

Research Article

## Study of the relationship between fracture geometry and vein-style mineralization using paleostress analysis in the Garijgan shear zone, eastern Iran

Hadi Alinia<sup>1\*</sup>, Mohammad Mahdi Khatib<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Zarrinkoub<sup>1</sup>

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand

**Keywords:** *Garijgan, Paleostress, Fracture density, Eastern Iran, Remote sensing.*

### 1-Introduction

The Garijgan mining area is located about 25 km south of Khouf in South Khorasan province. Regarding tectonic-sedimentary divisions (Alavi, 1991), this area is located in the eastern part of the Lut block. The Nehbandan strike-slip fault system in the east of the Lut zone and the Naiband strike-slip fault in the west of the Lut zone are the most prominent tectonic mechanisms in eastern Iran. The activity of these dextral strike-slip faults and sub-branches has been shown in the form of numerous regional shear zones. It seems that these shear zones caused this area's metallic and non-metallic mineral deposits to mostly have a vein style (; Khatib, 1998; Khatib and Zarrinkoub, 2012). One of these shear zones is a small non-parallel Garijgan shear zone. In this paper, we have examined paleo-stress data. Also, we have studied fracture densities concerning mineralization.

### 2-Material and methods

At first, in order to prepare a map of fractures, Landsat 8 data with a spatial resolution of 14.25 meters (combined data with band 8) and Aster data with a spatial resolution of 15 meters were used because it is known that satellite images can be used for depicting lineaments (such as fractures) (Gholamzadeh et al., 2021). In the next step, for a detailed examination of the structural controls, the studied area was placed in a 19-cell grid (the size of each cell is 1000 meters by 1000 meters, equivalent to 1 square kilometer), and the structural elements for each grid were examined. Also, parameters such as stria on the fault surface, displacement of rock units relative to each other, and processing of satellite images were used to determine the faults' motion mechanism. Then, the structural map of the faults and the outcrops of veins in the area was prepared, and the rose diagram of fractures and mineralization veins was drawn. Finally, using Win Tensor software, the maximum stress direction ( $1\sigma$ ) was obtained for each network, and the focal mechanism resulting from the kinematics of the faults in each station was displayed on the structural map.

### 3-discussions

Band composition of the main components of Aster satellite data revealed the lineaments in the region. In the next step, to examine the exact position of the structural controls, the studied area was placed in a 19-cell grid, and the structural elements of each grid were taken, and the rose diagram of linear structures (faults and mineralized veins) was drawn. As can be seen, most of the mineralization veins are concentrated along the fractures in the northwest-southeast direction (Fig. 1). Based on the rose diagrams and the histogram of the lineaments, the fractures of this area can be divided into three groups: a) Faults with a northwest-southeast trend, and their mechanism is right-lateral, strike-slip with a reverse component. These faults are more abundant in the region, and the mineralization veins are concentrated along them. b) Faults with a northeast-southwest trend and a left-lateral strike-slip mechanism. No mineralization was observed

\* Corresponding author: alinia\_hadi@yahoo.com

along these faults. c) Several faults have an almost east-west trend. These faults are secondary (third order), and their mechanism is a left-lateral strike slip with a reverse component. Mineralization is not observed along these faults.

Based on the results of the rose diagram, the dip direction distribution, and the histogram of jasperoid veins, it can be stated that the dominant trend of the veins is in the northwest-southeast direction. Mineralization has occurred along the faults. Moreover, the dip of the veins follows the dip of the fault. As a result, the average dip of the veins in the eastern border is 65 degrees towards the northeast, and in the western border, it is 71 degrees towards the southwest. In cell networks I, H, O, and R, the dip direction distribution of veins is almost radial, which can be related to the presence of intrusive bodies in-depth because there are many cases in which the presence of intrusive bodies caused fractures, especially radial types, to develop (Stevenson et al., 2008).

According to the fault structures examined in the Cenozoic (Eocene) and Quaternary time units, it can be seen that there were at least two stress phases in the study area. In the time units of the Eocene, the first stage in the northeast-southwest direction is a strike-slip with the position of the main stress axes,  $\sigma_1 = 058.04$ ,  $\sigma_2 = 174.80$ ,  $\sigma_3 = 327.9$  that indicates the predominance of compressive stress in these units. The second stage of stress in the Quaternary time units in the approximate north-south direction is strike-slip and thrust with the position of the main stress axes,  $\sigma_1 = 003.05$ ,  $\sigma_2 = 207.85$ , and  $\sigma_3 = 093.02$ . This research shows that the axis of maximum stress ( $\sigma_1$ ) in the studied area, from the Eocene to the Quaternary, has rotated about 55 degrees counterclockwise (Fig. 1). Similar results have been obtained by Jentzer et al. (2017). They analyzed the ancient stress field in the northern part of the Sistan orogenic belt in eastern Iran and concluded that in less than 10 million years, the compression direction ( $\sigma_1$ ) had undergone a rotation of approximately 65 degrees counterclockwise.

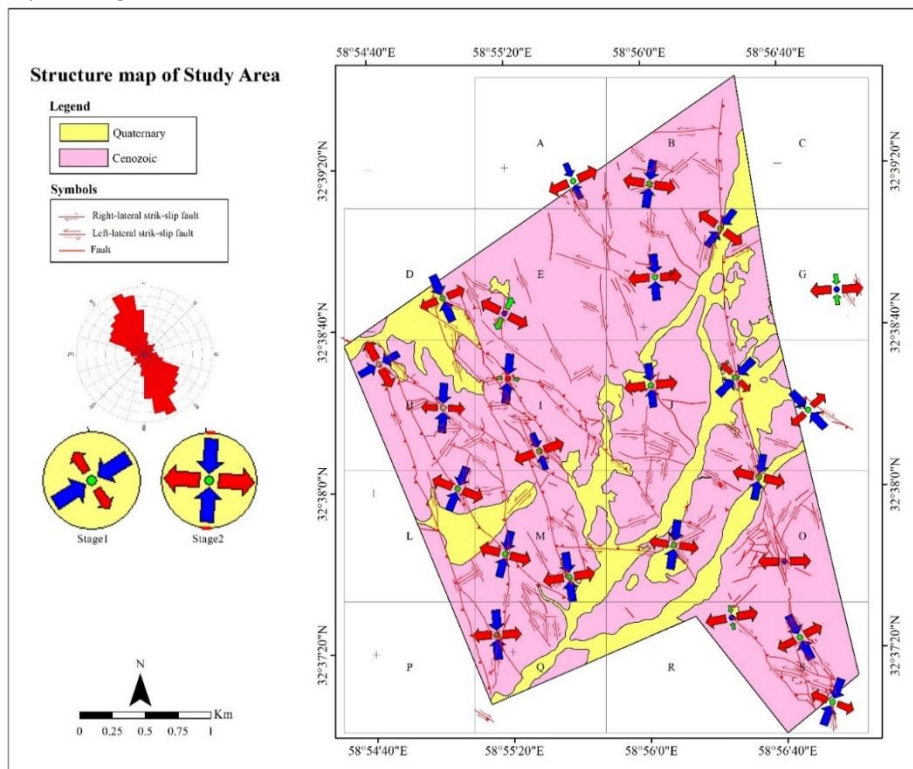


Fig. 1. Structural map of the study area along with the position of the stress axes in the measured stations.

#### 4-Conclusion

The Garijgan region is a classic non-parallel shear zone between two faults with a dominant strike-slip component. The fault located on the eastern border has an average dip of 65 degrees to the northeast, and the fault located on the western border has an average dip of 71 degrees to the southwest. According to the data obtained from the study of satellite images and the preparation of the fracture distribution map and

based on the rose diagrams and the histogram of the regional lineaments, it can be concluded that the mineralization occurred mainly in the fractures with the northwest-southeast trend. These mineralization veins in the eastern part have an average dip of 65 degrees towards the northeast, and in the western part, they have an average dip of 71 degrees towards the southwest. On the other hand, the preparation of the fault density map using the Hardcastle method also shows that the highest density of fractures occurred in the northwest-southeast direction, which is the same direction as the mineralization veins that confirms that the mineralization in the Garijgan area is controlled by structures (fractures). In addition, in cell networks, I, H, O, and R, the direction of the distribution of the vein dips is almost radial, which can be justified by the presence of intrusive bodies in depth. Of course, confirmation of this issue requires more studies, primarily geophysical investigations.

The study of paleo stress patterns indicates the occurrence of at least two phases of right-lateral shear-compressive stress with azimuth N03 and N58. The first stage occurred in the Eocene time in the approximate northeast-southwest direction in the form of strike-slip, and the second stage occurred in the Quaternary time in the approximate north-south direction in the form of strike-slip and thrusting. In addition, these faults have rotated about 55 degrees counterclockwise due to the stresses affecting the region until the Quaternary period. This rotation has opened most of the pore spaces and caused the mineralized veins to fit in their current direction (northwest-southeast).

## References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103, 983- 992. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- Gholamzadeh, M., Rahimi, B., Ghaemim, F. and Ahmadi Rouhani, R., 2015. Investigation of fault and fractures Akhلامad (north west Binalud) based on the satellite data processing and studying fractal characteristics of fracture systems. *Tectonics* 1(2), 77-92. <https://doi.org/10.22077/jt.2015.286>.
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, Ph., Omrani, J., Khatib, M.M. and Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics* 36 (2), 287-303. <https://doi.org/10.1002/2016TC004275>.
- Khatib, M.M. and Zarrinkoub, M.H., 2012. Structural controls in the formation of vein- style mines of eastern Iran. The 4<sup>th</sup> symposium of Economic Geology, University of Birjand, Birjand.
- Khatib, M.M., 1998. Terminal geometry of strike-slip faults with a special reference to the faults of eastern Iran. PhD thesis, Shahid Beheshti University, p. 224.
- Stevenson, C.T.E., O'Driscoll, B., Holohan, E.P., Couchmani, R., Reavy, R.J. and Andrews, G.D.M., 2008. The structure, fabrics and AMS of the Slieve Gullion ring-complex, Northern Ireland: testing the ring-dyke emplacement model. In: Thomson, K. and Petford, N. (Eds) *Structure and Emplacement of High-Level Magmatic Systems*. Geological Society of London Special Publications, London 302, 159–184. <https://doi.org/10.1144/SP302.12>.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Alinia, H., Khatib, M., Zarrinkoub, M.H., 2023. Studying the relationship between fracture geometry and vein- style mineralization using paleostress analysis in the Garijgan shear zone, eastern Iran. *Adv. Appl. Geol.* 13(2), 624-640.

DOI : 10.22055/AAG.2022.41920.2320

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_18255.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18255.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

## بررسی ارتباط هندسه شکستگی‌ها با کانی‌سازی رگه‌ای با استفاده از تحلیل تنش دیرین در پهنه بُرشی گاریجگان، شرق ایران

هادی علی نیا\*

دانشجوی دکترا، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمد مهدی خطیب

استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمد حسین زرین کوب

استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

alinia\_hadi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

### چکیده

محدوده گاریجگان در ۲۵ کیلومتری جنوب خوسف در استان خراسان جنوبی، در بین دو گسل امتدادلغز قرار گرفته است و در واقع یک پهنه بُرشی ناموازی کلاسیک کوچک به شمار می‌رود. مرز شرقی این پهنه را گسل امتدادلغز راست‌بُر با مؤلفه شیبی معکوس با شیب میانگین ۶۵ درجه به سوی شمال شرق و مرز غربی آن را گسل امتدادلغز راست‌بُر با مؤلفه شیبی معکوس با شیب میانگین ۷۱ درجه به سوی جنوب غرب تشکیل می‌دهد. تحلیل تنش دیرین در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد که اولین عملکرد رژیم تنش در زمان ائوسن، به صورت امتدادلغز با محور بیشینه  $\sigma_1=058.04$  رخ داده است و دومین مرحله تنش در زمان کواترنری، به صورت امتدادلغز و ترافشارشی با محور بیشینه  $\sigma_1=003.05$  انجام شده است. لذا محور تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) از ائوسن تا کواترنری در حدود ۵۵ درجه خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخیده است. با بررسی تصویرهای ماهواره‌ای و تهیه نقشه توزیع شکستگی‌ها و رسم نمودار گل‌سرخ و هیستوگرام شکستگی‌ها، می‌توان آنها را در سه دسته با راستای NW-SE، NE-SW و E-W قرار داد. گسل‌های دسته اول فراوانی بیشتری دارند و آثار کانی‌سازی رگه‌ای در آنها مشاهده می‌گردد اما دو گروه دیگر فاقد کانی‌سازی هستند. گسل‌های اصلی پهنه بُرشی (Y) و گسل‌های مزدوجی که زاویه کمتری با پهنه بُرشی دارند (R, P)، مجراهای مناسبی برای بالا آمدن سیالات هیدروترمالی کانه‌دار غنی از سیلیس فراهم کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شرق ایران، سنجش از دور، تنش دیرین، تراکم شکستگی، گاریجگان

### ۱- مقدمه

( Ansari Jafari et al., 2015; Mohebi et al., 2015; Wilson et al., 2016; Sun et al., 2018; Chauvet, 2019; Blenkinsop et al., 2020; Gholizadeh et al., 2021). علاوه بر این، مطالعه عوامل ساختاری اصلی کنترل‌کننده کانی‌سازی در یک منطقه، می‌تواند به تعیین اهداف اکتشافی و کشف کانسارها کمک کند ( Weinberg et al., 2004; Liu et al., 2010; Qin and Liu, 2018). یکی از متداول‌ترین الگوهای دگرشکلی ناهمگن، تمرکز دگرشکلی در پهنه‌های صفحه‌ای است که با حرکت پهنه‌های نسبتاً سخت سنگ دیواره همراه است. دگرشکلی در این پهنه‌های دارای کرنش زیاد، معمولاً یک مؤلفه چرخشی دارد

امروزه کاملاً مشخص شده است که چهار فرایند زمین‌شناسی وابسته به یکدیگر، در تشکیل کانسارها به‌ویژه انواع گرمابی، دخالت دارند: فرایندهای ساختاری (دگرشکلی و تشکیل ساختارهای مناسب)، فرایندهای هیدرولوژیکی (جریان سیال)، فرایندهای حرارتی (گرادیان زمین‌گرمایی)، و فرایندهای ژئوشیمیایی (انحلال و ته‌نشست کانه‌ها) (Zhang et al., 2011). از میان این فرایندها، ساختارهای زمین‌شناسی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تشکیل کانسارها، به‌ویژه کانسارهای گرمابی، در نظر گرفته می‌شوند

غرب توسط گسل نایبند جدا می‌شود. مرز جنوبی پهنه لوت، با کمپلکس آتشفشانی بزمان و فرونشست جازموریان مشخص می‌شود (Karimpour et al., 2011). به این ترتیب، دو سیستم گسلی امتدادلغز نهبندان در شرق پهنه لوت و گسل امتدادلغز نایبند در غرب پهنه لوت، بارزترین سازوکار تکتونیکی شرق ایران به‌شمار می‌روند. فعالیت این گسل‌های امتدادلغز راستگرد همراه با شاخه‌های فرعی آنها، در قالب پهنه‌های بُرشی متعدد در منطقه نمایان شده است. پهنه زمین‌درز سیستان، در شرق پهنه لوت قرار گرفته است و با راستای کلی شمال-جنوب، در واقع پهنه‌ای برخوردار به شمار می‌رود که حاصل بسته شدن باریکه اقیانوس سیستان در بین پهنه لوت و پهنه افغان در انتهای مزوزوئیک-ابتدای سنوزوئیک است (Tirrul et al., 1983). سامانه گسلی نهبندان که در کلّ ایالت ساختاری زمین‌درز سیستان گسترش دارد، در بخش شمالی با تغییر جهت به طرف غرب به صورت تداخلی وارد پهنه لوت می‌شود (Khatib, 1998).

در پهنه‌های بُرشی امتدادلغز، پنج دسته شکستگی  $P$ ،  $R$ ،  $Y$  و  $T$  (شکستگی‌های کششی) توسعه می‌یابند (Fossen, 2016). شکستگی‌های کششی  $T$  عمود بر محور کشش حداکثر، تشکیل شده و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت بُرش قرار می‌گیرند. عملکرد پهنه‌های بُرشی واقع در بین گسل نهبندان و نایبند، به صورت ساختارهای مختلف (از جمله شکستگی‌های ریدل) نمایان شده است و کانی‌سازی‌های متعددی در ارتباط با این پهنه‌های بُرشی تشکیل شده‌اند. برای مثال، در پهنه‌های بُرشی وابسته به پهنه گسلی نهبندان، ذخایر معدنی فراوانی بر جای گذاشته شده است که از هندسه گسل تبعیت می‌کنند (Khatib, 1998).

بیشترین گسترش واحدهای سنگی در منطقه، مربوط به پیروکسن آندزیت‌ها و سنگ‌های آذرآواری (غالباً توف) به سن ائوسن است. این سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری، میزبان مناسبی برای کانی‌زایی رگه‌ای در این پهنه بُرشی فراهم کرده‌اند (شکل ۲).

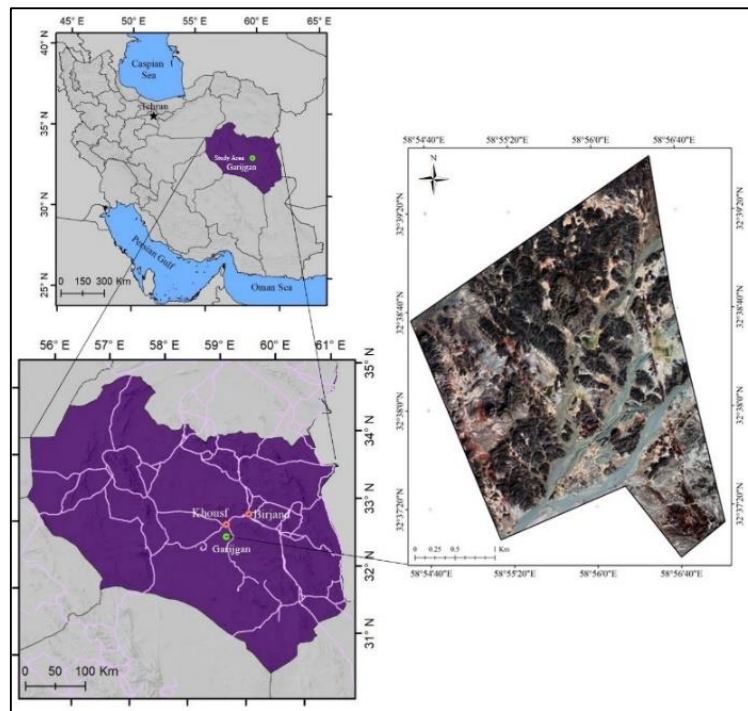
که بازتابی از جابه‌جایی قطعات سنگ دیواره نسبت به یکدیگر است؛ این پهنه‌های دارای کرنش زیاد، «پهنه‌های بُرشی» نامیده می‌شوند (Passchier and Trouw, 2005). دگرشکلی در یک پهنه بُرشی باعث ایجاد فابریک‌ها و مجموعه کانی‌های شاخصی می‌شود که بیانگر شرایط فشار-دما، نوع جریان، نوع حرکت و سرگذشت دگرشکلی در پهنه بُرشی است. بنابراین پهنه‌های بُرشی، منبع مهمی از اطلاعات زمین‌شناسی به‌شمار می‌روند.

یکی از مناطق دارای پهنه‌های بُرشی متعدد، منطقه واقع در بین دو سیستم گسلی امتدادلغز نهبندان در شرق پهنه لوت و گسل امتدادلغز نایبند در غرب پهنه لوت است. حضور پهنه‌های بُرشی، فضاهای مناسبی برای ته‌نشست مواد معدنی ایجاد می‌کند (Fabricio-Silva et al., 2018; Haddad - Martim et al., 2018; Kavyani-Sadr et al., 2022). به‌نظر می‌رسد وجود این پهنه‌های بُرشی باعث شده است که ذخایر معدنی فلزی و غیر فلزی در این گستره اکثراً دارای ساختار رگه‌ای باشند (Khatib and Zarrinkoub, 2012). منطقه معدنی گاریجگان یکی از این پهنه‌های بُرشی ناموازی کلاسیک در پهنه لوت به‌شمار می‌رود که کانی‌سازی مس و طلا در امتداد برخی از گسل‌های آن رخ داده است. در این پژوهش، پس از بارزسازی ساختارهای شکنا به کمک تصویرهای ماهواره‌ای و برداشت‌های صحرایی، با استفاده از نرم‌افزار وین تنسور تغییرات الگوی تنش در واحدهای زمانی مختلف در گستره مورد مطالعه بررسی شده است.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

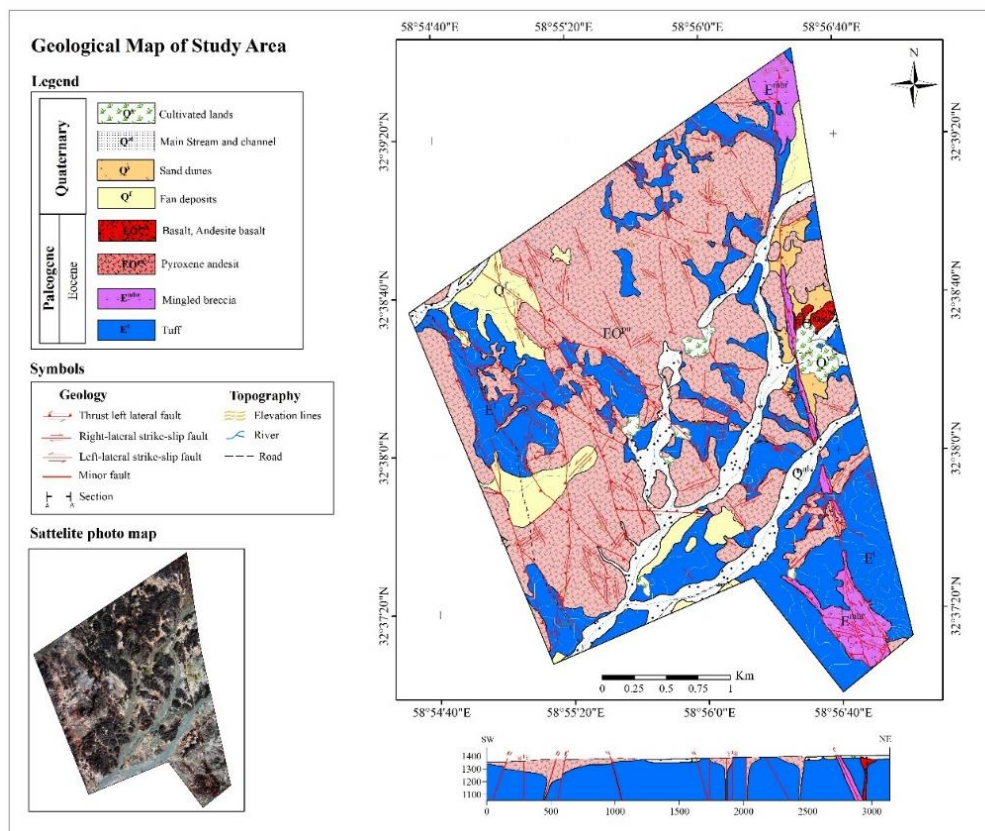
محدوده معدنی گاریجگان در حدود ۲۵ کیلومتری جنوب خوسف در استان خراسان جنوبی و بین عرض‌های جغرافیایی ۳۷ ۰۰ تا ۳۹ ۵۰ شمالی و بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ ۳۰ تا ۵۸ ۲۰ شرقی، در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی خوسف قرار گرفته است (شکل ۱). این محدوده معدنی از نظر تقسیم‌بندی‌های زمین‌ساختی-رسوبی (Alavi, 1991)، در بخش شرقی پهنه لوت قرار می‌گیرد. این پهنه از سمت شمال توسط گسل درونه، از سمت شرق توسط پهنه زمین‌درز سیستان و گسل نهبندان و از سمت





شکل ۱- موقعیت جغرافیایی گستره مورد مطالعه.

Fig. 1. Location of the study area..



شکل ۲- نقشه زمین شناسی- معدنی گستره مورد مطالعه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰.  
Fig. 2. Geological- mineral map of the study area (scale: 1:25000).

### ۳- روش مطالعه

امروزه برای انجام مطالعات آماری شکستگی‌ها، تنها به یافته‌ها و برداشت‌های صحرایی اکتفا نمی‌شود و برای رسم نقشه پایه پراکندگی شکستگی‌ها، از فنون دیگری از جمله سنجش از دور و پردازش داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌گردد (Ahmadi and Pekkan, 2021; Rouhani, 2011; Gholamzadeh et al, 2015). منطقه گاریجگان با توجه به گسله بودن، وضوح بالای ساختارهای شکننا در تصویرهای ماهواره‌ای، پوشیده نشدن توسط آبرفت‌ها در گستره بسیار زیاد و همچنین پتانسیل معدنی مناسب (کانه‌زایی فلزی)، مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا به منظور تهیه نقشه شکستگی‌ها، به ترتیب از داده‌های لندست ۸ با تفکیک مکانی ۱۴/۲۵ متر (داده تلفیقی با باند ۸) و داده‌های آستر با تفکیک مکانی ۱۵ متر استفاده گردید و پس از پردازش مناسب، تعبیر و تفسیر بر روی آنها انجام شد. در مرحله بعد، برای بررسی دقیق کنترل‌کننده‌های ساختاری، منطقه مورد مطالعه در یک شبکه ۱۹ سلولی (اندازه هر سلول ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر؛ معادل ۱ کیلومترمربع) قرار داده شد و عوارض ساختاری هر شبکه برداشت گردید. از آنجا که سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌ساختی فعال، دگرسانی و عوامل فرسایش قرار گرفته‌اند، سازوکار حرکتی برخی از گسل‌ها با اطمینان قابل تشخیص و اندازه‌گیری نیست. به هر حال، به منظور تشخیص سازوکار حرکتی گسل‌ها از پارامترهایی چون آثار لغزش روی سطح گسل، جابه‌جایی واحدها نسبت به یکدیگر و پردازش تصویرهای ماهواره‌ای بهره گرفته شد. پس از پایان عملیات صحرایی، نقشه ساختاری گسل‌ها به همراه رخنمون رگه‌های موجود در منطقه تهیه و دیاگرام گل سرخی شکستگی‌ها و رگه‌های کانی‌سازی ترسیم گردید. در نهایت با استفاده از نرم افزار وین تنسور، راستای تنش بیشینه (S1) برای هر شبکه بدست آمد و سازوکار کانونی حاصل از کینماتیک گسل‌ها در هر ایستگاه برداشت شده، بر روی نقشه ساختاری نمایش داده شد (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

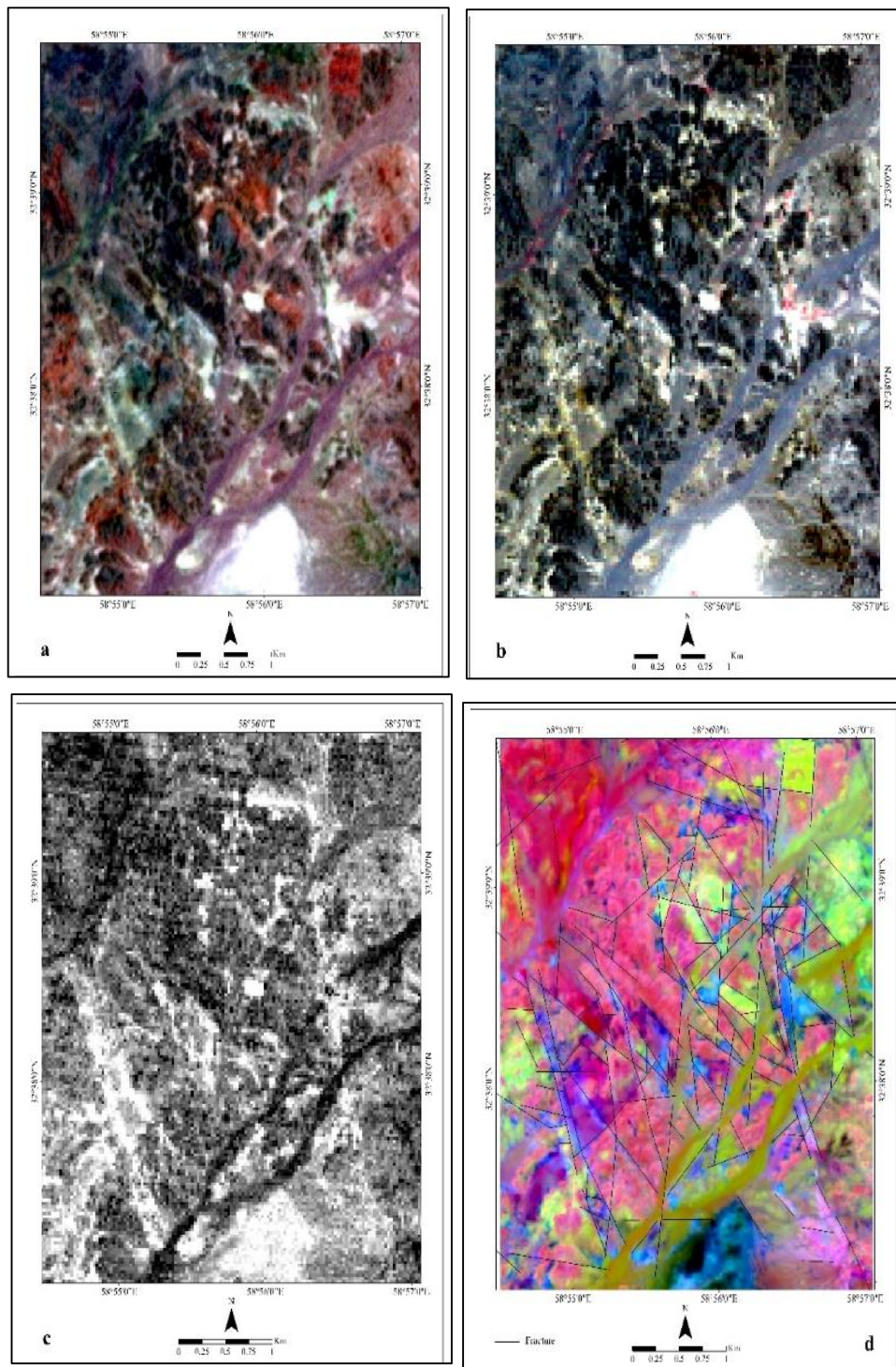
### ۴- بحث و تحلیل

در پردازش داده‌های لندست، از ترکیب باندهای ۲، ۴، ۷ که بهترین خروجی شاخص OIF را جهت تفکیک واحدها و شکستگی منطقه در برداشت، استفاده شد (شکل a۳). از آنجا که داده‌های

لندست با وجود تفکیک نسبتاً خوب واحدها، قادر به جداسازی برخی واحدها و تفکیک کامل نمی‌باشد، سعی شد تا با استفاده از داده‌های آستر علاوه بر ترکیب باندی و انجام مطالعات جزئی‌تر و موضوعی (شکل b۳)، دگرسانی‌های احتمالی محدوده که می‌توانند در ارتباط با برخی شکستگی‌ها باشند، تفکیک شود (شکل c۳). همچنین از پردازش کشیدگی غیرهمبسته بر مبنای تبدیل مؤلفه‌های اصلی، از ترکیب باندی pc1 و pc2 و pc3 در بارزسازی عناصر ساختاری گستره مورد مطالعه کمک گرفته شد (شکل d۳).

پس از بارز شدن خطواره‌ها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای، در مرحله بعد برای بررسی موقعیت دقیق کنترل‌کننده‌های ساختاری، منطقه مورد مطالعه در یک شبکه ۱۹ سلولی قرار داده شد و عوارض ساختاری هر شبکه برداشت و دیاگرام گل سرخی ساختارهای خطی (گسل‌ها و رگه‌های کانی‌سازی) ترسیم گردید (شکل ۴). همانطور که مشاهده می‌شود غالب رگه‌های کانی‌سازی، در امتداد شکستگی‌های دارای راستای شمال غرب- جنوب شرق متمرکز شده‌اند.

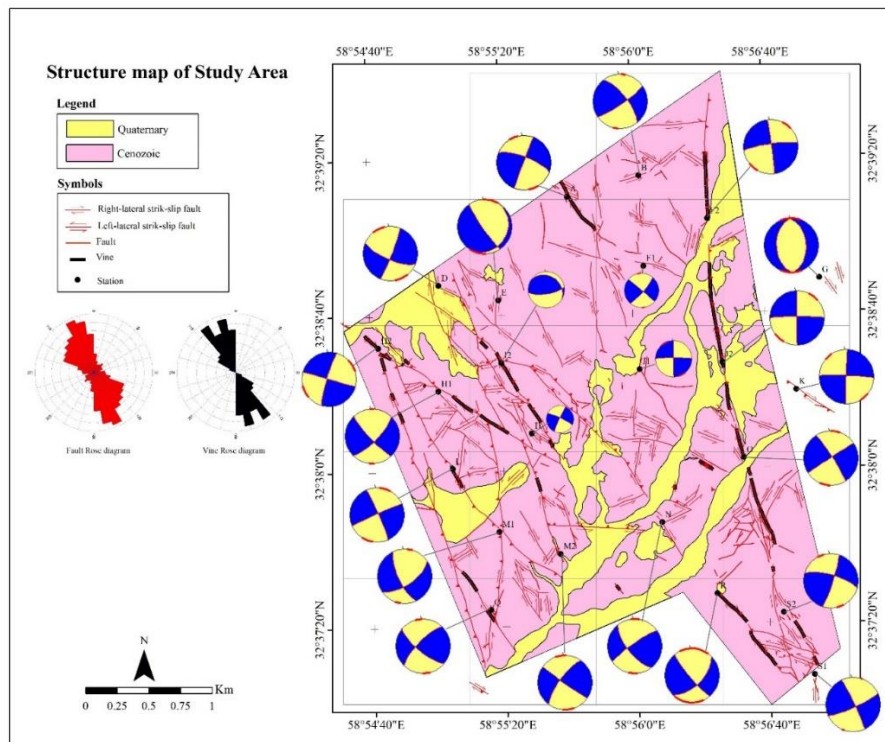
مرز شرقی پهنه برشی گاریجگان را گسل امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه شیبی معکوس با شیب میانگین ۶۵ درجه به سوی شمال شرق و مرز غربی آن را گسل امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه شیبی معکوس با شیب میانگین ۷۱ درجه به سوی جنوب غرب تشکیل داده است (شکل ۵). براساس دیاگرام گل سرخی و هیستوگرام خطواره‌های منطقه (شکل ۶)، شکستگی‌ها این پهنه را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: الف) گسل‌هایی که دارای روند شمال غرب- جنوب شرق بوده و سازوکار آن‌ها امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه معکوس است. این دسته از گسل‌ها در منطقه فراوانی بیشتری دارند و رگه‌های کانی‌سازی در امتداد آنها متمرکز شده‌اند (شکل a۷). ب) گسل‌هایی که دارای روند شمال شرق- جنوب غرب بوده و دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌بر هستند. در امتداد این گسل‌ها، کانی‌سازی مشاهده نگردید (شکل b۷). ج) تعدادی از گسل‌ها دارای روند تقریباً شرقی- غربی هستند. این گسل‌ها در واقع فرعی (مرتبه سوم) هستند و سازوکار آنها امتدادلغز چپ‌بر با مؤلفه معکوس می‌باشد. در راستای این گسل‌ها کانی‌سازی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۳- (a) ترکیب باندهای ۷ و ۴ و ۲ تصاویر ماهواره‌ای لندست به منظور تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی و شکستگی‌ها، (b) ترکیب باندهای ۳ و ۲ و ۱ تصاویر ماهواره‌ای استر به منظور نشان دادن آلتراسیون اکسید آهن در امتداد شکستگی‌ها، و (d) ترکیب باندهای مؤلفه‌های اصلی داده‌های ماهواره‌ای استر به منظور بارزسازی خطواره‌ها.

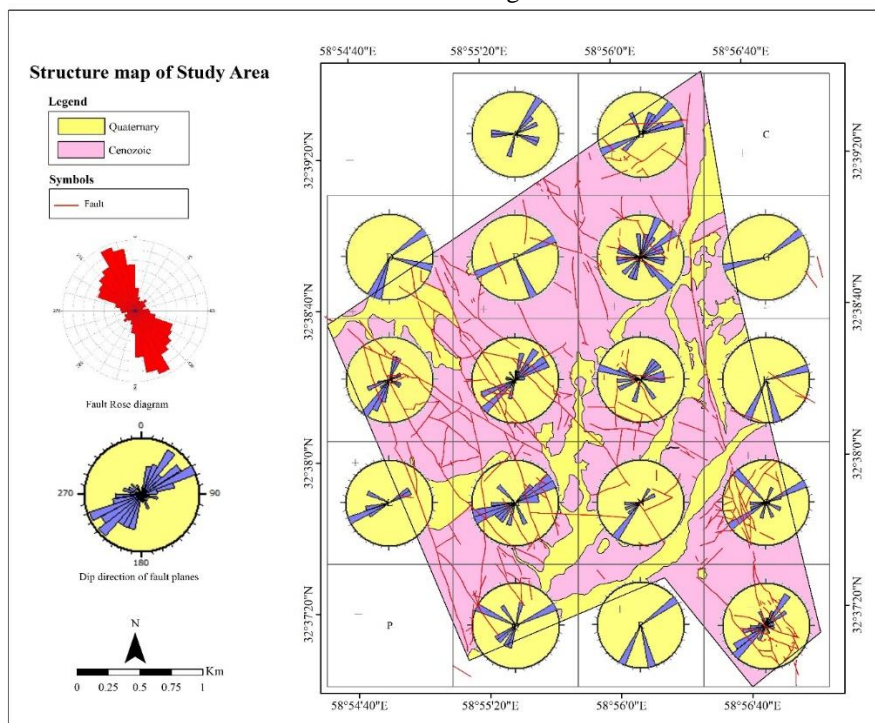
Fig. 3. (a) Combination of 7, 4, 2 bands of Landsat satellite image in order to separate lithological units and fractures, (b) Combination of 3, 2, 1 bands of Aster satellite image in order to separate lithological units and fractures, (c) 2/1 band ratio of Aster satellite image to show iron oxide alteration along fractures, and (d) Band composition of the main components of Aster satellite data in order to enhance the lineaments.





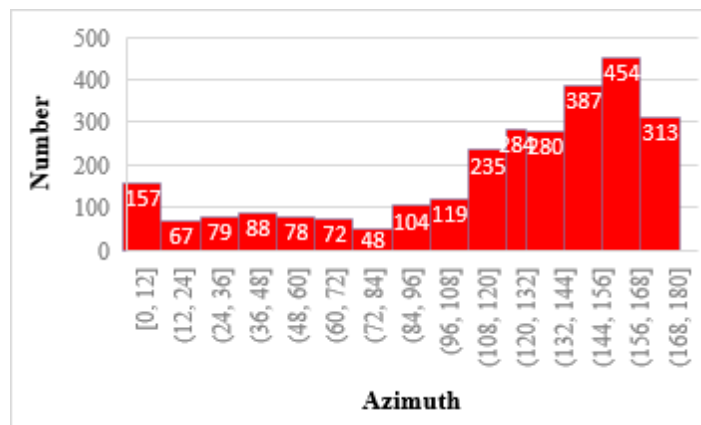
شکل ۴- نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت رگه‌ها و سیکلوگراف آن‌ها در ایستگاه‌های برداشت شده. نمودار گل سرخی قرمز مربوط به گسل‌ها و نمودار گل سرخی مشکی مربوط به رگه‌های کانی‌سازی در منطقه است.

Fig. 4. The structural map of the study area along with the location of veins and their cyclograph in the measured stations. The red rose diagram is related to the faults and the black rose diagram is related to the mineralization veins in the area.



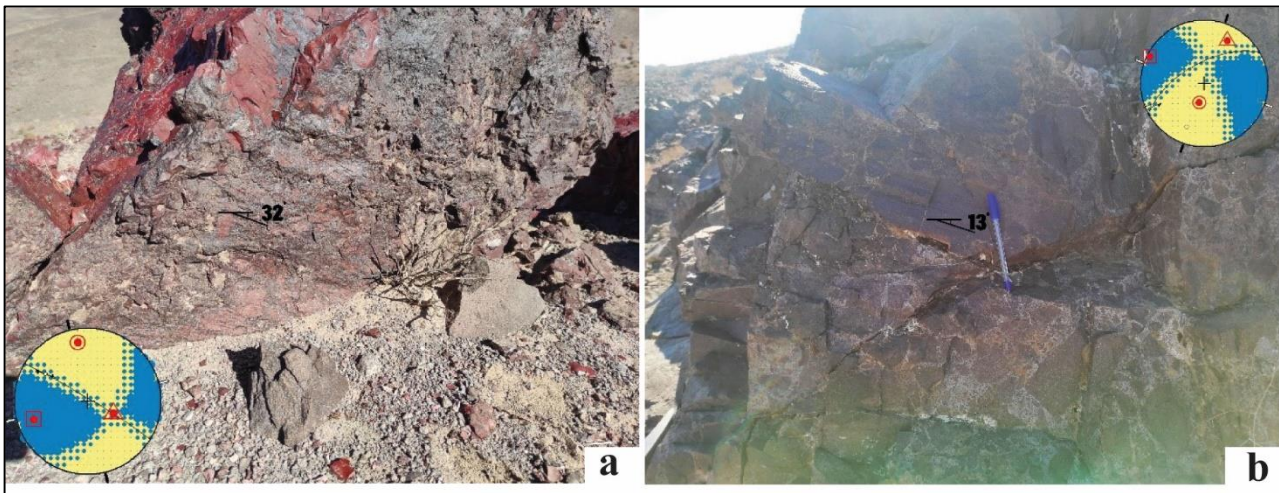
شکل ۵- جایگاه هندسی گسل‌ها و شیب سطح آن‌ها بر روی نقشه ساختاری به همراه نمودار گل سرخی آن‌ها در گستره مورد مطالعه.

Fig. 5. The geometric position of the faults and their surface dip on the structural map of the study area along with their rose diagram.



شکل ۶- هیستوگرام خطواره‌های محدوده مورد مطالعه. همانطور که مشاهده می‌شود خطواره‌های دارای روند شمال غرب- جنوب شرق فراوانی بیشتری دارند.

Fig. 6. Histogram of the lineaments in the study area. As can be seen, there are more lineaments with northwest-southeast trend.



شکل ۷- (a) یک گسل با امتداد شمال غرب- جنوب شرق در محدوده مورد مطالعه، و (b) یک گسل با امتداد شمال شرق- جنوب غرب در منطقه مورد مطالعه.

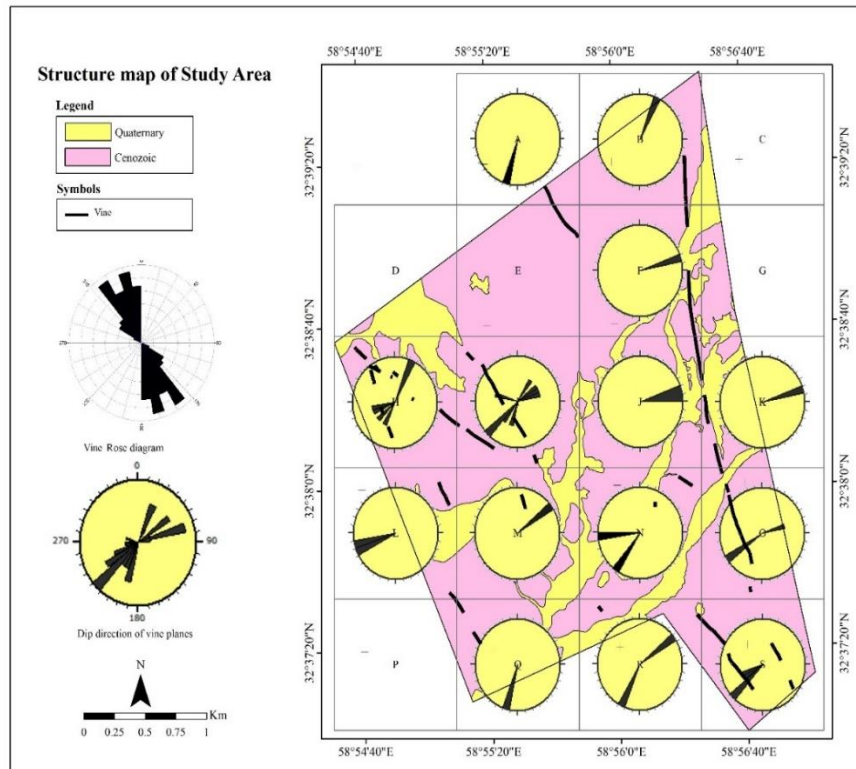
Fig. 7. (a) A fault with northwest-southeast orientation in the study area, (b) A fault with northeast- southwest orientation in the study region.

ژاسپروئیدها و سنگ های آذرین، رابطه مکانی وجود دارد. معمولاً ژاسپروئیدها در امتداد گسل‌ها، شکستگی‌ها، و پهنه‌های برشی متمرکز می‌شوند؛ یعنی این ساختارها مجراهایی برای بالا آمدن سیالات هیدروترمالی غنی از سیلیس فراهم می‌کنند. نهشته‌های ژاسپروئیدی همانند محصولات هیدروترمالی، می‌توانند نشانه ژئوشیمیایی سیالی را که از آن ته‌نشین شده‌اند، در خود داشته باشند. لذا حضور ژاسپروئیدها و ژئوشیمی آنها، برای اکتشاف به‌ویژه اکتشاف طلائی اپی ترمال سولفید پایین، به کار می‌رود. براساس نتایج حاصل از نمودار گل سرخی، توزیع جهت شیب و نمودار هیستوگرام رگه‌های ژاسپروئیدی، می‌توان

کانی‌سازی در گستره مورد مطالعه را می‌توان متأثر از حضور توده‌های نفوذی مونزونیت تا مونزودیوریت به سن ائوسن- الیگوسن در اطراف و یا در اعماق دانست؛ به بیان دیگر، این توده‌های نفوذی، سیالات کانی‌ساز را تأمین می‌کرده‌اند. در غالب موارد، کانی‌سازی به صورت رگه‌های ژاسپروئیدی می‌باشد. ژاسپروئید سنگی متشکل از کوارتز نهان بلورین و یا سایر پلی‌مرف‌های سیلیس است که در اثر جاننشینی هیدروترمالی در سنگ‌های دیگر (به‌ویژه سنگ آهک و دولومیت) به وجود می‌آید (Madondo et al., 2021). تشکیل ژاسپروئیدهای این منطقه را می‌توان به فعالیت هیدروترمالی نسبت داد؛ زیرا بین

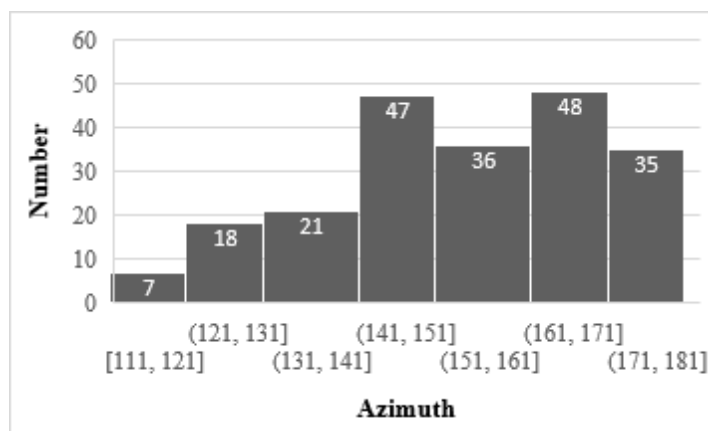
به صورت شعاعی می‌باشد که این توزیع را می‌توان با حضور توده‌های نفوذی در عمق توجه کرد، زیرا موارد بسیاری را می‌توان ذکر کرد که حضور توده‌های نفوذی، باعث ایجاد شکستگی‌ها، بخصوص انواع شعاعی، شده است (Stevenson et al., 2008). البته تأیید این موضوع نیاز به مطالعات بیشتر، به‌ویژه بررسی‌های ژئوفیزیکی دارد.

بیان نمود که امتداد غالب رگه‌ها در راستای شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹). با توجه به اینکه کانی‌سازی در راستای گسل‌ها رخ داده است، شیب رگه‌ها از شیب سطح گسل‌ها پیروی می‌کند به گونه‌ای که در مرز شرقی، میانگین شیب رگه‌ها ۶۵ درجه به سمت شمال شرق و در مرز غربی میانگین شیب رگه‌ها ۷۱ به سمت جنوب غرب می‌باشد. در شبکه‌های سلولی O, H, I و R جهت توزیع شیب رگه‌ها تقریباً



شکل ۸- جایگاه هندسی رگه‌ها و شیب سطح آنها بر روی نقشه ساختاری گستره مورد مطالعه.

Fig. 8. The geometric position of the veins and their surface dip on the structural map of the study area.



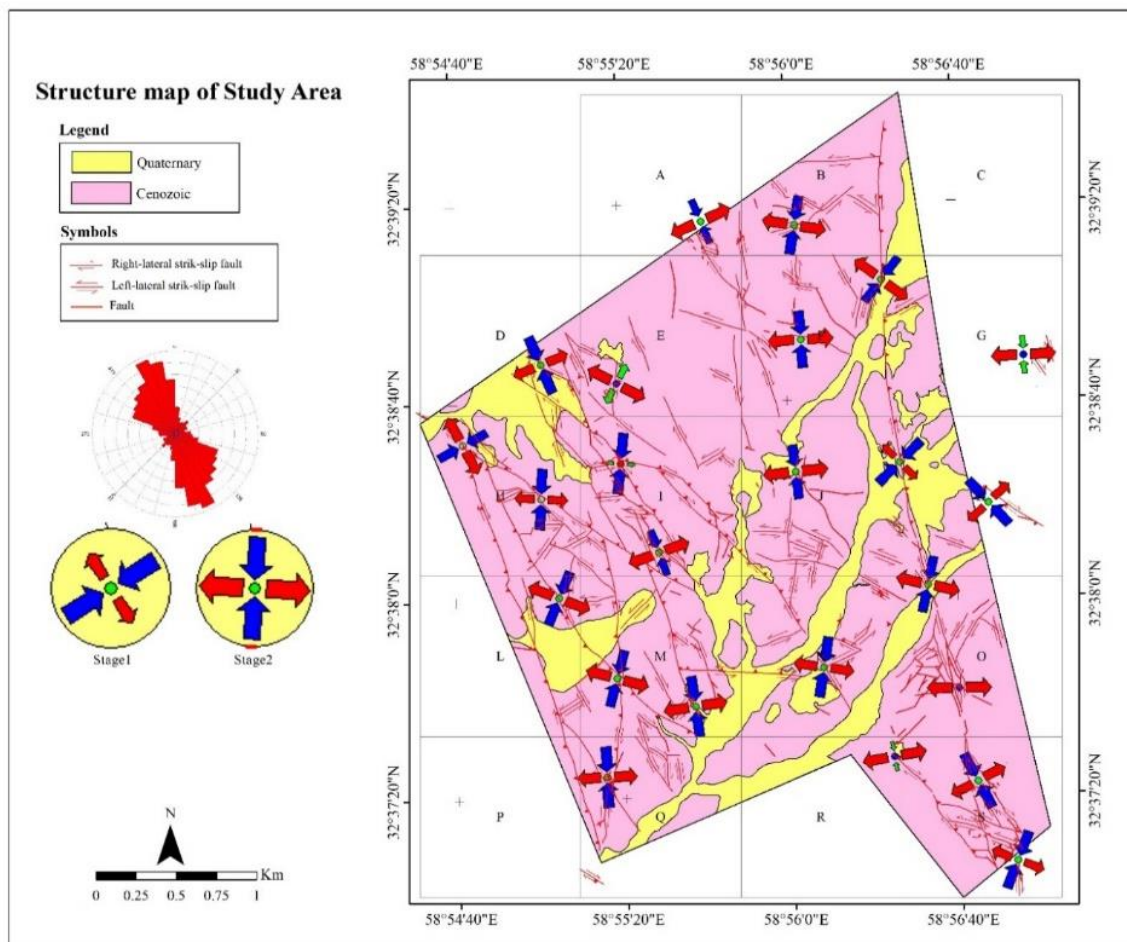
شکل ۹- هیستوگرام رگه‌های کانی‌سازی در گستره مورد مطالعه.

Fig. 9. Histogram of the mineralized veins in the study area.



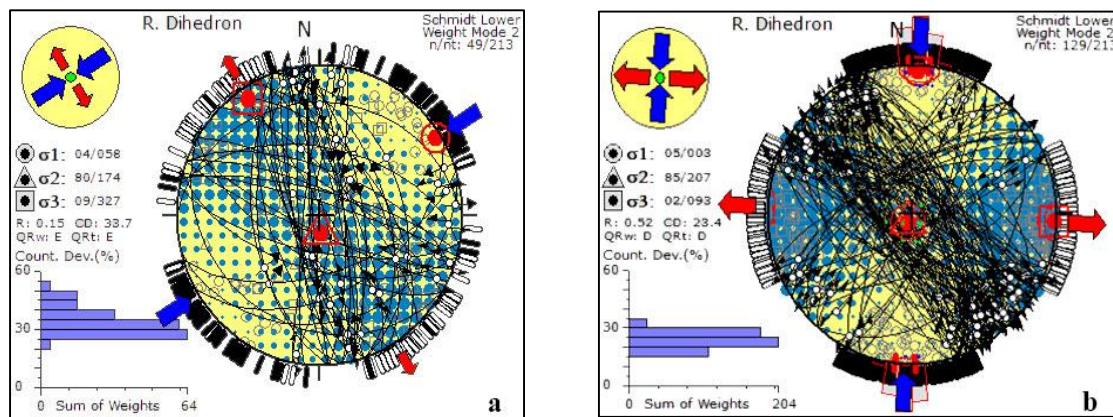
با توجه به ساختارهای گسلی برداشت شده در واحدهای زمانی سنوزویک (ائوسن) و کواترنری، می توان دریافت که در محدوده مورد مطالعه، حداقل دو فاز تنش وجود داشته است. اولین مرحله، در واحدهای زمانی ائوسن در جهت شمال شرق- جنوب غرب به صورت امتدادلغز با موقعیت محورهای اصلی تنش  $\sigma_1=058.04$ ،  $\sigma_2=174.80$  و  $\sigma_3=327.9$  می باشد (شکل های ۱۰ و ۱۱)؛ زیرا سازوکار غالب گسل هایی که این واحد را قطع کرده اند، امتدادلغز با مؤلفه معکوس و معکوس با مؤلفه امتدادلغز می باشد. این مورد، نشان دهنده غلبه تنش های فشارشی در این واحدها است. همچنین گسل های مجاور واحدهای آدرین ائوسن، اغلب نرمال با مؤلفه امتدادلغز می باشند؛ یعنی در این منطقه، رژیم تنش به صورت محلی به تراکشی تغییر یافته است. دومین مرحله تنش در واحدهای زمانی کواترنری در جهت تقریبی شمالی - جنوبی به صورت امتدادلغز و ترافشارشی با موقعیت محورهای اصلی تنش  $\sigma_1=$

۰۰۳.۰۵،  $\sigma_2=207.85$  و  $\sigma_3=093.02$  می باشد (شکل های ۱۰ و ۱۱). نتایج این پژوهش نشان می دهد که محور تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) در گستره مورد مطالعه، از ائوسن تا کواترنری در حدود ۵۵ درجه خلاف جهت عقربه های ساعت چرخیده است. Jentzer و همکاران (۲۰۱۷) براساس داده های کینماتیک گسل ها، میدان تنش دیرین را در بخش شمالی کمربند کوهزایی سیستان در شرق ایران تحلیل کرده و نتیجه می گیرند که رژیم تنش شرق ایران در سنوزویک پایانی تغییرات شدیدی را متحمل شده است. این تغییرات، سه جهت فشارش متوالی را نشان می دهد:  $90^\circ N$  در میوسن میانی- پایانی،  $60^\circ N$  در پلیوسن پایانی و  $25^\circ N$  در پلیو-کواترنری. بنابراین اظهار می دارند که در مدت زمان کمتر از ۱۰ میلیون سال، جهت فشارش ( $\sigma_1$ ) دچار چرخشی تقریباً ۶۵ درجه ای خلاف جهت عقربه های ساعت شده است.



شکل ۱۰- نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت محورهای تنش در ایستگاه های برداشت شده.  
Fig. 10. Structural map of the study area along with the position of the stress axes in the measured stations.



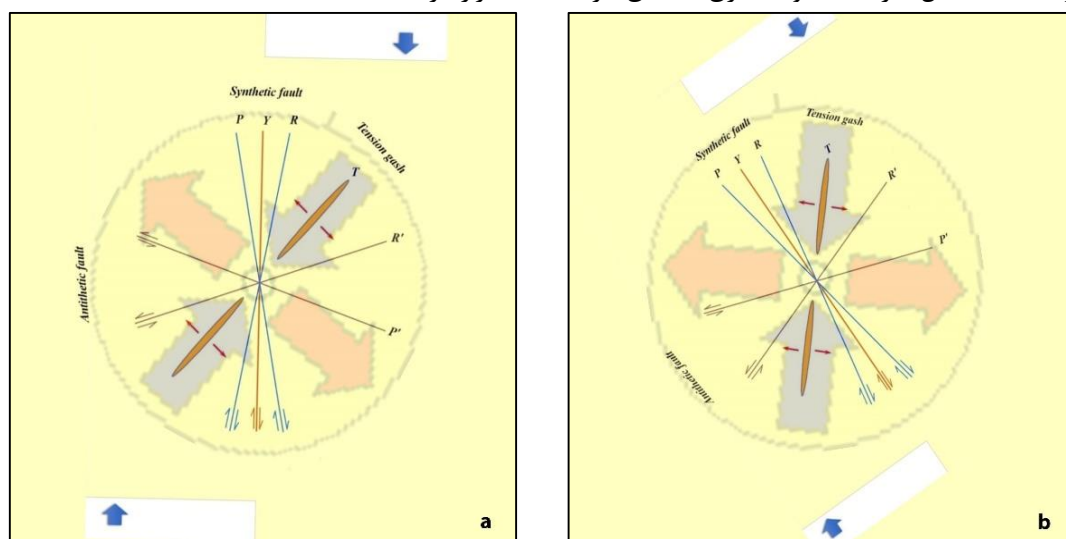


شکل ۱۱- (a) موقعیت محورهای تنش حاکم بر گستره مورد مطالعه در زمان ائوسن، (b) موقعیت محورهای تنش حاکم بر گستره مورد مطالعه در زمان کواترنری.

Fig. 11. (a) The position of the stress axes governing the study area during the Eocene, and (b) The position of the stress axes governing the study area during the Quaternary period.

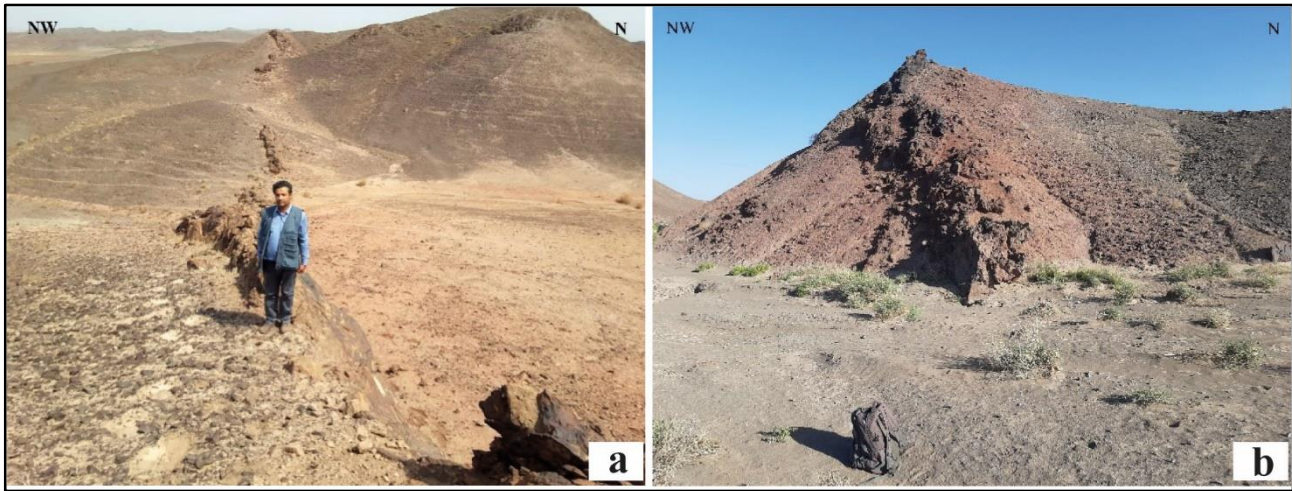
شکستگی‌های ریدل ناهمسو با پهنه بُرشی اصلی ( $R'$ ) تشکیل شدند. گسل‌های اصلی پهنه بُرشی ( $Y$ )، و گسل‌های مزدوجی که زاویه کمتری با پهنه بُرشی دارند ( $R, P$ )، مجراهایی برای بالا آمدن سیالات هیدروترمالی غنی از سیلیس فراهم کرده‌اند (شکل ۱۳). از سوی دیگر، محل تلاقی این شکستگی‌ها توانسته است فضای مناسبی برای نهشت مواد معدنی ایجاد کند. این گسل‌ها تحت تأثیر تنش حاکم بر منطقه تا زمان کواترنری، در حدود ۵۵ درجه خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخیده‌اند. این چرخش باعث بازشدگی بیشتر فضاهای خالی شده و رگه‌های کانی‌سازی در راستای امروزی خود (شمال غرب - جنوب شرق) قرار گرفته‌اند.

در منطقه مورد بررسی، دو سیستم بُرشی - فشارشی راستگرد با آزیموت  $N03$  و  $N58$  شناسایی شد (شکل ۱۲). در تحلیل شکستگی‌های این پهنه بُرشی می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در زمان ائوسن، دو گسل اصلی پهنه بُرشی با مؤلفه امتدادلغز راستگرد در راستای شمال شرق تا شمال - جنوب غرب تا جنوب ( $Y$ ) ایجاد شده است. سپس گسل‌های شرقی - غربی با مؤلفه غالب شیبي معکوس و مؤلفه امتدادی چپگرد ( $R'$ ) ایجاد شده است. سپس در ادامه فعالیت پهنه بُرشی، گسل‌های مزدوجی در امتداد شمال شرق - جنوب غرب منطبق بر شکستگی‌های ریدل همسو با پهنه بُرشی اصلی ( $R, P$ ) و همچنین در امتداد شمال غرب - جنوب شرق منطبق بر

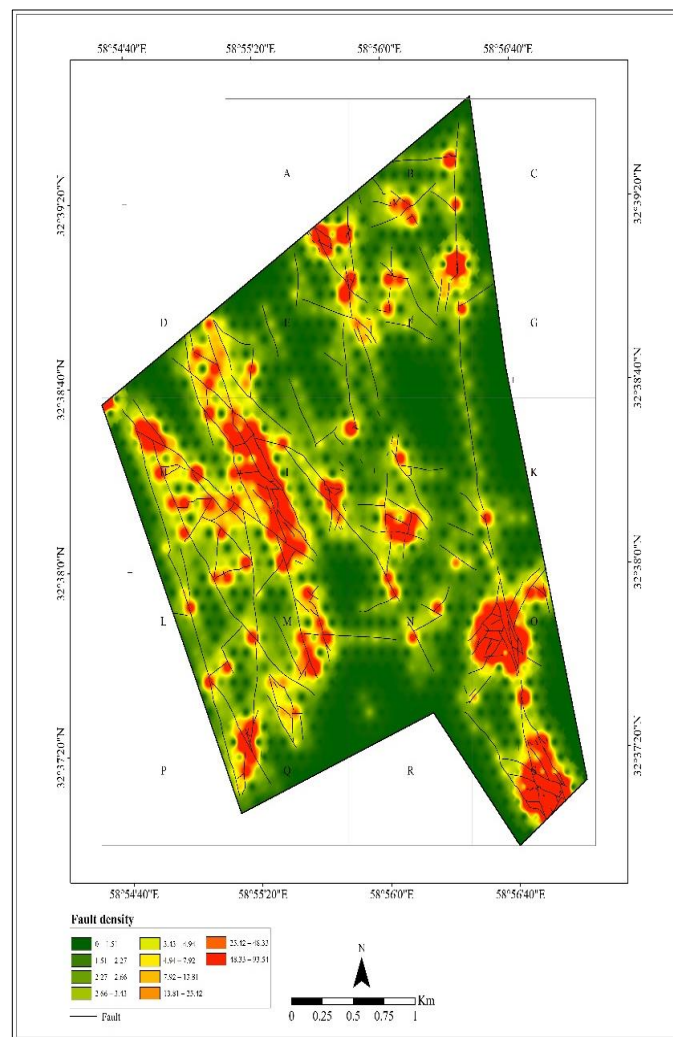


شکل ۱۲- (a) موقعیت شکستگی‌های ریدل همسو و ناهمسو در زمان ائوسن، (b) موقعیت شکستگی‌های ریدل همسو و ناهمسو در زمان کواترنری.

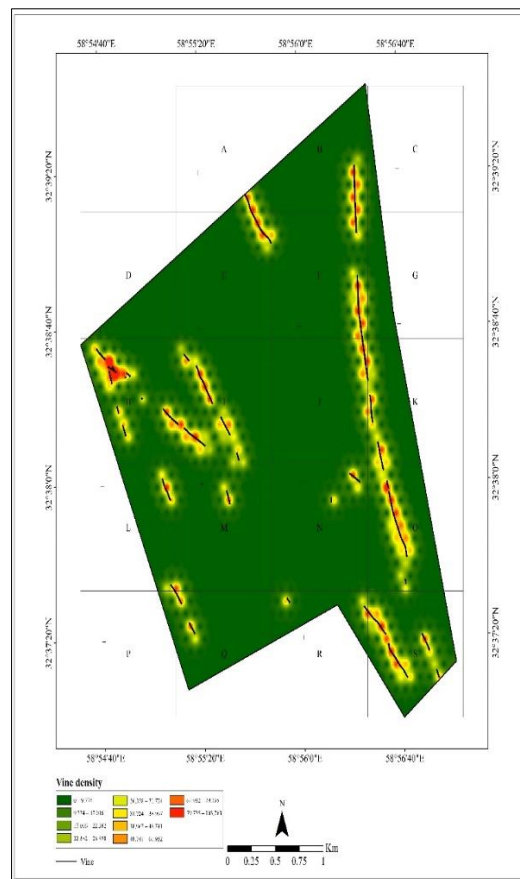
Fig. 12. (a) The position of the synthetic and antithetic Riedel fractures in Eocene time, (b) The position of the synthetic and antithetic Riedel fractures in Quaternary time.



شکل ۱۳- (a) و (b) پرشدگی شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه برشی توسط نهشته‌های هیدروترمال.  
 Fig. 13. (a) and (b) Filling of minor fractures resulting from shear zone by hydrothermal deposits.



شکل ۱۴- نقشه تراکم گسل‌ها در شبکه ۱۹ سلولی ایجاد شده در محدوده مورد مطالعه.  
 Fig. 14. Density map of faults in a 19-cell network in the study area.



شکل ۱۵- نقشه تراکم رگه‌ها در شبکه ۱۹ سلولی ایجاد شده در محدوده مورد مطالعه.

Fig. 15. Density map of veins in a 19-cell network in the study area.

این موضوع را اثبات می‌کند (شکل ۱۵). همچنین بیشترین تراکم شکستگی‌ها در شبکه سلولی O، I و S مشاهده می‌شود که این موضوع بیانگر فعال بودن این مناطق از نظر تکتونیکی است؛ این فعال بودن احتمالاً می‌تواند به حضور توده‌های نفوذی در اعماق ارتباط داشته باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

محدوده گاریجگان یک پهنه بُرشی ناموازی کلاسیک به شمار می‌رود که بین دو گسل با مؤلفه غالب امتدادلغز قرار گرفته است. گسل واقع در مرز شرقی دارای شیب میانگین ۶۵ درجه به سمت شمال شرق، و گسل واقع در مرز غربی دارای شیب میانگین ۷۱ درجه به سمت جنوب غرب می‌باشد. با توجه به داده‌های حاصل از مطالعه تصویرهای ماهواره‌ای و تهیه نقشه توزیع شکستگی‌ها و براساس نمودارهای گل سرخی و هیستوگرام خطواره‌های منطقه، می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌سازی عمدتاً در شکستگی‌های دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق رخ داده است. این رگه‌های کانی‌سازی در بخش

پس از بررسی تنش‌های وارد بر منطقه، با استفاده از روش هاردکستل، نقشه تراکم گسل‌ها ترسیم گردید. در این روش پس از فراخوانی داده‌ها در محیط نرم افزار آرک جی آی اس، با استفاده از یک شبکه مناسب، پارامترهای مختلف مانند طول خطواره‌ها (a)، تقاطع خطواره‌ها (b) و تعداد خطواره‌ها (c) مربوط به هر سلول مشخص شد و سپس با استفاده از رابطه زیر، تراکم گسل‌ها در هر سلول به دست آمد:

$$pf = \left(\frac{a}{A}\right) + \left(\frac{b}{B}\right) + \left(\frac{c}{C}\right) \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه فوق مقادیر A، B و C به ترتیب میانگین پارامترهای طول گسل‌ها، تقاطع گسل‌ها و تعداد گسل‌ها در منطقه است. روند تمرکز شکستگی‌ها در هر بخش در جهت تنش بیشینه آن بخش است که با بررسی نقشه الگوی رژیم تنش به کمک نقشه تراکم گسل‌ها، این موضوع قابل اثبات است (شکل ۱۴). این روندها می‌توانسته‌اند مکان‌های مناسبی برای نهشت مواد معدنی فراهم کنند که نقشه تراکم رگه‌های معدنی

شمال شرق- جنوب غرب به صورت امتدادلغز و دومین مرحله، در واحدهای زمانی کواترنری در راستای تقریبی شمالی- جنوبی به صورت امتدادلغز و ترافشارشی رخ داده است. کانی سازی در محدوده گاریجگان، بصورت رگه‌ای و توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود. از بین این ساختارها، گسل‌های اصلی پهنه بُرشی (Y) و گسل‌های مزدوجی که زاویه کمتری با پهنه بُرشی دارند (R,P)، مجراهای مناسبی را برای بالا آمدن سیالات هیدروترمالی کانه‌دار غنی از سیلیس فراهم کرده‌اند. این سیالات کانه‌دار با رسیدن به محل تلاقی شکستگی‌ها، به علت کاهش فشار، شروع به ته‌نشست کرده‌اند. بعلاوه، این گسل‌ها متأثر از تنش حاکم بر منطقه تا زمان کواترنر، در حدود ۵۵ درجه خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخیده‌اند. این چرخش، سبب بازشدگی بیشتر فضاهای خالی شده و همچنین باعث شده است که رگه‌های دارای کانی‌سازی، در راستای کنونی خود (شمال غرب- جنوب شرق) قرار گیرند.

شرقی دارای شیب میانگین ۶۵ درجه به سمت شمال شرق، و در بخش غربی دارای شیب میانگین ۷۱ درجه به سمت جنوب غرب می‌باشند. از سوی دیگر، تهیه نقشه تراکم گسل‌ها با روش هاردکستل نیز نشان می‌دهد که بیشترین تراکم شکستگی‌ها در راستای شمال غرب- جنوب شرق رخ داده است که این راستا، هم روند با امتداد رگه‌های کانی‌سازی می‌باشد. این موضوع تأیید می‌کند که کانی‌سازی در منطقه گاریجگان توسط ساختارها (شکستگی‌ها) کنترل شده است. بعلاوه، در شبکه‌های سلولی I ، H ، O و R جهت توزیع شیب رگه‌ها تقریباً به صورت شعاعی است که این توزیع را می‌توان با حضور توده‌های نفوذی در عمق توجیه کرد. البته تأیید این موضوع نیاز به مطالعات بیشتر، به‌ویژه بررسی‌های ژئوفیزیکی دارد.

بررسی الگوهای تنش دیرین، حاکی از بروز حداقل دو فاز تنش بُرشی- فشارشی راستگرد با آزیموت N03 و N58 است. اولین مرحله، در واحدهای زمانی ائوسن در راستای تقریبی

#### مراجع

- Ahmadi, H. Pekkan, E., 2021. Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS- A Review. *Geosciences* 11(5), 183-213. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>.
- Ahmadi Rouhani, R., 2011. Remote Sensing Report of Gonabad. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, North East Branch, p. 102.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103, 983- 992. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- Ansari Jafari, Sh., Rahimi, B., Ghaemi, F., Mazloumi Bajestani, A., 2015. Structural model based on fracture study in Zarmehr gold deposit. *Advanced Applied Geology* 15, 51- 58. <https://doi.org/10.22055/aag.2015.11820>.
- Blenkinsop, T.G., Oliver, N.H.S., Dirks, P.G.H.M., Nugus, M., Tripp, G., Sanislav, I., 2020. Structural Geology Applied to the Evaluation of Hydrothermal Gold Deposits. In: Rowland, J.V., Rhys, D.A. (Eds.), *Applied Structural Geology of Ore-Forming Hydrothermal Systems*. Society of Economic Geologists 21, 1-23. <https://doi.org/10.5382/rev.21.01>.
- Chauvet, A., 2019. Structural Control of Ore Deposits: The Role of Pre-Existing Structures on the Formation of Mineralized Vein Systems. *Minerals* 56, 56-77. <https://doi.org/10.3390/min9010056>.
- Fabricio-Silva, W., Rosière, C.A., Bühn, B., 2018. The shear zone-related gold mineralization at the Turmalina deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: structural evolution and the two stages of mineralization. *Mineralium Deposita* 54, 347-368. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0811-7>.
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology*. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, P. 524.
- Gholamzadeh, M., Rahimi, B., Ghaemim, F., Ahmadi Rouhani, R., 2015. Investigation of fault and fractures Akhlamad (north west Binalud) based on the satellite data processing and studying fractal characteristics of fracture systems. *Tectonics* 1(2), 77-92. <https://doi.org/10.22077/jt.2015.286>.
- Gholizadeh, K., Rasaa, A., Yazdi, M., Bouni, M., 2021. Geological structures and their role in control of mineralization in Bahramtaj Lead and Zinc deposit, Yazd province, Central Iran. *Researches in Earth Sciences* 46, 206-225. <https://doi.org/10.52547/esrj.12.2.206>.
- Haddad-Martim, P.M., John, E., Carranza, M., de Souza Filho, C.R., 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. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4600>.



- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, Ph., Omrani, J., Khatib, M.M., Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics* 36 (2), 287-303. <https://doi.org/10.1002/2016TC004275>.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, L., Saadat, S., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block. Eastern Iran. *Geopersia* 1 (1), 19-36. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2011.22162>.
- Kavyani-Sadr, Kh., Rahimi, B., Khatib, M.M., Kim, Y-S., 2022. Assessment of open spaces related to Riedel-shears dip effect in brittle shear zones. *Journal of Structural Geology* 154, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104486>.
- Khatib, M.M. and Zarrinkoub, M.H., 2012. Structural controls for vein type mineralization in east of Iran. 4<sup>th</sup> symposium of Economic Geology, University of Birjand, Birjand.
- Khatib, M.M., 1998. Terminal geometry of strike-slip faults with a special reference to the faults of eastern Iran. Ph.D thesis, Shahid Beheshti University, Tehran.
- Liu, L.M., Zhao, Y.L., Zhao, C., 2010. Coupled geodynamics in the formation of Cu skarn deposits in the Tongling-Anqing district, China: computational modelling and implications for exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 106, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.01.002>.
- Madondo, J., Canet, C., Nuñez-Useche, F., Gonzalez-Partida, E., 2021. Geology and geochemistry of jasperoids from the 'Montaña de Manganeso' district, San Luis Potosí, north-central Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Geologicas* 38(3), 193-209. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1651>.
- Mohebi, A., Mirnejad, H., Lentz, D., Behzadi, M., Dolati, A., Kani, A., Taghizadeh, H., 2015. Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, south-east of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data. *Ore Geology Reviews* 69, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.016>.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. 2nd edition, Springer, p. 366.
- Qin, Y., Liu, L., 2018. Quantitative 3D Association of Geological Factors and Geophysical Fields with Mineralization and Its Significance for Ore Prediction: An Example from Anqing Orefield, China. *Minerals* 8, 300-322. <https://doi.org/10.3390/min8070300>.
- Stevenson, C.T.E., O'Driscoll, B., Holohan, E.P., Couchmani, R., Reavy, R.J., Andrews, G.D.M., 2008. The structure, fabrics and AMS of the Slieve Gullion ring-complex, Northern Ireland: testing the ring-dyke emplacement model. In: Thomson, K., Petford, N., (Eds.), *Structure and Emplacement of High-Level Magmatic Systems*. Geological Society of London Special Publications 302, 159-184. <https://doi.org/10.1144/SP302.12>.
- Sun, T., Xu, Y., Yu, X., Liu, W., Li, R., Hu, Z., Wang, Y., 2018. Structural Controls on Copper Mineralization in the Tongling Ore District, Eastern China: Evidence from Spatial Analysis. *Minerals* 8(6), 254-279. <https://doi.org/10.3390/min8060254>.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94, 134-150. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- Zhang, Y., Robinson, J. Schaub, P.M., 2011. Numerical modelling of structural controls on fluid flow and mineralization. *Geoscience Frontiers* 2(3), 449-461. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.011>.
- Weinberg, R.F., Hodkiewicz, P.F., Groves, D.I., 2004. What controls gold distribution in Archean terranes? *Geology* 32, 545-548. <https://doi.org/10.1130/G20475.1>
- Wilson, C.J.L., Osborne, D.J., Robinson, J.A., Miller, J.M., 2016. Structural Constraints and Localization of Gold Mineralization in Leather Jacket Lodes, Ballarat, Victoria, Australia. *Economic Geology* 111, 1073-1098. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1073>.