

Research Article**Investigation of type and genesis of base metal mineralization in the Zajkan deposit (Tarom-e-Sofla, Qazvin Province) using geology, geochemistry and fluid inclusions data**Baharak Mahzi¹, Hossein Kouhestani^{1*}, Mir Ali Asghar Mokhtari¹

1- Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Keywords: Base metal mineralization, Intermediate-sulfidation, epithermal, Tarom–Hashtjin, Zajkan, Qazvin**1- Introduction**

The Zajkan base metal deposit is located in the Tarom-e-Sofla part of the Qazvin Province and is part of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt (THMB). The THMB has been documented as one of the essential epithermal metallogenic belts in Iran (Ghorbani, 2013; Kouhestani et al., 2018) that host numerous epithermal precious and base metal deposits (i.e., Golijeh, Rashtabad, Gulojeh, Aqkand, Aliabad–Khanchy, Chodarchay, Khalyfehlou, Chargar, Lubin-Zardeh, Marshoun, Abbasabad, Zehabad, and Shah Ali Beiglou; Esmaeli et al., 2015; Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017, 2018, 2019, 2020; Yasami et al., 2017, 2018; Khodabandelou et al., 2018; Mikaeili et al., 2018; Yasami and Ghaderi, 2019; Mousavi Motlagh and Ghaderi, 2019; Mousavi Motlagh et al., 2019; Shahbazi et al., 2019; Zamanian et al., 2019, 2020).

Mining at Zajkan started around 1970 and continued to the beginning of the 1980s. Recent exploration work at the Zajkan deposit began in 2017 by Roy Godaz Company, and the deposit is still under exploration. This paper presents detailed geology and mineralization characteristics of the Zajkan deposit and geochemical and fluid inclusions data to investigate the ore genesis of the deposit. These results may imply the regional exploration of epithermal deposits in the THMB.

2- Materials and methods

Detailed fieldwork has been carried out at different scales in the Zajkan area. Sixty samples were collected from various parts of ore veins, breccias, and host rocks. The samples were prepared for thin section (n=5) and polished-thin (n=42) sections in the University of Zanjan, Zanjan, Iran. In addition, eight representative samples of the mineralized veins and breccias and two samples of the barren and fresh host crystal acidic tuff and andesitic lava units were analyzed for rare and rare earth elements in Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran, using ICP–MS.

Fluid inclusion measurements have been conducted on four doubly polished thick (~150 μm) sections, including crystalline quartz and sphalerite from the first, second, and third stages of ore formation. In addition, microthermometric measurements were performed using a Linkam THMSG-600 heating–freezing set attached to a ZEISS microscope in the fluid inclusion laboratory of the Iranian Mineral Processing Research Center, Tehran, Iran.

3-Results and discussion

The geological units exposed in the Zajkan deposit are Eocene tuff units and andesitic lavas that were intruded by late Eocene dacitic domes and pyroxene quartz monzodiorite intrusions. The tuff units cover most parts of the Zajkan area and can be divided into acidic (crystal lithic tuff and lithic tuff) and intermediate (crystal tuff, crystal

* Corresponding author: kouhestani@znu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.36283.2191

Received 2021-01-03

Accepted 2021-06-19

lithic tuff, and lithic tuff) units. The andesite lavas crop out mainly in the southern parts of the Zajkan area. The dacitic dome and pyroxene quartz monzodiorite intrusion crop out in the west and northwest of the Zajkan area, where they intruded into the acidic tuff units.

The Zajkan deposit consists of three EW- and NE-trending epithermal quartz-base metal breccia veins hosted by Eocene acidic and intermediate tuff units. The ore veins extend up to 250 m long, from 0.5 m to 3 m wide, and generally dip steeply (65–85°) to the south and southeast. Metal concentrations of collected samples average eight wt. % Zn + Pb and 0.4 wt. % Cu (Roy Godaz Company, unpublished data). The hydrothermal alteration includes silicification, intermediate argillic, carbonate, and propylitic alteration. The quartz, intermediate argillic, and carbonate alteration types are spatially strictly connected with high-grade ore zones, whereas propylitic alteration occurs distally.

Three stages of mineralization are distinguished at Zajkan. Stage 1 is signified by mm to 10 cm wide quartz (fluorite)-chalcopyrite-pyrite vein-veinlets that are usually crosscut by stage 2. Stage 2 comprises 10 mm to 5 cm wide quartz-sulfide (galena-sphalerite ± chalcopyrite ± pyrite) veins and breccias. Clasts of this stage are usually found within the hydrothermal cement of stage 3. Stage 3 is marked by ~3-5 cm wide quartz-specular hematite vein-veinlets, which generally cut across stage 2 and, in turn, are cut by quartz-carbonate veins of stage 4. Finally, stage 4 is a barren post-ore stage marked by 1 cm wide individual or sets of quartz-carbonate veins that generally cut across previous ore stages. The ore minerals at Zajkan are pyrite, chalcopyrite, galena, and sphalerite, making up more than 10 percent of the vein volume, whereas hematite is a minor phase. Cerussite, smithsonite, malachite, azurite, covellite, and goethite are the supergene assemblages, and the gangue minerals include quartz, fluorite, sericite, chlorite, and calcite. Ore minerals display disseminated vein-veinlet, brecciated, comb, crustiform, colloform, cockade, plumose, and vug infill textures.

Comparison of Chondrite-normalized rare elements (Thompson, 1982) and REE (Sun and McDonough, 1989) patterns of host crystal acidic tuffs, barren and fresh andesitic lava, and the mineralized samples at Zajkan indicate that leaching of some elements from the host rocks may have involved in mineralization. Microthermometric data reveal that ore-forming fluids associated with the quartz-sulfide veins are represented by two-phase aqueous inclusions and by H₂O–NaCl fluids with moderate-temperature (150–295 °C) and low-salinity (0.2–7.6 wt. % NaCl equiv.). Estimated trapping hydrostatic pressures are 40 to 80 bars, corresponding to entrapment depths of 480 to 822 m below the paleowater table. Fluid inclusion data indicates that fluid boiling and mixing were essential processes in the evolution of the ore-forming fluids at Zajkan (e.g., Simmons and Browne, 2000; Simpson et al., 2001; Camprubi and Albinson, 2007; Canet et al., 2011; Li et al., 2019; Javidi Moghaddam et al., 2019).

4- Conclusions

The ore geology, mineralization, hydrothermal alteration, and fluid inclusion investigations of base metal mineralized quartz veins and breccias at Zajkan indicate that this deposit is an intermediate-sulfidation epithermal deposit. In addition, our data suggest that mineralization at Zajkan and other epithermal deposits at THMB are related to late Eocene magmatic-hydrothermal activity, which must be considered during epithermal base (precious) metal exploration programs.

Acknowledgment

This research was supported by the grant of the vice-chancellor's office for research and technology, the University of Zanjan, Zarazma Company, and IMIDRO. We acknowledge their support. The journal of Advanced Applied Geology reviewers and editors are also thanked for their constructive suggestions on the manuscript's alterations.

References

Camprubi, A., Albinson, T., 2007. Epithermal deposits in Mexico, update of current knowledge, and an empirical re-classification. Special Paper of the Geological Society of America 422, 14–39.



- Canet, C., Franco, S.I., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Villanueva-Estrada, R.E., 2011. A model of boiling for fluid inclusion studies: Application to the Bolaños Ag–Au–Pb–Zn epithermal deposit, Western Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* 110(2), 118–125.
- Esmaeli, M., Lotfi, M. and Nezafati, N., 2015. Fluid inclusion and stable isotope study of the Khalyfehlou copper deposit, southeast Zanjan, Iran. *Arabian Journal of Geoscience* 8(11), 9625–9633.
- Ghorbani, M., 2013. *The economic geology of Iran: Mineral deposits and natural resources*. Springer, London, 569 pp.
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., 2019. Investigation of Cu vein of the Shurk and associated gossan zone (North West of Birjand) based on alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion. *Advance Applied Geology* 9(3), 316–340.
- Khodabandelou, Z., Ghaderi, M., Rastad, E., 2018. Mineralogy, texture and structure, and formation stages of the Golijeh intermediate-sulfidation epithermal deposit in Tarom subzone of western Alborz–Azerbaijan zone. *Advance Applied Geology* 8(2), 9–20 (In Persian with English abstract).
- Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M., 2017. Mineralization and fluid evolution of epithermal base metal veins from the Aqkand deposit, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry* 194(2), 139–155.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., Johnson, A.C., 2018. Intermediate-sulfidation type base metal mineralization at Aliabad–Khanchy, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 93, 1–18.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z., Zhang, X.N., 2020. Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes. *Ore Geology Reviews* 126, 103752.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z., Zhao, J.X., 2019. Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb–Zn–Cu (Ag) deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 113, 103087.
- Li, H., Tang, J., Hu, G., Ding, S., Li, Z., Xie, F., Teng, L., Cui, S., 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag–Pb–Zn deposit, Tibet, China. *Ore Geology Reviews* 107, 692–706.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E.E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 78, 41–57.
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Maghfouri, S., 2018. The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, Iran: An example of intermediate-sulfidation epithermal type mineralization. *Minerals* 8(4), 148.
- Mousavi Motlagh, S.H., Ghaderi, M., 2019. The Chargar Au–Cu deposit: an example of low-sulfidation epithermal mineralization from the Tarom subzone, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry* 196(1), 43–66.
- Mousavi Motlagh, S.H., Ghaderi, M., Yasami, N., Alfonso, P., 2019. Stable isotope geochemistry of Chargar epithermal deposit: Constraints on epithermal systems in the Tarom metallogenic belt, NW Iran. *Journal Geochemical Exploration* 205, 106331.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 28, 882–901.
- Simmons, S.F., Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology* 95(5), 971–1000.
- Simpson, M.P., Mauk, J.L., Simmons, S.F., 2001. Hydrothermal alteration and hydrologic evolution of the Golden Cross epithermal Au–Ag deposit, New Zealand. *Economic Geology* 96(4), 773–796.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*. 42(1), 313–45.



- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology* 18(1), 49–107.
- Yasami, N., Ghaderi, M., 2019. Distribution of alteration, mineralization and fluid inclusion features in porphyry–high-sulfidation epithermal systems: The Chodarchay example. NW Iran. *Ore Geology Reviews* 104, 227–245.
- Yasami, N., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2018. Sulfur isotope geochemistry of the Chodarchay Cu–Au deposit, Tarom, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry* 195(2), 101–113.
- Yasami, N., Ghaderi, M., Madanipour, S., Taghilou, B., 2017. Structural control on overprinting high-sulfidation epithermal on porphyry mineralization in the Chodarchay deposit, northwestern Iran. *Ore Geology Reviews* 86, 212–224.
- Zamanian, H., Rahmani, S., 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.
- Zamanian, H., Rahmani, S., Zareisahamieh, R., Pazoki, A., Yang, X.Y., 2020. Geochemical characteristics of igneous host rocks of Lubin-Zardeh Au–Cu deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 122, 103496.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mahzi, B., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., 2022. Investigation of type and genesis of base metal mineralization in the Zajkan deposit (Tarom-e-Sofla, Qazvin Province) using geology, geochemistry and fluid inclusions data. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 365-392.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36283.2191

url: https://aag.scu.ac.ir/article_17041.html?lang=en

©2022 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.



بررسی تیپ و ژنز کانه‌زایی فلزات پایه در کانسار زاجکان (طارم سفلی، استان قزوین) با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

بهارک محضی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

حسین کوهستانی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

میر علی اصغر مختاری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

*kouhestani@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

چکیده

کانه‌زایی در کانسار زاجکان به صورت رگه‌های کوارتز - سولفیدی درون توالی توف‌های حدواسط و اسیدی رخ داده و به چهار مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی شامل رگه و رگچه‌های کوارتزی (\pm فلوریت) دارای پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. مرحله دوم کانه‌زایی شامل رگه‌ها و برش‌های گرمابی با سیمان کوارتز - سولفیدی (گالن، اسفالریت \pm کالکوپیریت \pm پیریت) است. مرحله سوم کانه‌زایی با حضور کوارتز و هماتیت در رگه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها مشخص می‌شود. مرحله چهارم شامل رگه و رگچه‌های کوارتز - کلسیتی تأخیری فاقد کانه‌زایی است. دگرسانی گرمابی شامل دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیک متوسط، کربناتی و پروپلیتیک است. پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت همراه با مقدار اندکی هماتیت، کانه‌های معدنی در زاجکان هستند. کوارتز، فلوریت، سرسیت، کلریت و کلسیت کانی‌های باطله می‌باشند. ساخت و بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه - رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کالکی، پرماند، گل کلمی و پُرکننده فضای خالی است. الگوی عناصر کمیاب و نادر خاکی به‌هنگار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان، مشابه و بیانگر نقش این سنگ‌ها در تأمین عناصر کانه‌ساز می‌باشد. مطالعات میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد سیالات مسئول کانه‌زایی در زاجکان یک سیستم $H_2O-NaCl$ با دمای متوسط (۱۵۰ تا ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (۰/۲ تا ۷/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. روند تکامل سیال کانه‌ساز با فرایندهای اختلاط و جوشش سیالات هم‌خوانی دارد. عمق کانه‌زایی بین ۴۸۰ تا ۸۲۰ متر زیر سطح آب‌های قدیمی می‌باشد. کانسار زاجکان از نوع کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط است.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی فلزات پایه، اپی‌ترمال، سولفیداسیون حدواسط، طارم - هشتجین، زاجکان، قزوین

مقدمه

آق‌کند (Feizi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017)، مس - طلای لوبین - زرده (Zamanian et al., 2019, 2020)، رشت‌آباد (Khakzad and Hajalilou, 1999; Kouhestani et al., 2018b)، خلیفه‌لو (Esmaili et al., 2015; Hosseinzadeh et al., 2016)، چرگر (Mousavi Motlagh and Ghaderi, 2019; Naderlou et al., 2019) و شمال چرگر (Mousavi Motlagh et al., 2019) و سرب - روی (مس) آباریک (Bazargani et al., 2021) و سرب - روی (مس) آباریک (Guilani and Parchekani, 2011) در آن قرار دارند. کانسار زاجکان یکی از کانه‌زایی‌های موجود در کمربند طارم - هشتجین می‌باشد که از سال ۱۳۴۹ تا ۱۳۵۹ به مدت یک دهه فعالیت‌های معدن‌کاری در آن انجام شده است. از سال ۱۳۹۶، شرکت روی‌گداز زنجان فعالیت‌های جدید اکتشافی بر روی این کانسار را آغاز کرده است.

کانسار فلزات پایه زاجکان در بخش طارم سفلی در استان قزوین واقع شده و بخشی از کمربند فلزایی طارم - هشتجین (Kouhestani et al., 2018a) در پهنه البرز باختری - آذربایجان (Nabavi et al., 1976) است (شکل a). این کمربند میزبان مهمی برای کانی‌سازی‌های اپی‌ترمال در ایران می‌باشد به‌طوری‌که کانسارهای طلای گلوچه (Mehrabi et al., 2009, 2010, 2014, 2016; Ghasemi Siani et al., 2015)، سرب و روی (\pm طلا) زه‌آباد (Shahbazi et al., 2019; Shahbazi, 2020)، مس - سرب - روی مرشون (Kouhestani et al., 2019) و عباس‌آباد (Kouhestani et al., 2020)، مس علی‌آباد - خان‌چای (Mokhtari et al., 2016; Kouhestani et al., 2018a) و

زمین شناسی و سنگ شناسی کانسار زاجکان

براساس نقشه زمین شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر (Hosseiny et al., 2016) و با توجه به پیمایش های صحرایی انجام شده در قالب تهیه نقشه زمین شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ از منطقه مورد مطالعه (شکل b1)، واحدهای سنگی موجود در منطقه زاجکان شامل توف های اسیدی (واحد E^{IV}) و حدواسط (واحد E^{IV2}) و گدازه های آندزیتی ائوسن (واحد E^{an}) هستند که توسط گنبد داسیتی (واحد da) و توده های نفوذی پیروکسن کوارتزومونزودیوریتی (واحد qm) به سن ائوسن بالایی قطع شده اند. زمین شناسی و سنگ شناسی این واحدها به شرح زیر می باشد.

توف های اسیدی: توف های اسیدی در بخش های شمالی منطقه زاجکان رخنمون دارند و توسط واحد توف های حدواسط پوشیده شده اند (شکل a2). این واحدها از لایه های نازک تا متوسط کریستال لیتیک توف و لیتیک توف تشکیل شده و توسط گنبد های داسیتی و توده پیروکسن کوارتزومونزودیوریتی ائوسن بالایی قطع شده اند (شکل b1). براساس مطالعات میکروسکوپی، توف های اسیدی از درشت بلورهای شکسته شده کوارتز، آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز و مقدار کمی بیوتیت همراه با قطعات خرده سنگی در یک زمینه ریزبلور تشکیل شده اند. قطعات سنگی موجود بیشتر از جنس داسیت با بافت پورفیری هستند.

توف های حدواسط: توف های حدواسط بیشتر در بخش های جنوبی منطقه زاجکان رخنمون دارند (شکل b1). این واحدهای سنگی شامل تناوبی از کریستال توف، کریستال لیتیک توف و لیتیک توف نازک تا متوسط لایه با میان لایه هایی از گدازه های آندزیتی هستند (شکل b2). نتایج مطالعات میکروسکوپی نشان می دهد توف های حدواسط از درشت بلورهای شکسته شده پلاژیوکلاز، آمفیبول و قطعات خرده سنگی در یک زمینه ریزبلور تشکیل شده اند. قطعات سنگی اغلب زاویه دار تا گرد شده هستند. در لیتیک توف ها، فضای بین قطعات سنگی را کوارتزها و کلسیت های ثانویه پر کرده اند.

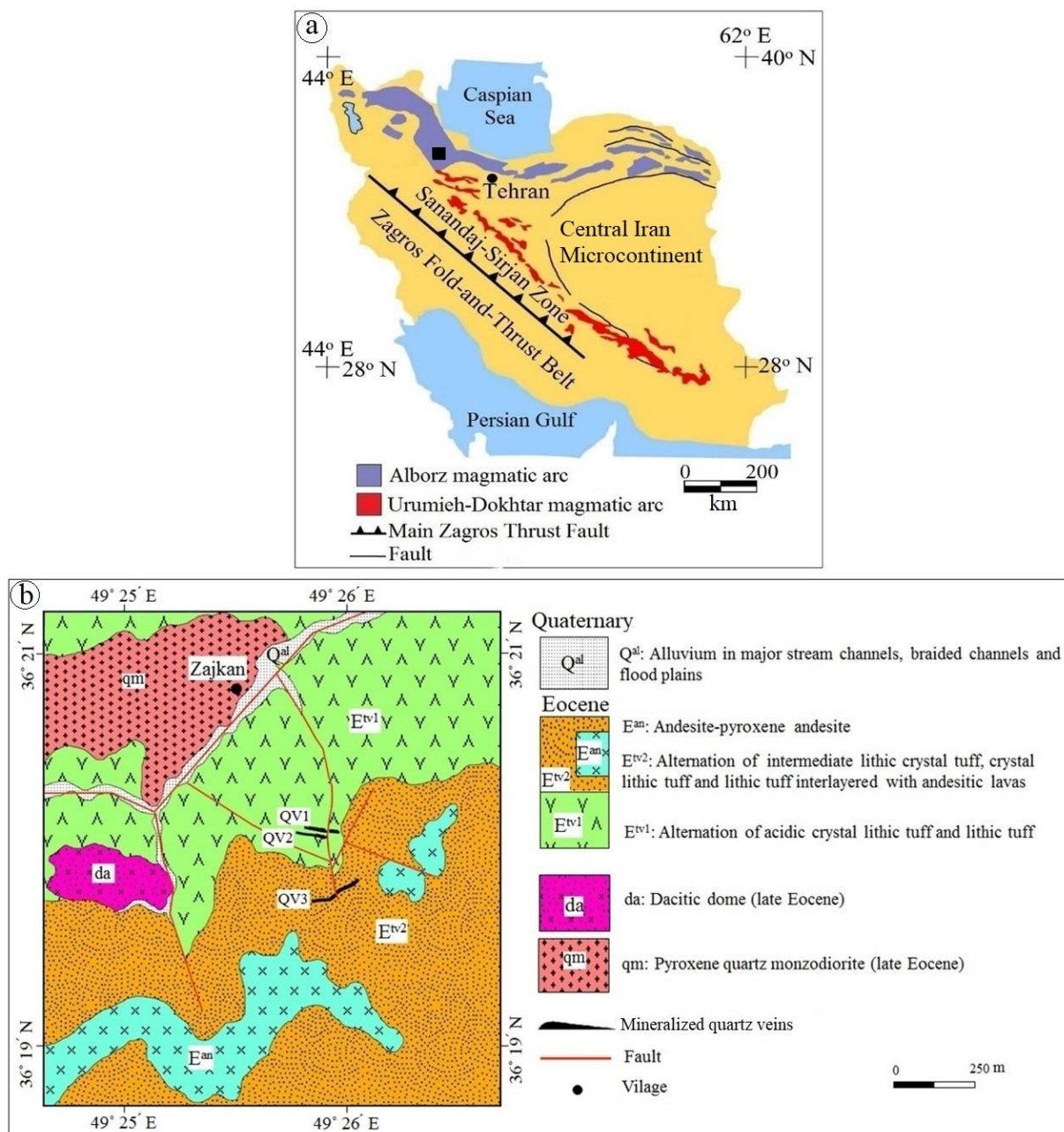
گدازه های آندزیتی: گدازه های آندزیتی در بخش های جنوبی منطقه، با ریخت شناسی صخره ساز و راستای تقریبی خاوری - باختری درون توالی توف های حدواسط گسترش دارند (شکل های b1 و b2). براساس مطالعات میکروسکوپی، گدازه های آندزیتی از درشت بلورهای پلاژیوکلاز و کانی های مافیک کلریتی شده تشکیل شده و دارای بافت پورفیری با زمینه دانه ریز و میکرولیتی هستند.

گنبد داسیتی: این گنبد به سن پس از ائوسن در بخش باختری منطقه زاجکان درون توالی توف های اسیدی رخنمون دارد (شکل های b1 و b2). براساس مطالعات میکروسکوپی، داسیت ها از درشت بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و کانی های مافیک (احتمالاً آمفیبول) اوپاسیته شده تشکیل شده اند.

در این مقاله، ویژگی های زمین شناسی و کانه زایی همراه با داده های زمین شیمی و میان بارهای سیال در کانسار زاجکان بررسی شده و خاستگاه و تیپ آن تعیین شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه زایی ها می تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی اکتشاف کانه زایی های مشابه در این منطقه را تعیین کرده و به عنوان الگوی اکتشافی در کمربند فلز زایی طارم - هشتجین و دیگر مناطق ایران با زمین شناسی مشابه مورد استفاده قرار داد.

روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می باشد. در مطالعات صحرایی، نقشه زمین شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ منطقه، تهیه و چگونگی ارتباط رگه های کانه دار با سنگ های میزبان مشخص گردید. سپس، تعداد ۵ مقطع نازک و ۴۲ مقطع نازک - صیقلی برای مطالعات سنگ شناسی، کانه نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله بعد، به منظور انجام مطالعات زمین شیمیایی، تعداد ۲ نمونه از سنگ های میزبان و ۸ نمونه از بخش های کانه دار انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا نمونه ها توسط سنگ شکن تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی متر) خرد شده و سپس با استفاده از آگات تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و نادر خاکی به روش ICP-MS به آزمایشگاه شرکت زرآما در تهران، ارسال و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین میزان عناصر نادر خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل گردید. برای تعیین میزان فلزات پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی گراد) حل گردید. حد پایین دقت اندازه گیری برای عناصر مختلف در جدول ۱ ذکر شده است. برای تعیین ویژگی های دما، فشار و شوری سیالات مسئول کانه زایی و دگرسانی، تعداد ۴ نمونه از رگه ها و پرش های کانه دار برای انجام مطالعات میان بارهای سیال انتخاب و در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران در کرج مطالعه شد. مطالعات ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه Linkam THMSG-600 متصل به میکروسکوپ ZEISS در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران در کرج انجام شد. دامنه حرارتی دستگاه ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی گراد می باشد. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت $\pm 0/6$ درجه سانتی گراد است که با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی گراد و در مرحله سرمایش با دقت $\pm 0/2$ درجه سانتی گراد و با ماده استاندارد ان هگزان (N-Hexane) با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی گراد انجام شده است. میزان شوری به صورت معادل درصد وزنی نمک طعام (wt.% NaCl) و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ با استفاده از فرمول ارائه شده توسط Bodnar (۱۹۹۳) محاسبه شده است. برای ترسیم نمودارها از نرم افزارهای Igpert 2007 و Excel 2016 استفاده شده است.

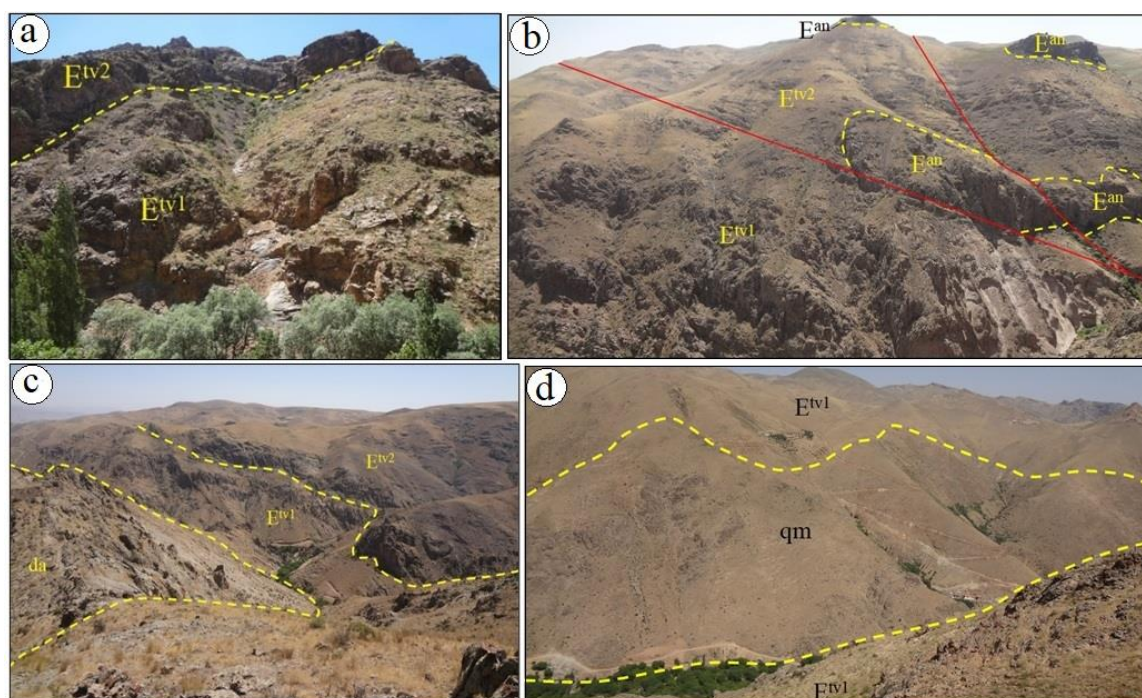


شکل ۱- (a) نقشه تکتونیکی ایران با تغییرات از نبوی (Nabavi, 1976) همراه با موقعیت منطقه مورد مطالعه (مربع مشکی) در پهنه البرز باختری-آذربایجان و (b) نقشه زمین شناسی کانسار زاجکان.

Fig. 1. (a) Tectonic map of Iran (modified from Nabavi, 1976) together with the location of the study area (black square) in the Western Alborz-Azerbaijan zone and (b) Geological map of Zajkan deposit.

پلاژیوکلاز (۵۰ درصد)، پیروکسن (۳۰ درصد)، کوارتز (۸ درصد) و آلکالی فلدسپار (۸ درصد) می‌باشند. کانی‌های فرعی این توده شامل بیوتیت‌های کلریتی شده، کانی‌های کدر، آپاتیت و زیرکن است. کانی‌های ثانویه نیز شامل اکتینولیت، سرپسیت، کانی‌های رسی، کلریت و کانی‌های کدر می‌باشند.

توده پیروکسن کوارتز مونوزودایوریتی: این توده به رنگ خاکستری تیره در بخش شمال باختری منطقه (باختر روستای زاجکان) واقع شده و درون توالی توف‌های اسیدی منطقه نفوذ کرده است (شکل‌های b1 و d2). در مطالعات میکروسکوپی، این توده ترکیب پیروکسن کوارتز مونوزودایوریتی داشته و کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آن شامل



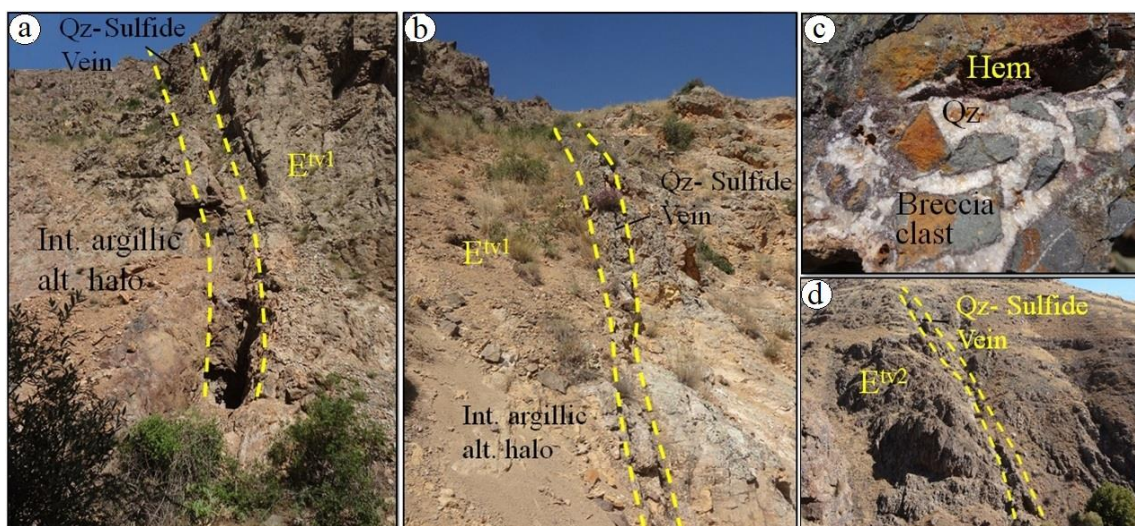
شکل ۲- (a) توالی توفهای اسیدی (E^{tv1}) در منطقه زاجکان که توسط توالی توفهای حدواسط (E^{tv2}) پوشیده شده‌اند (دید به سمت باختر- جنوب‌باختر)، (b) گدازه آندزیتی (E^{an}) درون توالی توفهای حدواسط (E^{tv2}) (دید به سمت خاور)، (c) گنبد داسیتی (da) که به درون توالی توفهای اسیدی (E^{tv1}) نفوذ کرده است (دید به سمت شمال خاور) و (d) توده پیروکسن کوارتز مونزودیریتی (qm) که به درون توالی توفهای اسیدی (E^{tv1}) نفوذ کرده است (دید به سمت شمال خاور).

Fig. 2. (a) Acidic tuff strata (E^{tv1}) covered by intermediate tuff units (E^{tv2}), looking to the west-southwest, (b) Andesitic lava (E^{an}) within intermediate tuff units (E^{tv2}), looking to the east, (c) Dacitic dome (da) intruded within acidic tuff units (E^{tv1}), looking to the northeast and (d) Pyroxene quartz monzodirite pluton (qm) intruded within acidic tuff units (E^{tv1}), looking to the northeast.

قطعات برش معمولاً جور نشده و زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار بوده و ۲۰ تا ۳۰ درصد قطعات توفی، ۱۰ تا ۲۰ درصد قطعات گدازه‌ای و ۵۰ تا ۷۰ درصد قطعات کانه‌دار می‌باشند. سیمان گرمایی این برش‌ها از جنس کوارتز، سولفید و هماتیت است. (شکل ۳c). رگه کوارتز - سولفیدی سوم (رگه جنوبی)، حدود ۲۵۰ متر درازا و ۰/۵ تا ۳ متر پهنا داشته و توسط توالی توفهای حدواسط (E^{tv2}) میزبان شده است (شکل ۳d). روند عمومی این رگه، شمال خاور - جنوب‌باختر با شیب حدود ۶۵ درجه به سمت جنوب‌خاور است. پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت، مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی موجود در رگه‌های کانه‌دار منطقه زاجکان هستند که با مقداری هماتیت همراهی می‌شوند. عیار نمونه‌های برداشت‌شده از این رگه‌ها تا ۸ درصد مجموع سرب و روی و ۰/۴ درصد مس را مشخص کرده است (Roy Godaz Co., unpublished data).

کانه‌زایی و دگرسانی

کانه‌زایی در کانسار زاجکان شامل سه رگه کوارتز - سولفیدی است که درون توالی توفهای اسیدی (واحد E^{tv1}) و حدواسط (واحد E^{tv2}) منطقه رخ داده‌اند (شکل‌های b1 و ۳). براساس مطالعات صحرایی و با توجه به نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ منطقه زاجکان، رگه اول (رگه شمالی) حدود ۲۰۰ متر درازا و ۱/۵ متر پهنا داشته و روند عمومی آن خاوری - باختری با شیب ۷۵ تا ۸۵ درجه به سمت جنوب می‌باشد. رگه دوم (رگه میانی) حدود ۱۵۰ متر درازا و ۰/۷ متر پهنا داشته و روند و شیبی مشابه با رگه اول دارد. دگرسانی آرژیلیک متوسط به ضخامت تا ۳ متر، اطراف این رگه‌های کانه‌دار را دربر می‌گیرد (شکل a3 و b). رگه‌های اول و دوم کانه‌زایی درون توالی توفهای اسیدی منطقه (واحد E^{tv1}) قرار داشته و عمده فعالیت‌های معدنی قدیمی بر روی آنها انجام شده است. برشی شدن اغلب در این رگه‌های کوارتز - سولفیدی رخ داده است. برش‌ها معمولاً حاوی قطعات فراوان با سیمان گرمایی هستند.



شکل ۳- نماهایی از رگه‌های کوارتز - سولفیدی کانه‌دار در کانسار زاجکان؛ (a و b) نماهایی از رگه‌های کوارتز - سولفیدی اول (a) و دوم (b) که توالی توف‌های اسیدی (E^{IV1}) میزبان خود را قطع کرده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژیلیک متوسط در بر گرفته شده‌اند (دید تصاویر به ترتیب به سمت خاور و شمال‌باختر)، (c) نمایی نزدیک از برش‌های گرمایی با سیمان کوارتز، سولفید و هماتیت و (d) نمایی از رگه کوارتز - سولفیدی سوم که توالی توف‌های حدواسط (واحد E^{IV2}) میزبان خود را قطع کرده است (دید به سمت جنوب‌خاور). علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Hem: هماتیت، Qz: کوارتز).

Fig. 3. Views of mineralized quartz-sulfide veins in the Zajkan deposit; (a and b) Views of quartz-sulfide veins 1 (a) and 2 (b) which cut host acidic tuff units (E^{IV1}) and covered by intermediate argillic alteration halo, looking to the east and northwest, respectively, (c) Close view of hydrothermal breccia with quartz, sulfide and hematite cements, and (d) A view from quartz-sulfide 3 vein which cut host intermediate tuff units (E^{IV2}), looking to the southeast. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Hem: hematite, Qz: quartz).

پایانی دگرسانی گرمایی در کانسار زاجکان تشکیل شده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی، کلسیت‌ها بیشتر در فضای بین کوارتزها دیده می‌شوند (شکل ۴e). دگرسانی پروپیلیتیک از گسترش زیادی در منطقه زاجکان برخوردار بوده و بیشتر در بخش‌های بیرونی پهنه‌های دگرسانی دیده می‌شود. این دگرسانی از شدت ضعیف تا متوسط برخوردار بوده و معمولاً با بافت کانی‌ها در آن حفظ شده است. دگرسانی پروپیلیتیک معمولاً با جانشینی پلاژیوکلاز توسط سریسیت، کلریت و کلسیت و همچنین دگرسانی آمفیبول به مجموعه اکتینولیت، کلسیت و کلریت مشخص می‌شود (شکل ۴f). کوارتز حاصل از این دگرسانی به میزان کم در زمینه سنگ دیده می‌شود.

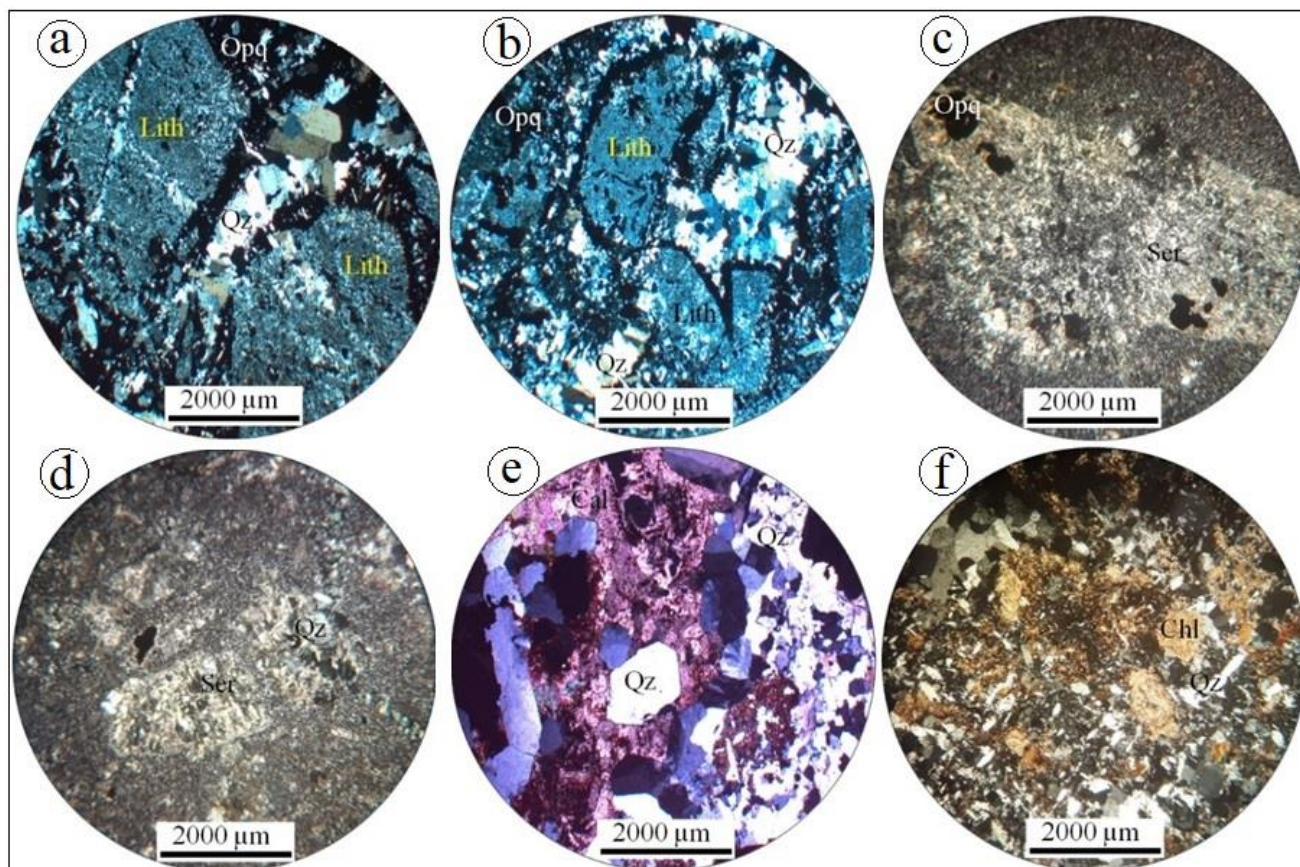
مراحل کانه‌زایی

براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام شده و با توجه به مجموعه کانی‌شناسی، روابط بافتی و ارتباط قطع‌کنندگی رگه‌های کانه‌دار، فرایند کانه‌زایی در کانسار زاجکان به چهار مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی شامل رگه و رگچه‌های کوارتزی (گاه کوارتز-فلوریت) به ضخامت چند میلی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر است که دارای مقادیر متغیری پیریت و کالکوپیریت می‌باشد (شکل ۵a). این مرحله از کانه‌زایی اغلب توسط مرحله دوم کانه‌زایی قطع شده است (شکل ۵b). مرحله دوم کانه‌زایی، اصلی‌ترین مرحله کانه‌زایی در کانسار زاجکان می‌باشد. این مرحله با حضور رگه‌ها و برش‌های گرمایی با سیمان کوارتز

براساس نتایج مطالعات صحرایی، XRD و میکروسکوپی، دگرسانی گرمایی در کانسار زاجکان شامل دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی و پروپیلیتیک می‌باشد که در این بین، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک متوسط و کربناتی منطبق بر بخش‌های کانه‌دار بوده و دگرسانی پروپیلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌دار، سنگ‌های میزبان را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی سیلیسی، به صورت رگه-رگچه‌ای و یا سیمان گرمایی برش‌ها رخ داده و منطبق بر بخش‌های کانه‌دار است (شکل ۴a و b). ضخامت رگه و رگچه‌های کوارتزی تا ۵ سانتی‌متر می‌رسد. در مقاطع نازک، بلورهای کوارتز موجود در رگچه‌ها، به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با اندازه‌های مختلف دیده می‌شوند. دگرسانی آرژیلیک متوسط با ضخامت حدود ۳ متر، به شدت توسط شکستگی‌ها کنترل شده و معمولاً رگه‌های کوارتز - سولفیدی را در بر گرفته است (شکل ۴a و b). این دگرسانی سبب تغییر رنگ سنگ به سفید تا زرد شده است. در مقیاس میکروسکوپی، این دگرسانی به صورت جانشینی پلاژیوکلاز توسط سریسیت، کانی‌های رسی و مقدار کمی کوارتز و کلسیت مشخص می‌شود (شکل ۴c و d). براساس نتایج تجزیه‌های XRD، کانی‌های رسی از نوع ایلیت و اسمکتیت هستند. دگرسانی کربناتی از گسترش محدودی در کانسار زاجکان برخوردار است. این دگرسانی شامل رگه و رگچه‌های کوارتز - کربناتی مرحله چهارم کانه‌زایی هستند که رگه و رگچه‌های کوارتز - سولفیدی مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. این امر نشان می‌دهد این رگچه‌ها در مراحل

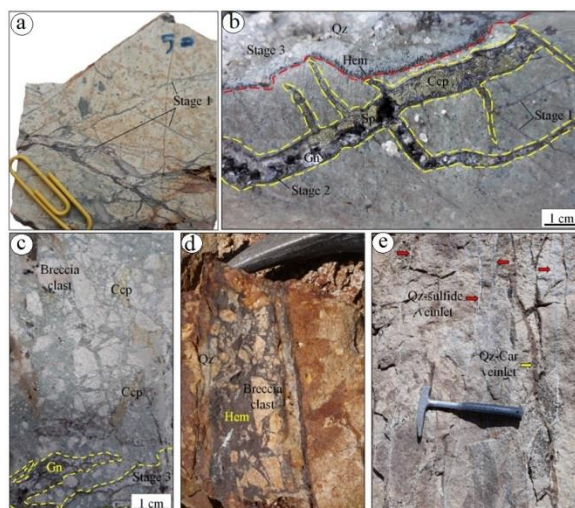
اغلب ضخامتی بین ۳ تا ۵ سانتی متر داشته و عموماً مرحله دوم کانه‌زایی را قطع کرده (شکل b و c) و خود توسط رگچه‌های مرحله چهارم کانه‌زایی قطع شده‌اند. مرحله چهارم کانه‌زایی یک مرحله عقیم بعد از کانه‌زایی بوده و به آخرین فعالیت‌های گرمایی در کانسار زاجکان مرتبط می‌باشد. این مرحله با حضور رگه و رگچه‌های مجزا و یا دسته رگچه‌های کوارتز- کربناتی با ضخامت کمتر از ۱ سانتی متر مشخص می‌شود که عموماً مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل e). هیچگونه کانی سولفیدی با این مرحله مشاهده نمی‌شود.

- سولفیدی (گالن، اسفالریت \pm کالکوپیریت \pm پیریت) به ضخامت ۱۰ میلی‌متر تا ۵۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. این مرحله از کانه‌زایی اغلب مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده و خود توسط رگه‌های مراحل بعدی کانه‌زایی قطع شده است (شکل b و c). قطعات این مرحله از کانه‌زایی اغلب به صورت قطعات برشی در سیمان گرمایی پرش‌های مرحله سوم کانه‌زایی دیده می‌شوند. مرحله سوم کانه‌زایی با حضور کوارتز و بلورهای تیغه‌ای هماتیت در رگه‌ها و سیمان گرمایی برش‌های کوارتز- هماتیتی مشخص می‌شود (شکل c و d). رگچه‌های کوارتز- هماتیتی این مرحله



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه با نیکول‌های متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌ها در کانسار زاجکان؛ (a و b) دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌ای و سیمان گرمایی پرش‌ها، (c و d) دگرسانی آرژیلیک متوسط به صورت جانشینی کانی‌های رسی و سریسیت همراه با اندکی کوارتز به جای پلاژیوکلاز، (e) کلسیت در فضای بین کوارتزها در دگرسانی کربناتی و (f) دگرسانی پروپیلیتیک به صورت جانشینی کلریت به جای پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Lith: قطعه سنگ، Opq: کانی کدر، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Zajkan deposit. (a and b) Silica alteration as veinlets and hydrothermal breccia cements, (c and d) Intermediate argillic alteration as replacement of plagioclase by clay minerals, sericite and minor quartz, (e) Calcite between quartz grains in carbonate alteration, and (f) Propylitic alteration as replacement of plagioclase and mafic minerals by chlorite. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Chl: chlorite, Lith: rock fragment, Opq: opaque mineral, Qz: quartz, Ser: sericite).



شکل ۵- مراحل کانه‌زایی در کانسار زاجکان؛ (a) مرحله اول کانه‌زایی به صورت رگچه‌های کوارتزی پیریت و کالکوپیریت‌دار که سنگ میزبان لیتیک کریستال توف اسیدی خود را قطع کرده‌اند، (b) رگه‌های کوارتزی گالن-اسفالریت - کالکوپیریت‌دار مرحله دوم کانه‌زایی که رگچه‌های مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده و خود توسط رگه کوارتز-هماتیتی مرحله سوم کانه‌زایی قطع شده است، (c) برش‌های گرمابی با سیمان سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی که توسط رگه‌های مرحله سوم کانه‌زایی قطع شده‌اند. قطعات پرشی مرحله دوم کانه‌زایی به صورت قطعات خردسنگی در رگه مرحله سوم قابل مشاهده است، (d) برش‌های گرمابی با سیمان کوارتز-هماتیتی مرحله سوم کانه‌زایی و (e) رگه‌های کوارتز-کربناتی مرحله چهارم (فلش زرد رنگ) که رگه‌های کوارتز-سولفیدی (فلش‌های قرمز) مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Hem: هماتیت، Sp: اسفالریت، Qz: کوارتز).

Fig. 5. Mineralization stages in the Zajkan deposit. (a) Stage 1 mineralization as pyrite and chalcopyrite-bearing quartz veinlets crosscutting its host lithic acidic tuff, (b) Galena-sphalerite-chalcopyrite-bearing quartz veins of stage 2 mineralization crosscut stage 1 veinlets, and, in turn, cut by stage 3 quartz-hematite veins, (c) Hydrothermal breccias with stage 2 sulfide cements which crosscut by stage 3 veins. The breccia clasts of stage 2 mineralization found as lithic fragments within stage 3 vein, (d) Hydrothermal breccias with quartz-hematite cements of stage 3 mineralization and (e) Quartz-carbonate veins of stage 4 (yellow arrow) that crosscut quartz-sulfide (red arrows) of previous stages. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Hem: hematite, Sp: sphalerite, Qz: quartz).

پاراژنزی می‌باشد. اما در برخی دیگر از نقاط، کالکوپیریت هم‌زمان با پیریت تشکیل شده است (شکل ۵d). در بخش اصلی زون کانه‌دار، کالکوپیریت توسط کولیت و گوتیت جانشین شده و به‌طور محلی بافت اسکلتی نشان می‌دهد (شکل ۵e). گالن به‌صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار دیده شده و اندازه آن گاه به بزرگ‌تر از ۱ سانتی‌متر می‌رسد. در توالی پاراژنزی، گالن معمولاً جانشین پیریت و کالکوپیریت شده و در مقابل، خود توسط اسفالریت جانشین شده است (شکل ۵f و ۵g). در برخی از نقاط کانسار، ادخال‌هایی از گالن درون اسفالریت قابل مشاهده است که بیانگر تبلور زودتر گالن نسبت به اسفالریت در توالی پاراژنزی می‌باشد (شکل ۵h). در بیشتر بخش‌های کانسار، گالن توسط سروزیت جانشین شده است. اسفالریت به‌صورت بلورهای درشت (اغلب بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر) بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار به رنگ عسلی (فقیر از آهن) دیده می‌شود. اسفالریت‌ها اندکی بعد از کالکوپیریت و گالن تشکیل شده‌اند اما در برخی موارد، این کانی‌ها هم‌رشدی نشان می‌دهند (شکل ۵g، ۵i و ۵j). در اثر فرایندهای برون‌زاد، اسفالریت از حاشیه به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است.

کانی‌شناسی، ساخت و بافت و توالی پاراژنتیک

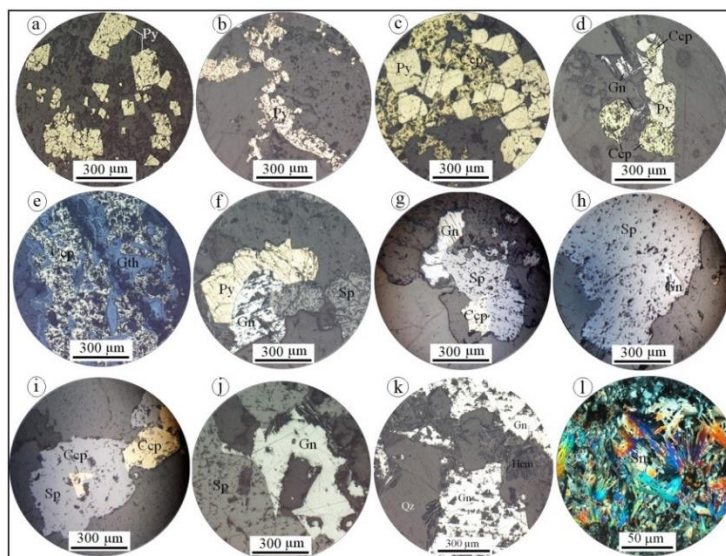
پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی در کانسار زاجکان هستند که با اندکی هماتیت همراهی می‌شوند. کوارتز، فلوریت، سریسیت، کلریت و کلسیت کانی‌های باطله در این کانسار می‌باشند. سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، آزوریت، کولیت و گوتیت در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. انواع بافت مواد معدنی و باطله در کانسار زاجکان شامل دانه‌پراکنده، رگه - رگچه‌ای، پرشی، شانهای، پوسته‌ای، کاکلی، پرماند، گل‌کلمی، بازماندی، اسکلتی، پُرکننده فضای خالی و جانشینی می‌باشد.

پیریت به‌صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در اندازه‌های ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر در رگه‌های کانه‌دار و یا سیمان گرمابی برش‌ها حضور دارد. این کانی اغلب بافت دانه‌پراکنده و رگچه‌ای داشته و معمولاً توسط کالکوپیریت دربرگرفته شده است (شکل ۵a تا ۵c). کالکوپیریت معمولاً به‌صورت بلورهای درشت (تا اندازه ۱ سانتی‌متر) نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و یا توده‌ای در رگه‌های کانه‌دار حضور دارد. در برخی از بخش‌ها، کالکوپیریت بلورهای شکل‌دار پیریت را در بر گرفته است (شکل ۵c) که این بیانگر تبلور کالکوپیریت بعد از پیریت در توالی

رگه‌ها و سیمان گرمابی پرش‌ها حضور دارد. این کانی معمولاً بافت‌های شانهای و پرکننده فضاهای خالی دارد (شکل a۷). در برخی از بخش‌های زون کانی‌سازی، بافت‌های کاکلی (شکل b۷)، پوسته‌ای (شکل c۷)، گل‌کلمی (شکل d۷) و پرماند (شکل e۷) نیز در کوارتزهای موجود در رگه‌های کانه‌دار و سیمان گرمابی پرش‌ها قابل مشاهده است. فلوریت تنها به صورت بلورهای شکسته‌شده در قطعات کوارتز - فلوریتی در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل f۷). سریسیت به صورت بلورهای ریز (اندازه بین ۵ تا ۵۰ میکرون) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده شده و عموماً جانشین پلاژیوکلاز شده است (شکل c۴ و d). کلریت به رنگ سبز در مقاطع میکروسکوپی دیده شده (شکل f۴) و بعضاً بافت اسفرولیتی نشان می‌دهد. کلسیت معمولاً حفرات بین کانی‌های کوارتز را پر کرده (شکل e۳) و یا در رگه‌های کوارتز-کربناتی دیده می‌شود (شکل e۵). توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار زاجکان در شکل ۸ نشان داده شده است.

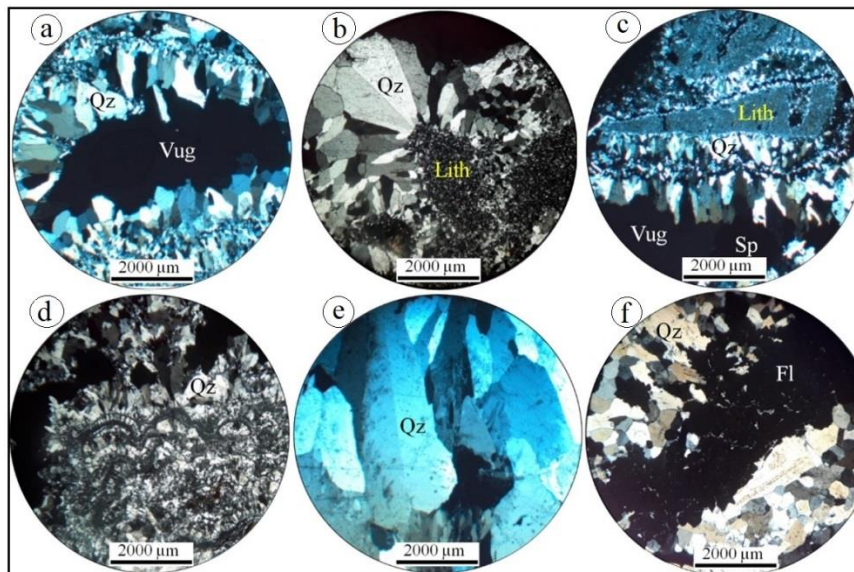
هماتیت معمولاً به صورت بلورهای تیغه‌ای (اسپیکولاریت) شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار تا اندازه ۱ میلی‌متر در رگه‌های کوارتز - هماتیته مرحله سوم کانه‌زایی حضور دارد (شکل k۶). در بیشتر بخش‌های کانسار، تیغه‌های هماتیت، کانی‌های سولفیدی را قطع کرده است (شکل k۶). سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، آزوریت، کوولیت و گوئیت کانی‌های برون‌زاد در کانسار زاجکان هستند. سروزیت و اسمیت‌زونیت معمولاً در بخش‌های کم‌عمق رگه‌های کوارتزی گالن و اسفالریت‌دار دیده شده و به ترتیب جانشین گالن و اسفالریت شده‌اند. اسمیت‌زونیت اغلب به صورت بلورهای با بافت شعاعی تا اندازه ۱ میلی‌متر در بخش‌های هوازده سطحی دیده می‌شود (شکل l۶). مالاکیت و آزوریت محصول جانشینی کالکوپیریت در رگه‌های کوارتزی کالکوپیریت‌دار هستند. کوولیت و گوئیت محصول دگرسانی کالکوپیریت‌ها از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها هستند.

کوارتز معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت (کمتر از ۲۰۰ میکرون تا ۱ سانتی‌متر) بی‌شکل تا شکل‌دار و یا مجموعه‌های توده‌ای در



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی (تصویر l در نور عبوری پلاریزه با نیکول‌های متقاطع، XPL و بقیه تصاویر در نور بازتابی) از کانه‌های موجود در کانسار زاجکان؛ (a) بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار پیریت با بافت دانه‌پراکنده، (b) پیریت با بافت رگچه‌ای، (c) بلورهای شکل‌دار پیریت که توسط کالکوپیریت در بر گرفته شده‌اند، (d) هم‌رشدی پیریت و کالکوپیریت، (e) جانشینی کالکوپیریت توسط گوئیت و تشکیل بافت اسکلتی، (f) جانشینی پیریت توسط گالن و اسفالریت، (g) جانشینی کالکوپیریت و گالن توسط اسفالریت، (h) ادخال گالن در اسفالریت، (i) جانشینی کالکوپیریت توسط اسفالریت. ادخال کالکوپیریت درون اسفالریت نیز در تصویر قابل مشاهده است، (j) هم‌رشدی گالن و اسفالریت، (k) بلورهای تیغه‌ای هماتیت که بلورهای گالن را قطع کرده‌اند و (l) اسمیت‌زونیت با بافت شعاعی. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Gth: گوئیت، Hem: هماتیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Sm: اسمیت‌زونیت، Sp: اسفالریت).

Fig. 6. Photomicrographs (l in transmitted light, XPL, and the rest in reflectel light) of ore mineralogy at the Zajkan deposit. (a) Subhedral to euhedral crystals of pyrite with disseminated texture, (b) Pyrite with veinlet texture, (c) Euhedral crystal of pyrite surrounded by chalcopyrite, (d) Intergrowth of pyrite and chalcopyrite, (e) Replacement of chalcopyrite by goethite and forming of skeletal texture, (f) Replacement of pyrite with galena and sphalerite, (g) Replacement of chalcopyrite and galena with sphalerite, (h) Inclusion of galena within sphalerite, (i) Replacement of chalcopyrite with sphalerite. Inclusion of chalcopyrite within sphalerite is also observed, (j) Intergrowth of galena and sphalerite, (k) Bladed crystals of hematite that crosscutting galena grains and (l) Smithsonite with radical texture. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Gth: goethite, Hem: hematite, Py: pyrite, Qz: quartz, Sm: smithsonite, Sp: sphalerite).



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه با نیکول‌های متقاطع، XPL) از بافت‌های کوارتز و فلوریت در کانسار زاجکان؛ (a) کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی، (b) بافت کاکلی کوارتز اطراف قطعه سنگ آذرآواری، (c) بافت پوسته‌ای کوارتز، (d) کوارتز با بافت گل‌کلمی، (e) بافت پرماند در بلورهای درشت کوارتز و (f) بلورهای فلوریت همراه با کوارتز در قطعات کوارتز-فلوریتی. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Fl: فلوریت، Lith: قطعه سنگ آذرآواری، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت).

Fig. 7. Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of quartz and fluorite textures in the Zajkan deposit. (a) Quartz with vug infill texture, (b) Cockade texture of quartz developed around volcaniclastic clast, (c) Crustiform texture of quartz, (d) Colloform texture of quartz, (e) Plumose texture of coarse-grained quartz crystals, and (f) Fluorite crystals along with quartz within quartz-fluorite fragments. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Fl: fluorite, Lith: volcaniclastic clast, Qz: quartz, Sp: sphalerite).

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5
Ore	Pyrite					
	Chalcopyrite					
	Galena					
	Sphalerite					
	Hematite					
	Cerussite					
	Smithsonite					
	Malachite-Azurite					
	Covellite					
	Goethite					
Gangue	Quartz					
	Sericite/Illite-Smectite					
	Chlorite					
	Fluorite					
	Calcite					
Textures	Disseminated					
	Brecciated					
	Vein-Veinlets					
	Comb					
	Cockade					
	Colloform/Crustiform					
	Plumose					
	Vug Infill					
	Replacement					

شکل ۸- توالی پاراژنزی، فراوانی نسبی، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانسار زاجکان.

Fig. 8. Paragenetic sequences showing the relative abundance, structure and texture of gangues and ore minerals at the Zajkan deposit.

الگوی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار، گدازه آندزیتی و کریستال توف اسیدی فاقد کانه‌زایی که نسبت به کندریت (Thompson, 1982) به‌هنگار شده‌اند، در شکل ۸a نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، نمونه‌های کانه‌دار الگوی تقریباً مشابهی دارند که می‌تواند بیانگر تشکیل آنها در ارتباط با یک

بحث و بررسی

داده‌های زمین‌شیمی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های کانسار زاجکان در جدول ۱ آورده شده است.

الگوی توزیع عناصر کمیاب و نادر خاکی

تقریباً مشابهی هستند (شکل b9). این نمونه‌ها الگوی مسطح عناصر نادر خاکی با نسبت متوسط تا پایین LREE/HREE با بی‌هنجاری منفی Ce را نشان می‌دهند. تهی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین را می‌توان به تحرک آسان این عناصر توسط سیالات کانه‌دار مرتبط دانست (Whitford et al., 1988; Yilmaz et al., 2007). بی‌هنجاری منفی Ce می‌تواند در ارتباط با شرایط احيائی سیال و محیط نهشت کانه‌ها باشد (Whitford et al., 1988; Dokuz et al., 2005; Wang et al., 2006).

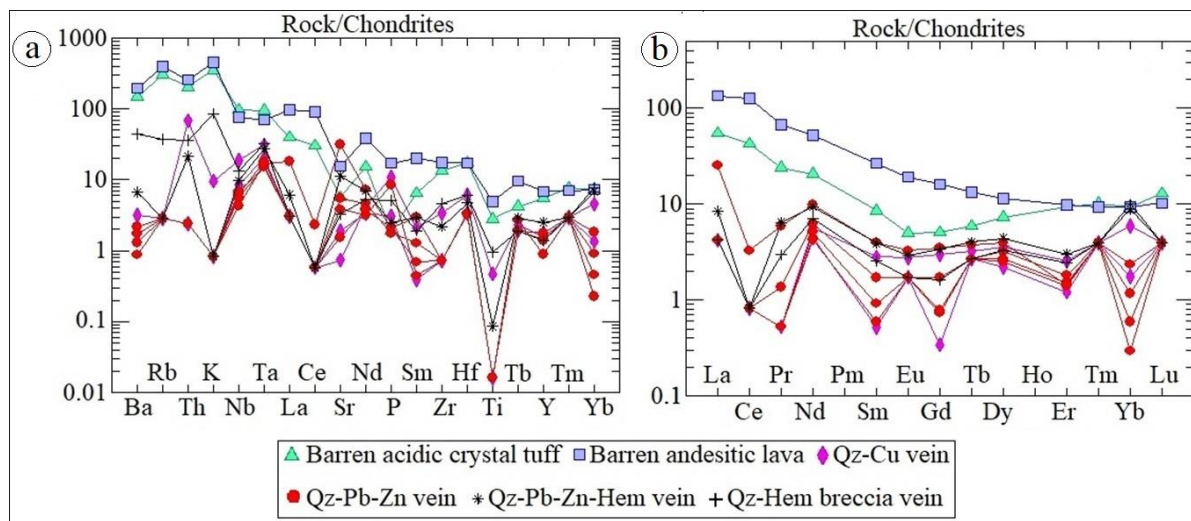
سیستم کانه‌زایی باشد. تفاوت‌های موجود در غنی‌شدگی و تهی‌شدگی برخی عناصر در رگه‌های کوارتزی مس‌دار، سرب - روی‌دار و کوارتز-هماتیت بیانگر تفاوت‌های جزئی کانی‌شناسی و نوع سیالات به‌وجود آورنده آنها می‌باشد. نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با گدازه آندزیتی و کریستال توف اسیدی از عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند که این امر می‌تواند در ارتباط با تحرک این عناصر طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی باشد. در الگوی عناصر نادر خاکی به‌هنجار شده به‌کندرت (Sun and McDonough, 1989)، نمونه‌های کانه‌دار دارای الگوی

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار زاجکان. مقادیر بر حسب گرم در تن (ppm) می‌باشند.

Table 1. Geochemical data of rare and rare earth elements for mineralized veins, and host rocks from the Zajkan deposit. All data are in ppm.

	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf
Z-51	0.3	65658	<0.1	1031	1.1	0.2	1054	0.1	1.8	10	<0.5	11	3223	3.48
Z-53	0.3	73466	1.6	1352	1.1	<0.1	2486	0.5	6.2	10	<0.5	68	35726	3.46
Z-60	16.9	1846	3.2	12	0.8	0.9	73391	32.7	6	12	<0.5	13427	28594	0.68
Z-61	22.2	21934	<0.1	22	1.2	3.1	1154	18.5	21.2	8	<0.5	22015	91472	1.23
Z-62	41	14743	2.3	6	0.6	13.5	24306	313	23.6	6	<0.5	1756	33723	0.66
Z-63	19.7	5545	<0.1	9	1.1	<0.1	1534	823.4	38.4	7	<0.5	1993	22708	0.67
Z-64	12.2	1743	<0.1	15	1.3	<0.1	32550	116.9	8.3	3	<0.5	3031	8413	0.66
Z-65	283.2	385	<0.1	12	0.2	153	734	75.5	6.6	3	<0.5	3430	1790	0.66
Z-66	19	20548	4	303	0.7	20.8	447	68.2	13.1	9	<0.5	5468	199080	1.21
Z-67	20.6	12811	<0.1	46	0.8	13.8	2956	331.6	28.6	21	<0.5	125	173670	0.94
	In	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P	Pb	Rb	S	Sb
Z-51	<0.5	42384	1	149	43	0.7	26762	33.7	2	87	10	107	1634	0.5
Z-53	<0.5	54717	10	7517	1061	0.2	21242	26.9	3	790	184	138	583	0.8
Z-60	<0.5	<100	79	128	85	1.2	407	3	4	143	25541	<1	21970	10.4
Z-61	1.56	1146	43	12158	1751	1.6	448	6.6	4	495	318	<1	37400	4.3
Z-62	1.24	<100	36	794	597	0.1	340	2.2	2	82	139000	<1	78560	23
Z-63	<0.5	<100	42	1497	552	0.8	331	2	2	394	62000	<1	101560	25.1
Z-64	<0.5	<100	82	165	97	<0.1	371	2.4	3	97	40300	<1	9835	11.8
Z-65	1.1	<100	<1	126	117	3.2	332	1.5	1	97	730100	<1	74280	15.9
Z-66	2.11	10305	29	374	177	5.1	783	4.6	3	233	18954	13	16887	8.3
Z-67	<0.5	<100	23	3775	1872	3.6	309	3.4	3	115	54200	<1	56160	13.8
	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn
Z-51	2.8	0.5	1.2	66.5	1.88	0.21	8.56	1743	0.57	5.58	23	<1	11	26
Z-53	7.1	0.5	1.1	182.5	1.4	0.27	10.81	3077	0.82	3.5	63	3.8	13.7	1157
Z-60	<0.5	6.46	0.8	22.5	0.4	0.29	<0.1	<10	7.18	0.2	20	12.9	3.5	11992
Z-61	3.2	12.7	1.6	8.7	0.62	0.26	2.85	291	0.14	1.6	64	31.1	3.1	1202
Z-62	<0.5	13.44	0.4	64.4	0.36	0.4	<0.1	<10	31.12	0.1	50	56.8	2.9	90100
Z-63	<0.5	22.78	0.3	45.3	0.31	0.36	<0.1	<10	16.82	0.4	31	11	2.8	210600
Z-64	<0.5	5.67	0.5	18	0.3	0.53	<0.1	<10	10.52	0.3	17	7.2	3.5	32700
Z-65	<0.5	104.33	0.1	368.1	0.34	3.9	<0.1	<10	41.27	3.6	14	1.8	1.8	19264
Z-66	2.2	17.42	1.1	38	0.65	0.68	1.51	587	5.11	2.5	147	859	2.8	20300
Z-67	1.8	22.84	0.7	133.6	0.54	0.55	0.9	53	13.52	1.3	163	994.2	5	99100
	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu
Z-51	93	13	26	2.28	9.6	1.31	1.11	1.04	0.22	1.86	1.54	0.26	1.6	0.33
Z-53	121	32	78	6.45	24.4	4.1	<0.1	3.32	0.5	2.9	1.63	0.24	1.6	0.26
Z-60	5	<1	<1	<0.05	2.1	0.08	0.16	0.07	<0.1	0.56	0.2	<0.1	0.3	<0.1
Z-61	23	<1	<1	<0.05	2.6	0.43	<0.1	0.61	0.12	0.91	0.42	<0.1	1	<0.1
Z-62	5	1	<1	0.13	2.9	0.26	<0.1	0.35	<0.1	0.81	0.3	<0.1	0.4	<0.1
Z-63	5	<1	<1	<0.05	2	0.09	<0.1	0.15	<0.1	0.68	0.25	<0.1	0.2	<0.1
Z-64	5	<1	<1	<0.05	2.4	0.14	0.19	0.16	<0.1	0.64	0.23	<0.1	0.1	<0.1
Z-65	5	6	2	0.56	4.6	0.61	0.1	0.72	0.14	1	0.24	<0.1	0.05	<0.1
Z-66	32	1	<1	0.28	3.3	0.39	0.17	0.33	<0.1	0.85	0.4	<0.1	1.7	<0.1
Z-67	15	2	<1	0.61	4.4	0.6	0.17	0.69	0.15	1.12	0.5	<0.1	1.5	<0.1

Z-51: Barren acidic crystal tuff, Z-53: Barren andesite, Z-60 and Z-61: Cu-bearing quartz vein, Z-62 to Z-64: Pb-Zn-bearing quartz veins, Z-65: Galena ore, Z-66: Brecciated quartz-hematite vein, Z-67: Pb-Zn-Hem-bearing quartz vein



شکل ۹- (a) الگوی عناصر کمیاب به‌هنگار شده به کندریت (Thompson, 1982) برای رگه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار زاجکان و (b) الگوی عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده به کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای رگه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار زاجکان.

Fig. 9. (a) Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare element patterns for the mineralized veins and host rocks in the Zajkan deposit and (b) Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) REE patterns for the mineralized veins and host rocks in the Zajkan deposit.

تجزیه به اجزاء، تغییرات دما، فشار، Eh، pH، آلکالینیتی و تمرکز سیال وابسته می‌باشد (Humphris, 1984; Lottermoser, 1992). طی فرایندهای کانه‌زایی، سیالات غنی از F، Cl و CO₂ در نسبت‌های بالای سیال به سنگ، قادر به تحرک عناصر نادر خاکی هستند (Murphy and Hynes, 1986; Whitford et al., 1988; Bienvenu, 1990). به اعتقاد این محققین، کمپلکس‌های هالورنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر مزبور محسوب می‌شوند. کاهش مشخص در میزان عناصر نادر خاکی برای رگه‌های کانه‌دار نسبت به سنگ‌های میزبان در کانسار زاجکان نشان می‌دهد که حجم و یا شیمی سیالات گرمایی برای تحرک این عناصر در این کانسار کافی بوده و می‌تواند بیانگر میزان بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ‌های میزبان باشد. این امر با رخدادهای گسترده دگرسانی در این کانسار مطابقت دارد.

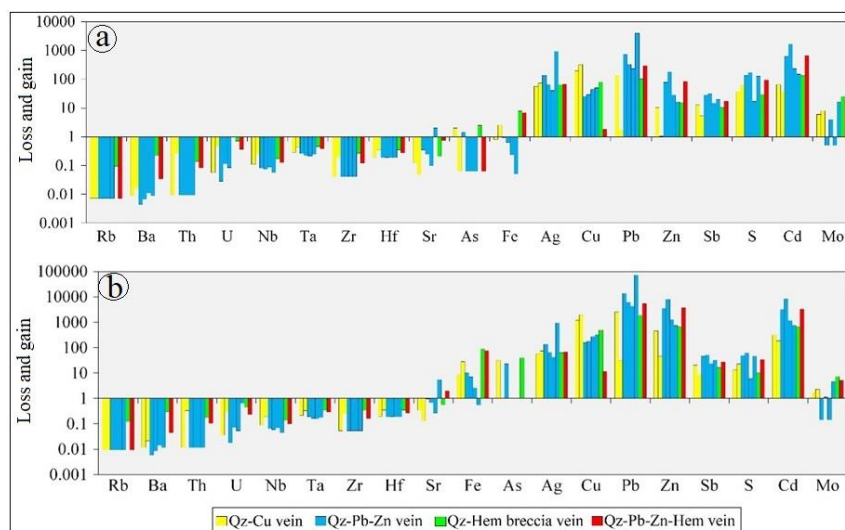
مطالعات میانبارهای سیال

مطالعات میانبارهای سیال بر روی کوارتزهای مرحله اول کانه‌زایی، کوارتزها و اسفالریت‌های شفاف موجود در رگه‌های کوارتز - سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی و کوارتزها در رگه‌های کوارتز - هماتیستی و سیمان گرمایی برش‌های مرحله سوم کانه‌زایی انجام شد. به دلیل ریز بودن اندازه میانبارهای سیال، هیچ میانبار سیالی در کوارتزها و کلسیت‌های موجود در رگه‌های مرحله چهارم کانه‌زایی مطالعه نشد.

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار

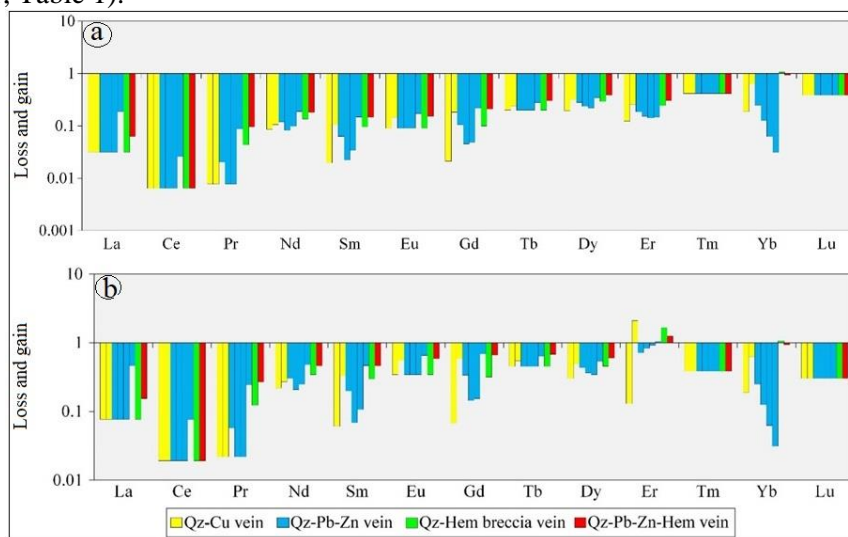
به‌منظور بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عنصری مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی در کانسار زاجکان، به پیروی از روش Yilmaz و همکاران (۲۰۰۷) مقادیر عناصر در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به گدازه آندزیتی و کریستال توف اسیدی فاقد کانه‌زایی به‌هنگار گردید. براساس نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب (شکل ۱۰)، نمونه‌های کانه‌دار نسبت به گدازه آندزیتی از عناصر Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, S, Cd و Mo غنی‌شدگی و از سایر عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۰a). نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های برشی کوارتز-هماتیستی از عنصر آهن غنی‌شدگی نشان می‌دهند. بر همین اساس، نمونه‌های کانه‌دار نسبت به کریستال توف اسیدی از عناصر Fe, As, Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, S و Cd غنی‌شدگی و از سایر عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۰b). در نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی، همه نمونه‌های کانه‌دار نسبت به گدازه آندزیتی و کریستال توف اسیدی از عناصر نادر خاکی (به غیر از غنی‌شدگی نسبی برخی از نمونه‌ها در عنصر Er نسبت به کریستال توف اسیدی) تهی شده‌اند (شکل ۱۱a و b).

به‌طور کلی، رفتار زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی در محیط‌های کانه‌زایی تحت تأثیر فرایندهایی از قبیل واکنش سیال با سنگ، نهشت سیال، جذب،



شکل ۱۰- (a) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار زاجکان که نسبت به نمونه گدازه آندزیتی فاقد کانه‌زایی (نمونه Z-53، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند و (b) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار زاجکان که نسبت به نمونه کریستال توف اسیدی فاقد کانه‌زایی (نمونه Z-51، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند.

Fig. 10. (a) Loss and gain histogram of rare elements in the mineralized samples from the Zajkan deposit that normalized against barren andesitic lava sample (sample Z-53, Table 1) and (b) Loss and gain histogram of rare elements in the mineralized samples from the Zajkan deposit that normalized against barren acidic crystal tuff sample (sample Z-51, Table 1).



شکل ۱۱- (a) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار زاجکان که نسبت به نمونه گدازه آندزیتی فاقد کانه‌زایی (نمونه Z-53، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند و (b) نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار زاجکان که نسبت به نمونه کریستال توف اسیدی فاقد کانه‌زایی (نمونه Z-51، جدول ۱) به‌هنگار شده‌اند.

Fig. 11. (a) Loss and gain histogram of rare earth elements in the mineralized samples from the Zajkan deposit that normalized against barren andesitic lava sample (sample Z-53, Table 1) and (b) Loss and gain histogram of rare earth elements in the mineralized samples from the Zajkan deposit that normalized against barren acidic crystal tuff sample (sample Z-51, Table 1).

کمتر از ۵۰ درصد حجمی فاز گاز (اغلب بین ۱۰ تا ۳۵ درصد حجمی) و غنی از گاز (VL) با بیش از ۵۰ درصد حجمی فاز گاز و تک فازهای گاز (V) و مایع (L) می‌باشند (شکل ۱۲). میانبارهای دوفازی نوع LV نسبت به انواع دیگر از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. در اغلب نمونه‌های مطالعه‌شده، این چهار نوع میانبار سیال در کنار یکدیگر قابل مشاهده هستند. از لحاظ ریخت‌شناسی، میانبارهای سیال موجود در

پتروگرافی

میانبارهای سیال موجود در نمونه‌های کانسار زاجکان بیشتر از نوع اولیه می‌باشند که غالباً به‌صورت پراکنده در متن کانی میزبان مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲). در برخی از نمونه‌ها، میانبارهای سیال ثانویه کاذب نیز قابل مشاهده است. براساس مطالعات پتروگرافی، میانبارهای سیال موجود در کانسار زاجکان از نوع دو فازهای غنی از مایع (LV) با

تغییر است (جدول ۲ و شکل ۱۳b). مقادیر چگالی برای میانبرهای سیال در کانسار زاجکان بین ۰/۷ تا ۰/۹ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده است (جدول ۲).

تحول سیال کانه‌ساز

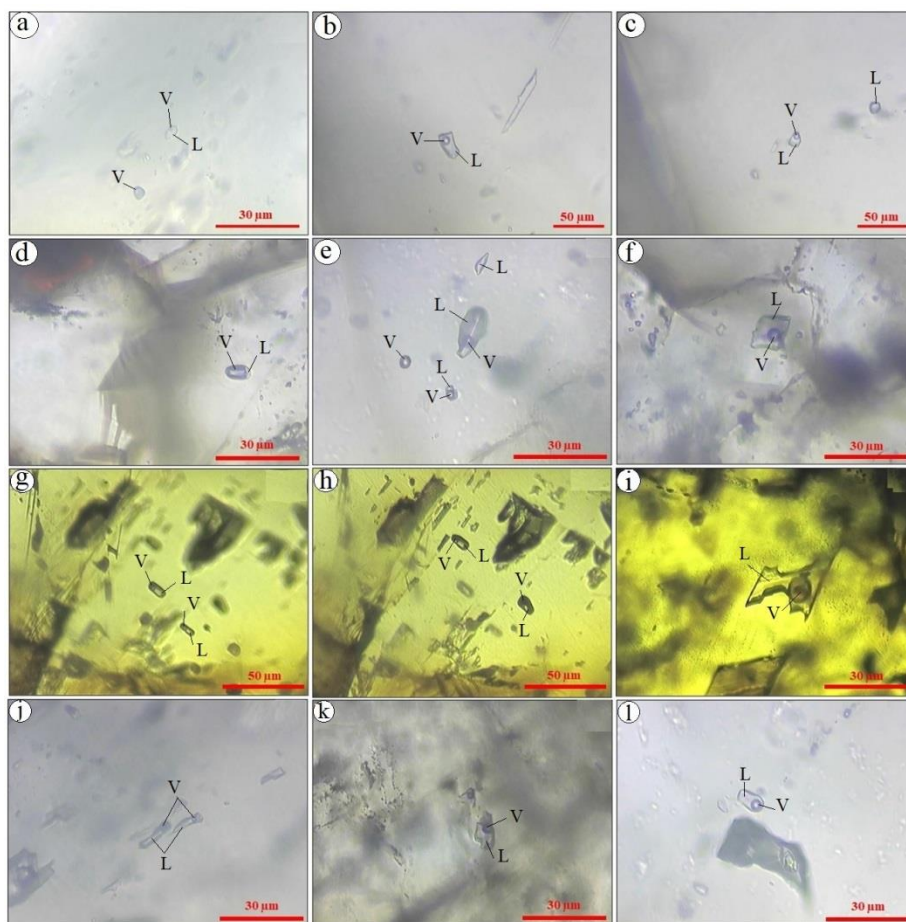
در شکل‌گیری و تحول کانسارهای گرمابی، سیالات بسیاری نقش دارند (Zhu et al., 2001; Cooke and McPhail, 2001; Fan et al., 2011; Zhai et al., 2013). داده‌های میانبرهای سیال در کانسار زاجکان نشان می‌دهد سیالات مسئول کانه‌زایی در این کانسار با یک سیستم $H_2O-NaCl$ با دمای متوسط و شوری پایین مرتبط است (جدول ۲). تکامل این سیستم از مرحله اول کانه‌زایی به مرحله سوم کانه‌زایی، با کاهش دما از حدود ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است. برپایه دیاگرام دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل میزان شوری (Wilkinson, 2001)، داده‌های میانبرهای سیال در کوارتزها و اسفالریت‌های کانسار زاجکان بیانگر اختلاط یک سیال با دمای به نسبت بالا و شوری متوسط با یک سیال دیگر با دما و شوری پایین است (شکل ۱۳).

معمولاً بین دمای همگن‌شدن و شوری سیالات کانه‌ساز در فرایند اختلاط سیالات، رابطه مستقیم و در فرایند جوشش، رابطه معکوس وجود دارد (Shepherd et al., 1985; Zhai et al., 2009; Li et al., 2013; Canet et al., 2011; Burnham, 1979; Hedenquist and Lowenstern, 2006; Yardley and Bodnar, 2014). از این رو، محدوده نسبتاً گسترده داده‌های شوری (۰/۲ تا ۷/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای کانسار زاجکان می‌تواند نشان‌دهنده اختلاط سیالات ماگمایی و جوی باشد. از طرف دیگر، وجود پرش‌های گرمابی و کوارتزهای با بافت پرماند، کاکلی و پوسته‌ای در این کانسار بیانگر رخداد جوشش حین تکامل سیال کانه‌ساز در سیستم گرمابی زاجکان است. جوشش سیال می‌تواند منجر به تفکیک شدید یک سیال شور به فازهای بخار و در نتیجه افزایش بیشتر شوری سیال باقیمانده گردد (Wilkinson, 2001; Canet et al., 2011). این تفسیر برای مقادیر شوری کم تا متوسط میانبرهای سیال در بسیاری از سیستم‌های کانه‌زایی اپی‌ترمال استفاده شده است (Sherlock et al., 1995; Scott and Watanabe, 1998; Simmons and Browne, 2000; Simpson et al., 2001; Camprubi and Albinson, 2007; Klemm et al., 2007).

نمونه‌های کانسار زاجکان دارای اشکال منفی بلور و چندوجهی نامنظم و مستطیلی شکل هستند. پدیده باریک‌شدگی در برخی از میانبرهای سیال دیده می‌شود، ولی دارای فراوانی زیادی در نمونه‌ها نیست. برای اطمینان از درست بودن نتایج، تمامی اندازه‌گیری‌ها بر روی میانبرهایی انجام شد که دارای معیارهای لازم برای میانبرهای اولیه (Roedder, 1984) بودند. اندازه میانبرهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله اول، دوم و سوم کانه‌زایی در کانسار زاجکان معمولاً کوچک تا متوسط بوده و به ترتیب بین ۵ تا ۴۶ میکرون، ۴ تا ۴۷ میکرون و ۴ تا ۵۵ میکرون در تغییر هستند. اندازه میانبرهای سیال مطالعه شده در کانی اسفالریت بین ۴ تا ۹۳ میکرون متغیر است.

داده‌های ریزدماسنجی

در این پژوهش، تعداد ۹۶ میانبر سیال اولیه نوع LV مورد بررسی قرار گرفت. براساس مطالعات انجام‌شده، دماهای یوتکتیک (T_e) اندازه‌گیری‌شده در تمامی میانبرهای سیال مطالعه‌شده، در محدوده ۲۱- تا ۳۰- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۲). این دماهای یوتکتیک می‌تواند بیانگر وجود نمک‌های سدیم و پتاسیم در سیالات گرمابی باشد (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985; Davis et al., 1990; Goldstein, 2003; Prokofiev et al., 2010). دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) در میانبرهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله اول کانه‌زایی بین ۰/۴- تا ۴/۸- درجه سانتی‌گراد، در کوارتزهای مرحله دوم کانه‌زایی بین ۱/۹- تا ۳- درجه سانتی‌گراد و در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی بین ۰/۳- تا ۱/۷- می‌باشد (جدول ۲). این دما در اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی در محدوده بین ۲- تا ۳/۶- متغیر است (جدول ۲). بر این اساس و با توجه به رابطه Bodnar (۱۹۹۳)، میزان شوری میانبرهای سیال در کوارتزهای مرحله اول تا سوم کانه‌زایی به ترتیب بین ۳/۴ تا ۷/۶ (میانگین ۵/۱)، ۳/۴ تا ۵ (میانگین ۳/۹) و بین ۰/۲ تا ۲/۹ (میانگین ۱/۴) درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۱۳a). میزان شوری میانبرهای سیال در اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی بین ۳/۴ تا ۵/۹ (میانگین ۴/۵) درصد وزنی معادل نمک طعام محاسبه شد (جدول ۲ و شکل ۱۳a). تمامی میانبرهای سیال مطالعه‌شده، به فاز مایع همگن شدند. به علت وقوع رخداد جوشش (بخش پایین را ببینید)، هیچگونه تصحیح دمایی بر روی مقادیر دمای همگن‌شدن میانبرهای سیال اعمال نشده است. دمای همگن‌شدن نهایی ($T_{h(total)}$) میانبرهای سیال موجود در کوارتزهای مرحله اول تا سوم کانه‌زایی به ترتیب در محدوده بین ۲۴۲ تا ۲۹۵ (میانگین ۲۶۷) درجه سانتی‌گراد، ۲۲۰ تا ۲۷۶ (میانگین ۲۳۹) درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ تا ۲۴۵ (میانگین ۲۱۹) درجه سانتی‌گراد است (جدول ۲ و شکل ۱۳b). دمای همگن‌شدن نهایی در میانبرهای سیال موجود در اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی بین ۲۱۹ تا ۲۹۰ (میانگین ۲۴۶) درجه سانتی‌گراد در

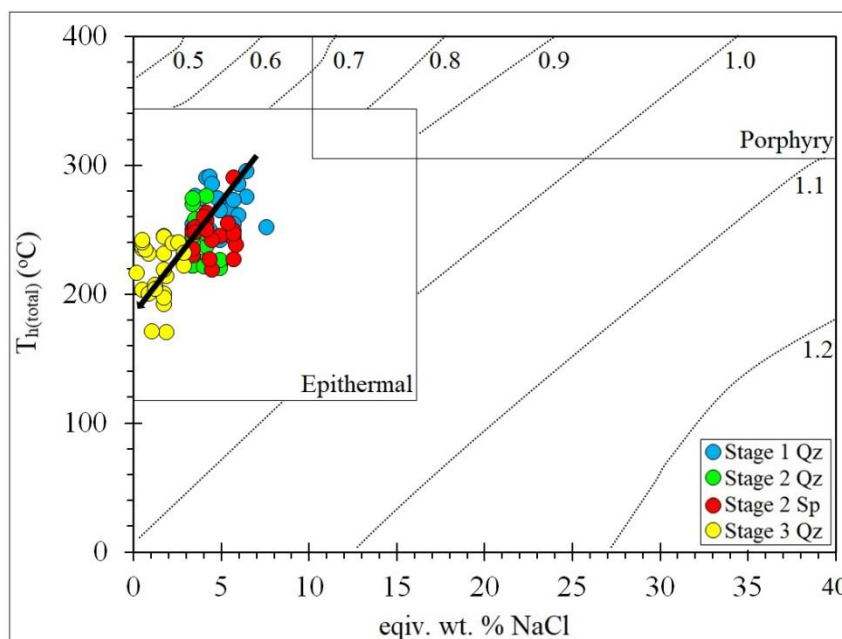


شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از انواع میانبارهای سیال در کانسار زاجکان؛ (a تا c) رخداد هم‌زمان میانبارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV و تک‌فازی‌های نوع L و V در کوارتزهای مرحله اول کانه‌زایی، (d) میانبار سیال اولیه دوفازی نوع VL در کوارتزهای مرحله دوم کانه‌زایی، (e و f) رخداد هم‌زمان میانبارهای سیال اولیه نوع LV، VL، و V در کوارتزهای مرحله دوم کانه‌زایی نشان‌دهنده رخداد جوشش، (g تا i) میانبارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV با اشکال بیضی کشیده و منفی بلور در اسفالریت‌های مرحله دوم کانه‌زایی و (j تا l) میانبارهای سیال اولیه دوفازی نوع LV در کوارتزهای مرحله سوم کانه‌زایی.

Fig. 12. Photomicrographs (at room temperature, plane-polarized light) of fluid inclusion types from Zajkan deposit; (a–c) Coexisting primary two-phase LV and one-phase V fluid inclusions in stage 1 quartz, (d and e) Coexisting of primary LV, VL and V fluid inclusions in stage 2 quartz as evidence of boiling, (f) Primary two-phase LV fluid inclusion in stage 2 quartz, (g–i) Elliptical or negative-shaped primary LV fluid inclusions within stage 2 spherulite and (j–l) Primary two-phase LV fluid inclusions in stage 3 quartz.

جدول ۲- خلاصه نتایج مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه نوع LV در کانسار زاجکان. اعداد داخل پرانتز، مقدار میانگین اندازه‌گیری شده است.
Table 2. Microthermometric data summary for primary LV fluid inclusions from Zajkan deposit. The digit in the parenthesis is the mean value of inclusion measured.

Mineral	Size (μm)	T_e ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m-ice} ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt.% NaCl)	$T_{h(\text{total})}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Density (g/cm^3)
Stage 1 Qz (n = 22)	5–46		–4.8 to –0.4	3.4–7.6 (5.1)	242–295 (267)	
Stage 2 Qz (n = 21)	4–47		–3 to –1.9	3.4–5 (3.9)	220–276 (239)	
Stage 2 Sp (n = 22)	4–93	–21 to –30	–3.6 to –2	3.4–5.9 (4.5)	219–290 (246)	0.7–0.9
Stage 3 Qz (n = 31)	4–55		–1.7 to –0.3	0.2–2.9 (1.4)	150–245 (219)	



شکل ۱۳- دیاگرام دمای همگن شدن نهایی در مقابل شوری برای میانبارهای سیال اولیه نوع LV در کانسار زاجکان. محدوده‌های مشخص شده برای کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال براساس Wilkinson (۲۰۰۱) ترسیم شده‌اند. خطوط مقطع نشان‌دهنده چگالی سیالات (g/cm^3) در سیستم‌های H_2O -NaCl است (Haas, 1971).

Fig. 13. Total homogenization temperatures vs. equivalent salinity diagram for primary LV fluid inclusions from Zajkan deposit. Typical ranges of fluid inclusions in porphyry and epithermal deposits worldwide are modified after Wilkinson (2001). Diagonal contours show fluid densities of H_2O -NaCl fluids in g/cm^3 for pressures along the L-V curve (Haas, 1971).

سیلیس هستند که به تهنشست سریع و متناوب کوارتز کلسدونی در فضاهای خالی در سیستم‌های اپی‌ترمال کم‌عمق نسبت داده می‌شوند (Bodnar et al., 1985a; Fournier, 1985; Roedder, 1984). این بافت‌ها در حین بازشدن سریع درز و شکستگی‌های مرتبط با کاهش فشار و به دنبال آن کاهش سریع دما مرتبط با فرایند جوشش تشکیل می‌شوند (Henley and Hughes, 2000; Taylor, 2009; Moncada et al., 2012).

رخداد جوشش سیالات در کانسار زاجکان با رخداد گسترده برش‌های گرمایی و رگه‌های برشی کانه‌دار نیز قابل تشخیص است که معمولاً شواهدی از کاهش شدید و متناوب فشار در نظر گرفته می‌شوند. این وقایع می‌توانند سبب رخداد جوشش در سیستم‌های گرمایی شوند (Berger and Eimon, 1983; Cole and Drummond, 1986; Jobson et al., 1994; Jébrak, 1997). علاوه بر این، رگه‌های کانه‌دار در کانسار زاجکان دارای مرز تماس مستقیم با واحدهای آذرآوری میزبان خود هستند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که رگه و رگچه‌های کانه‌دار از طریق پرکردن فضاهای خالی تحت فشار هیدروستاتیک تشکیل شده‌اند (Liu, 1998; Hedenquist et al., 2014; Ouyang et al., 2014; Thiersch et al., 1997; Muntean, 2001). این رگه‌های گرمایی شده است (and Einaudi, 2001).

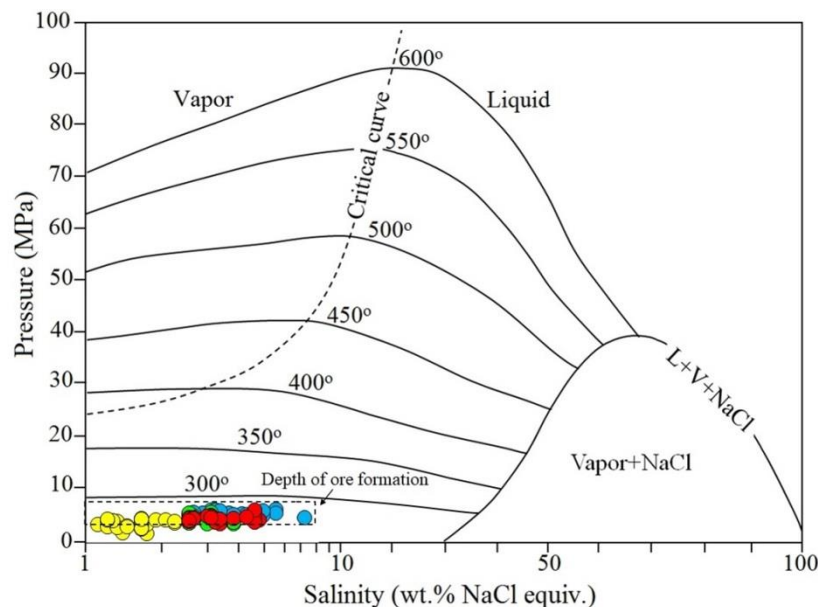
شواهد جوشش

داده‌های میانبارهای سیال و شواهد بافتی در کانسار زاجکان نشان‌دهنده رخداد جوشش حین تکامل سیستم کانه‌زایی در این کانسار است. یکی از شواهد مهم رخداد جوشش در سیستم‌های اپی‌ترمال حضور هم‌زمان میانبارهای سیال دوفازی نوع LV و VL در یک مجموعه میانبارهای سیال است (Bodnar et al., 1985a; White, 1995; Hedenquist, 1995; Moncada et al., 2017). میانبارهای سیال تک‌فازی نوع V نیز به‌عنوان شاهد دیگری از رخداد جوشش در سیالات کانه‌ساز تفسیر می‌شوند (Ronacher et al., 2000; Moncada et al., 2017). حضور هم‌زمان میانبارهای سیال نوع LV، VL و V در کانی‌های کوارتز و اسفالریت در کانسار زاجکان می‌تواند بیانگر به دام افتادن آنها از یک سیال در حال جوشش باشد. این وجود، این حضور هم‌زمان می‌تواند از طریق به دام افتادن سیالات مختلف در زمان‌های مختلف (Ramboz et al., 1982) و یا از طریق نشت و پدیده باریک‌شدگی (Rusk et al., 2008) نیز تعبیر شود. علاوه بر این، احتمال رخداد جوشش با حضور کوارتزهای با بافت پَرماند، کاکلی و پوسته‌ای در رگه‌ها و سیمان گرمایی برش‌ها مطابقت دارد. بافت پَرماند کوارتز محصول فوق‌اشباع شدن سیال در اثر کاهش سریع فشار مرتبط با رخداد فرایند جوشش و به دنبال آن کاهش دما است که سبب تهنشست سیلیس بی‌شکل (آمورف) می‌شود (Henley and Hughes, 2000). بافت‌های کاکلی و پوسته‌ای از بافت‌های اولیه

تعیین عمق و فشار

Hedenquist و Arribas (۱۹۹۸)، بالاترین دمای میانبراهای سیال نوع LV (۲۴۵ تا ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد) برای تخمین فشار سیالات در کانسار زاجکان استفاده شد. براساس داده‌های تجربی Haas (۱۹۷۱)، Bodnar و Urusova (۱۹۷۵) و همکاران (b) (۱۹۸۵)، فشار به دام افتادن سیالات در کانسار زاجکان بین ۴ تا ۸ مگاپاسکال به دست آمد (شکل ۱۴). اگرچه این مقادیر فشار پایین نمی‌تواند بیانگر مقادیر دقیق فشار سیال باشد اما می‌تواند نشان‌دهنده شرایطی باشد که جوشش در آن محل رخ داده است. با توجه به میانگین چگالی میانبراهای سیال (۰/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، عمق کانه‌زایی در کانسار زاجکان بین ۴۸۰ تا ۸۲۰ متر زیر سطح ایستایی قدیمی محاسبه شد که با عمق کانه‌زایی در سیستم‌های اپی‌ترمال (Simmons et al., 2005; Pirajno, 2009) و کانسارهای اپی‌ترمال موجود در پهنه طارم-هشتجین (Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017; Rabiei et al., 2017) و از پیروی از Albinson (۱۹۹۸) مطابقت دارد.

کانسارهای اپی‌ترمال معمولاً در عمق چند صد متری زیر سطح ایستایی قدیمی (Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005) معادل چند ده بار فشار هیدروستاتیک تشکیل می‌شوند. تحت چنین شرایط فشار پایین، دمای همگن‌شدن میانبراهای سیال می‌تواند تخمین خوبی از دمای سیال کانه‌ساز در نظر گرفته شود (Takács et al., 2017). حضور همزمان میانبراهای سیال نوع LV و VL که در بالا به آن اشاره شد، نشان می‌دهد که سیالات گرمایی مسئول کانه‌زایی در کانسار زاجکان به نقطه اشباع بخار رسیده‌اند. در چنین حالتی، دمای همگن‌شدن نهایی میانبراهای سیال نوع LV می‌تواند به‌عنوان دمای به دام افتادن تلقی شده و فشار سیال در این دما می‌تواند به‌عنوان فشار به دام افتادن لحاظ گردد (Roedder and Bodnar, 1980; Ouyang et al., 2014; Rabiei et al., 2017). لذا به پیروی از Albinson (۱۹۹۸) و



شکل ۱۴- فشار تخمینی برای میانبراهای سیال در کانسار زاجکان که بر مبنای دمای همگن‌شدن نهایی و از بین رفتن فاز بخار در میانبراهای سیال نوع LV محاسبه شده‌اند (با اندکی تغییرات از Bouzari and Clark, 2006).

Fig. 14. Estimated pressure for fluid inclusions in the Zajkan deposit that exhibited final homogenization by vapor disappearance of LV fluid inclusions (modified after Bouzari and Clark, 2006).

۳- مجموعه کانیاپی در کانسار زاجکان شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت است که با مجموعه کانی‌های باطله کوارتز، فلوریت، سریسیت، کلریت و کلسیت همراهی می‌شوند. ۴- ساخت و بافت‌های کانه‌زایی اپی‌ترمال مانند رگه-رگه‌های، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کاکلی، پرماند، گل کلمی و پُرکننده فضای خالی به خوبی در کانسار زاجکان توسعه یافته است.

مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال نشان می‌دهد که این مجموعه کانیاپی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط (Hedenquist et al.,

تیپ کانه‌زایی و مدل تشکیل

مقایسه شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در کانسار زاجکان با انواع کانسارهای فلزات پایه نشان می‌دهد کانه‌زایی در این کانسار را می‌توان در دسته کانسارهای اپی‌ترمال (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005) طبقه‌بندی کرد. مهم‌ترین شواهد این مقایسه عبارتند از: ۱- کانه‌زایی در کانسار زاجکان توسط ساختارهای گسلی کنترل و توسط واحدهای آذرآواری میزبانی شده است. ۲- دگرسانی‌های گرمایی در کانسار زاجکان با مجموعه سریسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت در نزدیکی رگه‌های کانه‌دار مشخص می‌شود.

and Hedenquist, 2003). علاوه بر این، نبود بافت کوارتز حفره‌ای و دگرسانی آرژلیک پیشرفته (مجموعه کانی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت) و همچنین نبود مجموعه کانی‌های آدولاریا، آلونیت، انارژیت، لورونیت و تنانتیت در رگه‌های کانه‌دار کانسار زاجکان بیانگر متفاوت بودن کانه‌زایی فلزات پایه در این کانسار از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین و بالا است. به علاوه، کانی‌های دگرسانی (مجموعه سرپسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت) در کانسار زاجکان جزء دگرسانی‌های گرمایی حرارت پایین تا متوسط هستند که شاخص کانی‌های دگرسانی در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط می‌باشند. در جدول ۳، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار زاجکان با برخی از کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط موجود در کمربند فلزایی طارم-هشتجین مقایسه شده است.

2000; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Gemmeil, 2004; Wang et al., 2019) دارد. دمایی پایین تا متوسط و شوری پایین تا متوسط سیالات کانه‌ساز در کانسار زاجکان از ویژگی‌های کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه و گران‌بهای نوع سولفیداسیون حدواسط است که در دیگر بخش‌های زیرپهنه طارم-هشتجین (Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2017, 2018a, 2019, 2020; Mikaeili et al., 2018; Shahbazi et al., 2019; Zamanian et al., 2019) و دیگر نقاط دنیا (Albinson et al., 2001; John, 2001; Simmons et al., 2005; Yilmaz et al., 2010; Chang et al., 2011; Sabeva et al., 2017) گزارش شده است. عمق کانی‌سازی در کانسار زاجکان حدود ۴۸۰ تا ۸۲۰ متر تعیین شده است. این عمق کانی‌سازی از ویژگی‌های رگه‌های فلزات پایه و غنی از نقره در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط است (Hedenquist et al., 2000; Albinson et al., 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار زاجکان با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلزایی طارم-هشتجین.

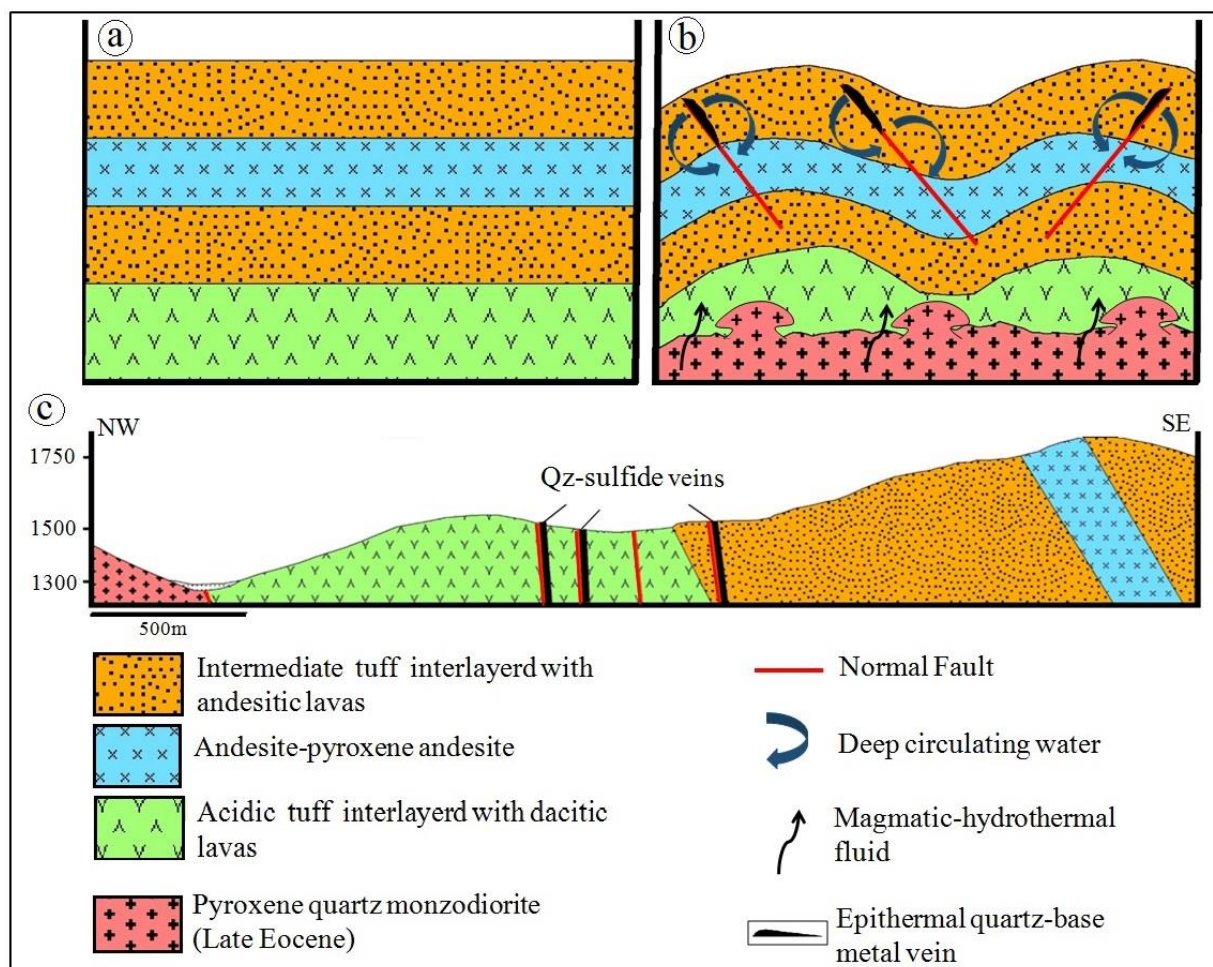
Table 3. Comparison of main characteristics of Zajkan deposit with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt.

	Zajkan	Marshoun	Abbasabad	Aliabad-Khanchy	Aqkand	Lubin-Zardeh	Ali Shah Beiglou
Host rock	Acidic and intermediate tuff	Intermediate tuff, pyroxene quartz monzodiorite	Intermediate tuff	Andesitic lavas, tuff units	Andesitic basalt lavas	Tuff units	Quartz monzonite dyke
Timing of mineralization	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Late Eocene (?)	Miocene (?)
Ore-controlling structures	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults	Normal faults
Ore Minerals	Gn, Sp, Ccp, Py, Hem	Gn, Sp, Ccp, Py	Gn, Sp, Ccp, Py	Ccp, Py, Hem	Ccp, Hem	Py, Ccp, Gn, Sp, Ttr-Tnt, Bn, Au, Ag	Sp, Gn, Ccp, Py, Ttr-Tnt
Ore texture	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed	Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, cockade	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform, colloform, plumose	Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform, comb, colloform	Vein-veinlet, breccia, crustiform, comb
Alteration	Silica, intermediate argillic, propylitic	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Silica, chloritization, argillic, propylitic	Silica, chloritization, propylitic	Silica, argillic, propylitic	Silica, argillic, chloritization, carbonatization, propylitic
References	This study	Kouhestani et al. (2019)	Kouhestani et al. (2020)	Mokhtari et al. (2016); Kouhestani et al. (2018a)	Feizi et al. (2016); Kouhestani et al. (2017)	Zamanian et al. (2019, 2020)	Mikaeili et al. (2018)

Abbreviations: Ag: native silver, Au: native gold, Bn: bornite, Ccp: chalcocopyrite, Gn: galena, Hem: hematite, Py: pyrite, Sp: sphalerite, Tnt: tetrahedrite, Ttr: tetrahedrite. All mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010).

براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ شناسی و کانه نگاری، روابط پاراژنتیکی کانی ها و کانه ها، مراحل تکوین و تکامل کانسار زاجکان را می توان به صورت یک توالی سه مرحله ای خلاصه کرد (شکل ۱۵). مرحله نخست با تشکیل توالی های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی ائوسن (۴۹ تا ۴۱ میلیون سال قبل، Verdel et al., 2011) در منطقه همراه است (شکل ۱۵a). در مرحله دوم، هم زمان با فاز تکتونیکی پیرنه در ائوسن پایانی، نهشته های ائوسن چین خورده و گسل ها و شکستگی های فراوانی در آنها تشکیل شده است (شکل ۱۵b). در همین مرحله، توده های پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی و گنبد های داسیتی اغلب کم عمق ائوسن پایانی (۴۰ تا ۳۶ میلیون سال قبل، Nabatian et al., 2014, 2016; Aghazadeh et al., 2015) است (شکل ۱۵c).

براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ شناسی و کانه نگاری، روابط پاراژنتیکی کانی ها و کانه ها، مراحل تکوین و تکامل کانسار زاجکان را می توان به صورت یک توالی سه مرحله ای خلاصه کرد (شکل ۱۵). مرحله نخست با تشکیل توالی های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی ائوسن (۴۹ تا ۴۱ میلیون سال قبل، Verdel et al., 2011) در منطقه همراه است (شکل ۱۵a). در مرحله دوم، هم زمان با فاز تکتونیکی پیرنه در ائوسن پایانی، نهشته های ائوسن چین خورده و گسل ها و شکستگی های فراوانی در آنها تشکیل شده است (شکل ۱۵b). در همین مرحله، توده های پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی و گنبد های داسیتی اغلب کم عمق ائوسن پایانی (۴۰ تا ۳۶ میلیون سال قبل، Nabatian et al., 2014, 2016; Aghazadeh et al., 2015) است (شکل ۱۵c).



شکل ۱۵- نمایی شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه زایی در کانسار زاجکان؛ (a) تشکیل توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن، (b) چین خوردگی واحدهای سنگی ائوسن طی فاز کوهزایی پیرنه (ائوسن بالایی) و نفوذ توده های پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی به داخل آنها. این توده ها سبب چرخش آب های جوی و شکل گیری کانه زایی به صورت رگه های سیلیسی- سولفیدی کانه دار درون واحدهای آتشفشانی منطقه شده است و (c) بالآمدگی ناحیه ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش.

Fig. 15. Schematic representation of mineralization evolution stages at Zajkan deposit; (a) Formation of Eocene volcano-sedimentary units, (b) Folding of Eocene rock units during Pyrenean orogeny (late Eocene) and intrusion of pyroxene quartz monzodiorite bodies within rock strata. Intrusion of these plutons caused circulation of meteoric waters and formation of mineralized quartz-sulfide veins within volcanic units in the area, and (c) Regional exhumation and development of weathering and erosion processes.

نتیجه گیری

سیال کانه‌ساز در این کانسار با فرایندهای اختلاط و جوشش سیالات هم‌خوانی دارد. این داده‌ها نشان می‌دهد فشار به دام افتادن سیالات در کانسار زاجکان بین ۴۰ تا ۸۰ بار و عمق کانه‌زایی بین ۴۸۰ تا ۸۲۰ متر زیر سطح آب‌های قدیمی بوده است.

۵- ژئومتری رگه‌ای کانه‌زایی در کانسار زاجکان و دیگر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال در کمربند فلززایی طارم - هشتجین نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی معبر اصلی برای عبور جریان سیالات کانه‌ساز بوده‌اند. علاوه بر این، این کانه‌زایی‌ها اغلب درون توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن و در ارتباط فضایی نزدیک با توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی ائوسن پایانی تشکیل شده‌اند. از این رو، بررسی پهنه‌های گسلی موجود در توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن به‌ویژه در مناطقی که مورد هجوم گرانیتوئیدی ائوسن بالایی قرار گرفته‌اند، از نظر اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه (و گران‌بها) می‌تواند حائز اهمیت است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان و شرکت زرازا برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین، نویسندگان از حمایت‌های مالی سازمان ایמידرو برای انجام مطالعات میانبارهای سیال و سرکار خانم مهندس آقاجانی برای انجام مطالعات مزبور کمال قدردانی را دارند. از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته به‌خاطر راهنمایی‌های علمی ارزنده که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، کمال تشکر را داشته باشند.

۱- شواهدی از قبیل مشاهدات صحرایی، ساخت و بافت، سنگ میزبان، پاراژنز، زمین‌شیمی، میانبارهای سیال و الگوی دگرسانی‌ها در کانسار زاجکان نشان می‌دهد که این کانسار از نوع کانسارهای اپی‌ترمال فلزات پایه نوع سولفیداسیون حدواسط بوده و از این نظر قابل مقایسه با سایر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم - هشتجین (مانند مرشون، علی‌آباد - خان‌چای، آق‌کند، ورم‌زیار، لوبین-زرده و شاه‌علی‌بیگلو) است. در هر حال، این مقایسه نیازمند اطلاعات دقیق ایزوتوپی (پایدار و سن‌سنجی) برای بسیاری از این کانه‌زایی‌ها است.

۲- شباهت نسبی روند الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی در رگه‌های کانه‌دار بیانگر تشکیل آنها در ارتباط با یک سیستم کانه‌زایی می‌باشد.

۳- بررسی نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در کانسار زاجکان نشان‌دهنده تمرکز عناصر کانه‌ساز (مانند Cu, Pb, Zn, Ag, Sb, Cd, Mo) در رگه‌های سیلیسی کانه‌دار است. تهی‌شدگی عناصر نادر خاکی در این نمودارها بیانگر میزان بالای واکنش بین سیالات کانه‌زا و سنگ‌های میزبان در کانسار زاجکان می‌باشد که با رخدادهای گسترده دگرسانی در این کانسار مطابقت دارد.

۴- داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال نشان می‌دهد سیالات مسئول کانه‌زایی در کانسار زاجکان، یک سیستم H₂O-NaCl با دمای متوسط (۱۵۰ تا ۲۹۵ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین (۰/۲ تا ۷/۶ درصد وزنی معادل نمک طعام) است. براساس این داده‌ها، روند تکامل

منابع

- Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., Castro, A., 2015. Petrogenesis and U-Pb SHRIMP Dating of Tarom Plutons. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 24(95), 3-20 (in Persian with English abstract).
- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. Society of Economic Geology Special Publication 8, 1-32.
- Albinson, T.F., 1988. Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombrorete, Colorado, and Fresnillo districts, Zacatecas State, Mexico. Economic Geology 83(8), 1647-1667.
- Bazargani-Guilani, K., Parchekani, M., 2011. Metallogenic properties of Barik-Ab Pb-Zn (Cu) ore deposit with acidic tuff host rock, west Central Alborz, northwest of Iran. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 20 (78), 97-104. (in Persian with English abstract).
- Berger, B.R., Eimon, P.I., 1983. Conceptual models of epithermal metal deposits. Shanks,
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M., Dmitriev, L., 1990. MORB alteration: rare-earth element/non-rare-earth hygromagmaphile element fractionation. Chemical Geology 82, 1-14.
- Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta 57(3), 683-684.
- Bodnar, R.J., Burnham, C.W., Sterner, S.M., 1985a. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1000 °C and 1500 bars. Geochimica et Cosmochimica Acta 49(9), 1861-1873.
- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J., Kuehn, C.A., 1985b. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. Reviews in Economic Geology 2, 73-97.
- Bouzari, F., Clark, A.H., 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the Cerro Colorado Hypogene Protore, I Region, northern Chile. Economic Geology 101(1), 95-134.
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes H.L. (Editor), Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd edition, John Wiley and Sons Inc, New York, pp. 71-136.

- Camprubi, A., Albinson, T., 2007. Epithermal deposits in Mexico, update of current knowledge, and an empirical re-classification. *The Geological Society of America Special Paper* 422, 14–39.
- Canet, C., Franco, S.I., Prol-Ledesma, R.M., González-Partida, E., Villanueva-Estrada, R.E., 2011. A model of boiling for fluid inclusion studies: Application to the Bolaños Ag–Au–Pb–Zn epithermal deposit, Western Mexico. *Journal of Geochemical Exploration* 110(2), 118–125.
- Chang, Z., Hedenquist, J.W., White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L., Garcia Jr, J., Gemmell, J.B., McKnight, S., Cuisson, A.L., 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu–Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology* 106(8), 1365–1398.
- Cole, D.R., Drummond, S.E., 1986. The effect of transport and boiling on Ag/Au ratios in hydrothermal solutions: A preliminary assessment and possible implications for the formation of epithermal precious metal ore deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 25 (1–2), 45–79.
- Cooke, D.R., McPhail, D.C., 2001. Epithermal Au–Ag–Te mineralization, Acupan, Baguio district, Philippines: numerical simulations of mineral deposition. *Economic Geology* 96(1), 109–131.
- Cooke, D.R., Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology* 13, 221–244.
- Davis, D.W., Lowenstein, T.K., Spencer, R.J., 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, and NaCl–CaCl₂–H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54(3), 591–601.
- Dokuz, A., Tanyolu, E., Genc, S., 2005. A mantle and a lower crust derived bimodal suite in the Yusufeli Artvin area, NE Turkey: Trace element and REE evidence for Subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *Int. Journal of Earth Sciences (Geologische Rundsch)* 95(3), 370–394
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In: Simmons, S.F., Graham, I. (Eds.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth*. *Economic Geology Special Publication* 10, 285–313.
- Esmaeli, M., Lotfi, M. and Nezafati, N., 2015. Fluid inclusion and stable isotope study of the Khalyfehlou copper deposit, southeast Zanjan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(11), 9625–9633.
- Fan, H.R., Hu, F.F., Wilde, S.A., Yang, K.F., Jin, C.W., 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong’ershan region, central China: fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *International Geology Reviews* 53, 25–45.
- Feizi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., 2016. Geology, mineralization and geochemistry of Aqkand Cu occurrence (north of Zanjan, Tarom–Hashtjin zone). *Journal of Economic Geology* 8(2), 507–524 (in Persian with extended English abstract).
- Fournier, R.O., 1985. The behavior of silica in hydrothermal solutions. *Reviews in Economic Geology* 2, 45–61.
- Gemmell, J. B., 2004. Low-and intermediate-sulfidation epithermal deposits. In: Cooke, D.R., Deyel, C.L., Pongratz, J. (Eds), *24 Ct Gold Workshop*. University of Tasmania, Hobart, Australia, pp. 57–63.
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Wilkinson, C.M., Ganerod, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojeh epithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geosciences* 7, 207–222.
- Goldstein, R.H., 2003. Petrographic analysis of fluid inclusions. In: Samson, I., Anderson A., Marshall, D., (Eds), *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course 32, 9–53.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology* 66(6), 940–946.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Economic Geology* 93(4), 373–404.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (Eds), *Gold in 2000*. *Reviews in Economic Geology* 13, 245–277.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Economic Geology* 93(4), 373–404.
- Hedenquist, J.W., Lowenstein, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature* 370(6490), 519–527.
- Henley, R.W., Hughes, G.O., 2000. Underground fumaroles: “Excess heat” effects in vein formation. *Economic Geology* 95(3), 453–466.

- Hosseiny, M., Moosavi, E., Rasouli Jamadi, F., 2016. Geological map of Abhar, Scale 1:100,000, Geological Survey of Iran.
- Hossienzadeh, M.R., Maghfouri, S., Moayyed, M., Rahmani, A., 2016. Khalyfehlou deposit: High-sulfidation epithermal Cu-Au mineralization in the Tarom magmatic zone, north Khoramdareh. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 25(99), 179–194. (in Persian with English abstract).
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: Henderson, P., (Ed.), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 317–342.
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: a review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews* 12, 111–134.
- Jobson, D.H., Boulter, C.A., Foster, R.P., 1994. Structural controls and genesis of epithermal gold-bearing breccias at the Lebung Tandai mine, Western Sumatra, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration* 50(1–3), 409–428.
- John, D.A., 2001. Miocene and early Pliocene epithermal gold–silver deposits in the northern Great Basin, western USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology* 96(8), 1827–1853.
- Khakzad, A., Hajalilou, B., 1999. Investigation on Pb, Zn and Cu mineralization in northwest of Zanjan and east of Mianeh and their relation to pervasive hydrothermal alteration. 3rd Symposium of Geological Society of Iran, University of Shiraz, Shiraz, Iran. (in Persian with English abstract).
- Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A., Campos, E., 2007. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu–Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids. *Economic Geology* 102(2), 1021–1045.
- Kouhestani, H., 2018. Temporal–spatial relationships between epithermal mineralization and Eocene magmatism at the Tarom-Hashtjin region, Tethyan metallogenic belt, northwestern Iran. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Unpublished Report, 150 pp.
- Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Mokhtari, M.A.A., Ebrahimi, M. 2017. Mineralization and fluid evolution of epithermal base metal veins from the Aqkand deposit, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)* 194(2), 139–155.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., 2018b. Origin and evolution of mineralizing fluids of the Armaqan Khaneh epithermal base metal deposits, NW Iran: Fluid inclusion and stable isotope perspective. *Porphyry Cu–Au–Mo Mineral System International Symposium*, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., Johnson, A.C., 2018a. Intermediate-sulfidation type base metal mineralization at Aliabad–Khanchy, Tarom–Hashtjin metallogenic belt. NW Iran. *Ore Geology Reviews* 93, 1–18.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z., Zhang, X.N., 2020. Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes. *Ore Geology Reviews* 126, 103752.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z., Zhao, J.X., 2019. Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb–Zn–Cu (Ag) deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 113, 103087.
- Li, H., Tang, J., Hu, G., Ding, S., Li, Z., Xie, F., Teng, L., Cui, S., 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag–Pb–Zn deposit, Tibet, China. *Ore Geology Reviews* 107, 692–706.
- Liu, J., Mao, J.W., Wu, G., Wang, F., Luo, D.F., Hu, Y.Q., Li, T.G., 2014. Fluid inclusions and H–O–S–Pb isotope systematics of the Chalukou giant porphyry Mo deposit, Heilongjiang Province, China. *Ore Geology Reviews* 59, 83–96.
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews* 7(1), 25–41.
- Mehrabi, B., Choghaneh, N., Tale Fazel, E., 2009. Petrology, mineralogy and alteration studies of anomaly no. 4 of Gulloje polymetal deposit (northwest of Zanjan). 1st Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E.E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 78, 41–57.

- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Tale Fazel, E., 2014. Base and precious metal ore-formation system in the Cheshmeh Hafez and Challu mining area, Torud-Chah Shirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 24(93), 105–118. (in Persian with English abstract).
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Ghasemi Siani, M., Eghbali, M.A., 2010. Investigation on mineralization and genetic model of Gulloje Cu-Au vein deposit (north of Zanjan), using mineralogical, geochemical and fluid inclusion data. *Journal of Sciences* 35(4), 185–199. (in Persian with English abstract).
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Maghfouri, S., 2018. The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, Iran: An example of intermediate-sulfidation epithermal type mineralization. *Minerals* 8(4), 148.
- Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., Saeedi, A., 2016. Investigation on type and origin of cooper mineralization at Aliabad Mousavi–Khanchy occurrence, east of Zanjan, using petrological, mineralogical and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 25(100), 259–270. (in Persian with English abstract).
- Moncada, D., Baker, D., Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag–Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México. *Ore Geology Reviews* 89, 143–170.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D., Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 114, 20–35.
- Mousavi Motlagh, S.H., Ghaderi, M., Yasami, N., Alfonso, P., 2019. Stable isotope geochemistry of Chargar epithermal deposit: Constraints on epithermal systems in the Tarom metallogenic belt, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 205, 106331.
- Mousavi Motlagh, S.H., Ghaderi, M., 2019. The Chargar Au-Cu deposit: an example of low-sulfidation epithermal mineralization from the Tarom subzone, NW Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)* 196(1), 43–66.
- Muntean, J.L., Einaudi, M.T., 2001. Porphyry-epithermal transition, Maricunga Belt, northern Chile. *Economic Geology* 96(4), 743–772.
- Murphy, J.B., Hynes, A.J., 1986. Contrasting secondary mobility of Ti, P, Zr, Nb and Y in two meta-basaltic suites in the Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences* 23(8), 1138–1144.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Xiaoming, L., Dong, Y., Jiang, S.H., Quadt, A., Bernroider, M., 2014. Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: Geochemical, U–Pb zircon and Sr–Nd–Pb isotopic constraints. *Lithos* 184–187, 324–345.
- Nabatian, G., Jiang, S.Y., Honarmand, M., Neubauer, F., 2016. Zircon U–Pb ages, geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Tarom-Olya pluton, Alborz magmatic belt, NW Iran. *Lithos* 244, 43–58.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 p. (in Persian)
- Naderlou, F., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., Nabatian, Gh., 2021. Type and origin of the north Chargar Cu–Au mineralization, southeast Zanjan: Using petrological, mineralogical and geochemical data. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 31(120), 149–162. (in Persian with English abstract).
- Ouyang, H., Wu, X., Mao, J.W., Su, H., Santosh, M., Zhou, Z., Li, C., 2014. The nature and timing of ore formation in the Budunhua copper deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from geology, fluid inclusions, and U–Pb and Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews* 63, 238–251.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin, p. 1250 .
- Prokofiev, V.Y., Garofalo, P.S., Bortnikov, N.S., Kovalenker, V.A., Zorina, L.D., Grichuk, D.V., Selektor, S.L., 2010. Fluid inclusion constraints on the genesis of gold in the Darasun district (eastern Transbaikalia), Russia. *Economic Geology* 105(2), 395–416.
- Rabiei, M., Chi, G., Normand, C., Davis, W.J., Fayek, M., Blamey, N.J.F., 2017. Hydrothermal rare earth element (Xenotime) mineralization at Maw Zone, Athabasca Basin, Canada, and its relationship to unconformity-related uranium deposits. *Economic Geology* 112(6), 1483–1507.
- Ramboz, C., Pichavant, M., Weisbrod, A., 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data: II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chemical Geology* 37(1–2), 29–48.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12, Mineralogical Society of America, p. 644 .
- Roedder, E., Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 8(1), 263–301.
- Ronacher, E., Richards, J.P., Johnston, M.D., 2000. Evidence for fluid phase separation in high-grade ore zones at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Mineralium Deposita* 35(7), 683–688.

- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. *Economic Geology* 103(2), 307–334.
- Sabeva, R., Mladenova, V., Mogessie, A., 2017. Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au-Ag deposit in Western Srednogie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews* 88, 400–415.
- Scott, A.M., Watanabe, Y., 1998. Extreme boiling model for variable salinity of the Hokko low-sulfidation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido, Japan. *Mineralium Deposita* 33(6), 568–578.
- Shahbazi, S., 2020. Geochemistry and genesis of Zehabad Pb-Zn-Au-Ag-Cu polymetallic deposit in NW Iran. Unpublished Ph.D Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (in prsian with English abstract).
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit. NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 28, 882–901.
- Shepherd, T.J., Ranbin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, p. 223.
- Sherlock, R.L., Tosdal, R.M., Lehrman, N.J., Graney, J.R., Losh, S., Jowett, E.C., Kesler, S.E., 1995. Origin of the McLaughlin mine sheeted vein complex: metal zoning, fluid inclusion and isotopic evidence. *Economic Geology* 90(8), 2156–2181.
- Sillitoe, R.H., Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. *Society of Economic Geology, Special Publication* 10, 315–343.
- Simmons, S.F., Brown, K.L., 2006. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a Giant ore deposit. *Science* 314(5797), 288–291.
- Simmons, S.F., Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology* 95(5), 971–1000.
- Simmons, S.F., White, N.C., John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary 485–522.
- Simpson, M.P., Mauk, J.L., Simmons, S.F., 2001. Hydrothermal alteration and hydrologic evolution of the Golden Cross epithermal Au–Ag deposit, New Zealand. *Economic Geology* 96(4), 773–796
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London, Special Publication* 42(1), 313–45.
- Takács, Á., Molnár, F., Turi, J., Mogessie, A., Menzies, J.C., 2017. Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu–Au–Ag deposit in the Reesk ore complex. Hungary. *Economic Geology* 112, 1461–1481.
- Taylor, R., 2009. Ore textures: Recognition and interpretation. Springer-Verlag, Berlin, p. 287 .
- Thiersch, P.C., Williams-Jones, A.E., Clark, J.R., 1997. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au–Ag deposit, Toadoggon District, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita* 32(1), 44–57.
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology* 18(1), 49–107.
- Urusova, M.A., 1975. Volume properties of aqueous solutions of sodium chloride at elevated temperatures and pressures. *Russian Journal of Inorganic Chemistry* 20, 1717–1721.
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.Y., Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews* 107, 434–456.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Zhao, Z.H., Jian, P., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Li, C.F., Bai, Z.H., 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui province (eastern china): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* 89, 1–26.
- White, N.C., Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG News Letter* 23(1), 9–13.
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M., Craven, S.J., 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology* 68(1–2), 105–119.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55(1–4), 229–272.
- Yardley, B.W.D., 2005. Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology* 100(4), 613–632.

- Yardley, B.W.D., Bodnar, R.J., 2014. Fluids in the continental crust. *Geochemical Perspectives* 3(1), 1–2.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Arehart, G.B., Colakoglu, A.R., Billor, Z., 2007. Low-sulfidation type Au–Ag mineralization at Bergama, Izmir, Turkey. *Ore Geology Reviews* 32, 81–124.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F.N., Arehart, G.B., Billor, Z., 2010. Intermediate sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespil Dere (Lapseki/Western Turkey). *Ore Geology Reviews* 37(3–4), 236–258.
- Zamanian, H., Rahmani, S., 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.
- Zamanian, H., Rahmani, S., Zareisahamieh, R., Pazoki, A., Yang, X.Y., 2020. Geochemical characteristics of igneous host rocks of Lubin-Zardeh Au–Cu deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 122, 103496.
- Zhai, D., Liu, J., Wang, J., Yao, M., Wu, S., Fu, C., Liu, Z., Wang, S., Li, Y., 2013. Fluid evolution of the Jiawula Ag–Pb–Zn deposit, Inner Mongolia: Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotopic evidence. *International Geology Reviews* 55(2), 204–224.
- Zhai, W., Sun, X., Sun, W., Su, L., He, X., Wu, Y., 2009. Geology, geochemistry, and genesis of Axi: a Paleozoic low-sulfidation type epithermal gold deposit in Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews* 36(4), 265–281.
- Zhu, Y.F., Zeng, Y.S., Jiang, N., 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, northern China. *International Geology Reviews* 43, 457–473.