

Research Article

## Fracture analysis based on remote sensing and its impact on hydrocarbon reservoir study, Bangestan group in the Anjir anticline

Sajad Saleh<sup>1</sup>, Ali Farzipour saein<sup>2\*</sup>

1- Master of Tectonics, Department of Geology, University of Isfahan

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

**Keywords:** *Structural analysis, Structural lineament, Remote sensing, Anjir anticline, Zagros folded-thrust belt.*

### 1- Introduction

Lineaments that can be identified as fractures in satellite images have an important role in the exploration of hydrocarbons, minerals, groundwater, earthquake risk, etc. (Rowland and Sibson, 2004; Masoud and Koike, 2017). These lineaments' length, distance, density, intensity, and fractal dimension indicate high permeability areas that can be used as migration routes for hydrocarbon fluids and minerals (Warner, 1997). Therefore, accurate identification and estimation of areas with high fracture density by satellite images (with a wider view of ground evidence and aerial images) is of particular importance in estimating the volume of reserves. Visual extraction, automatic extraction, and semi-automatic extraction are widely used methods of identifying and extracting lineaments, and the combined use of these methods to extract and study lineaments in a district can lead to more reliable results (McQuillan, 1974; Abdellah, 2010; Tavani et al., 2011, Carminati et al., 2014). Morphotectonic evidence includes isobase maps and stream gradients and sinuosity of rivers to reduce errors in the accuracy of the existence of linear traces in field studies and surveys. Therefore, the main purpose of this study is to obtain the lineaments by visual extraction, automatic extraction, and morphotectonic evidence (isobase map and stream gradient and sinuosity of river) in a study area. The next step is to classify these lineaments and obtain a map of tectonic lineaments that confirms the accuracy of these lineaments in field studies so that more confident statistical parameters such as length, distance, density, intensity, and fractal dimension of these lines can be obtained and more reliable results are acquired from structural analysis of faults with the help of remote sensing studies.

### Geological and tectonic setting

The chosen study area is the Anjir anticline, located in Zagros's fold-thrust belt. In terms of geographical divisions, the Anjir anticline is located in the Ilam province. This anticline is covered with major Cretaceous limestones (Bangestan group) and has a trend parallel to the general trend of Zagros (NW - SE) and is also located in the southwestern part of the Lorestan basin (Hessami et al., 2001; Blanc et al., 2003; Casciello et al., 2009; Farzipour- saein et al., 2009).

### 2- Material and methods

This research has used several spatial data including Landsat, Digital Elevation Model (DEM) Alos Palsar, Google Earth image with a spatial resolution of 4 meters (zoom 18), and geological map 1:250,000 Ilam-Kuhdasht (Llewellyn, 1974) for recognition and extraction of structural lineaments of the Anjir anticline district.

After pre-processing of satellite images using geometric and radiometric correction, then structural lineaments were obtained using visual lineament extraction methods (optimal band composition, spatial filtering, principal component analysis technique, and band ratio), automatic lineament extraction, and

\* Corresponding author: a.farzipour@sci.ui.ac.ir

DOI:10.22055/AAG. 2022.37844.2235

Received 2021-07-12

Accepted 2022-01-24

lineaments derived from Morphotectonic evidence (isobase map and stream gradient and sinuosity of rivers).

### 3- Results and discussions

Comparison of diagrams and adaptation of the location of the lineaments resulting from these methods led to the classification of lineaments. Since the lines obtained from the visual extraction method have been identified and extracted with the help of fractures in the geological map and with more parameters, visual lineaments are based on and the lineaments obtained by other methods are compared and matched with these lineaments. By comparing the lineaments, four categories of lineaments are obtained. The first to third-order lineaments show the compliance of the lineaments obtained from the visual extraction method with at least one or more methods. As well as field study confirms the existence of first to third-order lineaments as structural lineaments. This could be due to the misleading tectonic evidence that fourth-order lineaments show compared to first- to third-order lineaments. Therefore, according to the above reasons, the parameters of length, distance, density, intensity, and fractal dimension of the first to third-order lineaments are calculated. The length and distance parameters of the selected structural lineaments show a relatively good structural maturity for the district of this anticline due to their exponential distribution. Density and intensity parameters show that the most fault activity and fracture distribution is more inclined to the northern parts from the southern limb of the anticline. Fractal dimension values show that the fractal dimension increases towards the northern and northwestern parts of this anticline and therefore the structural maturity in this part of the anticline increases. It should be noted that an oil exploration well (specified in the geological map) has also been drilled in the northern part of the anticline.

### 4- Conclusion

The results of this study show that the information obtained using remote sensing techniques has a key role in identifying tectonic phenomena such as faults and areas with the highest density of fractures. If different remote sensing techniques along with field observations identify fractures, a good statistical population will be obtained from the lineaments that are the surface effect of small to large-scale fractures. This is especially important in correctly identifying areas with high density, intensity, and fractal dimensions of fractures. The parameters of density, intensity, and fractal dimension in the Anjir anticline district show that the main tectonic activity that increased the fracture density has more impact in the northern areas of the anticline. Existence of an oil exploration well in the northern part of the anticline where there is the highest density of fractures and the fractal dimension in this area is higher than in other areas, which is evidence of the high density of fractures in this part of the anticline.

### 5- References

- Abdullah, A., Akhir, J. M., Abdullah, I., 2010. Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran–Sungi Lembing area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 15(6), 949-958. <https://doi.org/10.3524/2010/137458>.
- Blanc, E.P., Allen, M.B., Inger, S., Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. *Journal of the Geological Society* 160 (3), 401-412. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-110>.
- Carminati, E., Aldega, L., Trippetta, F., Shaban, A., Narimani, H., Sherkati, S., 2014. Control of folding and faulting on fracturing in the Zagros (Iran): The Kuh-e-Sarbalesh anticline. *Journal of Asian Earth Sciences* 79, 400-414. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.10.018>.
- Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., Blanc, E. and Hunt, D.W., 2009. Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros simply folded belt (Iran). *Journal of the Geological Society* 166 (5), 947-959. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-138>.
- Farzipour-Saein, A., Yassaghi, A., Sherkati, S., Koyi, H., 2009. Mechanical stratigraphy and folding style of the Lurestan region in the Zagros Fold–Thrust Belt, Iran. *Journal of the Geological Society, London* 166, 1101-1115. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-162>.

- Hessami, K., Koyi, H.A., Talbot, C.J., Tabasi, H., Shabanian, E., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold–thrust belt, Zagros Mountains. *Journal of the Geological Society* 158 (6), 969-981. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-007>.
- Llewellyn, P.G., 1974. Ilam-Kuhdasht (20504), Oil Service Company of Iran, 1:250,000.
- Masoud, A., Koike, K., 2017. Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: lineament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers and Geosciences*, 106, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006>.
- McQuillan, H., 1974. Fracture patterns on Kuh-e Asmari anticline, southwest Iran. *AAPG Bulletin* 58 (2), 236-246. <https://doi.org/10.1306/83D913C1-16C7-11D7-8645000102C1865>.
- Rowland, J.V., Sibson, R.H., 2004. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geofluids* 4 (4), 259-283. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00091>.
- Tavani, S., Storti, F., Soleimany, B., Fallah, M., Munoz, J. A., Gambini, R., 2011. Geometry, kinematics and fracture pattern of the Bangestan anticline, Zagros, SW Iran. *Geological Magazine* 148 (5-6), 964-979. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000197>.
- Warner, E.M., Coalson, E.B., Osmond, J.C., Williams, E.T., 1997. Geology of Jonah field, a major gas accumulation in the upper Cretaceous Lance Formation, Sublette County, Wyoming. *Innovative applications of petroleum technology in the Rocky Mountain area*, Rocky Mountain Association of Geologists 1-12. <https://doi.org/80.2480046/480046>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Saleh, S., Farzipour saein, A., 2023. Fracture analysis based on remote sensing and its impact on hydrocarbon reservoir study, Bangestan group in the Anjir anticline. *Adv. Appl. Geol.* 12(4), 809-822.

DOI:10.22055/AAG. 2022.37844.2235

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17403.html](https://aag.scu.ac.ir/article_17403.html)

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## تحلیل شکستگی‌ها با روش سنجش از دور و اهمیت آن در مطالعات ذخایر هیدروکربوری، گروه بنگستان تاقدیس انجیر

سید سجاد صالح

کارشناسی ارشد زمین ساخت گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

علی فرضی پورصائین\*

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

\* A.farzipour@sci.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

### چکیده

با توجه به نقش شکستگی‌ها در ایجاد فضای اصلی انتقال و تجمع ذخایر هیدروکربوری در مخازن آهکی و گسترش این مخازن در میدان‌های نفتی ایران، از جمله گروه بنگستان، تحلیل هندسی- سینماتیکی و تخمین درست از نواحی با تراکم بالای شکستگی‌ها در برآورد حجم ذخائر، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به منظور روشن نمودن اهمیت این موضوع، تاقدیس انجیر با توجه به رخنمون مناسب گروه بنگستان، در جنوب باختری حوضه لرستان از کمر بند چین خورده- رانده زاگرس انتخاب شده است. در این پژوهش با استفاده از مطالعات دورسنجی به چهار روش شامل تشخیص بصری خطواره‌ها، استخراج اتوماتیک خطواره‌ها، نقشه خطوط هم‌پایه و الگوی تغییرات پیچ و خم رودخانه‌ها، به شناسایی شکستگی‌های محدوده تاقدیس انجیر پرداخته شده است. تفسیر شکستگی‌های به دست آمده از این چهار روش و مطالعات صحرایی انجام شده جهت شناسایی و صحت سنجی این شکستگی‌ها نشان می‌دهد هر چهار روش در بارزسازی شکستگی‌ها در این محدوده کارایی مناسبی دارند. مطالعه طول و فاصله شکستگی‌ها به طور کلی نشان دهنده درجه بلوغ ساختاری زیاد بخش شمال غربی نسبت به بخش جنوب شرقی این تاقدیس می‌باشد. پارامترهای تراکم، تجمع و بعد فراکتال شکستگی‌ها در بخش غربی تاقدیس بیشترین مقدار را برخوردارند که به نظر می‌رسد سیستم‌های گسلی با روند شمال باختری - جنوب خاوری واقع در بخش غربی تاقدیس بیشترین نقش را در اعمال تنش و ایجاد شکستگی‌ها، به خصوص در گروه بنگستان محدوده تاقدیس انجیر داشته است. با توجه به انطباق بالای تراکم شکستگی‌ها و درجه بلوغ ساختاری بخش غربی تاقدیس انجیر با محدوده‌های مستعد از نظر هیدروکربوری، نتایج این مطالعه کلید قابل اطمینانی برای پی‌جویی مناطق مستعد هیدروکربوری با هدف گروه بنگستان در سایر مناطق و در اعماق، ارائه داده است.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل شکستگی، خطواره‌های ساختاری، سنجش از دور، تاقدیس انجیر، کمر بند چین خورده - رانده زاگرس

### ۱- مقدمه

که می‌توانند به عنوان مسیر مهاجرت سیالات هیدروکربوری و مواد معدنی قرار گیرند. این خطواره‌ها می‌توانند نمایانگر گسل‌هایی باشند که توسعه حوضه و توزیع مخازن را کنترل می‌کنند (Warner, 1997). در میداین نفتی ایران تاثیر شکستگی‌های ایجاد شده در سنگ‌های مخزن بر افزایش مهاجرت نفت تولید شده از سنگ منشأ مورد بررسی قرار گرفته و تایید شده است (Alizadeh et al., 2012). بنابراین

آثار شکستگی‌ها که به صورت خطواره‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی می‌شوند نقش مهمی در اکتشافات مواد معدنی، مواد هیدروکربوری، آب‌های زیرزمینی و غیره دارند (Rowland and Sibson, 2004; Masoud and Koike, 2017). پارامترهایی نظیر طول، فاصله، تراکم، تجمع و بعد فراکتال این خطواره‌ها نشانگر مناطق با نفوذپذیری بالا هستند

## ۲- جایگاه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی محدوده

### مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی انتخاب شده تاقدیس انجیر می‌باشد که در کمربند چین خورده - رانده زاگرس واقع شده است. از نظر تقسیمات جغرافیایی تاقدیس انجیر در استان ایلام واقع شده است. این تاقدیس در موقعیت جغرافیایی بین عرض شمالی  $33^{\circ}28'09''N$  -  $33^{\circ}11'73''N$  و طولی شرقی  $46^{\circ}19'32''E$  -  $46^{\circ}44'12''E$  و در ۱۵ کیلومتری جنوب باختر شهرستان ایلام می‌باشد (شکل ۱). تاقدیس انجیر عمدتاً توسط سنگ‌های آهکی کرتاسه (گروه بنگستان) پوشیده شده است و دارای روندی موازی با روند عمومی زاگرس (NW - SE) می‌باشد و نیز در بخش جنوب باختری حوضه لرستان قرار دارد (شکل ۱). ناحیه لرستان از جنوب خاوری توسط گسل بالارود، از سمت باختر و شمال باختر توسط گسل خانقین، از جنوب باختر توسط گسل پیشانی کوهستان و از شمال خاور توسط گسل زاگرس مرتفع از دیگر بخش‌های کمربند چین خورده - رانده زاگرس جدا شده است (Hessami et al., 2001; Blanc et al., 2003; Casciello et al., 2009; Farzipour-Saein et al., 2009). با توجه به اینکه میزان کوتاه شدگی این کمربند، از خط درز زاگرس به سمت پیش بوم کاهش می‌یابد (Alavi, 2004; Pirouz et al., 2017) و تأثیری که بر روی ناحیه لرستان داشته است، می‌توان براساس ویژگیهای زمین ساخت-چینه نگاری و هندسه ساختاری در راستای SW-NE این ناحیه را به سه بخش جنوب باختری، مرکزی و شمال خاوری تقسیم کرد (Motiei, 1995). در ناحیه لرستان شدت دگرشکلی‌ها از بخش جنوب باختری به سمت شمال خاوری افزایش می‌یابد (شکل ۱). از بخش جنوب باختری به سمت شمال خاوری، تاثیر ضخامت لایه بر تراکم شکستگی‌ها افزایش یافته و تاثیر لیتولوژی بر تراکم شکستگی‌ها کاهش می‌یابد (Pireh et al., 2015).

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- داده‌ها و نرم افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های رقومی سنجنده  $ETM^+$  از ماهواره لندست ۷ (که شماره ردیف و گذر این تصویر انتخاب شده به ترتیب ۳۷-۱۶۷ و مربوط به ماه جولای سال ۱۹۹۹ میلادی است)، مدل رقومی ارتفاعی سنجنده آلوس پالسا (در چهار سین با شماره ردیف و گذرهای ۵۸۰-۶۶۰، ۵۸۰-۶۵۰، ۵۸۱-۵۸۰)

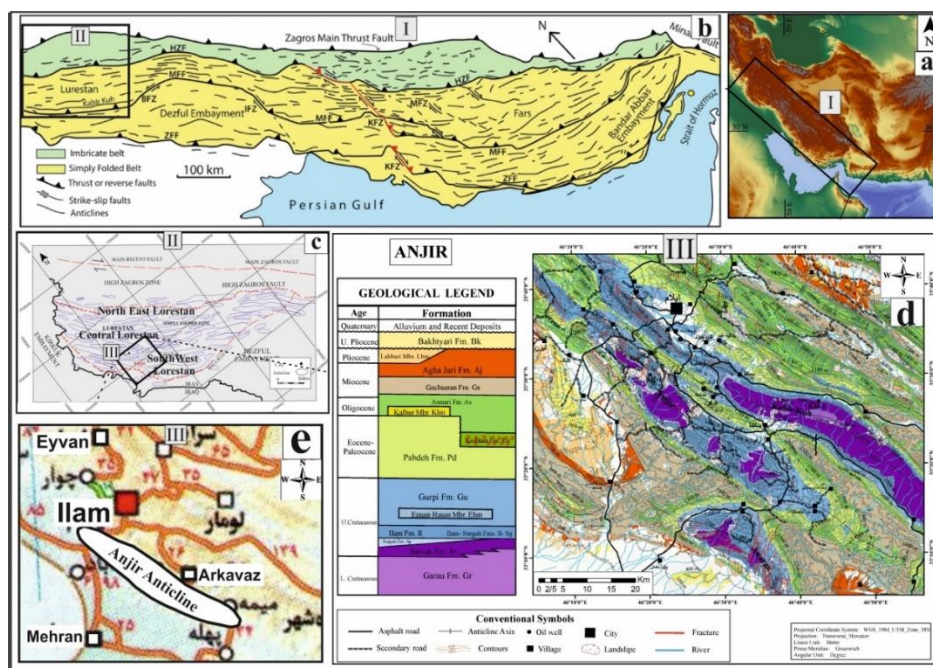
شناسایی و تخمین درست نواحی با تراکم بالای شکستگی در برآورد حجم ذخایر اهمیت ویژه دارد. تصاویر ماهواره‌ای دید وسیع‌تر و بهتری نسبت به تصاویر هوایی و شواهد زمینی داشته و از طرفی شناسایی و استخراج خطوط‌های تکتونیکی به کمک تصاویر ماهواره‌ای بسیار مورد توجه است (McQuillan, 1974; Abdullah, 2010; Tavani et al., 2014; Carminati et al., 2011). استخراج بصری، استخراج اتوماتیک و استخراج نیمه اتوماتیک روش‌های پرکاربرد شناسایی و استخراج خطوط‌ها هستند (Jordan et al., 2005; Soliman et al., 2019; Abdullah et al., 2013; Soto-Pinto et al., 2013). در روش استخراج بصری و نیمه اتوماتیک علاوه بر زمان بر بودن تا حدود زیادی شناسایی خطوط‌ها به تجربه مفسر بستگی دارد (Hung et al., 2005; Kusák et al., 2017; Abdullah et al., 2013). در حالی که استخراج خطوط‌ها در روش اتوماتیک به الگوریتم تشخیص خطوط‌ها و اطلاعات موجود در تصویر بستگی دارد (Koike et al., 1995; Soto-Pinto et al., 2013; Masoud and Koike, 2017). هر کدام از این روش‌ها معایب و مزایایی دارند ولی باید توجه کرد که هر کدام از این روش‌ها خطوط‌هایی را می‌توانند شناسایی کنند که توسط روش دیگر قابل تشخیص نیست. در نتیجه استفاده تلفیقی این روش‌ها با هم برای استخراج و مطالعه خطوط‌ها در یک محدوده می‌تواند نتایج قابل اعتمادتری را سبب شود. شواهد مورفوتکتونیکی که به کمک نقشه خطوط هم‌پایه و نقشه الگوی پیچ و خم رودخانه می‌توان بدست آورد کلیدی برای کاهش خطا در صحت وجود آثار خطوط‌ها در مطالعات و برداشت‌های زمینی است.

از این رو، هدف اصلی این مطالعه بدست آوردن خطوط‌ها به روش‌های استخراج بصری، استخراج اتوماتیک و به کمک شواهد مورفوتکتونیکی (نقشه خطوط هم‌پایه و نقشه الگوی پیچ و خم رودخانه) در یک محدوده مطالعاتی است. پس از آن با رده‌بندی این خطوط‌ها و بدست آوردن نقشه‌ای از خطوط‌های تکتونیکی، صحت وجود این خطوط‌ها در مطالعات صحرایی بررسی می‌شود تا بتوان با اطمینان بیشتر پارامترهای آماری مانند طول، فاصله، تراکم، تجمع و بعد فراکتال این خطوط‌ها بدست آورد و نتایج قابل اعتمادتری از تحلیل ساختاری گسل‌ها به کمک مطالعات دورسنجی حاصل شود.



اعمال از نرم افزارهای ENVI 5.3، ESRI ArcGIS 10.5، Google Earth، Global Mapper 17، PCI Geomatica 2016، SAS Planet 16 استفاده شد. شایان ذکر است که از نرم افزار Rock work v16 جهت محاسبات آماری و ترسیم رزیدیاگرام‌ها بکار گرفته شد.

۶۶۰، ۵۸۱-۶۵۰ قرار داشته و به ترتیب دو سین اول مربوط به ماه دسامبر سال ۲۰۰۷ میلادی و دو سین دوم مرتبط به ماه سپتامبر سال ۲۰۰۷ میلادی)، تصویر Google Earth با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر (زوم ۱۸) و نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ایلام- کوهدشت (Llewellyn, 1974) به عنوان داده های اولیه جهت تهیه نقشه شکستگی‌ها، نقشه خطوط هم پایه و مطالعه پیچ و خم رودخانه‌ها استفاده شده است. برای این



شکل ۱- (a) جایگاه ساختاری کمر بند کوهزایی زاگرس در ایران، (b) جایگاه ساختاری حوضه لرستان در کمر بند کوهزایی زاگرس، (c) موقعیت تاقدیس انجیر در حوضه لرستان، (d) نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ تاقدیس انجیر و (e) موقعیت جغرافیایی تاقدیس انجیر.

**Fig. 1.** (a) Structural position of Zagros orogenic belt in Iran, (b) Structural position of Lorestan basin in the Zagros orogenic belt, (c) Position of the Anjir anticline in Lorestan basin, (d) Geological map of 1/10000 Anjir anticline, and (e) Location of the Anjir anticline.

هیدرو کربور، تهیه نقشه خطواره‌های تکتونیکی به منظور بررسی الگوی شکستگی‌ها، ارتباط آنها با چین خوردگی و تأثیر آنها بر حرکت سیال ضروری می‌باشد. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و الوس پالسر به دلیل دید وسیع در تشخیص خطواره‌های تکتونیکی بزرگ مقیاس، گستره طیفی وسیع و قدرت تفکیک مکانی مناسب جهت تعیین موقعیت مکانی اثر سطحی شکستگی‌ها (خطواره‌های تکتونیکی) استفاده می‌شود. در ادامه به چهار روش استخراج بصری، استخراج اتوماتیک خطواره‌ها و خطواره‌هایی که به کمک شواهد مورفوتکتونیکی (نقشه خطوط هم‌پایه و الگوی پیچ و خم رودخانه) قابل شناسایی‌اند، پرداخته می‌شود.

### ۲-۳- تصحیح هندسی و رادیومتریکی تصاویر ماهواره‌ای

عملیات پیش پردازش تصویر که از آن بعنوان بازیابی مجدد و تجدید ساختار یک تصویر تعبیر می‌شود در واقع ضمن تصحیح اعوجاج‌ها و خطاهای احتمالی به دید بهتر و دقیقتر از لحاظ مکانی و طیفی تصاویر ماهواره‌ای کمک می‌کند و این تصاویر را برای پردازش آماده می‌سازد (Jensen, 2005). برای انجام تصحیح هندسی و رادیومتریکی مطابق فلوجارت زیر مراحل پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفته است (شکل ۲).

### ۳-۳- استخراج خطواره‌ها

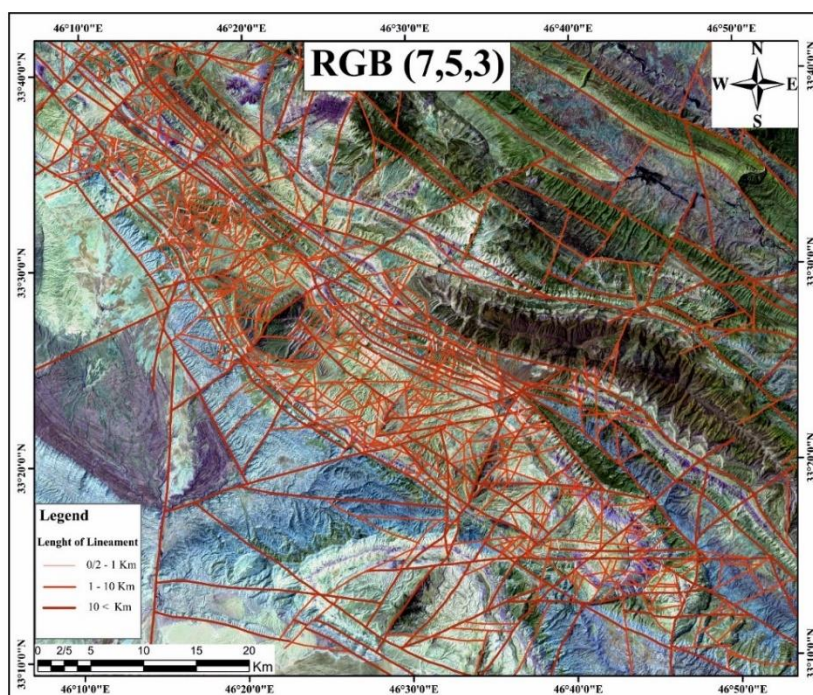
با توجه به نقش تأثیرگذار شکستگی‌ها در مهاجرت و تجمع



A						
Band7	Band5	Band4	Band3	Band2	Band1	Band NO
29.73	30.46	22.07	36.51	27.17	22.15	Standard deviation
B						
Band7	Band5	Band4	Band3	Band2	Band1	Correlation matrix
0.78	0.81	0.85	0.94	0.91	1.00	Band1
0.82	0.86	0.89	0.97	1.00	0.99	Band2
0.85	0.89	0.90	1.00	0.97	0.94	Band3
0.79	0.89	1.00	0.90	0.89	0.85	Band4
0.94	1.00	0.89	0.89	0.86	0.81	Band5
1.00	0.94	0.79	0.85	0.82	0.78	Band7
C						
OIF	Total Correlation matrix	Total Standard deviation	Combined bands			
29.59	2.90	85.83	1,2,3			
26.51	2.73	72.39	1,2,4			
29.99	2.66	79.78	1,2,5			
30.52	2.59	79.05	1,2,7			
30.38	2.69	81.73	1,3,4			
33.75	2.64	89.12	1,3,5			
34.39	2.57	88.39	1,3,7			
29.67	2.55	75.68	1,4,5			
30.97	2.42	74.95	1,4,7			
32.54	2.53	82.34	1,5,7			
31.43	2.76	86.75	2,3,4			
34.61	2.72	94.14	2,3,5			
35.38	2.64	93.41	2,3,7			
30.56	2.64	80.70	2,4,5			
31.98	2.50	79.97	2,4,7			
33.34	2.62	87.36	2,5,7			
33.59	2.68	90.04	3,4,5			
35.16	2.54	89.31	3,4,7			
36.08	2.68	96.70	3,5,7			
31.77	2.62	83.26	4,5,7			

شکل ۳- محاسبه مقادیر OIF برای تمامی ترکیبات رنگی RGB روی باندهای مرئی محدوده مورد مطالعه.

Fig. 3. Calculation of OIF values for all RGB color combinations on the visible bands of the study area.



شکل ۴- خطواره های شناسایی شده به کمک ترکیب بهینه باندی حاصل از تصویر ماهواره‌های لندست ۷.

Fig. 4. Lineaments identified by optimal combination of image banding Landsat 7 satellite.

### ۳-۸- تکنیک تحلیل مؤلفه اصلی

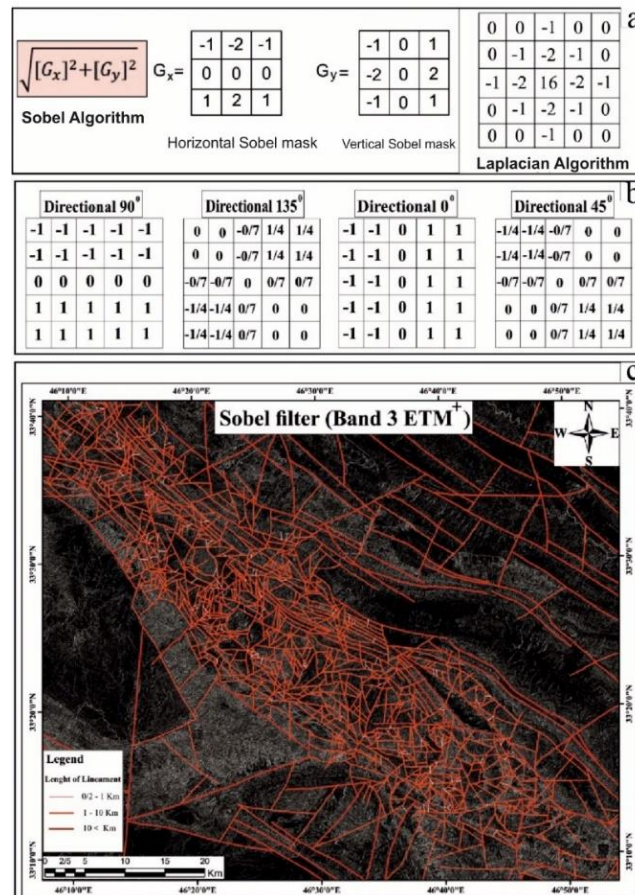
روش تحلیل مؤلفه‌ی اصلی بر مبنای پردازش بر روی اطلاعات طیفی و مکانی باندهای تصاویر ماهواره‌ای عمل می‌کند. این

روش می‌تواند بیشترین اطلاعات موجود در چندین باند را در دو یا سه مؤلفه جای دهد. این سه مؤلفه با تغییراتی که در ارزش عددی پیکسل‌های تصویر به وجود می‌آورد دید واضح‌تری را



شده در محدوده تاقدیس انجیر استفاده می‌شود. به کمک تکنیک تحلیل مؤلفه‌ی اصلی در مجموع ۲۱۷ خطواره تکتونیکی شناسایی شد (شکل ۶).

برای تشخیص جابه جایی‌های لیتولوژیکی بوجود آمده در واحدهای سنگی ایجاد می‌کند (Davis, 1973; Drury, 2001). در این بخش مطالعه از باندهای سنجنده‌ی ETM<sup>+</sup> از ماهواره لندست ۷ که عملیات پیش پردازش بر روی آن انجام



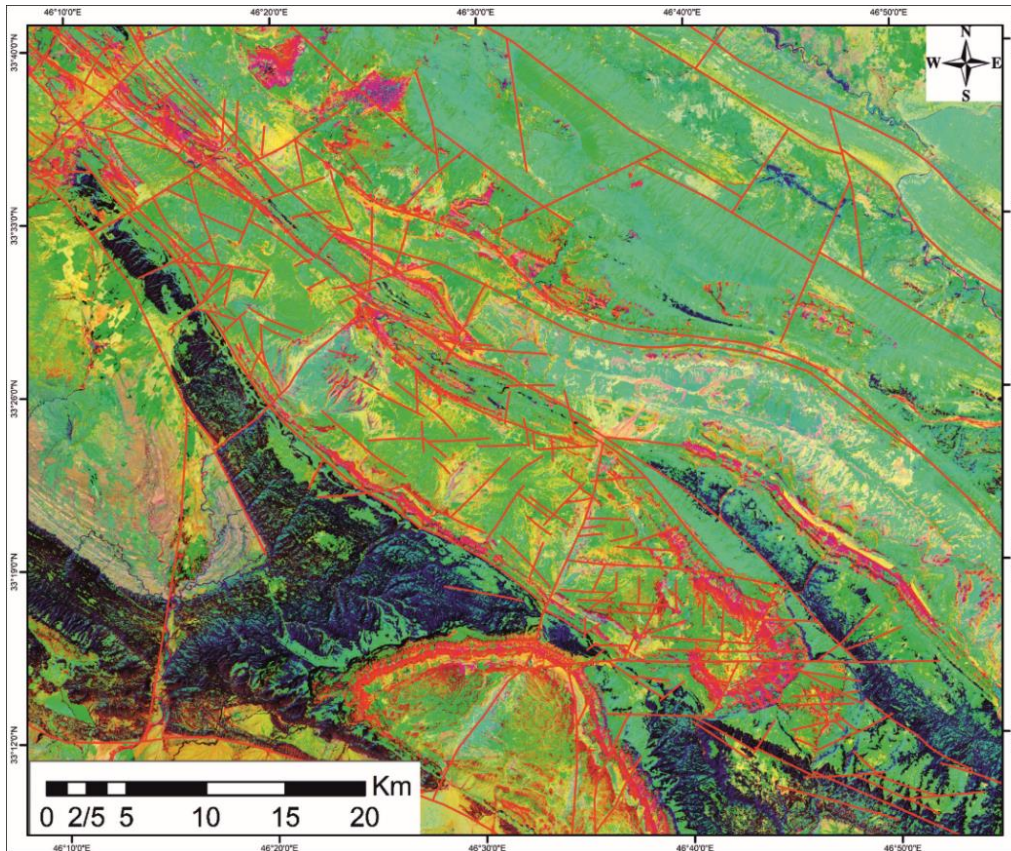
شکل ۵- (a) ماتریس‌های فیلترهای سوبل و لاپلاسین، (b) فیلترگذاری جهت‌دار بر روی تصویر DEM و (c) خطواره‌های شناسایی شده به کمک تکنیک فیلترگذاری بر روی تصویر.

Fig. 5. (a) Sobel and Laplacein filter matrixes, (b) Directional filtering on DEM image, and (c) Detected lineaments using the image filtering technique.

اطراف خطواره‌های تکتونیکی)، شناخت نواحی دگرسان و از بین بردن آثار توپوگرافی و سایه‌ها می‌باشد (Gupta et al., 2013). از نسبت بانندی ۳ به ۱ جهت شناسایی نواحی مستعد وجود کانی‌های آهن‌دار، از نسبت بانندی ۵ به ۴ برای شناسایی نواحی با متراکم‌ترین پوشش گیاهی، از نسبت بانندی ۵ به ۷ برای شناسایی نواحی مستعد تجمع کانی‌های رسی با هدف شناسایی خطواره‌های تکتونیکی در محدوده تاقدیس انجیر استفاده می‌شود. به کمک روش نسبت بانندی در مجموع تعداد ۱۰۴ خطواره تکتونیکی شناسایی شد (شکل ۷).

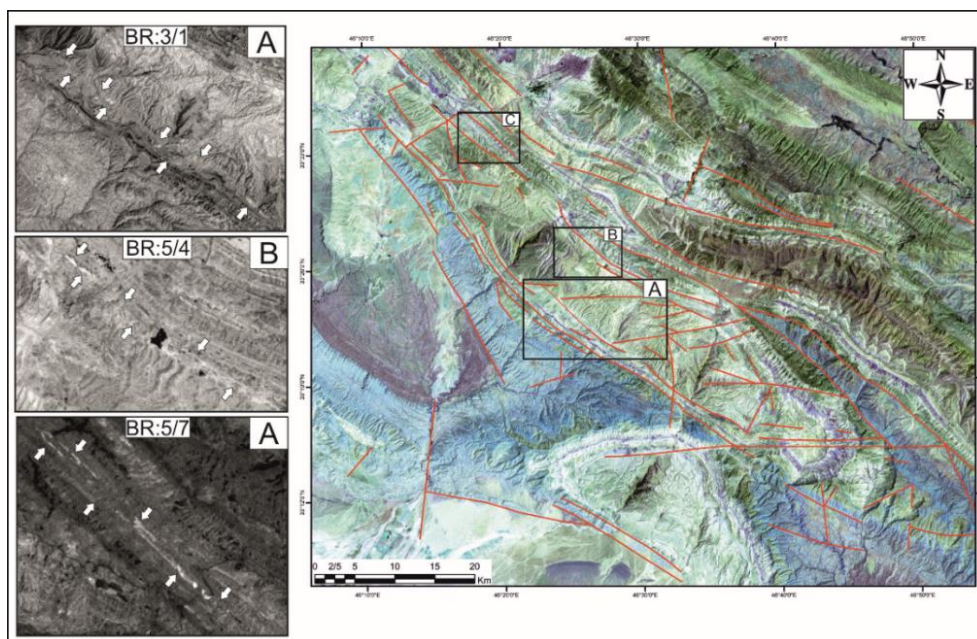
### ۳-۹- نسبت بانندی

روش نسبت بانندی کاربرد وسیعی در کانی‌شناسی و شناخت پدیده‌ها در یک محدوده بر اساس تفاوت میزان جذب و انعکاس نور در پدیده‌های مختلف به کمک تصاویر ماهواره‌ای دارد (Pour et al., 2015; Chernicoff et al., 2002). مزیت‌های اصلی این روش، بارسازی نواحی با بیشترین تجمع کانی‌های هدف (تجمع آثار رسی و کانی‌های رسی در اطراف نواحی تخریب گسلها، تجمع ترکیبات آهن‌دار در محل بازشدگی شکستگی‌ها، تراکم بیشتر و خطی بودن پوشش گیاهی در



شکل ۶- ترکیب مؤلفه اصلی اول، دوم و سوم با هدف بارزسازی خطواره‌های ساختاری.

Fig. 6. Combining the first, second and third main components with the aim of highlighting structural lineaments.



کل ۷- بارزسازی خطواره‌های ساختاری به کمک نسبت باندی ۱/۳، ۴/۵، ۷/۵.

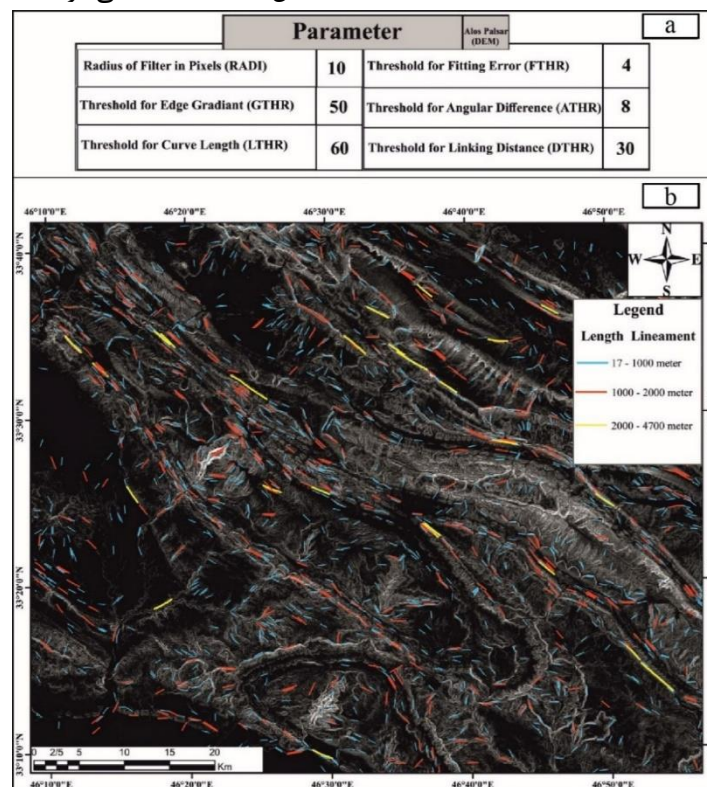
Fig. 7. Detection of structural lineaments based on band ratio 1/3, 4/5, 7/5.



### ۳-۱۰- استخراج اتوماتیک خطواره‌ها

استخراج اتوماتیک خطواره‌ها سبب شناسایی خطواره‌هایی که با چشم قابل رویت نیستند می‌شود و همچنین به کمک این روش در مدت زمان کوتاهی تمام خطواره‌ها شناسایی و استخراج شده و مکانیسم عملیات استخراج خطواره‌ها برای تمامی تصاویر یکسان می‌باشد (Sarp, 2005; Gulcan, 2005). با این وجود، خطواره‌های به دست آمده به کمک این روش تنها شامل خطواره‌های تکتونیکی نبوده و در کل هر پدیده‌ای که مرز خطی در تصاویر ماهواره‌ای داشته باشد به عنوان خطواره استخراج می‌نماید. بنابراین انتخاب باند مناسب از تصاویر ماهواره‌ای برای استخراج اتوماتیک خطواره‌ها نکته مهمی است که می‌توان از

مقالات و پژوهش‌هایی که در این رابطه انجام شده، استفاده شود (Javhar et al., 2019; Kusak et al., 2016). برای افزایش دقت در استخراج خطواره‌های تکتونیکی تصویر DEM از ماهواره Alos Palsar مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از عملیات پیش پردازش، با استفاده از فیلترگذاری مکانی Roberts با کرنل سایز ۵×۵، لبه‌های موجود در این تصویر بارزسازی شد. روند تشخیص و ثبت خطواره‌ها شامل سه مرحله‌ی لبه‌یابی به کمک الگوریتم کنی، آستانه‌گذاری به کمک مقادیر پارامترهایی که در شکل (۸a) قابل مشاهده است و استخراج منحنی است. خطواره‌های بدست آمده به کمک روش استخراج اتوماتیک توسط تصویر DEM فیلترگذاری شده در شکل (۸b) مشاهده می‌شود.



شکل ۸- (a) پارامترهای به کار رفته در الگوریتم استخراج اتوماتیک خطواره‌ها و (b) خطواره‌های شناسایی شده به کمک روش استخراج اتوماتیک. Fig. 8. (a) Parameters used in the automatic lineaments extraction algorithm, and (b) Detected lineaments using automatic extraction metho.

### ۳-۱۱- استخراج خطواره‌ها از نقشه خطوط هم‌پایه:

هدف اصلی از تهیه نقشه خطوط هم‌پایه، تشخیص نواحی متأثر از فعالیت‌های نوزمین‌شناختی به کمک تغییر جهت ناگهانی خطوط، فشردگی، فاصله گرفتن و تحذب خطوط هم‌پایه می‌باشد. برای تهیه نقشه هم‌پایه محدوده تاقدیس انجیر ابتدا از

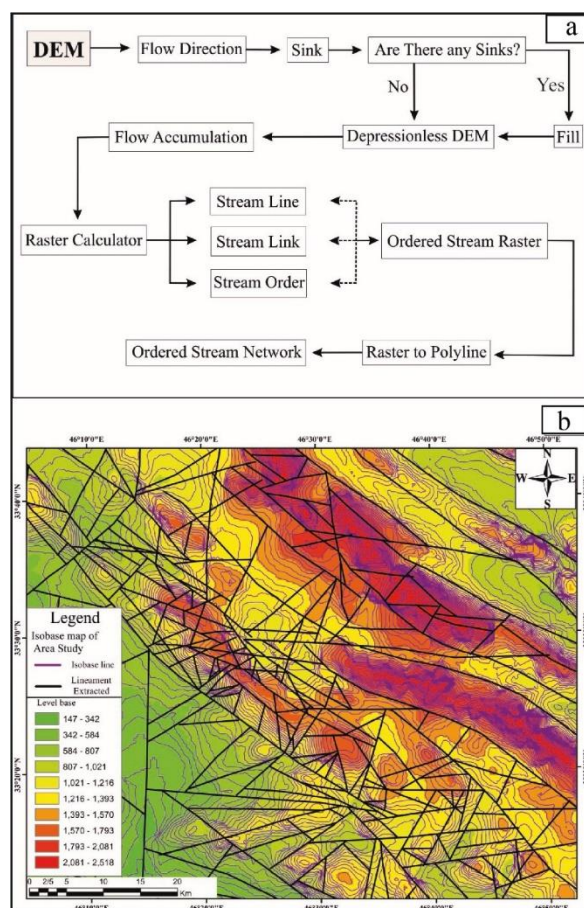
تصویر DEM ماهواره Alos Palsar آبراهه‌ها استخراج شد (شکل ۹a) و در مرحله بعد به کمک خطوط توپوگرافی منطقه با اختلاف ارتفاعی ۵۰ متر (بدست آمده از تصویر DEM ماهواره Alos Palsar)، نقشه خطوط هم‌پایه محدوده تاقدیس انجیر از آبراهه‌های تمامی مرتبه‌ها بدست آمد. در نهایت به کمک این خطوط هم‌پایه تمامی خطواره‌های زمین‌ساختی قابل

تشخیص شناسایی شد (شکل ۹b).

### ۳-۱۲- استخراج خطواره‌ها از طریق ضریب پیچ و خم رودخانه

ارزیابی فعالیت‌های نوزمین‌ساختی احتمالی محدوده تاقدیس انجیر با توجه به اینکه منطقه لرزه‌خیزی کمی نسبت به دیگر نواحی حوضه لرستان دارد مشکل است. بنابراین بررسی حرکات رودخانه یک روش مناسب و قابل اعتماد جهت ارزیابی‌های زمین‌ریخت‌شناسی این محدوده است. کوچکترین تغییرات در پیچ و خم رودخانه‌های کم شیب می‌تواند به تغییرات کوچک در توپوگرافی آن منطقه اشاره داشته باشد (Holbrook and

Schumm, 1999; Ouchi, 1985). یکی از موثرترین و مفیدترین تقسیم‌بندی‌ها برای بررسی پیچ و خم رودخانه‌ها، تقسیم‌بندی بر اساس پلان رودخانه‌ها می‌باشد (Leopold and Wolman, 1957; Gabet et al., 2008). یکی از مهمترین پارامترها در تعیین تغییرات شکل پلان رودخانه، ضریب پیچان رودی است. ضریب پیچان رودی کمتر از ۱/۴ برای هر بازه از رودخانه، معیار پایداری آن می‌باشد و چنانچه این ضریب بزرگتر از ۱/۴ باشد رودخانه رفتار ناپایداری خواهد داشت و به طور قراردادی رودخانه‌هایی که ضریب پیچان رودی بزرگتر از ۱/۵ دارند را از نوع مئاندری در نظر گرفته‌اند (Leopold and Wolman, 1957).



شکل ۹- (a) فلوجارت استخراج آبراهه‌ها به کمک تصویر DEM و (b) نقشه هم‌پایه و خطواره‌های تکتونیکی شناسایی شده محدوده تاقدیس انجیر.

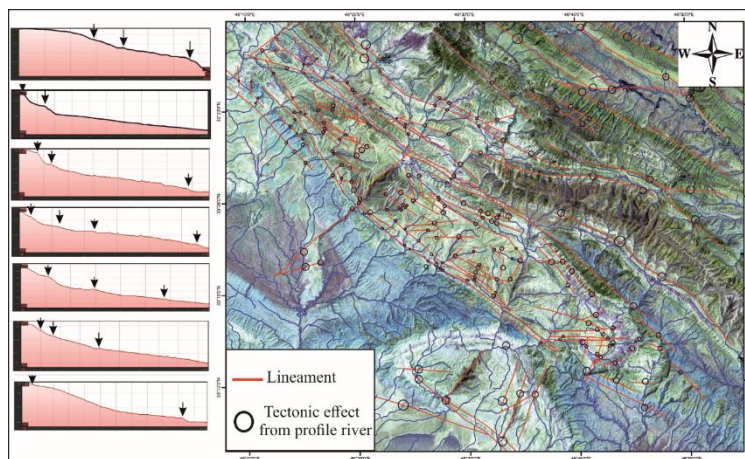
**Fig. 9.** (a) Flowchart extraction of streams using DEM image, and (b) Isobase map and identified structural lineaments of the Anjir anticline.

قبلی استفاده می‌شود. کمترین و بیشترین مقدار ضریب پیچ و خم به دست آمده به ترتیب ۱/۰۵ و ۲/۹۳ می‌باشد. بعد از

برای ارزیابی پیچ و خم آبراهه‌های محدوده تاقدیس انجیر به کمک ضریب پیچ و خم، از آبراهه‌های استخراج شده در بخش

زمین‌ساختی به کمک این روش، جهت بررسی دقیق‌تر خطواره‌های زمین‌ساختی در محدوده تاقدیس انجیر، ۷۸ پروفیل در امتداد آبراهه‌ها ترسیم شد. به کمک این پروفیل‌ها تعداد ۱۳۶ خطواره شناسایی شده به کمک روش ضریب پیچ و خم رودخانه، تاثیرشان را در مسیر پروفیل نشان می‌دهند (شکل ۱۰).

محاسبه این ضریب، با استفاده از ریخت‌شناسی آبراهه‌ها و نقشه شیب منطقه، اقدام به شناسایی خطواره‌های زمین‌ساختی شد. در تشخیص خطواره‌ها به کمک این روش، مقدار ضریب پیچ و خم رودخانه، مقدار شیب منطقه، تراکم مئاندرها، هم سو بودن تعدادی از آبراهه‌ها و دنبال کردن امتداد خاصی توسط آبراهه‌ها مورد توجه قرار گرفت. پس از شناسایی خطواره‌های



شکل ۱۰- خطواره‌های ساختاری شناسایی شده به کمک ضریب پیچان رودی و نمونه پروفیل‌های طولی آبراهه‌های محدوده تاقدیس انجیر (غالب خطواره‌ها روند شمال باختری - جنوب خاوری، روند زاگرسی، دارند).

Fig.10. Structural lineaments identified by means of river sinuosity coefficient and samples of longitudinal profiles of streams in the Anjir anticline district (Most of the lineament have a northwest-southeast trend (Zagros trend).

#### ۴- بحث

##### ۴-۱- رده‌بندی خطواره‌های سطحی

پس از شناسایی و استخراج خطواره‌ها به کمک روش‌های استخراج بصری (شکل ۱۱a)، استخراج اتوماتیک خطواره‌ها، استخراج خطواره‌های حاصل از نقشه خطوط هم‌پایه و خطواره‌های حاصل از ضریب پیچان رودی (شکل ۱۱b)، به مقایسه رزیدیاگرام‌ها و انطباق موقعیت مکانی خطواره‌های حاصل از این روش‌ها پرداخته شد. با توجه به اینکه خطواره‌های حاصل از روش استخراج بصری به کمک شکستگی‌های موجود در نقشه‌های زمین‌شناسی و با پارامترهای بیشتری شناسایی و استخراج شده است بنابراین این خطواره‌ها را مبنا قرار داده و خطواره‌های بدست آمده توسط روش‌های دیگر با این خطواره‌ها مقایسه و منطبق می‌شوند. جهت رده‌بندی خطواره‌های حاصل از روش استخراج بصری، خطواره‌هایی که به کمک سه مقایسه صورت گرفته با یکدیگر قابل انطباق بودند به عنوان خطواره‌های رده اول، خطواره‌های قابل انطباق به کمک دو مقایسه صورت گرفته به عنوان خطواره‌های رده دوم، خطواره‌های قابل انطباق

به کمک یک مقایسه صورت گرفته به عنوان خطواره‌های رده سوم و خطواره‌های حاصل از استخراج بصری که قابل انطباق با هیچ یک از روش‌های دیگر نبودند به عنوان خطواره‌های رده چهارم در نظر گرفته شدند (شکل ۱۱d). از خطواره‌های رده اول تا سوم به عنوان خطواره‌های ساختاری (شکستگی‌ها)، در مطالعات و تحلیل و بررسی‌های آماری در بخش‌های بعد استفاده می‌شود و از خطواره‌های رده چهارم به دلیل آنکه تنها توسط روش استخراج بصری شناسایی شده، صرف نظر می‌شود.

##### ۴-۲- خطواره‌های تایید شده از طریق پیمایش‌های

###### زمینی

کنترل زمینی خطواره‌های رده‌بندی شده به صحت سنجی این خطواره‌ها کمک می‌کند. با وجود محدودیت دسترسی به تمامی نواحی تاقدیس انجیر و فقدان شواهد زمین‌ساختی در برخی نواحی این تاقدیس به دلیل فرسایش زیاد، در مجموع جامعه آماری خوبی از آثار خطواره‌ها در ۳۲ ایستگاه از مطالعات زمینی بدست آمد (شکل ۱۲). این بررسی‌ها نشان داد خطواره‌های رده اول، دوم و سوم بطور چشمگیری صحت وجودی بیشتری



فعالیت بالازدگی‌های عهدحاضر رابطه مستقیم داشته و اهمیت بسزایی در مطالعات تکتونیک فعال یک ناحیه دارد (Xypolias and Koukouvelas, 2004). هر دو پارامتر در واحد سطح تعریف می‌شوند. تراکم بیانگر مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح و تجمع بیانگر تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح است. بنابراین برای محاسبه تراکم و تجمع شکستگی‌ها باید با شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه، واحد سطح را تعریف نمود. برای شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه، به وسعت منطقه و پراکندگی مکانی خطواره‌های ساختاری توجه می‌شود. جهت محاسبه این دو پارامتر از روش دایره‌ای می‌توان استفاده نمود. با توجه به وضعیت تراکم شکستگی‌ها در محدوده تاقدیس انجیر، این محدوده به ۴۶۰ سلول مربعی با اضلاع ۳ در ۳ کیلومتر شبکه‌بندی شده و پارامترهای تراکم و تجمع محاسبه می‌گردد (شکل های a-14c). با توجه به مطالعات انجام شده بالاترین مقادیر تراکم و تجمع مربوط به یال جنوبی و نیمه غربی محدوده تاقدیس انجیر است (شکل d14). این مسئله نشان می‌دهد که شدت دگرشکلی در این مناطق از تاقدیس انجیر بیشتر است که این می‌تواند به دلیل رخنمون بیشتر واحدهای گروه بنگستان که رفتار شکننده‌تری نسبت به واحدهای چینه‌ای گورپی و پایده دارند، باشد (شکل d1).

#### ۴-۵- تحلیل فراکتال خطواره‌های رده‌بندی شده:

مفهوم فراکتال توسط Mandelbrot (۱۹۷۶) معرفی شد و مطالعات گسترده‌ای در علوم مختلف به کمک آن صورت گرفته است. در این بخش از پژوهش بعد فراکتالی به کمک روش مربع شمار تعیین می‌شود. در این روش یک مربع به طول واحد به عنوان شبکه‌ی والد یا پایه‌ی فراکتال در نظر گرفته می‌شود. شبکه واحد یک مربع مرتبه صفر است که مولد مرتبه‌های بالاتر از خود می‌باشد. یعنی برای ایجاد مربع‌های مرتبه اول، مربع مرتبه صفر به ۴ مربع به طول یک چهارم مربع اولیه تقسیم می‌شود و برای ساخت مربع‌های مرتبه دوم هر یک از مربع‌های مرتبه اول به چهار مربع کوچکتر به طول یک چهارم مربع مرتبه اول تقسیم شده و در هر مرحله تعداد مربع‌های باقی‌مانده تحت عنوان شاخص  $N$  شمارش می‌شود. بنابراین بعد فراکتال در این روش هر عددی در بازه‌ی ۰ تا ۲ می‌باشد (Turcott, 1997).

در محدوده‌ی تاقدیس انجیر جهت محاسبه‌ی بعد فراکتالی خطواره‌های ساختاری محدوده‌های مربعی به ابعاد ۸ کیلومتر تعریف شدند. تمامی خطواره‌های ساختاری محدوده‌ی تاقدیس

نسبت به خطواره‌های رده‌ی چهارم دارند. این مسئله می‌تواند بخاطر شواهد ریخت زمین‌ساختی گمراه کننده‌ای باشد که خطواره‌های رده چهارم نسبت به خطواره‌های رده اول تا سوم نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به اینکه خطواره‌های رده اول تا سوم جامعه آماری بالایی از آثار سطحی شکستگی‌ها را دارا می‌باشند بنابراین پارامترهای طول، فاصله، تراکم، تجمع و بعد فراکتال این خطواره‌ها محاسبه می‌شود.

#### ۴-۳- محاسبه طول و فاصله خطواره‌های رده‌بندی شده

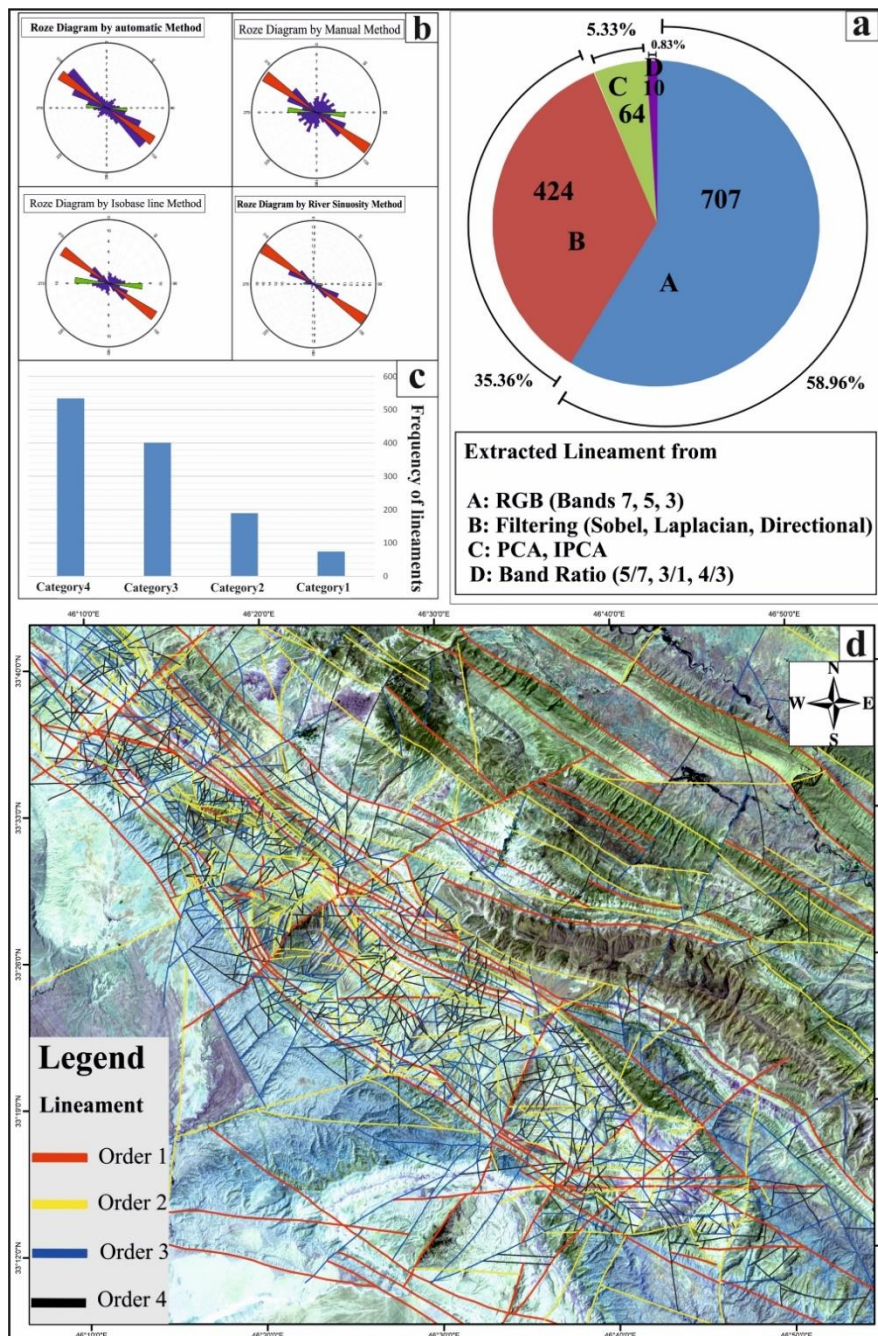
بررسی طول و فاصله خطواره‌های ساختاری، پارامتری مهم برای بررسی سایر خصوصیات آماری آنها می‌باشد (Ekneligoda and Henkel, 2006; Casas et al., 2000; Xypolias and Koukouvelas, 2004). در مطالعات مربوط به فاصله خطواره‌های تکتونیک، نمایی بودن پراکندگی تعداد بر طول خطواره‌های ساختاری در یک ناحیه، نشانه‌ی بلوغ ساختاری و حد بالایی از توسعه شکستگی‌های ساختاری در آن ناحیه می‌باشد. همانند فاکتور طول، نمایی بودن نسبت تعداد خطواره به فواصل بین خطواره‌ها، نشان‌دهنده بلوغ ساختاری و توسعه بسیار زیاد شکستگی‌ها در یک ناحیه است (Xypolias and Koukourelas, 2004). در مورد طول خطواره‌های ساختاری رده بندی شده، در نگاهی کلی تمامی هیستوگرام‌های رسم شده بنظر می‌رسد توزیع نمایی دارند ولی خطواره‌های با روند شمال باختری - جنوب خاوری در محدوده تاقدیس انجیر توزیع نمایی بسیار خوبی دارند (شکل a13). خطواره‌های ساختاری F1 تا F13 از بین خطواره‌های رده بندی شده بیشترین طول را دارند و می‌توان به عنوان شکستگی‌های اصلی محدوده تاقدیس انجیر در نظر گرفت. در مورد فاصله بین خطواره‌ها، نزولی بودن فراوانی نسبت به افزایش فاصله، بصورت نمایی می‌باشد. جهت بررسی دقیق‌تر فواصل خطواره‌ها، بررسی هر کدام از هشت دسته خطواره، اطلاعات دقیقتری در اختیار می‌گذارد. نکته قابل توجه نمایی بودن هیستوگرام خطواره‌های با روند شمال باختری - جنوب خاوری می‌باشد و بقیه هیستوگرام‌ها نیز توزیع نمایی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهند (شکل b13). در مجموع شکستگی‌های محدوده تاقدیس انجیر از نظر طول، فاصله بین شکستگی‌ها و بلوغ ساختاری، توسعه نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

#### ۴-۴- محاسبه پارامترهای تراکم و تجمع خطواره‌ها

تعیین پارامترهای تراکم و تجمع خطواره‌های ساختاری، با

۳۴ محدوده‌ی مربع شکل تعریف شد که کل محدوده‌ی تاقدیس

انجیر در محدوده‌های مربعی تعریف شده قرار دارند. در مجموع



شکل ۱۱- (a) مقایسه آماری خطواره‌های به دست آمده به کمک روش استخراج بصری، (b) رز دیاگرام خطواره‌های به دست آمده به کمک روش های استخراج بصری، استخراج اتوماتیک، نقشه هم‌پایه و ضریب پیچ و خم رودخانه، (c) فراوانی خطواره‌های رده ۱ تا رده ۴ و (d) نقشه خطواره‌های رده‌بندی شده محدوده تاقدیس انجیر.

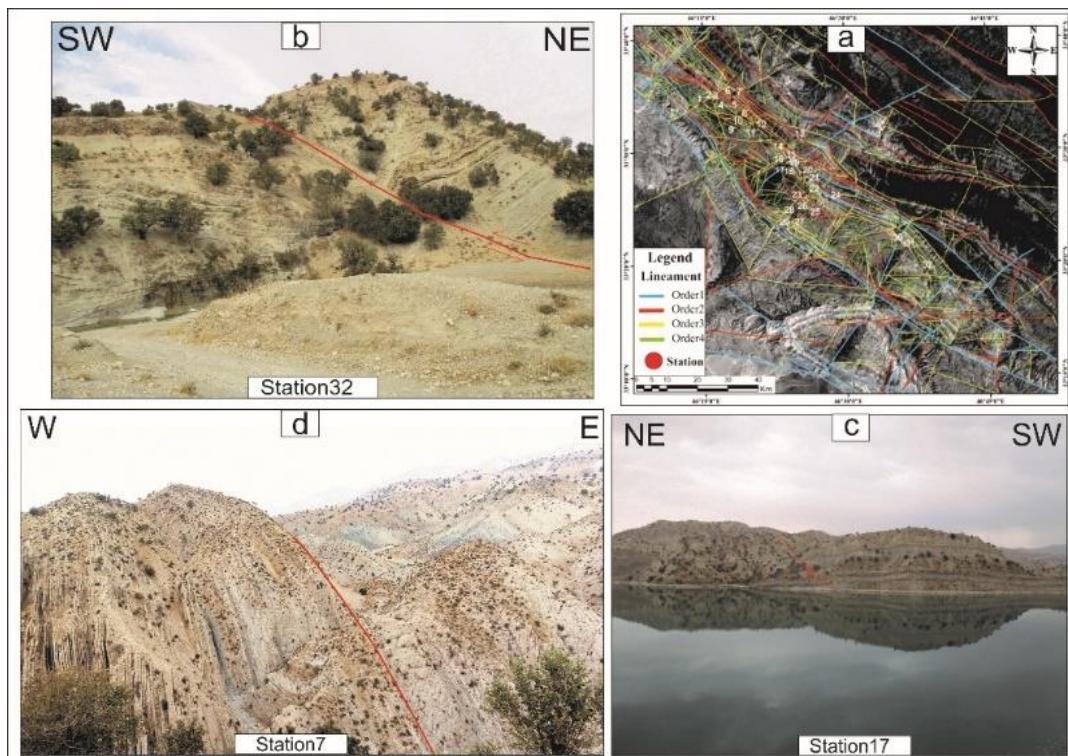
**Fig. 11.** (a) Statistical comparison of the obtained lineaments using visual extraction method, (b) Rose diagram of lineaments obtained by visual extraction methods, automatic extraction, Isobase map and river sinuosity coefficient, (c) Frequency of lineaments from category 1 to category 4, and (d) Map of classified lineaments Anjir anticline district.

پایین به ترتیب کنار هم قرار گرفته‌اند و با کوچک کردن سلول‌ها در پنج مرحله و محاسبه‌ی بعد فراکتال، این فاکتور در پنج

انجیر تحت پوشش این محدوده‌های مربعی می‌باشد. محدوده‌های مربع شکل از قسمت چپ بالا تا قسمت راست

نتیجه توسعه‌ی ریدل‌ها یا انشعابات گسلی بعد فراکتال هم افزایش یافته و بین ۱ تا ۲ تغییر می‌کند (Cello, 1997). با افزایش کرنش و بلوغ ساختاری، بعد فراکتالی به ۲ نزدیک می‌شود. با توجه به این موضوع تکامل شکستگی در محدوده تاقدیس انجیر به سمت بخش غربی تاقدیس می‌باشد، چراکه مقادیر بعد فراکتال در این راستا افزایش می‌یابد. بنابراین در محدوده تاقدیس انجیر یک شبکه گسلی کاملاً بالغ را نمی‌توان تعیین نمود ولی بلوغ ساختاری به سمت نیمه غربی تاقدیس انجیر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر گسل‌های F2 و F3 (مشخص شده در شکل (d۱۴)) می‌توانند عامل اصلی تغییر شکل شکننده و ایجاد شبکه شکستگی‌های ساختاری و توسعه‌ی آنها در محدوده تاقدیس انجیر باشند، که بالا بودن بلوغ ساختاری تحت تاثیر این دو گسل می‌تواند تایید کننده افزایش تراکم و شدت شکستگیها در این بخش باشد.

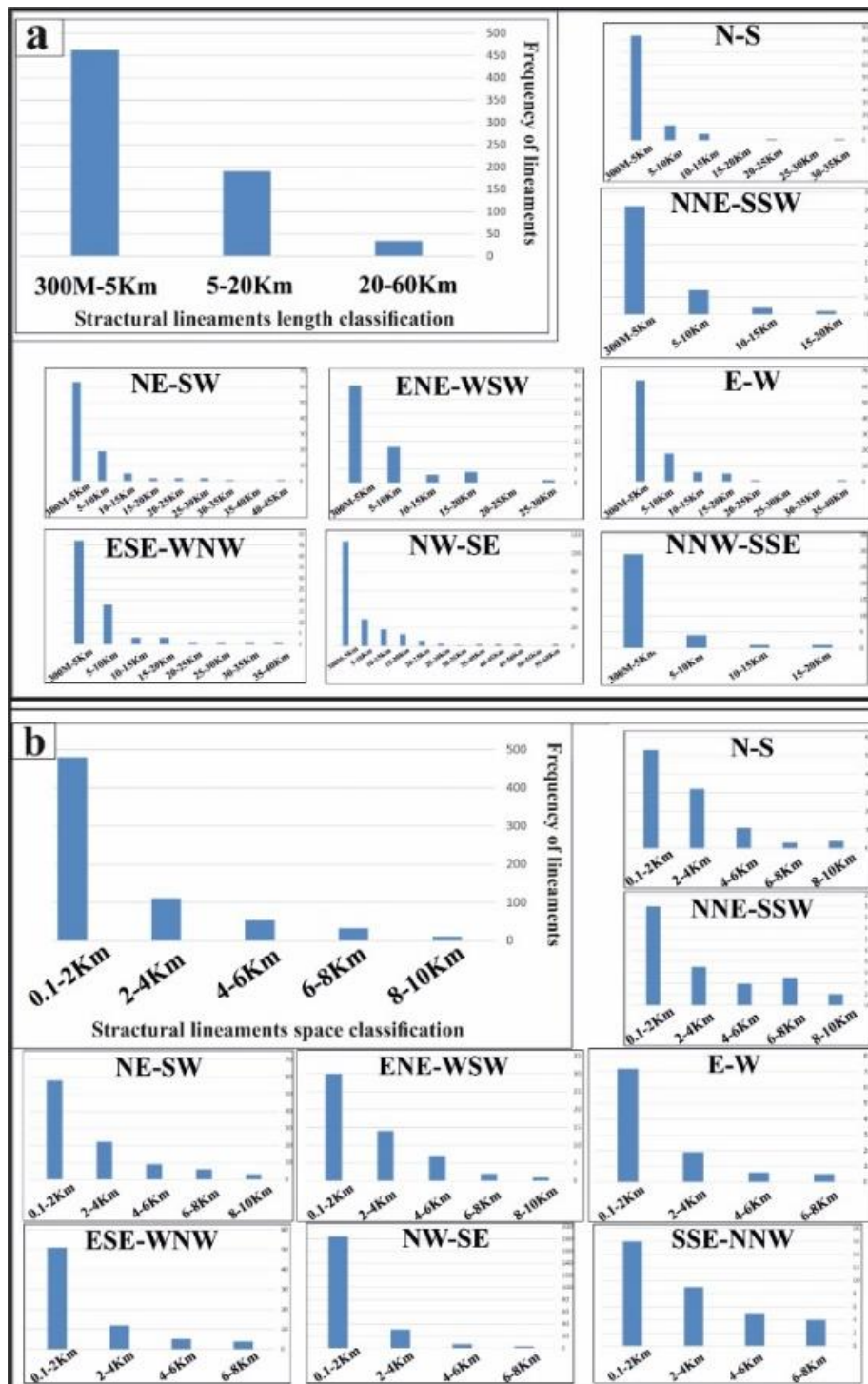
مقیاس مختلف برای خطواره‌های ساختاری محاسبه شد. بدیهی است که در تمامی مقیاس‌ها مساحت کل محدوده ثابت و برابر ۶۴ کیلومتر مربع است. نتایج هر کدام از محاسبات را می‌توان به صورت نموداری ارائه داد که محور افقی آن لگاریتم تعداد سلول‌ها در هر ضلع از شبکه رسم شده و محور قائم لگاریتم تعداد سلول‌های حاوی خطواره در کل شبکه است. هر چه راستای خط گذر کرده از نقاط تلاقی دو محور خطی‌تر باشد گسلها از دید آماری بیشتر خودمشابه هستند، به عبارت دیگر شیب خط نمودار ثابت و بدون تغییر می‌ماند (Hirata, 1989). مقادیر بعد فراکتال در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد. بخش غربی تاقدیس انجیر مقادیر بعد فراکتال بالاتری نسبت به بخش شرقی نشان می‌دهند. میانگین مقادیر بعد فراکتال در محدوده‌ی تاقدیس انجیر ۱/۳۱ تعیین گردید. یک زون گسلی مادامیکه یک گسل منفرد است بعد فراکتالی آن ۱ (خطی) است. با توسعه‌ی زون گسلی و افزایش پهنه‌ی تخریب و در



شکل ۱۲- (a) ایستگاه‌های مورد بررسی در مطالعات زمینی، (b) نمونه خطواره منطبق با گسل رانده در سازند شیلی گورپی (ایستگاه شماره ۳۲)، (c) نمونه خطواره منطبق با گسل رانده در سازند آهکی سروک (ایستگاه شماره ۱۷) و (d) نمونه خطواره حذف شده منطبق بر مرز سازند ایلام در سمت چپ تصویر و سازند گورپی در سمت راست تصویر (ایستگاه شماره ۷)

Fig. 12. (a) Location of stations in the field studies, (b) Sample of a lineament coincident to a reverse fault in the Gurpi shale Formation (Station No.32), (c) Sample of lineament coincident to a reverse fault in Sarvak limestone formation (Station No.17), and (d) Sample of removed lineament coincident to along the border of Ilam Formation on the left side of the image and Gurpi Formation on the right side of the image (Station No.7)





شکل ۱۳- (a) هیستوگرام توزیع طول خطواره‌های ساختاری و (b) هیستوگرام توزیع فاصله خطواره‌های ساختاری.

Fig. 13. (a) Histogram of structural lineaments length distribution, and (b) Histogram of structural lineaments spacing distribution.

خطواره‌ها به کمک استخراج بصری، استخراج اتوماتیک، نقشه خطوط هم‌پایه و استخراج خطواره‌ها به کمک ضریب پیچان رودی نقش بسیار مهمی دارد و بنابراین می‌توان از این تصویر

### ۵- نتیجه‌گیری

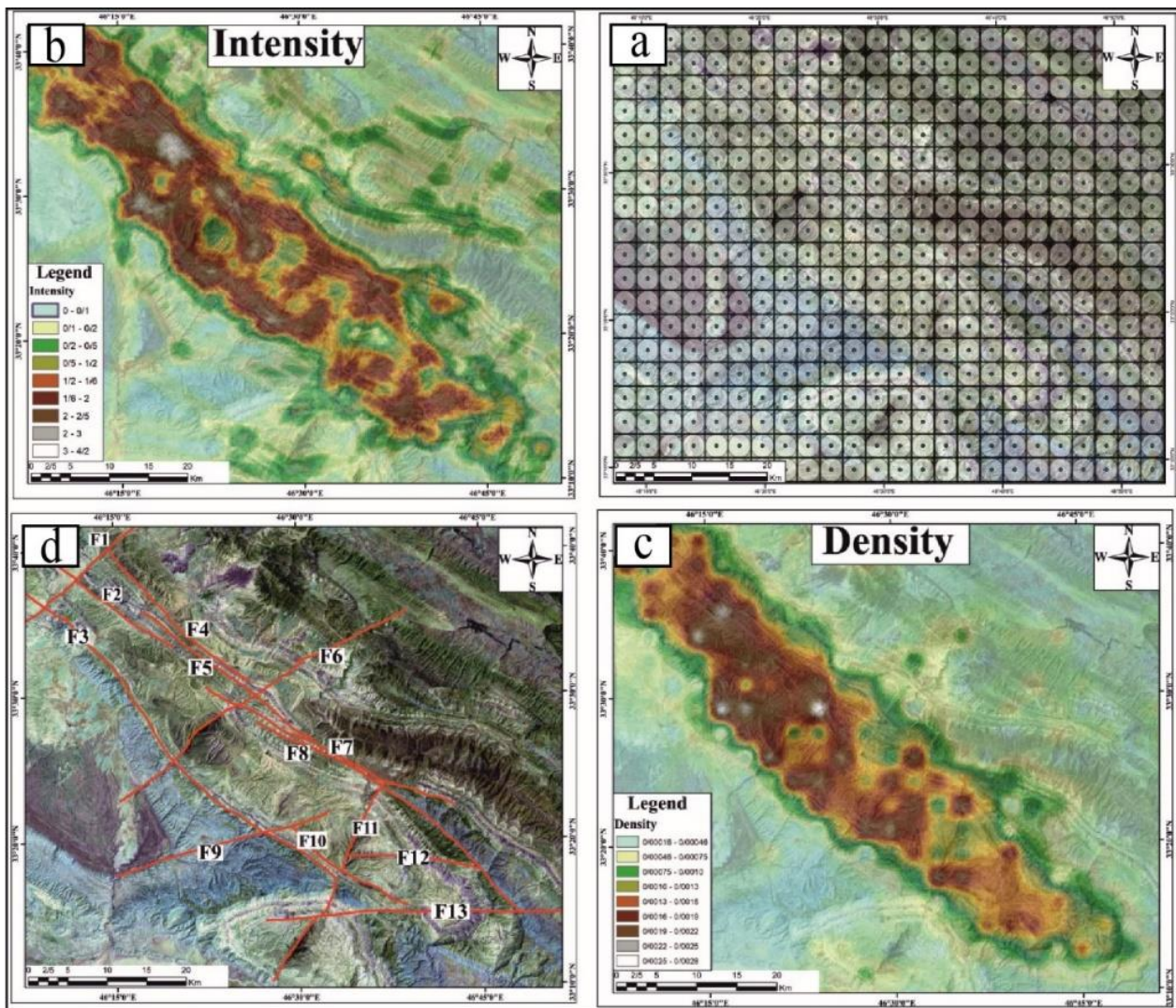
این مطالعه نشان می‌دهد از بین تصاویر ماهواره‌ای به کار رفته در این پژوهش، تصویر رقومی ارتفاعی الوس پالسا در استخراج

ماهواره‌ای در مطالعات زمین‌شناسی ساختاری بیش از پیش بهره‌برد.

با توجه به اینکه مطالعه الگوی پراکندگی و تراکم شکستگی‌ها برای مدل‌سازی استاتیک و یا دینامیکی مخازن هیدروکربوری گروه بنگستان اهمیت ویژه‌ای دارد، در این مطالعه به بررسی الگوی شکستگی‌ها در تصاویر ماهواره‌ای به کمک توصیف آماری از مناطق گسلی پرداخته شد و به کمک مطالعات زمینی خطواره‌هایی که آثاری از شکستگی‌ها نشان

ندادند از مطالعات آماری حذف شدند.

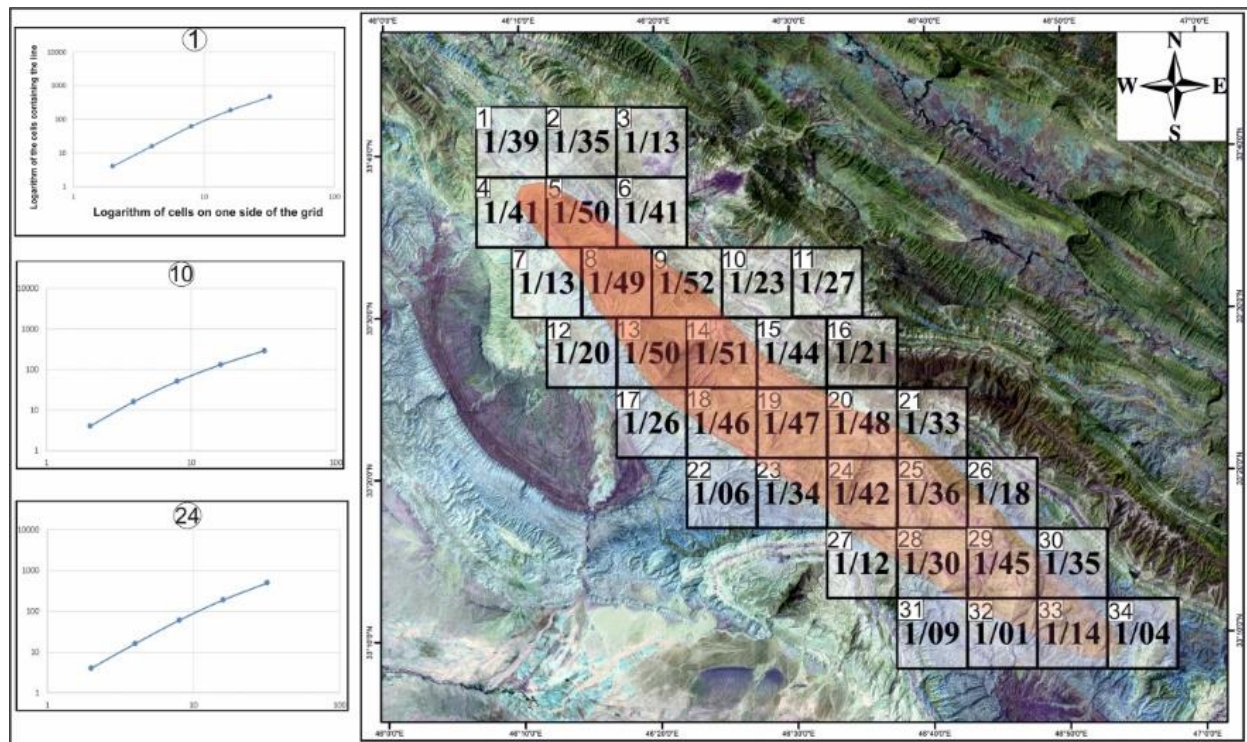
مطالعات آماری بر روی تاق‌دیس انجیر نشان می‌دهد که ابعاد سیستم‌های شکستگی مرتبط با این تاق‌دیس از چند صد متر تا ۶۰ کیلومتر تغییر کرده است. اغلب این شکستگی‌ها در راستای NW-SE جهت‌گیری کرده‌اند و برخی از سیستم‌های شکستگی در راستای NE-SW، E-W و N-S توسعه یافته‌اند. در تاق‌دیس انجیر توزیع سیستم‌های شکستگی در بخش‌های مختلف آن یکسان نیست. بررسی‌های سنجش از دور و مطالعات



شکل ۱۴- (a) شبکه‌بندی محدوده تاق‌دیس انجیر، (b) نقشه تراکم خطواره‌های ساختاری، (c) نقشه تجمع خطواره‌های ساختاری و (d) گسل‌های مؤثر بر افزایش تراکم شکستگی‌ها.

Fig. 14. (a) Network Anjir anticline, (b) Density map of structural lineament, (c) Intensity map of structural lineament, and (d) Faults affecting the increase of fracture density.





شکل ۱۵- مقادیر بعد فراکتال در ۳۴ محدوده انتخابی از محدوده تاقدیس انجیر.

Fig. 15. Fractal dimension's values in 34 selected areas in the Anjir anticline.

بخش‌های مختلف تاقدیس انجیر می‌تواند به عنوان مبنایی برای مدل‌سازی شبکه شکستگی‌ها به منظور مطالعات اکتشاف و استخراج هیدروکربور در مخازن مدفون گروه بنگستان در گستره حوضه لرستان در کمربند کوهزایی زاگرس مورد استفاده قرار گیرد.

#### قدردانی

از آقای دکتر همایون صفایی بدلیل مشاوره و نیز از گروه زمین شناسی و معاونت تحصیلات تکمیلی و فناوری دانشگاه اصفهان بخاطر همراهی شان برای به ثمر رسیدن این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از پیشنهادات داوران محترم این مقاله به‌ویژه آقای دکتر چرچی کمال سپاسگزاری را داریم.

زمینی نشان می‌دهند که الگوی دگرشکلی در بخش شمال غربی تاقدیس در مقایسه با بخش جنوب شرقی آن پیچیده‌تر می‌باشد. بنابراین با توجه به این مطالب بنظر می‌رسد تغییر تراکم و شدت شکستگی‌ها در این تاقدیس تابع جایگاه ساختاری و جنس واحدهای سنگی می‌باشد. این نتایج توسط مطالعات آماری شامل محاسبه فاصله، طول شکستگی‌ها، تراکم و تجمع شکستگی‌های شناسایی شده در محدوده تاقدیس انجیر به دست آمد و همچنین تحلیل فراکتال شکستگی‌ها نیز نشان دهنده بالا بودن بلوغ ساختاری در نیمه غربی در مقایسه با نیمه شرقی این تاقدیس می‌باشد. ویژگی‌های الگوی شکستگی‌ها و نحوه تغییرات آنها در

#### مراجع

- Abdullah, A., Akhir, J.M., Abdullah, I., 2010. Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran–Sungi Lembing area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 15(6), 949-958. <https://doi.org/10.3524/2010/137458>.
- Abdullah, A., Nassr, S., Ghaleb, A., 2013. Remote Sensing and Geographic Information System for Fault Segments Mapping a Study from Taiz Area, Yemen. *Geotechnical and Geological Engineering* 2013, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2013/201757>.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science* 304 (1), 1-20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>.

- Alizadeh, B., Najjari, S., Kadkhodaie-Ilkhchi, A., 2012. Artificial neural network modeling and cluster analysis for organic facies and burial history estimation using well log data: A case study of the South Pars Gas Field, Persian Gulf, Iran. *Computers and Geosciences* 45, 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.024>.
- Blanc, E.P., Allen, M.B., Inger, S., Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. *Journal of the Geological Society* 160 (3), 401-412. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-110>.
- Casas, A.M., Cortes, A.L., Maestro, A., Soriano, M.A., Riaguas, A., Bernal, J., 2000. Lindens: a program for lineament length and density analysis. *Computers and Geosciences* 26(9-10), 1011-1022. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00017-0).
- Carminati, E., Aldega, L., Trippetta, F., Shaban, A., Narimani, H., Sherkaty, S., 2014. Control of folding and faulting on fracturing in the Zagros (Iran): The Kuh-e-Sarbalesh anticline. *Journal of Asian Earth Sciences* 79, 400-414. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.10.018>.
- Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., Blanc, E. Hunt, D.W., 2009. Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros simply folded belt (Iran). *Journal of the Geological Society* 166 (5), 947-959. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-138>.
- Cello, G., 1997. Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology* 19 (7), 945-953. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(97\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(97)00024-2).
- Chernicoff, C.J., Richards, J.P., Zappettini, E.O., 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews* 21 (3-4), 127-155. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00087-2).
- Davis, R.W., Lambert, T.W., Hansen, A.J., 1973. Subsurface geology and ground-water resources of the Jackson Purchase region, Kentucky. US Government Printing Office, p. 66.
- Drury, S.A., 2001. Image interpretation in geology. UK: Nelson Thornes, p. 304.
- Ekneligoda, T.C., Henkel, H., 2006. The spacing calculator software- A Visual Basic program to calculate spatial properties of lineaments. *Computers and geosciences* 32 (4), 542-553. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.08.007>.
- Farzipour-Saein, A., Yassaghi, A., Sherkaty, S., Koyi, H., 2009. Mechanical stratigraphy and folding style of the Lurestan region in the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Journal of the Geological Society, London* 166, 1101-1115. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-162>.
- Gabet, E.J., Burbank, D.W., Pratt-Sitaula, B., Putkonen, J., Bookhagen, B., 2008. Modern erosion rates in the High Himalayas of Nepal. *Earth and Planetary Science Letters* 267 (3-4), 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.059>.
- GÜLCAN, S., 2005. Lineament analysis from satellite images, north-west of Ankara. MSc Thesis. Middle East Technical University.
- Gupta, R.P., 2013. Remote Sensing Geology. Springer Science and Business Media, p. 428.
- Haralick, R.M., Sternberg, S.R., Zhuang, X., 1987. Image analysis using mathematical morphology. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 4, 532-550. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767941>.
- Hessami, K., Koyi, H.A., Talbot, C.J., Tabasi, H., Shabanian, E., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains. *Journal of the Geological Society* 158 (6), 969-981. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-007>.
- Hirata, T., 1989. Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales. *PAGEOPH* 131, 157-170. <https://doi.org/10.1007/BF00874485>
- Holbrook, J., Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics* 305 (1-3), 287-306. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6).
- Hung, L.Q., Batelaan, O., De Smedt, F., 2005, October. Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. In *Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology* (Vol. 5983). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.627699>.

- Javhar, A., Chen, X., Bao, A., Jamshed, A., Yunus, M., Jovid, A., and Latipa, T., 2019. Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir. *Remote Sensing* 11(7), 778. <https://doi.org/10.3390/rs11070778>.
- Jensen, J.R., 2005. Introductory digital image processing, a remote sensing perspective (No. 621.3678 J4/2005).
- Jordan, G., Schott, B., 2005. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment* 94 (1), 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.013>.
- Koike, K., Nagano, S., Ohmi, M., 1995. Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA). *Computers and Geosciences* 21 (9), 1091-1104. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00042-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00042-7).
- Kusák, M., Krbcová, K., 2017. Analysis of the relationship of automatically and manually extracted lineaments from dem and geologically mapped tectonic faults around the main ethiopian rift and the ethiopian highlands, ethiopia. *Auc Geographica* 52 (1), 5-17. <https://doi.org/10.14712/23361980.2017.1>.
- Kusak, M., Kropacek, J., Vilimek, V., Schillaci, C., 2016. Analysis of the influence of tectonics on the evolution of valley networks based on SRTM DEM, Jemma River basin, Ethiopia. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 1, 37-50. <https://doi.org/10.4461/GFDQ>.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. US Government Printing Office, p. 84.
- Llewellyn, P.G., 1974. Ilam-Kuhdasht (20504), Oil Service Company of Iran, 1:250,000.
- Mandelbrot, B., 1976. Fractal geometry of turbulence-The Hausdorff dimension, the dispersion and nature of the singularities of fluid motion. *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus Serie Sciences Mathematiques* 282(2), 119. [https://doi.org/10.1016/0013-738X\(76\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0013-738X(76)90001-1).
- Masoud, A., Koike, K., 2017. Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: lineament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers and Geosciences*, 106, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006>.
- McQuillan, H., 1974. Fracture patterns on Kuh-e Asmari anticline, southwest Iran. *AAPG Bulletin* 58 (2), 236-246. <https://doi.org/10.1306/83D913C1-16C7-11D7-8645000102C1865>.
- Motiei, H., 1995. Iran Petroleum Geology—Geology of the Zagros 1. Publications GSI, Iran, p. 1009.
- Ouchi, S. (1985). Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement. *Geological Society of America Bulletin* 96 (4), 504-515. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96).
- Pireh, A., Alavi, S.A., Ghassemi, M.R., Shaban, A., 2015. Analysis of natural fractures and effect of deformation intensity on fracture density in Garau formation for shale gas development within two anticlines of Zagros fold and thrust belt, Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 125, 162-180. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.11.016>.
- Pirouz, M., Avouac, J.P., Hassanzadeh, J., Kirschvink, J.L., Bahroudi, A., 2017. Early Neogene foreland of the Zagros, implications for the initial closure of the Neo-Tethys and kinematics of crustal shortening. *Earth and Planetary Science Letters* 477, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.046>.
- Pour, A.B., Hashim, M., 2015. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science* 9 (2), 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>.
- Rowland, J.V., Sibson, R.H., 2004. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geofluids* 4 (4), 259-283. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00091>.
- Sabins, F.F., 1996. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. 3rd Edition, W.H. Freeman and Company, New York, 494 p.
- Sarp, H., Černý, R., 2005. Yazganite, NaFe<sup>3+</sup><sub>2</sub> (Mg, Mn) (AsO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O, a new mineral: its description and crystal structure. *European Journal of Mineralogy* 17 (2), 367-374. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2005/0017-0367>.
- Soliman, A., Han, L., 2019. Effects of vertical accuracy of digital elevation model (DEM) data on automatic lineaments extraction from shaded DEM. *Advances in Space Research* 64 (3), 603-622. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.009>.

- Solomon, S., Ghebreab, W., 2006. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea. *Journal of African Earth Sciences* 46 (4), 371-378. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.06.007>.
- Soto-Pinto, C., Arellano-Baeza, A., Sánchez, G., 2013. A new code for automatic detection and analysis of the lineament patterns for geophysical and geological purposes (ADALGEO). *Computers and geosciences* 57, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.03.019>.
- Tavani, S., Storti, F., Soleimany, B., Fallah, M., Munoz, J.A., Gambini, R., 2011. Geometry, kinematics and fracture pattern of the Bangestan anticline, Zagros, SW Iran. *Geological Magazine* 148 (5-6), 964-979. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000197>.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge university press, p. 398 <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695>.
- Warner, E.M., Coalson, E.B., Osmond, J.C., and Williams, E.T., 1997. Geology of Jonah field, a major gas accumulation in the upper Cretaceous Lance Formation, Sublette County, Wyoming. *Innovative applications of petroleum technology in the Rocky Mountain area: Rocky Mountain Association of Geologists* 1-12. <https://doi.org/80.2480046/480046>.
- Xypolias, P., Koukouvelas, I.K., 2004. Fault trace parameters as a tool for analysing remotely sensed fault arrays: an example from the eastern Gulf of Corinth, Greece. *International Journal of Remote Sensing* 25 (21), 4685-4699. <https://doi.org/10.1080/0143116042000192349>.