Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Autumn 2026, Vol. 15 (4): 145 - 169

Research Article

Origin of Mineralization and Hydrothermal Fluid Evolution in the Qaleh Zargar Copper Deposit: Evidence from Fluid Inclusion Microthermometry and Stable S and O Isotopes, Central Lut Block (Central Iran)

Morteza Esform[1], Hassan Zamanian[2*], Alireza Zarasvandi [3], Alireza Almasi[1]

1- Geology Department, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2- Faculty of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Geology Department, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: *Qaleh Zargar, Fluid inclusion Microthermometry, Isotopes, Hydrothermal Fluid Evolution, Central Lut.*

1- Introduction

At the highest stratigraphic levels of the Eocene volcanic sequence in Iran, numerous copper mineralizations and ore occurrences have been identified. These have been described in various studies as hydrothermal, vein-type, stockwork, and volcanic-hosted. However, due to an inadequate understanding of their genetic models and ore-forming characteristics, many of these deposits have been abandoned, and engineering operations such as drilling and tunneling have often been discontinued without meaningful results. The Qaleh Zargar copper deposit is located approximately 110 Km southwest of Deyhuk and about 200 Km southeast of Tabas. According to the structural-sedimentary zoning of Iran, this area lies in the eastern half of the Central Iranian microcontinent (CIM), roughly in the central part of the Lut Block, in the northwestern section of the South Seh-Changi Sheet, near the Nayband Fault, at coordinates 58° 01′ 06″ E and 32° 23′ 39″ N. A key feature of the Lut Block is its widespread magmatism, particularly in the northern parts, which began during the Jurassic and reached a thickness of up to 2000 meters in the Tertiary, especially during the Eocene (Aghanabati, 2004). Eastern Iran-and notably the Lut Block-has experienced multiple tectonic regimes throughout geological time, resulting in extensive magmatic activity with diverse geochemical characteristics that has created favorable conditions for a variety of mineralizations, including copper, lead, and zinc vein-type deposits such as Seh-Changi (Yusefzadeh et al., 2003), Mahour (Esform, 2011), Qaleh Zari (Karimpour et al., 2006), Hoz-e Raees (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2012), as well as Shourab, Geleh Chah, and Choopan (Lotfi, 1982), Shah-Kuh tin mineralization (Esmaeily et al., 2005), and high-sulfidation epithermal deposits like Chah Shalghami (Arjmandzadeh et al., 2011). The magmatism of this period occurred within a subduction zone setting. The magmas originated from partial melting of the oceanic crust and were variably contaminated by continental crustal material. This study aims to investigate the petrology of volcanic rocks associated with copper, iron, lead, and zinc mineralization, including the identification of constituent minerals, textures, paragenesis, alteration patterns, and detailed fluid inclusion microthermometry and stable isotope (oxygen and sulfur) studies in the Qaleh Zargar copper deposit.

2- Materials and methods

2.1. Laboratory Studies

In this study, following an extensive literature review, a total of 76 samples were collected during field operations from host rocks, mineralized veins, and alteration zones within the Qaleh Zargar copper deposit. Sampling was conducted from surface outcrops down to a depth of 56.2 meters using drill cores. (It should

* Corresponding author: hasanzamanian@ut.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.49852.2519
Received: 2025-06-06
Accepted: 2025-09-27

ISSN: 2717-0764

be noted that within the Qaleh Zargar deposit area, 16 boreholes with a total length of 560 meters and 22 trenches were designed and executed.) Laboratory analyses included the preparation of standard and polished thin sections for transmitted- and reflected-light microscopy. Additionally, double-polished sections were prepared for fluid inclusion studies. These analyses were conducted at the University of Tehran and Tarbiat Modares University.

2.2. Fluid Inclusion Microthermometry

Five double-polished thin sections (80–100 µm thick) were prepared from calcite (carbonate) and quartz veins and veinlets. Petrographic examinations were performed to identify fluid inclusion features, and 38 fluid inclusions were selected for microthermometric analysis.

2.3. Stable Isotope Analyses

2.3.1. Oxygen Isotopes

Two samples of quartz and calcite, taken from the same sites as the fluid inclusion samples, were selected for $\delta^{18}O$ stable isotope analysis. Samples were first crushed to a 60-mesh size at the University of Tehran and then manually purified under a binocular microscope to achieve >99% purity.

2.3.2. Sulfur Isotopes

Two representative samples from mineralized veinlets were selected for $\delta^{34}S$ sulfur isotope analysis.

3. Geology

3.1. Regional Geology of the Lut Block

The Lut Block, extending approximately 900 Km, forms the easternmost part of the Central Iranian microcontinent. It is bounded to the east by the Nehbandan Fault and the Flysch Basin of eastern Iran, and to the west by the Nayband Fault and the Tabas Block (Stocklin, 1968). Magmatic activity in the Lut Block began in the Late Cretaceous and produced basaltic, andesitic, dacitic, and rhyolitic lava flows, along with lesser amounts of shallow intrusive bodies. The oldest intrusive body in central Lut is the Sirch Kuh granitic–granodioritic complex of Middle to Late Jurassic age, located 20 km southwest of Talkhestak (SW of Birjand) (Tarkian et al., 1983).

3.2. Local Geology of the Study Area

The Qaleh Zargar copper prospect, covering an area of 9.38 km², is located in the Lut Desert in eastern Iran, approximately 13.15 km south of the abandoned Seh-Changi lead-zinc mine. The volcanic rocks in the South Seh-Changi region and the study area include andesite, biotite-latite-andesite, trachyandesite, pyroxene andesite, andesite-basalt, and dacite to rhyodacite, as well as pyroclastic rocks such as tuffs and lithic tuffs. Common textures include porphyritic, granular to microgranular, brecciated, colloform, mosaic, and vitriclastic.

4. Discussion

4.1. Mineralization

The mineralized outcrops in the Qaleh Zargar copper deposit appear as scattered hillocks composed of iron, copper, and lead hydroxides, trending approximately northeast-southwest. Mineralization in the area occurs in both primary (hypogene) and secondary (supergene) zones. The secondary mineralization is widespread and comprises sulfide, carbonate, sulfate, and oxide phases.

Primary (hypogene) mineralization includes disseminated magnetite, chalcopyrite, pyrite, chalcocite, and galena. Secondary (supergene) mineral assemblages consist of malachite, azurite, atacamite, covellite, hematite, goethite, limonite, anglesite, cerussite, and siderite.

4.2. Fluid Inclusions

The study of fluid inclusions is a widely used method for thermometric analysis, determining salt composition, and estimating the salinity of mineralizing fluids in ore deposits. In the Qaleh Zargar copper deposit, fine-grained quartz and calcite are the most abundant gangue minerals associated with the ore-

ISSN: 2717-0764

forming fluids. Fluid inclusions observed in this study are primarily single-phase (vapor-rich) and two-phase (liquid-rich), mostly irregular in shape and dark in color. Their sizes range from 2 to 10 microns. Two-phase liquid-rich inclusions are relatively scarce and commonly exhibit irregular or elliptical shapes, with vapor phases occupying approximately 5–30% of the total inclusion volume. Single-phase vapor inclusions are observed sporadically and as isolated inclusions in the host minerals, while the two-phase liquid-rich inclusions also typically appear as isolated inclusions. The homogenization temperatures (Th) of the fluid inclusions range from 136°C to 192°C, with an average of 163.1°C. Salinity varies between 3.55 wt.% and 7.31 wt.%.% NaCl equivalent, with an average of 5.63 wt.%. The decreasing trends in both temperature and salinity suggest fluid mixing between a high-temperature, high-salinity magmatic fluid and a low-temperature, low-salinity meteoric fluid.

4.3. Stable Isotopes

4.3.1. Sulfur Isotopes

Sulfur isotope studies in the Qaleh Zargar copper deposit were conducted on sulfide mineral samples, while oxygen isotope analyses were carried out on silica samples. The $\delta^{34}S$ values of sulfide minerals from the Qaleh Zargar copper deposit range from –6.6‰ to –6.0‰. Using isotope equilibrium equations between sulfide minerals and H_2S in the hydrothermal fluid, the $\delta^{34}S$ values of H_2S are estimated to range from –6.9‰ to -2.6‰.

4.3.2. Oxygen Isotopes

Oxygen isotope values of the hydrothermal fluid were calculated using temperatures obtained from microthermometric studies of fluid inclusions (with a dominant homogenization temperature of 192 °C and an average temperature of 169.75 °C), applying the equation of Zheng (1993b). Oxygen isotope values of hydrothermal fluids in carbonate alteration zones lacking mineralization fall within the meteoric water range but somewhat approach magmatic values that may reflect the reaction of hydrothermal fluids with igneous rocks or indicate the presence of two types of hydrothermal fluids, meteoric and magmatic, in the carbonate alteration zones.

5. Conclusion

The mineralization in the Qaleh-Zargar copper deposit is observed in two forms: vein-type along faults and disseminated throughout the host rocks. Mineralization occurs in both primary (hypogene) and secondary (supergene) stages, with the supergene zone being more extensive. This zone includes sulfide, carbonate, sulfate, and oxide mineral phases. The primary mineralization comprises scattered magnetite, chalcopyrite, pyrite, minor chalcocite, and galena. In contrast, secondary mineralization is characterized by the presence of malachite, azurite, covellite, hematite, goethite, limonite, cerussite, and siderite. The strong positive lead (Pb) anomaly observed in the study area likely results from either contamination of the parent magma by crustal materials or from mantle metasomatism. Based on the data obtained, two fluid sources are proposed for the ore-forming processes. The first is meteoric water, which infiltrated deep through fractures and faults, was heated by intrusive bodies, then ascended to the surface, precipitating metals during its upward migration. The second source is magmatic water derived from intrusive bodies, which ascended to the surface along with meteoric fluids.

The descending surface waters, rich in CO_2 and O_2, interacted with pyrite, producing sulfuric acid and creating a strongly acidic mineralizing environment. This process led to the formation of iron hydroxides and the leaching of copper from the rocks. The fluid associated with the quartz veins shows low salinity, ranging from 3.55 to 7.31 wt% NaCl equivalent, and homogenization temperatures between 136°C and 192°C, indicating fluid mixing during ore deposition. Considering the associated minerals, textures, alteration styles, comparison with known vein-type deposits, and results of microthermometric studies, this deposit is classified as a low-sulfidation epithermal system. The $\delta^{34}S$ values of H_2S in the ore-forming hydrothermal fluids range from –6.9‰ to –2.6‰, suggesting a magmatic origin for sulfur. In the Qaleh-Zargar deposit, sulfur may have originated either from the leaching of primary sulfide minerals within the volcanic host rocks or directly from magmatic hydrothermal fluids. The presence of galena and isotopic fractionation among different sulfide minerals may also contribute to the depletion of $\delta^{34}S$ in some of these

ISSN: 2717-0764

phases. The oxygen isotope values of the hydrothermal fluids associated with mineralized samples fall within the range typical of basaltic rocks, meteoric waters, and sedimentary units, which suggests that the source of oxygen could be the result of interaction between meteoric fluids and andesitic-basaltic and/or sedimentary rocks, or the product of isotopic overlap between magmatic and meteoric waters. These values are also relatively close to magmatic ranges, which may reflect hydrothermal fluid interaction with igneous rocks or the presence and mixing of both meteoric and magmatic fluids within the alteration zones.

6-References

Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, p. 606.

Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., Homam, S.M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran). Journal of Asian Earth Sciences 41, 283-296. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.02.014.

Esform, M., 2011. Geochemistry and Paragenetic Sequence of Minerals in the Mahour Polymetallic Deposit, West Nehbandan (Eastern Iran). M.Sc., Thesis, University of Sistan and Baluchestan, 235.

Esmaeily, D., Nedelec, A., Valizadeh, M. V., Moore, F., Cotton, J., 2005. Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization, Journal of Asian Earth Sciences 25, 961-980. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.09.003.

Esmaeily, D., Nedelec, A., Valizadeh, M.V., Moore, F., Cotton, J., 2005. Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization, Journal of Asian Earth Sciences 25, 961-980. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.09.003.

Karimpour, M.H., Large, R.R., Razmara, M.F., Pattrick, R.A.D., 2006. Bi sulfosalt mineral series and their paragenetic associations in the specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, Qaleh-Zari mine, Iran, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13 (2), 417-432.

Lotfi, M., 1991. Geological and geochemical investigation on the volcanogenic Cu-Pb-Zn-Sb ore mineralization in the Shurab Gale chah and Northwest of Khur, Ph.D thesis, University of Hamburg, p.152.

Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpoor, M.H., 2012. Advanced Geological and Applied Studies Journal, No. 6: Geology, Mineralization, and Fluid Inclusion Studies of the Hoz-e Raees Pb-Zn-Cu Deposit, Eastern Iran. Journal of Advanced Applied Geology 6. (In Persian)

Tarkian, M., Lotfi, M., Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of Mines and Metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran 51, 357-383, http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6664522.

Yusefzadeh, M.H., Gholami, E., 2003. Geological and petrographic study of lead and zinc mineralization indices in the Seh Changi-Hoz-e Raees area, Central Iran. Proceedings of the 7th Symposium of the Geological Society of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)

Zheng, Y.F., 1993. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. Earth Planetery Science Letter 120, 247-263, https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90243-3.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Esform, M., Zamanian, H., Zarasvandi, A., Almasi, A., 2026. Origin of Mineralization and Hydrothermal Fluid Evolution in the Qaleh Zargar Copper Deposit: Evidence from Fluid Inclusion Microthermometry and Stable S and O Isotopes, Central Lut Block (Central Iran). Adv. Appl. Geol. 15 (4), 145-169.
DOI: 10.22055/aag.2025.49852.2519
https://aag.scu.ac.ir/article_20279.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

زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته
زمستان ۱۴۰۴، دوره ۱۵، شماره ۴

مقاله پژوهشی

منشأ کانه‌زایی و تکامل سیال گرمابی در کانسار مس قلعه‌زرگر، شواهدی از ریزدماسنجی میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار S و O، لوت میانی (ایران مرکزی)

مرتضی اسفرم
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
حسن زمانیان
دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
علیرضا زراسوندی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
علیرضا الماسی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
hasanzamanian@ut.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

چکیده
محدوده قلعه‌زرگر در نیمه شرقی خرده قاره ایران مرکزی و در بخش میانی بلوک لوت قرار دارد. سنگ‌های آتشفشانی رخنمون یافته محدوده دارای ترکیب بازالت، آندزیت بازالت، آندزیت، تراکی آندزیت، تراکی داسیت، داسیت، ریوداسیت، ریولیت- ایگنمبریت، توف و لیتیک‌توف است. کانه‌زایی در محدوده شامل کانی‌های اکسیدی(کوپریت، اکسید و هیدروکسید آهن شامل مگنتیت، هماتیت، لیمونیت و گوتیت)، کربنات مس و سرب (آزوریت، مالاکیت و سروسیت) و سولفیدهای مس و سرب (کالکوپیریت، کوولیت، کالکوسیت و گالن) است. بی‌هنجاری مثبت Pb در شمال‌شرقی محدوده شاهدی از آلایش ماگما با مواد پوسته‌ای یا متاسوماتیسم گوشته‌ای است. سیال دارای شوری پایین بین ۳/۵۵ تا ۷/۳۱ درصد وزنی معادل NaCl و دمای همگن شدگی بین ۱۳۶ تا ۱۹۲ درجه سانتیگراد داشته و رخداد اختلاط در سیالات کانه‌ساز را نشان می‌دهد. کانی‌سازی در محدوده قلعه‌زرگر عمدتاً به صورت رگه‌ای و مرتبط با بخش‌های گسله است. مقادیر $\delta^{34}S$ در سیال گرمابی کانی‌ساز حاوی H_2S در دامنه ۶/۹- تا ۲/۶- ‰ برآورد شده که نشانگر منشاء ماگمایی است. منشاء گوگرد در سیستم رگه‌ای موجود در کانسار مس قلعه‌زرگر یا از شستشوی کانی‌های سولفیدی اولیه در سنگ دربرگیرنده آتشفشانی و یا مستقیماً از سیال‌های گرمابی با منشاء ماگمایی بوده و مقادیر ایزوتوپی اکسیژن سیال گرمابی در نمونه‌های همراه با کانی‌سازی در محدوده سنگ‌های بازالتی، آب‌های جوی و سنگ‌های رسوبی قرار می‌گیرد. در مجموع با وجود شواهد به دست آمده از مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌شناسی، ریزدماسنجی میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و اکسیژن منشاء کانه‌زایی در این محدوده را می‌توان از نوع رگه‌ای گرمابی تلقی کرد.

واژه‌های کلیدی: *قلعه‌زرگر، ریزدماسنجی میانبارهای سیال، ایزوتوپ پایدار، تکامل سیال گرمابی، لوت میانی.*

۱-مقدمه
در بالاترین ردیف آتشفشانی ائوسن ایران کانسارها و آثار معدنی متعددی از کانی‌سازی مس وجود دارد که در نوشته‌های مختلف از گونه گرمابی، رگه‌ای، استوک‌ورک، آتشفشانی و ... از آنها یاد شده و اغلب بواسطه عدم شناخت صحیح از مدل زایشی و ویژگی‌های کانه‌زایی، معادن آنها متروکه و عملیات مهندسی (اکتشاف چاه ، تونل و ...) بدون نتیجه رها شده است. کانسار مس قلعه‌زرگر در ۱۱۰ کیلومتری جنوب غرب دیهوک و ۲۰۰ کیلومتری جنوب شرق شهر طبس واقع است با توجه به تقسیمات ساختاری-رسوبی ایران محدوده فوق‌الذکر در نیمه شرقی خرده قاره ایران مرکزی و تقریباً در بخش میانی بلوک لوت و در شمال‌غربی چهارگوش جنوب سه‌چنگی در طول جغرافیایی ″۰۶ ′۰۱ °۵۸ و عرض جغرافیایی ″۳۹ ′۲۳ °۳۲ در نزدیکی گسل نایبند قرار گرفته است. از ویژگی‌های مهم بلوک

لوت، ماگماتیسم گسترده آن بویژه در بخش‌های شمالی که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری، بخصوص ائوسن، ۲۰۰۰ متر ضخامت دارد (Aghanabati, 2004). ماگماتیسم این دوره در بخش فرورانش تشکیل شده، ماگما از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی منشاء گرفته و با پوسته قاره‌ای نیز با نسبت‌های مختلف آلودگی پیدا کرده است (Aghanabati, 2004). شرق ایران و بویژه بلوک لوت بواسطه داشتن موقعیت‌های تکتونیکی مختلف در زمان‌های گذشته، دارای حجم عظیم ماگماتیسم با ویژگی‌های زمین‌شیمی متفاوت است که بعضاً پتانسیل‌های بسیار مناسبی برای تشکیل کانه‌زایی‌های مختلف را فراهم آورده است، از جمله می‌توان به ذخایر مس، سرب و روی رگه‌ای مانند کانسار سه‌چنگی (Yusefzadeh et al., 2003)، کانسار ماهور (Esform, 2011)، قلعه‌زری (Karimpour et al., 2006) و حوض رئیس (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2012)، ذخایر شوراب، گله چاه و چوپان (Lotfi, 1982) و کانه‌زایی قلع شاه‌کوه (Esmaeily et al., 2005) و کانسار اپی‌ترمال سولفید بالا مانند چاه شلجمی (Arjmandzadeh et al., 2011) اشاره کرد. هدف از این پژوهش، سنگ‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی دارای کانه‌زایی مس، آهن، سرب و روی، تعیین کانی‌ها، بافت، پاراژنز، دگرسانی و مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و گوگرد در کانسار مس قلعه‌زرگر می‌باشد که لذا شناخت این گونه از کانه‌زایی‌ها می تواند چشم انداز نوینی را در زمین شناسی و منابع معدنی مس با وجود پتانسیل بسیار بالای معدنی و منابع طبیعی کویر لوت و بویژه محروم بودن و اقتصاد ضعیف مردم منطقه شرق کشور، خلق نماید.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- مطالعات آزمایشگاهی

در این مطالعه، پس از بررسی‌های گسترده کتابخانه‌ای، تعداد ۷۶ نمونه در عملیات صحرایی از سنگ‌های میزبان، رگه‌های معدنی و بخش‌های دگرسان شده کانسار مس قلعه‌زرگر جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری از سطح زمین تا عمق ۵۶/۲ متر (نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری) انجام گرفت(لازم به ذکر می‌باشد در محدوده کانسار قلعه‌زرگر تعداد ۱۶ حلقه گمانه به متراژ ۵۶۰ متر و ۲۲ ترانشه طراحی و اجرا گردیده است). مطالعات آزمایشگاهی شامل آماده‌سازی مقاطع نازک ـ صیقلی (که با میکروسکوپ پلاریزه نور عبوری و بازتابی مطالعه شدند) و برش‌های دوبر صیقل برای مطالعات ریزدماسنجی در دانشگاه تهران(دانشکده مهندسی، آزمایشگاه کانه‌آرایی)، شرکت گرونا و دانشگاه تربیت مدرس(دانشکده علوم پایه، مطالعه مقطع کانه-نگاری) آماده و انجام گردید.

۲-۲- اندازه‌گیری میانبارهای سیال

پنج برش نازک دوبر صیقلی به ضخامت ۸۰ تا ۱۰۰ میکرومتر از رگه‌ها و رگچه‌های کلسیت (کربنات) و کوارتز تهیه شد. مشاهدات سنگ‌نگاری به منظور بررسی شواهد میانبار سیال انجام گرفت و سپس ۳۸ میانبار سیال مورد تحلیل ریزدماسنجی قرار گرفت.

این مطالعات با استفاده از دستگاه Linkam THMSG600 (محفظه گرمایش و سرمایش) با بازه دمایی از ۱۹۶- درجه سانتیگراد تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد و دقت ۱± درجه سانتیگراد در بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. کالیبراسیون دما با استفاده از استانداردهای سنتتیک Synflincانجام گرفت. نرخ گرمایش و سرمایش بین ۱ تا ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه کنترل شد و در نزدیکی دماهای انتقال فاز به ۰/۵ تا ۱ درجه سانتیگراد در دقیقه کاهش یافت.

۲-۳- اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار

۲-۳-۱- ایزوتوپ اکسیژن

دو نمونه کوارتز و کلسیت (۱ نمونه کوارتز و ۱ نمونه کلسیت) از همان محل‌هایی که نمونه‌های میانبار سیال گرفته شده بود، برای آنالیز ایزوتوپ پایدار اکسیژن ($\delta^{18}O$) انتخاب شدند. نمونه‌ها ابتدا در دانشگاه تهران تا اندازه مش ۶۰ خرد شده و سپس به صورت دستی تحت میکروسکوپ (بینوکولار) برای دستیابی به خلوص بیش از ۹۹٪ پاکسازی شدند. پس از جداسازی، نمونه‌ها پودر (بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون) و الک شده و برای حذف آلودگی‌ها با اتانول شسته شدند. آنالیز ایزوتوپی در مرکز تحقیقات ایزوتوپ پایدار دانشگاه اراک انجام شد. برای تحلیل $\delta^{18}O$ در این فرآیند نمونه‌های جامد، با دمای بالا در ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد با استفاده از آنالیز عنصری انجام شد، به گونه‌ای که تمام اتم‌های اکسیژن در ساختار مولکولی به گاز مونوکسید کربن (CO) تبدیل شدند. گاز CO تولیدشده از سیستم‌های خالص‌سازی عبور کرد که شامل تله آب برای حذف رطوبت و ستون پاکسازی برای حذف ناخالصی‌های CO بود. پس از حذف کامل گازهای مزاحم، ستون آزادسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شده و گاز CO خالص به

طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS(Isotope Ratio Mass Spectrometer)) منتقل شد. برای کالیبراسیون و محاسبه، ترکیب ایزوتوپی گاز مرجع CO از طریق مقایسه با استانداردهای بین‌المللی یا استانداردهای ثانویه آزمایشگاهی تعیین شد. نسبت جرمی ۲۸/۳۰ برای تعیین مقادیر $\delta^{18}O$ اندازه‌گیری گردید. در این فرآیند، $\delta^{18}O$با تبدیل نمونه به گاز COاز طریق پیرولیز در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، سپس خالص‌سازی و در ادامه تحلیل توسط دستگاه IRMS، با استفاده از نسبت جرمی ۲۸/۳۰ و کالیبره‌شده بر اساس استانداردهای بین‌المللی اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر $\delta^{18}O$ با دقت ۰.۱‰ گزارش شده و نسبت به (V-SMOW آب اقیانوسی میانگین استاندارد وین، $\delta^{18}O = 0$ ، با عدم قطعیت ۰/۰۲ ‰)؛ آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۱۷) بیان می‌شوند.

۲-۳-۲- ایزوتوپ گوگرد

یک نمونه از رگچه‌های معدنی برای آنالیز ایزوتوپ گوگرد ($\delta^{34}S$)انتخاب شدند. برای تحلیل $\delta^{34}S$ در نمونه‌های جامد، نمونه‌های پودر شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد جهت آنالیز عنصری، حرارت داده شدند که منجر به تولید گاز SO_2 شد. گاز SO_2 تولیدشده از سیستم و ستون‌های متوالی عبور کرد که در این فرآیند رطوبت توسط تله آب حذف و ناخالصی‌های گازی توسط ستون پاکسازی حذف شدند. سپس ستون جذب در دمای ۲۲۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا گاز SO_2 تجمع‌یافته آزاد شود و به طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS) منتقل گردد. درIRMS، ترکیب ایزوتوپی گوگرد با اندازه‌گیری نسبت جرم ۶۴/۶۶ که مربوط به نسبت $^{34}S/^{32}S$ نمونه است، تعیین شد. برای اطمینان از دقت و تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها، کالیبراسیون‌های مکرر با استفاده از استاندارد بین‌المللی ($\delta^{34}S = +16.9 \pm 0.2‰$ VCDT) IAEA-S-4و یک استاندارد ثانویه آزمایشگاهی ($\delta^{34}S = -6.3$ ± 0.2‰ VCDT) انجام شد.

۳- زمین‌شناسی

۳-۱- زمین‌شناسی عمومی بلوک لوت

بلوک لوت، با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر، شرقی‌ترین بخش خرد قارهٔ ایران مرکزی است. مرز شرقی آن با گسل نهبندان و حوضهٔ فلیشی شرق ایران و مرز غربی آن با گسل نایبند و بلوک طبس مشخص می‌شود (Stocklin,1968). فعالیت ماگمایی بلوک لوت از کرتاسهٔ پسین آغاز شده و گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی همچنین مقدار کمتری نفوذی‌های نیمه عمیق حاصل شده‌اند. قدیمی‌ترین توده نفوذی لوت مرکزی را توده گرانیتی- گرانودیوریتی سرخ کوه به سن ژوراسیک میانی تا پایانی در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب تلخشتک (جنوب غربی بیرجند) معرفی نموده‌اند (Tarkian et al.,1983).

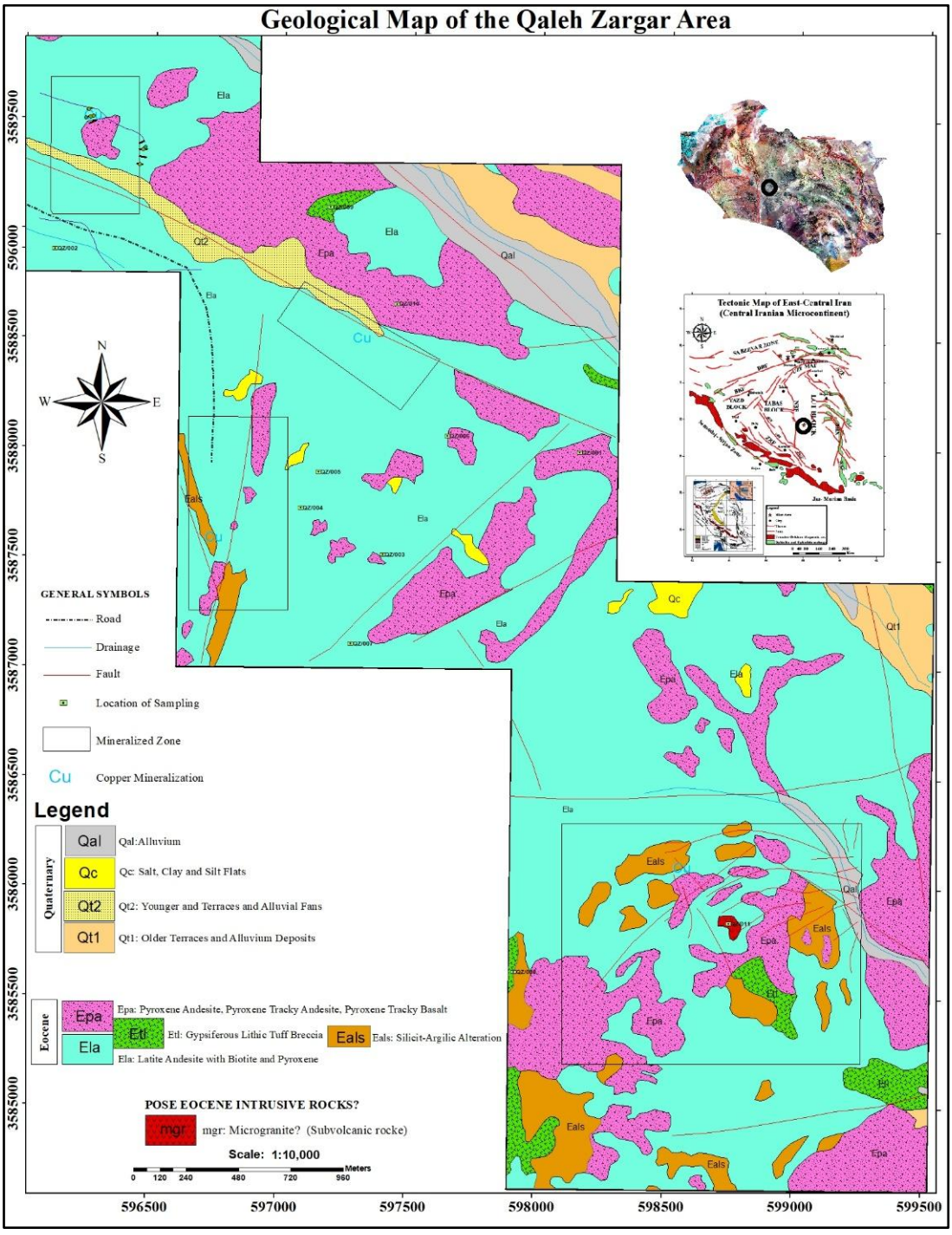
۳-۲- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مس قلعه‌زرگر با مساحت ۹/۳۸ کیلومتر مربع در منطقه کویری لوت در شرق ایران و در فاصله ۸/۱۵ کیلومتری جنوب معدن متروکه سرب و روی سه‌چنگی قرار دارد. بر اساس نتایج مطالعات گذشته، واحدهای زمین شناسی رخنمون یافته در این محدوده عمدتاً مربوط به سنگ‌های آتشفشانی ائوسن بوده (Kluyver et al., 1981) که متاثر از یک دگرسانی سیلیسی در ارتباط با تشکیل رگه‌های سیلیسی در منطقه می‌باشند. آثار معدنکاری قدیمی در امتداد یک بخش سیلیسی در محدوده با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی به صورت حفر ترانشه، چاهک و یک چاه قائم به عمق ۳۱ متر با دهانه ۲*۳ متر و سربارهای قدیمی دیده می‌شوند. سنگ‌های محدوده جنوب سه‌چنگی و محدوده مورد مطالعه از نوع سنگ‌های آتشفشانی دارای ترکیب سنگ شناسی آندزیت، بیوتیت لاتیت آندزیت، تراکی آندزیت، پیروکسن آندزیت (شکل ۲-a-b-c-d-e-f)، آندزیت بازالت (شکل ۲-g)، داسیت تا ریوداسیت (شکل ۲-h) و سنگ‌های آذرآواری شامل توف و لیتیک توف هستند (شکل ۲). بافت‌های عمده در این سنگ‌ها پورفیری، گرانولار تا میکروگرانولار، برشی، کلوفرم، موزائیکی و ویتروکلاستیک می‌باشد. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز که در مقاطع میکروسکوپی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به عنوان یکی از فراوان‌ترین کانی-های موجود در این سنگ‌ها می‌باشد و در انواع نمونه‌های آندزیتی بیش از ۵۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل داده و در این سنگ‌ها سالم مانده و تحت تاثیر دگرسانی قرار نگرفته‌اند. بلورهای پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و دارای ماکل پلی‌سنتتیک، بافت غربالی و منطقه‌بندی می-باشند. در تعدادی از پلاژیوکلازها در حاشیه حالت غبار آلود مشاهده می‌شود، که این شواهد دلیلی بر اختلاط ماگمایی می‌باشد (Sumner and Wolff,2003; Winter, 2014). زمینه میکرولیتی شامل بلورهای ریز پلاژیوکلاز نیز می‌باشد، که این اختلاف زیاد و ناگهانی بین اندازه دانه‌های فنوکریست و زمینه را نتیجه تبلور دومرحله‌ای می‌دانند، که کانی‌های درشت

بلور به صورت اولیه در عمق تشکیل شده و معرف مراحل اولیه تبلور می‌باشند، در صورتی‌که ریز بلورهای خمیره در نتیجه انتقال ناگهانی مخلوط بلور و مذاب به قسمت‌های بالایی پوسته زمین حاصل شده‌اند (Sumner and Wolff,2003; Winter, 2014). کوارتز در منطقه مورد مطالعه هم به صورت رگه- رگچه و همزمان با کانه‌زایی و هم به شکل ثانویه دیده می‌شوند. کوارتز در ابعاد ریزبلور تا بلورهایی با ابعاد ۳۰۰ میکرون دیده می‌شود. انواع درشت‌تر کوارتز خودشکل هستند و بلورهای نسبتاً خودشکل کوارتز به صورت رگچه‌هایی که حاصل به دنبال هم قرار گرفتن دانه‌های کوارتز است، مشاهده می‌شوند وکانی‌های تیره (کانه‌های فلزی مانند هماتیت و پیریت) که حدود ۲۰-۵ درصد حجمی کانی‌ها را تشکیل می‌دهند. در بعضی نمونه‌های مورد مطالعه بیوتیت‌های مشاهده شده اولیه می‌باشند و برخی از این بیوتیت‌ها مقداری کلریتی شده‌اند، در نهایت کانی‌های ثانویه از قبیل سریسیت، کانی‌های رسی، کلسیت، کلریت، اپیدوت و کوارتز ثانویه در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود که حاصل دگرسانی کانی‌هایی همچون پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت می‌باشند. ترتیب قرارگیری سنگ‌های آتشفشانی در محدوده قلعه‌زرگر و جنوب سه‌چنگی از قاعده شامل سنگ‌های پیروکلاستیک با ترکیب اسیدی، حضور جریان‌های با ترکیب حدواسط (بیشتر آندزیت و داسیت) و در ادامه جریان‌های پیروکسن آندزیتی مشاهده می‌شود و جوانترین واحدهای مشاهده شده سنگ‌های پیروکلاستیک و گدازه‌های ایگنمبریتی می‌باشد (شکل ۲-d-e).

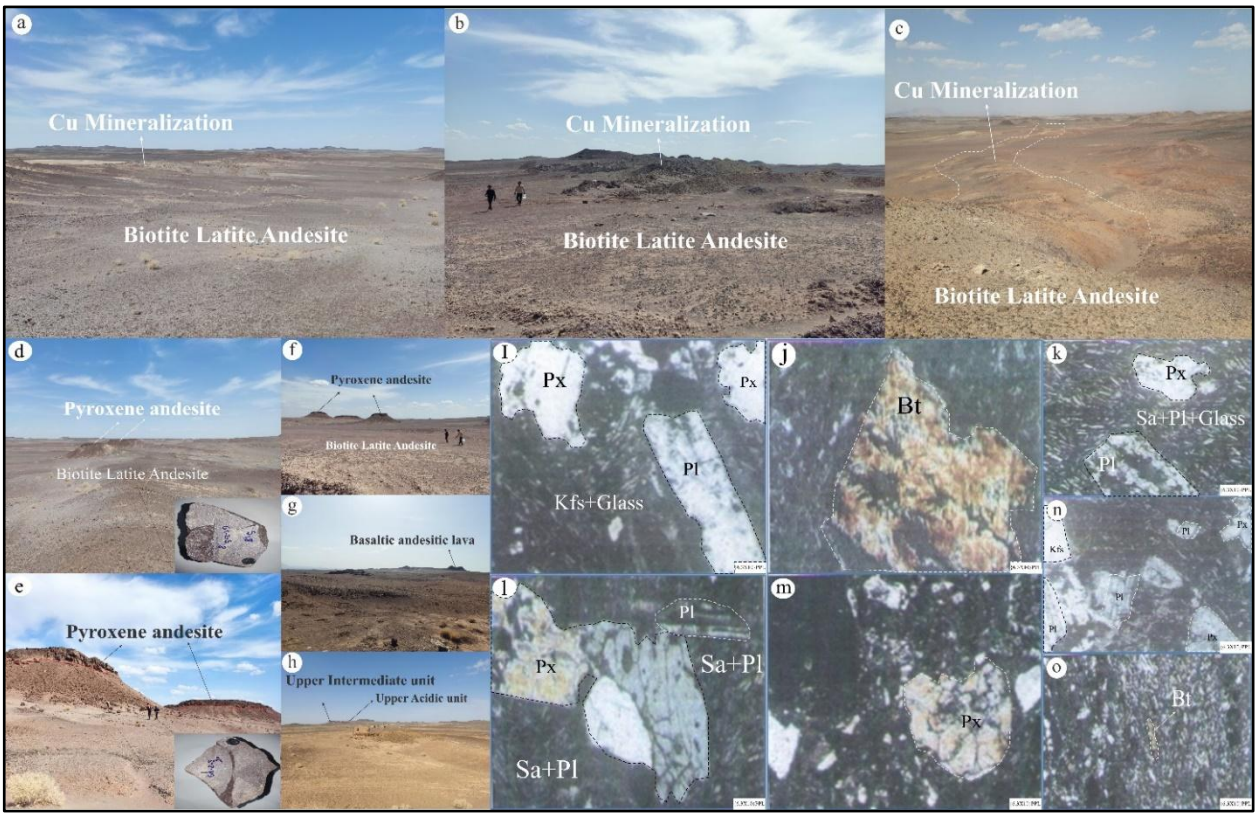
واحد بیوتیت لاتیت آندزیت بیشترین گسترش را در محدوده قلعه‌زرگر دارا بوده و دارای سیمای هموار بوده و برنگ خاکستری تا سبز کمرنگ و در بسیار از مناطق همراه با یک دگرسانی خفیف تا متوسط آرژیلیک می‌باشد (۲-d). درشت بلورهای پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، پیروکسن و بیوتیت در زمینه‌ای از میکرولیت‌های ریزدانه است (شکل ۲-i). درشت بلورهای مشاهده شده در سنگ حاوی پلاژیوکلاز با بلورهای منشوری تا قطور شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار حاوی ماکل مرکب کارلسباد – پلی‌سنتتیک با اندازه ۰/۸۵ × ۴/۱ میلیمتر و درصد حجمی ۲۰-۲۵ درصد بوده است. فلدسپات (ارتوز) با بلورهای بی‌شکل و پراکنده در متن نمونه، با درصد حجمی حدود ۵-۷ درصد، پیروکسن (اوژیت) با بلورهای بی‌شکل و با برجستگی بالا، با دو سیستم رخ عمود بر هم و با اندازه متوسط ۰/۵ × ۶ میلیمتر و درصد حجمی ۱۵-۱۰ درصد و بیوتیت با بلورهای منشوری قطور تا بلند و تا حدودی اوپاسیتی شده و از طرفی نشان دهنده چند رنگی از قهوه‌ای تیره تا روشن است. گاه تیغه‌هایی از روتیل سطح مقطع بیوتیت را قطع نموده و ساختار زاگینیتی (Sagenitic Structure) که سیمای ویژه‌ای از قرارگیری بلورهای ظریف درون یک کانی دیگر به شکل شبکه-ای، مشبک یا تار عنکبوتی اطلاق می‌شود(رشد بلورهای سوزنی، الیافی یا منشوری نازک بصورت شبکه‌ای درون کانی‌های دیگر)، پیدا نموده است (شکل ۲-j)، لازم به ذکر است که رشد بلورهای سوزنی معمولاً در مراحل پایانی تبلور ماگمایی یا در حفره‌های هیدروترمال رخ می‌دهد و دمای نسبتاً پایین و وجود عناصر خاص (Ti برای روتیل، Fe برای هماتیت و غیره) شرایط را برای تشکیل این ساختار فراهم می‌کند. در نمونه لاتیت آندزیت بیوتیت (شکل ۲-a-b-c) و لاتیت آندزیت پیروکسن‌دار (شکل ۲-d-e) که از دیدگاه ترکیب کانی‌شناسی و بافت میکروسکوپی تقریباً شبیه لاتیت آندزیت بیوتیت بوده با این تفاوت که ریزبلورهای فلدسپار در زمینه خیلی ریزبلورتر شده‌اند و از سویی درصد شیشه کم شده، اما دگرسانی کربناتی‌شدن در سطح مقطع معمول‌تر است. درصد بلورهای بیوتیت نسبت به پیروکسن بیشتر است. بافت این سنگ غالباً پورفیری با زمینه شیشه‌ای و سانیدین می‌باشد (شکل۲-k). در نمونه تراکی‌آندزیت پیروکسن و بیوتیت‌دار با بافت میکرولیتیت پورفیریتیک از زمینه‌ای متشکل از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز همراه با تیغه‌های باریک و ریز سانیدین با درصد حجمی ۶۰ تا ۶۵ درصد تشکیل شده و در داخل آن درشت بلورهای پلاژیوکلاز فلدسپار پتاسیک و بیوتیت و پیروکسن (اوژیت) قرار گرفته‌اند (شکل ۲-l). پیروکسن آندزیت در محدوده قلعه‌زرگر از وسعت کمی برخوردار بوده و بصورت لکه‌های تیره و مشخص در میان واحد لاتیت آندزیت دیده می‌شود (شکل ۲-d-e-f). بافت غالب این سنگ پورفیری با زمینه شیشه‌ای و سانیدین می‌باشد. در این سنگ‌ها درشت بلورهای پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز (با بلورهای منشوری حاوی ماکل کارلسباد-آلبیت) مجموعاً با درصد تقریبی ۲۰٪ در زمینه‌ای از میکرولیت پلاژیوکلاز و ریزبلورهای باریک و طویل سانیدین که توسط شیشه همراهی می‌شوند، قرار دارند (شکل ۲-n-m). واحد لیتیک توف در بسیاری از نقاط احتمالاً در نتیجه ته‌نشینی در محیط‌های آبی یا نیمه آبی و تحت تاثیر سیالات شور یا

هیدروترمال در فازهای تبخیر قرار گرفته و ژیپس رسوب یا دگرگون شده و در محدوده قلعه‌زرگر غالباً همراه با مقادیر زیادی ژیپس در زیر واحد پیروکسن آندزیت قرار گرفته است (شکل ۲-o). رنگ این واحد در رخنمون سطحی سبز روشن بوده و در سطح خردشدگی زیادی نشان می‌دهد. ضخامت این واحد ۵ تا ۱۵ متر متغیر است.



شکل۱- نمایی از نقشه زمین‌شناسی محدوده قلعه‌زرگر (تهیه شده در مطالعه حاضر)، نقشه تکتونیک شرق- مرکز ایران برگرفته از (Alavi, 1991).

Fig. 1. A view of the geological map of the Qaleh Zargar area (Produced in the current study), based on the tectonic map of East-Central Iran (adapted from Alavi, 1991).



شکل ۲- (a) نمایی از کانه‌زایی مس در سنگ میزبان بیوتیت لاتیت آندزیت در کانسار مس قلعه‌زرگر، دید به سمت شمال‌غربی، (b) نمایی از موقعیت ترانشه‌های حفر شده و گمانه‌های حفاری شده، دید به سمت جنوب‌شرقی، (c) نمایی از کانه‌زایی مس و توپوگرافی کانسار مس قلعه‌زرگر، دید به سمت شمال، (d) نمایی از واحد بیوتیت لاتیت آندزیت، (e) نمایی از واحد پیروکسن آندزیت، (f) نمایی از واحد پیروکسن آندزیت در محدوده قلعه‌زرگر و جنوب سه‌چنگی، دید به سمت جنوب‌شرقی، (g) نمایی از گدازه‌های آندزیت بازالتی، دید به سمت جنوب‌غربی، (h) نمایی از گدازه‌های تراکی آندزیتی،دید به سمت شمال‌غرب، i) نمایی از بافت هیالوپیلیتیک پورفیریک که در آن درشت بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در زمینه‌ای از ریز بلورهای باریک فلدسپار و شیشه، (j) نمایی از بیوتیت با ساختار زاگینیتی، (k) نمایی از بافت هیالوپیلیتیک جریانی با درشت بلورهای پیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از ریز بلورهای باریک و طویل سانیدین و پلاژیوکلاز به همراه شیشه بین‌دانه‌ای، (l) نمایی از بافت گلومروپورفیریتیک که بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در زمینه‌ای جریانی از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز و سانیدین، ((m) نمایی از فراگمنت آندزیتی پیروکسن‌دار در یک لاپیلی توف ولکانیکی، (n) نمایی از بافت هیالوپیلیتیک پورفیریتیک با درشت بلورهای پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیک و پیروکسن و (o) نمایی از قطعات آندزیت بیوتیت‌دار در لاپیلی توف ولکانیکی. (Px: پیروکسن، Bt: بیوتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Sa: سانیدین)(علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney and Evans, 2010).

Fig.2. (a) View of copper mineralization in the biotite-latitic andesite host rock at the Qaleh-Zargar copper deposit, looking northwest, (b) View of the excavated trenches and drilled boreholes, looking southeast, (c) View of copper mineralization and the topography of the Qaleh-Zargar copper deposit, looking north. (d) View of the biotite-latitic andesite unit, (e) View of the pyroxene andesite unit, (f) View of the pyroxene andesite unit within the Qaleh-Zargar and southern Seh-Changi area, looking southeast, (g) View of basaltic andesite lava flows, looking southwest, (h) View of trachy-andesitic lava flows, looking northwest, (i) View of the hyalopilitic porphyritic texture showing coarse plagioclase and pyroxene crystals set in a fine-grained feldspar and glass matrix, (j) View of biotite with a zig-zag structure, (k) View of flow hyalopilitic texture with coarse pyroxene and plagioclase crystals in a groundmass of fine, elongated sanidine and plagioclase crystals with interstitial glass, (l) View of the glomeroporphyritic texture with plagioclase and pyroxene crystals in a flow groundmass of plagioclase and sanidine microlites, (m) View of a pyroxene-bearing andesite fragment within a volcanic lapilli tuff, (n) View of hyalopilitic porphyritic texture with coarse plagioclase, potassium feldspar, and pyroxene crystals and (o) View of biotite-bearing andesite fragments in volcanic lapilli tuff. (Px: pyroxene, Bt: biotite, Pl: plagioclase, Sa: sanidine) (Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans, 2010).

۴- بحث

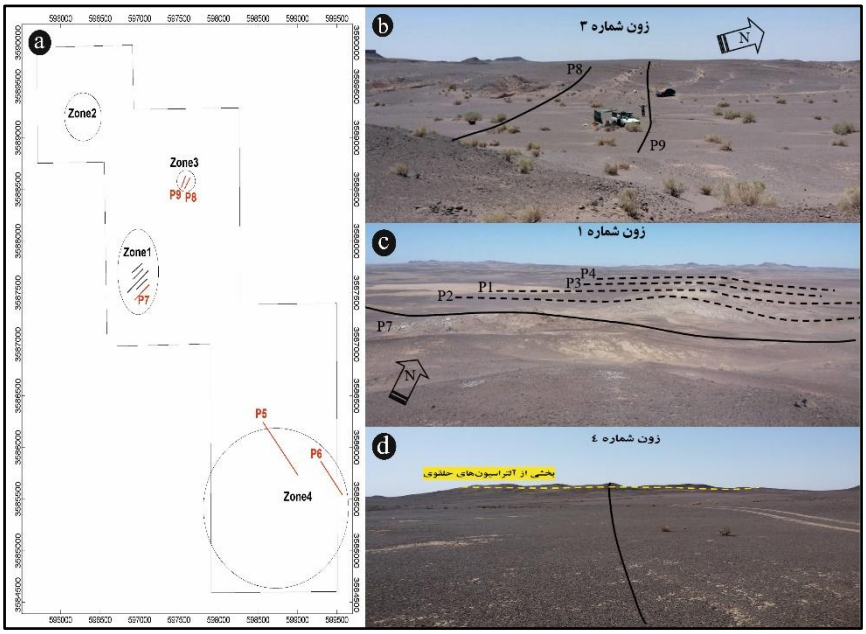
۴-۱- کانه‌زایی

رخنمون‌های کانه‌زایی در کانسار مس قلعه‌زرگر بصورت تپه ماهوری و ناپیوسته از هیدروکسیدهای آهن، مس و سرب با امتداد تقریباً شمال‌شرقی- جنوب‌غربی می‌باشد. کانه‌زایی در منطقه به صورت بخش‌های اولیه (درون‌زاد) و ثانویه (برون‌زاد) است که بخش ثانویه(برون‌زاد)، دارای گستردگی زیادی هست و دارای فاز سولفیدی، کربناتی، سولفاتی و اکسیدی است. کانه‌زایی اولیه (درون‌زاد) شامل مگنتیت به صورت پراکنده، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت، گالن و کانی‌زایی ثانویه (برون‌زاد)، شامل مالاکیت، آزوریت، آتاکامیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، آنگلزیت، سروسیت، سیدریت است. در کانسار مس قلعه‌زرگر ۴ بخش کانه‌دار شناسایی و بررسی گردید (شکل ۳-a). بخش شماره ۱ به عنوان بخش اصلی کانی‌سازی محدوده قلعه‌زرگر قرار دارد که عملیات ژئوفیزیک در این بخش متمرکز بوده است که به صورت یک رگه سیلیسی همراه با اکسید و هیدروکسیدهای آهن فراوان در راستای گسلی با امتداد N25W75SW داخل واحد بیوتیت لاتیت آندزیت تشکیل گردیده که طول آن به ۸۰۰ متر می‌رسد (Rocky, 2016). کانی‌سازی در بخش‌های مرکزی و جنوبی رگه به صورت مالاکیت، کالکوسیت و کوولیت همراه با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شکل گرفته که در بخش جنوبی ۳ رگه کانه‌دار تقریباً موازی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر تا ۲ متر مشاهده می‌شود (شکل ۳-c). بخش شماره ۲ در بخش شمالی و در فاصله ۱/۵ کیلومتری شمال‌غرب بخش کانه‌دار شماره ۱ حداقل در سه نقطه بروی رگه سیلیسی کانه‌دار مشاهده می‌شود. این بخش در مجاورت آبراهه قرار گرفته و توسط آبرفت‌های جوان پوشیده شده است. بخش کانه‌دار شماره ۳ در فاصله تقریبی ۹۰۰ متر در شمال‌شرقی بخش اصلی (بخش شماره ۱) و در فاصله ۱/۳ کیلومتری جنوب‌شرقی بخش کانه‌دار شماره ۲ قرار دارد. سیستم کانه‌زایی در این بخش مشابه دو بخش دیگر بوده و رگه سیلیسی دارای کانه‌های مس شامل مالاکیت و بندرت کالکوسیت بوده و ضخامت رگه کانه‌دار در سطح حدود ۵۰ سانتیمتر است (شکل ۳-b). بخش کانه‌دار شماره ۴ در بخش جنوبی محدوده و در فاصله ۱/۵ کیلومتری جنوب شرقی بخش اصلی (بخش کانه‌دار شماره ۱) قرار گرفته که بصورت یک بخش سیلیسی آرژیلیتی نسبتاً گسترده با یک ساختار حلقوی بوده که سنگ دربرگیرنده این بخش عمدتاً واحد لاتیت آندزیت با دگرسانی سیلیسی- آرژیلیتی است. سیلیس‌های کریپتو کریستالین سفید تا کرم و در برخی نقاط دارای پیریت دانه پراکنده در زمینه بوده که غالباً به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. رنگ این مجموعه زرد تا قهوه‌ای بوده بطوریکه در بین دیگر واحدهای سنگ‌شناختی منطقه بخوبی نمایان می‌باشد (شکل ۳-d).

نفوذ آب‌های سطحی در رگه‌های معدنی باعث انحلال و اکسایش سولفیدها و ایجاد بخش‌های غنی شده از ترکیبات مس و سرب و روی می‌شوند (Hitzman et al., 2003; Ramdohr, 2013). آب‌های غنی از اکسیژن و گاز کربنیک ضمن انحلال سولفیدها، آب اسیدی قوی ایجاد می‌کند که باعث شستشوی و انحلال عناصر فراوانی مانند کالکوپیریت و پیریت حل شده و بجای آنها هیدروکسیدهای آهن مانند لیمونیت و سولفوریک اسید تولید می‌شوند (Guilbert and Park, 1986 ; Evans, 1997). به نظر می‌رسد محلول‌های گرمابی اسیدی و غنی از سیلیس عامل اصلی دگرسانی در سنگ‌های مورد مطالعه و گسترش بخش‌های دگرسانی می‌باشند. حجم کانه‌زایی در رخنمون‌های کانسار مس قلعه‌زرگر بر اثر فرآیندهای برون‌زاد(ثانویه) تشکیل شده و حجم کانی‌های تشکیل شده متعدد و گسترده بوده است و بر اساس مطالعات و بررسی‌های پتروگرافی، پراش پرتو ایکس تعدادی از این کانی‌ها شناسایی شده‌اند که به توصیف بعضی از آنها در این پژوهش پرداخته می‌شود.

۴-۱-۱- کانی‌های کربناتی

مالاکیت از فراوان‌ترین کانی‌ها در بخش‌های سطحی است و در امتداد شکستگی‌ها تا متراژ ۱۹ متری بر اساس نتایج حفاری مغزه‌گیری قابل مشاهده است. این کانی بیشتر بصورت رگچه‌ای تشکیل شده و در زیر میکروسکوپ برنگ سبز تیره بوده و دارای بافت‌های کلوفرمی، گل‌کلمی، رگچه‌ای و توده‌ای در کانسار مس قلعه‌زرگر هستند که نشاندهنده تشکیل این کانی در دمای پایین است (Sumner and Wolff, 2003). به نظر می‌رسد که مالاکیت از محلول‌های رقیق‌تر از مس و تحت شرایط فشار دی اکسید کربن پایین‌تر و آزوریت نسبت به آن از محلول‌های غلیظ‌تر از مس و در شرایط فشار دی اکسید کربن بالاتر شکل گرفته است، مقدار آزوریت در کانسار مس قلعه‌زرگر کمتر از مالاکیت می‌باشد (شکل ۴-i-j).



شکل۳- (a) نمایی از موقعیت بخش‌های کانه‌زایی و مقاطع مطالعات زمین‌فیزیک در کانسار مس قلعه‌زرگر، (b) نمایی از مقاطع P8 و P9 اجرا شده در بخش شماره ۳، (c) نمایی از مقاطع اجرا شده در دو فاز مطالعات زمین‌فیزیک در بخش شماره ۱ و (d) نمایی از مقاطع اجرا شده در نزدیکی ساختارهای حلقوی و بخش شماره ۴.

Fig.3. (a) View showing the location of mineralized zones and geophysical survey profiles in the Qaleh Zargar copper deposit, (b) View of profiles P8 and P9 conducted in mineralized zone No. 3, (c) View of profiles from two phases of geophysical surveys carried out in zone No. 1 and (d) View of profiles conducted near ring structures and mineralized zone No. 4.

۴-۱-۲- کانی‌های اکسیدی

کوپریت به صورت ثانویه در حفره‌ها و شکستگی‌ها به همراه مالاکیت تشکیل شده است. هیدروکسیدهای آهن، تمام رخنمون‌ها را در محدوده کانی‌زایی شده بشدت آغشته نموده‌اند. هماتیت از اکسایش سولفیدهای اولیه و مگنتیت(مارتیتی شدن) حاصل شده‌اند. اکسید و هیدروکسیدهای آهن شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت بوده است. این کانی‌ها گاهی همراه با مالاکیت در رگه‌های کانه‌دار و به صورت سطحی در طی فرآیندهای ثانویه تشکیل شده‌اند. در اثر پدیده انحلال و اکسیداسیون سطحی، کانی‌های سولفیدی در قسمت سطحی دچار انحلال می‌شوند و در نتیجه یون گوگرد آنها از محیط خارج و هیدروکسیدهای آهن برجای مانده‌اند، عملکرد آب‌های جوی از خلال درزه‌ها و شکستگی‌ها موجب اکسید شدن کانه-های اکسیدی و سولفیدی شده و تشکیل هیدروکسیدهای آهن را داده است (Shahabpour, 2001). کانی مگنتیت بعنوان فاز اولیه و یا فاز اکسیدی بصورت پراکنده و منفرد مشاهده می‌شود. فراوان‌ترین کانی اکسیدی در این بخش است که با افزایش مقادیر اکسیژن در بخش‌های فوقانی کانسنگ، شرایط تشکیل آن مهیا شده است .آب‌های جوی غنی از اکسیژن اغلب به عنوان بهترین منبع خارجی تأمین کننده اکسیژن مطرح هستند. تشکیل اکسیدهای آهن به همراه کربناتهای مس(مالاکیت و آزوریت)، همگی شواهد کانه‌زایی سطحی می باشند. لیمونیت در قسمت‌های سطحی، درز و شکاف‌های را پر کرده و اغلب به رنگ زرد تا قهوه‌ای دیده می‌شوند. این کانی محصول دگرسانی نهایی اکسیدهای آهن است. گوتیت بیشتر بصورت جانشینی، رگچه‌ای، کلوفرمی و دانه‌های پراکنده است. گوتیت با رنگ خاکستری و انعکاس داخلی قرمز رنگ، قابل تشخیص و کاملاً جانشین پیریت‌های شکلدار شده است. بافت کلوفرمی و جعبه مانند از اشکال متنوع بافت‌های ثانویه و نشانه حرکت محلول-های کم دما در محیط‌های سطحی می‌باشند (Guilbert and Park, 1986). در اثر عملکرد آب‌های گرم اکسیدهای آهن به نوع آبدار گوتیت تبدیل شده‌اند. حضور گوتیت نشان دهنده نسبت اندک پیریت به کالکوپیریت، میزان اسیدیته پائین و میزان سولفید کل پائین می‌باشد (Klein et al., 1993).

۴-۱-۳- کانی‌های سولفیدی

گالن در شمال‌شرقی محدوده مورد مطالعه به شکل توده‌ای و به شکل رگچه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۴-b). گالن به طور بخشی و اغلب از حاشیه به سروسیت تبدیل شده است (شکل ۴-b-c-d). کانی کوولیت نیز از کانی‌های ثانویه مس بوده که در حاشیه گالن و جانشینی حاشیه‌ای کالکوسیت گاهی دیده می‌شود و رنگ کوولیت در زیر میکروسکوپ آبی و دارای چند رنگی و انیزوتروپی شدیدی است (شکل ۴-c-d). این کانی نه تنها در مناطق سطحی، بلکه در عمق نیز مشاهده می‌شود بویژه در مناطق برشی شده گسترش بیشتری دارد. کالکوپیریت اغلب از حاشیه به گوتیت تبدیل شده است (شکل ۴-b-d). روابط پاراژنزی در سنگ نشان دهنده تشکیل کالکوپیریت پس از گالن است (شکل ۴-b-e). در بخشی از سنگ ذرات ریز پیریت وجه‌دار نیز به همراه کالکوپیریت-گوتیت دیده شد. پیریت و کالکوپیریت با بافت دانه پراکنده در واحد گدازه‌ای بصورت دانه-های ریز حضور دارند و گاهی توسط محلول‌های اکسیدان به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) تبدیل شده‌اند. معمولاً کالکوپیریت در حضور اکسیژن، آب و در محیط-های کم عمق جایی که شرایط برای اکسید شدن آنها مهیا باشد، ناپایدار است (Ohmoto and Goldhaber, 1997). کالکوسیت به صورت دانه پراکنده، پرکننده فضاهای خالی و به همراه پورفیری‌های پلاژیوکلاز در زمینه آندزیت حضور دارد (شکل ۴-e-f). رخداد تشکیل کانه‌ها و بافت بصورت توده‌ای، پراکنده دانه، رگچه‌ای بوده و ابعاد گالن و کالکوپیریت(۵۰ میکرون تا بیش از ۳-۲ میلی‌متر)، کوولیت (۱۰۰-۵۰ میکرون) است. بی-هنجاری به شدت مثبت Pb در شمال‌شرقی محدوده مورد مطالعه حاصل آلایش ماگمای سازنده این سنگ‌ها با مواد پوسته‌ای و یا متاسوماتیسم گوشته‌ای است (Kamber et al., 2022; Srivastava and Singh, 2004).

۴-۲- انواع رگه و رگچه‌ها در منطقه و تاثیر آن بر روی دگرسانی

فعالیت سیالات گرمابی پس از جایگیری توده های نفوذی نیمه عمیق(به شکل تپه ماهوری و با ریخت‌شناسی پست با ترکیب بیوتیت پیروکسن مونبخشیت پورفیری که در بخش شمال و شمال شرقی محدوده سه‌چنگی برونزد دارد) و نفوذ سیالات بداخل درزه و شکستگی‌های متاثر از تکتونیک محدوده (گسل نایبند در فاصله ۵۲ کیلومتری غرب محدوده قلعه‌زرگر واقع است) می‌توان گفت کانه‌زایی تا حدود زیادی مدیون وجود شکستگی‌ها و توده‌های نفوذی منطقه می‌باشد. شدت کانه‌زایی و دگرسانی در بخش‌هایی از توده و سنگ‌های اطراف که متحمل خرد شدگی شدیدتری شده‌اند، نسبتًا بالاست. رگچه‌های سیلیسی دارای ضخامت‌های مختلف هستند. در بررسی میکروسکوپی، نسل‌های مختلفی از رگچه‌ها با محتویات متفاوت شناسایی شده‌اند. انواع این رگچه‌ها از قدیم به جدید(بر اساس تقاطع و جابه‌جایی‌های آنها نسبت به همدیگر) عبارتند از:

۴-۲-۱- رگچه های سیلیسی

این رگچه‌ها عمدتاً در بخش دگرسانی سیلیسی حضور دارند و حاوی بلورهای نسبتاً ریز دانه کوارتز هستند. مطالعات سنگ-شناسی نشان می‌دهد که این رگچه‌ها نسبت به سایر رگچه‌های موجود در منطقه زودتر تشکیل شده‌اند (شکل ۴-g). تشکیل این رگچه‌ها در اغلب سنگ‌های منطقه می‌تواند نشانگر این باشد که محلول‌های گرمابی که سبب دگرسانی سنگ‌های منطقه شده‌اند عمدتاً اسیدی و حاوی مقادیر بالای سیلیس بوده‌اند. برخی از رگچه‌های سیلیسی حاوی مواد معدنی از جمله سرب بوده که به نظر می‌رسد که این رگچه‌ها متحمل نفوذ دوباره سیال گرمابی شده و یا اینکه سیال حاوی سیلیس و ماده معدنی بوده و همزمان با ورود سیال به شکستگی‌ها، سیلیس به همراه ماده معدنی نهشته شده‌اند (شکل ۴-h).

۴-۲-۲- رگچه‌های کربنات

رگچه‌های کربناتی آخرین رگچه‌هایی هستند که در سنگ‌های منطقه نفوذ کرده و باعث تشکیل کربنات در فضای خالی درز و شکاف‌های موجود در سنگ‌ها شده‌اند (شکل ۴-h). این رگچه-ها، رگچه‌های سیلیسی را قطع نموده‌اند (شکل ۴-h). رخنمون-های دگرسان شده حاوی کائولینیت عمدتاً به رنگ سفید می-باشد و با وجود کوارتز نرم و سست می‌باشند. کائولینیت‌های مذکور که با آنالیز XRD مشخص شدند در تماس با زبان حالت چسبندگی از خود نشان می‌دهند و عمدتاً ریز دانه می‌باشد و احتمالاً جانشین برخی کانی‌ها به خصوص فلدسپات‌ها می‌شود. کائولینیت بیانگر شرایط تشکیل در PH حدود ۳-۴ هستند و تحت شرایط دمایی بین ۱۵۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شود (Zarasvandi, 2007) که در کانسار مس قلعه‌زرگر که با آنالیز XRD مشخص شده است نشانه‌ای از دگرسانی آرژیلیک در منطقه و مرتبط با محیط گرمابی می‌باشد. با توجه به مشاهدات صحرایی و توجه ویژه به نتایج مطالعات میکروسکوپی

نمونه‌های برداشت شده از حفاری‌هایی انجام گرفته، کانه‌زایی و نحوه رخداد کانه‌ها در کانسار مس قلعه‌زرگر، به ۵ بخش قابل تفکیک می‌شود. که عبارتند از:

الف. بخش اکسیدی که در بالاترین سطح قرار داشته و کانه-های پیریت و گالن در این بخش نسبت به سایر سولفیدها بیشتر مشاهده شده و همچنین هماتیت، لیمونیت، گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کربنات‌ها و سولفات‌های سرب در این بخش از سطح زمین تا حدود ۸-۱۱ متری قابل مشاهده است.

ب. بخش اکسیدی- سولفیدهای ثانویه که کمی پایین‌تر از سطح قرار دارد و در این بخش کانه‌های اکسیدی و کربناتی به همراه کالکوسیت و کوولیت در محدوده ۱۰-۱۸ متری از سطح زمین قابل مشاهده است.

پ. بخش سولفیدی ثانویه که وجود کالکوسیت و کوولیت به خوبی مشخصه این بخش بوده و بر اساس نتایج حفاری مغزه-گیری در محدوده در حدود ۲۲ متری از سطح زمین (دهانه گمانه) قابل مشاهده می‌باشند.

ت. بخش انتقالی و تدریجی بین فاز برون‌زاد (ثانویه) و فاز درون‌زاد (اولیه) بوده و سولفیدهای اولیه مانند کالکوپیریت و گالن با سولفیدهای ثانویه چون کوولیت و کالکوسیت در حدود ۲۲-۳۴ متری از سطح زمین قابل مشاهده است.

ث. بخش درون‌زاد (اولیه) که در پایین‌ترین سطح قرار دارد و شامل سولفیدهای اولیه چون کانه‌های کالکوپیریت و گالن به مقدار زیاد بوده و بر اساس نتایج حفاری مغزه‌گیری و چاه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده قلعه‌زرگر و محدوده سه‌چنگی از متراژ ۳۸ متر به پایین قابل مشاهده است.

۴-۳- ساخت و بافت

عمده‌ترین بافت کانه‌ها در این محدوده، می‌توان به بافت پرکننده فضاهای خالی، دانه پراکنده و برشی اشاره کرد. یکی از عمده‌ترین سیماهای مواد معدنی در بخش کانه‌دار، حضور آنها به صورت رگه و رگچه‌ای است که ابعاد آنها از سانتیمتر تا متر متغیر است. رگه‌ها از نظر ریخت‌شناسی، ظاهراً مسطح تا انحنادار هستند. و به طور عمده در واحد گدازه‌ای بیوتیت لاتیت آندزیت دیده می‌شود. در منطقه رگه و رگچه‌های سیلیسی و کربناتی به طور وسیعی گسترش یافته‌اند. رگه سیلیسی (کربناتی، دارای اکسیدهای آهن) دارای لایه بندی، بافت موزائیکی در کوارتز بوده و اجزای تشکیل دهنده اصلی آن کوارتز، اکسیدهای آهن، کانی‌های کربناتی (دولومیت و آنکریت) و کانی فرعی کلسیت می‌باشد. کوارتز در بخش‌هایی دارای بافت موزائیکی بوده و درون رگه سیلیسی، رگچه‌های سیلیسی مربوط به نسل دوم کوارتز دیده می‌شوند. همچنین رگچه‌های ضخیم اکسیدهای آهن، کربنات‌های دارای اکسیدهای آهن و همچنین رگچه‌های کربناتی (کلسیت) نیز دیده می‌شوند. رگچه‌های کربناتی (کلسیت) گاهی به همراه رگچه‌های سیلیسی و رگچه‌های کربناتی- اکسیدآهن در تناوب با یکدیگر قرار دارند (شکل ۴-g-h). از جمله بافت‌های جانشینی در کانسار مس قلعه‌زرگر می‌توان به جانشینی سولفیدهای فلزی (نظیر پیریت) توسط اکسیدها (نظیر هماتیت و گوتیت (شکل ۴-k-l) اشاره نمود. محلول گرمابی به هنگام عبور از گسل‌ها، درز و شکاف‌ها یا فضای بین قطعات سنگ‌های آذرآواری، متبلور شوند و مواد خود را بر جای می‌گذارند، بافت حاصله از نوع پرکننده فضای خالی خواهد بود (شکل ۴-f-j).

۴-۴- دگرسانی

دگرسانی گرمابی بطور گسترده‌ای در محدوده کانسار مس قلعه-زرگر مشاهده می‌شود. بر اساس شواهد میدانی، بررسی‌های سنگ

نگاری(مطالعات میکروسکوپی) و مطالعات طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) سنگ‌های میزبان کانه‌زایی تحت دگرسانی با شدت متوسط تا ضعیف قرار گرفته‌اند که شامل سیلیسی شدن، آرژیلیک، پروپلیتیک، کلریتی، کربناته در مقیاس‌های مختلف مشاهده شده‌اند. دگرسانی سیلیسی در کانسار مس قلعه‌زرگر، بارزترین و گسترده‌ترین دگرسانی می‌باشد سیلیس به صورت رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی(بافت حفره‌ای) و جانشینی دیده می‌شود. کوارتز در رگچه‌ها از حاشیه به سمت داخل دانه درشت‌تر می‌شود (بافت شانه‌ای) که این امر نشان-دهنده عملکرد محلول‌های سیلیسی بر روی سنگ‌های درونگیر منطقه است. سیلیسی شدن سنگ‌ها معمولاً با اضافه شدن SiO_2 به سنگ توسط محلول‌های ماگمایی یا گرمابی و بالا رفتن مقدار سیلیس به دلیل انحلال مواد دیگر سنگ صورت می گیرد (Shahabpour, 2001). در کانسار مس قلعه‌زرگر رخنمون‌های دگرسانی آرژیلیکی، اغلب به صورت لکه‌ها و مناطقی به رنگ سفید و با شدت ضعیف تا متوسط دیده می-شوند. در این کانسار پلاژیوکلاز و میکا به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند، آنچنان که اثری از شکل اولیه و ماکل پلاژیوکلاز باقی نمانده است. نتایج حاصل از آنالیز XRD از نمونه‌های محدوده

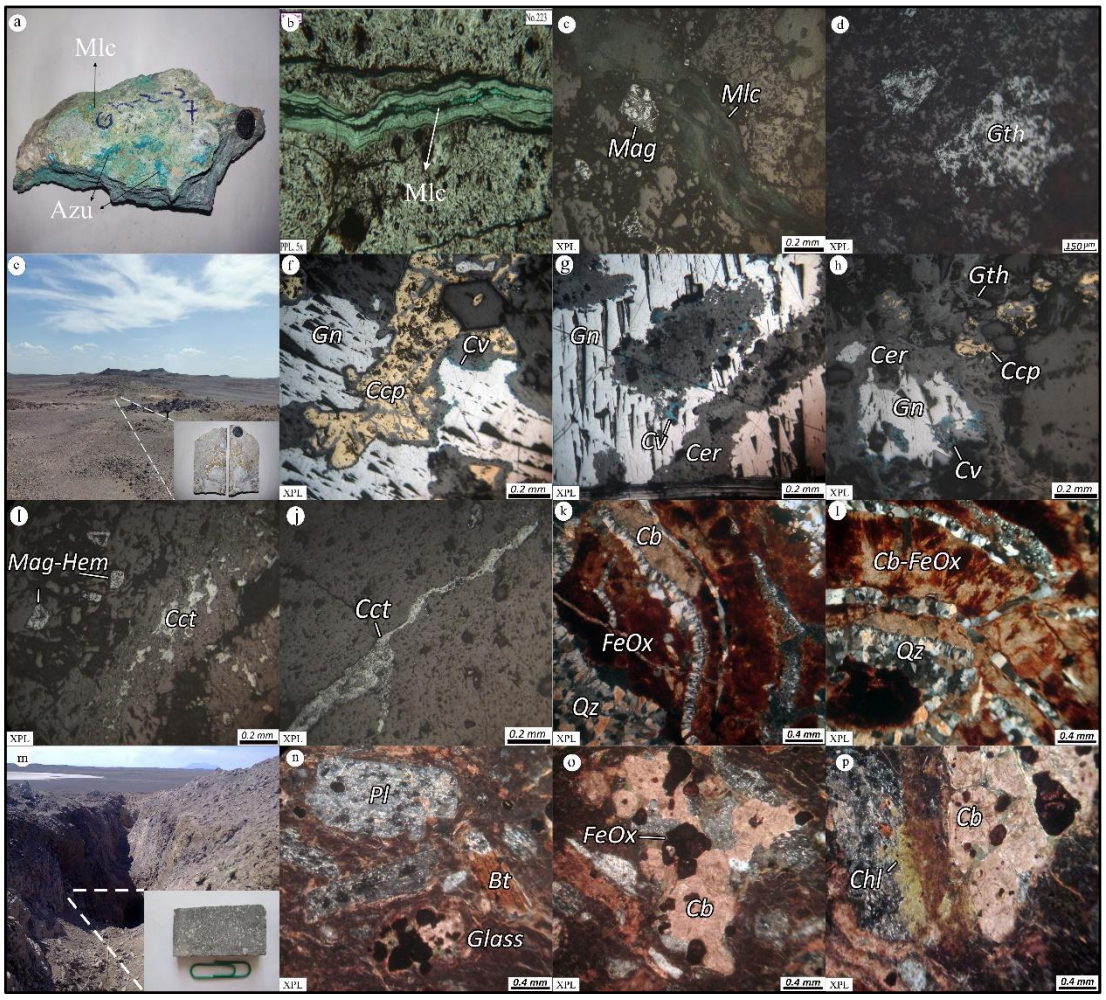
وجود کانی‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریونیت را تایید کرده است. در اثر دگرسانی آمفیبول‌ها، کلریت به جای هورنبلند، بیوتیت و پلاژیوکلاز جایگزین شده است. محلول‌های ماگمایی و گرمابی غنی از Al, Fe, Mg در سنگ‌های آذرین در دمای مناسب موجب تشکیل کلریت می‌شوند (Shahabpour, 2001). بلورهای کلسیت با ابعاد چند میلیمتر تا چند سانتیمتر به صورت برجستگی‌هایی بر روی سنگ میزبان کانسار مس قلعه‌زرگر تشکیل شده‌اند. این بلورها اکثراً در محلی که سیستم درزه و گسل‌ها فضاهای خالی را ایجاد کرده‌اند، مشاهده می‌شود. به احتمال زیاد این کلسیت‌ها ثانویه می‌باشند (شکل ۴-g-h). سیالات گرمابی توسط شکاف‌ها و درزه‌های ناشی از گسل‌ها، به سطح راه پیدا کرده‌اند و ضمن غنی شدن از کربنات، به آرامی در سطح سرد شده و سبب رشد بلورهای کلسیت گردیده‌اند. به طور کلی در کانسار مس قلعه‌زرگر سه نوع کربنات مشاهده می‌شود: الف) کربنات‌های به صورت رگه‌ای و رگچه‌ای (شکل ۴-g-h). ب) کربنات تشکیل شده در اثر دگرسانی در داخل پلاژیوکلازها که از مرکز پلاژیوکلاز شروع شده است (شکل ۴-n). ج) کربنات (کلسیت) تشکیل شده به صورت دانه‌های درشت با بافت موزاییکی (شکل ۴-o-p).

مشخصه بارز دگرسانی پروپیلیتیک در کانسار مس قلعه‌زرگر جانشینی پلاژیوکلازها توسط اپیدوت، کلریت و کلسیت و جانشینی هورنبلند و بیوتیت توسط کلریت می‌باشد (شکل ۴-p). این دگرسانی با رنگ سبز متمایل به تیره اطراف دیگر دگرسانی‌ها را فراگرفته و دارای پراکندگی خوبی در منطقه می‌باشد. سیالات گرمابی در ابتدای تشکیل، نسبتًا اسیدی بوده و این سیالات با صعود به مناطق سطحی‌تر ضمن کاهش درجه حرارت به علت واکنش با سنگ‌های مسیر و خارج ساختن عناصر قلیایی و قلیایی خاکی از سنگ‌ها، از میزان اسیدیته آنها کاسته شده و در دماهای پایین‌تر نسبتاً قلیایی می‌شوند. محلول‌های ماگمایی یا گرمابی غنی از منیزیم، آهن، کلسیم، سدیم یا بی کربنات، در سنگ‌های آذرین موجب تشکیل اپیدوت، کلریت و آلبیت می‌شوند (Evans, 1997). کلریت به صورت جانشینی در کانی‌های مافیک و در سنگ‌های ولکانیکی دیده می‌شود. اغلب کانی‌های مافیک و فرومنیزین نظیر آمفیبول و بیوتیت به کلریت تبدیل شده اند، همچنین در فضاهای خالی این سنگ‌ها نیز کلریت تشکیل شده است. بخش دگرسان شده سیلیسی- آرژیلیک و هماتیتی در بخش میانی محدوده (آنومالی ۱) بیشتر سیلیسی و در بخش جنوبی محدوده اکشتافی عمدتاً هماتیتی شده است. در بخش جنوبی و جنوب شرق محدوده اکتشافی یک دگرسانی سیلیسی – آرژیلیکی اکسید آهن‌دار نسبتاً گسترده و وسیع در یک ساختار به ظاهر حلقوی شکل دیده می‌شود. سنگ در بر گیرنده این بخش عمدتاً لاتیت آندزیت است. بخش مذکور از سیلیس‌های کریپتوکریستالین سفید تا کرم رنگ تشکیل شده که در برخی نقاط دارای پیریت دانه‌ای به صورت پراکنده در زمینه سنگ بوده که غالباً به اکسیدهای آهن تبدیل شده است. رنگ این مجموعه به علت اکسیدهای آهن ایجاد شده از اکسیداسیون سولفیدها به صورت زرد تا قرمز قهوه‌ای دیده می‌شود (شکل ۴-k-l).

ویژگی‌های کلیدی کانی‌سازی در محدوده مس قلعه‌زرگر اعم از نوع ماگماتیسم، سنگ میزبان، سن، فلز اصلی، کانی‌های دگرسانی، کانی‌های معدنی و بافت با کانسارهای گرمابی مانند مامونیه (Goudarzi,2024)، رنگرز (Zamanian et al., 2021)، لوبین-زرده (Zamanian et al., 2019)، Kushikino در ژاپن (Matsuhisa et al., 1985) و Ladolam در پاپوآ گینه نو (Carman, 1994) مقایسه گردیده و نتایج از اشتراکات فراوان کانسار مس قلعه‌زرگر با کانسارهای گرمابی نوع سولفیداسیون پایین حکایت دارد.

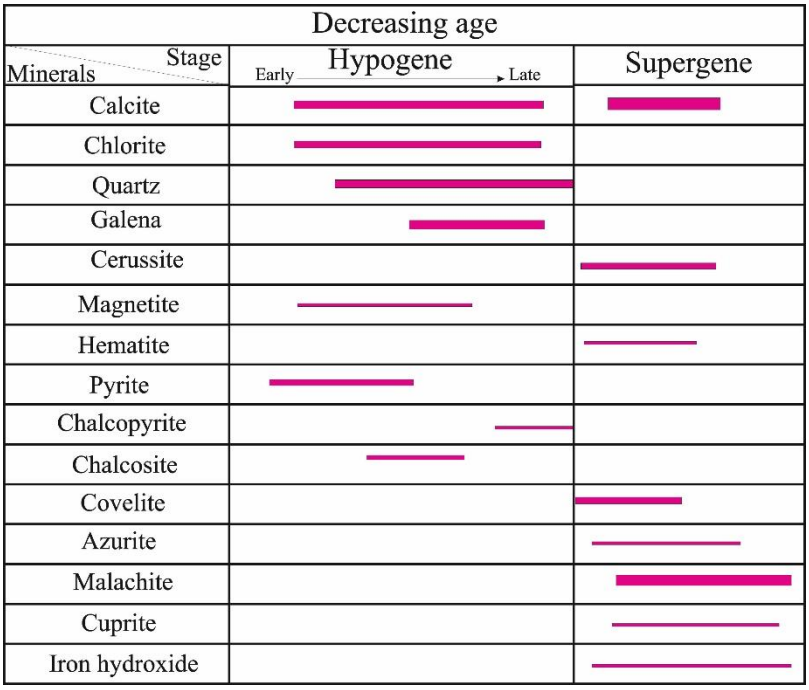
۴-۵- توالی همزادی

کانه‌زایی در کانسار مس قلعه‌زرگر شامل دو مرحله اولیه و ثانویه بوده که در مرحله اولیه فازهای تشکیل شده بیشتر سولفیدهای اولیه‌ای چون کالکوپیریت، گالن و به مقدار کمتر کالکوسیت و بورنیت هستند و در مرحله ثانویه، این سولفیدهای اولیه تجزیه شده و بجای آنها اکسید و هیدروکسیدهای آهن و انواع کانی‌های ثانویه مس و سرب شکیل شده است. لازم به ذکر است دگرسانی آرژیلیک و انواع رگچه‌های کربناته نیز در مرحله ثانویه تشکیل شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۴- (a) نمایی از نمونه سنگ دارای کانه‌زایی. (b) مالاکیت به فرم رگه‌ای، (c) رگچه‌های مالاکیت که در زمینه سنگ دارای مگنتیت پراکنده دانه را قطع نموده است، (d) گوتیت حاصل فرآیندهای ثانویه، (e) نمایی از مغزه حفاری بیوتیت لاتیت آندزیت حاوی کانی‌زایی، (f) هم‌رشدی گالن و کالکوپیریت، (g) کوولیت به شکل پراکنده به همراه سروسیت حاصل از تبدیل شدگی از گالن، (h) گالن که از حاشیه سروسیتی شده به همراه کوولیت، کالکوپیریت که در بخش‌هایی گوتیتی شده است، (i) کانه‌زایی مگنتیت بصورت پراکنده دانه که بطور بخشی هماتیتی شده است، (j) رگچه‌های نازک کالکوسیت در سنگ، (k) لایه‌ها (رگچه‌های) کوارتز، اکسیدآهن و کانی‌های کربناتی، (l) رگچه کربناتی در زمینه دارای بلورهای کوارتز، (m) نمایی از نمونه دستی ایگنمبریت، (n) فنوکریست پلاژیوکلاز و بیوتیت در خمیره متشکل از شیشه‌های ولکانیکی، (o) قطعات کربناتی و اکسیدهای آهن و (p) قطعات درشت کربناتی و کلریت. (Gn: گالن، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Cer: سروسیت، Mag: مگنتیت، Hem: هماتیت، Cb: کربنات، Qz: کوارتز، FeOx: هیدروکسید آهن، Mlc: مالاکیت، Azu: آزوریت، Gth: گوتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Bt: بیوتیت، Chl: کلریت) (علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans, 2010)).

Fig. ۴. (a) A hand specimen showing visible mineralization,(b) Malachite in vein form ,(c) Malachite veinlets cross-cutting a rock matrix with disseminated magnetite,(d) Goethite formed by secondary processes , (e) A view of the drill core Biotite latite andesite containing mineralization,(f) Galena and chalcopyrite intergrowth ,(g) Disseminated covellite with sericite, formed through alteration of galena,(h) Galena with sericitized margins, covellite, and chalcopyrite partially altered to goethite,(i) Disseminated magnetite mineralization, partially hematitized ,(j) Fine veinlets of chalcocite within the host rock,(k) Layers (veinlets) of quartz, iron oxides, and carbonate minerals ,(l) Carbonate veinlet in a matrix containing quartz crystals,(m) A hand specimen of ignimbrite ,(n) Plagioclase and biotite phenocrysts in a matrix composed of volcanic glass shards,(o) Fragments of carbonate and iron oxides and(p) Coarse carbonate and chlorite clasts. (Gn: galena, Ccp: chalcopyrite, Cct: chalcocite, Cv: covellite, Cer: cerussite, Mag: magnetite, Hem: hematite, Cb: carbonate, Qz: quartz, FeOx: iron hydroxide, Mlc: malachite, Azu: azurite, Gth: goethite, Pl: plagioclase, Bt: biotite, Chl: .chlorite) (Mineral abbreviations are taken from Whitney and Evans, ۲۰۱۰)



شکل ۵- نمودار توالی همزادی (هم‌یافتی) تعدادی از کانی‌های موجود در کانسار مس قلعه‌زرگر.

Fig. 5. Paragenetic sequence of selected minerals in the Qaleh-Zargar copper deposit.

۴-۶- میانبارهای سیال

۴-۶-۱- مطالعات سنگ‌نگاری

مطالعه میانبارهای سیال برای تعیین دماسنجی، نوع املاح و مقدار شوری محلول کانه‌دار در کانسارهای مختلف بکار می‌رود. در کانسار مس قلعه‌زرگر کانی‌های کوارتز و کلسیت ریز بلور مهمترین و فراوانترین کانی‌های همراه با کانه اصلی و مرتبط با محلول کانه‌ساز بوده است. در مطالعات انجام گرفته، میانبارهای سیال به صورت تک فازی گازی، دو فازی غنی از مایع و بیشتر به شکل نامنظم و به رنگ تیره دیده می‌شود. اندازه ی آنها از ۲ تا ۱۰ میکرون می‌باشد. سیالات درگیر دو فازی غنی از مایع فراوانی نسبتاً کمی در نمونه‌ها دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی دیده می شود. اندازه ی آنها از ۲ تا ۱۰ میکرون می باشد. رخداد میانبارهای تک فازی گازی به صورت پراکنده در زمینه(شکل ۶-b) و میانبارهای دو فازی غنی از مایع نیز اغلب به صورت پراکنده دیده می‌شوند(شکل ۶-a-c). حجم فاز بخار در این میانبار حدود ۵ تا ۳۰ درصد حجم میانبار می باشد.

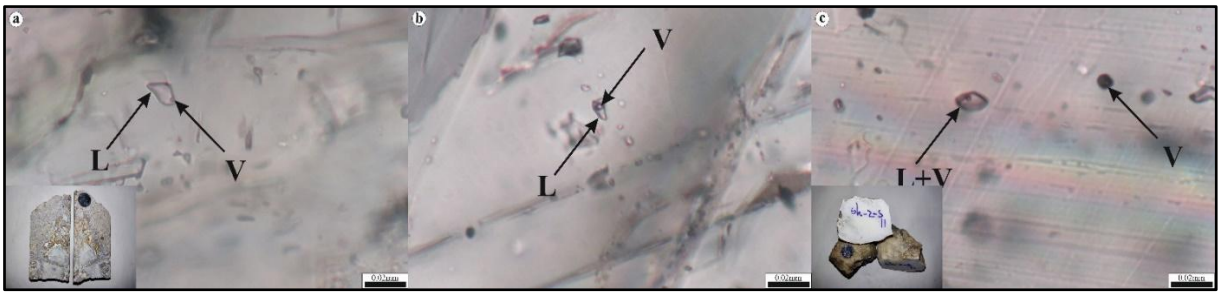
۴-۶-۲- مطالعات ریزدماسنجی

بر اساس نتایج بدست آمده طبق جدول ۱ نخستین دمای ذوب شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد (Putter et al., 2010) (شکل ۷-a). دمای همگن شدن (Th) میانبارهای سیال بین ۱۳۶ تا ۱۹۲ درجه سانتیگراد با میانگین دمای ۱۶۳/۱ درجه سانتیگراد است (شکل ۷-b). مقدار شوری بین ۳/۵۵ تا ۷/۳۱ درصد وزنی NaCl با میانگین ۵/۶۳ درصد متغیر است (شکل ۷-c). کاهش دما و شوری در در میانبارهای سیال، با روند مخلوط شدگی دو سیال دما- شوری بالا با سیال دما- شوری پایین مطابقت دارد و معمولاً در تشکیل ذخایر سطحی‌زاد، عناصر فلزی از ماگمای مادر توسط محلول ماگمایی با دما و شوری بالا حمل شده و به دلیل حرارت بالای توده نفوذی به طرف بالا حرکت می‌کند. آبهای جوی با دما و شوری پایین از فضای درز و شکستگی‌ها و گسل‌ها به عمق راه پیدا کرده و با محلول‌های ماگمایی مخلوط می‌شوند و فرآیند همرفتی- مخلوط شدگی سیال بین توده نفوذی در عمق به عنوان موتور حرارتی و اعماق کم ایجاد می‌شود. در نمودار دمای همگن شدن- شوری نشاندهنده تغییرات محلول به سمت کاهش درجه حرارت و شوری می‌باشد، بطوریکه دمای همگن شدن و شوری در مراحل آخر ته‌نشست کاهش می‌یابد (شکل ۸-a). در شکل ۸-a و ۸-b نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری برای میانبارهای سیال را نشان می‌دهد و مطابق این نمودارها، محلول‌ها در مرحله کانی‌سازی در منطقه روند کاهش

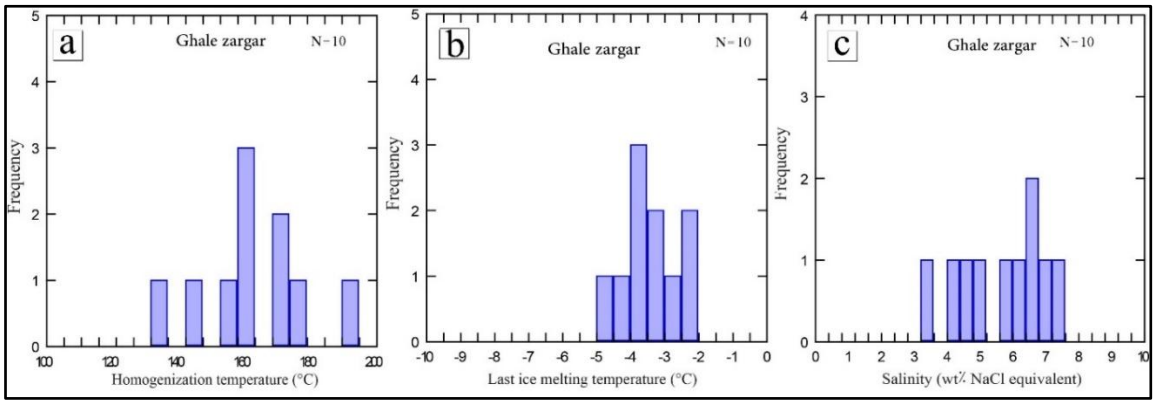
در دما و شوری را نشان داده و در محدوده کانسارهای سطحی‌زاد قرار می‌گیرند. در مطالعات میانبارهای سیال، سیالات تک فازی گاز و دو فازی (L+V) غنی از مایع شناسایی شدند و عدم حضور فاز جامد در میانبارهای سیال به دلیل شوری پایین محلول‌های کانه‌ساز می‌باشد (Bodnar and Vityk, 1994). با استفاده از داده‌های بدست آمده از مطالعات دماسنجی و با استفاده از نمودار تعیین چگالی، چگالی سیال در محدوده کانسار مس قلعه‌زرگر در محدوده ۰/۹ تا ۱ متغییر می‌باشد (شکل ۸-a). بر اساس نمودار شوری در مقابل فشار در مطالعات میانبارهای سیال در محدوده کانسار مس قلعه‌زرگر، فشار حاکم بر سامانه سیال کانه‌ساز در محدوده کمتر از 10MPa قرار می‌گیرد (شکل ۸-b). نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن (شکل ۸-d) نشان دهنده تاثیر کمپلکس‌های سولفیدی در انتقال عناصر کانسارساز و شکل ۸-c که بیانگر محدوده سیالات سطحی‌زاد در کانسار قلعه‌زرگر هستند. در مجموع میانبارهای سیال منطقه در گستره سیالات سطحی‌زاد و تا حدودی در محدوده اختلاط سیالات جوی و ماگمایی با شوری و دمای پایین قرار می‌گیرند (شکل ۸-e-f).

جدول ۱- اطلاعات ریز دماسنجی سیالات درگیر در کانسار مس قلعه‌زرگر.
Table 1. Microthermometric data of fluid inclusions in the Qaleh Zargar copper deposit.

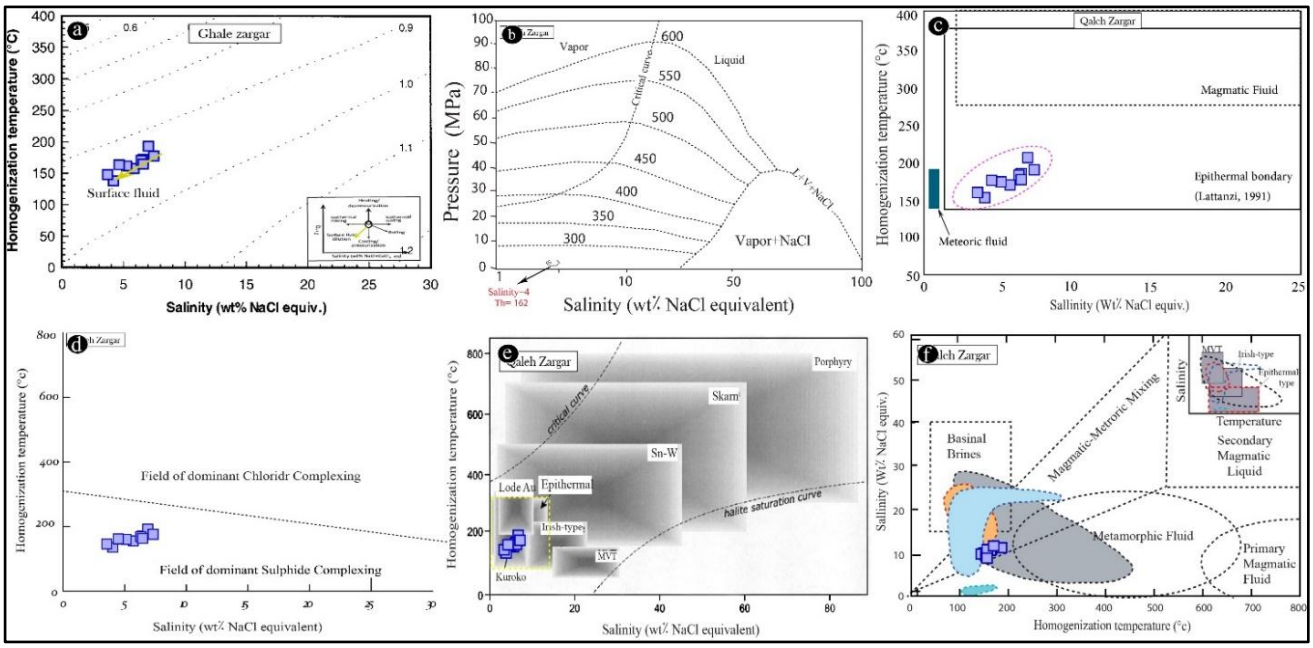
Sample N.	Mineralization Type	Mineral	phase	Tice	TICE+	salinity	Th V-L	Th L-V	THT
S11	Mlc+Az	Quartz	L+V	(-3/1) -(-4/3)	3/1-4/3	5/11-6/88	156-192		156-192
S22	Gn+Ccp_Cct+Bn+Mag+Q	Quartz+Calcite	L+V	(-2/1) -(-4/6)	2/1-4/6	3/55-7/31	136-176		136-176
S22	Gn+Ccp_Cct+Bn+Mag+Q	Quartz+Calcite	V	(-2/7)	2/7	4/49		162	162



شکل ۶- (a) سیال درگیر دو فازی غنی از مایع، (b) سیال درگیر دو فازی غنی از مایع و (c) سیال درگیر دو فازی غنی از مایع و تک فازی گازی.
Fig. 6. (a)Two-phase, liquid-rich fluid inclusion, (b) Two-phase, liquid-rich fluid inclusion, and (c) Two-phase, liquid-rich fluid inclusion and Single-phase vapor (gas) fluid inclusion.



شکل ۷- نمودارهای مربوط به میانبار سیال: (a) دمای همگن شدن، (b) دمای آخرین ذوب یخ و (c) شوری.
Fig. 7. Histograms related to fluid inclusions: (a) Homogenization temperature, (b) Final ice melting temperature, and (c) Salinity.



شکل ۸ـ (a) نمودار همگن شدن ـ شوری که چگالی سیال در محدوده کانسار مس قلعه‌زرگر در محدوده ۰/۹ تا ۱ متغییر می‌باشد (Zhang and Frantz, 1987)، (b) نمودار فشار در مقابل شوری که فشار سیالات درگیر کمتر از ۱۰ Mpa در دمای ۱۶۲ درجه سانتیگراد می‌باشد (Zhang and Frantz, 1987)، (c) نمودار همگن شدن ـ شوری که بیانگر محدوده سیالات ماگمایی تا اپی‌ترمال در کانسار مورد بررسی می‌باشد (Lattanzi, 1991)، (d) نمودار دمای همگن شدن ـ شوری برای تعیین کمپلکس فلزی (Pirajno, 2009)، نمودار درجه همگن شدن در مقابل شوری کانسارهای مختلف (Wilkinson, 2001)، که محدوده نمونه‌های کانسار مس قلعه‌زرگر در محدوده مربوط به کانسارهای اپی‌ترمال قرار می‌گیرد و (f) نمودار شوری ـ دمای همگن شدن سیالات درگیر با محدوده آب‌های مختلف (Beane, 1983).

Fig 8. (a) Homogenization temperature vs. salinity diagram showing fluid densities ranging from 0.9 to 1 g/cm³ in the Qaleh Zargar copper deposit (Zhang and Frantz, 1987), (b) Pressure vs. salinity diagram indicating that fluid inclusion pressures are generally below 10 MPa (Zhang and Frantz, 1987(, (c) Homogenization temperature vs. salinity diagram representing the transition from magmatic to epithermal fluids in the studied deposit (Lattanzi, 1991), (d) Homogenization temperature–salinity diagram used for identifying metal complexes (Pirajno, 2009), (e) Homogenization temperature vs. salinity diagram for various deposits (Wilkinson, 2001), showing that samples from the Qaleh Zargar copper deposit fall within the epithermal field and (f) Salinity vs. homogenization temperature diagram comparing fluid inclusions with different types of natural waters (Beane, 1983).

۴-۷- ایزوتوپ‌های پایدار

۴-۷-۱- ایزوتوپ گوگرد

مطالعات ایزوتوپ گوگرد در کانسار مس قلعه‌زرگر بروی نمونه‌های سولفیدی و ایزوتوپ اکسیژن بروی نمونه‌های سیلیس انجام گرفته و نسبت ایزوتوپی گوگرد(δ34S) بر مبنای استاندارد CDT(Canyon Diablo Troilite) محاسبه و در جدول ۲ ارائه گردیده است. به علت رخداد محدود کانی‌های کربناتی در ذخایر سولفیدی مطالعات ایزوتوپ کربن در مقایسه با گوگرد کمتر صورت گرفته است. تشکیل کانی‌های کربناتی عمدتاً به صورت کلسیت است که ممکن است همزمان و یا پس از تشکیل سولفیدها نهشته شود. حالت دوم نشانگر جدا بودن سیال‌های سولفیدساز از سیال‌های کربنات‌ساز می‌باشد، اگرچه گوگرد و کربن دارای ارتباط زمین‌شیمیایی تنگاتنگی هستند (Meheut et al., 2007). در سیستم‌های گرمابی، گوگرد در ترکیب سیال عمدتاً به صورت احیایی (H2S, HS-, S2-) در کانی سازی ذخایر گرمابی نقش دارد (Meheut et al., 2007). H2S و HS- مهمترین کمپلکس‌های سولفیدی هستند که در شرایط احیایی و قلیایی پایدارند (Li and Liu, 2006).

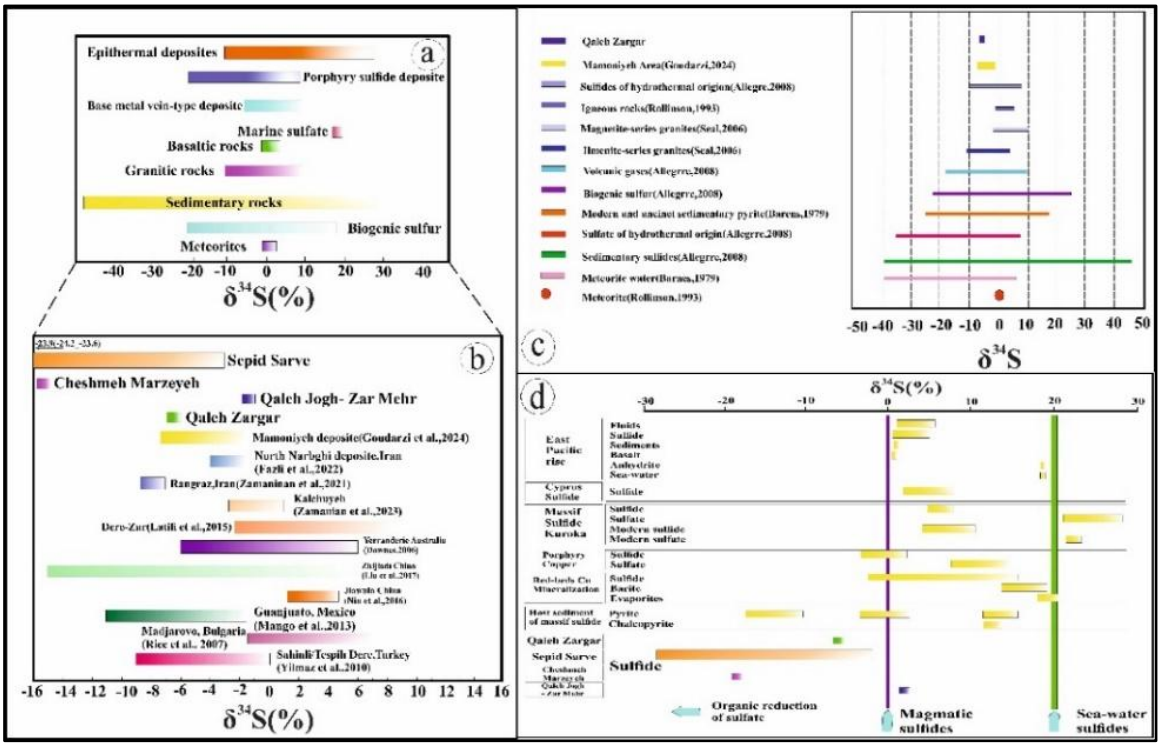
مقادیر δ34S در نمونه‌های سولفیدی کانسار مس قلعه‌زرگر نشانگر دامنه تغییرات ۶/۶- تا ۶/۰- ‰ می‌باشد. با استفاده از معادلات تعادل ایزوتوپی میان کانی‌های سولفیدی و H2S سیال گرمابی، مقادیر δ34S در H2S سیال گرمابی بین ۶/۹- تا ۲/۶- ‰ برآوردشده است(جدول ۲).

شواهد حضور بیش از یک فاز ورود سیال‌های گرمابی و احتمالاً بیش از یک نوع سیال در کانی‌سازی در سیستم حاکم بر کانسار مس قلعه‌زرگر شامل شواهد سطحی نظیر وجود رگه-های چندفازی((MV(Multiphase Veins) مطالعات سنگ‌نگاری نمونه‌ها، نشانگر نفوذ مکرر سیال‌های گرمابی به سیستم رگه‌ای می‌باشد که از شواهد این پدیده می‌توان به وجود رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار در متن سیلیسی کانه‌دار اشاره کرد. کانی‌های سولفیدی دارای تهی شدگی نسبی ایزوتوپ ^{34}S می-باشد. یکی از دلایل محتمل برای تهی شدگی ایزوتوپی در کانی-های سولفیدی، منشاء گرفتن گوگرد سیال گرمابی از شستشوی کانی‌های سولفیدی در رسوبات احیایی باشد (Hoefs, 2004). مجموعه کانی‌های سولفیدی سیستم رگه‌ای قلعه‌زرگر در حالت کلی از روند تعادلی تبعیت می‌کند. مقادیر $\delta^{34}S$ در H_2S سیال گرمابی کانی‌ساز در دامنه ۴/۷- تا ۱/۷- ‰ برآورد شده است. گوگرد در سیستم رگه‌ای قلعه‌زرگر یا از شستشوی کانی‌های سولفیدی اولیه در سنگ دربرگیرنده آتشفشانی و یا مستقیماً از سیال‌های گرمابی با منشاء ماگمایی رانده شده است (Hassan Nezhad and Moore, 2006). یکی از عوامل در تهی-شدگی ^{34}S در کانی‌های سیال گرمابی می‌تواند ناشی از شستشوی سنگ دربرگیرنده آتشفشانی و آذراواری توسط سیال‌های گرمابی با منشاء جوی باشد، به طوریکه ^{32}S به دلیل میل واکنشی بالا نسبت به ^{34}S (Hoefs, 2004)، به طور انتخابی از کانی‌های سولفیدی سنگ دربرگیرنده شسته شده و وارد سیال گرمابی شده است. یکی دیگر از عوامل موثر بر تهی شدگی ^{34}S در کانی‌های سولفیدی نسبت به مقادیر ماگمایی می‌تواند تفکیک ایزوتوپی میان فازهای سولفیدی و سولفاتی سیال گرمابی باشد. مقادیر $\delta^{34}S$ برابر کانی‌های سولفیدی در کانسار مس قلعه‌زرگر با محیط‌های مختلف زمین‌شناسی و منابع گوگرددار مورد مقایسه قرار گرفته و همانطور که مشخص می-باشد مشابه سولفیدهای با منشا گرمابی است (شکل ۹-a-b-c).

جدول ۲- مقادیر ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی در کانسار مس قلعه‌زرگر.

Table 2. Sulfur isotopic values in sulfide minerals from the Qaleh-Zargar copper deposit

Chalcopyrite<=>H_2S(Li & Liu,2006)									
Sample Point	Mineral	δ^{34}Smin(%)	T(C)*-Min	T(C)*-Ave	T(C)*-Max	1000 Ln α-T(min)	1000 Ln α-T(Ave)	1000 Ln α-T(max)	$\delta^{34}SH_2S$fluid (%)
Gh-Z-S22	Gn+Ccp+Py+Cct+Silica(Quartz)	-6/3 ± 0/3	136	158/66	176	0/3	0/3	0/2	-6/6 ± 0/3
Galena<=>H_2S(Li & Liu,2006)									
Sample Point	Mineral	δ^{34}Smin(%)	T(C)*-Min	T(C)*-Ave	T(C)*-Max	1000 Ln α-T(min)	1000 Ln α-T(Ave)	1000 Ln α-T(max)	$\delta^{34}SH_2S$fluid (%)
Gh-Z-S22	Gn+Ccp+Py+Cct+Silica(Quartz)	-6/3 ± 0/3	136	158/66	176	-3/3	-2/6	-2/2	-2/9 ± 0/3
Galena<=>Chalcopyrite(Li & Liu,2006)									
Sample Point	Mineral	δ^{34}Smin(%)	T(C)*-Min	T(C)*-Ave	T(C)*-Max	1000 Ln α-T(min)	1000 Ln α-T(Ave)	1000 Ln α-T(max)	$\delta^{34}SH_2S$fluid (%)
Gh-Z-S22	Gn+Ccp+Py+Cct+Silica(Quartz)	-6/3 ± 0/3	136	158/66	176	-1/9	-1/1	-0/7	-5/2 ± 0/3



شکل ۹- (a) مقایسه مقادیر δ34S گوگرد برای سولفیدها از سنگ‌های مختلف (Marini et al., 2011; Hofes, 2021)، (b) ترکیبات ایزوتوپی گوگرد سولفیدهای کانسار مس قلعه‌زرگر در مقایسه با سولفیدهای نهشته‌های اپی‌ترمال جهان و کمربند ماگمایی ارومیه دختر (Goudarzi, 2024) و (c,d) مقایسه مقادیر δ34S گوگرد سولفیدهای کانسار مس قلعه‌زرگر با محیط‌های زمین‌شناختی مختلف (Rollinson, 1993).

Fig. 9. (a) Comparison of $\delta^{34}S$ values of sulfur in sulfides from various rock types (Goudarzi, 2024), (b) Sulfur isotopic compositions ($\delta^{34}S$) of sulfides from the Qaleh Zargar copper deposit compared with sulfides from global epithermal deposits and the Urumieh–Dokhtar magmatic belt (Goudarzi, 2024) and (c,d) Comparison of $\delta^{34}S$ values of sulfide minerals from the Qaleh-Zargar deposit with those from different geological environments (Rollinson, 1993).

۴-۷-۲- ایزوتوپ اکسیژن

مقادیر ایزوتوپی اکسیژن در سیال گرمابی با استفاده از دمای بدست آمده از مطالعه ریزدماسنجی سیال‌های درگیر (دمای اندازه‌گیری شده غالب ۱۹۲ ˚C) و میانگین دما (˚C ۱۶۹/۷۵) و همچنین معادله(Zheng, 1993) محاسبه شده است(جدول ۳). مقادیر ایزوتوپی اکسیژن سیال گرمابی در نمونه‌های همراه با کانی‌سازی در محدوده سنگ‌های بازالتی، آب‌های جوی و سنگ‌های رسوبی قرار می‌گیرد. در این صورت منشاء اکسیژن می‌تواند از واکنش سیال‌های جوی با سنگ‌های آندزیت- بازالتی و یا رسوبی باشد و یا محصول همپوشانی ایزوتوپی سیال‌های ماگمایی و جوی باشد. چنین حالتی می‌تواند در نتیجه همپوشانی ایزوتوپی سیال‌های جوی و ماگمایی و یا برهمکنش سیال‌های جوی با سنگ‌های بازالتی باشد. عدم تعادل ایزوتوپی در چنین شرایطی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مانند دمای نسبتاً پایین سیال کانه‌ساز (کمتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد)، تغییرات ترکیب ایزوتوپی سیال کانه‌زا در طول زمان، ادامه تبادل ایزوتوپی بعد از تشکیل فازهای کانیایی می‌باشد. مقادیر ایزوتوپی اکسیژن سیال گرمابی در کربنات‌های دگرسانی و فاقد کانه‌سازی، در محدوده آب‌های جوی قرار گرفته است. این مقادیر تا حدودی نزدیک به محدوده ماگمایی است، چنین حالتی احتمالاً در نتیجه واکنش سیال گرمابی با سنگ‌های آذرین بوده و یا نشانگر حضور دو نوع سیال گرمابی، با منشاء جوی و ماگمایی در دگرسانی کربناتی می‌باشد(شکل ۱۰).

جدول ۳- مقادیر ایزوتوپی اکسیژن در کانی‌های حاوی کوارتز در کانسار مس قلعه‌زرگر.

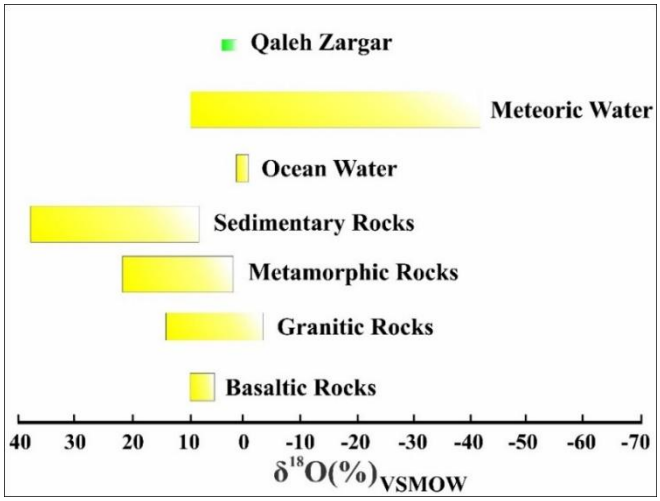
Table 3. Oxygen Isotope Values in Quartz-bearing Minerals from the Qaleh-Zargar Copper Deposit.

Muscovite<=>H_2O(Zheng,1993)

Sample Point	Mineral	δ^{18}Omin(%)	T(°C)*-Min	T(°C)*-Ave	T(°C)*-Max	1000 Ln α-T(min)	1000 Ln α-T(Ave)	1000 Ln α-T(max)	$\delta^{18}OH_2O$fluid(%)
Gh-Z-S11	Silica(Quartz)	+4/1 ± 0/1	156	169/75	192	6/8	6	4/8	-1/9 ± 0/1
Gh-Z-S21	Silica(Quartz)	+2/5 ± 0/3							

Quartz<=>H_2O(Meheut et al.,2007)

Sample Point	Mineral	δ^{18}Omin(%)	T(°C)*-Min	T(°C)*-Ave	T(°C)*-Max	1000 Ln α-T(min)	1000 Ln α-T(Ave)	1000 Ln α-T(max)	$\delta^{18}OH_2O$fluid(%)
Gh-Z-S11	Silica(Quartz)	+4/1 ± 0/1	156	169/75	192	15/7	14/3	12/2	-10/2 ± 0/1
Gh-Z-S21	Silica(Quartz)	+2/5 ± 0/3							



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر δ۱۸O کانسار مس قلعه‌زرگر با محیط‌های زمین‌شناختی مختلف (Hoefs, ۲۰۰۴).

Fig. ۱۰. Comparison of $\delta^{18}O$ values from the Qaleh Zargar copper deposit with those of various geological environments (Hoefs, ۲۰۰۴).

۵- نتیجه‌گیری

شکل کانی‌سازی‌های در کانسار مس قلعه‌زرگر به دو صورت رگه‌ای و در امتداد گسل و پراکنده می‌باشد. کانه‌زایی در منطقه به صورت اولیه (درون‌زاد) و ثانویه (برون‌زاد) می‌باشد که بخش ثانویه (برون‌زاد)، دارای گستردگی زیادی می‌باشد و دارای فاز کربناتی، اکسیدی، سولفیدی و سولفاتی می‌باشد. کانه‌زایی اولیه (درون‌زاد) شامل مگنتیت به صورت پراکنده، کالکوپیریت، پیریت، کالکوسیت به مقدار کم و گالن و کانی‌زایی ثانویه (برونزاد)، شامل مالاکیت، آزوریت، کوولیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، سروسیت و سیدریت است، بی‌هنجاری به شدت مثبت Pb در محدوده مورد مطالعه می‌تواند حاصل آلایش ماگمای سازنده این سنگ‌ها با مواد پوسته‌ای و یا متاسوماتیسم گوشته‌ای است. در مجموع و با مطالعات انجام گرفته، برای سیال‌های کانه‌ساز در منطقه می‌توان دو منشا در نظر گرفت، الف) آب‌های جوی که از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها به قسمت‌های عمیق نفوذ کرده و تحت تاثیر حرارت توده‌های نفوذی قرار گرفته و دوباره به سطح برگشته و فلزات همراه خود را ته نشین کرده است. ب) آب‌های ماگمایی منشا گرفته از توده‌های نفوذی که به همراه آب‌های جوی به سطح رسیده‌اند. آب‌های فرو رو غنی از Co2 و O2 بوده و و در اثر برخورد با پیریت سبب تشکیل

اسید سولفوریک شده و محیط کانی‌سازی به شدت اسیدی شده و هیدروکسیدهای آهن تشکیل شده و مس از محیط شسته شده است. سیال همراه رگه کوارتز دارای شوری پایین بین ۳/۵۵ تا ۷/۳۱ درصد وزنی معادل NaCl و دمای همگن شدن بین ۱۳۶ تا ۱۹۲ درجه سانتیگراد داشته و رخداد اختلاط در سیالات کانه‌ساز را نشان می‌دهد. مقادیر δ34S در H2S سیال گرمابی کانی‌ساز در دامنه ۶/۹- تا ۲/۶- ‰ برآورد شده است. این مقادیر نشانگر منشاء ماگمایی است. گوگرد در سیستم رگه‌ای موجود در کانسار مس قلعه‌زرگر یا از شستشوی کانی‌های سولفیدی اولیه در سنگ دربرگیرنده آتشفشانی و یا مستقیماً از سیال‌های گرمابی با منشاء ماگمایی رانده شده است. حضور کانی‌هایی نظیر گالن و تفکیکی ایزوتوپی میان کانی‌های سولفیدی نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل مؤثر بر تهی شدگی دیگر کانی‌های سولفیدی از 34S شود. مقادیر ایزوتوپی اکسیژن سیال گرمابی در نمونه‌های همراه با کانی‌سازی در محدوده سنگ‌های بازالتی، آب‌های جوی و سنگ‌های رسوبی قرار می‌گیرد. در این صورت منشاء اکسیژن می‌تواند از واکنش سیال‌های جوی با سنگ‌های آندزیت- بازالتی و یا رسوبی باشد و یا محصول همپوشانی ایزوتوپی سیال‌های ماگمایی و جوی باشد. این مقادیر تا حدودی نزدیک به محدوده ماگمایی است، چنین حالتی احتمالاً در نتیجه واکنش سیال گرمابی با سنگ‌های آذرین بوده و یا نشانگر حضور دو نوع سیال گرمابی، با منشاء جوی و ماگمایی و اختلاط آنها می‌باشد. و با توجه به نوع کانی‌ها، بافت، دگرسانی مبنی بر عدم دگرسانی پیشرفته آرژیلیک و عدم رخداد آلونیت، پایین بودن میزان سولفید، شوری کم سیال کانه‌ساز در مرحله گرمابی و رقیق شدن آنها با آب جوی، حضور گسترده کانی‌سازی نوع رگه/رگچه‌ای و پر کننده فضای خالی، بافت‌های کوارتز مانند کلوفرم، مقایسه با انواع کانسارهای رگه‌ای و استفاده از مطالعات ریز دماسنجی (میانبارهای سیال با دما و شوری کم) می‌توان گفت که این کانسار از نوع گرمابی دما پایین و از نوع رگه‌ای نوع L.S (Low sulfidation) می‌باشد.

مراجع

Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, p. 606.

Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., Homam, S.M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut block, eastern Iran). Journal of Asian Earth Sciences 41, 283-296. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.02.014.

Alavi, M., 1991. Tectonic Map of Middle East, Tehran. GSI, Scale, 1:50000.

Beane, R.E., 1983. The magmatic-meteoric transition. Geothermal Resources Council. Special Report 13, 245–253.

Bodnar, R.J., Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H2O-NaCl fluid inclusions. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 30, 105-121. https://doi.org/10.2138/rmg.1994.30.6.

Carman, G.D., 1994. Genesis of the Ladolam gold deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. Unpublished Ph.D. Thesis, Department of Earth Sciences, Monash University, Australia, 226.

Esform, M., 2011. Geochemistry and Paragenetic Sequence of Minerals in the Mahour Polymetallic Deposit, West Nehbandan (Eastern Iran). M.Sc., Thesis, University of Sistan and Baluchestan, 235.

Esmaeily, D., Nedelec, A., Valizadeh, M.V., Moore, F., Cotton, J., 2005. Petrology of the Jurassic Shah-Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization, Journal of Asian Earth Sciences 25, 961-980. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.09.003.

Evans, A.M., 1997. An Introduction to Economic Geology and its Environmental Impacts, Blackwell Scientific Publication.

Goudarzi, M., Zamanian, H., Klötzli, U., Lentz, D., Ullah, M., 2024. Genesis of the Mamuniyeh Copper Deposit in the Central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran: Constraints from Geology, Geochemistry, Fluid Inclusions, and H–O–S Isotopes. Ore Geol. Rev 175, 106279. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106279.

Guilbert, J.M., Park, Jr, C.F., 1986. The Geology of Ore Deposits. Freeman, San Francisco Leverett Publication, McKinnon.

Hassan-Nezhad, A.A., Moore, F., 2006. A stable isotope and fluid inclusion study of the Qaleh-Zari Cu–Au–Ag deposit, Khorasan Province, Iran, Journal of Asian Earth Sciences 27, 805–818, https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.08.002.

Hitzman, M.W., Reynolds, N., Sangster, D.F., Allen, C.R., Carman, C., 2003. Classification, Genesis and Exploration Guides for Non-Sulfide Zinc Deposits. Economic Geology 98, 685-714, https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.685.

Hoefs, J., 2004. Stable Isotope Geochemistry, Springer-Verlag, Berlin, p. 287.

Hoefs, J., 2021. Stable Isotope Geochemistry (8th ed.). Cham, Switzerland, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77692-3.

Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C., McDonald, G.D., 2002. Fluid-Mobile Trace Element Constraints on the Role of Slab Melting and Implications for Archean Crustal Growth Models. Contributions to Mineralogy and Petrology 144, 38-56.

Karimpour, M.H., Large, R.R., Razmara, M.F., Pattrick, R.A.D., 2006. Bi sulfosalt mineral series and their paragenetic associations in the specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, Qaleh-Zari mine, Iran, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13 (2), 417-432.

Klein, C., Hurlbut, C.S., Dana, J.D., Mineraloge, G., 1993. Manual of Mineralogy 527. New York: Wiley.

Kluyver, H.M., Tirrul, R., Chance, P.N., Meixner, H.M., 1981. Explanatory text of the Naybandan quadrangle map 1:250,000, 143.

Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. European Journal of Mineral 3, 689–697.

Li, Y.B., Liu, J.M., 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. Geochimica et Cosmochimica Acta 70, 1789– 795, https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.015.

Lotfi, M., 1991. Geological and geochemical investigation on the volcanogenic Cu-Pb-Zn-Sb ore mineralization in the Shurab Gale chah and Northwest of Khur, Ph.D thesis, University of Hamburg, p.152.

Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpoor, M.H., 2012. Advanced Geological and Applied Studies Journal, No. 6: Geology, Mineralization, and Fluid Inclusion Studies of the Hoz-e Raees Pb-Zn-Cu Deposit, Eastern Iran. Journal of Advanced Applied Geology 6. (In Persian)

Marini, L., Moretti, R., 2011. Accornero M. Sulfur Isotopes in Magmatic-Hydrothermal Systems, Melts, and Magmas. In: Behrens H, Webster J, editors. Sulfur in Magmas and Melts: Its Importance for Natural and Technical Processes. Berlin, Boston: De Gruyter; p. 423-492. https://doi.org/10.1515/9781501508370-014.

Matsuhisa, Y., Morishita, Y., Sato, Y., 1985. Oxygen and carbon isotope variations in gold-bearing hydrothermal veins in the Kushikino mining area, southern Kyushu, Japan. Economic Geology 80, 283-293, https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.2.283.

Méheut, M., Lazzeri, M., Balan, E., Mauri, F., 2007. Equilibrium isotopic fractionation in the kaolinite, quartz, water system: Prediction from first-principles density-functional theory. Geochimica et Cosmochimica Acta 71, 3170-3181, https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.012.

Ohmoto, H., Goldhaber, M.B., 1997. Sulfur and Carbon Isotopes: In Barnes, H.L. (ed), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 3rd ed., New York, John Wiley & Sons, p. 517- 611.

Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Mineral Deposits, Principle and Fundamental Concept for the Exploration Geologist, Springer, p.706.

Putter, T.D., Mess, F., Decree, S., Dewaele, S., 2010. Malachite, an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment (Katanga, Democratic Republic of Congo). Ore Geology Reviews 38, 90-100.

Ramdohr, P., 2013. The ore minerals and their intergrowths. Elsevier.

Rocky, M., 2016. Geophysical explorations using the IP & RS methods in the Qaleh Zargar area.

Rollinson, H., 1993. Rising geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman John Wiley and Sons, New York, p. 352.

Shahabpour, J., 2001. Economic Geology, Tehran: Jahad Daneshgahi Press. [In Persian]

Sillito, R.H., 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. Economic Geology 100, 723-768, https://doi.org/10.5382/AV100.22.

Srivastava, R.K., Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. Journal of Asian Earth Sciences 23, 373-389, https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00150-0.

Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, a review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52, 1229-1258.

Sumner, J.M., Wolff, J., 2003. Petrogenesis of mixed-magma, high-grade, peralkaline ignimbrite 'TL' (Gran Canaria): diverse styles of mixing in a replenished, zoned magma chamber, Journal of Volcanology and Geothermal Research 126, 109-126.

Tarkian, M., Lotfi, M., Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of Mines and Metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran 51, 357-383, http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6664522.

Wilkinson, J.J., 2001. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. Lithos 55, 229-272, https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5.

Winter, J.D., 2014. Principles of igneous and metamorphic petrology, Second edition, Pearson Education Limited, 737.

Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, American Mineralogist 95(1), 185-187, https://doi.org/10.2138/am.2010.3371.

Yusefzadeh, M.H., Gholami, E., 2003. Geological and petrographic study of lead and zinc mineralization indices in the Seh Changi–Hoz-e Raees area, Central Iran. Proceedings of the 7th Symposium of the Geological Society of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)

Zamanian, H., Dolatshahi, S., Yang, X., Karimzadeh, S.A.M., Meshkani, S.A., 2021. Geochemical, fluid inclusion, and O-H-S isotope constraints on the origin of the Rangraz copper deposit, Central Iran. Ore Geology Reviews 128, 103877, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103877.

Zamanian, H., Rahmani, Sh., Zareisahameih, R., 2019. Fluid inclusion and stable isotope study of the Lubin-Zardeh epithermal Cu-Au deposit in Zanjan Province, NW Iran: Implications for ore genesis, Ore Geology Reviews 112, 103014, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103014.

Zarasvandi, A.L., 2007. Atlas of Alteration (Field and Microscopic Study Guide for Hydrothermal Alteration Minerals). Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran.

Zheng, Y.F., 1993. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. Earth Planetery Science Letter 120, 247-263, https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90243-3.

Zhang, Y.G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenisation temperatures and densities of superficial fluids in the system NaCl-KCl-CaCl 2-H 2 O using synthetic fluid inclusions. Chemical Geology 64, 335–345. https://doi.org/10.1016/0009-2541 (87)90012-X, https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90012-X.