

Research Article

Strain changes in Dasht-e-Bayaz strike-slip fault terminal (East of Iran) and its role in copper and silver mineralization

Vahid Khademi¹, Mahmoudreza Heyhat^{1*}, Mohammad Mahdi Khatib¹, Mohammad Hossein Zarrinkoub¹, Hossein Hadizadeh Khader²

1- Department of geology, Faculty of science, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Geological Survey of Iran, Northeast Territory

Keywords: *Dasht-e-Bayaz, fault, fault terminals, mineralization, copper, strike-slip faults, Lut block*

1-Introduction

A fundamental aim of structural analysis applied to mineralization is to identify how deformation influenced the enhancement or decrease of permeability in rocks (Micklethwaite et al., 2010). Extension fractures (i.e., joints or veins) occur across various scales. The linkage between fault segments is mainly controlled by extension fractures approximately parallel to the local orientation, and the extension fractures are dominantly developed in the extensional quadrants of fault segments (Kim et al., 2004). The study area is located north of Lut block and in the eastern terminal of the sinistral DB fault with an approximate area of 570 km² east of Iran. Rocky outcrops consist of two intrusive igneous bodies, including Paleocene granitic, granodioritic, and dioritic masses in the north, and an Eocene basalt–andesitic body in the south; that southern part is the goal of this study. Studies were performed on the southern part of the Kaybarkuh area due to the abundance of vein-type mineralization.

2-Material and methods

The most essential principle in final strain studies is finding markers that help researchers make quantitative measurements. Markers such as oolites, pisolites, clasts in metamorphosed conglomerate rocks, porphyroclasts, porphyroblasts, and some types of fossils are essential markers in final strain studies. The lack of suitable markers has caused limitations in conducting such studies in many geological locations. However, in recent years, these limitations have disappeared mainly due to the increase in the variety of strain measurement methods and the use of various markers (Fossen, 2016).

Rock Quality Designation (RQD) is a parameter that provides a quantitative judgment of rock mass quality obtained from drill cores. This factor can be applied to detect the fractured zones due to fault systems (Madani Esfahani et al., 2013). Based on surficial evidence of mineralization, 12, 9, and 10 boreholes were drilled in three stations of Asad, Chah Abbas, and Qaleha by the Iran Geological Survey. The 3D diagrams of lithology, RQD, oxide, and sulfide mineralization were obtained by Rockworks software. The diagrams show that in the two areas of Asad and Chah Abbas, which are closer to the main fault of Dasht-e-Bayaz and, based on surface evidence, have pure shear signs, and copper mineralization occurred in places with lower RQD, which probably corresponds to subsurface faults.

3-Results and discussions

In the field survey, strain markers such as silica nodules and opened veins were measured in three drilling stations, and the data collected from more than 120 samples were entered and calculated using ellipse fit software. Table 1 shows the values of the average of tectonic strain parameters in each station, where R_{xz} or Ellipticity (ratio between the long and short axes of the ellipse), θ is the angle between ISA_1 (the Instantaneous Stretching Axes) and the shear plane, and K is elliptical 3D shape coefficient of strain

* Corresponding author: mhayhat@birjand.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.46366.2443

Received: 2024-03-12

Accepted: 2024-08-24

(Fossen, 2016). The parameters were plotted in the Fossen diagram of the strain ellipsoid shape (Fig. 1). Fig. 2 shows profiles of the XZ plane of the strain ellipsoid at three measured stations.

Table 1. Mean amounts of tectonic strain parameters in three stations.

Station	Rxz	θ	K
Chah Abbas	7	32	0.7
Asad	8	41	0.55
Qaleha	13	53	0.35

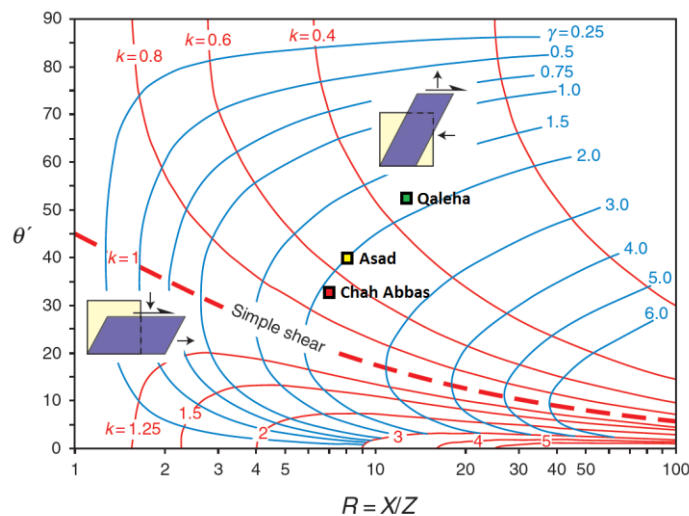


Fig. 1. Determining the strain ellipsoid shape coefficient using Rxz- θ -K- γ image function (Fossen, 2016).

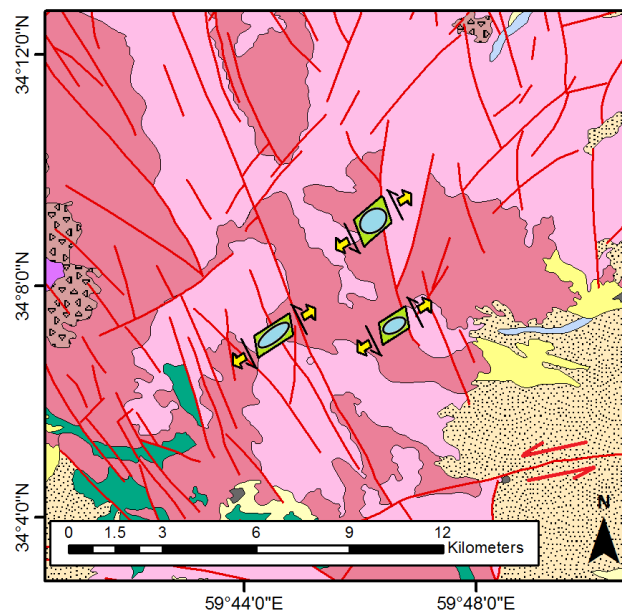


Fig. 2. Profiles of the XZ plane of the strain ellipsoid at three measured stations.

4-Conclusion

Drilling information shows that in Qhaleha station, which has the most deformation of pure shear, the core quality (RQD) is low, and the mineralization of copper oxide is high, shows that copper mineralization happened in direct connection with the stretching process at the same time as activity of DB fault terminal.

The dominant shearing type in the region is pure and tends to be simple as it moves away from the main fault of Dasht-e-Beyaz and its major branching faults. The relationship between core quality and copper mineralization revealed that the proximity to the main fault and the faults branching from it is directly related to mineralization. The alignment of mineralized veins with tensile structures indicates the effect of fault terminal function on mineralization.

5-References

- Fossen, H., 2016. Structural geology, second edition. Cambridge University Press, 520 P.
- Micklethwaite, S., Sheldon, H. A., Baker, T., 2010. Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery. *Journal of Structural Geology* 32, 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.10.009>
- Madani Esfahani, N., Asghari, O., 2013. Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD). *Arabian Journal of Geosciences* 6, 3737–3747. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0633-3>
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D. J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Khademi, V., Heyhat, M., Khatib, M., Zarrinkoub, M., Hadizadeh Khader, H., 2024. Strain changes in Dasht-e-Bayaz strike-slip fault terminal (East of Iran) and its role in copper and silver mineralization. *Adv. Appl. Geol.* 14(3), 785-800.

DOI: 10.22055/aag.2024.46366.2443

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19398.html

©2024 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

تغییرات واتنش در پایانه گسل امتدادلغز دشت بیاض (خاور ایران) و نقش آن در کانه‌زایی مس و نقره

وحید خادمی

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

محمودرضا هیهات*

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

محمد مهدی خطیب

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

محمدحسین زرین کوب

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

حسین هادی زاده خادر

اداره کل زمین شناسی و اکتشافات معدنی منطقه شمال شرق

* mhayhat@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

چکیده

مطالعه ارتباط بین دگرشکلی و کانه‌زایی نقش کلیدی در اکتشاف مواد معدنی دارد. در این مطالعه به بررسی وضعیت ساختارهای کشتی نظیر درزه‌های باز و ندول‌های سیلیسی و مقایسه روند این ساختارها با روند کلی گسل خوردگی در منطقه و رابطه آنها با کانی‌سازی رگه‌ای مس و نقره در پایانه گسل امتدادلغز دشت بیاض در خاور ایران پرداخته شده است. مطالعات بر سه ناحیه اکتشافی که توسط سازمان زمین شناسی ایران حفاری شده متمرکز شده است. نتایج حاصل از حفاری مغزه ای در سه منطقه به وسیله نرم افزار Rockworks به صورت نمودار فنی تهیه و بررسی گردید. در ادامه مشخصات ساختارهای کشتی در نرم افزار Ellipsefit وارد و مقادیر پارامتر واتنش تکتونیک محاسبه و در نمودار Fossen پیاده سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که نوع برش غالب در منطقه محض بوده و با دور شدن از گسل اصلی دشت بیاض و گسل‌های اصلی منشعب از آن به سمت برش ساده گرایش می‌یابد. همچنین بررسی رابطه بین کیفیت مغزه (RQD) با کانی‌سازی مس و نقره نشان می‌دهد که نزدیکی با گسل اصلی و گسل‌های منشعب از آن با کانی‌سازی رابطه مستقیم دارد. هم راستایی رگه‌های کانه‌دار با ساختارهای کشتی نشان‌دهنده تأثیر عملکرد پایانه گسل بر کانی‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: گسل دشت بیاض، پایانه گسلی، کانه‌زایی، مس، گسل امتدادلغز، بلوک لوت

۱- مقدمه

هدف اصلی تجزیه و تحلیل ساختاری مرتبط با کانی‌سازی، شناسایی چگونگی تاثیر دگرشکلی بر افزایش یا کاهش نفوذپذیری در سنگ‌ها است (Micklethwaite et al., 2010). برخی از فرایندهای ساختاری مانند کشش ناشی از برش که در پایانه گسل‌های امتدادلغز مشاهده می‌شود، می‌تواند ارتباط مستقیمی با کانی‌سازی در منطقه داشته باشد. از این رو، مطالعه ساختاری گسل‌های امتدادلغز برای شناخت عوامل موثر بر ایجاد رگه‌های معدنی اهمیت دارد. تشخیص اینکه آیا کنترل‌کننده‌های ساختاری بر روی ذخایر معدنی "غیرفعال" هستند

یعنی به ساختارهای تکتونیک توسعه یافته قبل از کانی‌سازی نسبت داده می‌شوند، یا برعکس "فعال" بوده که نشانگر ساختارهای تکتونیک است که به تدریج با کانی‌سازی تکامل می‌یابند، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار ما قرار دهد (Funedda et al., 2018).

شکستگی‌های کشتی از نوع درزه یا رگه، در مقیاس‌های مختلفی ایجاد می‌شوند. ارتباط بین قطعات گسل به طور عمده توسط شکستگی‌های کشتی تقریباً موازی با جهت محلی مشخص و این شکستگی‌ها غالباً در چهار گوش کشتی قطعات گسلی ایجاد می‌گردد (Kim et al., 2004). مناطق کشش

انجام چنین مطالعاتی شده است. اما در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش انواع روش‌های اندازه‌گیری کرنش و استفاده از نشانگرهای مختلف، این محدودیت‌ها تا حد زیادی از بین رفته است (Fossen, 2016).

هدف از این نوشتار، پاسخ به این پرسش است که آیا عملکرد گسل دشت بیاض در پایانه آن می‌تواند ارتباطی با کانی‌سازی‌های رگه‌ای به‌ویژه مس و نقره که در منطقه یافت شده داشته باشد. در صورت مثبت بودن پاسخ، این ارتباط به چه صورت شکل گرفته و چه پیش‌بینی می‌توان در مورد سایر مناطق مشابه انجام داد.

۲- زمین‌شناسی

۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در نیمه جنوبی ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ زوزن و در پایانه خاوری گسل چپ‌لغز دشت بیاض به مساحت تقریبی ۵۷۰ کیلومتر مربع در خاور ایران قرارداد (شکل ۱a). تکتونیک خاور ایران بیشتر بر فرورانش مکران متمرکز است، جایی که پوسته اقیانوسی حدود ۱۹/۵ میلی‌متر در سال به سمت شمال، زیر گوه مکران فرورانش می‌کند (Vernant et al., 2004). محدوده جغرافیایی منطقه از 34° 0' 0" تا 34° 17' 24" عرض شمالی و 59° 34' 0" تا 59° 54' 32" طول خاوری را شامل می‌شود. از نظر تقسیمات ساختاری زمین‌شناختی ایران، ورقه زوزن در بخش شمال خاوری بلوک لوت جای می‌گیرد که باتوجه به شرایط آب و هوایی ایران، در ناحیه بیابانی و نیمه بیابانی و کم بارش کشور قرار دارد. به لحاظ ریخت‌شناسی، بخش‌های مرکزی این ناحیه از ارتفاعات نسبتاً بلندی تشکیل شده که به سمت حاشیه‌ها از ارتفاعات کاسته می‌شود و دشت‌های به نسبت مسطحی را در بخش‌های خاوری و باختری تشکیل می‌دهد.

ورقه زمین‌شناسی زوزن حاوی برونزدهایی از پالئوزوئیک تا کواترن است که در این توالی، نبوده‌های چینه نگاری بزرگی نیز وجود دارد. از کهن‌ترین سنگ‌های برونزد یافته می‌توان به مجموعه دگرگونی موجود در سمت باختر اشاره نمود که تصور می‌شود به پالئوزوئیک وابسته باشند. همچنین یک سری نهشته‌های شیلی-ماسه سنگی با میان لایه‌های سنگ آهکی وجود دارند که به سازند سردر مربوط هستند. این نهشته‌ها دچار دگرگونی ناحیه‌ای بسیار ضعیفی شده‌اند و در مجاورت با توده

بدون برش در گوشه‌ها و در امتداد لبه گسل‌های مزدوج، تله‌های ساختاری مناسبی برای ذخایر مس پورفیری درون توده‌های گرانیتوئیدی هستند. در مقابل، ذخایر رگه‌ای چند فلزی، در جایی که برش و کشش داخل بلوک‌های گسلی رخ می‌دهد، بیشتر دیده می‌شوند (Drew, 2005). کانی‌سازی‌های رگه‌ای به ویژه طلا و نقره به‌طور عمده در انتهای نواحی برشی به‌ویژه پایانه گسل‌های امتدادلغز و نرمال شکل می‌گیرد (Neubauer, 2005).

تحلیل کرنش نهایی در مناطق تغییرشکل یافته، یکی از موضوعات مورد توجه زمین‌شناسان ساختمانی در سال‌های اخیر است. بررسی کینماتیک ناحیه برشی امکان پیش‌بینی نسبت متغیرهای برش محض به ساده را فراهم می‌کند که جهت احتمالی کانی‌سازی را مشخص می‌کند. جهت‌گیری‌های متعددی از کانی‌سازی ممکن است در مناطق تغییرشکل یافته به‌طور همزمان و متقارن حول محورهای اصلی کرنش تشکیل شود (Blenkinsop et al., 2020). Gloyn-Jones و همکاران (2022)، یک روش جامع برای بررسی کانی‌سازی (Iron IOCG (oxide - Copper - Gold از طریق ترکیبی از کنترل کننده‌های ساختاری-هندسی بر کانی‌سازی هیدروترمال در Mt. Woods Inlier در جنوب استرالیا معرفی کردند. با توجه به امکانات و داده‌های قابل جمع‌آوری در میدان، مطالعات کرنش، زمین‌شناسان را به درک پارامترهایی مانند: کمیت کرنش تکتونیک در سطوح اصلی بیضی کرنش، جهت‌گیری محورهای اصلی بیضی کرنش، ماهیت بیضی کرنش و نوع کرنشی که در تغییر شکل و تکامل ساختاری هر منطقه عمل می‌کند سوق می‌دهد. در مطالعات کرنش نهایی، محصول تغییرشکل یافته مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و مقادیر اندکی از کرنش در آخرین مرحله تغییرشکل آنالیز می‌شود چراکه زمین‌شناسان همیشه با آخرین محصول با شکل متفاوت در میدان مواجه می‌شوند و بنابراین فقط می‌توان به موضوع کرنش نهایی پرداخت. مهم‌ترین اصل در مطالعات کرنش نهایی، یافتن نشانگرهایی است که به زمین‌شناسان در اندازه‌گیری کمی کمک می‌کند. نشانگرهایی مانند اوولیت‌ها، پیزولیت‌ها، کلاست‌ها در سنگ‌های کنگلومرای دگرگون شده، پورفیروکلاست‌ها، پورفیروبلاست‌ها و برخی از انواع فسیل‌ها، مهم‌ترین نشانگرها در مطالعات کرنش نهایی هستند. در بسیاری از نقاط، فقدان نشانگرهای مناسب باعث ایجاد محدودیت در

و عملکرد گسل دشت بیاض و فراوانی کانی‌سازی از نوع رگه‌ای در این ناحیه، هدف اصلی این مطالعه، ولکانیک‌های جنوب منطقه است (شکل b).

۲-۲- زمین‌شناسی ساختمانی

باتوجه به اینکه محدوده مورد سخن در بخش شمال خاوری بلوک لوت جای می‌گیرد، لذا تحولات ساختاری آن نیز بایستی متأثر از تحولات ساختاری بلوک لوت باشد. ماگماتیسم ترشیر گسترده (فعالیت‌های آتشفشانی و نفوذی) همراه با برونزد گسترده سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای از ویژگی‌های این منطقه است. رخنمون سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی با روند تقریبی NNW-SSE در باختر، خاور و شمال خاوری بوسیله نهشته‌های کواترنری پوشیده شده‌اند که این رویداد باعث برونزد نیافتن چگونگی ارتباط این سنگ‌ها با واحدهای دیگر در منطقه شده است. در بخش‌های شمالی منطقه یک برونزد از سنگ‌های دگرگونی مربوط به پی سنگ پالئوزوئیک و یک رخداد گسترده از توده نفوذی گرانیتوئیدی که به‌طور کلی در قله شاه نشین برونزد دارد، مشخص است. سنگ‌های منتسب به سازند سردر و سنگ‌های دگرگونی دچار چین خوردگی شده‌اند. این چین‌ها در ابعاد سانتی متر و از نوع جناغی هستند. هرچند گسل‌هایی با روند خاوری - باختری نیز دیده می‌شوند. این گسل‌ها بیشتر از نوع امتدادلغز با مؤلفه شیبی (مورب لغز) هستند که به نظر می‌رسد جابه‌جایی امتدادی در آنها بیشتر از جابه‌جایی عمودی باشد. گسل‌هایی با روند NNW - SSE بطور کلی از جنوب (در داخل واحدهای آتشفشانی) به سمت شمال (در داخل توده گرانیتوئیدی) قابل مشاهده هستند. این گسل‌ها بیشتر دارای حرکت چپ‌گردند. گسل‌هایی با روند NE-SW در داخل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی مشاهده می‌شوند که این گسل‌ها نیز در بعضی موارد دارای حرکت چپ‌گرد بوده و گسل‌های پیشین را جابه‌جا نموده‌اند. روند غالب خطواره‌های به دست آمده با سه روش سنجش از دور در منطقه حدود $N330^\circ$ است (Khademi et al., 2021).

دگرگونی بسیار ضعیف در سنگ‌های منتسب به سازند سردر احتمالاً تحت تأثیر رخداد تکتونیکی کیمیرین پیشین روی داده‌اند. به‌طور کلی چین خوردگی ملایم و گسل خوردگی نامنظم، مشخص‌کننده ساختمان‌های لایه‌های تریاس، کرتاسه و ترشیر بلوک لوت است (Stöcklin et al., 1972). به غیر از

نفوذی متحمل دگرگونی مجاورتی نیز گردیده‌اند. برونزدی به نسبت کوچک از سنگ آهک پرمین در شمال دیده می‌شود. سنگ‌های مزوزوئیک متشکل از واحد شیلی و ماسه سنگی تریاس بالایی - ژوراسیک پایینی و سنگ آهک کرتاسه هستند که به‌طور کلی در شمال خاور ورقه برونزد دارند. در آغاز ترسیر آتشفشان به نسبت گسترده‌ای در بخش‌های جنوبی - مرکزی و شمالی منطقه آغاز شده که سپس با نهشته‌های ولکانی ادامه می‌یابد. ترکیب شیمیایی گدازه‌های این واحد بیشتر آندزیتی و اندکی آگلومرا است. دومین فاز آتشفشانی منطقه در ائوسن بالایی روی داده که بیشتر دارای ترکیب آندزیت - بازالتی و بازالتی و آندزیتی است و به‌طور عمده در بخش جنوبی ورقه گسترش دارد. یک فاز پلوتونیزم گسترده در اولیگوسن آغازین یا شاید ائوسن بالایی در بخش شمالی و مرکزی ورقه روی داده است که در حال حاضر بخش‌های کوهستانی شمال ورقه را در بر می‌گیرد. انباشته‌های قاره‌ای پلیوکواترنر از دیگر نهشته‌های دارای گسترش در این ورقه هستند.

به‌طور کلی دوره پالئوسن - ائوسن در گستره منطقه با سنگ‌های آتشفشانی و ولکانی کلاستیک مختلف مشخص می‌شود که با توجه به شرایط سنی و ترکیبی می‌توان آن‌ها را به سه واحد تقسیم نمود:

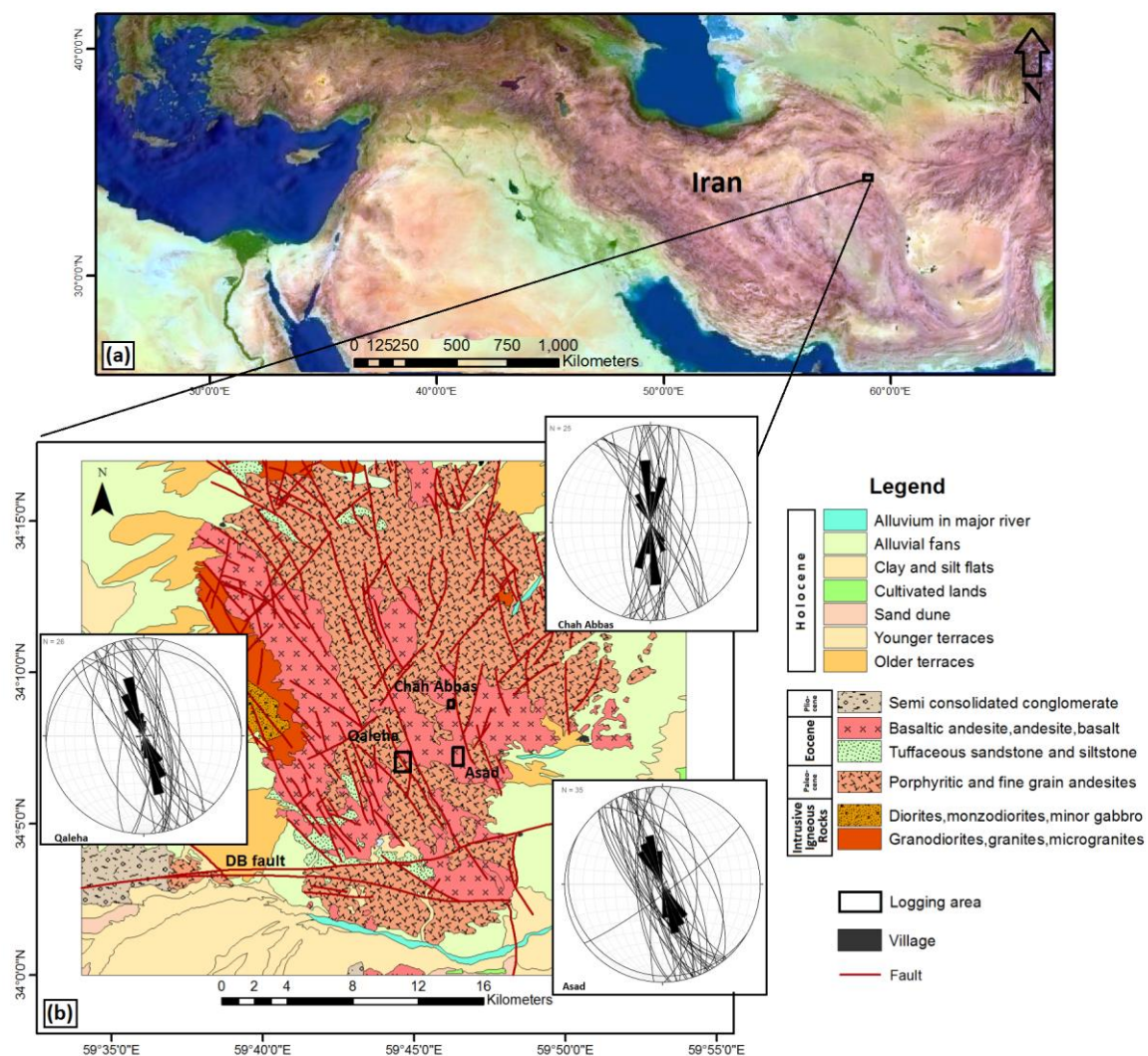
واحد زیرین که تصور می‌شود به سن پالئوسن - ائوسن پایینی باشد، به‌طور کلی، متشکل از آندزیت‌ها - آگلومراها، ریوداسیت‌ها، توفها و برش‌های آتشفشانی است. این واحد از شمال تا جنوب ورقه گسترش یافته است. این فعالیت آتشفشانی بر روی هم، در محیط دریایی کم عمق یا خشکی انجام گرفته است.

واحد پایینی تا میانی که به‌طور کلی ولکانی کلاستیک است و در جنوب و مرکز ورقه گسترش دارد. این واحد به‌طور عمده اپی کلاستیک است که ویژگی‌های نهشته‌های فلیشوئیدی را نیز تا اندازه‌ای داراست. سنگ‌های این واحد بیشتر از توفیت‌ها، کنگلومراهای توفی و سیلتستون، آندزیت و مادستون تشکیل شده‌اند.

واحد بالایی که با بازالت‌ها و به مقدار کمتر آندزیت‌ها مشخص می‌شود. یک نمونه از سنگ‌های این واحد در سال ۱۹۷۹ به روش پتاسیم - آرگن در باختر چاه متار تعیین سن شده و سن ائوسن فوقانی را به دست داده است. باتوجه به سن

داده است که اثر این فاز در بیشتر نقاط ایران ثبت شده است. چین خوردگی و گسل خوردگی نئوژن پسین باعث بوجود آمدن شکل کلی رشته و حوضه (Basin and Range) کنونی در منطقه شده است. باتوجه به اینکه محیط تکتونیکی توده گرانیتوئیدی زوزن یک محیط مرتبط با فرورانش است و باتوجه به آنکه سنگهای آتشفشانی بروزند یافته در محدوده مورد سخن تمایلات کالکواکالان نشان می‌دهد، به نظر می‌رسد ماگماتیسم روی داده در گستره مورد مطالعه بطور کلی یک ماگماتیسم مرتبط با فرورانش باشد (Blourian and Safari, 2005).

رخداد کیمبرین پیشین، از فازهای اصلی بعدی دگرشکلی، می‌توان به رخداد کیمبرین پسین اشاره کرد که سنگ‌های رسوبی ژوراسیک را در شمال خاوری ورقه تحت تأثیر قرار داده است و دگرشیبی مشاهده شده بین سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه به احتمال زیاد به دلیل این فاز دگرشکلی بوجود آمده‌اند. در پالئوسن - ائوسن بطور کلی وضعیت فشاری حاکم نبوده است و آتشفشانی گسترده تا ائوسن بالایی ادامه داشته است. یک فاز پلوتونیسیم گسترده، در منطقه در الیگوسن رخ



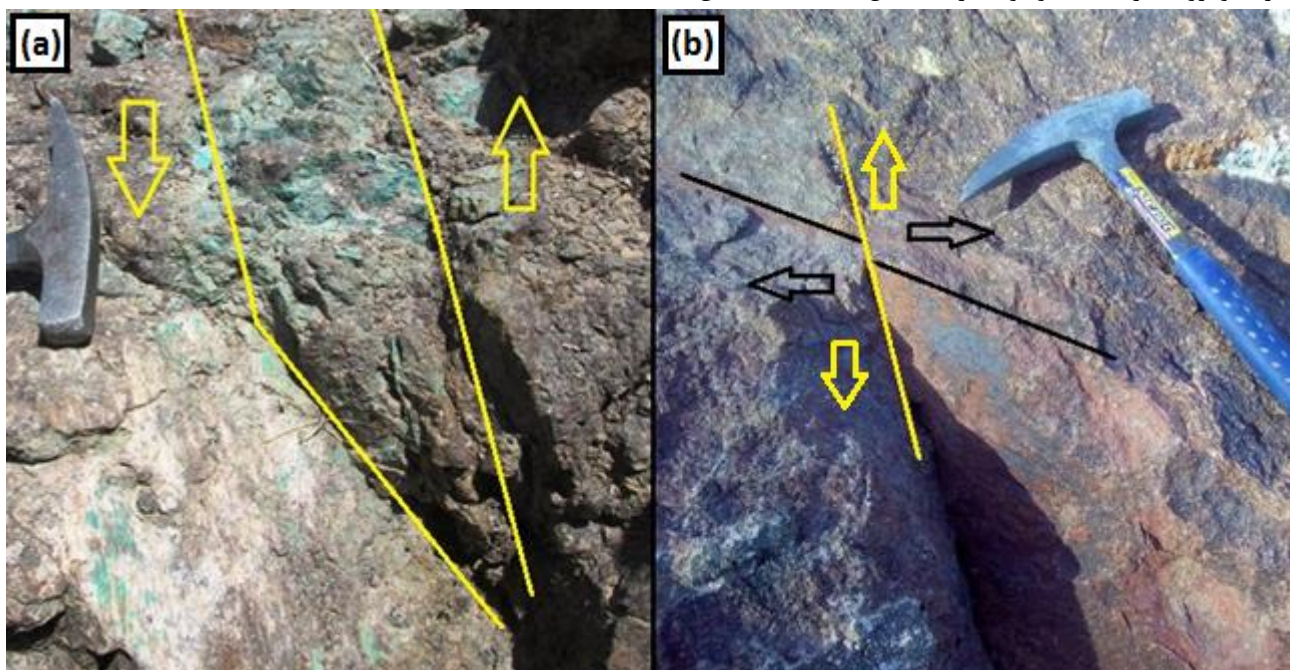
شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست خاورمیانه و (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از Blourian and Safari, 2005) و نمایش سه ناحیه اکتشافی چاه عباس، قلعه‌ها و اسد همراه با استریوگرام درزه‌های کششی در هر منطقه. Fig 1. (a) Location of the study area on Landsat photo of the Middle East, and (b) Geological map of the study area (modified from Bolourian and Safari, 2005) showing three exploration sites: Chah Abbas, Qaleha, and Asad, with stereogram of tensioned joints.

عناصر در بخش‌های مرکزی، جنوب خاوری و جنوب باختری منطقه بالاتر است. در قسمت‌های جنوبی، کانی‌سازی رگه‌ای نسبت به نوع توده‌ای بیشتر مشاهده می‌شود (Sereshgi et al., 2019). کانه‌زایی در محدوده اکتشافی به اشکال رگه‌ای، رگچه‌ای، افشان و برشی بوده و مشتمل بر دو نوع شامل رگه‌های سیلیسی- کربناتی با امتداد شمال باختری- جنوب خاوری با کانه‌زایی طلا- نقره- مس- سرب و رگه‌های کربناتی- سیلیسی با امتداد شمال خاوری- جنوب باختری است. مطالعات کانی‌شناسی، ساخت، بافت و مقایسه رگه‌های پلی متال با کانسارهای مشابه در سایر نقاط جهان نشان‌دهنده آن است که کانی‌سازی در این منطقه قابل مقایسه با سیستم‌های اپی ترمال سولفیداسیون پایین تا سولفیداسیون متوسط می‌باشد. ارزیابی‌های انجام گرفته نشان داد رگه‌های کانه دار در این محدوده عیار ۰/۸۶ درصد مس ۷۵/۲ گرم بر تن نقره می‌باشد (Hadizadeh and Azadi, 2023).

در شمال عرض جغرافیایی ۳۴ درجه، ساختارهای غالب، گسل‌های چپ لغز درونه و دشت بیاض هستند. که تصور می‌شود با چرخش ساعت گرد بلوک مابین آن‌ها هماهنگی دارد. این ناحیه در شمال گسل‌های راست لغز فعال در زمین درز سیستان قرار دارد که ممکن است بخش بزرگی از برش راست لغز با جابه‌جایی حدود ۲۰ میلی متر در سال بین ایران و افغانستان را شامل شود. منطقه دشت بیاض متحمل چندین زلزله بزرگ در قرن بیستم و نیز فعالیت‌های تاریخی فراوان شده است (Walker et al., 2004).

۲-۳- زمین‌شناسی اقتصادی و پتانسیل‌های معدنی

داده‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که دیوریت‌های منطقه از ذوب بخشی متبازالت‌ها در طی فروران‌ش صفحه اقیانوسی به زیر بلوک لوت در ترشیری منشأ گرفته اند (Mazhari and Safari, 2013). زون‌های کانی‌سازی مختلفی از مس، نقره، طلا، سرب و روی در منطقه وجود دارند (شکل ۲a). غلظت این



شکل ۲- (a) کانی‌سازی مس در سطح گسل امتدادلغز با شواهد کششی و (b) یک جفت از گسل‌های امتدادلغز با زاویه حدود ۷۰ درجه نسبت به یکدیگر.

Fig 2. (a) Copper mineralization on the strike-slip fault surface with the tension evidence, and (b) Couple of strike-slip faults with an angle of about 70 degrees.

ناحیه اکتشافی چاه عباس واقع در شمال محدوده مورد مطالعه، دارای رگه‌های سیلیسی - کربناتی برشی شده کم ضخامت (از ۴۰ سانتی‌متر تا بیش از ۷۰ سانتی‌متر) حاوی مالاکیت، پیریت و کالکوپیریت و بورنیت بوده که دارای مقادیر قابل توجهی از

۳- داده‌ها و روش‌ها

مطالعات بر سه ناحیه اکتشافی چاه عباس، محمد اسد و قلعه‌ها که توسط سازمان زمین‌شناسی ایران مورد بررسی و حفر گمانه قرار گرفته، متمرکز شده است (شکل ۱b).

روستای قلعه‌ها و رگه‌ها و زون‌های کانه دار جنوب شرقی این روستا است.

۳-۱- رگه‌های کششی

شکل ۲، نمونه‌ای از دو فاز امتدادلغز چپ‌بر در منطقه را نشان می‌دهد که مابین آن، یک فاز کششی نیز در راستای گسل خوردگی اتفاق افتاده است. چنان‌که فاز کششی توسط فاز امتدادلغز ۳ جابه‌جا شده اما فاز ۱ امتدادلغز روی آن تاثیری نداشته است. بر این اساس می‌توان تقدم و تاخر رخداد‌های ساختمانی را پیش بینی نمود. شکل ۳ نیز مجموعه‌ای از درزه‌های کششی را نشان می‌دهد که به نظر می‌رسد فاز کششی ثانویه اندکی پس از فاز کششی اولیه و عمود بر آن اتفاق افتاده است. رابطه تقدم و تاخر بین ساختارها نشان می‌دهد که کانی‌سازی همزمان یا اندکی پس از فعالیت گسل‌های نسل سوم در منطقه رخ داده است (Khademi et al., 2023).

عناصر مس، طلا و نقره می‌باشند. این ناحیه دارای چندین رگه کم ضخامت و کارهای قدیمی کوچک است.

ناحیه اکتشافی کلاته محمد اسد واقع در بخش جنوب شرقی محدوده اکتشافی ده خطیب حاوی دو رگه سیلیسی به طول حدود ۸۰۰ متر است که این دو دارای شیب‌هایی از ۷۰ تا ۸۵ درجه به سمت شمال شرقی هستند. از بین این دو، رگه شمالی دارای عیارهای بالایی از عناصر مس و نقره است. این رگه کانی‌سازی دارای ضخامت‌هایی از ۱ متر تا بیش از ۳ متر بوده که در بخش‌های سطحی حاوی کانی‌های مالاکیت و گاهی کالکوسیت می‌باشند. این ناحیه دارای چندین رگه کم ضخامت و کارهای قدیمی کوچک است.

ناحیه اکتشافی قلعه‌ها واقع در بخش جنوب غربی محدوده اکتشافی ده خطیب شامل رگه‌ها و زون‌های آلتره واقع در شمال غربی روستای مخروطه قلعه‌ها، رگه کانه دار واقع در جنوب غربی



شکل ۳- سه فاز از تغییر شکل؛ یک فاز کششی بین دو گسل خوردگی چپ‌لغز.

Fig 3. Three phases of deformation: a stretching phase between two sinistral strike-slip faulting.



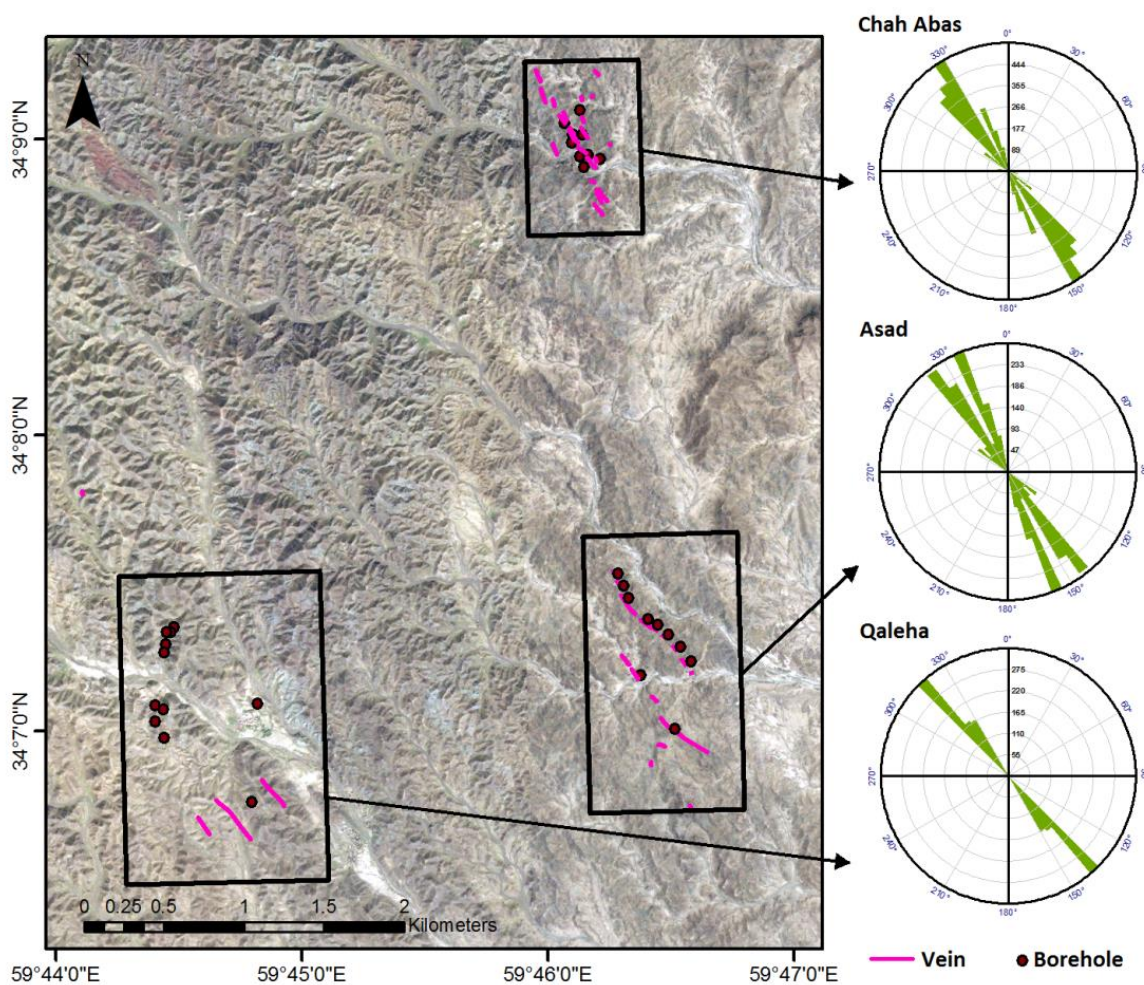
شکل ۴- رگه‌های کششی در دو جهت عمود بر هم (۲ و ۳)، در پی یک فرآیند شکست (۱).

Fig 4. Tension veins in two perpendicular directions (2, 3) following a fracture process (1).

۳-۲- داده‌های حاصل از حفاری

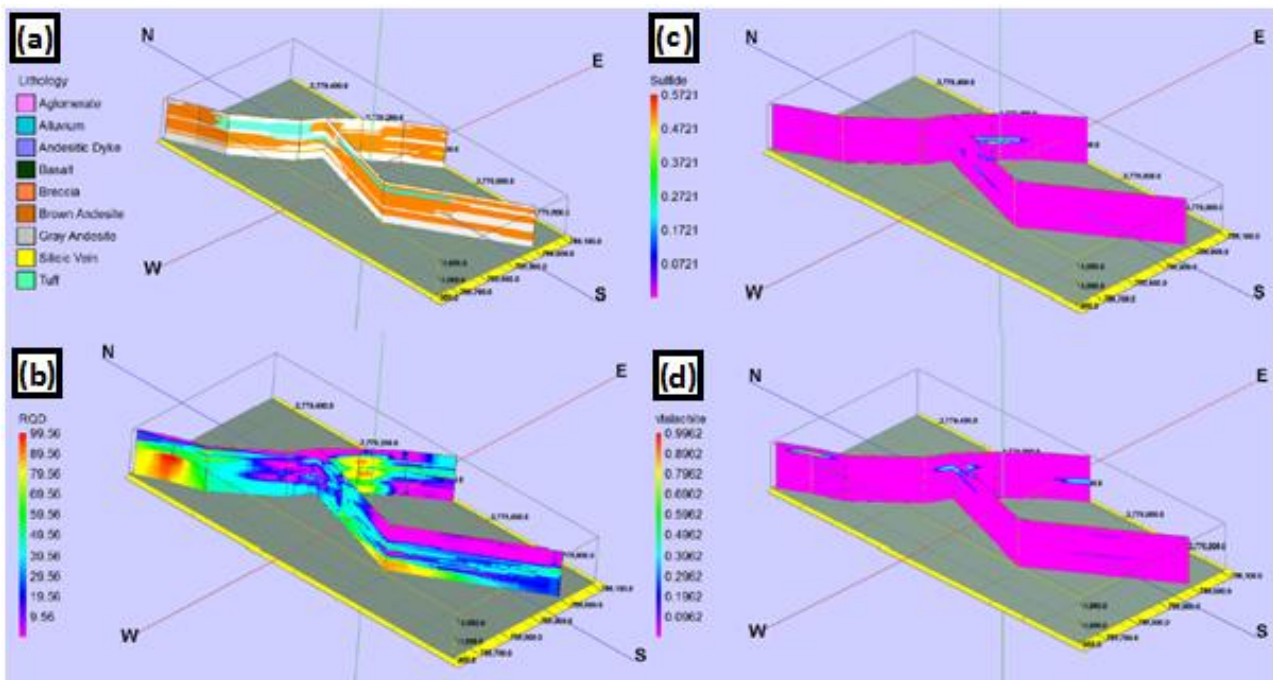
براساس شواهد سطحی کانی‌سازی، به ترتیب تعداد ۱۲، ۹ و ۱۰ گمانه در سه ایستگاه اسد، چاه عباس و قلعه‌ها به عمق جمعاً ۲۲۷۸ متر توسط سازمان زمین‌شناسی ایران حفر شده است (شکل ۵). اطلاعات حاصل از مغزه‌ها شامل سنگ شناسی، کیفیت مغزه و انواع کانی‌سازی بوده است. تعیین کیفیت سنگ یا (Rock Quality Designation) RQD پارامتری است که قضاوت کمی از کیفیت توده سنگ به دست آمده از مغزه‌های حفاری را ارائه می‌دهد. از این پارامتر می‌توان برای شناسایی

مناطق خرد شده حاصل از عملکرد سیستم‌های گسلی استفاده کرد (MadaniEsfahani et al., 2013). با استفاده از داده‌های حاصل از مغزه‌نگاری، نمودارهای سه بعدی سنگ‌شناسی، RQD، کانی‌سازی اکسید و کانی‌سازی سولفید مس توسط نرم افزار Rockworks ترسیم گردید (شکل‌های ۶ تا ۹). نمودارها نشان می‌دهد که در دو ناحیه اسد و چاه عباس که نزدیکتر به گسل اصلی دشت بیاض هستند، کانی‌سازی مس در نواحی با RQD کمتر رخ داده است که احتمالاً مربوط به عملکرد گسل‌های فرعی منشعب از گسل دشت بیاض است.



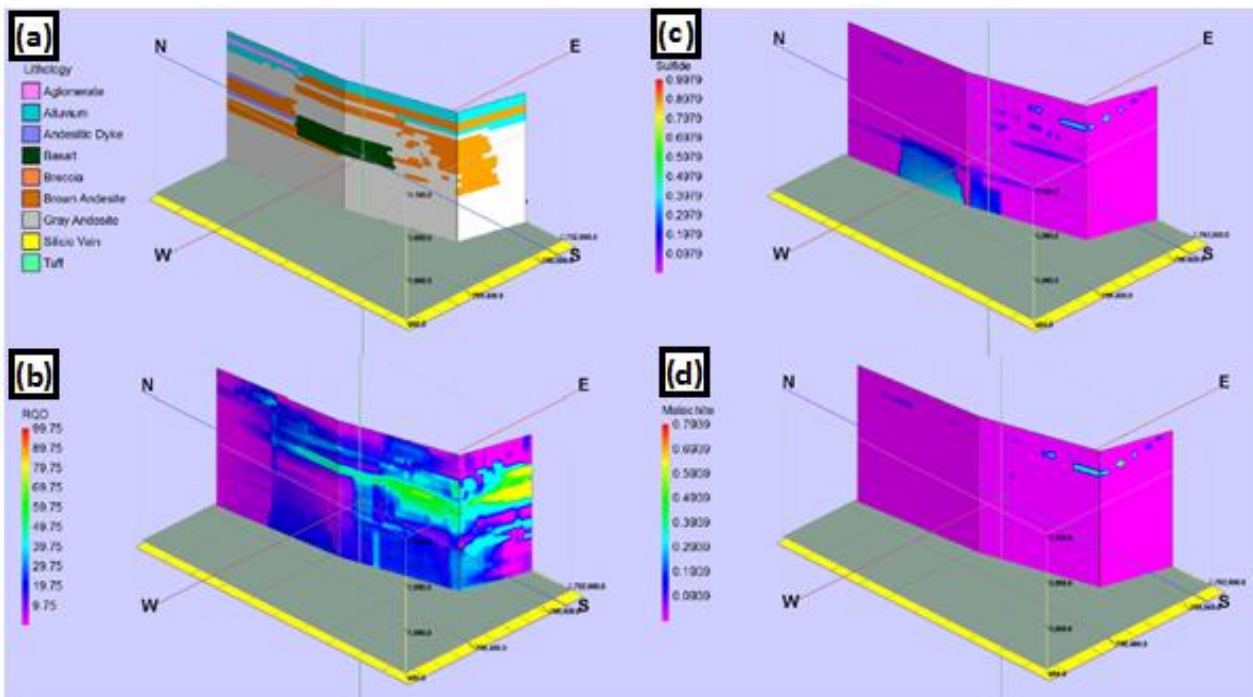
شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای سه ناحیه حفاری و مکان گمانه‌های حفر شده به همراه دیاگرام روند کانی‌سازی رگه ای مس و نقره در منطقه.

Fig 5. Satellite image of of three drilling sites and plotted borehole locations, with vein mineraliation of copper and silver diagram.



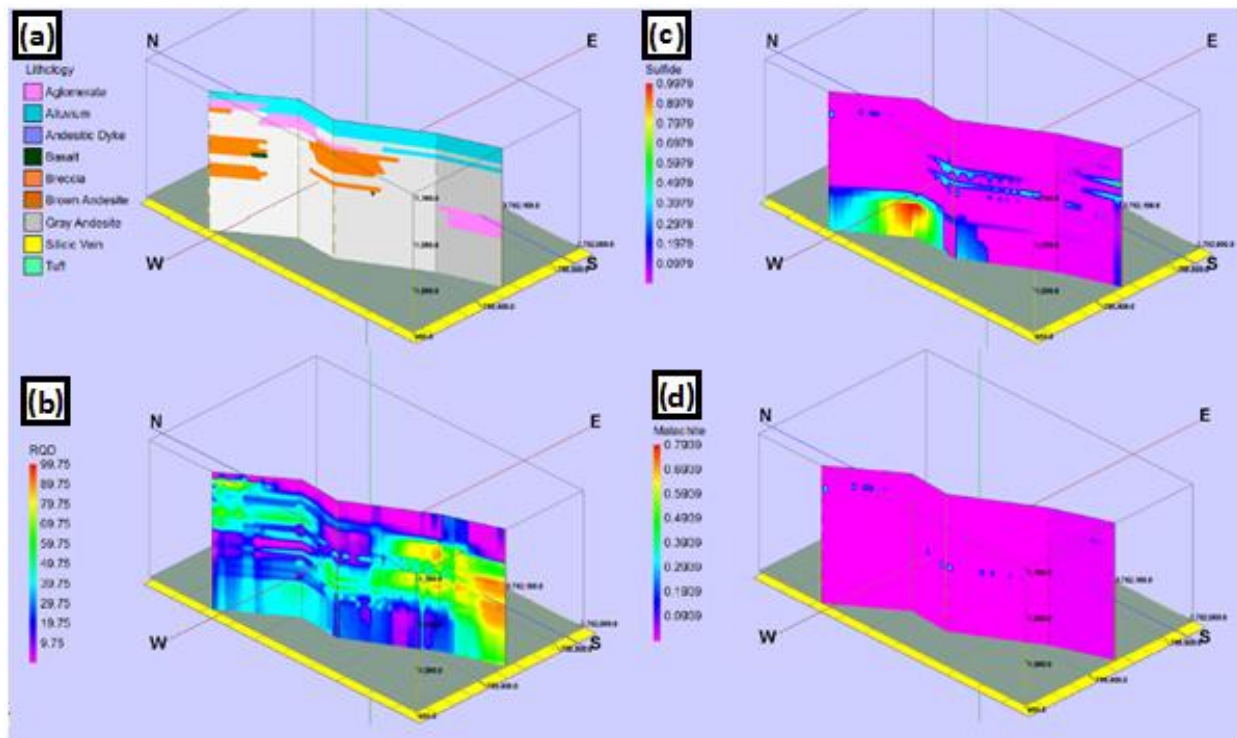
شکل ۶- نمودار فنی شکل (a) سنگ‌شناسی، (b) RQD، (c) کانی‌سازی سولفید مس و (d) کانی‌سازی اکسید مس در منطقه اسد.

Fig 6. Fence diagram of (a) lithology, (b) RQD, (c) Sulfide mineralization, and (d) Oxide mineralization in Asad area.

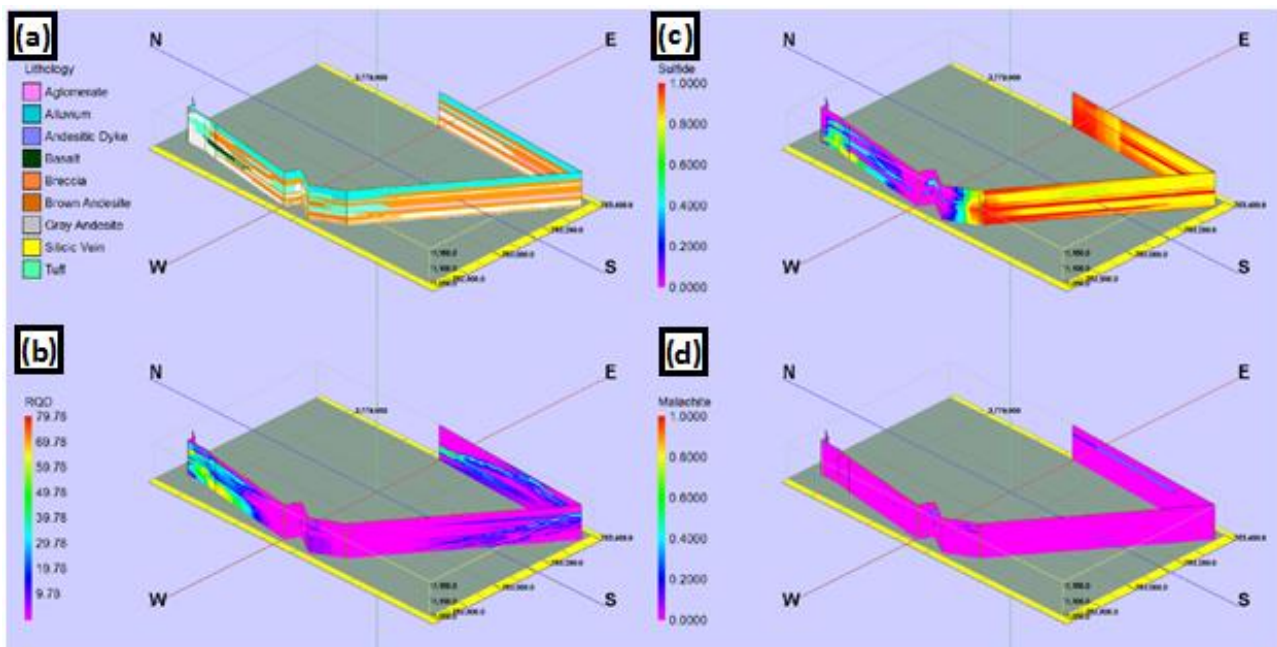


شکل ۷- نمودار فنی شکل (a) سنگ‌شناسی، (b) RQD، (c) کانی‌سازی سولفید مس و (d) کانی‌سازی اکسید مس در منطقه چاه عباس خاوری.

Fig 7. Fence diagram of (a) lithology, (b) RQD, (c) Sulfide mineralization, and (d) Oxide mineralization in Chah Abas eastern area.



شکل ۸- نمودار فنی شکل (a) سنگ‌شناسی، (b) RQD، (c) کانی‌سازی سولفید مس و (d) کانی‌سازی اکسید مس در منطقه چاه عباس باختری.
Fig 8. Fence diagram of (a) lithology, (b) RQD, (c) Sulfide mineralization, and (d) Oxide mineralization in Chah Abbas western area.



شکل ۹- نمودار فنی شکل (a) سنگ‌شناسی، (b) RQD، (c) کانی‌سازی سولفید مس و (d) کانی‌سازی اکسید مس در منطقه قلعه ها.
Fig 9. Fence diagram of (a) lithology, (b) RQD, (c) Sulfide mineralization, and (d) Oxide mineralization in Qaleha area.

۳-۳- نودول‌های سیلیسی

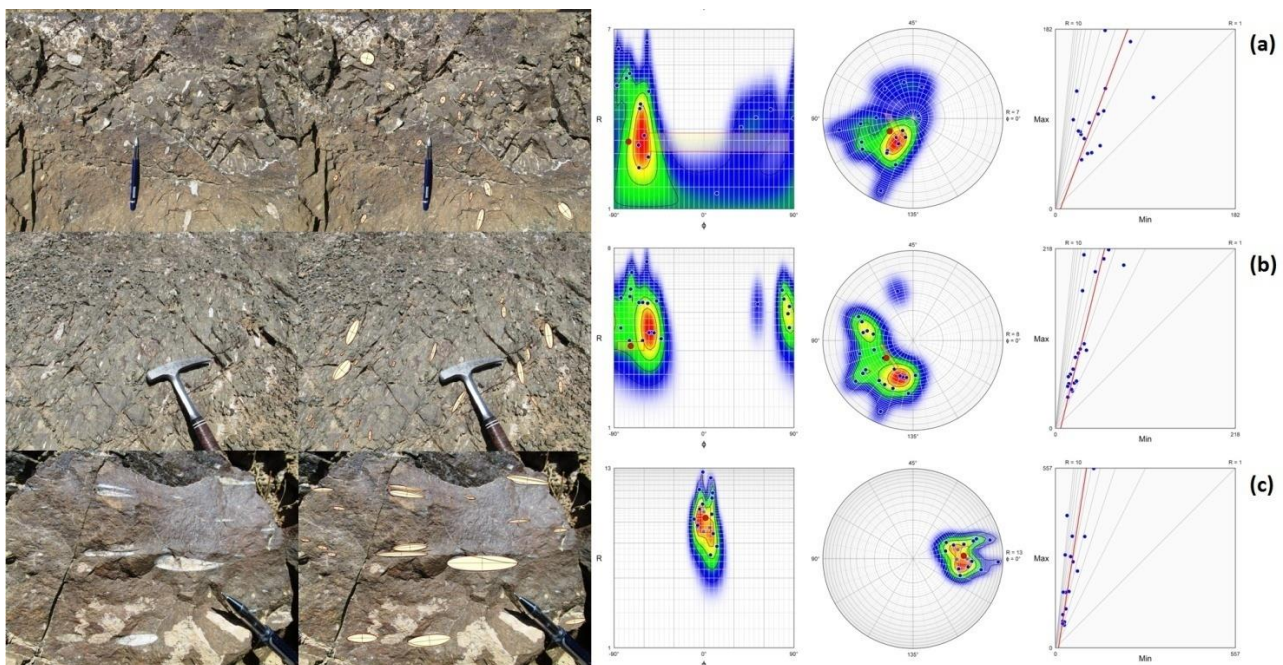
در بررسی میدانی از منطقه، نودول‌های سیلیسی دارای کشیدگی در یک جهت در سه ایستگاه اکتشافی از نظر مقادیر نسبت ابعادی اندازه گیری شد و داده‌های جمع آوری شده از بیش از ۱۲۰ نقطه در نرم افزار Ellipsefit وارد و محاسبه گردید (شکل ۱۱).

جدول (۱) مقادیر میانگین پارامترهای کرنش تکتونیکی را

در هر ایستگاه نشان می‌دهد که در آن R_{xz} مقدار بیضویت (نسبت بین محورهای بلند و کوتاه بیضی)، θ زاویه بین ISA (محورهای کششی آنی) باصفحه برشی، و K ضریب کرنش سه‌بعدی بیضی است (Fossen, 2016). مطابق شکل (۱۲)، پارامترها در نمودار تعیین ضریب شکل بیضی کرنش ترسیم شدند. شکل (۱۳) نمایه‌های صفحه XZ بیضی کرنش را در سه ایستگاه اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمونه‌هایی از نودول‌های سیلیسی ایجادشده در سنگ‌های آندزیتی منطقه.
Fig 10. Samples of silica nodules formed in andesite rocks of the region.

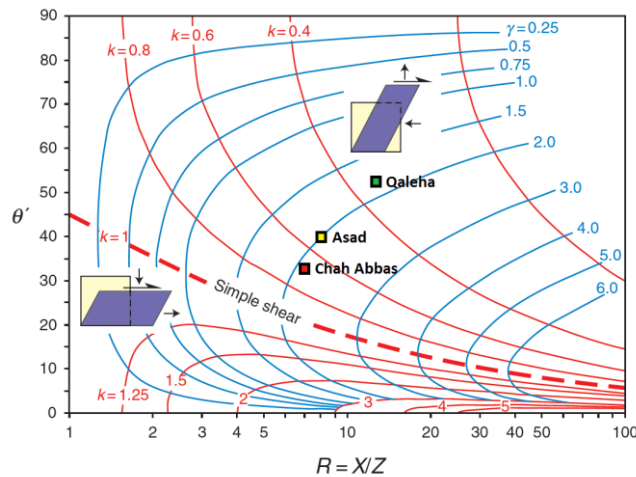


شکل ۱۱- نمونه‌هایی از نودول‌های سیلیسی باز شده و محاسبه مقادیر کرنش تکتونیکی در صفحه XZ بیضوی کرنش با استفاده از R_f/θ و روش‌های قطبی در ایستگاه‌های (a) چاه عباس، (b) اسد و (c) قلعه‌ها.

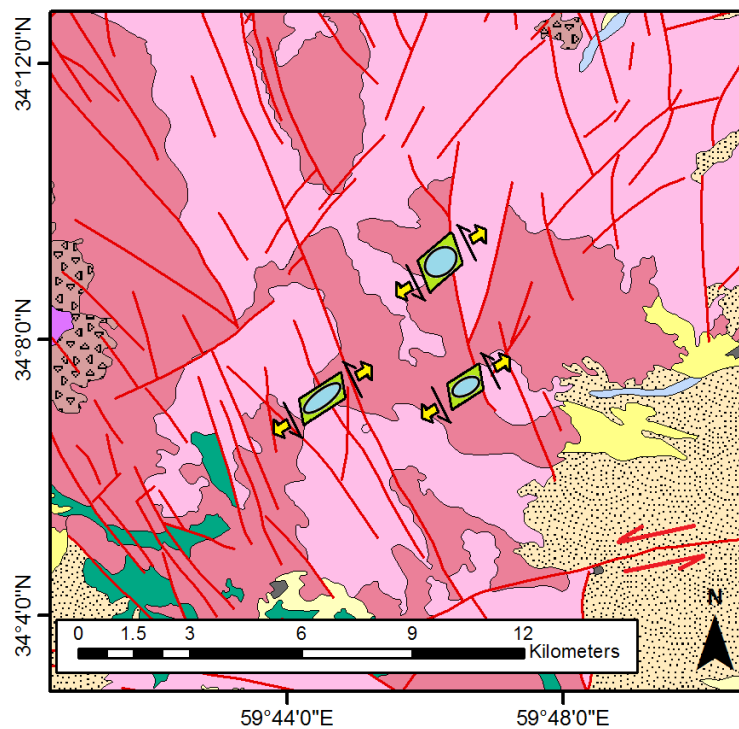
Fig 11. Samples of opened silica nodules and calculation of tectonic strain values in the XZ plane of the strain ellipsoid using R_f/θ and polar methods in (a) Chah Abbas, (b) Asad, and (c) Qaleha stations.

جدول ۱- میانگین مقادیر پارامترهای کرنش تکتونیکی در سه ایستگاه.
Table 1. Mean amounts of tectonic strain parameters in three stations.

Station	Rxz	θ	K
Chah Abbas	7	32	0.7
Asad	8	41	0.55
Qaleha	13	53	0.35



شکل ۱۲- تعیین ضریب شکل بیضی کرنش با استفاده از تابع تصویری $Rxz-\theta-K-\gamma$ (Fossen, 2016).
Fig 12. Determining the strain ellipsoid shape coefficient using $Rxz-\theta-K-\gamma$ image function (Fossen, 2016).



شکل ۱۳- وضعیت صفحه XZ بیضی کرنش در سه ایستگاه اندازه گیری شده.
Fig 13. Profiles of the XZ plane of the strain ellipsoid at three measured stations.

۴- نتایج و بحث

- نشان می‌دهد.
- ۱- با بررسی نمودارهای فنسی می‌توان به نکات زیر اشاره نمود: در ایستگاه اسد، در مناطق با RQD پایین، کانی‌سازی مس اکسیدی و در نقاط با RQD بالاتر، کانی‌سازی مس از نوع سولفید مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که کانی‌سازی اکسیدی به صورت ثانویه و پس از تحت تاثیر قرارگرفتن توسط سیالات، در نقاط دارای ضعف جای گرفته است.
- ۲- در ایستگاه قلعه‌ها که بیشترین تغییر شکل برش محض را دارد، کیفیت مغزه (RQD) پایین تر و کانی‌سازی مس بیشتر است. این مساله نشان می‌دهد که کانی‌سازی مس در ارتباط مستقیم با فرآیند کشش و همزمان با فعالیت پایانه گسل دشت بیاض اتفاق افتاده است.
- ۳- در ایستگاه چاه عباس که به برش ساده نزدیک تر است، رفتاری تقریباً عکس ایستگاه قلعه‌ها مشاهده می‌شود. بدین معنی که در نقاط دارای شکستگی بالاتر، کانی‌سازی مشاهده نمی‌شود و کانی‌سازی انجام شده احتمالاً به عملکرد دایک بازالتی نفوذ کرده در آندزیت‌ها مربوط می‌شود.

۵- نتیجه گیری

- نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت موارد زیر خلاصه نمود:
- اطلاعات برداشت شده از درزه‌های باز سیلیسی، هم راستایی آن‌ها را با روند کانی‌سازی مس و نقره در محدوده دارد.

مراجع

- Bailey, C.M., Eyster, E.L., 2003. General shear deformation in the Pinaleno mountains metamorphic core complex, Arizona. *Journal of Structural Geology* 25(11), 1883-1892., ISSN 0191-8141. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00044-0)
- Blenkinsop, T.G., Oliver, N.H.S., Dirks, P.G.H.M., Nugus, M., Tripp, G., Sanislav, I., 2020. Chapter 1: Structural geology applied to the evaluation of hydrothermal gold deposits. In: Julie V., Rowland, David A., Rhys (Eds.), *Applied structural geology of ore-forming hydrothermal systems*. Society of Economic Geologists. 20-22 PP. <https://doi.org/10.5382/rev.21>
- Blourian, Gh., Safari., 2005. Geology map of Zoozan, scale 1:100000, Geology Survey of Iran.
- Drew, J.L., 2005. A tectonic model for spatial occurrence of porphyry copper and polymetallic vein deposits applications to Central Europe. Scientific investigation report 5272. U.S. Geological Survey. P.24. <https://doi.org/10.3133/SIR20055272>
- Fossen, H., 2016. Structural geology, second edition. Cambridge University Press. P. 520.
- Funedda, A., Naitza, S., Buttau, C., Cocco, F., Dini, A., 2018. Structural controls of ore mineralization in a polydeformed basement: Field examples from the Variscan Baccu Locci shear zone (SE Sardinia, Italy). *Minerals* 8, 456. <https://dx.doi.org/10.3390/min8100456>

- Gloyn-Jones, J.N., Basson, I.J., Stoch, B., Koegelenberg, C., McCall, M. J., 2022. Integration of stress–strain maps in mineral systems targeting for IOCG mineralization within the Mt. Woods Inlier, Gawler Craton, South Australia. *Minerals* 12, 699. <https://doi.org/10.3390/min12060699>
- Hadizadeh, H., Azadi, M., 2023. Final report of the second phase of copper and associated elements exploration in the Deh Khatib Khaf exploration area, northeast of the Lut block, Geology survey and Mineral Exploration, Northeast Region brach, 618 P.
- Khademi, V., Heyhat, M.R., Forghani, A., Khatib, M.M., Zarrinkoub, M.H., Hadizadeh, Kh. H., 2021. An application of remote sensing imagery for geological lineaments extraction over Kaybarkuh region in east of Iran. *World Journal of Geomatics and Geosciences* 1, 50–59. <https://doi.org/10.31586/wjgg.2021.168>
- Khademi, V., Heyhat, M.R., Khatib, M.M., Zarrinkoub, M.H., Hadizadeh, H., 2023. Structural controls mineralization in strike-slip fault terminals, case study: Kaybarkuh region in east of Iran. *World Journal of Geomatics and Geosciences* 3(1), 13–21. <https://doi.org/10.31586/wjgg.2023.695>
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- Madani Esfahani, N., Asghari, O., 2013. Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD). *Arabian Journal of Geosciences* 6, 3737–3747. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0633-3>
- Mazhari, S.A., Safari, M., 2013. High-K calc-alkaline plutonism in Zouzan, NE of Lut block, eastern Iran: An evidence for arc related magmatism in Cenozoic. *Journal of Geology Society of India* 81, 698–708. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0091-x>
- Micklethwaite, S., Sheldon, H. A., Baker, T., 2010. Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery, *Journal of Structural Geology* 32, 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.10.009>
- Neubauer, F., 2005. Structural control of mineralization in metamorphic core complexes. In: Mao, J., Bierlein, F.P., (Eds.), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, Berlin, Heidelberg. 561–564 pp. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_144
- Sereshgi, H.A., Ganji, A., Ashja, A.A., Torshizian, H., Taheri, J., 2019. Detection of metallic prospects using staged factor and fractal analysis in Zouzan region, NE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 4, 256–266. <https://doi.org/10.30495/ijes.2019.669400>
- Stöcklin, J., Eftekhari-Nezhad, J., Hushmand Zadeh, A., 1972. Central Lut Reconnaissance, East Iran. *Geological survey of Iran Report*, 22, PP. 62.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chéry, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysics Journal International* 157, 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>
- Walker, R.T., Jackson, J., Baker, C., 2004. Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophysics Journal International* 157, 265–282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.02179.x>