



Fracture Analysis of the Changarzeh Pb-Ag Deposit in the Malayer-Isfahan Metallogenic Belt, Northeastern Isfahan

Seyedeh Zahra Hajiloo ¹ , Reza Alipoor ^{2*} , Ahmad Hosseinkhani ³

¹ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Basic Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Ph.D., Sormak mining company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 29 September 2024

Revised: 24 February 2025

Accepted: 11 March 2025

Keywords

Fault

Fractal

Left-Lateral Strike-Slip

Mineralization

Isfahan

Sanandaj-Sirjan

*Corresponding author

Reza Alipoor

✉ r.alipoor@basu.ac.ir

ABSTRACT

The Changarzeh Pb-Ag deposit is located in the southeastern part of the Malayer-Isfahan metallogenic belt, approximately 75 km northeast of Isfahan city. The host rock of this deposit consists of Middle Triassic dolostones, and mineralization occurs in two forms: hypogene sulfide and supergene non-sulfide. This study aims to investigate the fault system of the Changarzeh deposit using fractal analysis and field surveys. So, surface and subsurface field measurements were conducted along exploration and extraction tunnels. The results indicate that the Changarzeh fault divides the study area into two zones: Abanbar and Takhtchal, and it represents the most significant structure affecting the overall deformation of the region. The northwest-southeast trending faults control the mineralization within the Changarzeh deposit and are generally intersected by northeast-southwest trending faults. Fractal analysis of the faults reveals that an increase in fault density corresponds with a higher Pb ore grade. The left-lateral strike-slip motion of the Changarzeh fault has led to the formation of secondary fractures, including R, X, and T fractures, and also bending along the fault trace has led to the formation of duplex structures.

How to cite this article

Hajiloo, S.Z., Alipoor, R. and Hosseinkhani, A., ?. Fracture Analysis of the Changarzeh Pb-Ag Deposit in the Malayer-Isfahan Metallogenic Belt, Northeastern Isfahan. *Journal of Economic Geology*, ?(?): ?-?. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1126>



©2025 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.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Malayer-Isfahan metallogenic belt is one of the most important Pb-Zn (Ag) mineralization zones in Iran, trending northwest-southeast and located within the Sanandaj-Sirjan structural zone (Karimpour and Sadeghi, 2018; Rajabi et al., 2012). Most of these deposits are formed in siltstones and carbonate rocks from the Lower to Upper Cretaceous, as well as sandstones and shales of Jurassic age. The tectonic setting for the formation of sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Malayer-Isfahan metallogenic belt was a back-arc extensional basin between the Central Iran and Sanandaj-Sirjan zones during the Early Cretaceous (Niroomand et al., 2019). The oblique convergence between the Arabian and Eurasian plates, which led to the closure of the Neo-Tethys Ocean, resulted in significant shortening, ductile and brittle deformation, accompanied by the formation of deep basement faults within an extensional setting (Mohajjel and Fergusson, 2014). These faults were later reactivated during subsequent compressional phases, forming imbricate thrust systems and duplex structures, leading to further deformation (Agard et al., 2005). The Changarzeh deposit is structurally located in the central part of the Zagros orogen and within the Sanandaj-Sirjan zone. The Triassic rock units are the most prevalent in the Changarzeh deposit area, primarily consisting of the yellow and brown dolomites of the Sotori Formation and the calcareous shale-siltstone of the Nayband Formation. Olive and gray shales of the Early Jurassic Shemshak Formation overlie the Triassic sequences. Geographically, the Changarzeh Pb-Ag deposit is located in the southeastern part of the Malayer-Isfahan metallogenic belt, approximately 75 kilometers northeast of Isfahan city and about 26 kilometers southeast of Natanz city. Therefore, in this study, the fault and fracture system of the Changarzeh deposit has been investigated through fractal analysis and field surveys.

Materials and methods

In this study, to accurately investigate the fractures of the Changarzeh Pb-Ag deposit, fault maps of the mining area were initially prepared using existing geological maps and Google Earth satellite images. Subsequently, fractal analysis was conducted using

the box-counting method (Log-Log), where the study area was divided into smaller boxes, and the fractal dimension was calculated for each box. The results of the fractal dimension calculations for the faults and their density were then compared with Pb grade data from exploratory trenches. Additionally, field surveys were carried out in multiple stages to examine the geometry and kinematics of the faults. In this context, the mine tunnels and the trenches significantly contributed to identifying faults geometry.

Result

Fractal analysis results indicate that the highest frequency of fault trends in the study area is observed for the NW-SE (N30W to N35W) and NE-SW (N25 to N30E and N70E to N75E) trends. The plotted diagrams for the fractal dimensions of the faults in six boxes of the study area indicate that F and E boxes have the highest fractal dimensions. Comparing the fractal dimensions and the distribution of Pb content across different sections of the study area reveals that zones F, E, and D, which have the highest fractal dimensions for the faults, also exhibit high Pb percent grades. In fact, the southern half of the study area shows the highest Pb percent, while the northern half, which has the lowest fractal dimensions for the faults, displays lower Pb percent grades. The most important fault structure influencing the Changarzeh deposit is the Changarzeh fault with NE-SW trend. This fault divides the study area into the Abanbar and Takhtchal zones. The attitude of the Changarzeh fault is N30E/75SE and a 30° rake angle, exhibiting a left-lateral strike-slip movement.

Discussion

The most important mineralized faults in the Abanbar zone have a trend ranging from N10W to N65W and exhibit a steep dip of 70 to 80 degrees toward the NE. In this zone, some faults also have the same trend but with a gentler dip of approximately 40 to 65 degrees toward the SW and do not exhibit mineralization. In the Takhtchal zone, the faults with a NW-SE trend are the primary structures controlling mineralization. These faults generally have a strike between N70W and N80W and, similar to the Abanbar zone, exhibit a dip toward the NE. It seems that in both zones, the NW-SE trending faults are the primary structures

controlling mineralization, and these have been displaced by NE-SW trending faults. Additionally, the NW-SE trending joints have been displaced by joints with a NE-SW trend. The fault system in the study area is generally related to secondary or lateral fractures of the main strike-slip Changarzeh fault, which exhibits a left-lateral shear mechanism. In the study area, most of the NW-SE trending faults are R-type fractures related to the Changarzeh fault zone, which likely formed during the final phase of the deformation of this fault. X-type fractures related to the Changarzeh fault zone have also formed, leading to main structural complexities. Additionally, T-type

fractures have developed in some parts of the study area. Also, along the Changarzeh main fault, duplex structures have formed in the T2 dolostone unit. These compressional structures developed at the bend of the main resulted from the left-lateral shear movement.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support from Sormak Mining Company for their assistance with field studies. They also extend their sincere thanks to the editor and reviewers of the journal *Economic Geology* for their valuable contributions.



تحلیل شکستگی‌های کانسار سرب و نقره چنگرزه در کمربند فلززایی ملایر- اصفهان، شمال شرق اصفهان

سیده زهرا حاجیلو^۱، رضا علی‌پور^{۲*}، احمد حسینخانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ دکتری، شرکت معادن سرمک، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
کانسار سرب و نقره چنگرزه در بخش جنوب شرقی کمربند فلززایی ملایر- اصفهان و در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال شرقی شهر اصفهان قرار گرفته است. سنگ میزبان این کانسار دولستون‌های با سن تریاس میانی است و کانه‌زایی به دو صورت درون‌زاد سولفیدی و برون‌زاد غیرسولفیدی تشکیل شده است. هدف از این پژوهش، بررسی سامانه گسل‌های کانسار چنگرزه با استفاده از تحلیل‌های فرکتالی و برداشت‌های صحرایی است. برای این منظور برداشت‌های صحرایی به صورت سطحی و زیرسطحی در راستای تونل‌های اکتشافی و استخراجی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که گسل چنگرزه منطقه مورد بررسی را به دو پهنه آب‌انبار و تخت‌چال تقسیم می‌کند و مهم‌ترین ساختار تأثیرگذار بر دگرشکلی کلی منطقه است. گسل‌های با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی کنترل‌کننده کانی‌سازی در کانسار چنگرزه هستند و اغلب به وسیله گسل‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی قطع شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های فرکتالی گسل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تراکم گسل‌ها، درصد عیار ماده معدنی سرب نیز بیشتر می‌شود. حرکت راستالغز چپ‌گرد گسل چنگرزه باعث تشکیل شکستگی‌های ثانویه X ، R و T و همچنین خمش در راستای این گسل باعث تشکیل ساختارهای دوپلکسی شده است.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱</p>
	<p>واژه‌های کلیدی</p> <p>گسل فرکتال راستالغز چپ‌گرد کانه‌زایی اصفهان سندج- سیرجان</p>
	<p>نویسنده مسئول</p> <p>رضا علی‌پور r.alipoor@basu.ac.ir ✉</p>

استناد به این مقاله

حاجیلو، سیده زهرا؛ علی‌پور، رضا و حسینخانی، احمد، ۴. تحلیل شکستگی‌های کانسار سرب و نقره چنگرزه در کمربند فلززایی ملایر- اصفهان، شمال شرق اصفهان.

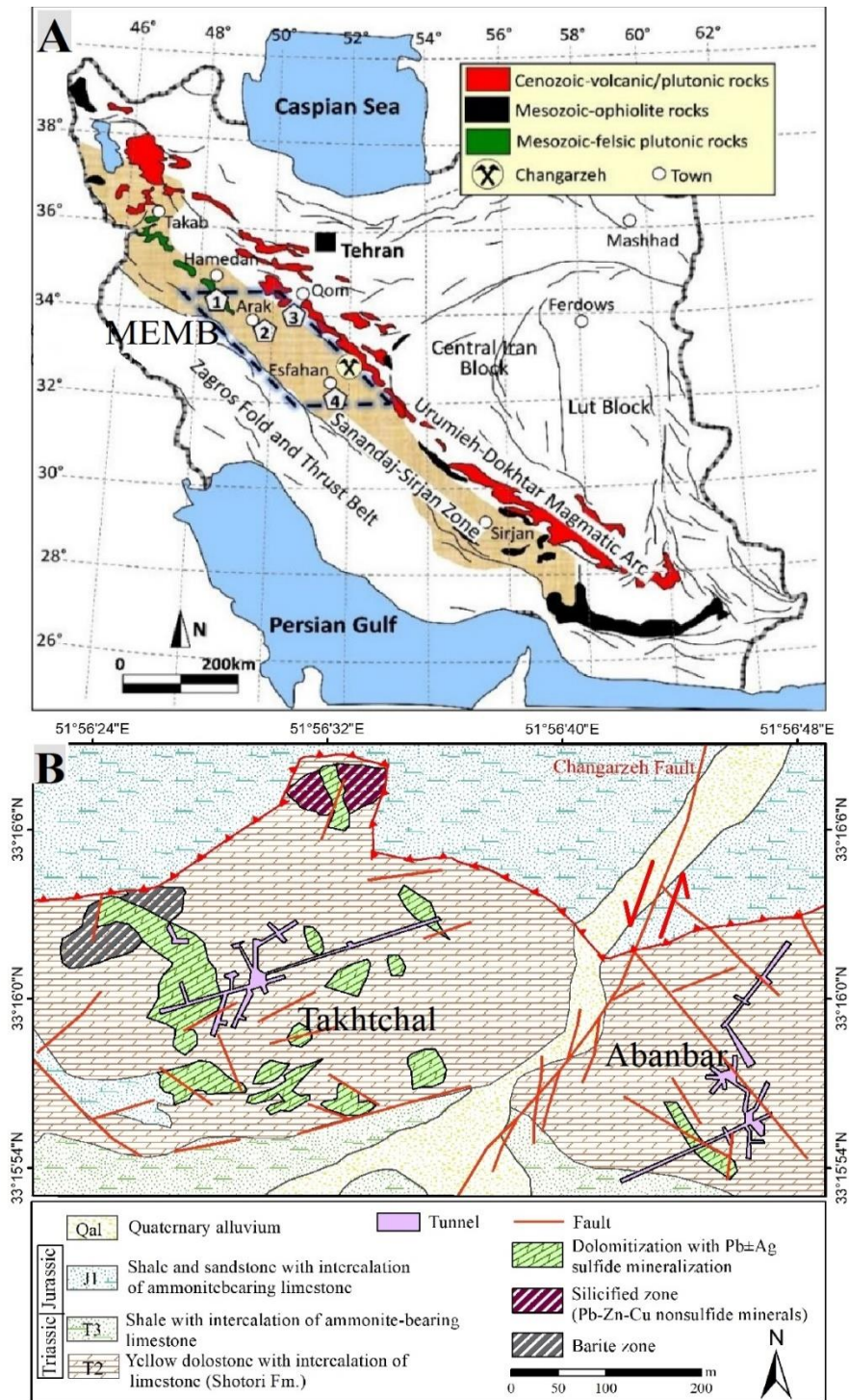
زمین‌شناسی اقتصادی، ۴(۴): ۴-۴. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1126>

مقدمه

کمر بند فلز زایی ملایر- اصفهان یکی از مهم‌ترین گستره‌های معدنی سرب و روی (نقره) ایران است که با راستای شمال غربی- جنوب شرقی و در پهنه سندانج- سیرجان قرار دارد (Rajabi et al., 2012; Karimpour and Sadeghi, 2018; Niroomand et al., 2019; Maanijou et al., 2020). این کمر بند دارای کانسارهای متعدد سرب و روی با میزان کربناته است که درون پهنه‌های گسلی و شکستگی‌های ناشی از آن تجمع پیدا کرده‌اند (Ehya et al., 2010). بیشتر این کانسارها در سیلتستون‌ها و سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین تا بالایی و ماسه‌سنگ و شیل‌های به سن ژوراسیک تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2012). کانسارهای ایرانکوه، عمارت، راونج و آهنگران از مهم‌ترین کانسارهای سرب و روی کمر بند فلز زایی ملایر- اصفهان هستند (Ghazban et al., 1994; Ehya et al., 2010; Meshkani et al., 2011) (شکل ۱). ماهیت بیشتر این کانسارها نسبت به سنگ دربرگیرنده به صورت چینه کران تا چینه سان است (Momenzadeh et al., 1979). محیط زمین‌ساختی برای تشکیل کانسارهای سرب و روی با میزان رسوبی در کمر بند فلز زایی ملایر- اصفهان یک حوضه کششی پشت کمانی بین پهنه‌های ایران مرکزی و سندانج- سیرجان در زمان کرتاسه زیرین بوده است (Niroomand et al., 2019). در واقع هم‌گرایی مایل بین صفحه‌های عربی و اوراسیا که باعث بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس شد، باعث کوتاه‌شدگی زیاد و تشکیل گسل‌های راندگی و مورب لغز شده است (Mohajjel and Fergusson, 2014). این گسل‌ها سپس در فازهای بعدی و فشارشی به صورت سامانه راندگی‌های فلسی و ساختارهای دوپلکسی باعث دگرشکلی شده‌اند (Agard et al., 2005).

کانسار سرب و نقره چنگرزه در بخش جنوب شرقی کمر بند فلز زایی ملایر- اصفهان و در فاصله ۷۵ کیلومتری شمال شرقی شهر اصفهان و حدود ۲۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان نظنز واقع شده است. این کانسار از معادن نسبتاً قدیمی استان اصفهان است که در سال‌های دور در آن به صورت زیرزمینی عملیات

اکتشافی- استخراجی در حجم وسیعی انجام شده است. همچنین ذخیره قطعی این کانسار حدود ۲۵۰ هزار تن و استخراج سالیانه حدود ۱۵۰۰ تن با عیار ۱۰/۸ درصد سرب، ۱/۹۹ درصد روی و ۶۹ گرم در تن نقره است. در یک نگاه کلی منطقه مورد بررسی در زمان تریاس، تحت کشش بوده و در فازهای بعدی زمین‌ساختی، گسل‌های راندگی و فازهای جدیدتر گسل‌های راست‌الغز کنترل‌کننده جریان سیال گرمایی بوده است و در راستای آن گسل‌ها و شکستگی‌ها، کانی‌سازی به صورت رگه‌ای شکل گرفته است (Shavvakhhi et al., 2023). این کانی‌سازی در نهشته‌های آهکی تریاس جای‌گیری کرده است. در واقع، با گذشت زمان این محیط کششی تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی بعدی و به ویژه فازهای کوه‌زایی کرتاسه میانی و بالایی مثل فاز کوه‌زایی لارامید تحت فشارش قرار گرفته است. بنابراین در پیرامون کانسار چنگرزه و مناطق اطراف، گسل‌های معکوس کنترل‌کننده کانی‌سازی و دگرشکلی بوده و گسل‌های راست‌الغز متأخر در توزیع مجدد کانی‌سازی نقش اساسی داشته‌اند (Shavvakhhi et al., 2023). همچنین شواهد دما و شوری میان‌بار سیال نشان‌دهنده کانی‌سازی سولفیدی توسط شورابه‌های حوضه‌ای است که با آب‌های جوی رقیق شده‌اند و گسل‌های عمقی نقش مهمی در اختلاط آب‌های رقیق جوی و شورابه‌های درون حوضه‌ای غنی از فلز داشته‌اند (Tale Fazel et al., 2020). با این حال، بررسی‌های جدیدتر نشان می‌دهند به دلیل اینکه کانی‌سازی به صورت رگه‌های پرکننده گسل‌های قطع‌کننده نهشته‌های تریاس است، ابتدا واحدهای تریاس نهشته شده‌اند و بعد از آن دچار گسلش و راندگی شده و بعد از آن مایع‌های حاوی کاتیون‌های فلزی شکستگی‌ها را پر کرده و رگه معدنی تشکیل شده است که نشان‌دهنده سن کانی‌سازی جوان‌تر از ژوراسیک است (Shavvakhhi et al., 2023). همچنین تشکیل کانسارهای باریت-فلوریت پیرامون منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده کشش در کرتاسه زیرین، فشارش پس از کرتاسه تا الیگوسن، کشش در دوره الیگومیوسن، و در نهایت فشارش در میوسن و دوره‌های جوان‌تر است (Alaminia et al., 2021).



شکل ۱. A: نقشه زمین‌شناسی ساده شده ایران و موقعیت کانسار چنگرزه در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان (Tale Fazel, 2023) و B: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (Zahedi and Rahmati, 2003)

Fig. 1. A: Simplified geological map of Iran and the location of the Changarzeh deposit within the Malayer-Isfahan metallogenic belt (Tale Fazel, 2023), and B: Geological map of the study area (Zahedi and Rahmati, 2003)

جنوب شرقی گسل زفره دگرشکلی‌هایی را در واحدهای پرمین-تریاس تا قبل از کرتاسه زیرین ایجاد کرده است که این گسل‌های راندگی و گسل‌های امتدادلغز با مؤلفه نرمال بعدی کنترل‌کننده منشأ و توزیع دوباره بخش عمده‌ای از ذخایر سرب و روی در این بخش از پهنه ایران‌م‌رکزی شده‌اند (Shavvakhi et al., 2023). تشکیل کانسارهای باریت-فلوریت در مرکز ایران و پیرامون منطقه مورد بررسی، در طی دوره‌های متناوب زمین‌ساختی شکل گرفته است و شامل کشش در کرتاسه زیرین، فشارش پس از کرتاسه تا الیگوسن، کشش در دوره الیگومیوسن، و در نهایت فشارش در میوسن و دوره‌های جوان‌تر است (Alaminia et al., 2021). واحدهای سنگی با سن تریاس اغلب شامل دولومیت‌های زرد و قهوه‌ای سازند شتری و آهک‌های شیلی-سیلنتی سازند نایبند رخنمون زیادی در منطقه مورد بررسی دارند (شکل ۱). شیل‌های زیتونی و خاکستری با سن ژوراسیک پیشین بر روی توالی‌های تریاس قرار گرفته است. در واقع، با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی موجود (نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰) (Zahedi and Rahmati, 2003) و برداشت‌های صحرایی، واحد دولستون زردرنگ (T2) با ضخامت ۶۱۰ متری با میان لایه‌های آهکی روشن با سن تریاس میانی (سازند شتری) مهم‌ترین افق میزبان کانی‌سازی سولفیدی و غیرسولفیدی در منطقه چنگرزه است (Zahedi and Rahmati, 2003; Tale Fazel et al., 2020). این واحد سنگی در طی فاز کوه‌زایی سیمین پیشین در پرموتریاس و هم‌زمان با بسته‌شدن اقیانوس پالئوتتیس در ایران مرکزی به صورت ناپیوسته بر روی ماسه‌سنگ قرمز بوکسیتی و شیل‌های تریاس زیرین نهشته شده است (Tale Fazel, 2023).

روش مطالعه

در محدوده معدن سرب و نقره چنگرزه و در طی سالیان گذشته فعالیت‌های اکتشافی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، حفر ترانشه، گمانه‌های حفاری همراه با مغزه‌گیری، تونل‌های اکتشافی و استخراجی است. در این پژوهش، برای

کانی‌سازی در این کانسار در راستای گسل‌های امتدادلغز با مؤلفه نرمال که قطع‌کننده گسل‌های راندگی قدیمی هستند، تشکیل شده است (Shavvakhi et al., 2023) و قطعه گسلی زفره مهم‌ترین ساختار گسلی کنترل‌کننده روندهای ساختاری در منطقه مورد بررسی است (Safaei et al., 2008; Tadayon et al., 2022). در واقع سامانه گسل‌های راستالغز جوان و متأخر ناشی از عملکرد قطعه گسلی زفره در توزیع مجدد کانی‌سازی سرب و نقره، در کانسار چنگرزه نقشی مهم داشته و شناسایی روندهای اصلی و ترکم این گسل‌ها در شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی مهم است. همچنین با توجه به اینکه این کانسار قدیمی است، از دیرباز عملیات اکتشافی و استخراجی در تونل‌های حفر شده در حال انجام بوده است. سامانه گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه مورد بررسی و به ویژه در تونل‌ها باعث پیچیدگی‌های ساختاری از جمله تغییر روند، ناپدیدشدن ناگهانی رگه‌ها و ... کانی‌سازی سرب و نقره شده است. با توجه به نزدیک بودن کانی‌سازی و همچنین عمق تونل‌ها به سطح زمین، شناسایی ویژگی‌های ساختاری از جمله روند و شیب عمومی، تراکم و ... گسل‌های سطحی می‌تواند به ساختارهای مؤثر در کانی‌سازی در عمق کمک کند. بنابراین، در این پژوهش سامانه گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در کانسار چنگرزه با استفاده از تحلیل‌های فرکتالی و برداشت‌های صحرایی مورد بررسی قرار گرفته است.

جایگاه ساختاری و زمین‌شناسی عمومی

معدن چنگرزه از نظر جایگاه ساختاری در بخش میانی کوه‌زاد زاگرس و در پهنه ایران مرکزی قرار گرفته است. مهم‌ترین ساختار گسلی که کنترل‌کننده روندهای ساختاری پیرامون منطقه مورد بررسی است، قطعه گسلی زفره است که قطعه جنوبی گسل قم-زفره است (Safaei et al., 2008; Tadayon et al., 2022). گسل قم-زفره یک پهنه تغییر شکل درون صفحه‌ای مهم در بخش مرکزی ایران در نظر گرفته می‌شود که حدود ۲۲۰ کیلومتر طول دارد (Beygi et al., 2016). گسل‌های راندگی در بخش

لاگ $(r)N$ در برابر لاگ $(r/1)$ بهترین خط رگرسیون ترسیم شده و از ترسیم این لاگ خط مستقیم با شیب d حاصل می‌شود که این بعد فرکتال نیز نامیده می‌شود. به طور کلی، تفسیرهای زمین‌ساختی و روش‌های فرکتالی در بررسی‌های متعددی برای بررسی ارتباط بین گسل‌ها و کانه‌زایی مورد استفاده قرار گرفته است (Alipoor et al., 2020; Amiri and Shahrokhi, 2023). در این پژوهش برای یافتن بعد فرکتالی گسل‌های معدن چنگرزه، منطقه مورد بررسی به شش مربع کوچک‌تر تقسیم شد تا میزان تراکم گسل در هر قسمت به صورت جداگانه بررسی شود. معیار تقسیم‌بندی به مربع‌های مختلف با توجه به اندازه مناطق مورد بررسی متفاوت است و معمولاً مربع‌ها طوری انتخاب می‌شوند که کل منطقه مورد نظر را در بر گرفته و کمتر یا بیشتر نشود. بنابراین با توجه به اندازه منطقه مورد بررسی برای محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها، منطقه مورد بررسی به شش پهنه A تا F تقسیم شده است (شکل ۲).

به طور کلی، با توجه به داده‌های آماری به دست آمده از نمودار گل‌سرخ، بیشترین فراوانی روند گسل‌های منطقه مورد بررسی، روند شمال‌شرقی - جنوب‌غربی ($N25E$ تا $N20E$ و $N70E$ تا $N75E$) است و روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی ($N30W$ تا $N35W$) نیز در رتبه بعدی فراوانی دارد (شکل ۲). مبنای بررسی فرکتال محاسبه ابعاد فرکتالی برای مؤلفه‌های هندسی بوده که به این منظور با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، تصویرهای ماهواره‌ای (گوگل ارث) و مشاهدات صحرایی گسل‌های منطقه مورد بررسی استخراج شده است. سپس برای هر شش مربع بعد فرکتالی محاسبه شده است (DA تا DF). به این منظور ابعاد مربع‌ها (r) و تعداد مربع‌هایی که حاوی گسل هستند (N) محاسبه و با ترسیم نمودار تعداد مربع‌های حاوی گسل بر معکوس اضلاع مربع بعد فرکتال گسل‌ها در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی محاسبه شده است. نمودارهای ترسیم شده برای ابعاد فرکتالی گسل‌ها در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که مربع‌های F و D دارای بیشینه ابعاد فرکتالی است (شکل ۳). وجود

بررسی دقیق ویژگی‌های شکستگی‌های منطقه مورد بررسی، نقشه گسل‌ها با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی موجود و همچنین تصویرهای ماهواره‌ای گوگل ارث تهیه شده است. سپس با استفاده از تحلیل‌های فرکتالی به روش مربع شمار یا (Log-Log)، منطقه مورد بررسی به مربع‌های کوچک‌تر تقسیم و بعد فرکتال برای هر مربع محاسبه شده است. در تحلیل‌های فرکتالی، نقشه گسل‌ها به عنوان نقشه پایه مورد استفاده قرار گرفته و با شمارش مربع‌های حاوی گسل و همچنین طول ضلع مربع‌ها، نمودار مربوطه ترسیم و بهترین خط رگرسیون ترسیم شده بعد فرکتال را نشان می‌دهد.

سپس نتایج به دست آمده از محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها و بررسی چگالی آنها با اطلاعات عیار سرب حاصل از ترانسه‌های اکتشافی مقایسه شده است. با مشخص شدن مناطق با تراکم شکستگی بالا و عیار سرب بالا، ویژگی‌های ساختاری گسل‌های این مناطق در مطالعات صحرایی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع برداشت‌های صحرایی برای بررسی هندسه و کینماتیک گسل‌ها در چندین مرحله انجام شده است. در این راستا تونل‌های معدن و همچنین ترانسه‌های حفر شده به شناسایی سطوح گسلی کمک زیادی کرده است.

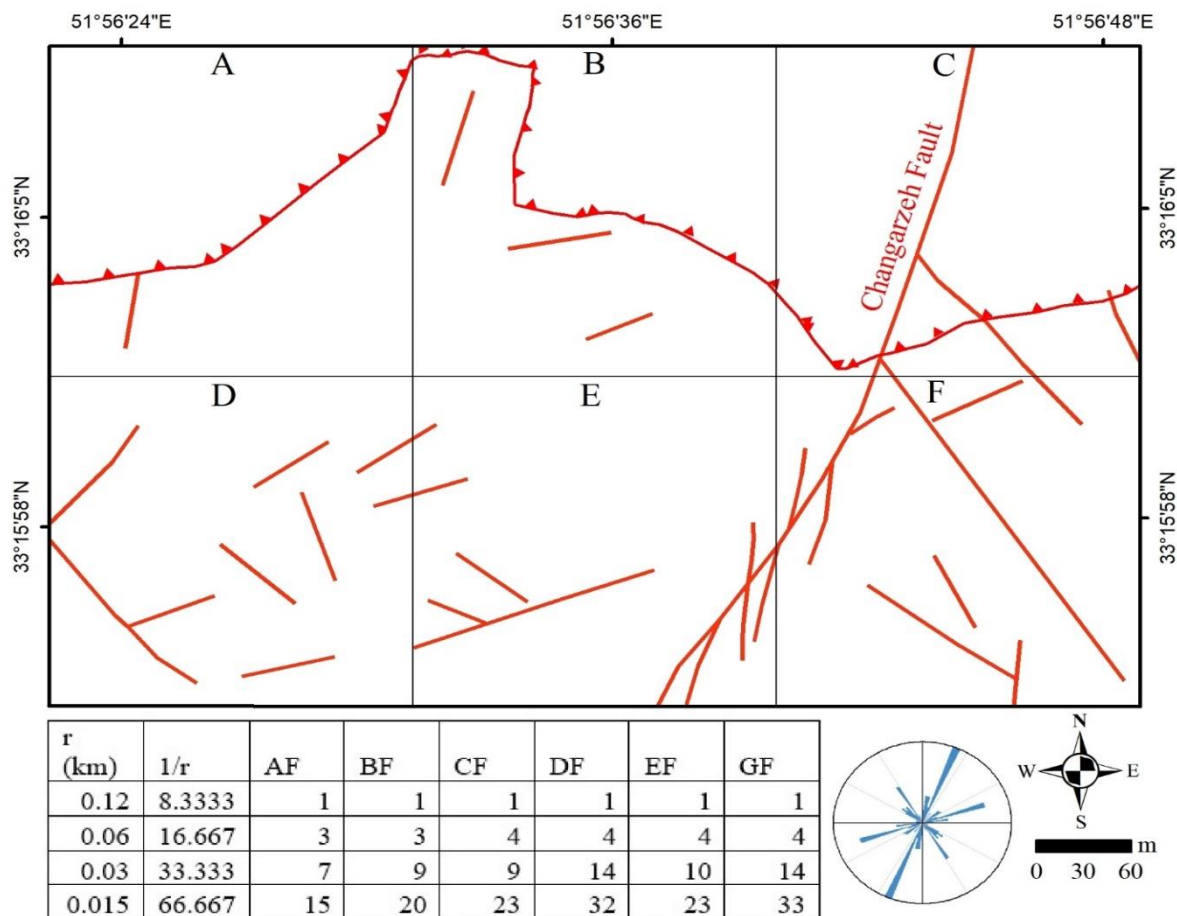
نتایج

تجزیه بعد فرکتال گسل‌ها

کاربرد مدل‌های فرکتالی در بیان کیفیت و توصیف پدیده‌های زمین‌شناسی کاربرد فراوانی داشته و یکی از موارد استفاده از هندسه فرکتالی در زمین‌شناسی درک تغییرات یک کمیت مستقل به واسطه بررسی ویژگی‌های قابل سنجش مانند شکل آبراهه‌ها، گسل‌ها و خطوط‌ها به عنوان متغیر وابسته است (Shahriari and Khatib, 1998). در این پژوهش، روشی که برای محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها به کار رفته، روش Log-Log است (Mandelbrot, 1983) که در این روش تعداد چهارگوش‌های مربعی (N) که خود تابعی از r و بعد فرکتال d هستند، با استفاده از فرمول $N(r) = K(1/r)^d$ به دست می‌آید. با رسم کردن نمودار

سامانه گسلی است. مقادیر بالای بعد فرکتالی برای مربع‌های F و E و D به ترتیب برابر با $1/6941$ و $1/4893$ و $1/6807$ است و کمترین مقدار بعد فرکتالی مربوط به مربع A و مقدار $1/2943$ است (شکل ۳).

اختلاف بعد فرکتالی در مربع‌های ، نشان‌دهنده فراوانی کمتر گسلس آن بخش‌ها با یکدیگر است. مقدار کم بعد فرکتالی نشان‌دهنده این خواهد بود که گستره سطحی سامانه گسل محدود بوده و مقدار زیاد بعد فرکتالی نشان‌دهنده گستره سطحی زیاد

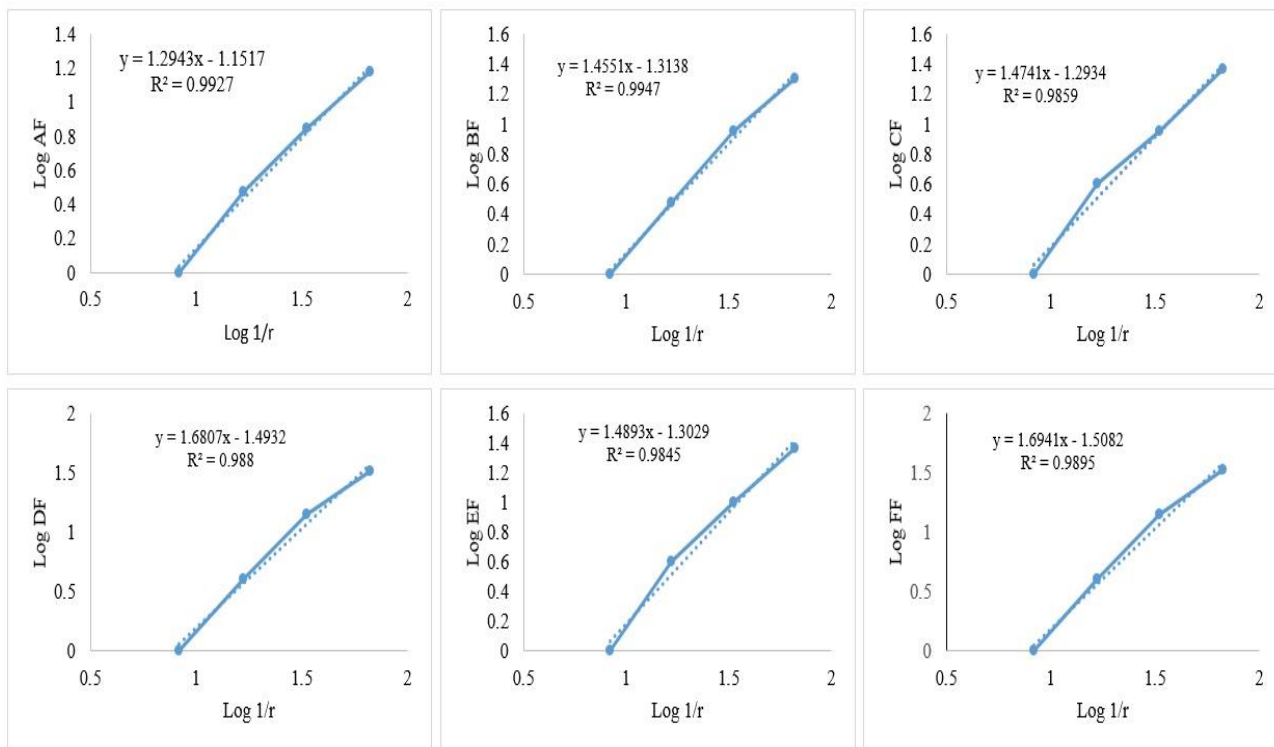


شکل ۲. نقشه شبکه‌بندی گسل‌های کانسار چنگرزه به شش مربع به همراه نمودار گل سرخی گسل‌ها

Fig. 2. The fault network map of Changarzeh deposit divided into six boxes, with the fault rose diagram

روش درون‌یابی ترسیم‌شده است که پراکندگی این عنصر را در قسمت‌های مختلف منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. به منظور بررسی ارتباط بین ابعاد فرکتالی گسل‌ها با توزیع پراکندگی عنصر سرب در منطقه مورد بررسی، نقشه گسل‌ها با نقشه توزیع پراکندگی عنصر سرب هم‌پوشانی شده است (شکل ۴).

ارتباط بین فراوانی عنصر سرب و بعد فرکتالی گسل‌ها
برای بررسی فراوانی عنصر سرب در منطقه مورد بررسی، تعداد ۴۳ نمونه سنگی از ترائشه‌ها و رخنمون‌های سطحی برداشت شده است (جدول ۱). سپس مقدار درصد وزنی عنصر سرب با تجزیه‌های دستگاهی شیمیایی محاسبه و نقشه کلی عیار سرب با استفاده از



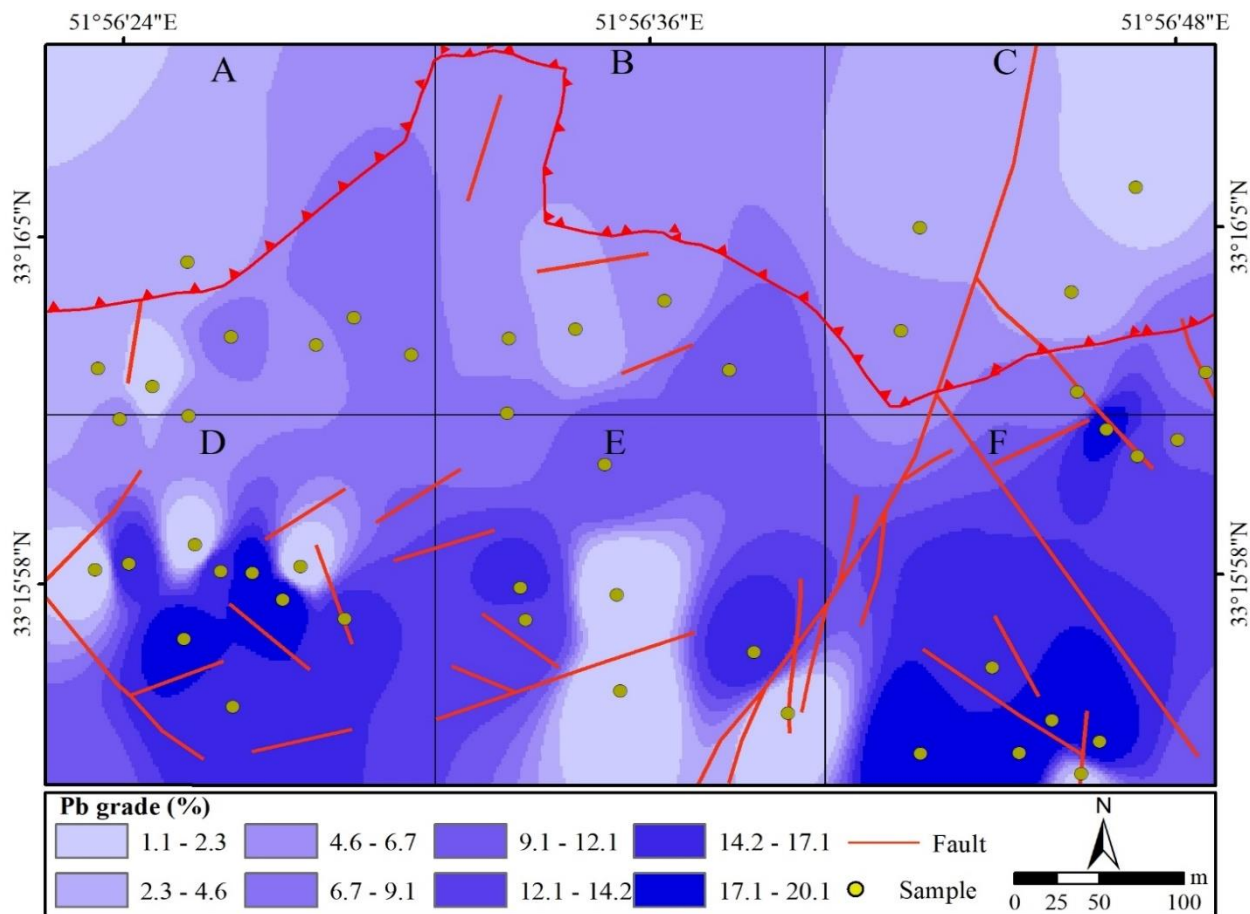
شکل ۳. نمودار لگاریتمی گسل‌های شش مربع A تا F در کانسار چنگرزه

Fig. 3. Logarithmic chart of faults in the six boxes (A to F) within the Changarzeh deposit

جدول ۱. مقادیر غلظت سرب در ۴۳ نمونه از ترانشه‌های کانسار چنگرزه

Table 1. Pb Concentration in 43 samples from trenches in Changarzeh deposit

Sample No.	Pb (%)	Sample No.	Pb (%)	Sample No.	Pb (%)	Sample No.	Pb (%)
Ch-Ab-21	20.12	Ch-Ab-34	3.85	Ch-Tkh-9	1.10	Ch-Tkh-20	3.21
Ch-Ab-22	20.41	Ch-Ab-35	2.46	Ch-Tkh-10	17.02	Ch-Tkh-32	6.45
Ch-Ab-23	2.84	Ch-Ab-45	1.10	Ch-Tkh-11	16.41	Ch-Tkh-33	4.25
Ch-Ab-24	18.02	Ch-Tkh-1	8.25	Ch-Tkh-12	1.16	Ch-Tkh-36	6.82
Ch-Ab-25	19.68	Ch-Tkh-2	7.08	Ch-Tkh-13	1.45	Ch-Tkh-37	11.19
Ch-Ab-26	16.37	Ch-Tkh-3	9.45	Ch-Tkh-14	20.03	Ch-Tkh-38	5.39
Ch-Ab-27	7.65	Ch-Tkh-4	6.74	Ch-Tkh-15	19.32	Ch-Tkh-39	7.45
Ch-Ab-28	18.21	Ch-Tkh-5	15.32	Ch-Tkh-16	18.62	Ch-Tkh-40	3.35
Ch-Ab-29	14.51	Ch-Tkh-6	14.62	Ch-Tkh-17	6.74	Ch-Tkh-41	11.12
Ch-Ab-30	12.32	Ch-Tkh-7	15.52	Ch-Tkh-18	5.12	Ch-Tkh-42	1.17
Ch-Ab-31	8.06	Ch-Tkh-8	17.15	Ch-Tkh-19	1.18	Ch-Tkh-43	1.87



شکل ۴. نقشه پراکندگی عیار عنصر سرب و گسل‌ها در شش مربع کانسار چنگرزه

Fig. 4. Pb Distribution map with faults in the six boxes of the Changarzeh deposit

پراکندگی سطحی عنصر سرب است. در واقع سامانه گسل‌های قدیمی که به علت فازهای زمین‌ساختی بعدی دچار فعالیت دوباره شده، کنترل‌کننده کانی‌سازی بوده و هم‌اکنون نزدیک به سطح زمین قرار گرفته‌اند. این موضوع باعث شده است که بین فراوانی سطحی گسل‌ها و پراکندگی سطحی عنصر سرب تطابق خوبی برقرار باشد. نکته مهم در مورد ارتباط مستقیم بین فراوانی گسل‌ها در مربع‌های جنوبی و توزیع پراکندگی سطحی عنصر سرب این است که طبق نقشه درون‌یابی درصد عنصر سرب، در بخش‌هایی از منطقه مورد بررسی با درصد سرب بالا منطبق بر گسل‌ها و در بخش‌هایی نیز منطبق نیستند. این موضوع به این دلیل است که

با مقایسه ابعاد فرکتالی و توزیع پراکندگی عنصر سرب در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی مشاهده می‌شود که در پهنه‌های D و E، F که دارای بیشترین ابعاد فرکتالی مربوط به گسل‌هاست، میزان عیار سرب نیز مقادیر بالایی را نشان می‌دهد. در واقع نیمه جنوبی منطقه مورد بررسی بیشترین فراوانی درصد عنصر سرب را دارد و در پهنه‌های نیمه شمالی که دارای کمترین مقادیر ابعاد فرکتالی گسل است، عیار سرب مقادیر پایینی را نشان می‌دهند. در واقع در بخش‌هایی از منطقه که ابعاد فرکتالی گسل‌ها بالاست، مقادیر عیار عنصر سرب نیز بالاست و این موضوع نشان‌دهنده ارتباطی مستقیم بین تراکم گسل‌های منطقه با توزیع

سیمای سطحی منطقه مورد بررسی در گذر زمان و به علت عملیات‌های معدن‌کاری از جمله دپوهای باطله، راه‌سازی و ... دچار تغییر شده و شناسایی رخنمون سطحی گسل‌ها میسر نباشد. بنابراین ممکن است برخی گسل‌های کوچک یا ادامه گسل‌های ترسیم‌شده کنونی، در منطقه مورد بررسی وجود داشته باشند.

بررسی‌های صحرایی

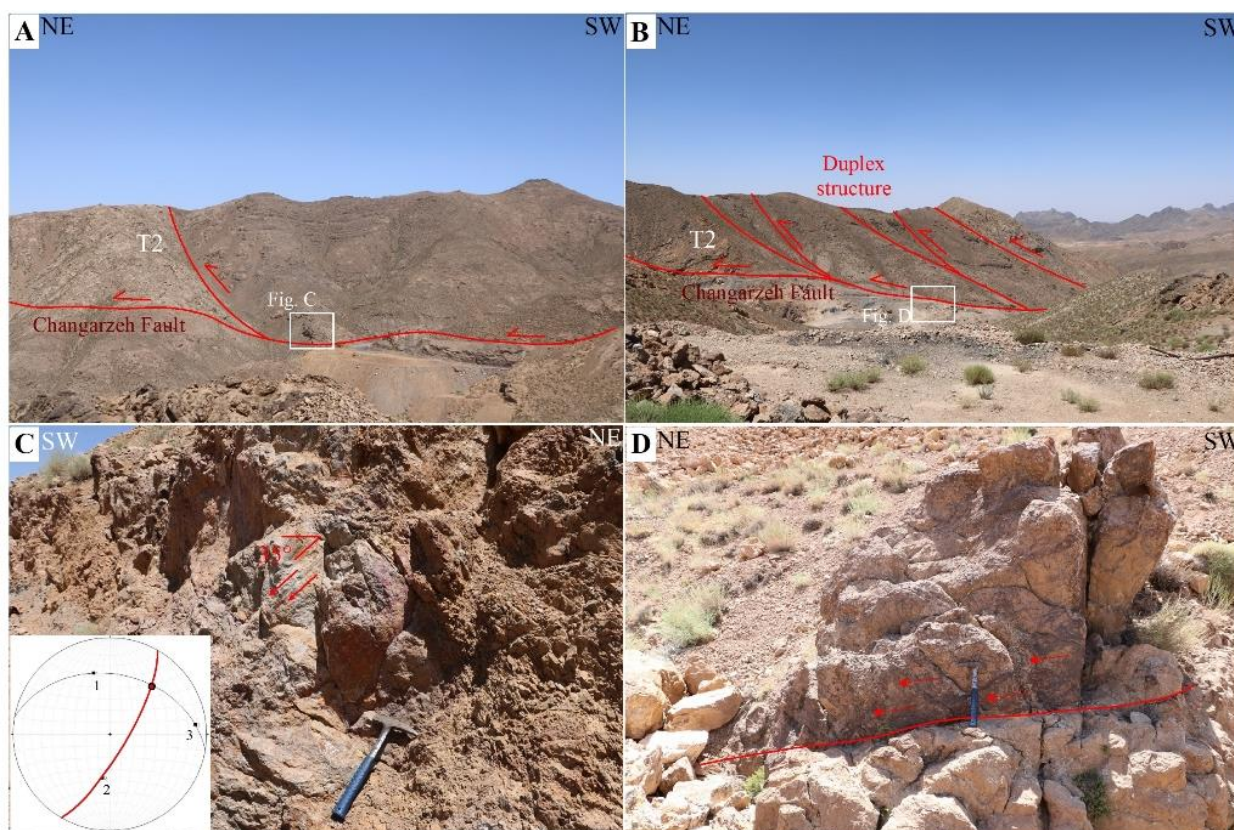
برای بررسی ویژگی‌های هندسی و کینماتیک گسل‌ها در بررسی‌های صحرایی به صورت برداشت سطحی و زیرسطحی (برداشت صفحه‌های گسلی در تونل‌های اکتشافی و استخراجی معدن) استفاده شده است. ساختار گسلی اصلی تأثیرگذار در معدن چنگرزه، گسل چنگرزه با راستای شمال‌شرقی- جنوب‌غربی است (شکل ۱). در این پهنه گسلی، گسل‌های معکوس به صورت ساختارهای دوپلکس تشکیل شده‌اند و اغلب به سمت جنوب‌غربی شیب دارند (شکل ۵- A). این گسل در بخش شرقی منطقه مورد بررسی رخنمون داشته و باعث دگرریختی واحدهای تریاس شده است (شکل ۵- B). با توجه به پوشیده بودن بیشتر بخش‌های منطقه و همچنین نبود تونل بر روی پهنه گسلی چنگرزه، شناسایی سازوکار این گسل اصلی به سختی قابل تشخیص است. با این حال، در دو محل رخنمونی از صفحه گسلی قابل تشخیص است که این گسل با مشخصات N30E/75SE و زاویه ریک ۳۵ درجه شمالی دارد. ویژگی‌های صفحه گسلی از جمله ریک بردار لغزش و همچنین زبری و نرمی سطح گسلش نشان‌دهنده عملکرد راستالغز چپ‌گرد گسل است (شکل ۵- C). همچنین صفحه گسلی دیگری از گسل اصلی چنگرزه با مشخصات N34E/80SE قابل تشخیص است که به علت فرسایش، نشانه‌های صفحه گسلی از بین رفته است؛ اما در هر دو صفحه گسلی شاخصه زبری و نرمی صفحه گسلی نشان‌دهنده حرکت چپ‌گرد گسل است (شکل ۵- D). گسل چنگرزه با راستای شمال‌شرقی- جنوب‌غربی منطقه مورد بررسی را به دو پهنه شرقی و غربی با نام‌های آب‌انبار و تخت‌چال تقسیم کرده است (شکل ۱).

پهنه آب‌انبار در بخش شرقی منطقه مورد بررسی قرار دارد و عمده تونل‌های حفرشده در این پهنه در واحد دولستون T2 حفرشده است. در بخش‌هایی از این پهنه کانی‌سازی سولفیدی سرب و نقره قابل مشاهده است که گسل‌ها نقش مهمی در کنترل کانی‌سازی و تأثیرهای بعدی داشته‌اند. با توجه به پوشیده بودن بیشتر بخش‌های پهنه آب‌انبار و مشخص نبودن اثرات سطحی گسل‌ها، تونل‌های اکتشافی و استخراجی کمک زیادی به شناسایی گسل‌ها کرده است. در واحد دولستون T2 یک پهنه گسلی با مشخصات N30W/70NE و در راستای تونل باعث دگرریختی شده و کانی‌سازی باریت و گالن در راستای آن تشکیل شده است (شکل ۶- A). همچنین پهنه گسلی دیگری با مشخصات N15W/80NE در این پهنه قابل مشاهده است که در راستای این گسل نیز کانی‌سازی باریت و گالن در شکستگی تشکیل شده است (شکل ۶- B). این دسته از گسل‌ها با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شیب به سمت شمال‌شرقی در پهنه آب‌انبار اغلب باعث کانی‌سازی شده‌اند. البته در این پهنه سامانه گسلی دیگری با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شیب به سمت جنوب‌غربی قابل مشاهده است که با کانی‌سازی همراه نیستند. با توجه به این که سطح این گسل‌ها با کانی‌سازی آغشته نشده است، اغلب نشانه‌های صفحه گسلی قابل مشاهده و سازوکار آنها قابل تشخیص است. در واحد دولستون T2 یک صفحه گسلی با مشخصات N40W/65SW و زاویه ریک ۷۰ درجه شمالی مشاهده می‌شود که شواهد زبری و نرمی صفحه گسلش و مقدار ریک بردار لغزش نشان‌دهنده سازوکار معکوس با مؤلفه راستالغز چپ‌گرد است (شکل ۶- C). در بخش‌های دیگر پهنه آب‌انبار نیز گسل‌های با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و بدون کانی‌سازی باعث راندگی واحد شیلی J1 بر روی واحد آهکی T3 شده است (شکل ۶- D).

علاوه بر شواهد گسلش در پهنه آب‌انبار که در بالا اشاره شد، صفحه‌های گسلی دیگری با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در تونل‌ها و رخنمون‌های سطحی باعث دگرریختی شده‌اند. در واحد

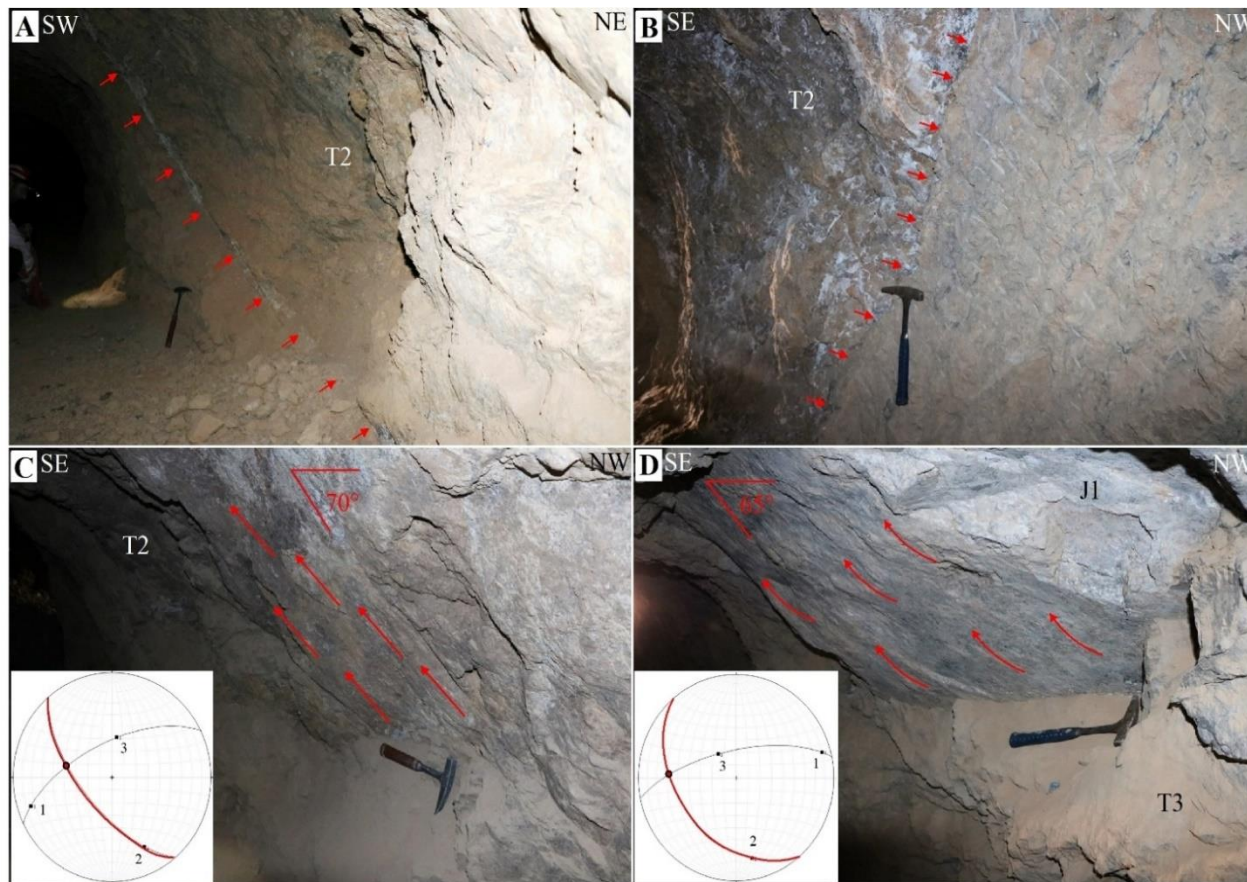
ریک ۶۰ درجه جنوبی و عملکرد معکوس (با توجه به زبری و نرمی صفحه گسل) همراه با کانی‌سازی در صفحه گسل نشان‌دهنده اهمیت این نوع گسلهاست (شکل ۷-۷C). در رخنمون‌های سطحی پهنه آب‌انبار نیز این نوع گسل‌ها در بخش‌هایی محدود از منطقه مورد بررسی قابل مشاهده است. رخنمون‌های سطحی یک پهنه گسلی به مشخصات N30W/70NE و زاویه ریک ۸۰ درجه جنوبی مشاهده می‌شود که شواهد کینماتیکی صفحه گسل از جمله مقدار زاویه ریک بردار لغزش و جهت زبری و نرمی صفحه گسل نشان‌دهنده سازوکار معکوس گسل است (شکل ۷-۷D).

دولستون T2 یک پهنه گسلی با فابریک SC نشان‌دهنده عملکرد معکوس گسل است که بدون کانی‌سازی و دارای مشخصات N10W/75NE است (شکل ۷-۷A). گسل‌های معکوس در بخش‌هایی از معدن باعث راندگی واحد دولستون T2 بر روی واحد شیلی J1 شده است. رخنمون‌هایی از این راندگی با مشخصات N20W/60SW در تونل‌های اکتشافی معدن قابل مشاهده است (شکل ۷-۷B). چنان‌که بیان شد، در پهنه آب‌انبار بیشتر گسل‌های با راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و شیب شمال‌شرقی همراه با کانی‌سازی هستند. یک پهنه گسلی با مشخصات N50W/80NE و زاویه



شکل ۵. A: رخنمون گسل چپ‌گرد چنگرزه به همراه ساختارهای دوپلکس، B: رخنمون پهنه گسلی چنگرزه، C: صفحه گسل چنگرزه با زاویه ریک ۳۵ درجه و استریونت صفحه گسل و D: رخنمون صفحه گسلی چنگرزه در واحد دولستون T2

Fig. 5. A: Outcrop of the left-lateral Changarzeh fault with duplex structures, B: The outcrop of the Changarzeh fault zone, C: The Changarzeh fault plane with a 35° rake angle and fault plane stereonet, and D: Outcrop of the Changarzeh fault plane in the T2 dolostone unit



شکل ۶. A: پهنه گسلی با مشخصات N30W/70NE و تشکیل کانی‌سازی در راستای گسل در کانسار چنگرزه، B: پهنه گسلی با مشخصات N15W/80NE و همراه با کانی‌سازی در پهنه آب‌انبار، C: صفحه گسلی با مشخصات N40W/65SW و زاویه ریک 70° درجه با سازوکار معکوس و استریونت صفحه گسل و D: صفحه گسلی با زاویه ریک 65° درجه و سازوکار معکوس همراه با استریونت صفحه گسلی در پهنه آب‌انبار

Fig. 6. A: Fault zone with N30W/70NE attitude and mineralization along the fault in the Changarzeh deposit, B: Fault zone with N15W/80NE attitude with mineralization in the Abanbar zone, C: Fault plane with N40W/65SW attitude and a 70° rake angle, displaying reverse faulting mechanism and fault plane stereonet, and D: Fault plane with a 65° rake angle and reverse faulting mechanism with fault plane stereonet in the Abanbar zone

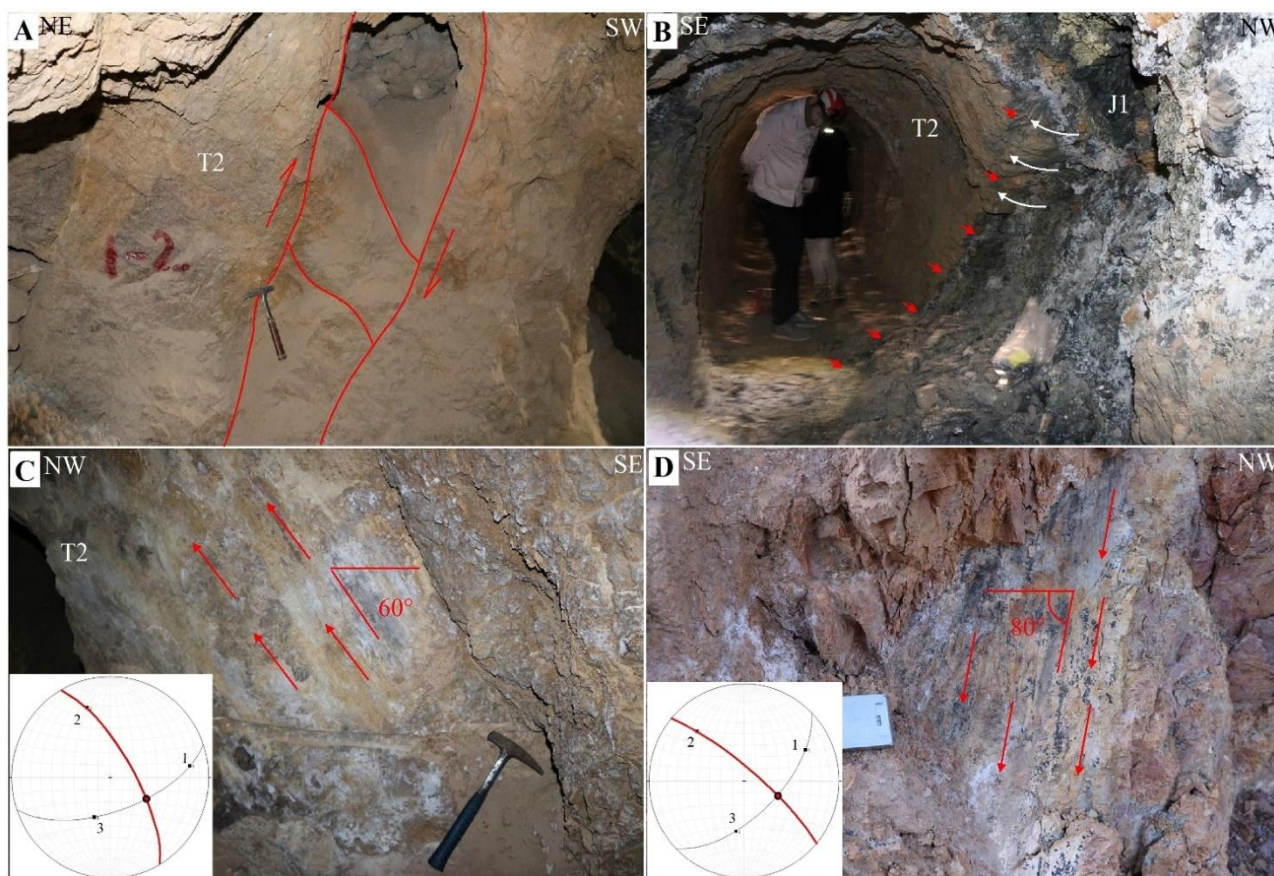
سمت شمال‌شرقی و با توجه به شواهد کینماتیکی صفحه گسلی از جمله مقدار و جهت زاویه ریک بردار لغزش و جهت زبری و نرمی صفحه گسل دارای سازوکار راستالغز چپ‌گرد با مؤلفه معکوس است. همچنین گسل‌های راستالغز دیگری با زاویه ریک کمتر نیز در پهنه تخت‌چال رخمون دارند که در برخی موارد همراه با کانی‌سازی هستند. یک پهنه گسلی با مشخصات N70W/80NE دارای زاویه ریک 10° درجه جنوبی است (شکل

در پهنه تخت‌چال که در شرق منطقه مورد بررسی قرار دارد نیز بیشتر گسل‌ها روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی داشته و شیب آنها نیز به سمت شمال‌شرقی است. رخمون گسل‌ها در این پهنه بیشتر در رخمون‌های سطحی قابل مشاهده است و اغلب دارای سازوکار راستالغز هستند. در مرز بین واحد‌های تریاس T2 و T3 یک صفحه گسلی با مشخصات N65W/85NE و زاویه ریک 35° درجه جنوبی رخمون دارد (شکل ۸-A). این گسل با شیب به

(B-8).

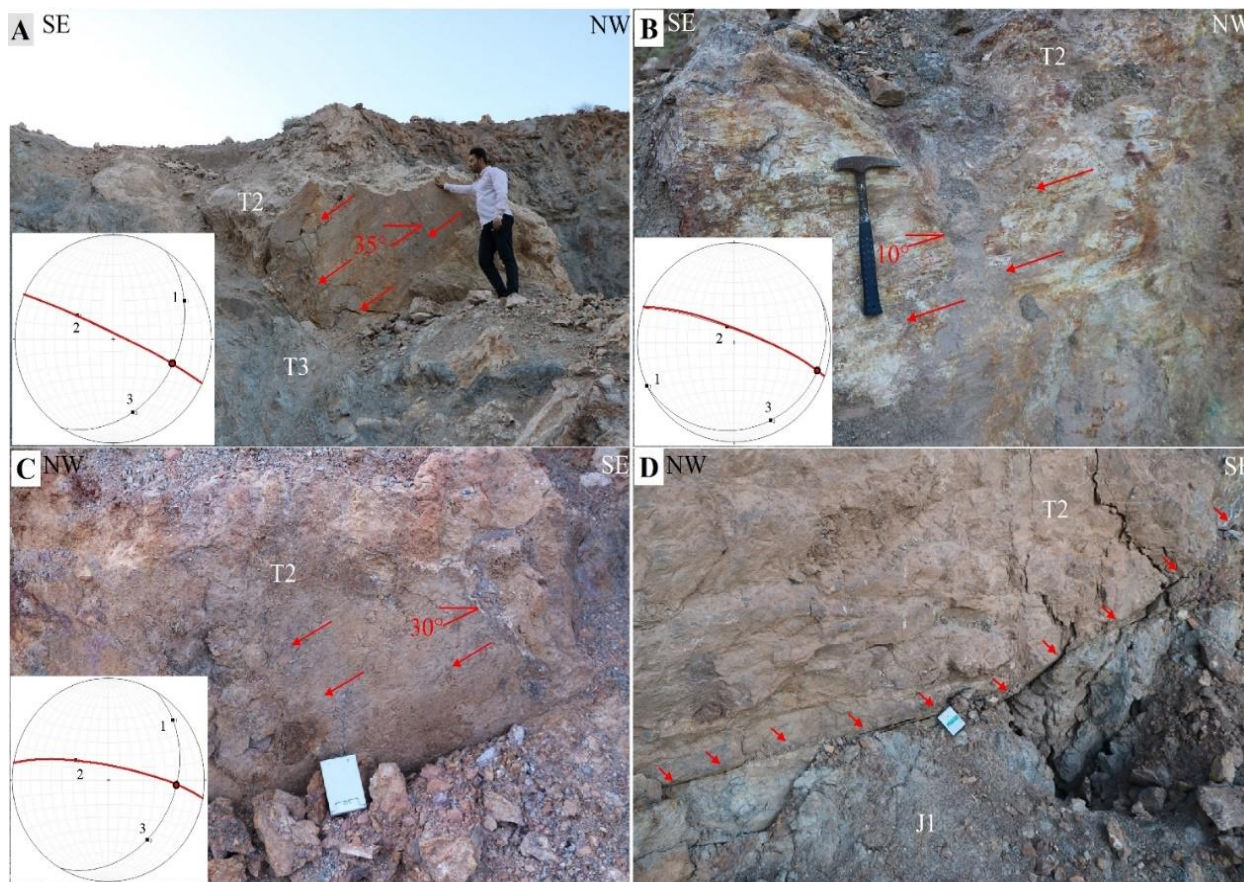
ریک ۳۰ درجه جنوبی و بدون کانی‌سازی باعث دگرریختی در منطقه مورد بررسی شده است (شکل ۸-۸). البته در بخش‌هایی از این پهنه نیز مشخصات صفحه گسلی قابل برداشت نیست و فقط اثر گسل در رخنمون‌های سطحی قابل مشاهده است. یک پهنه گسلی با مشخصات N74W/50NE باعث راندگی واحد دولستون T2 بر روی شیل‌های واحد J1 شده است (شکل ۸-۸).

مشابه شواهد کینماتیکی گسل قبلی، سازوکار این گسل نیز راستالغز چپ‌گرد با مؤلفه معکوس است و در سطح گسل سیلیکات‌های کربنات مس تشکیل شده است. به طور کلی، بیشتر صفحه‌های گسلی مشاهده شده در پهنه تخت‌چال در واحد دولستون T2 رخنمون داشته و دارای سازوکار راستالغز چپ‌گرد هستند. یک گسل دیگر با مشخصات N80W/78NE و با زاویه



شکل ۷. A: فابریک SC نشان‌دهنده پهنه گسلی با سازوکار معکوس و بدون کانی‌سازی در کانسار چنگرزه، B: رانده شدن واحد دولستون T2 بر روی شیل‌های ژوراسیک به علت عملکرد گسل راندگی با مشخصات N20W/60SW، C: پهنه گسلی با مشخصات N50W/80NE و زاویه ریک ۶۰ درجه همراه با کانی‌سازی در صفحه گسل و D: گسل با مشخصات N30W/70NE و زاویه ریک ۸۰ درجه و سازوکار معکوس

Fig. 7. A: SC fabric represents a fault zone with a reverse mechanism and no mineralization in the Changarzeh deposit, B: The thrusting of the T2 dolostone unit over Jurassic shales due to the activity of a thrust fault with N20W/60SW attitude, C: A fault zone with N50W/80NE attitude and a 60° rake angle, accompanied by mineralization along the fault plane, and D: A fault with N30W/70NE attitude and 80° rake angle, exhibiting a reverse mechanism



شکل ۸. A: صفحه گسلی با مشخصات N65W/85NE و سازوکار راستالغز چپ گرد در پهنه تخت چال، B: پهنه گسلی با مشخصات N70W/80NE دارای زاویه ریک ۱۰ درجه و سازوکار راستالغز چپ گرد. در سطح گسل سیلیکات‌های کربنات مس تشکیل شده است، C: گسل با مشخصات N80W/78NE و با زاویه ریک ۳۰ درجه و بدون کانی‌سازی در پهنه تخت چال و D: راندگی واحد دولستون T2 بر روی شیل‌های واحد J1 به علت عملکرد پهنه گسلی با مشخصات N74W/50NE

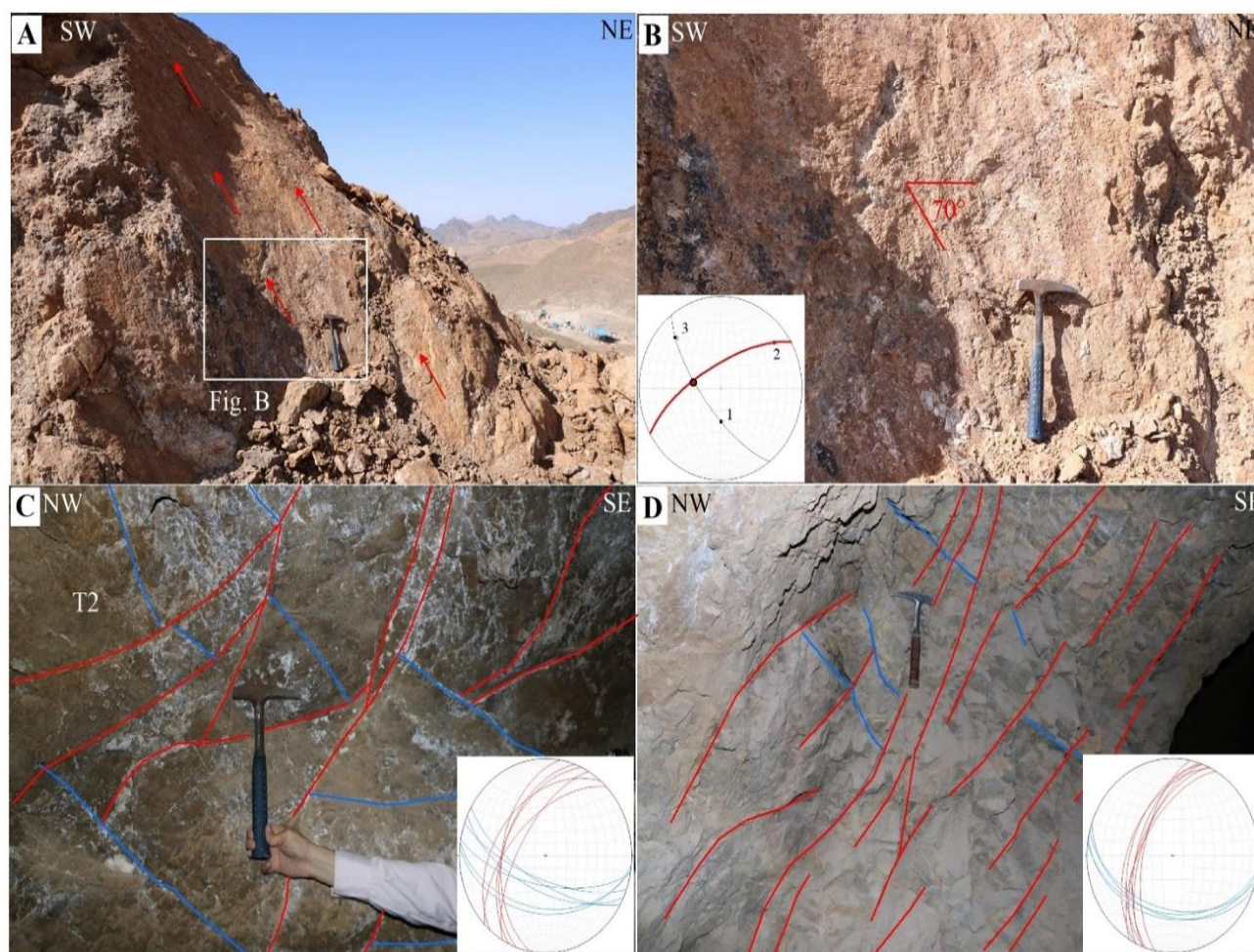
Fig. 8. A: Fault plane with N65W/85NE attitude and a left-lateral strike-slip mechanism in the Takhtchal zone, B: Fault zone with N70W/80NE attitude, with a 10° rake angle and a left-lateral strike-slip mechanism. Cu carbonate silicates have formed on the fault surface, C: Fault with N80W/78NE attitude and a 30° rake angle, with no mineralization in the Takhtchal zone, and D: Thrusting of the T2 dolostone unit over the J1 shale unit due to the activity of a fault zone with N74W/50NE attitude

بررسی شده و از معدود گسل‌های کششی در منطقه مورد بررسی است. علاوه بر گسل‌های با سازوکار مشخص در پهنه تخت چال، سامانه درزه‌های با روندهای متفاوت نیز در این پهنه رخمون دارند. در تونل‌های اکتشافی معدن در این پهنه دو دسته سامانه درزه با روندهای شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی قابل مشاهده است که درزه‌های دسته اول باعث

علاوه بر گسل‌های با راستای شمال غربی - جنوب شرقی، در پهنه تخت چال برخی گسل‌ها دارای راستای شمال شرقی - جنوب غربی هستند. یک پهنه گسلی با مشخصات N60E/70NW و زاویه ریک ۷۰ درجه در واحد دولستون T2 رخمون دارد (شکل ۹-A و B). جهت حرکت زبری و نرمی صفحه گسلش نشان می‌دهد که این گسل با سازوکار نرمال باعث دگرریختی در منطقه مورد

باریت تشکیل شده است. برای بررسی بیشتر این سامانه درزه‌ها در یک بخش دیگر از پهنه تخت‌چال، سامانه درزه‌های با راستای شمال‌شرقی - جنوب‌غربی اندازه‌گیری شد که اغلب بدون کانی‌سازی هستند. یک دسته درزه با راستای بین N10E تا N30E و شیب بین ۴۸ تا ۶۰ درجه به سمت شمال‌غربی و بدون کانی‌سازی رخنمون دارد (شکل ۹-D). این دسته درزه، باعث جابه‌جایی دیگر درزه‌ها با راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی شده‌اند.

جابه‌جایی درزه‌های دسته دوم شده‌اند (شکل ۹-C). این موضوع به معنی به طور نسبی جوان‌تر بودن دسته گسل‌های شمال‌شرقی است. راستای درزه‌های دسته اول اغلب بین N10E تا N45E و شیب بین ۴۲ تا ۶۵ درجه به سمت شمال‌غربی است. روند درزه‌های دسته دوم نیز N60W تا N85W و شیب بین ۴۰ تا ۷۰ درجه به سمت جنوب‌غربی است. به صورت محدود در راستای برخی از درزه‌های با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی کانی‌سازی گالن و



شکل ۹. A: رخنمون گسل با راستای شمال‌شرقی - جنوب‌غربی در واحد دولستون T2، B: نمای نزدیک گسل با زاویه ریک ۷۰ درجه، C: دو سامانه درزه با روندهای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی - جنوب‌غربی در پهنه تخت‌چال و D: دسته درزه با راستای بین N10E تا N30E و شیب بین ۴۸ تا ۶۰ درجه به سمت شمال‌غربی و بدون کانی‌سازی

Fig. 9. A: Fault outcrop with a NE-SW trend in the T2 dolostone unit, B: Close-up view of the fault with a 70° rake angle, C: Two fracture systems with NW-SE and NE-SW trends in the Takhtchal zone, and D: Fracture set oriented between N10E and N30E and dip between 48° and 60° toward the NW, and lacking mineralization

بحث

در یک نگاه کلی سامانه گسل‌های قدیمی و عمیق نقشی مهم در کانی‌سازی سرب و نقره در کانسار چنگرزه به عهده داشته است. عملکرد فازهای زمین‌ساختی فشارشی ناشی از هم‌گرایی صفحه‌های اوراسیا و عربی و بسته‌شده اقیانوس نئوتیس، باعث شده است که کانی‌سازی هم‌اکنون نزدیک به سطح زمین قرار گیرد. نکته مهم این است که گسل‌های کنترل‌کننده کانی‌سازی در فازهای بعدی زمین‌ساختی دچار فعالیت دوباره شده و با تغییر عملکرد باعث توزیع مجدد کانی‌سازی شده‌اند. بنابراین با توجه به اینکه شکستگی‌های قدیمی دوباره فعال شده و کنترل‌کننده کانی‌سازی بوده و هم‌اکنون در نزدیک سطح زمین قرار گرفته است، شناسایی روندهای اصلی این سامانه شکستگی‌ها و مناطق با تراکم شکستگی بالا کمک‌شایانی به اکتشافات آتی معدن چنگرزه می‌کند. بنابراین گسل‌ها نقش بسیار مهمی در کنترل کانه‌زایی سرب و نقره در معدن چنگرزه به عهده داشته است. چنان‌که بیان‌شد، کانسار سرب و نقره چنگرزه با میزبان دولستون تریاس میانی دارای کانه‌زایی سولفیدی و غیرسولفیدی است. گسل اصلی چنگرزه که مهم‌ترین ساختار تأثیرگذار بر دگرریختی کلی در منطقه مورد بررسی است و دو پهنه آب‌انبار در شرق و تخت‌چال در غرب را از یکدیگر تفکیک می‌کند. در پهنه آب‌انبار مهم‌ترین گسل‌ها که کانی‌سازی در راستای آنها تشکیل شده است، روندی بین $N10W$ تا $N65W$ هستند و معمولاً با شیب زیاد و بین 70° تا 80° درجه به سمت شمال‌شرقی رخنمون دارند. در این پهنه برخی گسل‌ها نیز با همان روند قبلی ولی با شیب کمتر و حدود 40° تا 65° درجه به سمت جنوب‌غربی و بدون کانی‌سازی رخنمون دارند. در پهنه تخت‌چال نیز گسل‌های با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی مهم‌ترین ساختارهای کنترل‌کننده کانی‌سازی هستند. راستای این گسل‌ها اغلب بین $N70W$ تا $N80W$ است و مشابه پهنه آب‌انبار به سمت شمال‌شرقی شیب دارند. شیب این گسل‌ها بین 50° تا 85° درجه است و در دسته گسل‌های پرشیب قرار می‌گیرند. علاوه بر این، گسل‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب

غربی نیز در پهنه تخت‌چال با شیب به سمت شمال‌شرقی نیز رخنمون دارند. به نظر می‌رسد که در هر دو پهنه گسل‌های با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی مهم‌ترین گسل‌های کنترل‌کننده کانی‌سازی هستند که به وسیله گسل‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی جابه‌جا شده‌اند. این موضوع را سامانه درزه‌های برداشت شده در تونل‌های اکتشافی معدن تأیید می‌کند؛ به طوری که اغلب درزه‌های با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی به وسیله درزه‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی جابه‌جا شده‌اند. در واقع سامانه شکستگی‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی جوان‌تر بوده و اغلب جابه‌جا کننده رگه‌های حاوی ماده معدنی هستند. علاوه بر راستا و شیب سامانه شکستگی‌های منطقه مورد بررسی، نتایج تحلیل‌های فرکتالی نیز نشان می‌دهد که بین تراکم و فراوانی گسل‌ها با عیار ماده معدنی سرب ارتباطی مستقیم وجود دارد.

سامانه گسل‌های منطقه مورد بررسی اغلب به شکستگی‌های ثانویه یا جانبی گسل اصلی راستالغز چنگرزه با سازوکار چپ‌گرد مربوط می‌شود که در واکنش به تنش‌های برشی شکل می‌گیرند. این شکستگی‌ها هرکدام زاویه و نوع خاصی از حرکت را نسبت به گسل اصلی دارند. شکستگی‌های نوع R، متداول‌ترین نوع شکستگی‌های فرعی در گسل‌های امتدادلغز هستند و با زاویه‌ای نسبتاً کوچک (10° تا 20° درجه) نسبت به گسل اصلی امتدادلغز شکل می‌گیرند. جهت حرکت این شکستگی‌ها موافق با حرکت گسل اصلی است و به عنوان پیش‌زمینه حرکت گسل اصلی شکل می‌گیرند و می‌توانند نشان‌دهنده توزیع تنش در منطقه گسل باشند (Fossen, 2010).

شکستگی‌های R' یا شکستگی‌های آنتی‌تیک و مخالف با شکستگی‌های R هستند و با زاویه‌ای حدود 60° تا 80° درجه نسبت به گسل اصلی شکل می‌گیرند و جهت حرکت آنها بر خلاف جهت حرکت گسل اصلی است. شکستگی‌های R' به عنوان نتیجه واکنش به تنش‌های متقابل شکل می‌گیرند و اغلب در مناطقی که مقاومت سنگ بیشتر است، دیده می‌شوند (Fossen, 2010).

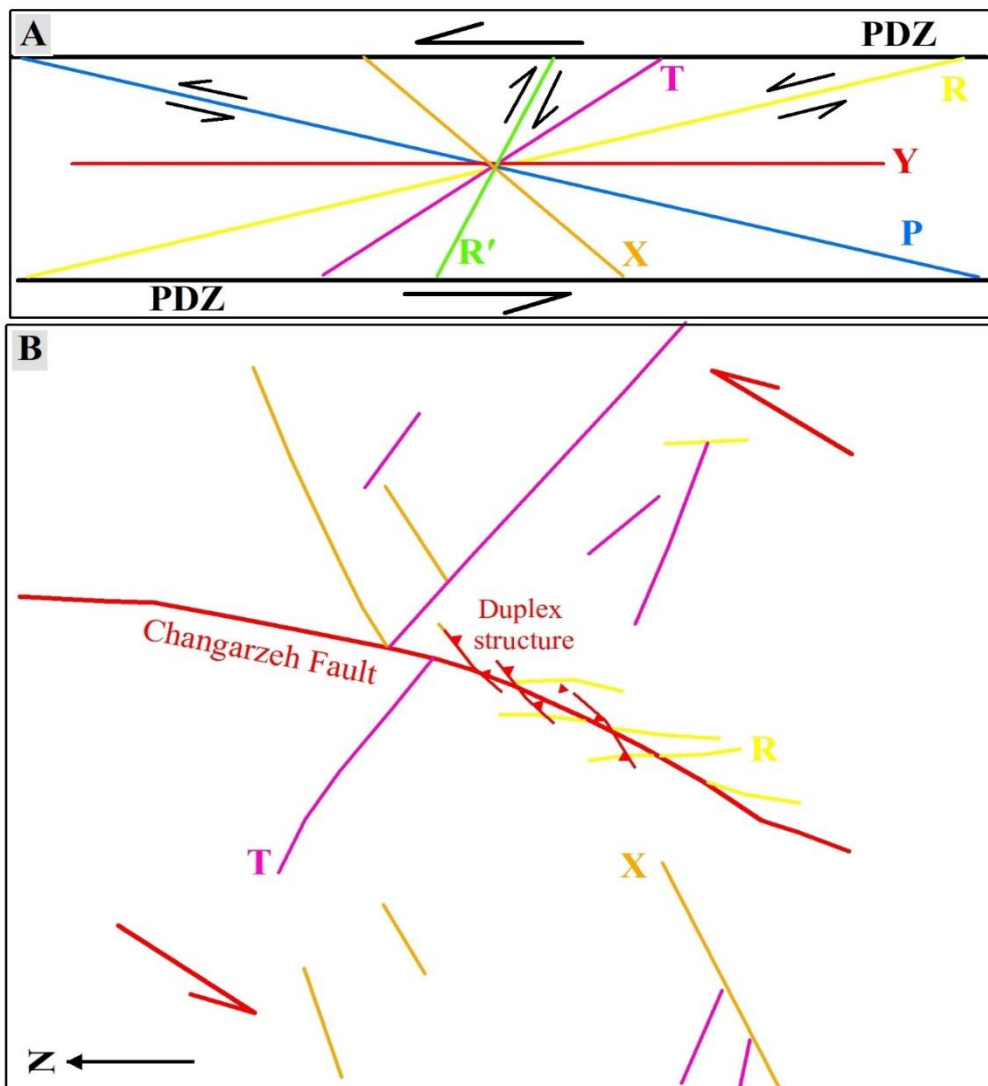
گسل‌های داخلی در یک دوپلکس افزایش یابد و باعث تشکیل ساختارهای چندلایه‌ای و پیچیده‌تر شود. این ساختارها معمولاً در حاشیه‌های هم‌گرای صفحه‌های زمین‌ساختی یا در سامانه‌های کوه‌زایی یافت می‌شوند. در گسل‌های امتدادلغز، ساختارهای دوپلکس به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم در مکانیک گسل‌ها در نواحی خمیدگی یا کمانش شناخته می‌شوند (Twiss and Moores, 2007). با توجه به نوع خمش گسل راستالغز ممکن است ساختارهای فشارشی یا کششی در منطقه خمش تشکیل شود که دوپلکس‌ها در خم‌های فشارشی گسل‌های امتدادلغز تشکیل می‌شوند. این ساختارها شامل مجموعه‌ای از صفحه‌های گسلی فشاری هستند که به صورت موازی یا نیمه موازی با یکدیگر قرار گرفته و بلوک‌های سنگی بین آنها فشرده می‌شوند (Twiss and Moores, 2007).

به طور کلی، گسل‌های راندگی کنترل‌کننده منشأ و توزیع مجدد بخش عمده‌ای از ذخایر سرب و روی در این بخش از ایران مرکزی بوده و سامانه گسل‌های راستالغز بعدی و جوان در پهنه گسلی زفره، کانی‌سازی و گسل‌های راندگی را تحت تأثیر قرار داده و در توزیع مجدد آنها نقش داشته‌اند (Shavvakhi et al., 2023). با توجه به اینکه ساختارهای کنونی منطقه مورد بررسی در رابطه با عملکرد گسل‌های راستالغز است و شکستگی‌های مرتبط با این پهنه‌های گسلی در توزیع مجدد کانی‌سازی و همچنین جابه‌جایی رگه‌های حاوی ماده معدنی نقش دارند، مدل ساختاری منطقه مورد بررسی ترسیم شده است (شکل ۱۰-B).

همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱ و همچنین شواهد صحرائی شکل ۶ نشان داده شده است، در راستای گسل اصلی چنگرزه، ساختارهای دوپلکسی در واحد دولستون T2 تشکیل شده است. در واقع این ساختارهای فشارشی در محل خمش گسل اصلی و با توجه به حرکت چپ‌گرد تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰-A).

شکستگی‌های P در زاویه‌ای حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه نسبت به گسل اصلی؛ اما در جهت مخالف شکستگی‌های R شکل می‌گیرند و به طور کلی شکستگی‌های موازی با گسل اصلی هستند که نقش مهمی در انتقال حرکت و تغییر تنش در طول زمان دارند. شکستگی‌های X به عنوان شکستگی‌های انتقالی عمل می‌کنند و به صورت مورب و با زاویه‌های زیاد نسبت به گسل اصلی ظاهر می‌شوند و معمولاً برای پیوند دادن بخش‌های مختلف گسل‌های دیگر با هم ایجاد می‌شوند. شکستگی‌های X نشان‌دهنده تلاش برای انتقال تنش از یک بخش گسل به بخش‌های دیگر هستند و می‌توانند به تشکیل پیچیدگی‌های ساختاری بیشتر در سامانه‌های امتدادلغز منجر شوند. کستگی‌های T یا شکستگی‌های کششی، تحت تأثیر تنش‌های کششی عمود بر گسل اصلی ایجاد می‌شوند و معمولاً در نواحی که تنش‌های کششی غالب هستند، شکل می‌گیرند (Fossen, 2010).

در منطقه مورد بررسی بیشتر گسل‌های با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی از نوع شکستگی‌های نوع R مربوط به پهنه گسلی چنگرزه هستند که احتمالاً در فاز نهایی دگرشکلی این گسل تشکیل شده‌اند. شکستگی‌های نوع X مربوط به پهنه گسلی اصلی نیز در منطقه مورد بررسی تشکیل شده که باعث پیچیدگی‌های ساختاری زیادی شده‌اند. همچنین در قسمت‌هایی از پهنه گسلی اصلی شکستگی‌های نوع T تشکیل شده است (شکل ۱۰-A). همچنین همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در برخی قسمت‌ها و در راستای پهنه گسلی اصلی چنگرزه، گسل‌های معکوس و همچنین ساختارهای دوپلکس تشکیل شده‌اند. دوپلکس‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی شناخته می‌شوند و اغلب زمانی شکل می‌گیرند که مجموعه‌ای از گسل‌های معکوس ثانویه در یک محیط فشاری ایجاد شوند و به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های محدود بین گسل‌های بالا و پایین حرکت کنند (Twiss and Moores, 2007). با گذشت زمان و افزایش تنش، ممکن است تعداد



شکل ۱۰. A: شکستگی‌های مرتبط با پهنه گسلی راستالغز چپ گرد (Fossen, 2010). علائم اختصاری شکستگی‌ها در متن اشاره شده است. PDZ (Principal Displacement Zone) پهنه جابه‌جایی اصلی را نشان می‌دهد و B: تشکیل شکستگی‌های ثانویه مرتبط با پهنه گسلی چنگرزه در کانسار چنگرزه. رنگ‌ها شکستگی‌های مختلف را نشان می‌دهند.

Fig. 10. A: Fractures related to the left-lateral strike-slip fault zone (Fossen, 2010). Abbreviations for fractures are mentioned in the text. PDZ (Principal Displacement Zone) indicates the main displacement zone, and B: Formation of secondary fractures related to the Changarzeh fault zone in the Changarzeh deposit. Colors represent different types of fractures.

نتیجه‌گیری

میانی دارای کانه‌زایی سولفیدی و غیرسولفیدی بوده که مهم‌ترین ساختار مؤثر بر دگرشکلی کلی منطقه یک گسل راستالغز چپ گرد به نام گسل چنگرزه است. این گسل منطقه مورد بررسی

شکستگی‌ها نقش مهمی در تشکیل و تکوین کانسار سرب و نقره چنگرزه داشته‌اند. این کانسار با سنگ میزبان دولستون تریاس

جنوب شرقی در هر دو پهنه کنترل کننده کانی سازی هستند که به وسیله گسل‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی جابه‌جا شده‌اند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

از حمایت‌های شرکت معادن سرمک برای همکاری در بازدیدهای صحرایی و انجام برخی تجزیه‌های دستگامی قدردانی می‌شود. نویسندگان همچنین از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

را به دو پهنه آب‌انبار در شرق و تخت‌چال در غرب تقسیم می‌کند. گسل چنگرزه در راستای خود دچار خمش شده و با توجه به حرکت چپ‌گرد آن در بخش میانی گسل ساختارهای فشارشی از جمله دوپلکس‌ها تشکیل شده است. در پهنه آب‌انبار راستای عمومی گسل‌ها بین $N10W$ تا $N65W$ و شیب بین 70° تا 80° درجه به سمت شمال شرقی است. در پهنه تخت‌چال راستای گسل‌ها اغلب بین $N70W$ تا $N80W$ است و شیب بین 50° تا 85° به سمت شمال شرقی شیب است. در این پهنه گسل‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی نیز رخنمون دارند. تحلیل‌های فرکتالی گسل‌ها نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین تراکم و فراوانی گسل‌ها با عیار ماده معدنی سرب است. گسل‌های با راستای شمال غربی -

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros, Iran: Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3): 401–419.
<https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>
- Alaminia, Z., Tadayon, M., Griffith, E.M., Solé, J. and Corfu, F., 2021. Tectonic-controlled sediment-hosted fluorite-barite deposits of the central Alpine-Himalayan segment, Komsheche, NE Isfahan, Central Iran. *Chemical Geology*, 566: 120084.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120084>
- Alipoor, R., Tale Fazel, E. and Farhani Moghadam, M., 2020. The role of right-lateral shear zone and folding-related fractures in development of Zarshuran gold deposit, Takht-e-Soleyman complex, northern Takab. *Journal of Economic Geology*, 12(2): 131–155. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v12i2.75702>
- Amiri, B. and Shahrokhi, S.V., 2023. Ore control factors of zinc and lead mineralization in the Tangedozdan area (NE Fereydounshahr-Isfahan Province). *Journal of Economic Geology*, 15(1): 27–51. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2023.79745.1058>
- Beygi, S., Nadimi, A. and Safaei, H., 2016. Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran. *Journal of Geosciences*, 61(2): 127–144.
<https://doi.org/10.3190/jgeosci.212>
- Ehya, F., Lotfi, M. and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn–Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 186–194.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.007>
- Fossen, H., 2010. *Structural geology*. Cambridge University Press, 463 pp.
- Ghazban, F., McNutt, R.H. and Schwarcz, H.P., 1994. Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan area, west-central Iran. *Economic Geology*, 89(6): 1262–1278.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.6.1262>
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: Key to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194: 88–103.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106455>
- Maanijou, M., Tale Fazel, E., Hayati, S., Mohseni, H. and Vafaei, M., 2020. Geology, fluid inclusions, C–O–S–Pb isotopes and genesis of the Ahangara Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104339.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104339>
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The fractal geometry of nature (Updated and Augmented Edition)*. Freeman, New York, 468 pp.
- Meshkani, S.A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A. and Alghalandis, Y.F., 2011. The application of geochemical pattern recognition to regional prospecting: A case study of the Sanandaj-Sirjan metallogenic zone, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(3): 183–195.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.01.006>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Momenzadeh, M., Shafghi, S., Rastad, E. and Amstutz, G.S., 1979. The Ahangaran lead-silver deposit, SE-Malayer, west Central Iran. *Mineralium Deposita*, 14: 323–341.
<https://doi.org/10.1007/BF00206363>
- Niroomand, S., Haghi, A., Rajabi, A., Tabbakh Shabani, A.A. and Song, U.C., 2019. Geology, isotope geochemistry, and fluid inclusion investigation of the Robat Zn-Pb-Ba deposit, Malayer-Esfahan metallogenic belt, southwestern Iran. *Ore Geology Reviews*, 112: 103040.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103040>
- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: Geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14): 1649–1672.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659110>
- Safaei, H., Taheri, A. and Vaziri-Moghaddam, H., 2008. Structural analysis and evolution of the Kashan (Qom-Zefreh) fault, Central Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(8): 1426–1434.
<https://doi.org/10.3923/jas.2008.1426.1434>

- Shahriari, S. and Kharib., 1998. Fractal Analysis of the Nehbandan Fault System. *Quarterly Journal of Earth Sciences*, 6(23–24): 22–39. (in Persian with English abstract) Retrieved from <https://sid.ir/paper/433996/fa>
- Shavvakhi, F., Madanipour, S., Tadayin, M., Rastad, E. and Kupaei, M.J., 2023. Structural evolution of the southern Natanz region and its role in the distribution and concentration of Pb-Zn mineralization. *Iranian Journal of Geology*, 16(64): 103–118. (in Persian with English abstract) Retrieved from <http://geology.saminattech.ir/fa/Article/41438>
- Tadayon, M., Rashid, H., Salehi, M.A. and Aslani, A., 2022. Post-Cretaceous structural reconstruction of the west Central Iranian micro-plate: Insights from structural and magnetic fabrics (AMS) constraints. *Journal of Structural Geology*, 160: 104601. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104601>
- Tale Fazel, E., 2023. Geochemistry, mineralogy, and development constraints of the Changarzeh non-sulfide ore, southern Natanz: Implications on tracing of carbonate rock-hosted supergene Pb-Zn deposits. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 31(4): 709–720. (in Persian with English abstract) Retrieved from <http://ijcm.ir/article-1-1839-fa.html>
- Tale Fazel, E., Mokhtari Nezhad, E. and Hossein Khani, A., 2020. Genesis of the Changarzeh deposit (southern Natanz) in middle Triassic sedimentary sequence: A typical example of Pb±Ag Mississippi valley type deposit at Malayer-Esfahan metallogenic belt. *Applied Sedimentology*, 8(16): 139–159. <https://doi.org/10.22084/psj.2020.22711.1256>
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 2007. *Structural geology*. W.H. Freeman and Company, New York, 736 pp.
- Zahedi, M. and Rahmati, M., 2003. Geological map of Tarq, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.