

Original Research Paper

Chemistry of Sericite, Pyrite, and Chalcopyrite in the Phyllic Alteration Zone of the Parkam and Abdar Porphyry Deposits

Alireza Zarasvandi¹, Mohsen Rezaei^{1*}, Mansour Adelpour¹ and Hadis Parvaneh¹

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022 July 13

Accepted: 2023 March 25

Available online: 2023 September 23

Keywords:

Phyllic alteration

Sericite chemistry

Pyrite and Chalcopyrite chemistry

Parkam and Abdar porphyry Cu deposits

Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt

ABSTRACT

Parkam (Sara) and Abdar porphyry Cu deposits containing mainly dioritic and quartz dioritic stocks are located in the southern part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB). In the Parkam deposit, alterations such as potassic, potassic-phyllic, biotitic, phyllic, argillic and propylitic have been identified, while Abdar deposit is characterized by the limited extent of potassic alteration with widespread occurrence of phyllic alteration. The aim of this study is to characterize the phyllic alteration using sericite and sulfide (i.e., pyrite and chalcopyrite) chemistry. In this way representative phyllic alteration samples were analyzed using Electron Microprobe Analysis (EMPA). Results imply for higher concentrations of Zn, Ag, Au, and as in the chalcopyrite samples (averages in wt. %; 0.07, 0.007, 0.012, and 0.043; respectively). Comparably, pyrite samples exhibit higher concentrations of Re, Te, Co, and Mo (averages in wt. %; 0.01, 0.003, 0.09, 0.07; respectively). Among this, gold concentration in the pyrite samples of studied deposits is analogous to those reported previously for Meiduk porphyry Cu-Mo systems wherein gold occurs as inclusions, and/or nanoparticles (probably as Au⁰ or Au-telluride). In the both deposits, fine-grained micas are K-rich. Additionally, sericite samples exhibit an increasing trend of Si with Fe²⁺, Mg²⁺, and Al³⁺ substitution in the octahedral sites confirming the changes to celadonite - endmember. In accordance with other mineralized porphyry systems (i.e., Copper Cliff and Copper Flat deposits), most of the data follow the trend of ideal tschermak substitution occurring by the increasing of positive charges in the tetrahedral site of white mica owing to the increasing of Si substitution.

1. Introduction

Porphyry Cu ± Mo ± Au systems are considered as the most studied and potentially well-known ore deposit type. These deposits supply most of the world's Cu and Mo resources (approximately ~80% Cu and ~95% Mo; Sillitoe, 2010). Porphyry deposits are commonly centred within a distinctive

arrangement of alteration assemblages, including sodic-calcic, potassic, propylitic, chlorite-sericite with early and late sericitic, and finally, near-surface advanced argillic alterations. According to Seedorff et al. (2005) the processes leading to alteration could be summarized as

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

Citation:

Zarasvandi, A.R., Rezaei, M., Adelpour, M., and Parvaneh, H., 2023. Chemistry of Sericite, Pyrite, and Chalcopyrite in the Phyllic Alteration Zone of the Parkam and Abdar Porphyry Deposits. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 139-158. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.351321.2015>

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

doi: 10.22071/gsj.2023.351321.2015

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.4.5



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

alkali exchange (potassic alteration), hydrolysis (sericitic, advanced argillic and intermediate argillic), and volatile addition (propylitic alteration).

In the phyllic alteration, the destruction of feldspars under the acidic pH conditions and K, H⁺, and HS⁻ availability facilitates the formation of quartz, white mica, and up to 20% sulfide (e.g., pyrite and to lesser extent chalcopyrite; Pirajno 2009). Notably, this alteration occurs next to the mineralized potassic alteration (Richards, 2012).

In Iran most of the porphyry Cu deposits are localized in the Urumieh –Dokhtar Magmatic Belt (UDMB), particularly to the southern parts which is called as Kerman Cenozoic Magmatic Assemblage (KCMA; Shafiei et al., 2009). During the recent years several studies have been carried out for characterizing the main factors controlling the metal fertility of porphyry Cu systems. Considering the close association between potassic alteration and sulfide mineralization, most of these studies focused on the potassic alteration. Comparably, a little is known about the criteria of phyllic alteration. Accordingly, the aim of this study is to characterize the phyllic alteration of Parkam and Abdar porphyry deposits using sericite and sulfide (i.e., pyrite and chalcopyrite) chemistry. Additionally, trace metal content of sulfides were used to provide insight into the trace metal partitioning of sulfides in the phyllic alteration of porphyry Cu deposits.

2. Geological Setting

Parkam (Sara) and Abdar porphyry Cu deposits containing mainly dioritic and quartz dioritic stocks are located in the southern part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB). Both deposits are associated with collisional magmatic system, where magma sourced from combined contribution of juvenile lower crust melting and melting of the subduction modified lithospheric mantle (Asadi, 2018). In the Parkam deposit, alterations such as potassic, potassic-phyllic, biotitic, phyllic, argillic and propylitic have been identified, while Abdar deposit is characterized by the limited extent of potassic alteration with widespread occurrence of phyllic alteration. Comparison of phyllic alteration in the studied deposits reveal that the late-stage D-type veins containing quartz ± pyrite ± chalcopyrite are dominant in the Abdar deposit, whereas the phyllic alteration of Parkam deposit is characterized by the dominance of anhydrite minerals. Sulfide ores containing

pyrite and chalcopyrite occurred as dissemination and/or veinlets within the phyllic alteration of both deposits.

3. Research Methodology

Sampling was carried out on the drill cores of Abdar (borehole No: ABR01 and ABR02) and Parkam (borehole No: PAM 01 and PAM 04) at different depths. Polished thin sections were prepared from 1-2 cm blocks for optical microscopy and electron probe microanalyzer (EPMA) studies. Wavelength-dispersive (WDS) EPMA analyses of the samples were conducted at the Montanuniversität Leoben, Austria using the Jeol JXA 8200 instrument and the following analytical conditions: 15 kV accelerating voltage, 10 nA beam current and beam size set to spot mode (of about 1 μm). For analyzing the sericite minerals, the calibration standards were natural adularia, atacamite, rhodonite, titanite, fluorite, labradorite, wollastonite, and olivine for F, Si, Al, Fe, Mg, Ti, Cl, Ba, and Mn. For sulfide analyses including pyrite and chalcopyrite, the calibration standards used were pyrite for Fe and S, chalcopyrite for Cu, pentlandite for Ni, AuTe₂ for Au and Te, Bi₂Se₃ for Se, CoAs₃ for Co, GaAs for As, AgBiSe₂ for Ag, and ZnS for Zn. Moreover, the sulfides elemental maps were obtained using wavelength-dispersive spectrometry (WDS) X-ray mapping capability of the electron probe microanalyzer.

4. Results

The results of EMPA analysis show that the white mica in the phyllic alteration of both deposits mainly contain SiO₂, Al₂O₃, and K₂O. The average content of these elements (wt. %) in the Parkam deposit include 46.8, 39.51, and 6.08 and for Abdar deposit include 52.15, 30.97, and 9.7. Additionally, in the both deposits, fine-grained micas are K-rich.

Results imply for higher concentrations of Zn, Ag, Au, and as in the chalcopyrite samples (averages in wt. %; 0.07, 0.007, 0.012, and 0.043; respectively). Comparably, pyrite samples exhibit higher concentrations of Re, Te, Co, and Mo (averages in wt. %; 0.01, 0.003, 0.09, 0.07; respectively). Results of WDS elemental mappings confirmed that the Co and as have not a uniform distribution, but comparably the Hg shows a uniform distribution throughout the sulfide ores (i.e., pyrite and chalcopyrite). Additionally, gold occurred mostly as nanoparticles / inclusions.

5. Discussion and Conclusions

Sericite analyses in the both deposits exhibit an increasing trend of Si with Fe^{2+} , Mg^{2+} , and Al^{3+} substitution in the octahedral sites confirming the changes to celadonic - endmember. In accordance with other mineralized porphyry systems (i.e., Copper Cliff and Copper Flat deposits), most of the data follow the trend of ideal tschermak substitution occurring by the increasing of positive charges in the tetrahedral site of white mica owing to the increasing of Si substitution. Results proved that there are variable ranges of trace elements concentration in the sulfide samples confirming the variation of trace metal partitioning in the sulfide structure through the hydrothermal fluid evolution

in the studied deposits. Moreover, gold concentration in the pyrite samples of studied deposits is analogous to those reported previously for Meiduk porphyry Cu-Mo systems wherein gold occurs as inclusions, and/or nanoparticles (probably as Au_0 or Au-telluride).

Acknowledgements

This research was made possible by a grant (No: SCU.EG1401.582 and No: SCU.EG1401.38600) to first and second authors from the office of vice-chancellor for research and technology, Shahid Chamran University of Ahvaz. We acknowledge their support.

شیمی کانی‌های سریسیت، پیریت و کالکوپیریت در زون دگرسانی فیلک سامانه‌های پورفیری پرکام و آبدر

علیرضا زراسوندی^۱، محسن رضایی^۱، منصور عادل‌پور^۱ و حدیث پروانه^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

کانسارهای مس پورفیری پرکام (سارا) و آبدر در ارتباط با استوک‌های دیوریتی - کوآرتزدیوریتی در بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، واقع شده‌اند. در کانسار پرکام دگرسانی‌های پتاسیک، پتاسیک - فلیک، بیوتیتیک، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک توسعه یافته‌اند، در مقابل در کانسار آبدر گسترش دگرسانی پتاسیک ناچیز، اما پهنه دگرسانی فلیک دارای گسترش قابل توجه است. هدف از این مطالعه بررسی شیمی کانی‌های سریسیتی و سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) در زون دگرسانی فلیک این کانسارها است. در این راستا نمونه‌برداری از گمانه‌های حفاری انجام شد و در نهایت ۹ نمونه منتخب با استفاده از آنالیز ریزکاوته الکترونی (EMPA) مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد تمرکز عناصر As ، Zn ، Ag ، Au و Fe^{2+} در نمونه‌های کالکوپیریت (به ترتیب با میانگین 0.07 ، 0.07 ، 0.12 و 0.43 درصد وزنی) به نسبت بیشتر است. در مقابل عناصر Re ، Te ، Co و Mo عمدتاً در نمونه‌های پیریت (به ترتیب با میانگین 0.01 ، 0.03 ، 0.09 و 0.07 درصد وزنی) تمرکز دارند. در این میان رخداد طلا در نمونه‌های پیریت زون دگرسانی فلیک سامانه‌های مس پورفیری آبدر و پرکام بسیار شبیه به کانسار میدوک بوده و نشان‌دهنده رخداد طلا به صورت اذخال یا نانوذرات طلای طبیعی (احتمالاً به صورت Au^0) یا تلورید طلا) می‌باشد. در نمونه‌های سریسیت هر دو کانسار، میکاهای ریزدانه، غنی از پتاسیم هستند. افزون بر این نمونه‌ها دارای روند افزایش جانشینی Si و نیز جانشینی عناصر Fe^{2+} ، Mg^{2+} و Al^{3+} در مکان‌های هشت‌وجهی می‌باشد که مبین روند تغییر ترکیب به سمت سلاوونیت می‌باشد. همانند دیگر کانسارهای مس پورفیری دارای کانه‌زایی قابل توجه (مانند Copper Flat و Copper Cliff)، نمونه‌های دگرسانی فلیک مربوط به کانسارهای مورد مطالعه، نشان‌دهنده روند جانشینی شرمایت می‌باشند که به دلیل افزایش بار مثبت در جایگاه چهاروجهی به دلیل روند افزایشی جانشینی Si در ساختار میکاهای سفید می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

دگرسانی فلیک

شیمی سریسیت

شیمی پیریت و کالکوپیریت

کانسارهای پورفیری پرکام و آبدر

کمان ماگمایی ارومیه - دختر

۱- پیش‌نوشتار

دگرسانی‌های موجود در یک سامانه پورفیری از پایین به سمت بالا شامل دگرسانی اولیه سدیک - کلسیک، پتاسیک، کلریت - سریسیت، سریسیت و در نهایت دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در مناطق سطحی است (Sillitoe, 2010). همچنین دگرسانی پیرامونی کلریتی و پروپیلیتیک به ترتیب در نواحی کم‌ژرفا و ژرف‌تر رخ می‌دهند. در این کانسارها عمده کانه‌زایی درون‌زاد در انتهای زون دگرسانی پتاسیک و در مجاورت زون دگرسانی فلیک حادث می‌شود (Richards, 2012). به‌طور کلی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم در سیستم دگرسانی کانسارهای مس پورفیری به‌طور خلاصه عبارتند از: (۱) تبادل آلكالی (دگرسانی پتاسیک)، (۲) هیدرولیز (دگرسانی‌های سریسیتی، آرژیلیک حدواسط و پیشرفته) و (۳) اضافه شدن اجزای فرار

ذخایر مس پورفیری به عنوان منبع اصلی مس، مولیبدن، رنیوم و منبع ثانویه برای دیگر فلزات (Pb ، Au ، Ag ، Pd ، Te ، Se ، Bi ، Zn) معرفی شده‌اند (Sillitoe, 2010). کانسارهای مس پورفیری اغلب تناژ بالا، عیار پایین، غیر همزاد و درون‌زاد بوده و از نظر زمانی و مکانی در ارتباط با نفوذی‌های نیمه‌ژرف پورفیری عمدتاً آداکیتی هستند (Castillo, 2012; Zarasvandi et al., 2018). کانسارهای مس پورفیری را می‌توان محصول سرد شدن سامانه‌های ماگمایی - گرمایی مرتبط با جایگیری نفوذی‌های کم ژرفا در کمان‌های ماگمایی مرتبط با فروورانش و یا کمان‌های برخورد کرده (Collided arcs) دانست (Richards, 2015). سیستم‌های مس پورفیری معمولاً دارای منطقه‌بندی دگرسانی از مرکز به سمت پیرامون توده نفوذی هستند (Sillitoe, 2010).

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

ماخذنگاری:

زراسوندی، ع.ر.، رضایی، م.، عادل‌پور، م. و پروانه، ح.، ۱۴۰۲، شیمی کانی‌های سریسیت، پیریت و کالکوپیریت در زون دگرسانی فلیک سامانه‌های پورفیری پرکام و آبدر، فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳ (۳)، ۱۲۹-۱۳۹
https://doi.org/10.22071/gsj.2023.351321.2015



doi: 10.22071/gsj.2023.351321.2015



doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.4.5



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

۲- زمین‌شناسی منطقه

۲-۱- کانسار پرکام

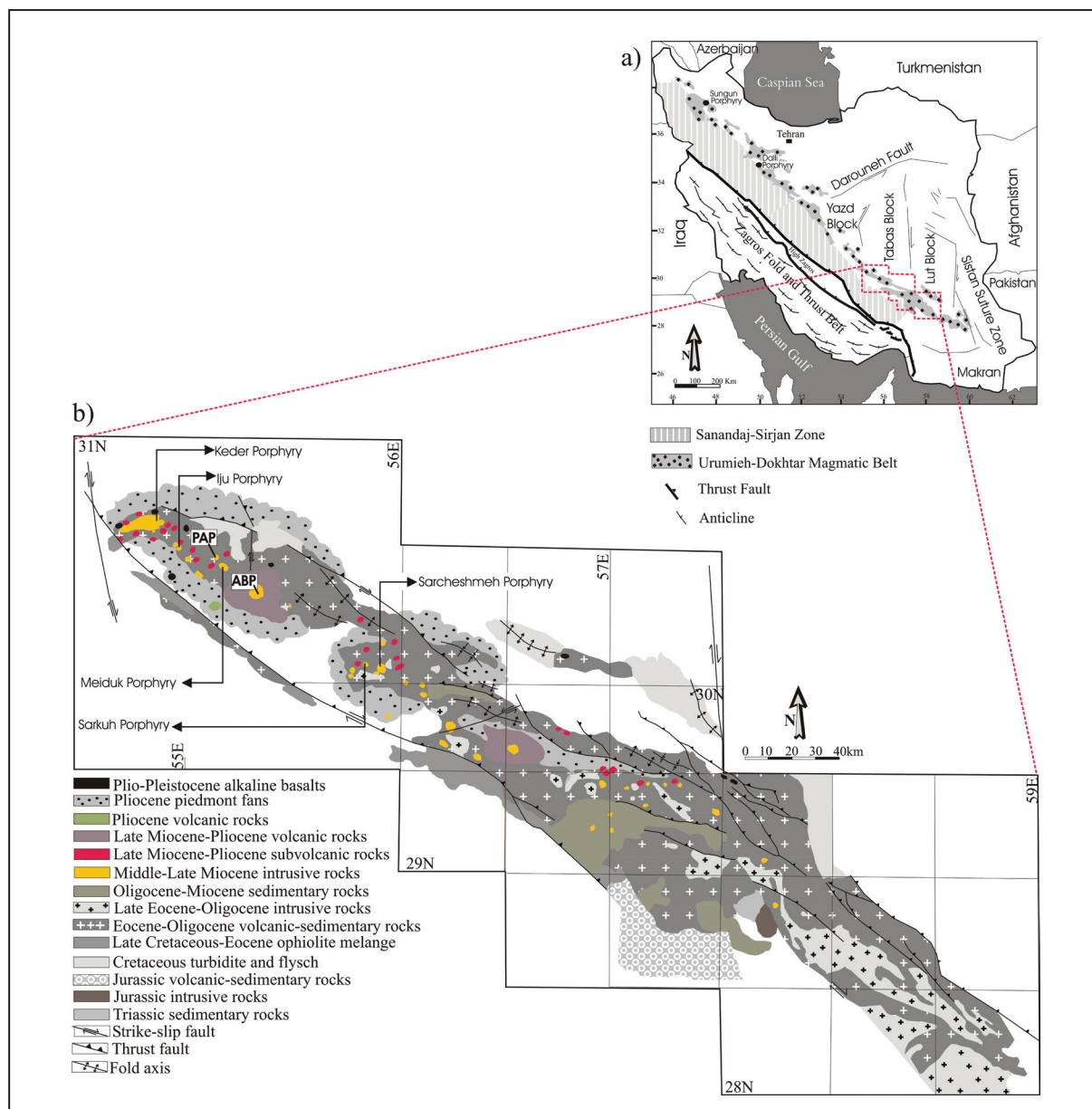
کانسار مس پورفیری پرکام (سارا) که نام خود را از کوه داسیتی نئوژن سارا گرفته، در استان کرمان، ۸۷ کیلومتری شمال باختر کانسار سرچشمه و ۲ کیلومتری کانسار مس پورفیری میدوک قرار دارد (شکل ۱). این کانسار در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر در کمربند دهج - ساردوییه واقع شده است (Dimitrijevic, 1973). قدیمی‌ترین واحد سنگی کانسار پرکام فلیش‌های سنومانین-تورونین است و کنگلومرای کرمان به‌صورت ناپیوسته بر روی آن واقع شده و توسط فلیش‌های انوسن زیرین پوشیده شده است (Saric et al., 1972; Dimitrijevic, 1973). در محدوده کانسار مس پورفیری پرکام، نفوذی‌های نیمه‌آتشفشانی با ترکیب چیره دیوریتی و کوارتز دیوریتی درون سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی شامل آندزیت تا تراکی آندزیت، توف و سنگ‌های آذرآواری آندزیتی جایگزین شده‌اند. از لحاظ حجمی بخش عمده توده نفوذی کانسار پرکام دارای ترکیب دیوریتی است و متحمل دگرسانی به نسبت شدیدی شده است. بر مبنای مطالعات سنگ‌نگاری در توده‌های دیوریتی، میزان پلاژیوکلاز بین ۳۵ تا ۵۰ درصد حجمی، هورنبلند تا ۱۰ درصد حجمی، بیوتیت ۳ تا ۵ درصد حجمی و فلدسپار پتاسیم کمتر از ۵ درصد حجمی است. ماتریکس عمدتاً از پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و هورنبلند تشکیل شده است. کوارتز دیوریت از نظر حجمی کوچک‌تر است و از پلاژیوکلاز (۴۵ تا ۵۰ درصد حجمی)، هورنبلند (۸ تا ۱۲ درصد حجمی)، بیوتیت (۳ تا ۵ درصد حجمی) و کوارتز (۱۰ درصد حجمی) تشکیل شده است. مطالعات اخیر صورت گرفته نشان داده ماگمای مولد کانه‌زایی مس پورفیری در این کانسار، در جایگاه زمین‌ساختی کمان برخورد کرده و بر اثر ذوب بخشی جبه لیتوسفری تغییر یافته از مواد حاصل از فروراش به‌وجود آمده است (Subduction modified lithospheric mantle; Asadi, 2018). گفتنی است، آخرین فاز نفوذی در این منطقه، دایک‌های تأخیری کوارتز دیوریتی است. این دایک‌ها معمولاً دارای روند شمال خاور - جنوب باختر بوده و دگرسانی و کانه‌زایی ضعیفی دارند.

۲-۲- کانسار آبدر

کانسار آبدر در استان کرمان در محدوده عرض جغرافیایی ۳۰°۱۸' ۴۵" و طول جغرافیایی ۵۵°۱۸' ۱۹" واقع شده است. کالدرای آبدر با سن نئوژن بخشی از آتشفشان مساحیم واقع در ۳۵ کیلومتری شمال خاور شهربابک واقع است. واحدهای رخنمون‌یافته در محدوده کانسار آبدر به ترتیب از قدیم به جدید شامل توف آندزیتی، برش‌های آتشفشانی، توده‌های نیمه‌زرف عمدتاً دیوریتی به همراه آپوفیرهایی از سنگ‌های آندزیتی و دایک‌های حدواسط (دیوریت تا کوارتز دیوریت و آندزیت‌بازالت) می‌باشند. در ادامه دایک‌های لامپروفیری قطع‌کننده واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه هستند. در این کانسار توده‌های نفوذی دیوریتی به سن حدود ۷/۵ میلیون سال (سن سنجی U/Pb زیر کن؛ McInnes et al., 2005) که در مرکز یک کالدرای فرسایش یافته قرار دارند عامل کانه‌زایی ضعیف مس (۱/۰ - ۲/۵ درصد مس) در این کانسار هستند (McInnes et al., 2003). مطالعات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد واحدهای دیوریتی عمدتاً دارای پلاژیوکلاز (۳۰ درصد حجمی)، هورنبلند (تا ۱۰ درصد حجمی) و کمتر از ۳ درصد حجمی بیوتیت به همراه مقادیر ناچیز اورتوکلاز است. زمینه دانه‌ریز واحدهای دیوریتی عمدتاً شامل پلاژیوکلاز، بیوتیت، اورتوکلاز و کوارتز است.

(دگرسانی پروپلیتیکی) (Seedorff et al., 2005). معمولاً در سیستم‌های پورفیری گذار از دگرسانی پتاسیک به دگرسانی فیلیک همراه با کاهش دما و کاهش اکتیویته $a(K^+)/a(H^+)$ سیالات گرمایی است که باعث پایداری میکاهای دانه سفید ریز (سریسیت) می‌شود (Pirajno, 2009). از دیرباز اختلاط آب‌های جوی و ماگمایی به عنوان عاملی مهم در رخداد و گسترش زون دگرسانی فیلیک قلمداد شده است (Hemley and Hunt, 1992). با این حال بررسی‌های اخیر نشان داده در برخی از ذخایر مس پورفیری، بدون نقش آفرینی قابل توجه سیالات جوی، این دگرسانی می‌تواند منشأ ماگمایی داشته باشد (Rezaei and Zarasvandi, 2022). افزون بر این، بررسی‌ها نشان داده شیمی میکای سفید (مسکوویت) در دگرسانی فیلیک کانسارهای مس پورفیری می‌تواند تفکیک‌کننده سامانه‌های با کانه‌زایی متفاوت باشد (Uribe-Mogollon and Maher, 2020). به‌عنوان مثال، میکاهای سفید ذخایر مس پورفیری دارای کانه‌زایی قابل توجه، واجد مقادیر بیشتر Sn، Pb، Cr، Zn، Cs در ساختار خود می‌باشند (Uribe-Mogollon and Maher, 2018). این شاخصه مبنای ارائه‌نمودار تفکیکی میزان باروری ذخایر مس پورفیری بر مبنای شیمی میکای سفید (مسکوویت) شده است.

بیشتر ذخایر مس پورفیری ایران در کمان ماگمایی ارومیه - دختر و به‌ویژه در بخش‌های جنوب خاوری که کمان ماگمایی سنوزویک کرمان (KCMA) نامیده شده، قرار دارند (Shafiei et al., 2009). سیستم‌های مس پورفیری موجود در زون ماگمایی ارومیه - دختر از جنبه‌های مختلفی مانند شاخصه‌های پتروژنی و یا تکامل سیال کانه‌دار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Shafiei et al., 2009; Asadi et al., 2014; Zarasvandi et al., 2015b; 2018). با توجه رابطه تنگاتنگ کانه‌زایی سولفیدی مس و دگرسانی پتاسیک در ذخایر مس پورفیری، عمده مطالعات پیشین در مورد زون‌های دگرسانی ذخایر مس پورفیری زون ارومیه - دختر، به کانی‌های دگرسانی پتاسیک (بیوتیت، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت) معطوف بوده است (Rezaei, 2017; Zarasvandi et al., 2018). به‌نسبت مطالعات کمتری بر روی شاخصه‌های فیزیکی‌شیمیایی دیگر زون‌های دگرسانی به‌ویژه مناطق دگرسانی فیلیک انجام شده است. تنها مطالعه رضایی و زراسوندی (Rezaei and Zarasvandi, 2022) نشان داده مسکوویت‌های دگرسانی فیلیک سامانه مس پورفیری سریدون، همانند دیگر ذخایر مس پورفیری فاقد کانه‌زایی قابل توجه (مانند Grasshopper در آمریکا) نشانگر روند افزایش میزان Si و Al در ساختار خود هستند. در این راستا با توجه به اهمیت دگرسانی فیلیک در سیستم‌های مس پورفیری، در این مطالعه سعی شده متغیرهای تعیین‌کننده شیمی سریسیت و کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) دگرسانی فیلیک کانسارهای مس پورفیری پرکام و آبدر شاخص‌سازی شود. مطالعات اخیر نشان داده فازهای سولفیدی ذخایر مس پورفیری (به‌ویژه پیریت و کالکوپیریت) می‌توانند دربرگیرنده تمرکز قابل توجهی از عناصر کمیاب حتی در آستانه استخراج باشند (Reich et al., 2013a). با این حال در پورفیری‌های زون ارومیه - دختر کمتر به آنها پرداخته شده است (Zarasvandi et al., 2018). در نتیجه در این مطالعه تلاش شده داده‌های حاصل به منظور تعیین نرخ مشارکت عناصر کمیاب در فازهای سولفیدی دگرسانی فیلیک نیز مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است این موضوع می‌تواند در ارتقای دانش موجود در زمینه اکتشاف پهنه این ذخایر اهمیت داشته باشد.



شکل ۱- (a) کمربند کوهزایی و فلززایی زاگرس شامل سه روند زمین‌ساختی؛ کمان ماگمایی ارومیه دختر، زون دگرگونی سندج - سیرجان و کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس، با تغییرات برگرفته از قاسمی و تالبوت (Ghasemi and Talbot, 2006)؛ (b) موقعیت برخی از کانسارهای مس پورفیری در بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، با تغییرات از شفیع و شهاب‌پور (Shafiei and Shahabpour, 2008). علائم اختصاری؛ ABP: کانسار پورفیری آبدر و PAP: کانسار پورفیری پرکام.

Figure 1. a) Zagros orogenic and metallogenic belt, including three major tectonic trends; Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt (UDMB), Sanandaj-Sirjan Metamorphic Zone, and Zagros Fold and Thrust Belt, modified after Ghasemi and Talbot (2006); b) Location of the some porphyry deposits in the southern part of UDMB, modified after Shafiei and Shahabpour (2008). Abbreviations; ABP: Abdar porphyry deposit and PAP: Parkam porphyry deposit.

۳- روش پژوهش

(میکاهای سفید ریزدانه و کانه‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت) در آزمایشگاه EMPA دانشگاه Montanuniversitat Leoben کشور اتریش مورد آنالیز قرار گرفتند. در اینجا دستگاه ریزکاوند الکترونی مورد استفاده مدل Jeol JXA 8200 است. آنالیزهای ولتاژ ۱۵ KV، جریان با آمپر ۱۰ nA و با قطر باریک الکترونی ۱ میکرومتر انجام شد. در طول انجام آنالیز زمان خوانش دستگاه برای پیک (Peak) و پس زمینه (Background) به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ ثانیه بوده است. حد تشخیص (به صورت درصد

در این مطالعه نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری کانسارهای مس پورفیری آبدر (گمانه‌های ABR 01 و ABR 02) و پرکام (گمانه‌های PAM 01 و PAM 04) انجام شد. مطالعات آزمایشگاهی دربردارنده مطالعات سنگ‌نگاشتی مقاطع نازک - صیقلی برای تعیین بافت سنگ‌ها و ریزساختارهای آنها می‌باشد. به منظور این کار، ۳۲ نمونه از مغزه‌های حفاری (۲۱ نمونه سیلیکاته و ۱۱ نمونه سولفیدی) برای تعیین شاخص‌های زون دگرسانی فیلیک انتخاب شد. در این مطالعه تعداد ۹ نمونه منتخب

بخش‌های گمانه‌های حفر شده (گمانه‌های ABR01 و ABR02 تا ژرفای ۴۰۳ متری) قابل مشاهده است. بررسی مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد بر اثر شدت رخداد دگرسانی فیلیک کانی‌های مافیک اولیه (مانند هورنبلند و بیوتیت)، ابتدا تبدیل به کلریت و در ادامه با سریسیت جانشین شده‌اند. افزون بر این کانی‌های فلدسپار پتاسیم نیز با سریسیت جانشین شده‌اند؛ به گونه‌ای که تنها آثار محدودی از این کانی‌های اولیه دیده می‌شود که این موضوع نشانگر افزایش روند شدت دگرسانی فیلیک است (Ulrich and Heinrich, 2001; Wallace and Maher, 2019). افزون بر این نبود رخداد قابل توجه کلریت و در مقابل حضور روتیل در نمونه‌های فیلیک این کانسار نشان‌دهنده شدت رخداد فرایندهای هیدرولیز مرتبط با دگرسانی فیلیک می‌باشد (Ulrich and Heinrich, 2001). در این کانسار با توجه به شدت دگرسانی فیلیک و به‌ویژه تبدیل بخشی تا کامل دگرسانی پتاسیک به فیلیک، عملاً تفکیک سیستم رگه‌ای با توجه به رخداد دگرسانی‌ها امکان‌پذیر نیست. بر خلاف مطالعات کهن تر صورت پذیرفته بر روی ذخایر مس پورفیری، یافته‌های جدید نشان داده، دگرسانی فیلیک این کانسارها می‌تواند اولیه و یا تاخیری باشد (Uribe-Mogollon and Maher, 2018; Wallace and Maher, 2019). دگرسانی فیلیک اولیه که تاکنون در مطالعات عموماً نادیده گرفته شده، مربوط به مراحل آغازین تکامل سامانه گرمایی است و در بخش‌های ژرف‌تر سامانه مس پورفیری یافت می‌شود. این نوع از دگرسانی فیلیک، با میکاهای سفید با ظاهر خاکستری تا سبز (در نمونه دستی) و با کانه‌زایی دانه پراکنده کالکوپیریت و بورنیت مشخص می‌شوند (Uribe-Mogollon and Maher, 2018; Wallace and Maher, 2019). در مقابل دگرسانی فیلیک تاخیری با رخداد غالب میکاهای با ظاهر سفید (در نمونه دستی) مشخص شده و عموماً بر اثر تبدیل دگرسانی‌های اولیه (پتاسیک و فیلیک اولیه) حاصل می‌شوند. افزون بر این، رخداد رگه‌های کوارتز سولفیدی (عمدتاً پیریتی) با حاشیه سریسیتی که در تقسیم‌بندی عمومی رگه‌های کانسارهای مس پورفیری تحت عنوان نسل D نامیده شده است (Sillitoe, 2010)، از ویژگی‌های بارز دگرسانی فیلیک تاخیری است. همان‌طور که پیشتر یاد شد، به دلیل تبدیل بخشی تا کامل دگرسانی پتاسیک به فیلیک در کانسار آبدر، نسل‌بندی دقیق رگه‌ای امکان‌پذیر نیست، با این وجود تنها رخداد رگه‌های نسل D با قطعیت قابل ردیابی هستند (شکل ۲-a و b). رخداد گسترده میکاهای با ظاهر سفید رنگ به همراه رخنمون قابل توجه رگه‌های نسل D (شکل ۲-a و b) و جانشینی گسترده کانی اولیه مانند پلاژیوکلاز با سریسیت (شکل ۲-c) حاکی از تاخیری بودن پهنه دگرسانی فیلیک در این سامانه پورفیری است.

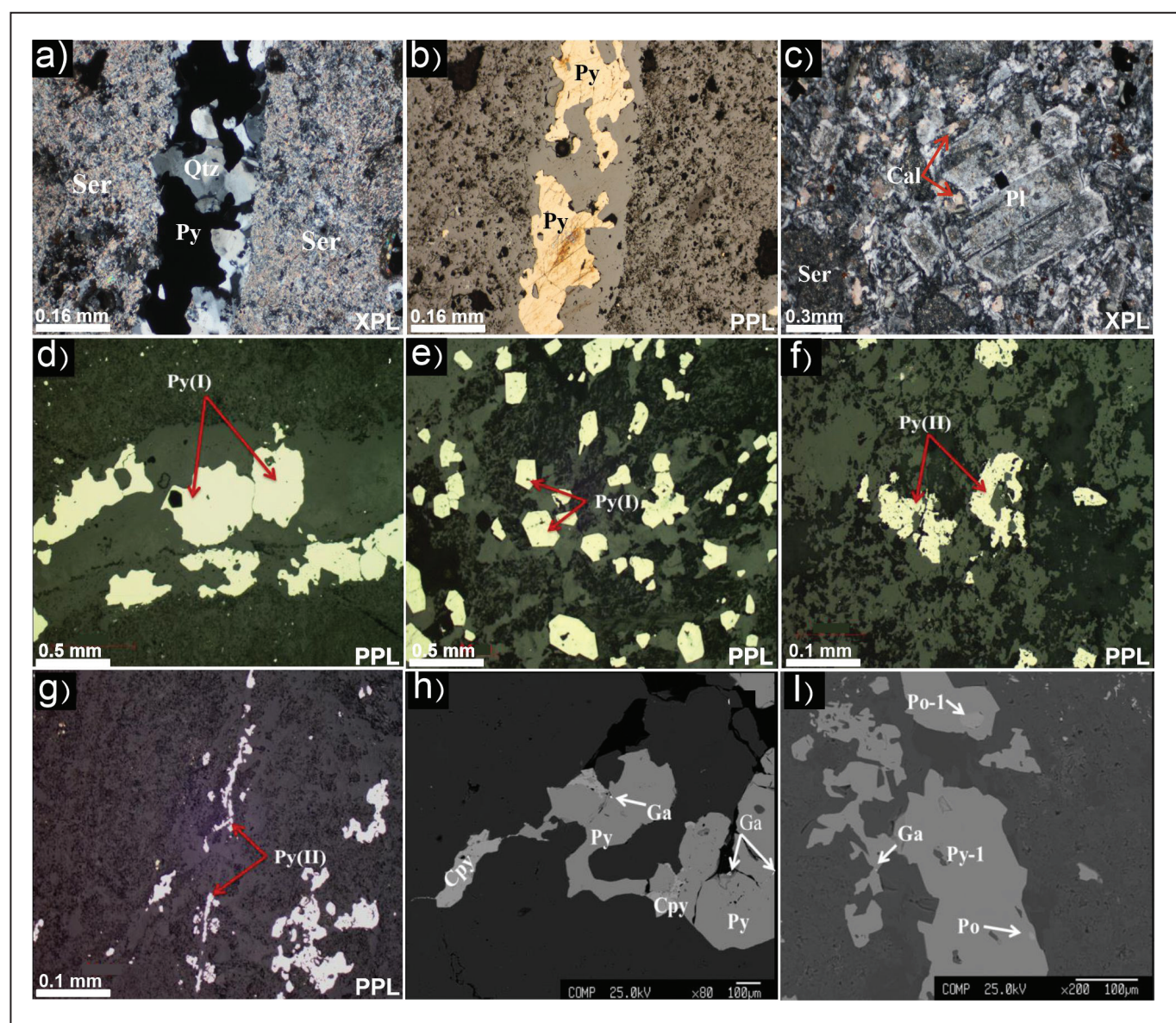
مقایسه دگرسانی فیلیک دو کانسار مورد مطالعه نشان می‌دهد رگه‌های کوارتز سولفیدی نسل D در کانسار آبدر چیره بوده و در مقابل کانی انیدریت در نمونه‌های پرکام دارای رخداد به نسبت گسترده‌تری است. کانه‌زایی سولفیدی با غلبه پیریت و کالکوپیریت گاه به صورت افشان و رگه‌های ستر کوارتز در هر دو کانسار حضور دارند. کانه پیریت در دگرسانی فیلیک هر دو کانسار به صورت دو نسل مجزا (I و II) قابل تفکیک است. پیریت‌های نسل اول (I) در کانسارهای آبدر و پرکام معمولاً به صورت خودشکل (یوهدرال) و مکعبی شکل در اندازه‌های متفاوت دیده می‌شود (شکل ۲-d و e). همچنین این پیریت‌ها گاه دارای سطوح متخلخل و ناصاف بوده و به صورت دانه پراکنده و شکل‌دار در مناطقی که به شدت تحت‌تأثیر دگرسانی سریسیتی و سیلیسی قرار گرفته‌اند، یافت می‌شوند. پیریت‌های نسل دوم (II)، در کانسارهای آبدر و پرکام به صورت بی‌شکل همراه با شکستگی‌ها دیده می‌شوند (شکل ۲-f و g). به‌طور کلی بررسی مقاطع دگرسانی فیلیک کانسارهای پورفیری پرکام و آبدر نشان‌دهنده رخداد غالب کانه‌های پیریت، کالکوپیریت به همراه مقادیر کمتر پیروتیت، گالن، مگنتیت و روتیل است (شکل ۲-h و i).

وزنی) توسط نرم‌افزار Integrated Jeol Software درونی دستگاه محاسبه شده است. برای اندازه‌گیری شیمی سریسیت، استانداردهای آدولاریا، آتاکامیت، رودونیت، تیتانیت، فلئوریت، لابرادوریت، ولاستونیت و الیون به ترتیب برای اندازه‌گیری عناصر Ba, Cl, Ti, Mg, Fe, Al, Si, F و Mn مورد استفاده قرار گرفت. افزون بر این، برای سنجش شیمی سولفیدها (پیریت و کالکوپیریت) از استانداردهای پیریت و کالکوپیریت به‌منظور اندازه‌گیری S, Fe و Cu استفاده شد. برای دیگر عناصر شامل Ag, As, Co, Se, Te, Au, Ni و Zn به‌ترتیب از استانداردهای پنتلاتنیت، AuTe₂ (برای Au و Te)، AgBiSe₂، GaAs، CoAs₃، Bi₂Se₃ و ZnS استفاده شد. به‌منظور حصول نتایج دقیق‌تر پیش از انجام آنالیز کلیه نمونه‌ها تحت پوشش کربنی قرار گرفتند. گفتنی است پیش از شروع آنالیز بر روی کانی‌های انتخاب شده، ادخال‌ها و کانی‌های همراه با استفاده از بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی BSE (Backscattered Electron Image) بررسی و به صورت دقیق مشخص شدند. نتایج آنالیزی کانی‌های سریسیت، پیریت و کالکوپیریت از زون دگرسانی فیلیک کانسارهای مورد مطالعه در جدول‌های ۱ تا ۵ نمایش داده شده است. افزون بر این، همین دستگاه Jeol JXA 8200 برای تهیه نقشه عنصری WDS (Wavelength-Dispersive Spectroscopy) مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور پس از انتخاب کانه‌های سولفیدی و ورود مختصات چهار گوش کانه‌ها به دستگاه، نقشه‌برداری عنصری طی ۱۲ ساعت کارکرد دستگاه ریزکانونده الکترونی در طول شب انجام شد.

۴- دگرسانی - کانه‌زایی

در کانسار پرکام، شش نوع دگرسانی، شامل دگرسانی‌های پتاسیک، پتاسیک - فیلیک، بیوتیتیک، فیلیک، پروپیلیتیک و آرژیلیک شناسایی شده است. طبق مطالعه مغزه‌های حفاری شده و مقاطع نازک - صیقلی، دگرسانی پتاسیک در کانسار پرکام اغلب در بخش مرکزی و ژرف‌ترین بخش رخ داده است و با کانی‌های فلدسپار پتاسیم ثانویه، بیوتیت ثانویه و تعادل دوباره یافته مشخص می‌شود. همچنین دگرسانی بیوتیتیک بیشتر در سنگ‌های آتشفشانی دیواره توسعه دارد. دگرسانی پتاسیک - فیلیک تحت تأثیرپذیری دگرسانی پتاسیک از دگرسانی فیلیک (Overprinting) به‌وجود آمده و با ظهور همزمان کانی‌های سریسیت، بیوتیت ثانویه، فلدسپار پتاسیم ثانویه، کوارتز و انیدریت مشخص می‌شود. در این سامانه پورفیری تغییر به زون دگرسانی فیلیک با غالب شدن کوارتز - سریسیت - پیریت همراه است. دگرسانی فیلیک در کانسار پرکام دارای گسترش زیادی بوده و به‌ویژه در توده‌های پورفیری پرکام قابل مشاهده است. در این کانسار سیستم کانه‌زایی استوک‌ورکی به خوبی توسعه یافته و عموماً همراه با دگرسانی‌های پتاسیک، پتاسیک - فیلیک و فیلیک همراه است. جزئیات مربوط به نسل‌های رگه‌ای این کانسار در مطالعه محمدی‌لقب و تقی‌پور (Mohammadilagh and Taghipour, 2011) مطرح شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت در رگه‌های نسل اول این سیستم پورفیری کانی‌های کوارتز و مگنتیت غالب هستند که در ادامه توسط رگه‌های تاخیری تر کوارتز سولفیدی (با چیرگی کالکوپیریت، پیریت ± انیدریت) قطع می‌شوند. انتهای ترین نسل رگه‌ای این کانسار شامل رگه‌های انیدریتی است که همراه با دگرسانی فیلیک دیده می‌شود. به‌طور کلی با توجه به تبدیل ثانویه دگرسانی پتاسیک به فیلیک، رگه‌های اولیه این کانسار گاه همراه با دگرسانی پتاسیک - فیلیک و فیلیک یافت می‌شوند.

طبق مطالعه گمانه‌های اکتشافی، دگرسانی پتاسیک در کانسار آبدر گسترش ناچیزی دارد. در اینجا کانی‌های بیوتیت ثانویه، نیز به صورت بخشی تا کامل با کلریت جانشین شده‌اند. نکته قابل توجه در این سامانه پورفیری، گستردگی زیاد پهنه دگرسانی فیلیک است، به گونه‌ای که این دگرسانی از نواحی سطحی تا ژرف‌ترین



شکل ۲- (a) رگه نوع D در کانسار آبدر (میکروسکوپ عبوری نور XPL)؛ (b) رگه نوع D در کانسار آبدر (میکروسکوپ انعکاسی نور PPL)؛ (c) جانشینی سریسیست و کلسیت به جای درشت بلور پلاژیوکلاز؛ (d) پیریت‌های نسل اول در کانسار پرکام؛ (e) پیریت‌های نسل اول در کانسار آبدر؛ (f) پیریت‌های نسل دوم در کانسار آبدر؛ (g) پیریت‌های نسل دوم در کانسار پرکام؛ (h) تصویر BSE از کانه‌های کانسار آبدر؛ (i) تصویر BSE از کانه‌های کانسار پرکام. Pl: پلاژیوکلاز، Ser: سریسیست، Qtz: کوارتز، Cal: کلسیت، Py (I): پیریت نسل اول، Py (II): پیریت نسل دوم، Po: پیرویت، Cpy: کالکوپیریت، Ga: گالن، Mag: مگنتیت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است.

Figure 2. a) Type-D vein in the Abdar deposit (transmitted XPL light); b) Type-D vein in the Abdar deposit (reflected PPL light); c) Plagioclase phenocryst gives way to sericite and calcite; d) First generation of pyrites in the Parkam deposit; e) First generation of pyrite in the Abdar deposit; f) Second generation of pyrites in the Abdar deposit; g) Second generation of pyrites in the Parkam deposit; h) BSE image of Abdar ores, and (i) BSE image of Parkam ores. Pl: Plagioclase, Ser: Sericite, Qtz: Quartz, Cal: Clacite, Py (I): First generation of pyrite, Py (II) second generation of pyrite, Po: Pyrrhotite, Cpy: Chalcopyrite, Ga: Galena, Mag: Magnetite. Minerals abbreviations adopted from Whitney and Evans (2010).

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تعیین نوع و شیمی میکاها

و ۶/۰۸ درصد وزنی است. در کانسار آبدر این مقادیر به ترتیب عبارت است از ۵۲/۱۵، ۳۰/۹۷ و ۹/۷ درصد وزنی است (جدول‌های ۱ و ۲). تقریباً ۷۰ درصد از میکاهای سفید دی‌اکتاهدral دارای سطوح هشت‌وجهی با فرمول عمومی $XY_2(T_4O_{10})(OH)_2$ هستند، که در آن X می‌تواند شامل عناصر Cs، Rb، Ca، Na، K باشد.

نتایج مربوط به آنالیز میکاهای سفید کانسارهای مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. در مجموع می‌توان گفت مهم‌ترین عناصر اندازه‌گیری شده در نقاط آنالیزی از نظر غلظت به ترتیب شامل SiO_2 ، Al_2O_3 و K_2O است. میانگین غلظت این عناصر در نقاط آنالیزی کانسار پرکام به ترتیب ۴۶/۸، ۳۹/۵۱

وجود در کانسار پرکام $K_{0.53} Na_{0.05} Fe^{3+} 0.00 Fe^{2+} 0.12 Mg_{0.19} Ti_{0.009} Al_{2.58} Si_{3.24}$
 $K_{0.801} Na_{0.008} Fe^{3+} 0.00 Fe^{2+} 0.064 Mg_{0.229} Ti_{0.003} Al_{2.36} Si_{3.36}$ و در کانسار آبدار $O_{10}(OHF)$
 می‌باشد.

و (Ba) که بیانگر کاتیون‌های بین‌لایه‌ای می‌باشند، کاتیون‌های اکتاهدرال یا Y می‌تواند شامل (Mg، Fe^{2+} ، Mn، Li، Cr، Ti، V و Al) و جایگاه تتراهدرال T نیز معمولاً در برگرفته Si، Fe^{3+} و Al است (Wallace and Maher, 2019). فرمول عمومی میکاهای

جدول ۱- نتایج آنالیز ریزکائنده الکترونی میکاهای سفید دگرسانی فیلیک در کانسار مس پورفیری پرکام (کاتیون‌ها بر مبنای ۱۱ اتم اکسیژن محاسبه دوباره شده‌اند)

Table 1. Results of the EMPA analysis on the white micas of phyllic alteration in the Parkam porphyry Cu deposit (cations recalculated based on 11 oxygen atoms).

Sample	PAM 91M1	PAM 91M2	PAM 91M3	PAM 91M4	PAM 91M5	PAM 91M6	PAM 91M7	PAM 91M8	PAM 91M9	PAM 91M10	Ave. white mica *composition
SiO ₂	45.48	47.95	45.83	44.55	45.67	47.62	49.03	48.32	47.83	45.92	47.62
TiO ₂	0.36	0.09	b.d	0.71	0.05	0.18	0.08	0.06	0.1	0.08	0.18
Al ₂ O ₃	32.68	31.67	33.05	29.98	31.39	32.47	31.51	32.04	31.92	29.21	32.72
FeO	2.71	1.85	1.71	4.9	2.14	1.48	1.41	1.07	1.02	2.71	1.96
MnO	b.d	b.d	b.d	0.01	b.d	0.03	b.d	0.02	b.d	0.03	0.01
MgO	0.93	1.31	0.68	3.07	2.87	1.55	1.88	1.37	1.23	4.38	1.75
CaO	0.06	0.05	0.03	0.01	0.02	0.04	0.06	0.05	0.1	0.01	20.0
Na ₂ O	0.38	0.31	0.41	0.4	0.38	0.41	0.41	0.33	0.32	0.37	0.38
K ₂ O	5.86	5.76	6.12	7.18	6.11	6.38	5.7	5.78	5.64	6.27	9.77
BaO	0.25	0.11	0.12	0.29	0.15	0.37	0.18	0.21	0.17	0.18	n.d
F	0.6	0.18	0.97	1.48	1.02	b.d	1.21	0.42	b.d	1.36	0.26
Cl	0.01	0.01	0.01	0.04	b.d	b.d	0.01	0.01	b.d	0.03	0.03
Fe ₂ O ₃	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
Cr ₂ O ₃	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
Total	89.06	89.22	88.53	91.98	89.37	90.54	90.95	89.49	88.32	89.96	95.02
Si	3.183	3.305	3.213	3.123	3.193	3.25	3.329	3.313	3.309	3.221	3.18
Ti	0.019	0.005	b.d	0.038	0.003	0.009	0.004	0.003	0.005	0.004	0.01
Al	2.695	2.573	2.73	2.476	2.587	2.612	2.521	2.588	2.603	2.414	2.58
Cr	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
³⁺ Fe	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
²⁺ Fe	0.158	0.107	0.1	0.287	0.125	0.085	0.08	0.061	0.059	0.159	0.11
Mn	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	0.002	b.d	0.001	b.d	0.002	0.01
Mg	0.097	0.134	0.071	0.321	0.299	0.158	0.19	0.14	0.126	0.458	0.17
Ca	0.005	0.004	0.002	b.d	0.001	0.003	0.004	0.004	0.007	b.d	0.017
Na	0.052	0.042	0.056	0.055	0.051	0.055	0.054	0.044	0.043	0.05	0.05
K	0.523	0.507	0.548	0.642	0.545	0.556	0.494	0.506	0.498	0.561	0.83
Ba	0.007	0.003	0.003	0.008	0.004	0.01	0.005	0.006	0.005	0.005	n.d
Cl	0.001	0.001	0.001	0.005	b.d	b.d	0.001	0.001	b.d	0.003	0.01
F	0.132	0.04	0.215	0.328	0.224	b.d	0.26	0.09	b.d	0.302	0.05
Al ^{IV}	0.817	0.695	0.787	0.877	0.807	0.75	0.671	0.687	0.691	0.779	0.81
Al ^{VI}	1.878	1.878	1.943	1.599	1.78	1.862	1.85	1.901	1.912	1.635	1.76

*میانگین ترکیب میکای سفید که برگرفته از میانگین ترکیب میکاهای سفید در زون دگرسانی فیلیک کانسار مس پورفیری Copper Cliff می‌باشد (Uribe-Mogollon and Maher, 2018).

b.d= below detect

n.d= not detected

جدول ۲- نتایج آنالیز ریز کاونده الکترونی میکاهای سفید در زون دگرسانی فیلیک در کانسار مس پورفیری آبدر (کاتیون ها بر مبنای ۱۱ اتم اکسیژن محاسبه دوباره شده‌اند).

Table 2. Results of the EMPA analysis on the white micas of phyllic alteration in the Abdar porphyry Cu deposit (cations recalculated based on 11 oxygen atoms)

Sample	AB 4bo1	AB 4bo2	AB 4bo3	AB 4bo4	AB 4bo5	AB 4bo6	AB 4bo7	AB 4bo8	AB 4f9	AB 4f11	Ave. white mica composition*
SiO ₂	50.69	48.14	53.52	55.22	49.61	50.95	55.79	52.03	52.52	52.2	52.99
TiO ₂	0.18	0.04	0.02	0.02	0.06	0.05	0.03	0.13	b.d	0.05	0.40
Al ₂ O ₃	29.11	30.46	31.09	31.19	32.44	31.25	30.39	30.25	31.56	31.37	27.13
FeO	2.29	1.29	1.22	0.49	1.37	1.26	0.53	1.46	0.5	1.02	1.58
MnO	0.09	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.07	0.02	0.06
MgO	4.03	2.46	2.56	1.78	1.81	2.16	2.12	2.74	1.97	2.26	1.9
CaO	0.07	0.11	0.13	0.49	0.04	0.04	0.22	0.05	0.61	0.11	0.32
Na ₂ O	0.08	0.06	0.06	0.03	0.09	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.65
K ₂ O	10.45	10.15	9.78	8.43	10.75	10.69	8.51	10.15	7.98	9.77	8.87
BaO	0.11	0.14	0.01	0.08	b.d	b.d	b.d	0.27	0.24	0.12	n.d
F	1.25	1.94	0.87	0.48	1.75	0.99	0.73	1.18	1.25	2.53	0.86
Cl	b.d	b.d	b.d	0.01	b.d	b.d	b.d	0.01	b.d	b.d	0.04
Fe ₂ O ₃	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
Cr ₂ O ₃	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
Total	97.81	94.02	98.93	98.06	97.19	97.13	98.1	97.85	96.23	98.44	98.8
Si	3.32	3.275	3.396	3.477	3.258	3.326	3.513	3.372	3.396	3.365	3.55
Ti	0.009	0.002	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.006	b.d	0.003	0.09
Al	2.247	2.442	2.325	2.315	2.511	2.405	2.256	2.311	2.405	2.384	2.07
³⁺ Fe	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	n.d
²⁺ Fe	0.125	0.073	0.065	0.026	0.075	0.069	0.028	0.079	0.027	0.055	0.09
Mn	0.005	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.001	0.005
Mg	0.393	0.25	0.242	0.167	0.177	0.21	0.199	0.264	0.19	0.217	0.19
Ca	0.005	0.008	0.009	0.033	0.003	0.003	0.015	0.004	0.043	0.007	0.02
Na	0.01	0.008	0.007	0.004	0.011	0.015	0.006	0.006	0.007	0.007	0.08
K	0.873	0.881	0.792	0.677	0.901	0.891	0.684	0.839	0.658	0.803	0.75
Ba	0.003	0.004	b.d	0.002	b.d	b.d	b.d	0.007	0.006	0.003	n.d
Cl	b.d	b.d	b.d	0.001	b.d	b.d	b.d	0.001	b.d	b.d	0.003
F	0.259	0.418	0.175	0.095	0.363	0.204	0.146	0.241	0.255	0.517	0.18

* میانگین ترکیب میکای سفید که برگرفته از میانگین ترکیب میکاهای سفید در زون دگرسانی فیلیک کانسار مس پورفیری Copper Flat می‌باشد (Wallace and Maher, 2019)

b.d =below detect

n.d =not detected

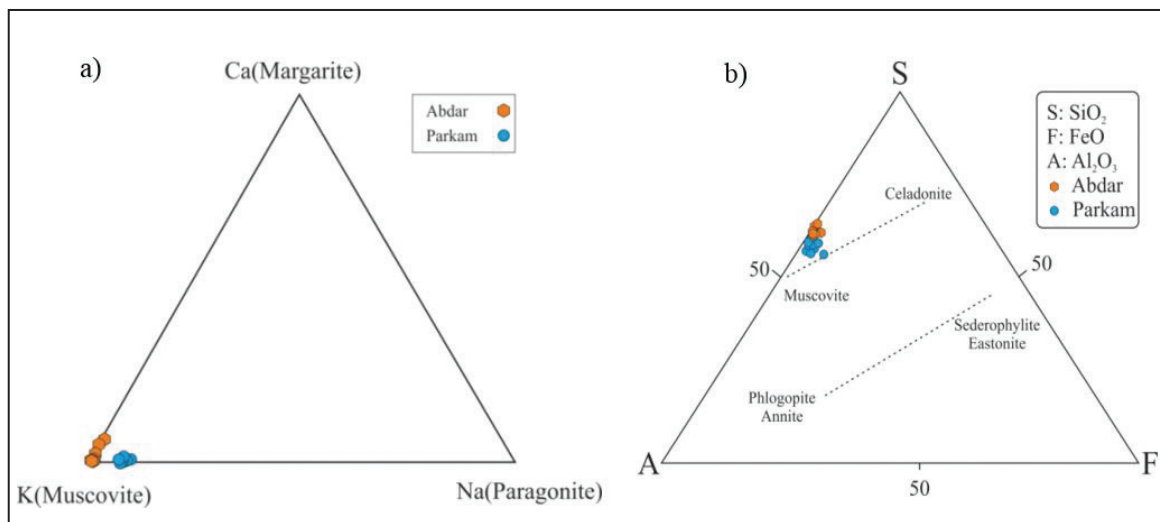
نتایج آنالیز ریز کاونده الکترونی کانی‌های سریسیتی در کانسارهای آبدر و پرکام بر روی نمودار تفکیک مسکوویت‌های اولیه از ثانویه در شکل ۴ آورده شده است، همانطور که دیده می‌شود، تمامی نمونه‌های موجود در کانسارهای آبدر و پرکام در محدوده مسکوویت‌های ثانویه قرار دارند که این امر نشان‌دهنده تشکیل این کانی به عنوان یکی از محصولات فرایندهای دگرسانی گرمایی طی فرایند هیدرولیز است.

در شکل ۵ نمونه‌های سریسیت موجود در دگرسانی فیلیک کانسارهای آبدر و پرکام با نمونه‌های سریسیتی کانسارهای پورفیری دارای کانه‌زایی Copper Flat (Uribe-Mogollon and Maher, 2018) و Copper Cliff (Wallace and Maher, 2019)

با توجه به نمودار سه تایی ارائه شده در شکل ۳- a، نمونه‌های سریسیت در کانسارهای پرکام و آبدر با ترکیب یکسان به سمت قطب غنی از پتاسیم گرایش دارند و در واقع نشان‌دهنده نوع میکاهای دانه‌ریز موجود در این دو کانسار یعنی مسکوویت هستند. از طرف دیگر با توجه به رده‌بندی دیگری که توسط (Maydagán et al., 2016) ارائه شده است، میکاها بر اساس ترکیب شیمیایی سه اکسید اصلی (SiO₂، FeO و Al₂O₃) رده‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳- b دیده می‌شود تمامی سریسیت‌های موجود در کانسارهای آبدر و پرکام در محدوده سلادونیت - مسکوویت، نزدیک به قطب مسکوویت قرار دارند.

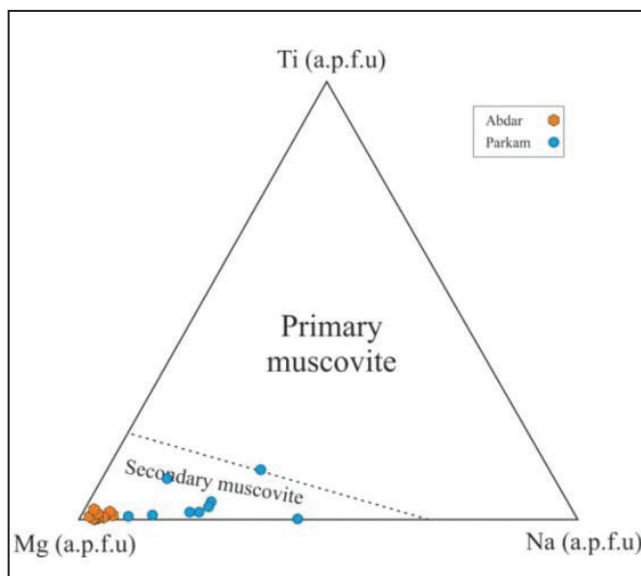
Fe^{2+} و Mg^{2+} دیگر با Al^{3+} می‌باشد. از طرفی، قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط جانشینی شرمایت (نمونه‌های پرکام، آبدر و پورفیری Copper Cliff) نشان می‌دهد که عمده محتوای آهن در موقعیت هشت‌وجهی سریسیت قرار گرفته‌اند، اگر چه Fe^{3+} نیز می‌تواند در موقعیت چهاروجهی قرار گیرد (Deer et al., 2013; Wallace and Maher, 2019). این ویژگی‌ها نقش مهم اثرات جانشینی را در ترکیب میکاهای سفید ریزدانه برجسته می‌کند. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، نمونه‌های مسکوویت کانسارهای آبدر و پرکام، مانند کانسار پورفیری Copper Cliff که دارای کانه‌زایی قابل توجه است، از روند جانشینی شرمایت تبعیت نموده و در بالای خط تفکیک‌کننده شرمایت قرار گرفته‌اند (شکل ۵).

مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است نمونه‌های مورد آنالیز از روند خطی جانشینی شرمایت (Tschermak substitution) پیروی می‌کنند که دلیل آن افزایش بارهای مثبت در محل چهار وجهی میکای سفید، به دلیل افزایش جانشینی Al با Si و Fe^{3+} است (Wallace and Maher, 2019). در اینجا بار مثبت اضافی ایجاد شده با جانشینی عناصری مانند Fe^{2+} و Mg^{2+} با Al^{3+} در مکان‌های هشت‌وجهی متعادل می‌شود (Wallace and Maher, 2019). این فرایند سبب ایجاد روند تغییر ترکیب به سمت عضو انتهایی (Celedonite endmember) سلادونیت می‌شود (Wallace and Maher, 2019؛ شکل ۵). در اینجا اگر داده‌ها در زیر خط مشخص‌کننده جانشینی شرمایت (برای مثال، کانسار پورفیری Copper Flat) رسم شوند، نشان‌دهنده جانشینی عناصر دیگر (به غیر از



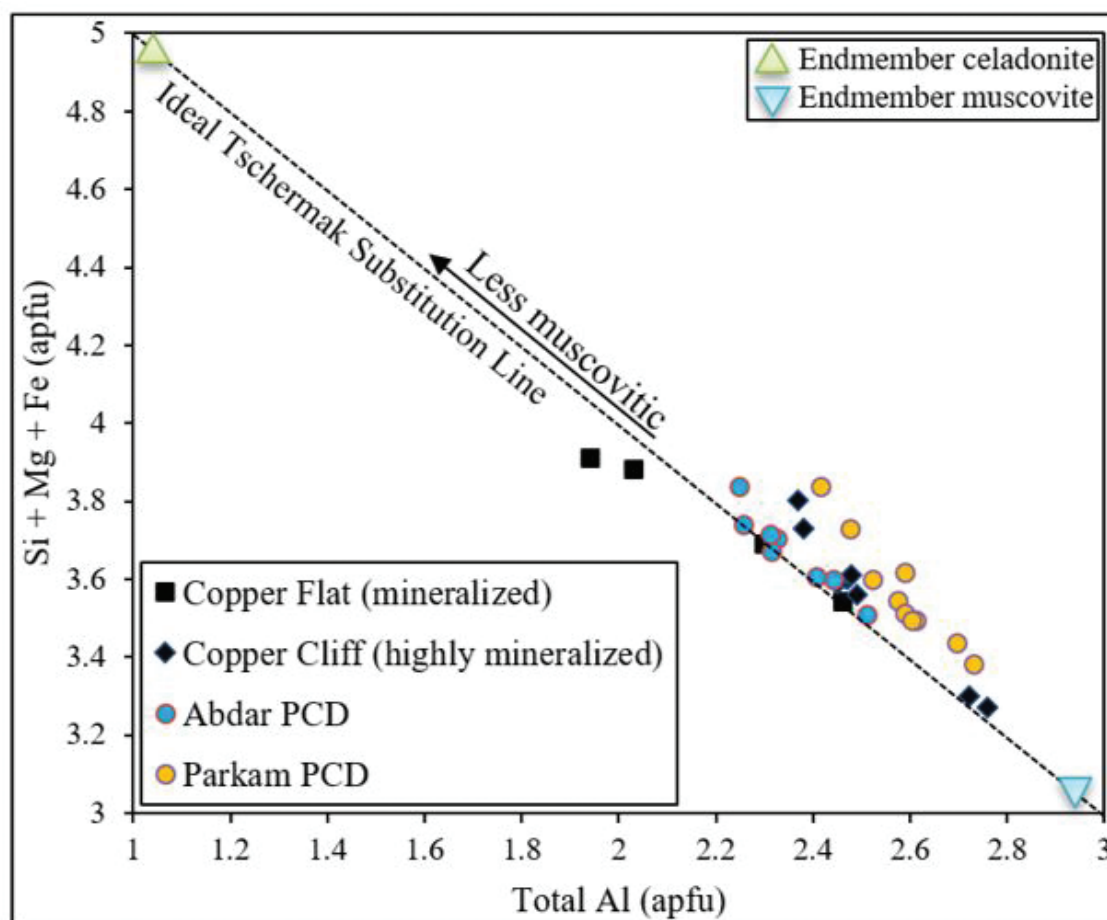
شکل ۳- (a) موقعیت مسکوویت‌های کانسار آبدر و پرکام بر روی نمودار $Ca-Na-K$ (Miller et al., 1981)؛ (b) رده‌بندی مسکوویت‌های کانسار آبدر و پرکام بر روی نمودار سه‌تایی ASF (Al_2O_3 , SiO_2 , FeO) (Maydagán et al., 2016).

Figure 3. a) Position of Abdar and Parkam muscovites on the Ca, Na, and K diagram (Miller et al., 1981); b) Classification of Abdar and Parkam muscovites on the ASF (Al_2O_3 , SiO_2 , and FeO) ternary plot (Maydagán et al., 2016).



شکل ۴- نمودار تفکیک مسکوویت‌های اولیه از ثانویه (Miller et al., 1981). در این نمودار محاسبه کاتیون‌ها در واحد فرمول (apfu) بر مبنای ۱۱ اتم اکسیژن است.

Figure 4. Discrimination plot of primary and secondary muscovites (Miller et al., 1981). Cations were recalculated based on 11 oxygen atoms.



شکل ۵ - موقعیت مسکویت‌های کانسار آبدر و پرکام بر روی نمودار $\text{Si} + \text{Mg} + \text{Fe}$ در برابر Al^{3+} (Wallace and Maher, 2019)؛ کانسارهای پورفیری Copper Flat و Copper Cliff برای مقایسه آورده شده است. در این نمودار محاسبه کاتیون‌ها در واحد فرمول (apfu) در تمامی نمونه‌های یادشده، بر مبنای ۱۱ اتم اکسیژن است.

Figure 5. Composition of Abdar and Parkam muscovites compared with data of Copper Flat and Copper Cliff deposits on the $\text{Si} + \text{Mg} + \text{Fe}$ vs. Al^{3+} diagram (Wallace and Maher, 2019). Cations were recalculated based on 11 oxygen atoms in all points.

۵-۲- ترکیب سولفیدها

پیریت و به میزان کمتر کالکوپیریت اصلی‌ترین کانه‌های سولفیدی در دگرسانی فیلیک کانسارهای مورد مطالعه هستند. بررسی مقاطع نازک - صیقلی نشان‌دهنده افزایش نسبی کالکوپیریت در نمونه‌های دگرسانی فیلیک کانسار پرکام (تقریباً ۴۰ درصد کالکوپیریت و ۶۰ درصد پیریت) نسبت به کانسار پرکام (تقریباً ۲۰ درصد کالکوپیریت و ۸۰ درصد پیریت) است. این کانه‌ها میزبان طیف گسترده‌ای از عناصر کمیاب در ساختار خود هستند که از این میان As ، Te ، Co ، Au و Mo حائز اهمیت بیشتری می‌باشند (Zarasvandi et al., 2018). با توجه به نتایج حاصل از آنالیز ریزکانونده الکترونی (جدول‌های ۳ تا ۵) در کانسارهای مورد مطالعه غلظت این عناصر برای اجزای اصلی به نسبت یکسان است، به‌طوری که در نمونه‌های پیریت کانسار پرکام این مقادیر (بر حسب درصد وزنی) عبارت است از: میانگین: Fe : ۴۶/۹۴-۴۶/۳۵ %Wt، میانگین: S : ۵۱/۷۱-۵۱/۵۵ و ۴۶/۶۸ %Wt. دامنه تغییرات اجزای اصلی در نمونه‌های پیریت کانسار آبدر عبارت است از: Fe : ۴۵/۳۹-۴۶/۸۲ %Wt، میانگین: Fe : ۴۶/۴۸ و ۵۰/۳۸-۵۲/۷۴ %Wt، میانگین: S : ۵۲/۲۱-۵۲/۱۶ %Wt. در نمونه‌های کالکوپیریت کانسار پرکام و آبدر میانگین مقادیر اجزای اصلی (بر حسب درصد وزنی) شامل آهن، گوگرد و مس به ترتیب شامل ۳۰/۱۶،

مس، طلا، رنیوم و مولیبدن به عنوان اصلی‌ترین عناصر اقتصادی همراه با کانسنگ‌های نوع پورفیری به‌شمار می‌آیند (Sillitoe, 2010). بر اساس مطالعه زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2018) محتوای مس کانه‌های پیریت کانسارهای مس پورفیری می‌تواند بازگوکننده میزان باروری سامانه پورفیری باشد. برای مثال، پیریت‌های متعلق به کانسار مس پورفیری میدوک (دارای کانه‌زایی قابل توجه؛ مس با عیار ۰/۸۶ درصد، ۱۷۰ میلیون تن؛ Taghipour et al., 2008) گاه حاوی مقادیر قابل توجه مس (نزدیک به ۱ درصد وزنی) در مقایسه با دیگر سامانه‌های مس پورفیری با باروری کمتر (به عنوان مثال،

غلظت طلا در نقاط آنالیز شده پیریت کانسار پرکام دارای بیشینه ۰/۰۱۰ درصد وزنی (جدول ۳) و در کانسار پرکام دارای بیشینه ۰/۰۲۲ درصد وزنی است (جدول ۴). همچنین غلظت طلا در نقاط آنالیز شده کالکوپیریت کانسار پرکام پایین‌تر از حد تشخیص و در نمونه‌های کالکوپیریت کانسار آبدار دارای میانگین ۰/۰۲۳۵ درصد وزنی است (جدول ۵). میانگین غلظت Mo در نقاط آنالیز شده پیریت کانسار پرکام برابر ۰/۷۲۴ %Wt و در نقاط آنالیز شده پیریت کانسار آبدار برابر ۰/۷۰۸ %Wt می‌باشد (جدول‌های ۳ و ۴).

پورفیری‌های ایجو، سرکوه و کدر) در بخش جنوبی زون ماگمایی ارومیه - دختر هستند (Zarasvandi et al., 2018). میانگین غلظت مس موجود در نمونه‌های پیریت در کانسار پرکام برابر ۰/۰۱۸ %Wt و در کانسار آبدار ۰/۰۹۳ %Wt است، که نشانگر مقادیر به نسبت بیشتر مس در نمونه‌های پیریت کانسار آبدار است (جدول‌های ۳ و ۴). داده‌ها نشان می‌دهد مقادیر قابل توجهی طلا در نمونه‌های پیریت و کالکوپیریت دگرسانی فیلیک این کانسارها وجود دارد (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳- نتایج آنالیز ریز کاونده الکترونی پیریت در زون دگرسانی فیلیک کانسار آبدار (مقادیر بر حسب درصد وزنی است).

Table 3. Results of the EMPA analysis on the pyrite of phyllic alteration in the Abdar porphyry Cu deposit (values are in weight percent; wt. %).

Sample	AB4-1p1	AB41p2	AB42p1	AB42p2	AB4-2p3	AB4-2p4	Ave. pyrite composition*
As	0.0571	0.0394	0.046	b.d	0.0559	0.0473	0.045
Te	b.d	b.d	0.0258	0.0064	b.d	b.d	0.004
S	52.74	52.19	52.51	50.83	52.41	52.58	52.02
Fe	46.75	46.62	46.61	45.39	46.69	46.82	43.43
Cu	b.d	0.0007	0.0095	0.0092	0.0276	0.0088	0.137
Se	b.d	b.d	0.003	b.d	0.0194	b.d	0.0005
Bi	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Re	0.0249	0.0186	b.d	0.0255	b.d	b.d	0.003
Ni	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	0.011
Co	0.0907	0.0976	0.0701	0.0815	0.0989	0.0959	0.095
Ge	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Hg	b.d	b.d	b.d	0.0036	b.d	b.d	0.0006
Au	b.d	b.d	0.0107	b.d	0.0014	b.d	0.016
Zn	b.d	b.d	b.d	0.0191	b.d	b.d	0.001
Th	b.d	0.003	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Sb	b.d	b.d	0.0027	0.0114	b.d	b.d	0.001
Ag	b.d	b.d	b.d	b.d	0.0099	0.002	0.0004
Pb	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Mo	0.7098	0.7111	0.7111	0.6847	0.7202	0.7132	0.69
Total	100.3725	99.6805	99.9989	97.0614	100.0333	100.2671	99.47

* میانگین ترکیب پیریت برگرفته از میانگین ترکیب کانی‌های پیریت در کانسارهای مس پورفیری میدوک، ایجو و سرکوه است (Zarasvandi et al., 2018).

b.d =below detect

جدول ۴- نتایج آنالیز ریزکاونده الکترونی پیریت در زون دگرسانی فیلیک کانسار پرکام (مقادیر بر حسب درصد وزنی است).

Table 4. Results of the EMPA analysis on the pyrite of phyllic alteration in the Parkam porphyry Cu deposit (values are in weight percent; wt. %)

Sample	PM11-2p1	PM11-2p2	PM11-1p1	PM11-1p2	Ave. pyrite *composition
As	0.0359	0.0295	0.0358	0.0619	0.045
Te	0.0032	0.0004	b.d	b.d	0.004
S	51.68	51.64	51.55	51.71	52.02
Fe	46.94	46.83	46.63	46.35	43.43
Cu	b.d	b.d	0.0057	0.0018	0.137
Se	b.d	b.d	b.d	0.003	0.0005
Bi	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Re	0.0277	0.0002	0.0096	b.d	0.003
Ni	b.d	b.d	b.d	b.d	0.011
Co	0.103	0.0964	0.0886	0.1121	0.095
Ge	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Hg	b.d	b.d	b.d	0.0125	0.0006
Au	0.0058	0.0223	0.0039	0.0102	0.016
Zn	0.0113	0.0001	b.d	b.d	0.001
Th	b.d	b.d	b.d	0.0027	b.d
Sb	b.d	b.d	b.d	b.d	0.001
Ag	b.d	b.d	b.d	b.d	0.0004
Pb	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
Mo	7231 .0	0.7293	0.731	0.722	0.69
Total	99.5301	99.3483	99.0547	98.9863	99.47

* میانگین ترکیب پیریت برگرفته از میانگین ترکیب کانی‌های پیریت در کانسارهای مس پورفیری میدوک، ایجو و سرکوه است (Zarasvandi et al., 2018).

b.d= below detect

جدول ۵- نتایج آنالیز ریزکائونده الکترونی کالکوپیریت در زون دگرسانی فیلیک کانسارهای پرکام (PM) و آبدر (AB) (مقادیر بر حسب درصد وزنی است).

Table 5. Results of the EMPA analysis on the pyrite and chalcopyrite of phyllic alteration in the Parkam and Abdar porphyry Cu deposits (values are in weight percent; wt. %)

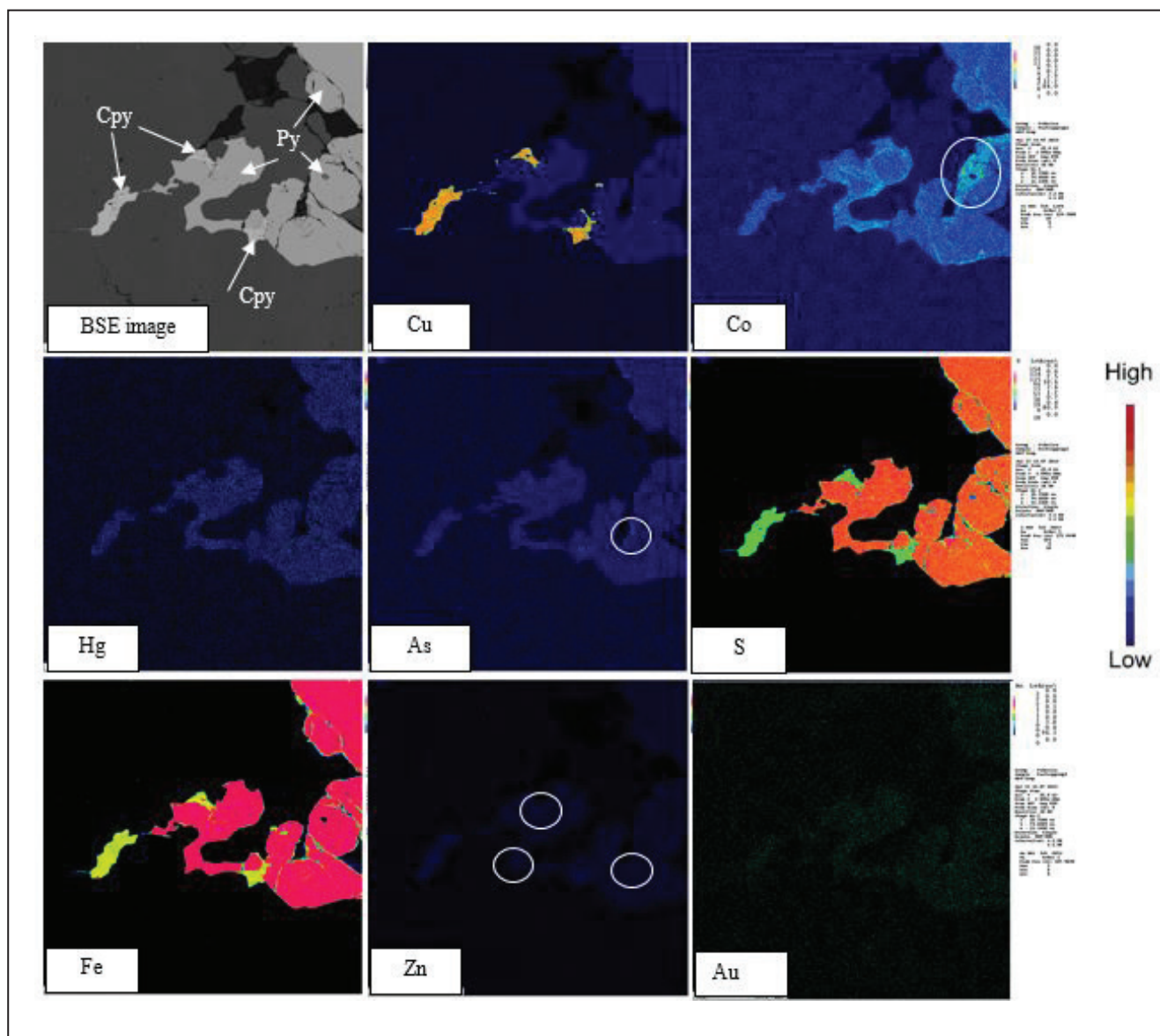
Sample	PM11-1cp1	AB4-1cp1	AB4-1cp2	Ave. chalcopyrite composition*
As	0.0467	0.0637	0.0202	0.036
Te	0.0025	0.0016	b.d	0.005
S	34.39	34.79	34.55	34.21
Fe	30.16	30.49	30.67	30.36
Cu	34.22	34.46	34.34	34.26
Se	b.d	b.d	b.d	b.d
Bi	b.d	b.d	b.d	b.d
Re	0.0078	b.d	b.d	0.004
Ni	b.d	b.d	b.d	b.d
Co	0.0615	0.0553	0.0602	0.051
Ge	b.d	b.d	b.d	b.d
Hg	b.d	b.d	b.d	0.005
Au	b.d	0.0244	0.0227	0.007
Zn	0.0495	0.0778	0.1109	0.076
Th	0.002	b.d	0.0034	0.002
Sb	b.d	b.d	b.d	0.002
Ag	b.d	0.0221	b.d	0.0028
Pb	b.d	b.d	b.d	0.003
Mo	0.5197	0.5107	0.5057	0.504
Total	99.4597	100.4955	100.2831	99.55

* میانگین ترکیب کالکوپیریت برگرفته از میانگین ترکیب کانی‌های پیریت در کانسارهای مس پورفیری میدوک، ایجو و سرکوه است (Zarasvandi et al., 2018).

۵-۳- تفریق عناصر کمیاب در فازهای سولفیدی دگرسانی فیلیک

نتایج آنالیز ریزکائونده الکترونی کانه‌های پیریت و کالکوپیریت (جدول‌های ۳ تا ۵) نشان داد میزان عناصر As ، Zn ، Ag ، Au و Re در نمونه‌های کالکوپیریت (به ترتیب با میانگین 0.007 ، 0.007 ، 0.012 و 0.043 درصد وزنی) به نسبت بیشتر است، در حالی که عناصر Co ، Te ، Mo و Re عمدتاً در نمونه‌های پیریت (به ترتیب با میانگین 0.001 ، 0.003 ، 0.009 و 0.007 درصد وزنی) تمرکز دارند. اغلب نمونه‌های پیریت و کالکوپیریت مورد مطالعه با غلظت نسبتاً بالای Te مشخص می‌شوند. برای مثال مقادیر Te در نمونه‌های پیریت آبدر دارای بیشینه 0.258 درصد وزنی و در کانسار پرکام دارای بیشینه 0.032 درصد وزنی است. در نمونه کالکوپیریت پرکام میزان این عنصر برابر با 0.025 درصد وزنی است و بیشینه آن در کانسار آبدر به 0.016 درصد وزنی می‌رسد (جدول‌های ۳ تا ۵). گفتنی است این مقادیر بالاتر از محدوده $1/5$ تا 3 گرم در تن به عنوان یک آستانه اقتصادی استحصال به عنوان فراورده جانبی (By-product)، طی فرایند فراوری مس به‌شمار می‌روند (Ayres et al., 2002; Cioaca et al., 2014). مطالعات پیشین نشان داده بوریت و کالکوپیریت مهمترین کانه عامل حمل Ag در سولفیدهای گرمابی هستند (Cook et al., 2011; Reich et al., 2013b). بالاترین میانگین Ag برای کانسنگ ذخایر مس - طلای پورفیری به میزان $1/1$ Wt.% گزارش شده است (Cox and Singer, 1988). طبق نتایج حاصل از آنالیز ریزکائونده الکترونی بیشینه غلظت Ag در نمونه‌های پیریت کانسارهای آبدر و پرکام به ترتیب برابر 0.099 درصد وزنی و پایین‌تر از حد

تشخیص (b.d) است (جدول‌های ۳ و ۴). در نمونه کالکوپیریت کانسار پرکام مقدار Ag پایین‌تر از حد تشخیص و در کانسار آبدر دارای بیشینه 0.221 درصد وزنی است (جدول ۵). در نمونه‌های مورد مطالعه، سلنیم فقط در نمونه‌های پیریت قابل تشخیص بوده است (بیشینه 0.194 و 0.003 درصد وزنی، در کانسارهای آبدر و پرکام؛ جدول‌های ۳ و ۴). مطالعات نشان داده در سامانه‌های مس پورفیری، Re معمولاً در مولیدنیت متمرکز می‌شود (Zarasvandi et al., 2018). بیشینه میزان Re در نمونه‌های پیریت کانسار آبدر برابر 0.255 درصد وزنی و در کانسار پرکام 0.277 درصد وزنی است. در نمونه کالکوپیریت پرکام میزان Re برابر 0.078 Wt.% و در کانسار آبدر پایین‌تر از حد تشخیص است (جدول ۵). به منظور بررسی چگونگی پراکنش عناصر کمیاب در نمونه‌های سولفیدی زون دگرسانی فیلیک کانسارهای مورد مطالعه، نقشه عنصری WDS تهیه شده است (شکل ۶). همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، غنی‌شدگی عنصر Co در نمونه‌های پیریت، نسبت به کالکوپیریت بیشتر است؛ البته این غنی‌شدگی بیشتر به‌صورت موضعی است. تصاویر عنصری نشان می‌دهد As نیز در نمونه‌های پیریت دارای غنی‌شدگی موضعی هستند (شکل ۶). غنی‌شدگی Zn به‌صورت ادخال‌های خیلی ریز می‌باشد. عناصر جیوه و نیکل دارای غنی‌شدگی یکنواخت در نمونه‌های پیریت و کالکوپیریت هستند (شکل ۶). همچنین نقشه‌های عنصری نشان دهنده تمرکز نقطه‌ای نسبی طلا در فازهای سولفیدی مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی BSE و نقشه توزیع عناصر مس، کبالت، جیوه، آرسنیک، گوگرد، آهن، روی و طلا در کانه‌های پیریت (Py) و کالکوپیریت (Cpy) در کانسار مس پورفیری آبدر. دایره‌های سفید رنگ نشان‌دهنده مناطق دارای غنی‌شدگی است.

Figure 6. BSE electron image and WDS elemental mappings of Cu, Co, Hg, As, S, Fe, Zn, and Au in the pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) of the Abdar deposit. White circles indicates areas of enrichment.

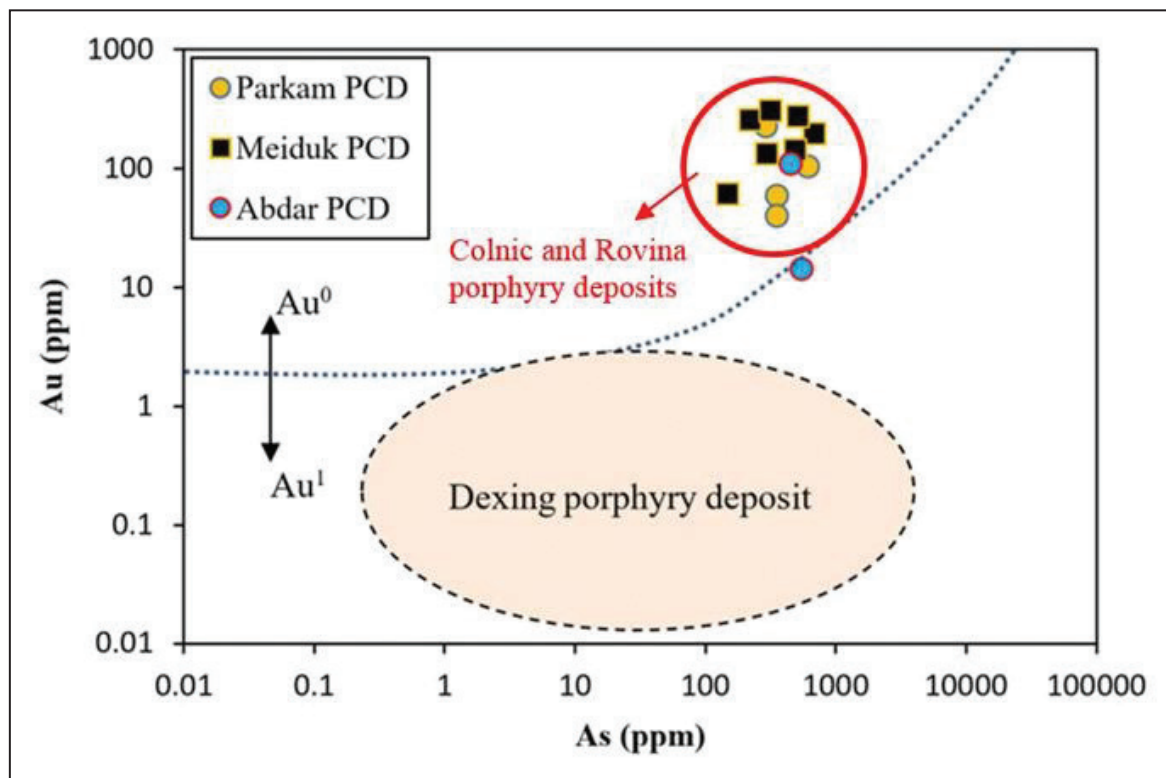
۴-۵- روابط بین طلا و آرسنیک در ساختار پیریت و کالکوپیریت

که خود جانشین گوگرد می‌شود بستگی دارد (Reich et al., 2005). بر این اساس ریچ و همکاران (Reich et al., 2005) خط تفکیک رخداد طلا به صورت انحلال جامد و یا نانوذرات را به عنوان تابعی از غلظت آرسنیک پیریت ارائه کردند (شکل ۷). بر اساس این نمودار، قرارگیری داده‌ها زیر خط تفکیک‌کننده Au^0 و Au^{1+} نشان‌دهنده رخداد طلا به صورت انحلال جامد در ساختار پیریت است (به صورت Au^{1+}). در برابر قرارگیری داده‌ها در بالای این خط مبین رخداد طلا به صورت ادخال یا نانوذرات طلای طبیعی می‌باشد (احتمالا به صورت Au^0 و یا تلورید طلا؛ Reich et al., 2013). همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، ترکیب شیمیایی نمونه‌های پیریت زون دگرسانی فیلیک پورفیری‌های

شناخت همبستگی‌های ژنتیکی متقابل موجود بین عناصر مختلف می‌تواند در شناخت دقیق‌تر تغییرات موجود در محیط‌های زمین‌شیمیایی به کار گرفته شود. همچنین تجمع ژنتیکی بعضی از عناصر ممکن است به عنوان راهنمای مستقیمی در تعیین نوع رخداد فلزات کمیاب در فازهای سولفیدی به کار رود (Reich et al., 2013a). بررسی ضرایب همبستگی بین عناصر کمیاب در نمونه‌های پیریت کانسارهای آبدر و پرکام نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی قابل توجه بین عناصر کمیاب به ویژه آرسنیک و طلا در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۷). مطالعات زیادی به بررسی ارتباط تمرکز طلا و آرسنیک در ساختار پیریت سامانه‌های مس پورفیری پرداخته‌اند. تصور می‌شود مشارکت طلا در ساختار پیریت (به صورت Au^{1+}) به محتوای آرسنیک آن

آبدر و پرکام بسیار شبیه به میدوک و نیز پورفیری‌های Colnic و Rovina در رومانی است. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد کانسارهایی که رخداد طلا در کانه‌های پیریت آنها به صورت انحلال جامد می‌باشد (مانند پورفیری Dexing)، دارای مقادیر به نسبت کمتر طلا در ساختار پیریت باشند. گفتنی است، در صورت رخداد طلا به صورت انحلال جامد معمولاً همبستگی قوی بین محتوای آرسنیک و طلا دیده می‌شود

با این توضیح عدم وجود همبستگی مشخص بین محتوای طلا و آرسنیک در نمونه‌های پیریت پورفیری‌های زون ارومیه - دختر (شکل ۷)، می‌تواند به رخداد طلا به صورت ادخال‌های در اندازه نانو در نمونه‌های پیریت این ذخایر نسبت داده شود. هر چند به منظور بررسی دقیق‌تر این مسئله، آنالیزهای تکمیلی مورد نیاز است.



شکل ۷- نمودار دو متغیره Au (ppm) در برابر As (ppm). محدوده خط‌چین آبی تفکیک‌کننده جانشینی طلا در پیریت به صورت Au^{1+} و یا حضور طلا در پیریت به صورت ادخال Au^0 است. نمودار پایه برگرفته از ریچ و همکاران (Reich et al., 2005)، محدوده کانسار مس پورفیری Dexing برگرفته از ریچ و همکاران (Reich et al., 2013)، داده‌های پورفیری میدوک برگرفته از زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2018)، داده‌های پورفیری‌های Colnic و Rovina برگرفته از سایوکا و همکاران (Cioaca et al., 2014).

Fig. 7. Au (ppm) vs. As (ppm) binary plot. The dashed blue line divides the fields of Au substitution in the pyrite structure as Au^{1+} from Au^0 present in inclusions. Base diagram after Reich et al. (2005). Field of Dexing porphyry deposit after Reich et al. (2013), data of Meiduk porphyry deposit after Zarasvandi et al. (2018), and field of Colnic and Rovina porphyry deposits from Cioaca et al. (2014).

۶- نتیجه‌گیری

۱- کانسار مس پورفیری پرکام در ارتباط با استوک نفوذی با ترکیب چیره دیوریتی است که متحمل دگرسانی‌های به نسبت شدیدی شامل پتاسیک، پتاسیک - فیلیک، بیوتیتیک، فیلیک، پروپیلیتیک و آرزلیک شده است. کانه‌زایی در سامانه پورفیری آبدر نیز در ارتباط با توده‌های نفوذی دیوریتی است که در مرکز یک کالدرا جایگیر شده‌اند. اگر چه در این کانسار گسترش دگرسانی پتاسیک ناچیز است، اما دگرسانی فیلیک به شدت گسترده می‌باشد، به گونه‌ای که این دگرسانی از نواحی سطحی تا ژرف‌ترین بخش‌های گمانه‌های حفر شده (گمانه‌های ABR01 و ABR02 تا ژرفای ۴۰۳ متری) دیده می‌شود. به‌طور کلی، مقایسه دگرسانی فیلیک این دو کانسار

نشان می‌دهد، رگه‌های کوارتز سولفیدی نسل D (مبین دگرسانی فیلیک ثانویه) در کانسار آبدر چیره بوده و در مقابل کانی اندریت در نمونه‌های پرکام دارای رخداد به نسبت گسترده‌تری است. این موضوع نشان می‌دهد، طی دگرسانی فیلیک، بخشی از محتوای گوگرد به جای مشارکت در فاز سولفید به صورت فاز سولفات (اندریت) متبلور شده است.

۲- بررسی شیمی سریسیت‌های زون دگرسانی فیلیک در کانسارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد، میکاهای سفید ریزدانه این کانسارها غنی از پتاسیم و دارای ترکیب مسکوویت - سلادونیت هستند. همچنین همانند کانسارهای مس پورفیری دارای

در این کانسارها است.

۵- تغییر تمرکز عناصر کمیاب در فازهای سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) زون دگرسانی فیلیک نشان‌دهنده تفریق عناصر کمیاب در فازهای سولفیدی طی رخداد این دگرسانی می‌باشد، به نحوی که عناصر Au ، Ag ، Zn و As عمدتاً در کالکوپیریت و در برابر عناصر Co ، Te ، Re و Mo بیشتر در پیریت متمرکز می‌شوند. البته برخی از عناصر کمیاب نظیر Zn ، Co و As دارای غنی‌شدگی موضعی در ساختار سولفیدهای زون دگرسانی فیلیک می‌باشند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه‌های SCU.EG1401.38600 و SCU.EG1401.582 تشکر و قدردانی می‌گردد.

کانه‌زایی قابل توجه مانند Copper Flat و Copper Cliff، نمونه‌ها از روند جانشینی شرم‌اکت تبعیت می‌کنند، که دلیل آن افزایش بارهای مثبت در محل چهار وجهی میکای سفید، به دلیل افزایش جانشینی Si می‌باشد.

۳- نتایج آنالیز نقطه‌ای ریز کاو الکترونی بر روی فازهای سولفیدی نشان می‌دهد مقادیر قابل توجهی طلا در برخی از نقاط آنالیزی نمونه‌های پیریت و کالکوپیریت دگرسانی فیلیک این کانسارها وجود دارد. غلظت طلا در نمونه‌های پیریت کانسار پرکام دارای بیشینه ۰/۱۰ درصد وزنی و در کانسار پرکام دارای بیشینه ۰/۲۲ درصد وزنی می‌باشد.

۴- نبود همبستگی مشخص بین محتوای طلا و آرسنیک در نمونه‌های پیریت کانسارهای مس پورفیری پرکام و آبدر و نیز مشاهده رخداد چنین شاخصه‌ای در دیگر ذخایر مس پورفیری کمرند ماگمایی ارومیه - دختر نشان‌دهنده حضور طلا به صورت ادخال یا نانوذررات طلای طبیعی (احتمالاً به صورت Au^0 و یا تلورید طلا)

کتابنگاری

محمدی‌لقب، ح. و تقی‌پور، ن.، ۱۳۹۰، تکامل فیزیکوشیمیایی سیال گرمایی در کانسار مس پورفیری سارا (پرکام)، استان کرمان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱، جلد ۱، صفحه ۱۱ تا ۲۶. https://journals.scu.ac.ir/article_11540.html.

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(1), 25-46. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.001>.
- Ayres, R.U., Ayres, L., and Råde, I., 2002. The Life Cycle of Copper, Its Co-products and Byproducts, *Eco-Efficiency in Industry and Science*, 265p. (<http://pubs.iied.org/pdfs/G00740.pdf>).
- Castillo, P.R., 2012. Adakite petrogenesis, *Lithos*, 134, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.013>.
- Cioacă, M.E., Munteanu, M., Qi, L., and Costin, C., 2014. Trace element concentrations in porphyry copper deposits from Metaliferi Mountains, Romania: A reconnaissance study, *Ore Geology Reviews*, 63, 22–39. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2014.04.016>.
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Danyushevsky, L.V., and Gilbert, S., 2011. Minor and trace elements in bornite and associated Cu–(Fe)–sulfides: LA-ICP-MS study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 6473–6496. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.08.021>.
- Cox, D.P., and Singer, D.A., 1988. Distribution of gold in porphyry copper deposits. US Geological Survey, Open-file Report. 10.3133/ofr8846.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., 2013. An introduction to the rock-forming Minerals, 3rd edition. Stevenage, Berforts Information Press 498 p. 9780903056434.
- Dimitrijevic, M., 1973. Geology of Kerman region, Institute for Geological and Mining Exploration and Institution of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Beograd-Yugoslavia, Geological Survey of Iran, Report No. Yu/52, 334 p.
- Franchini, M., McFarlane, C., Maydagán, L., Reich, M., Lentz, D.R., Meinert, L., and Bouhier, V., 2015. Trace metals in pyrite and marcasite from the Agua Rica porphyry-high sulfidation epithermal deposit, Catamarca, Argentina: Textural features and metal zoning at the porphyry to epithermal transition, *Ore Geology Reviews*, 66, 366–387. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.022>.
- Ghasemi, A., and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>.
- Hemley, J.J., and Hunt, J.P., 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: II. Some General Geologic Applications, *Economic Geology*, 87, 23–43. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.1.23>.

- Maydagan, L., Franchini, M., Impicini, A., and Lentz, D.R., 2016. Phyllosilicates geochemistry and distribution in the Altar porphyry Cu- (Au) deposit, Andes Cordillera of San Juan, Argentina: Applications in exploration, geothermometry, and geometallurgy, *Journal of Geochemical Exploration*, 167, 83-109. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.05.002>.
- McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Belousova, E., and Griffin, W.L., 2003. Porphyry copper deposits of the Kerman belt, Iran: timing of mineralization and exhumation processes, CSIRO Scientific Research Report, No: 41.
- McInnes, B.I.A., Evans, N.J., Fu, F.Q., Garwin, S., Belousova, E., Griffin, W.L., Bertens, A., Sukama, D., Permanadewi, S., Andrew, R.L., and Deckart, K., 2005. Thermal history analysis of selected Chilean, Indonesian, and Iranian porphyry Cu-Mo-Au deposits, in: In: Porter, T.M. (Ed.), *Super, Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*, 1st. PGC Publishing, Adelaide, pp. 1-16.
- Miller, C.F., Stoddard, E.F., Larry, J.B., and Wayne, A.D., 1981. Composition of plutonic muscovites: genetic implications, *Canadian Mineralogist*, 19(1), 25-34. <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/19/1/25/11497/Composition-of-plutonic-muscovite-genetic>.
- Mohammadilagh, H., and Taghipour, N., 2011. *Physico - chemical evolution of hydrothermal fluid at Sara (Parkam) porphyry copper deposit, Kerman Province, Advanced Applied Geology, 1, 11-24. (In Persian)*
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, Springer, Geological Survey of Western Australia, p 1250.
- Reich, M., Deditius, A., Chrysoulis, S., Li, J-W., Ma, Ch-Q., Parada, M.A., Barra, F., and Mittermayr, F., 2013a. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 104, 42-62. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.006>.
- Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C., Chrysoulis, S.L., and Ewing, R.C., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11), 2781-2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>.
- Reich, M., Palacios, C., Barra, F., and Chrysoulis, S., 2013b. Invisible silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu deposit, northern Chile, *European Journal of Mineralogy*, 25(3), 453-460. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2013/0025-2287>.
- 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., and Zarasvandi, A., 2022. Combined Feldspar-Destructive Processes and Hypogene Sulfide Mineralization in the Porphyry Copper Systems: Potentials for Geochemical Signals of Ore Discovering. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 46, 1413-1424. <https://doi.org/10.1007/s40995-022-01350-1>.
- 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>.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A., and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan, *Economic Geology*, 107(2), 295-332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>.
- Saric, A., Djordjevic, M., and Dimitrijevic, M.N., 1972. Geological map of Shahr-Babak, Scale 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. Geological Society of America, Vol: 32, p.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A., and Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features, *Economic Geology*, 100th Anniversary, 251. <https://doi.org/10.5382/AV100>.
- Shafiei, B., and Shahabpour, J., 2008. Gold Distribution in Porphyry Copper Deposits of Kerman Region, Southeastern Iran, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 19(13) 247-260. https://jsciencs.ut.ac.ir/article_31898.html
- 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, *Economic Geology*, 105, 3-41. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>.
- Taghipour, N., Aftabi, A., and Mathur, R., 2008. Geology and Re-OS geochronology of Mineralization of the Miduk Poyphyry Deposit, *Resource Geology*, 58 (2), 143-160. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00054.x>
- Ulrich, T., and Heinrich, C.A., 2001. Geology and alteration geochemistry of the Porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 97, 1865-1888. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1719>.

- Uribe-Mogollon, C., and Maher, K., 2018. White Mica Geochemistry of the Copper Cliff Porphyry Cu Deposit: Insights from a Vectoring Tool Applied to Exploration, *Economic Geology*, 113, 1269–1295. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4591>.
- Wallace, C.J., and Maher, K.C., 2019. Phyllic Alteration and the Implications of Fluid Composition at the Copper Flat Hydrothermal System, New Mexico, USA, *Ore Geology Reviews*, 104, 273-293. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.009>.
- 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>.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., and Zentilli, M., 2010. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, central Iran, *International Geology Review*, 47(6), 620-646. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.6.620>.
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., Lentz, D., Azimzadeh, A.M., and Pourkaseb, H., 2015b. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu–Au deposit, Central Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 111(1), 175-191.
- 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 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>