

Original Research Paper

The investigation of sulfidation state and hydrothermal fluid evolution on genesis of the quartz-sulfide ± gold veins in the Mouchesh deposit (southern Kurdistan): constraints on mineralization, fluid inclusions, and stable isotope of sulfur

Mehdi Moradi¹, and Ebrahim Tale Fazel^{1*}

¹ Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 September 18

Accepted: 2024 January 27

Available online: 2024 September 22

Keywords:

Gold-bearing quartz-sulfide veins

Fluid inclusions

Sulfur isotope

Boiling

Mouchesh deposit

Takab-Delijan

ABSTRACT

Mouchesh gold deposit (0.7 Mt @ 1.3 g/t gold) is located in the Takab-Delijan gold belt. Mineralization with several 28 gold-bearing quartz-sulfide veins (N40E-trending, 1 to 10 m wide, and 5 to 200 m long) has been formed in the host of Lower Cretaceous andesite and andesitic lithic tuff units. Open space-filling, comb, and disseminated textures are important mineralization textures that were formed in quartz-sulfide±gold veins (vein I) and quartz-barite-galena (vein II), which and cut later by carbonate veins (vein III). The homogenization temperature (Th) and salinity of the fluid inclusions, respectively, with an average temperature of 180 °C and salinity of 0.2 wt% NaCl eq. (vein I), 155 °C and 1.6 wt% NaCl eq. (vein II), and 135 °C and 1.5 wt% NaCl eq. (vein III). The values of $\delta^{34}\text{S}$ in sulfide minerals of veins I and II are between +0.1 to -3‰ ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ between -0.3 to +0.4‰), which indicates a single magmatic source for sulfur. The results of this research reveal that the existence of hydrostatic conditions (e.g., boiling) in the Mouchesh deposit has caused H_2S releasing from the hydrothermal fluid, the decrease in the solubility of the bisulfide complex $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, and ultimately the gold instability.

1. Introduction

The origin of gold and the ore-forming process are the key to understanding the evolution of large-scale gold deposits (Phillips and Powell, 2009). Enrichment of gold deposits is multistage and often occurs through changes in the nature of the fluid (e.g., changing the sulfidation state and increasing the $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$ ratio) (Seward, 1990). The Takab-Delijan gold belt with a mining


history of thousands of years (Ghorbani, 2013) is considered to be an area with the greatest gold mineralization potential in Iran and even neighboring countries such as Turkey (in the northwest) and Pakistan (in the southeast), which more than 300 tons of gold (Heidari et al., 2022). The Mouchesh gold deposit (47° 04' - 47° 07' E and 35° 02' - 35° 04' N) is located in 50 km south of Sanandaj


* Corresponding author: Ebrahim Tale Fazel; E-mail: e.talefazel@basu.ac.ir

Citation:

Moradi, M., and Tale Fazel, E., 2024. The investigation of sulfidation state and hydrothermal fluid evolution on genesis of the quartz-sulfide ± gold veins in the Mouchesh deposit (southern Kurdistan): constraints on mineralization, fluid inclusions, and stable isotope of sulfur. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 34(3), 133, 17-34. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.416998.2115>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2024.416998.2115

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.2.0



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

city, one of the gold prospecting areas in the Takab-Delijan gold belt and Sanandaj-Sirjan structural zone, which is about 50 km away from the Sari Gunay epithermal gold deposit (Richards et al., 2006) (Fig. 1). The first prospecting surveys in the Mouchesh gold deposit were carried out by Parsi Kankav Company in 2020 and the result was prepared in the form of a detailed exploration report. Based on, the Mouchesh deposit has an approximate tonnage of 0.7 Mt and an average gold grade of 1.3 g/t. In this research, along with introducing geological and mineralization characteristics of the Mouchesh gold deposit, the fluid inclusions and stable isotope of sulfur, sulfidation state, and evolution of ore-forming fluids have been investigated.

2. Research methodology

A total of 41 rock samples were taken from different parts of the deposit, including volcanic host rock, alteration and mineralization zones. Petrographic and mineralogical studies were carried out in the Geological Survey of Kurdistan by 10 polished sections, 29 thin sections, and 4 thin-polished sections. The fluid inclusions studies in order to obtain temperature, salinity, density, and pressure variables were carried out on the number of 34 inclusions from veins I, II and III. These studies were carried out by Linkam THM600 heating–freezing stage (-100 to +600 °C) with a temperature error of ± 2 °C, in the fluid inclusions laboratory of Isfahan University. Samples selected for sulfur isotope analysis were first ground and sieved. Individual minerals were then separated into heavy liquids. Finally, individual grains were handpicked under a binocular microscope. The $\delta^{34}\text{S}$ values were measured in SO_2 gas using a continuous-flow gas-ratio ISOPRIME-100 mass spectrometer in the isotopic research laboratory of Arak University. The data are presented in delta (δ) notation as per mill (‰) deviations relative to the Vienna Canyon Diablo Triolite (VCDT) standard for sulfur. Precision is estimated to be ± 0.1 ‰ or better (1σ), based on repeated measurement of internal standards.

3. Results

The Lower Cretaceous volcano-sedimentary units are the most important rock unit in the Mouchesh area, which from old to new, includes: medium to thick limestone unit (K1), lithic tuff to andesitic tuff unit (K₁¹). This unit is continuously placed on the K₁¹ unit and consists of lithic tuff horizons that slope towards the north (Fig. 2). The Mouchesh gold deposit with geometry of epigenetic vein was formed in the andesite tuffs host rock of the Lower Cretaceous. Mineralization with a number of 28 Au-bearing quartz-sulfide veins is exposed in three mineralization zones, where the veins often have N40E extension, 1 to 10 meters in length and 7 to 200 meters in length (Fig. 3). The highest veins are exposed at the topographic level of 1950 meters and the lowest level at 1820 meters from the sea

level. Considering the maximum depth of 20 meters for ore-bearing veins, an approximate reserve of 0.7 Mt and an average grade of 1.3 g/t gold have been calculated (Parsi Kankav Company, 2020). The main faults of the area are identified with NE-SW trend and the secondary faults with NW-SE trend. The NE-SW faults control the Au-bearing quartz-sulfide veins in the Mouchesh deposit. Sericitic (muscovite, quartz and pyrite) and silicic alterations are the most important alterations near the ore veins, which are surrounded by argillic (kaolinite and dickite) and propylitic (chlorite and carbonate) alterations. Primary sulfides in the hypogene zone consist of sphalerite, pyrite, galena, and chalcopyrite along with free gold particles (average size 170 μm). The veins were formed in three stages in the Mouchesh gold deposit. The quartz-sulfide±gold vein (vein I) was formed in the initial stage of mineralization and is the main host of gold particles in the Mouchesh deposit. This vein is observed in all three mineralization zones. Sulfide ores observed in this vein include sphalerite, galena, chalcopyrite, and pyrite, in order of abundance, and oxides and carbonates are formed in secondary order. The quartz-barite±sulfide vein (vein II) was formed chronologically after the occurrence of vein I and has a smaller amount of sulfide ore. According to the classification of Roedder (1984), fluid inclusions include four groups of two-phase liquid-rich (LV-type), two-phase vapor-rich (VL-type), single-phase liquid (L-type), and vapor (V-type). More than 80% of the inclusions were shapeless and oval or ellipsoid shapes were rarely observed. The dimensions of the inclusions vary from 2 to 25 μm .

In the cooling stage, the eutectic temperature (T_e) of fluid inclusions was less than -21 °C, which trapped in the H_2O -NaCl system based on Steele-McInnis et al. (2012). The final ice melting temperature ($T_{m_{ice}}$) was found between -2.5 to -0.4 °C (-0.9 °C in average), based on which, the salinity of the fluid inclusions was obtained in terms of NaCl equivalent percentage. The density of fluid inclusions was obtained using the degree of filling between 0.84 and 0.98 g/cm^3 (0.91 g/cm^3 in average). Also, by using the HOKIEFLINCS_ H_2O -NaCl Excel software, the actual temperature of the fluid inclusions in vein I is between 152 and 234 °C (180 °C in average), vein II between 121 and 218 °C (155 °C in average) and vein III between 123 to 171 °C (135 °C in average) (Table 1).

The $\delta^{34}\text{S}$ values were obtained for sulfide minerals of chalcopyrite (+0.1 to +0.3‰) and sphalerite (-0.9 to -0.5‰) in vein I and galena (-3‰) in vein II. Based on, $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ values were obtained in galena minerals (-0.3‰), chalcopyrite (0.1 to -0.1‰) and sphalerite (0.0 to +0.4‰), which shows the fluid changes in equilibrium with sulfur during mineralization have fluctuated from -0.3 to 0.4‰. Since there is no evidence of the presence of an oxide mineral in the Au-bearing quartz-sulfide vein (vein I), the H_2S species was used to calculate the fluid in equilibrium with sulfur.

4. Discussion and conclusions

Based on the binary diagrams of pH-log/O_2 , the amount of log/O_2 is estimated to be around -45 in vein I of the Mouchesh deposit which is comparable with the content of dissolved gold in the hydrothermal fluid is 1 g/t, lead and copper are about 100 mg/t, and zinc is about 10 mg/t. Based on the concentration of the above-mentioned elements in the composition of the hydrothermal fluid and considering the bisulfide complex, the changes in the fugacity of sulfur gas (log/S_2) in the Au-bearing polymetallic vein I fluctuate between -11 and -13. A large volume of Cu-Pb-Zn sulfide ores along with free gold particles occurred in the vein I of the Mouchesh gold deposit, which shows that the reduction of H_2S -rich fluids with a $\text{log/S}_2 \approx -11$ to -13 after the instability of bisulfide complexes (e.g., HS^{2-} and HS^-).

After the deposition of a large part of sulfide ores in vein I, the total sulfur (ΣS) content in the hydrothermal fluid decreased and due to the removal of a large part of H_2S by the vapor phase (caused by the boiling event), the ratio of $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$ increases, which has led to the rise of ambient sulfate and the occurrence of quartz-barite \pm galena veins (vein II). Due to this decrease in fugacity of sulfur from vein I ($\text{log/S}_2 \approx -11$ to -13) to vein II ($\text{log/S}_2 < -13$), the residual bisulfide complexes in the fluid became unstable, as a result of which a small amount of galena and disseminated pyrite is formed in vein II.

The formation of late carbonate veins (vein III) without ore mineralization was done after the main veins I and II. This vein

was formed at a trapping temperature between 123 and 171 °C (135 °C on average) and salinity of 0.7 to 2.5 (1.5 wt% NaCl eq. on average), which due to the presence of LV- and L-type fluid inclusions and low temperature and salinity is caused during fluid mixing by meteoric waters.

Sulfur isotope composition in veins I (-0.9 to 0.3‰) and II (-3‰) is relatively homogeneous and consistent with the range of isotopic composition of mantle or igneous rocks (Seal, 2006; Hoefs, 2018). The range of $\delta^{34}\text{S}$ in hydrothermal sulfides with magmatic origin is approximately between -3 and +1‰ (Hoefs, 2018). The amount of $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ of hydrothermal fluid in equilibrium with sulfide in vein I was found between -0.1 and 0.4‰, which very limited isotopic content confirms the magmatic origin of vein I. The $\delta^{34}\text{S}$ composition in vein II for galena ore is about -3‰, which is lower than other sulfide minerals in vein I. This negative value indicates the increase of oxygen in the ore-forming fluid (occurrence of barite), which caused the majority of $\delta^{34}\text{S}$ enter to $^{34}\text{SO}_4^{2-}$ in the hydrothermal fluid during this reaction ($4\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 3\text{SO}_4^{2-} + 6\text{H}^+$).

Generally, according to the values of temperature, salinity, and pressure of fluid inclusions in the Mouchesh deposit, it like that the genesis of quartz-sulfide polymetallic Au-bearing veins (veins I and II) and late carbonate (vein III) is consistent with low-sulfidation epithermal styles, which is comparable to the temperature-salinity condition of the Sari Gunay epithermal gold deposit in its vicinity.

بررسی شرایط سولفیداسیون و تحول سیال گرمابی در نحوه تشکیل رگه‌های کوارتز-سولفید± طلا کانسار موچش (جنوب کردستان): شواهد کانه‌زایی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار گوگرد

مهدی مرادی^۱ و ابراهیم طالع فاضل^{۱*}^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

کانسار طلای موچش با تناژ تقریبی ۰/۷ میلیون تن و متوسط عیار ۱/۳ گرم در تن طلا در کمر بند طلای تکاب-دلیجان واقع شده است. کانه‌زایی به شکل رگه‌ای در ۲۸ رگه کوارتز-سولفید طلا دار راستای عمومی N40E، سبزی ۱ تا ۱۰ متر و درازای ۵ تا ۲۰۰ متر در واحدهای آندزیت و لیتیک توف آندزیت کرتاسه زیرین، شکل گرفته است. بافت‌های شکافه پرکن، شانه‌ای و افشان از بافت‌های مهم کانی‌سازی هستند که در رگه‌های کوارتز-سولفید±طلا (رگه I) و کوارتز-باریت-گالن (رگه II) مشاهده شده و بعداً توسط رگه-رگچه‌های کربناتی (رگه III)، قطع شده‌اند. دمای همگن شدن و شوری میانبارها به ترتیب با متوسط دما ۱۸۰ °C و شوری ۲/۰ درصد معادل NaCl (رگه I)، متوسط دما ۱۵۵ °C و شوری ۱/۶ درصد معادل NaCl (رگه II) و متوسط دما ۱۳۵ °C و شوری ۱/۵ درصد معادل NaCl (رگه III)، به دست آمد. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی رگه‌های I و II بین +۰/۱ تا -۳٪ (معادل $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ بین -۰/۳ تا +۰/۴٪) در تغییر بوده که گویای وجود یک منشأ ماگمایی همگن برای گوگرد است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد وجود شرایط هیدرواستاتیک (وقوع جوشش) در کانسار موچش موجب خروج H_2S از سیال گرمابی، کاهش حلالیت کمپلکس بی سولفیدی $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ و در نهایت ناپایداری طلا شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

رگه کوارتز-سولفید طلا دار

میانبار سیال

ایزوتوپ گوگرد

جوشش

کانسار موچش

تکاب-دلیجان

۱- پیش‌نوشتار

بررسی منشأ طلا و فرایندهای کانه‌ساز موثر در رخداد آن، کلید درک تکامل ذخایر طلا در ابعاد وسیع است (Phillips and Powell, 2009). غنی‌سازی ذخایر طلا چند مرحله‌ای بوده و اغلب از طریق تغییرات ماهیت سیال (به عنوان مثال، تغییر وضعیت سولفیداسیون و افزایش نسبت $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$) رخ می‌دهد (Seward, 1990). در این حالت، گوگرد نقش محوری در مهاجرت و ناپایداری کمپلکس‌های هیدروسولفیدی طلا (مانند $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ و AuHS^0) دارد که در نهایت پس از تغییرات ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال (نظیر دما، فشار، pH ، \log/S_2) یا اختلال ناگهانی (مانند جوشش و اختلاط سیال) تحت کنترل عناصر ساختاری پوسته، ناپایدار شده و ته‌نشین می‌شود (Hutchison et al., 2020).

شکل‌گیری و تکامل اقیانوس تیتس جوان (نئوتیتس) در حاشیه باختری ایران به رخداد ذخایر طلای قابل توجهی به‌ویژه در حوضه کوهزاد زاگرس (پهنه سنندج-سیرجان و ایران مرکزی) انجامیده که این ذخایر ضمن قرار گرفتن در رده

جهانی (مانند زرشوران، آق‌دره، ساری‌گونی و دالی) دارای محدوده سنی پرمین میانی تا نوژن، هستند (Richards and Sholeh, 2016). در این میان، کمر بند طلای تکاب-دلیجان با سابقه معدنکاری هزاران ساله (Ghorbani, 2013) محدوده‌ای با بیشترین پتانسیل کانی‌سازی طلا در ایران و حتی کشورهای مجاور مانند ترکیه (در شمال‌باختر) و پاکستان (در جنوب‌خاور) به‌شمار می‌رود که بیش از ۳۰۰ تن طلا به‌صورت اولیه در آن برآورد شده است (Heidari et al., 2022). کانسار طلای موچش (مختصات ۴۷° ۷' تا ۴۷° ۷' طول‌خاوری و ۲۷° ۳۵' تا ۳۵° ۴' عرض‌شمالی) در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب شهر سنندج، یکی از مناطق مورد پی‌جویی طلا در کمر بند طلای تکاب-دلیجان و پهنه ساختاری سنندج-سیرجان بوده که از کانسار طلای ایپی‌ترمال ساری‌گونی (Richards et al., 2006)، حدود ۵۰ کیلومتر فاصله دارد (شکل ۱). نخستین واکاوی‌های اکتشافی در کانسار طلای موچش توسط شرکت پارسی کان‌کاو در سال ۱۳۹۹ انجام شده که نتیجه آن به‌صورت گزارش

* نویسنده مسئول: ابراهیم طالع فاضل؛ E-mail: e.talefazel@basu.ac.ir

ماخذنگاری:

مرادی، م. و طالع فاضل، ا.، ۱۴۰۳، بررسی شرایط سولفیداسیون و تحول سیال گرمابی در نحوه تشکیل رگه‌های کوارتز-سولفید±طلا کانسار موچش (جنوب کردستان): شواهد کانه‌زایی، میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار گوگرد. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۳)، ۱۷-۳۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.416998.2115>

doi: 10.22071/gsj.2024.416998.2115



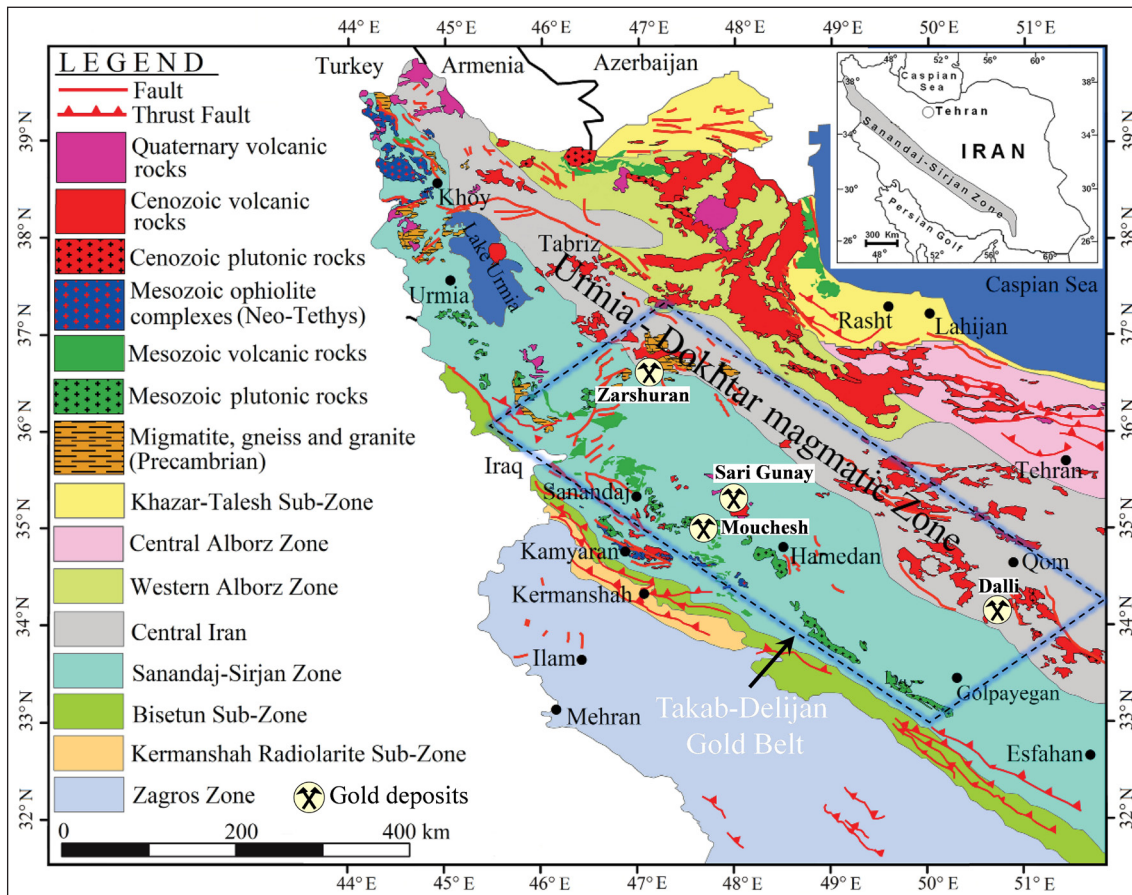
doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.2.0

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

کانه‌ساز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به موقعیت کانسار موجش در کمربند طلای تکاب-دلیجان و وجود ذخایر متعدد طلا در این پهنه، استفاده از این نتایج می‌تواند نقش مفیدی در راستای اهداف اکتشافی و ردیابی ذخایر مشابه در این کمربند داشته باشد.

اکتشافات تفصیلی تهیه شده است. طبق این بررسی‌ها کانسار موجش دارای تناژ تقریبی ۰/۷ میلیون تن و متوسط عیار طلای ۱/۳ گرم در تن، است. در این پژوهش ضمن معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی در کانسار طلای موجش، با کمک مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار گوگرد، شرایط سولفیداسیون و تحول سیال



شکل ۱- کمربند طلای تکاب-دلیجان (Heidari et al., 2022) در باختر ایران متشکل از کانسارهای طلا رده جهانی نظیر زرشوران، ساری گونای و دالی و موقعیت آنها نسبت به کانسار طلای موجش.

Figure 1. The Takab-Delijan gold belt (after Heidari et al., 2022) in the west of Iran consists of world class gold deposits of Zarshuran, Sari Gunay, and Dalli and their location relative to Mouchesh gold deposit.

۲- روش پژوهش

گوگرد، تعداد ۵ نمونه (شامل گالن، اسفالریت و کالکوپیریت) پس از جدایش و خالص سازی (بیش از ۹۸ درصد) توسط بیناکولار و پودر کردن نمونه‌ها (ابعاد ۵۰ میکرون) در آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپی دانشگاه اراک تجزیه شدند. ایزوتوپ پایدار گوگرد با به کارگیری دستگاه طیف سنج جرمی ISOPRIME-100 اندازه گیری شد. تعیین ترکیب ایزوتوپی گوگرد از کانه‌های سولفیدی پس از احتراق یک نمونه جامد در آنالایزر عنصری در دمای ۱۱۵۰ °C، گاز SO₂ تولید شده از سیستم و ستون عبور می‌کند و از آب موجود در تله آب و همچنین SO₂ در ستون تصفیه و تله خارج می‌شود. سپس ستون جذب تا دمای ۲۲۰ °C گرم می‌شود تا گاز SO₂ انباشته آزاد شده و در نهایت وارد IRMS شود. در IRMS، نسبت جرم ۶۴/۶۶ به منظور ارزیابی نسبت ³⁴S/³²S نمونه تعیین می‌شود. مقدار δ³⁴S در مقایسه با استاندارد شهاب سنگ کانیون دیابلو (VCDT) و با دقت تجزیه‌ای ±۲ در هزار (%) به دست آمد.

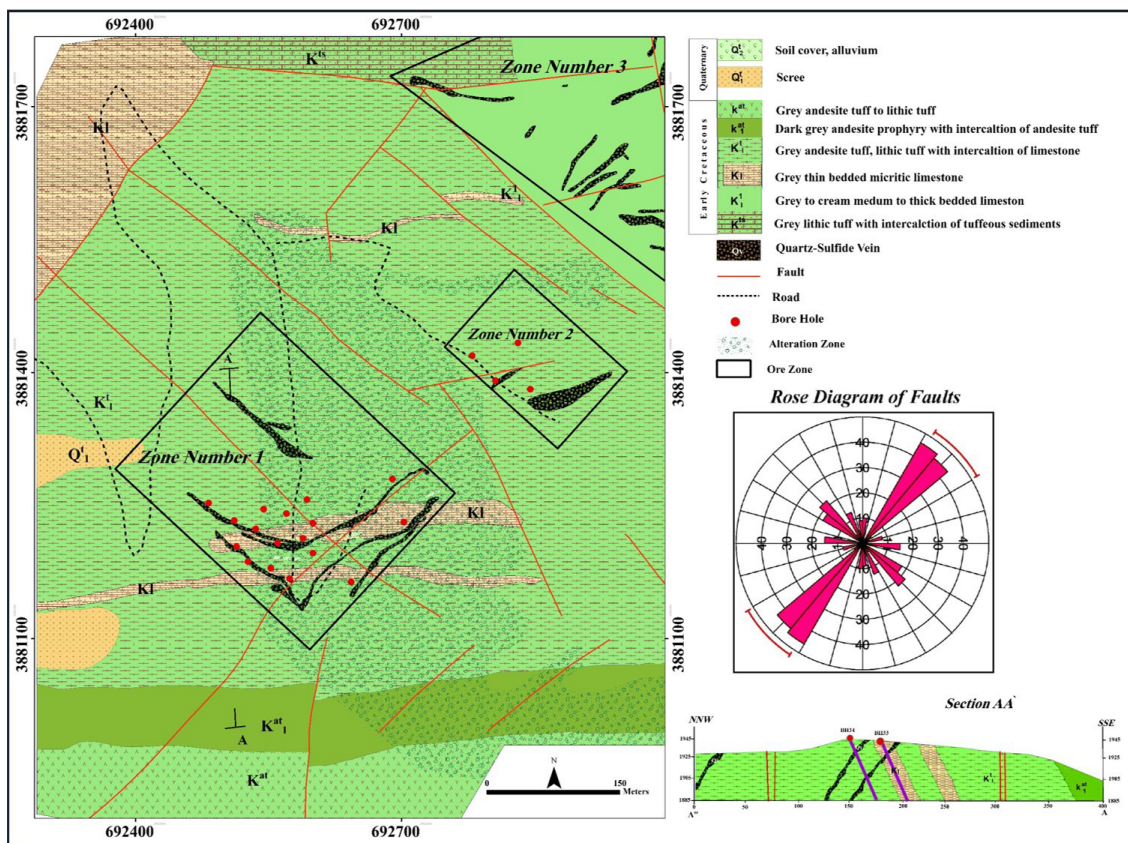
در این پژوهش تعداد ۴۱ نمونه سنگی از بخش‌های مختلف شامل سنگ میزبان آتشفشانی، پهنه‌های (زون‌های) دگرسانی و کانی‌سازی برداشت شد. مطالعات سنگ‌نگاری (پتروگرافی) و کانه‌نگاری با هدف دستیابی به انواع بافت و ساخت و روابط پاراژن کانی‌ها با استفاده از ۱۰ مقطع صیقلی، ۲۹ مقطع نازک و ۴ مقطع نازک-صیقلی در سازمان زمین‌شناسی استان کردستان انجام شد. همچنین، برای تشخیص انواع دگرسانی، تعداد ۴ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران مورد آزمایش قرار گرفت. مطالعات میانبارهای سیال به منظور دستیابی به متغیرهای دما، شوری، چگالی و فشار، بر روی تعداد ۳۴ میانبار از رگه‌های I، II و III انجام شد. این مطالعات توسط دستگاه لینکام مدل THM600 با میزان خطای دما ۲± °C، کنترل‌کننده‌های حرارتی TSM 94 (گرمایش) و LNP (سرمایش) و بازه دمایی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ °C در آزمایشگاه میانبار سیال دانشگاه اصفهان انجام شد. به منظور تکمیل داده‌ها و دستیابی به مشا

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی

رسوبات بوده و در شمال نقشه مشاهده می‌شود. اجزای اصلی سازنده سنگ را خرده‌های سنگی، فلدسپار آلکالن، پلاژیوکلاز، پیروکسن تشکیل می‌دهند. واحد لیتیک توف آندزیت، توف خاکستری تا خاکستری مایل به سبز با بین لایه‌های سنگ آهک (K_1^l) و زیر واحد سنگ آهک نازک لایه خاکستری رنگ (K_1^l) قرار گرفته است. مهم‌ترین واحد سنگی منطقه از نظر میزان کانه‌زایی واحد (K_1^l) است که متشکل از مجموعه توف آندزیت با بین لایه‌های آهک می‌باشد. واحد آندزیت پورفیری خاکستری مایل به سبز تیره با میان لایه‌های توف آندزیت (K_1^{st}) در بخش جنوبی نقشه به صورت پیوسته بر روی واحد K_1^l قرار دارد. این واحد نشانه تغییر شرایط به سمت محیط خشکی و ماگماتیسیم کرانه دریایی است. طبق شواهد صحرایی، واحدهای سنگی منطقه به‌طور محلی دچار چین خوردگی و تغییرات روند شده‌اند. گسل‌های اصلی منطقه با روند NE-SW و گسل‌های فرعی با روند NW-SE مشخص می‌شوند که گسل‌های NE-SW کنترل‌کننده رگه‌های کوارتز-سولفید طلا در کانسار موحش هستند.

منطقه مورد مطالعه از دیدگاه ساختاری (آقاناتی، ۱۳۸۳) بخشی از پهنه سندج-سیرجان شمالی و در ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ سندج (سرتیپی، ۱۳۸۴) قرار دارد. در این محدوده تفکیک واحدهای سنگی، تشخیص دگرسانی‌ها، گسل‌ها و کانی‌سازی سولفیدها و رگه‌های کوارتزی مورد توجه قرار گرفت و نقشه زمین‌شناسی کانسار موحش در مقیاس ۱:۱۰۰۰ تهیه شد (شکل ۲). بر این اساس، واحدهای رسوبی-آتشفشانی کرتاسه زیرین مهم‌ترین واحد سنگی منطقه موحش را تشکیل می‌دهد که به ترتیب از قدیم به جدید شامل: واحد سنگ آهک متوسط تا سبتر لایه خاکستری تا کرم رنگ (K_1)، واحد لیتیک توف تا توف آندزیتی خاکستری تا خاکستری مایل به سبز (K_1^l): این واحد به صورت پیوسته بر روی واحد K_1^l قرار گرفته و متشکل از افق‌های لیتیک توف است که به سمت شمال شیب دارند. واحد لیتیک توف خاکستری تا خاکستری مایل به سبز با میان لایه‌های رسوبات توفی (K_1^{ls}). در بخش زیرین واحد K_1^l واحد لیتیک توف دیگری قرار دارد که دارای



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار طلای موحش (با تغییرات از شرکت پارسی کان کاو، ۱۳۹۹).

Figure 2. Simplified geologic map of the Mouchesh gold deposit (modified after Parsi Kankav Co., 2020).

دارد. با در نظر گرفتن بیشینه ژرفای ۲۰ متر برای رگه‌های کانه‌دار، ذخیره تقریبی ۰/۷ میلیون تن و عیار میانگین ۱/۳ گرم در تن، محاسبه شده است (شرکت پارسی کان کاو، ۱۳۹۹). بیشتر رگه‌ها در راستای شمال‌باختر-جنوب‌خاور تشکیل شده‌اند و ستبرای و طول متفاوتی دارند. رگه‌های کانه‌دار با فاصله از یکدیگر تشکیل شده و در برخی مناطق تجمع بیشتری داشته و براساس اولویت اکتشافی به ۳ پهنه کانه‌ساز تقسیم شده‌اند (شکل ۲).

۳-۲- کانه‌زایی و بافت و ساخت

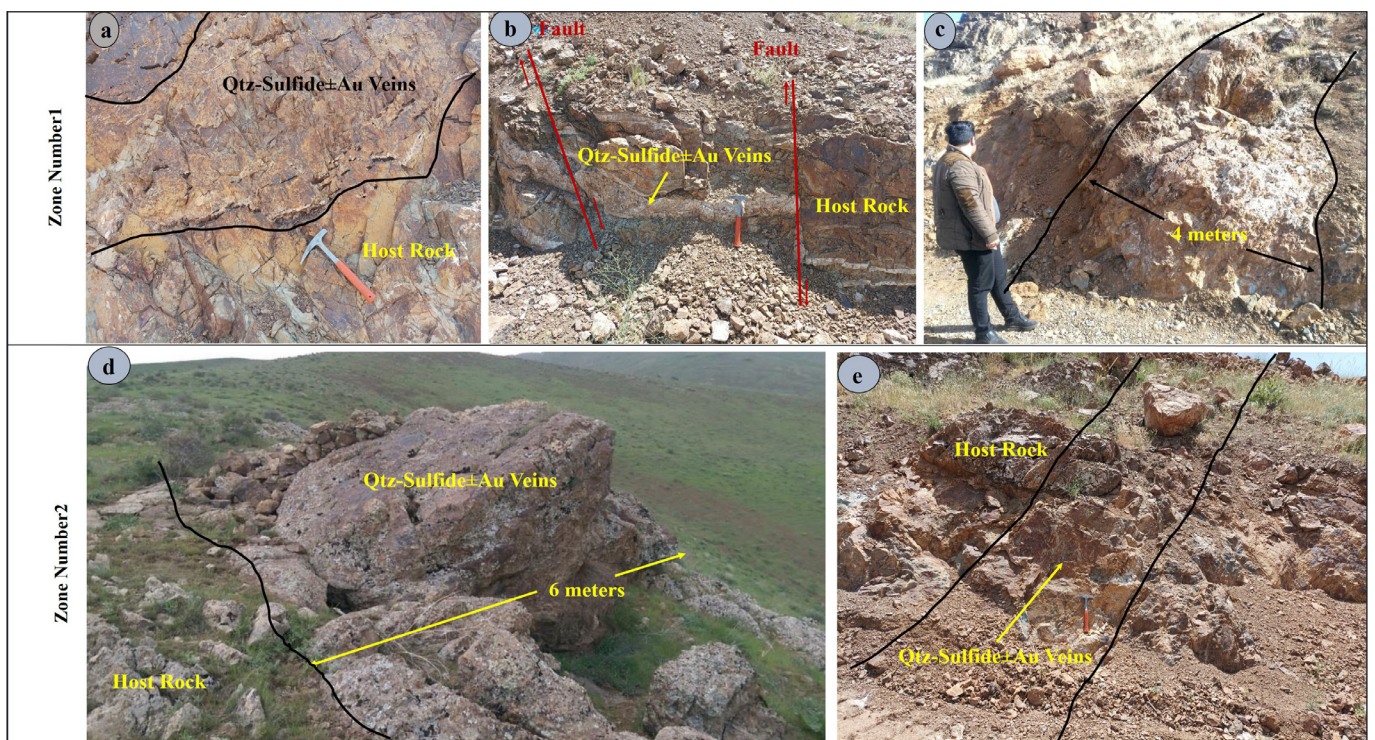
کانسار طلای موحش با ژئومتری رگه‌ای اپی‌ژنتیک در سنگ میزبان آندزیت توف‌های کرتاسه زیرین شکل گرفته است. کانی‌سازی به شکل ۲۸ رگه کوارتز-سولفید طلا در سه پهنه کانه‌زایی یافت می‌شود و رگه‌ها اغلب دارای امتداد N40E، ستبرای ۱ تا ۱۰ متر و درازای ۷ تا ۲۰۰ متر هستند (شکل ۳). بالاترین رگه‌ها در تراز توپوگرافی ۱۹۵۰ متر و کمترین تراز در ۱۸۲۰ متر از سطح دریا رخمون

– **پهنه شماره ۳:** در این پهنه، رگه‌های کانه‌دار زیادی وجود دارند که مشابه سایر رگه‌ها در تراز ارتفاعی بالا برونزد یافته و ستبرای آنها تا ۱۰ متر نیز قابل مشاهده است. در این پهنه، کانه‌های کالکوپیریت، گالن و اسفالریت در زمینه کوارتز به صورت مجزا و دانه‌ای تشکیل شده‌اند. در فضاهای خالی تبلور آرام سیلیس به صورت بلورهای کوارتز بافت‌های قشری را تشکیل داده است. تصاویر صحرایی رگه‌ها از پهنه‌های شماره ۱ و ۲ در شکل ۳ ارائه شده است.

بافت‌های تشکیل شده در محدوده کانسار طلای موحش شامل پرکننده فضای خالی، شانه‌ای، رگه‌ای، دانه‌ای و حفره‌ای است. اسفالریت و گالن در رگه سیلیس به صورت دانه پراکنده، کربنات‌ها اغلب به صورت رگه‌ای، کوارتز با بافت‌های قشری و حفره‌دار در رگه‌ها مشاهده شده‌اند (شکل ۴). شکل گیری بافت برشی از شواهد مهم رخداد جوشش در کانسار طلای موحش است (شکل ۴-د).

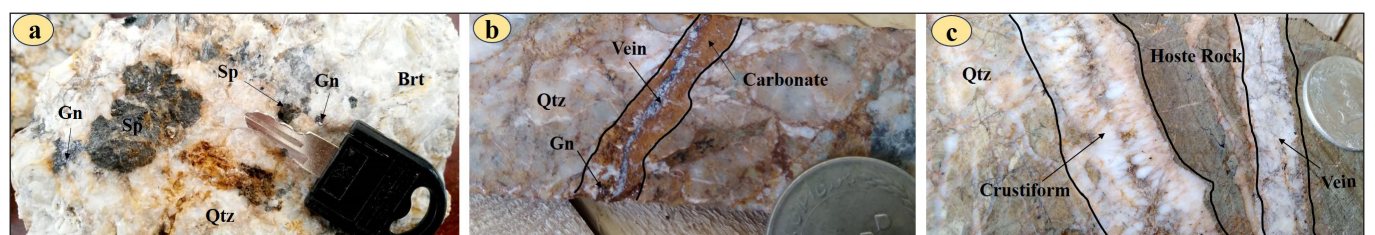
– **پهنه شماره ۱:** در این پهنه دست کم ۶ رگه کوارتز-سولفید طلا دار با دو راستای شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و شمال‌باختری-جنوب‌خاوری رخنمون دارند. درازای رگه‌ها در این پهنه به‌طور متوسط ۵۰ متر و ستبرای ۱ تا ۶ متر هستند. بیشینه عیار طلا در این پهنه به ۲/۵ گرم در تن می‌رسد. کانی‌های اصلی در این پهنه شامل کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، آرسنوپیریت، پیریت، کولین، مالاکیت هستند.

– **پهنه شماره ۲:** در این پهنه تعداد ۳ رگه کوارتز طلا دار با عیار متوسط ۱/۱ گرم در تن وجود دارند که در یک پهنه سیلیسی به ستبرای حدود ۱۰ متر رخنمون دارند. در این بخش، شواهدی مانند کوارتز حفره‌دار همراه کانی‌سازی گالن و کالکوپیریت دیده می‌شوند.



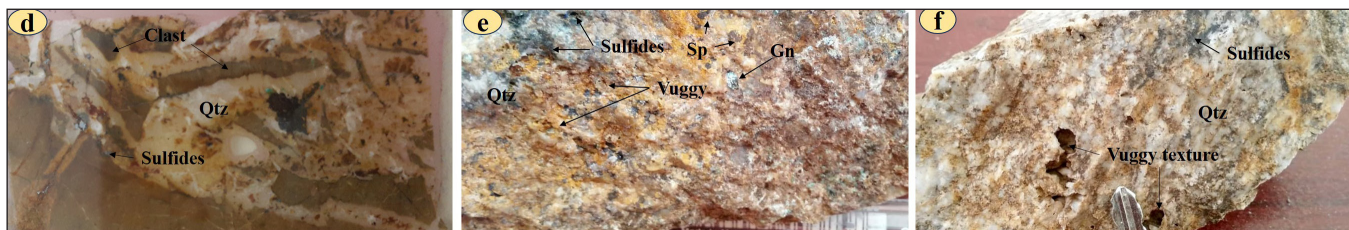
شکل ۳- تصاویر صحرایی از رگه‌های کانه‌دار در پهنه‌های کانی‌سازی شماره ۱ و ۲ کانسار موحش. (a) رگه کوارتز-سولفید طلا دار، (b) قطع شدگی رگه کوارتز-سولفید توسط گسل، (c) رگه کوارتز-سولفید، (d) و (e) نمایی از رگه‌های کوارتز-سولفید طلا دار در پهنه شماره ۲.

Figure 3. Field photographs of ore-bearing veins in mineralization zones numbers 1 and 2 at Mouchesh deposit. a) gold-bearing quartz-sulfide vein, b) cutting of the quartz-sulfide vein by fault, c) quartz-sulfide vein, d and e) gold-bearing quartz-sulfide vein in mineralization zone number 2.



شکل ۴- تصاویر نمونه دستی از ساخت و بافت کانی‌سازی در کانسار موحش. (a) ذرات دانه پراکنده اسفالریت و گالن در رگه، (b) بافت رگه‌ای کربنات در زمینه کوارتز، (c) بافت قشری کوارتز،

Figure 4. Photographs of hand specimens from mineralization textures in the Mouchesh deposit. a) Sphalerite and galena dissemination in vein, b) Carbonate veins within quartz, c) Crustiform texture of quartz,



ادامه شکل ۴- تصاویر نمونه دستی از ساخت و بافت کانی سازی در کانسار موجش. (d) بافت برشی با سیمان سولفید (نشان از جوشش)، (e و f) بافت حفره دار.

Continued from Figure 4. Photographs of hand specimens from mineralization textures in the Mouchesh deposit. d) Breccia texture with sulfide cement (boiling evidence), e and f) Vuggy texture.

۳-۳- دگرسانی گرمایی

رگه های کوارتز-سولفید طلا دار تشکیل شده است (شکل ۵- a, b). دگرسانی سیلیسی شامل بلورهای میکرو کریستالین تا درشت بلور (کوارتزهای druzi) بوده و اغلب در پهنه کانه زایی و محدود به رگه های کوارتز-سولفید تشکیل شده است (شکل های ۵- g و h). دگرسانی آرزلیک با کانی شاخص کائولینیت و رنگ سفید اغلب در بخش های دارای کانه زایی مشاهده می شود، که در نتیجه تشکیل آن بلورهای روتیل ثانویه در زمینه کائولینیت شکل گرفته است (شکل ۵- c, d). دگرسانی پروپیلیتیک با کانی شاخص کلریت اسفرولیتی و رگه-رگچه های ثانویه کلسیت اغلب در واحد آندزیت مشاهده شد (شکل ۵- e, f, i).

نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی و بررسی های میکروسکوپی نشان می دهد که شکل گیری واحدهای آتشفشانی-نفوذی و سیالات گرمایی منشا گرفته از آنها سبب تشکیل دگرسانی و پراکندگی آنها به ویژه در اطراف رگه های کوارتز-سولفید شده است. طبق شواهد، دگرسانی های سریستی (مسکوویت، کوارتز و پیریت) و سیلیسی مهم ترین دگرسانی های مجاور رگه هستند که توسط دگرسانی های آرزلیک (کائولینیت و دیکیت) و پروپیلیتیک (کلریتی و کربناتی) احاطه شده اند. دگرسانی سریستی با کانی های مسکوویت، کوارتز و ذرات پراکنده پیریت در فاصله نزدیک به

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری عبوری از دگرسانی های کانسار موجش. (a و b) دگرسانی سریستی همراه بلورهای کوارتز druzi، (c و d) دگرسانی آرزلیک با حضور کائولینیت همراه با ذرات پراکنده روتیل، (e و f) دگرسانی کلریتی همراه با کانی کدر پیریت، (g و h) دگرسانی سیلیسی همراه بلورهای کوارتز با ابعاد مختلف، (i) دگرسانی کربناتی. حروف اختصاری شامل سریست: Ser؛ آرزلیک: Arg؛ کائولینیت: Kln؛ روتیل: Rt؛ کلریت: Chl؛ پیریت: Py؛ کوارتز: Qtz؛ کربنات: Cb.

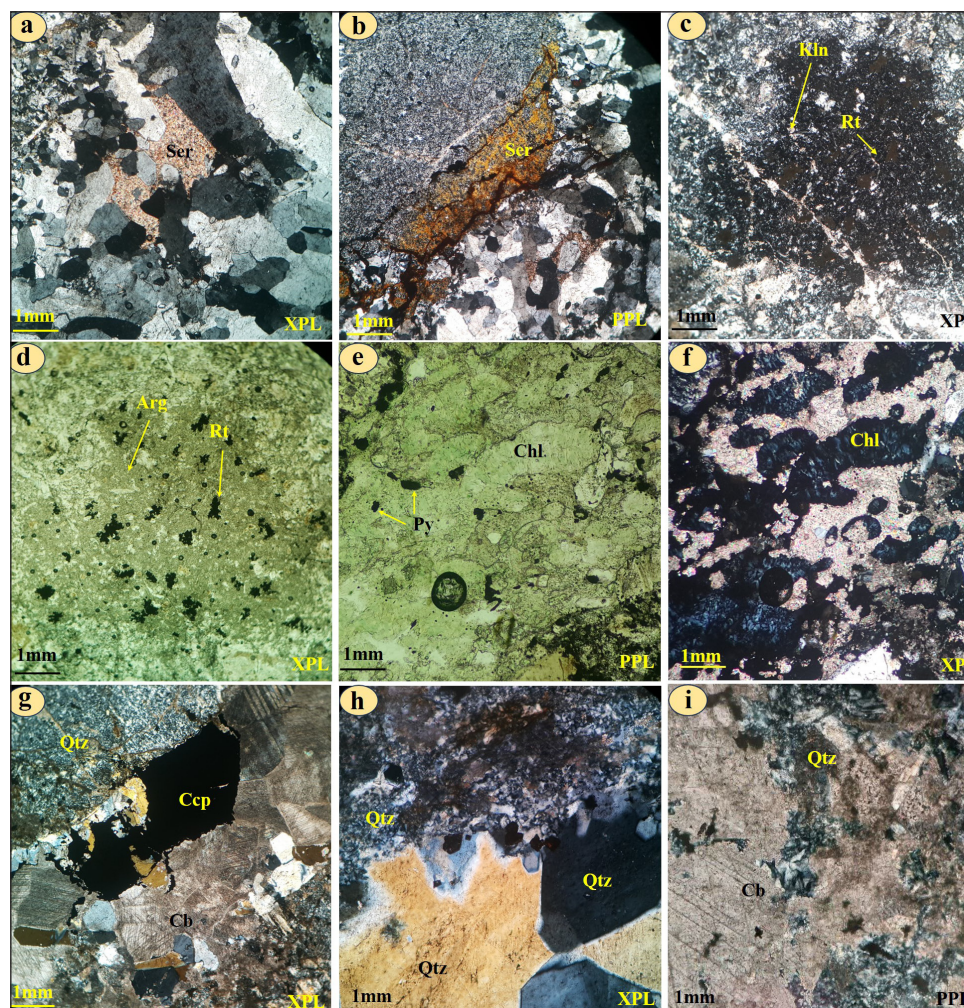
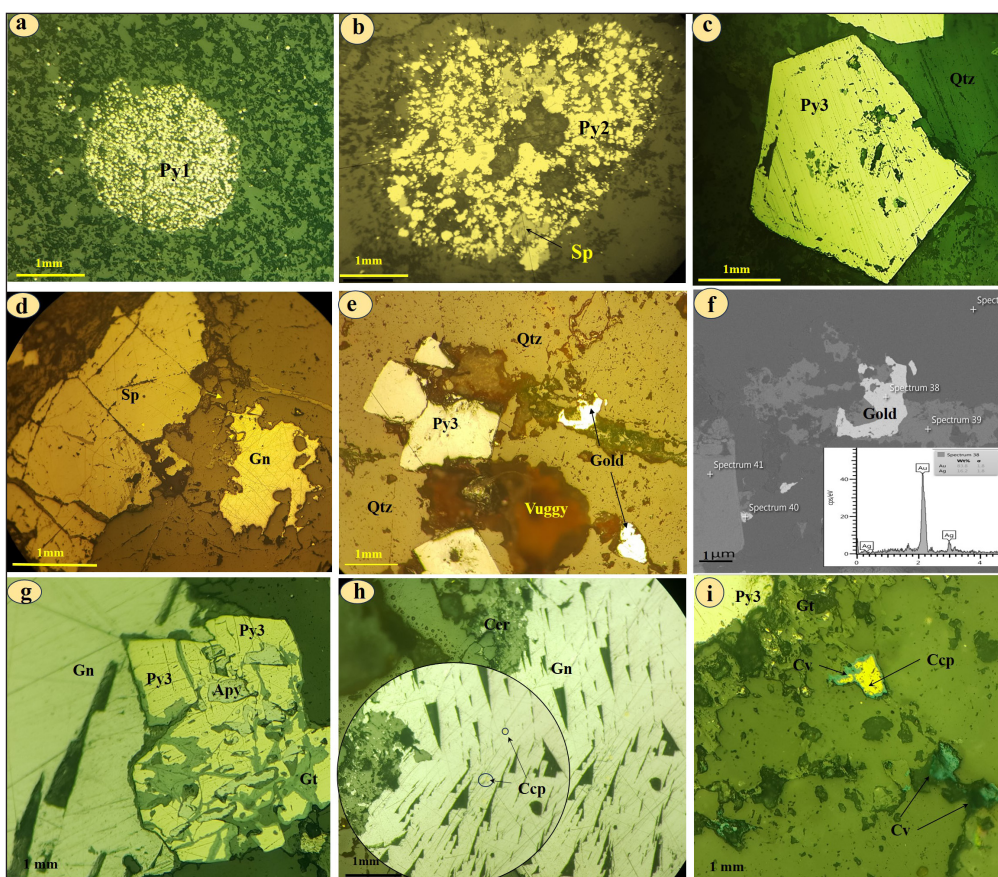


Figure 5. Photomicrographs from various alteration assemblages in the Mouchesh deposit. a and b) sericitic alteration with druzi quartz crystals, c and d) argillic alteration with kaolinite and disseminated rutile grains, e and f) silicification alteration with various sizes of quartz crystals, g and h) chlorite alteration accompanied with pyrite, i) carbonate alteration. Mineral abbreviations= Sericite: Ser, Argillic: Arg, Kaolinite: Kln, Rutile: Rt, Chlorite: Chl, Pyrite: Py, Quartz: Qtz, Carbonate: Cb.

۳-۴- کانی‌شناسی

به صورت پراکنده در سنگ میزبان، ۲) اجتماع پیریت‌های ریزبلور (شکل ۶-ب) که همراه اسفالریت تشکیل شده‌اند و ۳) پیریت‌های خوش‌وجه درشت بلور به‌عنوان نسل آخر پیریت، شناسایی شده‌اند (شکل ۶-ج). ذرات طلای آزاد در رگه کوارتز-سولفید مرحله نخست (رگه I) مرتبط با فاز سیلیسی شکل گرفته و همراه کانه‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت مشاهده شده است (شکل ۶-د، ۶-ه). در پهنه برون‌زاد کانی‌های اکسیدی-هیدروکسیدی آهن (نظیر لیمونیت و گوتیت) و کانی‌های برون‌زاد مس (نظیر مالاکیت) از مهم‌ترین کانی‌های ثانویه هستند. این کانی‌ها به دنبال اکسیدشدگی و آزاد شدن آهن از ساختمان کالکوپیریت و تمرکز مس در حاشیه و شکستگی‌های آن جان‌شین شده‌اند. برپایه مشاهدات صحرایی و مغزه‌های حفاری، گوتیت فراوان‌ترین کانی هیدروکسیدی است (شکل ۶).

براساس مطالعات کانه‌نگاری، کانی‌های سولفیدی، کربناته روی و سرب و اکسید-هیدروکسیدی آهن به ترتیب از مهم‌ترین فازهای کانی‌شناسی در کانسار طلای موش هستند. در پهنه درون‌زاد، سولفیدهای اولیه اسفالریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت به همراه ذرات آزاد طلا (ابعاد متوسط ۱۷۰ میکرون) از مهم‌ترین فازهای کانه‌زایی هستند. در این مرحله، کانی‌های سولفیدی فرعی و کمیاب مانند کوولیت و کالکوسیت، با فراوانی کمتر دیده می‌شوند. اسفالریت با فراوانی بالا کانی اصلی به شمار می‌رود. گالن نیز پس از اسفالریت با فراوانی کم و بیش بالا در همه مراحل کانه‌زایی (به صورت پاراژنز اسفالریت) حضور دارد. پیریت در نسل‌های مختلف نیز همراه با اسفالریت و گالن و کالکوپیریت مشاهده می‌شود (شکل ۶). پیریت‌ها در سه نسل شامل ۱) پیریت فرامبوئیدال نسل اول (شکل ۶-ا)



شکل ۶- تصاویر کانه‌نگاری از کانه‌های مختلف کانسار موش. (a) پیریت فرامبوئیدال (Py1) در سنگ میزبان، (b) اجتماع ریزبلور پیریت (Py2) همراه اسفالریت در رگه I، (c) پیریت خوش‌وجه درشت بلور (Py3) در رگه II، (d) کانه‌زایی اسفالریت و گالن، (e) ذرات آزاد طلا (native gold) در رگه I، (f) تصویر SEM به همراه طیف EDS از ذره طلای آزاد، (g) ادخال‌های روشن آرسنوپیریت در زمینه Py3، (h) ادخال‌های ریز کالکوپیریت در زمینه گالن، (i) جان‌شینی کوولین در حاشیه کالکوپیریت. حروف اختصاری شامل پیریت: Py، اسفالریت: Sp، گالن: Gn، کالکوپیریت: Ccp، آرسنوپیریت: Apy، کوولین: Cv، گوتیت: Gt، سروزیت: Cer، کوارتز: Qtz.

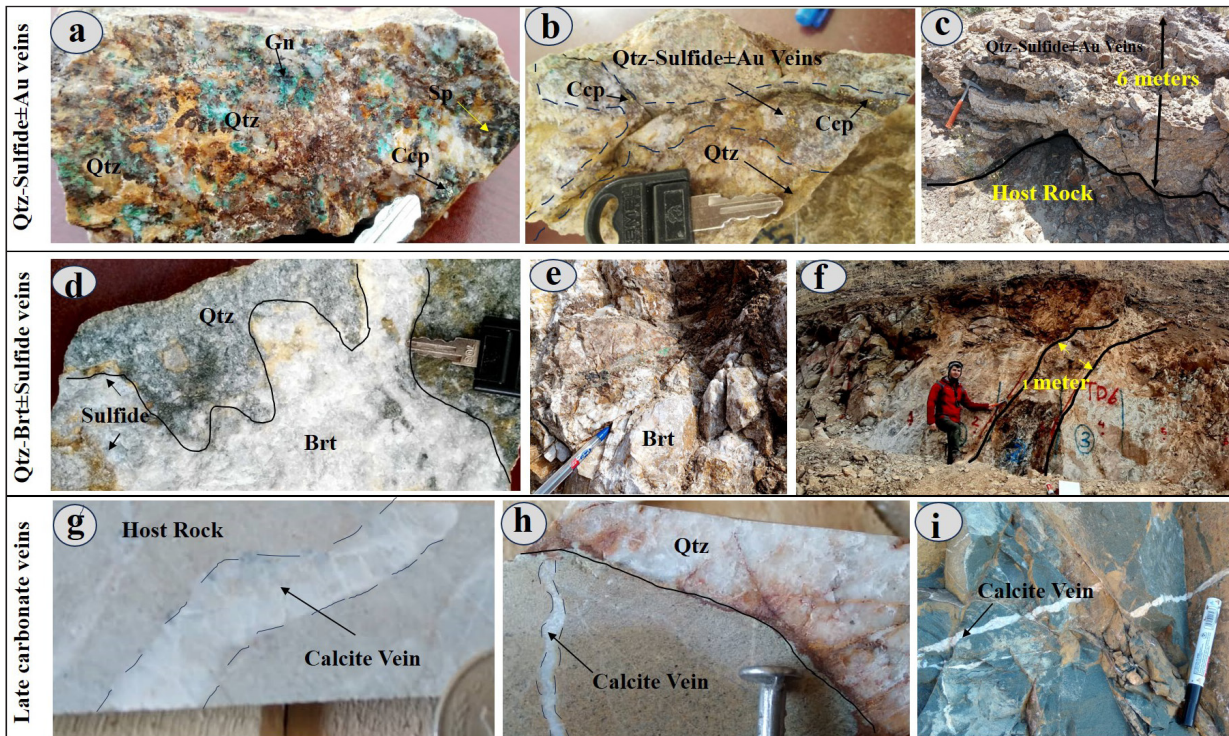
Figure 6. Photomicrographs of different ore minerals in the Mouchesh deposit. a) framboidal pyrite within host rock (Py1), b) fine-grained pyrite (Py2) accompanied with sphalerite, c) euhedral coarse-grained pyrite (Py3), d) sphalerite and galena mineralization, e) native gold nuggets in vein type-I, f) SEM image with EDS from native gold, g) bright inclusions of arsenopyrite within euhedral Py3, h) chalcopyrite inclusions within galena, i) replacement of chalcopyrite by covelline. Mineral abbreviations= Pyrite: Py, Sphalerite: Sp, Galena: Gn, Chalcopyrite: Ccp, Arsenopyrite: Apy, Covelline: Cv, Goethite: Gt, Cerussite: Cer, Quartz: Qtz.

۳-۵- توالی پاراژنی

رگه‌هایی سه مرحله در کانسار طلای موجش شکل گرفته‌اند. رگه کوارتز-سولفید±طلا (رگه I) در مرحله آغازین کانه‌زایی تشکیل شده و میزان اصلی ذرات طلا در کانسار موجش است (شکل ۷- a-c). این رگه در هر سه پهنه کانه‌زایی مشاهده می‌شود. کانه‌های سولفیدی که در این پهنه مشاهده می‌شوند به ترتیب فراوانی شامل اسفالریت، گالن، کالکوپیریت و پیریت هستند که اکسیدها و کربنات‌ها به صورت فرعی تشکیل شده‌اند. رگه کوارتز-باریت±سولفید (رگه II) از لحاظ زمانی پس از رخداد رگه I شکل گرفته و دارای مقدار کمتری کانه سولفیدی است (شکل ۷- d-f). سولفیدها غالباً گالن

و پیریت خوش وجه (Py3) بوده و به ندرت کالکوپیریت در این رگه وجود دارد. رگه تاخیری کربناتی (رگه III) پس از تشکیل رگه‌های یاد شده در شکستگی‌ها شکل گرفته و فاقد هرگونه آثار کانه‌زایی سولفیدی است (شکل ۷- g-i). تصاویر صحرایی از رخداد انواع رگه‌ها در کانسار موجش در شکل ۷ نشان داده شده است.

در توالی پاراژنی پیریت‌های فرامبوئیدال به همراه کلسیت‌های ریزبلور در مراحل اولیه (پیش از کانه‌زایی)، در مرحله اصلی کانه‌زایی پیریت‌های ریزبلور، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، آرسنوپیریت و کوارتز و در مرحله تاخیری کربنات‌ها، گوتیت همراه با کانه‌های سولفیدی مس (کالکوسیت و کوئیت) تشکیل شده‌اند (شکل ۸).



شکل ۷- نمایی از رگه‌های مختلف کانسار طلای موجش. (a-c) رگه کوارتز-سولفید طلا دار (رگه I) که به عنوان رگه اصلی کانه دار دارای ذرات آزاد طلا است، (d-f) رگه کوارتز-باریت سولفید دار (رگه II) که از لحاظ زمانی پس از رگه اصلی تشکیل شده، (g-i) رگه کربناتی تاخیری (رگه III) که فاقد کانه‌زایی سولفیدی است.

Figure 7. Photographs of various veins in the Mouchesh gold deposit. a-c) Gold-bearing quartz-sulfide vein, which is known as the main ore-bearing vein and contains free gold nuggets, d-f) Sulfide-bearing quartz-barite vein, which was formed chronologically after the main vein, g-i) Late carbonate veins without any sulfide mineralization.

| | Main mineralization | | | | |
|--------------|---------------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------|
| | Pre-mineralization | Qtz-Sulfide±Au | Qtz-Barite±sulfide | Carbonate veins | Supergene |
| Pyrite (Py1) | ————— | | | | |
| Pyrite (Py2) | | ————— | | | |
| Pyrite (Py3) | | | ————— | | |
| Chalcopyrite | | ————— | ----- | | |
| Sphalerite | | ————— | | | |
| Galena | | ----- | ————— | | |
| Visible Gold | | ————— | | | |
| Arsenopyrite | | ————— | | | |
| Barite | | | ————— | | |
| Quartz | | ————— | ----- | ----- | |
| Calcite | ————— | | ----- | ————— | |
| Rutile | | ————— | ————— | | |
| Covellite | | | | | ————— |
| Chalcocite | | | | | ————— |
| Goethite | | | | | ————— |

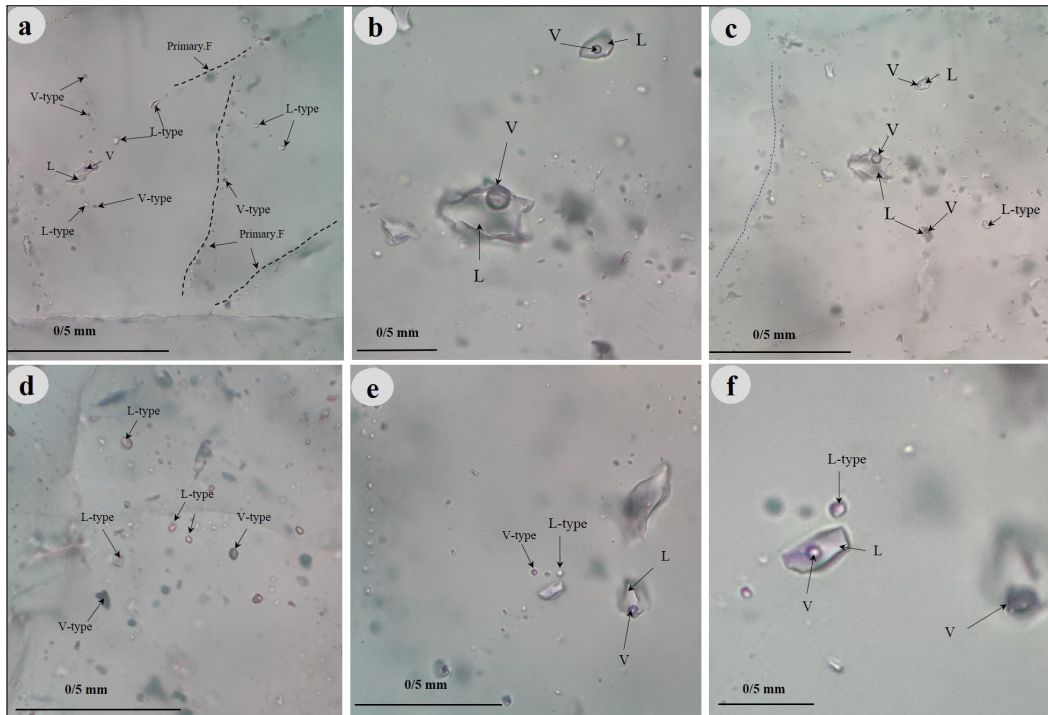
شکل ۸- توالی پاراژنی کانی‌ها در کانسار طلای موجش.

Figure 8. The paragenetic sequence of minerals in the Mouchesh gold deposit.

۳-۶- میانبارهای سیال

مطالعه میانبارهای سیال به تفکیک بر روی سه رگه کوارتز-سولفیدپلادار، کوارتز-باریت±سولفید و کربنات تاخیری، انجام شده است. طبق شواهد سنگ‌نگاری، سه نوع میانبار اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب در مقاطع مشاهده شد. میانبارها بر اساس رده‌بندی روندر (Roedder, 1984) شامل چهار گروه میانبارهای غنی از مایع (LV-type)، غنی از گاز (VL-type)، تک فاز مایع (L-type) و گاز

(V-type)، هستند (شکل ۹). بیش از ۸۰ درصد میانبارها بی شکل بوده و به ندرت شکل‌های بیضی، دوکی و مثلثی دارند. ابعاد میانبارها از کوچک‌تر از ۲ تا ۲۵ میکرون متغیر است. درجه پرشدگی میانبارها ($F=V_L/V_L+V_V$) در میانبارهای اولیه LV و VL به ترتیب بین ۶۵ تا ۹۰ درصد و ۱۰ تا ۳۰ درصد متغیر است. میانبارهای ثانویه اغلب شامل تک‌فاز مایع هستند که با ابعاد کوچک‌تر از ۲ میکرون به صورت قطع کننده مرز بلور مشاهده شدند (شکل ۹).



شکل ۹- تصاویر میانبارهای سیال در کانسار موشش. (a) اجتماع از میانبارهای اولیه و ردیفی ثانویه، (b) میانبارهای دوفازی غنی از مایع، (c) میانبارهای تک فاز مایع و دوفازی غنی از مایع، (d) میانبارهای تک فازی گاز در کنار تک فاز مایع (نشان از جوشش)، (e) میانبارهای تک فاز مایع و گاز در کنار هم (نشان از جوشش)، (f) میانبارهای دوفازی غنی از مایع در کنار میانبارهای تک فاز مایع.

Figure 9. Photomicrographs of fluid inclusions in the Mouchesh deposit, a) primary inclusions with secondary trails, b) liquid-rich two-phase inclusions, c) liquid monophasic inclusions and liquid-rich two-phase inclusions, d) gas monophasic inclusions with liquid single-phase inclusions (boiling assemblage), e) adjacent of liquid and gas monophasic inclusions (boiling assemblage), f) two-phase liquid-rich inclusions adjacent to liquid monophasic inclusions.

۳-۷- ریزدماسنجی

مطالعات ریزدماسنجی با هدف دستیابی به مولفه‌های دما (°C)، شوری (درصد وزنی NaCl)، چگالی (g/cm³) و فشار (bar) بر روی میانبارهای غنی از مایع (LV-type)، در سه نوع رگه، انجام شد. طی مطالعات ریزدماسنجی، به دلیل جلوگیری از انهدام میانبارها، ابتدا میانبارها تحت فرایند سرمایش و پس از آن مورد گرمایش قرار گرفتند. در مرحله سرمایش، دمای یوتکتیک یا T_e میانبارها کمتر از ۲۱- °C به دست آمد که بر اساس مطالعات استیل-مک‌این (Steele-McInnis et al., 2012) میانبارها در سیستم H₂O-NaCl به دام افتاده‌اند. همچنین، دمای نهایی ذوب یخ (T_{mice}) در این میانبارها بین ۲/۵- تا ۴/۴- °C (متوسط ۰/۹- °C) به دست آمد که بر مبنای آن شوری میانبارهای سیال بر حسب درصد معادل NaCl به تفکیک در رگه I با متوسط ۲/۰، در رگه II با متوسط ۱/۶ و در رگه III با متوسط ۱/۵، به دست آمد. چگالی میانبارها با استفاده از درجه پرشدگی بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۸ g/cm³

(متوسط ۰/۹۱ g/cm³)، به دست آمد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار تحت اکسل HOKIEFLINCS_H₂O-NaCl، دمای به دام افتادن میانبارهای سیال در رگه I بین ۱۵۲ تا ۲۳۴ °C (متوسط ۱۸۰ °C)، رگه II بین ۱۲۱ تا ۲۱۸ °C (متوسط ۱۵۵ °C) و رگه III بین ۱۲۳ تا ۱۷۱ °C (متوسط ۱۳۵ °C)، به دست آمد (جدول ۱).

۳-۸- ایزوتوپ پایدار گوگرد

به منظور دستیابی به مقادیر δ^{۳۴}S و منشا گوگرد، نمونه‌ها از رگه‌های کوارتز-سولفید طلادار (رگه I) و کوارتز-باریت±سولفید (رگه III) برداشت شد. بر این اساس، مقادیر δ^{۳۴}S برای کانه‌های سولفیدی کالکوپیریت (+۰/۱ تا +۰/۳%) و اسفالریت (-۰/۹ تا -۰/۵%) در رگه I و گالن (-۳%) در رگه II، به دست آمد. با توجه به مقادیر δ^{۳۴}S کانه‌های سولفیدی و داشتن دمای به دام افتادن (T_i)، سیال، محتوای δ^{۳۴}S_{H₂S} در تعادل با سیال برای هر یک از کانه‌های سولفیدی مورد محاسبه قرار گرفت (جدول ۲).

نوسان بوده است. از آنجایی که در رگه کوارتز-سولفید طلا دار (رگه I) شواهدی از حضور کانی اکسیدی نیست، برای محاسبه سیال در تعادل با گوگرد از گونه H_2S استفاده شده است.

بر این اساس، مقادیر $\delta^{34}S_{H_2S}$ در کانه‌های گالن (% ۰/۳-)، کالکوپیریت (% ۰/۱) تا (% ۰/۱-) و اسفالریت (% ۰/۰ تا % ۰/۴+)، به دست آمد که نشان می‌دهد تغییرات سیال در تعادل با گوگرد در هنگام کانه‌سازی به طور جزئی از % ۰/۳- تا % ۰/۴+ در

جدول ۱- داده‌های ریزدماسنجی بدست آمده از میانبرهای سیال اولیه نوع LV از سه رگه در کانسار طلای موچش.

Table 1. Microthermometric results from primary LV-type fluid inclusions in the three veins at Mouchesh gold deposit.

| Sample no. | Vein type | Minerals | n | T_c (°C) | $T_{m_{ice}}$ (°C) | Salinity (wt% NaCl eq.) ¹ | T_h (°C) | Density (g/cm ³) ¹ | $T_{trapping}$ (°C) ¹ |
|------------|-----------|----------|----|------------|--------------------|--------------------------------------|------------|---|----------------------------------|
| M-1 | Vein I | Quartz | 14 | < -21 | -2.5 to -0.6 | 1.05 – 4.27 | 135 – 227 | 0.84 – 0.96 | 152 – 234 |
| M-2 | Vein II | Quartz | 12 | < -21 | -2.1 to -0.4 | 0.7 – 3.55 | 110 – 194 | 0.88 – 0.98 | 121 – 218 |
| M-3 | Vein III | Calcite | 8 | < -21 | -1.5 to -0.4 | 0.7 – 2.50 | 105 – 133 | 0.95 – 0.96 | 123 – 171 |

¹ داده‌ها توسط نرم افزار تحت اکسل (HOKIEFLINCS_H₂O-NaCl (Steele-MacInnis et al., 2012) محاسبه شده است.

جدول ۲- ترکیب ایزوتوپ گوگرد در کانه‌های سولفیدی مختلف از کانسار طلای موچش. محاسبات مقادیر تفریق ایزوتوپ بر اساس دمای به دام افتادن سیال کانه ساز انجام شده است.

Table 2. Sulfur isotope compositions in different sulfide ores from the Mouchesh gold deposit. Calculations of isotopic fractionation values are obtained based on trapping temperature of the ore-forming fluids.

| Sample no. | Vein type | Minerals | $T_{trapping}$ (°C) | $\delta^{34}S_{Sulfide}$ (‰) $1 \pm \sigma$ | $\delta^{34}S_{H_2S}$ (‰) |
|------------|-----------|--------------|---------------------|---|---------------------------|
| M-Sp-2 | Vein I | Sphalerite | 180 | -0.5 ± 0.01 | 0.0 ^A |
| M-Sp-3 | Vein I | Sphalerite | 180 | -0.9 ± 0.03 | 0.4 ^A |
| M-Cp-4 | Vein I | Chalcopyrite | 180 | 0.1 ± 0.02 | 0.1 ^B |
| M-Cp-5 | Vein I | Chalcopyrite | 180 | 0.3 ± 0.02 | -0.1 ^B |
| M-Gn-1 | Vein II | Galena | 155 | -3.0 ± 0.02 | -0.3 ^C |

A) $\delta^{34}S_{H_2S} = \delta^{34}S_{sphalerite} - 0.1 (10^6 \times T^{-2})$ (Ohmoto and Rye, 1997)

B) $\delta^{34}S_{H_2S} = \delta^{34}S_{chalcopyrite} - 0.05 (10^6 \times T^{-2})$ (Li and Liu, 2006)

C) $\delta^{34}S_{H_2S} = \delta^{34}S_{galena} + 0.17 (10^6 \times T^{-2}) - 4.00 (10^3 \times T) + 1.99$ (Sakai, 1968)

۴- بحث

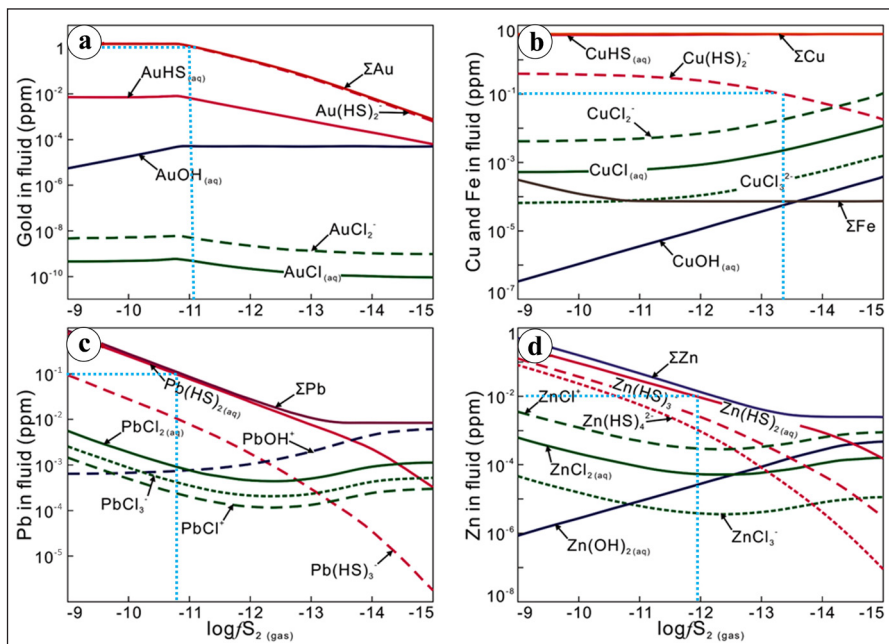
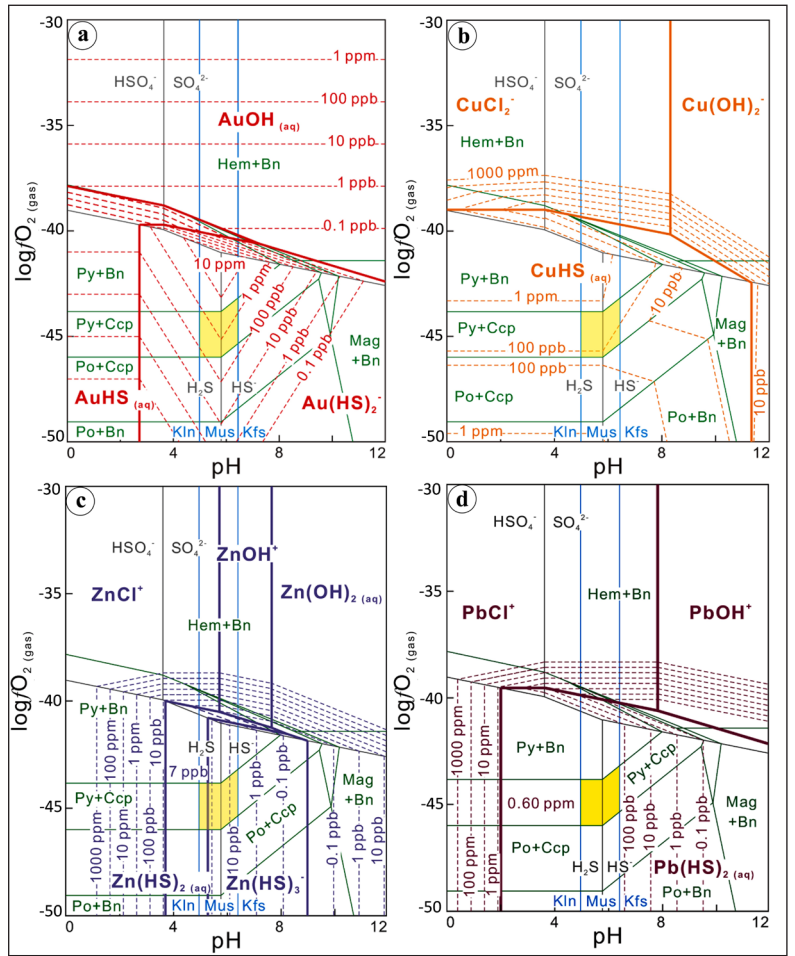
۴-۱- نمودارهای pH-log/O₂ و تعیین شرایط سولفیداسیون

بر اساس نمودارهای دو تایی pH-log/O₂ که میزان حلالیت عناصر فلزی پایه (سرب، روی و مس) و طلا به همراه گونه‌های مختلف آنها را در سیال گرمایی بازسازی می‌نماید، می‌توان با در دست داشتن تغییرات pH (بین ۶ تا ۶/۵ بر اساس کانی دگرسان مسکوویت در رگه I) به تعیین شرایط اکسیداسیون سیال (log/O₂) و تمرکز عناصر محلول دست یافت. بر این اساس، در رگه I کانسار موچش که شرایط فوق وجود دارد میزان log/O₂ حدود -۴۵- تخمین زده می‌شود (شکل ۱۰). در این شرایط محتوای طلای محلول در سیال گرمایی ۱ گرم در تن، سرب و مس حدود ۱۰۰ میلی گرم در تن و روی حدود ۱۰ میلی گرم در تن می‌باشد (شکل ۱۰). براساس تمرکز عناصر یاد شده در ترکیب سیال گرمایی و در نظر گرفتن

کمپلکس بی‌سولفیدی انتقال دهنده، تغییرات فوگاسیته گاز گوگرد یا log/S₂ در سیال چندفلزی طلا دار رگه I کانسار طلای موچش حدوداً بین ۱۱- تا ۱۳- در نوسان است (شکل ۱۱). با توجه به ناپایداری کمپلکس‌های بی‌سولفیدی و کاهش محتوای گوگرد کل (ΣS) در سیال، حجم زیادی از کانه‌های سولفیدی کالکوپیریت، گالن و اسفالریت به همراه ذرات آزاد طلا در این شرایط شکل گرفته‌اند (شکل ۱۲-a). همچنین، با در نظر گرفتن pH بین ۶ تا ۶/۵ (حضور مسکوویت) و محتوای log/S₂ (بین ۱۱- تا ۱۳-) تمرکز گوگرد و کربن سیال گرمایی در رگه I کانسار موچش بین ۰/۱ تا ۰/۱۱ درصد مولی در تغییر است (شکل ۱۲-b). این محتوای گوگرد و کربن به منظور شکل‌گیری ذخایر اپی‌ژنتیک طلا و مس (نظیر ذخایر اپی‌ترمال و پورفیری) ضروری است (Hutchison et al., 2020).

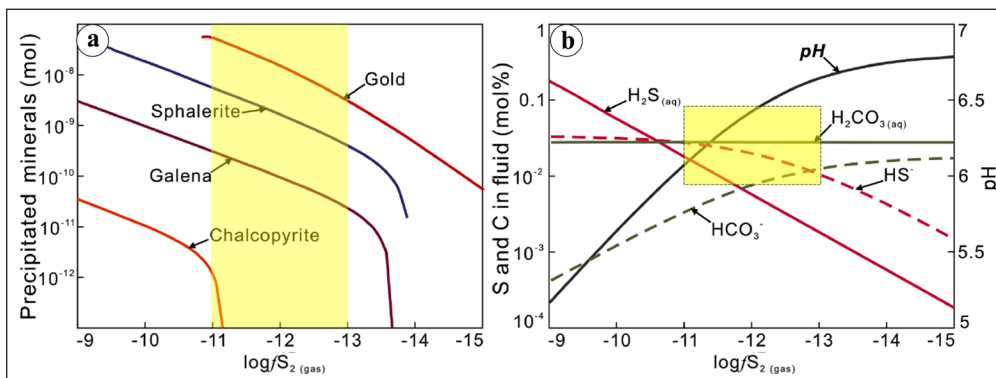
شکل ۱۰- نمودارهای pH-log/O₂ که گونه‌های مختلف و میزان حلالیت عناصر فلزی پایه (سرب، روی و مس) و طلا را در سیال گرمایی تشکیل دهنده رگه I کانسار موجش، بازسازی می‌نماید. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن محتوای I کانسار ۱ mol/kg Cl⁻ و 0.01 mol/kg ΣS در فشار ۲ kbar و دمای ۲۰۰ °C انجام شده است (بر پایه مطالعات لی و همکاران - Li et al., 2022). خطوط خاکستری مرزهای گونه‌های مختلف گوگرد و خطوط سبز میدان کانه‌های مس و آهن را به عنوان بافر احیا نشان می‌دهد. خطوط ستبر، مرزهای گونه‌های چیره طلا (قرمز، مس (نارنجی)، روی (آبی) و سرب (بنفش)) را نشان می‌دهند و خطوط حلالیت عناصر با خط چین مشخص شده‌اند. ناحیه زرد نشان‌دهنده مقادیر تخمینی در رگه I کانسار طلای موجش است. حروف اختصاری کانی‌ها شامل Bn: بورنیت، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت؛ Po: پیرویت؛ Ccp: کالکوپریت؛ Kln: کائولینیت؛ Mus: مسکویت؛ Kfs: فلدسپار آلکالن.

Figure 10. pH-log/O₂ diagrams showing the predominant Cu, Zn, Pb, and Au speciation and solubility in hydrothermal fluid of vein-type I in the Mouchesh gold deposit, containing 1 mol/kg Cl⁻ and 0.01 mol/kg ΣS at 2kbar and 200 °C (based on Li et al., 2022). The grey lines show the boundaries of different sulfur species and the green lines show the field of Cu and Fe minerals as a redox buffer. The thick lines show the boundaries of the dominant species of gold (red), copper (orange), zinc (blue), and lead (purple), and the solubility lines of the elements are marked with dashed lines. The yellow rectangle represents the estimated pH-O₂ values on vein-type I of the Mouchesh gold deposit. Bn: bornite; Hem: hematite; Mag: magnetite; Po: pyrrhotite; Ccp: chalcopyrite; Kln: kaolinite; Mus: muscovite; Kfs: alkaline feldspar.



شکل ۱۱- تأثیر از دست دادن گوگرد کل (ΣS) سیال گرمایی بر روی ناپایداری کمپلکس‌های بی سولفیدی فلزات پایه و طلا در رگه I کانسار طلای موجش (نمودار پایه از Li et al., 2022). (a) حدود log/S₂ -۱۱ با تمرکز طلای 1ppm در سیال، (b) حدود log/S₂ -۱۳.۳ با تمرکز مس 0.1 ppm در سیال، (c) حدود log/S₂ -۱۱ با تمرکز سرب 0.1 ppm در سیال، (d) حدود log/S₂ -۱۲ با تمرکز روی 0.01 ppm در سیال.

Figure 11. Effect of total sulfur losses in hydrothermal fluids on the instability of base metals and gold bisulfide complexes in vein type-I of the Mouchesh gold deposit (based on Li et al., 2022). a) log/S₂ ≈ -11 with Au concentration of 1 ppm in the fluid, b) log/S₂ ≈ -13.3 with Cu concentration of 0.1 ppm in the fluid, c) log/S₂ ≈ -11 with Pb concentration of 0.1 ppm in the fluid, d) log/S₂ ≈ -12 with Zn concentration of 0.01 ppm in the fluid.



شکل ۱۲- (a) ته‌نشست کانه‌های سولفیدی فلزات پایه و طلا در log/S₂ حدود ۱۱- تا ۱۳- و (b) تعیین محتوای گوگرد و کربن سیال توسط pH و log/S₂. ناحیه زرد نشان‌دهنده مقادیر تخمینی در رگه I کانسار طلای موشش است. نمودار پایه از ویلیام جونز و همکاران (Williams-Jones et al., 2009) اقتباس شده است.

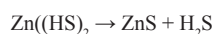
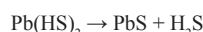
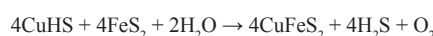
Figure 12. a) Precipitation of base metal sulfides and gold in log/S₂ ≈ -11 to -13, b) Determination of fluid sulfur and carbon content by pH and log/S₂. The yellow area shows the estimated values of vein type-I of the Mouchesh gold deposit. Diagram based on Williams-Jones et al. (2009).

(NaCl) شکل گرفته که با توجه به حضور میانبرهای نوع LV و L و دما و شوری پایین در شرایط اختلاط سیال جوی به‌وجود آمده است. علت تشکیل رگه تاخیری در کانسار موشش با روندهای عمومی میانبرهای سیال توسط ویلکینسون (Wilkinson, 2001) مقایسه شده که بر مبنای آن منطبق با شرایط اختلاط سیال است (شکل ۱۳). با توجه به آنکه اغلب کانسارهای سولفیدی فلزات پایه به دلیل تشکیل توسط کمپلکس‌های کلریدی نیاز به شوری بالا دارند و از آنجایی که شوری به‌دست آمده در میانبرهای سیال کانسار موشش اغلب کمتر از ۵ درصد معادل NaCl است؛ از این رو، به نظر می‌رسد کمپلکس‌های بی‌سولفیدی و محتوای بالای H₂S نقش بسزایی در جابه‌جایی و ته‌نشست فلزات در رگه‌های کوارتز-سولفید طلا دار کانسار موشش داشته‌اند. بر این اساس، با توجه به مقادیر دما و شوری رگه‌ها طی مطالعات ریزدماسنجی به نظر می‌رسد شکل‌گیری رگه‌های کوارتز-سولفید چندفلزی طلا دار (رگه‌های I و II) و کربناتی تاخیری (رگه III) کانسار موشش در محدوده ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین (به دلیل دگرسانی کوارتز-سریسیت و دمای نسبتاً پایین کانی‌سازی) قرار می‌گیرند که از این نظر قابل قیاس با شرایط دما-شوری کانسار طلای اپی‌ترمال ساری گونی (Richards et al., 2006) در فاصله ۵۰ کیلومتری این کانسار است.

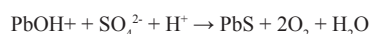
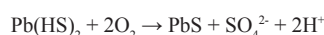
با توجه به اینکه دما و شوری کانی‌سازی در رگه‌های کوارتز-سولفید I (دمای همگن شدن ۱۳۵ تا ۲۲۷ و شوری ۱/۰ تا ۴/۲۷) و II (دمای همگن شدن ۱۱۰ تا ۱۹۴ و شوری ۰/۷ تا ۳/۵۵) تقریباً در یک محدوده مشخص تغییر می‌نمایند و در نمودار دوتایی دمای همگن شدن-شوری نیز با کاهش دما شوری آنها روند افزایش نشان می‌دهد (شکل ۱۳)، این روند گویای آن است که جوشش نقش مهمی در شکل‌گیری رگه‌های I و II در کانسار طلای موشش داشته است. این موضوع با استفاده از نمودار دمای همگن شدن-چگال نیز تایید می‌شود. به این صورت که طی جوشش به دلیل آزاد شده بخارات و مواد فرار چگالی سیال افزایش یافته و با کاهش دما رابطه معکوس نشان می‌دهد. همپوشانی بخش زیادی از چگالی‌های میانبرهای سیال در رگه‌های کانه‌ساز I و II گویای تشکیل این رگه‌ها در شرایط جوشش است (شکل ۱۴-a). بر این اساس، با استفاده از نمودار تعیین ژرفا توسط هاس (Haas, 1971) رگه I در ژرفای تقریبی ۲۶۰ تا ۶۲۰ متر و رگه II در ژرفای تقریبی ۲۱۰ تا ۴۵۰ متر شکل گرفته‌اند (شکل ۱۴-b).

۲-۴- ژنز رگه‌ها و تحول سیال کانه‌ساز

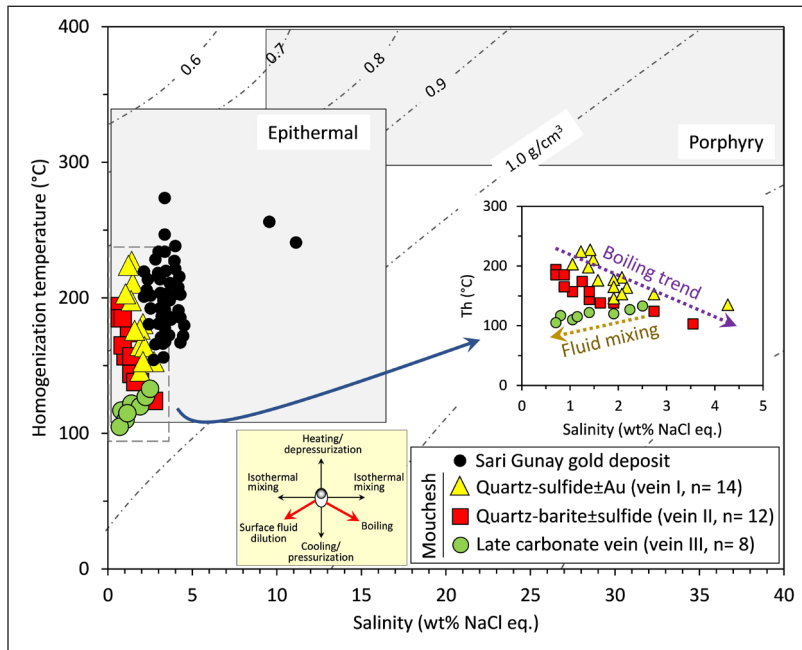
مطالعات نظری و آزمایشگاهی نشان می‌دهند طلا در سیال گرمایی احیایی و تحت شرایط pH نزدیک به خنثی با کمپلکس بی‌سولفیدی Au(HS)₂ مهاجرت می‌کند (Stefansson and Seward, 2004; Pokrovski et al., 2014). این کمپلکس نه تنها در فاز آبیگن چگال و تحت فشار لیتواستاتیک، بلکه در فازهای آبیگن کم چگال مانند شرایط هیدرواستاتیک نیز پایدار است (Liu et al., 2011). حجم زیادی از کانه‌های سولفیدی Cu-Pb-Zn به همراه ذرات طلای آزاد در رگه I کانسار طلای موشش رخ داده که نشان می‌دهد سیال احیایی غنی از H₂S با محتوای log/S₂ حدود ۱۱- تا ۱۳- پس از ناپایداری کمپلکس‌های بی‌سولفیدی (HS⁻ و HS²⁻) به شکل‌گیری کانه‌ها و ذرات آزاد طلا طی واکنش‌های زیر (Li et al., 2022) پرداخته است:



پس از ته‌نشست بخش زیادی از کانه‌های سولفیدی در رگه I، محتوای سولفور کل (ΣS) در سیال گرمایی کاهش یافته و در اثر خروج بخش زیادی از H₂S توسط فاز بخار (ناشی از پدیده جوشش، شکل‌های ۹ و ۱۳) نسبت SO₄²⁻/H₂S افزایش می‌یابد که به بالا رفتن سولفات محیط و رخداد رگه کوارتز-باریت-گالن (رگه II)، انجامیده است. با توجه به این کاهش فوگاسیته گوگرد از رگه I (حدود ۱۱- تا ۱۳- ≈ log/S₂) به رگه II (۱۳- < log/S₂)، کمپلکس‌های بی‌سولفیدی باقیمانده در سیال ناپایدار شده که در نتیجه آن مقدار ناچیز گالن و ذرات پراکنده پیریت در رگه II شکل گرفته‌اند. تشکیل گالن به واسطه حضور یون SO₄²⁻ در رگه II با افزایش اکسیداسیون و pH محیط همراه بوده که طی واکنش‌های زیر (Reed and Palandri, 2006) صورت گرفته است:

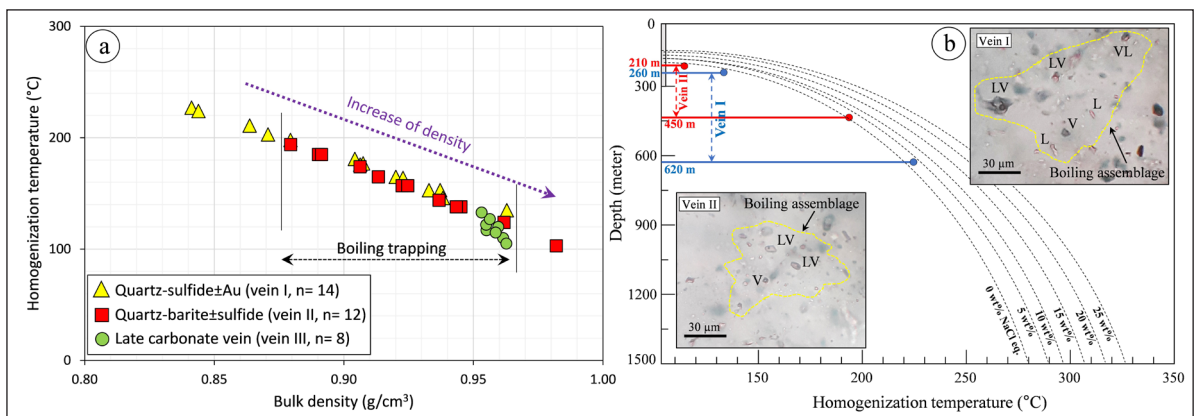


شکل‌گیری رگه‌های کربناتی تاخیری (رگه III) بدون کانی‌سازی فلزی و همراه باطله کوارتز پس از رگه‌های اصلی I و II انجام شده است. این رگه در دمای بین ۱۲۳ تا ۱۷۱ °C (متوسط ۱۳۵ °C) و شوری ۰/۷ تا ۲/۵ (متوسط ۱/۵ درصد معادل



شکل ۱۳- نمودار دما-شوری که روندهای جوشش و اختلاط سیال را به ترتیب در رگه‌های کوارتز-سولفید-پلاکار (رگه‌های I و II) و کربناتی تاخیری (رگه III) در قیاس با روند عمومی سیال توسط ویلکینسون (Wilkinson, 2001) نشان می‌دهد. به منظور مقایسه، داده‌های میانبار سیال کانسار طلای ساری گونی (با اقتباس از ریچاردز و همکاران - Richards et al., 2006) نیز ترسیم شده که ارتباط نزدیک با داده‌های ریزدماسنجی کانسار موشش نشان می‌دهد.

Figure 13. Temperature-salinity diagram showing boiling and fluid mixing trends in the Au-bearing quartz-sulfide veins (veins I and II) and late carbonate (vein III), respectively; in comparison with the general fluid trend by Wilkinson (2001). For comparison, the fluid inclusions data of the Sari Gunay gold deposit (adapted from Richards et al., 2006) are also plotted, which shows a close relationship with the microthermometric data of the Mouchesh deposit.



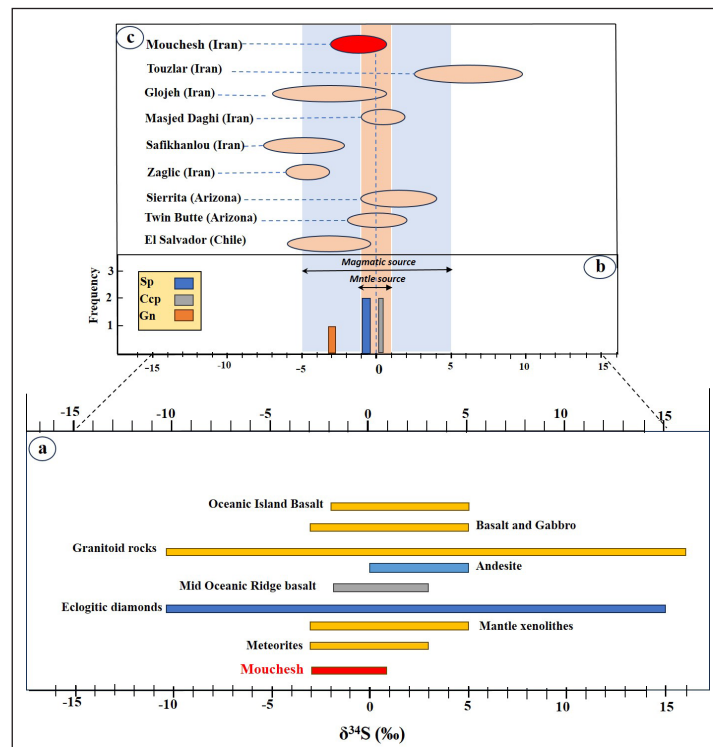
شکل ۱۴- (a) نمودار دوتایی دمای همگن شدن در مقابل چگالی در میانبارهای سیال رگه‌های مختلف کانسار موشش. (b) تعیین عمق رگه‌های I و II تحت شرایط هیدرواستاتیک با استفاده از منحنی‌های شوری توسط هاس (Haas, 1971).

Figure 14. a) Binary diagram of homogenization temperature versus density in fluid inclusions of different veins of Mouchesh deposit. b) Determining the depth of vein types-I and II under hydrostatic conditions using salinity curves (after Haas, 1971).

۳-۴- منشا گوگرد

همان‌گونه که اشاره شد، طلا و HS^- معمولاً کمپلکس پایدار $Au(HS)_2^-$ را برای مهاجرت این عنصر در شرایط pH تقریباً خنثی، احیایی و دمای متوسط تا پایین تشکیل می‌دهند (Stefansson and Seward, 2004). بنابراین، تعیین منبع گوگرد می‌تواند منشا طلا را نیز به طور بالقوه منعکس نماید. بررسی ایزوتوپ گوگرد کانه‌های سولفیدی بهترین روش برای استنباط منشا گوگرد در کانسار است (Shanks, 2014; Kesler et al., 2005). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نسبت $\delta^{34}S$ کانی‌های سولفیدی به شدت تحت تاثیر فوگاسیته اکسیژن (O_2) ، pH، دما و ترکیب سیال نخستین قرار دارند، اما اثر فشار محدود است (Ohmoto, 1986; Seal, 2006; Li et al., 2019). در شرایط فیزیکی و شیمیایی در نظر گرفته شده برای مرحله اصلی $(T < 250^\circ C)$ و pH نزدیک خنثی، گوگرد در سیال اغلب به صورت H_2S حضور دارد. در این دما مقدار $\delta^{34}S$ در سولفید معادل مقدار $\delta^{34}S_{H_2S}$ در سیال است (Ohmoto and Rye, 1997). ترکیب ایزوتوپ گوگرد در رگه‌های I (۰/۹- تا ۰/۳%) و II (۳- تا ۰/۳%) نسبتاً همگن و سازگار با محدوده ترکیب ایزوتویی گوشته یا سنگ‌های

ماگمایی است (Seal, 2006; Hoefs, 2018) (شکل ۱۵). دامنه تغییرات $\delta^{34}S$ در سولفیدهای گرمایی با خاستگاه ماگمایی حدوداً بین ۳- تا ۱%+ است (Hoefs, 2018). مقدار $\delta^{34}S_{H_2S}$ سیال گرمایی در تعادل با سولفید در رگه I بین ۰/۱- تا ۰/۴%+ به دست آمد که تفریق ایزوتویی بسیار محدود آن منشا ماگمایی رگه I را تایید می‌نماید. هر چند وجود پیریت‌های فرامبوئیدال نسل اول (Py1) در سنگ میزبان رسوبی-آتشفشانی کانسار موجش می‌تواند پدیده احیا سولفات آب دریا توسط باکتری بی‌هوازی (BSR) را نیز در تشکیل کانه‌های سولفیدی رگه I موثر بداند. ترکیب $\delta^{34}S$ در رگه II برای کانه گالن حدود ۳%+ به دست آمده که از سایر کانه‌های سولفیدی در رگه I کمتر است. این مقدار منفی گویای افزایش اکسیژن سیال کانه‌ساز (حضور باریت) بوده که موجب شده بخش عمده $\delta^{34}S$ طی واکنش $(4SO_2 + H_2O \rightarrow H_2S + 3SO_4^{2-} + 6H^+)$ وارد ترکیب SO_4^{2-} در سیال گرمایی شده باشد. مقادیر $\delta^{34}S$ کانسار موجش قابل مقایسه با ترکیب ایزوتویی کانه‌های سولفیدی در برخی کانسارهای چندفازی طلا دار ایران، آریزونا و شیلی می‌باشد که بین ۵- تا ۶%+ در تغییر است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- a) دامنه تغییرات $\delta^{34}S$ برای انواع مختلف سنگ‌ها (محدوده‌ها از Marini et al., 2011; Qiu et al., 2016)، b) نمودار مقادیر $\delta^{34}S$ کانه‌های سولفیدی در کانسار موجش، c) ترکیب $\delta^{34}S$ سولفیدهای کانسار موجش در قیاس با برخی کانسارهای چندفازی طلا (Tale Fazel et al., 2023) در ایران.

Figure 15. a) range of $\delta^{34}S$ values in different rock types (data from Marini et al., 2011; Qiu et al., 2016), b) $\delta^{34}S$ values in the Mouchesh deposit, c) $\delta^{34}S$ composition of sulfides in the Mouchesh deposit, comparison with some magmatic-thermal polymetallic deposits (after Tale Fazel et al., 2023) in Iran.

۵- نتیجه گیری

آهک) کرتاسه زیرین، تشکیل شده است. کانه‌زایی در قالب ۲۸ رگه کانه‌دار و عقیم به ترتیب شامل رگه‌های کوارتز-سولفید±طلا (رگه I)، کوارتز-باریت±سولفید (رگه II) و کربناتی تاخیری (رگه III)، با بافت و ساخت‌های شکافه پرکن، شانه‌ای،

کانسار موجش با عیار متوسط ۱/۳ گرم در تن طلا به‌عنوان یکی از ذخایر چندفازی طلا دار رگه‌ای در کمربند طلای تکاب-دلیجان (غرب ایران)، از لحاظ فضایی و زمانی مرتبط با واحدهای آتشفشانی-رسوبی (لیتیک توف آندزیت با میان لایه‌های

تشکیل گالن و پیریت‌های پراکنده در این مرحله است. در مجموع، با توجه به مقادیر دما، شوری و فشار میانبارهای سیال در کانسار موجش به نظر می‌رسد شکل‌گیری رگه‌های کوارتز-سولفید چندفلزی طلا دار (رگه‌های I و II) و کربناتی تاخیری (رگه III) منطبق با شرایط ذخایر اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین بوده که از این نظر قابل قیاس با وضعیت دما-شوری کانسار طلای اپی‌ترمال ساری‌گونی در مجاورت آن می‌باشد.

سیاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از مدیریت محترم شرکت پارسی کان‌کاو صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان از نظرات سودمند داوران محترم فصلنامه علوم زمین سازمان زمین‌شناسی سپاسگزارند.

کلو فرم، افشان و جانشینی رخنمون دارد. مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ سیال گرمابی در تعادل با سولفید در رگه I بین ۰/۱- تا ۰/۴% به دست آمد که تفریق ایزوتوپی بسیار محدود آن منشا ماگمایی سولفید و طلای همراه آن در رگه I را تایید می‌کند. به نظر می‌رسد با توجه به حجم بالای کانه‌های سولفیدی، عدم رخداد کانی‌های اکسیدی و محتوای بالای سولفور کل (ΣS)، طلای محلول در رگه I توسط کمپلکس‌های بی‌سولفیدی $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ در دمای نسبتاً پایین ($T < 250^\circ\text{C}$) و pH نزدیک به خنثی (6.5-6.5، وجود دگرسانی سربستی)، مهاجرت یافته است. پس از آن، در اثر رخداد جوشش (اجتماع میانبارهای دوفازی LV و VL در کنار هم)، فرایند اکسیداسیون H_2S و HS^- به سولفات (SO_4^{2-}) صورت گرفته که به کاهش اکتیویته S^{2-} ناپایداری کمپلکس‌های بی‌سولفیدی و ته‌نشست ذرات طلای آزاد (متوسط ابعاد ۱۷۰ میکرون) در رگه I انجامیده است. تشکیل رگه کوارتز-باریت-سولفید (رگه II) پس از کانه‌زایی طلا، گویای افزایش \log/O_2 سیال و تشکیل یون‌های سولفات همزمان با

کتابنگاری

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ص.
 سرتیپی، ع.، ۱۳۸۴، نقشه زمین‌شناسی سندج با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 شرکت پارسی کان‌کاو، ۱۳۹۹، گزارش پایان عملیات اکتشافی محدوده طلا زرزیما موجش - استان کردستان، ۱۷۷ص.

References

- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran. Geological Survey of Iran, 586p. (In Persian).*
- Ghorbani, M., 2013. *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources.* Springer Science and Business Media, 572 p.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic geology*, 66, 940-946. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.6.940>.
- Heidari, S.M., Afzal, P., and Sadeghi, B., 2022. Miocene tectono-magmatic events and gold/poly-metal mineralization in the Takab-Delijan belt, NW Iran. *Geochemistry*, p.125944. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125944>.
- Hoefs, J., 2018. Isotope Fractionation Processes of Selected Elements. In: Hoefs, J. (Ed.), *Stable Isotope Geochemistry*, eighth ed. Springer International Publishing, Cham, pp. 53-227. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78527-1-2>.
- Hutchison, W., Finch, A.A., and Boyce, A.J., 2020. The sulfur isotope evolution of magmatic-hydrothermal fluids: insights into ore-forming processes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 288, 176-198. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.07.042>.
- Kesler, S.E., Ricuputi, L.C., and Ye, Z., 2005. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer Deposit, Nevada, USA. *Mineralium Deposita*, 40, pp.127-136. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0477-9>.
- Li, H., Wang, Q., Weng, W., Dong, C., Yang, L., Wang, X., and Deng, J., 2022. Co-precipitation of gold and base metal sulfides during fluid boiling triggered by fault-valve processes in orogenic gold deposits. *Ore Geology Reviews*, p.105090. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105090>.
- Li, H.F., Tang, J.X., Hu, G.Y., Ding, S., Li, Z., Xie, F.W., Teng, L., and Cui, S.Y., 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Tibet, China. *Ore Geol. Rev.* 107, 692-706. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.033>.
- Li, Y.B., and Liu, J.M., 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1789 - 1795. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.015>.
- Liu, X.D., Lu, X.C., Wang, R.C., Zhou, H.Q., and Xu, S.J., 2011. Speciation of gold in hydrosulfide-rich ore-forming fluids: Insights from first-principles molecular dynamics simulations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75 (1), 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.10.008>.
- Marini, L., Moretti, R., and Accornero, M., 2011. Sulfur isotopes in magmatic-hydrothermal systems, melts, and magmas. *Rev. Mineral. Geochem.* 73, 423-492. <https://doi.org/10.2138/rmg.2011.73.14>.
- Ohmoto, H., 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Rev. Mineral. Geochem.* 16, 491-559. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01103-7>.
- Ohmoto, H., and Rye, R. O., 1997. Isotope of sulfur and carbon, in Barnes, H. L. Ed., *Geochemistry of Hydrothermal deposits*, John Wiley and Sons, p. 509-567
- Parsi Kankav Company, 2020, *Report on the detail exploration in the Zarzima Mouchesh gold area, Kurdistan province, 177p. (In Persian).*

- Phillips, G.N., and Powell, R., 2009. Formation of gold deposits—review and evaluation of the continuum model. *Earth Sci. Rev.* 94, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.002>.
- Pokrovski, G.S., Akinfiev, N.N., Borisova, A.Y., Zotov, A.V., and Kouzmanov, K., 2014. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 402 (1), 9-70. <https://doi.org/10.1144/SP402.4>.
- Qiu, K.F., Taylor, R.D., Song, Y.H., Yu, H.C., Song, K.R., and Li, N., 2016. Geologic and geochemical insights into the formation of the Taiyangshan porphyry copper–molybdenum deposit, Western Qinling Orogenic Belt, China. *Gondw. Res.* 35, 40–58. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.014>.
- Reed, M.H., and Palandri, J., 2006. Sulfide mineral precipitation from hydrothermal fluids. *Rev. in Mineralogy & Geochemistry* 61, 609–631. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.61.11>.
- Richards, J.P., and Sholeh, A., 2016. The Tethyan tectonic history and Cu-Au metallogeny of Iran. In: Richards, J.P. (Ed.), *Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt: Society of Economic Geologists Special Publication No. 19*, 193–212.
- Richards, J.P., Wilkinson, D., and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit Northwest Iran. *Econ. Geol.* 101, 1455–1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>.
- Roedder, E., 1984. Volume 12: fluid inclusions. *Reviews in mineralogy*, 12, p.644.
- Sakai, H., 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes. *Geochemical Journal*, 2: 29-49. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.29>.
- Sartipi, A., 2005, *Geological Map of Sanandaj with a scale of 1:100.000, Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Seal, R.R., 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Rev. Mineral. Geochem.* 61, 633-677. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.61.12>.
- Seward, T.M., 1990. *The Hydrothermal Geochemistry of Gold, Gold Metallogeny and Exploration*. Springer, US, pp. 37–62.
- Shanks, W.C.P., 2014. Stable isotope geochemistry of mineral deposits. *Treatise Geochem.* (2nd) 13, 59–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01103-7>.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., and Bodnar, R., 2012. HOKIEFLINCS_H2O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O–NaCl. *Computers and Geosciences.* 49, 334–337. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022>.
- Stefansson, A., and Seward, T.M., 2004. Gold (I) complexing in aqueous sulfide solutions to 500°C at 500 bar. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 4121-4143. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.006>.
- Tale Fazel, E., Nevolko, P.A., Pašava, J., Xie, Y., Alaei, N., and Oroji, A., 2023. Geology, geochemistry, fluid inclusions, and H–O–C–S–Pb isotope constraints on the genesis of the Atash-Anbar epithermal gold deposit, Urumieh–Dokhtar magmatic arc, central-northern Iran. *Ore Geology Reviews*, p.105285. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105285>.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- Williams-Jones, A.E., Bowtell, R.J., and Migdisov, A.A., 2009. Gold in solution. *Elements* 5, 281–287. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.281>.