



## Alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion investigations in Joftrud prospect area, southwest of Birjand

Omid Shareipour<sup>1</sup>, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi<sup>2\*</sup> , Maryam Javidi Moghaddam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Ph.D., Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 08 October 2024  
Revised: 02 November 2024  
Accepted: 02 November 2024

#### Keywords

Mineralization  
base metals  
fluid inclusion  
Joftrud  
Lut Block

#### \*Corresponding author

Azadeh Malekzadeh Shafaroudi

✉ [shafaroudi@um.ac.ir](mailto:shafaroudi@um.ac.ir)

### ABSTRACT

The Joftrud prospect area is located in the central Lut Block and 60 Km of Birjand city. The area comprises outcrops of pyroclastic (andesitic tuff), volcanic (hornblende andesite, pyroxene andesite, basaltic andesite), intrusive (diorite porphyry, monzodiorite, gabbro) rocks. Mineralization as vein-type with mostly northeast-southwest trend has formed in andesitic units. Main alterations are consist of silicified, argillic, carbonate and propylitic. Primary minerals include chalcopyrite, pyrite, and secondary minerals are consist of chrysocolla, chalcocite, covellite, azurite, malachite, goethite, and hematite. Maximum of geochemical anomalies in veins are for copper 6000 ppm, lead 2934 ppm, zinc 6904 ppm, and Au 144 ppb. Quartz-sulfide veins are formed of fluids with temperature of 265 to 408°C and salinity of 11.1 to 19 NaCl wt.% equivalent. Decreasing temperature and fluid mixing by high-salinity fluid can cause metal deposition. According to the available evidence of structural control of mineralization, alterations and their narrow expansions, mineralogy, texture, fluid inclusion data and depth of formation, prospect area is similar to intermediate sulfidation deposit.

### How to cite this article

Shareipour, O., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Javidi Moghaddam, M., 2024. Alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion investigations in Joftrud prospect area, southwest of Birjand. *Journal of Economic Geology*, 16(4): 1–20. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1130>



©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.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The Joftrud prospect area is located at 60 Km Birjand city, and belongs to the central Lut Block, Eastern Iran. Extensive magmatic activity in the Lut Block, is accompanied with numerous mineralization events such as porphyry copper, IOCG, vein and skarn (Karimpour et al., 2012).

The central Lut Block is significant part of this Block due to widespread Tertiary volcano–plutonic rocks (Lotfi, 1982; Salim, 2012; Javidi Moghaddam et al., 2019; Javidi Moghaddam et al., 2021) and many cases of Cu (e.g., Mire-e-Khash, Shikasteh Sabz, Rashidi, Ghar-eKaftar, Shurk, and Howz-e-Dagh), Pb-Zn (e.g., Chah Noghereh, Hows-e-Raise and Sechangi veins), Pb-Zn-Cu-Sb veins (e.g., Ghale-Chah, Shurab, Chupan and Kuh Shuru) in the neighboring areas (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015; Javidi Moghaddam et al., 2013; Javidi Moghaddam et al., 2014; Javidi Moghaddam et al., 2018; Mehrabi et al., 2019).

Recently, Karjo (2021) has studied geochemistry of ore-veins in the area. For the first time, detailed studies of base metal mineralization and genesis of veins have been conducted. The purpose of this research is the geology, examine the geochemical and fluid inclusion data, and finally discuss mineralization model of occurrence of ore veins in the Joftrud prospect area.

### Materials and methods

In the field work, a total of 80 samples were taken mainly from igneous units and ores. 40 thin sections and polished slabs were examined by an optical microscope. The geological map of the prospect area (scale of 1:5000) was produced in Arc GIS software. Geochemical analysis were done at Zarazma laboratory of Iran (ICP-OES technique) on 15 samples selected from veins by the Kavoshgaran of Eastern Birjand Company (Karjo, 2021). Also, 9 samples were selected for Au analysis with Fire assay in the same laboratory.

Microthermometric tests and salinity determination of fluid inclusions were performed on 3 wafers of quartz minerals using a heating-freezing system, model THM 600 at Ferdowsi University of Mashhad, Iran. The precision of this device during the heating and refrigeration stages is  $C \pm 1^\circ C$  and the thermal

range is  $-190$  to  $600^\circ C$ .

### Result

The rock units of the prospect area are divided into three categories: pyroclastic (andesitic tuff), volcanic (hornblende andesite, pyroxene andesite, basaltic andesite), intrusive (diorite porphyry, monzodiorite, and gabbro) rocks. The ore-veins are mostly formed in andesite rocks, in fault zones with trending NE–SW and subordinate NW–SE. The veins are associated with wall rock alterations of silicified, argillic, carbonate and propylitic. Petrography studies represent that the ore-veins include pyrite, chalcopyrite as hypogene minerals and malachite, azurite, chrysocolla, chalcocite, covellite, goethite, and hematite as secondary minerals. Quartz is significant gangue mineral accompanied with the ore-veins. Based on geochemical data of the ore-veins, maximum anomalies are for copper (6000 ppm), lead (2934 ppm), and zinc (6904 ppm). Based on the criteria of Roedder (1984), three types of primary fluid inclusions (two-phase liquid-rich (L+V), single-phase aqueous (L) and single-phase vapor (V) inclusions) were distinguished in the ore-veins, without evidence of daughter minerals.

In the ore-veins, quartz-hosted LV inclusions have homogenization temperatures ( $T_h$ ) between  $270^\circ$ – $408^\circ C$  for stage-1 and  $265^\circ$ – $385^\circ C$  for stage-2. These LV inclusions show salinities between 11.1–13.4 wt.% NaCl equivalent in quartz of stage1 and 15.9–19 wt.% NaCl equivalent in quartz of satage-2.

### Discussion

The fluid inclusion data illustrate that the ore-forming fluids had a magmatic signature and were diluted by meteoric water. Quartz of ore-veins dominated by non-boiling textures such as massive and comb textures of quartz (without coexisting liquid-rich and vapor-rich inclusions). So, boiling is not the depositional mechanism in the ore-veins. Decreasing temperature and fluid mixing by high-salinity fluid can cause metal deposition.

In the pressure–temperature diagram (Fournier, 1999), the trapping pressures for the ore-forming fluids of the veins were determined to be within the range of 10–30 MPa which can be equivalent to a depth of approximately 1.2 km assuming lithostatic pressure. So, the ore-veins formed in shallow environment (e.g., Hedenquist and Henley, 1985).

Based on the evidence of geology, alteration,

mineralization, texture, and fluid evolution processes probably the Joftrud district is interpreted as an intermediate sulfidation deposit. Numerous ore-veins are present in the central Lut Block (e.g., Mir-e-Khash, Rashidi, Shikasteh Sabz, Howz-e-Dagh, Chah Khareh, Chah Noghereh, Hows-e-Raise, Sechangi, Shurab, Chupan and Kuh Shuru) (e.g., [Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013](#); [Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015](#); [Javidi Moghaddam et al., 2018](#); [Mehrabi et al., 2019](#)). These veins mostly have NW-SE and subordinate NE–SW trends and are hosted by andesitic to dacitic composition (andesitic tuff breccia, andesite and


dacite). These ore-veins entail copper, lead, zinc and antimony without significant gold anomaly. The similarities in structural control of mineralization, ore mineralogy, geochemistry and fluid inclusion data suggest that ore-veins can be related to part of a large-scale magmatic-hydrothermal system with economic potential.

#### **Acknowledgements**

The Research Foundation of Ferdowsi University of Mashhad, Iran, supported this study (Project No. 59744.3).




## بررسی‌های دگرسانی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و سیالات درگیر در محدوده اکتشافی جفت‌رود، جنوب‌غرب بیرجند

امید شرعی پور<sup>۱</sup>، آزاده ملک‌زاده شفارودی<sup>۲\*</sup>، مریم جاویدی مقدم<sup>۳</sup> 

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
محدوده اکتشافی جفت‌رود در مرکز بلوک لوت و ۶۰ کیلومتری جنوب‌غرب بیرجند واقع شده است. این محدوده دارای برون‌زدهایی از واحدهای آذرآواری (توف آندزیتی)، آتشفشانی (هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت بازالتی) و توده‌های نفوذی (دیوریت پورفیری، مونزودیوریت، گابرو) است. کانی‌سازی به شکل رگه‌ای با امتداد اغلب شمال‌شرق-جنوب‌غرب در واحدهای آندزیتی تشکیل شده است. دگرسانی‌های عمده شامل سیلیسی، آرژلیک، کربناته و پروپلیتیک است. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، کالکوسیت، کولیت، گوتیت و هماتیت هستند. بیشترین بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمی در رگه‌ها برای مس ۶۰۰۰ گرم در تن، سرب ۲۹۳۴ گرم در تن، روی ۶۹۰۴ گرم در تن و طلا ۱۴۴ میلی‌گرم در تن است. رگه‌های کوارتز-سولفید از سیالاتی با دمای ۲۶۵ تا ۴۰۸ درجه سانتی‌گراد و شوری‌های ۱۱/۱ تا ۱۹ درصد وزنی NaCl تشکیل شده‌اند. کاهش دما و همچنین اختلاط با سیالی با شوری بیشتر می‌تواند باعث ته‌نشینی فلزها شده باشد. محدوده اکتشافی بر اساس شواهدی مانند کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی‌ها و گسترش خطی آنها، کانی‌شناسی، بافت، داده‌های سیالات درگیر و عمق تشکیل مشابه کانسارهای سولفید متوسط است.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲</p>
	<p><b>واژه‌های کلیدی</b></p> <p>کانی‌سازی فلزهای پایه سیالات درگیر جفت‌رود بلوک لوت</p>
	<p><b>نویسنده مسئول</b></p> <p>آزاده ملک‌زاده شفارودی shafaroudi@um.ac.ir </p>

### استناد به این مقاله

شرعی‌پور، امید، ملک‌زاده شفارودی، آزاده و جاویدی مقدم، مریم، ۱۴۰۳. بررسی‌های دگرسانی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و سیالات درگیر در محدوده اکتشافی جفت‌رود، جنوب‌غرب بیرجند. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۴): ۱-۲۰. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1130>

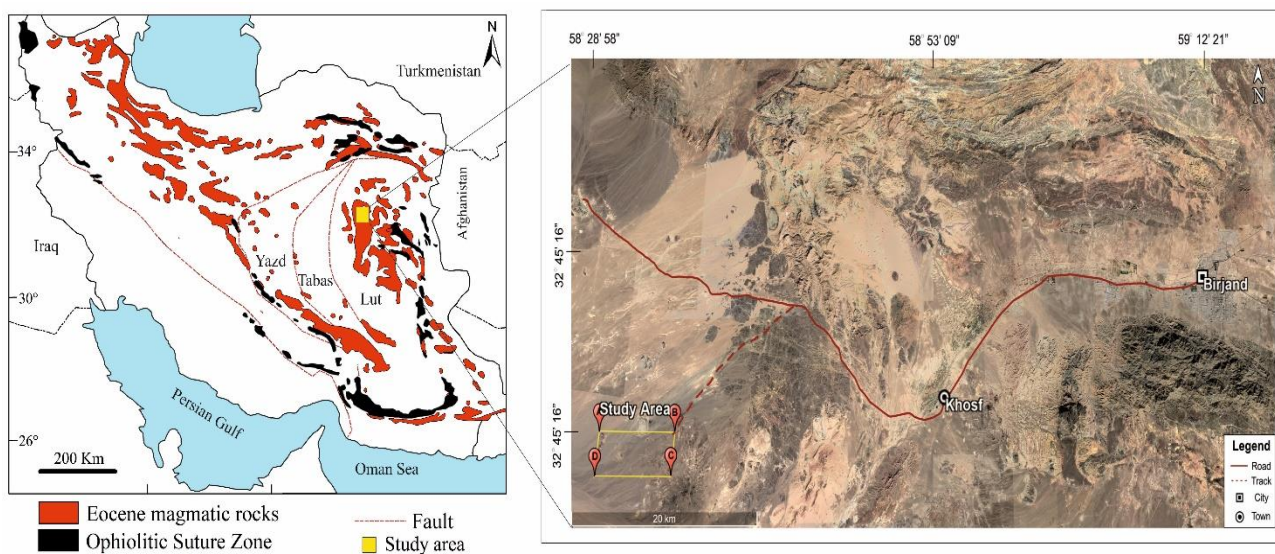
## مقدمه

Moghaddam et al., 2013; Javidi Moghaddam et al., 2018; Javidi Moghaddam et al., 2014), سرب-روی (چاه نقره، سه چنگی، حوض رئیس) (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015), سرب-روی-مس-آنتیموان (شوراب، چوپان، شند محمود، کوه شورو) (Mehrabi et al., 2019) و همچنین وجود حفاری های قدیمی و سرباره های فراوان در محل رگه ها حائز اهمیت است.

بررسی هایی که در منطقه اکتشافی جفت رود انجام شده است شامل تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوسف (Eftekhar-Nezhad et al., 1975) و گزارش عملیات اکتشافی پلی متال توسط کارجو (Karjo, 2021) است؛ اما تا کنون بررسی دقیق علمی بر روی سامانه کانی سازی در منطقه اکتشافی انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش، تفکیک واحدهای سنگی و بررسی های دگرسانی، کانی سازی، زمین شیمیایی و سیالات در گیر به منظور تعیین نوع کانی سازی در منطقه اکتشافی جفت رود و مقایسه با کانی سازی های مجاور آن در مرکز بلوک لوت است.

منطقه اکتشافی جفت رود به وسعت حدود ۲۳ کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی، در ۶۰ کیلومتری جنوب غرب بیرجند و بین طول های جغرافیایی  $58^{\circ} 28' 17''$  و  $58^{\circ} 34' 17''$  و عرض های جغرافیایی  $32^{\circ} 45' 16''$  و  $32^{\circ} 43' 15''$  واقع شده است (شکل ۱). محدوده مورد بررسی از لحاظ تقسیمات ساختاری در مرکز بلوک لوت واقع شده است. بلوک لوت به دلیل وقوع فرو رانش و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسیم، پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی سازی های مختلف دارد. انواع کانی سازی مس-طلا پورفیری، طلای مرتبط با توده های نفوذی احیایی، طلای اپی ترمال سولفید بالا، اسکارن آهن، رگه های Pb-Zn-Sb و IOCG در بلوک لوت شناسایی شده اند (Karimpour et al., 2012).

مرکز بلوک لوت به دلیل گسترش سنگ های آتشفشانی و نفوذی با سن ترشیری (Lotfi, 1982; Salim, 2012; Javidi Moghaddam et al., 2019; Javidi Moghaddam et al., 2021)، حضور کانی سازی های رگه ای نوع مس (شکسته سبز، حوض دغ، مهرخش، رشیدی، شورک و غار کفتری) (Javidi



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه اکتشافی جفت رود در ایران، بلوک لوت و راه های دسترسی به آن

Fig. 1. Location map of the Joftrud prospect area in Iran, Lut Block and access routes to it

## روش بررسی

فعالیت های انجام شده در این پژوهش در دو بخش صحرایی (بررسی ویژگی های بافتی و چگونگی ارتباط پدیده ها در رخنمون ها و نمونه برداری از رگه های معدنی، سنگ میزبان و بخش های دارای دگرسانی) و آزمایشگاهی (تجزیه نمونه ها) انجام شد. در محدوده اکتشافی ۸۰ نمونه از واحدهای سنگی کانی سازی (سطح و محل ترانشه ها) برداشت شد که از این میان ۴۰ نمونه مقطع نازک برای بررسی های سنگ شناسی، دگرسانی و ۵ نمونه مقطع نازک صیقلی و بلوک صیقلی برای بررسی کانی های فلزی تهیه شد. در نهایت، نقشه های زمین شناسی محدوده با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ در محدوده ای به وسعت تقریبی ۲۳ کیلومتر مربع در نرم افزار ArcGIS ترسیم شد.

برای تفسیر دقیق تر سامانه کانی سازی، از داده های زمین شیمیایی حاصل از برداشت ۱۵ نمونه خرده سنگی (از محل کانی سازی ها در سطح و محل ترانشه ها) و تجزیه به روش ICP-OES (در آزمایشگاه زر آزما) استفاده شد که توسط شرکت کاوشگران شرق بیرجند (Karjo, 2021) انجام شده است (روش آماده سازی نمونه ها چهار اسید بوده است). همچنین، تجزیه ۹ نمونه خرده سنگی برای شناسایی طلا به روش fire assay در همین آزمایشگاه انجام شده است.

برای بررسی سیالات درگیر، بعد از بررسی های دقیق هم یافت کانی ها، تعداد ۵ مقطع دوبرصیقل از کانی کوارتز (مهم ترین کانی باطله همراه با کانی سازی در رگه ها) تهیه شد. از این تعداد، ۳ نمونه دارای سیالات درگیر با اندازه مناسب برای بررسی ها بودند. آزمایش های داماسنجی، تعیین نوع نمک ها و مقدار شوری بر روی سیالات درگیر توسط یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن  $\pm 1$  درجه سانتی گراد و محدوده حرارتی دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی گراد است. مقدار شوری در سامانه H<sub>2</sub>O-NaCl با استفاده از نرم افزار تعبیه شده در سامانه اکسل -HOKIEFLINCS

Steele- MacInnis et al., 2012) H<sub>2</sub>O- NaCl

(Lecumberri-Sanchez et al., 2012) محاسبه شده است. در نهایت نمودارهای مناسب در نرم افزار SPSS ترسیم شد.

## زمین شناسی

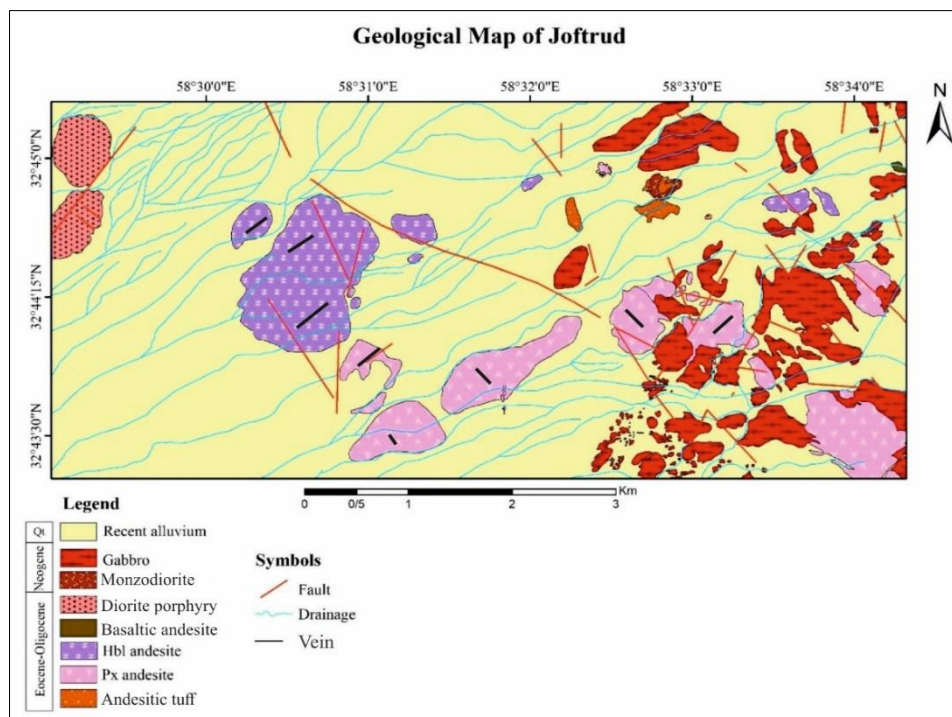
واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای آذرآواری (توف آندزیتی)، آتشفشانی (هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت بازالتی)، توده های نیمه عمیق (دیوریت پورفیری) و عمیق (مونزودیوریت، گابرو) است. بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوسف (Eftekhar-Nezhad et al., 1975)، سن دقیق این واحدها مشخص نبوده و با تردید آنها را به زمان پالئوژن-نوژن نسبت داده اند. واحد توف آندزیتی، قدیمی ترین واحد با گسترش محدود، در شمال منطقه رخنمون یافته است (شکل ۲).

واحد هورنبلند آندزیت اغلب در مرکز محدوده گسترش یافته است (شکل ۲). بافت غالب آن پورفیری تا گلومروپورفیری بوده و درشت بلورها ۳۰ تا ۳۵ درصد از حجم سنگ را تشکیل داده اند که شامل کانی های پلاژیو کلاز (۱۵ تا ۲۰ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۱۰ درصد) و آلکالی فلدسپار (۳ تا ۵ درصد) است (شکل ۳-A). هورنبلندها در بعضی قسمت ها از حاشیه اپاسیتی شده اند. کانی های کدر نیز حدود ۲ درصد از مقطع را شامل می شوند. واحد آندزیت بازالتی رخنمون محدودی در شمال شرق منطقه دارد (شکل ۲).

بافت غالب در این واحد پورفیری بوده و بافت های گلومروپورفیری و میکروولیتی در بعضی قسمت ها دیده می شود. حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد درشت بلور دارد که شامل پلاژیو کلاز (۱۵ تا ۲۰ درصد)، پیروکسن (۷ تا ۱۰ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۷ درصد) و الیوین (۲ تا ۳ درصد) است. زمینه سنگ نیز شامل کانی های یاد شده است. واحد پیروکسن آندزیت اغلب در جنوب و جنوب شرق منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه دانهریز است. در بعضی قسمت ها بافت گلومروپورفیری نیز دیده می شود که حاصل تجمع کلینوپیروکسن هاست.

واحد مونزودیوریت رخنمون محدودی در شمال منطقه دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت گرانولار بوده و از کانی های پلاژیوکلاز (۴۰ تا ۴۵ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳۰ تا ۳۵ درصد)، هورنبلند (۱۰ تا ۱۵ درصد) و پیروکسن نوع اوژیت (۳ تا ۵ درصد) تشکیل شده است. واحد گابروی بیشترین گسترش را در محدوده مورد بررسی داشته و اغلب در شرق محدوده گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد دارای بافت گرانولار بوده و کانی های تشکیل دهنده سنگ شامل پلاژیوکلاز (۵۵ تا ۶۰ درصد)، پیروکسن (۱۵ تا ۲۰ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۱۰ درصد)، الیون (۵ تا ۷ درصد) و کمتر از ۳ درصد کانی های کدر است (شکل ۳-B و C).

درشت بلورهای (۵۵ تا ۶۰ درصد) تشکیل دهنده سنگ شامل پلاژیوکلاز (۳۰ تا ۳۵ درصد)، پیروکسن (۱۰ تا ۱۵ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳ تا ۵ درصد) و هورنبلند (۳ تا ۵ درصد) است. واحد دیوریت پورفیری در شمال غرب منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری بوده و درشت بلورهای (۵۵ تا ۶۰ درصد) تشکیل دهنده سنگ شامل پلاژیوکلاز (۴۰ تا ۴۵ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳ تا ۵ درصد)، بیوتیت (۳ تا ۵ درصد)، هورنبلند (۲ تا ۳ درصد) و کانی های کدر (کمتر از ۲ درصد) است. زمینه سنگ شامل کانی های پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کانی های کدر بوده و در اثر دگرسانی زمینه سنگ سیلیسی و کربناته شده است.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده اکتشافی جفت رود

Fig. 2. Geological map of the Joftrud prospect area

گرفته اند (شکل ۴). دگرسانی غالب در منطقه مورد بررسی سیلیسی شدن بوده که اغلب به صورت کوارتز همراه با ماده معدنی

دگرسانی ها با گسترش کم و شدت زیاد در حاشیه رگه ها شکل

## دگرسانی

شمال غرب - جنوب شرق هستند.

در منطقه جفت رود، بافت عمده در کانی سازی رگه ای از نوع پرکننده فضای خالی یا قشری است که در اثر ورود سیالات کانه دار در فضای خالی گسل ها و شکستگی ها در واحدهای آندزیتی شکل گرفته است. این بافت در توالی همبرزادی اهمیت بالایی داشته و معمولاً نسل اول ته نشست با ماده معدنی فلزی بوده که در ادامه با ته نشست کوارتز به عنوان باطله همراه است. بافت های برشی در زون گسلی شناسایی شد؛ به طوری که سنگ میزبان دچار شکستگی شده و زون های خرد شده توسط کانی سازی مس و سیلیس سیمان شده اند.

کانی سازی اولیه شامل پیریت و کالکوپیریت است. در اثر اکسایش، کانی های ثانویه مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، کالکوسیت، کوولیت (شکل ۳-E و F)، گوتیت، لیمونیت و هماتیت ایجاد شده اند (شکل ۴-C و D). کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی، مهم ترین باطله همراه با کانی سازی است. در نهایت، بر اساس بررسی های صحرایی، هم یافت کانی ها، بافت، نوع دگرسانی و روابط قطع شدگی در رگه، کانی سازی در محدوده مورد بررسی را می توان به دو مرحله تقسیم کرد. این مراحل عبارتند از: ۱- کوارتز - کالکوپیریت - پیریت - بورنیت، ۲- کوارتز - کالکوپیریت و به میزان کمتر پیریت (شکل ۵).

### کانه نگاری در رگه های کانه دار

پیریت اغلب به صورت پراکنده در مقاطع دیده شد و به میزان کمتر همراه با کالکوپیریت در رگه ها در هر دو مرحله کانی سازی شناسایی شد. این کانی بی شکل تا شکل دار بوده و اندازه آن از ۰/۵ تا ۰/۱ میلی متر متغیر است. مقدار فراوانی این کانی ۱ تا ۲ درصد از حجم سنگ است. پیریت ها به کانی های ثانویه هماتیت و گوتیت تبدیل شده اند. مقدار تبدیل پیریت به هماتیت و گوتیت بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد است. کالکوپیریت به صورت بی شکل تا نیمه شکل دار و فراوانی ۳ تا ۵ درصد در مرحله اول کانی سازی شکل گرفته است. این کانی اغلب به کالکوسیت و کوولیت

و به میزان کمتر اضافه شدن سیلیس به سنگ های اطراف در زون های دگرسانی دیده می شود. دگرسانی آرژیلیک در حاشیه رگه (در محل ترانشه ها) مشاهده شد. شدت این دگرسانی در بعضی قسمت ها به حدی است که سنگ اولیه قابل تشخیص نیست و حاصل تبدیل شدن پلاژیو کلاز به کانی های رسی از قبیل کائولینیت است (شکل ۳-C و شکل ۴-A و B). همچنین، بر روی سطح زمین و محل ترانشه ها، کانی های رسی مشاهده شد که این کانی ها مربوط به دگرسانی آرژیلیک نبوده و در اثر فرایندهای ثانویه ایجاد شده اند. بنابراین، نباید آنها را به عنوان بخشی از دگرسانی آرژیلیک در نظر گرفت. دگرسانی کربناته به صورت رگچه های کلسیت و یا حفره های پر شده توسط کربنات مشخص می شود (شکل ۳-D). در این رگچه ها کانی های کلسیت بی شکل تا خودشکل بوده و ابعاد بلورهای آن از چند ده میکرون تا ۰/۴ میلی متر متغیر است.

دگرسانی پروپیلیتیک بیشترین گسترش را در محدوده داشته و اغلب واحدهای آندزیتی و مونوزودیوریتی را تحت تأثیر قرار داده است. هورنبلندها اغلب به کلریت (۱۰ تا ۲۵ درصد) تبدیل شده اند. همچنین پلاژیو کلازها به اپیدوت (۲۰ تا ۳۰ درصد) و به میزان خیلی کم به کانی رسی (۱ تا ۳ درصد) تبدیل شده اند. واحدهای گابرویی نسبت به دیگر واحدها کمتر دگرسان شده و اغلب پلاژیو کلازها به میزان خیلی کم به کانی رسی تبدیل شده اند.

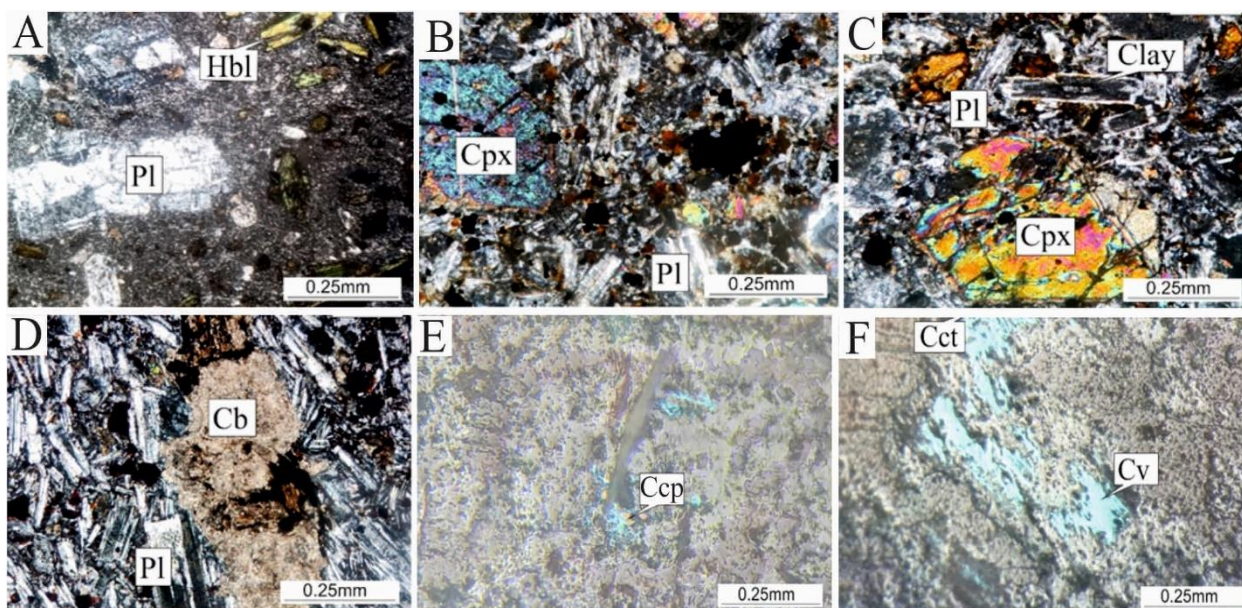
### کانی سازی

دو روند اصلی گسلی در محدوده مورد بررسی شناسایی شده که شامل گسل هایی با روند شمال شرق - جنوب غرب و شمال غرب - جنوب شرق است (Karjo, 2021). بیشترین تراکم زون های گسلی اغلب در شرق و مرکز محدوده است. کانی سازی در محدوده مورد بررسی کنترل گسلی داشته و به صورت رگه ای شکل گرفته است. عمده ترین سنگ میزبان رگه ها، واحدهای آندزیتی است. رگه های کانی سازی با طول در حدود ۵ تا ۱۰ متر اغلب دارای روند شمال شرق - جنوب غرب و به میزان کمتر روند



هماتیت و گوتیت به صورت پراکنده و نیز در رگه‌ها مشاهده می‌شوند (شکل ۴-C و D). میزان فراوانی گوتیت حدود ۳ تا ۵ درصد بوده که بافت کلونیدی نیز در آن مشهود است. اندازه این کانی از ۰/۱ تا ۰/۷ میلی‌متر متغیر است. فراوانی هماتیت نیز از ۱۵ تا ۲۰ درصد متغیر است. مالاکیت به صورت لکه‌های پراکنده تا جانشینی در حاشیه کالکوسیت در حجم زیاد در نواحی اکسیدان و سوپرژن مشاهده می‌شود. اندازه این کانی بین ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر و فراوانی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد است. کوولیت در نمونه‌هایی با تأثیر فرایندهای سوپرژن حضور داشته که در حاشیه کانی گالن دیده می‌شود. آزوریت و کریزوکلا به میزان کم و به صورت پراکنده حفره‌ها در زون سوپرژن مشاهده شد.

تبدیل شده است (شکل ۳-E). کالکوسیت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در رگه‌هاست. فراوانی کالکوسیت‌ها ۲۰ تا ۲۵ از حجم کانی‌سازی است و اندازه آنها از ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر و گاهی تا بیش از ۵ میلی‌متر است. کالکوسیت ثانویه با بافت جانشینی ثانویه و ابعادی بین ۰/۳ تا ۰/۸ میلی‌متر در رگه‌ها مشاهده شد. فراوانی کالکوسیت‌ها ۳۰ تا ۳۵ از حجم کانی‌سازی است (شکل ۳-E و F). کوولیت نیز مشابه کالکوسیت ثانویه با بافت جانشینی ثانویه و ابعادی بین ۰/۳ تا ۰/۵ میلی‌متر در رگه‌ها و به صورت پراکنده شناسایی شد. کوولیت فراوانی ۱۰ تا ۱۵ درصد در حاشیه و سطوح درز و شکستگی‌های کانی کالکوسیت مشاهده شد (شکل ۳-E و F).



شکل ۳. تصاویرهای میکروسکوپی از A: واحد هورنبلند آندزیت، B: واحد گابرو، C: تبدیل پلاژیوکلاز از مرکز به کانی‌های رسی در واحد گابروی، D: دانه‌های درشت کربنات در زمینه واحد مونزودیوریت، E: تبدیل کالکوپیریت به کالکوسیت و کوولیت از حاشیه و درز و شکستگی‌ها و F: کالکوسیت و کوولیت در زون سوپرژن، محدوده اکتشافی جفت‌رود. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Cpx: کلینوپیروکسن، Cb: کربنات، Clay: کانی رسی، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کوولیت، Cct: کالکوسیت).

**Fig. 3.** Photomicrographs of A: hornblende andesite unit, B: gabbro unit, C: replacement of plagioclase by clay minerals from the center in gabbro unit, D: coarse-grained carbonate in groundmass of monzodiorite unit, E: chalcopyrite replaced by chalcocite and covellite along grain boundaries and fractures, and F: chalcocite and covellite in supergene zone, the Jofrud prospect area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: plagioclase, Hbl: hornblende, Cpx: clinopyroxene, Cb: Carbonate, Clay: clay minerals, Ccp: Chalcopyrite, Cv: Covellite, Cct: Chalcocite).



شکل ۴. تصویرهای صحرایی از A و B: دگرسانی آرژیلیک، C و D: اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) در محل ترانشه، محدوده اکتشافی جفت رود

Fig. 4. Field photographs of A and B: argillic alteration, C and D: Fe oxides (hematite, goethite and limonite) at the trench, the Joftrud prospect area

Minerals	Hypogene			Supergene
	Stage-1	Stage-2	Late Stage	
Pyrite				
Chalcopyrite	—			
Bornite	—			
Chalcocite				
Covellite				
Chrysocolla				
Azurite				
Malachite				
Hematite				
Goethite				
Limonite				
Quartz	—			

شکل ۵. توالی هم یافت کانی های فلزی و غیر فلزی در محدوده اکتشافی جفت رود

Fig. 5. The paragenetic sequence in the Joftrud prospect area

**زمین‌شیمی**

بیشترین مقادیر مس در مرکز محدوده و مربوط به رگه موجود در واحد آندزیتی است؛ در حالی که مقدار زمینه عنصر مس در واحدهای آذرین حدواسط بین ۲۰ تا ۴۰ گرم در تن است (جدول ۱).

بر اساس نتایج آنالیز تعداد ۱۷ نمونه زمین‌شیمی برداشت‌شده از رگه‌ها (از محل ترانشه‌ها)، نتایج عناصر مهم مس، نقره، طلا، آنتیموان، آرسنیک، منگنز، سرب و روی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار مس از ۲۴ تا ۶۰۰۰ گرم در تن در نمونه‌ها متغیر است.

**جدول ۱.** نتایج آنالیز مس، نقره، طلا، آنتیموان، آرسنیک، منگنز، سرب و روی در نمونه‌های خرده سنگی محدوده اکتشافی جفت‌رود (طلا بر حسب میلی‌گرم در تن و بقیه عناصر گرم در تن است)

**Table 1.** Results of Cu, Ag, Au, Sb, As, Mn, Pb and Zn from chip composite samples of the Joftrud prospect area (Au is ppb and other elements are ppm)

Sample Number	X	Y	Cu	Pb	Zn	Sb	Ag	As	Au	Mn
J-M-01	32°44'26.85"N	58°30'57.29"E	256	6904	2934	83.4	39.7	>100	95	1367
J-M-03	32°44'34.60"N	58°30'42.29"	70	868	404	25.7	10.5	>100	117	559
J-M-04	32°44'30.05"N	58°30'42.02"E	39	2056	649	70.7	1.8	>100	31	110
J-M-05	32°44'26.73"N	58°30'42.61"E	-	-	-	-	-	-	90	-
J-M-06	32°44'26.90"N	58°30'26.29"E	83	305	81	9.3	0.69	>100	-	383
J-M-07	32°44'26.94"N	58°30'23.06"E	1529	141	416	>0.01%	1.69	>100	-	1210
J-M-10	32°44'41.37"N	58°29'38.70"E	-	-	-	-	-	-	6	-
J-M-14	32°44'42.05"N	58°32'14.12"E	155	32	105	0.91	0.3	6.6	-	1069
J-M-15	32°44'53.77"N	58°32'27.70"E	160	14	125	0.98	0.33	2.6	-	1387
J-M-16	32°44'35.27"N	58°33'29.70"E	154	14	106	1	0.27	2.1	-	1230
J-M-19	32°44'20.08"N	58°33'36.96"E	141	12	120	0.94	0.39	1.9	-	1446
J-M-20	32°44'26.89"N	58°30'56.79"E	29	1332	464	73.7	37.4	>100	44	1728
J-M-21	32°44'29.96"N	58°30'58.08"E	24	2405	146	49.2	22.4	>100	-	1215
J-M-23	32°44'26.70"N	58°30'42.69"E	24	1284	187	9.7	0.43	>100	7	297
J-M-24	32°44'16.39"N	58°30'22.77"E	3713	3122	573	>0.01%	16.2	>100	141	546
J-M-25	32°44'6.50"N	58°30'21.68"E	44	65	23	17.9	0.4	25	5	50
J-M-26	32°44'45.88"N	58°32'45.73"E	6651	5	36	0.95	5.1	61.2	5	5529

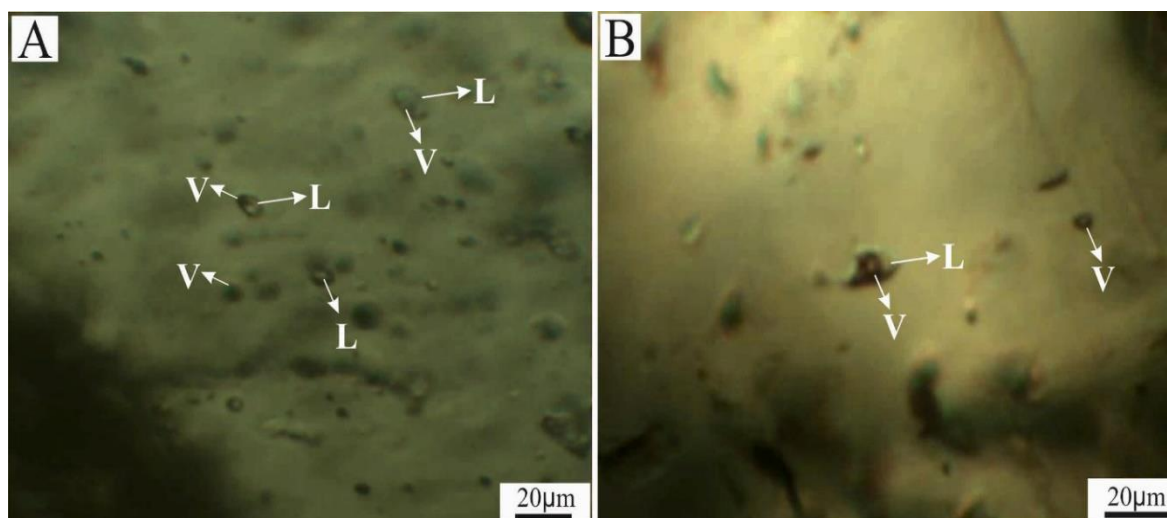
پژوهش، ۳ مقطع دوبرصیقلی از کانی کوارتز تهیه و بررسی های سیالات درگیر بر روی آنها انجام شد. سیالات درگیر در نمونه های کوارتز اغلب بی شکل، کروی تا بیضوی بوده و اندازه آنها بین ۱۰ تا ۲۴ میکرون است. بر اساس تقسیم بندی های متداول (Roedder, 1984)، در نمونه های مورد بررسی ۳ نوع سیال درگیر قابل تفکیک است. بیشتر سیالات درگیر شناسایی شده دو فاز غنی از مایع (نوع L+V با مقدار فاز مایع ۷۰ تا ۸۵ درصد و بخار ۱۵ تا ۳۰ درصد) بوده و همگی به صورت اولیه تشکیل شده اند. همچنین تعداد کمی از سیالات از نوع سیالات درگیر غنی از بخار (V) و تک فاز مایع (L) هستند (شکل ۶-A و B). نبود فاز جامد (هالیت) در سیالات درگیر به دلیل شوری متوسط تا پایین سیالات کانه ساز است.

در این پژوهش، ۱ مقطع دوبرصیقلی و تعداد ۱۹ سیال درگیر (انواع LV) از مرحله اول، ۲ مقطع دو برصیقلی و تعداد ۲۱ سیال درگیر (انواع LV) از مرحله دوم کانی سازی رگه ای اندازه گیری شده است (جدول ۲).

تغییرات سرب و روی به ترتیب از ۲۴ تا ۲۹۳۴ و ۵ تا ۶۹۰۴ گرم در تن است (جدول ۱). بیشترین میزان سرب و روی در رگه شکل گرفته در واحد هورنبلند آندزیت (در مرکز محدوده مورد بررسی) اندازه گیری شده است. مقادیر سرب و روی در نمونه ها قابل توجه بوده و آنومالی بالایی نشان می دهند؛ اگرچه کانی های سرب دار و روی دار در بلوک های مورد بررسی دیده نشد. میزان آنتیموان نیز از کمتر از ۱ تا ۸۴ گرم در تن تغییر می کند که بیشینه میزان این عنصر در رگه شکل گرفته در واحد پروکسن آندزیت واقع در بخش جنوبی محدوده است. آنالیز طلا نشان داد که بیشترین آنومالی آن، ۱۴۱ میلی گرم در تن است؛ در حالی که مقدار زمینه عنصر طلا در سنگ های آذرین حدواسط ۵ میلی گرم در تن است. میزان آرسنیک از ۱ گرم در تن تا بیش از ۱۰۰ گرم در تن متغیر است (جدول ۱).

### بررسی سیال های درگیر

در محدوده اکتشافی جفت رود، کانی کوارتز مهم ترین کانی باطله همراه با کانی سازی و مرتبط با سیال کانه ساز است. در این



شکل ۶. A و B: تصویرهای میکروسکوپی از سیالات درگیر دوفازی (LV)، تک فاز مایع (L)، تک فاز بخار (V) در کوارتز، محدوده اکتشافی جفت رود

**Fig. 6.** A and B: the microscopic images of two-phase liquid-vapor (LV), single-phase liquid (L) and single-phase vapor (V) fluid inclusions in quartz, the Joftrud prospect area

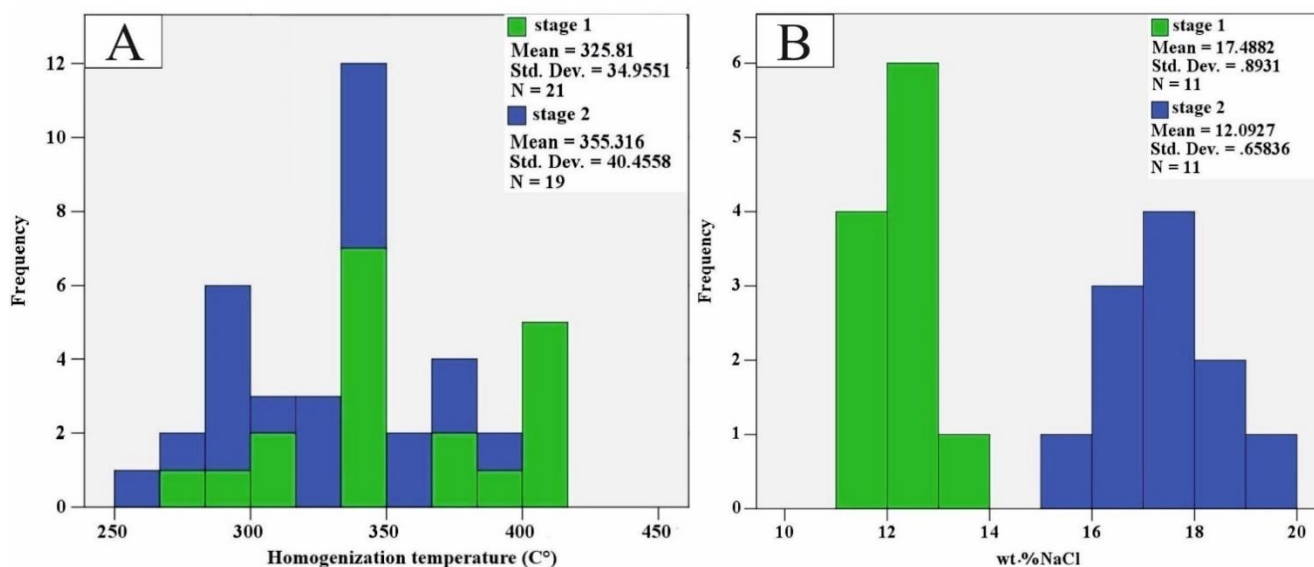
دوم کانی سازی، مقدار دمای ذوب آخرین قطعه یخ ( $T_{m-ice}$ ) در سیالات متغیر و بین ۱۵/۵- تا ۱۲- است که بر این اساس شوری سیالات درگیر این رگه از ۱۵/۹ تا ۱۹ درصد وزنی متغیر است. دامنه حرارتی دمای همگن شدن در این رگه ۲۶۵ تا ۳۸۵ درجه سانتی گراد است (شکل ۷-A و B).

خلاصه نتایج دماسنجی بر روی این سیالات در جدول ۲ ارائه شده است. در مرحله اول کانی سازی، دمای ذوب آخرین قطعه یخ ( $T_{m-ice}$ ) در سیالات متغیر و بین ۹/۵- تا ۷/۵- است که بر این اساس شوری سیالات درگیر این رگه از ۱۱/۱ تا ۱۳/۴ درصد وزنی متغیر است. دامنه حرارتی دمای همگن شدن در این مرحله ۲۷۰ تا ۴۰۸ درجه سانتی گراد است (شکل ۷-A و B). در مرحله

جدول ۲. نتایج بررسی های سیالات درگیر اولیه (P) در کانی کوارتز همراه با کانه زایی رگه ای در محدوده اکتشافی جفت رود

**Table 2.** Microthermometric data of primary fluid inclusions (P) of quartz mineral associated with mineralization in the Jofrud prospect area

Sample N.	Stage	Dimension ( $\mu\text{m}$ )	Fluid Number	Th ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{fm}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m-ice}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Salinity (Wt.%)
JR-18	2	11-24	9	385-285	48.3 -to 49.4-	12 -to 15.5-	17.7-15.9
JR-24	2	10-21	12	360-265	46.5-to 47-	13 -to 15.5-	19-16.8
JR-3	1	8-16	19	408-270	45.9 -to 48.2-	7.5 -to 9.5-	13.4-11.1



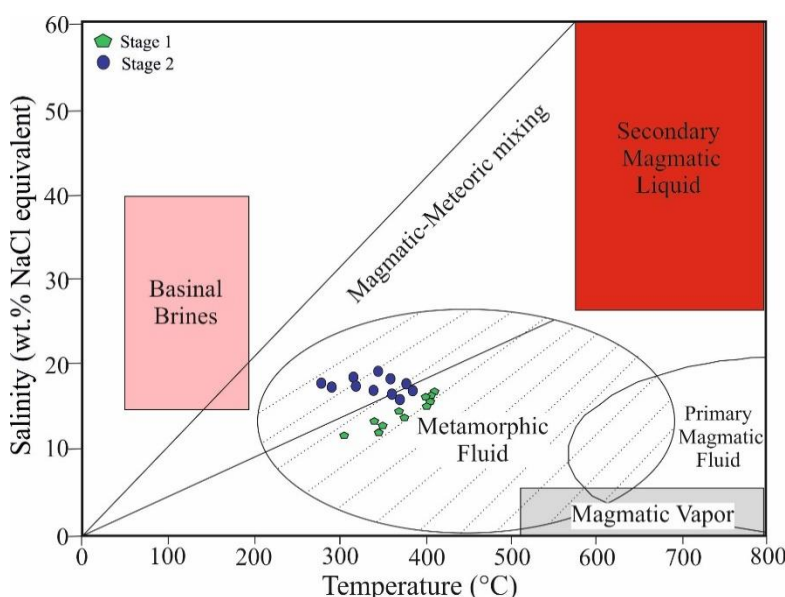
شکل ۷. نمودارهای A: دمای همگن شدن و B: شوری سیالات درگیر اولیه در محدوده اکتشافی جفت رود

**Fig. 7.** Histogram showing the A: homogenization temperature, and B: salinity (wt.% NaCl equivalent) data of primary fluid inclusions in veins from the Jofrud prospect area

### بحث و نتیجه گیری

برای سیالات در گیر نشان می دهد که سیال های در گیر کوارتز در محدوده اکتشافی جفت رود در گستره آمیختگی آب ماگمایی-جوی و محیط آب های دگرگونی قرار گرفته اند (شکل ۸). آثار دگرگونی ناحیه ای در این منطقه وجود ندارد؛ لذا فرضیه دخالت آب دگرگونی در حمل فلزها منتفی است. بنابراین می توان محلول کانه دار را آمیزه ای از آب ماگمایی و آب جوی در نظر گرفت؛ هر چند به طور قطع نمی توان این مسئله را تأیید کرد و برای اثبات نقش آب های ماگمایی و جوی در محلول کانه ساز نیاز به بررسی های ایزوتوپ های پایدار است.

به کمک شواهد صحرائی می توان گفت که کانی سازی در محدوده مورد بررسی در ارتباط با عملکرد گسل هایی با امتداد اغلب شمال شرق- جنوب غرب در سنگ میزبان اغلب آندزیتی شکل گرفته است. بافت های شاخص کانی زایی رگه ای با کنترل گسلی مانند رگه-رگچه ای، برشی و پرکننده فضای خالی در محدوده اکتشافی به خوبی قابل شناسایی است (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Gemmell, al., 2000; Einaudi et al., 2005; Wang et al., 2019). نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدن و محیط آب های مختلف



شکل ۸. نمودار دمای همگن شدن نسبت به شوری سیال های در گیر محدوده اکتشافی جفت رود (محیط های تعریف شده برگرفته از بین (Beane, 1983)

**Fig. 8.** Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Joftrud prospect area (Defined areas are plotted according to Beane (1983)

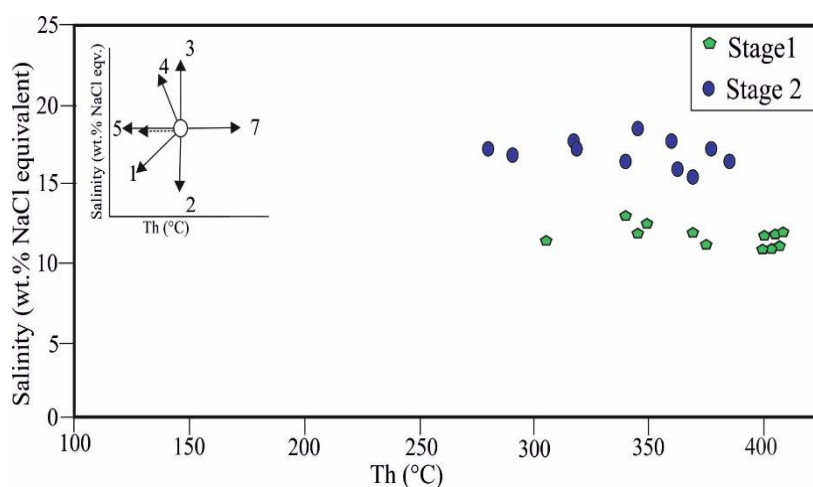
ذخایری که در درجه حرارت های بالاتر از تقریباً ۳۰۰ درجه سانتی گراد تشکیل می شوند، بیانگر شرایط نسبتاً آکسید کننده و غالب بودن کمپلکس های کلریدی است (Seward, 1973; Seward, 1991). درجه حرارت تشکیل اغلب بالاتر از ۳۰۰

کمپلکس های بی سولفیدی در کانسارهایی که در درجه حرارت های پایین تر از ۳۰۰ درجه سانتی گراد تشکیل می شوند و یا در کانسارهایی که کانی شناسی آنها دلالت بر شرایط احیا کننده دارد، غالب هستند. حضور کانی های اکسیدی یا سولفیدی در

کاهش دما مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری کانی‌سازی است. آنچه در نمودار شوری-دما همگن‌شدن سیال‌های درگیر مورد توجه است، در دو مرحله کانی‌سازی، سیالات با روند خطی مستقیم دارای دماهای تقریباً یکسان و شوری‌های متفاوت هستند. این رخداد را می‌توان در نتیجه یکی از این دو فرایند دانست: ۱- ورود شورابه بیگانه به قسمت‌های کم عمق و ۲- فرایند جوشش که باعث گیر افتادن سیالی با شوری متغیر در یک سیال دیگر شود (Simmons and Brown, 1997; Scott and Watanabe, 1998). با توجه به اینکه شواهد جوشش در سیالات درگیر (مانند وجود سیالات دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار) مشاهده نشد، می‌توان عامل اختلاط با سیالی با شوری بیشتر که می‌تواند حاصل آب‌های شور حوضه‌ای باشد را به عنوان عاملی مهم در ته‌نشست کانی‌ها در مرحله دوم کانی‌سازی دانست.

درجه سانتی‌گراد در محدوده اکتشافی جفت‌رود می‌تواند نشان‌دهنده غالب بودن کمپلکس‌های کلریدی نسبت به کمپلکس‌های بی‌سولفیدی باشد؛ هرچند نمی‌توان با قاطعیت نقش غالب کمپلکس‌های کلریدی در محلول‌های کانه‌ساز را تأیید کرد. در کانسارهای رگه‌ای، میزان طلا به شوری سیال کانه‌ساز بستگی دارد. انواع غنی از طلا با سیال با شوری کمتر و نوع فلزهای پایه و نقره با سیال با شوری بالاتر همراه هستند (Seward and Barnes, 1997). بنابراین میزان کم طلا در کانی‌سازی رگه‌ای می‌تواند به دلیل شوری بالای سیال کانه‌ساز در محیط تشکیل باشد.

شکل ۹، نمودار دمای همگن‌شدن در برابر شوری برای سیالات دوفازی در کانی‌های کوارتز را نشان می‌دهد. سیالات مربوط به کانی‌های کوارتز دارای روند خطی مستقیم بوده که نشان می‌دهد

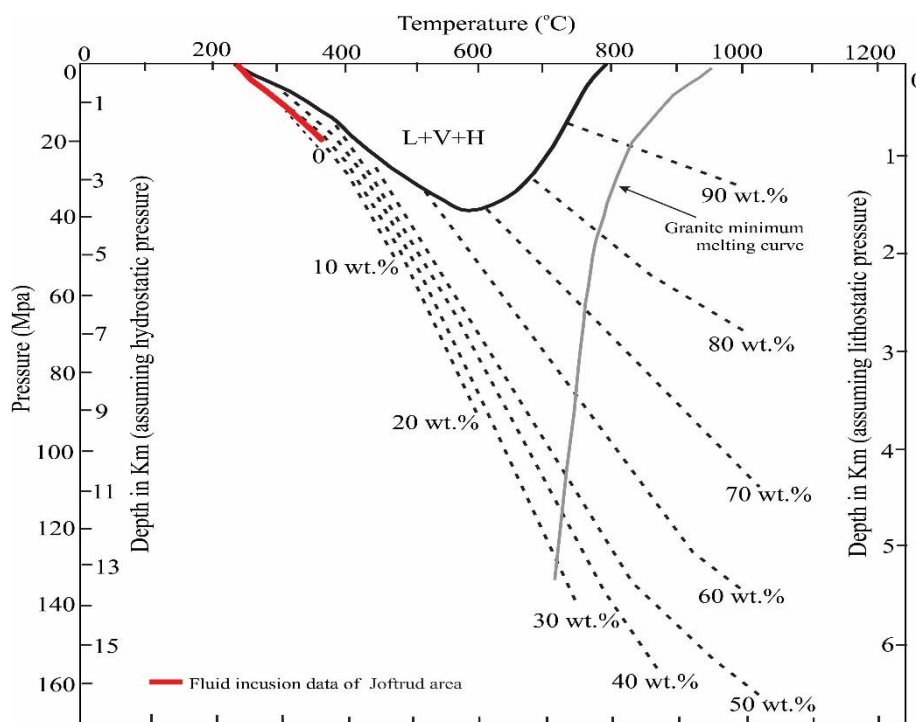


شکل ۹. نمودار دمای همگن‌شدن در مقابل شوری میان‌بارهای سیال در کانی‌سازی‌های رگه‌ای محدوده اکتشافی جفت‌رود. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری از شفرد و همکاران (Shepherd et al., 1985). روند ۱= مخلوط‌شدگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روند ۲ و ۳= مخلوط‌شدگی سیال A با سیالات دیگر با شوری مختلف؛ ولی دمای یکسان، روند ۴= شوری فاز باقی‌مانده در اثر جوشش افزایش پیدا کرده است، روند ۵= سرد شدگی سیال، روند ۶= باریک‌شدگی میان‌بارهای سیال، روند ۷= تراوش میان‌بارهای سیال در طول گرمایش

**Fig. 9.** Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Joftrud prospect area. Several possible trends of fluid evolution in a temperature–salinity diagram from Shepherd et al. (1985). Trend 1 represents primitive fluid A mixed with cold and low salinity fluid B, trends 2 and 3 represent the result of fluid A isothermally mixing with different salinity fluid B, trend 4 represents the salinity of residual phase increased, caused by boiling of fluid A, trend 5 represents cooling of fluid A, trend 6 represents necking of the fluid inclusion, trend 7 represents leakage of fluid inclusions during heating

در عمق کمتر از ۱ کیلومتر تشکیل می‌شوند (Hedenquist and Henley, 1985)، شاید بتوان چنین استنباط کرد که کانی‌سازی رگه‌ای می‌تواند در ارتباط با یک سامانه پورفیری در عمق باشد.

بر اساس نمودار دما-فشار (Fournier, 1999) کانی‌سازی در فشاری بین ۱۰ تا ۳۰ پاسکال تشکیل شده است. بر اساس این مقدار فشار و با توجه به فشار لیتواستاتیک، عمق تشکیل کانی‌سازی حدود ۱۲۰۰ متر است (شکل ۱۰). از آنجا که کانسارهای رگه‌ای



شکل ۱۰. نمودار فشار-درجه حرارت (برای نمونه‌های منطقه جفت‌رود) نشان‌دهنده رابطه فازها در سامانه NaCl-H<sub>2</sub>O در فشارهای هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک (Fournier, 1999). L=مایع، V=بخار، H=نمک. خط‌چین‌ها کانتورهای ثابت درصد وزنی NaCl محلول در شورابه هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیت را مشخص می‌کند. خط ضخیم مشکی مرز سه فاز، L+V+H را برای سامانه NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O با Na/K در محلول ثابت‌شده به وسیله آلایت و K-فلدسپار در درجه حرارت‌های مشخص نشان می‌دهد.

**Fig. 10.** Pressure-temperature diagram (for samples of the Joftrud prospect area) showing phase relationships in the NaCl-H<sub>2</sub>O system at lithostatic and hydrostatic pressures (Fournier, 1999). L= liquid, V= vapor, H= halite. Thin dashed lines are contours of constant wt percent NaCl dissolved in brine. Filled gray line indicates granite minimum melting curve. Filled dark line shows the three-phase boundary, L+V+H, for the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O with Na/K in solution fixed by equilibration with albite and K-feldspar at the indicated temperatures.

در طی دهه‌های اخیر، سه نوع اصلی کانسار سولفید بالا، سولفید متوسط و سولفید پایین هم به صورت رگه‌ای و هم به صورت توده‌ای، به‌طور گسترده‌ای شناسایی شدند (Sillitoe, 1997)؛

چون ارتباط با ماگماتیسیم کالک‌آلکان، سنگ میزبان آندزیتی، دگرسانی سریسیتیک، آنومالی عناصر فلزهای پایه، دما و شوری



آنومالی قابل توجهی از طلا در این رگه ها شناسایی نشده است. محدوده های دما و شوری در این رگه ها مشابه است. با توجه به چنین شواهدی این احتمال وجود دارد که همه رگه ها در این محدوده از مرکز بلوک لوت مربوط به یک سامانه ماگمایی- گرمایی واحد بوده و ماگما در عمق کانی سازی ها را کنترل می کند.

### قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاون پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد طی طرح شماره ۵۹۷۴۴ مورخ ۱۴۰۲/۱/۲۱ انجام شده است.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

محلول های کانه ساز و عمق تشکیل، کانی سازی در محدوده اکتشافی جفت رود تا حدودی مشابه سامانه های سولفید متوسط است.

نکته قابل توجه در مرکز بلوک لوت، حضور کانی سازی های رگه ای متعدد فلزهای پایه است. از جمله این رگه ها می توان به شورک، شکسته سبز، غار کفتر، رشیدی، چاه نقره، شوراب، چوپان، گله چاه، سه چنگی و حوض رئیس اشاره کرد (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015; Javidi Moghaddam et al., 2018; Mehrabi et al., 2019). این

رگه ها دارای امتداد اغلب شمال غرب- جنوب شرق تا شمال شرق- جنوب غرب بوده و سنگ میزبان این رگه ها ترکیب حدواسط تا اسیدی (توف برش آندزیتی، آندزیت تا داسیت) دارند. کانی سازی عمده در آنها شامل مس، سرب، روی و آنتیموان بوده و در مقابل،

## References

- Beane, R.E., 1983. The Magmatic–Meteoric Transition. Geothermal Resources Council (Special Report 13), 245–253. Retrieved September 29, 2024 from <https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1005457>
- Eftekhari-Nezhad, J., Vahdati Daneshmand, F. and Kholghi, M.H., 1975. Geological map of Khusf, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2005. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 285–313. <https://doi.org/10.5382/SP.10.15>
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1212. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1193>
- Gemmell, J.B., 2004. Low- and intermediate sulfidation epithermal deposits. In: D.R. Cooke, C.L. Deyel and J. Pongratz (Editors), 24 Ct Gold Workshop. University of Tasmania. Hobart, Australia, pp. 57–63. Retrieved July 20, 2022 from <http://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgibin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=40195>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), Gold in 2000. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Hedenquist, J.W. and Henley, R.W., 1985. Hydrothermal eruptions in the Waitapu geothermal system, New Zealand: Their origin, associated breccias, and relation to precious metal mineralization. *Economic geology*, 80(6): 1640–1668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1640>
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Haidarian Shahri, M.R. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Mineralogy, geochemistry, fluid inclusion and oxygen isotope investigations of epithermal Cu ± Ag veins of the Khur Area, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 1139–1156. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13596>
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Heidariane Shahri, M.R., 2013. Satellite data processing, alteration, mineralization and geochemistry of Mehrkhash area prospect, North West of Birjand. *Researches in Earth Sciences* 4(4): 56–69. (in Persian with English abstract) Retrieved September 29, 2024 from [https://esrj.sbu.ac.ir/article\\_95473.html](https://esrj.sbu.ac.ir/article_95473.html)
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Heidariane Shahri, M.R., 2014. Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Shekaste Sabz area prospect, North West of Birjand. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22(3): 507–520. (in Persian with English abstract) Retrieved September 29, 2024 from [https://ijcm.ir/browse.php?a\\_id=231&sid=1&slc\\_lang=en](https://ijcm.ir/browse.php?a_id=231&sid=1&slc_lang=en)
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Santos, J.F. and Corfu, F., 2021. Middle Eocene magmatism in the Khur region (Lut Block, Eastern Iran): implications for petrogenesis and tectonic setting. *International Geology Review*, 63(9): 1051–1066. <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1708815>
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Santos, J.F. and Mendes, M.H., 2019. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of intrusive rocks: Constraint on the genesis of the Cheshmeh Khuri Cu mineralization and its link with granitoids in the Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 202: 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.04.001>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Stern, C.R. and Farmer, L., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U–Pb zircon geochronology, Sr–Nd isotopic characteristic and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1–27. (in Persian with English abstract)

- <https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13391>
- Karjo, M., 2021. Report on the progress of the exploration operation of the Joftrud poly-metal area. Geological Survey of Iran, Birjand, 47 pp.
- Lecumberri-Sanchez, P., Steel-MacInnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044>
- Lotfi, M., 1982. Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore-mineralization in the Shurab-Gale Chah and northwest of Khur (Lut, east of Iran). Ph.D. thesis, University of Hamburg, Hamburg, Germany, 150 pp.
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2013. Geology, Mineralization and fluid inclusion studies in Howz-e-Raise lead–zinc–copper deposit, Eastern Iran. *Journal of Advanced Applied Geology*, 2(4): 63–73. (in Persian with English abstract) Retrieved September 29, 2024 from [https://aag.scu.ac.ir/article\\_11587.html?lang=fa](https://aag.scu.ac.ir/article_11587.html?lang=fa)
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2015. Mineralogic, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence for the genesis of Sechangi lead–zinc (–copper) deposit, Eastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 107: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.015>
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E. and Yardley, B., 2019. Ore geology, fluid inclusions and O-S stable isotope characteristics of Shurab Sb-polymetallic vein deposit, eastern Iran. *Geochemistry*, 79(2): 307–322. <https://doi.org/10.1016/j.geoch.2018.12.004>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.E. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy 12*. Mineralogy Society of America, 644 pp. Retrieved June 3, 2023 <http://www.minsocam.org/msa/rim/rim12.html>
- Salim, L., 2012. Geology, petrology and geochemistry of volcanic and sub volcanic rocks in Cheshme Khuri area (North West of Birjand). M.Sc. thesis, Birjand University, Birjand, Iran, 117 pp.
- Scott, A.M. and Watanabe, Y., 1998. Extreme boiling model for variable salinity of the Hokko low-sulfation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido Japan. *Mineralium Deposita*, 33: 563–578. <https://doi.org/10.1007/s001260050173>
- Seward, T.M. and Barnes, H.L., 1997. Metal transport by hydrothermal ore fluids. In: H. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley, New York, pp. 435–486. Retrieved June 29, 2024 from [https://books.google.com/books/about/Geochemistry\\_of\\_Hydrothermal\\_Ore\\_Deposit.html?id=vy2\\_QnyojPYC](https://books.google.com/books/about/Geochemistry_of_Hydrothermal_Ore_Deposit.html?id=vy2_QnyojPYC)
- Seward, T.M., 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal solutions. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 37(3): 379–399. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90207-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90207-X)
- Seward, T.M., 1991. The hydrothermal geochemistry of gold. In: R.P. Foster, (Editor), *gold metallogeny and exploration*. Blackie and Sons, Littleton, pp. 37-62. Retrieved June 29, 2024 from [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-0497-5\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-0497-5_2)
- Shepherd, T, Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239 pp. Retrieved November 2, 2024 from [https://books.google.com/books/about/A\\_Practical\\_Guide\\_to\\_Fluid\\_Inclusion\\_Stu.html?id=CVSGAAAAIAAJ](https://books.google.com/books/about/A_Practical_Guide_to_Fluid_Inclusion_Stu.html?id=CVSGAAAAIAAJ)
- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the Circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes Within the Earth*. Society of Economic Geologists Special Publication 10, Littleton, pp. 315–343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.I., 1997. Saline fluid inclusions in sphalerite from the Broadlands-Ohaaki geothermal system: A coincidental trapping of fluid boiled toward dryness. *Economic Geology*, 92(4): 485–489. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.4.485>

- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H<sub>2</sub>O-NaCl: a Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O-NaCl. *Computers & Geosciences*, 49: 334–337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022>
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.Y. and Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals: *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yang, E., Mao, J., Bierlein, F., Pirajno, F., Zhao, C., Ye, H. and Liu, F., 2009. A review of the geological characteristics and geodynamic mechanisms of Late Paleozoic epithermal gold deposits in North Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 217–234. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.09.003>