



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2026.1172



Geology, mineralization, and geochemistry of the Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit (North of Zanjan): Intermediate-sulfidation epithermal mineralization in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt

Shima Eyvazi¹ , Hossein Kouhestani^{2*} , Mir Ali Asghar Mokhtari³ , Behnam Mehdikhani⁴

¹ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

⁴ Ph.D., Mining Engineering Organization of Zanjan Province, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 06 May 2026

Revised: 09 June 2026

Accepted: 13 June 2026

Keywords

Pb-Zn-Cu mineralization

Epithermal

Intermediate-sulfidation

Aqjeh Qaleh

Zanjan

Tarom-Hashtjin metallogenic belt

*Corresponding author

Hossein Kouhestani

✉ kouhestani@znu.ac.ir

ABSTRACT

The Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit is part of the Tarom-Hashtjin metallogenic belt. Mineralization occurs as five quartz-sulfide veins hosted by Eocene volcanoclastic and volcanic units, and is enclosed by 1–5-meter haloes of intermediate argillic alteration. The ore veins have N10-20E/70-85NW trends, and vary between 30 and 150 meters in length, and 0.5 and 2 meters in thickness. In the ore veins, textures and structures of ores include disseminated, veinlets, brecciated, crustiform, cockade, colloform, plumose, and vug infill. Ore assemblages include pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, cerussite, smithsonite, goethite, malachite, and covellite, and gangue minerals are quartz, calcite, and chlorite. Five stages of mineralization can be recognized at Aqjeh Qaleh, in which Cu and Pb-Zn mineralization occurred during the second and third stages. Hydrothermal alterations around the ore veins mostly consist of silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration. Geochemical data display negative correlation between Pb, Zn, and Cu, positive correlation between Pb and Ag, and positive correlation between Ag and S, As, and Sb. Similar Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of ore samples, pyroxene quartz monzonite porphyry intrusion, fresh and unaltered intermediate crystal tuffs, and basaltic lavas reveal that intrusion and host rocks are possibly involved in mineralization. The Aqjeh Qaleh deposit is an intermediate-sulfidation epithermal deposit.

How to cite this article

Eyvazi, Sh., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Mehdikhani, B., 2026. Geology, mineralization, and geochemistry of the Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit (North of Zanjan): Intermediate-sulfidation epithermal mineralization in the Tarom-Hashtjin metallogenic belt. *Journal of Economic Geology*, 18(1): 171–203. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1172>



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Porphyry and epithermal deposits are the main sources of precious (Au, Ag) and base metals (Cu, Pb, Zn) in the world. Among these, epithermal deposits provide about 6% of gold and 16% of silver of the world, and are also the main source for base metals in the world (Simmons et al., 2005; Dilles and John, 2021). Many of the important epithermal deposits are of Tertiary age and are concentrated on the Pacific rim and in the Mediterranean and Carpathian regions of Europe. Older deposits are scattered in the Tethys metallogenic belt and others in volcanic arcs of various ages, with a few of Archean age also found (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; John, 2001; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005).

Iran, as a part of the Alpine-Himalayan orogenic belt, hosts numerous epithermal deposits. These deposits are mostly reported from the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Ahar-Arasbaran zone, Miyaneh-Bostan Abad metallogenic belt, Taron-Hashtjin metallogenic belt, Torud-Chahshirin ore belt, Binaloud subzone, Torbat-e Heydariyeh-Taknar zone, Central Iran zone, Lut block, and the Bazman-Taftan volcanic arc (Yasami et al., 2025 and references therein). The Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit, discovered ~55 km north of Zanjan in the Taron-Hashtjin metallogenic belt. Although exploration activities have been carried out on the quartz-sulfide veins in the area, the genesis of the deposit remains poorly understood. This study presents geological, mineralogical, alteration, and geochemical characteristics of the Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit to constrain its ore genesis and mineralization type. The outcomes are planned to help regional exploration programs within the Taron-Hashtjin metallogenic belt and other parts in northwest Iran.

Materials and methods

This research includes fieldwork and laboratory analyses. The geological map of the Aqjeh Qaleh area, at a 1:5,000 scale, was prepared during the fieldwork. Additionally, fifty samples from quartz-sulfide mineralized veins, host rocks, and intrusive bodies were collected. Then, thirteen thin and seventeen polished-thin blocks were prepared and

studied under transmitted and reflected polarized light microscopes at the mineralogy laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. Moreover, thirteen samples from ore samples and host rocks were analyzed for rare, REE, and base metal contents using ICP-MS technique at Zarazma Analytical Laboratory in Tehran.

Results and Discussion

The rock units exposed in the Aqjeh Qaleh area include Eocene volcanic (olivine basalt, andesitic basalt, andesite, rhyodacite) and volcanoclastic (intermediate to acidic crystal to lithic crystal tuff, basic lithic crystal to crystal lithic tuff) sequence, and late Eocene gabbro to pyroxene quartz monzonite porphyry intrusion. Mineralization at Aqjeh Qaleh occurred as five quartz-sulfide ore veins hosted by Eocene strata, and is covered by 1 to 5-meter halos of intermediate argillic alteration. The veins strike N10–20E and dip 70–85° NW and range from 30 to 150 meters in dimension, with widths varying from 0.5 to 2 meters. Hydrothermal alterations comprise silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration; the first three are closely related to the mineralized veins. Ore minerals consist of pyrite, chalcopyrite, galena, and Fe-poor sphalerite. Gangue minerals are quartz, calcite, and chlorite. Cerussite, smithsonite, goethite, malachite, and covellite are supergene minerals. The ores display different textures and structures, such as disseminated, veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, plumose, and vug infillings. Mineralization can be separated into five stages. Stage-1 is characterized by the silicification (fine-grained quartz) of host rocks comprising minor anhedral fine-grained disseminated pyrite. Stage-2 is categorized by quartz-pyrite-chalcopyrite as vein-veinlets and hydrothermal breccia cement. Stage-3 is represented by quartz-galena-Fe poor sphalerite vein-veinlets and breccia cement. Stage-4 includes post-mineralization barren quartz-calcite vein-veinlets. Stage-5 corresponds to supergene processes.

Geochemical data of mineralized samples disclose moderate positive correlation between Pb and Zn, weak negative correlation between Pb, Zn, and Cu, as well as moderate positive correlation between Pb and Ag, and strong positive correlation between Ag and As. Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of ore samples, and fresh and unaltered

intermediate crystal tuffs, basaltic lavas, and pyroxene quartz monzonite porphyry intrusion, indicate that they are probably involved in mineralization. Characteristics of the Aqjeh Qaleh Pb-Zn-Cu deposit are comparable with the intermediate-sulfidation style of epithermal deposits. The close spatial association between late Eocene

granitoid intrusions and epithermal mineralization in the Taron-Hashtjin metallogenic belt proposes the role of late Eocene magmatic-hydrothermal activities in providing metals and ore-forming hydrothermal fluids for this type of mineralization in NW Iran, which should be considered in exploration programs.



زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی کانسار سرب-روی-مس آغچه‌قلعه (شمال زنجان): کانه‌زایی اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم-هشتجین

شیمایعیوضی^۱ ID، حسین کوهستانی^{۲*} ID، میر علی اصغر مختاری^۳ ID، بهنام مهدیخانی^۴ ID

^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۴ دکتری، سازمان نظام مهندسی معدن استان زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

چکیده

کانسار سرب-روی-مس آغچه‌قلعه در کمربند فلززایی طارم-هشتجین واقع شده است. کانه‌زایی به صورت پنج رگه سیلیسی-سولفیدی در میزبان واحدهای آذرآواری و گدازه‌ای ائوسن رخ داده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژلیک حدواسط (پهنای ۱ تا ۵ متر) در بر گرفته شده است. رگه‌های کانه‌دار با روند N10-20E/70-85NW و ۳۰ تا ۱۵۰ متر درازا و ۰/۵ تا ۲ متر ضخامت هستند. بافت و ساخت کانسنگ در رگه‌ها شامل دانه‌پراکنده، رگچه‌ای، پرشی، قشرگون، کاکلی، گل‌کلی، پرمانند و پُرکننده فضای خالی است. کانه‌ها شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، سروزیت، اسمیت‌زونیت، گوتیت، مالاکیت و کوولیت و باطله‌ها شامل کوارتز، کلسیت و کلریت هستند. پنج مرحله کانه‌زایی در کانسار آغچه‌قلعه قابل تفکیک است که کانه‌زایی مس در مرحله دوم و سرب و روی در مرحله سوم رخ داده است. دگرسانی‌های گرمابی در اطراف رگه‌ها بیشتر شامل سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط و پروپلیتیک هستند. داده‌های زمین‌شیمی بیانگر همبستگی منفی سرب و روی با مس، همبستگی مثبت سرب با نقره و همبستگی مثبت نقره با گوگرد، آرسنیک و آنتیموان است. تشابه الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانسنگ، توده پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری، توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی سالم و بدون دگرسانی بیانگر نقش احتمالی توده نفوذی و سنگ‌های میزبان در کانه‌زایی است. کانسار آغچه‌قلعه از نوع کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط است.

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی سرب-روی-مس

اپی‌ترمال

سولفیداسیون حدواسط

آغچه‌قلعه

زنجان

کمربند فلززایی طارم-هشتجین

نویسنده مسئول

حسین کوهستانی

kouhestani@znu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

عیوضی، شیمای؛ کوهستانی، حسین؛ مختاری، میر علی اصغر و مهدیخانی، بهنام، ۱۴۰۵. زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی کانسار سرب-روی-مس آغچه‌قلعه (شمال زنجان): کانه‌زایی اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم-هشتجین. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۱): ۱۷۱-۲۰۳.

<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1172>

مقدمه

ذخایر پورفیری و اپی‌ترمال از منابع اصلی برای فلزهای پایه و گران‌بها در جهان هستند. در این میان، کانسارهای اپی‌ترمال، حدود ۶ درصد از طلا و ۱۶ درصد از نقره دنیا را تأمین کرده‌اند و منبع اصلی فلزهای پایه (مس، سرب و روی) جهان به شمار می‌روند (Simmons et al., 2005; Dilles and John, 2021). اغلب کانسارهای اپی‌ترمال بزرگ، سن ترشیاری دارند و در حاشیه اقیانوس آرام و در مناطق مدیترانه‌ای و کارپات اروپا متمرکز شده‌اند (Simmons et al., 2005). کانسارهای قدیمی‌تر در کمربند فلززایی تیتس و برخی دیگر در کمان‌های آتشفشانی با سن‌های مختلف پراکنده هستند و تعداد کمی از آنها به سن آرکئن نیز یافت می‌شود (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; John, 2001; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005).

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا دارای کانسارهای اپی‌ترمال فراوانی است. این کانسارها بیشتر در کمان ماگمایی ارومیه-دختر (مانند کانسارهای چاه‌زرد، کالجویه، نارباغی، آتش‌انبار، میلارد، گمیش‌تپه، گویجه‌یلاق، زواریان، آی‌قلعه‌سی، توزلار و چوران)، پهنه اهر-ارسباران (مانند کانسارهای زایلیک-ساریلار، شرف‌آباد، مزرعه شادی و میوه‌رود)، کمربند فلززایی میانه-بستان‌آباد (مانند کانسارهای قبیجاق، تیکمه‌داش و تیکمه‌داش ۲)، کمربند فلززایی طارم-هشتجین (مانند کانسارهای عباس‌آباد، نیکویی، زاجکان، مرشون، علی‌آباد-خان‌چای، تشویر، آق‌کند، جلیل‌آباد، رشت‌آباد، خلیفه‌لو، چرگر، شمال چرگر، چودرچای، گلوچه، چومالو، ورمزیار و شاه‌علی‌بیگلر)، پهنه کانه‌دار طرود-چاه‌شیرین (مانند کانسارهای دارستان-باغو، قله‌کفتران، چشمه‌حافظ، گندی، ابولحسنی و کلاته چاه‌موسی)، زیرپهنه بینالود (مانند کانه‌زایی علم‌جوق)، پهنه تربت حیدریه-تکنار (مانند کانسارهای کلاته تیمور، چشمه نقره، ارغش، سه‌بندون، بردسکن و چلیو-کلاته چوبک)، پهنه ایران مرکزی (مانند کانسارهای تلخه، خان‌مس،

گود مراد و خرانگون)، بلوک لوت (مانند کانسارهای کودکان، قلعه‌چاه، ماهور و شوراب) و کمان آتشفشانی بزمان-تفتان (مانند کانسارهای شمال بزمان، چاه‌نلی، خارستان، بیدستر، چاه‌مراد و شور چاه) گزارش شده‌اند (Yasami et al., 2025).

کانسار سرب-روی-مس آغجه‌قلعه در ۵۵ کیلومتری شمال زنجان واقع شده و بخشی از نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین (Faridi and Anvari, 2000) است. این کانساریکی از کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه در کمربند فلززایی طارم-هشتجین است که نخستین بار در سال ۱۳۹۵ توسط بخش خصوصی شناسایی و مورد اکتشاف قرار گرفت. فعالیت‌های اکتشافی در این کانسار شامل حفر ترانشه (۶ رشته با حجم کلی ۱۶۷۶ متر مکعب) و گمانه مغزه‌گیری (۱۵ حلقه به متر اژ کل ۵۳۸ متر) است که به شناسایی ذخیره‌ای با تناژ ۷۳۰۰۰ تن و عیار ۴ درصد مجموع سرب و روی و ۰/۵ درصد مس منجر شده است (Mehdikhani, 2020). در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی و زمین‌شیمی در کانسار آغجه‌قلعه بررسی شده و نوع کانه‌زایی و زایش آن تعیین شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان الگوی اکتشافی در کمربند فلززایی طارم-هشتجین و دیگر بخش‌های پهنه البرز غربی-آذربایجان مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

این پژوهش دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی را دربر می‌گیرد. در بخش بررسی‌هایی صحرایی و در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰، بیش از ۵۰ نمونه از واحدهای سنگی و رگه‌های کانه‌دار برداشت شده است. از این بین، تعداد ۱۳ مقطع نازک و ۱۷ مقطع نازک-صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و بررسی شد. در مرحله بعد، بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، تعداد ۱۰ نمونه از بخش‌های کانه‌دار و ۳ نمونه از سنگ‌های میزبان انتخاب و برای تعیین مقدار عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS

در آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران تجزیه شدند. برای این بررسی‌ها، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا ابعاد حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خردایش شده و سپس توسط آسیاب آگاتی به مدت ۲ دقیقه تا ابعاد حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر و میزان ۵۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تجزیه و تحلیل انتخاب شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به روش چند اسید و با استفاده از ماکروویو هضم شد. دقت اندازه‌گیری برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۰/۱ تا ۱ گرم در تن بوده است. برای تعیین میزان فلزهای پایه، به صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه آغجه‌قلعه

بر اساس پیمایش‌های صحرایی، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه شامل سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی ائوسن هستند که توسط توده نفوذی با سن ائوسن بالایی مورد هجوم قرار گرفته‌اند (شکل ۱). زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی این واحدها به شرح زیر است:

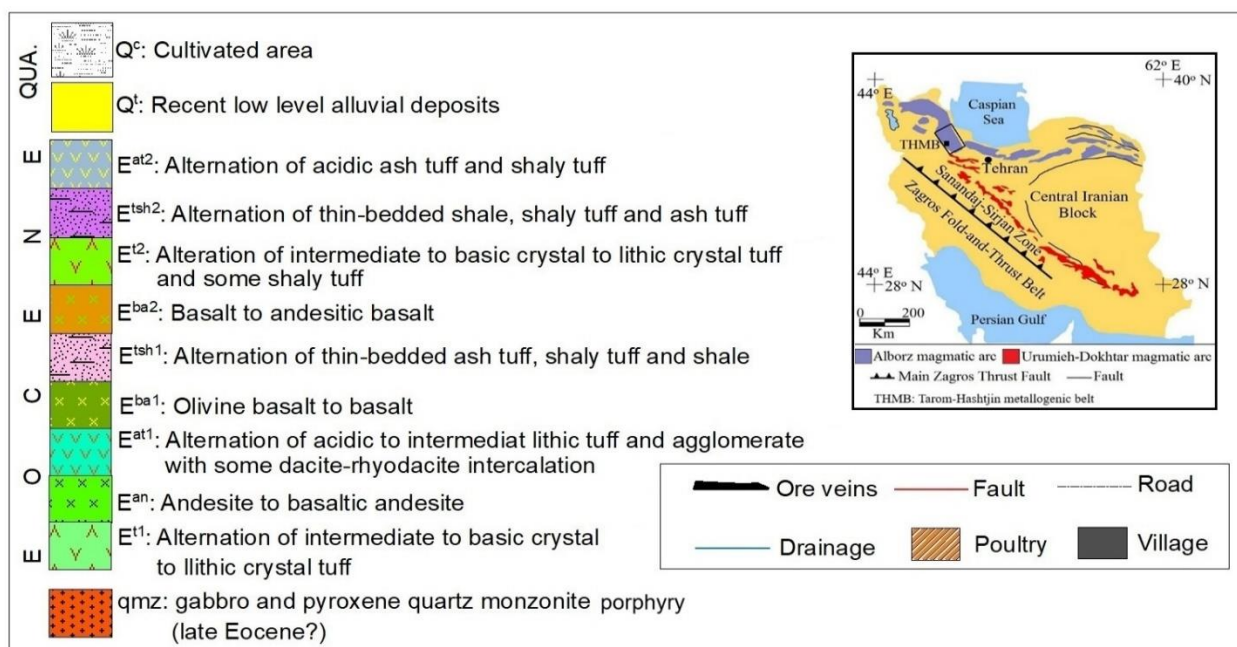
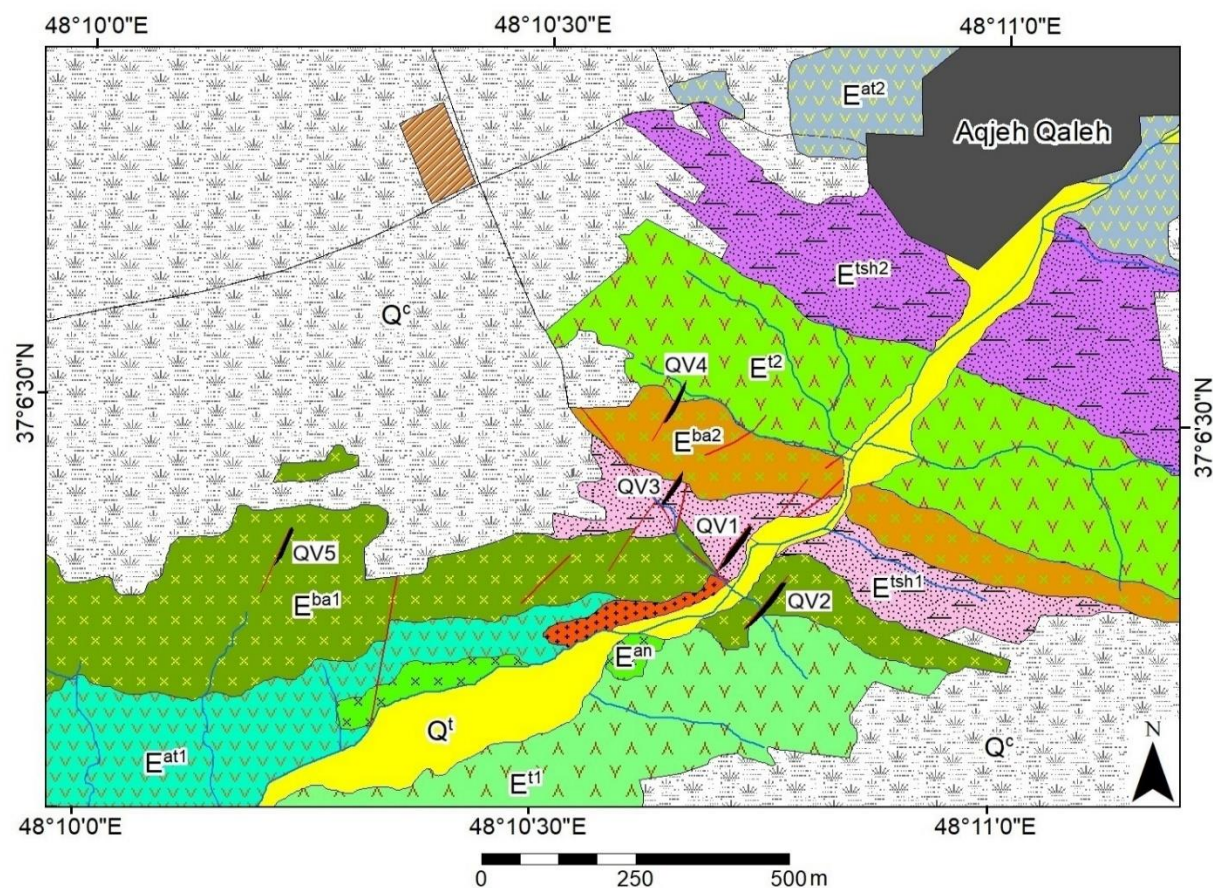
واحد E^{t1} : این واحد شامل تناوب لایه‌های توف بلورین تا توف سنگی بلورین حدواسط تا بازیک با ضخامت متوسط است که در حاشیه جنوبی منطقه آغجه‌قلعه رخنمون دارند (شکل ۲-A و B). این سنگ‌ها، قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه مورد بررسی بوده و به سمت بالا به صورت هم‌شیب توسط گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی (واحد E^{an}) پوشیده می‌شوند.

واحد E^{an} : این واحد از گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی تشکیل شده است که به صورت هم‌شیب بر روی واحد توفی E^{t1} قرار دارند (شکل ۲-A و B) و خود به صورت هم‌شیب توسط توالی توفی E^{at1} با ترکیب اسیدی پوشیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، این سنگ‌ها دارای بافت پورفیری متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و هورنبلندهای اوپاسیته و کلریتی شده هستند (شکل ۳-A). درشت‌بلور غالب سنگ،

بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز (ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر) است. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی و بافت غربالی هستند. بر اساس زاویه خاموشی، پلاژیوکلازها از نوع آندزین هستند. دیگر درشت‌بلور سنگ عبارت از بلورهای منشوری اوپاسیته و جانشین‌شده توسط کلریت با ابعاد تا ۱/۷ میلی‌متر است. به نظر می‌رسد کانی اولیه این بلورها از نوع هورنبلند بوده است. زمینه سنگ دانه‌ریز با دگرسانی ضعیف آرزلی است. در برخی نقاط، تمرکزهایی از کوارتز ثانویه بی‌شکل قابل مشاهده است.

واحد E^{at1} : این واحد شامل تناوب لایه‌های متوسط تا ضخیم لیتیک توف و آگلومرا با ترکیب اسیدی تا حدواسط است که گاه میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های داسیتی-ریوداسیتی در بین آنها دیده می‌شود (شکل ۲-A). این واحد که در بخش‌های جنوب‌غربی منطقه آغجه‌قلعه رخنمون دارد، به صورت هم‌شیب بر روی واحدهای گدازه‌ای و توفی E^{an} و E^{t1} قرار گرفته و خود به صورت هم‌شیب توسط واحد گدازه‌ای بازیک E^{ba1} پوشیده می‌شود. بخش‌های آگلومرای این واحد، ریخت‌شناسی صخره‌سازتری دارند. در برخی نقاط، تمرکزهایی از اپیدوت در لایه‌های توفی و به ویژه در حاشیه قطعه‌های سنگی واحدهای آگلومرای دیده می‌شود. روند عمومی لایه‌بندی در این واحد سنگی، شمال‌شرق-جنوب‌غرب بوده و شیب بین ۲۰ تا ۳۵ درجه به سمت شمال‌غرب نشان می‌دهند. در بخش‌های میانی و در حاشیه آبراهه اصلی منطقه، توده نفوذی با ترکیب گابرو تا پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری (واحد qmz) به درون این واحد نفوذ کرده است (شکل ۲-A).

بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، میان‌لایه‌های گدازه‌ای این واحد ترکیب ریوداسیتی با بافت پورفیری متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آکالی فلدسپار، بلورهای جانشین‌شده با کلریت (و کلسیت) و بلورهای کوارتز در زمینه دانه‌ریز حاوی کوارتز است (شکل ۳-B).



شکل ۱. نقشه زمین شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ کانسار آغجه قلعه (ابعاد رگه های کانه دار بزرگ نمایی شده است)

Fig. 1. Geological map, scale: 15,000, of the Aqjeh Qaleh deposit (The dimension of the ore veins was exaggerated)

پلاژیوکلازها به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در ابعاد تا ۱/۲ میلی‌متر حضور دارند و گاهی منطقه‌بندی نشان می‌دهند. برخی از پلاژیوکلازها به کلسیت و سریسیت دگرسان شده‌اند. آلکالی‌فلدسپارها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار در ابعاد تا ۱ میلی‌متر دیده شده و گاه به کانی‌های رسی و سریسیت دگرسان شده‌اند. تعدادی بلور جانشین شده با کلسیت (و کانی‌های کدر) و کلریت در ابعاد تا ۱ میلی‌متر مشاهده می‌شوند که شکل منشوری (احتمالاً آمفیبول) در برخی از آنها قابل شناسایی است. کوارتز به صورت بلورهای بی‌شکل کوچک تا ۰/۲ میلی‌متر با فراوانی قابل توجه در زمینه سنگ مشاهده می‌شود. در مقاطع میکروسکوپی، لایه‌های توفی ترکیب توف بلورین تا توف سنگی بلورین حدواسط تا اسیدی با دگرسانی پروپیلیتیک دارند. این سنگ‌ها دارای بافت پورفیر و کلاستیک با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و بلورهای جانشین شده توسط کلسیت و اپیدوت، همراه قطعه‌های سنگی در زمینه دانه‌ریز هستند (شکل ۳-C). پلاژیوکلازها (ابعاد تا ۳ میلی‌متر) اغلب به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار، گاه شکسته و زاویه‌دار حضور داشته و گاه به اپیدوت، کلسیت و سریسیت دگرسان شده‌اند. یکسری بلورهای نیمه‌شکل‌دار منشوری شکل (احتمالاً از نوع پیروکسن) با جانشینی کامل توسط کلسیت (گاه همراه با کلریت و کانی کدر) در ابعاد تا ۱ میلی‌متر در سنگ حضور دارند. یک گروه دیگر از بلورها با جانشینی کامل توسط اپیدوت (و گاه کلریت) در ابعاد تا ۱ میلی‌متر دیده می‌شوند که به نظر می‌رسد کانی اولیه آنها از نوع آمفیبول بوده است. قطعه‌های سنگی به شکل‌های نیمه‌گردشده و در ابعاد تا ۲ میلی‌متر، دیگر اجزاء سنگ هستند که دارای بافت‌های پورفیری تا میکروولیتی هستند. در زمینه سنگ، دگرسانی به اپیدوت مشاهده می‌شود.

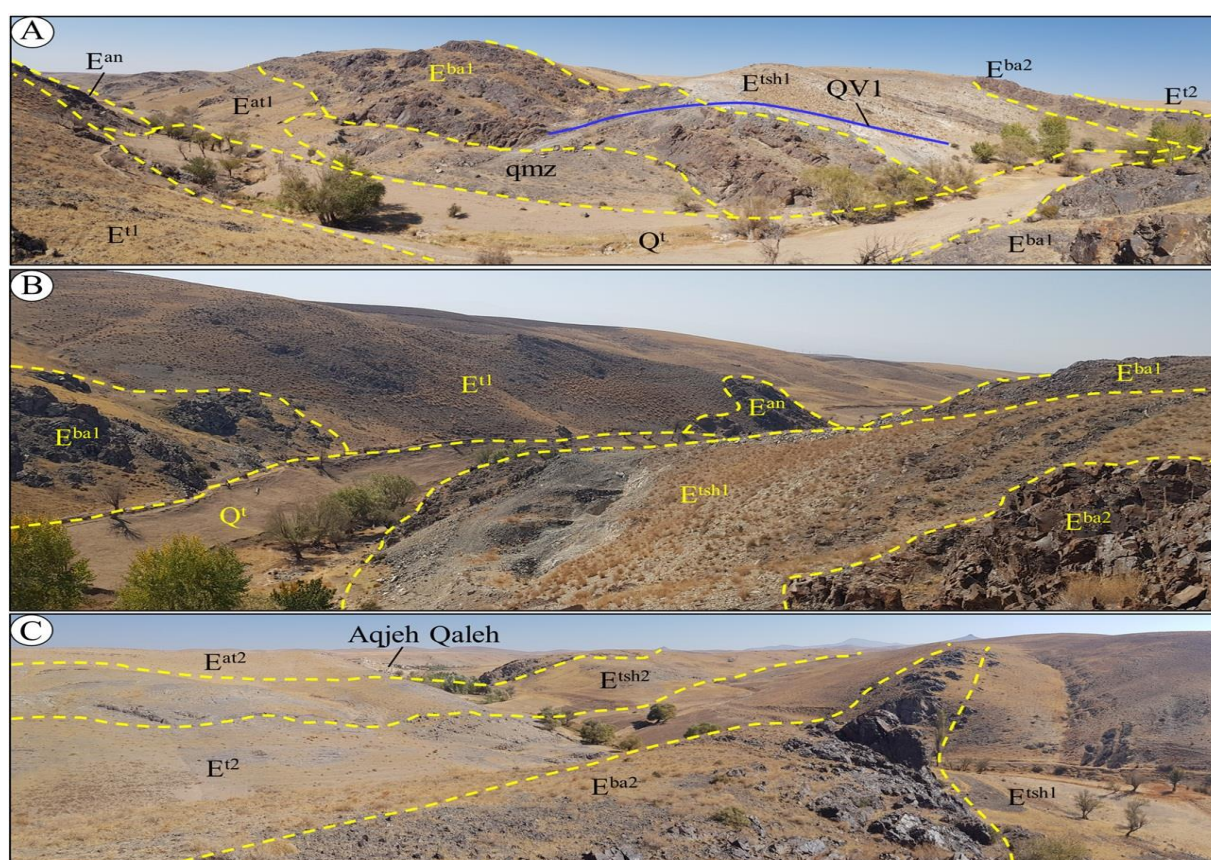
واحد E^{ba1}: این واحد متشکل از لایه‌های گدازه‌ای ضخیم تیره رنگ با ترکیب بازالتی است که با ریخت‌شناسی صخره‌ساز با روند تقریبی شرقی-غربی در منطقه آغچه‌قلعه رخنمون دارند (شکل ۲-B و A). این واحد به صورت هم‌شیب بر روی واحدهای توفی E^{at1} و E^{ba1} قرار گرفته و خود به صورت هم‌شیب توسط واحد توفی

E^{tsh1} پوشیده می‌شود. نتایج بررسی‌های سنگ‌شناسی چهار نمونه برداشت‌شده از لایه‌های مختلف این واحد سنگی بیانگر ترکیب الیون بازالتی تا بازالتی با بافت‌های پورفیری، گلوپروپورفیری، اینترگرانولار و افیتیک و متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و الیون‌های جانشین شده با سرپانتین هستند (شکل ۳-D). پلاژیوکلازها (ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر) به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور داشته و گاهی دارای اذخال‌هایی از کلینوپیروکسن هستند. برخی از پلاژیوکلازها دارای منطقه‌بندی و بافت غربالی هستند. کلینوپیروکسن‌ها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار در ابعاد تا ۱ میلی‌متر و گاه با ماکل نواری مشاهده می‌شوند. گاه اذخال‌های پلاژیوکلاز درون کلینوپیروکسن‌ها دیده می‌شود که به تشکیل بافت افیتیک منجر شده است. در برخی از نمونه‌ها، بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با جانشینی کامل توسط سرپانتین و شکستگی‌های زیاد و پرشده توسط کانی‌های کدر در ابعاد تا ۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود که احتمالاً کانی اولیه آنها از نوع الیون بوده است. زمینه سنگ متشکل از بلورهای ریز کلینوپیروکسن و کانی‌های کدر در بین بلورهای تیغه‌ای پلاژیوکلاز است که بافت اینترگرانولار را تشکیل داده‌اند. در برخی از نمونه‌ها، حفره‌های پرشده توسط کوارتز، کلسیت و اپیدوت دیده می‌شود که بافت بادامکی را به وجود آورده است. به طور کلی، بررسی‌های سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که از بخش زیرین واحد به سمت بالا، ترکیب از الیون بازالت به بازالت تغییر می‌کند که نشان‌دهنده تفریق ماگمایی در این واحد است.

واحد E^{tsh1}: این واحد متشکل از تناوب لایه‌های نازک خاکستر توف، توف شیلی و شیل و گاه لایه‌هایی از توف بلورین تا توف سنگی بلورین است که در بخش‌های مرکزی منطقه آغچه‌قلعه قابل مشاهده هستند (شکل ۲-A و B). روند کلی واحد E^{tsh1}، شرق و جنوب‌شرق-غرب و شمال‌غرب با شیب ۲۰ تا ۳۰ درجه به سمت شمال و شمال‌شرق است. این واحد سنگی به صورت هم‌شیب بر روی واحد گدازه‌ای E^{ba1} قرار گرفته است و خود به صورت هم‌شیب توسط واحد گدازه‌ای E^{ba2} پوشیده می‌شود.

کلسیت و کلریت به مقدار قابل توجه حضور دارند. این بلورها، اغلب حالت شکسته با گوشه‌های تیز نشان می‌دهند که می‌تواند بیانگر ماهیت آذرآواری نمونه باشد. کانی‌های دارای آغشتگی هیدروکسید آهن و کانی‌های کدر در میان بلورهای دیگر با تمرکز بالا دیده می‌شود که به تیرگی رنگ عمومی سنگ منجر شده است. در چند نقطه، قطعه‌های سنگی با رنگ قهوه‌ای در نمونه قابل مشاهده است. چند رگچه کلسیت این نمونه را قطع کرده است.

بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، این واحد سنگی ترکیب توف سنگی بلورین با بافت پورفیروکلاستیک در یک زمینه دانه‌ریز به رنگ تیره است (شکل ۳-۲). تمرکزهای کلسیتی در محل حفره‌ها و گاه به صورت کانی‌های نسبتاً درشت اولیه، شاخص‌ترین کانی قابل شناسایی هستند. کلسیت‌ها گاه به صورت کانی‌های منشوری و گاه تخته‌ای جانشین شده‌اند. در برخی نقاط، کلریت نیز همراه با کلسیت دیده می‌شود. بلورهای کوچک جانشین شده توسط



شکل ۲. تصویرهای صحرایی از واحدهای سنگی موجود در کانسار آغجه‌قلعه. A: نمایی کلی از توالی واحدهای سنگی در منطقه آغجه‌قلعه (دید به سمت شمال-شمال غرب). موقعیت رگه کانه‌دار شماره ۱ (QV1) با خط آبی نشان داده شده است. B: نمایی از واحدهای سنگی در بخش جنوبی منطقه آغجه‌قلعه (دید به سمت جنوب). در جلوی تصویر، ترانشه‌های حفر شده بر روی رگه کانه‌دار شماره ۱ در داخل واحد E^{ts1} قابل مشاهده است و C: نمایی از توالی واحدهای سنگی منطقه در بخش غربی روستای آغجه‌قلعه (دید به سمت شرق)

Fig. 2. Field photographs of rock units in the Aqjeh Qaleh deposit. A: A general view of the rock unit sequence in the Aqjeh Qaleh area, looking north-northwest. The location of the ore vein 1 (QV1) is shown by the blue line, B: A view of rock units in the southern part of the Aqjeh Qaleh area, looking south. In the foreground, trenches dug on the ore vein 1 within the E^{ts1} unit are visible, and C: A view of the rock unit sequence in the western part of the Aqjeh Qaleh village, looking to the east

واحد E^{ba2}: این واحد شامل لایه‌های گدازه‌ای ضخیم تیره رنگ با ترکیب بازالت و بازالت آندزیتی است که با ریخت‌شناسی صخره‌ساز با روند جنوب‌شرقی-شمال‌غربی در منطقه رخنمون دارند (شکل ۲-۲ تا C). این واحد به صورت هم‌شیب بر روی واحد توفی E^{tsh1} قرار گرفته و خود به صورت هم‌شیب توسط واحد توفی E^{t2} پوشیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، این واحد ترکیب بازالتی با بافت‌های پورفیری و گلومروپورفیری متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در یک زمینه دانه‌ریز است (شکل ۳-۲). پلاژیوکلاز درشت‌بلور اصلی سنگ است که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۲ میلی‌متر قابل مشاهده است. منطقه‌بندی و بافت غربالی و دگرسانی محدود به کلسیت و گاه کانی‌های رسی در برخی از پلاژیوکلازها مشاهده می‌شود. بر اساس زاویه خاموشی، پلاژیوکلازها از نوع لابرادوریت هستند. کلینوپیروکسن دیگر درشت‌بلور سنگ است که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۱ میلی‌متر حضور دارد. این کانی‌ها با درجه‌های متغیری به کلسیت و گاه کلریت دگرسان شده‌اند. در برخی نقاط، تجمع کلینوپیروکسن و گاه پلاژیوکلاز به تشکیل بافت گلومروپورفیری منجر شده است. کانی‌های کدر ماگمایی با فراوانی حدود ۲ درصد در زمینه سنگ پراکنده هستند.

واحد E^{t2}: این واحد شامل تناوب لایه‌های متوسط تا ضخیم توف بلورین تا توف سنگی بلورین حدواسط تا بازیک همراه با میان‌لایه‌هایی از توف شیلی است (شکل ۲-۲ تا C). رنگ عمومی این واحد خاکستری تیره بوده و ریخت‌شناسی نسبتاً ملایم نشان می‌دهد. واحد E^{t2} از بخش‌های شرقی تا مرکزی منطقه آغجه‌قلعه رخنمون داشته و به صورت هم‌شیب بر روی واحد گدازه‌ای E^{ba2} قرار گرفته است و خود توسط واحد توفی E^{tsh2} به صورت هم‌شیب پوشیده می‌شود. نتایج بررسی‌های سنگ‌شناسی این واحد بیانگر ترکیب توف سنگی بلورین بازیک با بافت پورفیر و کلاستیک بوده و تشکیل‌دهنده‌های آن شامل قطعه‌های سنگی، بلورهای پلاژیوکلاز، بلورهای جانشین شده با اپیدوت و کلسیت است

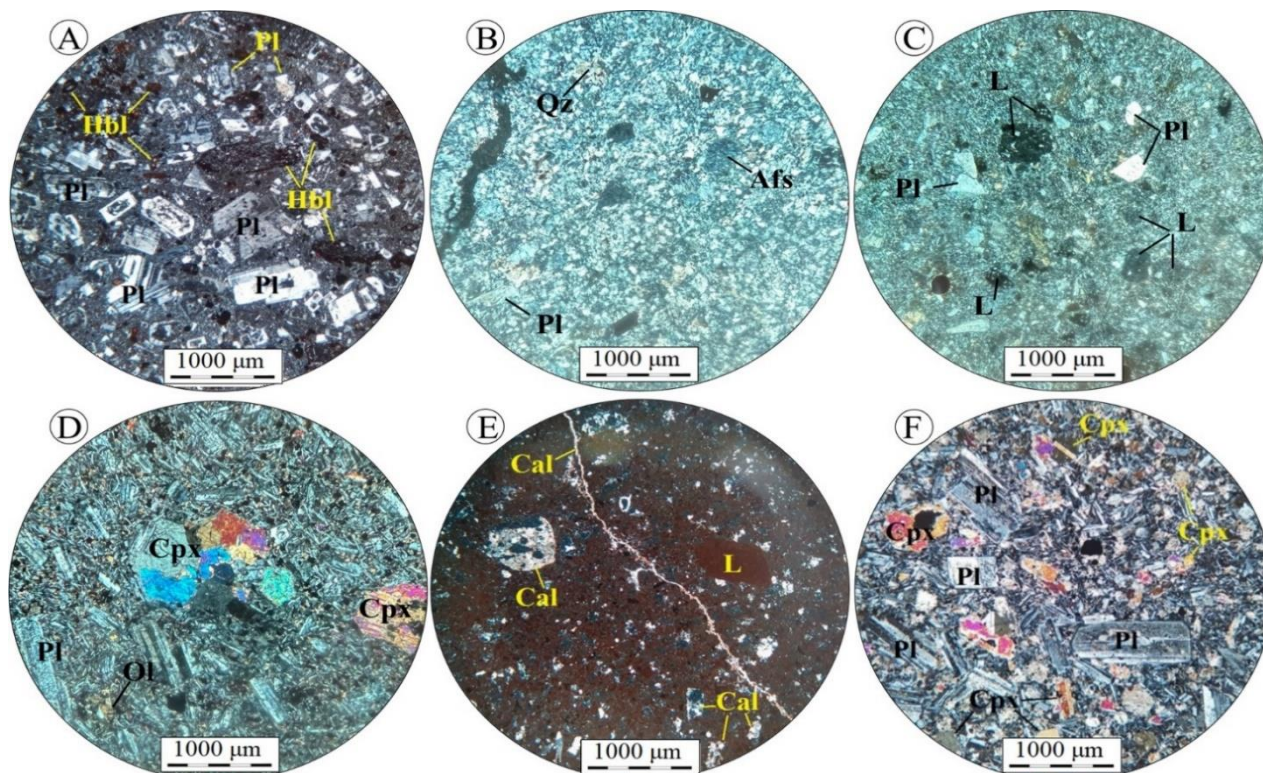
(شکل ۴-۲). قطعه‌های سنگی به شکل نیمه‌گرد شده تا نیمه‌زاویه‌دار در ابعاد تا ۲ میلی‌متر دیده می‌شوند و اغلب دارای بافت پورفیری تا میکرولیتی و زمینه تیره رنگ هستند. بلورهای پلاژیوکلاز داخل قطعه‌های سنگی قابل شناسایی است. بلورهای پلاژیوکلاز (ابعاد تا ۱/۵ میلی‌متر) از دیگر تشکیل‌دهنده عمده سنگ هستند که بیشتر به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و گاه شکسته و زاویه‌دار دیده می‌شوند. دگرسانی به اپیدوت و کلسیت در برخی از بلورهای پلاژیوکلاز دیده می‌شود. بلورهای ریزی با ابعاد ۰/۵ میلی‌متر و با جانشینی کامل توسط اپیدوت و کلسیت مشاهده می‌شوند. در بخش‌هایی از زمینه سنگ، تمرکزهایی از کوارتز و کلسیت ثانویه دیده می‌شود.

واحد E^{tsh2}: این واحد شامل تناوب لایه‌های نازک شیل، توف شیلی و خاکستر توف با ریخت‌شناسی ملایم است (شکل ۲-۲ تا C) که از مرز شمال‌شرقی منطقه تا مرز شمالی آن رخنمون دارد. واحد E^{tsh2} به صورت هم‌شیب بر روی واحد توفی E^{t2} قرار گرفته است و خود توسط واحد توفی E^{at2} به صورت هم‌شیب پوشیده می‌شود.

واحد E^{at2}: این واحد شامل تناوب لایه‌های نازک خاکستر توف و شیل توفی با ترکیب اسیدی و ریخت‌شناسی ملایم است که با رنگ روشن در گوشه شمال‌شرقی منطقه و در اطراف روستای آغجه‌قلعه رخنمون دارد (شکل ۲-۲). این واحد به صورت هم‌شیب بر روی واحد توفی E^{tsh2} قرار گرفته است.

توده نفوذی (واحد qmz): در بخش‌های مرکزی منطقه آغجه‌قلعه و در انتهای جنوب‌غربی رگه کانه‌دار شماره ۱ (QV1)، رخنمونی کوچک از توده نفوذی در حاشیه غربی آبراهه دیده می‌شود که به داخل واحد توفی و گدازه‌ای E^{at1} و E^{ba1} نفوذ کرده است (شکل ۲-۲). با توجه به بررسی‌های سنگ‌شناسی، این توده دارای ترکیب گابرو تا پیروکسن کوارتزموزنویت پورفیری بوده و به نظر می‌رسد هم‌منشأ با توده گرانیتوئیدی حاج‌سیران (Faridi and Anvari, 2000) واقع در شمال‌شرق منطقه باشد.

در مقاطع میکروسکوپی، این توده اغلب دارای بافت پورفیروئیدی
 دانه‌ریز حاوی آلکالی فلدسپار همراه با مقداری پلاژیوکلاز و
 حاوی درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه
 کوارتز است (شکل ۴- B و C).



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت واحدهای سنگی در کانسار آغجه‌قلعه. A: درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز همراه با هورنبلندهای اوپاسیته و کلریتی‌شده در زمینه دانه‌ریز گدازه‌های آندزیتی (واحد E^{an}), B: درشت‌بلورهای آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز کوارتز-فلدسپاتی در گدازه‌های ریوداسیتی (واحد E^{at1}), C: قطعه‌های سنگی همراه با بلورهای کوارتز شکسته‌شده در زمینه دانه‌ریز در توف‌های سنگی بلورین (واحد E^{at1}), D: بافت گلومروپورفیری در گدازه‌های الیوین بازالتی (واحد E^{ba1}), E: بلورهای تخته‌ای و منشوری کوچک جانشین‌شده توسط کلسیت همراه با قطعه‌های سنگی و حفره‌های پر شده توسط کلسیت در متن بسیار دانه‌ریز و تیره رنگ توف‌های سنگی بلورین (واحد E^{tsh1}) و F: درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن همراه با پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز گدازه‌های بازالتی (واحد E^{ba2}). علائم اختصاری: کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Afs: آلکالی فلدسپار، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Hbl: هورنبلند، L: قطعه سنگ، Ol: الیوین، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 3. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the rock units in the Aqjeh Qaleh deposit. A: Plagioclase phenocrysts along with chloritized and opacitized hornblende in a fine-grained matrix of andesitic lavas (Unit E^{an}), B: Alkali feldspar and plagioclase phenocrysts in a quartz-feldspathic fine-grained matrix of rhyodacitic lavas (Unit E^{at1}), C: Rock fragments along with broken quartz crystals in a fine-grained matrix in lithic crystal tuffs (Unit E^{at1}), D: Glomeroporphyritic texture in olivine basalt lavas (Unit E^{ba1}), E: Small tabular and prismatic crystals replaced by calcite, along with rock fragments and vugs filled by calcite in the very fine-grained, dark-colored matrix of lithic crystal tuffs (Unit E^{tsh1}), and F: Clinopyroxene phenocrysts along with plagioclase in a fine-grained matrix of basaltic lavas (Unit E^{ba2}). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Afs: alkali feldspar, Cal: calcite, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende, L: rock fragment, Ol: olivine, Pl: plagioclase, Qz: quartz).

زمینه سنگ به صورت محدود به کانی‌های رسی دگرسان شده است. بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار پلاژیوکلاز (ابعاد تا ۶ میلی‌متر) گاهی دارای منطقه‌بندی بوده و با درجه‌های ضعیفی به سرسیت و کلسیت دگرسان شده‌اند. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز حاوی اذخال‌هایی از کانی‌های دیگر مانند کانی‌های کدر، پیروکسن و آپاتیت هستند. بلورهای کلینوپیروکسن (ابعاد تا ۲/۵ میلی‌متر) اغلب نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و برخی از آنها حاوی اذخال‌هایی از پلاژیوکلاز (بافت افیتیک) هستند. این بلورها با درجه‌های نسبتاً شدید و گاه به صورت کامل توسط کلسیت و اکینولیت جانشین شده‌اند. آلکالی‌فلدسپارها در زمینه سنگ متمرکز بوده و به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. در بخش‌های حاشیه‌ای، علاوه بر بافت پورفیروئیدی، بافت افیتیک نیز در سنگ دیده می‌شود (شکل ۴-D). در بافت پورفیروئیدی، درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در یک زمینه میکروگرانولار متشکل از ریزبلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن جای گرفته‌اند. برخی از بلورهای پیروکسن موجود در زمینه سنگ توسط کلریت و کانی‌های کدر جایگزین شده‌اند. روند کلی ساختارها و گسل‌ها در منطقه آغچه‌قلعه شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شمال‌غربی-جنوب‌شرقی با شیب ۷۰ تا ۸۵ درجه به سمت شمال‌غرب و یا شمال‌شرق است. در این میان، گسل‌های با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی از نظر کانه‌زایی مهم هستند و رگه‌های کانه‌دار منطقه در امتداد آنها تشکیل شده‌اند.

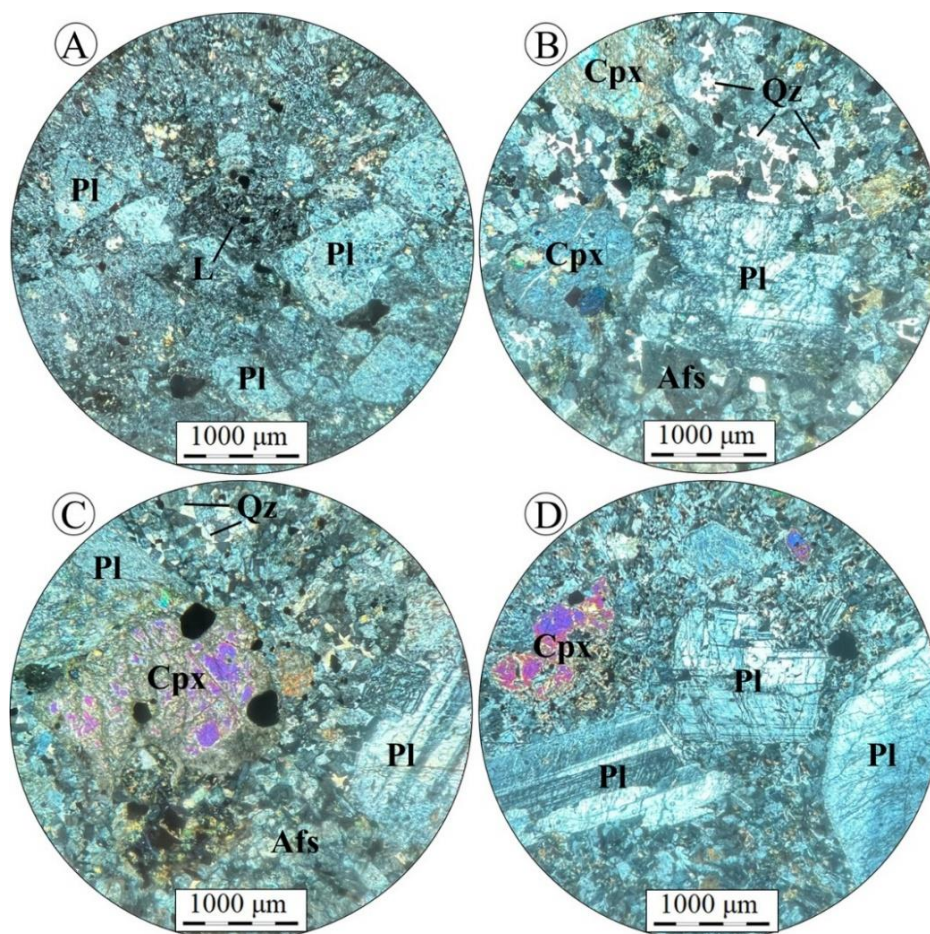
کانه‌زایی

کانه‌زایی در کانسار پلی‌متال آغچه‌قلعه شامل ۵ رگه کوارتز-سولفید است که درون توالی‌های آذرآواری و گدازه‌ای ائوسن منطقه (واحدهای E^{tsh1} , E^{ba1} , E^{ba2} و E^{t2}) رخ داده‌اند. بر اساس بررسی‌های صحرایی و با توجه به نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ کانسار آغچه‌قلعه (شکل ۱)، رگه‌های کانه‌دار دارای امتداد کلی N10-20E با شیب ۷۰ تا ۸۵ درجه به سمت شمال‌غرب هستند. رگه شماره ۱ (QV1) حدود ۱۵۰ متر درازا و

۱/۵ متر پهنا داشته و توسط توالی خاکستر توف‌ها و توف‌های شیلی نازک‌لایه و شیل (واحد E^{tsh1}) میزبان‌شده است (شکل ۵-A). عمده فعالیت‌های اکتشافی بر روی این رگه کانه‌دار متمرکز بوده است. رگه شماره ۲ (QV2)، حدود ۵۰ متر درازا و تا ۰/۷ متر پهنا دارد. این رگه واحدهای E^{t1} (تناوب توف‌های بلورین تا توف‌های سنگی بلورین حدواسط تا بازیگ) و E^{ba1} (گدازه‌های الیوین بازالت تا بازالتی) را قطع کرده است (شکل ۵-B و C). درازای رگه کانه‌دار شماره ۳ (QV3) حدود ۶۰ متر بوده و پهنای آن تا ۰/۵ متر می‌رسد. این رگه توالی خاکستر توف‌ها و توف‌های شیلی نازک‌لایه و شیل (واحد E^{tsh1}) و گدازه‌های بازالتی تا الیوین بازالتی (واحد E^{ba2}) را قطع کرده است (شکل ۵-D). رگه شماره ۴ (QV4) حدود ۸۰ متر درازا و ۰/۶ متر پهنا داشته و واحدهای E^{ba2} (گدازه‌های بازالتی) و E^{t2} (توالی توف‌های بلورین تا توف‌های سنگی بلورین حدواسط تا بازیگ و توف‌های شیلی) را قطع کرده است (شکل ۵-E). رگه کانه‌دار شماره ۵ (QV5)، حدود ۳۰ متر درازا و تا ۲ متر پهنا دارد. امتداد کلی این رگه N15E بوده و شبیهی مشابه با دیگر رگه‌های کانه‌دار منطقه دارد. این رگه نیز توسط گدازه‌های الیوین بازالتی تا بازالتی (واحد E^{ba1}) میزبان‌شده است (شکل ۵-F). به طور معمول، دگرسانی آرژلیک حدواسط رگه‌های کانه‌دار در کانسار آغچه‌قلعه را در بر گرفته است (شکل ۵-A، C و E). پهنای این دگرسانی در کمر بالا و کمر پایین رگه‌ها متغیر و بین ۱ تا ۵ متر قابل اندازه‌گیری است. برشی‌شدن در اغلب رگه‌های کانه‌دار کانسار آغچه‌قلعه رخ داده است. ضخامت بخش‌های برشی از چند میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر متغیر بوده و گاه تمام رگه کانه‌دار دارای ساخت برشی است. به طور معمول، برش‌ها دارای قطعه‌های سنگی فراوان با سیمان گرمابی بوده و از نوع برش‌های گرمابی هستند (برای مثال کوهستانی و همکاران (Kouhestani et al., 2012)). قطعه‌های موجود اغلب جورنشده و زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار بوده و شامل ۲۰ تا ۳۰ درصد قطعه‌های توفی، ۱۰ تا ۲۰ درصد قطعه‌های گدازه‌ای و ۵۰ تا ۷۰ درصد قطعه‌های کانه‌دار هستند. سیمان گرمابی این

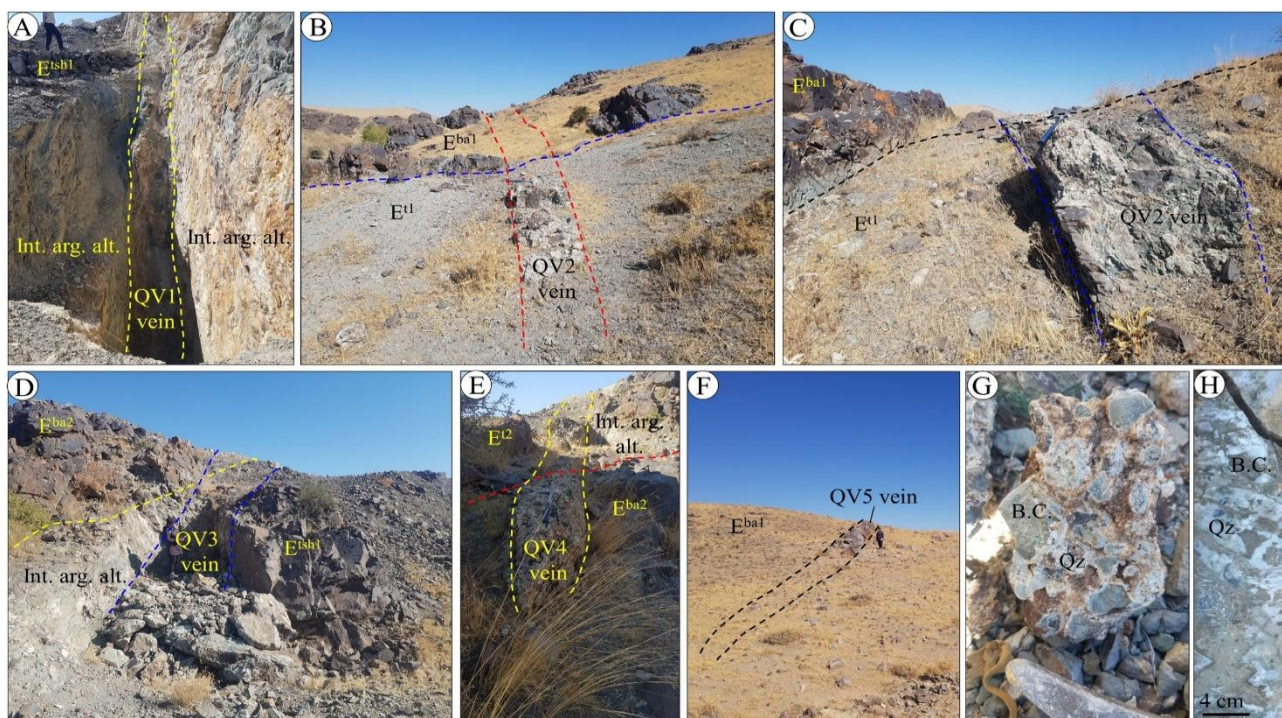
هستند. عیار نمونه‌های برداشت‌شده از این رگه‌ها تا ۴ درصد مجموع سرب و روی، میانگین ۰/۵ درصد مس و تا ۲۵/۹ گرم در تن نقره را نشان می‌دهد (Mehdikhani, 2020).

برش‌ها از نوع کوارتز و سولفید است (شکل ۵-G و H). گالن و اسفالریت همراه با اندکی پیریت و کالکوپیریت، مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی موجود در رگه‌های کانه‌دار کانسار آغجه‌قلعه



شکل ۴: تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت واحدهای سنگی در کانسار آغجه‌قلعه. A: درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز همراه با یک قطعه سنگ در زمینه دانه‌ریز در لایه‌های توفی (واحد E¹²)، B و C: بافت پورفیریوئیدی متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه متشکل از کوارتز و آلکالی فلدسپارهای آرژیلی شده با بافت میکروگرانولار در پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری و D: بافت پورفیریوئیدی متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه میکروگرانولار در گابروها. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Afs: آلکالی فلدسپار، Cpx: کلینوپیروکسن، L: قطعه سنگ، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of mineralogy and texture of the rock units in the Aqjeh Qaleh deposit. A: Plagioclase phenocrysts along with a rock fragment in a fine-grained matrix in tuff layers (Unit E¹²), B and C: Porphyritic texture consisting of plagioclase and clinopyroxene phenocrysts in a matrix of quartz and argillized alkali feldspars with a microgranular texture in pyroxene quartz monzonite porphyry, and D: Porphyritic texture consisting of plagioclase and clinopyroxene phenocrysts in a microgranular matrix of gabbros. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Afs: alkali feldspar, Cpx: clinopyroxene, L: rock fragment, Pl: plagioclase, Qz: quartz).



شکل ۵. تصویرهای صحرایی و نمونه دستی از رگه های کوارتز- سولفیدی کانه دار و ساخت و بافت آنها در کانسار آغجه قلعه. A: نمایی از رگه کانه دار شماره ۱ (QV1) با میزبان واحد E^{tsh1} و ترانشه اکتشافی حفر شده بر روی آن (دید به سمت جنوب غرب). به هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط اطراف رگه توجه شود، B و C: نماهایی از رگه کوارتز- سولفیدی کانه دار شماره ۲ (QV2) که واحدهای E^{t1} و E^{ba1} میزبان خود را قطع کرده است. دید هر دو تصویر به سمت شمال شرق است، D: نمایی از رگه کانه دار شماره ۳ (QV3) و هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط اطراف آن (دید به سمت شمال شرق)، E: نمایی از رگه کوارتز- سولفیدی کانه دار شماره ۴ (QV4) که واحدهای E^{ba2} و E^{t2} میزبان خود را قطع کرده است (دید به سمت شمال شرق). دگرسانی آرژیلیک حدواسط اطراف رگه قابل مشاهده است، F: نمایی از رگه کانه دار شماره ۵ (QV5) که واحد E^{ba1} را قطع کرده است (دید به سمت شمال شرق)، G و H: نماهایی نزدیک از برش های گرمایی با سیمان کوارتز- سولفیدی. علائم اختصاری کانی ها از وینتی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (B.C.: قطعه های برشی، Qz: کوارتز).

Fig. 5. Field and hand specimen photographs of quartz-sulfide ore veins and their structure and texture in the Aqjeh Qaleh deposit. A: View of ore vein 1 (QV1) hosted by E^{tsh1} unit, and the exploration trench dug over it, looking southwest. Note the intermediate argillic alteration halo around the vein, B and C: Views of quartz-sulfide ore vein 2 (QV2) cutting its host E^{t1} and E^{ba1} units. Both views are looking northeast, D: View of ore vein 3 (QV3) and its surrounding intermediate argillic alteration halo, looking to the northeast, E: View of quartz-sulfide ore vein 4 (QV4) that cuts its host E^{ba2} and E^{t2} units, looking to the northeast. Intermediate argillic alteration is evident around the vein, F: View of ore vein 5 (QV5) that cuts unit E^{ba1} , looking northeast, G and H: Close views of hydrothermal breccia with quartz-sulfide cement. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (B.C.: breccia clasts, Qz: quartz).

دگرسانی گرمایی

سه نوع نخست دگرسانی با بخش های کانه دار هم پوشانی دارند. دگرسانی سیلیسی به صورت رگه- رگچه ای و همچنین سیمان کوارتزی بین قطعه های برشی در برش های گرمایی دیده می شود (شکل ۶- A و B). ضخامت رگه- رگچه های کوارتزی بین ۵ تا

بر اساس نتایج بررسی های صحرایی و میکروسکوپی، دگرسانی گرمایی در کانسار آغجه قلعه شامل انواع دگرسانی های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک است که در این میان،

اسمیت‌زونیت، گوتیت، مالاکیت و کوولیت در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. کوارتز، کلسیت و کلریت کانی‌های باطله هستند. انواع بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای (قشرگون)، کاکلی، گل‌کلی، پرمانند، بازماندی، پُرکننده فضای خالی و جانشینی است.

پیریت معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت (بین ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر) بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار و گاه شکل‌دار با بافت دانه‌پراکنده در رگه‌های کانه‌دار و هاله‌های دگرسانی اطراف آنها دیده می‌شود (شکل ۷-۷A). پیریت‌های درشت اغلب از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت دگرسان شده‌اند و گاه بقایایی از آن با بافت بازماندی باقی‌مانده است. در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از پیریت‌های نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار درون کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل ۷-۷B). در برخی دیگر از نمونه‌ها، پیریت با کالکوپیریت و گالن هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-۷C و D). کالکوپیریت معمولاً به صورت بلورهای متوسط تا گاه درشت (بیشینه تا ابعاد حدود ۲ سانتی‌متر) نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده قابل مشاهده است. کالکوپیریت گاهی دارای ادخال‌هایی از پیریت است (شکل ۷-۷B). در بیشتر نمونه‌ها، کالکوپیریت از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت و کوولیت دگرسان شده و تنها بقایایی از آن به صورت بافت‌های بازماندی و یا اسکلتی باقی‌مانده است (شکل ۷-۷C). در برخی از نمونه‌ها، کالکوپیریت با پیریت، گالن و اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-۷B و C و F و G). در برخی دیگر از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از کالکوپیریت درون گالن و اسفالریت (شکل ۷-۷F، G و L) قابل مشاهده است. در یکی از نمونه‌ها، کالکوپیریت با بافت رگچه‌ای نیز در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود (شکل ۷-۷H). گالن بیشتر به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار (تا ابعاد حدود ۳ سانتی‌متر) با رخ‌های مثلی دیده می‌شود. در بیشتر بخش‌های کانه‌دار، گالن از حاشیه‌ها به سروزیت دگرسان شده و تنها بقایایی از آن به صورت بافت بازماندی باقی‌مانده است (شکل ۷-۷I). گالن معمولاً با پیریت،

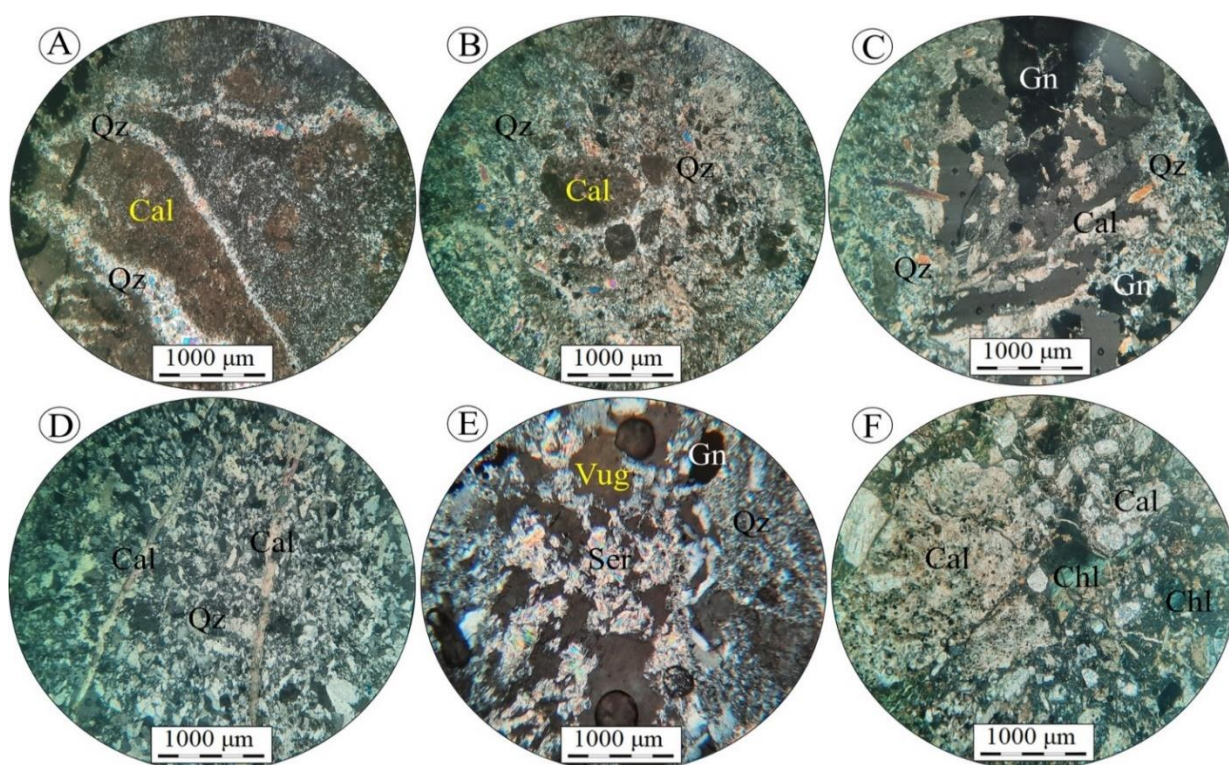
۱۰ سانتی‌متر متغیر است. در مقاطع میکروسکوپی، کوارتز به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با ابعاد ریز تا درشت (بیشینه تا ۲ سانتی‌متر) دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی دو نوع دگرسانی کربناتی در کانسار آغچه‌قلعه قابل تفکیک است. دگرسانی کربناتی نوع اول شامل کلسیت‌هایی است که همراه با کوارتز در بخش‌های کانه‌دار دیده می‌شوند (شکل ۶-۶C). دگرسانی کربناتی نوع دوم شامل رگچه‌های کلسیت تأخیری و کلسیت با بافت پُرکننده فضای خالی است (شکل ۶-۶D). رگچه‌های کلسیتی بخش‌های کانه‌دار را قطع می‌کنند که نشان‌دهنده تشکیل آنها در مراحل پایانی دگرسانی گرمایی است. دگرسانی آرژلیک حدوداً با ضخامت بین ۱ تا ۵ متر در اطراف رگه‌های کوارتز-سولفیدی کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۵-۵A، C و E). بر اساس بررسی‌های صحرایی، دگرسانی آرژلیک حدوداً در کانسار آغچه‌قلعه توسط درز و شکستگی‌ها کنترل شده و در مقیاس رخنمون باعث تغییر رنگ سفید تا زرد سنگ‌ها شده است که می‌تواند در اکتشاف مفید باشد. در مقاطع میکروسکوپی، این دگرسانی شامل بلورهای ریز سربیسیت (و ایلیت) در همراهی با کلریت و مقدار کمی کوارتز و کلسیت است (شکل ۶-۶E). دگرسانی پروپلیتیک در رخنمون‌های صحرایی به رنگ سبز مشاهده شده و معمولاً در خارج از بخش‌های کانه‌زایی رخ داده است. این دگرسانی دارای شدت کم تا متوسط است و بافت کانی‌ها در آن حفظ شده است. دگرسانی پروپلیتیک اغلب با جانشینی کانی‌های اولیه سنگ توسط مجموعه کلریت، کلسیت، اپیدوت و سربیسیت مشخص می‌شود (شکل ۶-۶F).

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

به ترتیب فراوانی، گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت، کانه‌های درون‌زاد در کانسار آغچه‌قلعه هستند. سروزیت،

به رنگ عسلی (احتمالاً فقیر از آهن) دیده شده و معمولاً با گالن و گاهی کالکوپیریت هم‌رشدی دارد (شکل ۷-G و J). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از کالکوپیریت درون اسفالریت دیده می‌شود (شکل ۷-L). در اثر فرایندهای برون‌زاد، اسفالریت از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است (شکل ۷-J و L).

کالکوپیریت و اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۷-D، F، G و J). با این وجود، در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از کالکوپیریت درون گالن دیده می‌شود (شکل ۷-F). به صورت محدود، گالن با بافت رگچه‌ای نیز در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود (شکل ۷-K). اسفالریت با فراوانی کمتر نسبت به گالن در رگه‌های کانه‌دار کانسار آغجه‌قلعه قابل مشاهده است. این کانی بیشتر به صورت بلورهای متوسط تا درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار



شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌ها در کانسار آغجه‌قلعه. A و B: رگه- رگچه‌های کوارتزی (A) و سیمان سیلیسی برش‌های گرمایی (B) در دگرسانی سیلیسی، C: کلسیت در بخش‌های کوارتز- کربناتی کانه‌دار در دگرسانی کربناتی نوع اول، D: رگچه کلسیتی در دگرسانی کربناتی نوع دوم، E: سریسیت همراه با کوارتز در دگرسانی آرژیلیک حدواسط و F: دگرسانی پلاژیوکلاز و پیروکسن به کلسیت و کلریت در دگرسانی پروپلیتیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Gn: گالن، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Vug: فضای خالی).

Fig. 6. Photomicrographs (transmitted cross-polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Aqjeh Qaleh deposit. A and B: Quartz vein-veinlets (A) and hydrothermal breccia cement (B) in silicification, C: Calcite within ore-bearing quartz-carbonate parts in type 1 carbonate alteration, D: Calcite veinlet in type 2 carbonate alteration, E: Sericite along with quartz in intermediate argillic alteration, and F: Alteration of plagioclase and pyroxene to calcite and chlorite in propylitic alteration. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Chl: chlorite, Gn: galena, Qz: quartz, Ser: sericite, Vug: open space).

کوارتز، کلسیت و کلریت، کانی‌های باطله در کانسار آغچه‌قلعه هستند. کوارتز کانی باطله اصلی است که به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار (ابعاد کمتر از ۲۰۰ میکرون تا بیشینه ۱ سانتی‌متر) و یا توده‌ای در رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. در مقاطع میکروسکوپی، کوارتزها اغلب دارای بافت‌های شانه‌ای و پُرکننده فضای خالی هستند (شکل ۸-۸). در برخی از نمونه‌ها، کوارتزها بافت‌های کاکلی، پوسته‌ای، گل‌کلمی و پُرمانند نشان می‌دهند (شکل ۸-۸ تا E). کلسیت معمولاً دارای بافت‌های رگچه‌ای، پُرکننده فضای خالی و جانشینی است (شکل ۶-۶، D و F). در مقاطع میکروسکوپی، کلریت به رنگ قهوه‌ای تا سبز دیده شده و اغلب دارای بافت اسفرولیتی است (شکل ۸-۸). سریست-ایلیت به صورت بلورهای ریز (ابعاد بین ۵ تا ۵۰ میکرون) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده می‌شوند (شکل ۶-۶).

مراحل کانه‌زایی و توالی هم‌یافتی کانی‌ها

با توجه به بررسی‌های صحرایی، بررسی نمونه‌های دستی و مغزه‌های حفاری، بررسی‌های میکروسکوپی و براساس روابط بافتی موجود بین کانی‌ها، مراحل کانه‌زایی در کانسار آغچه‌قلعه به پنج مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی با سیلیسی شدن (کوارتزهای ریزبلور) سنگ‌های میزبان مشخص می‌شود (شکل ۹-۸ تا C و H). پیریت تنها کانی سولفیدی این مرحله است که بیشتر به صورت بلورهای ریز و بی‌شکل سالم با بافت دانه‌پراکنده در متن سیلیسی شده سنگ دیده می‌شود. این مرحله اغلب به عنوان زمینه‌ساز مراحل بعدی کانه‌زایی عمل کرده و بیشتر توسط مراحل بعدی کانی‌سازی قطع و برشی شده است (شکل ۹-۸ تا E و H). مرحله دوم کانه‌زایی شامل رگه-رگچه‌ها و برش‌های گرمابی با سیمان سیلیسی حاوی پیریت (فراوانی ۲ درصد) و کالکوپیریت (فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد) با ضخامت تا ۳۰ سانتی‌متر است. پیریت‌های این مرحله اغلب متوسط تا درشت‌بلور بوده و دارای حفره‌های فراوان هستند. مرحله دوم کانه‌زایی، مرحله اول کانه‌زایی را قطع و برشی کرده (شکل ۹-۸ و C) و خود توسط مرحله سوم

کانه‌زایی قطع شده است (شکل ۹-۸ و B)؛ به طوری که بخش‌هایی از آن به صورت قطعه‌های سنگی در سیمان گرمابی برش‌های مرحله سوم کانه‌زایی قابل مشاهده است (شکل ۹-۸ تا G). کانه‌زایی مرحله سوم با حضور رگه و رگچه‌ها و برش‌های گرمابی با سیمان سیلیسی دارای گالن و اسفالریت به ضخامت تا ۲۵ سانتی‌متر مشخص می‌شود که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۹-۸، B و D) و خود توسط رگه و رگچه‌های کوارتز-کلسیتی مرحله چهارم کانه‌زایی قطع شده‌اند (شکل ۹-۸ تا G). برش‌های گرمابی این مرحله حاوی قطعه‌های سنگی مراحل اول و دوم کانه‌زایی هستند (شکل ۹-۸ تا G). مرحله چهارم کانه‌زایی یک مرحله عقیم (بدون کانه) بعد از کانه‌زایی بوده و به آخرین فعالیت‌های گرمابی در کانسار آغچه‌قلعه مرتبط است. این مرحله با حضور رگه و رگچه‌های کوارتز و کلسیتی مشخص می‌شود که اغلب مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل ۹-۸ تا E و G). ضخامت رگه-رگچه‌های این مرحله معمولاً کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است. هیچ کانی سولفیدی با این مرحله مشاهده نمی‌شود. مرحله پنجم کانه‌زایی مربوط به فرایندهای برون‌زاد بوده و طی آن کانی‌های سروزیت، اسمیت‌زونیت، گوتیت، مالاکیت و کوولیت با بافت‌های پُرکننده فضای خالی، بازماندی و جانشینی تشکیل شده‌اند. توالی هم‌یافتی کانی‌ها در کانسار آغچه‌قلعه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

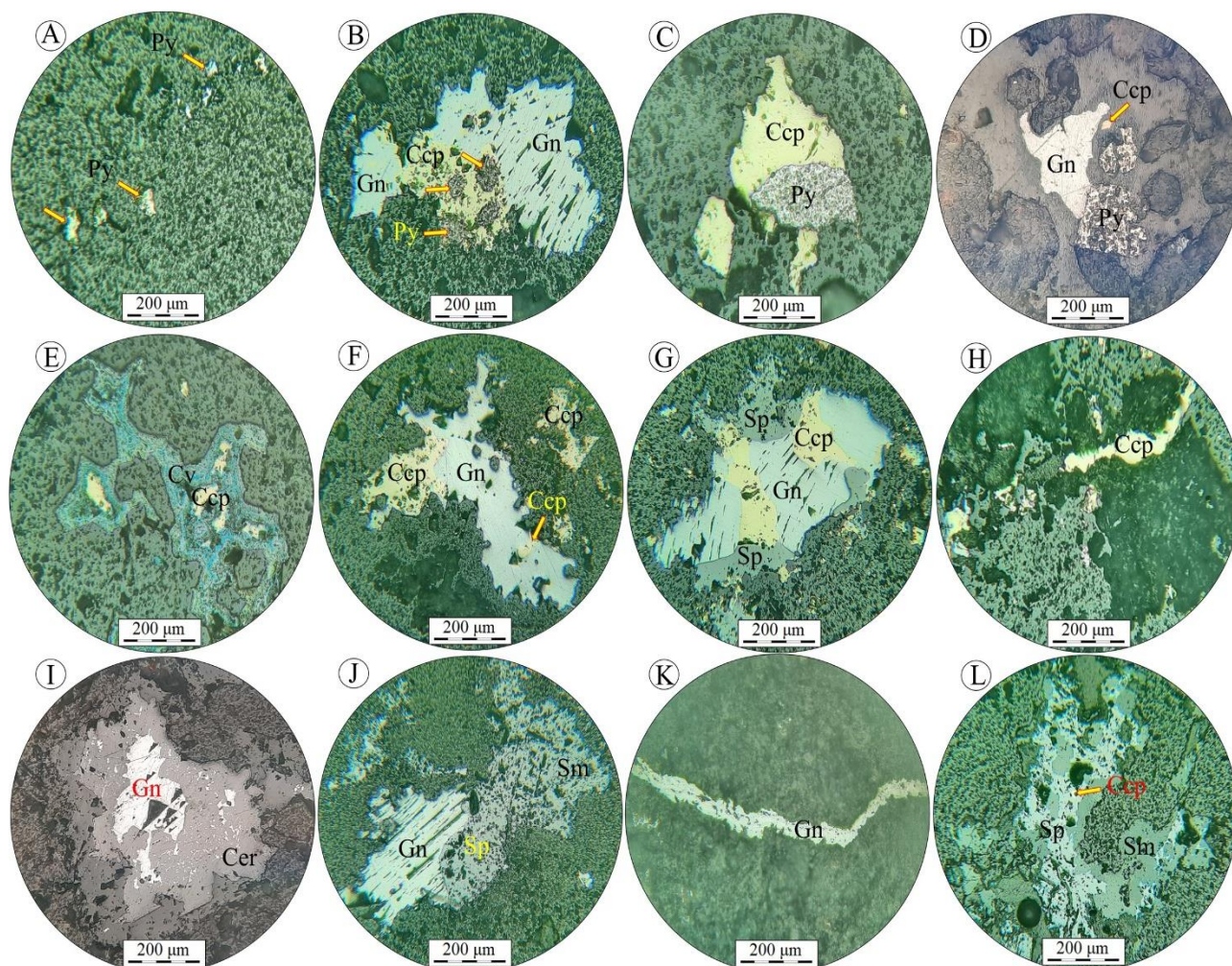
داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های کانسار آغچه‌قلعه در جدول ۱ آورده شده است.

بحث و بررسی

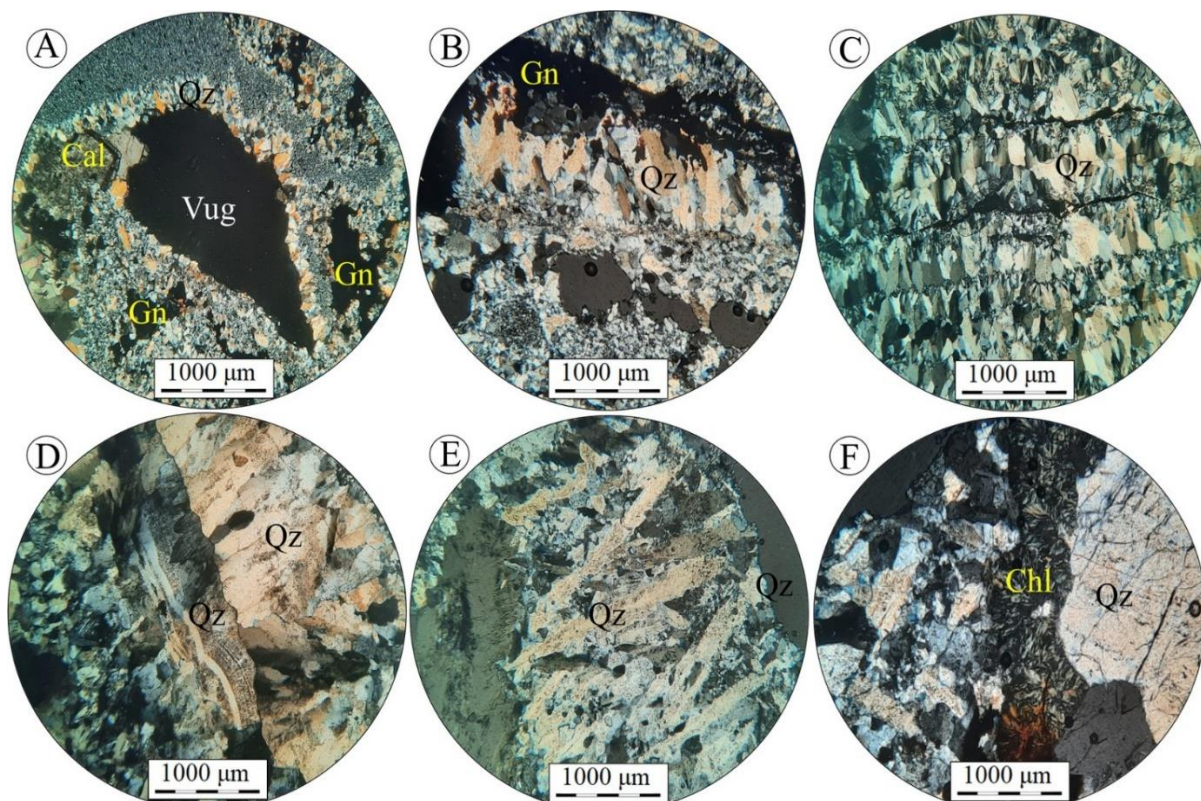
ضرایب همبستگی عناصر

ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز در کانسار آغچه‌قلعه در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی) از کانی‌شناسی و بافت کانسنگ در کانسار آغجه‌قلعه. A: بلورهای ریز و بی‌شکل پیریت با بافت دانه‌پراکنده، B: ادخال‌های پیریت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار درون کالکوپیریت. هم‌رشدی کالکوپیریت و گالن نیز قابل مشاهده است، C: هم‌رشدی پیریت و کالکوپیریت، D: هم‌رشدی پیریت و گالن، E: دگرسانی کالکوپیریت به کوولیت و تشکیل بافت بازماندی، F و G: هم‌رشدی کالکوپیریت با گالن و اسفالریت. ادخال‌های کالکوپیریت در گالن و اسفالریت نیز قابل مشاهده است، H: بافت رگچه‌ای کالکوپیریت، I: دگرسانی گالن به سروزیت و تشکیل بافت بازماندی، L: هم‌رشدی گالن و اسفالریت. دگرسانی اسفالریت به اسمیت‌زونیت نیز دیده می‌شود، K: گالن با بافت رگچه‌ای. و L: دگرسانی اسفالریت به اسمیت‌زونیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Cer: سروزیت، Cv: کوولیت، Gn: گالن، Py: پیریت، Qz: کوآرتز، Sm: اسمیت‌زونیت، Sp: اسفالریت).

Fig. 7. Photomicrographs (reflected light) of the ore mineralogy and texture in the Aqjeh Qaleh deposit. A: Anhedral fine-grained disseminated pyrite crystals, B: Subhedral to euhedral pyrite inclusions within chalcopyrite. Intergrowth of chalcopyrite and galena is also observed, C: Intergrowth of pyrite and chalcopyrite, D: Intergrowth of pyrite and galena, E: Alteration of chalcopyrite to covellite and formation of residual texture, F and G: Intergrowth of chalcopyrite with galena and sphalerite. Chalcopyrite inclusions within galena and sphalerite are also observed, H: Veinlet texture of chalcopyrite, I: Alteration of galena to cerussite and formation of residual texture, J: Intergrowth of galena and sphalerite. Alteration of sphalerite to smithsonite is also observed, K: Veinlet texture of galena, and L: Alteration of sphalerite to smithsonite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: chalcopyrite, Cer: cerussite, Cv: covellite, Gn: galena, Py: pyrite, Qz: quartz, Sm: smithsonite, Sp: sphalerite).

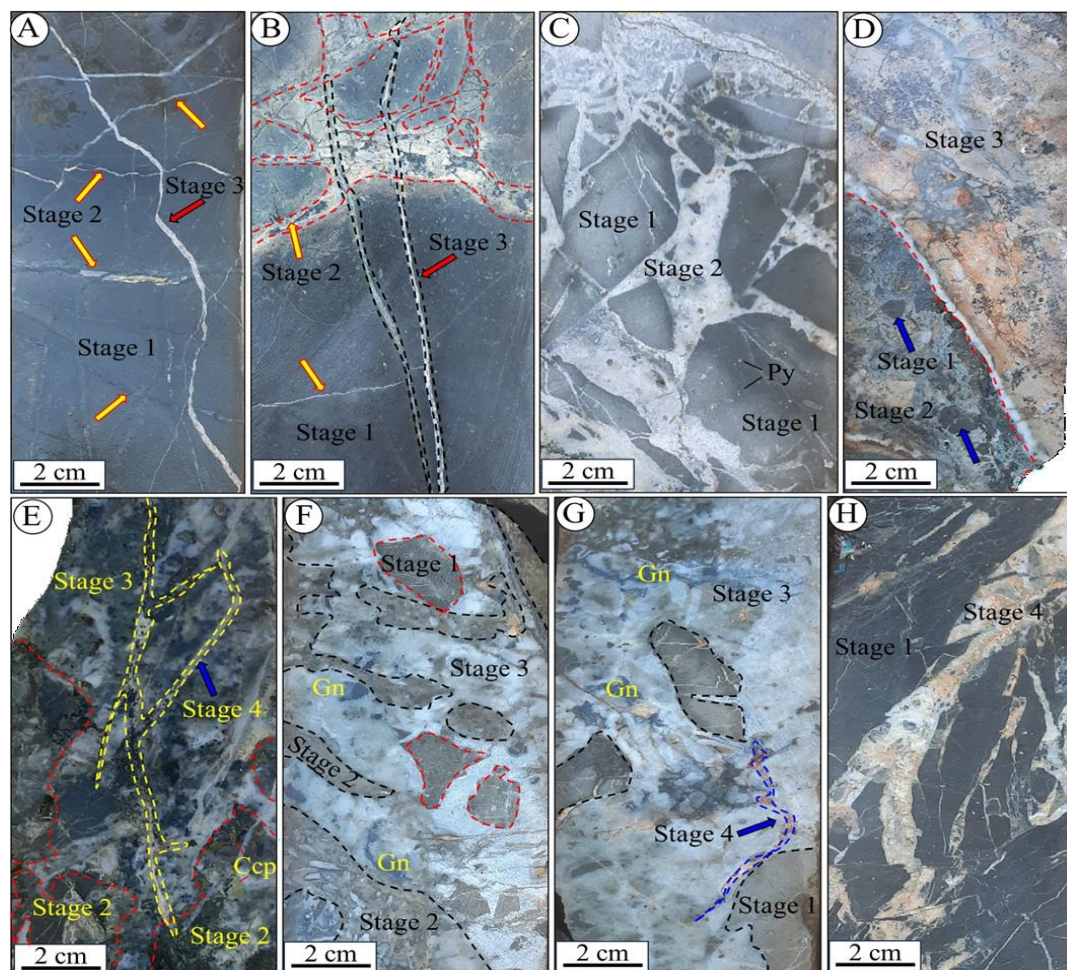


شکل ۸. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌های باطله و بافت آنها در کانسار آغجه‌قلعه. A: کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی، B: بافت کاکالی کوارتز، C: بافت پوسته‌ای (قشرگون) کوارتز، D: بافت‌های گل‌کلمی و پرمانند کوارتز، E: بلورهای درشت کوارتز با بافت پرمانند و F: کلریت با بافت اسفرولیتی در فضاهای خالی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Gn: گالن، Qz: کوارتز، Vug: فضای خالی).

Fig. 8. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of gangue minerals and textures in the Aqjeh Qaleh deposit. A: Quartz with vug infill texture, B: Cockade texture of quartz, C: Crustiform texture of quartz, D: Colloform and plumose textures of quartz, E: Coarse-grained quartz crystals with plumose texture, and F: Chlorite with spherulitic texture within vugs. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Chl: chlorite, Gn: galena, Qz: quartz, Vug: open space).

آرسنیک (۰/۷) و مثبت ضعیف (۰/۲) آن با آنتیموان و همچنین همبستگی مثبت قوی (۰/۸) آرسنیک و آنتیموان می‌تواند نشان‌دهنده همراهی این عناصر در سیالات گرمایی کانه‌ساز باشد. همبستگی مثبت بین نقره و عناصر گوگرد و آرسنیک می‌تواند نشان‌دهنده حضور این عناصر در شبکه کانی‌های سولفوسالتی باشد. همبستگی مثبت متوسط (۰/۶) روی و کادمیم می‌تواند به جایگزینی Cd^{2+} به جای Zn^{2+} در ساختار اسفالریت باشد.

بر این اساس، سرب و روی همبستگی مثبت متوسط (۰/۶) با یکدیگر و همبستگی منفی ضعیف (به ترتیب ۰/۰۱- و ۰/۰۷-) با مس دارند که با تشکیل این عناصر در مراحل مختلف کانه‌زایی مطابقت دارد. سرب همچنین دارای همبستگی مثبت متوسط (۰/۶) با نقره است که احتمالاً به حضور نقره در شبکه گالن دلالت دارد. همبستگی متوسط (۰/۴) نقره و گوگرد نیز احتمالاً بیانگر حضور نقره در شبکه کانی گالن است. همبستگی مثبت قوی نقره با



شکل ۹. تصویرهای نمونه دستی از مراحل کانه‌زایی در کانسار آغجه‌قلعه. A و B: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان که توسط رگچه‌های مرحله دوم (فلش‌های زرد) قطع شده است. در هر دو تصویر، رگچه‌های مرحله دوم خود توسط رگچه‌های مرحله سوم (فلش‌های قرمز) قطع شده‌اند، C: قطعه‌های برشی مرحله اول کانه‌زایی (بخش‌های تیره) در سیمان سیلیسی-سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی. بلورهای ریز پیریت در قطعه‌های مرحله اول کانه‌زایی قابل مشاهده است، D: قطع شدن مرحله دوم کانه‌زایی توسط مرحله سوم کانه‌زایی. قطعه‌های برشی مرحله اول کانه‌زایی (فلش‌های آبی) در سیمان سیلیسی-سولفیدی مرحله دوم کانه‌زایی قابل مشاهده است، E تا G: قطعه‌های برشی مرحله‌های اول و دوم کانه‌زایی در سیمان سیلیسی-سولفیدی مرحله سوم کانه‌زایی. در تصویرهای E و G، رگچه‌های کوارتز-کلسیتی مرحله چهارم کانه‌زایی (فلش‌های آبی) که مرحله سوم کانه‌زایی را قطع کرده‌اند نیز قابل مشاهده است و H: رگچه‌های کوارتز-کلسیتی مرحله چهارم کانه‌زایی که مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Py: پیریت).

Fig. 9. Hand specimen photographs of mineralization stages in the Aqjeh Qaleh deposit. A and B: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock crosscut by stage 2 veinlets (yellow arrows). In both photos, stage 2 veinlets are, in turn, cut by stage 3 veinlets (red arrows), C: Stage 1 breccia clasts (dark parts) in quartz-sulfide cement of stage 2 mineralization. Fine-grained pyrite crystals are visible in stage 1 clasts, D: Stage 2 mineralization that cut by stage 3 mineralization. Stage 1 breccia clasts (blue arrows) are visible in quartz-sulfide cement of the stage 2 mineralization, E–G: Clasts of stages 1 and 2 mineralization in quartz-sulfide cement of stage 3 mineralization. In E and G photos, quartz-calcite veinlets of stage 4 mineralization (blue arrows) cutting the stage 3 mineralization, are also visible, and H: Quartz-calcite veinlets of stage 4 mineralization that cut the stage 3 mineralization. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Py: pyrite).

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Supergene
Pyrite					
Chalcopyrite					
Galena					
Sphalerite					
Cerussite					
Smithsonite					
Goethite					
Malachite					
Covellite					
Quartz					
Calcite					
Chlorite					
Sericite-Illite					
Disseminated					
Vein-Veinlets					
Brecciated					
Colloform					
Crustiform					
Cockade					
Plumose					
Vug Infill					
Relict					
Replacement					

شکل ۱۰. مراحل کانی‌سازی و توالی هم‌یافتی کانه‌ها و کانی‌های باطله در کانسار آغجه‌قلعه

Fig. 10. Mineralization stages and paragenetic sequence of ore and gangue minerals at the Aqjeh Qaleh deposit

الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در سنگ‌های میزبان و بخش‌های کانه‌دار

الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های برداشت شده از رگه‌های کانه‌دار، توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری، توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی سالم و بدون دگرسانی در شکل ۱۱-A نشان داده شده است. بر اساس این شکل، الگوی عناصر کمیاب در نمونه‌های کانه‌دار مشابه است که می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل آنها در ارتباط با یک فرایند کانه‌زایی باشد. علاوه بر آن، الگوی عناصر کمیاب در توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری و سنگ‌های میزبان (توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی) شبیه به الگوی این عناصر در نمونه‌های کانه‌دار است. این امر بیانگر نقش توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری و سنگ‌های میزبان در کانه‌سازی و احتمالاً تأمین عناصر کانه‌ساز است (Yilmaz et al., 2007; Yilmaz et al., 2010; Kouhestani et al., 2012). نمونه‌های بازالتی، الگوی با شباهت کمتری را نسبت به نمونه‌های کانه‌دار نشان می‌دهند که

بیانگر نقش کمتر آنها در کانه‌زایی است. در الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995)، نمونه‌های کانه‌دار الگوی تقریباً مشابهی با توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری و سنگ‌های میزبان نشان می‌دهند (شکل ۱۱-B) که این امر نیز می‌تواند بیانگر نقش توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری و سنگ‌های میزبان در تشکیل رگه‌های کانه‌دار باشد. نمونه‌های کانه‌دار دارای الگوی عناصر کمیاب خاکی با نسبت متوسط تا بالای عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین و الگوی تقریباً مسطح در عناصر کمیاب خاکی سنگین هستند. غنی‌شدگی نسبی عناصر کمیاب خاکی سبک در رگه‌های کانه‌دار می‌تواند در ارتباط با قابلیت تحرک این عناصر در مقایسه با عناصر کمیاب خاکی سنگین باشد که به غنی‌شدگی بیشتر آنها در رگه‌های کانه‌دار منجر شده است (Rolland et al., 2003). در مجموع، نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با توده پیروکسن کوارتزومونزونیت پورفیری و توف‌های بلورین حدواسط دارای تمرکز پایین‌تری از عناصر کمیاب خاکی هستند.

جدول ۱. داده‌های تجزیه ICP-MS (گرم در تن) نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار آغجه‌قلعه

Table 1. ICP-MS (ppm) data of ore and host rock samples from the Aqjeh Qaleh deposit

	Ag	As	Ba	Cd	Ce	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Gd	Hf	K
D.L.	0.1	0.5	1	0.1	0.5	0.5	1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.5	100
AQ-2	<0.1	18.5	686	0.3	42	3	70	3.7	2.4	1.11	3.5	0.9	31734
AQ-3	0.4	37.6	123	0.4	41	1	5	4.3	2.6	0.98	3.8	1.7	3100
AQ-4	<0.1	32.7	482.4	0.3	19.4	2.3	148.7	4.8	1.2	0.1	3.3	1.6	9395
AQ-31	16.1	37.8	216	7.1	9	3.2	11829	1.4	1	0.3	1.3	<0.5	4776
AQ-32	15.9	26.5	134	2.7	9	2.5	6112	1.4	1	0.3	1.3	<0.5	3734
AQ-33	11.3	18.3	87	100.5	19	5.5	7597	3.6	2.2	1.1	3.1	<0.5	7860
AQ-34	68.6	>100	369	18	21	3.3	3280	2.9	1.8	0.8	2.5	<0.5	4696
AQ-35	11.4	19.2	114	129.1	20	11.2	331	3	1.8	0.	2.5	<0.5	13640
AQ-36	12.4	27.4	77	77.2	15	3.2	944	2	1.3	0.5	1.8	<0.5	3409
AQ-37	6.4	16.3	207	22.2	5	3.3	430	1.5	1	0.3	1.3	<0.5	7840
AQ-38	2.5	25.1	132	2.2	15	3.8	6535	1.8	1.5	0.3	1.4	1.4	10561
AQ-39	13.8	39.8	162	11.6	8	3.5	263	1.3	0.5	<0.1	1.4	<0.5	6180
AQ-40	25.9	>100	58	7.9	15	3.7	5823	2.2	0.8	0.2	2	<0.5	5904
	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sm
D.L.	1	0.1	0.5	1	0.5	1	10	1	0.05	1	50	0.5	0.1
AQ-2	25	0.3	1.4	13.4	16.6	7	1467	106	7.2	111	149	3.7	3.2
AQ-3	26	0.3	1.1	12.1	17.1	10	940	39	6.9	18	205	10.8	3.3
AQ-4	14.9	0.2	0.9	2.2	<0.5	6.6	1003	28.1	<0.05	28.1	231.9	2	<0.1
AQ-31	5	0.1	2.8	2.3	1	8	277	10993	3.3	35	5431	13.8	0.2
AQ-32	5	0.1	4	2.2	0.6	13	216	15162	3.3	33	2593	10.5	0.1
AQ-33	11	0.3	1.6	3.3	8.4	3	317	20816	4.9	57	10608	17.7	2
AQ-34	13	0.2	12.1	2.1	6.4	7	97	>30000	4.5	33	6399	23.3	1.5
AQ-35	10	0.2	<0.5	3.4	5.4	<1	353	>30000	4.1	77	>30000	35.8	1.4
AQ-36	6	0.1	23.6	2.1	1.8	1	115	>30000	3.5	32	4051	12	0.6
AQ-37	2	0.1	6.1	2.5	<0.5	2	195	8393	2.9	42	832	31.2	<0.1
AQ-38	5	0.2	51.3	6.7	<0.5	4	291	10453	3.2	47	1176	39.4	0.2
AQ-39	3	<0.1	0.9	<1	6.8	4	201	>30000	1.3	36	5244	44.2	1.3
AQ-40	8	0.1	4.9	<1	9.5	7	341	>30000	1.9	41	2849	89.5	1.9
	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	Y	Yb	Zn	Zr
D.L.	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.1	0.1	0.1	0.5	0.05	1	5
AQ-2	406.4	<0.1	0.7	<0.5	9.1	4347	0.4	0.4	2	17.7	1.6	314	35
AQ-3	307.7	0.1	0.8	<0.5	6.6	5387	<0.1	0.4	1.7	19.7	1.8	181	62
AQ-4	540.8	0.7	0.3	<0.5	0.8	8172	0.2	0.2	0.5	18.6	1.9	179	
AQ-31	30.8	<0.1	0.3	<0.5	2.2	1236	0.3	0.2	0.8	5	0.3	21933	8
AQ-32	19.6	<0.1	0.3	<0.5	2	1043	0.3	0.2	0.8	4.6	0.2	5976	8
AQ-33	24.6	<0.1	0.7	<0.5	2.3	1592	0.6	0.3	0.6	17.1	1.3	>30000	12
AQ-34	308.1	<0.1	0.5	<0.5	2	283	0.3	0.3	0.6	14.7	0.8	>30000	6
AQ-35	41.2	<0.1	0.5	<0.5	2.2	2107	1	0.3	0.2	14.3	1	>30000	18
AQ-36	122.2	<0.1	0.4	<0.5	1.9	477	0.3	0.2	0.6	7.3	0.5	>30000	5
AQ-37	29.4	<0.1	0.3	<0.5	2	1471	0.3	0.2	1	5.3	0.3	>30000	8
AQ-38	30.8	<0.1	0.3	<0.5	3.6	4492	0.3	0.3	2.1	7.1	0.91	2793	73
AQ-39	108.2	<0.1	0.2	<0.5	1.2	1347	0.4	<0.1	0.4	3.2	0.33	>30000	<5
AQ-40	170.3	<0.1	0.3	<0.5	1.7	2140	0.5	0.1	1.2	6.9	0.6	8425	10

D.L.: detection limits; AQ-2: Pyroxene quartz monzonite porphyry body, AQ-3: intermediate crystal tuff, AQ-4: basaltic lava, AQ-31 and AQ-32: stage 2 quartz-chalcopryrite-pyrite veins, AQ-33, AQ-34, AQ-35, AQ-36, AQ-39, and AQ-40: stage 3 quartz-galena-sphalerite veins, AQ-37: supergene ore, AQ-38: stage 1 silicified tuff

جدول ۲. ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه شده بر اساس جدول ۱) برای نمونه‌های کانسنگ در کانسار آغجه‌قلعه

Table 2. Elemental correlation coefficient (calculated based on Table 1) for ore samples at the Aqjeh Qaleh deposit

	Ag	As	Cd	Cu	Pb	S	Sb	Zn
Ag	1							
As	0.7	1						
Cd	-0.04	-0.3	1.0					
Cu	0.2	0.2	-0.1	1				
Pb	0.6	0.4	0.5	-0.01	1			
S	0.4	-0.03	0.7	0.5	0.5	1		
Sb	0.2	0.8	-0.1	0.1	0.5	-0.02	1	
Zn	0.4	-0.2	0.6	-0.1	0.6	0.7	0.02	1

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در پهنه‌های کانه‌دار

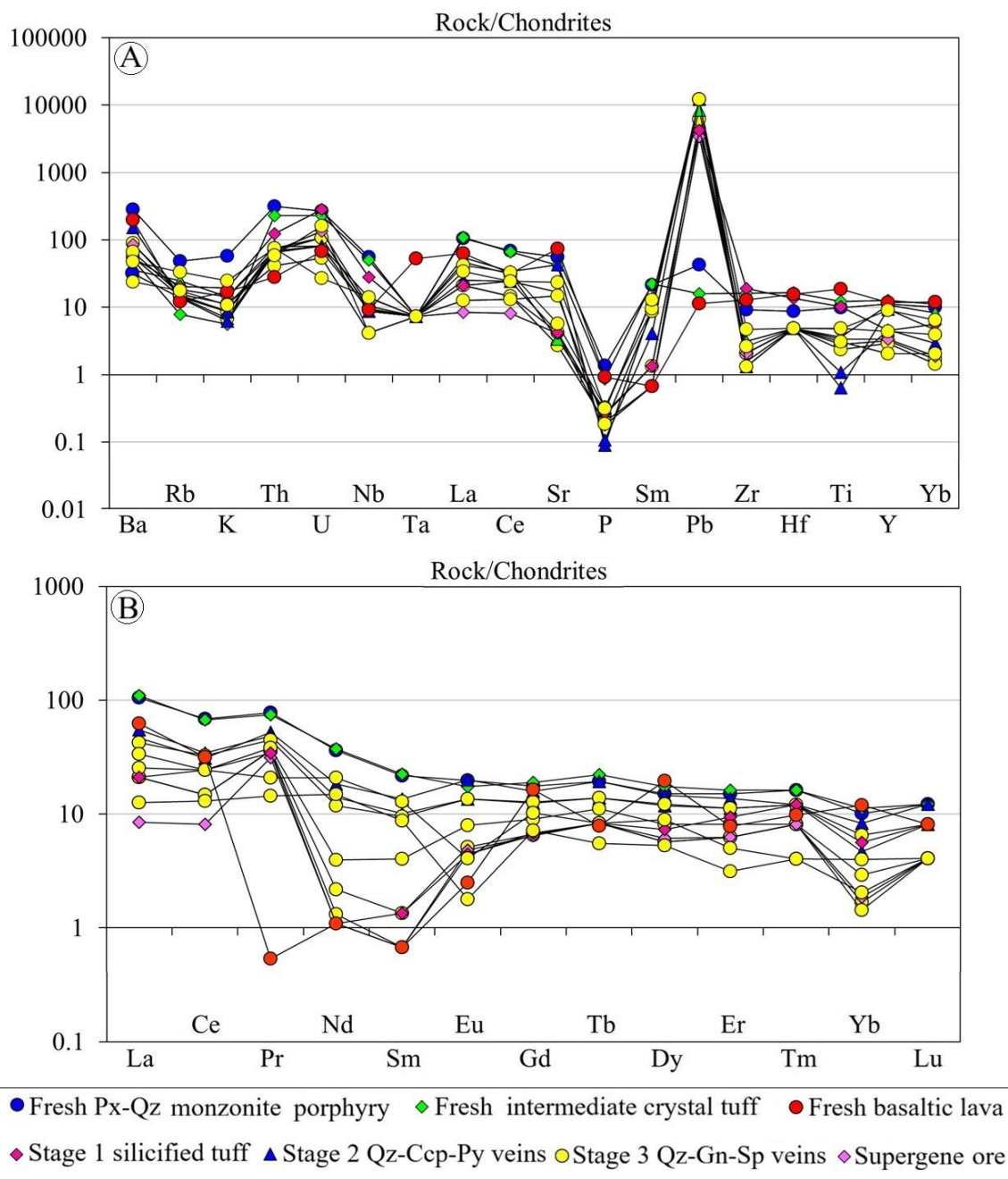
برای بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عنصری مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی در کانسار آغجه‌قلعه، مقادیر عناصر در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به توده پیروکسن کوارتزومونزیت پورفیری، توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی بدون دگرسانی بهنجار شد. این روش کیفی بوده و برای تعیین میزان کمی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این پژوهش انجام نشده است. نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با توده پیروکسن کوارتزومونزیت پورفیری بدون دگرسانی از عناصر Nb, Zr, Hf, U, Ba, Th, Rb, Sr و تهی و از عناصر کانه‌ساز Pb, Zn, Sb, Cu, Ag و S غنی شده‌اند (شکل ۱۲-۱۲). برخی از نمونه‌های کانه‌دار (توف سیلیسی شده مرحله اول کانه‌زایی و رگه‌های مس‌دار مرحله دوم کانه‌زایی) از عناصری مانند Nb, Zr, Hf, U, Ba, Sr و غنی و از عنصر Sb تهی شده‌اند. نمونه‌های کانه‌دار نسبت به توده پیروکسن کوارتزومونزیت پورفیری بدون دگرسانی از عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل ۱۲-۱۲).

در مقایسه با توف‌های بلورین حدواسط بدون دگرسانی، نمونه‌های کانه‌دار از عناصر Nb, Zr, Hf, U, Th, Sr و تهی و از عنصر Rb عناصر کانه‌ساز (S, Pb, Zn, Cu, Ag) غنی شده‌اند (شکل ۱۳-۱۳). برخی از نمونه‌های کانه‌دار از عنصر Ba تهی شده‌اند. غنی‌شدگی از عنصر Rb می‌تواند در ارتباط با شسته‌شدن این عناصر طی دگرسانی از سنگ‌های میزبان باشد. همانند توده پیروکسن

کوارتزومونزیت پورفیری، نمونه‌های کانه‌دار نسبت به توف‌های بلورین حدواسط بدون دگرسانی در همه عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۳-۱۳). نمونه‌های کانه‌دار نسبت به گدازه‌های بازالتی بدون دگرسانی از عناصر Sr, Ba, Ta, Zr, Hf و از عناصر Nb, U, Th, Rb و عناصر کانه‌سازی مانند Sb, Zn, Pb, Cu, Ag و S غنی شده‌اند (شکل ۱۴-۱۴). برخی از نمونه‌های کانه‌دار از عناصر U و Nb تهی شده‌اند. نمونه‌های کانه‌دار نسبت به گدازه‌های بازالتی بدون دگرسانی از عناصر کمیاب خاکی Er, Tb, Eu, Sm, Nd, Pr و Tm غنی و از سایر عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل ۱۴-۱۴). برخی از نمونه‌های کانه‌دار در عناصر Er, Tb و Tm تهی و از عناصر Ce و Lu غنی شده‌اند.

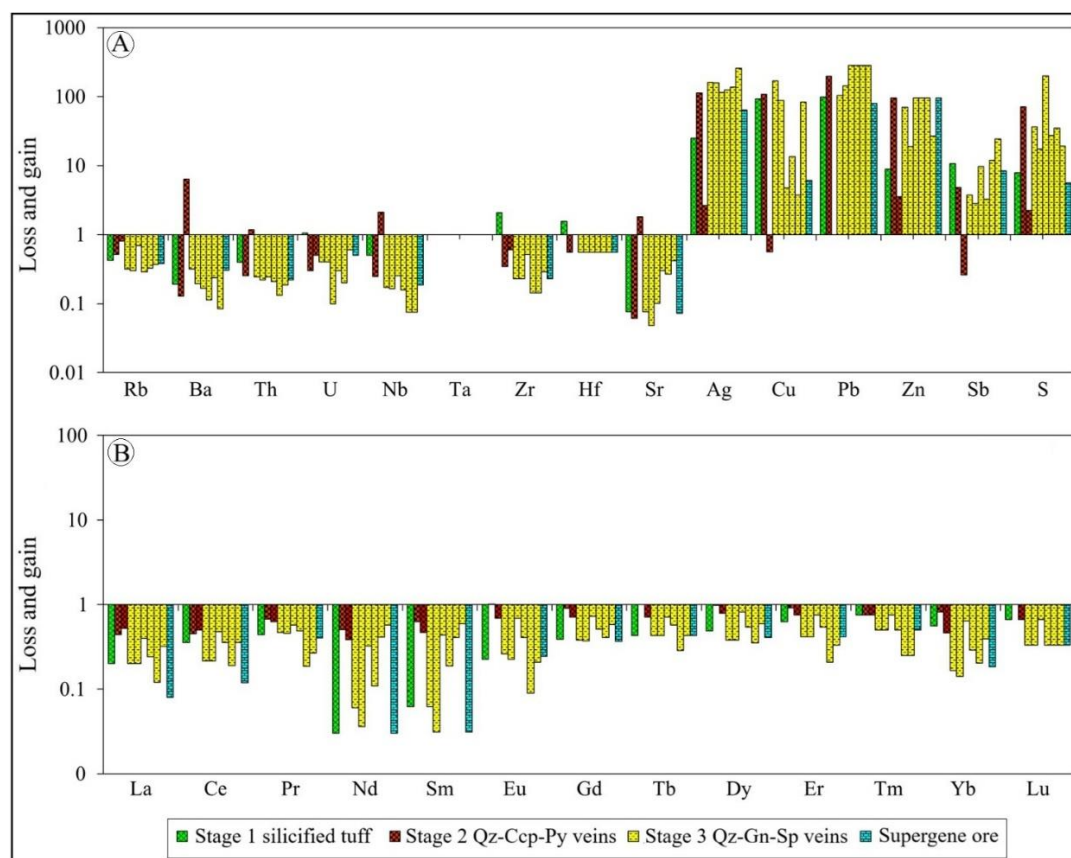
نوع کانه‌زایی و الگوی تشکیل

بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی، کانسار آغجه‌قلعه در دسته کانسارهای اپی‌ترمال طبقه‌بندی می‌شود. کانسارهای اپی‌ترمال بر اساس ویژگی‌های کانه‌زایی، انواع دگرسانی و ترکیب کانی‌شناسی به سه دسته سولفیداسیون بالا، سولفیداسیون پایین و سولفیداسیون حدواسط تفکیک شده‌اند (White and Hedenquist, 1990; Cooke and Simmons, 2000; Hedenquist et al., 2000; John, 2001; Einaudi et al., 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005; Andreeva et al., 2013; Saunders et al., 2014; Wang et al., 2019).



شکل ۱۱. A: الگوی عناصر کمیاب بهنجارشده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار، توده پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری، توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی در کانسار آغجه‌قلعه و B: الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجارشده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار، توده پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری، توف‌های بلورین حدواسط و گدازه‌های بازالتی در کانسار آغجه‌قلعه. در هر دو نمودار، بهنجارسازی داده‌ها بر اساس مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995) انجام شده است.

Fig. 11. Chondrite-normalized rare element diagram for ore samples, pyroxene quartz monzonite porphyry, intermediate crystal tuffs, and basaltic lavas in the Aqjeh Qaleh deposit, and B: Chondrite-normalized rare earth element diagram for ore samples, pyroxene quartz monzonite porphyry, intermediate crystal tuffs, and basaltic lavas in the Aqjeh Qaleh deposit. In both diagrams, normalization data are from McDonough and Sun (1995).



شکل ۱۲. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری (شماره AQ-2، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری (شماره AQ-2، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 12. A: Loss and gain histogram of rare elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against pyroxene quartz monzonite porphyry sample (AQ-2, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against pyroxene quartz monzonite porphyry sample (AQ-2, Table 1).

هستند که با کانی‌های باطله کوارتز، کلسیت و کلریت همراهی می‌شوند و ۴- ساخت و بافت‌های موجود در کانسارهای اپی‌ترمال مانند دانه پراکنده، رگه-رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای (قشرگون)، کاکلی، گل‌کلمی، پرماند و پُرکننده فضای خالی به خوبی در کانسار آغجه‌قلعه گسترش دارند. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال (جدول ۳) نشان می‌دهد این مجموعه کانی‌شناسی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون حدواسط داشته و از این نظر قابل مقایسه با دیگر

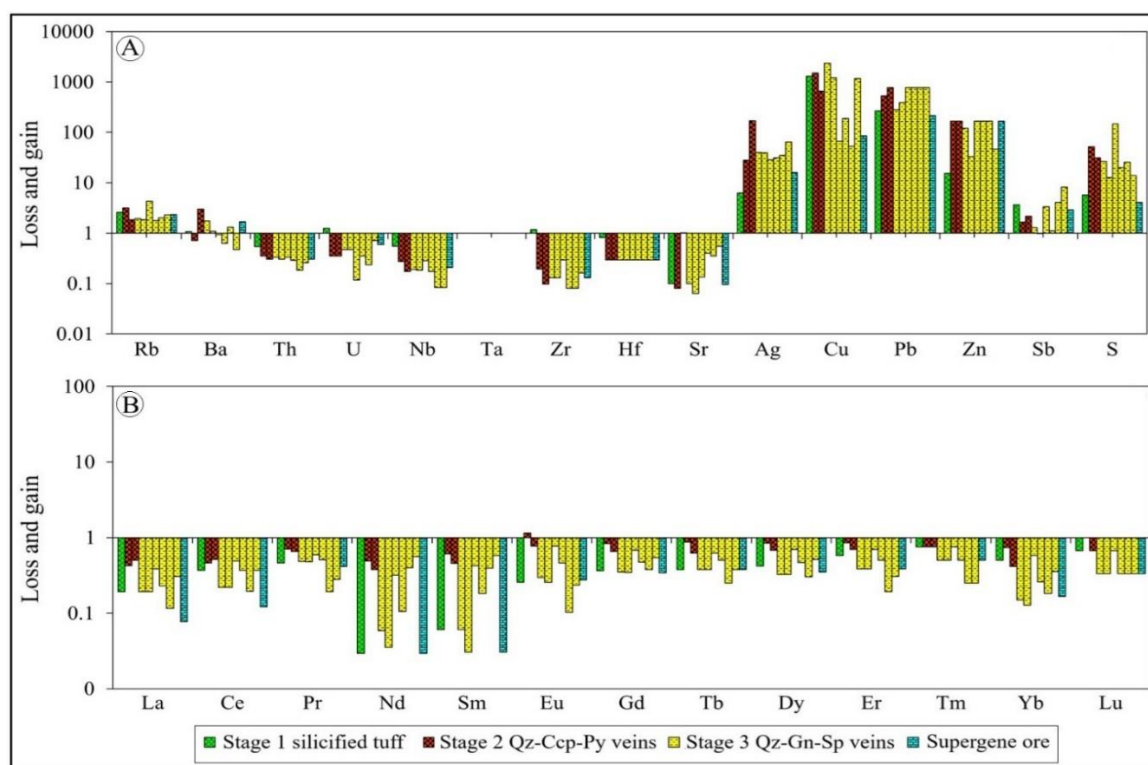
نتایج بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی در کانسار آغجه‌قلعه نشان می‌دهد:

۱- کانه‌زایی فلزهای پایه در کانسار آغجه‌قلعه به صورت رگه‌های سیلیسی-سولفیدی درون ساختارهای گسلی رخ داده و دارای سنگ میزبان آذرآواری و گدازه‌ای ائوسن است. ۲- دگرسانی‌های گرمابی در کانسار آغجه‌قلعه شامل کانی‌های دگرسانی دما پایین تا متوسط مانند کلسیت، کلریت و سریسیت-ایلیت است. ۳- کانه‌های معدنی در کانسار آغجه‌قلعه شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت

(شکل ۱۵). مرحله نخست مربوط به تشکیل توالی‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن در کمربند فلززایی طارم-هشتجین است (شکل ۱۵-A). در مرحله دوم، هم‌زمان با فاز کوه‌زایی پیرنه در ائوسن پایانی، واحدهای سنگی ائوسن چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آنها تشکیل شده است (شکل ۱۵-B). بر اساس بررسی‌های پیشین (Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2018; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Kouhestani et al., 2022a; Kouhestani et al., 2022b)، این مرحله در کمربند فلززایی طارم-هشتجین معمولاً با نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی کم‌عمق ائوسن پایانی به درون واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن همراه است.

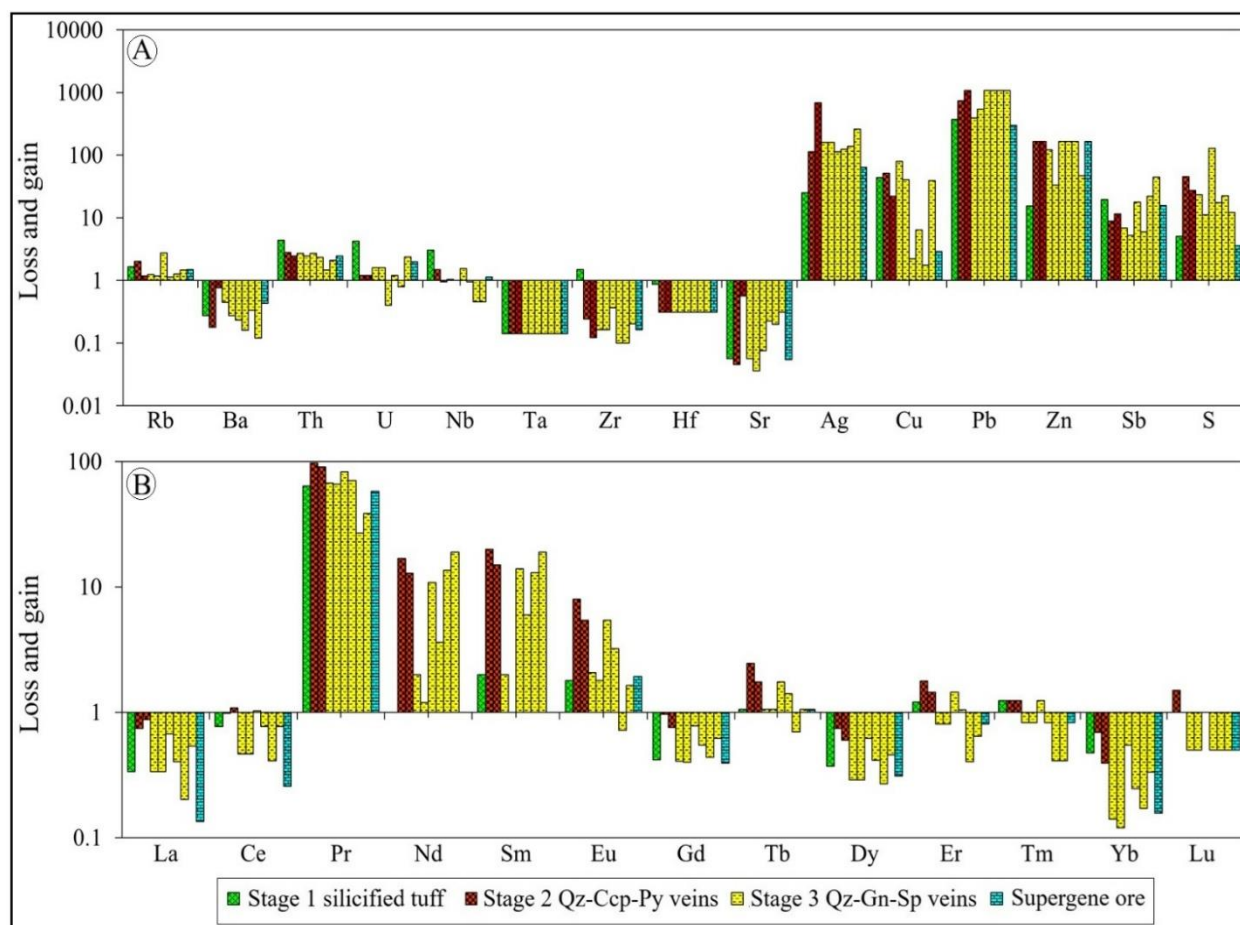
کانسارهای اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بها نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند فلززایی طارم-هشتجین (Mehrabi et al., 2016; Feizi et al., 2017; Kouhestani et al., 2017; Kouhestani et al., 2018; Mikaeili et al., 2018; Shahbazi et al., 2019; Zamanian et al., 2019; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Kouhestani et al., 2022a; Kouhestani et al., 2022b; Ghasemi Siani et al., 2022; Ghorbani et al., 2022; Tarvirdizadeh et al., 2025) است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری و روابط هم‌یافتی کانی‌ها، مراحل تکوین و تکامل کانسار آغجه‌قلعه به صورت یک توالی سه مرحله‌ای است



شکل ۱۳. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه توف بلورین حدواسط (شماره AQ-3، جدول ۱) به‌نچار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه توف بلورین حدواسط (شماره AQ-3، جدول ۱) به‌نچار شده‌اند.

Fig. 13. A: Loss and gain histogram of rare elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against intermediate crystal tuff sample (AQ-3, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against intermediate crystal tuff sample (AQ-3, Table 1).



شکل ۱۴. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه گدازه بازالتی (شماره AQ-4، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار در کانسار آغجه‌قلعه که نسبت به نمونه گدازه بازالتی (شماره AQ-4، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

Fig. 14. A: Loss and gain histogram of rare elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against basaltic lava sample (AQ-4, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements of ore samples in the Aqjeh Qaleh deposit normalized against basaltic lava sample (AQ-4, Table 1).

دارد (Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2018; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Kouhestani et al., 2022a; Kouhestani et al., 2022b). بر همین مبنا، توده گابرو تا پیروکسن کوارتزموزنویت پورفیری اتوسن پایانی در منطقه آغجه‌قلعه را می‌توان عامل کانه‌زایی در نظر گرفت. مرحله سوم با بالا آمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه به دست آمده است (شکل ۱۵-C).

این توده‌ها بیشتر به عنوان موتور حرارتی بوده و سبب چرخش آب‌های جوی از طریق شکستگی‌های موجود در سنگ‌های منطقه می‌شوند.

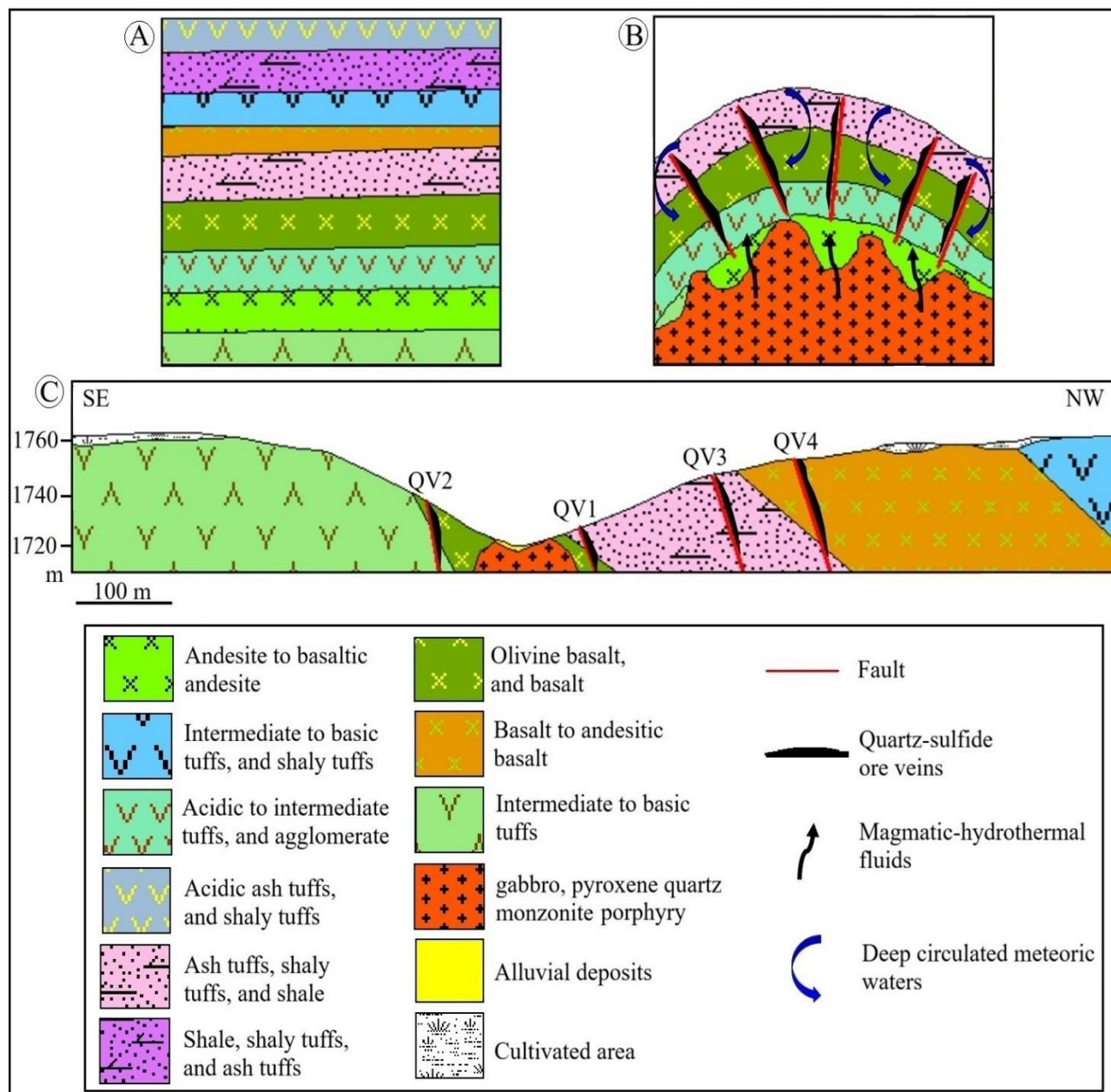
این فرایند سبب شسته‌شدن عناصر فلزی از سنگ‌های مسیر، گسترش پهنه‌های دگرسانی گرمایی و تشکیل رگه‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بها می‌شوند (شکل ۱۵-B). احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از توده‌های گرانیتوئیدی منشأ گرفته باشند نیز وجود

جدول ۳. مقایسه ویژگی های اصلی کانسار آغجه قلعه با انواع مختلف کانسارهای اپی ترمال

Table 3. Comparison of main characteristics of the Aqjeh Qaleh deposit with different types of epithermal deposits

	Aqjeh Qaleh	Epithermal deposits		
		Low-sulfidation	Intermediate-sulfidation	High-sulfidation
Host rock	Volcanic-volcaniclastic units	Basalt-rhyolite	Andesite-rhyodacite	
Ore controls	Faults and fractures	Extensional to strike-slip faults		Arc parallel faults, diatreme, hydrothermal breccias
Key ore minerals	Py, Ccp, Gn, Fe-poor Sp	Sp, Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Apy, Prg, Acn	Fe-poor Sp, Gn, Tnt-Ttr, Ccp, Stb	Eng, Lzn, Fmt, Cv, Dg
Gangue minerals	Qz, Cal, Chl	Qz, Adl, non-Mn bladed Cal, Brt, Clt, Fl	Qz, Mn Cal, Brt	Qz, Alu, Anh, Brt
Hydrothermal alteration	Silicification, intermediate argillic, carbonatization, propylitic	Argillic, silicification, carbonatization	Sericitization, intermediate argillic, silicification, propylitic	Sericitization, advanced argillic, silicification, propylitic
Ore textures	Vein-veinlet, brecciated, cockade, crustiform, plumose, colloform, vug infill	Vein-veinlet, comb, bladed, replacement, colloform, crustiform brecciated	Vein-veinlet, comb, crustiform, vug infill, cockade	Vuggy Qz, vein-veinlet, cockade, vug infill, brecciated, comb, replacement
Metal associations	Pb, Zn, Cu (Ag, As, Sb)	Au, Ag (Zn, Pb, Cu, Mo, As, Sb, Hg)	Au, Ag, Pb, Zn, Cu (Mo, As, Sb)	Au, Ag, Cu, As, Sb (Zn, Pb, Bi, W, Mo, Sn, Hg)
References	Eyvazi (2026), This study	White and Hedenquist (1990); Cooke and Simmons (2000); Hedenquist et al. (2000); Albinson et al. (2001); Sillitoe and Hedenquist (2005); Simmons et al. (2005); Andreeva et al. (2013); Saunders et al. (2014); Wang et al. (2019)		

Abbreviations: Acn: acanthite, Adl: adularia, Alu: alunite, Anh: anhydrite, Apy: arsenopyrite, Brt: barite, Cal: calcite, Ccp: chalcopryrite, Chl chlorite; Clt: celestine, Cv: covellite, Dg: digenite, Eng: enargite, Fl: fluorite, Fmt: famatinite, Gn: galena, Lzn: luzonite, Prg: pyrargyrite, Py: pyrite, Qz: quartz, Sp: sphalerite, Stb: stibnite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010).



شکل ۱۵. تصویرهای شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در کانسار آغجه‌قلعه. A: تشکیل توالی آتشفشانی و آذرآواری انوسن، B: چین‌خوردگی واحدهای سنگی انوسن طی فاز کوه‌زایی پیرنه (انوسن بالایی) و نفوذ توده‌های گابرو تا پیروکسن کوارتز مونزونیت پورفیری به داخل آنها. این توده‌ها سبب چرخش آب‌های جوی و شکل‌گیری کانه‌زایی به صورت رگه‌های سیلیسی-سولفیدی کانه‌دار درون واحدهای آتشفشانی و آذرآواری منطقه شده است و C: بالاآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش

Fig. 15. Schematic representation of mineralization evolution stages at Aqjeh Qaleh deposit. A: Formation of Eocene volcanic and volcanoclastic units, B: Folding of Eocene rock units during Pyrenean orogeny (late Eocene) and intrusion of gabbro to pyroxene quartz monzonite porphyry bodies within rock strata. Intrusion of these plutons caused circulation of meteoric waters and formation of mineralized quartz-sulfide veins within volcanic and volcanoclastic units in the area, and C: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

نتیجه‌گیری

کانه‌زایی در کانسار آغجه‌قلعه به صورت رگه‌های سیلیسی سرب، روی و مس‌دار درون توالی آتشفشانی و آذرآواری ائوسن رخ داده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژلیک حدواسط در برگرفته شده است. رگه‌های کانه‌دار دارای ۳۰ تا ۱۵۰ متر درازا و ۵/۰ تا ۲ متر پهنا هستند. پنج مرحله کانه‌زایی شامل سیلیسی‌شدن پیش از کانه‌زایی (مرحله ۱)، کانه‌زایی مس (مرحله ۲)، کانه‌زایی سرب-روی (مرحله ۳)، رگه‌های عقیم (مرحله ۴) و دگرسانی برونزاد (مرحله ۵) تشخیص داده شد. شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، الگوی دگرسانی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ در آغجه‌قلعه نشان می‌دهد که این کانسار از نوع کانسارهای اپی‌ترمال فلزهای پایه بوده و قابل مقایسه با سایر کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمرند فلززایی طارم-هشتجین است. داده‌های زمین‌شیمیایی بیانگر همبستگی مثبت متوسط سرب و روی با یکدیگر و همبستگی منفی ضعیف آنها با مس و همچنین همبستگی مثبت متوسط سرب با نقره و همبستگی مثبت قوی نقره با آرسنیک در کانسار آغجه‌قلعه است. تشابه الگوی بهنجار شده

عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار، توده پیروکسن کوارتزموئزویت پورفیری و سنگ‌های میزبان بیانگر نقش احتمالی آنها در کانه‌سازی است. ارتباط فضایی نزدیک توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن بالایی و کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال در کمرند فلززایی طارم-هشتجین بیانگر نقش فعالیت‌های ماگمایی-گرماپی ماگماتیسم ائوسن بالایی در تأمین عناصر کانسار ساز و سیالات گرماپی برای این نوع از کانه‌زایی‌ها در این بخش از ایران بوده و باید در برنامه‌های اکتشافی مورد توجه قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر مقاله حاضر منجر شده است، تشکر می‌نمایند.

References

- Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D. and Chomiak, B., 2001. Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 1–32.
<https://doi.org/10.5382/SP.08.01>
- Andreeva, E., Matsueda, H., Okrugin, V.M., Takahashi, R. and One, S., 2013. Au-Ag-Te mineralization of the low-sulfidation epithermal Aginskoe deposit, Central Kamchatka, Russia. *Resource Geology*, 63(4): 337–349. <https://doi.org/10.1111/rge.12013>
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>
- Dilles, J.H. and John, D.A., 2021. Porphyry and epithermal mineral deposits. In: D. Alderton and S.A. Elias (Editors), *Encyclopedia of geology* (second edition). Academic Press, Oxford, pp. 847–866. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00005-9>
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 285–313. <https://doi.org/10.5382/SP.10.15>
- Eyvazi, Sh., 2026. Geology, geochemistry, and genesis of Aqjeh Qaleh polymetal deposit, north of Zanjan. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 103 pp. (in Persian with English abstract)
- Faridi, M. and Anvari, A., 2000. Geological map of Hashtjin, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Feizi, M., Ebrahimi, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2017. 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) <https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.49150>
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Nazarian, M., Lotfi, M. and Corfu, F., 2022. Geology and genesis of the Chomalu polymetallic deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 143: 104763. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104763>
- Ghorbani, A., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2022. Genesis of the Varmazyar Pb–Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt: Insights from ore geology, geochemistry and fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, 14(1): 1–38. (in Persian with extended English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2021.51947.86716>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- 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. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827>
- Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Mokhtari, M.A.A. and 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. <https://doi.org/10.1127/njma/2017/0036>
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(4): 425–440. <https://dx.doi.org/10.1007/s00126-011-0382-3>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Chang, Z., 2022a. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of epithermal base metal veins in the Armaqan Khaneh mining district, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 69(6): 844–860. <https://doi.org/10.1080/08120099.2022.2033320>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.012>

- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., Qin, K.Z., and Aghajani Marsa, S., 2022b. Fluid inclusion, zircon U–Pb geochronology, and O–S isotopic constraints on the origin and evolution of ore-forming fluids of the Tashvir and Varmazyar epithermal base metal deposits, NW Iran. *Frontiers in Earth Science*, 10: 990761. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990761>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103752>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and Zhao, J.X., 2019a. Fluid inclusion and stable isotope constraints on ore genesis of the Zajkan epithermal base metal deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 109: 564–584. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.014>
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K.Z. and Zhao, J.X., 2019b. 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103087>
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mehdikhani, B., 2020. Exploration report of polymetal mineralization in the Aqjeh Qaleh area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, 126 pp. (in Persian)
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M. and Marsh, E.E., 2016. Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 41–57. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016>
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M. and 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. <https://doi.org/10.3390/min8040148>
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A. M., Pennacchioni, G. and Mancktelow, N., 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth Planet Scientific Letters*, 214(1–2): 203–219. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00372-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00372-8)
- Saunders, J.A., Hofstra, A.H., Goldfarb, R.J. and Reed, M.H., 2014. Geochemistry of hydrothermal gold deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors) *Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, England, pp. 383–424. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01117-7>
- Shahbazi, S., Ghaderi, M. and Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit. NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28(6): 882–901. <https://doi.org/10.3906/yer-1902-1>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2005. Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. V. 10. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 315–343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Tarvirdizadeh, Sh., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Rahmati, N., 2025. Type and genetic model of mineralization in the Qoushebolaq Pb–Zn occurrence (NW Zanjan): Evidence from geology, mineralization, and geochemistry. *New Findings in Applied Geology*, 19(38): 1–23. (in Persian with extended English abstract) <https://doi.org/10.22084/nfag.2024.29498.1619>
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.Y. and Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36(1–3): 445–474. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)

- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
<https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yasami, N., Mousavi Motlagh, S.H. and Ghaderi, M., 2025. Stable isotope, fluid inclusion, and petrological-mineralogical features of epithermal deposits in the structural zones of Iran: A review. *Ore Geology Reviews*, 186: 106851.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106851>
- Yilmaz, H., Oyman, O., Arehart, G.B., Colakoglu, A.R. and Billor, Z., 2007. Low-sulfidation type Au-Ag mineralization at Bergama, Izmir, Turkey. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 81–124.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.007>
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F.N., Arehart, G.B. and 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.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.04.001>
- Zamanian, H., Rahmani, S. and Zareisahameih, R., 2019. Fluid inclusion and stable isotope study of the Lubin-Zardeh epithermal Cu–Au deposit in Zanjan Province, NW Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 112: 103014.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103014>