

Original Research Paper

Origin and physicochemical nature of the ore-forming fluids of the Fathabad Cu deposit, SE Torbat-e-Heydarieh, Khorasan Razavi

Hanieh Kiaei¹, Ahmad Kazemi-Mehrnia^{1*}, Hamid Samari², Peyman Afzal³ and Nazanin Zaheri-Abdehvand¹¹ Department of Earth Science, Mahallat Branch, Islamic Azad University, Mahallat, Iran² GRE Company, Denver, Colorado, USA³ Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022 June 08

Accepted: 2022 October 24

Available online: 2023 June 22

Keywords:

Vein type Cu deposit

Geochemistry

Fluid inclusions

Sulfur isotope

Fathabad Cu deposit

Metallogenic belt

Khaf-Kashmar-Bardaskan

ABSTRACT

The Fathabad Cu deposit is located in the Khorasan Razavi province, 35 km SE of the Torbat-e-Heydariyeh and in the Khaf-Kashmar-Bardaskan metal belt. The vein and veinlet mineralization consist of chalcopyrite, pyrite, magnetite, chalcocite, bornite, covellite, malachite and iron oxides associated with siliceous-sericite, argillite and propylitic alteration in the volcanic rocks formed parallel to the sub-faults that branch off from the Dorouneh fault. The similar pattern of REE and trace elements in the mineralized veins and associated volcanic rocks suggests a magmatic-hydrothermal origin of the ore elements. In the vein system of Fathabad district, quartz, pyrite, chalcopyrite, and magnetite veins with propylitic alteration in the early stage of mineralization, quartz, pyrite, chalcopyrite and magnetite veins with sericite alteration in the main stage of mineralization and quartz, pyrite and chalcopyrite veins were identified along with argillic and iron oxide alterations. Calcite veins along with sericite and iron oxide alterations were also identified in the late stage of mineralization. The enrichment of trace, LREEs/HREEs ratio, positive Eu anomaly and negative Ce anomaly, indicate reducing conditions and a high pH of the mineralized fluids. Fluid inclusion studies with low salinity (13.9 to 4.74 wt% NaCl eqv.) and low temperature (111 to 192 °C) indicate dilution and mixing of the sulfur- and element-rich magmatic-hydrothermal fluid with meteoric water, leading to leaching and precipitation of trace, rare and copper elements. The $\delta^{34}\text{S}$ isotopes values (-1.58 to -2.86‰) in the chalcopyrite minerals indicate the magmatic origin of sulfur. The geology, geochemistry, and fluid inclusions evidences indicate that the Fathabad Cu deposit belongs to an epithermal style mineral system.

1. Introduction

Fathabad deposit is located in the central part of the Khaf-Kashmar-Bardaskan metallogenic belt in the North East of Iran. Based on exploration activities, the source of copper ore was estimated to be 622,837 tons with a grade of 0.42% (Kazemi Mehrnia, 2016).

The exposed rock units in the Fathabad deposit include Eocene volcanic, Oligocene sedimentary units, and middle Jurassic to Miocene granitic intrusive rocks. The most important alterations include siliceous-sericite, argillic, carbonate, propylitic, and iron

* Corresponding author: Ahmad Kazemi-Mehrnia; E-mail: Akmehrnia@yahoo.com

Citation:

Kiaei, H., Kazemi-Mehrnia, A., Samari, H., Afzal, P., and Zaheri-Abdehvand, N., 2023. Origin and physicochemical nature of the ore-forming fluids of the Fathabad Cu deposit, SE Torbat-e-Heydarieh, Khorasan Razavi. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(2), 128, 25-42. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.346123.2004>

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2023 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2022.346123.2004

 doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.2.3.2



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

oxide and hydroxide, which are often limited to mineralized zones of Eocene porphyry andesite units. In the present study, the origin, nature and physicochemical properties of ore-forming fluid have been investigated using the evidence of fluid inclusion and stable sulfur isotopes in mineralized quartz veins and the geochemistry of mineralized veins and their comparison with the geochemistry of volcanic host rocks.

2. Research Methodology

12 polished sections and 21 thin sections of host rock units were studied for the mineralogy and alteration. Geochemical analysis was performed on 3 samples of mineralized quartz vein and 1 sample of calcite vein related to drilling boreholes. The fluid inclusions were studied in 4 double polished sections of quartz veins and 1 sample of calcite vein. Also, sulfur isotope in chalcopyrite ore mineral of 2 samples of ore quartz vein (quartz + pyrite + chalcopyrite + chalcocite with siliceous-sericite alteration) was analyzed.

3. Results

3.1. Geochemical data of mineralized quartz and calcite veins

The geochemical characteristics and enrichment and depletion of trace and REE elements of the ore veins were compared with those of the Fathabad host rocks.

The Chondrite-normalized REE distribution patterns of mineralized quartz and calcite veins (McDonough and Sun, 1995) showed a high similarity with the host rocks (except Ho, Tm, and Yb), and enrichment of LREE elements in the mineralized parts.

Quartz and calcite veins have positive values of Eu* and negative values of Ce* compared to the negative values of Eu* and Ce* anomalies of the host rock samples of Fathabad deposit. The Chondrite-normalized REE distribution diagrams (MacDonough and Sun, 1995) of quartz and calcite veins similar to volcanic rocks related to the subduction zone of Fathabad, enriched in Pb, U, Nd, Sr and Ba and depleted in Ti, Nb, P, Th, Zr, Rb and Hf, indicated that the ore veins were originated from the volcanic host rocks.

Enrichment of Cu, Mn, and Y, depletion of Ni, Zn, Pb, Sr, Sc and V and REE comparison of the mineralized veins with the average of those are from the Fathabad volcanic rocks showed the REE enrichment of these mineralized quartz and calcite veins from all elements except Ho and Lu.

3.2. Fluid inclusion

In the quartz and calcite veins, most of the inclusions were identified as two-phase liquid-rich (LV) with liquid phase are about 70-80%. Microthermometric studies on liquid-rich (LV) two-phase primary fluid inclusion show that the first melting temperature T_{fm} (°C) in fluid inclusion of the quartz and calcite minerals is between -41 °C

and -53 °C and -41 °C and -43 °C, respectively, which is lower than the first melting temperature (T_{fm} =20.8 °C) of NaCl-H₂O system. The final melting temperature T_{mice} (°C) of (LV) fluid inclusion found in quartz and calcite minerals is between -14.2 °C and -24.7 °C and -20.4 °C and -22 °C, respectively (Table .3). The salinity of (LV) inclusions found in quartz and calcite minerals is between +6.57 to +13.9% wt%/NaCl equivalent, and +4.74 to +10.9 % wt%/NaCl equivalent. The homogenization temperature Th_{v-L} (°C) of the (LV) in quartz and calcite minerals is between +118 °C. and +192 °C and 111 °C and 167 °C.

3.3. Sulfur isotope

Sulfur isotopic values ($\delta^{34}S$) of two chalcopyrite samples from the mineralized quartz veins on which the fluid inclusion studies were conducted have a limited range between -1.58‰ and -2.86‰ (Table 4).

4. Discussion

4.1. Geochemistry of mineralized quartz and calcite veins

The depletion of HREE to LREE elements indicates the reducing conditions, low temperature and high pH of the mineralized hydrothermal fluid during the deposition of the mineralized quartz and calcite veins. The same REE and trace element patterns in the mineralized veins and volcanic host rocks indicates the same origin of these elements in two types of mineral veins with volcanic host rocks.

According to spider diagrams (Fig. 5a, b) and the depletion-enrichment (Fig. 6a, b) of trace elements, due to the alteration and leaching of the host rocks along the path of upwelling and mixing of magmatic-hydrothermal fluids derived from the host volcanic rocks with atmospheric fluids, copper and trace elements were leached from the host rocks and deposited along the fractures and faults in the host volcanic units in the form of calcite and quartz veins.

4.2. Origin, evolution and physicochemical properties of mineralizing fluid

According to the trend of salinity changes compared to the homogenization temperature, the density of effective fluids on the mineralization system is in the range of 0.99-1.13 g/cm³ (Fig. 9).

In homogenization temperature and salinity diagram (Fig. 10), fluid inclusions of the Fathabad are lied in the lower range of mixing of secondary magmatic fluids with atmospheric fluids, indicating that a high volume of meteoric fluids have diluted the secondary magmatic fluid. Therefore, the change in conditions caused by the mixing between different fluid sources (Wilkinson, 2001) has caused the deposition of copper, gold and other metal elements and magmatic sulfur in the quartz and calcite veins of Fath Abad (Fig. 10).

4. 3. Origin of sulfur

The values of $\delta^{34}\text{S}$ in the chalcopyrite samples in the mineralized quartz veins of the Fathabad deposit range from -1.58‰ and -2.86‰ (Table 4), indicating the direct effect of sulfur-rich fluids derived from the magmatic source (Chaussidon et al., 1989) similar to the magmatic origin of sulfur in hydrothermal deposits ($\delta^{34}\text{S}\sim 0$ ‰) (Ohmoto and Rye, 1979).

5. Conclusion

The host rock units of the Fathabad deposit include Eocene, calc-alkaline to shoshonite volcanic- pyroclastic units, which were formed in the subduction of the continental convergent margin tectonic setting. The same trend of the pattern of trace elements of quartz and calcite veins and host volcanic rocks indicates the same origin of these veins and host volcanic rocks. Sulfur isotope studies of chalcopyrite indicate the magmatic origin of sulfur and the predominance of reduced sulfur species in the form of H_2S in the

hydrothermal fluid. The geochemical results of quartz and calcite mineralized veins (Table 1, Fig. 5 and 6a, b) as well as the study of fluid inclusions in these veins (Table 3, Fig. 9) and the sulfur isotope of chalcopyrite ore in the quartz veins (Table 4) indicate the presence and reaction of reducing mineralized hydrothermal fluids with host rocks; and mixing of magmatic-hydrothermal fluids with meteoric fluids. During the migration, the mineralized fluid interacted with the host rock and leached REEs as well as metals from the host rock during the decrease of temperature and solubility of bisulfide complexes. Therefore, volcanic rocks are probably the origin of metal elements necessary for mineralization. As a result, based on geological studies, structural control of mineralization and alteration, geochemistry of mineralized veins and characteristics of mineralizing hydrothermal fluid, Fathabad deposit is a epithermal type of the hydrothermal vein copper deposit.

منشا و ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز در کانسار مس فتح‌آباد، جنوب خاور تربت حیدریه، استان خراسان رضوی

هانیه کبابی^۱، احمد کاظمی مهرنیا^۱، حمید ثمری^۲، پیمان افضل^۳ و نازنین ظاهری عبده‌وند^۱

^۱ گروه علوم زمین، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران

^۲ شرکت GRE، دنور، کلرادو، امریکا

^۳ گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

کانسار مس فتح‌آباد در استان خراسان رضوی، در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب‌خاور شهرستان تربت حیدریه و بخش میانی کمر بند آتشفشانی - نفوذی خواف - کاشمر بردسکن واقع شده است. کانه‌زایی رگه - رگچه‌ای متشکل از کانی‌های کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، کالکوسیت، بورنیت، کوولیت، مالاکیت و اکسیدهای آهن، به موازات گسل‌های فرعی منشعب شده از گسل اصلی درونه تشکیل شده است. در سامانه رگه‌ای محدوده فتح‌آباد، رگه‌های کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با دگرسانی پروپلیتیک در مرحله اولیه کانه‌زایی، رگه‌های کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با دگرسانی سریستی در مرحله اصلی کانه‌زایی و رگه‌های کوارتز، پیریت و کالکوپیریت همراه با دگرسانی‌های رسی و اکسید آهن و رگه‌های کلسیتی همراه با دگرسانی‌های سریستی، رسی و اکسید آهن در مرحله پسین کانه‌زایی شناسایی شدند. روند یکسان الگوی تغییرات عناصر نادر خاکی و کمیاب رگه‌های کانه‌دار و سنگ‌های آتشفشانی میزبان نشان‌دهنده منشا ماگمایی - گرمایی عناصر است. غنی‌شدگی عناصر کمیاب، غنی‌شدگی نسبت LREE/HREE، مقادیر مثبت Eu^* و مقادیر منفی Ce^* ، نشانگر شرایط احیایی و pH بالای سیال ماگمایی - گرمایی است. میانبارهای سیال با شوری (۴/۷۴ wt% NaCl equiv تا ۱۳/۹) و دمای پایین ($111^{\circ}C$ تا $192^{\circ}C$) نشانگر رقیق‌شدگی و اختلاط سیال ماگمایی - گرمایی با آب‌های جوی است. مقادیر $\delta^{34}S$ کانه کالکوپیریت ($-1/58$) تا $2/86$ - (% نشانگر منشا ماگمایی گوگرد است. سیال ماگمایی - گرمایی گوگرددار و غنی از فلز رقیق شده با آب‌های جوی موجب آبشویی عناصر کمیاب، نادر خاکی و مس و نهشت آن‌ها به صورت رگه - رگچه‌های کوارتزی - کلسیتی کانه‌دار شده است. مطالعات زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و ویژگی‌های سیال گرمایی کانه‌ساز رگه‌های کانه‌دار، نشانگر کانی‌سازی مس رگه‌ای اپی ترمال در کانسار فتح‌آباد است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسار مس نوع رگه‌ای

زمین‌شیمی

میانبارهای سیال

ایزوتوپ گوگرد

کانسار مس فتح‌آباد

کمر بند فلز زایی

خواف - کاشمر - بردسکن

۱- پیش‌نوشتار

کانسار فتح‌آباد در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب خاور تربت حیدریه، استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱- a و b). از نظر تقسیمات ساختاری، این کانسار در پهنه سبزواری و در بخش مرکزی کمر بند آتشفشانی - نفوذی خواف - کاشمر - بردسکن در شمال‌خاور ایران قرار دارد (شکل ۱- a و b). فعالیت‌های اکتشافی در کانسار فتح‌آباد شامل مطالعات زمین‌شناسی در مقیاس‌های محلی ۱:۱۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰، اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی، مجموع حفاری‌های انجام شده ۱۴ گمانه با بیشینه ژرفای ۷۰ متر و متراژ کل ۷۰۸ متر است. برپایه اکتشافات انجام شده و با روش‌های زمین‌آماری، منابع کانسنگ مس به میزان ۶۲۲۸۳۷ تن با عیار ۰/۴۲ درصد برآورد شد (کاظمی مهرنیا، ۱۳۹۵). در مطالعه حاضر، منشا، ماهیت و ویژگی‌های

فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌زا با استفاده از شواهد میانبارهای سیال و ایزوتوپ پایدار گوگرد در رگه‌های کوارتزی کانه‌دار و زمین‌شیمی رگه‌های کانه‌دار و مقایسه آن‌ها با زمین‌شیمی سنگ‌های میزبان آتشفشانی انجام شده است.

۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

استان خراسان واقع در بخشی از ریزقاره ایران مرکزی است، که توسط گسل‌های درونه - کلمرد و نهندان از خاور تا باختر به بلوک‌های طبرس، یزد و لوت تقسیم شده است (شکل ۱- a؛ آقائاتی، ۱۳۸۳). کمر بند آتشفشانی - نفوذی خواف - کاشمر - بردسکن بخش مهمی از زون ریزقاره ایران مرکزی را تشکیل داده که با طول

* نویسنده مسئول: احمد کاظمی مهرنیا؛ E-mail: Akmehrnia@yahoo.com

ماخذ تکاری:

کبابی، ه.، کاظمی مهرنیا، ا.، ثمری، ح.، افضل، ب. و ظاهری عبده‌وند، ن.، ۱۴۰۲، منشا و ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز در کانسار مس فتح‌آباد، جنوب خاور تربت حیدریه، استان خراسان رضوی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۲)، ۱۲۸، ۲۵-۴۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.346123.2004>

doi: 10.22071/gsj.2022.346123.2004

doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.2.3.2

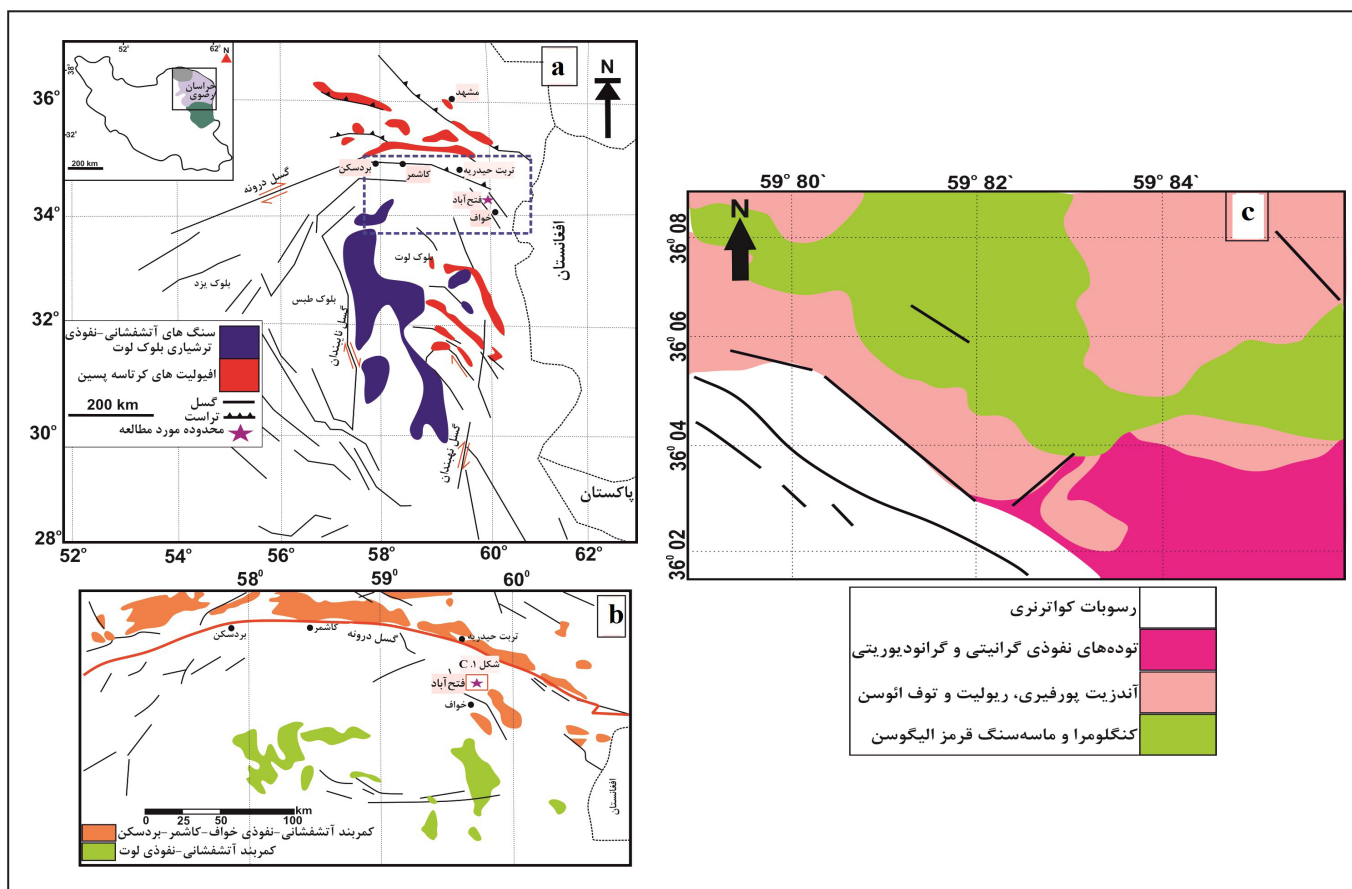
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



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

فلزایی ایران با پتانسیل بالای اکتشاف انواع ذخایر پورفیری، رگه‌ای، اسکارن و IOCG عناصر مس، طلا، نقره و آهن با میزبانی سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری شده است. تاکنون کانسارهای متنوعی در این کمربند توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده، که از این جمله می‌توان به کانسار مس-طلای نوع پورفیری تنورچه (کریم‌پور و ملک‌زاده‌شفارودی، ۱۳۸۵)، کانسار طلا-مس-اسپیکولاریت-مگنتیت شهرک (یوسفی‌سورانی و همکاران، ۱۳۸۷)، کانسار طلا-مس-اسپیکولاریت کوه زر (Karimpour et al., 2017)، کانسار مس رگه‌ای زاوه (بروزی‌نیت و همکاران، ۱۳۹۸)، کانسار مس-طلای نوع رگه‌ای نامق (تقدسی و ملک‌زاده‌شفارودی، ۱۳۹۷)، کانسار مس رگه‌ای رشیدی (جاویدی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۹)، کانسار مس رگه‌ای شریف‌آباد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹)، اشاره کرد.

بیش از ۳۵۰ کیلومتر و عرض ۱۵ تا ۸۰ کیلومتر با روند خاوری-باختری تا شمال باختر-جنوب خاور، بین زمین‌درز نئوتیس و کمان پشت قوسی سبزوار-البرز واقع شده است (شکل ۱- a و b؛ Alaminia et al., 2013). بررسی‌های پژوهشی و اکتشافی بر روی ماگماتیسیم و کانی‌سازی‌های خاور و شمال خاور ایران در کمربند خواف-کاشمر-بردسکن نشانگر چندین رویداد ماگمایی و نفوذ توده‌های گرانیتویدی و توف‌ها و گدازه‌های آتشفشانی اسیدی، حدواسط تا مافیک به سن پالئوسن تا ائوسن مرتبط با فرورانش حاشیه همگرای نوع آندی پوسته اقیانوسی-قاره‌ای در این کمربند است (Malekzadeh-Shafaroudi et al., 2013; Alaminia et al., 2013; Asiabanha and Foden, 2012; Golmohammadi et al., 2015). زمین‌ساختی و تنوع ماگمایی موجب تبدیل این کمربند به یکی از ایالت‌های مهم



شکل ۱- (a) نقشه کلی زمین‌شناسی شمال خاور ایران، جایگاه کانسار فتح‌آباد در استان خراسان رضوی و کمربند آتشفشانی-نفوذی و فلزایی خواف-کاشمر-بردسکن؛ (b و c) نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده فتح‌آباد، (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دولت‌آباد) (کاظمی‌مهرنیا، ۱۳۹۵)

Figure 1. a) General geological map of Northeast Iran, the location of Fathabad in Khorasan Razavi Province and the volcanic- Plutonic and metal belt of Khaf-Kashmar-Bardaskan; b,c) Simplified geological map of Fathabad (1:100000 Dolat Abad map, and 1:1000 map of Kazemi Mehrnia, 2016).

۳- زمین‌شناسی کانسار

مجموعه توسط واحدهای رسوبی الیگومیوسن (شکل ۲- b) و آبرفت‌های کواترنری پوشیده شده است. واحدهای رسوبی الیگومیوسن (شکل ۲- a) شامل کنگلومرای پلی‌میکتیک، ماسه‌سنگ، مارن و میان‌لایه‌هایی از آهک‌مارنی هستند، که به‌طور ناپیوسته با نهشته‌ها و پادگانه‌های آبرفتی و مخروطه‌افکنه‌ای کواترنز پوشیده شده‌اند. محدوده فتح‌آباد به علت اثر درزه‌ها و گسل‌های منشعب‌شده از گسل درونه از نظر ساختار زمین‌ساختی وضعیت پیچیده‌ای دارد. حضور گسل درونه به عنوان ویژگی ساختاری- زمین‌شناسی اصلی در شمال‌باختر محدوده فتح‌آباد، با امتداد 40NW و روند NW-SE، با ایجاد زون‌های برشی و گسله بزرگ، واحدهای آتشفشانی و

واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده کانسار فتح‌آباد شامل واحدهای آتشفشانی ائوسن، واحدهای رسوبی الیگوسن و توده‌های نفوذی گرانیتی ژوراسیک میانی تا میوسن هستند (شکل‌های ۱- c و ۲- a). توالی‌های آتشفشانی ائوسن میزبان کانی‌سازی مس در محدوده فتح‌آباد شامل واحد آندزیت پورفیری خاکستری تیره تا روشن با بین لایه‌های توف ماسه‌ای هستند. این واحد کانه‌دار به‌علت نزدیکی با گسل درونه به‌شدت برشی شده و تحت‌تأثیر دگرسانی‌های آرژلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی-سریستیک قرار گرفته‌اند. این واحدها توسط توده‌های نفوذی گرانیتی-گرانودیوریتی و چندین دایک میکرودیوریتی (شکل ۲- a و b) قطع شده‌اند. کل این

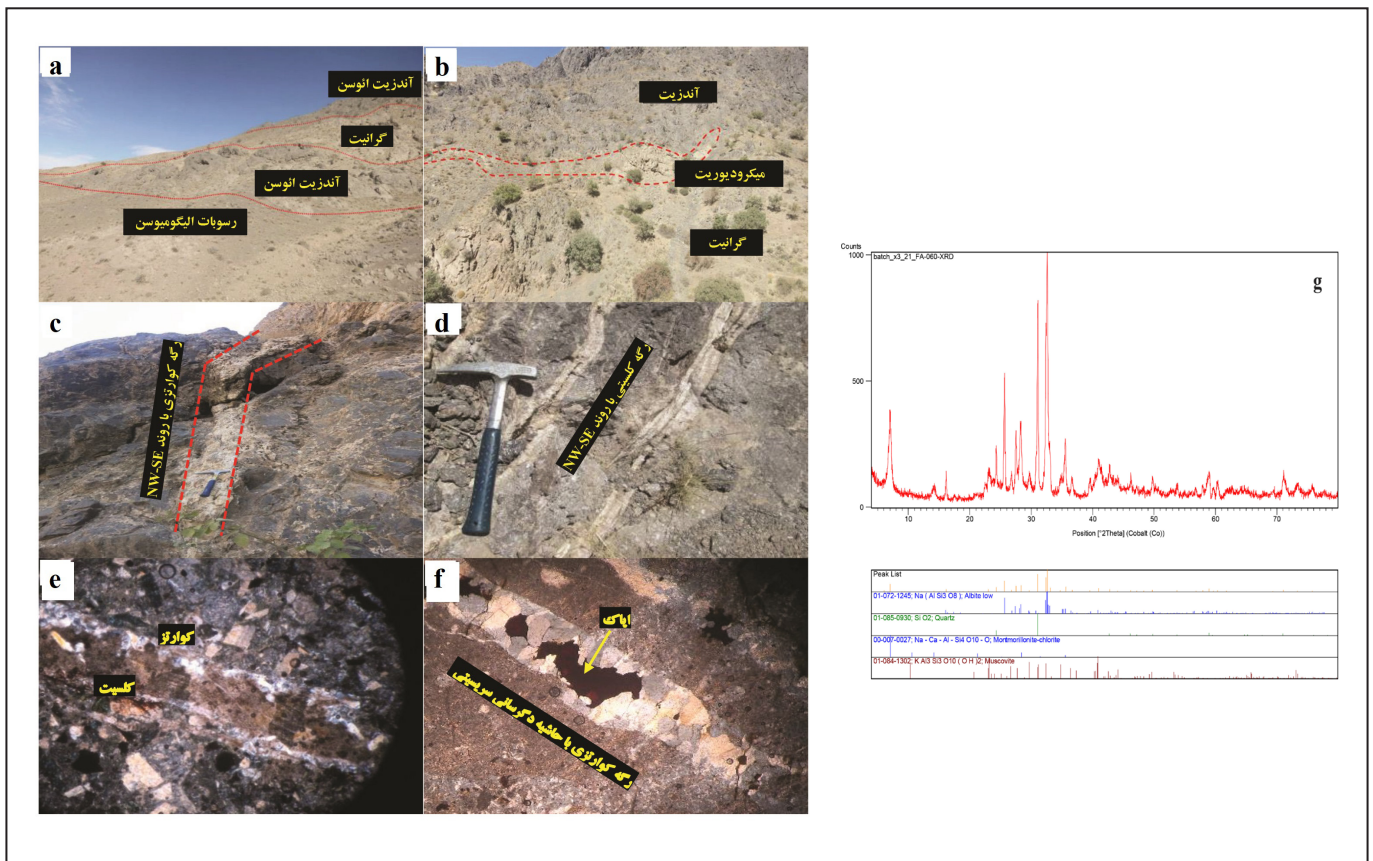
پراکنده و لکه‌ای همراه با دگرسانی پروپلیتیک در آندزیت پورفیری رخ داده است. نتایج حاصل از طیف سنج XRD نشان داد که دگرسانی آرژلیک اغلب از کانی‌های رسی ایلیت، کانولینیت و مونت‌موریلونیت تشکیل شده‌اند. دگرسانی چیره همراه با کانی‌سازی، سیلیسی شدن است که به صورت رگچه‌های کوارتزی با روند NE-SW در امتداد زون‌های شکستگی و برشی شده دیده می‌شوند (شکل ۲- c). کوارتز به صورت رگه‌ای با حاشیه سریستی و کلریتی شده (شکل ۲- d، c) دیده شده است. همچنین دگرسانی کربناتی غالباً به صورت رگچه‌ای است (شکل ۲- d و e). دگرسانی سریستی در بیشتر موارد با سیلیسی شدن و حضور رگه‌های کوارتزی کانه‌دار همراه است (شکل ۲- f). این دگرسانی به مقدار کم بلورهای آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز را تحت تاثیر قرار داده و با کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) نیز همراه است (شکل ۲- d). نتایج حاصل از XRD نشان می‌دهد در دگرسانی سریستی مجموعه کانیایی سریست، کلریت، ایلیت و مقدار کمی کوارتز حضور دارند. دگرسانی اکسید و هیدروکسید آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) به طور گسترده در محدوده با رنگ زرد آجری تا زرد مایل به نارنجی و قرمز متمایل به قهوه‌ای قابل تشخیص است.

رگه‌های کوارتزی با ستبراهای متغیر چند سانتی‌متر تا بیشینه یک متر و طول ۵۰ تا ۲۰۰ متر با رخنمون‌های ناپیوسته قابل تعقیب هستند (شکل ۲- c). در مواردی بلورهای کلسیت بلورین همراه با رگه‌های کوارتزی نیز قابل مشاهده است (شکل ۲- d).

رسوبی را به شدت خرد و برشی کرده است. حرکات گسل‌های راست‌گرد، کوتاه و ناپیوسته با روند NW-SE، مشتق شده از گسل درونه، با ایجاد سیستم‌های مقاطع شرایط مناسبی را برای ایجاد رگه‌های کوارتز کانه‌دار در واحدهای آتشفشانی آندزیتی فراهم کرده است.

۴- دگرسانی و کانه‌زایی

بر پایه مطالعات صحرایی و میکروسکوپی مهم‌ترین دگرسانی‌ها در محدوده مورد مطالعه شامل دگرسانی‌های سیلیسی-سریستی، آرژلیک، کربناتی، پروپلیتیک و اکسید و هیدروکسیدهای آهن هستند. گسترش دگرسانی‌ها اغلب محدود به زون‌های کانه‌دار واحدهای آندزیت پورفیری ائوسن است، و از روند شکستگی و گسل‌های فرعی (شکل ۲- c و d) منشعب شده از گسل درونه تبعیت می‌کنند. بر پایه مطالعه مقاطع نازک و طیف سنج XRD کانی‌های کوارتز، کلسیت، مونت‌موریلونیت-کلریت، سریست، موسکوویت، ایلیت، کانولینیت و آلپیت کانی‌های اصلی دگرسانی شناسایی شده هستند (شکل ۲- g) سنگ‌های آتشفشانی با تبعیت از گسل‌های با روند NE-SW به طور گسترده و نامنظم دچار دگرسانی پروپلیتیک شده‌اند (شکل ۲- c). دگرسانی پروپلیتیک اغلب همراه با دگرسانی‌های آرژلیک و گاهی در حاشیه رگه‌های سیلیسی کانه‌دار به صورت نوارهای باریک با پهنای چند سانتی‌متر دیده می‌شود (شکل ۲- c). کانی‌سازی مس به صورت

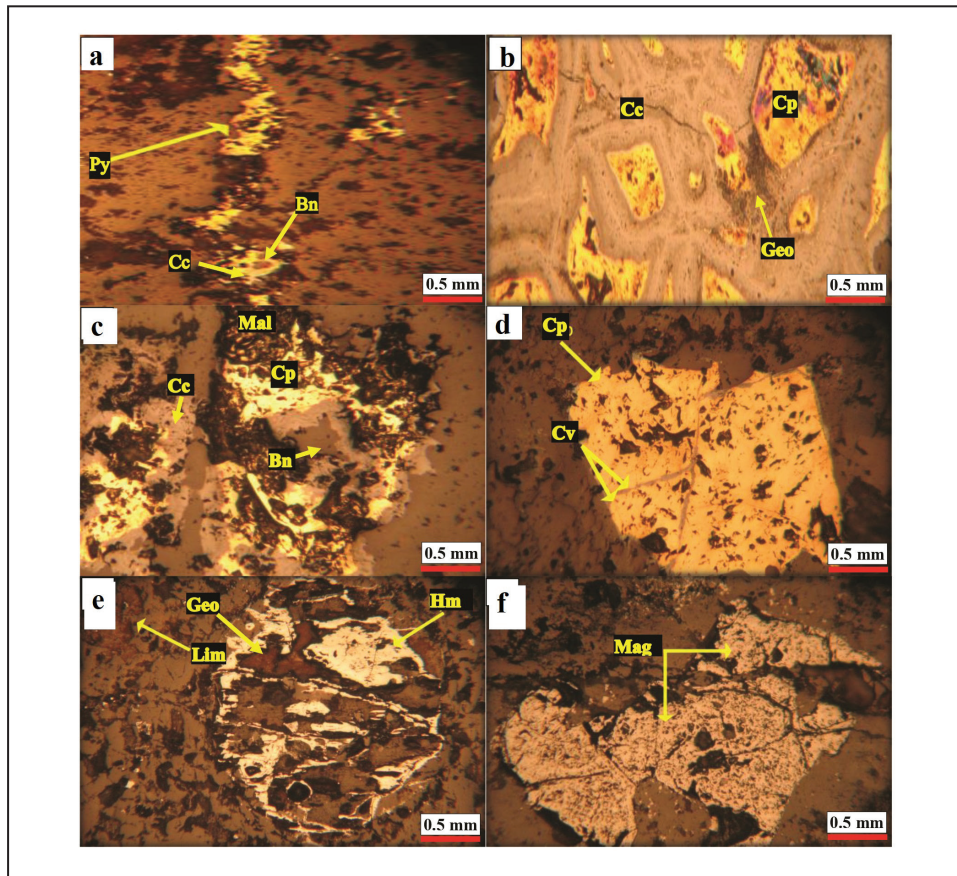


شکل ۲- تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی و میکروسکوپی رگه‌های کانه‌دار محدوده فتح‌آباد: (a) سکانس چینه‌ای واحدهای رخنمون‌یافته در محدوده فتح‌آباد؛ (b) واحد میکرودیوریتی در حدفاصل گرانیت و آندزیت ائوسن؛ (c) نمای از رگه کوارتزی دارای دگرسانی پروپلیتیک همراه با کانی‌های سولفیدی و اکسیدی؛ (d) رگه کلسیتی با حاشیه دگرسانی آرژلیک و سریستی؛ (e) رگچه کوارتز-کلسیت با حاشیه آرژلیک و سریستی که کوارتز در دیواره و کلسیت در وسط رگه متبلور شده، تصویر در نور (XPL)؛ (f) رگه کوارتزی کانه‌دار با حاشیه دگرسانی سریستی، تصویر در نور (XPL)؛ (g) طیف سنج XRD نشانگر حضور آلپیت، مونت‌موریلونیت و موسکوویت است.

Figure 2. Field images of rock and microscopic units of vein-style mineral deposits in Fathabad. a) stratigraphic sequence of exposed units in Fathabad area; b) microdiorite unit between granite and Eocene andesite; c) quartz vein with propylitic alteration along with sulfide and oxide ore elements; d) calcite vein with argillic and sericite alteration margin; e) quartz-calcite vein with argillic and sericite margin, where quartz is crystallized in the wall and calcite in the middle of the vein, (XPL); f) mineralized quartz vein with sericite alteration margin, (XPL); g) XRD indicates the presence of albite, montmorillonite and muscovite.

ثانویه در محدوده هستند؛ که از تبدیل کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت ایجاد شده‌اند. بر اساس مطالعات صحرایی و کانی‌شناسی، سه مرحله کانی‌سازی درون‌زاد در سامانه رگه‌ای فتح‌آباد شناسایی شد (شکل ۴).
مرحله اولیه مطابق با کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت (شکل ۳- a و c) در رگه‌های کوارتزی و مگنتیت در زمینه سنگ (شکل ۳- f) و تشکیل کانی‌های دگرسانی کلریت و اپیدوت (دگرسانی پروپلیتیکی) در سنگ‌های میزبان است. در مرحله دوم کانی‌سازی درون‌زاد یا مرحله اصلی، ادامه تشکیل کوارتز منجر به تشکیل رگه- رگه‌های ستر کوارتز، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت همراه با کانی‌های دگرسانی کلسیت، کلریت، اپیدوت، سربیت- ایلیت (دگرسانی سربیتی- سلیسی و کربناته) است. در مرحله پسین درون‌زاد، همچنان رگه- رگه‌های نازک کوارتز و کلسیت و مقادیر کمی کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت به همراه کانی‌های رسی (کائولینیت، مونتوریلونیت، سربیت- ایلیت)، کلریت و اپیدوت (دگرسانی آرژلیک، سلیسی- سربیتی) تشکیل شده‌اند. در مرحله برون‌زاد، اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) و دگرسانی اکسید آهن از آبشویی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی تشکیل شده‌اند (شکل ۴).

در محدوده مورد مطالعه کانی‌شناسی ساده شامل کوارتز، کلسیت، پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت و محصولات دگرسانی برون‌زاد آنها شامل کالکوسیت، کوولیت، بورنیت، مالاکیت و اکسید و هیدروکسیدهای آهن هستند (شکل ۴). به طور کلی، بر پایه مطالعات کانه‌شناسی، کانه‌زایی در محدوده فتح‌آباد را می‌توان به دو نوع درون‌زاد و برون‌زاد تقسیم‌بندی کرد. کانی‌های درون‌زاد شامل پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت و کانه‌های برون‌زاد شامل بورنیت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) هستند (شکل ۴). کوارتز و کلسیت به شکل رگچه‌ای مهم‌ترین کانی‌های باطله همراه با کانی‌سازی هستند (شکل ۲- c و f). پیریت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار به صورت پراکنده، پرکننده فضاهای خالی و رگه- رگچه‌ای همراه دیگر کانی‌های سولفیدی مس دیده می‌شود (شکل ۳- a). کالکوپیریت در اثر فرایند برون‌زاد اغلب از کناره به کانی‌های کالکوسیت (شکل ۳- b و c)، کوولیت (شکل ۳- d)، بورنیت (شکل ۳- c)، مالاکیت (شکل ۳- c) و اکسید و هیدروکسید آهن (شکل ۳- b و e) تبدیل شده است. بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار مگنتیت (شکل ۳- f)، در برخی موارد به ههماتیت، گوتیت و لیمونیت تبدیل شده‌اند (شکل ۳- b و e). مالاکیت و اکسید و هیدروکسیدهای آهن ثانویه شامل گوتیت ههماتیت و لیمونیت فراوان‌ترین کانی



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌سازی در کانسار فتح‌آباد. (a) رگچه پیریت که به کالکوسیت و بورنیت تبدیل شده؛ (b) دانه‌های شکل‌دار کالکوپیریت که از میانه و حاشیه به کالکوسیت و اکسید و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند؛ (c) دانه‌های نیمه‌شکل‌دار کالکوپیریت که از حاشیه به کالکوسیت و بورنیت تبدیل شده‌اند؛ (d) کانه شکل‌دار کالکوپیریت که از حاشیه و از درون به کوولیت تبدیل شده؛ (e) قالبی از کانه مگنتیت که به ههماتیت، لیمونیت و گوتیت دگرسان شده‌است؛ (f) بلور شکل‌دار مگنتیت. همه تصاویر در نور PPL گرفته شده‌اند. حروف اختصاری نشانگر کانی: Bn=بورنیت، Cc=کالکوسیت، Cp=کالکوپیریت، Cv=چولیت، Geo=گوتیت، Hm=هماتیت، Lim=لیمونیت، Mag=مگنتیت، Py=پیریت.

Figure 3. Microscopic images of mineralization in Fathabad deposit. a) Pyrite veins that have been transformed into chalcocite and bornite; b) Euhedral chalcocopyrite grains are replaced by chalcocite and iron oxides and hydroxides from the middle and edge; c) Subhedral grains of chalcocopyrite that have transformed to chalcocite and bornite from the margin; d) Euhedral chalcocopyrite that has turned into caveolite from the edge and inside; e) A form of magnetite mineral that has changed to hematite, limonite and goethite; f) Euhedral magnetite crystal. All images taken in PPL. Bn=bornite, Cc=chalcocite, Cp=chalcopyrite, Cv=cholate, Geo=goethite, Hm=hematite, Lim=limonite, Mag=magnetite, Py=pyrite.

Minerals Stages	Hypogene			Supergene
	Early	Main	Late	
Chalcopyrite	████████████████████	████████████████████	-----	
Chalcocite			████████████████████	
Covelite			████████████████████	
Pyrite	████████████████████	████████████████████		
Bornite				████████████████████
Galena		████████████████████		
Magnetite	████████████████████	████████████████████		
Hematite				████████████████████
Limonite				████████████████████
Goethite				████████████████████
Malachite				████████████████████
Pyrolusit		████████████████████	-----	
Quartz	████████████████████	████████████████████	-----	
Chlorite		████████████████████	-----	
Epidote		████████████████████	-----	
Calcite		████████████████████	-----	
Illite- Sericite		████████████████████	-----	
Kaolonite		-----	-----	
Montmorilonite		-----	-----	

شکل ۴- توالی پاراژنری کانی‌سازی و کانی‌های دگرسانی در سیستم رگه‌ای فتح‌آباد.

Figure 4. Paragenetic sequence of mineralization and alteration minerals in Fathabad vein system

۵- روش پژوهش ۵-۱- نمونه‌برداری

این پژوهش بر مبنای مشاهدات صحرائی و نمونه‌برداری از ژرفاهای مختلف گمانه‌های حفاری رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار برای مطالعات آزمایشگاهی استوار است. به‌منظور شناخت کانه‌شناسی و دگرسانی سنگ میزبان، تعداد ۱۲ مقطع صیقلی و ۲۱ مقطع نازک از واحدهای سنگی مطالعه شد. همچنین، تعداد سه نمونه از رگه کوارتز کانه‌دار (BHFA-B12; BHFA-B11; BHFA-B35) و یک نمونه از رگه کلسیت (FA-63) مربوط به گمانه‌های حفاری برای تجزیه عنصری به‌روش ICP-OES (جدول ۱)، چهار مقطع دوبر صیقلی از رگه‌های کوارتز (BHFA-B12; BHFA-B11; BHFA-B35) و یک نمونه از رگه کلسیت (FA-63) برای مطالعه میانبراهای سیال (جدول ۳) انتخاب شدند. همچنین، تعداد دو نمونه از رگه کوارتز (BHFA-B12; BHFA-B35) (کوارتز+پیریت+کالکوپیریت+ کالکوسیت همراه با دگرسانی سیلیسی-سرسیستی) برای آنالیز ایزوتوپ گوگرد در

کانه کالکوپیریت (جدول ۴) انتخاب شدند.

۶- زمین‌شیمی رگه‌های کانه‌دار

برای بررسی‌های زمین‌شیمی رگه‌های کانه‌دار تعداد سه نمونه از رگه کوارتز کانه‌دار (BHFA-B12; BHFA-B1; BHFA-B35) و یک نمونه از رگه کلسیتی (FA-63) برداشت شد؛ و پس از خردایش و نرمایش به روش طیف سنجی نشر نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی کرج، استان البرز تجزیه شدند. نتایج تجزیه زمین‌شیمی سه نمونه از رگه‌های کوارتز و یک نمونه از رگه کلسیت در جدول ۱ آورده شده‌است. همچنین، برخی نسبت‌های عنصری عناصر نادر خاکی REE سنگ‌های میزبان در جدول ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱- نتایج تجزیه زمین شیمی عناصر کمیاب و نادر خاکی نمونه‌های کانه‌دار رگه‌های کوارتز و رگه کلسیت محدوده فتح‌آباد. واحد عناصر اصلی برحسب درصد و عناصر کمیاب و نادر بر حسب گرم در تن (ppm) هستند.

Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for samples of quartz and calcite veins in Fath Abad. The major elements are in percentage and rare elements are in grams per ton (ppm).

Elements	BHFA-B11	BHFA-B35	BHFA-B12	FA-63
	Quartz Vein			Calcite Vein
Ti	1021	296	4526	<10
Al	2.24	0.71	5.31	0.08
Fe	2.69	2.2	1.87	0.35
Mn	3660	2440	1343	5423
Mg	5094	917	2721	658
Ca	23.91	14.74	6.58	34.63
Na	6539	294	3540	175
K	8230	2799	33529	147
P	581	311	1539	96
S	6967	13951	6345	266
Ti	1021	296	4526	10
Sc	3.06	3.13	2.91	3.51
V	1.4	0.6	1	2
Cr	24	46	172	11
Ni	11	11	18	3
Cu	10200	20600	6474	911
Zn	22	18	10	1
Rb	11	1	137	1
Sr	453	150	127	176
Y	28.1	13.5	11.2	53.4
Zr	7	11	80	5
Nb	7.8	5.9	26.4	2.5
Cs	1.1	0.9	5.1	0.5
Ba	11300	24	282	9
Hf	0.5	0.5	2.11	0.5
Ta	0.91	0.42	2.78	0.47
Pb	1	3	5	3
Th	2.25	0.68	10.79	0.6
U	28.1	13.5	11.2	53.4
Mo	0.4	11.5	5.2	0.1
La	59	54	54	34
Ce	133	115	99	76
Pr	19.05	17.61	13.7	13.23
Nd	81.8	73	51.6	62.5
Sm	18.97	14.59	9.39	17.88
Eu	12.6	8.28	4.69	9.4
Gd	14.67	10.73	6.78	18.34
Tb	1.58	1.01	0.68	2.32
Dy	8.19	4.66	3.44	12.97
Er	2.98	1.31	1.45	4.75
Tm	0.3	0.1	0.15	0.46
Yb	1.4	0.6	1	2
Lu	0.17	0.1	0.12	0.27
ΣREE	353.7	300.9	246	254.1
Eu*	2.23	1.94	1.72	1.57
Ce*	0.955	0.908	0.846	0.872
(La/Yb) _{CN}	28.6	61.1	36.7	11.5
(Ce/Yb) _{CN}	25	50.3	26	9.98

جدول ۲- نسبت‌های عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (McDonough and Sun, 1995) نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی محدوده فتح‌آباد.

Table 2. Ratios of rare earth elements normalized with chondrite (McDonough and Sun, 1995) of volcanic rock samples of Fathabad.

Rock	Rhyolite	Rhyolite	Rhyolite	Trachyte	Trachyandesite	Trachyandesite	Trachybasalt
Eu*	0.19	0.28	0.49	0.6	0.76	0.93	1.06
Ce*	0.841	1.038	1.009	1.064	1.209	1.041	1.248
(La/Yb) _{CN}	22	11.3	35.6	6.65	7.91	16.9	3.78
(Ce/Yb) _{CN}	14.4	9.75	29.8	5.96	8.62	14.9	4.54

Rock	Trachybasalt	Trachybasalt	Basaltic-trachyandesite	Basaltic-trachyandesite	Basaltic-trachyandesite
Eu*	0.97	0.75	0.72	0.95	1.33
Ce*	1.111	0.905	0.925	1.006	0.99
(La/Yb) _{CN}	8.28	29.6	27.8	18.9	22.5
(Ce/Yb) _{CN}	8.01	21.5	20.9	15.8	18.6

۷- میانبارهای سیال

دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS-ISOPRIME 100) شد. جهت اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ نسبت شدت مولکولی جرم‌های ۶۶ به ۶۴ سنجیده و گزارش شد. همچنین، استانداردهای IAEA-S-4 و IAEA-SO-6 جهت کالیبراسیون سیستم در این آنالیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقادیر ایزوتوپی گوگرد $\delta^{34}\text{S}$ اندازه‌گیری شده بر مبنای VCDT محاسبه شد؛ و نتایج بهنجار شده با دقت اندازه‌گیری $\pm 0.2\%$ در هزار در جدول ۴ آورده شدند. مقادیر $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ سیال در تعادل با کالکوپیریت‌ها با استفاده از مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانه‌های کالکوپیریت و معادله لی و لیو (Lia and Liu (2006) و میانگین دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال رگه‌های کوارتزی (153°C) (جدول ۴) محاسبه شد.

۹- نتایج

۹-۱- داده‌های زمین‌شیمی رگه‌های کوارتز و رگه کلسیت کانه‌دار

در این بخش ویژگی‌های زمین‌شیمی و غنی‌شدگی و تهی‌شدگی‌های عصری رگه‌های کانه‌دار و مقایسه با سنگ‌های میزبان کانسار فتح‌آباد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجزیه زمین‌شیمی و داده‌های عناصر نادر خاکی و کمیاب نمونه‌های رگه‌های کوارتزی و کلسیتی کانسار فتح‌آباد (جدول ۱) بر حسب کندریت (McDonough and Sun, 1995) بهنجار شده و نمودارهای عنکبوتی آن‌ها در مقایسه با داده‌های زمین‌شیمی سنگ‌های میزبان آتشفشانی رسم شد (شکل ۵- a و b). در ادامه، برای تعبیر و تفسیر رفتار عناصر نادر خاکی در این نمونه‌ها، مقادیر نسبت‌های $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{CN}}$ و $\text{Ce}^* \cdot \text{Eu}^* \cdot (\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}}$ محاسبه شدند (جدول‌های ۱ و ۳).

۹-۲- الگوی عناصر نادر خاکی و کمیاب در بخش‌های کانه‌دار

الگوی توزیع عناصر نادر خاکی نمونه‌های رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار پس از بهنجار شدن با کندریت (McDonough and Sun, 1995) در نمودار عنکبوتی (شکل ۵- a) رسم شده‌اند. بر پایه نمودار عنکبوتی (شکل ۵- a) برای رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار، الگوی REE در بخش‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان شباهت به نسبت خوبی را نشان می‌دهند (به جز عناصر Ho, Tm, Yb)، با این تفاوت که بخش‌های کانه‌دار تمرکزهای بیشتری از عناصر LREE نشان می‌دهند. میزان کل

میانبارهای سیال در ۳ مقطع دوبرصیقل از کوارتز (BHFA-B12; BHFA-B1) و ۱ مقطع دوبرصیقل از کلسیت (FA-63) با ستبرای تقریبی ۱۰۰ میکرون (جدول ۳) دارای کانه‌زایی سولفیدی به‌منظور داماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری بررسی شدند. اندازه‌گیری متغیرهای دمایی در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران به کمک استیج THMS600 گرم‌کننده و منجمدکننده با مدل Linkam که بر روی میکروسکوپ ZEISS-Axioplan2 نصب است، صورت گرفت. دامنه حرارتی دستگاه بین ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، این دستگاه مجهز به دو کنترل گر، گرمایش (TP94) و سرمایش (LNP)؛ مخزن ازت (جهت پمپ نیتروژن برای انجماد) و مخزن آب (جهت خنک کردن دستگاه در دمای بالا) است. کالیبراسیون استیج در گرمایش با دقت $\pm 0.6\%$ درجه بوده که با نترات سزیم (Cesium nitrate) و با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه صورت پذیرفت و در انجماد با دقت $\pm 0.2\%$ درجه و با ماده استاندارد ان-هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. مقدار شوری طبق معادله بودنار (Bodnar (1993) در سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ و مقدار چگالی میانبارهای سیال با استفاده از نرم‌افزار FLINCOR و رابطه براون و لامب (Brown and Lamb (1989) محاسبه شد.

۸- ایزوتوپ گوگرد

تعداد دو نمونه کالکوپیریت از رگه‌های کوارتز کانه‌دار (BHFA-B12; BHFA-B35) (جدول ۴) که بر روی آن‌ها مطالعه زمین‌شیمی و میانبارهای سیال انجام شده، برای مطالعه ایزوتوپ گوگرد در آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار مرکز اراک، استان مرکزی مورد تجزیه قرار گرفتند. برای جدایش کالکوپیریت، نمونه‌های کوارتزی در هاون چینی به اندازه ۲۰ مش خردایش شده و با الک کردن، قطعات درشت جدا شد. پس از خردایش نمونه‌ها و تبدیل آن‌ها به یک پودر همگن، نمونه توسط دستگاه آنالیز عنصری در دمای بالا در حضور اکسیژن اضافی مورد احتراق قرار گرفته و گوگرد موجود در آن تبدیل به گاز SO_2 می‌شود. این گاز پس از طی مراحل خالص‌سازی از دیگر گازهای همراه جدا شده و از طریق سیستم جریان مداوم به‌همراه گاز هلیم به‌عنوان گاز حامل وارد

عناصر Ba و Pb، U، Nd، Sr، Tm، Zr، Nb، P، Th، Ti، Hf هستند، که نشانگر منشا گرفتن رگه‌های کانه‌دار از سنگ‌های آتشفشانی می‌باشد.

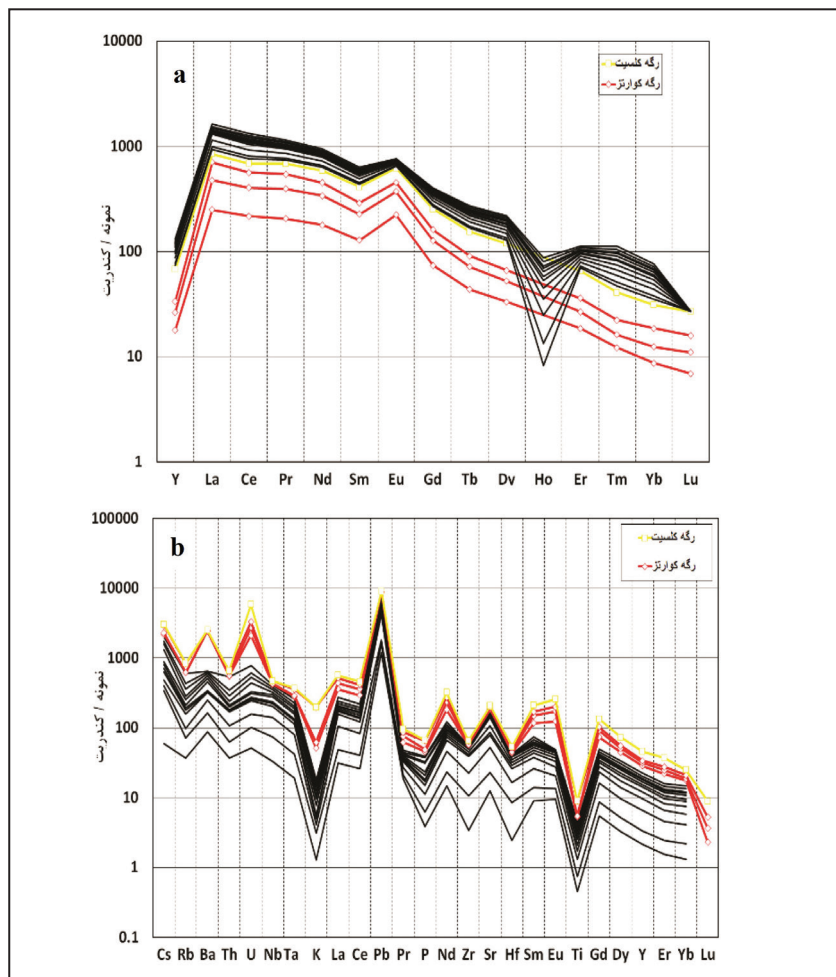
۳-۹- تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب و نادر خاکی در رگه‌های کانه‌دار

برای بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی کانه‌زایی، داده‌های مربوط به نمونه‌های رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار بر میانگین داده‌های سنگ‌های آتشفشانی می‌باشد. در شکل ۶- a و b نشان داده شده‌اند. بررسی الگوی عناصر کمیاب در رگه‌های کوارتز کانه‌دار بهنجار شده با سنگ‌های آتشفشانی (شکل ۶- a) نشان می‌دهد که در رگه‌های کوارتز کانه‌دار مقدار متفاوت تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب دیده می‌شود؛ ولی به‌طور کلی، رگه‌های کوارتز کانه‌دار از عناصر Cu، Mo، Rb، Cs، Ba، Mn، Y غنی و از عناصر Sn، V، Nb، Zn، Pb، Sc، Sr، Ni تهی شده‌اند. رگه کلسیتی در همه عناصر تهی‌شدگی نشان‌دهنده به جز عناصر Cu، Mo، Y، Sn که غنی شده‌اند (شکل ۶- b) و b) بنابراین، همان‌گونه که در (شکل ۶- a) دیده می‌شود، مقایسه غلظت عناصر کمیاب در بخش‌های کانه‌دار نشان‌دهنده غنی‌شدگی عناصر Cu، Mn، Y و تهی‌شدگی عناصر V، Ni، Zn، Pb، Sr، Sc است (شکل ۶- b). همچنین، مقایسه غلظت عناصر نادر خاکی در بخش‌های کانه‌دار با میانگین سنگ‌های آتشفشانی محدوده فتح‌آباد نشان‌دهنده غنی‌شدگی این رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار از همه عناصر REE به جز Lu و Ho است (شکل ۶- a).

عناصر نادر خاکی (ΣREE) در رگه‌های کانه‌دار کوارتزی (ΣREE=۲۴۶-۳۵۴) و کلسیتی (ΣREE =۲۵۴) بسیار بیشتر از مقادیر ΣREE سنگ‌های آتشفشانی می‌باشد (ΣREE =۲۵-۱۶۹) است.

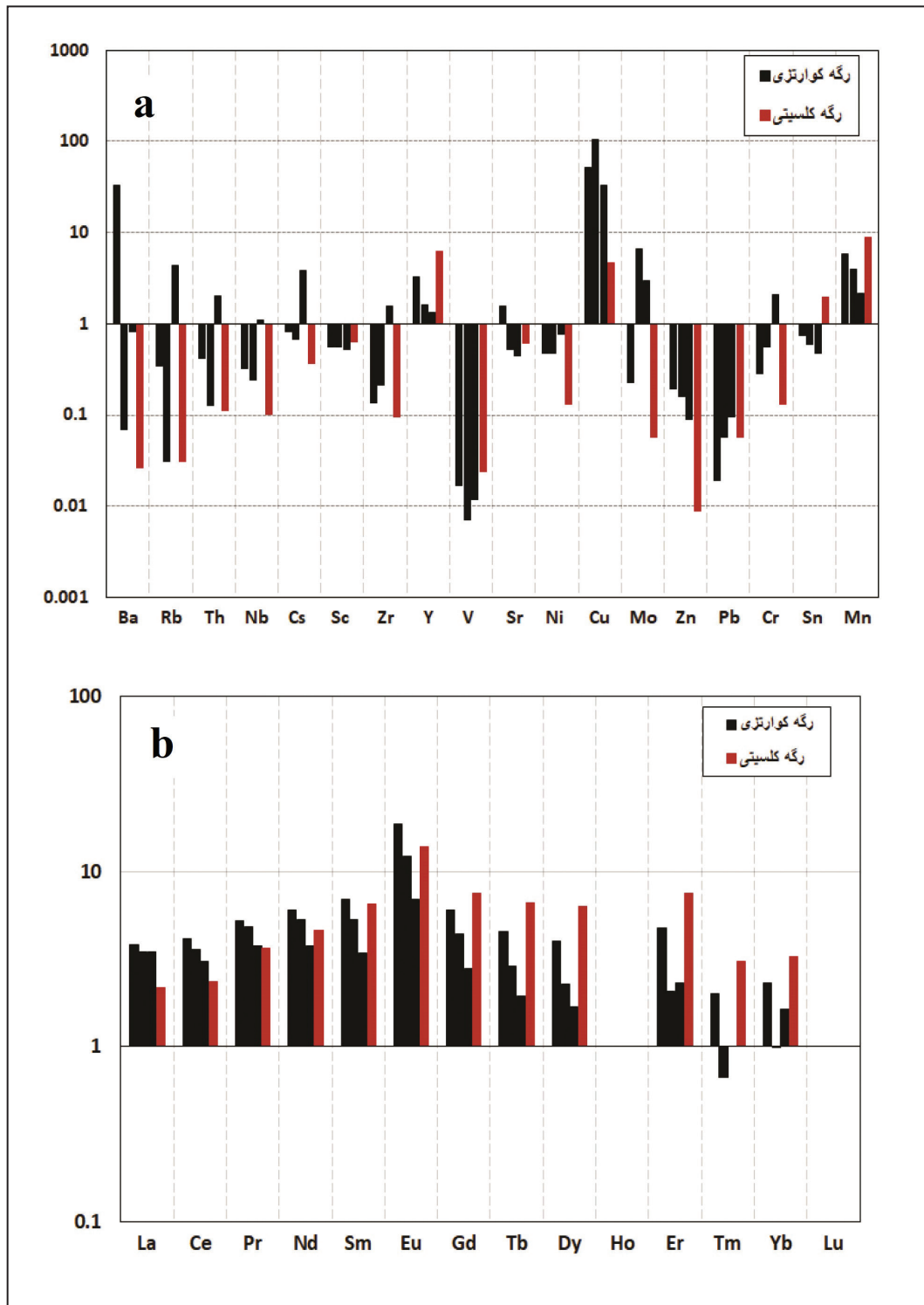
الگوی تغییرات عناصر نادر خاکی در نمونه‌های کوارتزی و کلسیتی کانه‌دار کانسار فتح‌آباد بهنجار شده با کندریت (MacDonough and Sun, 1995) دارای شیب منفی به نسبت زیاد همراه با مقادیر نسبت‌های $(Ce/Yb)_{CN} = ۵۰/۳-۲۵$ و $(La/Yb)_{CN} = ۳۶/۷-۶۱/۱$ در نمونه‌های کوارتزی و کلسیتی است، که نشان از غنی‌شدگی بیشتر LREEها نسبت به HREEهاست.

رگه‌های کوارتزی و کلسیتی دارای مقادیر مثبت Eu^* ($Eu^*_{Calcite} = ۱/۵۷$) و $(Eu^*_{Quartz} = ۲/۲۳-۱/۷۲$) و مقادیر منفی Ce^* ($Ce^*_{Quartz} = ۰/۹۰۵-۰/۹۰۳$ ؛ $\sim ۰/۸۴۶$) و $(Ce^*_{Calcite} = ۰/۸۷۲)$ هستند (جدول ۱). همچنین، نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب (شکل ۵- b) غنی‌شدگی عناصر Nd، Sm، Gd، La و تهی‌شدگی عنصر Ce در رگه‌های کوارتزی و کلسیتی را تایید می‌کند. نمونه‌های سنگ می‌باشد کانسار فتح‌آباد به‌طور میانگین دارای نبود تا مقادیر منفی بی‌هنجاری Ce^* ($Ce^* = ۱/۲۵-۰/۸۴۴-۱/۰۳$) و نبود تا مقادیر منفی بی‌هنجاری Eu^* ($Eu^* = ۱/۳۳-۰/۱۹$) (جدول ۲) هستند. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با مقادیر کندریت (MacDonough and Sun, 1995) (شکل ۵- b) رگه‌های کوارتزی و کلسیتی مشابه با سنگ‌های آتشفشانی مربوط به پهنه فرورانش محدوده فتح‌آباد، دارای غنی‌شدگی



شکل ۵- a) الگوهای عناصر نادر خاکی و b) کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت (MacDonough and Sun, 1995) رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار در مقایسه با سنگ‌های آتشفشانی.

Figure 5. a) Rare earth element patterns; b) Chondrite-normalized elements (MacDonough and Sun, 1995) of mineralized quartz and calcite veins compared to volcanic rocks.



شکل ۶- (a) نمودار عناصر نادر خاکی؛ (b) نمودار عناصر کمیاب در رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار کانسار فتح‌آباد که نسبت به میانگین مقادیر این عناصر در سنگ‌های میزبان آتشفشانی بهنجار شده‌اند.

Figure 6. a) Rare earth element graph; b) Trace elements in quartz and mineralized calcite veins of Fathabad deposit, which are normalized to the average values of these elements in volcanic host rocks.

۹-۴- میانبراهای سیال

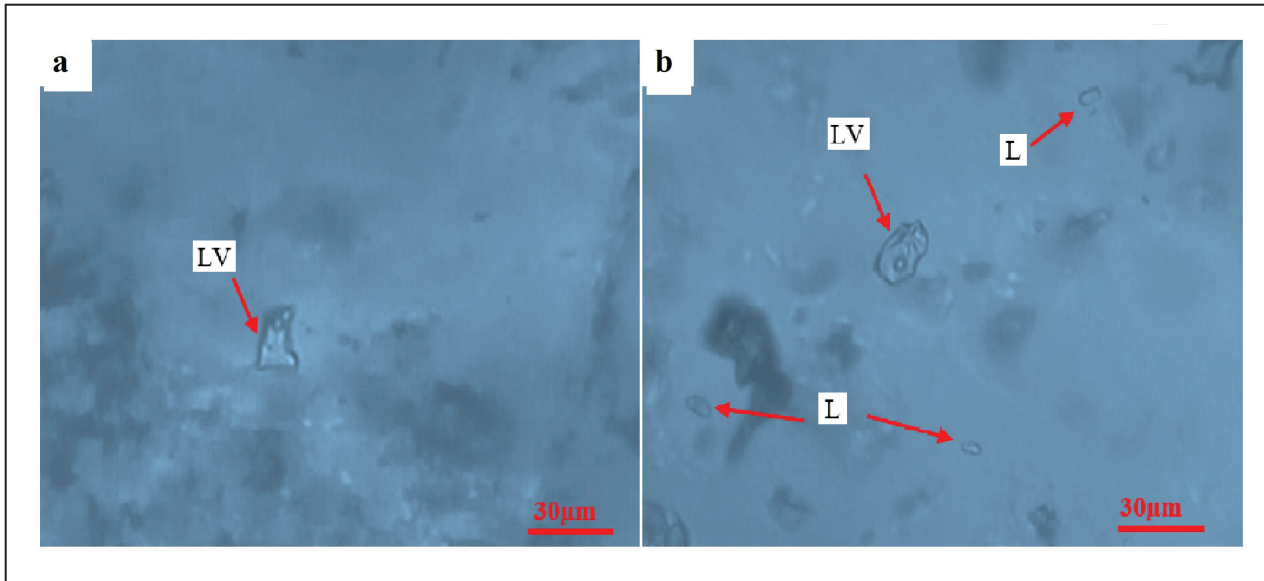
نخستین دمای ذوب یخ (T_{fm} °C) در میانبراهای سیال موجود در کانی کوارتز بین $41^{\circ}C$ تا $53^{\circ}C$ و در کانی کلسیت بین $41^{\circ}C$ تا $43^{\circ}C$ است (جدول ۳) که پایین‌تر از نخستین دمای ذوب یخ ($T_{fm} = -20/8^{\circ}C$) سیستم دوتایی $NaCl-H_2O$ و شاهدهی بر حضور نمک‌های $CaCl_2 \pm FeCl_2 \pm MgCl_2$ در سیال کانه‌ساز است. دمای نهایی ذوب T_{mice} (°C) در میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کوارتز بین $14/2^{\circ}C$ و $24/7^{\circ}C$ (جدول ۳) و در میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کلسیت بین $20/4^{\circ}C$ تا $22^{\circ}C$ است (جدول ۳). مقدار شوری محاسبه‌شده برای میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کوارتز بین $6/57$ تا $13/9$ درصد وزنی معادل نمک‌طعام (جدول ۳؛ شکل ۷ و ۸) و میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کلسیت بین $4/74$ تا $10/9$ درصد وزنی معادل نمک‌طعام است (جدول ۳؛ شکل ۷ و ۸). دمای همگن‌شدگی به فاز مایع Th_{v-L} (°C) برای میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کوارتز بین $118^{\circ}C$ تا $192^{\circ}C$ (جدول ۳؛ شکل ۷ و ۸) و میانبراهای سیال نوع (LV) موجود در کانی کلسیت بین $111^{\circ}C$ تا $167^{\circ}C$ است (جدول ۳؛ شکل ۷ و ۸). مقدار چگالی میانبراهای سیال موجود در کانی کوارتز بین $0/99 g/cm^3$ تا $1/13 g/cm^3$ و میانبراهای سیال موجود در کانی کلسیت بین $1/08 g/cm^3$ تا $1/12 g/cm^3$ است (جدول ۳).

به‌منظور شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌زا طی تشکیل کانسار، از رگه- رگچه‌های کوارتز و کلسیت همراه با کانه‌زایی، مقاطع دوبرصیقلی تهیه شد. در نمونه‌های مورد مطالعه دو نوع میانبر سیال دوفازی غنی از مایع (LV) (شکل ۷- a) و تک فازی مایع (L) (شکل ۷- b) قابل تفکیک هستند. بیشتر میانبرهای سیال شناسایی‌شده دوفازی غنی از مایع (LV) با فاز مایع حدود 70 تا 80 درصد هستند. همگی میانبرهای سیال نوع (LV) به صورت اولیه به اشکال بیضوی، نامنظم، کروی و کشیده و اندازه 5 تا 26 میکرون تشکیل شده‌اند (شکل ۷- a و b؛ جدول ۳). مطالعات ریزدماسنجی بروی میانبرهای سیال اولیه دوفازی غنی از مایع (LV) در سه مقطع با میزان کانی کوارتز و یک مقطع با میزان کلسیت انجام گرفت (جدول ۳). با توجه به محتوی میانبرها و مطالعات میکروسکوپی و ریزدماسنجی، هیچ شاهدهی از حضور CO_2 مایع یا گاز، کانی‌های نوزاد و پدیده نازک‌شدگی در میانبرهای نمونه‌های مورد مطالعه دیده نشد. در همین راستا، برای جلوگیری از هرگونه ترکیدگی در ابتدا فرایند سرمایش تا زیر نقطه انجماد انجام شد و سپس برای به‌دست آوردن دمای همگن شدن فرایند گرمایش انجام شد؛ و به‌ترتیب طی این مراحل نخستین دمای ذوب یخ (T_{fm})، دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mice}) و دمای همگن شدن (Th_{v-L}) ثبت شدند (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج مطالعات ریزدماسنجی میانبرهای سیال بر روی رگه‌های کوارتز و کلسیت در کانسار مس فتح‌آباد.

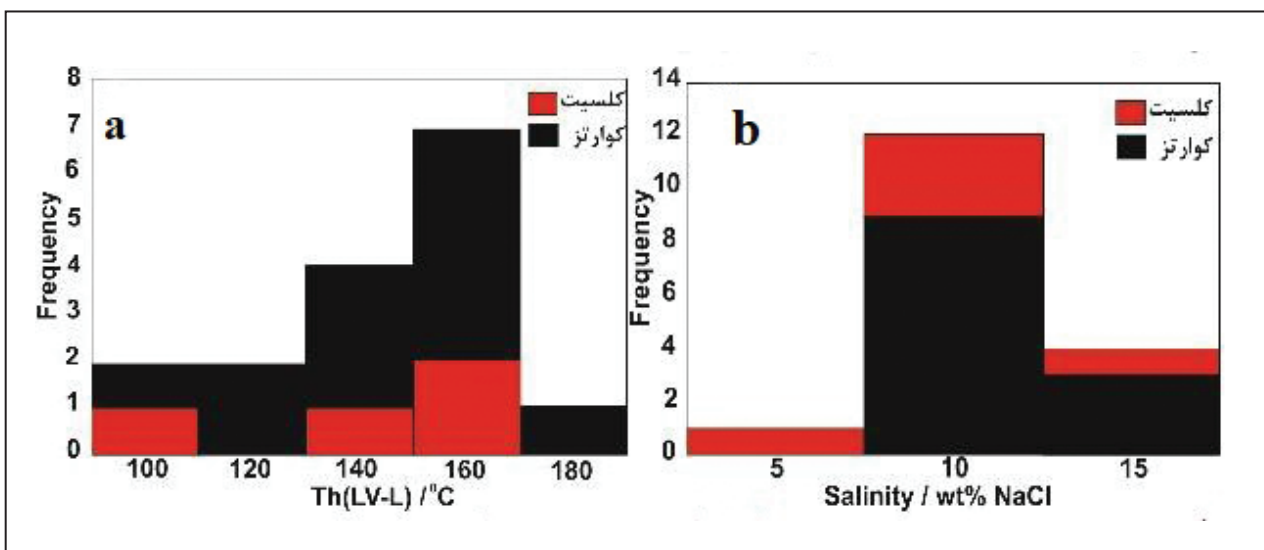
Table 3. Results of micro-thermometric studies of fluid inclusion on quartz and calcite veins in Fathabad copper deposit.

Samples	Mineral	Size (µm)	Type	Origin	T_{fm} (°C)	T_{mice} (°C)	Thv-1 (°C)	Salinity wt% NaCl	Density (g/cm ³)
BHFA-B12	Quartz	12	L+V	Primary	-45	-8.4	166	12.3	0.99
		4	L+V	Primary	-52	-15	192	9.14	1.02
		۱۶	L+V	Primary	-52	-4.2	118	6.74	0.99
		12	L+V	Primary	-43 to -46	-24.5	149	8.98	1.11
BHFA-B11	Quartz	17	L+V	Primary	-52	-24	161	10.4	1.1
		5	L+V	Primary	-41 to -43	-10	170	13.9	1
		16	L+V	Primary	-52	-24.7	128	8.9	1.13
		11	L+V	Primary	-41 to -43	-21	166	6.57	1.08
BHFA-B35	Quartz	۷	L+V	Primary	-41 to -46	24.4	141	9.2	1.11
		7	L+V	Primary	-41 to -43	-24.6	155	9.24	1.1
		26	L+V	Primary	-53	-19.6	167	9.31	1.07
		7	L+V	Primary	-41 to -43	-18	139	8.87	1.08
FA-63	Calcite	6	L+V	Primary	-41 to -43	-21	111	6.57	1.12
		10	L+V	Primary	-41 to -43	-20.4	157	10.9	1.08
		11	L+V	Primary	-41 to -43	-20.4	161	5.73	1.08
		11	L+V	Primary	-41 to -43	-22	167	4.74	1.08



شکل ۷- (a) میانبارهای سیال دوفازی مایع-گاز با فاز غالب مایع (LV) در کلسیت و تک فازی (L) در کوارتز.

Figure 7. a) two-phase (liquid + vapour) fluid inclusion with liquid-dominated phase (LV) in calcite; b) two-phase (liquid + vapour) fluid inclusion with liquid-dominated phase (LV) and single-phase (L) in quartz.



شکل ۸- نمودار فراوانی (a) دمای همگن‌شدگی و (b) شوری میانبارهای سیال در رگه‌های کلسیت و کوارتز محدوده فتح‌آباد. (L) در کوارتز.

Figure 8. Frequency of a) Homogenization temperature; b) Salinity of fluid inclusion in calcite and quartz veins in Fath-Abad.

و کلسیتی نسبت به سنگ‌های آتشفشانی میزبان (شکل ۶ - a و b) کاهش شدید نسبت عناصر HREE به LREE را نشان می‌دهد که نشانگر شرایط احیایی، دمای پایین و pH بالای سیال گرمایی کانه‌دار حاکم بر محیط در هنگام نهشت رگه‌های کوارتز و کلسیت دارای کانه‌زایی است (ظاهری عبده‌وند و همکاران، ۱۳۹۴). طی دگرسانی سریستی عناصر HREE از ترکیب کانی‌های سنگ‌ساز (هورنبلند و بیوتیت) حذف شده و LREE در شبکه کانی سریست در رگه‌های کانه‌دار متمرکز می‌شود (Rollinson, 1993). مقادیر مثبت بی‌هنجاری Eu^* و مقادیر منفی بی‌هنجاری Ce^* رگه‌های کوارتزی و کلسیتی (جدول ۱) نشان‌دهنده حاکم بودن شرایط احیایی در سیالات گرمایی، مشارکت آب‌های جوی در محلول گرمایی مسئول نهشت

۹-۵- ایزوتوپ گوگرد

برای تعیین منشا گوگرد در سیال کانه‌ساز مقادیر ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}S$) بر حسب در هزار برای دو نمونه کالکوپیریت از رگه‌های کوارتز کانه‌دار که مطالعات میانبارهای سیال بر روی آن‌ها انجام شده (جدول ۴)، اندازه‌گیری شد. مقادیر ایزوتوپ گوگرد $\delta^{34}S$ تعداد دو نمونه کالکوپیریت در گستره محدود بین $-1/58\%$ و $-2/86\%$ (جدول ۴) به‌دست آمد.

۱۰- بحث

۱۰-۱- زمین‌شیمی رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌دار

مقایسه الگوهای بهنجارشده عناصر نادر خاکی و کمیاب رگه‌های کانه‌دار کوارتزی

و کلسیت (شکل ۶- b) نشان‌گر غنی‌شدگی عناصر Pb, Cu, Mn, Y, K, Rb, Sn, Nb, V, Ni, Zn, Pb, Sr, Sc, P, Th, Zr, U, Nd, Sr, Ba و تپه‌شدگی عناصر Hf, Rb, Ti در هر دو رگه است. عناصر کانه‌ساز مانند Cu و Mo در رگه‌های کانه‌دار غنی‌شدگی و تمرکز یافته‌اند. همچنین، به‌طور همزمان، تپه‌شدگی عنصر Sr و غنی‌شدگی K و Rb را می‌توان به آزاد شدن این عناصر از شبکه کانی‌هایی مانند پلاژیوکلاز و ایجاد دگرسانی سریستی همراه با رگه‌های کانه‌دار نسبت داد (شکل ۲- e و f).

به‌طور کلی، با توجه به نمودارهای عنکبوتی (شکل ۵- a و b) و تپه‌شدگی- غنی‌شدگی (شکل ۶- a و b) عناصر کمیاب و نادر خاکی، می‌توان گفت که در اثر دگرسانی و آب‌شویی سنگ‌های میزبان در طول مسیر بالاآمدگی و آمیختگی سیالات ماگمایی-گرمایی مشتق شده از سنگ‌های آتشفشانی میزبان با سیالات جوی، مس و عناصر کمیاب و نادر خاکی همراه از سنگ‌های میزبان شسته شده و در امتداد شکستگی و گسل‌های موجود در واحدهای آتشفشانی میزبان به‌صورت رگه-رگچه‌های کلسیتی و کوارتزی نهشته شده‌اند.

رگه‌های کوارتزی و کلسیتی و شسته شدن مقادیر به نسبت بالایی از عنصر Ce به صورت Ce^{3+} از محیط است. همچنین، بی‌هنجاری منفی تا نبود بی‌هنجاری‌های Eu^* و Ce^* سنگ‌های آتشفشانی میزبان (جدول ۲) بیانگر بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در محیط تبلور ماگما و جدایش پلاژیوکلاز کلسیک از مذاب توسط تفریق بلوری است (Rollinson, 1993). روند یکسان الگوی تغییرات عناصر نادر خاکی و کمیاب نمونه‌های رگه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان آتشفشانی (شکل ۶- a و b) نشان‌دهنده منشا یکسان و مشابه این عناصر در دو نوع رگه کانه‌دار با سنگ‌های میزبان آتشفشانی است. شواهد زمین‌شیمی رگه‌های کوارتزی و کلسیت نشان‌دهنده غنی‌شدگی رگه‌های کانه‌دار از عناصر نادر خاکی و کمیاب و همچنین عنصر مس هستند. بنابراین، تبدیل شرایط اکسیدان در زمان نهشت سنگ‌های میزبان به شرایط احیایی رگه‌ها موجب نهشت کانه‌های سولفیدی شده است.

غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی و کمیاب در رگه‌های کوارتزی و کلسیتی کانه‌دار نسبت به سنگ‌های میزبان آتشفشانی (شکل ۶- a و b) نشان‌دهنده واکنش بالای سیال با سنگ و تحرک و آب‌شویی این عناصر از سنگ میزبان به رگه‌های کانه‌دار است. بررسی نمودار تپه‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب در رگه‌های کوارتزی

جدول ۴- مقادیر ایزوتوپ گوگرد کانه کالکوپیریت در رگه‌های کوارتزی.

Table 4. Sulfur isotope values of chalcopyrite in quartz veins.

Sample name	Rock	Sulphide mineral	Quartz vein	$\delta^{34}S$ (‰)	$\delta^{34}S_{H_2S}$
BHFA-B35	Porphyritic andesite	Chalcopyrite	+Quartz+ Chalcopyrite+pyrite malachite+Hematite	-1.58	-1.94
BHFA-B12	Porphyritic andesite	Chalcopyrite	+Quartz+ Chalcopyrite+pyrite Chalcocite+malachite+Hematite	-2.86	-3.15

۱۰-۲- منشا، تکامل و ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی سیال کانه‌ساز

با توجه به روند تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی، چگالی سیالات موثر در سیستم کانه‌زایی در محدوده بین 0.99 g/cm^3 تا 1.13 قرار می‌گیرند (شکل ۹). بنابراین، بر این اساس فشار تخمینی به دام افتادگی میانبارهای سیال در رگه‌های کوارتزی و کلسیتی محدوده فتح‌آباد بین ۲ تا ۵۰ بار است (شکل ۹).

در نمودار دمای همگن‌شدن و شوری (شکل ۱۰) میانبارهای سیال کانسار فتح‌آباد در محدوده زیرین گستره آمیختگی سیالات ماگمایی ثانویه با سیالات جوی واقع شده‌اند. این امر نشانگر آن است که مقدار زیادی سیال جوی باعث رقیق‌شدگی سیال ماگمایی ثانویه شده است. بنابراین تغییر شرایط ناشی از اختلاط بین منابع مختلف سیال (Wilkinson, 2001) موجب نهشت عناصر مس، طلا و دیگر عناصر فلزی و گوگرد ماگمایی در در رگه‌های کوارتزی و کلسیتی محدوده کانسار فتح‌آباد شده است (شکل ۱۰). مطالعات سوارد (Seward, 1973) و سوارد و همکاران (Seward et al., 2013) نشان‌دهنده که کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در کانسارهایی با شرایط احیایی و درجه حرارت کمتر از 300°C ، چیره هستند. بنابراین میانبارهای سیال با شوری کم-متوسط (شکل‌های ۹ و ۱۰) و درجه حرارت تشکیل کمتر از 300°C نشانگر چیرگی کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در کانی‌سازی رگه‌ای در کانسار فتح‌آباد است. همچنین در شکل ۹، شوری و دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال نشان می‌دهد که روندهای موثر بر رخداد کانه‌زایی و ته‌نشست سولفیدها در کانسار فتح‌آباد، روندهای اختلاط هم‌دما و رقیق‌شدگی با سیال سطحی هستند؛ که موجب

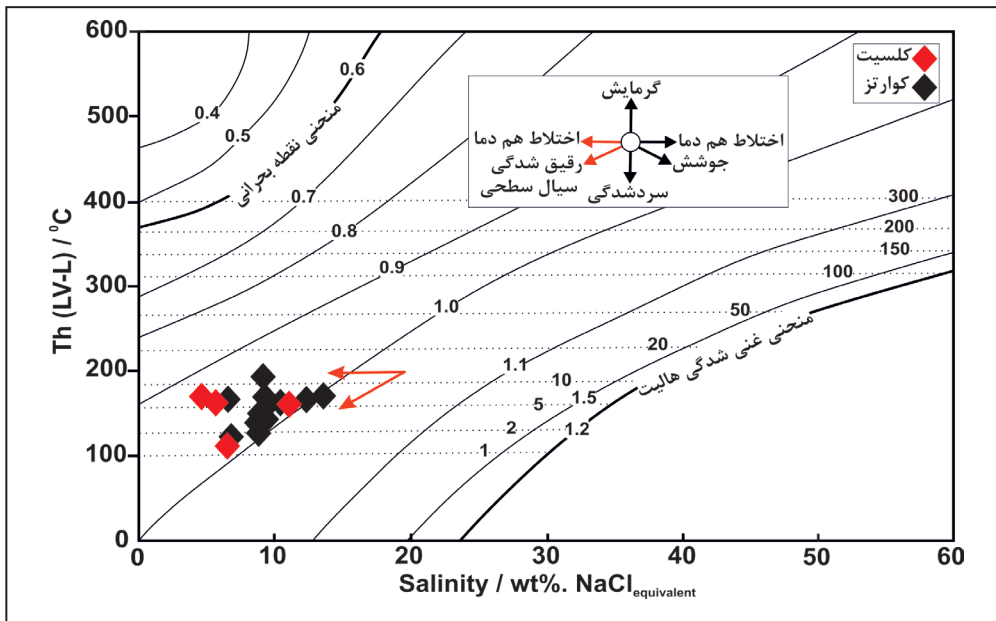
ته‌نشست مس از کمپلکس‌های بی‌سولفیدی به‌عنوان لیگاند‌های اصلی برای انتقال فلز در محلول‌های گرمایی شده‌اند.

۱۰-۳- منشا گوگرد

مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در زمین‌شناسی، درک بهتری از منشا احتمالی گوگرد و شرایط تشکیل کانه‌های سولفیدی را فراهم می‌سازد (Ohmoto and Rye, 1979). مقادیر $\delta^{34}S$ در کالکوپیریت‌های موجود در رگه‌های کوارتزی کانه‌دار سنگ آندزیت پورفیری کانسار فتح‌آباد در گستره 1.58% و 2.86% در هزار (جدول ۴) گویای مشارکت مستقیم سیالات گوگرددار مشتق شده از منبع ماگمایی (Chaussidon et al., 1989) و مشابه با منشا ماگمایی گوگرد در کانسارهای گرمایی ($\delta^{34}S$ ‰ $0 \sim 2$) (Ohmoto and Rye, 1979) هستند. همچنین، در دماهای کمتر از 400°C درجه سانتی‌گراد گونه احیایی گوگرد به فرم H_2S گونه چیره در سیستم گرمایی است (Ohmoto and Rye, 1979). مقادیر $\delta^{34}S_{H_2S}$ (1.94% و 3.15%) سیال در تعادل با کالکوپیریت‌ها نشانگر حضور گونه احیایی گوگرد به فرم H_2S در سیال گرمایی است. بنابراین لیگاند گوگرد احیایی به فرم H_2S نقش مهمی در انتقال فلز مس تحت شرایط گرمایی در حین نهشت کالکوپیریت داشته است. متراکم شدن گازهای سیستم ماگمایی-گرمایی همچون HCl و SO_2 ، موجب ناپایداری SO_2 و اسیدی شدن محلول با تشکیل H_2SO_4 و

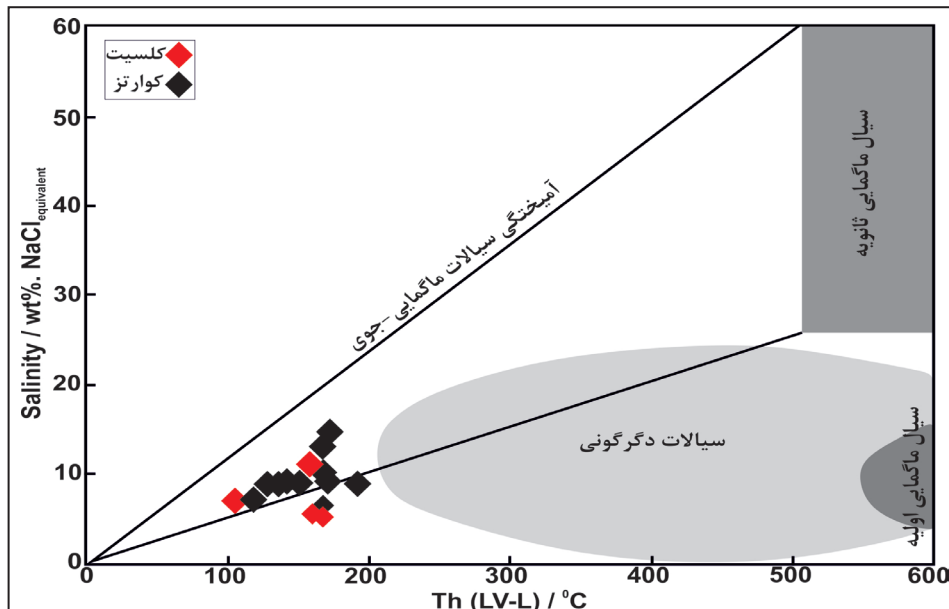
دارای pH بالاتر و دمای کمتر و واکنش سنگ میزبان با سیالات کانه‌دار موجب کاهش حلالیت کمپلکس‌های فلزی و نهایتاً افزایش غنی‌شدگی و نهشت فلزات می‌شود (Tindell et al., 2018).

H₂S طبق فرمول (4SO₂ + 4H₂O = 3H₂SO₄ + H₂S) می‌شود. این محلول اسیدی در اثر واکنش با سنگ‌های میزبان، خنثی شده و موجب مجموعه دگرسانی‌ها می‌شود (John et al., 2018). اختلاط سیال ماگمایی با pH اسیدی با آب‌های جوی



شکل ۹- نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری میانبارهای سیال کانی‌ساز در رگه‌های کوارتز و کلسیتی کانسار فتح‌آباد. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما- شوری از (Wilkinson, 2001)، خطوط ریزنقطه‌چین منحنی‌های فشار از (Ramdohr, 1980) و خطوط سیاه منحنی‌های چگالی از (Brown and Lamb, 1989).

Figure 9. Homogenization temperature versus salinity of mineralizing fluid inclusion in quartz and calcite veins of Fathabad deposit. Possible trends of fluid evolution in the temperature-salinity diagram (Wilkinson, 2001), dotted lines of pressure curves (Ramdohr, 1980) and black lines of density curves (Brown and Lamb, 1989).



شکل ۱۰- نمودار دمای همگن شدن در برابر درجه شوری میانبارهای سیال کانسار فتح‌آباد؛ توزیع میانگین دمای همگن شدن و شوری محلول‌های گرمایی و ماگمایی (برگرفته شده از Beane, 1983) است.

Figure 10. Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusion of Fathabad deposit; distribution of mean homogenization temperature and salinity of hydrothermal and magmatic solutions (Beane, 1983).

۱۱- نتیجه‌گیری

سیالات جوی است. سیال کانه‌ساز در هنگام مهاجرت، با سنگ میزبان فعل و انفعال داشته و طی کاهش دما و کاهش حلالیت کمپلکس‌های بی‌سولفیدی، REEها و همچنین فلزات کانه‌ساز را از سنگ میزبان شسته است. بنابراین سنگ‌های آتشفشانی احتمالاً منشا عناصر فلزی لازم برای کانی‌سازی هستند. در نتیجه، بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، کنترل ساختاری کانی‌سازی و دگرسانی، زمین‌شیمی رگه‌های کانه‌دار و ویژگی‌های سیال گرمایی کانه‌ساز، کانسار فتح‌آباد نوعی کانی‌سازی مس رگه‌ای گرمایی نوع اپی‌ترمال است.

سیاسگزاری

این پژوهش بخشی از رساله دکتری نویسنده اول مقاله متعلق به دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات است. نگارندگان از حمایت‌های اساتید و مسئولان این دانشگاه، همچنین حمایت‌های مالی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) و در نهایت از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

واحدهای میزبان کانه‌زایی مس در کانسار فتح‌آباد شامل واحدهای آتشفشانی-آذرآوری کالک‌آلکان تا شوشونیتی به سن ائوسن هستند که در موقعیت زمین‌ساختی مرتبط با فرورانش حاشیه همگرای قاره‌ای تشکیل شده‌اند. سیستم‌های گسله فرعی امتدادلغز NE-SW مشتق شده از گسل اصلی درونه، به‌عنوان مجاری سیال گرمایی موجب تشکیل دگرسانی‌های سیلیسی-سریستی و پروپلیتی همراه با رگه‌های کانه‌دار متشکل از کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت، پیریت شده‌اند. روند یکسان الگوی عناصر نادر خاکی و کمیاب رگه‌های کوارتز و کلسیتی و سنگ‌های آتشفشانی میزبان نشان‌دهنده هم‌منشا بودن این رگه‌ها و سنگ‌های آتشفشانی میزبان است. مطالعات زمین‌شیمی ایزوتوپی گوگرد کانه کالکوپیریت، نشانگر منشا ماگمایی گوگرد و غلبه گونه احیایی گوگرد به فرم H_2S در سیال گرمایی است. نتایج زمین‌شیمی رگه‌های کانه‌دار کوارتز و کلسیت (جدول ۱، شکل‌های ۵ و ۶ - a و b) همانند مطالعه میانبراه‌های سیال در این رگه‌ها (جدول ۳، شکل ۹) و ایزوتوپ گوگرد کانه کالکوپیریت در رگه‌های کوارتزی (جدول ۴) نشانگر حضور و واکنش سیالات گرمایی احیایی کانه‌دار با سنگ‌های میزبان و آمیختگی سیالات ماگمایی-گرمایی با

کتابنگاری

- ابراهیمی، س.، عرب امیری، ع. و قبری، ه.، ۱۳۹۹، مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی، میانبراه‌های سیال و ایزوتوپ‌های پایدار ذخیره مس شریف‌آباد بردسکن، شمال‌خاور ایران، فصلنامه علوم زمین، ۳۰(۱۱۷)، ص ۱۳۵-۱۴۶. <https://doi.org/10.22071/gsj.2020.197243.1687>
- آقناباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ ص.
- بروزی‌نیت، ب.، ملک‌زاده شفاوردی، آ. و حیدریان‌شهری، م.، ۱۳۹۸، مطالعات کانی‌شناسی، ژئوشیمی و سیالات‌درگیر در رخداد مس زاوه، جنوب‌شرق تربت‌حیدریه، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی، دوره ۲۷، شماره ۱، ص ۱۸-۳. <http://ijcm.ir/article-1-1221-fa.html>
- تقدسی، ه. و ملک‌زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۹۷، شواهد احتمالی کانه‌زایی Cu-Au در منطقه نامق، شمال شرق کاشمر: مطالعات دگرسانی، کانه‌زایی، ژئوشیمی و سیالات‌درگیر، فصلنامه علوم زمین، ۱۰۸، ص ۱۰۵-۱۱۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.82914.1094>
- جاویدی‌مقدم، م.، کریم‌پور، م. ح. و ملک‌زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۹۹، کانسار مس رگه‌ای رشیدی، شمال خور، شرق ایران: مطالعات دگرسانی، کانی‌سازی، ژئوشیمیایی، میانبراه‌های سیال و ایزوتوپ‌های پایدار، فصلنامه علوم زمین، ۲۸(۱۱۶)، ص ۲۶۵-۲۷۶. <https://sid.ir/paper/392187/fa>
- کاظمی مهرنیا، ا.، ۱۳۹۵، گزارش زمین‌شناسی اقتصادی منطقه فتح‌آباد رشتخوار(شرکت پارس کان کاو)، ص ۱۰۱.
- کریم‌پور، م. و ملک‌زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۸۵، مقایسه ژئوشیمی سنگ منشا توده مگنتیت طلادار تنورچه، و مگنتیت بدون طلا معدن سنگان، استان خراسان رضوی، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱۴(۱)، ص ۲۶-۳. <http://ijcm.ir/article-1-691-fa.html>
- ظاهری‌عبده‌وند، ن.، زراسوندی، ع.، صامتی، م.، کاروانی، م.، پورکاسب، ه. و راست‌منش، ف.، ۱۳۹۴، بررسی تکامل زمین‌شناسی-فلزایی در منطقه خاور الیگودرز با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی و کمیاب، فصلنامه علوم زمین، ۲۴(۹۵)، ص ۲۵۹ تا ۲۷۰ (سنگ و کانی). <https://sid.ir/paper/31761/fa>
- یوسفی‌سورانی، ل.، حیدریان‌شهری، م. و کریم‌پور، م.، ۱۳۸۷، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دماسنجی شاره‌های درگیر و مغناطیس‌سنجی زمینی کانی‌سازی مگنتیت-اسپیکولاریت مس-طلا منطقه پی‌جویی شهرک، تربت‌حیدریه، ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی، ۱۶(۳)، ص ۵۰۵-۵۱۶. <http://ijcm.ir/article-1-631-fa.html>

References

- Aghanabati, A., 2004. *The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 586 p. (in persian)*
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, S.M., and Finger, F., 2013. The magmatic record in the Arghash region (northeast Iran) and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 3(12): 1603–1625. DOI: 10.1007/s00531-013-0897-1
- Asiabanha, A., and Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos*, V 148, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.014>
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684. DOI:10.1016/0016-7037(93)90378-A.
- Boroziyat, B., malekzadeh Shafaroudi, A., and Haidarian Shahri, M., 2019. *Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion studies in Zaveh copper mineralization occurrence, southeast of Torbat-e-Hydariéh, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 27 (1) :3-18. http://ijcm.ir/article-1-1221-en.html. (in persion)*
- Brown, P.E., and Lamb, W.M., 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 1209-1221. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90057-4).

- Chaussidon, M., Albarede, F., and Sheppard, S.M.F., 1989. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(2), 144–156. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90042-3).
- Ebrahimi, S., Arab Amiri, A., Ghanbari, H. Associates, 2020. *Mineralogy, alteration, fluid inclusion and stable isotopes studies of the Sharifabad -Bardaskan copper deposit, NE Iran*, *Scientific Quarterly Journal*, 30(117), pp. 135-146. <https://doi.org/10.22071/gsj.2020.197243.1687>. (in persian)
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2), 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.005>.
- Javidi-Moghadam, M., Karimpour, M., H. and Malekzadeh Shafarodi, A., 2020. *Rashidi copper vein deposit, North Khur, Eastern Iran: hydrothermal alteration, mineralization, geochemistry, fluid inclusion and stable isotope investigations*, *Scientific Quarterly Journal*, 28(116), pp. 265-276. <https://doi.org/10.22071/gsj.2019.128676.1460>. (in persian)
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070, 247. <https://doi.org/10.3133/sir20105070Q>.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazloumi Bajestani, A., Schader, R.K., Stern, C.R., Farmer, L., and Sadeghi, M., 2017. Geochemistry, geochronology, isotope and fluid inclusion studies of the Kuh-e-Zar deposit, Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt, NE Iran: Evidence of gold-rich iron oxide–copper–gold deposit. *Journal of Geochemical Exploration* 183 (A) 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.001>.
- Karimpour, M., Malekzadeh Shafaroudi, A. 2006. *Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite & Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 2006; 14 (1) :3-26. <http://ijcm.ir/article-1-691-fa.html>. (in persian)
- Kazemi Mehrnia, A., 2016, *Economic Geology Report of Fathabad Roshtkhar Region (Parsikankav Company)*, p. 101. (in persian)
- Lia, Y., and Liu, J., 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7), 1789–1795. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.015>.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H., and Golmohammadi, A., 2013. Zircon U–Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64(5): 256-271. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.028>.
- McDonough, W.F., and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Ohmoto, H., and Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd ed. Wiley, New York, pp. 509 – 567.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data, Evaluation, Presentation, Interpretation*, Harlow, UK, Longman, 352 p.
- Seward, T.M., 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochem. Cosmo. Acta.*, 37, 370-399. [Doi: 10.1016/0016-7037\(73\)90207-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90207-X)
- Seward, T.M., Williams-Jones, A.E. and Migdisov, A.A., 2013. The chemistry of metal transport and deposition by ore-forming hydrothermal fluids. In *Treatise on Geochemistry* (eds. K. Turekian and H. Holland). 2nd edition. V. 13. Elsevier, pp. 29-57. DOI:10.1016/B978-0-08-095975-7.01102-5.
- Taghadosi, H., Malekzadeh Shafaroudi, A. 2018, *Evidences of probable porphyry Cu-Au mineralization in Namegh area, Northeast of Kashmar: geology, Alteration, mineralization, geochemistry, and fluids inclusion studies. Scientific Quarterly Journal*, 108, pp. 105-118. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.82914.1094>. (in persian)
- Tindell, T., Watanabe, K., Imai, A., Takahashi, R., Boyce, A.J., Yonezu, K., Schersten, A., Page, L. and Ogata, T., 2018. The Kago low-sulfidation gold and silver deposit: A peripheral mineralisation to the Nansatsu high-sulfidation system, southern Kyushu, Japan, *Ore Geology Reviews*, 102, 951-966. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.027>.
- Yousefi Sorani, L., Heydarian Shahri, M. and Karimpour, M. 2008. *Geology, mineralogy, fluid inclusion thermometry and ground magnetic of Shahrak Magnetite-Specularite Cu-Au prospecting area, Torbat-e-Heydariyeh, Iran. Journal of Crystallography and Mineralogy*, 16(3), pp. 505-516. <http://ijcm.ir/article-1-631-en.html>. (in persian)
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, 55(1-4) 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- Zaheri-Abdevand, N., Zarasondi, A., Sameti, M., Karvani, M., Pourkasab, H., Rastmanesh, F., 2015, *Geology and Metallogeny Evolution of Eastern Aligudarz Using Mineralogy, Trace and Rare Earth Elements Geochemistry. Scientific Quarterly Journal*, 24 (95), pp. 259-270 (Rock and Mineral. (in persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42437>