

## آنالیز فرکتالی تأثیر گسل نظام آباد بر روی خطواره‌های مرتبط با چین: مطالعه موردی تاقدیس خافتتر، زاگرس، ایران

مهدی حسین پور<sup>۱</sup>، مهران آرین<sup>۲\*</sup>، زهرا ملکی<sup>۲</sup>، منوچهر قرشی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- ۲- \* استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- ۳- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- ۴- دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور، تهران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷



### چکیده

منطقه گسلی نظام آباد با سازوکار چیره راستالغز چپبر و راستای شمال شرقی-جنوب غربی در جنوب غرب ایران واقع شده است. این منطقه گسلی به عنوان یکی از مهمترین ساختارهای کمربند چین خورده-رانده زاگرس محسوب می شود. عملکرد این گسل موجب دگرشکلی های پیچیده زمین ساختی در این منطقه گردیده است. همچنین که به واسطه عملکرد این گسل، جابه جایی در تاقدیس خافتتر را نیز شاهد هستیم. این مطالعه با هدف آنالیز فرکتالی تأثیر گسل نظام آباد بر روی خطواره های مستخرج از تصاویر ماهواره های تاقدیس خافتتر انجام گرفت. روش مربع شمار که یک روش مناسب برای تحلیل الگوی شکستگی ها محسوب می شود برای این مطالعه در نظر گرفته شد. با استفاده از این روش ابعاد فرکتالی برای بخش های مختلف تاقدیس خافتتر محاسبه گردید. اختلاف بین ابعاد فرکتالی به دست آمده از خطواره های مرتبط با گسل نظام آباد به خوبی چگونگی اثر این گسل و نیز مناطق با بلوغ متفاوت زمین ساختی در بخش های مختلف تاقدیس خافتتر را شناسایی و مشخص نمود. به طوری که بخش های A و C و یال های جنوبی آنها که شامل بخش های SLA و SLC می باشد دارای ابعاد فرکتالی بیشتری نسبت به سایر بخش های تاقدیس بوده و به نظر می رسد این مناطق به ویژه یال های جنوبی بخش های A و C از سایر بخش ها فعال تر هستند. همچنین اختلاف در ابعاد فرکتالی تاقدیس خافتتر در نتیجه اختلاف در چگالی، شدت و جهت تنش ناشی از عملکرد گسل نظام آباد در منطقه ارزیابی گردید.

**کلید واژه ها:** فرکتال، گسل نظام آباد، خطواره، شکستگی، چین خوردگی.



## ۱- مقدمه

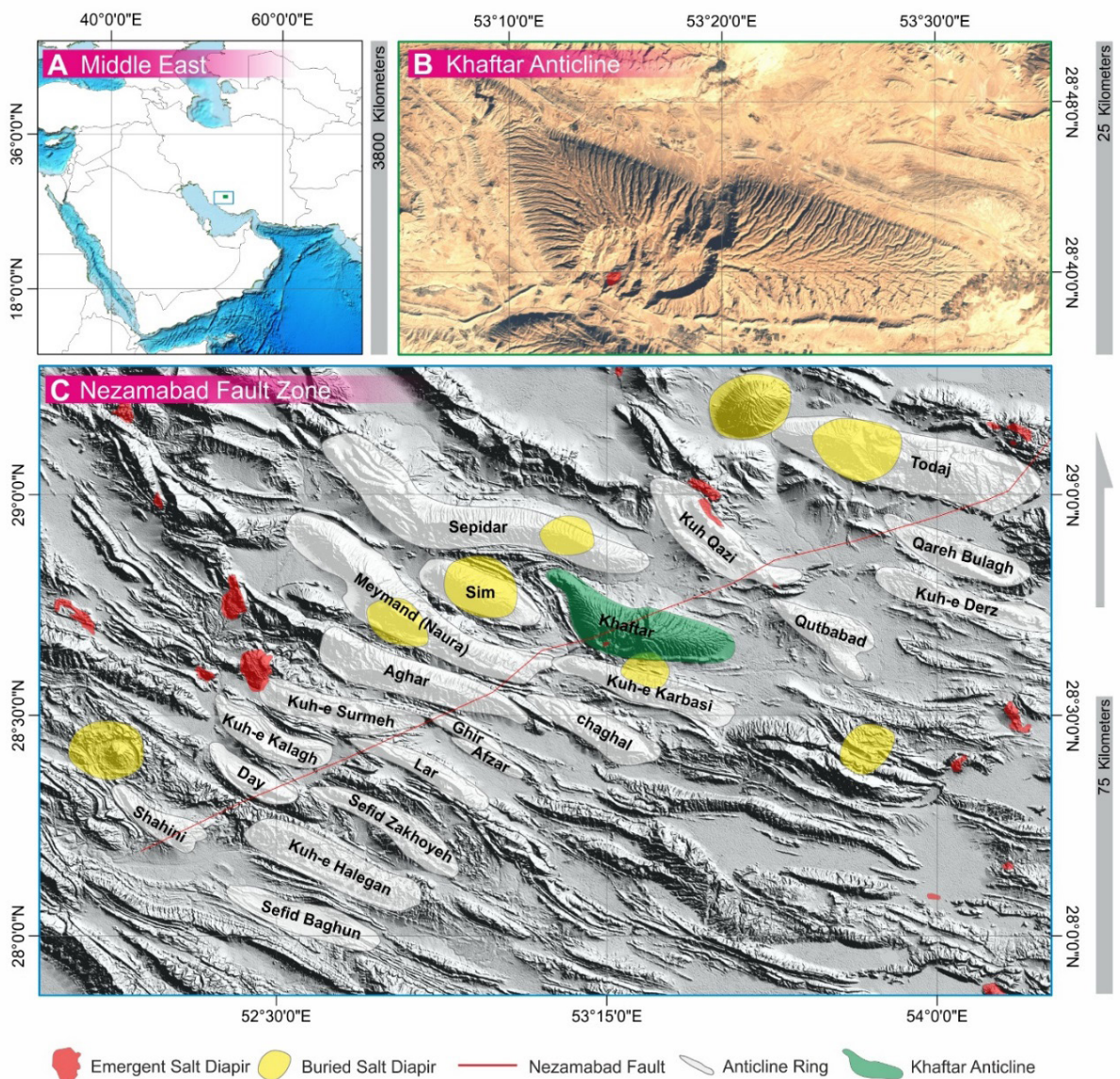
که خطواره‌ها می‌توانند نشان دهنده شکستگی‌ها باشند لذا به وسیله تجزیه و تحلیل فراوانی و جهت‌گیری شکستگی‌ها نسبت به ساختارهای مهم زمین‌شناسی نظیر چین‌ها و گسل‌ها می‌توان ارتباط بین آن‌ها را شناسایی نمود

(Casini et al., 2018; Watkins et al., 2018, 2015; Sanai et al., 2015; Tamara et al., 2014; Ahmadhadi et al., 2007; Stephenson et al., 2007; Cooper et al., 2006; Bergbauer and Pollard, 2004; Stearns, 1968; Price, 1966).

هدف از این مطالعه بررسی فرکتالی تأثیر گسل نظام آباد بر خطواره‌های مرتبط با چین در تاقدیس خافت‌تر می‌باشد. گسل راستالغز چپ‌بر نظام آباد با روند تقریبی N060 و طول حدود ۲۵۶ کیلومتر یکی از ساختارهای مهم در کمربند چین خورده-رانده زاگرس می‌باشد. که به‌طور شاخص موجب قطع شدگی و جابه‌جایی اثر محوری تاقدیس خافت‌تر و برونزد نمک هرمز در بخش میانی این تاقدیس شده است (Yassaghi, 2006; Hessa- mi et al., 2001; Barzegar, 1994, 1992; Furst, 1990). در این مطالعه ابعاد فرکتالی خطواره‌های مرتبط با گسل راستالغز در بخش‌های مختلف تاقدیس خافت‌تر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و انتظار می‌رود با محاسبه ابعاد فرکتالی بیشینه محدوده اثر گسل نظام آباد و نیز پویایی ساختاری منطقه استخراج گردد.

متغیرهای متعدد به یک پدیده و ایجاد اشکال هندسی پیچیده به وجود می‌آیند. از این رو برای بررسی پدیده‌های دارای اشکال هندسی پیچیده نیازمند محاسبات ریاضی متعدد برای مجموعه وسیعی از عوامل اثرگذار می‌باشد که این محاسبات بسیار مشکل خواهد بود. مندلیرت در سال ۱۹۸۳ مفهوم تازه‌ای را به نام فرکتال برای توصیف پدیده‌های طبیعی مطرح نمود. وی معتقد بود که فرکتال توانایی بالایی برای توصیف هندسه اشکال پیچیده ناشی از فرآیندهای فیزیکی طبیعی متعدد دارد (Sarp, 2014). به طور کلی فرکتال ضمن ساده سازی محاسبات قادر به بیان چگونگی توزیع و نیز اندازه متغیرها نسبت به کل فضای اشغال شده است (Turcotte, 1997). امروزه از هندسه فرکتال برای مطالعه سامانه‌های گسلی و ابعاد گسل‌ها، شکستگی‌ها، خطواره‌ها، تکتونیک فعال، اکتشاف هیدروکربور و منابع معدنی به‌طور گسترده استفاده می‌شود (Ahmadfaraj et al., 2019; Hosseini et al., 2019; Velandia and Bermúdez, 2018; Haddad-Martim et al., 2018; Ni et al., 2017; Mirzaie et al. 2015; Sarp, 2014; Liao et al., 2012; Fagereng, 2011; Yao and Zhan, 2007). نی و همکاران (Ni et al., 2017) با استخراج خطواره‌ها و نیز محاسبه ابعاد فرکتالی ضمن تشریح پیچیدگی گسل‌ها بینش جدیدی را درباره مهاجرت سیال حاوی مواد معدنی ارائه نمودند. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2019) نیز با آنالیز فرکتالی خطواره‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به ارزیابی شدت فرآیند هوازدگی پرداختند.

خطواره‌ها شامل خطوط مستقیم و تقریباً خطی شکل هستند که در سطح زمین می‌توان مشاهده نمود. این خطوط می‌توانند در نتیجه رویدادهای زمین‌شناسی ایجاد شوند. برای مثال فعالیت‌های ماگمایی، تغییرات توپوگرافی و نیز ساختارهای زمین‌شناسی همچون شکستگی‌ها که به‌طور عام شامل گسل‌ها، درزه‌ها، زون‌های برشی و برگواره‌ها می‌شود (Ahmadirouhani et al., 2017; Richards, 2000). سنجش از دور به‌عنوان یک ابزار قدرتمند و کاربردی به محققین در استخراج خطواره‌ها کمک شایانی نموده است. به‌طوری که نتایج به‌دست آمده از سنجش از دور همخوانی مناسبی را با مشاهدات صحرایی داشته است (Nkono et al., 2018; Han et al., 2018; Hosseini et al., 2019; Ahmadirouhani et al., 2017; Bagheri, 2015; Gabrielsen and Braathen, 2014; Chaabouni et al., 2012; Raharima-hefa and Kusky, 2009; Al-Shumaimri, 2001).

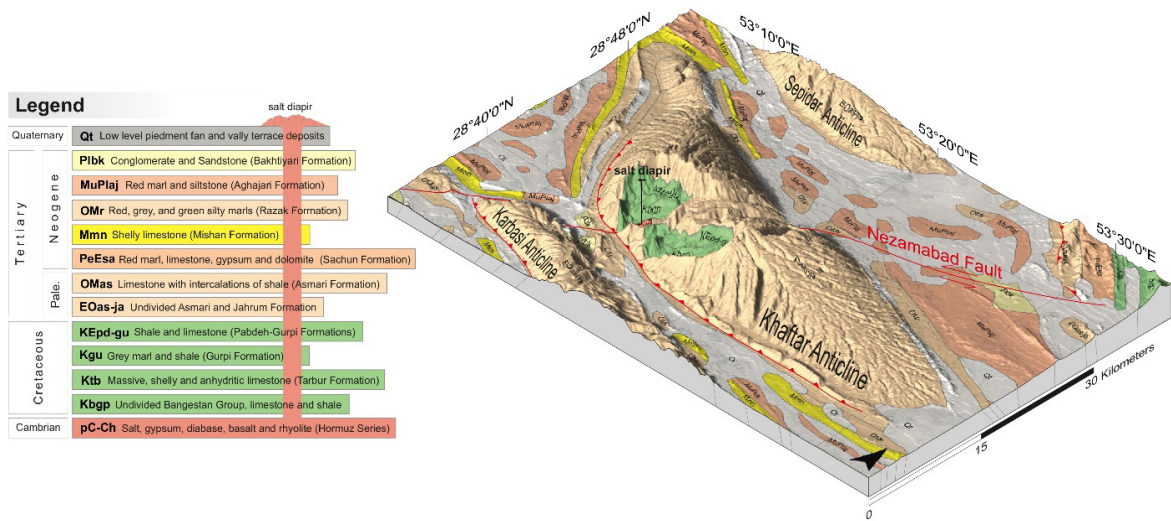


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و تاقدیس خافتار (a) نمایش منطقه مورد مطالعه در خاورمیانه (b) تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM+ تاقدیس خافتار با ترکیب باندهی ۱-۲-۳ در RGB (c) موقعیت گسل نظام آباد در کمربند چین خورده رانده زاگرس که در آن تاقدیس خافتار به رنگ سبز و دیاپیرهای نمکی به سطح رسیده و مدفون به ترتیب با رنگ قرمز و زرد نشان داده شده است.

### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

قدیمی‌ترین رخنمون این تاقدیس در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). عبور گسل پی سنگی نظام آباد از تاقدیس خافتار این تاقدیس را تحت تأثیر قرار داده و باعث جابه‌جایی در تاقدیس شده است. اثر راستالغز چپگرد باعث جابه‌جایی در تاقدیس شده است. این گسل محدود به تاقدیس خافتار نبوده و تاقدیس‌های دی، شاهینسی، کلاغ، قاضی و میمند را نیز تحت تأثیر قرار داده است. محققین متعددی بر روی گسل نظام آباد و تأثیر آن بر ساختارهای منطقه به بحث و بررسی پرداخته‌اند. (Hosseinpour et al., 2017; Maleki et al., 2014; Yassaghi, 2006; Hessami et al., 2001; Barzegar, 1994, 1992; Furst, 1990).

تاقدیس خافتار در غرب و شمال غرب شهرستان جهرم واقع شده است. این ساختمان از شمال به تاقدیس‌های سپیدار و کوه قاضی، از جنوب به کوه کرباسی و از غرب به تاقدیس سیم محدود می‌شود (شکل ۱). بر روی سطح این تاقدیس سازندهای میشان، رازک، آسماری-جهرم، کزدمی و بنگستان رخنمون یافته‌اند. سازند آسماری-جهرم دارای بیشترین گسترش در سطح تاقدیس می‌باشد. سری نمکی هرمرز در بخش مرکزی تاقدیس و در امتداد گسل نظام آباد به‌عنوان

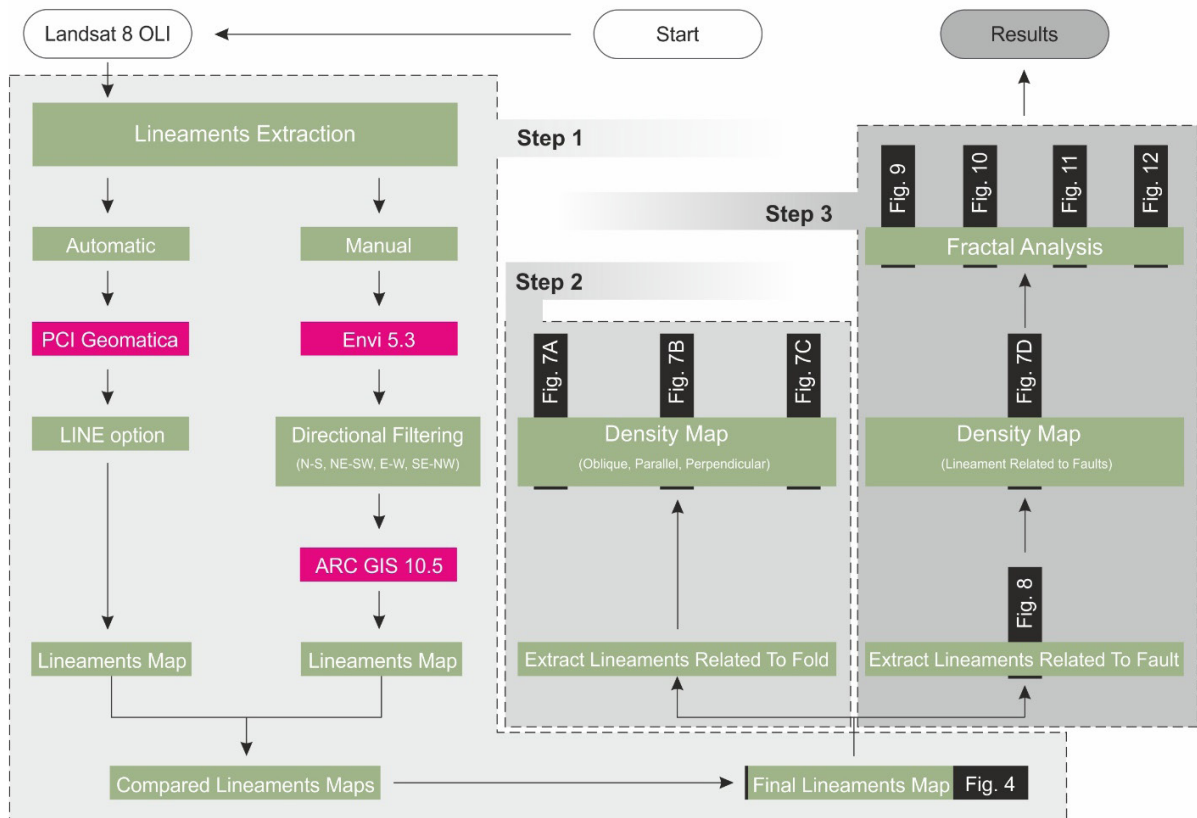


شکل ۲. نقشه سه بعدی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

مطالعه، تفکیک خطواره‌های مرتبط با چین خوردگی بر مبنای ارتباط بین شکستگی‌ها و چین خوردگی و در نهایت تجزیه تحلیل فرکتالی خطواره‌های باقیمانده به منظور ارزیابی اثر گسل نظام آباد بر ناقدیس خاخر (شکل ۳).

### روش تحقیق

روش مورد مطالعه شامل سه بخش اصلی می‌شود. که این سه بخش اصلی عبارتند از استخراج خطواره‌ها با استفاده از روش‌های اتوماتیک و دستی به منظور تهیه نقشه خطواره‌های منطقه مورد



شکل ۳. خلاصه‌ای از روش کار استفاده شده در این مطالعه

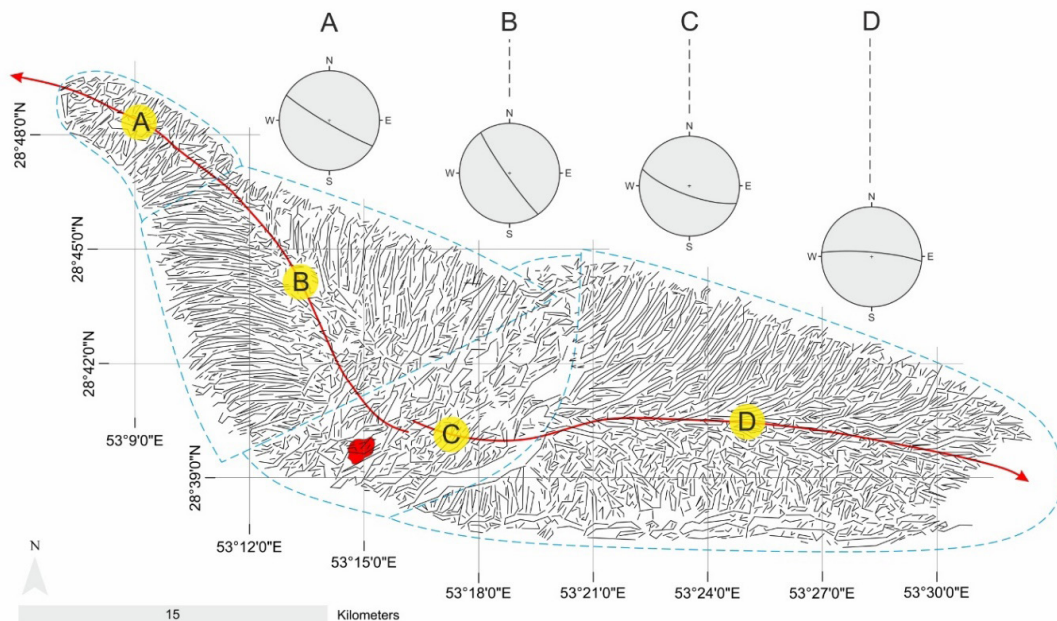


## استخراج خطواره‌ها

مرتبط با چین خوردگی با توجه به فراوانی گسل‌های نرمال و شکستگی‌های دارای مؤلفه کششی که کانالیزه شدن آب‌های سطحی را به دنبال خواهد داشت. می‌بایست توجه نمود که حذف آبراهه‌ها خود نیز می‌تواند خطای محاسباتی به‌همراه داشته باشد. لذا در این مطالعه پس از بررسی آبراهه‌ها و نیز با توجه به همروندی خطواره‌ها و آبراهه‌ها با شکستگی‌های کششی، به‌عنوان خطواره ساختاری در نظر گرفته شدند.

در روش دوم استخراج خطواره‌ها با استفاده از نرم‌افزار Envi نسخه ۵٫۳ با اعمال فیلترهای جهتی در چهار جهت اصلی N-S، E-W، NE-SW و SE-NW انجام گرفت و سپس خطواره‌ها در محیط نرم‌افزار جی ای اس به‌صورت دستی و با بررسی‌های چشمی ترسیم گردید. در نهایت با مقایسه خطواره‌های استخراجی از دو روش اتوماتیک و دستی و تلفیق آن‌ها با یک دیگر نقشه خطواره‌های منطقه به‌دست آمد (شکل ۴).

به‌منظور استخراج خطواره‌ها از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI استفاده گردید. به‌طور کلی برای استخراج خطواره‌ها از سه روش اتوماتیک، دستی و روش نیمه اتوماتیک که ترکیبی از دو روش اتوماتیک و دستی است استفاده می‌شود. در روش اتوماتیک استخراج خطواره‌ها با استفاده از باند ۵ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم Line تعبیه شده در نرم‌افزار PCI Geomatic استفاده شد. این ابزار قادر است تا استخراج خطواره‌ها را به‌صورت کاملاً اتوماتیک انجام دهد. اما از آنجایی که در این روش تفکیکی بین خطواره‌های زمین‌شناسی با سایر خطواره‌ها نظیر جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی، آبراهه‌ها و سایر موارد انجام نمی‌گیرد می‌تواند همراه با خطا باشد. البته لازم به ذکر است که تفکیک آبراهه‌ها از خطواره‌ها به‌عنوان یک فاکتور اولیه و پایه همیشه مطرح است به‌طوری که در بسیاری از مطالعات آبراهه‌ها از خطواره‌های ساختاری تفکیک می‌شوند تا محاسبات با خطا همراه نباشد اما در مطالعه خطواره‌های



شکل ۴. نقشه خطواره‌های تاقدیس خافت به‌همراه تغییرات سطح محوری تاقدیس و تقسیم‌بندی آن (موقعیت دیاپیر نمکی با رنگ قرمز نشان داده شده است همچنین استریوبات‌ها نشان دهنده امتداد و شیب سطح محوری چین می‌باشد).

Cooper et al., 2006, 2003, 2001, 2000; Doll et al. 1995; Stearns and Friedman, 1972; Stearns, 1968; Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959). با توجه به این تقسیم‌بندی می‌توان دریافت که شکستگی‌های مرتبط با چین به تغییرات در زاویه محور چین وابسته است. در واقع با تغییر محور چین آرایش و توزیع شکستگی‌ها نیز تغییر کرده و با محور چین

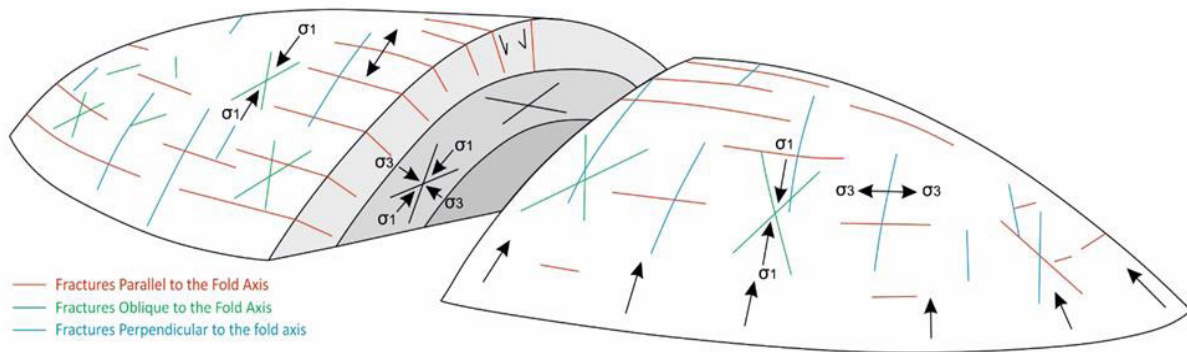
## تفکیک خطواره‌های مرتبط با چین خوردگی

شکستگی‌های مرتبط با چین را می‌توان به سه دسته کلی شکستگی‌های کششی موازی با محور چین، شکستگی‌های عمود بر محور چین و شکستگی‌های برشی یا مزدوج مایل به محور چین که در یال‌ها توسعه می‌یابد تقسیم نمود (شکل ۵)



چین در تاقدیس خافتتر می‌توان چهار بخش A، B، C و D را مطابق با شکل (۴) برای این تاقدیس در نظر گرفت که در آنها شکستگی‌ها متناسب با محور چین تغییر می‌کند. از این رو با اعمال روابط هندسی قادر خواهیم بود تا شکستگی‌های مرتبط با چین خوردگی را از شکستگی مرتبط با گسل نظام آباد و نیز بالا آمدگی گنبد نمکی تفکیک نماییم.

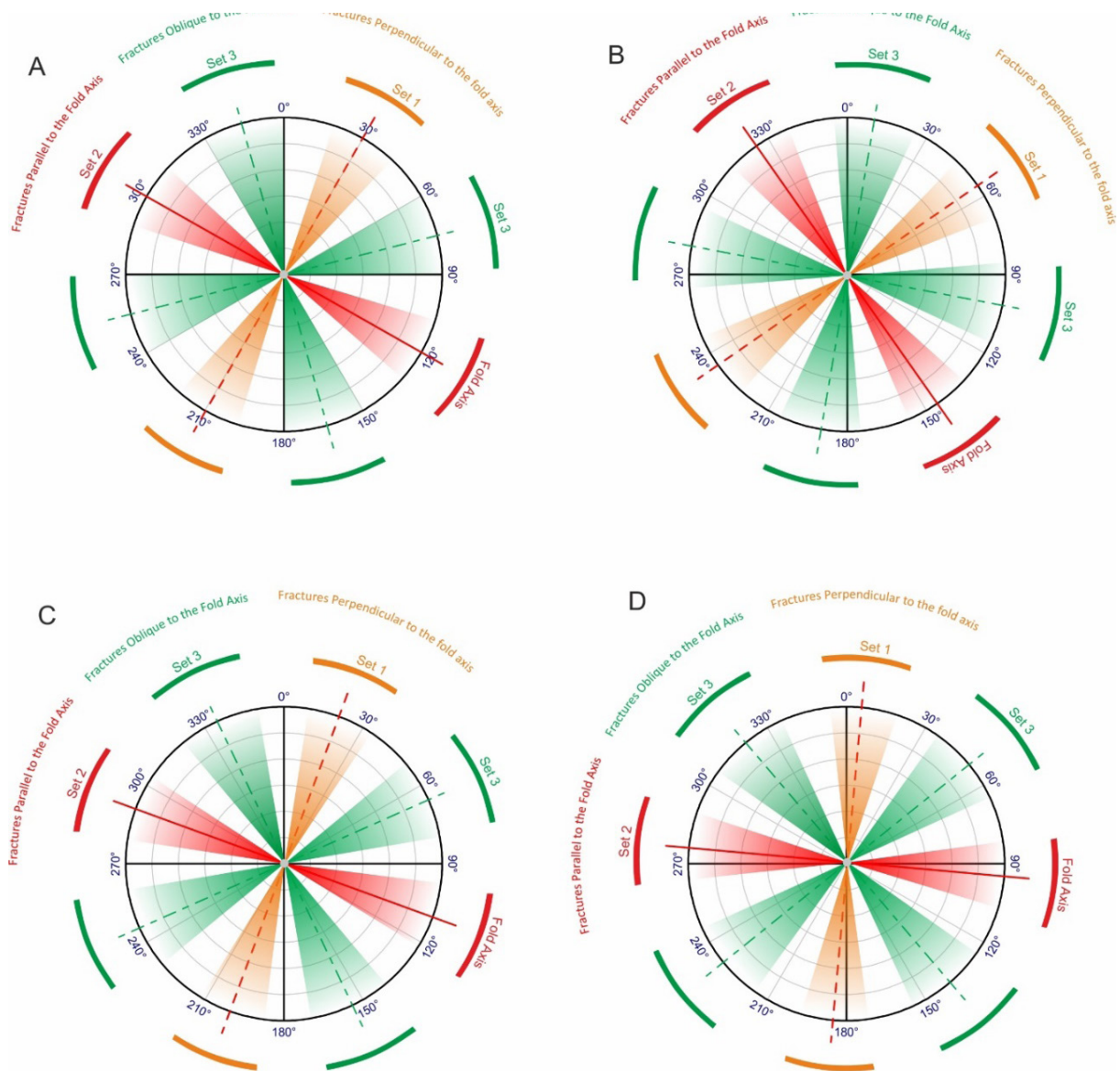
همانگ می‌شود. شکستگی‌های مرتبط با چین نیز می‌توانند بر اثر عوامل تکتونیکی ناحیه‌ای و نیز فعالیت ساختارهای ثانویه نظیر گسل‌ها و گنبد‌های نمکی دچار تغییر شوند. که معمولاً با نزدیک شدن به ساختاری‌های اثرگذار فراوانی شکستگی‌ها و نیز پیچیدگی آن‌ها افزایش می‌یابد. در این مطالعه با در نظر گرفتن این موضوع به‌عنوان فرضیات تحقیق و نیز تغییرات محور



شکل ۵. نمای شماتیک از الگوی شکستگی‌های مرتبط با چین با تغییر از Stearns, 1968 و Watkins et al., 2018 (سیگما ۱ تنش اصلی بیشینه، سیگما ۲ تنش اصلی متوسط، سیگما ۳ تنش اصلی کمینه)

چین دارای امتداد ۱۳۰ تا ۱۶۰ درجه و ۳۱۰ تا ۳۴۰ درجه، خطواره‌های عمود بر محور چین دارای امتداد ۴۰ تا ۷۰ درجه و ۲۲۰ تا ۲۵۰ درجه و خطواره‌های مایل بر محور چین دارای امتداد ۸۵ تا ۱۱۵ درجه، ۱۷۵ تا ۲۰۵ درجه، ۲۶۵ تا ۲۹۵ درجه و ۳۵۵ تا ۳۸۵ درجه می‌باشد (شکل ۶B). در بخش C خطواره‌های موازی با محور چین دارای امتداد ۹۵ تا ۱۲۵ درجه و ۲۷۵ تا ۳۰۵ درجه، خطواره‌های عمود بر محور چین دارای امتداد ۵ تا ۳۵ درجه و ۱۸۵ تا ۲۱۵ درجه و خطواره‌های مایل بر محور چین دارای امتداد ۵۰ تا ۸۰ درجه، ۱۴۰ تا ۱۷۰ درجه، ۲۳۰ تا ۲۶۰ درجه و ۳۲۰ تا ۳۵۰ درجه می‌باشد (شکل ۶C). در بخش D خطواره‌های موازی با محور چین دارای امتداد ۸۰ تا ۱۱۰ درجه و ۲۶۰ تا ۲۹۰ درجه، خطواره‌های عمود بر محور چین دارای امتداد ۵ تا ۳۵ درجه و ۲۰ تا ۳۵۰ درجه و خطواره‌های مایل بر محور چین دارای امتداد ۳۵ تا ۶۵ درجه، ۱۲۵ تا ۱۵۵ درجه، ۲۱۵ تا ۲۴۵ درجه و ۳۰۵ تا ۳۳۵ درجه می‌باشد (شکل ۶D).

در بخش A تاقدیس خافتتر سطح محوری چین دارای امتداد ۱۲۰ و ۳۰۰ درجه، در بخش B دارای امتداد ۱۴۵ و ۳۲۵ درجه، در بخش C دارای امتداد ۱۱۰ و ۲۹۰ درجه و در بخش D دارای امتداد ۹۵ و ۲۷۵ درجه می‌باشد (شکل ۵). با توجه به تغییرات سطح محوری و نیز ارتباط بین چین خوردگی و شکستگی و در نظر گرفتن بازه تغییرات ۱۵ درجه‌ای مطابق شکل ۶ خطواره‌های مرتبط با چین خوردگی از قبیل خطواره‌های موازی با محور چین، خطواره‌های عمود بر محور چین و خطواره‌های مایل به محور چین برای بخش‌های مختلف تاقدیس خافتتر شناسایی و تفکیک شدند. در بخش A خطواره‌های موازی با محور چین دارای امتداد ۱۰۵ تا ۱۳۵ درجه و ۲۸۵ تا ۳۱۵ درجه، خطواره‌های عمود بر محور چین دارای امتداد ۱۵ تا ۴۵ درجه و ۱۹۵ تا ۲۲۵ درجه و خطواره‌های مایل بر محور چین دارای امتداد ۶۰ تا ۹۰ درجه، ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه، ۲۴۰ تا ۲۷۰ درجه و ۳۳۰ تا ۳۶۰ درجه می‌باشد (شکل ۶A). در بخش B خطواره‌های موازی با محور



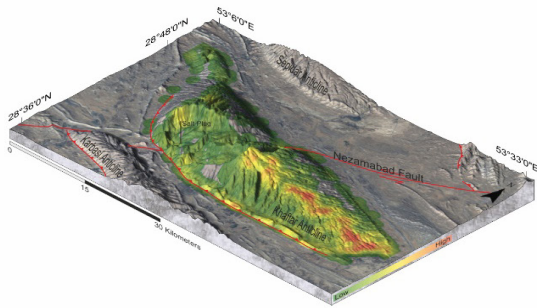
شکل ۶. رابطه هندسی خطواره‌های مرتبط با چین در بخش‌های A، B، C و D تاقدیس خافت. خطوط قرمز رنگ نشان دهنده امتداد سطح محوری چین، هایلایت قرمز رنگ بیانگر امتداد خطواره‌های موازی با محور چین، هایلایت سبز رنگ بیانگر امتداد خطواره‌های مایل با محور چین و هایلایت نارنجی رنگ بیانگر امتداد خطواره‌های عمود بر محور چین می‌باشد.

رأس تاقدیس شده است و در نتیجه خطواره‌های موازی با محور چین پدیدار شده‌اند (شکل ۷A). دو مجموعه دیگر از خطواره که شامل خطواره‌های عمود بر محور چین و نیز خطواره‌های مایل با محور چین می‌باشند عمدتاً در بال‌های تاقدیس خافت توسعه پیدا کرده‌اند (شکل ۷B، C). توزیع خطواره‌های مرتبط با چین در رأس و بال‌های تاقدیس خافت همخوانی مناسبی را با مدل ارائه شده توسط استرنس (Stearns, ۱۹۶۸) و واتکینس و همکاران (Watkins et al., 2018) که در شکل (۵) ارائه شده است دارد.

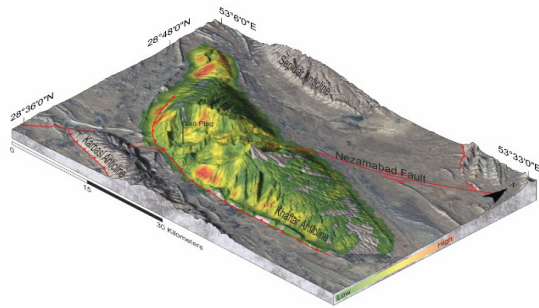
پس از استخراج خطواره‌های مرتبط با چین برای تاقدیس خافت، نقشه تراکم خطواره‌های موازی با محور چین، عمود بر محور چین و نیز خطواره‌های مایل با محور چین ترسیم گردید. همچنین با تفکیک خطواره‌های مرتبط با چین از نقشه خطواره‌ها، خطواره‌های مرتبط با گسل نظام آباد نیز استخراج و نقشه تراکم آن نیز ترسیم شد (شکل ۷D). بیشترین فراوانی خطواره‌های موازی با محور چین در بخش D تاقدیس خافت و در رأس تاقدیس توسعه یافته است. این موضوع بیانگر آن است که اعمال نیروی فشاری بر تاقدیس، باعث ایجاد کشش در



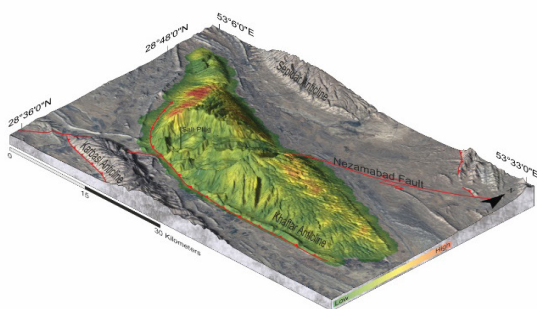
**A** Density of the Lineaments Parallel to the Fold Axis



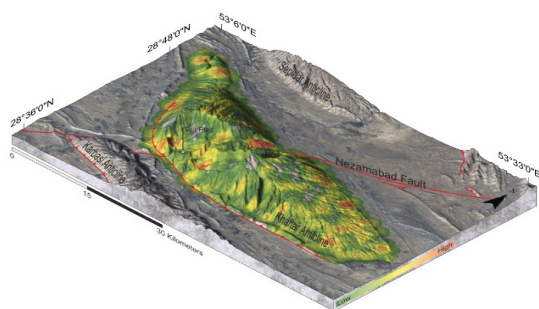
**B** Density of the Lineaments Perpendicular to the Fold Axis



**C** Density of the Lineaments Oblique to the Fold Axis



**D** Density of the Lineaments Related to the Faults



شکل ۷. مدلسازی سه بعدی از تراکم خطواره‌های تاقدیس خافت (A) نقشه تراکم خطواره‌های موازی با محور چین (B) نقشه تراکم خطواره‌های عمود با محور چین (C) نقشه تراکم خطواره‌های مایل با محور چین (D) نقشه تراکم خطواره‌های مرتبط با گسل نظام آباد

برای هر بخش از تاقدیس خافت تغییرات ابعاد فرکتالی را نشان می‌دهد (شکل ۹ و ۱۱). برای به دست آوردن بعد فرکتالی از رابطه زیر استفاده گردید:

$$\text{Log}(N_s) = a + K \text{Log}(1/S) \quad (\text{رابطه ی ۲})$$

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

مقدار K در رابطه فوق همان بعد فرکتالی است که از نمودار ترسیم شده به دست می‌آیند. برای تحلیل فرکتالی خطواره‌های مرتبط با گسل نظام آباد منطقه به ۴۹ مربع به ابعاد ۳,۷۵ کیلومتر تقسیم گردید (S1). سپس هر یک از این مربع‌ها به چهار مربع دیگر با ابعاد ۱,۸۷۵ کیلومتر تقسیم شدند (S2). به همین ترتیب شبکه‌بندی‌هایی با ۷۸۴ مربع با ابعاد ۰,۹۳۷۵ کیلومتر (S3) و ۳۱۳۶ مربع با ابعاد ۰,۴۶۸۷۵ کیلومتر (S4) ایجاد شد (شکل ۸). اما به منظور بررسی اثر گسل، محاسبه ابعاد فرکتالی متناسب با شبکه طراحی شده ابتدا برای بخش‌های A، B، C و D تاقدیس خافت محاسبه گردید و سپس برای یال‌های هر بخش نیز این محاسبه ادامه یافت. در نهایت با مقایسه ابعاد فرکتالی مناطقی که بیشتر تحت تأثیر عملکرد گسل نظام آباد بودند شناسایی شدند (شکل ۱۰ و ۱۲).

## آنالیز فرکتالی

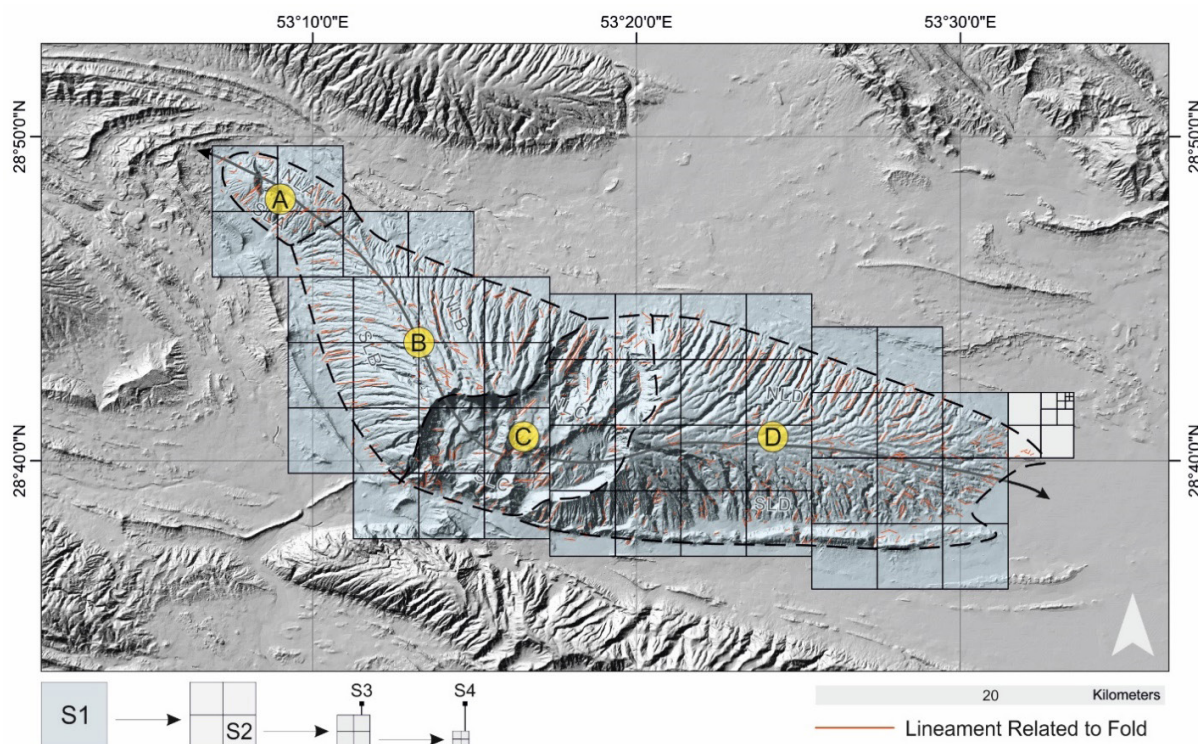
از زمان ارائه مفهوم فرکتال توسط مندلبرو در سال ۱۹۸۳ این مفهوم کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. به کمک فرکتال قادر خواهیم بود تا رابطه میان فرآیندهای زمین ساختی مانند گسل‌ها و چین‌ها را بررسی نماییم. بر مبنای مطالعات صورت گرفته توسط تورکات (Turcott, 1997) یک مجموعه فرکتال را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$N_i = C / r_i^D \quad (\text{رابطه ی ۱})$$

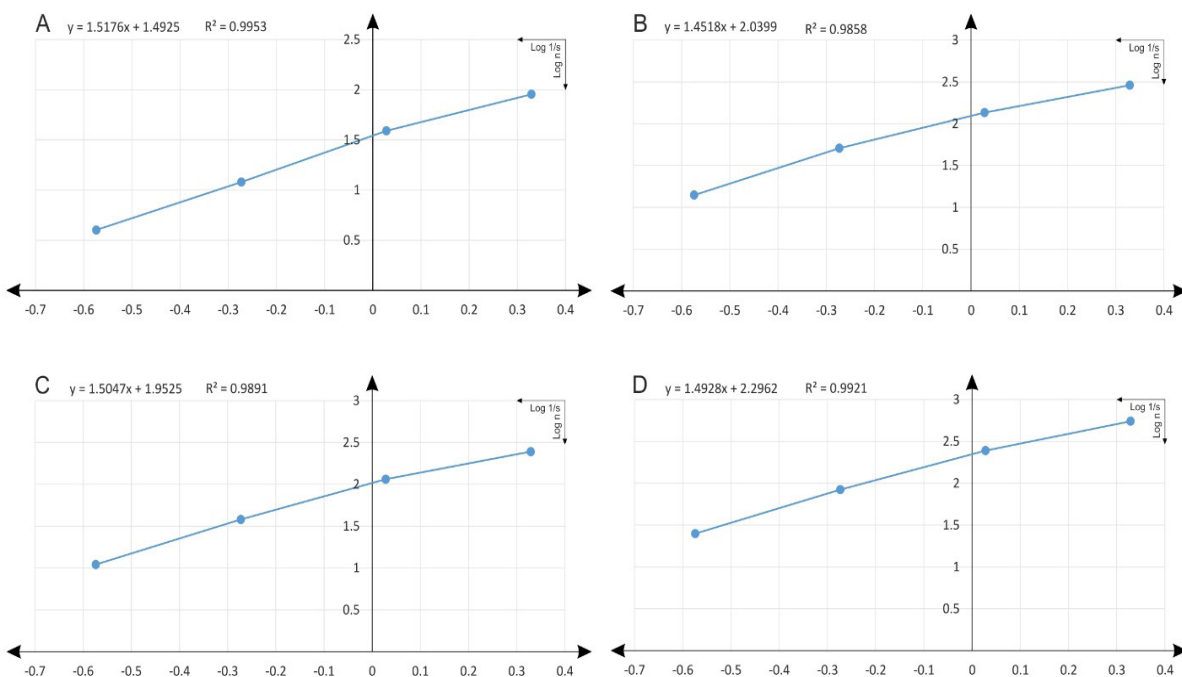
$$N_i = C / r_i^D$$

در این رابطه  $N_i$  تعداد پدیده‌ها،  $r_i$  بعد خطی ویژه، C ثابت رابطه و D بعد فرکتال محسوب می‌شود. برای محاسبه ابعاد فرکتالی در این مطالعه از روش مربع شمار استفاده گردید (Turcott, 1997). برای این منظور یک شبکه‌بندی مناسب برای محدوده مورد نظر ترسیم شد (شکل ۸). در این روش تحلیل بر مبنای نمودار  $\text{Log}/\text{LogLog}/\text{Log}$  از تعداد مربع‌های دارای خطواره (nm) بر حسب اندازه شبکه بکار رفته (SS) و یا عکس آن  $(1/S1/S)$  صورت گرفته است. نمودارهای ترسیم شده

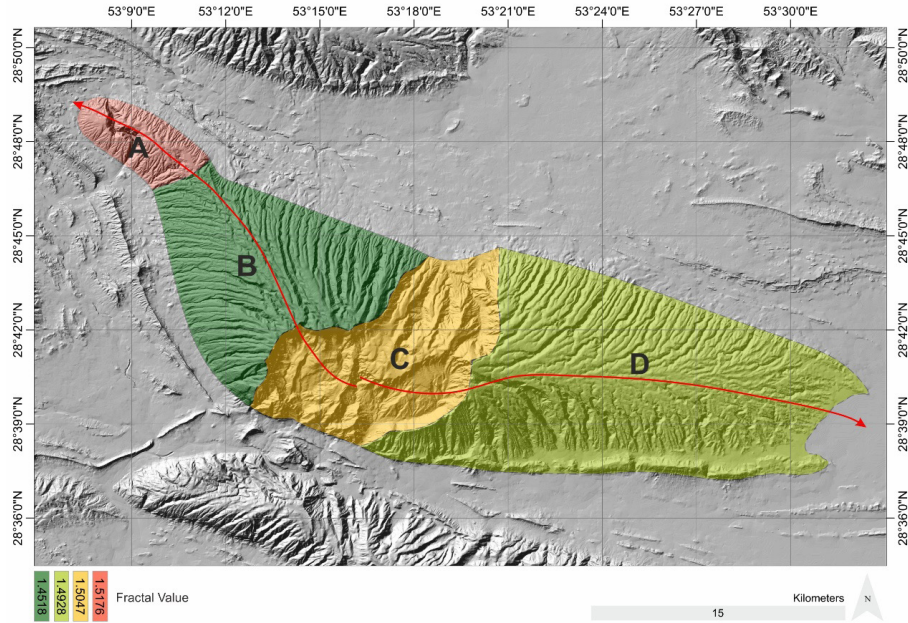




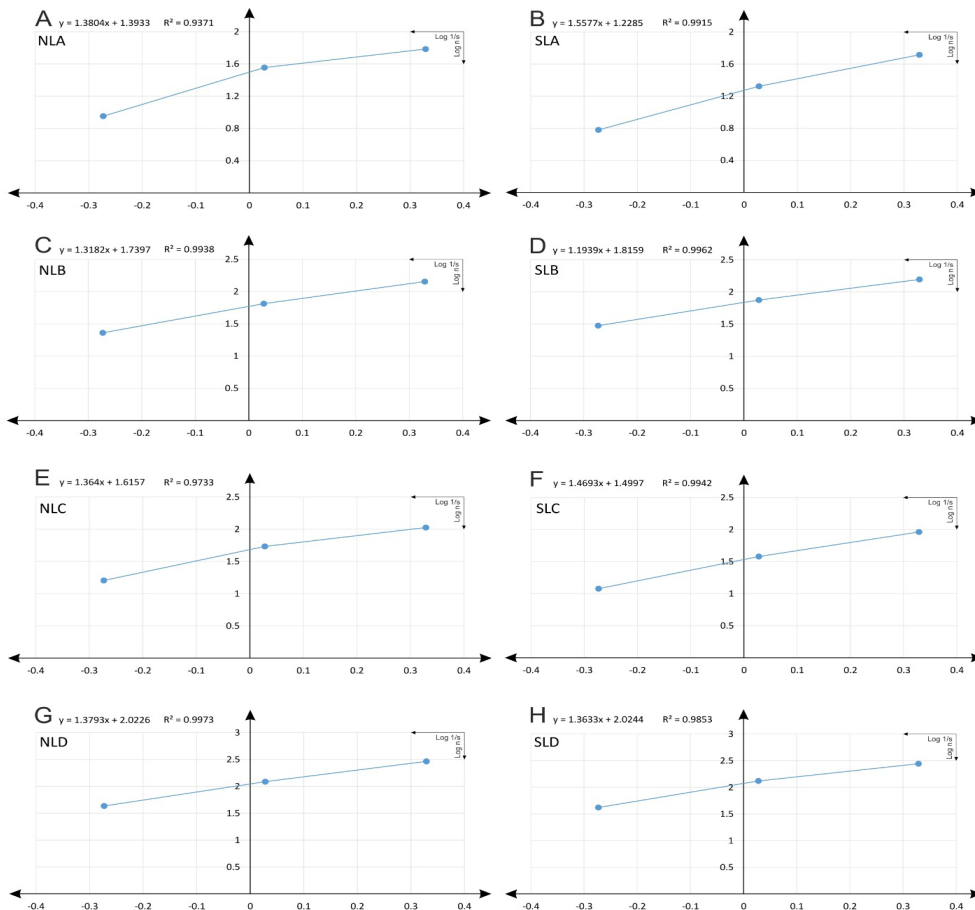
شکل ۸. خطواره‌های مرتبط با گسل نظام آباد به همراه شبکه طراحی شده جهت محاسبه ابعاد فرکتالی در بخش‌های مختلف تاقدیس خافت



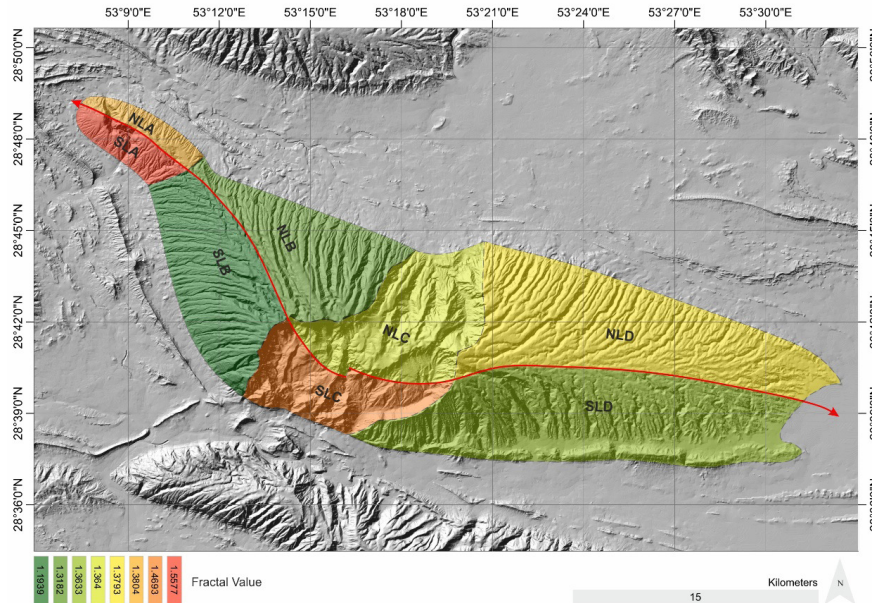
شکل ۹. نمودار لگاریتمی-لگاریتمی N بر حسب S/1 جهت محاسبه ابعاد فرکتالی برای بخش‌هایی که در آن سطح محوری تاقدیس خافت تغییر نموده است. نمودار A، B، C و D مربوط به بخش‌های A، B، C و D تاقدیس خافت می‌باشد که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نقشه تغییرات بعد فرکتالی تاقدیس خافتر به تفکیک مناطقی که در آن سطح محوری تاقدیس خافتر تغییر نموده است.



شکل ۱۱. نمودار لگاریتمی-لگاریتمی N بر حسب S/1 جهت محاسبه ابعاد فرکتالی برای یال‌های شمالی و جنوبی بخش‌های مختلف تاقدیس خافتر که در آن سطح محوری چین تغییر نموده است. نمودارهای A و B مربوط به یال‌های شمالی و جنوبی بخش A تاقدیس خافتر، نمودارهای C و D مربوط به یال‌های شمالی و جنوبی بخش B تاقدیس خافتر، نمودارهای E و F مربوط به یال‌های شمالی و جنوبی بخش C تاقدیس خافتر و نمودارهای G و H مربوط به یال‌های شمالی و جنوبی بخش D تاقدیس خافتر می‌باشد.



شکل ۱۲. نقشه تغییرات بعد فرکتالی تاقدیس خافت به تفکیک یال‌های شمالی و جنوبی مناطقی که در آن سطح محوری تاقدیس خافت تغییر نموده است.

## بحث و نتایج

بخش D تاقدیس خافت (NLD) دارای بعد فرکتالی ۱,۳۷۹۳ و یال جنوبی آن (SLD) دارای بعد فرکتالی ۱,۳۶۳۳ می‌باشد. مقادیر بدست آمده بیانگر آن است که یال‌های جنوبی مناطق A و C نیز دارای پویایی زیاد و بلوغ زمین ساختی کمتری هستند. وجود گنبد نمکی خافت در یال جنوبی بخش C نیز تأیید کننده پویایی این منطقه است. برای منطقه B نیز بلوغ بیشتر زمین ساختی نسبت به منطقه D ارزیابی می‌شود.

### نتیجه گیری

بر اساس محاسبات انجام شده بر روی تاقدیس خافت، میزان بعد فرکتالی خطواره‌های مرتبط با گسل نظام آباد در بخش A و C و یال‌های جنوبی آن‌ها بیشتر از سایر بخش‌های تاقدیس می‌باشد و با توجه به آنکه افزایش بعد فرکتالی نشان از بلوغ زمین ساختی کمتر و پویا بودن گستره مورد مطالعاتی دارد لذا یال‌های جنوبی بخش‌های A و C از سایر بخش‌ها پویاتر است.

حضور دیپایر نمکی خافت در یال جنوبی بخش C با بعد فرکتالی بالا نشان دهنده پویایی بیشتر و نیز ارتباط دیپایر نمکی با گسل نظام آباد در این منطقه می‌باشد.

ابعاد فرکتالی به دست آمده برای بخش‌های مختلف تاقدیس خافت نشان می‌دهد که سیستم گسلی نظام آباد دارای ابعاد فرکتالی متفاوت بوده که اختلاف در ابعاد فرکتالی در نتیجه اختلاف در چگالی، شدت و جهت تنش در منطقه است.

محاسبات فرکتالی انجام شده برای بخش A تاقدیس خافت مقدار ۱,۵۱۷۶، بخش B مقدار ۱,۴۵۱۸، بخش C مقدار ۱,۵۰۴۷ و بخش D مقدار ۱,۴۹۲۸ را نشان می‌دهد. توزیع فرکتالی شکستگی‌ها و یا ابعاد فرکتالی یک گسل بیانگر چگونگی گسترش و فعالیت آن گسل است. مقدار کم بعد فرکتالی نشانگر این خواهد بود که گستره سطحی سامانه گسلی محدود بوده و دگرشکلی در آن به حد نهایی رسیده است؛ مقدار زیاد بعد فرکتالی نیز نشانگر آن است که گستره سطحی سامانه گسلی، زیاد و بلوغ آن کمتر است (Shahriyari and Khatib, 1998). از این رو به نظر می‌رسد که بخش A و C تاقدیس خافت به لحاظ زمین ساختی دارای بلوغ کمتری بوده و فعالیت بیشتری در این بخش ملاحظه می‌شود. در مقابل بخش‌های B و D نسبت به دو بخش دیگر دارای بلوغ زمین ساختی بیشتر و پویایی کمتری هستند. این محاسبات همچنین به منظور شناسایی مناطق با فعالیت بیشتر زمین ساختی نیز به تفکیک یال‌های هر بخش انجام گردید. یال شمالی بخش A تاقدیس خافت (NLA) دارای بعد فرکتالی ۱,۳۸۰۴ و یال جنوبی آن (SLA) دارای بعد فرکتالی ۱,۵۵۷۷، یال شمالی بخش B تاقدیس خافت (NLB) دارای بعد فرکتالی ۱,۳۱۸۲ و یال جنوبی آن (SLB) دارای بعد فرکتالی ۱,۱۹۳۹، یال شمالی بخش C تاقدیس خافت (NLC) دارای بعد فرکتالی ۱,۳۶۴ و یال جنوبی آن (SLC) دارای بعد فرکتالی ۱,۴۶۹۳ و یال شمالی



## Reference:

- Ahmadfaraj, M., Mirmohammadi, M., Afzal, P., Yasrebi, A.B. & Carranza, E.J., 2019. Fractal modeling and fry analysis of the relationship between structures and Cu mineralization in Saveh region, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 107, 172-185.
- Ahmadhadi, F., Lacombe, O. & Daniel, J.M., 2007. Early Reactivation of Basement Faults in Central Zagros (SW Iran): Evidence from Pre-Folding Fracture Populations in Asmari Formation and Lower Tertiary Paleogeography. *Thrust Belts and Foreland Basins*, 205-228.
- Ahmadirouhani, R., Rahimi, B., Karimpour, M.H., Shafaroudi, A.M., Najafi, S.A., Pour, A.B., 2017. Fracture mapping of lineaments and recognizing their tectonic significance using SPOT-5 satellite data: A case study from the Bajestan area, Lut Block, east of Iran. *J. Afr. Earth Sci.*, 134, 600-612.
- Al-Shumaimri, M., 2001. Classification and Interpretation of Precambrian to Neogene Lineaments of Southwest Jordan, *Gondwana Research* 4(2):141-142.
- Bagheri, H., 2014. Crustal lineament control on mineralization in the Anarak area of Central Iran. *Ore Geology Reviews*.
- Barzegar, F., 1992. Introducing Firuzabad and Nezamabad faults. *proc of 10th geosciences conference, geological survey of Iran, Tehran*.
- Barzegar, F., 1994. Basement Fault Mapping of Zagros Folded Belt (S. W. Iran) Based on Space-Born Remotely Sensed Data. *Proceeding of the 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing: Exploration, Environment and Engineering, San Antonio*, 455-466.
- Bergbauer, S. & Pollard, D.D., 2004. A new conceptual fold-fracture model including prefolding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3).
- Casini, G., Romaine, I., Casciello, E., Saura, E., Vergés, J., Fernández, N. & Hunt, D.W., 2018. Fracture characterization in sigmoidal folds: Insights from the Siah Kuh anticline, Zagros, Iran. *AAPG Bulletin*, 102(3): 369-399.
- Chaabouni, R., Bouaziz, S., Peresson, H. & Wolfgang, J., 2012. Lineament analysis of South Jenein Area (Southern Tunisia) using remote sensing data and geographic information system. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*.
- Cooper, S. P., 2000. Deformation within a basement-cored anticline Teapot Dome, Wyoming: Master's thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, 274.
- Cooper, S. P., B. Hart, L. B. Goodwin, J. C. Lorenz, & Milliken, M., 2003. Outcrop and seismic analysis of natural fractures, faults and structure at Teapot Dome, Wyoming, in M. S. Horn, ed., *Wyoming basins/reversing the decline: Wyoming Geological Society Field Guidebook*, 63-74.
- Cooper, S. P., J. C. Lorenz, & Goodwin, L. B., 2001. Lithologic and structural controls on natural fracture characteristics Teapot Dome, Wyoming: Sandia National Laboratories technical report SAND2001-1786, 73.
- Cooper, S.P., Goodwin, L.B. & Lorenz, J.C., 2006. Fracture and fault patters associated with basement-cored anticlines: The example of Teapot Dome, Wyoming, *AAPG Bulletin* 90(12):1903-1920.
- Doll, T. E., D. K. Luers, G. R. Strong, R. K. Schult, P. S. Sarathi, D. K. Olsen, & Hendricks, M. L., 1995. An update of steam injection operations at Naval Petroleum Reserve No. 3, Teapot Dome field, Wyoming: A shallow heterogeneous light oil reservoir: International Heavy Oil Symposium, Calgary, Alberta, Canada, Society of Petroleum Engineers Paper 30286, 1- 20.
- Fagereng, A., 2011. Fractal vein distributions within a fault-fracture mesh in an exhumed accretionary mélange, Chrystalls Beach Complex, New Zealand. *Journal of Structural Geology*.
- Furst, M., 1990. Strike-Slip Faults and Diapirism of the South-Eastern Zagros Ranges. *Proceeding of Symposium on Diapirism, Iran*, 2, 149-182.
- Gabrielsen, R.H. & Braathen, A., 2014. Models of fracture lineaments Joint swarms, fracture corridors and faults in crystalline rocks, and their genetic relations. *Tectonophysics*, 628, 26-44.
- Haddad-Martim, P.M., Carranza, E.J.M. and Filho, C.R.D.S., 2018. The Fractal Nature of Structural Controls on Ore Formation: The Case of the Iron Oxide Copper-Gold Deposits in the Carajás Mineral Province, Brazilian Amazon. *Economic Geology*, 113(7):1499-1524.
- Han, L., Liu, Z., Ning, Y., Zhao, Z., 2018. Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area. *Advances in Space Research*.
- Hessami, K., Koyi, H.A. & Talbot, C.J. 2001a. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of Petroleum Geology*, 24, 5-28.
- Hosseini, S., Lashkaripour, G.R., Moghadas, N.H., Ghafoori, M., Pour, A.B., 2019. Lineament mapping and fractal analysis using SPOTASter satellite imagery for evaluating the severity of slope weathering process. *Adv. Space Res.* 63 (2), 871-885.
- Hosseinpour, M. Maleki, Z. & Aleali, M., 2017. Evaluation of Hydrocarbon Potential in the Jahrom Area, Interior Fars, Zagros. *Open Journal of Geology*, 7, 429-442.
- Liao, J., Feng, Z., Luo, C. & Kang, Z., 2012. Fractal characteristics analysis of fractures in Shuiyanba ore



- field of Hezhou, Guangxi. *Mineral Deposits* 31, 459–464.
- Maleki, Z., Arian, m., Solgi, A. & Ganjavian, M. A., 2014. The Elements of Fold Style Analysis in the Khaftar Anticline, Zagros, Iran. *Open Journal of Geology*, 4, 79-92.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York.
- Mirzaie, A., Bafti, S.S., Derakhshani, R., 2015. Fault control on Cu mineralization in the Kerman porphyry copper belt, SE Iran: A fractal analysis. *Ore Geol. Rev.* 71, 237–247.
- Ni, C., Zhang, S., Chen, Z., Yan, Y. & Li, Y., 2017. Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models: A Case Study from Northeastern Yunnan Province, China, *Scientific Reports*, 10511, 7.
- Nkono, C., Liégeois, J.P. & Demaiffe, D., 2018. Relationships between structural lineaments and Cenozoic volcanism, Tibesti swell, Saharan metacraton. *Journal of African Earth Sciences* 145 (2018):274–283.
- Price, N. J., 1966. *Fault and Joint Development in Brittle and Semi- Brittle Rock*. Pergamon, Oxford.
- Raharimahefa, T. & Kusky, T.M., 2009. Structural and remote sensing analysis of the Betsimisaraka Suture in northeastern Madagascar. *Gondwana Research* 15(1):14-27.
- Richards, J. P., 2000. Lineaments revisited. *Society of Economic Geologists Newsletter* 42, 14–20.
- Sanaï, L., Chenini, I., Mammoua, A.B. & Mercier, E. 2015. Fracture related-fold patterns analysis and hydrogeological implications: Insight from fault-propagation fold in Northwestern of Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 101(2015):375–382.
- Sarp, G., 2014. Evolution of neotectonic activity of East Anatolian Fault System (EAFS) in Bingöl pullapart basin, based on fractal dimension and morphometric indices. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88, 168–177.
- Shahriyari, S. & Khatib, M.M., 1998. Fractal Analysis of Nehbandan Fault System, *Geosciences Scientific Quarterly Journal (ULUM-I ZAMIN)*, 32-39.
- Stearns, D. W., 1968. Certain aspects of fracture in natural deformed rocks. In: *Advanced Science Seminars in Rock Mechanics Vol. 1.* (edited by Rieker, R. E.) Air Force Cambridge Research Laboratory, Bedford, Mass., 97-118.
- Stearns, D.W. & Friedman, M., 1972. Reservoirs in fractured rocks, -in Stratigraphic oil and gas field classification, exploration methods, and case histories: AAPG Memoir 16, 82-106.
- Stephenson, B.J., Koopman, A., Hillgartner, H., Mcquillan, H., Bourne, S., Noad, J.J., Rawnsley, K., 2007. Structural and stratigraphic controls on fold-related fracturing in the Zagros Mountains, Iran: implications for reservoir development. In: Lonergan, L., Jolly, R.J.H., Rawnsley, K., Sanderson, D.J. (Eds.), *Fractured Reservoirs*, Geological Society, London, Special Publications, 270, 1-21.
- Tamara, J., Mora, A., Robles, W., Kammer, A., Ortiz, A., Sanchez-Villar, N., Piraquive, A., Rueda, L.H., Casallas, W., Castellanos, J., Montaña, J., Parra, L.G., Corredor, J., Ramirez, A. & Zambrano, E., 2015. Fractured reservoirs in the Eastern Foothills, Colombia, and their relationship with fold kinematics. *AAPG Bulletin*, 99(8): 1599–1633.
- Timoshenko, S. & Woinowsky-Krieger, S., 1959. *Theory of Plates and Shells*. New York: McGraw-Hill.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 148-149.
- Velandia, F. & Bermúdez, M.A., 2018. The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): Insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Butler, R.W., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, 72, 67-82.
- Watkins, H., Healy, D., Bond, C.E. & Butler, R.W.H., 2018. Implications of heterogeneous fracture distribution on reservoir quality; an analogue from the Torridon Group sandstone, Moine Thrust Belt, NW Scotland, *Journal of Structural Geology*, 108, 180-197.
- Yao, Y. & Zhan, W., 2007. Fractal analysis of faults in the southern part of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* 29, 59–66.
- Yassaghi, A., 2006. Integration of Landsat Image Interpretation and Geomagnetic Data on Verification of Deep-Seated Transverse Fault Lineaments in SE Zagros, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 4529-4544.

## **Fractal Analysis of the Effect of the Nezamabad Fault on the Lineaments Related to Fold: A Case Study of the Khaftar Anticline, Zagros, Iran**

**Mehdi Hosseinpour<sup>1</sup>, Mehran Arian<sup>2\*</sup>, Zahra Maleki<sup>3</sup>, Manouchehr Ghorashi<sup>4</sup>**

1. PhD student of Tectonics, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4. Associate Professor of Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran.



### **Abstract:**

Nezamabad fault zone with sinistral strike-slip (Dominant Mechanism) and NE-NW striking has located in the southwest of Iran, it is considered as one of the most important structures in the Zagros fold-thrust belt. This fault has caused complex structural deformations in the region. Also, there is an evidence for fault movement in the Khaftar anticline. This study aimed to fractal analysis, the impact of the Nezamabad fault on the lineaments extracted from the satellite image of Khaftar anticline. The box-counting method is an appropriate method for analyzing the fracture pattern for this study. Using this method, fractal dimensions were calculated for different parts of the Khaftar anticline. The difference between the fractal dimensions obtained from the lineaments associated with the Nezamabad fault well identifies how this fault is affected and the areas with different structural maturity in different parts of the Khaftar anticline. So that part A and C and their southern limbs, which include the SLA and SLC parts, have more fractal dimensions than other parts of the anticline, and these areas, especially the southern limbs of parts A and C are more active than other parts. Also, the difference in fractal dimensions of the Khaftar anticline as a result of differences in density, severity, and direction of stress due to Nezamabad fault performance in the area was evaluated.

**Keywords:** Fractal, Nezamabad Fault, Lineament, Fracture, Folding.