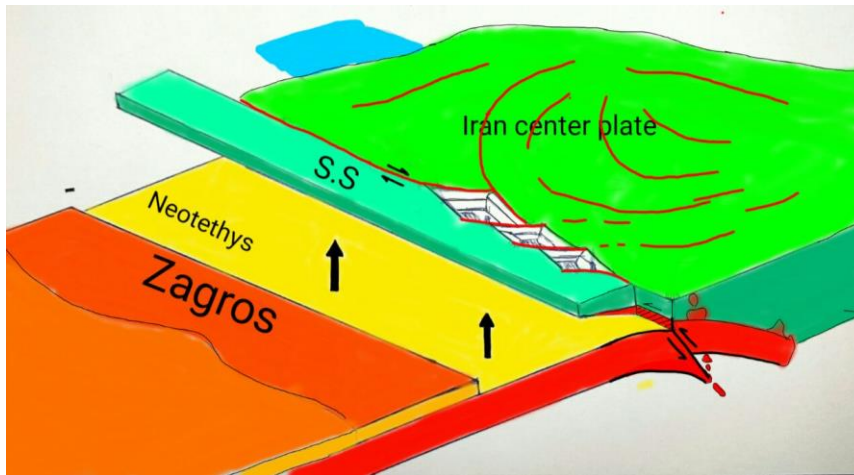
شکل ۹. چگالی فرکتالی بدست آمده برای پهنه‌های الف (میل سفید، ب) تفت-هامانه، ج) زردشتی. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود.

اهمیت روش‌های فرکتالی به این دلیل است که معمولاً این روش‌ها این امکان را فراهم می‌کنند تا بین نتایج بدست آمده از مطالعات زمین-شناسی ساختاری (یا هر نوع مطالعات مشابه) یک ارتباط منطقی برقرار نمود. و آنها را با ترسیم نمودارهای حاصل نتایج بدست آمده از روش فرکتالی توضیح داد. برای این کار معمولاً از نمودارهای لگاریتمی استفاده می‌شود. در نهایت اغلب نمودارها حاصله می‌توانند تغییرات و تفاوت‌های زمین‌شناختی موجود را بیان کنند. از جمله وجود تفاوت‌های ساختاری و فرایندهای ژئوفیزیکی را می‌توان برشمرد. به طوری که نقطه شکست بین قطعات خط مستقیم این نمودارها می‌تواند محلی برای جداسازی مقادیر گوناگون بکار رود (Li et al., 2003).

قبلاً بخش شرقی استان یزد با مدل‌سازی فرکتالی مورد مطالعه قرار گرفته بود (ادیب و همکاران، ۱۳۹۵)، ولی در منطقه مطالعاتی این پژوهش، تاکنون مطالعات فرکتالی انجام نشده است. بنابراین برای ارزیابی دقیق‌تر فعالیت‌های ساختاری و ژئودینامیکی این منطقه از روش فرکتالی استفاده شد. از آنجایی که توزیع فرکتالی شکستگی‌ها و یا ابعاد فرکتال یک گسل بیانگر نحوه فعالیت گسل و چگونگی گسترش آن می‌باشد (Turcotte, 1997)، بنابراین این ویژگی در این نوشتار مورد توجه قرار گرفت. مدل‌های فرکتالی زیادی برای بررسی چگونگی و نحوه توزیع گسل-ها در سطح پوسته زمین در یک منطقه مفروض ارائه شده است (آقاشاهی اردستانی، ۱۳۸۵ و چرچی و همکاران، ۱۳۹۰; Turcotte, 1997). علاوه بر این نوع کاربرد مطالعات و آنالیزهای فرکتالی، پیش از این استفاده از تحلیل‌های فرکتالی برای تعیین میزان فعالیت تکتونیک و بررسی و تحلیل ژئودینامیک یک منطقه نیز استفاده شده است (چرچی و همکاران، ۱۳۹۰ و ندایی، ۱۳۷۸ و شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶; Han, Cello et al., 2006; et al., 1998 Sukmono et al., 1996).

منطقه مطالعاتی این مقاله در نزدیکی شهر تفت قرار دارد و مشتمل بر سه پهنه گسلی میل سفید، تفت-هامانه و زردشتی است. در پژوهش انجام شده بر روی این سه پهنه گسلی، بر اساس هندسه فرکتالی، ابعاد فرکتالی برای این سه پهنه گسلی بدست آمد. بر این اساس دو پهنه میل سفید و تفت-هامانه با بعد فرکتالی نزدیک به هم و پهنه زردشتی با بعد فرکتالی بالاتر مشخص شدند. با توجه به ابعاد فرکتالی بدست آمده، به نظر می‌رسد که هندسه گسلی دو پهنه میل سفید و تفت-هامانه بسیار شبیه هم است. اما با توجه به چگالی فرکتالی که برای اولین بار در این تحقیق تبیین گردید، وضعیت رفتاری دو پهنه از هم مجزا می‌شود. در مورد پهنه زردشتی بعد فرکتالی بالا نشان دهنده رشد و انشعابات بیشتر گسل است که این مسئله با چگالی فرکتالی هم تایید می‌شود. بدین ترتیب که چگالی فرکتالی برای شبکه بندی‌های کوچکتر بیشتر است تا شبکه بندی‌های بزرگتر.

با توجه به مدل تکتونیکی ارائه شده (شکل ۱۰) برای بخشی از منطقه ارومیه-دختر در حد فاصل کاشان-نائین-بافت (محمدی‌نیا و خلج ۱۳۹۶) که در آن رشته کوه‌های البرز و زاگرس را دو لبه قیچی و منطقه ایران مرکزی را استوانه بین این دو لبه معرفی می‌نماید، این امکان وجود دارد که در اثر فشارش مداوم و مورب صفحه عربی، (در راستای تقریبی شمالی-جنوبی)، تنش‌های فشارشی و در راستای عمود بر آن، تنش‌های کششی (در راستای تقریبی شرقی-غربی) حاکم باشند. به این ترتیب مبتنی بر این



شکل ۱۰. مدل تکتونیکی ارائه شده برای چرخش بلوک ایران مرکزی بین البرز و زاگرس (محمدی نیا و خلج، ۱۳۹۶).

### نتیجه گیری

است که منطقه تفت را در بر می‌گیرد. بر این اساس، این احتمال وجود دارد که این گسل بخشی از سیستم خطواره گسلی باشد که در مجاورت خرده قاره ایران مرکزی منطقه مطالعاتی را به سمت جنوب شرق می‌راند. این نتیجه ضمن نوین و جدید بودن برای سیستم گسلی منطقه عمومی تفت بخصوص پهنه گسلی زردشتی به لحاظ فرارگیری منطقه در مجاورت خرده قاره ایران مرکزی اهمیت زیادی در ارتباط ژئودینامیکی این منطقه با مناطق مجاور دارد. ضمن اینکه به لحاظ کاربردی، برای تحلیل های ساینموتکتونیکی و بویژه برآورد توان لرزه‌ای و آنالیز خطر لرزه‌ای و تحلیل های ساختاری و تقسیم بندی استرین این منطقه باید توجه محققین قرار گیرد.

منطقه مطالعاتی این مقاله مشتمل بر سه پهنه گسلی میل سفید، تفت-هامانه و زردشتی است که در نزدیکی شهر تفت در غرب و جنوب غرب شهر یزد قرار دارد. با تلفیق نتایج حاصل از اعمال دو پارامتر هندسه فرکتالی و چگالی فرکتالی که برای این سه پهنه گسلی انجام شده است، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بعد فرکتالی دو پهنه میل سفید و تفت-هامانه، مقادیر نزدیک به هم دارند و پهنه زردشتی مقدار بعد فرکتالی بالاتری نسبت به دو پهنه دیگر دارد. بعد فرکتالی بالاتر این پهنه گسلی نشانه عریض تر بودن و بلوغ کمتر آن نسبت به دو سیستم گسلی دیگر می باشد. این موضوع بوسیله پارامتر چگالی فرکتالی نیز دارای همخوانی می باشد. ضمن اینکه این پهنه گسلی مبتنی بر مدل تکتونیکی ارائه شده‌ای

### منابع

- آرامشیان، و.، ۱۳۹۵، تعیین الگوی گسلش در منطقه تفت بر مبنای تحلیل فرکتال، جنوب غرب یزد. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی.
- آقاشاهی اردستانی، س.، ۱۳۸۵، لرزه زمین ساخت و توان لرزه ایی گسل زاهدان و ار آن بر گستره شهر زاهدان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- ادیب، ا.، افضل، پ.، و زارع، م.، ۱۳۹۵، پهنه بندی شرق استان یزد بر اساس زلزله ها و گسل های کوتاه نری با استفاده از مدلسازی فرکتالی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۲، ص ۷۸-۸۸.
- چرچی، ع.، خطیب، م.م.، مظفر خواه، م. و برجسته، آ.، ۱۳۹۰، استفاده از تحلیل فرکتالی برای تعیین پویایی تکتونیک شمال منطقه لالی در شمال شرق خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱، ص ۳۷-۴۷.
- سامانی، ب.، چرچی، ع.، ۱۳۹۴، تحلیل الگوی مکانی گسلش و رومکز رخدادهای لرزه ای با استفاده از روش فرای (مطالعه موردی در استان یزد)، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۸، ص ۵۴-۵۹.
- شهریاری، س. و خطیب، م.، ۱۳۷۶، تحلیل فرکتالی سیستم گسلی نهبندان، فصلنامه علوم زمین، سال ششم، شماره ۲۳-۲۴، ص ۳۲ تا ۳۹.
- محمدی نیا، ع و خلج، م.، ۱۳۹۶، ارائه مدل تکتونیکی در ژنز پلوتولکانیک ها و افیولیتها و آمیزه های رنگین مرتبط با زون ارومیه-دختر در حد فاصل کاشان-نائین-بافت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور.
- نقشه اطلس راههای ایران ۱۳۸۰، انتشارات گیتاشناسی.
- حاج ملا علی، ع.، ۱۳۷۹، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یزد، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عندلیبی، ص.، ۱۳۶۸، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چارگوش یزد، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علوی نایینی، م.، ۱۳۷۲، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضراباد، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سلیمی، ص.، ۱۳۶۸، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چارگوش آباد، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نقشه گسل های فعال ایران، حسامی، خ. جمالی، ف. طبعی، ه. پژوهشکده زلزله شناسی، چاپ ۱۳۸۲.
- ندانی، م.، ۱۳۷۸، آنالیز فرکتالی سیستم گسلی کازرون. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N. and Asadi Haroni, H., 2012, Application of power spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran, *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 131-138.
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., khakzad, A., Moarefvand, P. and Rashidnejad Omran, N., 2011, Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling, *Journal of Geochemical Exploration*, 108, 220-232.
- Cello, G., and Malamud, B.D., 2006, *Fractal analysis for natural hazards*, Geological Society, Special Publication, 261, 171.
- Cheng, Q. 1999. Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation, *Journal of Geochemical Exploration* 65, 175-194.
- Davis, J.C., 2002, *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Jackson, P. and Sanderson, D. J. 1992, Scaling of fault displacements from the Badajoz-Cordoba shear zone, SW Spain, *Tectonophysics*, 210, 179-190.
- Han, Z., Zhang, P., Wu, L., and Hou, J., 1998, Characters about the modern movement of north Qilian Shan block. In: *Dep. of Geology, Peking University, Collection of international Conference on Geological Science in Peking University*. Seismological press, Beijing.
- Hassanpour, Sh. and Afzal, P., 2013, Application of concentration number (C-N) multifractal modelling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 957-970.
- Kargaranbafghi, F., Neubauer, F., and Genser, J., 2011, Cenozoic kinematic evolution of southwestern central Iran, strain partitioning and accommodation of Arabia-Eurasia convergence. *Tectonophysics*, 502, 221-243.
- King, G. C. P. and Yielding, G., 1983, The Evolution of a Thrust Fault System: Processes of Rupture Initiation, Propagation and Termination in the 1980 El Asnam (Algeria) Earthquake, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 77, pp. 915-933.
- King, K. J. and Clark, M. R. 1984, The food of rig (*Mustelus lenticulatus*) and the relationship of feeding to reproduction and condition in Golden Bay .New Zealand, *journal of Marine and Freshwater Research*, 18, 29-42.
- Li, C., Ma, T. and Shi, J., 2003, Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background, *Journal of Geochemical Exploration*, 77, 167-175.
- Mandelbrot, B. B. 1983, *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman and Company, New York. 498P.
- Nagahama, Y., Yoshikuni, M., Yamashita, M. and Tanaka, M. 1994. 13 Regulation of Oocyte Maturation in Fishes. *Fish Physiology*, 13, 393-439.
- Nouri, R., Jafari, M.R., Arian, M., Feizi, F., and Afzal, P., 2013, Correlation between Cu mineralization and major faults using multifractal modeling in Tarom 1: 100 000 sheet, NW Iran. *Geologica Carpathica*, 64, 409-416.
- Okubo, P. G. and Aki, K. 1987, Fractal geometry in the San Andreas Fault System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92, 345-355.
- Pollard, D.D. and P. Segall 1987, Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces. In: *Atkinson, B.K. (Ed.), Fracture Mechanics of Rock*. Academic Press, London, p. 277-349.
- Rodríguez Pascua, M.A., Pérez López, R., Prieto Ballesteros, O. and Kargel, J. S. 2003, Tectonic and fractal analysis of Connemara chaos area (Europa, Jupiter): Strike slip and compressional features in an expansive satellite, 34th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 17-21, 2003, League City, Texas, abstract no.1331.
- Scholz, C. H., and Aviles, C. A. 1986, The fractal geometry of faults and faulting. In: *Earthquake Source Mechanics*, eds. S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, *Earthquake Source Mechanics*, 155, AGU, Washington, D.C., 147-155.
- Sukmono, S., Zen, M. T., Kadir, W. G. A., Hendrajaya, L., Santoso, D., and Dubois, J. 1996, Fractal geometry of the Sumatra active fault system and its geodynamical implications. *Journal of Geodynamics*, 22(1-2), 1-9.
- Turcotte, D. L., 1986, Fractals and Fragmentation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, 1921-1926.
- Velde, B., Dubios, J., Touchard, G., and Badri, A., 1990, Fractal Analysis of Fractures in Rocks: The Cantor's Dust Method", *Tectonophysics*, 179, 345-352.
- Vere-Jones, d. 1992, Statistical methods for the description and display of earthquake catalogs, In: *Statistics in the Environmental and Earth Sciences*, ed. A.T. Walden and P. Guttorp, Arnold, London, 220-246.
- Voss, R. F., 1985, Random Fractal Forgeries, in *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, edited by R. A. Earnshaw, NATO ASI Series, F17, Springer-Verlag, Berlin, 805-835.
- Walsh, J., Watterson, J., and Yielding, G. 1991, The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*, 351, 391-393.
- Xiao, F., Chen, J., Zhang, Zh., Zhou, Wang, Ch., Wu, G. and Agterberg, F.A., 2012, Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China, *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 90-100.