Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2026, Vol. 16(1): 219 - 245

Research Article

Geology, fluid intercalation studies and stable S and O isotopes in the Chah Alikhan copper-gold deposit of Ardestan, north of Isfahan

Hossein Masoumi[1], Hassan Zamanian[2]*

1- Geology Department, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2- Faculty of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

Keywords: *Geology, fluid intercalation, isotope, copper-gold mineralization, Alikhan chah*

1-Introduction

The study area is located 65 km northeast of Ardestan city (Isfahan province). This area is located at latitude '40 33° to '45 33° North and longitude '55 52° to '00 53° East. The host rocks of epithermal deposits associated with the subduction zone are formed in the tectonic setting of convergent margin magmatic arcs in both continental and oceanic environments (Du Bray 2014). The Urmia-Dokhtar magmatic zone is a volcanic zone located in the west and southwest of central Iran and north of the Sanandaj-Sirjan zone. This zone is more than 1700 km long and 100-150 km wide, parallel to the Zagros uplift zone (Alavi 1994). The Chah Alikhan deposit is also one of the important deposits of this zone, which has recently been exploited he exposed rock units in the Chah Alikhan mineral area include Upper Eocene volcanic and pyroclastic units with a combination of lithic-crystalline tuff and tuffite alternation with andesitic to dacite lavas (Eta), andesitic to basaltic andesite lava alternation (Eban), brown to purple lithic tuff (Ebtl), rhyodast and shear tuff lava alternation (Ertb), acid lithic tuff, ignimbrite and agglomerate alternation (Eltai), and basalt to pyroxene andesite lava (Eba) that are cut by subvolcanic intrusive masses of porphyry dacite (dap) and rhyodacite to dacite (rda) and related andesitic dykes (dan) of Oligocene age. Old alluvial deposits (Qt1), sedimentary and covered deposits (Qsc) and recent alluvial deposits (Qal) cover the older units.

2-Material and methods

After field observations, sampling of cores and different rock units in the Chah Alikhan mining area was carried out. For petrographic studies (37 sections) and mineralogy (95 sections), 28 samples were sent to the Zar-Azma laboratory for alteration studies using X-ray diffraction (XRD). For geochemical studies, 165 samples were taken and then analyzed in the Zar-Azma laboratory. The analysis method for all elements is AFMS (ICP-MS and Fire Assay). 10 double-polished sections were prepared from boreholes drilled on copper-gold-bearing siliceous veins. Studies related to fluid intermediates were carried out using the Linkam THMSG 600 device in the microthermometry laboratory of Tarbiat Modares University. For sulfur isotopic analysis, 9 samples of chalcopyrite and for measuring oxygen isotopic values, 12 samples of quartz were sent to the Stable Isotope Research Laboratory of Arak University. By petrographic studies on the host of gold-copper quartz veins in the study area, it was determined that the host rock of mineralization is mainly metatuff rocks with a combination of lithic tuff and basaltic andesite. These rocks are highly altered, with a porphyritic texture and a paste composed of glass and have been altered to a complex of phyllosilicate minerals (mica, chlorite, clay), silica and clay, and the paste is microgranular-microcrystalline rock. The results of X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that minerals such as alkali feldspar, plagioclase, chlorite, illite, kaolinite, hematite, mica group, and colliste are also present in small amounts in gold-copper veins. The types of mineral structure and texture in the Chah Alikhan deposit include pore filling and concentric bands of cobble-shaped, vein-veined, and scaffold textures. Based on textural, structural

* Corresponding author: hasanzamanian@ut.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.51230.2548
Received: 2025-11-23
Accepted: 2026-02-22

ISSN: 2717-0764
CC BY

evidence, field and laboratory studies, the paragenetic sequence of minerals was drawn. Field studies, petrographic studies, and XRD analysis show the presence of chlorite-epidote-carbonate alteration, argillic alteration, and argillic-silica alteration along with inclusions of iron oxides and hydroxides and a goosen zone. According to Spearman's results, the element gold has a positive correlation with copper (0.64), arsenic (0.65), lead (0.67), antimony (0.73) and bismuth (0.80) with a confidence level of 99%, and the element bismuth has the highest positive correlation with gold. In order to determine the physical and chemical properties of mineralizing fluids, microthermometry experiments were conducted on fluid inclusions present in quartz ore with gold mineralization. Ten double-polished sections were prepared (106 inclusions). The fluid inclusions studied were mainly of primary type and conformed to the criteria of (Roedder 1984). The most common type of fluid interstitial studied in the samples is liquid-gas two-phase. The dominance of gas interstitials, their association with liquid-rich two-phases, and the presence of gas-rich interstitials indicate that during the mineral replacement, the fluid was accompanied by pressure reduction and boiling. Such conditions are usually associated with the formation of quartz veins containing sulfide minerals and metal precipitation in epithermal systems. The study of stable isotopes is an important part of the study of deposits and plays a significant role in understanding their genesis (Ohmoto 1972, 1979; Rye 2005; Hoefs 2004; Calagari 2003). Since the most abundant sulfide mineral in the study area is chalcopyrite, 9 samples were selected to determine the origin of sulfur. And 12 quartz samples were analyzed for oxygen isotopes using the method of (McCrea 1950). Therefore, according to the obtained numbers, it can be said that the δ34S values in the sulfides present in the Alikhan well deposit range from 2.6 to 6.7 ‰ in chalcopyrite. Considering the volcanic nature of the Alikhan well host rock, the sulfur of the mineralizing fluids is similar to the volcanic fluids or magma-derived systems and is located in the magmatic range, and the effect of biological reduction processes in them is mainly weak. The δ18O value of quartz ranges from 7.2 to 16.5‰, and overall it confirms the magmatic origin of the mineralizing fluids and the limited role of meteoric waters.

3-Results and discussions

The Chah Alikhan deposit was formed in the form of mineralization of gold-copper veins along with structural controlling factors in the subduction zone of the Urmia-Dokhtar magmatic belt. Considering the type of host rock, alteration, mineralization, and the presence of high levels of spicularite, which indicates high oxygen fugacity in solution, and the amount of pyrite and chalcopyrite to a lesser extent in the gold-bearing silica veins, as well as the results of lithogeochemical studies of the veins and based on geological data and characteristics, the Chah Alikhan mineralization could be a type of epithermal gold-copper mineralization. Based on the comparison made between this deposit and epithermal types, the possibility of similarity between this The deposit has the aforementioned features. In fluid interlayer studies, considering the temperature and salinity range of the Alikhan well copper-gold veins, the density of the mineralizing fluid is between 0.7 and 1.0 gr/cm^3, and the most populous group of fluid interlayers studied is in the density range of 0.9 to 1.0 gr/cm^3, and this mineralization is formed at a depth of approximately less than one kilometer from the surface of the earth. Also, based on the temperature-salinity diagram of the mineralized fluid, the origin of the Alikhan well deposit is magmatic and has mixed with atmospheric waters of lower temperature and salinity. The homogenization temperature and salinity of the Alikhan well deposit in the salinity-temperature diagram and the presence of fluid interlayers of both two-phase and single-phase types in The studied samples can be indicative of fluid mixing and dilution phenomena accompanied by boiling and low salinity. The cooling phenomenon probably occurred due to mixing with atmospheric waters and reaction with wall rocks. Also, the examination of sulfur isotopic data in the chalcopyrite mineral of Alikhan well shows that $\delta^{34}S$ values vary between 2.6 and 6.7 ‰ (CDT). This range of variations is consistent with the typical values of mineralizations of magmatic origin (Hoefs 2004). Such conditions are usually observed in epithermal systems of low sulfide type. In general, the positive and limited agreement of $\delta^{34}S$ values with the range of +2 to +7‰ supports the role of magmatic fluids in supplying ore-forming sulfur and does not indicate the influence of reduced or sedimentary sulfur components in the system. Oxygen isotope results in quartz also show $\delta^{18}O$ values between 7.2 and 16.5‰ (VSMOW). This range is higher than the typical values of meteoric waters (−5 to +8‰) and is within the range of magmatic waters (+8 to +10‰) or slightly higher. Thus, the main origin of the ore-forming fluid

ISSN: 2717-0764
CC BY

can be considered magmatic (Hoefs 2009), although the possibility of limited mixing with meteoric waters in the final stages of ore deposition can also be proposed. Relatively large variations in $\delta^{18}O$ may also be due to the mixing of fluids of different origins or the isotopic interaction of the fluid with the host rock during cooling of the system.

4-Conclusion

In the Chah Alikhan deposit, the host rock of the studied veins is mostly lithic tuff to basaltic andesite. Primary minerals are pyrite, chalcopyrite, specularite, quartz and secondary minerals are goethite, limonite, malachite. The structure and texture of mineralization are vein-vein, blade, pore-filling, concentric band, cobble-shaped and comb-shaped. X-ray diffraction results show alkali feldspar, plagioclase, chlorite, illite, kaolinite, hematite and mica group minerals in the gold-copper siliceous veins. Alteration at the vein margins is mainly siliceous, argillic and iron oxide. According to the geochemical results, the maximum gold element is 18.25 g/t, copper is 4.94% and iron is 3.56%. The results of fluid interlayer studies show a temperature of 117 to 470 degrees Celsius and a salinity of 4.18 to 20.45. The origin of the deposit is magmatic and has mixed with atmospheric waters of lower temperature and salinity. The results of sulfur and oxygen isotopes also confirm its magmatic origin, considering the volcanic nature of the host rocks of the Alikhan chah. Therefore, according to a set of studies conducted from surface geological data and studies of boreholes and trenches, including petrography, mineralization and alteration, geochemistry, fluid interlayer and the results of stable oxygen and sulfur isotopes, and the comparison of field studies and evidence, the mineralization event of the gold-copper quartz veins studied in the Alikhan well can probably be attributed to a hydrothermal mineralization that is more similar to the type of epithermal mineralization, and accurate proof of this issue requires more detailed and in-depth data.

5-References

Alavi, Mehdi. 1994. 'Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations', Tectonophysics, 229: 211-38. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-

Calagari, Ali Asghar. 2003. 'Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic–phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaidjan, Iran', Journal of Asian Earth Sciences, 21: 767-80. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00083-4

Du Bray, Edward A. 2014. "Geochemical and modal data for igneous rocks associated with epithermal mineral deposits." In.: US Geological Survey. http://minerals.cr.usgs.gov/

McCrea, John Morden. 195' .·On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale', The Journal of Chemical Physics, 18: 849-57.

Ohmoto, H., 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67(5), 551–581. https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.67.5.551

Roedder, Edwin. 1984. 'Volume 12: fluid inclusions', Rev. Mineral, 12: 644.https://doi.org/10.1515/9781501508271

Hoefs, J., 2004. Stable isotope geochemistry. Spinger-Verlag, Berlin, 244. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70708-0

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Masoumi, H., Zamanian, H,. 2026. Geology, fluid intercalation studies and stable S and O isotopes in the Chah Alikhan copper-gold deposit of Ardestan, north of Isfahan. Adv. Appl. Geol. 16 (1), 219-245.
DOI: 10.22055/aag.2026.51230.2548
https://aag.scu.ac.ir/article_20578.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

زمین‌شناسی، مطالعات میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار S و O در کانسار مس ـ طلا چاه‌علیخان اردستان، شمال اصفهان

حسین معصومی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

حسن زمانیان
دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
hasanzamanian@ut.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

چکیده

کانسار چاه‌علیخان بر روی کمان ماگمایی ارومیه-دختر و در بخش ایران مرکزی واقع است. کانی‌سازی رگه‌ایی در داخل زون‌های سیلیسی-اسپیکولاریتی و برش گرمابی با سیمان سیلیس، هماتیت و گوتیت با سنگ میزبان لیتیک توف تا آندزیت بازالت به سن ائوسن تشکیل شده مهمترین هاله‌های دگرسانی به ترتیب رخداد شامل؛ کلریت-اپیدوت-کربنات، آرژیلیک و آرژیلیک-سیلیسی همراه با آغشتگی به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و زون گوسان می‌باشد. کانه‌های اولیه سولفیدی پیریت، کالکوپیریت ریزدانه و اکسیدی اسپکولاریت و کانی‌های ثانویه گوتیت، لیمونیت، مالاکیت و کوارتز در بررسی‌های میکروسکوپی و صحرایی شناسایی شده‌اند. در مطالعات کانی‌شناسی (XRD) کانی‌های کلریت، ایلیت، کائولینیت، هماتیت، کوارتز، گروه میکا و کلسیت در رگه‌های سیلیسی طلادار شناسایی شدند. با توجه به مطالعات لیتوژئوشیمیایی، عنصر طلا با عناصر بیسموت، آنتیموان، آرسنیک، مولیبدن، مس و سرب دارای همبستگی مثبت است. مطالعات میان بارهای سیال (۱۰۶ میانبار سیال) در مناطق کانه‌دار چاه‌علیخان، دمای کانی‌سازی را ۱۱۷ تا ۴۷۰ درجه سانتی گراد و میزان شوری کانسار را ۴/۱۸ تا ۲۰/۴۵ درصد وزنی معادل نمک طعام نشان داده است. کانی‌سازی در محدوده چاه‌علیخان عمدتاً به صورت رگه‌ای و مرتبط با زون‌های گسله است. مقادیر δ34S در گستره ‰ ۲.۶ تا ۶.۷ و δ18O از ‰ ۷.۲ تا ۱۶.۵ سیال گرمابی، نیز منشاء ماگمایی سیالات کانه‌ساز را تأیید می‌کنند. در مجموع با توجه به مطالعات صورت گرفته در این ناحیه، کانه‌زایی چاه‌علیخان را می‌توان احتمالا نوعی کانی‌زایی اپی‌ترمال سولفید پایین مس – طلا دانست.

واژه‌های کلیدی: *زمین‌شناسی، میانبار سیال، ایزوتوپ، کانه‌زایی مس-طلا، چاه‌علیخان*

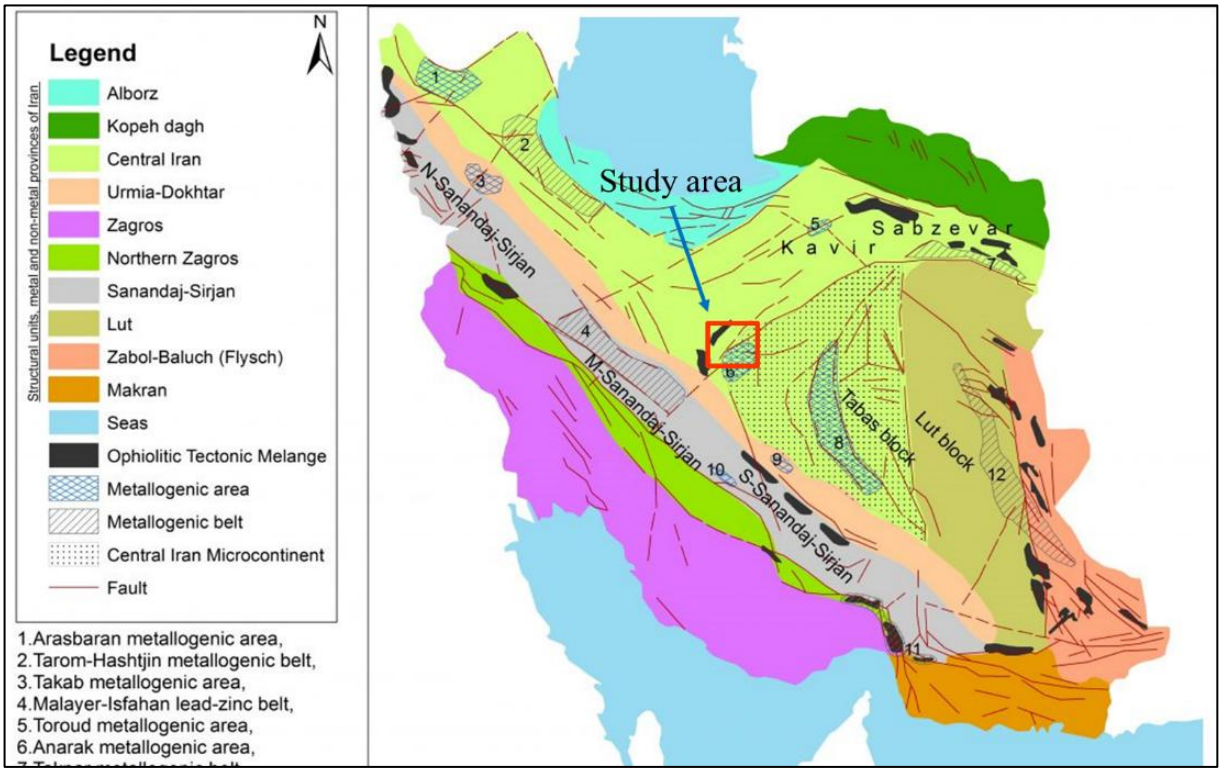
۱- مقدمه

محدوده مورد مطالعه در فاصله ۶۵ کیلومتری شمال خاوری شهر اردستان (استان اصفهان) واقع شده است. این محدوده در عرض جغرافیایی ′۴۰ °۳۳ تا ′۴۵ °۳۳ شمالی و طول جغرافیایی ′۵۵ °۵۲ تا ′۰۰ °۵۳ شرقی قرار دارد. سنگهای میزبان کانسارهای اپی‌ترمال مرتبط با زون فرو رانش در موقعیت تکتونیکی قوس‌های ماگمایی حاشیه همگرا در هر دو محیط قاره‌ای و اقیانوسی تشکیل می‌شوند (Du Bray, 2014) کانسارهای پورفیری، عناصر پایه و طلای اپی‌ترمال در ایران در کمربند ماگمایی ارومیه دختر و البرز رخ داده است (Zarasvandi et al., 2015) کانسارهای پورفیری شامل سونگون (Calagari, 2003)، دالی (Zarasvandi et al., 2015)، علی‌آباد (Zarasvandi et al., 2005)، سرچشمه (AftabiandAtapour, 2011)، میدوک (Taghipour et al., 2008)، شادان (Karimpour, 2014) و کانسارهای اپی ترمال شامل منطقه ارسباران، مسجد داغی، شرف آباد، زگلیگ، صفی خانلو، (Ebrahimi et al., 2011)، ساری گونی (Richardst et al., 2006)، گندی-ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004)، ارغش (Ashrafpouret et al., 2012)، چاه زرد (Kouhestani et al., 2015)، چاه نعلی (Sholeh et al.,

2016)، زرشوران (Asadi et al., 2000) و گلیجه (Mehrabi et al., 2016) می‌شوند. پهنهٔ ماگمایی ارومیه-دختر به صورت یک پهنه آتشفشانی در باختر و جنوب باختری ایران مرکزی و در شمال پهنهٔ سنندج‌سیرجان جای دارد. این پهنه به طول بیش از ۱۷۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۵۰-۱۰۰ کیلومتر، موازی منطقهٔ روراندهٔ زاگرس گسترش یافته است (Alavi, 1994) کانسار چاه‌علیخان نیز یکی از کانسارهای مهم این پهنه می‌باشد که به تازگی به بهره‌برداری رسیده است. با توجه به اینکه پیش از این مطالعه جامع و کاملی بر روی محدوده معدنی چاه‌علیخان صورت نگرفته است بر این اساس هدف اصلی این مطالعه بازسازی ویژگی‌های PTVX تشکیل کانسنگ به منظور دستیابی به روند تکامل سیال گرمابی موثر در تشکیل این کانسار است.

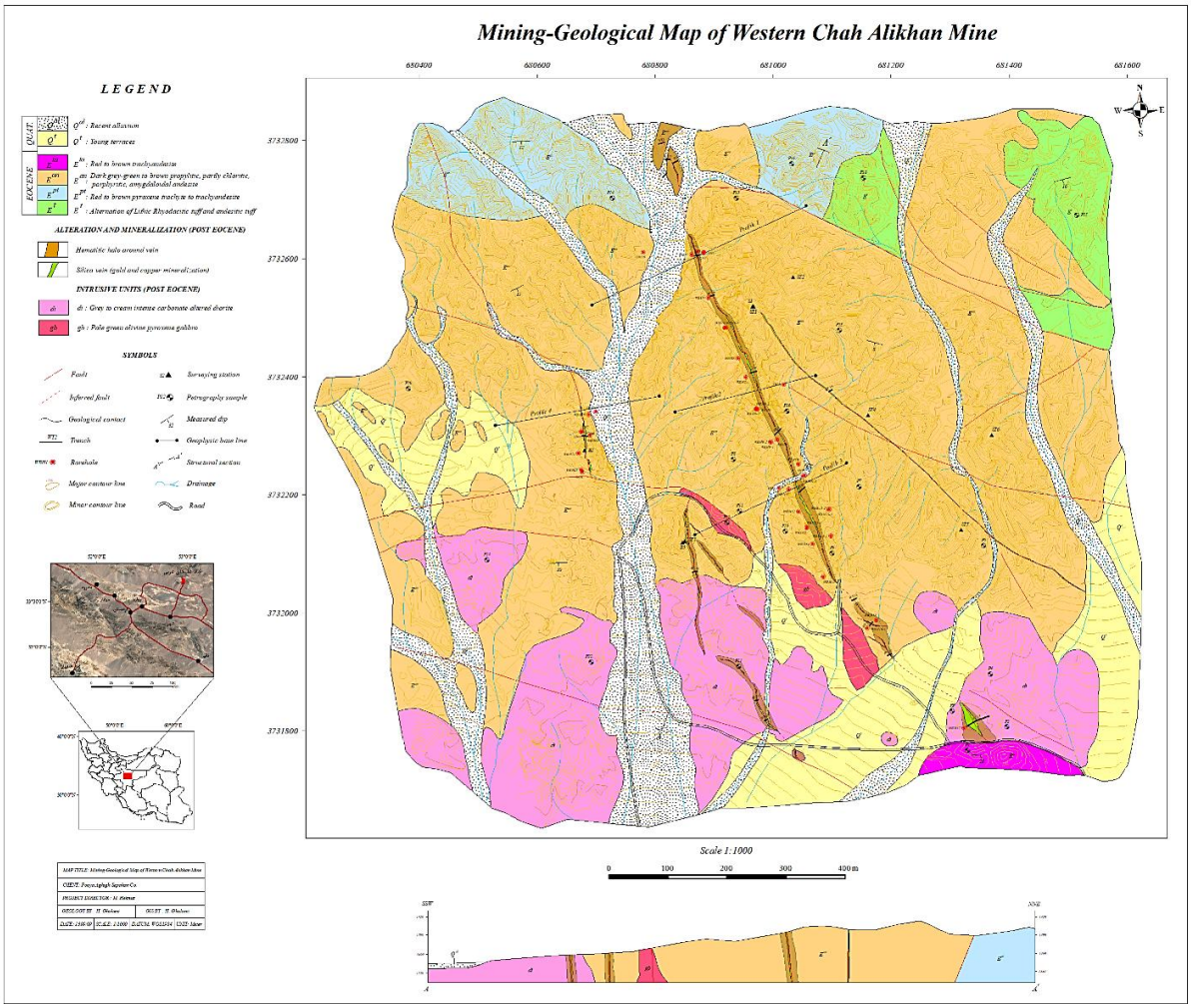
۲- زمین‌شناسی منطقه

از نظر زمین‌شناسی ساختاری، این منطقه در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کوه دم و بر روی نوار ماگمایی ارومیه-دختر قرار گرفته است (شکل ۱) در این ورقه، واحدهای سنگی به ترتیب از قدیمی‌ترین تا جوان‌ترین واحد از کرتاسه زیرین، کرتاسه فوقانی، پالئوسن-ائوسن، ائوسن، ائوسن زیرین، ائوسن میانی-فوقانی (سازند سهلاب)، ائوسن فوقانی، الیگوسن-میوسن، پلیئوسن و کواترنر می‌باشد. واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده معدنی چاه‌علیخان شامل واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن فوقانی با ترکیب تناوب لیتیک‌کریستال توف و توفیت با گدازه‌های آندزیتی تا داسیتی (Eta)، تناوب گدازه آندزیتی تا آندزیت بازالتی (Eban)، لیتیک توف قهوه‌ای تا بنفش رنگ (Ebtl)، تناوب گدازه ریوداست و توف برش (Ertb)، تناوب لیتک توف اسیدی، ایگنمبریت و آگلومرا (Eltai) و گدازه بازالت تا پیروکسن آندزیت (Eba) است که توسط توده‌های نفوذی ساب‌ولکانیک داسیت پورفیری (dap) و ریوداسیت تا داسیت (rda) و دایک‌های آندزیتی وابسته (dan) به سن الیگوسن قطع شده‌اند. نهشته‌های آبرفتی قدیمی (Qt1)، نهشته‌های واریزه‌ای و پوشیده (Qsc) و آبرفت‌های عهد حاضر (Qal) واحدهای قدیمی‌تر را می‌پوشانند (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت محدوده چاه‌علیخان در زون ایران مرکزی بر روی نقشه زونهای ساختاری (آقانباتی، ۱۳۸۵).

Fig. 1. Chah Alikhan area location within the Central Iran Zone on the structural zoning map of Iran (Aghanabati, 2006).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کانسار چاه‌علیخان (با تغییرات از شارکووسکی و همکاران، ۱۹۸۱)، مقیاس ۱:۱۰۰۰.

Fig. 2. Geological map of the Chah Alikhan ore deposit (modified from Sharkovski et al., 1981), scale 1:1000.

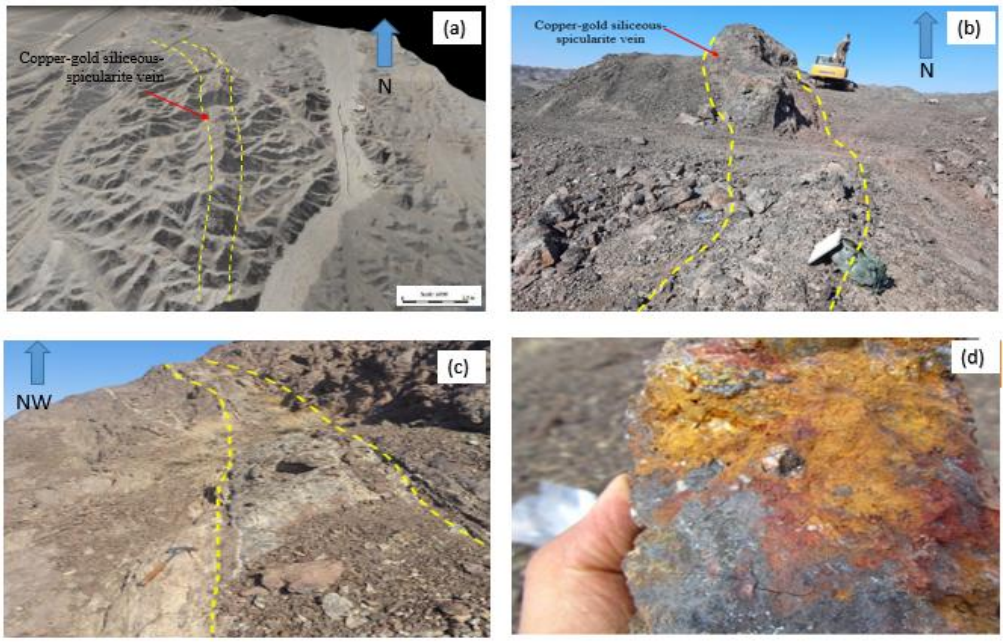
۳- روش مطالعه

پس از مشاهدات صحرایی، نمونه برداری از مغزه‌ها و واحدهای سنگی مختلف در محدوده‌ی معدنی چاه‌علیخان انجام شد. جهت انجام مطالعات سنگ نگاری (۳۷ مقطع) و کانه نگاری (۹۵ مقطع) تهیه شده است به منظور مطالعات دگرسانی نیز تعداد ۲۸ نمونه به روش پرتو پراش ایکس (XRD) به آزمایشگاه زرآزما ارسال شد. به منظور ارزیابی پراکندگی عناصر و تعیین الگوهای هاله‌های دگرسانی ژئوشیمیایی در محدوده مورد مطالعه، عملیات نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی به‌صورت غیر سیستماتیک در مقیاس ۱:۱۰۰۰ انجام شد. در مجموع ۱۶۵ نمونه سنگی از واحدهای میزبان، رگه‌ها و مناطق پیرامونی برداشت شد. فاصله نمونه‌برداری با توجه به تغییرات لیتولوژی و شدت دگرسانی متغیر بوده و در نواحی دارای پتانسیل بالاتر، تراکم نمونه‌برداری افزایش یافته است. نمونه‌ها عمدتاً از سنگ‌های تازه تا نیمه تغییریافته برداشت شده‌اند تا اثرات هوازدگی حداقل شود. تمامی نمونه‌ها با ثبت دقیق مختصات با GPS و تعیین موقعیت ساختاری برداشت شده و پس از آماده‌سازی، در آزمایشگاه زرآزما مورد تجزیه قرار گرفت روش تجزیه برای تمامی عناصر AFMS (ICP-MS) و Fire Assay است. پردازش داده‌ها در نرم افزارهای SPSS و Excel صورت پذیرفته همچنین تعداد ۱۰ مقطع دوبر صیقل از گمانه‌های حفر شده بر روی رگه‌های سیلیسی مس-طلادار تهیه شده، مطالعات مربوط به میانبارهای سیال توسط دستگاه Linkam THMSG 600 در آزمایشگاه ریزدماسنجی دانشگاه تربیت مدرس انجام

گرفت. جهت آنالیز ایزوتوپی گوگرد ۹ نمونه از کالکوپیریت و برای اندازه‌گیری مقادیر ایزوتوپی اکسیژن ۱۲ نمونه از کوارتز به آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ پایدار دانشگاه اراک، ارسال گردید.

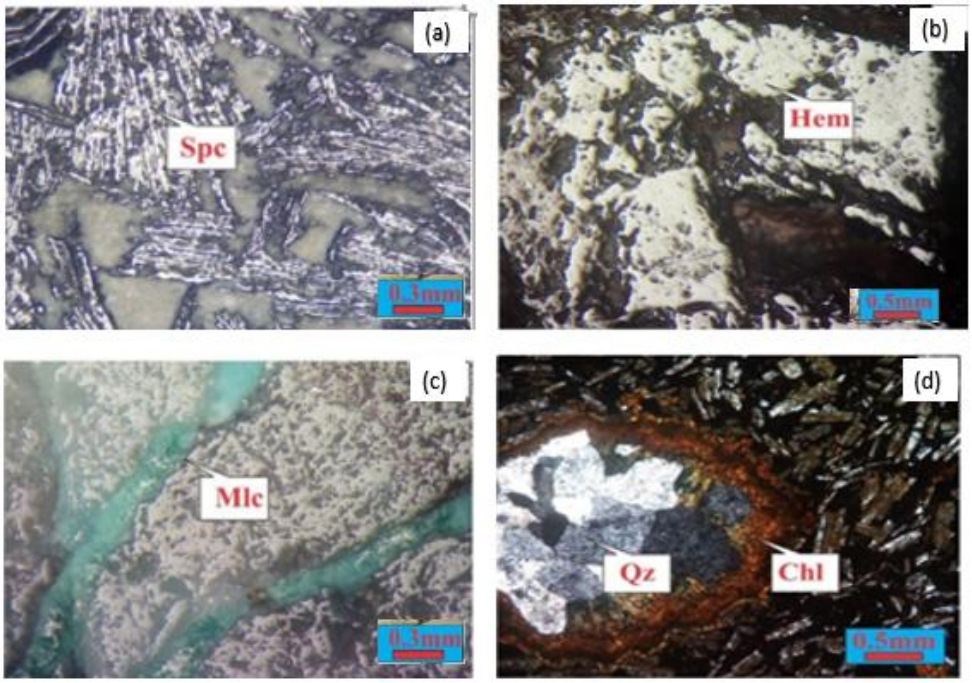
۴- ژئومتری، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی رگه‌های سیلیسی طلا-مس

کانی‌سازی در کانسار چاه‌علیخان در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. کانه‌زایی در دو رگه اصلی A1 (محدوده غربی) و A2 (محدوده شرقی) رخ داده است رگه‌های فرعی نیز با روند و به تبعیت از این دو رگه اصلی در این منطقه دیده می‌شود، رگه A1 به پهنای متوسط ۴ متر با روند N130E و شیب 85NE که در امتداد یک گسل امتدادلغز چپگرد با مؤلفه امتدادی تشکیل شده است. (شکل-a۳) این رگه عمدتا از کوارتز-اسپیکولاریت تشکیل شده (شکل-b۳) و طول تقریبی آن نیز یک کیلومتر می‌باشد. رگه اصلی A2 نیز با روند NW-SE به وسیله رگه و رگچه‌های کوارتزی همراه با اکسیدهای آهن و نیز حاوی کانی‌زایی مس (مالاکیت و کالکوپیریت) قطع شده است (شکل-c۳) با بررسی‌های سنگ‌نگاری بر روی میزبان رگه‌های کوارتزی مس-طلا در ناحیه مورد مطالعه، مشخص گردید که سنگ میزبان کانی‌سازی عمدتا سنگ‌های متاتوف با ترکیب لیتیک توف و آندزیت بازالتی می‌باشند. این سنگ‌ها به شدت دگرسان شده، با بافت پورفیریتیک و خمیره تشکیل شده از شیشه بوده و به مجموعه کانی‌های فیلوسیلیکاته (میکا، کلریت، رس)، سیلیس و رس دگرسان شده اند و خمیره سنگ میکروگرانولار میکروکریستالی می‌باشد. کانی‌های مافیک شامل قالب‌هایی از کانی آهن و منیزیم‌دار هستند که با اکسید آهن و کانی‌های فیلوسیلیکاته جایگزین شده‌اند. پیریت به صورت افشان و یا در امتداد رگه‌ها و اکسیده و هماتیتی شده به صورت خوشه‌ای یا مکعبی و اکسیدهای آهن فراوان، لیمونیت دیده می‌شود بر اساس مطالعات صحرایی، کانه‌نگاری، مجموعه کانیایی زون اکسیده شامل اکسید و هیدروکسیدهای آهن‌دار (هماتیت نوع اسپیکولاریت، گوتیت، لیمونیت) می‌باشند (شکل-d۳) اسپیکولاریت فراوان‌ترین کانی اکسیدی در منطقه چاه‌علیخان است و در مقطع میکروسکوپی به صورت تیغه‌ای، رگچه‌ای و به صورت بافت پرکننده حفرات بوده (شکل-a۴) و هیدروکسیدهای آب دار آهن (گوتیت) در نمونه دستی با جلای تیره و به صورت رگه ـ رگچه‌ای و در مقطع میکروسکوپی با بافت‌های نواری متحدالمرکز و قلوه‌ای شکل و یا به صورت بافت پر کننده حفرات مشاهده می‌شوند بخش‌های عمده باطله و کانی‌های غیر فلزی با لیمونیت آغشته شده‌اند کانه‌های سولفیدی پیریت با ابعاد کمتر از ۶۰ میکرون، به شکل خودشکل و پراکنده ریزدانه نیمه شکل‌دار و بعضی از آنها توسط هیدروکسیدهای آهن جانشین شده اند (شکل-b۴) بلورهای نیمه شکل‌دار کالکوپیریت با ابعاد کمتر از ۵۰ میکرون مشاهده می‌شوند که داخل کوارتز به تله افتاده و تحت دگرسانی سوپرژن قرار نگرفته‌اند کانی مالاکیت، تنها کانی ثانویه مس دار است که تحت تأثیر دگرسانی کالکوپیریت تشکیل شده است و در نمونه دستی به رنگ سبز و در مقاطع میکروسکوپی به صورت بافت‌های قلوه‌ای شکل متحدالمرکز یا بافت پرکننده حفرات در فضای بین بلورهای باطله و غیرفلزی و به صورت رگه-رگچه‌ای قابل مشاهده می باشد (شکل-c۴) کانی‌های باطله کلیست و کوارتز هستند که کوارتز فراوان‌ترین کانی سیلیکاته باطله در محدوده به شمار می‌رود و در نمونه دستی و میکروسکوپی به صورت رگه‌ای، شکافه پرکن و شانه‌ای مشاهده می‌شود (شکل-d۴) افزون بر کانی‌های یاد شده، در بررسی نتایج حاصل از تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) مشخص گردید که کانی‌هایی مانند آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کلریت، ایلیت، کائولینیت، هماتیت، گروه میکا و کلیست به مقدار کم نیز در رگه‌های مس-طلادار حضور دارند انواع ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار چاه‌علیخان شامل پرکننده حفرات و نوارهای متحدالمرکزی از بافت‌های قلوه‌ای شکل، رگه-رگچه‌ای و داربستی می‌باشند (شکل ۵). کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، اسپیکولاریت کانی‌سازی اولیه در محدوده هستند که تحت تأثیر اکسیداسیون سطحی به اکسیدها و هیدروکسیدهای ثانویه آهن از جمله گوتیت، هماتیت، لیمونیت و کربنات ثانویه مس (مالاکیت) تبدیل شده‌اند. از دیگر کانی‌های ثانویه می توان به کانی‌های رسی (ایلیت، کائولینت) و کلیست اشاره کرد. کوارتز هم به صورت اولیه و هم ثانویه در نمونه‌ها دیده شده است. با توجه به شواهد بافتی، ساختی، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، توالی پاراژنتیکی کانی‌ها ترسیم گردید (شکل۶).



شکل ۳. تصاویر صحرایی: (a) تصویر سه‌بعدی رگه A1 ، (b) رگه سیلیسی-اسپیکولاریتی مس-طلا، (c) رگه A2 ، (d) مجموعه کانیایی زون اکسیده در نمونه دستی.

Fig. 3. Field photographs: (a) 3D image of vein A1, (b) silicified-specularite Cu-Au vein, (c) vein A2, (d) mineral assemblage of oxidized zone in hand specimen.



شکل ۴ (a) بلورهای سوزنی شکل اسپیکولاریت در گانگ سیلیسی، (b) جانشینی هماتیت به‌جای پیریت، (c) مالاکیت به‌صورت رگچه‌ای، (d) بافت شکافه‌پرکن کوارتز. اختصارات: Spc، اسپیکولاریت. QHem، هماتیت. Mlc، مالاکیت. Qz، کوارتز. Chl ، کلریت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 4. (a) Needle-like specularite crystals in silicified gangue. (b) Hematite replacement of pyrite (c) Malachite occurring as small veins. (d) Quartz vein-fill texture. Abbreviations: Spc, specularite. Hem, hematite. Mlc, malachite. Qz, quartz. Chl, chlorite. (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۵- تصاویر نمونه دستی ساخت و بافت‌های کوارتز قشری و نواری حاوی کانه‌زائی مس-طلا همراه با اسپیکولاریت.

Fig. 5. Hand specimen photographs illustrating crustiform and banded quartz textures hosting Cu–Au mineralization associated with specularite.

۵- دگرسانی

مطالعات صحرایی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و تجزیه XRD وجود دگرسانی‌های کلریت-اپیدوت-کربنات، دگرسانی آرژیلیک و دگرسانی آرژیلیک-سیلیسی همراه با آغشتگی به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و زون گوسان را به ترتیب رخداد نشان می‌دهد. بنظر می‌رسد که فرآیندهای دگرسانی در این کانسار، از دو منشاء مختلف می‌باشند. بخشی از آنها تحت تأثیر عملکرد سیالات گرمابی عمقی (هیپوژن) و در ارتباط با توده‌های نفوذی می‌باشد. بخشی دیگر نیز در اثر عملکرد سیالات جوی و سطحی به صورت سوپرژن ایجاد شده‌اند. در بخش‌هایی نیز هاله‌های دگرسانی اولیه تحت تأثیر عملکرد سیالات جوی قرار گرفته و هاله‌های دگرسانی ثانویه و سوپرژن مانند آرژیلیک و اکسید آهنی بر روی آنها جانشین شده‌اند. دگرسانی کلریت-اپیدوت-کربنات از نظر سن نسبی به عنوان قدیمی‌ترین هاله دگرسانی در نظر گرفته شده است. این فرآیند دگرسانی بصورت زمینه در تمام واحدهای سنگی از گسترش وسیعی در کانسار چاه‌علیخان برخوردار بوده و در حدود ۶۰ درصد از سطح محدوده را پوشش می‌دهد. با توجه به حضور کانی‌هایی از قبیل اپیدوت، کلریت، ترمولیت-اکتینولیت به نظر می‌رسد دگرسانی پروپلیتیک تقریباً به طور همزمان با سردشدن واحدهای آتشفشانی-آذرآواری مافیک تشکیل شده است. دگرسانی آرژیلیک شامل ترکیبی از کانی‌های رسی است که مهم‌ترین آنها ایلیت و کائولینیت هستند و در واحد سنگی متاتوف ریوداسیتی گسترش دارند و در حاشیه رگه‌ها دیده می‌شوند مهمترین و بارزترین دگرسانی هیدروترمال در کانسار چاه‌علیخان، دگرسانی سیلیسی است دگرسانی سیلیسی در گستره وسیعی از دما رخ می‌دهد (Lagat, 2009) رخداد در بیشتر محدوده به شکل رگه-رگچه‌ای و به صورت انتشاری است که به صورت ذرات ریز در متن سنگ‌ها و به سمت مرکز رگه‌ها افزایش پیدا می‌کند دگرسانی اکسیدهای آهنی به صورت رگچه‌های اکسید و هیدروکسیدهای آهن همراه با رگه‌های محدوده دیده می‌شوند براساس نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس (جدول۱) دگرسانی‌های فیلیک±آرژیلیک، آرژیلیک±فیلیک و فیلیک، کانه‌زایی مس-طلا را همراهی می‌نمایند.

۶- لیتوژئوشیمیایی

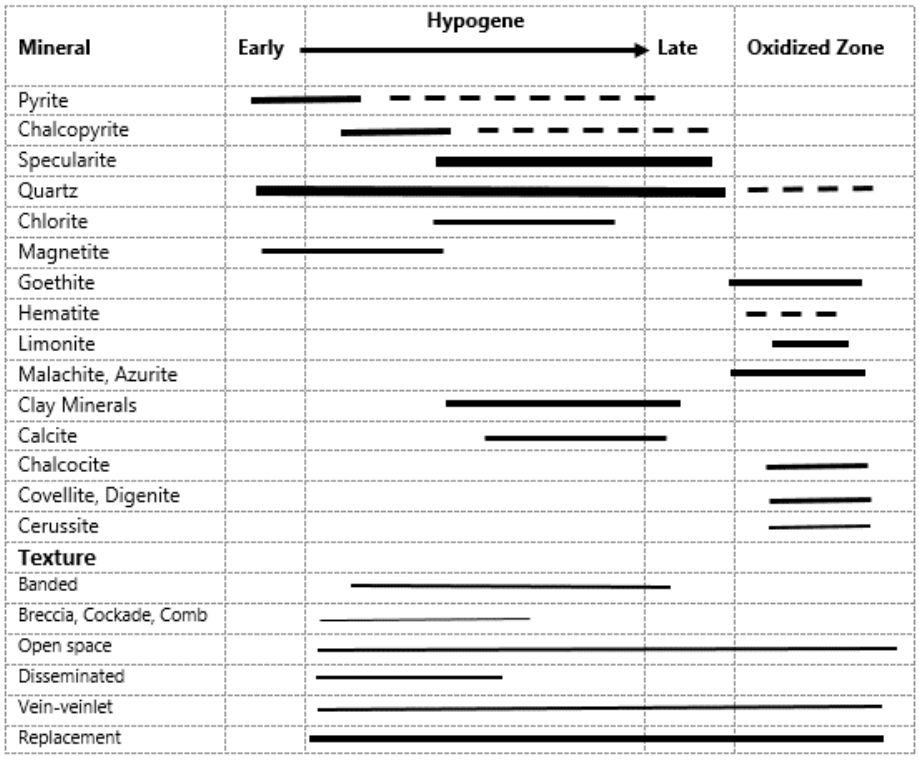
تعداد ۱۶۵ نمونه از واحدهای سنگی مستعد کانی‌سازی انتخاب و در آزمایشگاه زرآزما مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول ۲) پس از انجام تصحیحات لازم بر روی داده‌ها، هیستوگرام توزیع فراوانی عناصر مربوطه رسم شد که برخی عناصر دارای توزیع لاگ نرمال و برخی دیگر به روش لگاریتم، بهنجار شدند برای تعیین ارتباط پاراژنتیکی بین عناصر از ضریب همبستگی اسپیرمن (برای داده‌های خام)، پیرسون (برای داده‌های نرمال)، تحلیل فاکتوری و خوشه‌ای با استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شد و نقشه‌های بی‌هنجاری عناصر با استفاده از نرم افزار Arc GIS رسم گردید براساس نتایج اسپیرمن عنصر طلا با مس (۰.۶۴)، آرسنیک (۰.۶۵)، سرب (۰.۶۷)، آنتیموان (۰.۷۳) و بیسموت (۰.۸۰) سطح اعتماد بالای ۹۹ درصد دارای همبستگی مثبت است و عنصر بیسموت بیشترین همبستگی مثبت را با طلا دارد براساس تحلیل‌های چند متغیره به روش فاکتوری، داده‌های ژئوشیمیایی منطقه به ۷ عامل فاکتوری تقسیم‌بندی شده است فاکتور ۱ عناصر کمیاب و کانساری مانند طلا، مس، مولیبدن، تیتانیوم، وانادیوم و آرسنیک در مؤلفه اول و اصلی قرار می‌گیرند (جدول ۳).

جدول ۱- نتایج مطالعات کانی‌شناسی به روش XRD بر روی نمونه‌های برداشت شده از محدوده چاه علیخان.

Table 1. Results of mineralogical studies by XRD method on samples collected from the Chah Alikhan area

Sample No.	Alteration	Major phase	Minor phase	Trace phase
CHA-18D	Silicification	Quartz	Hematite, Goethite, atacamite, and malachite	Calcite
CHA-21D	Silicification, argillic	Quartz, albite, potassium feldspar	----	Jarosite, clay minerals
CHA-24D	Argillic, propylitic	Quartz, Albite, hematite,	Potasium feldspar, calcite, chlorite	---
CHA-27D	Chlorite-epidote	Anorthite, augite	Epidote	---
CHA-41D	Chlorite-epidote	Anorthite, potassium feldspar, augite, chlorite	Hematite	Vermiculite, calcite
CHA-42D	Propylitic, argillic	Quartz, albite	Goethite, semectite group, gypsum, potassium feldspar	---
CHA-60D	Propylitic	Albite, pidote, Calcite	Potassium feldspar	Hlorite
CHA-61D	Silicification	Quartz	Paratacamite, potassium feldspar, chlorite, hematite	----
CHA-88D	Silicification, argillic	potassium feldspar, hematite, quartz	Semectite group	----
CHA-110D	Propylitic	quartz, albite, potassium feldspa	Calcite	----
CHA-115D	Propylitic, argillic	Calcite, quartz, chlorite	Muscovite-illite, hematite	Potassium feldspar
CHA-122D	Propylitic	Calcite, quartz, albite, chlorite	Potassium feldspar, hematite	----
CHA-127D	Propylitic	Quartz, albite, Potasium feldspar	Calcite	Amphibole group
CHA-138D	Silicification	Quartz	Calcite, hematite	-----
CHA-163D	Chlorite-epidote-carbonate	Quartz, potassium feldspar, chlorite, hematite	Albite, goethite, siderite	----
CHA-166D	Propylitic	Quartz, hematite	Potassium feldspar, chlorite, calcite, goethite	-----
CHA-186D	Propylitic	Anorthite, augite, chlorite, hematite	Potassium feldspar	----
CHA-187D	Propylitic	Fluorite	Galena, quartz, calcite	----

Sample No.	Alteration	Major phase	Minor phase	Trace phase
CHA-196D	Propylitic	Quartz, potassium feldspar	Hematite	----
CHA-203D	Propylitic	Quartz, potassium feldspar	Albite	----
CHA-209D	Silicificaton	Quartz, hematite	goethite, calcite	----
CHA-212D	Silicification-argillic	Quartz, potassium feldspar, albite	Muscovite-illite, hematite	Gypsum
CHA-221D	Propylitic	Quartz, potassium feldspar, albite	Hematie	----
CHA-225D	Silicification	Quartz, potassium feldspar, albite	----	----
CHA-244D	Silicification-argillic	Quartz, albite, hematite	Potassium feldspar, goethite, smectite group	----
CHA-249D	Propylitic	Albite, hematite, chlorite, quartz	Potassium feldspar	Goethite
CHA-256D	Propylitic	Quartz, hematite	Calcite, albite	----
CHA-258D	Propylitic	Albite, quartz, chlorite	Hematite, calcite, potassium feldspar	----



شکل ۶- توالی پاراژنزی محدوده معدنی چاه‌علیخان.

Fig. 6. Paragenetic sequence of the Chah Alikhan mineralized area.

جدول ۲- نتایج تجزیه‌های ICP-MS عناصر مختلف و عنصر طلا با استفاده از Fire Assay

Table 2. Results of ICP-MS analysis for various elements and gold element determined by Fire Assay

Element	Ag (ppm)	As (ppm)	Au (ppb)	Bi (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Pb (ppm)	S (ppm)	W (ppm)	Zn (ppm)
CHA-2I	2.2	133.33	353	13.7	3109	13333	232	0.375	87	640	27.2	30
CHA-4I	6.2	133.33	923	503	613	93688	145	6.2	888	369	89	20
CHA-5I	3.4	133.33	4669	366	1142	86799	101	10.6	565	1368	70.2	17
CHA-6I	3.5	133.33	451	269.9	301	83333	76	9.5	478	862	48.4	30
CHA-8I	0.4	133.33	58	65.2	2429	13333	229	69	656	1868	39.5	54
CHA-T-11	2.1	133.33	314	50	1075	13333	639	38.5	1070	918	105.3	58
CHA-14I	1.2	51.1	12	470.6	4653	13333	309	6.3	286	37.5	244.4	38
CHA-15I	0.3	133.33	27	301.1	797	13333	319	45.7	194	1812	118.1	42
CHA-19I	1.3	133.33	423	271.1	24334	72313	114	26.2	1570	448	70.4	13
CHA-20I	1.6	133.33	819	55.9	8377	13333	690	15.5	1519	1710	57.6	58
CHA-23I	0.7	133.33	5	34.5	2063	13333	199	10.2	461	3475	106	38
CHA-25I	0.5	133.33	12	21.2	710	13333	245	9	224	449	47.7	42
CHA-26I	1.7	71.1	16	362.1	612	13333	85	6.7	757	484	144.8	13
CHA-28I	0.8	65.3	405	3.8	59	13333	2534	2.2	253	153	18.6	158
CHA-29I	1	133.33	361	5.2	394	13333	2729	1.1	80	37.5	8.9	346
CHA-30I	1.2	9.8	353	0.5	80	75259	2564	0.375	12	143	4.3	141
CHA-32I	2.8	133.33	923	366.1	2176	13333	156	18.1	851	1172	72.5	11
CHA-33I	1	58.2	4669	2.7	18	48600	1958	0.375	42	259	8.4	103
CHA-35I	0.2	10.6	451	0.7	10	15949	2396	0.375	13	37.5	8.6	29
CHA-40I	0.2	9	58	0.2	19	15696	474	0.375	<1	2220	6.3	20
CHA-46I	6.4	133.33	314	736.4	1514	13333	117	5.4	931	332	76.7	11
CHA-49I	0.4	133.33	12	751.2	9599	48817	513	6	391	262	11.3	80
CHA-50I	0.4	133.33	307	107.1	2114	75850	1075	14.9	191	127	27.2	30
CHA-62I	0.3	5.4	6	1.5	79	56751	1303	0.375	6	37.5	89	20
CHA-67I	0.3	7.9	144	2.2	17002	73715	1897	0.375	14	259	70.2	17
CHA-69I	0.8	54.5	482	16.4	29710	90015	2056	4	1707	601	48.4	30
CHA-70I	6.2	133.33	1592	1333	12878	31289	229	4.9	3587	1471	39.5	54
CHA-71I	3.7	133.33	422	711.8	10788	99072	150	8.6	104	657	105.3	58
CHA-73I	0.5	14.5	5	4.7	70	68335	1958	0.375	14	100	244.4	38
CHA-74I	0.5	16.6	5	0.8	17	67314	2175	0.375	31	98	118.1	42
CHA-77I	0.6	133.33	368	51.8	1460	13333	1206	23	2896	1416	70.4	13
CHA-79I	0.3	63.8	27	0.7	30	76026	1998	0.375	40	159	57.6	58
CHA-80I	0.3	11.5	15	0.3	7	51969	1932	0.375	9	209	106	38
CHA-81I	1.6	49.3	408	156.2	3571	62820	950	2.9	275	50	47.7	42
CHA-82I	0.6	6.3	5	2.6	70	44501	1570	0.375	17	57	144.8	13
CHA-83I	2.5	133.33	2459	276.8	13582	13333	1040	4.6	1909	219	18.6	158
CHA-85I	2	30.6	3831	1333	28361	98781	325	3.8	2013	380	8.9	346
CHA-93I	2.6	133.33	3132	223.7	26515	83552	268	4.8	1159	513	4.3	141
CHA-96I	0.3	12.2	5	2.1	165	64903	1169	0.375	16	423	72.5	11
CHA-97I	0.6	4.5	6	0.7	102	18363	3024	3.4	19	192	8.4	103
CHA-98I	0.4	7.7	5	0.3	152	55465	1704	0.7	16	166	8.6	29
CHA-100I	0.6	13.2	5	0.3	20	69616	2333	0.375	24	185	6.3	20
CHA-102I	0.7	24.3	5	0.3	5	99104	2357	0.375	28	71	76.7	11
CHA-103I	0.5	12.4	5	0.5	54	65318	3583	0.375	18	76	11.3	80
CHA-107I	0.6	12.2	5	1.3	193	56126	1395	0.375	21	711	5	140
CHA-108I	0.9	133.33	1715	333.2	4460	13333	683	20.3	618	608	60.1	46
CHA-111I	3.9	133.33	4690	14.9	17856	63700	191	3.4	1759	856	25.7	25
CHA-112I	5.1	43.8	4080	292	27023	38130	224	2.7	438	2831	11.1	18
CHA-116I	1.5	21.2	1878	347.3	8243	59344	231	2.6	213	240	52.4	29
CHA-118I	0.5	133.33	665	238.8	16319	13333	431	4.2	213	258	247.8	28
CHA-119I	1.2	63.2	365	273	10616	74395	214	10	377	444	32.2	22
CHA-126I	0.3	9.8	239	2.5	86	13333	48	0.7	11	812	282.9	5
CHA-128I	0.7	11	692	2	4183	13333	495	4.3	5	79	548.5	24
CHA-130I	1	93.8	434	179.3	4593	13333	393	4.7	810	726	71.9	74
CHA-132I	0.4	10.6	8	1.2	34	66479	1976	0.375	20	165	21.4	144
CHA-133I	0.7	27	14	0.8	750	13333	3843	2.7	21	62	12	389
CHA-137I	0.5	1.5	5	0.1	42	14735	2494	2.5	4	156	2	12
CHA-139I	0.9	61.5	108	20.3	4973	48914	745	2.2	75	214	36.8	47
CHA-140I	0.2	3.3	6	1.1	30	7343	2553	0.375	3	71	3.6	6

ادامه جدول ۲

CHA-141I	0.1	133.33	565	267.4	881	13333	238	28.3	528	1166	10.2	36
CHA-142I	0.4	74.1	431	6.9	311	13333	140	2.6	73	2609	244	19
CHA-151I	0.7	13.1	5	1.2	15	74450	2733	0.375	91	74	30.3	357
CHA-152I	0.4	15.6	5	0.4	37	53410	2116	0.375	11	411	8.5	273
CHA-154I	1.7	38.1	105	4.1	1807	13333	2451	1.8	222	68	19.1	244
CHA-156I	0.6	5.8	5	0.2	41	66219	1750	0.375	10	195	4.9	116
CHA-160I	0.2	3.2	7	0.4	8	7455	78	3.4	39	1588	2.4	0.75
CHA-165I	0.9	6	5103	239.1	6836	74627	428	2.7	290	114	68.5	28
CHA-167I	0.7	22.5	10	6.3	887	13333	1958	0.5	137	262	18.2	109
CHA-170I	0.3	69.5	34	0.7	29	18562	333	8.5	118	464	3.7	160
CHA-171I	0.2	5.2	7	0.2	2	19489	1134	0.375	5	95	1.6	11
CHA-173I	0.4	7.6	5	0.2	14	61078	1946	<0.5	8	106	2.5	116
CHA-174I	0.2	9.4	5	0.2	9	17787	1733	0.375	4	150	1.2	9
CHA-176I	3.3	133.33	3019	1333	44348	82403	846	10.6	877	375	27.7	74
CHA-177I	0.2	5.7	6	10.5	290	70113	813	0.6	17	159	8.1	46
CHA-180I	0.1	25.6	7	5.3	390	71702	101	10.9	43	668	4	15
CHA-181I	0.9	133.33	660	112.8	9981	80059	273	17.8	712	333	23.7	48
CHA-182I	0.5	9.3	666	19.9	427	40163	314	0.5	44	37.5	47.2	19
CHA-183I	0.4	5.2	5	0.5	7	52131	3098	0.375	8	218	5.1	83
CHA-185I	0.6	133.33	268	42.6	4860	13333	271	104.9	2289	1142	20.7	30
CHA-188I	0.3	9.1	5	1.1	36	14567	119	0.9	61	567	3.4	7
CHA-189I	0.1	9.7	5	0.2	8	9305	59	1.6	31	2544	2.3	0.75
CHA-190I	0.1	6.8	5	0.2	2	12223	1594	0.375	8	335	1.5	13
CHA-191I	0.6	2	6	0.5	20	52413	2033	0.375	12	66	1.9	250
CHA-197I	0.1	5.8	5	0.2	4	15608	57	0.6	7	201	1	1
CHA-198I	0.1	24.8	5	0.8	13	11447	42	0.375	7	1754	0.75	0.75
CHA-201I	4.2	133.33	186	28	2540	62495	26667	11	1717	439	1.2	119
CHA-204I	0.1	9.5	5	0.7	24	11059	267	0.375	30	1745	0.75	0.75
CHA-211I	0.2	25.6	100	21.4	290	13333	304	19.2	381	463	12.2	8
CHA-213I	0.1	39.3	7	1.4	6	42872	342	1.4	13	1179	2.4	18
CHA-214I	0.3	0.375	5	0.3	1304	30641	2633	0.375	298	100	0.75	244
CHA-216I	0.6	6.7	5	0.3	32	21861	75	0.375	19	1207	0.75	4
CHA-219I	0.2	11.9	5	0.4	34	11491	93	1	17	1460	0.75	0.75
CHA-220I	0.3	39	5	0.3	24	16243	114	0.375	30	592	0.75	6
CHA-224I	0.1	21.3	5	0.2	1	23149	46	0.375	5	343	0.75	0.75
CHA-230I	0.4	0.375	5	0.1	49	34856	331	0.375	5	753	0.75	74
CHA-231I	0.9	12.7	9	0.9	499	13333	1089	9.6	120	<50	294.3	76
CHA-235I	0.1	5.5	5	0.1	43	10199	685	0.375	18	457	24.9	6
CHA-237I	0.1	5	5	0.2	4	9409	67	0.9	56	321	8.2	3
CHA-238I	0.2	7.8	5	0.3	20	20248	72	0.375	31	111	4.7	5
CHA-239I	0.3	0.375	18	0.4	192	13333	439	2	47	37.5	327.1	22
CHA-240I	0.1	8.7	5	0.2	6	8649	44	0.375	10	1800	33.2	<1
CHA-241I	0.3	5.3	5	<0.1	6	57285	2049	0.375	33	124	18	198
CHA-242I	0.2	17.6	5	0.8	13	73043	354	8.1	19	642	22.5	37
CHA-246I	1.4	133.33	7	5.8	9425	69651	408	21.6	2613	1240	6.7	50
CHA-248I	0.2	133.33	20	12.8	1478	13333	414	53.1	2185	856	4.3	61
CHA-250I	2.1	133.33	14	3.2	171	13333	413	8.1	9	474	135.8	18
CHA-252I	0.2	11.3	5	0.2	8	8986	43	0.375	10	1432	14.9	3
CHA-253I	0.1	9.3	5	0.4	22	12239	45	0.375	7	811	5.2	4
CHA-254I	0.9	27.5	12	1	48	57908	4749	0.375	12	260	6.6	686
CHA-255I	0.2	133.33	8240	25.7	620	13333	97	61.5	288	2500	71	14
CHA-257I	0.2	7	26	0.5	13	32163	2848	1.5	9	229	8.1	34
CHA-259I	0.4	64.2	18	2.5	719	13333	139	6.3	263	3508	78.9	8
CHA-260I	0.3	54.3	5	1.5	578	13333	98	7.9	93	3420	123.7	8
CHA-261I	0.3	10.1	5	0.1	18556	69440	2088	0.375	8	141	21.4	169
CHA-262I	0.4	3.5	5	0.075	226	22239	2923	5.3	5	228	4.9	9
CHA-263I	0.9	133.33	761	4.5	2389	23084	281	0.375	515	119	8.1	23
CHA-264I	0.8	133.33	561	5.6	2349	30906	322	0.375	516	122	11.9	21
CHA-265I	1.6	133.33	271	29.2	6888	13333	699	35.6	1344	1380	6.3	44
CHA-266I	0.4	36.6	34	2.3	218	13333	980	8.7	11	120	95.6	58
CHA-267I	0.2	40.3	14	2	195	13333	168	4.7	28	413	373.3	16
CHA-268I	1	98.2	7644	1333	2540	13333	109	4.3	81	646	47.5	7

ادامه جدول ۲

CHA-269I	0.5	12.9	8	14.9	54	68370	2134	0.375	23	37.5	22.4	239
CHA-270I	0.3	133.33	6	10.6	255	13333	1236	2	36	2643	10.2	127
CHA-271I	2.8	54	5	1	49456	72090	7695	0.8	30	117	6.4	389
CHA-272I	0.4	11.9	1277	1.9	1921	13333	1168	7.5	456	59	356.9	72
CHA-273I	0.7	15.6	400	3.8	4196	13333	842	6.2	11	51	180.7	65
CHA-275I	1.7	81	15	1.2	18687	97837	1433	2.9	1500	177	58.4	95
CHA-276I	2.5	17.9	7	0.3	22252	43043	1459	0.375	10	323	8.5	59
CHA-278I	0.2	21.6	10	21.3	2678	50646	1962	0.375	211	2816	7.7	120
CHA-279I	6.1	15.7	44	2.8	25676	25759	3309	52.4	236	3597	4.3	21
CHA-280I	0.4	15.5	118	2.8	1188	13333	254	6.3	42	470	293.1	10
CHA-282I	1.2	98.2	13	3.7	3439	13333	284	6.2	140	363	224.7	16
CHA-283I	2.6	133.33	21	3.2	12515	13333	201	4.8	12	145	184.8	13
CHA-284I	0.2	13.7	298	3.9	3684	13333	916	4.6	22	262	36.8	63
CHA-285I	0.3	8	5	0.2	46	38424	3062	0.375	6	256	15	58
CHA-286I	0.5	8.6	5	0.3	275	14996	2616	1.9	10	160	8.1	0.75
CHA-287I	12.9	133.33	66	5.8	852	13333	142	4.1	34	15294	66.9	16
CHA-288I	1	5.1	5	0.2	4921	54943	1441	0.375	11	601	13.8	83
CHA-289I	1.4	16.2	386	6.2	8790	13333	1153	8.5	73	103	76.9	79
CHA-290I	0.9	6.4	1371	1.3	4657	13333	747	4	516	1172	309.6	51
CHA-292I	0.1	9.7	5	0.2	45	18077	67	0.375	14	519	28.5	3
CHA-294I	9.7	133.33	61	4.4	26751	13934	953	8.6	1614	6329	12.3	22
CHA-298I	2.6	4.8	5	2.4	31266	54569	1285	0.375	32	272	10.1	193
CHA-299I	0.5	28.5	5	0.3	197	59424	621	0.375	43	677	5.9	6
CHA-301I	1.1	133.33	9	1.5	440	13333	329	27.1	60	675	15.2	23
CHA-303I	0.1	77.6	34	1.6	679	13333	330	4.3	51	739	37.7	19
CHA-306I	0.6	65.7	26	2.7	686	13333	247	13.9	124	2974	142.6	22
CHA-307I	0.2	30.5	7	1.4	2038	13333	145	21.2	74	1184	138.2	13
CHA-308I	1.1	10.9	5	1.2	1295	13333	166	9.7	51	913	98.1	14
CHA-309I	4.2	20.9	11	2.5	9315	13333	361	4	54	222	131.2	25
CHA-316I	5.4	17.9	2433	4.2	22801	42291	297	0.7	275	498	43.4	29
CHA-317I	3.7	20.2	3638	3.6	20586	51786	371	1.1	253	252	41.4	35
CHA-318I	0.2	133.33	1193	34.9	841	49625	167	40.9	3411	1201	14.3	24
CHA-319I	0.5	133.33	299	27.8	744	62534	316	33.5	2759	1963	9.7	37
CHA-320I	0.2	133.33	25186	22.4	669	13333	89	66	259	2645	71.5	9
CHA-321I	0.4	18	41	1.5	41	85555	234	1.6	15	37.5	122.5	11
CHA-322I	0.4	12.9	5	0.9	293	13333	598	5.6	4	599	334.8	39
CHA-324I	2.4	12.6	53	2.4	30293	13333	582	6	36	115	205.3	39
CHA-325I	1.7	8	722	1.3	2258	13333	1589	5.2	46	133	155.5	120
CHA-326I	0.5	7.4	5	1.6	2996	58792	788	0.375	10	79	25.9	33
CHA-327I	0.3	133.33	872	45.6	391	82003	682	61.5	73	2490	15.7	44
CHA-329I	1.7	20.2	542	38	5270	13333	670	1.3	10	37.5	172.6	37
CHA-330I	1	22.4	375	10.5	8662	68290	2844	3.1	33	332	38	234
Max	12.9	133.33	25186	1333	49456	99104	26667	104.9	3587	15294	548.5	686
Min	0.1	0.375	5	0.075	0.75	5116	42	0.375	3	37.5	0.75	0.75
Mean	1.18	53.451	722.42	88.49	4754.9	35657	1187	8.2253	364.77	816.97	57.553	74.4
Median	0.5	22	18	2.5	644.5	17932	547.5	2.7	46	375	18.85	37
Variance	3	2844.8	551426	56929	8E+07	7E+06	5E+05	232.78	464985	2E+06	7973.6	9977
Stdev	1.73	53.336	2348.2	239.2	8867.3	27284	2286	15.29	683.38	1465.4	89.295	100
CV	1.47	0.9978	3.2505	2.703	1.8649	0.7652	1.926	1.8589	1.8735	1.7937	1.5515	1.344

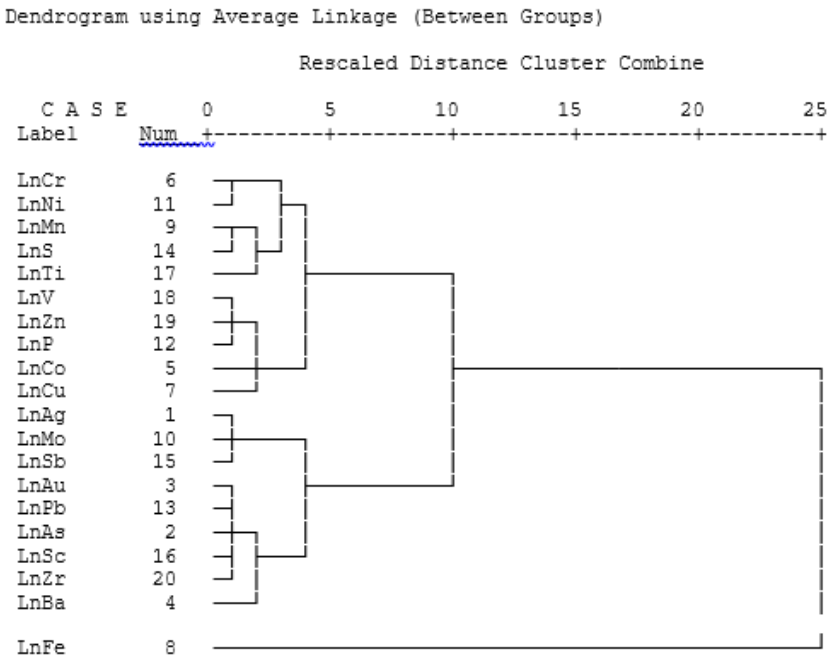
جدول ۳- نتایج تحلیل فاکتوری، فاکتور اول نشان دهنده کانه‌زایی

Table 3. The results of factor analysis indicate that the first factor represents mineralization

	Component						
	1	2	3	4	5	6	7
Ag	.492	.393	-.184	-.179	-.214	.124	.585
As	.653	.224	-.474	-.029	.012	-.265	-.125
Au	.686	.466	.106	-.070	-.257	.165	.273
Ba	.314	-.115	-.614	.591	.256	.132	.056
Cd	.461	.187	.383	.523	-.355	.021	-.324
Co	-.482	.555	.364	.084	.335	-.025	-.003
Cr	-.717	.561	-.054	-.017	-.024	.246	-.076
Cu	.256	.175	.600	.327	.385	-.318	.083
Fe	-.240	-.306	.196	.305	.254	.085	.575
Mn	.074	-.155	-.240	-.043	-.341	-.756	.108
Mo	.526	.405	.247	-.049	.410	-.295	.111
Ni	-.745	.543	-.071	-.009	-.017	.203	-.059
P	.498	-.495	.179	-.229	.186	.192	-.172
Pb	.351	.023	-.550	.654	.082	.241	-.013
S	.499	.292	-.245	-.134	.494	-.108	-.235
Sb	.657	.554	-.122	-.329	-.006	.162	-.094
Ti	.542	-.540	.371	-.149	.080	.312	.005
V	.764	-.032	.123	-.237	.015	.227	-.020
Zn	.416	.218	.528	.472	-.381	.004	-.072

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. 7 components extracted.



شکل ۷- تحلیل خوشه‌ایی داده‌های ژئوشیمیایی.
Fig. 7. Cluster analysis of geochemical data.

رنگ میانبارهای گازی غالباً تیره‌تر از میانبارهای غنی از مایع است، که ناشی از ضریب شکست پایین‌تر فاز گازی است میانبارهای سیال مشاهده شده در اغلب نمونه‌ها از دو تیپ اصلی تشکیل شده‌اند تک فازی گازی و دوفازی غنی از مایع و در برخی نمونه‌ها دوفازی غنی از گاز نیز مشاهده شده است (شکل ۸) در میانبارهای تک فازی، تنها فاز موجود حباب گاز است از این نوع میانبار نمی‌توان برای اندازه گیری میکروترمومتری استفاده کرد در این نوع میانبار حباب گاز تمام حجم سیال را احاطه کرده است وجود این نوع میانبار سیال نشان دهنده‌ی جوشش می‌باشد (Simmons et al., 2000) میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع که فاز مایع ۶۵ تا ۹۵٪ حجم میانبار را تشکیل می‌دهد و حباب گاز تنها حدود ۵ تا ۳۵٪ را شامل می‌شود دوفازی غنی از گاز دارای حجم نسبت بالایی از گاز است (تا بیش از ۷۰٪)، که نشانه‌ای از فرآیند جوشش (boiling) در زمان تشکیل سیال درگیر است. بیشترین نوع میانبار سیال مطالعه شده در نمونه‌ها دو فازی مایع-گاز است. غالب بودن میانبارهای گازی، همراهی آنها با دوفازی‌های غنی از مایع و همچنین وجود میانبارهای غنی از گاز، حاکی از این است که در زمان جایگزینی کانی‌ها، سیال با کاهش فشار و جوشش همراه بوده است چنین شرایطی معمولاً با تشکیل رگه‌های کوارتز حاوی کانی‌های سولفیدی و رسوبگذاری فلزات در سامانه‌های اپی‌ترمال مرتبط است. در مطالعات میکروترمومتری محاسبه میزان شوری میانبار سیال براساس فرمول (Hall et al, 1988) صورت پذیرفته است. در نمودار ستونی دمای همگن شدن، میانبارهای دوفازی مایع-بخار بیشترین فراوانی را داشته و دمای همگن شدن آنها در محدوده ۲۲۰-۱۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد (شکل a۹). برای اندازه گیری دمای همگن شدن از میانبارهای سیال نوع LV, VL استفاده شده است. نمودار ستونی، میزان شوری نسبت به درصد فراوانی میانبارهای سیال کانسار چاه‌علیخان را نشان می دهد که میانبارهای دوفازی مایع-بخار با بیشترین فراوانی شوری در محدود ۱۵-۱۰ درصد وزنی معادل نمک طعام و میانبارهای دو فازی بخار-مایع در محدوده ۱۳-۱۴ درصد وزنی معادل نمک طعام قرار گرفته‌اند (شکلb۹). در جدول (۴) نیز مقایسه ویژگی‌های سیالات درگیر کانسار چاه‌علیخان با سایر تیپ کانسارها نشان داده شده است (شکل c۹).

۸- تعیین منشأ سیال کانه‌دار به کمک ایزوتوپ پایدار

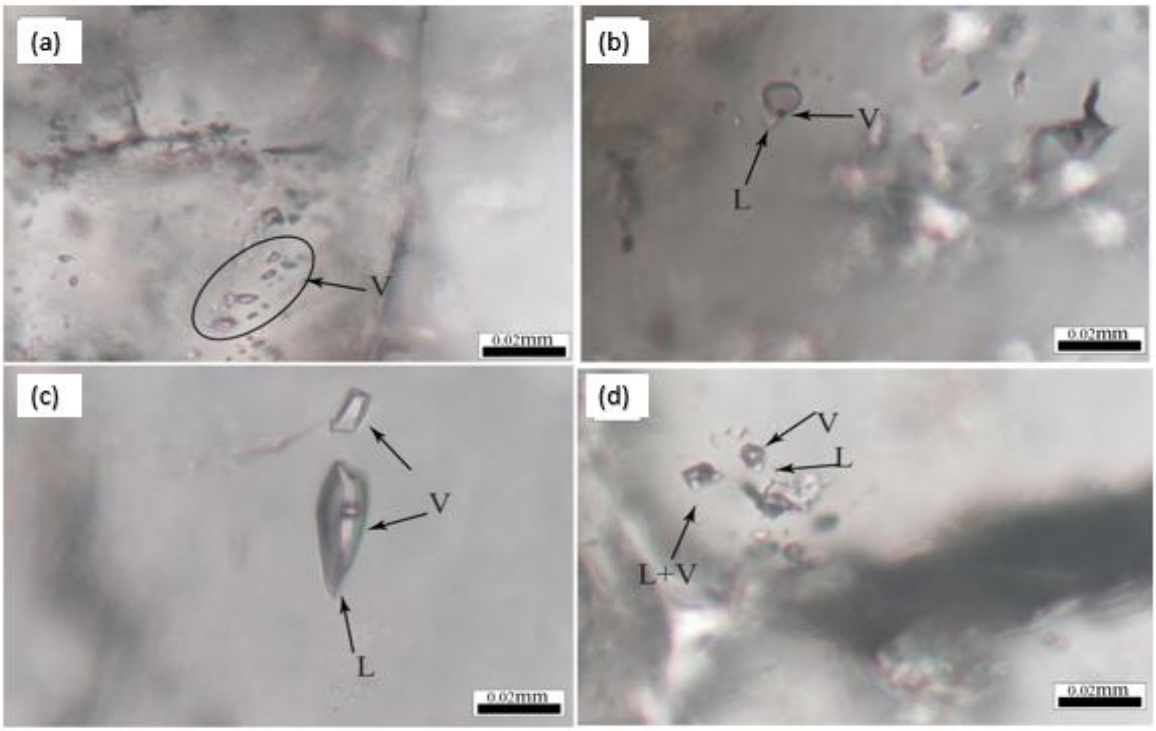
بررسی ایزوتوپ‌های پایدار بخشی مهم در بررسی کانسارها و نقش به سزایی در فهم ژنز آنها را دارد (Ohmoto, 1972, 1979; Calagari, 2003; Hoefs, 2004; Rye, 2005) از

آنجایی که در محدوده مورد مطالعه فراوان‌ترین نوع کانی سولفیدی کالکوپیریت است، برای آگاهی از منشا گوگرد ۹ نمونه از آن انتخاب شده است. و جهت ایزوتوپ اکسیژن از ۱۲ نمونه کوارتز آنالیز گردید که از روش (McCrea, 1950) استفاده شده است.

جدول ۴- مقایسه ویژگی‌های سیالات درگیر کانسار چاه‌علیخان با سایر کانسارها (با تغییرات از Wilkinson, 2001). اختصارات : Qz، کوارتز. Dol ، دولومیت. Sph، اسفالریت. Cc، کالکوسیت. Ccp، کالکوپیریت. Ba، باریت. Fluor، فلوئورین. wolf، ولفرامیت (Whitney and Evans, 2010).

Table 4. Comparison of Fluid Characteristics Involved in the Chah Ali-Khan Deposit with Other Deposits (Modified from Wilkinson, 2001). Abbreviations: Qz, quartz. Dol, dolomite. Sph, sphalerite. Cc, chalcocite. Ccp, chalcopyrite. Ba, barite. Fluor, fluorite. Wolf, wolframite (Whitney and Evans, 2010).

Deposit type	Host minerals	Th range (0C)	Salinity range (wt% NaCl equiv.)	Daughter minerals	Trapped phases	Comments
Mississippi Valley-type	Cc, dol, fluor, ba, qu, sph	50-180	15-30	-	Petroleum	CH4, may be present
Irish-type	Cc, dol, sph, qu, ba	150-240, 80-150	10-18, 20-25	-	Calcite, K-mica	Mixing of two fluids, high T fluid Has low, CO2
Volcanic-associated Massive sulphide	Qz, ba	80-340	1-8	-	-	Higher Th and S in stockwork zones
Granitoid-associated veins	Qz, wolf, fluor, cc	150-500	0-45	Hal, syl, chlor, Bor, anh, cc, Hm, mt, sulph	Torm, ksp	CO2, often present, common effervescence
Porphyry-copper	Qz,	200-700	0-70	Hal, Syl, chlor, Cpy, hm	-	Effervescence common, CO2, in deep systems
Epithermal	Qz, cc, sph	100-300	0-12	daw	-	Sometimes low, CO2, common effervescence
Chah Alikhan	Qz, Ccp	117-470	4-20	-	-	Sometimes low, CO2, common effervescence
Mesothermal gold	Qz, cc	200-400	2-10	daw	-	High, CO2+CH4, or N2



شکل ۸- (a) میانبارهای سیال تک فازی گازی، (b) میانبار سیال دو فازی غنی از مایع، (c) میانبار سیال درگیر دو فازی غنی از مایع همراه با تک فازی گازی، (d) میانبار سیال درگیر دو فازی غنی از گاز همراه با دوفازی غنی ازمایع.

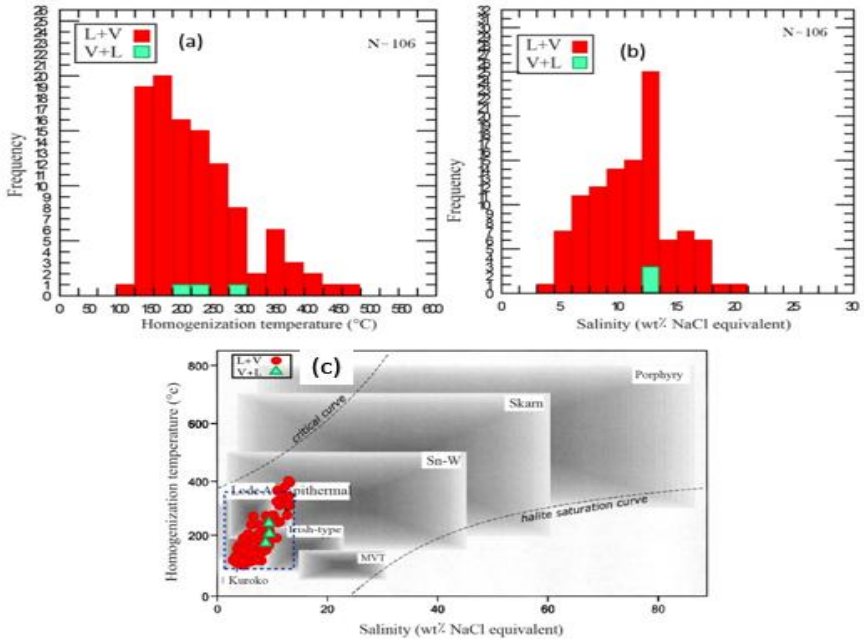
Fig. 8. (a) Vapor single-phase fluid inclusion, (b) Liquid -rich two-phase fluid inclusion, (c) two-phase liquid-rich fluid inclusions coexisting with single-phase Vapor inclusions, (d fluid inclusions comprising two-phase Vapor -rich inclusions along with two-phase liquid-rich.

۸-۱- ایزوتوپ گوگرد

مقادیر δ 34S بر مبنای استاندارد CDT یا فاز سولفیدی ترویلیت شخانه (شهاب سنگ‌ها) برای ۹ نمونه در محدوده معدنی چاه‌علیخان محاسبه و در جدول ۵ و شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به مقدار ایزوتوپ گوگرد اندازه‌گیری شده توسط آزمایشگاه و دمای تشکیل کانی، ایزوتوپ گوگرد محلول گرمابی را می‌توان محاسبه نمود بدین ترتیب با در نظر گرفتن میانگین دمای همگن شدگی بدست آمده توسط میانبار سیال و مقادیر δ34S اندازه‌گیری شده برای کالکوپیریت موجود در کانسار چاه‌علیخان و با توجه به معادله تفریق مقدار δ 34S موجود در سیال محاسبه شده از ‰ ۲.۶ تا ۶.۷ در تغییر می‌باشد. مقدار δ 34SH2S گوگرد احیایی سیال در تعادل با کالکوپیریت با استفاده از متوسط دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال از طریق معادله تفریق (Li and Liu, 2006) محاسبه شده است.

۳) $1000\ Ln\alpha = \delta\ 34S_{Cpy} - \delta\ 34S_{H2S} = (-0.75) * (10^6/T^2)$

لذا با توجه به اعداد بدست آمده می‌توان گفت که مقادیر δ 34S در سولفید گوگرد موجود در محلول گرمابی موثر در تشکیل چاه‌علیخان در گستره ‰ ۲.۶ تا ۶.۷ قرار می‌گیرد. با توجه به طبیعت آتشفشانی سنگ میزبان چاه‌علیخان، سولفور سیال‌های کانه‌ساز مشابه با سیال‌های خارج شده آتشفشانی و یا سیستم مشتق شده از ماگما می‌باشد و در محدوده ماگمایی جای می‌گیرند و به طور عمده تاثیر فرآیندهای احیای زیستی در آن‌ها ضعیف است.



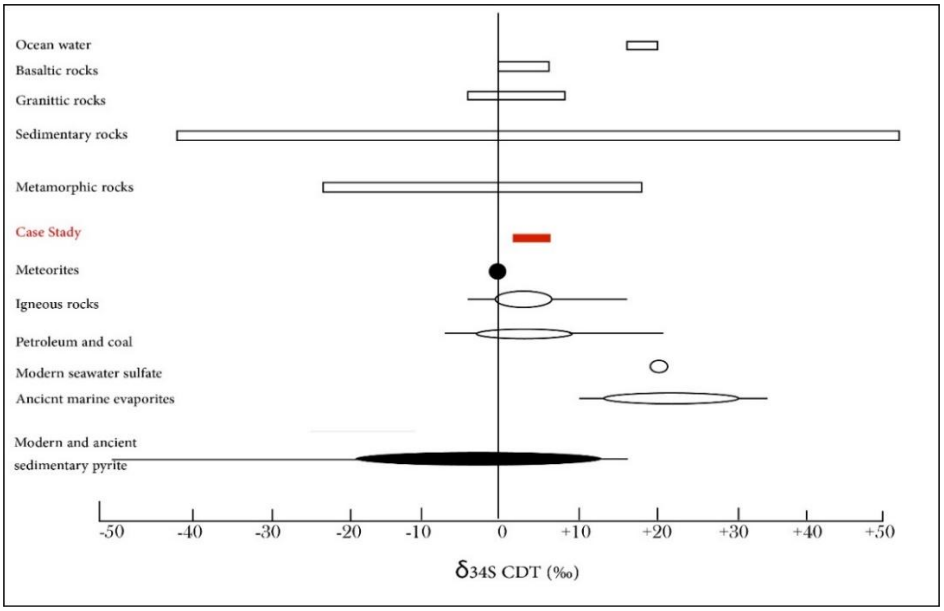
شکل ۹- (a) نمودار ستونی فراوانی شوری، (b) نمودار ستونی دمای همگن شدن، (c) نمودار دمای همگن شدن در مقابل شوری انواع مختلف کانسار با قرار گرفتن نمونه‌های کانسار چاه‌علیخان در حوزه اپی‌ترمال (Wilkinson, 2001).

Fig. 9. (a)Frequency bar chart of salinity, (b) Histogram of homogenization temperature, (c) Diagram of homogenization temperature versus salinity of different deposit types with samples from the Chah Alikhan deposit located in the epithermal domain) Wilkinson, 2001).

جدول ۵- داده‌های ایزوتوپی گوگرد (δ34S) مربوط به چاه علیخان.

Table 5. Sulfur isotopic data (δ34S) of the Chah Alikhan deposit.

NO	Sample	Mineral	δ34S CDT (‰)	T(˚C)	1000ln α	δ34SH2S fluid (‰)
1	BH-12-S	Cpy	+3.0	200	0.5	3.5
2	BH-17A-S	Cpy	+4.6	200	0.5	5.1
3	BH-39-S	Cpy	+3.0	200	0.5	3.5
4	BH-35	Cpy	+2.8	200	0.5	6.3
5	BH-36	Cpy	+6.2	200	0.5	6.7
6	BH-61	Cpy	+4.3	200	0.5	4.5
7	BH-36-W	Cpy	+3.8	200	0.5	4.3
8	BH-17A	Cpy	+2.1	200	0.5	2.6
9	TE1	Cpy	+4.2	200	0.5	4.7



شکل ۱۰- مقادیر δ34S در کانسار چاه‌علیخان در مقایسه با محیط‌های مختلف زمین‌شناسی (برگرفته از Hoefs, 2004).

Fig. 10. δ34S values in Chah Alikhan deposit in comparison with different geological environments, taken from) modified from Hoefs, 2004).

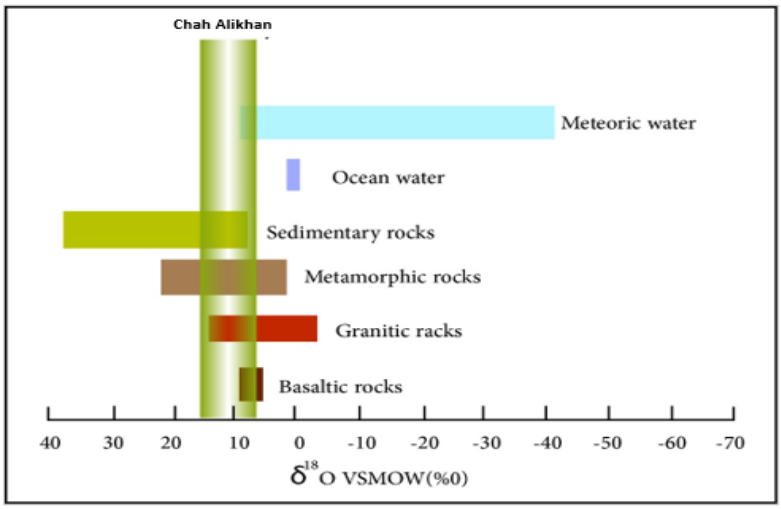
۸-۲- ایزوتوپ پایدار اکسیژن

همچنین به منظور مشخص نمودن منشأ سیالات کانه‌ساز، اغلب از مطالعات ایزوتوپ اکسیژن نیز استفاده می‌شود. در این پژوهش، مطالعات ایزوتوپی اکسیژن بر روی کانی کوارتز در کانسار چاه‌علیخان صورت گرفته و نتایج درجدول ۶ و شکل ۱۱ آورده شده است. بدین منظور جهت مشخص شدن ترکیب ایزوتوپی اکسیژن، ۱۲ نمونه کوارتز همراه با کانه‌زایی در کانسار چاه‌علیخان، برداشت و مورد آنالیز قرار گرفته است. برای محاسبه مقدار ایزوتوپ اکسیژن سیال گرمابی در تعادل با کوارتز از معادله (Clayton et al, 1972) استفاده شده است که مقدار δ18O کوارتز را از ‰ ۷.۲+ تا ۱۶.۵+ نشان می‌دهد و در مجموع نیز منشاء ماگمایی سیالات کانه‌ساز و نقش محدود آب‌های متئوریک را تأیید می‌کند.

جدول ۶- داده‌های ایزوتوپی اکسیژن (δ18O) مربوط به کانسار چاه علیخان.

Table 6. Oxygen isotope compositions of the Chah Alikhan deposit.

Sample name	Mineral	δ18O (‰) VSMOW	T(˚C)	1000ln α	δ18O H2O (‰)
BH17A-O-SP	Quartz	+5.0	200	3.9	8.9
BH-38-O-SP	Quartz	+3.5	200	3.9	7.4
BH-E-39-O-SP	Quartz	+3.3	200	3.9	7.2
BH-40-E-O-SP	Quartz	+5.4	200	3.9	9.3
BH-5A-O-Q	Quartz	+12.3	200	3.9	16.2
BH-11-O-Q	Quartz	+7.6	200	3.9	11.5
BH-12-O-Q	Quartz	+12.6	200	3.9	16.5
BH-14-O-Q	Quartz	+8.6	200	3.9	12.5
BH-17A-O-Q	Quartz	+5.8	200	3.9	9.7
BH-39E-O-Q	Quartz	+9.5	200	3.9	13.4
BH-6E-Q-O	Quartz	+8.3	200	3.9	12.2
BH-40-E-O-Q	Quartz	+6.8	200	3.9	10.7



شکل ۱۱- موقعیت مقادیر δ18O کانی کوارتز کانسار چاه‌علیخان (Hoefs, 2009).

Fig. 11. Location of δ18O values of quartz mineral from the Chah Alikhan deposit (Hoefs, 2009).

۹- بحث

در کمربند ارومیه-دختر، تاکنون کانی سازی‌های طلا و مس متعددی شناخته شده است که می‌توان به تیپ‌های اپی‌ترمال طلا دشت لوئین ساوه (Ghasemi et al., 2014)، طلا - نقره (مس) توزلار (Heidari et al., 2013; Heidari et al., 2015; Heidari et al., 2015)، ساری گونای قروه (Asadi et al. 2014; Geranian et al., 2016)، کالچویه اصفهان (Mehvary et al., 2012) ، چاه زرد-دره زرشک یزد (Surname et al., 2014)، قشلاق میل ساوه (Lajouyi Kalaki et al., 2021) و طلا در بی‌هنجاری شماره ۳ کوه دم اصفهان (Nabavi et al., 1998) را بعنوان نمونه نام برد. کانسار چاه‌علیخان به شکل کانی‌سازی رگه‌های مس-طلا همراه با عوامل کنترل‌کننده ساختاری در پهنه فرورانش کمربند ماگمایی ارومیه-دختر ایجاد شده است. این رگه‌ها حاصل فعالیت گرمایی ناشی از فعالیت توده‌های نفوذی با سن الیگومیوسن هستند که واحدهای سنگی را دگرسان نموده‌اند. زون‌های کانه‌زائی دارای آنومالی‌هایی از عناصری مانند As ,Sb ,Au ,Zn ,Pb ,Cu ,Ba، به عنوان عناصر فوق‌کانساری در سیستم‌های هیدورترمال می‌باشند. با توجه به نوع سنگ میزبان، دگرسانی، کانه‌زایی و وجود اسپیکولاریت به میزان زیاد که نشان دهنده فوگاسیته بالای اکسیژن در محلول و مقدار پیریت و کالکوپیریت به میزان کمتر در رگه‌های سیلیسی طلادار و نیز نتایج مطالعات لیتوژئوشیمیایی رگه‌ها و بر اساس داده‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی چاه‌علیخان می‌تواند نوعی کانه‌زایی اپی‌ترمال سولفید پایین مس-طلا باشد بر اساس مقایسه صورت گرفته بین این کانسار با تیپ‌های اپی‌ترمال احتمال مشابهت بین این کانسار با موارد پیش گفته وجود دارد (جدول ۷) در مطالعات میانبارهای سیال با توجه به گستره دمایی و شوری رگه‌های مس-طلا چاه‌علیخان، چگالی سیال کانه‌زا بین ۰.۷ gr/cm³ تا ۱.۰gr/cm³ و همچنین پرجمعیت‌ترین گروه از میانبارهای سیال مطالعه شده در محدوده چگالی ۰.۹ gr/cm³ تا ۱.۰gr/cm³ قرار می‌گیرند (شکل ۱۲a)، (Bodnar, 1983) و این کانی‌سازی در عمق تقریبا کمتر از یک کیلومتری سطح زمین تشکیل شده است (شکل ۱۲b)، (Wilkinson, 2001) همچنین براساس نمودار دما-شوری سیال کانه‌دار، منشأ کانسار چاه‌علیخان ماگمایی است و با آب‌های جوی دما و شوری پایین‌تر اختلاط پیدا کرده است (شکل ۱۳a)، (Kesler, 2005) دمای همگن شدن و شوری کانسار چاه‌علیخان در نمودار شوری-دما و وجود میانبارهای سیال از هر دو نوع دو فازه و تک فازه در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند گویای رخداد پدیده اختلاط سیال و رقیق‌شدگی همراه با جوشش و شوری کم باشد. پدیده سرد شدگی هم احتمالا به دلیل آمیختگی با آب‌های جوی و واکنش با سنگ‌های دیواره رخ داده است (شکل ۱۳b)، (Wilkinson, 2001) همچنین بررسی داده‌های ایزوتوپی گوگرد در کانی کالکوپیریت چاه‌علیخان نشان می‌دهد که مقادیر δ34S بین ۲.۶ تا ۶.۷ (

CDT)‰ متغیر است این دامنه تغییرات با مقادیر ویژهٔ کانه‌زایی‌های با منشأ ماگمایی تطابق دارد (Hoefs, 2004) چنین شرایطی معمولاً در سامانه‌های اپی‌ترمال از نوع سولفید پایین مشاهده می‌شود. به طور کلی، هم‌خوانی مقادیر مثبت و محدود δ34S با محدوده +۲ تا +۷ ‰ مؤید نقش سیالات ماگمایی در تأمین گوگرد کانه‌زا است و نشانی از تأثیر مؤلفه‌های گوگرد احیایی یا رسوبی در سامانه دیده نمی‌شود. نتایج ایزوتوپی اکسیژن در کوارتز نیز مقادیر δ18O بین ۷.۲ تا ۱۶.۵ (VSMOW) ‰ را نشان می‌دهد. این محدوده، بالاتر از مقادیر معمول آب‌های متئوریکی (-۵ تا +۸ ‰) بوده و در محدوده آب‌های ماگمایی (+۸ تا +۱۰ ‰) یا کمی بیشتر از آن قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، منشاء اصلی سیال کانه‌زا را می‌توان ماگمایی دانست (Hoefs, 2009) هرچند احتمال اختلاط محدود با آب‌های متئوریکی در مراحل پایانی ته‌نشینی کانه‌ها نیز قابل طرح است. تغییرات نسبتاً وسیع δ18O ممکن است ناشی از اختلاط سیالات با منشأ متفاوت یا برهم‌کنش ایزوتوپی سیال با سنگ میزبان در حین سردشدگی سامانه نیز باشد. در مجموع داده‌های میکروترمومتری و ایزوتوپی نشان دهنده مخلوط شدن سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی می‌باشد. جوشش سیال‌های ماگمایی و مخلوط شدن با آب‌های جوی از مکانیسم‌های اصلی ته‌نشینی کانسار چاه‌علیخان می‌باشد. روش کانی‌زایی و شرایط PH نزدیک به خنثی سیال تشکیل دهنده کانسار و هم چنین داده‌های ایزوتوپی S–O دلالت بر سولفیداسیون پایین کانسار چاه‌علیخان دارد.

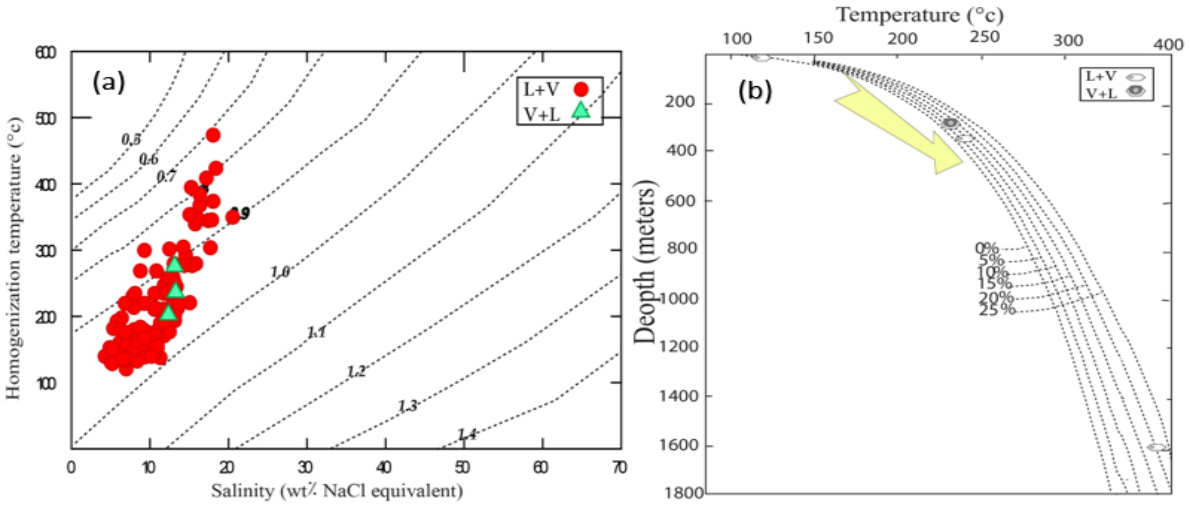
جدول ۷- مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار چاه‌علیخان با برخی از سیستم‌های اپی‌ترمال نوع سولفید پایین تا متوسط در ایران و دنیا. اختصارات: Kf، فلدسپار پتاسیم. Qtz، کوارتز. Hal، هالیت. Carb، کربنات. Dol، دولومیت. Chl، کلریت. Ep، اپیدوت. Mont، مونتموریلونیت. Alu، آلونیت. Sph، اسفالریت. Ser، سرسیت. Flo، فلوئورین. Cc، کالکوسیت. Gt، گوتیت. Py، پیریت. Ad، آدولاریا (Whitney and Evans, 2010).

Table. 7. Comparison of geological and mineralization characteristics of the Chah Alikhan deposit with some low- to intermediate-sulfidation epithermal systems in Iran and worldwide. Abbreviations: Kf, K-feldspar. Qtz, quartz. Hal, halite. Carb, carbonate. Dol, dolomite. Chl, chlorite. Ep, epidote. Mont, montmorillonite. Alu, alunite. Sph, sphalerite. Ser, sericite. Flo, fluorite. Cc, chalcocite. Gt, goethite. Py, pyrite. Ad, adularia (Whitney and Evans, 2010).

نام کانسار	نوع ماگماتیسم	سنگ میزبان	سن	فلز اصلی	کانیهای دگرسانی
چاه علیخان	کالک آلکالن	لیتیک توف و آندزیت بازالت	ائوسن	Cu, Au	Qtz, Py, Ad, Epi وChl, Car
چاه زرد، ایران	کالک آلکالن پتاسیم بالا	ریولیت	۶/۱۹ میلیون سال	Ag, Au	Qtz, Ill, Py, Ad, Chl, Car, K-f
ساریگونی، ایران	آلکالن متوسط	آندزیت، ریولیت	۱۰/۷ میلیون سال	Au	Qtz, Ad, Chl, Ser, Tor, K- f
زگلیک و صفی خانلو	کالک آلکالن پتاسیم متوسط تا بالا و آلکالن	آندزیت و داسیت	الیگوسن	Au (Cu)	Qtz, Cal, Ad, Chl, Ill, Kao, Mont, Epi
لاطلا	کالک آلکالن	آندزیت -تراکی آندزیت	الیگو - میوسن	Au, Ag, Cu (Pb, Zn)	Qtz, Cal, Ser, Chl, Kf, Alu
بزمان	کالک آلکالن	ولکانی کلاستیک های آندزیتی -داسیتی	ترشیری بالایی	Au	Qtz-Chal, Ad, Ser, Py
گندی و ابوالحسنی	کالک آلکالن پتاسیم بالا	آندزیت، برش ولکانیکی	الیگوسن	Au, Ag, Pb, Zn	Qtz, Ill, Cal, Bar, Dol, Epi
Kelian ، اندونزی	کالک آلکالن	آندزیت، ریولیت	حدود۲۰ میلیون سال	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Qtz, Ad, Car, Ser, Ill, Py, Chl
Mt Muro ، اندونزی	کالک آلکالن	آندزیت، بازالت	حدود۲۰ میلیون سال	Au, Ag	Qtz, Chl, Ill, Ser, Phe, Car, Py, Ad, Alb, Kao, Hal, Epi

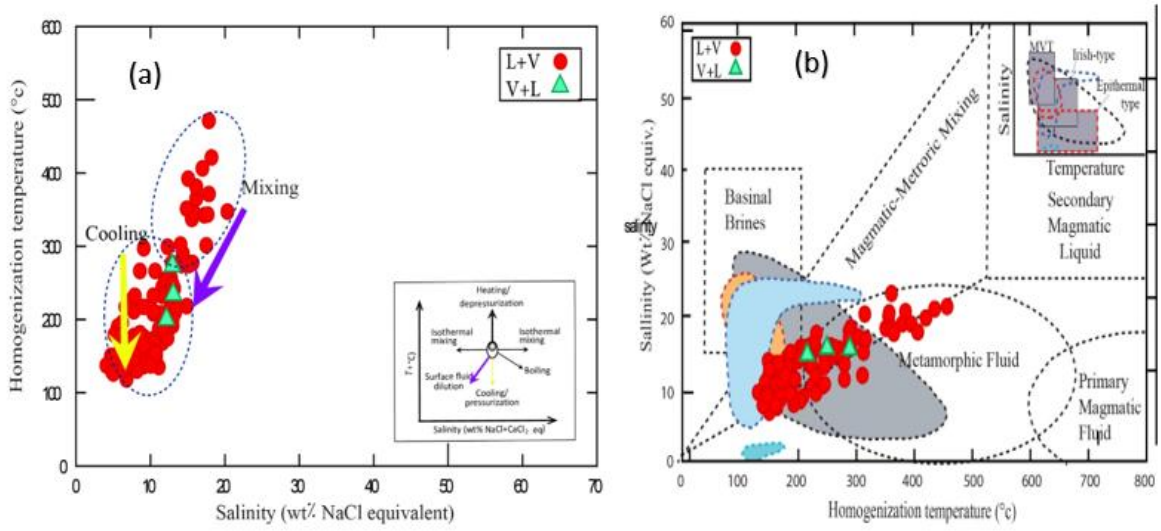
ادامه جدول۷

Kushikino ، ژاپن	کالک آلکالن	آندزیت	۳/۳۵ تا ۳/۶۳ میلیون سال	Au, Ag	Qtz, Ad, Sid, Chl, Car
Dong'an ، چین	کالک آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی	ریولیت	۱۰۷/۲ میلیون سال	Au	Qtz, Ad, Ser, Flu, Py, Chl, Car
Broadlands ، نیوزیلند	کالک آلکالن	ریولیت تا داسیت	۰/۳ تا کنون	Au, Ag± Cu, Pb, Zn	Qtz, Ill, Ad, Alb, Chl, Cal, Py, Sm, Sid
Ladolam ، پاپوآ، گینه نو	آلکالن	لوکوگابرو تا سیینیت	۰/۴ میلیون سال	Au	Ad, Qtz, Cal, Py, Ill, Alb, Rut, Anh, K-f, Phl
Ovacik ، ترکیه	کالک آلکالن	آندزیت تا داسیت	۱۸/۲ میلیون سال	Au, Ag	Sm, Ill / Sm, Qtz, Ad, Car
Roşia Montanâ ، رومانی	کالک آلکالن	داسیت	۱۲/۸۵ میلیون سال	Au, Ag	Qtz, Ad, Car, Chl, Ser, Kao, Ill
Hishikari ، ژاپن	کالک آلکالن	آندزیت	۱/۱۱ تا ۰/۷۳ میلیون سال	Au, Ag	Chl, Ill, Qtz, Cri, Sm, Ad
Eunsan ، کره	کالک آلکالن پتاسیم بالا	ریوداسیت	۷۷/۹ میلیون سال	Au, Ag	Alb, Car, Ill, Ad, Qtz
Sahinli ، ترکیه	کالک آلکالن	آندزیت تا داسیت	۳۵ میلیون سال	Au, Ag, Cu, Pb, Zn	Ill/Mus, Ill / Sm, Cli, Alu, Dic/Nac, Pyr
Comstock ، آمریکا	کالک آلکالن پتاسیم بالا	آندزیت	۱۳ تا ۱۶ میلیون سال	Au, Ag± Cu, Pb, Zn	K-f, Py, Ad, Ser



شکل ۱۲- (a) نمودار چگالی (Bodnar, 1983)، (b) تعیین عمق به دام افتادن میانبارهای سیال بر اساس نمودار دما-فشار (Wilkinson, 2001).

Fig. 12. (a) Isochores of density. (b) Determination of fluid inclusion entrapment depth based on temperature-pressure diagrams (Wilkinson, 2001).



شکل ۱۳- (a) نمودار پیشنهادی (Kesler, 2005) نمایش منشأ سیالات کانه‌ساز در تیپ‌های مختلف، (b) نمودار شماتیک جهت‌های اصلی شوری-دمای همگن شدن میانبارهای سیال (Wilkinson, 2001).

Fig. 13. (a) The proposed diagram by Kesler (2005) illustrates the origin of ore-forming fluids in different deposit types. (b) Schematic diagram of the principal trends of salinity and homogenization temperature in fluid inclusions (Wilkinson, 2001).

۱۰- نتیجه‌گیری

در کانسار چاه‌علیخان سنگ میزبان رگه‌های مورد مطالعه بیشتر لیتیک توف تا آندزیت بازالت است. کانه‌های اولیه پیریت، کالکوپیریت، اسپیکولاریت، کوارتز و کانی‌های ثانویه گوتیت، لیمونیت، مالاکیت نیز دیده شده است. ساخت و بافت کانی‌سازی به صورت رگه-رگچه‌ای، تیغه‌ای، پرکننده حفرات، نواری متحدالمرکز، قلوه‌ای شکل و شانه‌ای است. نتایج پراش پرتو ایکس کانی‌های آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، اپیدوت، اکتینولیت، کلریت، ایلیت، کائولینیت، هماتیت و گروه میکا را در رگه‌های سیلیسی مس-طلا نشان می‌دهد. دگرسانی در حاشیه رگه‌ها عمدتاً سیلیسی، آرژیلیکی و اکسید آهن است. بر طبق نتایج زمین‌شیمی بیشینه عنصر طلا ۲۵/۱۸ گرم در تن، مس ۴/۹۴ درصد و آهن برابر ۳/۵۶ درصد است. نتایج مطالعات میانبارهای سیال دمای ۱۱۷ تا ۴۷۰ درجه سانتیگراد و شوری ۴.۱۸ تا ۲۰.۴۵ را نشان می‌دهد. منشأ کانسار ماگمایی است و با آب‌های جوی دما و شوری پایین‌تر اختلاط پیدا کرده است. نتایج حاصل از ایزوتوپ‌های گوگرد و اکسیژن نیز با توجه به طبیعت آتشفشانی سنگ‌های میزبان چاه‌علیخان، منشاء ماگمایی آن را تایید می‌کند لذا بر طبق مجموعه مطالعات صورت گرفته از داده‌های سطحی زمین‌شناسی و مطالعه گمانه‌ها و ترانشه‌ها شامل سنگ‌نگاری، کانه‌زایی و دگرسانی، زمین شیمی، میانبار سیال و نتایج ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و گوگرد تطبیق مطالعات و شواهد صحرایی، رخداد کانه‌زایی رگه‌های کوارتزی مس-طلا مورد مطالعه در چاه‌علیخان را می‌توان احتمالا به یک کانی‌سازی گرمابی نسبت داد که شباهت بیشتری به نوع کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید پایین دارد و اثبات دقیق این موضوع نیازمند داده‌های تفصیلی و عمقی بیشتر است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله لازم می دانند نهایت قدردانی خود را از همکاری آقای مهندس علی کیانی ریاست محترم هیأت مدیره شرکت پویا عقیق سپاهان بابت حمایت هایشان از این اثر علمی را ابراز نمایند.

مراجع

Aftabi, A., Atapour, H., 2011. Alteration geochemistry of volcanic rocks around Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for regional exploration. Resource Geology, 61, 76–90. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00149.x

Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran, 1st edition, Geological Survey of Iran, Tehran, p. 586.

Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229, 211–238. https://doi.org/10.1016/0040-1951 (94) 90030-2

Asadi, H.H., Kianpouryan, S., Lu, Y.-J., McCuaig, T.C., 2014. Exploratory data analysis and C–A fractal model applied in mapping multi-element soil anomalies for drilling: a case study from the Sari Gunay epithermal gold deposit, NW Iran. Journal of Geochemical Exploration 145, 233–241. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.07.005

Asadi, H.H., Voncken, J.H., Kühnel, R., Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. Mineralium Deposita 35, 656–671. https://doi.org/10.1007/s001260050269

Ashrafpour, E., Ansdell, K.M., Alirezaei, S., 2012. Hydrothermal fluid evolution and ore genesis in the Arghash epithermal gold prospect, northeastern Iran. Journal of Asian Earth Sciences 51, 30–44. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.01.020

Bodnar, R., 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids. Economic Geology 78, 535–542. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.535

Calagari, AA., 2003. Stable isotope) S, O, H, and C) studies of the phyllic and potassic–phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences 21 (7), 767–780. https://doi.org/10.1016/S1367-9120 (02) 00083-4

Clayton, R.N., O'Neil, J.R., Mayeda, T.K., 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Journal of Geophysical Research 77, 3057–3067. https://doi.org/10.1029/JC077i021p03907

Du Bray, E.A., 2014. Geochemical and modal data for igneous rocks associated with epithermal mineral deposits. U.S. Geological Survey Data Series 875, 13 p. https://doi.org/10.3133/ds875

Ebrahimi, S., Alirezaei, S., Pan, Y., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. In: Jenkin, G.R.T., Lusty, P.A.J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A.J., and Burgess, R. (Eds.), Mineralogy and Geochemistry of Mineral Deposits, Geological Society, London, Special Publications 350, 251–273. https://doi.org/10.1144/SP350.8

Geranian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi, H.H., Carranza, E.J.M., 2016. Application of discriminant analysis and support vector machine in mapping gold potential areas for further drilling in the Sari-Gunay gold deposit, NW Iran. Natural Resources Research 25, 145–159. https://doi.org/10.1007/s11053-015-9271-2

Ghasemi, H., Rajabi, F., Mohammadi, M., 2014. Geochemical data analysis of rare earth elements in the Luein intrusive body (northwest of Saveh) with emphasis on copper mineralization. In: Proceedings of the Economic Geology Conference.

Hall, D.L., Sterner, S.M., Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H_2O solutions. Economic Geology 83, 197–202. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197

Heidari, S., Ghaderi, M., Kouhestani, H., Hosseini, M., 2015. Touzlar epithermal Au-Ag (Cu) deposit, subvolcanic intrusion-related of intra-arc extensional setting, northwest Mahneshan, Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 24, 329–349. https://doi.org/10.22071/gsj.2015.42948

Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L., Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (–Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. Ore Geology Reviews 65, 460–486. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013

Heidari, S.M., Ghaderi, M., Afzal, P., 2013. Delineating mineralized phases based on lithogeochemical data using multifractal model in Touzlar epithermal Au–Ag (Cu) deposit, NW Iran. Applied Geochemistry 31, 119–132. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.12.014

Hoefs, J., 2004. Stable isotope geochemistry. Spinger-Verlag, Berlin, 244. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70708-0

Hofstra, AH., and Kreiner, D.C., 2020. Systems-Deposits-Commodities-Critical Minerals Table for the Earth Mapping Resources Initiative (ver. 1.1, May 2021): U.S. Geological Survey Open-File Report 2020–1042, 26 p., https://doi.org/10.3133/ofr20201042

Karimpour, M.H., Mazhari, N., Shafaroudi, A.M., 2014. Discrimination of different erosion levels of porphyry Cu deposits using ASTER image processing in eastern Iran: a case study in the Maherabad, Shadan, and

Chah Shaljami Areas. Acta Geologica Sinica-English Edition 88, 1195–1213. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12283

Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. Elements 1, 13–18. https://doi.org/10.2113/gselements.1.1.13

Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z., Zaw, K., 2015. Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia-hosted epithermal Au-Ag deposit, Iran: Fluid inclusions and stable isotope studies. Ore Geology Reviews 65, 512-521. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.003

Lagat, J., 2009. Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria Domes geothermal field, Kenya. In: Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources.

Lajouyi Kalaki, M.S., Sadat, M., Akbarpour, A., Tarantola, A., Hasanpour, Sh., Mohammadi, B., Poshtkouhi, M., 2021. Petrology, mineralogy, lithogeochemistry and fluid inclusion studies in the Qeshlaq-Mil Au–Cu deposit, northwest of Saveh, Iran. Geosciences Scientific Quarterly 31(2), 199–212. https://doi.org/10.22071/gsj.2020.209775.1728

Li, YB., Liu, JM., 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. Geochimica et Cosmochimica Acta. 70, 1789–1795. 10.1016/j.gca.2005.12.015

McCrea, J.M., 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. The Journal of Chemical Physics 18, 849–857. https://doi.org/10.1063/1.1747785

Mehrabi, B., Siani, M.G., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E.E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution, and genesis of polymetallic epithermal veins, Glojeh district, NW Iran. Ore Geology Reviews 78, 41–57. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016

Mehvary, R., Noghreyan, M., Mackizadeh, M., 2012. Mineralization and fluid inclusion studies on quartz-mineralized veins at the Kalchoyeh epithermal deposit, southwest of Nain.

Nabavi, M.A., Mirzayi, S.J., Yazdani, M., Mohammadi, O.R., 1998. Lithogeochemical exploration of gold and associated elements in Anomaly 3 of the Kuh-e-Dom deposit, northeast of Ardestan, Isfahan, Iran. In: 2nd National Conference of the Iranian Society of Economic Geology.

Ohmoto, H., 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67(5), 551–581. https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.67.5.551

Ohmoto, H., Rye, RO., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits John Wiley & Sons, Newyork, 509-567.

Richards, J.P., Wilkinson, D., Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay Epithermal Gold Deposit, Northwest Iran. Economic Geology 101, 1455-1496. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions: Reviews in mineralogy 12, 644. https://doi.org/10.1515/9781501508271

Rye, RO., 2005. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. Chemical Geology 215 (1-4), 5-36. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.034

Shamanian, G.H., Hedenquist, J.W., Hattori, K.i.H., Hassanzadeh, J., 2004. The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. Economic Geology 99, 691–712. https://doi.org/10.2113/99.4.691

Sholeh, A., Rastad, E., Huston, D., Gemmell, J.B., Taylor, R.D., 2016. The Chahnaly low-sulfidation epithermal gold deposit, western Makran volcanic arc, Southeast Iran. Economic Geology 111, 619–639. https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.619

Sharkovski, M., Susov, M., Krivyakin, B., Morozov, L., Kiristaev, V., Romanko, E., 1984. Geology of the Anarak Area (Central Iran), Report 19, 1st edition, Geological Survey of Iran, Technoexport, Tehran, 143 p.

Simmons, S.F., Simpson, M.P., Mauk, J., 2000. The mineral products of boiling in the golden cross epithermal deposit. New Zealand Minerals and Mining Conference Proceedings, 209–216.

Surname, N., 2014. Assessment and potential mapping of epithermal gold and porphyry copper mineralization between Chah Zard and Dareh Zereshk areas, south of Yazd in GIS. M.Sc. thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Taghipour, N., Aftabi, A., Mathur, R., 2008. Geology and Re–Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran. Resource Geology 58, 143–160. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00054.x

Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95, 185-187. https://doi.org/10.2138/am.2010.3371

Wilkinson, JJ., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit. Lithos 55, 229–72. https://doi.org /10.1016/S0024-4937(00)00047-5

Zang, A.Y., 2012. Evidence on the trade-off between real activities manipulation and accrual-based earnings management. The Accounting Review 87, 675–703. https://doi.org/10.2308/accr-10196

Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran. International Geology Review, 47, 620–646. https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.6.620

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., Lentz, D., Azimzadeh, A.-M., Pourkaseb, H., 2015. Geochemistry and fluid characteristics of the Dalli porphyry Cu-Au deposit, Central Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 111, 175–191. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.029

Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., Lentz, D., Adelpour, M., Pourkaseb, H., 2015. Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. Ore Geology Reviews, 70, 407–423. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.010