

“Kutnohorite”: Mineralogy database and alteration types in the Koushk deposit (Bafq, Central Iran)

Sina Asadi^{1*}, Abbas Zolfaghari¹

1- Department of Earth Sciences, School of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

Keywords: Kutnohorite, Zn-Pb, Koushk deposit, Central Iran, Bafq

1-Introduction

The Koushk Zn-Pb shale-hosted massive sulfide (SHMS) deposit in the central part of the Zarigan–Chahmir basin, central Iran (Posht-Badam Block), is the largest of several sedimentary–exhalative deposits in this basin and the sequence of lithostratigraphic Rizu unit. The host-rock sequence includes black shales, volcanoclastic and rhyolitic tuffs, intermediate to felsic and basaltic lavas, shales, black siltstones, sandstones, and dolomitic dolomitic limestone, and minor gypsum beds (Ramezani and Tucker, 2003). U-Pb zircon dating gave 528.2 ± 0.8 Ma age for the dacitic porphyries and rhyodacites of the lower part of the Early Cambrian volcano-sedimentary sequence (Ramezani and Tucker, 2003).

Evaluation of the deposit by Koushk Corporation Ltd. reported the ore reserve to be about 14 Mt, averaging 7% Zn and 1.5% Pb and the primary resources ore of the deposit is also estimated to be more than 60 Mt (Rajabi et al., 2020). The mine-scale association of spatially and texturally distinct sulfide ore styles with vent complex, bedded ore, and feeder zone in the Koushk deposit is puzzling in that high-grade Zn ore and intense vein-network/breccia development are often adjacent to highly pyritic stratiform sulfide bands within the Lower Cambrian black shales (Rajabi et al., 2012).

The presence of “kutnohorite,” a type of manganese carbonate [$\text{CaMn}^{2+}(\text{CO}_3)_2$] in almost all lithostratigraphic units, including open pit and underground mine, is an interesting feature reported for the first time in this research. According to Polgari et al. (2007), X-ray diffraction (XRD) and infrared spectroscopy studies indicate that the kutnohorite has excess Ca (72.9-80.0 mol.% CaCO_3 , 16.3-20.5 mol.% MnCO_3 , 3.3-5.6 mol.% MgCO_3 and 0.0-0.5 mol. % FeCO_3). It is generally accepted that the Mn^{2+} ion and most trivalent rare-earth elements (REE) are the most important activators in carbonate minerals such as kutnohorite (Machel, 2000). Based on determining the types of alteration associated with the kutnohorite-bearing zone using Ishikawa and chlorite-carbonate-pyrite (CCP) indices, this mineral is an exploratory indicator of the Mn-rich zone in volcanogenic massive sulfide and deposits similar to this type, such as the Koushk ore deposit.

Therefore, the alteration zone is a common feature in host rocks surrounding massive sulfide deposits. Alteration indexes, such as the Ishikawa alteration index (AI) and the chlorite-carbonate-pyrite index (CCPI), have been developed to measure sericite intensity chlorite, carbonate, and pyrite replacement of Na-bearing feldspars and glass associated with hydrothermal alteration proximal to the ores. In this paper, a simple graphical representation of the Ishikawa AI plotted against the CCPI, termed the “alteration box plot,” is used to characterize the different alteration trends related to the SHMS deposits (Large et al., 2001). Although there are some limitations with the technique, a series of case studies are used to demonstrate that the alteration box plot is a powerful means of understanding the relationship between mineralogy, lithogeochemistry, and intensity of alteration in zoned alteration systems related to SHMS deposits and to place samples within the context of the typical mineralogical zonation exhibited by the hydrothermal systems. The purpose of this paper is to propose a simple graphical representation of lithogeochemical data for altered rocks, which enables a better understanding of the relationship between kutnohorite generation and alteration mineralogy within the context of zoned hydrothermal alteration systems related to the Koushk deposit.

*Corresponding author: sinaasadi@shirazu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.34493.2145

Received 2020-07-28

Accepted 2020-11-15

2- Results and discussion

To better understand kutnohorite formation and its relation to hydrothermal alterations, field operations and systematic sampling of all lithological units in the open pit and underground mine of the Koushk were performed. XRD and Raman spectroscopy patterns of the carbonate minerals indicate that sharp peaks are characteristic of kutnohorite. The compositional variation of kutnohorites extends from Mn-rich varieties to Ca-rich varieties. In nature, Ca-deficient and Mn-excessive nonstoichiometric kutnohorites are known to occur. While XRD indicates one phase in the kutnohorite, Raman data revealed microscale heterogeneity in the vein type, which seems to be a standard feature for kutnohorite mineral Koushk deposit. The Raman patterns of the kutnohorite mineral show also reflections characteristic of the dolomite structure. According to the kutnohorite's dolomite-type structure, a composite band with an emission peak of Mn^{2+} in the lattice structure. Our XRD and Raman spectroscopy studies show that kutnohorite is monophase, and its spectra more closely resemble those of dolomites, where only one peak appears due to Mn substituting for Fe. However, it remains undecided whether the kutnohorite spectra have a single emission band or, due to a relatively similar Ca-Mn occupation of dolomite lattice mineral positions, composed of two peaks with nearly identical peaks wavelengths.

The alteration box plot typically exhibits $AI > 23.72$ and $69.13 < CCPI < 99.80$, corresponding to chlorite-carbonate-pyrite (CCP) alteration within the host sequence in the Koushk deposit. Lithochemical data from a series of host rocks samples is plotted into five major fields in the diagram related to the alteration zones. In the Koushk mine, the significant samples plotted in field 4, which corresponds to altered rocks within the Koushk ore horizon, along strike from ore, fall in the truncated triangular field (carbonate-sericite \pm chlorite), where the AI varies from 20 to 85 and the CCPI from 50 to 99. The vast literature available on hydrothermal zonation associated with shale-hosted massive sulfide deposits indicates that there are consistent patterns of zonation, with chlorite-, pyrite-, carbonate- (CCP) and sometimes quartz-rich assemblages close to the ore, surrounded by halos of sericite-rich and sericite \pm chlorite \pm carbonate assemblages (Large et al., 2001) similar to Koushk deposit.

3- Conclusion

Field observations and geochemical analyses indicate that the Koushk Zn-Pb deposit in Central Iran can be considered an exciting feature of shale-hosted massive sulfide deposits with a collection of sulfide, oxide, phosphate, and carbonate minerals. In this research, we report the microscopic- ray diffraction and Raman spectroscopic properties of kutnohorite " $CaMn^{2+}(CO_3)_2$ " from the Mn-bearing carbonate group (dolomites) for the first time. Furthermore, plotting the alteration Ishikawa index (AI) against the chlorite-pyrite-carbonate index (CCPI) for a range of host rock Koushk samples shows chlorite-carbonate-pyrite alteration typically developed immediately adjacent to massive sulfide lenses in the footwall position in the host rocks. Finally, determining the types of alterations associated with kutnohorite generation using the Ishikawa and CCP indices showed that this mineral is the indicator and an exploration key for the manganese-rich zones shale-hosted massive sulfide deposits such as the Koushk mine.

References

- Large, R.R., Bull, S.W., Winefield, P.R., 2001. Carbon and oxygen isotope halo in carbonates related to the McArthur River (HYC) Zn-Pb-Ag deposit, north Australia: Implications for sedimentation, ore genesis, and mineral exploration. *Economic Geology* 96(7), 1567-1593.
- Machel, H.G., 2000. Application of cathodoluminescence to carbonate diagenesis. In: *Cathodoluminescence in Geosciences* (M. Pagel, V. Barbin, P. Blanc and D. Ohnenstetter, editors). Springer Verlag, Berlin.
- Polgari, M., Bajnoczi, B., Kovacs Kis, V., Gotze, J., Dobosi, G., Toth, M., Vigh, T., 2007. Mineralogical and cathodoluminescence characteristics of Ca-rich kutnohorite from the Úrkút Mn-carbonate mineralization, Hungary. *Mineralogical Magazine* 71, 493-508.
- Rajabi, A., Alfonso, P., Canet, C., Rastad, E., Niroomand, S., Modabberi, S., Mahmoodi, P. 2020. The world-class Koushk Zn-Pb deposit, Central Iran: a genetic model for vent-proximal shale-hosted massive sulfide (SHMS) deposits – based on paragenesis and stable isotope geochemistry. *Ore Geology Reviews* 124, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103654.
- Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P., Canet, C., 2012. Geology, ore facies and sulphur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam block, Central Iran. *International Geology Review* 54(14), 1635-1648.

Ramezani, J., Tucker, R. D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303(7), 622-665.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Asadi, S., Zolfaghari, A., 2021. "Kutnohorite": Mineralogy database and alteration types in the Koushk deposit (Bafq, Central Iran). *Adv. Appl. Geol.* 11(3), 405-420.

DOI: 10.22055/AAG.2020.34493.2145

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16260.html?lang=en

"کوتنهوریت": پایگاه داده‌های کانی‌شناختی و انواع دگرسانی‌ها در کانسار کوشک (باقی، ایران مرکزی)

سینا اسدی*

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز

عباس ذوالفقاری

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵

*sinaasadi@shirazu.ac.ir

چکیده

کانسار سولفید توده‌ای روی-سرب کوشک (شمال شرق بافق) با سنگ میزبان شیل در ایران مرکزی (بلوک پشت بادام) و در توالی سنگ‌چینه‌ای سری ریزو قرار دارد. طی این پژوهش برای نخستین بار در ایران رگه‌های صورتی رنگ کانی مجهولی همزاد با کوارتز، واقع در اغلب واحدهای سنگ‌چینه‌ای پهنوی شمالی و جنوبی کانسار کوشک به‌عنوان کانی کوتنهوریت (Kutnohorite) معرفی شده است. کوتنهوریت نوعی کربنات منگنز با فرمول شیمیایی " $\text{CaMn}^{2+}(\text{CO}_3)_2$ " از گروه دولومیت است. نمونه‌برداری و انجام تجزیه‌های زمین‌شیمیایی از سنگ‌میزبان آتشفشانی-رسوبی (ریولیت، توف، شیل و دولومیت) نشان می‌دهد که در بخش پهنوی شمالی کانسار کوشک مقادیر فراوانی از کانی‌های کلریت، سریسیت، کلینوکلر و پیریت‌های خودشکل همراه با رگه‌های کوتنهوریت-کوارتز و در ارتباط با کانه‌های گالن و اسفالریت دیده می‌شود. بر این اساس، تعیین انواع دگرسانی‌های مرتبط با زون‌های کربنات منگنز با استفاده از شاخص‌های ایشی‌کاوا و کلریت - کربنات - پیریت (CCPI) نشان داد که کانی کوتنهوریت در ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب با میزبان شیل، مانند کانسار کوشک، می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر و کلید اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: کوتنهوریت، روی - سرب، کانسار کوشک، ایران مرکزی

مقدمه

زمین‌شناسی باعث شده که امروزه در این منطقه شاهد انواعی از کانه‌زایی و دگرسانی‌های مختلف باشیم. وجود زون‌های سولفیدی، غیرسولفیدی و زون‌های آبشوییده و به تبع آن وجود کانی‌هایی نظیر اسفالریت، گالن، اسمیت‌زونیت، باریت، بروشیت (Brushite)، واریسیت (Variscite)، بیرائونیت (Beraunite) (فسفات آبدار آهن) بویلیت (Boyleite)، کارفوسیدریت، ژاروسیت، اپسومیت، ملانتریت، لیناریت، آپژونیت، کالینیت، گونژیت مگنتیت، همتایت و سنگ‌های جاسپلیت، ریولیت، گابرو، توف و شیل همگی از توالی سنگ‌چینه‌ای پیچیده‌ای حکایت دارند که نمی‌توان منشأ آن را مشابه با یک تیپ مشخصی از کانه‌زایی در دنیا مقایسه کرد (Zolfaghari, 2019) محاسبه شاخص‌های ایشی‌کاوا "Ishikawa Alteration Index (AI)" (Ishikawa et al., 1976) و شاخص دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت "chlorite-carbonate-pyrite Index (CCPI)" (Large et al., 2001) در ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب با میزبان شیل اطلاعات مفیدی را در ارتباط با تعیین خاستگاه کانسار، بارور و یا نابارور بودن سنگ‌های میزبان در محدوده‌های مشابه، دوری و

کانسار روی - سرب کوشک در ایران مرکزی را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از کانی‌های سولفیدی و اکسیدی، فسفاتی و کربناتی دانست. در این کانسار در بخش‌های سطحی‌تر معدن روباز که با رنگ‌های غالباً زرد، نارنجی و قهوه‌ای مشخص هستند، انواعی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی حضور دارند. در اغلب واحدهای سنگ‌چینه‌ای کانسار رگه‌های صورتی رنگ کانی مجهولی همزاد با کوارتز و گاه‌ها همراه با پیریت، اسفالریت و گالن مشاهده می‌شود. طی پژوهش حاضر بر اساس عملیات صحرایی و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف کانسار و انجام تجزیه‌های زمین‌شیمیایی، مشخص شد که این رگه‌های صورتی‌رنگ، کانی کمیاب کوتنهوریت (نوعی کربنات منگنز از گروه دولومیت) هستند. کانی کوتنهوریت را می‌توان جزئی از بخش کربناتی در دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت وابسته به ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد دانست. دگرسانی مذکور پیشتر در ذخیره سولفید توده‌ای رُزبری (Rosebery) در غرب تاسمانیا - استرالیا توسط لارژ و همکاران (Large et al., 2001) با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفته است. کانسار کوشک در ادوار مختلف زمین‌شناسی تحولات زمین‌شناختی گسترده‌ای را متحمل شده است. تغییرات زمین‌ساختی و قرارگیری در اقلیم‌های مختلف

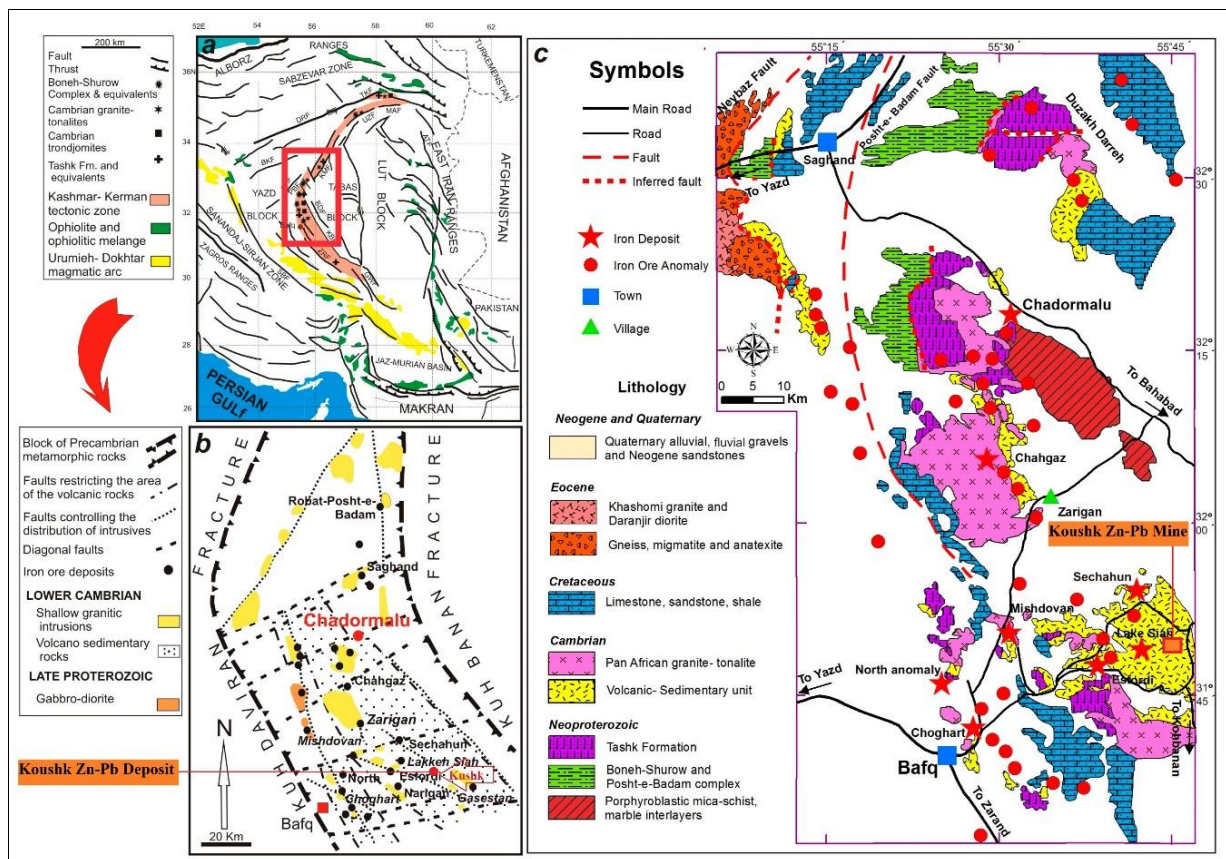
مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

دگرگونی نئوپروتروزویک معرفی شده و اغلب شامل سنگ‌های آتشفشانی ریولیت تا ریوداسیت همراه با توده‌های نفوذی مافیک کوچک است (شکل ۱). قربانی (2002) (Ghorbani) برپایه مطالعات صحرایی و سنگ‌چینه‌شناختی منطقه، واحدهای سنگی را به سن پروتروزویک بالایی و در بین شیل‌های سیاه با پی‌سنگی ریولیتی معرفی کرده است (شکل ۲). مطالعات وزیری و همکاران (Vaziri et al., 2018) مهم‌ترین واحدهای سنگی واقع در حوضه زیرگان-چاه-میر (منطقه مورد مطالعه) را ریولیت‌های آتشفشانی، میکرودیوریت، توف‌های آتشفشانی، سنگ آهک‌های دولومیتی، واحدهای شیلی به سن اداکارن بالایی و ماسه سنگ معرفی نموده است.

نزدیکی به مرکز بروندم و تفسیرهای مهم دیگری را در مورد منطقه

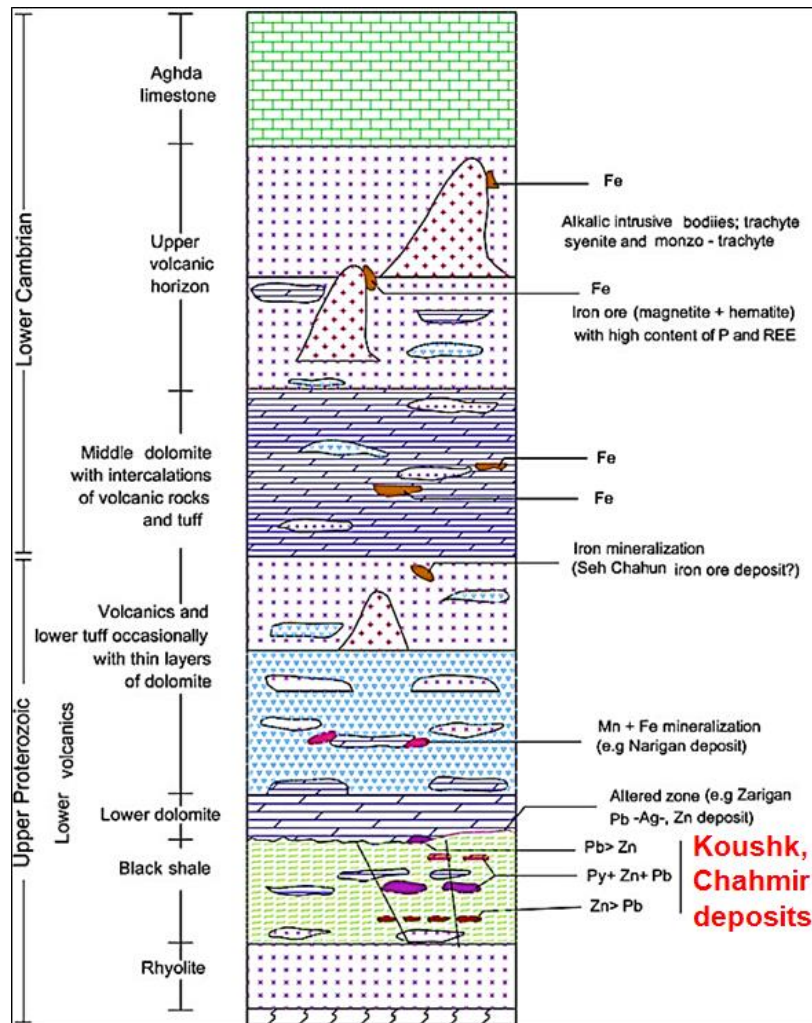
جایگاه ساختاری و چینه‌شناختی منطقه

کانسار روی - سرب کوشک با مختصات طول جغرافیایی شرقی $31^{\circ} 45' 33.27''$ و عرض جغرافیایی شمالی $55^{\circ} 45' 44.97''$ در ۱۷۰ کیلومتری شرق یزد، ۴۲ کیلومتری جنوب غرب شهرستان بهاباد و در ۴۴ کیلومتری شمال شرق بافق قرار دارد. بهترین راه دسترسی به این کانسار، جاده آسفالت بافق - بهاباد است. این کانسار از نظر ساختاری در کوچک‌قاره ایران مرکزی و بلوک پشت بادام (Alavi, 1991) یا معادل آن کمربند کاشمر-کرمان (Ramezani and Tucker, 2003) و در یک توالی آتشفشانی-رسوبی به سن پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین تحت عنوان سری ریزو (هم‌ارز عضوهای سازند سلطانیه) قرار دارد. این منطقه به عنوان پی‌سنگ



شکل ۱- (a) نقشه ساختاری بلوک پشت بادام یا معادل آن از کمربند کاشمر-کرمان، (b) موقعیت ساختاری کانسار کوشک در بلوک پشت بادام و نمایش گسل‌ها و واحدهای اصلی آذرین و رسوبی منطقه و (c) نقشه زمین‌شناسی بلوک پشت بادام و موقعیت تعدادی از کانسارهای ایالت فلزایی بافق، از جمله کانسار روی-سرب کوشک در بین واحدهای آتشفشانی-رسوبی (با اصلاح، برگرفته از Ramezani and Tucker, 2003; Forster and Jafarzadeh, 1994; Haghypour, 1977; NISCO, 1980).

Fig. 1. (a) Structural map of the Posht-Badam block or equivalent of the Kashmar-Kerman belt, (b) The structural location of the Koushk deposit in the Posht-Badam block and showing the faults and main igneous and sedimentary units in the area, and (c) Geological map of the Posht-Badam block and the location of some deposits in the Bafgh metallurgical state, including the zinc-lead deposit of the pavilion between volcanic-sedimentary units (modified after Ramezani and Tucker, 2003; Forster and Jafarzadeh, 1994; Haghypour, 1977; report of NISCO, 1980).



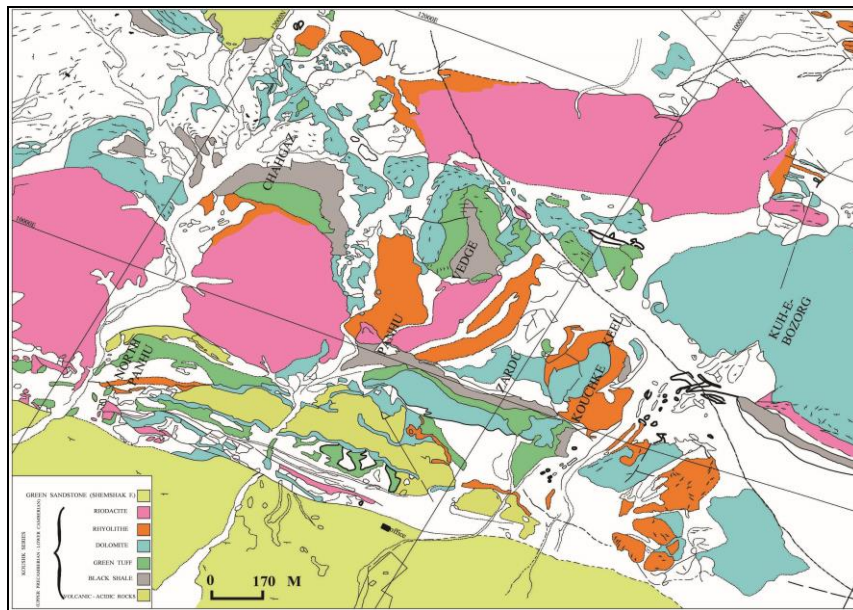
شکل ۲- ستون سنگ‌چینه‌شناختی سنگ‌های پرکامبرین و کامبرین و کانه‌زایی‌های مرتبط با آنها در محدوده معدنی بافق. موقعیت چینه‌شناختی کانسار روی-سرب پایین‌ترین بخش ستون با سن پروتروزوئیک بالایی در بین شیل‌های سیاه با پی‌سنگی از ریولیت مشخص شده است (Ghorbani, 2002).

Fig. 2. Lithostratigraphy column of Precambrian and Cambrian rocks and related mineralizations in the Bafq mining area. The stratigraphic position of the Koushk Zn-Pb deposit is determined in the lowest part of the Upper Proterozoic column among the black shales with rhyolite basement (Ghorbani, 2002).

اصلی شامل واحدهای دولومیت بالایی، دولومیت زیرین، شیل بالایی، شیل زیرین، ریولیت و توف هستند. لیتولوژی‌های فرعی سنگ میزبان در کانسار کوشک نیز شامل آهک سازند عقدا در جنوب غرب معدن روباژ، میکرودیوریت بخش زردو (ابتدای گزنگ ۸۹۰، مشرف به ۸۸۰ بخش زردو)، جاسپیلیت‌ها (در داخل واحد دولومیت بالایی) در تماس با سری چشمه در بخش کمر بالای سنگ‌های آتشفشانی پشت معدن و پله ۱۰۷۰ پهنوی جنوبی، توده نفوذی گابرو در داخل دولومیت‌های بالایی سری کوشک در قسمت کمر بالای معدن، زون آبشوییده و رنگین در واحد شیل زیرین (با گسترش و تنوع رنگی زیاد) هستند. در بسیاری از واحدهای سنگ‌چینه‌ای کانسار کوشک، رگه - رگچه‌های صورتی رنگ متقاطع وجود دارد که این رگه‌ها غالباً از کانی صورتی‌رنگ کوتنهوریت همزاد با کوارتز تشکیل شده‌اند که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت.

زمین‌شناسی و کانه‌زایی منطقه

کانسار کوشک شامل کان‌توده‌های کوشک، پهنو، زردو، کیل و چاه‌گز است. توده‌های معدنی پهنو، زردو، کوشک قدیمی و کیل توسط گسل‌های مشخصی از هم جدا شده‌اند. کانه‌زایی اصلی معدن بیشتر در بخش‌های کوشک، پهنو و زردو و در بین سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی قرار رخ داده است (شکل ۳)، این سنگ‌ها بیشتر شامل شیل سیاه، توف و دولومیت هستند. میزبان اصلی کانه‌زایی روی و سرب در این کانسار واحد شیلی به سن پروتروزوئیک بالایی است اما بر اساس پژوهش حاضر کانه‌زایی در در واحدهای دولومیتی هم‌ارز عضوهای سازند سلطانیه (و معادل با سری ریزو)، نیز رخ داده است. این کانسار یک ذخیره سولفیدی فلزات پایه با غلظت میانگین روی ۱۶٪ و سرب ۴٪ است، اما بخش‌های کوچک غیرسولفیدی (اسمیت‌زونیت و هماتیت) نیز در آن وجود دارد. سنگ‌های میزبان



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت کان‌توده‌های اصلی کانسار کوشک (اقتباس از دفتر زمین‌شناسی معدن کوشک، با مسئولیت محدود).

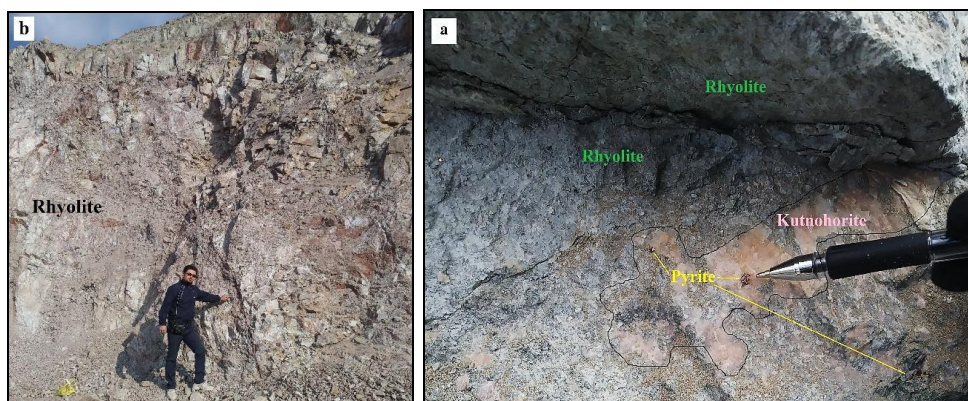
Fig. 3. Geological map and location of the main orebodies at Koushk deposit (Koushk mining company, Corporation Ltd.).

بحث و نتایج

طبق مشاهدات و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف کانسار کوشک، واحدهای ریولیتی و توف‌های ریوداسیتی نسبت به دیگر واحدهای آذرین سنگ میزبان، بیشترین رخمون را دارند. نمونه‌برداری از این واحد سنگی ریولیتی در بخش شمالی سری معدنی کوشک و سنگ‌های دگرسان شده کلریتی و سربستی در پله ۱۰۱۰ معدن روباز انجام شد (شکل ۴). بررسی واحد ریولیتی در کانسار کوشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر علاوه بر مطالعات سنگ‌نگاری با انجام تجزیه‌های زمین‌شیمیایی و مشاهدات صحرایی از این واحد دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت "CCP" تشخیص داده شد. استفاده از شاخص‌های دگرسانی ایشی‌کاوا "AI" و کلریت - کربنات - پیریت "CCPI" در ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب اطلاعات مفیدی را در ارتباط با تعیین خاستگاه کانسار، بارور و یا نابارور بودن سنگ‌های میزبان در محدوده‌های مشابه، دوری و نزدیکی به مرکز بروندم و داده‌های کاربردی دیگری را در اختیار ما قرار می‌دهد (Large, 2001). با نمونه‌برداری از رخمون ریولیت‌ها و توف‌های ریوداسیتی در پهنوی شمالی کانسار کوشک و انجام تجزیه‌های متعدد مشخص شد که در ریولیت‌ها کانی کلینوکلر و پیریت‌های خودشکل به مقدار قابل توجهی همراه با کانی کربنات-منگنز (کوتنهوریت) وجود دارد. با توجه به وجود این سه کانی، دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت در واحدهای سنگ میزبان مشاهده و اثبات شد که نشان می‌دهد کانی کوتنهوریت شاخص و کلید اکتشافی زون غنی از منگنز در ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب مانند کانسار کوشک است. که در ادامه به بررسی کانی‌شناختی و تفسیر پارامترهای مرتبط با این دگرسانی پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش عملیات صحرایی و نمونه‌برداری سامانند از اکثر واحدهای سنگی معدن روباز و زیرزمینی کوشک به مدت ۲۱ روز و با کمک پرسنل معدن انجام گرفت. پس از دسته‌بندی نمونه‌ها، تعداد ۲۰ عدد مقطع میکروسکوپی (شامل مقاطع صیقلی، مقاطع نازک - صیقلی و مقاطع نازک) از نمونه‌های کانسنگ و سنگ‌میزبان در آزمایشگاه زرگون دانشگاه بوعلی‌سینا (همدان) تهیه شد و مطالعات میکروسکوپی این مقاطع در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه شیراز انجام گرفت. همچنین با هدف شناسایی و اثبات کانی کوتنهوریت، تعداد ۲ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران (کرج) با استفاده از دستگاه X Ray Diffraction مدل Philips-Xpert Pro مورد تجزیه قرار گرفت. ۴ نمونه نیز به روش طیف‌سنجی رامان مدل HORIBA Scientific's LabSpec 6 Spectroscopy L633 nm_F100_50x_G1800_32-1200 cm-L532 nm_F100_50x_G1800_32- 1_Accq5Accu5 1200 cm- در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز مورد شناسایی قرار گرفت. علاوه بر این، با هدف تشخیص انواع دگرسانی‌ها و مطالعات زمین‌شیمیایی سنگ میزبان، تعداد ۱۵ نمونه از کانسنگ و سنگ میزبان به روش طیف‌سنجی پلاسما جفتیده القایی (ICP-MS)، و تعداد ۱۵ نمونه به روش فلئورسانس پرتو ایکس (XRF) در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران (کرج) مورد تجزیه قرار گرفتند.



شکل ۴- (a) ریولیت‌های دگرسان شده په‌نوی شمالی کانسار کوشک و (b) ریولیت‌ها و توف‌های ریوداسیتی پله ۱۰۱۰ کانسار (دید به سمت شمال).

Fig. 4. (a) Altered rhyolites of northern Pahno in the Koushk deposit and (b) Rhyolites and rhyodacitic tuffs of step 1010 of the Koushk deposit (view to the north).

سه لیزره طیف‌سنجی رامان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز نیز بررسی شد و طیف آن با دو لیزر ۵۳۲ و ۶۳۳ نانومتر با توان‌های ۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ثبت گردید و پیک‌های این لیزرها در تایید دقت تجزیه به طور کامل بر هم منطبق شدند. سپس نتایج حاصل از طیف‌سنجی رامان این کانی با طیف کانی کوتنهوریت مربوط به پایگاه داده‌های طیف‌سنجی رامان گروه علوم‌زمین دانشگاه آریزونا آمریکا (RRUFF.info) نیز مقایسه، و مشخص شد که این طیف‌ها کاملاً بر هم منطبق هستند و در نتیجه صحت آن نیز مورد تایید قرار گرفت (شکل‌های ۸ و ۹). علاوه بر نتایج فوق، بر اساس نتایج تجزیه "ICP-MS" انجام شده از این کانی در مرکز تحقیقات و فناوری مواد معدنی ایران نیز مشخص شد که غلظت عنصر منگنز به میزان قابل توجهی در آن بالاست (جدول ۱). در تصاویر میکروسکوپی، کانی کوتنهوریت ظاهری مشابه با دولومیت زین‌اسبی با بلورهای خودشکل دارد (Polgári et al., 2007; Asadi and Rajabzadeh, 2014). در مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سنگ‌های کانسار کوشک نیز کانی کوتنهوریت به صورت زین‌اسبی با بلورهای موزاییکی و خوش‌وجه مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

شاخص دگرسانی ایشی‌کاوا (Ishikawa Index; AI)

نسبت مجموع غلظت عناصر $MgO+K_2O$ تشکیل دهنده سنگ میزبان رسوبی - آتشفشانی مرتبط با دگرسانی کلریتی و سریسیتی به مجموع غلظت عناصر $Na_2O+CaO+MgO+K_2O$ در سنگ‌های درونگیر دگرسان شده طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Ishikawa et al., 1976):

$$AI = \frac{100 (K_2O + MgO)}{(K_2O + MgO + Na_2O + CaO)}$$

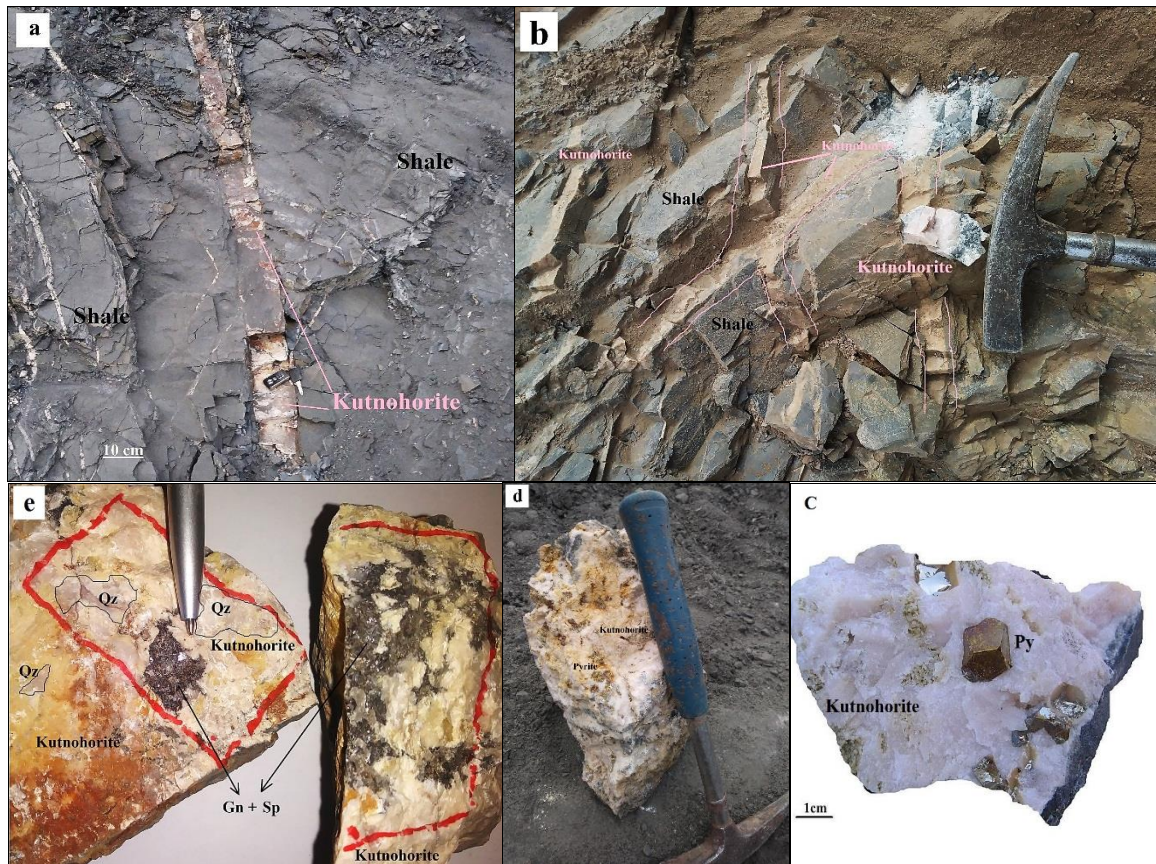
Ishikawa AI

کانی کوتنهوریت "Kutnohorite"

طی این پژوهش برای نخستین بار در ایران اثبات گردید که رگه‌های صورتی رنگ کانی مجهولی همزاد با کوارتز، واقع در اغلب واحدهای سنگ‌چینه‌ای په‌نوی شمالی و جنوبی کانسار کوشک، نوعی کانی کربنات منگنز به نام کوتنهوریت "Kutnohorite" است (شکل ۵). کوتنهوریت با ترکیب شیمیایی $CaMn^{2+}(CO_3)_2$ از گروه دولومیت‌ها است. رگه‌های کوتنهوریت - کوارتز در مناطق مختلفی در دنیا جهت اکتشاف سرب، روی، نقره و آنتیموان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که می‌توان به مطالعات ریچارد و همکاران (Richard et al., 2019) در ناحیه باستانی معدن سرب - روی - نقره کوتنهورا (Kutná Hora) در جمهوری چک اشاره نمود. کانی کوتنهوریت در کانسار کوشک بیشتر در زون کربنات منگنز و در ارتباط با کانه‌زایی روی و سرب و همچنین دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت مشاهده می‌شود (جدول ۱، شکل‌های ۱۲ و ۱۳). رگه‌های کانی کوتنهوریت در بخش په‌نوی شمالی و جنوبی کانسار و در بین واحدهای آتشفشانی - رسوبی قرار دارند. به عبارت دیگر در واحدهای ریولیتی، شیلی و کربناتی که در مجاورت یکدیگر هستند، کانی کوتنهوریت به همراه کانه‌های اسفالریت و گالن و کانی‌های کلریت، پیریت و کوارتز مشاهده می‌شود. برای تایید وجود این کانی، ابتدا مطالعات طیف‌سنج پراش پرتو ایکس بر روی آن انجام و در این روش نام آن دولومیت گزارش شد (شکل ۶). تجزیه "XRD" به دست آمده از این کانی با پایگاه داده‌های کانی‌شناسی گروه علوم‌زمین دانشگاه آریزونا (شکل ۷) مطابقت داده شد. اما نکته قابل توجه این است که بر اساس مطالعات فروندل و باور (Frondel and Bauer, 1955) و گابریلسون و ساندیوس (Gabrielson and Sundius, 1966) تشخیص کانی کوتنهوریت در طیف‌سنج پراش پرتو ایکس دشوار بوده و ساختار و طیفی شبیه به دیگر کانی‌های گروه دولومیت را نشان می‌دهد. بنابراین، برای تشخیص قطعی این کانی به روش‌های شناسایی کارآمدتری نیاز شد؛ در این راستا این کانی با دستگاه

مقدار آن به ترکیب اولیه عناصر در سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی
میزبان نیز بستگی دارد.

در کانسار سولفید توده‌ای روی - سرب با میزبان شیل کوشک
تغییرات این شاخص دگرسانی بین ۲۳/۷۲ تا ۶۷/۳۰ است که البته



شکل ۵- (a) رگه عمودی کوتنهوریت - کوارتز در میزبانی از شیل‌های سیاه دارای کانه‌زایی سرب و روی، تصویربرداری در پله ۹۸۰ معدن روباز
کانسار کوشک، دید به سمت شمال شرق، (b) رگه‌های متقاطع کوتنهوریت - کوارتز درون واحد شیل‌زیرین (سازند ریزو، معادل عضوهای سازند
سلطانیه) که در کانسار کوشک بر روی واحد دولومیت‌زیرین قرار دارد، (c و d) نمونه‌های مطالعه شده از رگه‌های کوتنهوریت - پیریت‌دار، (e)
کوتنهوریت به همراه کوارتز شیری، پیریت و کانه‌های گالن و اسفالریت.

Fig. 5. (a) Vertical kutnohorite - quartz vein hosting black shales containing Pb and Zn mineralization, imaged at step 980 of open pit mine, northeast view, (b) Formation kutnohorite - quartz intersecting veins within the lower shale (Rizo Formation; equivalent to the Soltanieh Formation) located in the lower dolomite in the Koushk deposit, (c-d) The studied samples of kutnohorite - pyrite bearing veins, (e) Kutnohorite with milky quartz, pyrite and galena and sphalerite ores.

در فرمول محاسبه شاخص دگرسانی "CCPI" لازم است
"FeO^{total}" قرار گیرد. مقدار "FeO^{total}" برابر با مجموع مقدار
"Fe₂O₃" بعلاوه "FeO" است (Large et al., 2001). مقدار
درصد "Fe₂O₃" به دست آمده از نمونه های کانسار کوشک با
استفاده از تجزیه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) با مقدار "Fe" به
دست آمده به روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌ده القایی (-ICP
MS) همخوانی دارند. بنابراین با استفاده از فرمول زیر مقدار
"FeO^{total}" محاسبه شد (جدول ۲).

$$\text{Fe} \times 1.435 = \text{Fe}_2\text{O}_3\%$$

$$\text{Fe} \times 1.286 = \text{FeO}\%$$

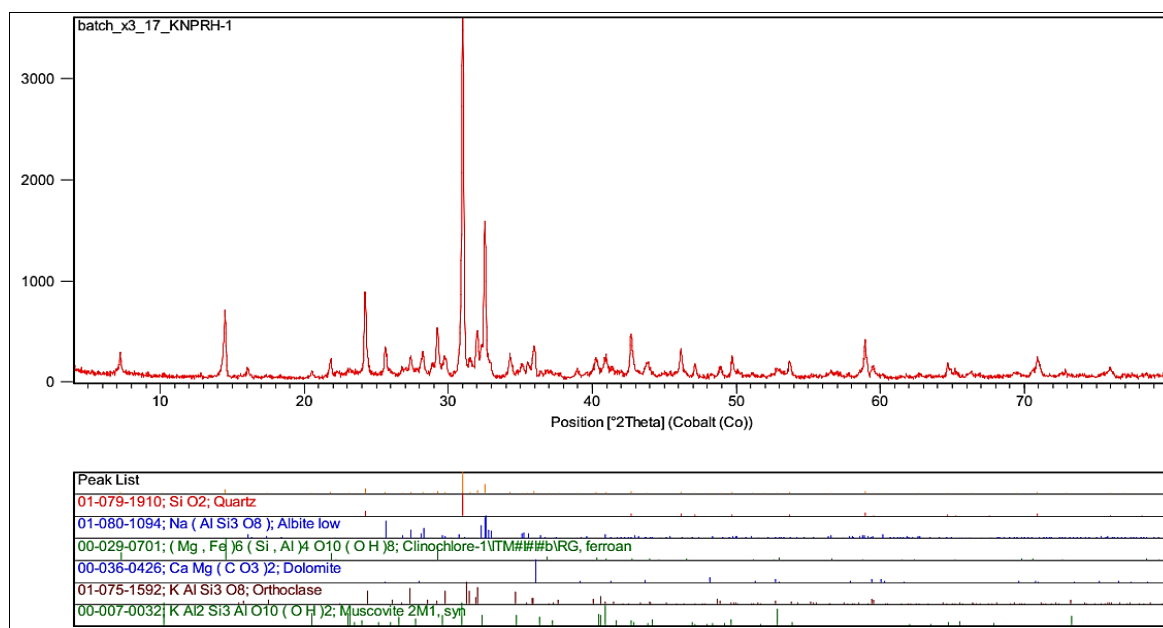
نتایج حاصل از این شاخص دگرسانی در کانسار کوشک بین ۶۹/۱۳
تا ۹۹/۸۰ تغییر می‌کند.

شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت (CCPI)

شاخص دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت (CCPI) مشابه
شاخص ایشی کاوا است، با این تفاوت که در این شاخص محاسبات بر
مبنای نسبت $\text{MgO} + \text{FeO}$ به مجموع همین مقادیر همراه با
اکسیدهای قلیایی تعیین می‌شود. کاربرد شاخص دگرسانی CCPI در
ذخیره سولفید توده‌ای رُزبری (Rosebery) در غرب تاسمانیا - استرالیا
پیشتر توسط لارز و همکاران (Large et al., 2001)، با موفقیت مورد
آزمایش قرار گرفته است و طبق فرمول زیر محاسبه شد:

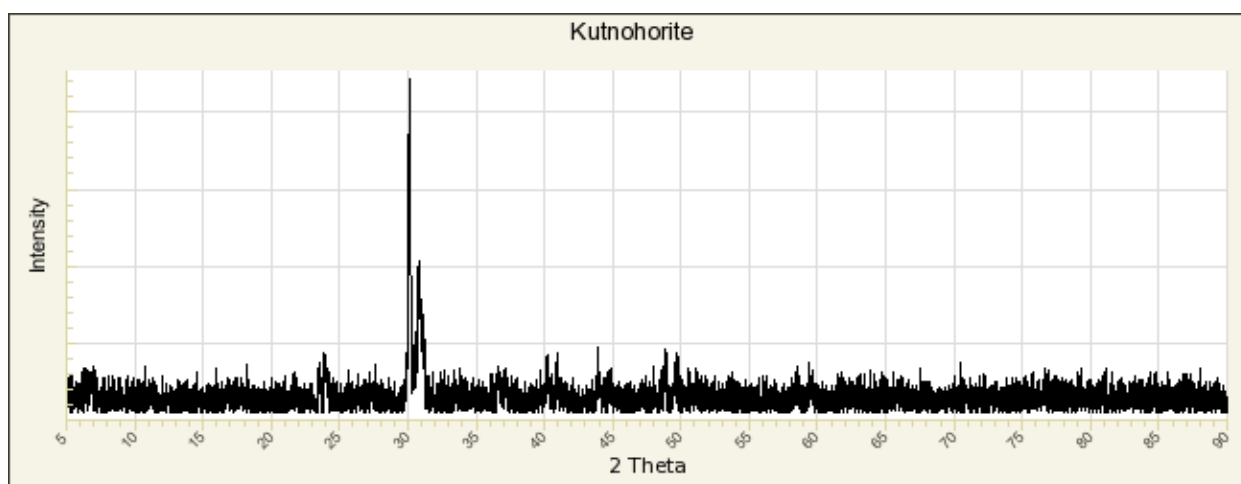
Chlorite-carbonate-pyrite index (CCPI)

$$\text{CCPI} = \frac{100 (\text{MgO} + \text{FeO})}{(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})}$$



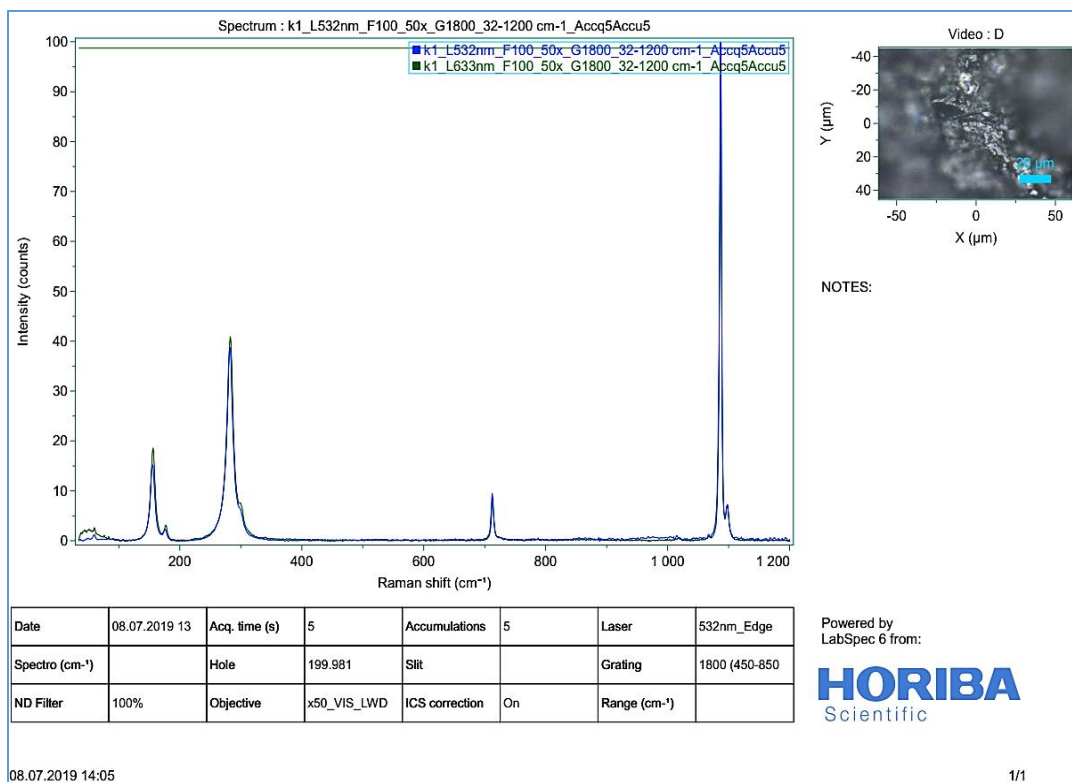
شکل ۶- طیف‌سنج پراش پرتو ایکس "XRD" از ریولیت‌های پله ۱۰۱۰ معدن روباز، پهنوی شمالی کنسار کوشک شامل کانی‌های کوارتز، آلبیت، کلینوکلر، ارتوکلاز، مسکوویت و دولومیت (کوتنهوریت احتمالی). زاویه پراش پرتو ایکس از کانی کوتنهوریت در ریولیت کنسار کوشک، مشابه با زاویه پراش پرتو ایکس از کانی کوتنهوریت در پایگاه داده‌های کانی‌شناسی گروه علوم‌زمین دانشگاه آریزونا "RRUFF.info" در شکل ۷ مطابقت دارد.

Fig. 6. X-ray diffraction analysis from 1010 step ores of the open pit mine, northern Pahno of the Koushk deposit including quartz, albite, clinochlore, orthoclase, muscovite and kutnohorite (possible dolomite) minerals. X-ray diffraction peak from kutnohorite in rhyolite at Koushk deposit, exactly with the XRD analysis peak of kutnohorite in the Mineralogy Database of the Department of Earth Sciences, University of Arizona. "RRUFF.info" corresponds to Figure 7.



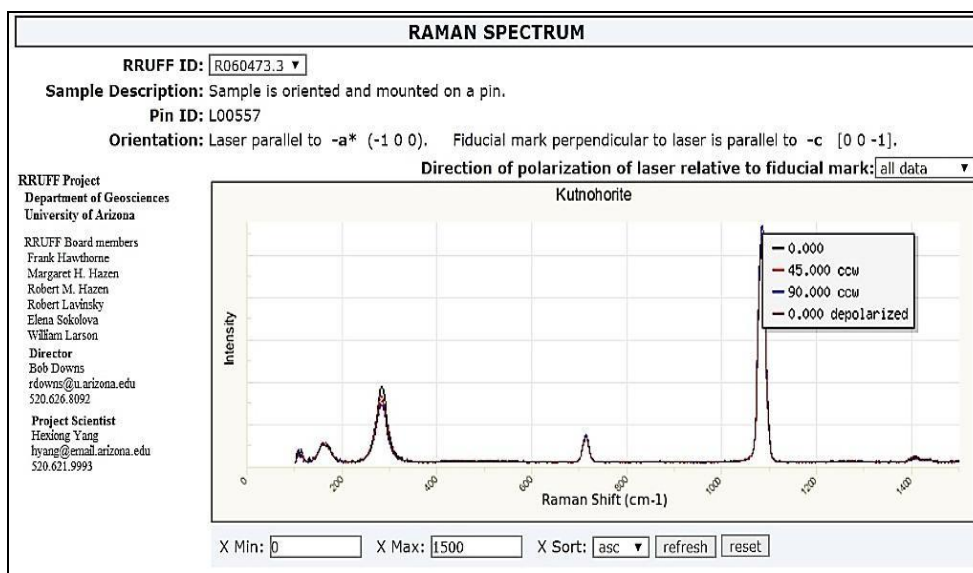
شکل ۷- تجزیه XRD از کانی کوتنهوریت در پایگاه داده‌های کانی‌شناختی گروه علوم‌زمین دانشگاه آریزونا، ایالات متحده آمریکا. "RRUFF.info" (برای مقایسه با شکل ۶).

Fig. 7. XRD analysis of kutnohorite mineral in the mineralogical database of the department of earth sciences, University of Arizona, USA. "RRUFF.info" (comparable to Figure 6).



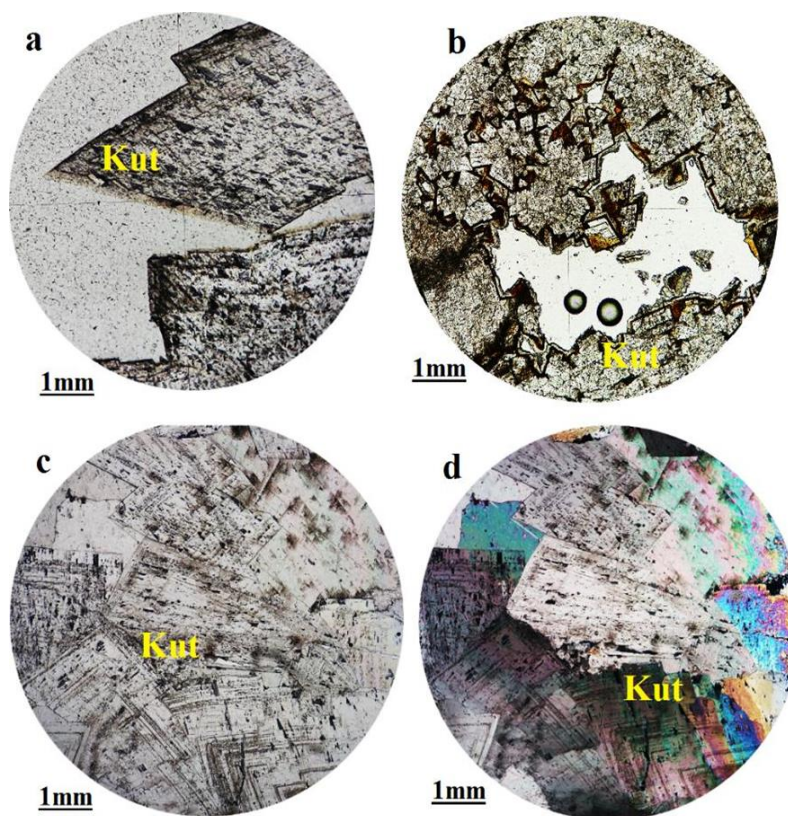
شکل ۸- طیفسنجی رامان برای شناسایی کانی کوتنهوریت، این طیف مشابه با طیف کانی کوتنهوریت در پایگاه داده‌های طیفسنجی رامان دانشگاه آریزونا است. (مطابق با شکل ۹)

Fig. 8. Raman spectroscopy to identify kutnohorite. This spectrum corresponds to the kutnohorite mineral spectrum in the Raman spectroscopic database of the University of Arizona. (corresponds to Figure 9)



شکل ۹- طیف رامان از کانی کوتنهوریت در پایگاه داده‌های طیفسنجی رامان مربوط به گروه علوم زمین دانشگاه آریزونا. "RRUFF.info"

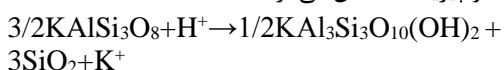
Fig. 9. Raman spectra of kutnohorite mineral in the Raman spectroscopic database of the department of earth sciences, University of Arizona. "RRUFF.info"



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی کانی کوتنهوریت؛ (a) و (b) بلورهای زین‌اسی کوتنهوریت در نور قطبیده صفحه‌ای "PPL"، (c) بلورهای بزرگ کوتنهوریت در نور "PPL" و (d) همان تصویر در نور قطبیده متقاطع "XPL". علائم اختصاری: Kut: kutnohorite.

Fig. 10. Photomicrophotographs of kutnohorite mineral; (a-b) saddle-shaped kutnohorite crystals in plane polarized light "PPL", (c) Large crystals of kutnohorite in "PPL", and (d) The same photomicrophotograph in cross polarized light "XPL". Abbreviation: Kut: kutnohorite.

تغییرات دمایی تشکیل می‌شود. این دگرسانی معمولاً با حضور کوارتز، کلریت و پیریت مشخص می‌گردد (Robb, 2005):



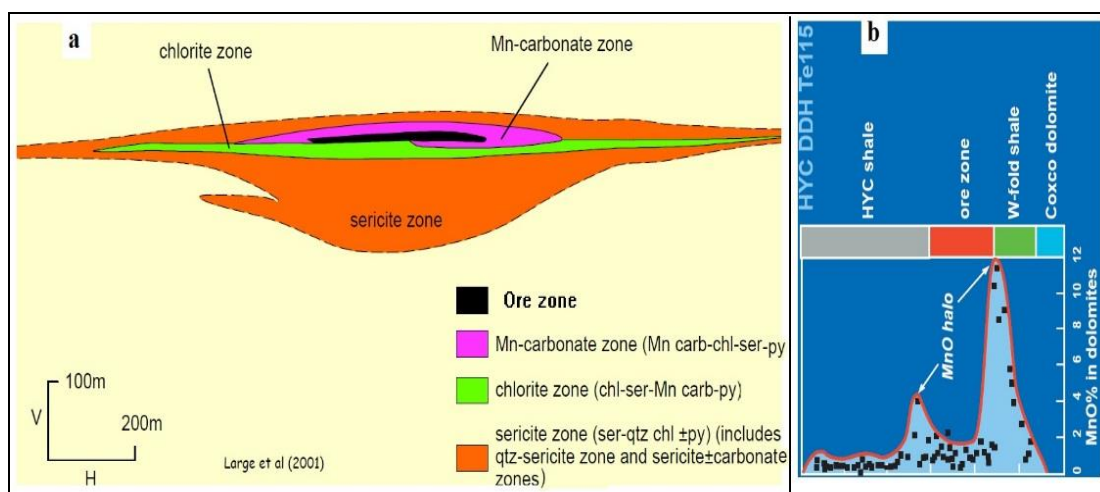
۴. دگرسانی کلریت، کربنات، پیریت "CCP"

تیپ "CCP" اصلی‌ترین دگرسانی موجود در کانسار کوشک و شامل کانی‌های کلینوکلر، پیریت و کوتنهوریت است (شکل ۱۳). بر این اساس در این پژوهش بیشتر به شواهد مربوط به دگرسانی "CCP" پرداخته می‌شود. مطابق شکل ۱۴ داده‌های حاصل در زون کربنات-های غنی از منگنز (کوتنهوریت) همزاد با کانی‌های کلریت، کلینوکلر، سریسیت و پیریت قرار می‌گیرند (Ishikawa et al., 2001; Large et al., 2001; Polgari et al., 2007). به باور پلگری و همکاران (2001) و دیگر کربنات‌های منگنز با این شاخص‌های دگرسانی منحصر به ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب با میزبان شیل مانند ذخیره سرب - روی کوشک بافق در ایران مرکزی است.

جعبه دگرسانی بر مبنای شاخص‌های "CCPI-AI"

ترکیب این شاخص‌ها در یک نقشه مشترک، تصویر روشنی از فرآیندهای دگرسانی را ترسیم می‌کند که نمایش گرافیکی آن بر مبنای شاخص‌های "CCPI-AI" جعبه دگرسانی نامیده می‌شود (Ishikawa et al., 1976). جعبه دگرسانی برای تشخیص انواع مختلف دگرسانی‌های مرتبط با ذخایر بزرگ سولفیدی فلزات پایه (Large, 2001; Asadi, 2013) و همچنین تشخیص دگرسانی-های گرمایی وابسته به سنگ میزبان شیل‌دار ذخایر سولفید توده‌ای استفاده می‌شود (Ishikawa et al., 1976). انواع دگرسانی‌های منطقه معدنی کوشک به شرح زیر است:

۱. دگرسانی کلریت - سریسیت - پیریت (در بخش‌های سطحی کانسار)
۲. دگرسانی سدیک (در بخش‌های ژرف کانسار)
۳. دگرسانی سریسیتی رایج در حاشیه کانسار و در اثر آب‌کافت و تبدیل فلدسپار به سریسیت طبق واکنش زیر در دامنه وسیعی از



شکل ۱۲- (a) مکان زون کربنات منگنز در ذخیره معدنی اصلی و دگرسانی‌های مرتبط با آن در کانسار سولفید توده‌ای رُزبری، استرالیا (Large et al., 2001) و (b) نمودار تغییرات غلظت منگنز و ارتباط آن با کانه‌زایی روی-سرب در واحدهای سنگ‌چینه‌ای ذخیره رسوبی-بروندمی HYC در کمربند روی پروتروزوئیک شمال استرالیا (Large et al., 2001).

Fig. 12. (a) Location of manganese carbonate zone in the main ore deposit and related alterations in the Rosebery massive sulfide deposit, Australia (Large et al., 2001), and (b) Graph of manganese concentration changes and its relationship with Zn-Pb mineralization in lithostratigraphic units of HYC sedimentary exhalative deposit located in Proterozoic Zn-belt of North Australia (Large et al., 2001).

جدول ۱- نتایج تجزیه های XRF و ICP-MS از زون کربنات منگنز و سایر واحدهای سنگ‌چینه‌ای کانسار کوشک.

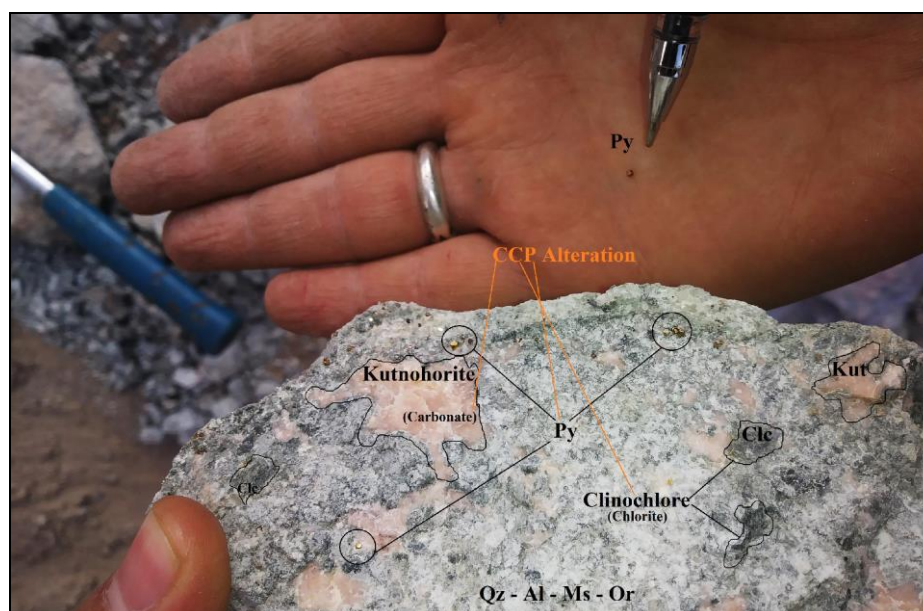
Table 1. Results of XRF and ICP-MS analyses from the manganese carbonate zone and other lithostratigraphic units in the Koushk deposit.

Mn Carbonate Zone (Northern & Southern Pahno – Koushk Deposit)	Sample	ICP-MS	XRF
		Mn (ppm)	MnO (%)
High	KSPS19	6450.22	0.98
	KZT27	4556.92	0.87
	KSPD24	3967	0.85
	KZM9	3209.38	0.83
	KNPR9	2921.64	0.52
	KSPD33	2766.74	0.48
	KZS26	2422.08	0.37
	KSPS23	1771.33	0.34
	KXPbSp	1744.35	0.28
	KSPG31	1110.4	0.12
	KSPR11	959.22	<0.1
	Low	KNKS2	941.45
Other units in Koushk Deposit	KZD28	844.92	<0.1
	KNPR4	271.55	<0.1
	VaShCrn-3	149.06	<0.1

جدول ۲- غلظت برخی اکسیدهای عناصر اصلی برای محاسبه شاخص‌های دگرسانی ایشی‌کاوا (Ishikawa Index; AI) و کلریت - کربنات - پیریت (CCPI) در کانسار کوشک.

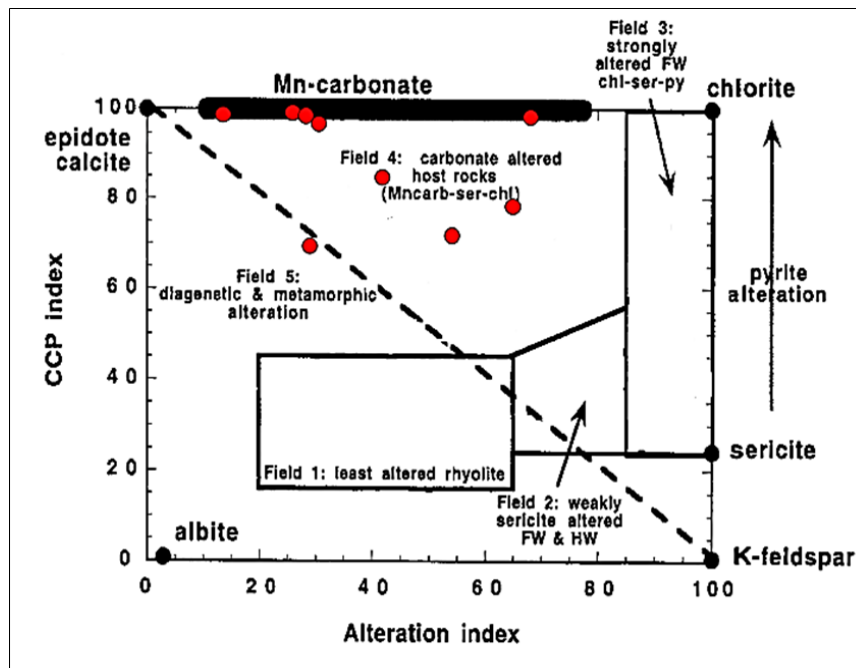
Table 2. Concentration of some major element oxides for calculation of Ishikawa (AI) and chlorite-carbonate-pyrite (CCPI) alteration indices in the Koushk deposit.

Sample	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	FeO ^{total}	FeO	Fe	AI	CCPI
KZS26	2.51	2.44	0.48	1.72	5.404	2.89	2.25	28.83	70.93
KNPR4	5.63	2.75	2.96	4.2	8.588	2.96	2.3	53.34	69.13
KZT27	3.79	3.01	0.07	9.25	6.864	3.07	2.39	41.32	83.95
KNKS2	2.47	2.42	0.07	3.95	4.875	2.40	1.87	64.34	77.99
KZD28	69.3	0.48	0.07	0.59	105.30 8	36.01	28	67.30	99.48
KSPS23	13.5	0.59	0.07	1.23	26.077	12.58	9.78	28.98	97.64
KSPD33	35.22	0.07	0.07	3.82	54.253	19.03	14.8	26.25	99.76
KSPD24-2	20.69	0.07	0.07	0.72	47.979	27.29	21.22	27.05	99.71
KSPS19	41.8	0.07	0.07	1	67.533	25.73	20.01	23.72	99.80



شکل ۱۳- کانی کوتنهوریت در زمینه ریولیت همراه با کانی‌های کلینوکلر و پیریت، نشانگر دگرسانی کلریت - کربنات - پیریت "CCP". علائم اختصاری: کوارتز (Qz)، آلبیت (Al)، مسکوویت (Ms) و ارتوکلاز (Or) در زمینه.

Fig. 13. Kutnohorite mineral in the rhyolite matrix with clinocllore and pyrite minerals, indicator of chlorite-carbonate-pyrite "CCP" alteration. Abbreviations: Quartz (Qz), albite (Al), muscovite (Ms) and orthoclase (Or) in the background.



شکل ۱۴- جعبه دگرسانی بر مبنای شاخص‌های ایشی کاوا (AI) و کلریت - کربنات - پیریت (CCPI)، در کانسار کوشک. براساس این نمودار داده‌های حاصل در زون کربنات‌های غنی از منگنز (کوتنهوریت) همراه با کانی‌های کلینوکلر، سریسیت و پیریت (محدوده شماره ۴) قرار می‌گیرد (Ishikawa et al., 1976; Large et al., 2001).

Fig. 14. Alteration box based on Ishikawa (AI) and chlorite-carbonate-pyrite (CCPI) indices in the Koushk deposit. According to this diagram, the data are located in the manganese-rich carbonate zone (kutnohorite) with clinochlore, sericite and pyrite minerals (Field No. 4). (Ishikawa et al., 1976; Large et al., 2001).

نتیجه‌گیری

۱. کانسار روی - سرب کوشک در ایران مرکزی را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از کانی‌های سولفیدی، اکسیدی، فسفاتی و کربناتی دانست.
۲. میزبان اصلی کانه زایی روی و سرب در کانسار کوشک واحد شیلی است اما بر اساس پژوهش حاضر کانه‌زایی در بخش‌هایی از واحد‌های دولومیتی هم-ارز سازند سلطانیه در این کانسار (سری ریزو)، نیز رخ داده است.
۳. سنگ‌های میزبان فرعی در کانسار کوشک شامل واحدهای دولومیت بالایی، دولومیت زیرین، شیل بالایی، شیل زیرین، ریولیت و توف هستند. لیتولوژی‌های فرعی سنگ میزبان در این کانسار نیز شامل آهک سازند عقدا، میکرودیوریت بخش زردو، جاسپیلیت‌ها در تماس با سری چشمه، توده نفوذی گابرویی در قسمت کمر بالای معدن، زون آبشوییده و رنگین در واحد شیل‌زیرین هستند.
۴. طی پژوهش حاضر برای نخستین بار در ایران، براساس بررسی‌های صحرایی و نمونه‌های دستی، مطالعات میکروسکوپی، تجزیه XRD، ICP-MS و تجزیه طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy) وجود گسترده کانی کوتنهوریت "Kutnohorite" در پهنوی شمالی و جنوبی کانسار کوشک بافق به اثبات رسید. کانی کوتنهوریت نوعی کربنات منگنز با فرمول شیمیایی $\text{CaMn}^{2+}(\text{CO}_3)_2$ از گروه دولومیت است. رگه‌های صورتی-رنگ کوتنهوریت در همراهی با کوارتز، در اکثر واحدهای سنگ‌چینه‌ای پهنوی شمالی و جنوبی کانسار کوشک، هم در بخش کانسنگ و هم در بخش سنگ‌میزبان مشاهده می‌شوند.
۵. در پهنوی شمالی کانسار کوشک مقادیر فراوانی از کانی‌های کلریت، سریسیت، کلینوکلر و پیریت‌های خودشکل همراه با کانی کوتنهوریت مشاهده می‌شود. بر این اساس، تعیین انواع دگرسانی‌های مرتبط با زون‌های کربنات منگنز با استفاده از شاخص‌های ایشی‌کاوا و کلریت - کربنات - پیریت (CCPI) نشان داد که کانی کوتنهوریت شاخص و کلید اکتشافی زون غنی از منگنز در ارتباط با ماده معدنی در ذخایر سولفید توده‌ای روی - سرب با میزبان شیل مانند کانسار کوشک است.

منابع

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103(8), 983-992.
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East: Tehran, Geological Survey of Iran scale 1: 5,000,000.
- Asadi, S., 2013. Geochemistry of selected productive and barren intrusions in Shahr Babak copper

- complex, Urumiyeh–Dokhtar volcano–magmatic belt. Ph.D. thesis, Shiraz, Iran, Shiraz University, 222 pp.
- Asadi, S., Rajabzadeh, M.A. 2014. Geochemistry, paragenesis, and wall-rock alteration of the Qatruyeh iron deposits, southwest of Iran: Implications for a hydrothermal-metasomatic genetic model. *Journal of Geological Research* 2014, 1-24.
- Forster, H., Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in central Iran; a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology* 89, 1697-1721.
- Frondel, C., Bauer, L., H., 1955. Kutnahorite: A manganese dolomite, $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$, *American Mineralogist* 40, 748-760.
- Gabrielson, O., Sundius, N., 1966. Calcian kutnahorite from Lingban. *Arkansas Mineralogy and Geology* 4, 287-289.
- Ghorbani, M., 2002. *The Economic Geology of Iran (Mineral Deposits and Natural Resources)*, Springer Dordrecht Heidelberg New York London.
- Haghipour, A., 1977. Geological map of the Biabanak-Bafq, area, 1: 500000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration haloes. *Mining Geology* 26, 105-117.
- Large, R.R., 2001. Lithogeochemical Halos: VHMS and SEDEX, Centre for Ore Deposit Research (CODES), University of Tasmania.
- Large, R.R., Allen, R.L., Blake, M.D., Herrmann, W., 2001. Hydrothermal Alteration and Volatile Element Halos for the Rosebery K Lens Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Western Tasmania. *Economic Geology* 96, 1055-1072.
- Large, R.R., Bull, S.W., Winefield, P.R., 2001. Carbon and oxygen isotope halo in carbonates related to the McArthur River (HYC) Zn-Pb-Ag deposit, north Australia: Implications for sedimentation, ore genesis, and mineral exploration. *Economic Geology* 96(7), 1567-1593.
- Large, R.R., Gemmill, J.B., Paulick, H., Huston, D.L., 2001. The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology* 96(5), 957-971.
- NISCO, 1980. Report on results of search and evaluation works at magnetic anomalies of the Bafq iron ore region during 1976-1979, 260p.
- Polgari, M., 2001. Contribution of volcanic material, a new aspect of the genesis of the black shale-hosted Jurassic Mn-carbonate ore formation, Úrkút Basin, Hungary. *Acta Geologica Hungarica* 44(4), 419-438
- Polgari, M., Bajnóczi, B., KovácsKis, V., Götze, J., Dobosi, G., Tóth, M., Vigh, T., 2007. Mineralogical and cathodoluminescence characteristics of Ca-rich kutnahorite from the Úrkút Mn-carbonate mineralization, Hungary. *Mineralogical Magazine* 71, 493-508.
- Ramezani, J., Tucker, R. D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science* 303(7), 622-665.
- Richard, P., Jiří, S., Vladimír, S., 2019. Ag-Pb-Sb Sulfosalts and Se-rich Mineralization of Anthony of Padua Mine near Poličany—Model Example of the Mineralization of Silver Lodes in the Historic Kutná Hora Ag-Pb Ore District, Czech Republic. *Minerals* 9, 430.
- Vaziri, H., Majidifard, M.R., Lafamme, M., 2018. Diverse Assemblage of Ediacaran fossils from Central Iran. *Nature* 7, 1-7.
- Zolfaghari, A., 2019. The potential of Precious Metals and Rare Earth Elements in Pb and Zn Kushk mine -Yazd, Central Iran. M.Sc Thesis, Department of Earth Sciences at Shiraz University, Shiraz.

