

Research Article

Occurrence of the rare minerals in porphyry Cu deposits: Evidences from the potassic alteration of the Sarkuh porphyry deposit

Mohsen Rezaei^{1*}, Alireza Zarasvandi¹, Sima Basious¹, Hasan Zamanian²

1- Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- School of Geology, College of Science, University of Tehran

Keywords: *Sarkuh Porphyry Cu deposit, Potassic alteration, Rare minerals, Magnetite chemistry, Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB)*

1- Introduction

In Iran, widespread occurrence of porphyry Cu deposits is reported and investigated along the Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB). These deposits formed in a collided arc setting where fertile magmas generated from the melting of subduction-modified lithospheric mantle, especially when there is asthenosphere upwelling (Asadi, 2018). Given that mineralization in the porphyry Cu systems occurs at the end of potassic alteration (Richards, 2011), the features of potassic alteration could be linked to mineralization potential of porphyry systems (Zarasvandi et al., 2018). Considering this point, the present study focused on the petrography and EDX spectra of potassic alteration minerals. This is used to characterize the occurrence and paragenesis of rare minerals. Additionally, textural and geochemical features of magnetite paragenesis is linked to the physicochemical conditions under which rare minerals crystallized in the potassic alteration.

2- Geological setting

The Sarkuh porphyry Cu deposit associated with granite and granodiorite intrusions, is located 6km SW of Sarcheshmeh porphyry Cu deposit in the southern part of UDMB. In this deposit, intrusions were emplaced in 15.18 ± 0.43 (U/Pb dating) in Eocene units dominated by tuff, andesite, basaltic andesite, and pyroclastic breccia. Potassic, phyllic, argillic, propylitic alterations as well as potassic - argillic and potassic - phyllic transitions are identified in the Sarkuh district. Potassic alteration of deposit mainly containing magnetite, secondary and re-equilibrated biotites as well as anhydrite is observed till the deepest parts of drill holes (~500m). However, secondary k-feldspar, calcite, monazite, epidote, and titanite occurred to a lesser extend in the potassically altered rocks. Apatite and zircon inclusions are widely observed in the biotite and magnetite phenocrysts. Texturally, various types of magnetites were crystalized through the evolution of potassic alteration; magmatic, pre-ore, ore, and late stages (Zarasvandi et al., 2023). Nevertheless, only those having martitized margins (Mag 1) and Ti-phase (ilmenite) exsolution as lamellae or in grain contacts (Mag 2) are accompanied with rare minerals (discussed below).

3- Material and methods

In this study a number of 6 representative samples were selected from the potassic alteration of Sarkuh porphyry Cu deposit (borehole No: SKP05, SKP16, and SKP33). Preparation of thin-polished sections as well as EMPA analysis were carried out in the Montanuniversitat Leoben, Austria. Analyses were done on the carbon coated samples using a Superprobe Jeol JXA 8200 instrument. In order to substantiate the paragenesis and occurrence of accessory minerals, EDX spectra of analyzing point were recorded.

* Corresponding author: m.rezaei@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.43575.2369

Received: 2023-04-25

Accepted: 2023-06-10

4- Result and discussion

Optical petrography with interpretations of EDX spectra imply the unusual occurrence of rare minerals, including thorite, REE-rich monazite, Ce-bearing titanite, and La-Ce rich epidotes within groundmass of the potassic alteration in the Sarkuh porphyry deposit. Commonly, they are associated with apatite, anhydrite, magnetite, hydrothermal biotite, quartz, and k-feldspar assemblages. Assessing the geochemical composition of magnetite paragenesis indicates they are mainly contain Fe, Ti, V, Al, Si, Cr, Mn, and Mg, whereas Ca, Cu, and Ni were detected only in some limited points. Based on the geochemical composition, studied magnetites formed via high temperature ($>500^{\circ}\text{C}$) magmatic – hydrothermal fluids exsolved in the early-stages of hydrothermal fluid evolution in the potassic alteration. This is also supported by the position of samples on the Mg + Al + Si (ppm) vs. Ti (ppm) discrimination plot (Nadoll et al., 2015; Tian et al., 2021), where magnetite samples show the affinity with low rate of the fluid – rock interaction. Additionally, the co-occurrence of magnetite with hematite and anhydrite assemblages represents that high oxygen fugacity conditions (near magnetite - hematite buffers $\sim \Delta\text{FMQ} +4$) prevailed during the magnetite crystallization (Zarasvandi et al., 2019). Considering the close association between magnetite and rare minerals, these findings could be extended to the occurrence of rare minerals in the potassic alteration of porphyry Cu deposits.

5- Conclusion

The intrusive units of Sarkuh porphyry deposit (mainly granite and granodiorite) are related to a hydrous/oxidant magmatic system representing high Sr/Y and La/Yb adakitic features. They sourced from the melting of subduction-modified lithospheric mantle analogous to those reported previously for other fertile porphyry intrusions in southern parts of UDMB (e.g., Meiduk and Sarcheshmeh porphyry deposits). Considering the same magmatic source of Sarkuh porphyry with other PCDs in the southern part of UDMB, it seems that the occurrence of rare minerals (i.e., thorite, REE-rich monazite, Ce-bearing titanite, and La-Ce rich epidotes) could also be traced in the other PCDs especially those localized in the southern parts of UDMB. Linking the chemical composition of magnetite paragenesis with rare mineral occurrences in the potassic alteration confirmed that they crystallized from high temperature / oxidant magmatic - hydrothermal fluids in the early stages of hydrothermal fluid evolution in the potassic alteration.

6- References

- Asadi, S., 2018. Triggers for the generation of post-collisional porphyry Cu systems in the Kerman magmatic copper belt, Iran: New constraints from elemental and isotopic (Sr–Nd–Hf–O) data. *Gondwana Research* 64, 97–121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>.
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., Koenig, A.E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita* 50, 493–515. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0539-y>
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews* 40, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G., Berador, A.E., 2021. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: Perspective from the giant Cretaceous Atlas porphyry Cu–Au deposit (Cebu, Philippines). *Ore Geology Reviews* 133, 104084. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104084>
- Zarasvandi, A., Heidari, M., Rezaei, M., Raith, J., Asadi, S., Saki, A., Azimzadeh, A., 2019b. Magnetite chemistry in the porphyry copper systems of Kerman Cenozoic magmatic arc, Kerman, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 43, 839–862. <https://doi.org/10.1007/s40995-019-00677-6>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Pourkaseb, H., Asadi, S., Saed, M., Lentz, D.R., 2018. Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfide s of mineralized porphyry copper systems, Urumieh-Dokhtar magmatic arc. *Iran. Geochimica et Cosmochimica Acta* 223 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.11.012>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Taheri, M., Asadi, S., Heidari, M., 2023. Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran: A record of

deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration* 249, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107213>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Rezaei, M., Zarasvandi, A., Basious, S., Zamanian, H., 2024. Occurrence of the rare minerals in porphyry Cu deposits: Evidences from the potassic alteration of the Sarkuh porphyry deposit. *Adv. Appl. Geol.* 13(4), 1048-1065.

DOI: 10.22055/AAG.2023.43575.2369

https://aag.scu.ac.ir/article_18656.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

رخداد کانی‌های نادر در کانسارهای مس پورفیری: شواهدی از زون دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری سرکوه

محسن رضایی *

گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

علیرضا زرسوندی

گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

سیما باسیوس

گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

حسن زمانیان

دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران

* m.rezaee@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

چکیده

کانسار مس پورفیری سرکوه در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر و در ارتباط با جایگیری توده‌های نفوذی میوسن با ترکیب غالب گرانیات و گرانودیوریت درون واحدهای آئوسن شامل توف، آندزیت، آندزیت - بازالت و برش‌های پیروکلاستیکی می‌باشد. دگرسانی پتاسیک این کانسار دارای گسترش قابل توجه بوده و با کانی‌شناسی غالب مگنتیت، بیوتیت‌های ثانویه و تعادل مجددیافته همراه با انیدریت مشخص می‌گردد. در این مطالعه طیف EDX کانی‌های فرعی موجود در دگرسانی پتاسیک به منظور ردیابی کانی‌های نادر در زون دگرسانی پتاسیک مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نتایج آنالیز ریزکاونده الکترونی (EMPA) بر روی پاراژنز مگنتیت همراه با کانی‌های نادر به منظور بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی رخداد این کانی‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده رخداد غیر معمول اپیدوت‌های غنی از Ce و La به همراه مونازیت‌های غنی از عناصر نادر خاکی و نیز تیتانیات‌های سریم‌دار همراه با مجموعه‌های آپاتیت، انیدریت، بیوتیت گرمابی، کوارتز و مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک این کانسار می‌باشد. داده‌های حاصل از شیمی مگنتیت نیز نقش سیال ماگمایی - گرمابی اولیه دما بالا (بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی گراد) را با نرخ برهمکنش پایین سیال گرمابی و سنگ دیواره در شکل‌گیری این مگنتیت‌ها نشان می‌دهد. این مگنتیت‌ها بعضاً در همراهی با همتایت و انیدریت یافت می‌شوند که تاییدکننده شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا، نزدیک محدوده بافری مگنتیت-همتایت ($\Delta FMQ+4$) می‌باشد. با توجه به نوع رخداد و شیمی پاراژنز مگنتیت، به نظر می‌رسد تشکیل کانی‌های نادر عموماً مربوط به مرحله پیش از کانه‌زایی سولفیدی در دگرسانی پتاسیک این کانسار باشد.

واژه‌های کلیدی: کانسار مس پورفیری سرکوه، دگرسانی پتاسیک، کانی‌های نادر، شیمی مگنتیت، کمربند ماگمایی / ارومیه - دختر

۱-مقدمه

تکتونیکی کمان برخورد کرده (Collided arc)، از ذوب بخشی گوشته لیتوسفری تغییر یافته بر اثر مواد حاصل از فرورانش بویژه در مناطقی که بالا آمدگی آستونسفر دیده می‌شود منشا گرفته است (Asadi, 2018). بررسی‌ها نشان داده درجات مختلف کانه‌زایی در کانسارهای مس پورفیری این کمربند عمدتاً ریشه در تاریخچه تحول سامانه ماگمایی - گرمابی این ذخایر دارد (Rezaei, 2017; Zarasvandi et al., 2019). در ذخایر مس پورفیری انتقال از سامانه ماگمایی به گرمابی (Magmato-)

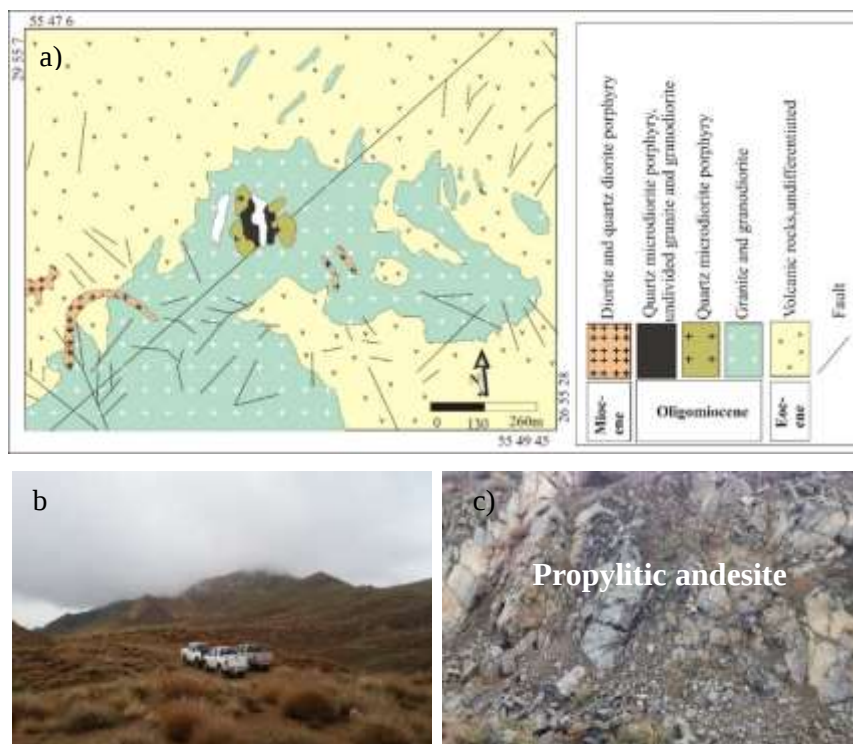
کمربند ماگمایی ارومیه - دختر به عنوان یک منطقه دارای پتانسیل بالا برای اکتشاف ذخایر مس $\pm$ مولیبدن $\pm$ طلا می‌باشد. پورفیری در ایران شناخته شده است. این ذخایر عموماً نشان دهنده درجات مختلف کانه‌زایی از ضعیف / نیمه اقتصادی تا قابل توجه / اقتصادی می‌باشند (Zarasvandi et al., 2018). امروزه مشخص شده ماگمای مادر این ذخایر عمدتاً در جایگاه

۲- زمین شناسی، دگرسانی و کانه زایی

کانسار مس پورفیری سرکوه در ۶ کیلومتری جنوب غرب کانسار مس پورفیری سرچشمه و در ارتباط با نفوذی های با ترکیب غالب گرانیته و کوارتز دیوریت می باشد (شکل ۱). این کانسار دارای میزان ذخیره ۱۱۰ میلیون تن با عیار ۰/۲۶ درصد مس است (Aghazadeh et al., 2015). در این کانسار سن سنجی U-Pb کانی های زیرکن نشانگر زمان جایگیری 0.43 ± 1.18 برای گرانیته های میزبان کانه زایی می باشد (McInnes et al., 2005). به طور کلی می توان گفت در این محدوده یک استوک با روند شرقی - غربی که دارای هسته گرانودیوریتی و حاشیه گرانیته می باشد و درون واحدهای ائوسن شامل توف، آندزیت، آندزیت - بازالت و برش های پیروکلاستیکی جایگیر شده است (شکل ۱c; Nourali and Mirnejad, 2012). به سمت مرکز، دایک های پورفیری میکروکریستالی با ترکیب کوارتز دیوریت واحدهای نفوذی را قطع می کنند.

در کانسار مس پورفیری سرکوه، دگرسانی و کانه زایی عمدتاً همراه با استوک های گرانیته - گرانودیوریتی دیده می شود (شکل ۲c). دگرسانی های پتاسیک، فلیک، آرژلیک و پروپلیتیک در این محدوده قابل تفکیک می باشد. علاوه بر این دگرسانی های حدواسط مبین تغییرات تدریجی در زون های دگرسانی شامل پتاسیک - آرژلیک و پتاسیک - فلیک نیز در این کانسار قابل مشاهده می باشد. از نظر ابعاد دگرسانی پتاسیک در این کانسار دارای گسترش قابل توجهی می باشد به نحوی که در عمیق ترین بخش های گمانه های حفاری (حدوداً ۵۰۰ متر) نیز آثار قابل مشاهده می باشد. در مقابل دگرسانی فلیک (عمدتاً شامل کوارتز، سریسیت، پیریت، کلریت و کانی های رسی) از گسترش به نسبت ناچیزی برخوردار است. بیشترین توسعه دگرسانی پروپلیتیک در ولکانیک های میزبان استوک های نفوذی رخ داده است (شکل ۱c) که عموماً با ترکیب کانی - شناختی کلریت، کلسیت، اپیدت، سریسیت، اکتینولیت، پیریت، همتایت و رسی شدن پلاژیوکلازها مشخص می گردد.

(hydrothermal transition) با رخداد دگرسانی پتاسیک همراه می باشد. بررسی شاخصه های فیزیکوشیمیایی این دگرسانی از دیدگاه بررسی رخداد کانه زایی می تواند حائز اهمیت باشد، چراکه بخش عمده کانه زایی سولفیدی ذخایر مس پورفیری در انتهای این دگرسانی رخ می دهد (Richards, 2011). در گذشته ذخایر مس پورفیری عمدتاً تنها از نظر رخداد مس، مولیبدن و طلا حائز اهمیت بودند، اما توسعه مطالعات صورت پذیرفته بر روی این ذخایر نشان دهنده پتانسیل های معدنی بالقوه در این ذخایر می باشد. به عنوان مثال امروزه بخش زیادی از عنصر Re (رنیوم)، به همراه مقادیر قابل توجهی از سایر فلزات نظیر Zn, Bi, Pd و Ag از این ذخایر استخراج می گردند (Sillitoe, 2010). هر چند در مطالعات اخیر آثاری از رخداد قابل ملاحظه عناصری نظیر Re و Te، بویژه در فازهای سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) موجود در ذخایر مس پورفیری زون ارومیه - دختر گزارش شده است (Rezaei, 2018; Zarasvandi et al., 2017)، اما تاکنون در خصوص نوع رخداد و شرایط فیزیکوشیمیایی شکل گیری کانی های نادر در سامانه های مس پورفیری زون ارومیه - دختر مطالعه دقیقی صورت نگرفته است. براین اساس در این مطالعه، ابتدا با استفاده از بررسی های کانی شناسی و طیف EDX نوع رخداد کانی های نادر در زون دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری سرکوه شناسایی گردیدند. در ادامه به منظور تحلیل شرایط فیزیکوشیمیایی رخداد این کانی ها، از شیمی پاراژنز مگنتیت همراه با کانی های نادر نیز استفاده گردید. به طور کلی می توان گفت کاتیون های مختلفی مانند Al^{3+} , Ti^{4+} , Mg^{2+} , $Mn^{2+/4+}$, Zn^{2+} , Cr^{2+} , V^{3+}/V^{4+} , Ni^{2+} و Co^{2+} (از قابلیت جانشینی در ساختار اسپینل مگنتیت برخوردارند) (Nadoll et al., 2015; Zarasvandi et al., 2019). تمرکز این عناصر در مگنتیت تابع پارامترهای مختلفی از جمله ترکیب ماگما/سیال گرمابی، فوگاسیته اکسیژن، دما، نرخ واکنش سیال و سنگ می باشد (Tian et al., 2021). در نتیجه تمرکز این عناصر در ساختار مگنتیت را می توان به تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تبلور مگنتیت نسبت داد (Nadoll et al., 2015).

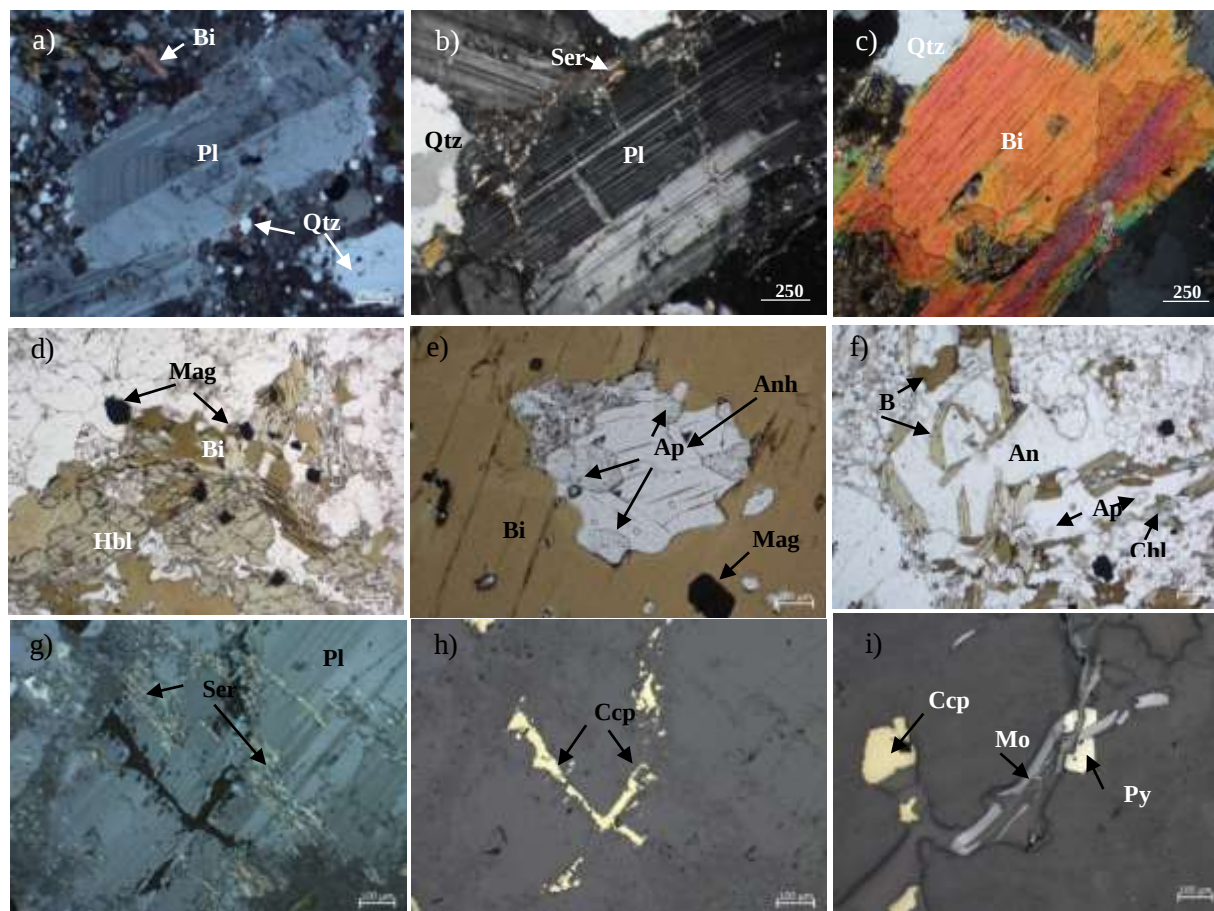


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار سرکوه؛ با تغییرات از Kaniran Consulting Company (۲۰۰۸)، (b) نمای صحرایی محدوده سرکوه و (c) آندزیت پروپلیتیکی شده در محدوده کانسار مس پورفیری سرکوه.

Fig. 1. (a) Simplified geological map of the Sarkuh porphyry deposit, modified after Kaniran Consulting Company (2008), (b) Field photographs of Sarkuh district with argillic alteration in the background, and (c) propylitic andesite in the Sarkuh porphyry copper deposit.

هستند (شکل ۱۲). علاوه بر این اسفالریت به صورت خیلی محدود تنها به صورت میانبارهایی در کانه پیریت دیده می‌شود. بر مبنای مطالعات کانی‌شناختی و روابط قطع‌شدگی، ۴ گروه عمده رگه که مبین سه مرحله تکامل سامانه گرمایی می‌باشند در این کانسار شناسایی شده است (Rezaei, 2017; Zarasvandi et al., 2019). این مراحل عبارتند از (۱) مرحله پیش از کانه‌زایی که همراه با دگرسانی پتاسیک می‌باشد و با مجموعه رگه‌های بیوتیتی و کوارتز $\pm$ بیوتیت و نیز رگه‌های کوارتز + پتاسیم فلدسپار شناخته می‌شود، (۲) مرحله کانه‌زایی اصلی که دارای مجموعه رگه‌های کوارتز + بیوتیت + کلریت $\pm$ مگنتیت $\pm$ پیریت $\pm$ کالکوپیریت تشکیل شده در دگرسانی پتاسیک و رگه‌های تاخیری تر کوارتز + پیریت + کالکوپیریت $\pm$ بورنیت $\pm$ کالکوسیت $\pm$ سریسیت در زون انتقالی دگرسانی پتاسیک - فلیک می‌باشد و (۳) رگه‌های کوارتز $\pm$ کلسیتی که در نمونه‌های دگرسانی فلیک مشاهده می‌شود و فاقد کانه‌زایی سولفیدی می‌باشد.

دگرسانی پتاسیک این کانسار با فراوانی گسترده مگنتیت، بیوتیت‌های ثانویه و تعادل مجددیافته مشخص می‌گردد. در برخی از مقاطع مورد مطالعه بیوتیت‌های ماگمایی، ثانویه و تعادل مجددیافته به همراه هورنبلند به صورت بخشی تا کلی توسط کلریت جانشین شده‌اند. علاوه بر این کانی‌های هورنبلند نیز به صورت بخشی تا کامل با بیوتیت ثانویه جانشین شده‌اند (شکل ۱۲d). میانبارهای آپاتیت و زیرکن در نمونه‌های بیوتیت کانسار سرکوه رایج می‌باشند (شکل ۱۲e). فلدسپارهای پتاسیم ثانویه، کلسیت، انیدریت و ندرتا موناژیت، اپیدوت، تیتانیت و توریت نیز در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک حضور دارند (شکل ۱۲f). در برخی موارد بیوتیت‌های گرمایی به صورت رورشدی بر روی انیدریت مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲f). در نمونه‌های مورد مطالعه میانبارهای آپاتیت در انیدریت رایج هستند (شکل ۱۲f). کانه‌زایی سولفیدی در زون دگرسانی پتاسیک به صورت جانشینی در کانی سیلیکاتی (شکل ۱۲g و h) و یا افشان همراه با غلبه پیریت نسبت به کالکوپیریت همراه می‌باشد. همچنین پیرویت و مولیبدنیت نیز ندرتا در برخی مقاطع قابل مشاهده



شکل ۲- (a) نمونه کوارتز دیوریت کانسار مس پورفیری سرکوه نشان دهنده فنوکریست پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی (Pl)، (b) پلاژیوکلاز با آثار سیریسیت (Ser) در نمونه گرانیتی کانسار سرکوه، (c) بیوتیت ماگمایی (Bi) در نمونه گرانیت کانسار سرکوه (تصاویر a-c در زیر نور عبوری XPL می‌باشد)، (d) رخداد مگنتیت (Mag) همراه با بیوتیتی‌شدن هورنبلند (Hbl)، (e) مگنتیت و انیدریت (Anh) به صورت میانبار در بیوتیت (انیدریت دارای میانبارهای ریز آپاتیت (Ap) می‌باشد)، (f) رخداد بیوتیت‌های گرمایی در سطح بلور انیدریت (تصاویر d-f در زیر نور عبوری PPL می‌باشد)، (g) رخداد کانه‌زایی سولفیدی (کانی‌های کدر) در امتداد رخ پلاژیوکلاز (تصویر در زیر نور عبوری XPL)، (h) تصویر g در زیر نور انعکاسی که نشان می‌دهد کانی‌های کدر کالکوپیریت (Ccp) می‌باشند و (h) رخداد پیریت (Py)، کالکوپیریت و مولیبدنیت (Mo) در نمونه‌های زون دگرسانی پتاسیک کانسار سرکوه. علائم اختصاری برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) می‌باشد.

Fig. 2. (a) Plagioclase phenocryst (Pl) in the quartz diorite sample of Sarkuh deposit, (b) Plagioclase with sericite (Ser) traces in the granite sample of Sarkuh deposit, (c) Magmatic biotite (Bi) in the granitic sample (photos a-c taken under crossed polarized transmitted light; XPL), (d) Magnetite (Mag) occurrence accompanied with biotitized hornblende (Hbl), (e) Magnetite and anhydrite (Anh) inclusions within biotite (anhydrite represents apatite (Ap) inclusions), (f) Hydrothermal biotites overgrowth anhydrite, (g) Sulfide mineralization (opaque minerals) along cleavage planes of plagioclase (photo taken under XPL light), (h) Photo-g under reflected light confirming opaque minerals are chalcopyrite (Ccp), and (h) Occurrence of pyrite (Py), chalcopyrite, and molybdenite (Mo) in the potassic alteration samples of Sarkuh deposit. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010).

۱-۲- رخداد مگنتیت در کانسار سرکوه

با توجه به اینکه در این مطالعه از شیمی مگنتیت به منظور تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی رخداد کانی‌های نادر در زون دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری سرکوه استفاده شده،

در اینجا به بررسی نحوه تشکیل این کانه در زون دگرسانی پتاسیک این کانسار پرداخته شده است. همانطور که پیشتر توسط Zarasvandi و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش شده است می‌توان گفت مگنتیت رایج‌ترین کانه اکسیدی در نمونه‌های

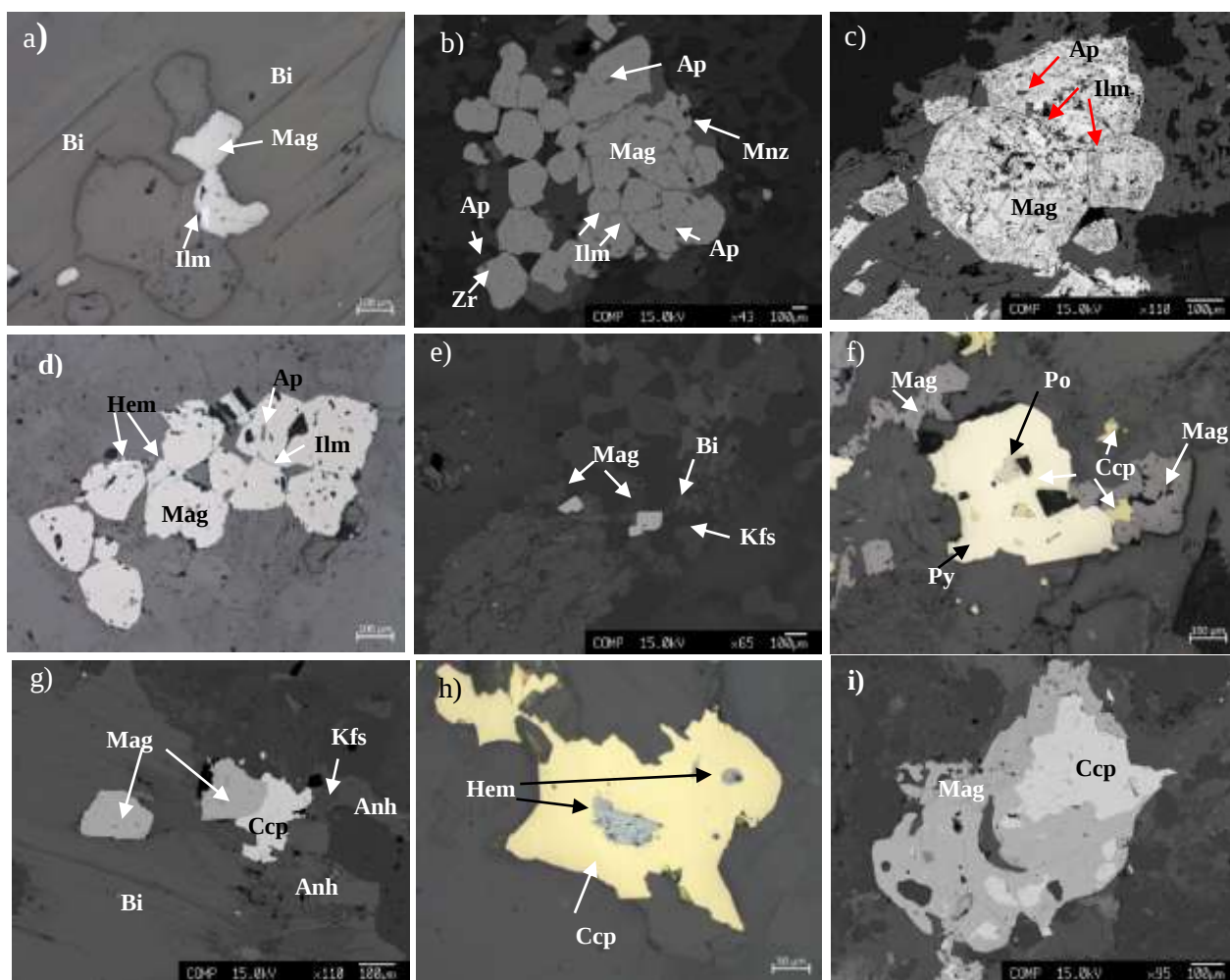
شده) متعلق به مراحل پیش از کانه‌زایی سولفیدی می‌باشند (شکل ۳h). مگنتیت‌های مراحل انتهایی به صورت رورشدی، سولفیدهای مراحل قبل را می‌پوشانند (شکل ۳i) که در برخی موارد، این جانشینی به صورت کامل می‌باشد. آثار مارتیتی شدن در این گروه از مگنتیت‌ها نیز قابل مشاهده می‌باشد.

۳- روش پژوهش

در این مطالعه نمونه‌های مغزه حفاری مربوط به گمانه‌های SKP05، SKP16 و SKP33 در اعماق مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد آثار دگرسانی پتاسیک با کانی-شناسی غالب مگنتیت، بیوتیت‌های ثانویه و تعادل مجدداً یافته و انیدریت در عمیق‌ترین بخش گمانه‌ها (تا عمق ۵۰۰ متر در گمانه SKP33) نیز قابل مشاهده می‌باشد. در این پژوهش کلیه مراحل آماده‌سازی نمونه‌های دوبرصیقلی و آنالیز نمونه‌ها در دانشگاه Montanuniversitat Leoben کشور اتریش صورت پذیرفت. به منظور تعیین دقیق رخداد و پاراژنز کانی‌های نادر، تصاویر میکروسکوپ الکترونی BSE به همراه طیف EDX کانی‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است به منظور دستیابی به نتایج صحیح‌تر، کلیه نمونه‌ها قبل از انجام آنالیز تحت پوشش کربن قرار گرفتند. علاوه بر این سنجش ژئوشیمی مگنتیت توسط دستگاه Jeol JXA 8200 Superprobe با شرایط کارکرد ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلوولت، باریکه لیزر ۱ میکرومتر و نیز با شدت جریان ۱۰ نانوامپر انجام شد. در حین انجام آنالیز، زمان خوانش برای پیک و پس‌زمینه به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ ثانیه می‌باشد. حد تشخیص (به صورت درصد وزنی) توسط دستگاه محاسبه شده و عبارت است: از ۰/۰۲۴ برای کروم، ۰/۰۲۳ برای آهن و منگنز، ۰/۰۱۲ برای منیزیم، ۰/۰۱۹ برای تیتانیم، ۰/۰۲۷ برای وانادیوم و ۰/۰۱ برای آلومینیم می‌باشد. نتایج مربوط به آنالیز نمونه‌های در جدول ۱ نمایش داده شده است. در جدول ۱، نماد Mag 1 و Mag 2 مربوط به مگنتیت‌های پیش از کانه‌زایی سولفیدی و همراه با فازهای کانیاپی نادر می‌باشد. این مگنتیت‌ها به ترتیب دارای حاشیه مارتیتی و جدایش تیغه‌های ایلمنیتی می‌باشند.

سرکوه می‌باشد. بیشترین فراوانی مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک قابل مشاهده بوده به نحوی که در برخی از نمونه‌ها، این کانه از فراوانی بیشتری نسبت به کانه‌های سولفیدی (مانند پیریت و کالکوپیریت) برخوردار است. مگنتیت‌ها عمدتاً دارای میانبراهای آپاتیت و زیرکن هستند. علاوه بر این، جدایش فازهای ایلمنیتی و تبدیل شدن به هماتیت (مارتیتی شدن مگنتیت) نیز به وفور قابل مشاهده است. در برخی موارد پلاژیوکلاز و بیوتیت‌های ماگمایی دارای میانبراهای ریز مگنتیت می‌باشند که نشان می‌دهد این نسل از مگنتیت‌ها طی شرایط ماگمایی متبلور شده‌اند (شکل ۳a). علاوه بر گونه ماگمایی این کانه، مگنتیت‌های گرمابی نیز در چند نسل قابل مشاهده می‌باشند که پیشتر توسط Zarasvandi و همکاران (۲۰۲۳) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مطالعات پتروگرافی به همراه بررسی تصاویر BSE نشان می‌دهد برخی از مگنتیت‌های گرمابی مربوط به مراحل پیش از کانه‌زایی سولفیدی می‌باشند. رخداد آنها به صورت منفرد و یا دسته‌ای بدون همراهی کانه‌زایی سولفیدی می‌باشد (شکل‌های ۳b-d). به صورت شاخص مرز تماس مگنتیت‌های دسته‌ای عموماً نشان‌دهنده برون‌رست ایلمنیت می‌باشد (شکل‌های ۳d-b). علاوه بر این، برخی از مگنتیت‌های پیش از کانه‌زایی سولفیدی طی دگرسانی پتاسیک و بر اثر بیوتیتی شدن هورنبلند بوجود آمده‌اند (شکل ۳d). همچنین این نسل از مگنتیت‌ها (پیش از کانه‌زایی سولفیدی) به صورت ریزدانه همراه با مجموعه‌های بیوتیت، کوارتز ریزدانه، فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز در زمینه نمونه‌های دگرسانی پتاسیک نیز قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۳e). در مگنتیت‌های پیش از کانه‌زایی سولفیدی آثار مارتیتی شدن به وفور قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۳d). در این مطالعه عمده کانی‌های نادر (در ادامه بحث شده است) همراه با مگنتیت‌های پیش از کانه‌زایی سولفیدی یافت می‌شوند. از لحاظ مکانی، مگنتیت‌های مربوط به مرحله کانه‌زایی سولفیدی دارای ارتباط تنگاتنگ با کانه‌زایی سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت و مولیبدنیت) می‌باشند (شکل ۳f و g). در مواردی، فازهای سولفیدی (مربوط به مرحله کانه‌زایی سولفیدی) دارای میانبراهای مگنتیتی (عمدتاً مارتیتی



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی و BSE از انواع رخداد مگنتیت در کانسار مس پورفیری سرکوه؛ (a) تصویر BSE نشان دهنده میانبار مگنتیت (Mag) در بیوتیت ماگمایی (Bi)، (b-d) تصاویر BSE نشان دهنده رخداد دسته‌ای مگنتیت پیش از کانه‌زایی که به صورت بخشی مارتیتی شده‌اند و در سطح تماس دانه‌های مگنتیت برون‌رست ایلمنیت (Ilm) مشاهده می‌گردد، (e) تصویر BSE نشان دهنده رخداد مگنتیت به صورت ریزدانه همراه با مجموعه بیوتیت و فلدسپار پتاسیم (kfs) در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک، (f) تصویر میکروسکوپ انعکاسی (در نور PPL) نشان دهنده رخداد مگنتیت همراه با کانه‌زایی سولفیدی شامل پیریت (Py)، کالکوپریت (Ccp) و پیروتیت (Po)، (g) تصویر BSE نشان دهنده همراهی مگنتیت با کالکوپریت (مگنتیت‌های همراه با کانه‌زایی سولفیدی)، (h) تصویر میکروسکوپ انعکاسی (در نور PPL) نشان می‌دهد مگنتیت‌های هماتیته شده (Hem) پیش از کانه‌زایی به صورت میانبار در کالکوپریت به دام افتاده است و (i) تصویر BSE نشان دهنده رورشدی مگنتیت بر فاز سولفیدی (کالکوپریت). علائم اختصاری برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) می‌باشد.

Fig. 3. Microscopic and backscattered electron images (BSE) showing the different types of magnetite in the Sarkuh porphyry deposit; (a) BSE image showing the magnetite (Mag) inclusion within magmatic biotite (Bi), (b-d) BSE images displaying pre-ore magnetite occurrence as aggregates which partly martitized and represent ilmenite exsolution in grain contacts, (e) Fine-grained magnetite (pre-ore magnetite) accompanied with k-feldspar (kfs) and biotite assemblages in the potassically altered rocks, (f) Reflect light microscopic image (PPL image) showing pre-ore martitized magnetite (hematite; Hem) occurred as inclusion within chalcopyrite, and (i) BSE image representing magnetite overgrowth on the sulfide phase (chalcopyrite). Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010).

جدول ۱- نتایج آنالیز EMPA مگنتیت‌های کانسار مس پورفیری سرکوه
Table 1. EMPA results of magnetites in the Sarkuh porphyry deposit.

Mag. Type	Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	CuO	Total
Mag1	SKP33-201_3	0.144	0.292	0.27	0.062	0.27	66.81	31.47	0.031	0.008	n.d	0.02	99.39
Mag1	SKP33-201_5	0.03	0.145	0.243	0.086	0.662	67.50	31.69	0.015	0.004	n.d	n.d	100.38
Mag1	SKP33-201_13	0.075	0.65	0.46	0.085	0.323	66.78	32.34	0.004	0.023	n.d	n.d	100.74
Mag1	SKP33-201_14	0.083	0.055	0.233	0.059	0.354	68.73	31.75	0.027	0.034	n.d	0.036	101.37
Mag1	SKP33-201_15	n.d	0.135	0.402	0.055	0.314	67.92	31.42	0.14	0.038	n.d	n.d	100.43
Mag1	SKP33-201_16	n.d	0.127	0.239	0.061	0.333	65.31	30.23	0.027	0.012	n.d	n.d	96.34
Mag1	SKP16-72_1	0.015	0.087	0.376	0.031	0.358	68.19	31.56	0.089	n.d	n.d	n.d	100.71
Mag1	SKP16-72_5	0.478	0.33	0.301	0.058	0.351	66.12	32.03	0.037	0.004	n.d	n.d	99.71
Mag1	SKP16-72_6	0.319	0.431	0.35	0.079	0.394	66.65	32.20	0.048	0.064	n.d	n.d	100.54
Mag1	SKP16-72_7	0.061	0.134	0.171	0.057	0.393	67.77	31.38	0.064	0.03	0.024	n.d	100.08
Mag1	SKP16-72_8	0.19	0.838	0.236	0.053	0.276	65.66	31.77	n.d	0.027	0.362	n.d	99.42
Mag1	SKP16-72_9	0.19	0.769	0.115	0.067	0.328	66.56	32.17	0.067	0.033	0.101	n.d	100.41
Mag1	SKP16-72_10	n.d	n.d	0.214	0.068	0.37	68.63	31.47	0.047	0.012	n.d	n.d	100.81
Mag1	SKP16-72_11	0.766	0.664	0.219	0.095	0.341	63.20	31.92	0.019	0.003	n.d	n.d	97.23
Mag2	SKP16-72_12	0.319	0.203	0.365	0.104	0.383	64.25	30.74	0.041	0.016	n.d	n.d	96.42
Mag2	SKP16-72_13	0.357	0.2	0.293	0.097	0.394	63.39	30.32	0.067	0.026	n.d	n.d	95.16
Mag2	SKP16-72_14	0.061	0.259	0.348	0.07	0.355	66.24	31.19	0.014	0.008	n.d	n.d	98.55
Mag2	SKP05-126_17	0.091	0.061	0.213	0.048	0.306	68.27	31.40	0.179	0.003	n.d	n.d	100.58
Mag2	SKP05-126_18	0.045	0.061	0.105	0.023	0.322	68.66	31.41	0.122	0.015	n.d	n.d	100.77

n.d = تشخیص داده نشده

پیشتر ذکر شد در کانسار مس پورفیری سرکوه رخداد اپیدوت عموماً همراه با دگرسانی پروپیلیتیک و در همراهی کلریت، کلسیت، سرسیت، اکتینولیت، پیریت، هماتیت و کانی‌های رسی است. علاوه بر این در هاله دگرسانی پتاسیک این کانسار، اپیدوت تنها به صورت ریزدانه در زمینه و به ویژه در همراهی آپاتیت، مونازیت و انیدریت قابل مشاهده است (شکل ۴a و b). بررسی طیف EDX اپیدوت‌های دگرسانی پتاسیک نشانگر غنی‌شدگی غیرعادی عناصر نادر خاکی نظیر La و Ce می‌باشد (شکل ۵a). علاوه بر این طیف EDX کانی‌های مونازیت نشان می‌دهد این کانی دارای درجات متغیر غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی است

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رخداد کانی‌های نادر در کانسار مس پورفیری سرکوه

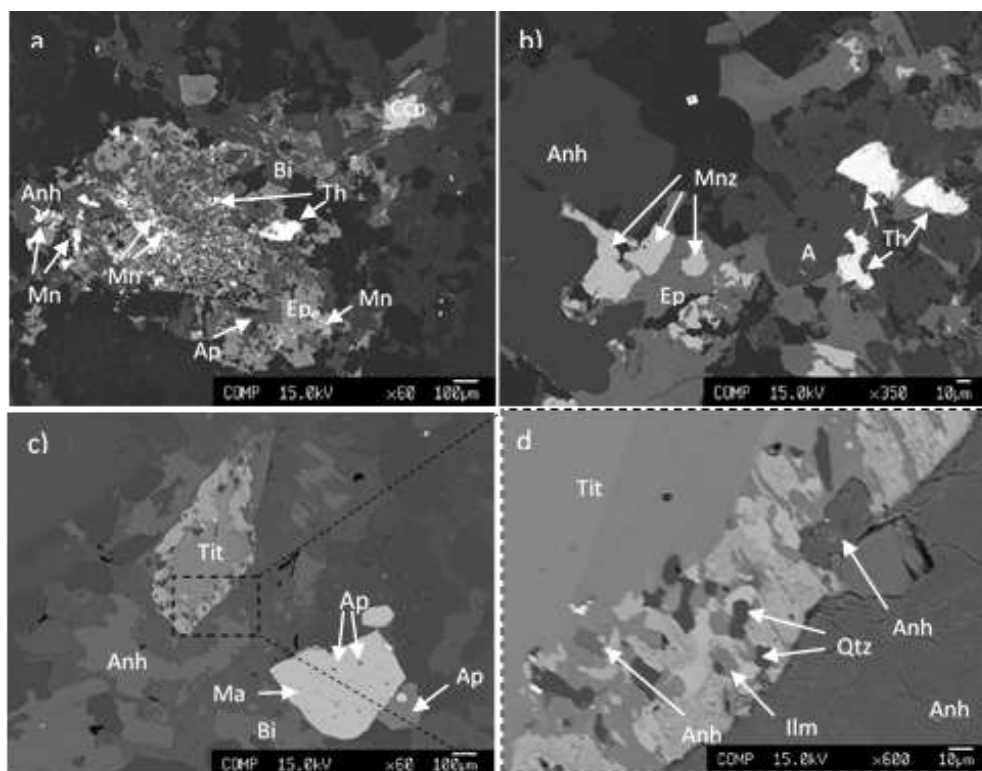
پetroگرافی نمونه‌های مس پورفیری سرکوه به همراه مطالعه تصاویر BSE و بررسی طیف EDX نشان‌دهنده رخداد کانی‌های نادر نظیر توریت، مونازیت، تیتانیت‌های سریم‌دار و اپیدوت-های غنی از عناصر نادر خاکی در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار می‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵). این کانی‌ها عموماً همراه با مجموعه‌های آپاتیت، انیدریت، مگنتیت، بیوتیت گرمابی، کوارتز، فلدسپار پتاسیم می‌باشند (شکل ۴a و b). همانطور که

Ca, Cu و Ni به صورت محدود، تنها در برخی از نقاط اندازه-گیری شده است. این موضوع به دلیل مقادیر به نسبت پایین این عناصر (پایین تر از حد تشخیص EMPA) می باشد، به نحوی که با انتخاب زمان خوانش زیاد (۱۰۰ ثانیه) نیز عملاً در عمده نقاط آنالیزی، این عناصر تشخیص داده نشده است (جدول ۱). این شاخصه در سایر مگنتیت های مربوط به دگرسانی پتاسیک ذخایر مس پورفیری بخش جنوبی کمربند ارومیه - دختر نیز گزارش شده است (Zarasvandi et al., 2019). در سامانه های مس پورفیری تنها مگنتیت هایی که از لحاظ پاراژنزی در ارتباط کانی های کربناتی نظیر کلسیت هستند دارای مقادیر قابل تشخیص Ca می باشد (Rezaei, 2017).

(شکل b۵). بویژه در مواردی که مونازیت ها در تماس با اپیدوت هستند، غنی شدگی در La مشاهده می گردد (شکل های b۴ و b۵). کانی تیتانیت در نمونه های سرکوه دارای Ce می باشند (شکل های c۴ و d۵). در مواردی کانی های تیتانیت در مرز تماس با انیدریت نشان دهنده حاشیه واکنشی چندفازی دارای کانی های ایلمنیت، کوارتز و انیدریت هستند (شکل d۴).

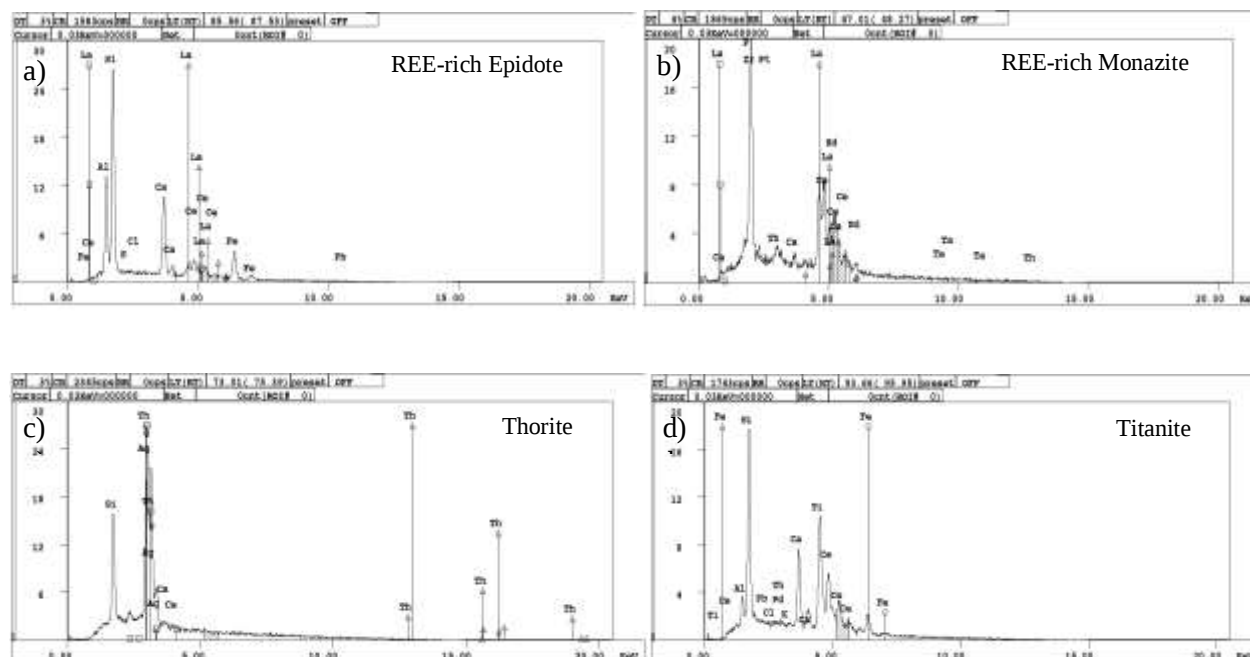
۴-۲- شیمی مگنتیت

بر مبنای نتایج ارائه شده در جدول ۱ مهم ترین عناصر موجود در نقاط آنالیزی مگنتیت های رخ داده همراه با کانی های نادر شامل Fe, Ti, V, Al, Si, Cr, Mn و Mg می باشد. در مقابل



شکل ۴- (a-b) تصاویر میکروسکوپی BSE مبین رخداد توریت (Th)، مونازیت (Mnz) و اپیدوت های غنی از عناصر نادر خاکی (Ep) (طیف EDX در شکل ۵ ارائه شده است) همراه با بیوتیت (Bi)، آپاتیت (Ap)، انیدریت (Anh) و کالکوپیریت (Ccp) در نمونه های پهنه دگرسانی پتاسیک کانسار سرکوه، (c) حاشیه واکنشی چند فازی شامل کانی های ایلمنیت (Ilm)، کوارتز (Qtz) و انیدریت در مجاورت تیتانیت سریم دار (Tit) با انیدریت و (d) تصویر c در بزرگنمایی بیشتر. علائم اختصاری برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰) می باشد.

Fig. 4. (a-b) Backscattered electron images (BSE) representing the occurrence of thorite (Th), monazite (Mnz), and REE-rich epidote (Ep) (EDX spectra presented in the Fig. 5) with biotite (Bi), apatite (Ap), anhydrite (Anh), and chalcopyrite (Ccp) in the potassic alteration samples of Sarkuh deposit, (c) polyphase reaction corona containing ilmenite (Ilm), Quartz (Qtz), and anhydrite in the contact area of Ce-bearing titanite (Tit) and anhydrite, and (d) Figure 5d under higher magnification. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010).

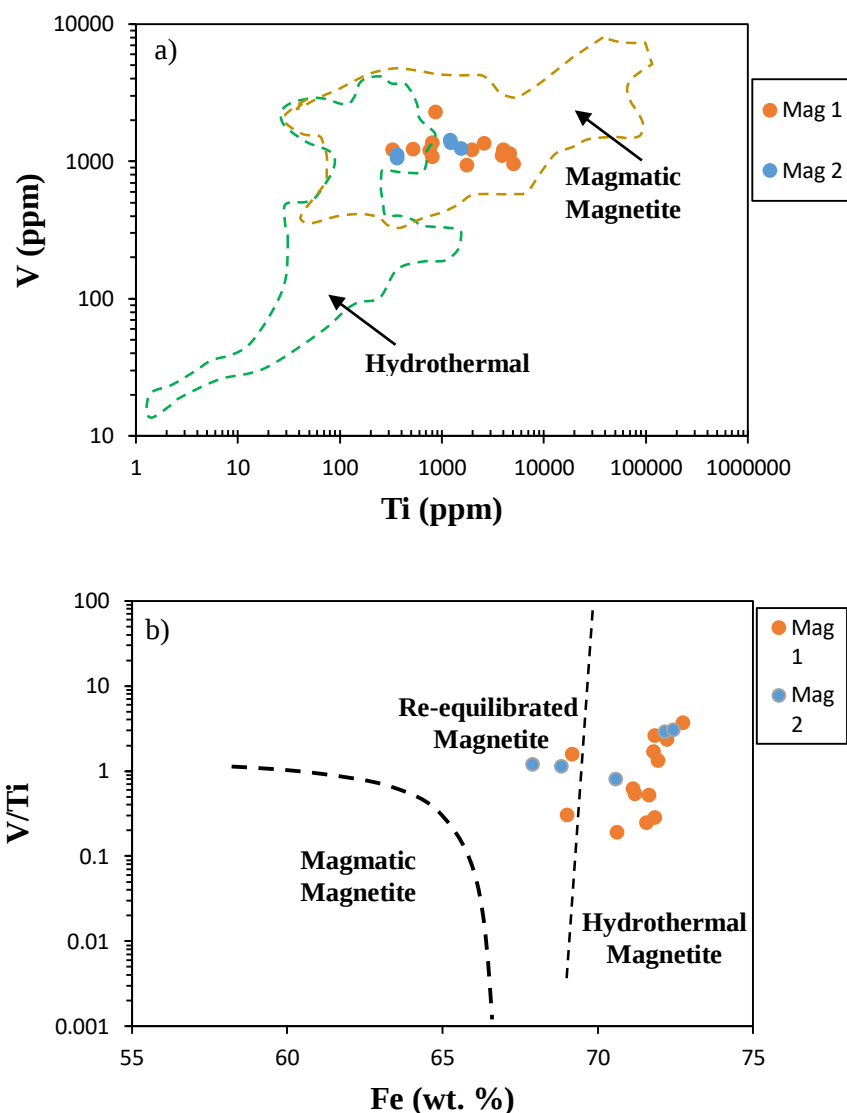


شکل ۵- (a-d) طیف EDX کانی‌های اپیدوت غنی از عناصر نادر خاکی، مونازیت غنی از عناصر نادر خاکی، توریت و تیتانیت سربوم‌دار (برای توضیحات به متن مراجعه گردد).

Fig. 5. (a-d) EDX spectra of REE-rich epidote, REE-rich monazite, thorite and Ce-bearing titanite (see text for explanations).

(۲۰۲۰) نشان داده در شرایط فوگاسیته اکسیژن بالاتر، مگنتیت‌ها واجد مقادیر کمتر وانادیم می‌باشند. در نمونه‌های مورد مطالعه مقادیر میانگین V در نقاط آنالیزی Mag 1 و Mag 2 تقریباً مشابه می‌باشد (به ترتیب میانگین ۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۴ درصد وزنی)، که این موضوع می‌تواند حاکی از وجود شرایط فوگاسیته اکسیژن یکسان طی تبلور Mag 1 و Mag 2 باشد. ترسیم نتایج بر روی نمودار دو متغیره V در مقابل Ti باشد. تفکیک کننده مگنتیت‌های ماگمایی از گرمایی می‌باشد نشان می‌دهد عمده نمونه‌ها در محدوده مشترک بین مگنتیت-های ماگمایی و گرمایی با تمایل به سمت محدوده ماگمایی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه مگنتیت‌های مربوط به مراحل تاخیری تر خروج سیال گرمایی در دگرسانی پتاسیک کانسارهای مس پورفیری، عمدتاً به سمت محدوده گرمایی نمودار V در مقابل Ti تمایل دارند (Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023)، می‌توان نتیجه گرفت این ویژگی نشان‌دهنده تبلور مگنتیت‌های مورد مطالعه در مراحل ابتدایی خروج سیالات ماگمایی-گرمایی در حین تکامل دگرسانی پتاسیک این کانسار می‌باشد (شکل ۵a).

در نمونه‌های آنالیز شده مقادیر مجموع Fe بین ۶۷/۹۱ تا ۷۲/۷۵ درصد وزنی متغیر است. بیشترین میزان میانگین Fe در Mag 1 مشاهده می‌شود (میانگین ۷۱/۳۷ درصد وزنی). در مقابل میانگین این عنصر در Mag 2 برابر با ۷۰/۳۹ درصد وزنی است. مطالعات پیشین نشان داده میزان Ti در ساختار مگنتیت می‌تواند تابع دما باشد، به نحوی که مگنتیت‌های متبلور شده در دماهای بالاتر واجد مقادیر بیشتر Ti در ساختار خود می‌باشند (Tian et al., 2021). بررسی میانگین مقادیر Ti در مگنتیت-های سرکوه نشان می‌دهد بیشترین میزان Ti در Mag 1 مشاهده می‌گردد (میانگین ۰/۱۹ درصد وزنی)، در مقابل Mag 2 واجد مقادیر کمتر Ti می‌باشد (میانگین ۰/۰۹ درصد وزنی). یکی دیگر از عناصر مهم در تفسیر شیمی مگنتیت وانادیم می‌باشد. یافته‌های پیشین نشان داده در محیط‌های احیایی V^{3+} در مقایسه با V^{4+} و V^{5+} نسبت به ساختار مگنتیت سازگارتر می‌باشد، در نتیجه از میزان وانادیم به عنوان سنجش فوگاسیته اکسیژن ماگما یا سیال گرمایی حین تبلور مگنتیت استفاده شده است (Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2014; Knipping et al., 2015). تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی داده‌های مگنتیت توسط Canil و Lacourse



شکل ۶- (a) نمودار دوتایی V در مقابل Ti. محدوده مگنتیت‌های گرمایی و ماگمایی بر گرفته از Nadoll و همکاران (۲۰۱۵) و Knipping و همکاران (۲۰۱۵) و (b) نمودار Fe در مقابل V/Ti، برگرفته از Wen و همکاران (۲۰۱۷).

Fig. 6. Binary plot of V vs. Ti. Fields of hydrothermal and magmatic magnetite after Nadoll et al. (2015) and Knipping et al. (2015) and Fe vs. V/Ti diagram after Wen et al. (2017).

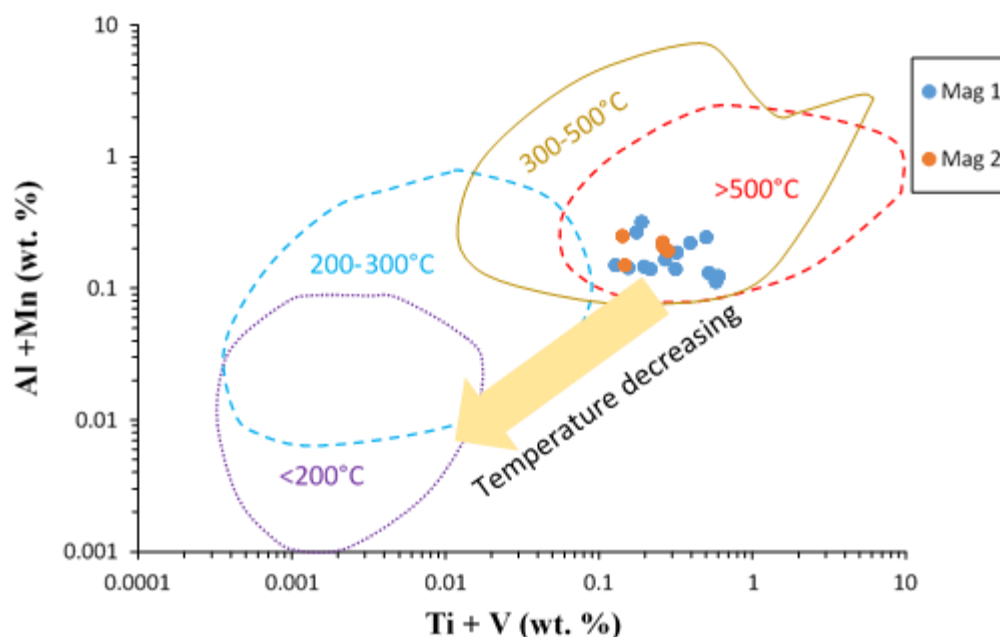
V/Ti ترسیم شدند (شکل ۶b). همانطور که در شکل ۶b مشخص شده است، تنها در تعداد محدودی از نقاط آنالیزی، مگنتیت‌های مورد مطالعه از لحاظ ژئوشیمیایی رخداد تعادل مجدد را نشان می‌دهند (شکل ۶b). شایان ذکر است در پیکربندی نمودار ۶b، محدوده ماگمایی بر اساس شیمی مگنتیت در ولکانیک‌های فلسیک و مافیک، بدون حضور سیالات گرمایی بدست آمده است. اما در مقابل محدوده گرمایی بر اساس شیمی مگنتیت در سامانه‌های کانه‌زایی دارای سامانه گرمایی

در سامانه‌های مس پورفیری با توجه به مراحل مختلف خروج سیالات گرمایی طی تکامل سامانه ماگمایی-گرمایی، ممکن است شیمی مگنتیت‌ها، پس از تبلور طی برهمکنش با سیالات گرمایی تاخیری تر دستخوش تغییر شود و عملاً سرشت اولیه مگنتیت‌ها تغییر یابد. همچنین بررسی‌ها نشان داده در این صورت مقادیر Mg ، Ca ، Al و Mn و Ti دستخوش تغییر خواهد شد (Hu et al., 2014). به منظور بررسی این مساله، داده‌های مگنتیت سرکوه بر روی نمودار دو متغیره Fe در مقابل

مگنتیت‌ها طی مراحل اولیه تکامل سیال گرمایی در زون دگرسانی پتاسیک این کانسار می‌باشد. بررسی میزان Mg در مگنتیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد میزان این عنصر در Mag 1 و Mag 2 تقریباً مشابه می‌باشد (به ترتیب میانگین ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۳ درصد وزنی). علاوه بر این میانگین Si نیز در نمونه‌های مورد مطالعه از Mag 1 و Mag 2 نیز تقریباً مشابه می‌باشد (به ترتیب ۰/۰۷۸ و ۰/۰۸۱ درصد وزنی). به منظور بررسی علت این تغییرات، نمونه‌ها بر روی نمودار Ti در مقابل Mg + Al + Si ترسیم شدند (شکل ۸؛ Tian et al., 2021). همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نمونه‌های مورد مطالعه فاقد روند شاخص افزایش واکنش سیال گرمایی و سنگ دیواره می‌باشد که به نوعی دلالت بر تبلور این مگنتیت‌ها در آغاز تکامل سامانه ماگمایی گرمایی این کانسار دارد.

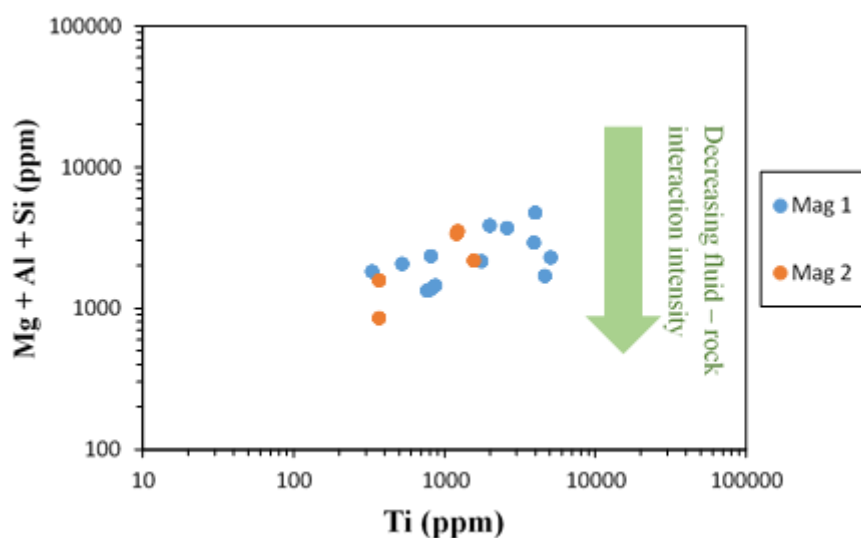
مشخص نظیر ذخایر اسکارن و مس پورفیری به دست آمده است (Wen et al., 2017). بر اساس این نمودار عمده نقاط آنالیز در محدوده مگنتیت گرمایی ترسیم شده است که نشانگر نقش سیال گرمایی در حین تبلور مگنتیت‌های مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۶b).

بررسی مقادیر Al در مگنتیت‌های مورد مطالعه نشان دهنده وجود میانگین مشابه این عنصر در Mag 1 و Mag 2 می‌باشد (میانگین ۰/۱۴ درصد وزنی). در مگنتیت‌های آنالیز شده میانگین Mn در Mag 1 و Mag 2 به ترتیب برابر ۰/۰۳۴، ۰/۰۶۵ درصد وزنی می‌باشد. به منظور سنجش دمای تشکیل نمونه‌های مگنتیت مورد مطالعه، داده‌های مگنتیت بر روی نمودار Ti + V در مقابل Al + Mn ترسیم شده‌اند (شکل ۷). این نمودار نشان می‌دهد تمامی نقاط آنالیزی مربوط به مگنتیت‌های مورد مطالعه (Mag 1 و Mag 2) در محدوده دمای بالا ($< 500^{\circ}\text{C}$) ترسیم شده‌اند. سرشت دما بالای مگنتیت‌های مورد مطالعه می‌تواند تائید کننده تبلور این



شکل ۷- نمودار Ti + V در مقابل Al + Mn نشان دهنده محدوده دمایی تبلور مگنتیت‌های تشکیل شده همراه با کانی‌های نادر در کانسار مس پورفیری سرکوه. محدوده دمایی برگرفته از Nadoll و همکاران (۲۰۱۴) و Deditus و همکاران (۲۰۱۸).

Fig. 7. Ti + V vs. Al + Mn diagram represents temperature domains of magnetite which accompanied with rare minerals crystallization in the Sarkuh porphyry deposit. Temperature domains after Nadoll et al. (2014) and Deditus et al. (2018).



شکل ۸- ترسیم نتایج آنالیز مگنتیت‌های همراه با کانی‌های نادر بر روی نمودار دوتایی Ti در مقابل Mg + Al + Si به منظور سنجش نرخ واکنش سیال و سنگ دیواره. نمودار پایه برگرفته از Tian و همکاران (۲۰۲۱).

Fig. 8. Ti vs. Mg + Al + Si binary diagram for assessing the rate of fluid – rock interaction in the magnetites accompanied with rare minerals. Base diagram after Tian et al. (2021).

۳-۴- بررسی نقش فوگاسیته اکسیژن در رخداد کانی-های نادر

مطالعات نشان داده وجود سامانه ماگمایی اکسیدان بویژه در محدوده بافری مگنتیت - هماتیت (Sun et al., 2015) $\sim \Delta FMQ+4$ ، که تا دگرسانی پتاسیک نیز امتداد یافته، یکی از پارامترهای مهم ارتقاء دهنده کانه‌زایی سولفیدی در سامانه‌های مس پورفیری می‌باشد (Richards, 2011). لازم به ذکر است پارامترهای ماگمایی - گرمایی متعدد دیگری نیز وجود دارند که در ارتقاء پتانسیل کانه‌زایی سامانه مس پورفیری نقش آفرین هستند (مانند محتوای آب ماگمایی، میزان گوگرد، درجه ذوب بخشی، عمق ذوب بخشی، فاصله از محور فروانش، سرشت سیالات گرمایی و تکامل دمایی سامانه گرمایی؛ Karimpour and Sadeghi, 2019). البته باید توجه داشت که امروزه کانسارهای مس پورفیری در ارتباط با سامانه‌های ماگمایی احیایی نیز گزارش شده‌اند که عموماً فاقد درجات قابل توجه کانه‌زایی سولفیدی می‌باشند (مانند کانسار مولیدن پورفیری Junggar در شمال غرب چین، Cao et al., 2020). به طور کلی وجود شرایط ماگمایی-گرمایی اکسیدان که تا بخشی از دگرسانی پتاسیک نیز امتداد می‌یابد از عوامل مهم نگهداشت غلظت بالای گوگرد در سامانه‌های ماگمایی-گرمایی می‌باشد.

(Richards, 2011; Sun et al., 2015). زیرا در مقایسه با شکل احیایی (H_2S)، گوگرد به راحتی به شکل سولفات (SO_4) طی صعود و جایگیری، همراه با ماگما منتقل می‌گردد. از جمله این شواهد می‌توان به وجود شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا، نزدیک به محدوده بافری مگنتیت - هماتیت در حین مراحل ماگمایی و شروع دگرسانی پتاسیک سامانه‌های مس پورفیری، رخداد انیدریت و مگنتیت‌های دارای حاشیه هماتیته شده در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک اشاره نمود (شکل‌های e۲-f و d۳). لازم به ذکر است این شواهد در سیالات درگیر اولیه (سیالات درگیر به دام افتاده در مراحل اولیه تکامل سامانه ماگمایی-گرمایی) نیز مشاهده می‌گردد (Zarasvandi et al., 2019). مطالعات لیزر اسپکتروسکوپی رامان بر روی سیالات درگیر اولیه برخی از سامانه‌های مس پورفیری دارای کانه‌زایی قابل توجه (نظیر کانسار مس پورفیری میدوک) نیز نشان داده، رگه‌های اولیه (پیش از کانه‌زایی اصلی) این کانسارها حاوی سیالات درگیری هستند که همزمان دارای فازهای دختر هماتیت، مگنتیت و انیدریت می‌باشند (Asadi et al., 2013; Wang et al., 2017; Zarasvandi et al., 2019). رخداد همزمان هماتیت، مگنتیت و انیدریت، همچنین ثبت دماهای بالا (بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد) و نرخ پایین واکنش سیال گرمایی و

سنگ دیواره (شکل‌های ۷ و ۸) نشانگر وجود شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا طی مراحل آغازین تکامل سامانه ماگمایی سرکوه بوده که با رخداد کانی‌های نادر نیز همراه شده است.

۴-۴- پتانسیل‌های اکتشافی پنهان ذخایر مس پورفیری کمر بند ارومیه - دختر

کانسارهای مس پورفیری ایران عموماً برای استخراج مس، مولیبدن و طلا مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. بررسی پتروگرافی نمونه‌های دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری سرکوه به همراه بررسی دقیق طیف EDX کانی‌ها، نشان دهنده رخداد غیر معمول اپیدوت‌های غنی از عناصر نادر خاکی نظیر La و Ce در کانی‌های این دگرسانی می‌باشد. همچنین درجات مختلف غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در موناژیت‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار دیده می‌شود. کانی‌های تیتانیت نیز واجد غنی‌شدگی Ce می‌باشند. این موضوع نشان دهنده وجود پتانسیل‌های پنهان اکتشافی در کانسارهای مس پورفیری کمر بند ارومیه - دختر می‌باشد که نیازمند بررسی‌های بیشتر در مطالعات آتی است (شکل ۵). این نکته بسیار حائز اهمیت می‌باشد، چراکه پژوهش‌های اخیر بر مبنای داده‌های جدید سن‌سنجی بر روی سامانه‌های مس پورفیری دارای کانه‌زایی در بخش‌های جنوبی زون ارومیه - دختر (از جمله پورفیری سرکوه) نشان داده این پورفیری‌ها در یک محیط برخوردی در بازه زمانی ۱۷ تا ۳/۶ میلیون سال قبل (ابتدای میوسن تا ابتدای پلیوسن) جایگیر شده‌اند. ماگمای مولد این سامانه‌ها عموماً دارای منشأ واحدی بوده و از ذوب بخشی جبهه لیتوسفری تغییر یافته از مواد حاصل از فرورانش (Subduction modified lithospheric mantle) حاصل شده است (Asadi et al., 2014; Asadi, 2018; Zarasvandi et al., 2018). علاوه بر این، مطالعه Zarasvandi و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داده با توجه به مقادیر بالای نسبت Sr/Y و La/Yb به همراه روند افزایشی در مقادیر Sm/Yb و نیز تغییرات آنومالی Eu از ۰/۷۷ تا ۱/۳۵، سامانه ماگمایی کانسار مس پورفیری سرکوه آبدار (و اکسیدان) و دارای سرشت شبه آداکیتی می‌باشد. این ویژگی‌ها مشابه با سایر ذخایر مس پورفیری رخنمون یافته در کمر بند ارومیه - دختر (نظیر سرچشمه، میدوک و چاه فیروزه) می‌باشد (Zarasvandi et al., 2015). شاید بتوان گفت، با توجه به وجود سامانه‌های ماگمایی تقریباً یکسان برای

کانسارهای مس پورفیری ارومیه - دختر، به ویژه ذخایری که در بازه زمانی ۱۷ تا ۳/۶ میلیون سال قبل جایگیر شده‌اند، کانی‌های نادر شاخص‌سازی شده در زون دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری سرکوه، قابل ردیابی در سایر ذخایر مس پورفیری کمر بند ارومیه - دختر نیز باشند. البته این موضوع نیازمند انجام مطالعات بیشتر در این خصوص می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

کانسار مس پورفیری سرکوه در بخش جنوبی کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر واقع شده است. همانند سایر ذخایر مس پورفیری دارای کانه‌زایی قابل توجه این کمر بند (نظیر پورفیری-های سرچشمه و میدوک)، ماگمای آداکیتی، اکسیدان و غنی از آب مولد کانه‌زایی در این کانسار، بر اثر از ذوب بخشی گوشته لیتوسفری تغییر یافته از مواد حاصل از فرورانش بوجود آمده است. در این کانسار نفوذ استوک‌های با ترکیب گرانیتی - گرانودیوریتی باعث رخداد دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک، به همراه دگرسانی‌های حدواسط شامل پتاسیک - آرژیلیک و پتاسیک - فلیک شده است. از نظر ابعاد، دگرسانی پتاسیک در این کانسار دارای گسترش قابل توجه بوده و آثار آن (رخداد مگنتیت، بیوتیت‌های گرمایی و انیدریت) تا اعماق حدود ۵۰۰ متری نیز مشهود می‌باشد. با توجه به وجود منشأ ماگمایی یکسان در پورفیری‌های بارور بخش جنوبی کمر بند ارومیه - دختر، به نظر می‌رسد رخداد غیر معمول اپیدوت‌های غنی از عناصر نادر خاکی نظیر La و Ce، موناژیت - های غنی از عناصر نادر خاکی و نیز تیتانیت‌های واجد غنی - شدگی Ce که در کانسار مس پورفیری سرکوه شناسایی شد، در سایر ذخایر مس پورفیری کمر بند ارومیه - دختر، بویژه کانسارهای بخش جنوبی نیز قابل ردیابی باشد. با توجه به رخداد این کانی‌ها با مگنتیت‌های دارای حاشیه هماتیستی و جدایش تیغه‌های ایلمنیتی (به ترتیب Mag 1 و Mag 2) از شیمی مگنتیت به منظور شاخص‌سازی شرایط فیزیکوشیمیایی شرایط تبلور این کانی‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد این کانی‌ها در مراحل آغازین تکامل سامانه گرمایی این کانسار، از یک سیال ماگمایی - گرمایی دما بالا (بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) و اکسیدان (نزدیک محدوده بافری مگنتیت - هماتیت) طی شرایط نرخ پایین واکنش سیال و سنگ دیوار متبلور شده‌اند. عمده رخداد این کانی‌ها مربوط به مراحل پیش از کانه‌زایی سولفیدی می‌باشد.

مراجع

- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z., Zhou, L., 2015. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews* 70, 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Asadi, S., 2018. Triggers for the generation of post-collisional porphyry Cu systems in the Kerman magmatic copper belt, Iran: New constraints from elemental and isotopic (Sr-Nd-Hf-O) data. *Gondwana Research* 64, 97–121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>
- Asadi, S., Moore, F., Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: a review. *Earth-Science Reviews* 138, 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>
- Asadi, S., Moore, F., Zarasvandi, A., Khosrojerdi, M., 2013. First report on the occurrence of CO₂-bearing fluid inclusions in the Meiduk porphyry copper deposit, Iran: implications for mineralization processes in a continental collision setting. *Geologos* 19, 301–320. <https://doi.org/10.2478/logos-2013-0019>
- Canil, D., Lacourse, T., 2020. Geothermometry using minor and trace elements in igneous and hydrothermal magnetite. *Chemical Geology* 541, 119576. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119576>
- Cao, C., Shen, P., Pan, H., Zheng, L., Li, C., Feng, H., 2020. The formation mechanism of reduced porphyry Mo deposits in the West Junggar region, Xinjiang: The Suyunhe example. *Ore Geology Reviews* 117, 103286. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103286>
- Deditius, A.P., Reich, M., Simon, A.C., Suvorova, A., Knipping, J., Roberts, M.P., Rubanov, S., Dodd, A., Saunders, M., 2018. Nanogeochemistry of hydrothermal magnetite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1474-1>
- Dupuis, C., Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita* 46, 319–335. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0334-y>
- Hu, H., Li, J.W., Lentz, D., Ren, Z., Zhao, X.F., Deng, X.D., Hall, D., 2014. Dissolution-reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: Insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite. *Ore Geology Reviews* 57, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.07.008>
- Kaniran Consulting Company, 2008. Final report on the geology and alteration of Sarkuh region in 1:5000 scale, P. 256.
- Karimpour, M.H., Sadeghi, M., 2019. A new hypothesis on parameters controlling the formation and size of porphyry copper deposits: Implications on thermal gradient of subducted oceanic slab, depth of dehydration and partial melting along the Kerman copper belt in Iran. *Ore Geology Reviews* 104, 522–539. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.022>
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wälle, M., Heinrich, C.A., Holtz, F., Munizaga, R., 2015. Trace elements in magnetite from massive iron oxide apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 171, 15–38. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.08.010>
- McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Fu, F.Q., Garwin, S., 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58, 467–498. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.18>
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D., Walshe, J., 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews* 61, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., Koenig, A.E., 2015. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita* 50, 493–515. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0539-y>
- Nourali, S., Mirnejad, H., 2012. Hydrothermal evolution of the Sarkuh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: a fluid inclusion and sulfur isotope investigation. *Geopersia* 2, 93–107. <https://doi.org/10.22059/JGEOPE.2012.29234>
- Rezaei, M., 2017. Effective Parameters in Mineralization Potential of Economic And Subeconomic Porphyry Copper Deposits in Urumieh- Dokhtar Magmatic Zone: Using Geochemical And Fluid Inclusion Studies. Ph.D thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz.

- Rezaei, M., Zarasvandi, A., 2020. Titanium-in-biotite thermometry in porphyry copper systems: challenges to application of the thermometer. *Resource Geology* 70, 157–168. <https://doi.org/10.1111/rge.12227>
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews* 40, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology* 105, 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sun, W., Huang, R., Li, H., Hu, Y., Zhang, C., Sun, S., Zhang, L., Ding, X., Li, C., Zartman, R.E., Ling, M., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews* 65, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004>
- Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G., Berador, A.E., 2021. Genesis, geochemical evolution and metallogenic implications of magnetite: Perspective from the giant Cretaceous Atlas porphyry Cu–Au deposit (Cebu, Philippines). *Ore Geology Reviews* 133, 104084. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104084>
- Wang, Y.H., Zhang, F.F., Li, B.C., 2017. Genesis of the Yandong porphyry Cu deposit in eastern Tianshan, NW China: evidence from geology, fluid inclusions and isotope systematics. *Ore Geology Reviews* 86, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.020>
- Wen, G., Li, J.W., Hofstra, A.H., Koenig, A.E., Lowers, H.A., Adams, D., 2017. Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 213, 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.043>
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zarasvandi, A., Heidari, M., Rezaei, M., Raith, J., Asadi, S., Saki, A., Azimzadeh, A., 2019b. Magnetite chemistry in the porphyry copper systems of Kerman Cenozoic magmatic arc, Kerman, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 43, 839–862. <https://doi.org/10.1007/s40995-019-00677-6>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S., Lentz, D.R., 2019. Hydrothermal fluid evolution in collisional Miocene porphyry copper deposits in Iran: Insights into factors controlling metal fertility. *Ore Geology Reviews* 105, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.027>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Pourkaseb, H., Asadi, S., Saed, M., Lentz, D.R., 2018. Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfide s of mineralized porphyry copper systems, Urumieh-Dokhtar magmatic arc. *Iran Geochimica et Cosmochimica Acta* 223, 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.11.012>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Taheri, M., Asadi, S., Heidari, M., 2023. Magnetite chemistry of the Sarkuh Porphyry Cu deposit, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran: A record of deviation from the path sulfide mineralization in the porphyry copper systems. *Journal of Geochemical Exploration* 249, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107213>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M., Pourkaseb, H., 2015. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews* 70, 407–423. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.010>
- Zarasvandi, A., Taheri, M., Rezaei, M., Raith, J., 2022. Investigation of the behavior of rare earth elements and trace elements in Sarkuh porphyry copper deposit, Kerman, Iran. *Advanced Applied Geology* 11(4), 690–709. <https://doi.org/10.22055/AAG.2021.35086.2166>