

Original Research Paper

Occurrence and chemistry of magnetite in the Iju porphyry Cu deposit, southern part of Urumieh-Dokhtar magmatic belt

Mohsen Rezaei^{1*}, Alireza Zarasvandi¹, and Sima Basious¹¹Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 May 24

Accepted: 2023 July 29

Available online: 2024 March 20

Keywords:

Porphyry Cu deposit

Iju

Magnetite chemistry

Potassic alteration

Sulfide mineralization

Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB)

ABSTRACT

Iju porphyry deposit is associated with the emplacement of Miocene tonalite-granodiorite intrusions (zircon U/Pb dating; 9.27 ± 0.50) within Eocene volcanic and pyroclastic sequences including andesite, basaltic andesite, trachyandesite, andesitic breccias, tuffaceous breccias, and agglomerate. In this study, occurrence and chemistry of magnetites in the potassic alteration of Iju deposit were assessed using EMPA analysis. The findings imply for a limited occurrence of magnetite as fine-grained disseminated and/or product of biotite chloritization. Magnetites associated with potassic alteration of Iju deposit don't show hematite intergrowth (as martitized margin) and anhydrite paragenesis, indicating the lack of high oxygen fugacity (near magnetite-hematite buffers; $\sim \Delta FMQ+4$) during the magnetite crystallization in the potassic alteration. Studied magnetites are high temperature (>500 °C) and according to the Mg + Al + Si contents crystallized under low rate of fluid rock interaction. These evidences accompanied with the absence of reequilibration processes could imply for the lack of repeated stages of hydrothermal fluid exsolving during the evolution of potassic alteration in the in the Iju deposit. Additionally, results represent that there are considerable values of Ga (average; 0.015 wt. %) in the studied magnetites providing insights into the presence of unseen exploration potentials associated with porphyry Cu deposits of UDMB.

1. Introduction

Magnetite is an accessory mineral in many igneous and metamorphic rocks (Nadoll et al., 2015). Also, this is an ore mineral found in a broad range of deposits, i.e., skarn, Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG), Kiruna-type, Banded


Iron Formation (BIF), magmatic Fe-Ti oxides and porphyry Cu systems (Hu et al., 2014). In the porphyry Cu deposits, magnetites are generally crystallized in the ore-hosting intrusions and/or through hydrothermal-stages evolution,

* Corresponding author: Mohsen Rezaei; E-mail: m.rezaei@scu.ac.ir

Citation:

Rezaei, M., Zarasvandi, A. R., and Basious, S., 2024. Occurrence and chemistry of magnetite in the Iju porphyry Cu deposit, southern part of Urumieh-Dokhtar magmatic belt. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 34(1), 131, 67-80. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.398882.2092>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2023.398882.2092

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.1.5.9



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

especially in the potassic alteration (Richards, 2011). There are many ore-forming variables directly affecting the fertility of porphyry systems, e.g., magmatic water content, sulfur content, degree of partial melting, thermal history, distance to the arc axis with nature of hydrothermal fluids, and oxidized magmatic systems extended to the early stages of hydrothermal fluid evolution (Sun et al., 2015; Karimpour and Sadeghi, 2019). The latter is very important regarding the increasing the metal fertility of porphyry systems, because under high oxygen fugacity conditions, hydrogen sulfide could not be segregated and therefore sulfur content (and chalcophile elements; Cu and Mo) could be preserved in the magmatic and early stages of hydrothermal evolution (Richards, 2011; Sun et al., 2015). In the porphyry Cu deposits, most of the sulfide mineralization is associated with potassic alteration (Richards, 2011). Hence, physicochemical attributes of potassic alteration could be linked to the metal fertility potential of porphyry Cu systems. Many cations could incorporate in the spinel structure of magnetite. On the other hand, many important ore forming variables, e.g., temperature, oxygen fugacity, and rates of fluid-rock interaction could influence on the substitution of cations in the magnetite structure (e.g., Nadoll et al., 2015; Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023b). These features make the magnetite an important tool for deciphering the physicochemical attributes of hydrothermal alteration and mineralization in the porphyry Cu systems (e.g., Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023b). Considering these points, the present study focused on the occurrence and chemical features of magnetites associated with potassic alteration of Iju porphyry Cu deposit.

In the Iju deposit, Miocene (9.27 ± 0.50 Ma; zircon U/Pb dating; Mirnejad et al., 2013) ore-hosting intrusions range in composition for tonalite to granodiorite are emplaced within Eocene volcanic and pyroclastic sequences, consisting of andesite and andesite-basalt as well as trachyandesite with andesitic breccias, tuffaceous breccias, tuff and agglomerate associations. Potassic alteration of the Iju deposits is dominated by the occurrence of hydrothermal biotites. In these samples, plagioclase and hornblende phenocrysts are partly to completely replaced with biotite. Additionally, most of the magmatic and hydrothermal biotites undergone chloritization, which lead to the occurrence of magnetite. Iju magnetites mostly occurred as small discreet phenocrysts with no presence of hematite at margins.

2. Research methodology

Samples were taken from core drillings of Iju porphyry

deposit (borehole No: IJU-19 and IJU-21). Electron probe microanalyzer (EPMA) studies were carried out on the carbon-coated thin-polished sections, using a Superprobe Jeol JXA 8200 instrument in the Eugen F. Stumpfl Laboratory, Chair of Resource Mineralogy, Montanuniversität Leoben, Austria. Measurements were done under the accelerating voltage of 15kv, beam size 1 μm and 10 nA beam current. The detection limit (in wt.%) as calculated by the instrument software includes: 0.023 for Fe and Mn, 0.019 for Ti, 0.027 for V, 0.01 for Al, 0.012 for Mg, and 0.024 for Cr.

3. Results and discussions

Based on the EMPA results, the most important elements measured in the analyzing points include Al, Fe, Mg, Cr, Ti, Cr, and V, on the contrary, Ni, Cu, Co, Zn and Ga are detectable only in some limited points. Projection of samples on the Fe (wt. %) vs. V/Ti diagram (Wen et al., 2017) confirmed that studied magnetites are of hydrothermal origin with no geochemical signs of re-equilibration during the magnetite crystallization. Also, comparing the Al + Mn vs. Ti + V (wt. %) contents of studied magnetites with temperature domains of Nadoll et al. (2014) and Deditus et al. (2018) imply for the prevailing of high temperature conditions ($>500^\circ\text{C}$) during the magnetite crystallization. Additionally, low content of Mg + Al + Si values could be linked to the low rates of fluid-rock interaction in the hydrothermal fluids responsible for magnetite crystallization (Tian et al., 2021). Based on petrographic observations, studied magnetites are not accompanied with sulfate paragenesis (i.e., anhydrite) and they have not hematite intergrowth (i.e., martitized margin) indicating the lack of very high oxygen fugacity conditions ($\sim\Delta\text{FMQ}+4$; Sun et al., 2015) during the magnetite crystallization. Presented data confirmed that studied magnetites may contain considerable gallium values (average; 0.015 wt. %) which most probably contributed to the tetrahedral sites of magnetite by alumina substitution. This evidence highlights the unseen potentials of porphyry Cu deposits of UDMB for strategic metals.

4. Conclusion

Iju porphyry Cu deposit is related to the emplacement of Miocene tonalite-granodiorite intrusions in the southern part of UDMB. Potassic alteration of this deposit is not developed, but contains the most of sulfide mineralization (e.g., pyrite and chalcopyrite). Petrographic observation reveals that this is characterized by widespread occurrence of hydrothermal biotite undergone somewhere by chloritization. Based on the

EMPA results, magnetites of Iju were crystallized by high temperature hydrothermal fluids under low rates of fluid-rock interaction. It seems that inability of hydrothermal system for cooling is related to the lower mineralization efficiently in the potassic alteration of Iju porphyry Cu

deposit. Magnetites of potassic alteration in the Iju deposit contain considerable gallium contents highlighting the unseen potential of porphyry Cu systems in the UDMB for strategic metals, however much more works are needed for better characterizing this feature.

رخداد و شیمی مگنتیت در کانسار مس پورفیری ایجو، بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر

محسن رضایی^{۱*}، علیرضا زراسوندی^۱ و سیما باسیوس^۱^۱ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

کانسار مس پورفیری ایجو در ارتباط با جایگیری نفوذی‌های میوسن ($9/27 \pm 0/50$ میلیون سال؛ سن سنجی اورانیم - سرب زیرکن) با ترکیب تونالیت تا گرانودیوریت به درون واحدهای آتشفشانی (ولکانیکی) و آذرآواری (پیروکلاستیکی) انوسن عمدتاً شامل آندزیت، آندزیت بازالت، تراکی آندزیت، برش‌های آندزیتی، برش‌های توفی، توف و آگلومرا می‌باشد. در این مطالعه، رخداد و شیمی مگنتیت در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان‌دهنده رخداد محدود مگنتیت به صورت دانه پراکنده و یا به صورت محصول فرایند کلریتی شدن بیوتیت در پهنه دگرسانی پتاسیک می‌باشد. مگنتیت‌های پهنه دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو فاقد هم‌رشدی هماتیت (به صورت حاشیه مارتیتی) و پاراژنز انیدریت بوده که گویای نبود شرایط فوگاسیته اکسیژن خیلی بالا (نزدیک به محدوده بافری هماتیت - مگنتیت؛ $4 + \Delta FMQ$) در حین تبلور مگنتیت در پهنه دگرسانی پتاسیک می‌باشد. مگنتیت‌های مورد مطالعه دما بالا بوده (تا بیشتر از $500^\circ C$) و همچنین بر مبنای مقادیر $Mg + Al + Si$ طی شرایط نرخ پایین واکنش سیال گرمایی و سنگ دیواره متبلور شده‌اند. این شواهد به همراه عدم رخداد تعادل مجدد در مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو، احتمالاً دلالت بر عدم وجود دفعات متعدد خروج سیال گرمایی طی تکامل دگرسانی پتاسیک این کانسار و در نتیجه عدم توسعه قابل توجه آن در این کانسار دارد. همچنین شواهد نشان‌دهنده وجود مقادیر قابل توجه کالیم (میانگین $0/15$ درصد وزنی) در ساختار مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری ایجو می‌باشد که نشان‌دهنده وجود پتانسیل‌های اکششافی ناشناخته برای عناصر کمیاب راهبردی (استراتژیک) همراه با ذخایر مس پورفیری کمربند ارومیه - دختر می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسار مس پورفیری

ایجو

شیمی مگنتیت

دگرسانی پتاسیک

کانه‌زایی سولفیدی

کمربند ماگمایی ارومیه-دختر

۱- پیش‌نوشتار

پارامترهای مهم ارتقادهنده کانه‌زایی سولفیدی در سامانه‌های مس پورفیری می‌باشد (Richards, 2011)، هر چند پارامترهای ماگمایی - گرمایی متعدد دیگری نیز وجود دارند که در ارتقای پتانسیل کانه‌زایی سامانه‌های مس پورفیری نقش آفرین هستند (به عنوان مثال؛ محتوای آب ماگمایی، میزان گوگرد، درجه ذوب بخشی، ژرفای ذوب بخشی، فاصله از محور فرورانش، سرشت سیال‌های گرمایی و تکامل حرارتی سامانه گرمایی؛ (Karimpour and Sadeghi, 2019)). البته باید توجه داشت که امروزه رخداد محدودی از کانسارهای مس پورفیری در ارتباط با سامانه‌های ماگمایی احیایی نیز گزارش شده‌اند که این ذخایر عموماً فاقد درجات شایان توجه کانه‌زایی می‌باشند (مانند کانسار مولیبدن پورفیری Junggar در شمال باختر چین؛ (Cao et al., 2020)).

مگنتیت به عنوان یک کانه فرعی در بسیاری از سنگ‌های آذرین و دگرگونی یافت می‌شود (Nadoll et al., 2015). همچنین، این کانه در طیف گسترده‌ای از ذخایر معدنی از جمله اسکارن، IOCG (Iron - Oxide - Copper - Gold)، ذخایر نوع کایرونا، سازندهای آهن نواری (BIF: Banded Iron Formation)، ذخایر ماگمایی اکسید آهن - تیتانیم و نیز ذخایر مس پورفیری یافت می‌شود (Hu et al., 2014). در ذخایر مس پورفیری بخش عمده تبلور مگنتیت در فاز ماگمایی و نیز همراه با دگرسانی پتاسیک می‌باشد (Richards, 2011). مطالعات نشان داده وجود سامانه ماگمایی اکسیدان به‌ویژه در محدوده بافری مگنتیت - هماتیت ($4 + \Delta FMQ$) (Sun et al., 2015)، که تا مراحل آغازین دگرسانی پتاسیک نیز امتداد یافته، از

* نویسنده مسئول: محسن رضایی؛ E-mail: m.rezaei@scu.ac.ir

ماخذنگاری:

رضایی، م.، زراسوندی، ع.ز. و باسیوس، س.، ۱۴۰۳، رخداد و شیمی مگنتیت در کانسار مس پورفیری ایجو، بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۱)، ۱۳۱-۱۳۷. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.398882.2092>

doi: 10.22071/gsj.2023.398882.2092

doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.1.5.9

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/>)

IJU21 و IJU23 کانسار مس پورفیری ایجو با تاکید بر دگرسانی پتاسیک انجام شد. در ادامه ترکیب زمین شیمیایی مگنتیت در مقاطع نازک - صیقلی پوشش داده شده با کربن اندازه گیری شد. لازم به یادآوری است کلیه مراحل آماده سازی مقاطع نازک- صیقلی، سنگ نگاری (پتروگرافی) و آنالیز نمونه ها در دانشگاه Montanuniversitat کتسور اتریش انجام شد. در این دانشگاه از دستگاه ریزکاونده الکترونی مدل Superprobe Jeol JXA 8200 برای سنجش ترکیب شیمیایی مگنتیت استفاده گردید. همچنین، همین دستگاه برای دریافت تصاویر BSE و حصول طیف EDX به منظور تعیین دقیق کانی شناسی نمونه های مورد مطالعه استفاده شد. آنالیزها در خط پتاسیم آلفا و در ولتاژ شتاب دهنده ۱۵KV با شدت جریان ۱۰ نانوآمپر و باریکه الکترونی ۱ میکرومتر صورت پذیرفت. در اینجا زمان شمارش از ۲۰ تا ۱۰۰ ثانیه متغیر می باشد. حد تشخیص (به صورت درصد وزنی) که توسط نرم افزار دستگاه یادشده محاسبه گردیده، عبارت است از: از ۰/۰۲۴ برای کروم، ۰/۰۲۳ برای آهن و منگنز، ۰/۰۱۲ برای منیزیم، ۰/۰۱۹ برای تیتانیم، ۰/۰۲۷ برای وانادیم و ۰/۰۱ برای آلومینیم. نتایج مربوط به آنالیز نمونه های مگنتیت کانسارهای ایجو در جدول ۱ نمایش داده شده است.

۳- داده ها و اطلاعات

۳-۱- زمین شناسی، دگرسانی، کانه زایی

یافته های جدید بر مبنای داده های سنسنجی نشان داده واحدهای نفوذی مس پورفیری ایجو همانند سایر پورفیری های دارای کانه زایی سولفیدی در بخش جنوبی کمربند ارومیه-دختر که در بازه زمانی ۱۷ تا ۳/۶ میلیون سال قبل (ابتدای میوسن تا ابتدای پلیوسن) جایگیر شده اند، در یک جایگاه زمین ساختی کمان برخورد کرده (Collided arc) قرار دارند (Asadi, 2018). ماگمای مولد این سامانه های مس پورفیری مشابه می باشد و از ذوب بخشی پوسته پایینی که تحت تاثیر مواد حاصل از جبه سنگ کره ای (لیتوسفری) تغییر یافته با مواد فرورانش بوده، حاصل شده است (Asadi, 2018; Zarasvandi et al., 2018؛ شکل ۱). در محدوده کانسار مس پورفیری ایجو واحدهای نفوذی با سن $۹/۲۷ \pm ۰/۵۰$ میلیون سال (سنسنجی اورانیم-سرب زیر کن؛ Mirnejad et al., 2013) به درون واحدهای آتشفشانی و آذر آوری ائوسن عمدتاً شامل آندزیت، آندزیت بازالت، تراکی آندزیت، برش های آندزیتی، برش های توفی، توف و آگلومرا جایگیر شده اند (شکل ۲-ا).

چنین اثبات شده که وجود شرایط ماگمایی-گرمایی اکسیدان که تا بخشی از دگرسانی پتاسیک نیز امتداد یافته از عوامل مهم در حفظ شدگی محتوای گوگرد سامانه ماگمایی-گرمایی در ذخایر مس پورفیری می باشد (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 می گردد. در ذخایر مس پورفیری عمده کانه زایی سولفیدی در انتهای دگرسانی پتاسیک رخ می دهد (Richards, 2011). در نتیجه، آگاهی از شرایط فیزیکی شیمیایی که در آن دگرسانی پتاسیک تکامل یافته، می تواند در تعیین میزان باروری سامانه ماگمایی-گرمایی این ذخایر مهم باشد (Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023a). از سوی دیگر، کاتیون های مختلفی می توانند در ساختار مگنتیت جانشین شوند که این جانیشینی می تواند تابع برخی پارامترهای مهم از منظر کانه زایی مانند نرخ واکنش سیال-سنگ دیواره، فوگاسیته اکسیژن و دما باشد (Nadoll et al., 2015). این عامل سبب شده در برخی از مطالعات جدید، ارتباط بین شیمی مگنتیت و تکامل سامانه ماگمایی-گرمایی ذخایر مس پورفیری شاخص سازی گردد (Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023b). کمربند ماگمایی ارومیه - دختر به عنوان یکی از مناطق مهم دارای پتانسیل کانه زایی ذخایر مس پورفیری و اپی ترمال شناخته می شود (Shafiei et al., 2009). ذخایر مس پورفیری این کمربند همانند یک طیف، درجات مختلف کانه زایی را نمایش می دهند که در مطالعات مختلف سامانه گرمایی این ذخایر با استفاده از ابزارهایی مانند سیال های در گیر، شیمی سولفید و سیلیکات مورد بررسی قرار گرفته است (e.g., Zarasvandi et al., 2018; 2019b; Mahmoudi et al., 2023). با این حال تاکنون مطالعه ای بر روی شیمی مگنتیت کانسار مس پورفیری ایجو صورت نگرفته است. از آنجا که این کانسار مس پورفیری در مقاسه با ذخایر عظیم و بزرگ کمربند ارومیه-دختر (مانند سرچشمه و میدوک) دارای درجات کانه زایی کمتری است، آگاهی از ویژگی های دگرسانی پتاسیک این کانسار می تواند از دیدگاه تعیین شرایط دخیل در کانه زایی دارای اهمیت باشد. در این راستا، این مطالعه به بررسی رخداد مگنتیت و شاخص سازی شیمی مگنتیت در دگرسانی پتاسیک این کانسار پرداخته است.

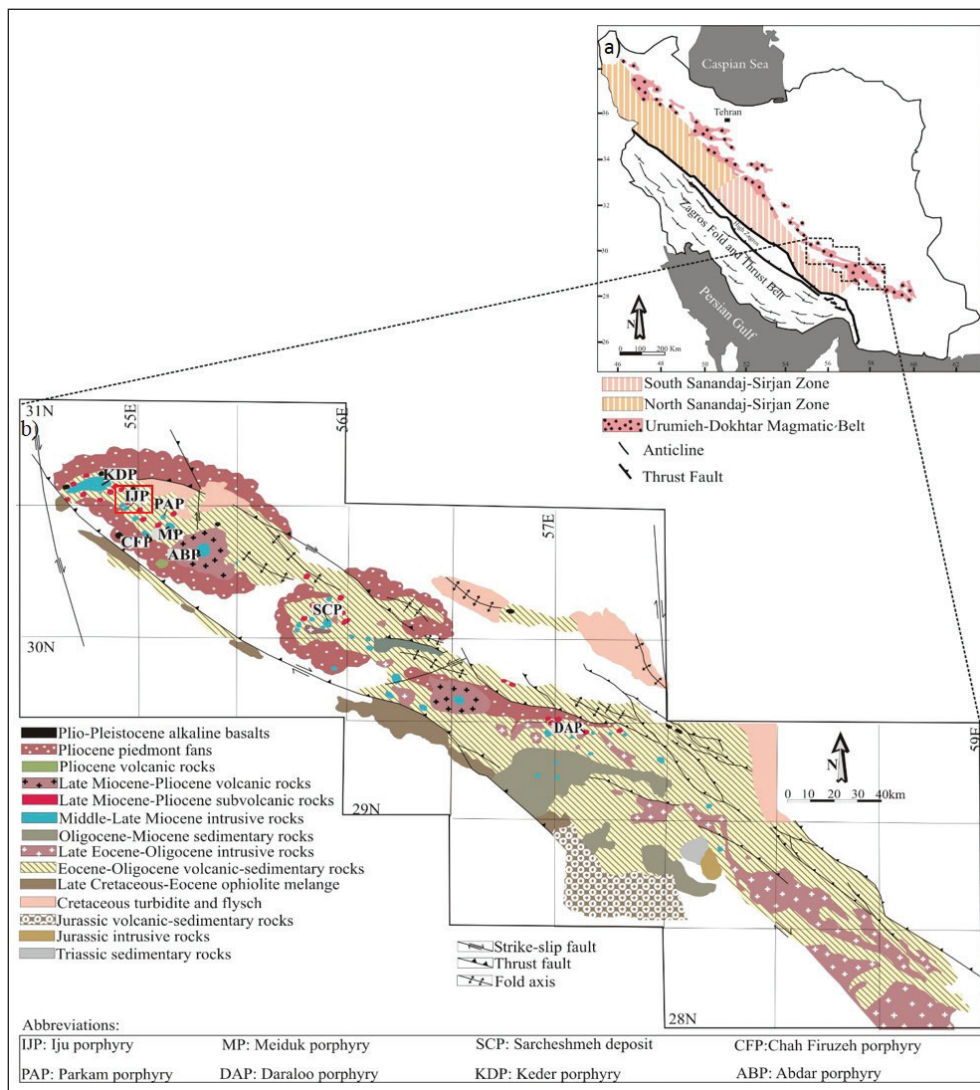
۲- روش پژوهش

به منظور بررسی رخداد و شیمی مگنتیت، نمونه برداری از گمانه های حفاری شماره

جدول ۱- نتایج آنالیز EMPA نمونه های مگنتیت ایجو (داده ها بر حسب درصد وزنی).

Table 1. EMPA results of Iju magnetite samples (wt. %).

| Sample No. | 3 | 6 | 7 | 8 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Al ₂ O ₃ | 0.173 | 0.191 | 0.115 | 0.144 | 0.083 | 0.054 | 0.153 | 3.059 | 0.189 | 0.403 | 0.234 | 0.148 | 0.148 | 0.234 |
| TiO ₂ | 0.37 | 0.588 | 0.052 | 0.068 | 0.198 | 0.286 | 0.251 | 0.267 | 0.178 | 35.487 | 0.068 | 0.099 | 0.22 | 0.866 |
| Fe _{tot} | 96.413 | 97.853 | 96.838 | 95.516 | 96.526 | 96.752 | 95.994 | 80.613 | 96.54 | 55.958 | 98.784 | 96.703 | 96.977 | 92.049 |
| NiO | b.d | 0.014 | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d |
| MgO | b.d | 0.038 | 0.048 | 0.032 | b.d | 0.007 | 0.036 | 0.277 | 0.044 | 0.016 | 0.037 | 0.029 | 0.03 | b.d |
| Cr ₂ O ₃ | 0.098 | 0.111 | 0.051 | 0.087 | 0.046 | 0.05 | b.d | 0.044 | 0.07 | b.d | b.d | 0.05 | 0.095 | 0.03 |
| CuO | b.d | 0.015 | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | 0.096 | b.d | b.d | b.d |
| ZnO | b.d | b.d | 0.053 | 0.045 | 0.042 | 0.018 | b.d | b.d | b.d | b.d | 0.015 | b.d | 0.041 | 0.038 |
| Ga ₂ O ₃ | b.d | b.d | b.d | 0.056 | 0.115 | b.d | b.d | 0.053 | b.d | b.d | b.d | 0.057 | 0.056 | b.d |
| V ₂ O ₅ | 0.478 | 0.367 | 0.334 | 0.359 | 0.122 | 0.179 | 0.224 | 0.254 | 0.21 | 0.52 | 0.228 | 0.197 | 0.133 | 0.225 |
| CoO | b.d | 0.01 | b.d | b.d | b.d | b.d | b.d | 0.047 | b.d | 0.065 | b.d | b.d | b.d | b.d |
| Total | 97.58 | 99.26 | 97.51 | 96.35 | 97.17 | 97.37 | 96.76 | 84.73 | 97.30 | 92.47 | 99.53 | 97.37 | 97.78 | 93.51 |



شکل ۱- (a) سه روند تکتونی موازی تشکیل دهنده کوه‌زایی زاگرس؛ شامل کمربند ماگمایی ارومیه-دختر، زون دگرگونی سندانج-سیرجان و کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس، با تغییرات برگرفته از قاسمی و تالبوت (2006, Ghasemi and Talbot). (b) بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر که تحت عنوان مجموعه ماگمایی سنوزویک کرمان (KCMSA: Kerman Cenozoic Magmatic Assemblage) شناخته می‌شود (با تغییرات برگرفته از شفیعی و همکاران - 2009, Shafiei et al.).

Figure 1- a) Three parallel tectonic trends forming Zagros orogenic belt, including Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt and Zagros Fold and Thrust Belt, modified after Ghasemi and Talbot (2006). b) Southern part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt which known as Kerman Cenozoic Magmatic Assemblage (modified after Shafiei et al., 2009).

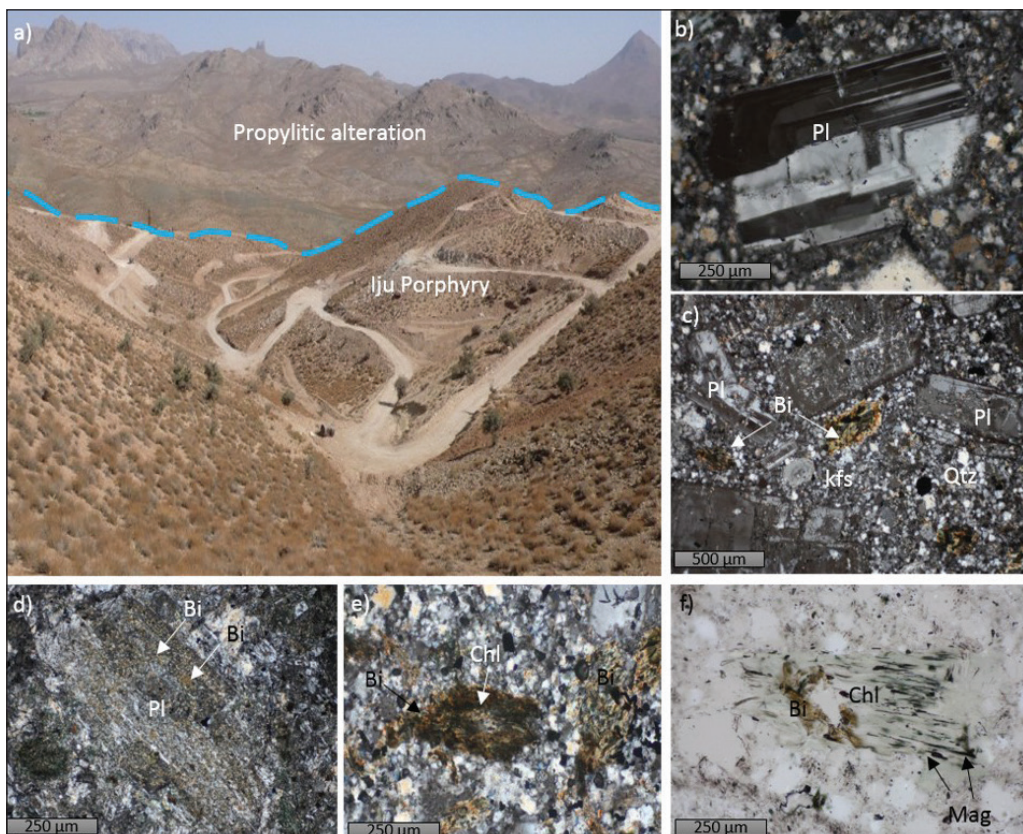
گرانودیوریتی عمدتاً دارای کوارتز، پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار افزون بر کانی‌های فرعی مانند سریسیست، آپاتیت، زیرکن و اسفن می‌باشد (شکل ۲-۲c). مطالعه مغزه‌های حفاری نشان دهنده رخداد دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، پروپیلیتیک و آرژیلیک به‌همراه دگرسانی‌های حد واسط پتاسیک-فلیک و پتاسیک-آرژیلیک در این کانسار می‌باشد. دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو دارای گسترش محدود بوده و عمدتاً با رخداد بیوتیت‌های گرمایی مشخص می‌گردد. در این نمونه‌ها پلاژیوکلاز و بیوتیت به صورت بخشی تا کامل با بیوتیت گرمایی جایگزین شده‌اند (شکل ۲-۲d). افزون بر این، بخشی از بیوتیت‌های ماگمایی و گرمایی نیز با کلریت جایگزین شده‌اند که این فرایند گاه سبب رخداد مگنتیت شده است (شکل‌های ۲-e تا ۲-f و

نفوذی‌های میزبان کانه‌زایی مس پورفیری در این کانسار دارای ترکیب چیره تونالیتی تا گرانودیوریتی می‌باشند. افزون بر این، در این محدوده نفوذی‌های کوارتز مونوزویتی نیز دیده می‌شوند که اگرچه با واحدهای تونالیتی-گرانودیوریتی همزمان زایش بوده (سن $9/33 \pm 0/20$ میلیون سال؛ 2018, Golestani et al.) و دارای سرشت شبه آداکیتی می‌باشند، اما با این حال رخداد کانه‌زایی در آنها مشاهده نمی‌گردد و عملاً نابارور هستند (2018, Golestani et al.).

از دیدگاه کانی‌شناسی، بخش‌های تونالیتی دارای کانی‌های پلاژیوکلاز و به میزان کمتر بیوتیت و هورنبلند می‌باشند که در زمینه چیره کوارتز همراه با مقادیر ناچیز پتاسیم فلدسپار، سریسیست و اپیدوت قرار دارند (شکل ۲-۲b). همچنین بخش‌های

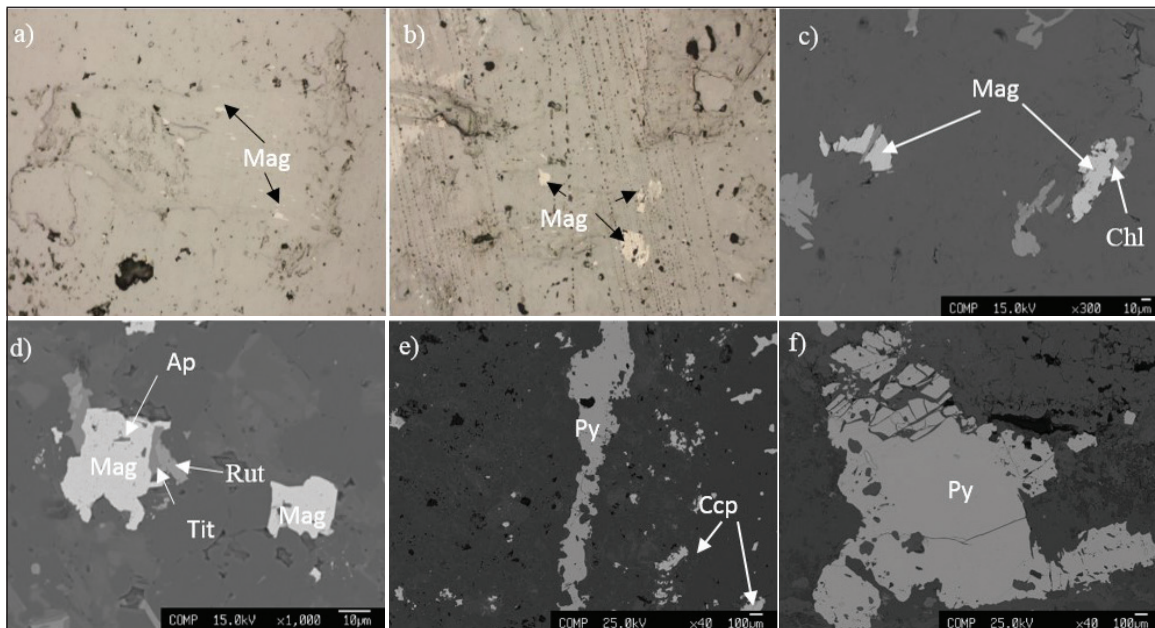
در کانسار مس پورفیری ایجو، کانه‌زایی سولفیدی درون‌زاد، بیشتر شامل پیریت، کالکوپیریت و به مقدار ناچیز مولیبدنیت می‌باشد که به صورت دانه پراکنده و با رگه-رگچه‌ای مشاهده می‌گردد (شکل ۳- e و f). بر مبنای تقسیم‌بندی رگه‌ای ۳ گروه اصلی رگه گویای ۳ مرحله کانه‌زایی در این کانسار تشخیص داده شده است که عبارتند از (۱) مرحله پیش از کانه‌زایی دارای کانی‌شناسی کوارتز ± پیرویت ± مگنتیت ± پتاسیم فلدسپار در دگرسانی پتاسیک، (۲) مرحله کانه‌زایی اصلی که بیشتر در دگرسانی پتاسیک و با گسترش ناچیز در دگرسانی فیلیک مشاهده می‌گردد و با کانی‌شناسی کوارتز + کالکوپیریت + پیریت ± مولیبدنیت ± سریسیت مشخص می‌شود و در نهایت، رگه‌های تاخیری نسل (۳) که فاقد کانه‌زایی بوده و مجموعه‌های پیشین را قطع می‌نمایند. در این کانسار یک پهنه اکسیدی توسعه نیافته دارای کانی‌های لیمونیت، گوتیت، هماتیت و ملاکیت قابل مشاهده می‌باشد (Rezaei, 2017).

۳-a). به صورت کلی رخداد مگنتیت در نمونه‌های کانسار ایجو ناچیز و عمدتاً به صورت دانه پراکنده در زمینه دگرسانی پتاسیک می‌باشد (شکل ۳-b). این مگنتیت‌ها برخلاف سایر ذخایر مس پورفیری کمر بند ارومیه-دختر نظیر میدوک و دالی (Rezaei, 2017) فاقد حاشیه هماتیته بوده و همچنین به‌ندرت در تماس با فازهای تیتانیم‌دار (تیتانیت و روتیل) دیده می‌شوند (شکل ۳-e و d). افزون بر این، ادخال‌های آپاتیته نیز در این مگنتیت‌ها مشاهده می‌گردد (شکل ۳-d). دگرسانی سریسیت این کانسار با کانی‌شناسی کوارتز، سریسیت، پیریت و به میزان کمتر کربنات عمدتاً با واحدهای گرانودیوریتی- تنالیتی در بخش‌های میانی کانسار قابل مشاهده می‌باشد (Golestani et al., 2018). در این کانسار دگرسانی پروپلیتیک بیشتر در بخش‌های باختری و جنوب‌باختری کانسار، همراه با واحدهای آتشفشانی مشاهده می‌گردد (Mirnejad et al., 2013). این دگرسانی با کانی‌شناسی کلسیت، کلریت و سریسیت مشخص می‌گردد.



شکل ۲- a) تصویر صحرایی نشان دهنده جایگیری نفوذی‌های ایجو در سنگ‌های آتشفشانی دارای دگرسانی پروپلیتیک، b) فنو کریست پلاژیو کلاز (Pl) در نمونه تنالیتی ایجو، c) نمونه گرانودیوریت دارای فنو کریست‌های پلاژیو کلاز و بیوتیت (Bi) در زمینه غالب کوارتز (Qtz) و آلکالی فلدسپار (kfs)، d) فنو کریست پلاژیو کلاز در حال جانشینی با بیوتیت گرمایی در پهنه دگرسانی پتاسیک، e) کلریتی شدن بیوتیت در پهنه دگرسانی پتاسیک و f) جانشینی بیوتیت با کلریت (Chl) همراه با زایش مگنتیت (Mag). تصاویر b تا f به ترتیب در زیر نور عبوری XPL و PPL می‌باشند. علائم اختصاری: Pl؛ پلاژیو کلاز، Bi؛ بیوتیت، Chl؛ کلریت و Mag؛ مگنتیت.

Figure 2- a) Field photograph showing the emplacement of Iju intrusions within volcanics with propylitic alteration, b) Plagioclase (Pl) phenocryst in the tonalite sample of Iju, c) granodiorite sample showing plagioclase and biotite (Bi) set in the groundmass dominated by quartz (Qtz), K-feldspar (kfs), d) Plagioclase replacement by hydrothermal biotite in the potassic alteration, e) Chloritization of biotite in the potassic alteration, and f) Biotite replacement by chlorite (Chl) which accompanied with magnetite generation. Photos b-e and f taken under transmitted XPL and PPL light, respectively. Abbreviations: Pl; Plagioclase, Bi; Biotite, Chl; Chlorite, K-feldspar; kfs, and Mag; Magnetite.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ انعکاسی در زیر نور PPL (a-b) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی BSE (c-f) از رخداد مگنتیت و کانه‌های سولفیدی در دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو؛ (a) تصویر شکل f-۲ در زیر نور انعکاسی که نشان می‌دهد کانی‌های کدر (اوپیک) حاصل از تبدیل بیوتیت به کلریت، مگنتیت (Mag) می‌باشد، (b) رخداد مگنتیت به صورت ریز و دانه پراکنده در پهنه دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو، (c) همراهی مگنتیت با کلریت، (d) همراهی مگنتیت با فازهای تیتانیم‌دار تیتانیت (Tit) و روتیل (Rut) در مگنتیت دارای ادخال آپاتیت (Ap) و (e-f) رخداد پیریت (Py) و کالکوپریت (Ccp) به صورت رگچه و دانه پراکنده در پهنه دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو. علائم اختصاری برگرفته از وایتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010): Bi: بیوتیت، Chl: کلریت، Mag: مگنتیت، Tit: تیتانیت، Rut: روتیل، Ap: آپاتیت، Py: پیریت و Ccp: کالکوپریت.

Figure 3- a-b) Reflected light microscopic images in PPL light and c-f) Backscattered electron images (BSE) of magnetite and sulfide minerals in the potassic alteration of Iju deposit; a) Photo 2f in the reflected light confirming that biotite alteration to chlorite lead to the generation of magnetite (Mag), b) Magnetite occurrence as fine-grain disseminated in the potassic alteration, c) Magnetite accompanied with chlorite (Chl), d) Co-occurrence Ti-bearing phases of titanite (Tit) and rutile (Rut) minerals with magnetite having apatite (Ap) inclusions, and e-f) Pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) occurrences as veinlet and disseminated in the potassic alteration of Iju deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010); Chl: Chlorite, Mag: Magnetite, Tit: Titanite, Rut: Rutile, Ap: Apatite, Py: Pyrite, and Ccp: Chalcopyrite.

۳-۲- نتایج آنالیز

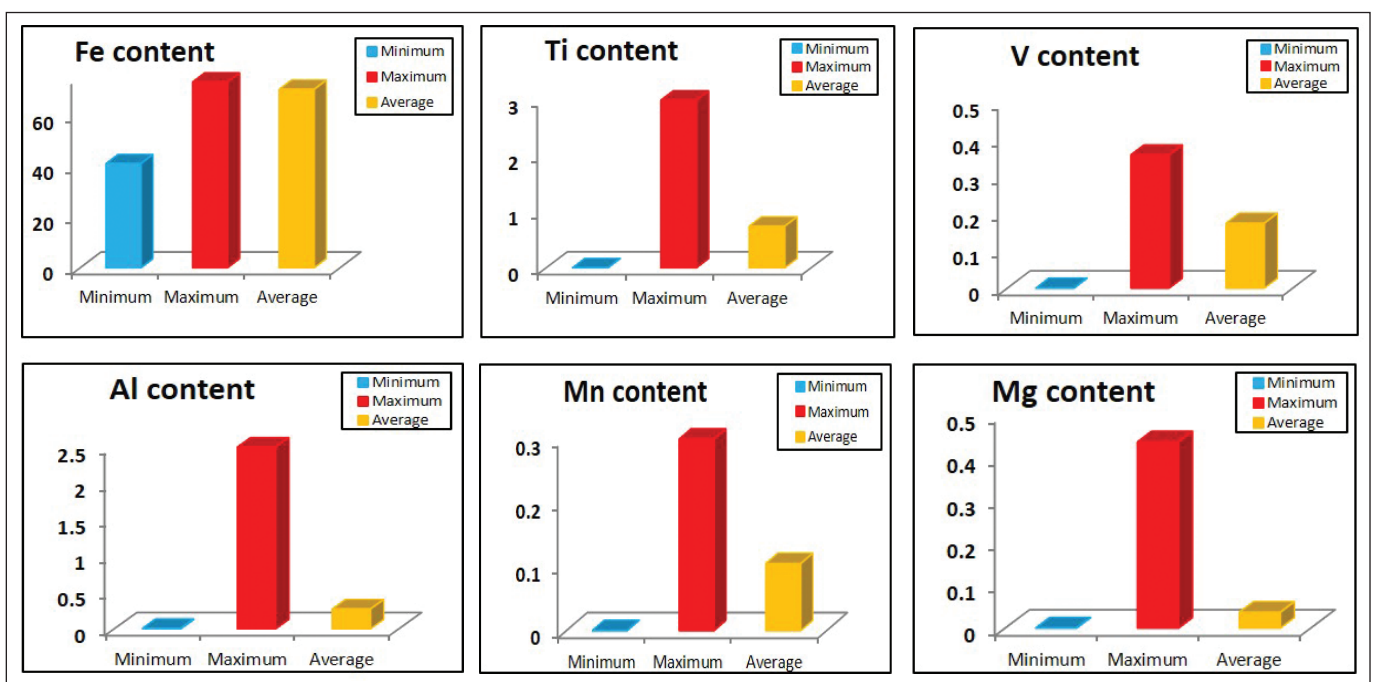
نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد، عناصری مانند آلومینیم، تیتانیم، آهن، منیزیم، کروم و وانادیم دارای بیشترین تمرکز در نقاط آنالیز شده می‌باشند. در مقابل نیکل، مس، روی، گالیم و کبالت، بعضاً در برخی از نقاط آنالیزی اندازه‌گیری شده‌اند. لازم به یادآوری است در حین انجام آنالیز، با انتخاب زمان خوانش زیاد (۱۰۰ ثانیه) نیز این عناصر تنها در برخی از نقاط آنالیزی اندازه‌گیری شدند. این شاخصه در مگنتیت‌های سایر ذخایر مس پورفیری (مانند پورفیری‌های سرکوه، میدوک و دالی) نیز دیده شده است که به دلیل غلظت پایین‌تر از حد تشخیص دستگاه EMPA برای این عناصر می‌باشد (Rezaei, 2017; Zarasvandi et al., 2023a). مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین عناصر آهن، تیتانیم، وانادیم، آلومینیم، منگنز و منیزیم در ساختار مگنتیت‌های مورد مطالعه در شکل ۴ مشخص شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، در نقطه آنالیزی ۱۶۲ که دارای کمترین میزان آهن ($Fe_{tot} = 55/95$ wt.%) می‌باشد، همزمان بیشترین میزان تیتانیم مشاهده می‌گردد (۳۵/۴۸ wt.%). به نظر می‌رسد این میزان کاهش شدید آهن مربوط به آنالیز بر رو- یا نزدیک به فازهای تیتانیم‌دار باشد. چنین ویژگی در نقطه آنالیزی شماره ۱۶۶ نیز به میزان کمتری مشاهده می‌گردد، به نحوی که با کاهش آهن، افزایش نسبی در مقادیر تیتانیم دیده می‌شود. افزون بر این،

بررسی سایر نقاط آنالیزی کانسار ایجو نشان می‌دهد، در نقطه شماره ۱۶۰ نیز کاهش نسبی در مقادیر آهن دیده می‌شود که همزمان این نقطه دارای بیشترین میزان Al نیز می‌باشد (۱/۶۴ درصد وزنی) که با مقادیر قابل تشخیص Ga نیز همراه شده است (جدول ۱). با استناد کردن نقاط آنالیزی ۱۶۰، ۱۶۲ و ۱۶۶ میانگین درصد وزنی آهن در نمونه‌های ایجو برابر ۷۱/۷۹ می‌باشد که تقریباً مشابه نمونه‌های مگنتیت کانسار مس پورفیری سرکوه (میانگین ۷۱/۳۷ درصد وزنی؛ Zarasvandi et al., 2023b) و سایر ذخایر مس پورفیری کمرند تیس نظیر پورفیری Atlas در فیلیپین می‌باشد (میانگین ۷۰/۹۸ درصد وزنی؛ Tian et al., 2021).

مطالعات پیشین نشان دهنده وابستگی میزان تیتانیم مگنتیت به دمای تبلور آن در محیط ماگمایی-گرمایی می‌باشد. به نحوی که مگنتیت‌های متبلور شده در دماهای بالاتر دارای مقادیر بیشتر Ti در ساختار خود می‌باشند (Nadoll et al., 2015; Tian et al., 2021). البته در سامانه‌های مس پورفیری با افت دمایی سامانه ماگمایی-گرمایی در خلال سرد شدن سیستم و یا افزایش تاخیری نرخ فوگاسیته اکسیژن، بخشی از محتوای تیتانیم مگنتیت به صورت ناآمیختگی (اکسولوشن) فازهای تیتانیم‌دار (عمدتاً ایلمنیت و روتیل) به صورت تیغه و یا در حاشیه مرز تماس دسته‌جات مگنتیت خود را نشان می‌دهند (Wen et al., 2017; Zarasvandi et al., 2023a). همان‌گونه که در

بالا بیان شد، احتمالاً به دلیل نزدیک بودن نقاط آنالیزی بر-رو یا در نزدیکی فازهای تیتانیم دار در دو نقطه آنالیزی ۱۶۲ و ۱۶۶ بیشترین میزان Ti مشاهده می گردد (به ترتیب ۲۰/۰۸ و ۰/۴۹ درصد وزنی). همان گونه که در جدول ۱ مشخص شده برای سایر نقاط آنالیزی، تغییرات این عنصر وابسته به دما چندان زیاد نیست که این عامل می تواند به عدم وجود تغییرات دمایی شاخص در خلال تبلور مگنتیت های مورد مطالعه نسبت داده شود (Tian et al., 2021). میزان محتوای وانادیم مگنتیت افزون بر دما می تواند گویای شرایط فوگاسیته اکسیژن محیط ماگمایی-گرمایی و یا متاثر از واکنش سیال گرمایی و سنگ دیواره در حین تبلور مگنتیت می باشد (Knipping et al., 2015; Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023a).

کمتز وانادیم در ساختار مگنتیت همراه خواهد شد. این موضوع به حضور ترجیحی V^{3+} در ساختار مگنتیت نسبت به گونه های اکسیدی V^{4+} و V^{5+} ارتباط دارد (Nadoll et al., 2015). برای کانسار ایجو با صرف نظر از مقادیر وانادیم مربوط به نقاط آنالیزی نزدیک به جدایش فازهای تیتانیم دار (نقاط ۱۶۲ و ۱۶۶)، میزان وانادیم از ۰/۱۲ تا ۰/۴۷ درصد وزنی متغیر می باشد. این میزان تقریباً مشابه با مقادیر مگنتیت سایر ذخایر مس پورفیری کمر بند ارومیه-دختر مانند کانسار مس پورفیری سرکوه (میانگین؛ ۰/۱۵ درصد وزنی؛ (Zarasvandi et al., 2023a)) و کانسار مس-طلا پورفیری دالی (میانگین ۰/۱۳ درصد وزنی (Zarasvandi et al., 2023b)) می باشد.



شکل ۴- مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین (بر حسب درصد وزنی) عناصر آهن، تیتانیم، وانادیم، آلومینیم، منگنز و منیزیم در ساختار مگنتیت های مورد مطالعه.

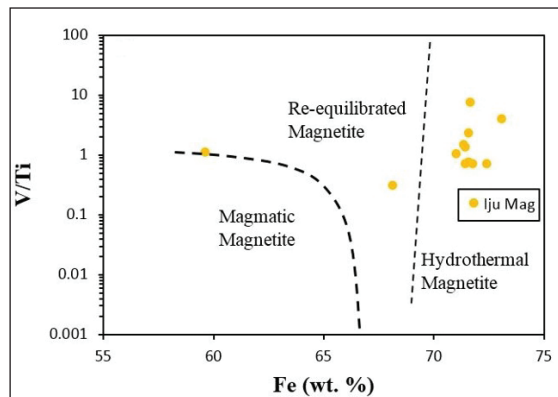
Figure 4. Minimum, maximum, and average contents (in wt%) of Fe, Ti, V, Al, Mn, Mg in the studied magnetites.

سنگ های آتشفشانی فلسیک و مافیک (بدون سیال گرمایی) برای ترسیم محدوده ماگمایی استفاده شده است (Wen et al., 2017). ترسیم نتایج مگنتیت های ایجو بر روی این نمودار نشان می دهد بیشتر نمونه های آنالیز شده در محدوده مگنتیت های گرمایی پلات شده اند (شکل ۵)، که این موضوع گویای نقش آفرینی سیال گرمایی در حین تبلور مگنتیت های مورد مطالعه می باشد. شاید بتوان گفت عدم رخداد قابل توجه تعادل مجدد در مگنتیت های ایجو در مقایسه با مگنتیت های ذخایر مس پورفیری (مانند مگنتیت های کانسار مس پورفیری سرکوه؛ (Zarasvandi et al., 2023a)) به سبب عدم توسعه یافتگی دگرسانی پتاسیک این کانسار و در نتیجه فقدان مراحل دامنه دار خروج سیال گرمایی در حین تکامل دگرسانی پتاسیک این کانسار باشد. از شواهد دیگر این موضوع می توان به عدم وجود حاشیه هماتی در مگنتیت های ایجو اشاره نمود. زیرا مطالعات اخیر صورت گرفته توسط یین و همکاران (Yin et al., 2022) بر روی مگنتیت متبلور شده در سامانه های گرمایی نشان داده، دفعات خروج سیالات گرمایی می تواند سبب شششوی Fe^{2+} در ساختار مگنتیت گردد. این تخریب

یکی از پارامترهای مهم تغییر دهنده شیمی مگنتیت، رخداد تعادل مجدد می باشد (Hu et al., 2014). به ویژه در سامانه های کانه زایی که در آن ها چندین مرحله خروج سیال گرمایی وجود دارد (مانند ذخایر مس پورفیری و اسکارن)، به دلیل مراحل مختلف خروج سیال گرمایی، ممکن است ترکیب شیمیایی مگنتیت دستخوش تغییر شود و عملاً سرشت اولیه مگنتیت ها تغییر یابد. مطالعات هو و همکاران (Hu et al., 2014) نشان داده در این صورت مقادیر تیتانیم، منگنز، آلومینیم، کلسیم، منیزیم و سیلیسیم مگنتیت دستخوش تغییر خواهد شد (Hu et al., 2014). این موضوع در تفسیر شیمی مگنتیت بسیار مهم می باشد، زیرا این عناصر تقریباً در تمامی نمودارهای تفکیکی ارائه شده بر مبنای شیمی مگنتیت استفاده شده اند. رخداد یا عدم رخداد تعادل مجدد در مگنتیت، با استفاده از ویژگی های زمین شیمیایی و نمودار دو متغیره Fe در برابر V/Ti قابل ردیابی می باشد (شکل ۵؛ Wen et al., 2017). در این نمودار، محدوده گرمایی بر اساس شیمی مگنتیت های گرمایی ذخایر اسکارن و مس پورفیری به دست آمده است (Wen et al., 2017). در مقابل، شیمی مگنتیت های همراه با

هم‌رشدی مگنتیت با هماتیت به صورت آثار مارتیتی در نمونه‌های ایجو می‌تواند به عدم دفعات متعدد خروج سیال گرمایی نسبت داده شود.

در ساختار مگنتیت باعث ایجاد فاز ناپایدار آهن هیدراته (Ferrihydrite) می‌شود که در نهایت با هماتیت جانشین می‌شود (Yin et al., 2022). از این دیدگاه، عدم وجود



شکل ۵- نمودار Fe (درصد وزنی) در برابر V/Ti، برای نمونه‌های مگنتیت ایجو. نمودار پایه برگرفته از ون و همکاران (Wen et al., 2017).

Figure 5. Fe (wt.%) vs. V/Ti diagram for Iju magnetite samples. Base diagram after Wen et al. (2017).

۴- بحث

۴-۱- سامانه ماگمایی کانسار مس پورفیری ایجو

سامانه‌های مس ± مولیبدن ± طلا پورفیری عموماً بر اثر جایگیری کم‌ژرفای (۵ تا ۱۵ کیلومتر) استوک‌های دارای شرایط ماگمایی اکسیدان و غنی از آب، گوگرد، کلر و عناصر کالکوفیل (مانند مس، مولیبدن و طلا) تشکیل شده‌اند (Sillitoe, 2010). امروزه مشخص شده ماگمای مولد کانه‌زایی در این سامانه‌های کانه‌زایی ممکن است در ارتباط با فروانش و یا برخوردی باشد (Richards, 2015). بهترین مثال‌های مورد اخیر در قطعات کمان‌های برخورد کرده کمر بند تیس به‌ویژه در پهنه ماگمایی ارومیه - دختر ایران و کمر بند گانگدسه (Gangdese belt) در جنوب فلات تبت گزارش شده است (Wang et al., 2014; Zarasvandi et al., 2019a). همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، داده‌های جدید سن‌سنجی بر روی گرانیتوئیدهای میزبان ذخایر مس پورفیری دارای درجات مختلف کانه‌زایی در بخش‌های جنوبی کمر بند ارومیه-دختر (از جمله پورفیری ایجو)، نشان داده این پورفیری‌ها از نوع برخوردی بوده و در پنجره زمانی ۱۷ تا ۳/۶ میلیون سال پیش (ابتدای میوسن تا ابتدای پلیوسن) جایگیر شده‌اند (Asadi, 2018). ماگمای مولد این کانسارها عموماً از ذوب بخشی پوسته پایینی که با مذاب منشا گرفته از جبه سنگ‌کره‌ای تغییر یافته، منشا گرفته است (Asadi, 2018; Golestani et al., 2018). این یافته‌ها نشان دهنده چرایی وجود بازه زمانی بین شروع فعالیت آذرین در زون ارومیه-دختر (اوسن) و رخداد کانه‌زایی مس پورفیری در پنجره زمانی ابتدای میوسن تا ابتدای پلیوسن می‌باشد (Asadi, 2018). نقش آفرینی این عوامل سبب به‌وجود آمدن ماگمایی آداکایتی دارای قابلیت زایش کانه‌زایی مس پورفیری در محدوده ایجو شده است (Asadi et al., 2014; Asadi, 2018; Golestani et al., 2018).

۴-۲- دگرسانی پتاسیک در کانسار مس پورفیری ایجو

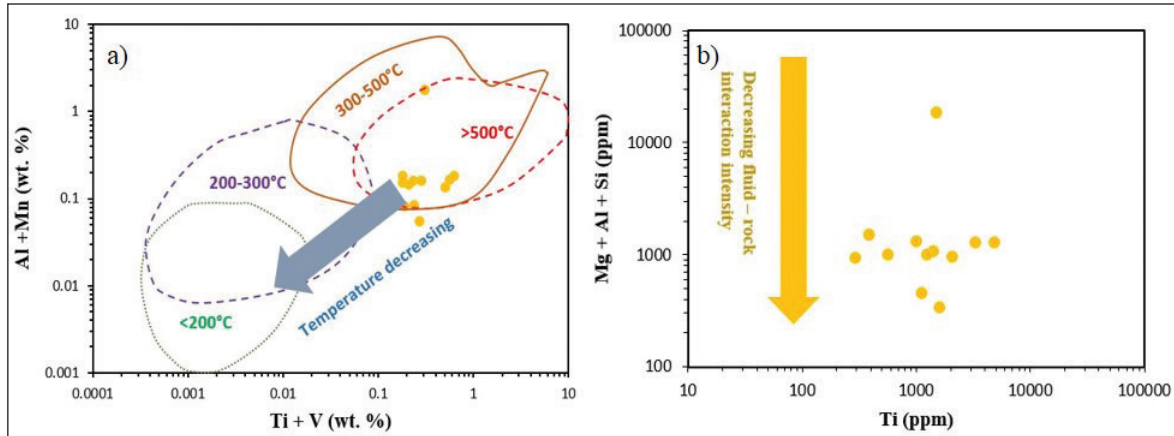
همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، در حین تکامل سامانه‌های ماگمایی - گرمایی ذخایر مس پورفیری، وجود شرایط ماگمایی اکسیدان در محدوده بافری هماتیت -

مگنتیت که تا مراحل آغازین توسعه دگرسانی پتاسیک نیز امتداد می‌یابد از عوامل مهم کنترل‌کننده کانه‌زایی سولفیدی قلمداد شده است (Pokrovski, 2014; Sun et al., 2014). زیرا در مقایسه با فرم احیایی گوگرد (H₂S)، کمپلکس‌های گوگردی به صورت اکسیدی (SO₄²⁻) اولاً به راحتی حمل و نقل یافته و ثانیاً تمایل کمی به واکنش با عناصر کالکوفیل (مس، مولیبدن و طلا) دارند، در نتیجه این عامل سبب حفظ شدگی محتوای گوگرد و عناصر کالکوفیل سامانه ماگمایی - گرمایی می‌گردد (Richards, 2011; Sun et al., 2015).

رخداد فراوان انیدریت به همراه مگنتیت‌های دارای حاشیه مارتیتی از نشانه‌های وجود شرایط ماگمایی اکسیدان نزدیک به محدوده بافری هماتیت-مگنتیت در آغاز دگرسانی پتاسیک کانسارهای مس پورفیری می‌باشد (Liang et al., 2009). این ویژگی در بسیاری از ذخایر مس پورفیری گزارش شده است. به عنوان مثال، کانسار مس پورفیری Yulong در حاشیه خاوری فلات تبت، پورفیری‌های مس-طلا Xiongcun و Duoboza در فلات تبت و همچنین کانسار مس طلا پورفیری دالی در بخش میانی کمر بند ارومیه-دختر نیز نشان دهنده چنین شاخصه‌ای می‌باشد (Sun et al., 2013; Zarasvandi et al., 2023a). بررسی سنگ‌نگاری نمونه‌های دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری ایجو نشان می‌دهد، نخست، مگنتیت‌ها بیشتر به صورت محدود و دانه‌پراکنده در پهنه دگرسانی پتاسیک یافت می‌شوند (شکل ۳- a و b)، دوم این که، فاقد آثار هم‌رشدی هماتیت (به صورت حاشیه مارتیتی) می‌باشند. افزون بر این، مگنتیت‌ها فاقد پارائز انیدریت می‌باشند. این ویژگی‌ها گویای عدم وجود شرایط فوگاسیته اکسیژن بسیار بالا نزدیک محدوده بافری هماتیت-مگنتیت در حین تبلور مگنتیت‌های کانسار مس پورفیری ایجو می‌باشد. افزون بر این، ترسیم نتایج آنالیز شده بر روی نمودار دو متغیره Al + Mn در برابر Ti + V (wt.%) نشان می‌دهد، مگنتیت‌های مورد مطالعه دما بالا بوده (دمای تشکیل تا بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد؛ شکل ۶- a). به طور همخوان، بررسی داده‌های حرارت سنجی سیال‌های درگیر میزبان در رگه‌های نسل اول (کوآرتز ± پیروتیت ± مگنتیت ± پتاسیم فلدسپار)

بیشتر مگنتیت‌های آنالیز شده این سامانه مس پورفیری فاقد کانه‌زایی قابل توجه، طی شرایط عدم واکنش گسترده سیال گرمابی و سنگ دیواره متبلور شده‌اند (شکل ۶-ب).

دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری ایجو، نشان دهنده دمای به دام افتادن بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Zarasvandi et al., 2019b). نتایج نشان می‌دهد



شکل ۶- ا) نمودار دو متغیره در برابر Ti + V (wt%) نشان دهنده محدوده دمایی تبلور مگنتیت در کانسار مس پورفیری ایجو. محدوده دمایی برگرفته از نادول و همکاران (Nadoll et al., 2014) و دیدتیوس و همکاران (Deditus et al., 2018). ب) نمودار دوتایی Ti در برابر Mg + Al + Si (ppm) به منظور سنجش نرخ واکنش سیال و سنگ دیواره در خلال. نمودار پایه برگرفته از تیان و همکاران (Tian et al., 2021).

Figure 6- a) Al + Mn vs. Ti + V (wt. %) binary plot showing the temperature domain of magnetite crystallization in the Iju deposit. Temperature domains after Nadoll et al. (2014) and Deditus et al. (2018), and b) Ti vs. Mg + Al + Si (ppm) binary plot for assessing the rates of fluid-rock interaction during the magnetite crystallization. Base diagram after Tian et al. (2021).

سولفیدی مس در دگرسانی پتاسیک می‌باشد (واکنش ۱). این عامل باعث رخداد همزمان کانه‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) با مگنتیت در نمونه‌های دگرسانی پتاسیک می‌گردد (Zarasvandi et al., 2023a). در مقایسه با سایر ذخایر مس پورفیری کمربند ارومیه-دختر (مانند پورفیری‌های میدوک، دالی و سرکوه؛ (Rezaei, 2017; Zarasvandi et al., 2023a,b))، رخداد مگنتیت در دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو ناچیز بوده و عمدتاً به صورت ریز و دانه‌پراکنده می‌باشد (شکل ۳-ب). در این کانسار مگنتیت‌ها گاه محصول کلریتی شدن بیوتیت در این پهنه دگرسانی می‌باشند (شکل‌های ۲-۳ و ۳-۴). رخداد محدود مگنتیت در پهنه دگرسانی پتاسیک این سامانه مس پورفیری نشان می‌دهد احتمالاً شرایط برای حرکت واکنش ۱ به سمت راست و در نتیجه زایش H_2S مورد نیاز جهت کانه‌زایی سولفیدی مس فراهم نبوده است (Sun et al., 2013; 2015; Zarasvandi et al., 2018). به همین دلیل به نظر می‌رسد برخلاف سایر ذخایر مس پورفیری (مانند پورفیری Atlas، میدوک، سرکوه و دالی (Rezaei, 2017; Tian et al., 2021; Zarasvandi et al., 2023a,b)) مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار عمدتاً فاقد پاراژنز سولفیدی می‌باشند (شکل ۳-ا تا د).

افزون بر تبلور مگنتیت، سرد شدن سامانه گرمابی (طبق واکنش ۲) نیز می‌تواند سبب تبدیل گوگرد اکسیدی به احیایی گردد و در نتیجه شرایط را برای کانه‌زایی سولفیدی در پهنه دگرسانی پتاسیک فراهم نماید (Richards, 2011). به عبارتی سرد شدن سامانه گرمابی باعث انتقال واکنش ۲ به سمت راست می‌گردد (Richards, 2011):



۳-۴- ارتباط رخداد و شیمی مگنتیت با پتانسیل کانه‌زایی سولفیدی مس در پهنه دگرسانی پتاسیک

در سامانه‌های مس پورفیری عموماً بخش عمده کانه‌زایی در انتهای دگرسانی پتاسیک و در مرز دگرسانی فلیک رخ می‌دهد (Richards, 2011). به استثنای تعداد محدودی از ذخایر مس پورفیری که دارای سامانه ماگمایی احیایی می‌باشند (Cao et al., 2020)، در بیشتر ذخایر مس پورفیری دارای کانه‌زایی قابل توجه، سامانه ماگمایی اکسیدان بوده، در نتیجه برای رخداد کانه‌زایی سولفیدی لازم است شرایط سامانه گرمابی از اکسیدی به احیایی تغییر یابد (Sun et al., 2015). در اثر نقش آفرینی پارامترهای زیادی شرایط فوگاسیته اکسیژن در مرحله کانه‌زایی سولفیدی پهنه دگرسانی پتاسیک، از اکسیدی به احیایی تغییر می‌یابد (Richards, 2011; Zarasvandi et al., 2018). در این خصوص، یکی از مهم‌ترین موارد تبلور مگنتیت می‌باشد (Sun et al., 2013; 2015).

همان‌گونه که در واکنش ۱ مشخص شده است، تبلور مگنتیت همراه با زایش گوگرد احیایی (H_2S)، تسهیل‌کننده تغییر شرایط از اکسیدی به احیایی می‌باشد (Liang et al., 2009).



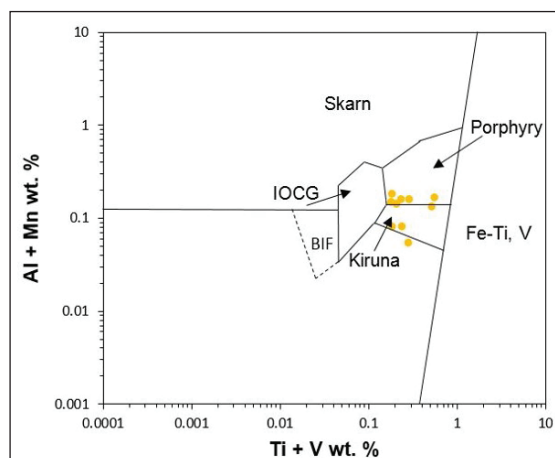
به همین دلیل رخداد مگنتیت به فراوانی در پهنه دگرسانی پتاسیک کانسارهای مس پورفیری دارای کانه‌زایی سولفیدی قابل توجه گزارش شده است (به عنوان مثال کانسار مس پورفیری میدوک (Rezaei, 2017) و یا کانسار عظیم مس پورفیری Atlas در فیلیپین (Tian et al., 2021)). به بیان دیگر، تبلور مگنتیت تسهیل‌کننده کاهش فوگاسیته اکسیژن و تامین‌کننده گوگرد احیایی (H_2S) لازم برای کانه‌زایی

مگنتیت در محیط‌های مختلف سبب شده، این کانی به عنوان ابزاری مهم در تفکیک زایش ذخایر گوناگون به‌شمار رود (Hu et al., 2014; Nadoll et al., 2014). به همین سبب، طی سال‌های اخیر نمودارهای زیادی برای تفکیک زایش ذخایر مختلف بر پایه شیمی مگنتیت ارائه شده است (Dupuis and Beaudoin 2011; Nadoll et al., 2015; Knipping et al., 2014). مروری بر استفاده این نمودارهای تفکیکی نشان می‌دهد، در برخی موارد ممکن است نتایج صحیح نباشد. به عنوان مثال، در برخی موارد داده‌های مگنتیت‌های اسکارن در محدوده ذخایر مس پورفیری، BIF و ذخایر IOCG قرار گرفته است (Hu et al., 2014). همچنین مطالعه زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2023b) نشان داده شیمی مگنتیت ذخایر مس پورفیری ممکن است در محدوده اسکارن و ذخایر نوع Kiruna ترسیم گردد. به نظر می‌رسد بخشی از این موضوع به سبب تغییر سرشت سیال گرمایی در خلال تکامل سامانه گرمایی بر اثر رخداد مواردی مانند واکنش سیال گرمایی با سنگ دیواره باشد. در خصوص کانسار مس پورفیری ایجو، عمده نمونه‌ها در محدوده ذخایر مس پورفیری پلات شده‌اند که شاید بتوان گفت رخداد این شاخصه به دلیل عدم رخداد قابل توجه فرایند تعادل مجدد (شکل‌های ۵ و ۷) و یا نرخ پایین واکنش سیال گرمایی و سنگ دیواره در نمونه‌های آنالیز شده باشد (شکل ۶-b). البته تمایل پراکنش زمین‌شیمیایی برخی از نمونه‌های کانسار مس پورفیری ایجو به ذخایر نوع کایرونا می‌تواند به دلیل طبیعت غنی از آپاتیت این نمونه‌ها باشد (شکل‌های ۳-d و ۷).

افزون بر تولید گوگرد احیایی (H₂S) مورد نیاز برای کانه‌زایی، این عامل سبب تولید H₂SO₄ به منظور تبلور انیدریت در پهنه دگرسانی پتاسیک می‌گردد (Richards, 2011). بر خلاف مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک سایر ذخایر مس پورفیری (مانند کانسار مس-حلالی پورفیری دالی؛ Zarasvandi et al., 2023b)، مگنتیت‌های آنالیز شده کانسار ایجو، روند افت دمایی آشکاری را نمایش نمی‌دهند (شکل ۶-a). از سوی دیگر، این مگنتیت‌ها فاقد پاراژن انیدریت و کانه‌های سولفیدی (مانند پیریت و کالکوپیریت؛ شکل ۳-e و f) می‌باشند که گویای قابلیت کمتر واکنش ۲ برای حرکت به سمت راست در سامانه گرمایی این کانسار می‌باشد (Sun et al., 2013; 2015; Zarasvandi et al., 2018). به نظر می‌رسد عدم قابلیت سرد شدن بهینه سامانه گرمایی کانسار مس پورفیری ایجو که با زایش کمتر H₂S و H₂SO₄ همراه بوده (واکنش ۲)، با عدم رخداد قابل توجه کانی‌های سولفات (انیدریت) و نیز کانه‌زایی سولفیدی ضعیف در پهنه دگرسانی پتاسیک این کانسار مرتبط باشد.

۴-۴- اهمیت شیمی مگنتیت از منظر زایشی

کاتیون‌های زیادی مانند Ni و Ti, Cr, Mg, Ca, Al, Mn, V, Zn, Cu, Co, Sn, Ga از قابلیت جایگیری در جایگاه‌های اکتاهدری و تتراهدری اسپینل مگنتیت برخوردار هستند (Dupuis and Beaudoin, 2011; Zhang et al., 2020). تغییرات زمین‌شیمیایی



شکل ۷- نمودار Al + Mn (wt. %) در برابر Ti + V (wt. %) برای تفکیک ذخایر مختلف؛ نمودار پایه برگرفته از داپیوس و بیادوین (Dupuis and Beaudoin, 2011) که توسط نادول و همکاران (Nadoll et al., 2014) تغییر یافته است.

Figure 7. Al + Mn (wt. %) vs. Ti + V wt. % discrimination plot. Base diagram after Dupuis and Beaudoin (2011) modified by Nadoll et al. (2014).

پورفیری این کمربند نیز گزارش شده است (Zarasvandi et al., 2023b). هر چند تاکنون گزارشی در خصوص مقادیر گالیم موجود در ساختار مگنتیت‌های پهنه ارومیه-دختر ارائه نشده است، با این حال سنجش این عنصر در ساختار مگنتیت‌های کانسار مس پورفیری ایجو نشان دهنده وجود مقادیر قابل توجه این عنصر می‌باشد (میانگین ۰/۱۵ درصد وزنی؛ جدول ۱). از دیدگاه زمین‌شیمیایی، به سبب مشابهت بار و شعاع یونی Al³⁺ و Ga³⁺ (به ترتیب ۰/۵۱ Å و ۰/۶۲ Å)، گالیم از قابلیت جانمایی در ساختار کانی‌های آلومینیم‌دار برخوردار است. همین موضوع سبب رخداد متداول

۴-۵- پتانسیل‌های فلزی ناشناخته در ذخایر مس پورفیری زون ارومیه - دختر

یافته‌های نوین نشان دهنده رخداد کانی‌های نادر در پهنه دگرسانی پتاسیک ذخایر مس پورفیری کمربند ارومیه - دختر می‌باشد (Rezaei, 2017). به عنوان مثال مطالعه رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2023) نشان دهنده رخداد اپیدوت‌های غنی از La و Ce به همراه موناژیت و تیتانیت‌های غنی از عناصر نادر خاکی در پهنه دگرسانی پتاسیک برخی از ذخایر مس پورفیری کمربند ارومیه - دختر می‌باشد. همچنین رخداد قابل توجه عناصر Tl و Re در ساختار سولفیدهای دگرسانی پتاسیک ذخایر مس

همراه با این دگرسانی مشاهده می‌گردد. دگرسانی پتاسیک این کانسار با رخداد فراوان بیوتیت‌های گرمایی که بعضا کلرینی شده‌اند، مشخص می‌گردد. نتایج آنالیز EMPA از مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار نشان می‌دهد، این مگنتیت‌ها از محلول گرمایی دما بالا بوده (تا بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) و طی شرایط نرخ پایین واکنش سیال گرمایی و سنگ دیواره متبلور شده‌اند. به نظر می‌رسد عدم قابلیت سرد شدن بهینه سامانه گرمایی، با کانه‌زایی سولفیدی نسبتاً ضعیف در پهنه دگرسانی پتاسیک این کانسار مرتبط باشد. همچنین وجود مقادیر قابل توجه گالیم در مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک این کانسار، نشان می‌دهد افزون بر فازهای سولفیدی (پیریت و کالکوپریت)، فازهای اکسیدی ذخایر مس پورفیری کمرند ارومیه - دختر نیز می‌توانند دارای پتانسیل‌های اکتشافی ناشناخته باشند. این موضوع گویای لزوم انجام مطالعات بیشتر به منظور شناخت بهتر این شاخصه در ذخایر مس پورفیری کمرند ماگمایی ارومیه - دختر می‌باشد.

گالیم همراه ذخایر بوکسیتی شده است (Wen et al., 2021). نتایج مطالعه حاضر نشان‌دهنده رخداد قابل توجه گالیم در ساختار اسپینل مگنتیت‌های دگرسانی پتاسیک کانسار مس پورفیری ایجو می‌باشد که این شاخصه احتمالاً به دلیل جانشینی پذیرفته شده گالیم به جای آلومینیم در ساختار اسپینل می‌باشد. این موارد نشان‌دهنده لزوم انجام مطالعات بیشتر در خصوص پتانسیل‌های ناشناخته فلزات کمیاب و راهبردی همراه با ذخایر مس پورفیری کمرند ارومیه-دختر می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

کانسار مس پورفیری ایجو در ارتباط با جایگیری توده‌های نفوذی عمدتاً نونالیتی -گرانودیوریتی به سن میوسن در بخش‌های جنوبی کمرند ماگمایی ارومیه- دختر می‌باشد. دگرسانی‌های پتاسیک، فیلیک، پروپیلیتیک و آرزلیک در این کانسار مشاهده می‌گردد. اگرچه گسترش دگرسانی پتاسیک این کانسار محدوده است، با این حال عمده کانه‌زایی سولفیدی (عمدتاً شامل پیریت و کالکوپریت)

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>.
- Asadi, S., Moore, F., and 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>.
- Canil, D., and 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., and 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., and Saunders, M., 2018. Nanogeochemistry of hydrothermal magnetite, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173, 46. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1474-1>.
- Dupuis, C., and 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>.
- Ghasemi, A., and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran), *J. Asian Earth Sci.* 26, 683-693. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.01.003>.
- Golestani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Haidarian Shahri, M.R., 2018. Geochemistry, U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of the Neogene igneous rocks, at the Iju porphyry copper deposit, NW Shahr-e-Babak, Iran, *Ore Geology Reviews*, 93, 290-307. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.001>.
- Hu, H., Li, J.W., Lentz, D., Ren, Z., Zhao, X.F., Deng, X.D., and 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>.
- Karimpour, M.H., and 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., Bilinker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wälle, M., Heinrich, C.A., Holtz, F., and 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>.
- Liang, H.Y., Sun, W., Su, W.C., and Zartman, R.E., 2009. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration, *Econ. Geol.*, 104, 587-596. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.587>.
- Mahmoudi, E., Asadi, S., and Sharifpour, S., 2023. Micrometallogeny and hydrothermal fluid evolution of the Iju porphyry Cu deposit, NW Kerman, Iran: Evidence from fluid inclusions, Laser Raman spectroscopy, and single bond isotope systematics, *Geochemistry*, 125956. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.125956>.
- Mirnejad, H., Mathur, R., Hassanzadeh, J., Shafiei, B., and Nourali, S., 2013. Linking Cu mineralization to host porphyry emplacement: Re-Os ages of molybdenites versus U-Pb ages of zircons and sulfur isotope compositions of pyrite and chalcopyrite from the Iju and Sarkuh porphyry deposits in Southeast Iran, *Economic Geology*, 108, 861-870. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.4.861>.
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French, D., and 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., and 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>.
- Pokrovski, G.S., 2014. Use and misuse of chemical reactions and aqueous species distribution diagrams for interpreting metal transport and deposition in porphyry copper systems: Comment on Sun et al. (2013) “The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas”, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 126, 635–638. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.05.049> 103.
- 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, 204 pp.
- Rezaei, M., Zarasvandi, A., Basious, S., and Zamanian, H., 2023. Occurrence of the rare minerals in porphyry Cu deposits: Evidences from the potassic alteration of Sarkuh porphyry deposit, *Advanced Applied Geology*, Accepted Manuscript.
- 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>.
- Richards, J.P., 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70, 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>.
- Shafiei, B., Haschke, M., and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, Southeastern Iran, *Mineralium Deposita*, 44, 265-283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Econ. Geol.*, 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., and Ling, M., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas. *Ore Geology Reviews*, 65, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004>.
- Sun, W.D., Liang, H.Y., Ling, M.X., Zhan, M.Z., Ding, X., Zhang, H., Yang, X.Y., Li, Y.L., Ireland, T.R., Wei, Q.R., and Fan, W.M., 2013. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103, 263–275. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.054>.
- Sun, W.D., Zhang, C.C., Liang, H.Y., Ling, M.X., Li, C.Y., Ding, X., Zhang, H., Yang, X.Y., Ireland, T., and Fan, W.M., 2014. The genetic association between magnetite–hematite and porphyry copper deposits: Reply to Pokrovski, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126, 639–642. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.07.038>.
- Tian, J., Zhang, Y., Gong, L., Francisco, D.G., and 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, R., Richards, J.P., Hou, Z., Yang, Z., and Du Frane, S.A., 2014. Increased magmatic water content - the key to Oligo-Miocene porphyry Cu–Mo ± Au formation in the Eastern Gangdese Belt, Tibet, *Economic Geology*, 109, 1315–1339. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1315>.
- Wen, G., Li, J.W., Hofstra, A.H., Koenig, A.E., Lowers, H.A., and 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>.
- Wen, J., Zhang, J., Wen, H., Ling, K., Zhu, C., Fan, H., and Shen, N., 2021. Gallium isotope fractionation in the Xiaoshanba bauxite deposit, central Guizhou Province, southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 137, 104299. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104299>.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist* 95, 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Yin, S., Wirth, R., He, H., Ma, C., Pan, J., Xing, J., Xu, J., Fu, J., and Zhang, X.-N., 2022. Replacement of magnetite by hematite in hydrothermal systems: a refined redox independent model, *Earth and Planetary Science Letters*, 577, 117282. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117282>.
- Zarasvandi, A., Heidari, M., Rezaei, M., Raith, J., Asadi, S., Saki, A., and Azimzadeh, A., 2019a. 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., Azizi, S., Adelpour, M., and Saki, A., 2023b. Magnetite chemistry in the Dalli porphyry Cu-Au deposit, central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), *Journal of Economic Geology*, 15(1), 1–25. <https://doi.org/10.22067/econg.2023.77655.1049>.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., Taheri, M., Asadi, S., and Heidari, M., 2023a. 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., Raith, J.G., Asadi, S., and Lentz, D., 2019b. 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., and Lentz, D.R., 2018. Metal endowment reflected in chemical composition of silicates and sulfides 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>.
- Zhang, Y., Hollings, P., Shao, Y., Li, D., Chen, H., and Li, H., 2020. Magnetite texture and trace-element geochemistry fingerprint of pulsed mineralization in the Xinqiao Cu–Fe–Au deposit, Eastern China, *American Mineralogist* 105, 1712–1723. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7414>.