



## Intermediate-sulfidation epithermal base and precious metal mineralization in the Qebchaq deposit (NW Qarachaman, East Azerbaijan): Geology, mineralization, and geochemical evidence

Mohammad Sohbatoon<sup>1</sup>, Hossein Kouhestani<sup>2\*</sup> , Mir Ali Asghar Mokhtari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 15 February 2022  
 Revised: 23 August 2022  
 Accepted: 23 August 2022

#### Keywords

Epithermal mineralization  
 Base and precious metal  
 Intermediate-sulfidation  
 Qebchaq  
 Qarachaman

#### \*Corresponding author

Hossein Kouhestani  
 ✉ [kouhestani@znu.ac.ir](mailto:kouhestani@znu.ac.ir)

### ABSTRACT

Precious and base metal mineralization in the Qebchaq deposit occurred as brecciated quartz-sulfide veins within the Eocene tuff and lava strata, and the Oligocene quartz diorite-gabbro intrusion. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, and gold along with minor realgar, psilomelane, and pyrolusite, are ore minerals; quartz, sericite, chlorite and calcite are gangue minerals. The ore minerals show disseminated, vein-veinlet, brecciated, comb, cockade, colloform, crustiform, plumose, and vug infill textures. Five stages of mineralization can be distinguished at Qebchaq. Stage 1 is represented by silicification of host rocks along with minor disseminated pyrite. Stage 2 is characterized by quartz veins and breccias that contain variable amounts of disseminated pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite ± native gold ± realgar. Stage 3 is marked by quartz-manganese oxides-hydroxides (psilomelane, pyrolusite, braunite) veins and hydrothermal breccia cements. Stage 4 is represented by quartz (calcite-chlorite) vein-veinlets, and stage 5 is characterized by calcite as veinlets and vug infill texture. Wall-rock alterations include silicification, intermediate argillic, carbonate, chlorite and propylitic alteration. Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of the mineralized samples and the host rocks are similar and indicate that host rocks are probably involved in mineralization. Characteristics of Qebchaq deposit are comparable with intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.

### How to cite this article

Sohbatloo, M., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2023. Intermediate-sulfidation epithermal base and precious metal mineralization in the Qebchaq deposit (NW Qarachaman, East Azerbaijan): Geology, mineralization, and geochemical evidence. *Journal of Economic Geology*, 15(1): 53–85. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2022.75340.1041>



©2023 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

Qebchaq base and precious metal deposit, 15 km northwest of Qarachaman, is located in the Western Alborz–Azerbaijan zone, northwestern Iran. Several types of deposits are present in this zone including porphyry and skarn Cu–Mo (Au) porphyry deposits, Cu–Mo and Fe skarn deposits, Cu–Mo–Au vein deposits, and epithermal Au deposits (Jamali et al., 2010; Kouhestani et al., 2018). The most important deposit discovered to date within the Western Alborz–Azerbaijan zone is the Sungun porphyry Cu–Mo deposit, which has a defined reserve of 796 Mt at 0.6% Cu (Hezarkhani and Williams-Jones, 1998; Aghazadeh et al., 2015; Simmonds et al., 2017). Other important deposits or occurrences include Haft-Cheshmeh, Sonajil, Ali Javad, Mirkuh-e-Ali Mirza, Astergan, Avan, Anjerd, Mazraeh, Astamal, Pahnavar, Masjed Daghi, Sharafabad, Mivehroud, Nabijan, Zaglig, Aniq, Zaily Darreh, Qara Darreh and Qarachilar (Ebrahimi et al., 2011; Jamali et al., 2010; Mokhtari, 2012; Maghsoudi et al., 2014; Mokhtari et al., 2014; Adeli et al., 2015; Baghban et al., 2015; Baghban et al., 2016; Simmonds and Moazzen, 2015; Kouhestani et al., 2018).

Although geological general characteristics of the location of the Qebchaq deposit have been determined (Asadian et al., 1993), no detailed studies have been conducted on the mineralogy, geochemistry, and genesis of the Qebchaq deposit. In this paper, detailed geology, mineralogy, geochemistry, and alteration styles of the Qebchaq deposit to constrain its ore genesis are investigated. These results may have implications for the regional exploration of epithermal base and precious metal deposits in the Western Alborz–Azerbaijan zone.

### Material and Methods

Detailed fieldwork has been carried out at different scales in the Qebchaq area. A total of 50 samples were collected from various parts of ore veins and breccias, host volcanic rocks, and intrusions. The samples were prepared for thin (n=8) and polished-thin (n=32) sections in the laboratory at the University of Zanjan, Zanjan, Iran. Thirty nine representative samples from the mineralized veins and breccias, 1 sample from host dacitic rocks, and 1 sample from altered quartz diorite-gabbro intrusion were analyzed for REE, Au, Ag, Cu, Pb, Zn, and

other rare elements using Fire Assay and ICP–MS in the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran.

### Results and Discussion

The geological units hosting the Qebchaq deposit are mainly Eocene volcanic and volcanoclastic rocks that have been intruded by Oligocene intrusions. The Eocene sequence includes tuff, andesite, and andesitic basalt, rhyolite, rhyodacite-dacite, and ignimbrite. The intrusive rocks in the Qebchaq area include Oligocene quartz diorite-gabbro and granite-alkali granite. They show porphyritic, microgranular, and granular textures. Mineralization at Qebchaq occurs as the epithermal base and precious metal quartz-sulfide brecciated vein that occupies NE-trending faults in the Eocene volcanic rocks and Oligocene intrusions. The ore veins are 50 to 1000 m long, from 0.5 to 4 m wide, and generally, dip steeply (65–85°) to the southeast and northwest. Wall-rock alterations developed at the Qebchaq deposit include silicification, intermediate argillic, carbonate, chlorite, and propylitic alteration. The first four types are closely related to mineralization. Five stages of mineralization can be distinguished at Qebchaq. Stage 1 is represented by silicification of host rocks along with minor disseminated pyrite. This stage is usually crosscut by stage 2. Stage 2 (the main ore-stage) is characterized by millimeters to several centimeters wide quartz veins and breccias that contain variable amounts of disseminated pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite ± native gold ± realgar. Clasts of this stage and associated wall-rock alteration have been recognized in the hydrothermal cement of stage 3 breccias. Stage 3 is marked by quartz- manganese oxides-hydroxides (psilomelane, pyrolusite, braunite) veins and breccia cement. It is usually crosscut stage 2 and is cut by stage 4 veinlets. Stage 4 is represented by < 1 mm wide quartz (calcite-chlorite) vein-veinlets. This stage usually crosscuts previous ore stages. No sulfide minerals are recognized in stage 4. Stage 5 is characterized by up to 2 mm wide veinlets or vug infill texture of calcite. Stage 5 calcite veinlets usually crosscut previous ore stages. The ore minerals at Qebchaq have been formed as vein-veinlet and hydrothermal breccia cement, and show disseminated, vein-veinlet, brecciated, comb, cockade, colloform, crustiform, plumose, and vug infill textures. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, native gold, realgar, psilomelane, and pyrolusite are the main ore

minerals. Malachite, azurite, smithsonite, cerussite, goethite, secondary pyrolusite, and braunite are supergene minerals. Quartz, sericite, chlorite, and calcite are present in the gangue minerals.

Comparison of Chondrite-normalized rare elements and REE patterns of host dacitic lavas, fresh and altered quartz diorite-gabbro intrusion, and the

mineralized samples at Qebchaq indicate that leaching of some elements from the host rock units may have been involved in mineralization. The data in this study suggest that Qebchaq is an example of intermediate-sulfidation type of epithermal base and precious metal mineralization.



## کانه‌زایی اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بهای نوع سولفیداسیون حدواسط در کانسار قیچاق (شمال غرب قره‌چمن، آذربایجان شرقی): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی

محمد صحبتلو<sup>۱</sup>، حسین کوهستانی<sup>۲\*</sup>، میر علی اصغر مختاری<sup>۳</sup> 

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

کانه‌زایی فلزهای پایه و گران‌بها در کانسار قیچاق به صورت رگه‌های برشی کوارتز-سولفیدی درون توالی توف و گدازه ائوسن و توده کوارتز دیوریت-گابرو الیگوسن رخ داده است. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و طلا همراه با اندکی رآلگار، پسیلوملان و پیرولوزیت، کانه‌های فلزی و کوارتز، سرسیت، کلریت و کلسیت کانی‌های باطله هستند. بافت‌های کانسنگ شامل دانه پراکنده، رگه-رگچه‌ای، برشی، شان‌ای، کاکلی، گل‌کلمی، پوسته‌ای، پرماتند و پُرکننده فضای خالی است. پنج مرحله کانه‌زایی در قیچاق قابل تشخیص است. مرحله اول کانه‌زایی با سیلیسی شدن سنگ‌های میزبان همراه با اندکی پیریت دانه پراکنده مشخص می‌شود. مرحله دوم شامل رگه-رگچه‌های کوارتزی و برش‌های گرمایی است که حاوی مقادیر متغیری پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت،  $\pm$  طلا  $\pm$  رآلگار هستند. مرحله سوم با کوارتز و اکسیدها-هیدروکسیدهای منگنز (پسیلوملان، پیرولوزیت و براونیت) در رگه‌ها و سیمان گرمایی برش‌ها قابل تشخیص است. مرحله چهارم شامل رگه و رگچه‌های کوارتز (کلسیت-کلریت) و مرحله پنجم شامل کلسیت با بافت‌های رگچه‌ای و پُرکننده فضاهای خالی است. دگرسانی‌های گرمایی شامل سیلیسی، آرژلیک متوسط، کربناتی، کلریتی و پروپلیتیک است. الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان، مشابه و بیانگر نقش این سنگ‌ها در تأمین عناصر کانه‌ساز است. ویژگی‌های کانسار قیچاق با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون متوسط قابل مقایسه است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

### واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی اپی‌ترمال  
فلزات پایه و گران‌بها  
سولفیداسیون متوسط  
قیچاق  
قره‌چمن

### نویسنده مسئول

حسین کوهستانی

kouhestani@znu.ac.ir 

### استناد به این مقاله

صحبتلو، محمد؛ کوهستانی، حسین و مختاری، میر علی اصغر، ۱۴۰۲. کانه‌زایی اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بهای نوع سولفیداسیون حدواسط در کانسار قیچاق (شمال غرب قره‌چمن، آذربایجان شرقی): شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۱): ۵۳-۸۵

<https://doi.org/10.22067/econg.2022.75340.1041>

## مقدمه

کانسار فلزهای پایه و گران‌بهای قیچاق ( $17^{\circ} 40' 37''$  عرض شمالی و  $52^{\circ} 1' 47''$  طول شرقی) در ۱۵ کیلومتری شمال‌غرب قره‌چمن در استان آذربایجان شرقی واقع شده و بخشی از پهنه البرز غربی - آذربایجان (Nabavi, 1976) است (شکل ۱-۱). رخدادهای مهمی از کانه‌زایی‌های پورفیری مس - مولیبدن (طلا)، اسکارن مس - مولیبدن، رگه‌های مس - مولیبدن - طلا، اپی‌ترمال‌های طلا و اسکارن‌های آهن در پهنه البرز غربی - آذربایجان وجود دارد (Jamali et al., 2010; Kouhestani et al., 2018). از جنبه اقتصادی، مهم‌ترین کانسار موجود در این پهنه، کانسار مس - مولیبدن پورفیری سونگون است که ذخیره‌ای حدود ۷۹۶ میلیون تن کانسنگ با عیار ۰/۶ درصد مس برای آن برآورد شده است (Hezarkhani and Williams-Jones, 1998; Aghazadeh et al., 2015; Simmonds et al., 2017). از دیگر کانسارها و رخدادهای معدنی مهم موجود در این پهنه می‌توان به کانسار مس - مولیبدن پورفیری هفت‌چشمه، کانسارهای مس - طلای پورفیری سوناجیل، علی جواد و میرکوه علی میرزا، اسکارن‌های مس کمتال، آوان، انجرد و مزرعه، اسکارن‌های آهن آستامال، آوان و پنهاور، اپی‌ترمال‌های طلای مسجداغی، میوه‌رود، استرقان، نبی‌جان، شرف‌آباد و زگلیگ و رگه‌های مس - مولیبدن - طلای قره‌چیلر، انیق، زایلی دره و قره‌دره اشاره کرد (Jamali et al., 2010; Ebrahimi et al., 2011; Mokhtari, 2012; Maghsoudi et al., 2014; Mokhtari et al., 2014; Adeli et al., 2015; Baghban et al., 2015; Simmonds and Moazzen, 2015; Baghban et al., 2016; Kouhestani et al., 2018). کانسار قیچاق یکی از کانه‌زایی‌های موجود در پهنه البرز غربی - آذربایجان است که آثار فعالیت‌های اکتشافی و استخراجی قدیمی به صورت ترانشه‌های پُرشده و تونل‌های ریزش کرده در آن قابل مشاهده است. با این وجود، تاکنون بررسی علمی دقیقی بر روی این کانسار انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمیایی کانسار قیچاق مورد بررسی قرار گرفته و نوع

کانه‌زایی آن تعیین شده است. بررسی دقیق این کانه‌زایی می‌تواند عوامل کلیدی توزیع زمانی و مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در این منطقه را تعیین کرده و به عنوان الگوی اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

## روش مطالعه

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. در بررسی‌های صحرایی، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منطقه تهیه و چگونگی ارتباط رگه‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان مشخص شد. در این راستا، ۵۰ نمونه از واحدهای سنگی و رخنمون‌های کانه‌زایی برداشت شد. سپس، تعداد ۸ مقطع نازک و ۳۲ مقطع نازک - صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۱۱ نمونه از بخش‌های کانه‌دار، یک نمونه از گدازه داسیتی و یک نمونه از توده کوآرتز دیوریت دگرسان‌شده انتخاب و به روش ICP-MS تجزیه شد. همچنین، برای این بررسی‌ها از میانگین داده‌های تجزیه‌ای ۷ نمونه از توده کوآرتز دیوریتی - گابرویی سالم که توسط صحبتلو (Sohbatloo, 2022) انجام شده بود، استفاده شد. برای بررسی ضرایب همبستگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار، علاوه بر ۱۱ نمونه اشاره شده، تعداد ۲۸ نمونه دیگر از رگه‌های کانه‌دار به صورت تکه‌های خرده‌سنگی برداشت و به روش Fire Assay برای طلا و روش ICP-MS برای سایر عناصر کانه‌ساز تجزیه شدند. تمامی تجزیه‌های شیمیایی در آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران انجام شده است. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش خردایش شده و سپس توسط آسیاب تنگستن کاربرد به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش پودر شدند. سپس، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی انتخاب و تجزیه شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به روش چند اسید و با استفاده از ماکروویو هضم شد. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۳ تا ۵ درصد بوده است. در روش Fire Assay،

برای اندازه‌گیری میزان طلا، به صورت جداگانه حدود ۳۰ گرم از هر نمونه تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد تا طلا از سرباره جدا شده و جذب ملغمه سربی شود. در مرحله بعد، سرب حذف و طلا و نقره در ملغمه نقره‌ای جدا شدند. در پایان، ملغمه نقره‌ای با استفاده از تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه) محلول‌سازی شده و میزان طلا به روش ICP-MS قرائت شد.

### زمین‌شناسی منطقه قیچاق

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورقه ترکمن‌چای - قره‌چمن (Asadian et al., 1993) و بر اساس بررسی‌های صحرایی انجام‌شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه قیچاق (شکل ۱-۱-B)، واحدهای سنگی موجود در این منطقه شامل توالی توف و گدازه ائوسن (واحدهای  $E^{IV}$ ،  $E^{VI}$  و  $E^{VI}$ )، توده‌های نفوذی کوارتز دیوریت - گابرو (qd-gb) و گرانیت - آلکالی گرانیت (gr) الیگوسن، کنگلومرای پلیو کواترنری ( $PIQ^c$ ) و واحدهای کواترنری ( $Q^l$ ،  $Q^c$ ،  $Q^{al}$ ) هستند.

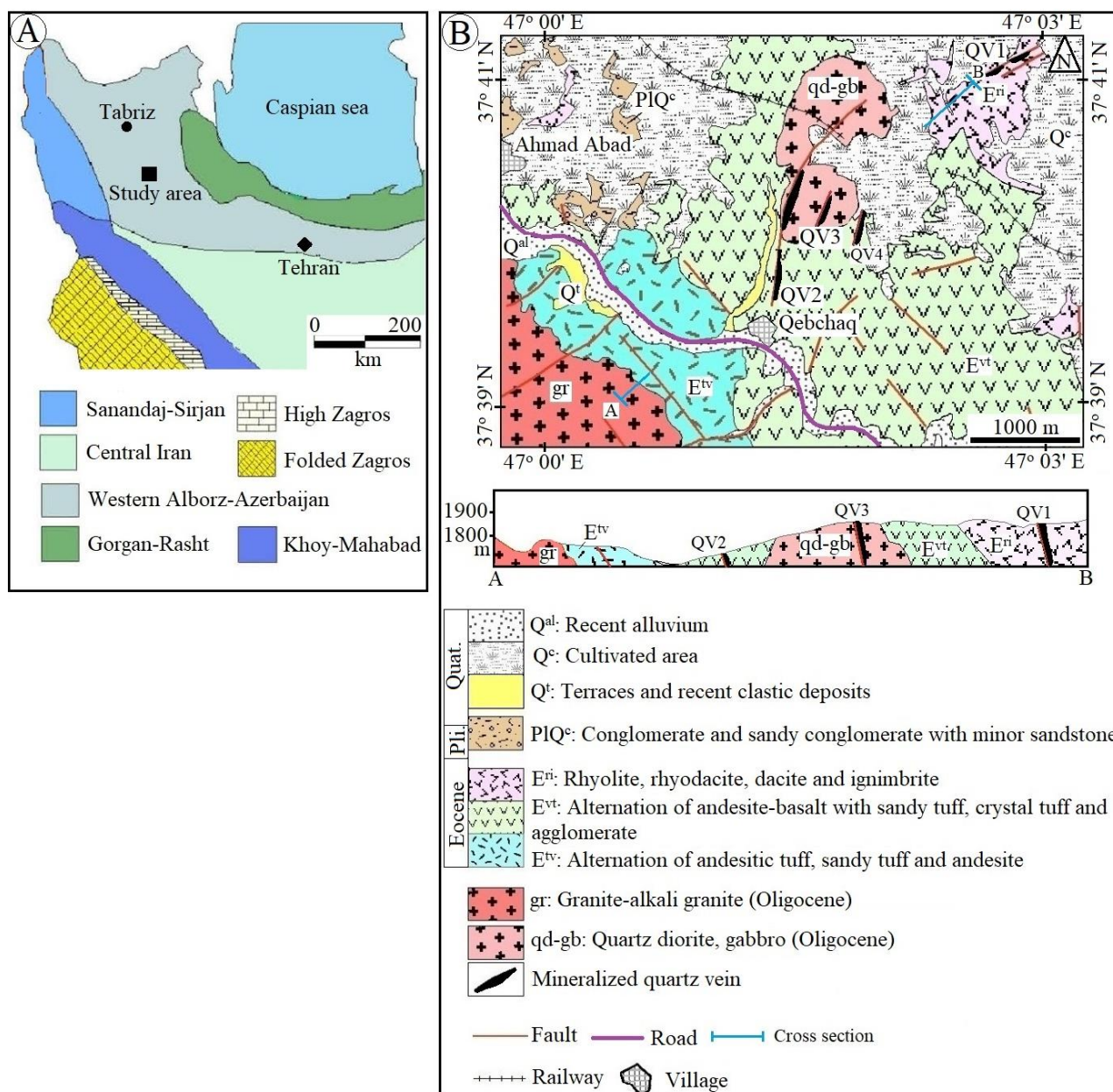
واحد  $E^{IV}$  متشکل از توالی توف آندزیتی و توف ماسه‌ای با میان‌لایه‌های گدازه‌های آندزیتی است که در غرب و جنوب غرب روستای قیچاق رخنمون دارد (شکل ۱-۱-B و شکل ۲-۱-A). توده نفوذی گرانیت - آلکالی گرانیت به داخل این واحد نفوذ کرده و در بخش‌هایی به دگرسانی آرژیلیکی واحدهای سنگی آن منجر شده است. واحد  $E^{VI}$  از توالی گدازه‌های آندزیتی - بازالتی با توف‌های ماسه‌ای، توف بلورین و آگلومرا تشکیل شده است و اغلب در شرق و جنوب شرق روستای قیچاق رخنمون دارد (شکل ۱-۱-B). این واحد به صورت هم‌شیب بر روی واحد  $E^{IV}$  واقع شده (شکل ۲-۱-A) و میزان بخشی از رگه‌های سیلیسی کانه‌دار منطقه است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، گدازه‌های بازالتی این واحد از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه دانه‌ریز تشکیل شده است و بافت پورفیریکی نشان می‌دهند.

واحد  $E^{VI}$  متشکل از توالی ریولیت، ریوداسیت - داسیت و ایگنمریت است که اغلب در بخش‌های شمال شرقی منطقه رخنمون دارند (شکل

۲-۱-B). رخنمون محدودی از این واحد در بخش شمال غربی منطقه مورد بررسی نیز قابل مشاهده است. در بخش‌های شمال شرقی منطقه قیچاق، این واحد سنگی میزان رگه‌های سیلیسی و برش‌های گرمایی کانه‌دار است. در بررسی‌های میکروسکوپی، بخش‌های گدازه‌ای این واحد دارای بافت پورفیری بوده و متشکل از درشت‌بلورهای کوارتز با بافت خلیجی و پلاژیوکلاز (از نوع الیگوکلاز) همراه با هورنبلند و بیوتیت اغلب اوپاسیته شده هستند. ایگنمریت‌ها در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن بوده و با بافت جریان‌ی و حضور درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه سنگ مشخص می‌شوند. در بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت پورفیر و کلاستیک متشکل از درشت‌بلورهای شکسته شده کوارتز، پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت در یک زمینه دارای بافت جریان‌ی و با دگرسانی به کانی‌های رسی هستند. توده‌های نفوذی کوارتز دیوریت - گابرو (qd-gb) و گرانیت - آلکالی گرانیت (gr) الیگوسن به ترتیب در بخش‌های شمال و جنوب غرب روستای قیچاق رخنمون دارند (شکل ۱-۱-B). تاکنون داده‌های سن‌سنجی ایزوتوپی برای این توده‌ها ارائه نشده است و روابط صحرایی نیز ارتباط زمانی آنها را در منطقه قیچاق نشان نمی‌دهد؛ اما در غرب منطقه و بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ بستان آباد (Behrouzi et al., 1998)، توده گرانیتی - آلکالی گرانیتی نسبت به توده کوارتز دیوریتی - گابرویی جوان‌تر است.

توده کوارتز دیوریت - گابرو دارای روند عمومی شمالی - جنوبی بوده و ابعاد طولی آن حدود ۱/۵ کیلومتر و ضخامت آن در بیشترین قسمت در حدود یک کیلومتر است. این توده به داخل واحد  $E^{VI}$  نفوذ کرده و میزان بخش عمده رگه سیلیسی کانه‌دار منطقه قیچاق است (شکل ۲-۱-C). کوارتز دیوریت‌ها در نمونه دستی به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره بوده و دارای بافت میکروگرانولار متشکل از کانی‌های فلدسپات همراه با کانی‌های مافیک هستند. در بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت گرانولار و میکروگرانولار تا پورفیروئیدی هستند.

کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز (۶۰ درصد)، هورنبلند (۲۵ درصد)، کلینوپیروکسن (۵ درصد) و کوارتز (۵ درصد) و کانی‌های فرعی آنها شامل آلکالی‌فلدسپار (۳ درصد)، زیرکن و کانی‌های کدر (۲ درصد) است. گابروها در نمونه دستی دارای بافت میکروگرانولار متشکل از کانی‌های فلدسپات و کانی‌های مافیک با رنگ کلی خاکستری تیره هستند.

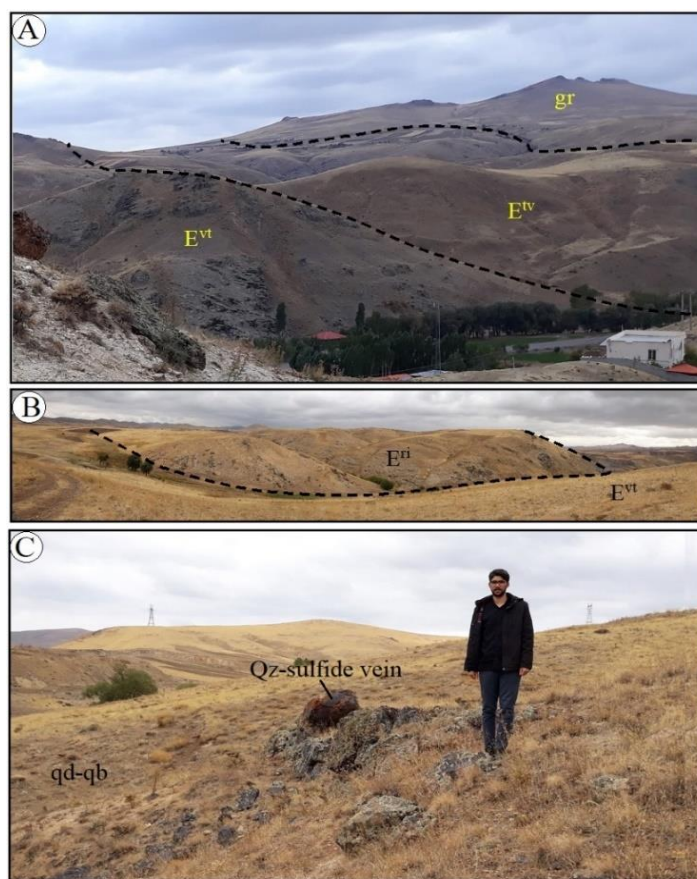


شکل ۱. A: موقعیت منطقه قیچاق در پهنه البرز غربی - آذربایجان با تغییراتی از نبوی (Nabavi, 1976) و B: نقشه زمین‌شناسی کانسار قیچاق. برای بهتر نشان دادن موقعیت رگه‌های کانهدار، ضخامت آنها بیشتر نشان داده شده است.

**Fig. 1.** A: Location of the Qebchaq area in the Western Alborz-Azerbaijan zone (modified from Nabavi, 1976), and B: Geological map of the Qebchaq deposit. The width of mineralized veins was exaggerated to better show their position.

رنگ عمومی کرمی تا صورتی است. در بررسی‌های میکروسکوپی این سنگ دارای بافت گرانولار بوده و متشکل از کانی‌های کوارتز (۲۵ درصد)، پلاژیوکلاز (۴۰ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳۰ درصد)، بیوتیت (۵ درصد)، زیرکن و کانی‌های کدر (۲ درصد) هستند. واحد PIQ<sup>c</sup> در بخش‌های شمال‌غربی منطقه رخنمون داشته (شکل ۱- B) و شامل کنگلومرا و کنگلومرای ماسه‌ای با مقادیر کمی ماسه‌سنگ است.

در بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت میکروگرانولار تا پورفیروئیدی بوده و متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز (۶۵ درصد) و کلینوپیروکسن (۳۰ درصد) همراه با اندکی کوارتز (۲ درصد) و کانی‌های کدر (۳ درصد) هستند. توده گرانیت-آلکالی گرانیت (gr) به داخل واحد E<sup>iv</sup> نفوذ کرده است (شکل ۲- A). گرانیت در نمونه دستی دارای بافت گرانولار متشکل از کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار با



**شکل ۲. A:** نمایی از توالی‌های سنگی E<sup>iv</sup> و E<sup>vi</sup> همراه با توده گرانیتی (gr) در جنوب‌غرب روستای قیچاق (دید به سمت جنوب‌غرب)، **B:** نمایی از توالی ریولیت، ریوداسیت-داسیت و ایگنمبریت (واحد E<sup>ri</sup>) در بخش شمال‌شرقی منطقه قیچاق (دید به سمت شمال‌شرق) و **C:** نمایی کلی از توده کوارتزدیوریت-گابرو (واحد qd-gb) در منطقه قیچاق (دید به سمت شمال). رگه کوارتز-سولفیدی در داخل این توده نفوذی قابل مشاهده است.

**Fig. 2. A:** View of E<sup>iv</sup> and E<sup>vi</sup> rock sequences along with granite body (gr) in the southwest of Qebchaq village, looking southwest, **B:** View of intercalation of rhyolite, rhyodacite-dacite, and ignimbrite sequences (Unit E<sup>ri</sup>) in the northeast Qebchaq area, looking northeast, and **C:** General view of quartz diorite-gabbro (Unit qd-gb) body in the Qebchaq area, looking to the north. The Quartz-sulfide vein can be seen within this intrusive body.



دگرسانی آرژیلیک متوسط اطراف این رگه کانه‌دار را دربر گرفته است (شکل ۳-۳). پهنای این دگرسانی در کمر بالای رگه تا ۱۰ متر و در کمر پایین آن تا ۵ متر می‌رسد. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و رآلگار، مهم‌ترین سولفیدهای موجود در این رگه کانه‌دار هستند (شکل ۳-۳ D تا F). در بخش‌های ابتدایی (بخش جنوب‌غربی)، این رگه دارای حجم زیادی اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز است. رگه کانه‌دار سوم (QV3)، حدود ۵۰ متر درازا و بین ۰/۵ تا ۱ متر پهنا داشته و توده کوارتز دیوریت-گابرو (واحد qd-gb) را قطع کرده است (شکل ۳-۳ G). روند عمومی این رگه شمال‌شرق- جنوب‌غرب (N20E) و شیب آن حدود ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت شمال‌غرب است. کانه‌زایی محدود گالن همراه با اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز و آغشتگی به هیدروکسیدهای آهن در این رگه کانه‌دار قابل مشاهده است. رگه کانه‌دار چهارم (QV4) دارای روند عمومی شمال‌شرق- جنوب‌غرب (N10-20E) و شیب حدود ۶۵ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب‌شرق بوده و طولی تا بیش از ۲۰۰ متر و پهنایی بین ۲ تا ۴ متر دارد. سنگ میزبان این رگه کانه‌دار عبارت از توالی توف، گدازه و آگلومرا (واحد E<sup>VI</sup>) است (شکل ۳-۳ H). این رگه کانه‌دار دارای مقادیر محدودی گالن و مقادیر زیادی اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز همراه با آغشتگی به هیدروکسیدهای آهن است. دگرسانی آرژیلیک متوسط به ضخامت تا ۲ متر، اطراف این رگه‌های کانه‌دار دیده می‌شود. عیار نمونه‌های برداشت‌شده از این رگه‌های کانه‌دار تا ۷/۴ درصد مجموع سرب و روی، ۰/۴ درصد مس، ۴۵/۸ گرم در تن نقره و ۴/۶ گرم در تن طلا را مشخص کرده است.

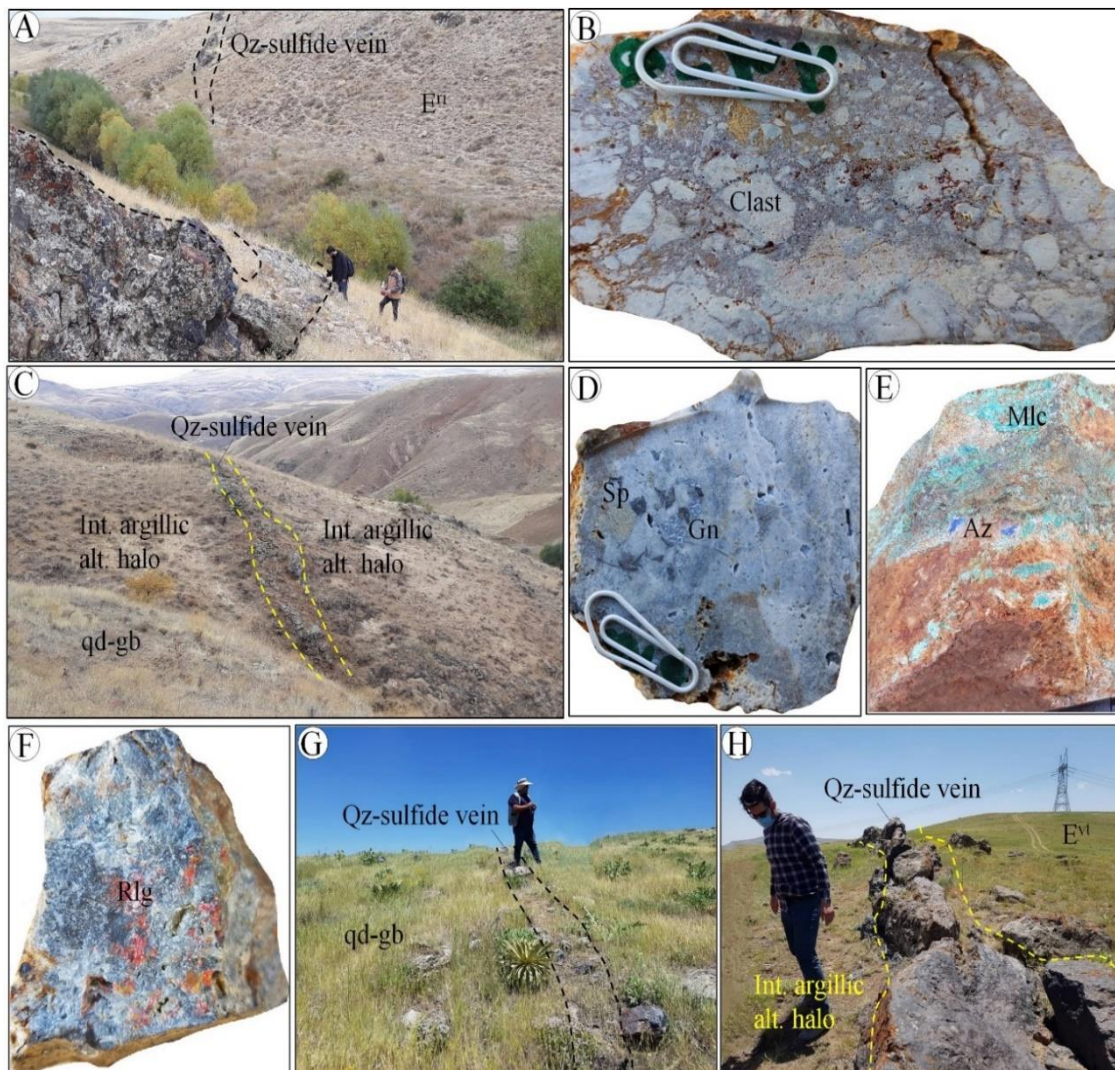
بر اساس یافته‌های صحرایی و میکروسکوپی و تجزیه‌های XRD، دگرسانی گرمایی در کانسار قیچاق شامل دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی، کلریتی و پروپیلیتیک است که در این میان، دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی و کلریتی منطبق بر بخش‌های کانه‌دار بوده و دگرسانی پروپیلیتیک در خارج از بخش‌های کانه‌دار، سنگ‌های میزبان را تحت تأثیر قرار داده است.

قطعه‌های تشکیل‌دهنده این واحد کنگلومرایی از انواع قطعه‌های سنگی قدیمی‌تر شامل قطعه‌های سنگی گدازه‌ای، توفی و گاه توده‌های نفوذی است. ابعاد قطعه‌های سنگی مزبور تا ۲۰ سانتی‌متر می‌رسد. قطعه‌های سنگی در یک سیمان ماسه‌ای ریز به هم چسبیده و در مجموع از استحکام متوسطی برخوردار هستند. واحدهای کواترنری شامل تراس‌های آبرفتی سخت‌نشده (Q<sup>I</sup>)، پوشش زمین‌های کشاورزی (Q<sup>C</sup>) و رسوبات آبرفتی مسیر رودخانه‌ها (Q<sup>all</sup>) است.

از نظر ساختاری، منطقه قیچاق با یک سری گسل‌های عادی با روند عمومی شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و شمال‌غربی- جنوب‌شرقی مشخص می‌شود (شکل ۱-۱ B). در این بین، گسل‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، مهم‌ترین گسل‌ها در این منطقه محسوب می‌شوند که کنترل‌کننده کانه‌زایی منطقه هستند. این امر بیانگر نقش کنترل‌کننده گسل‌های عادی برای کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بها است (Kouhestani et al., 2018).

### کانه‌زایی و دگرسانی

کانه‌زایی در کانسار قیچاق شامل چهار رگه سیلیسی- برشی کانه‌دار است (شکل ۱-۱ B). رگه کانه‌دار اول (QV1) درون توالی ریولیت، ریوداسیت- داسیت و ایگنمبریت (واحد E<sup>VI</sup>) رخ داده است و حدود ۱۵۰ متر درازا و ۱/۵ متر پهنا دارد (شکل ۳-۳ A). روند عمومی این رگه، شمال‌شرق- جنوب‌غرب (N45E) با شیب ۵۰ درجه به سمت جنوب‌شرق است. برشی شدن در این رگه به فراوانی رخ داده است. برش‌ها معمولاً دارای قطعه‌های جورنشده و زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار سنگ میزبان سیلیسی و آرژیلی شده در سیمانی از جنس کوارتز و پیریت (اغلب اکسیدشده) هستند (شکل ۳-۳ B). رگه دوم (QV2) درون توده کوارتز دیوریت- گابرو (واحد qd-gb) و توالی توف، گدازه و آگلومرا (واحد E<sup>VI</sup>) رخ داده است و حدود ۱۰۰۰ متر درازا و ۱ تا ۱/۵ متر پهنا دارد (شکل ۳-۳ C). روند عمومی این رگه شمال‌شرق- جنوب‌غرب (N10-20E) با شیب ۷۵ تا ۸۵ درجه به سمت جنوب‌شرق است.



**شکل ۳.** تصویرهای صحرایی و نمونه دستی از رگه‌های کوارتز-سولفیدی در کانسار قیچاق. A: رگه QV1 که توالی ربولیت، ریوداسیت-داسیت و ایگنمبریت (واحد E<sup>n</sup>) را قطع کرده است (دید به سمت شمال شرق)، B: برش‌های گرمابی با سیمان کوارتز-پیریت رگه QV1، C: بخشی از رگه QV2 که توده کوارتزدیوریت-گابرو (واحد qd-gb) را قطع کرده است (دید به سمت غرب-جنوب غرب). رگه کانه‌دار توسط دگرسانی آرژلیک متوسط در بر گرفته شده است. D، E و F: رگه QV2 حاوی گالن و اسفالریت (D)، کالکوپیریت‌های دگرسان شده به مالاکیت و آزوریت (E) و رآلگار (F)، G: رگه QV3 که توده کوارتزدیوریت-گابرو (واحد qd-gb) را قطع کرده است (دید به سمت شمال شرق) و H: رگه QV4 که توالی توف، گدازه و آگلومرا (واحد E<sup>v</sup>) را قطع کرده است (دید به سمت شمال شرق). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Az: آزوریت، Gn: گالن، Mlc: مالاکیت، Rlg: رآلگار، Sp: اسفالریت).

**Fig. 3.** Field and hand specimen photographs of quartz-sulfide veins of the Qebchaq deposit. A: QV1 vein crosscutting rhyolite, rhyodacite-dacite and ignimbrite sequences (Unit E<sup>n</sup>), looking northeast, B: Hydrothermal breccia with quartz-pyrite cement of QV1 vein, C: Part of QV2 vein crosscutting quartz diorite-gabbro body (Unit qd-gb), looking west-southwest. The mineralized vein is covered by an intermediate argillic alteration halo, D, E and F: QV2 vein containing galena and sphalerite (D), chalcopyrite altered to malachite and azurite (E), and realgar (F), G: QV3 vein crosscutting quartz diorite-gabbro body (Unit qd-gb), looking northeast, and H: Qv4 vein crosscutting tuff, lava, and agglomerate sequences (Unit E<sup>v</sup>), looking northeast. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Az: azurite, Gn: galena, Mlc: malachite, Rlg: realgar, Sp: sphalerite).

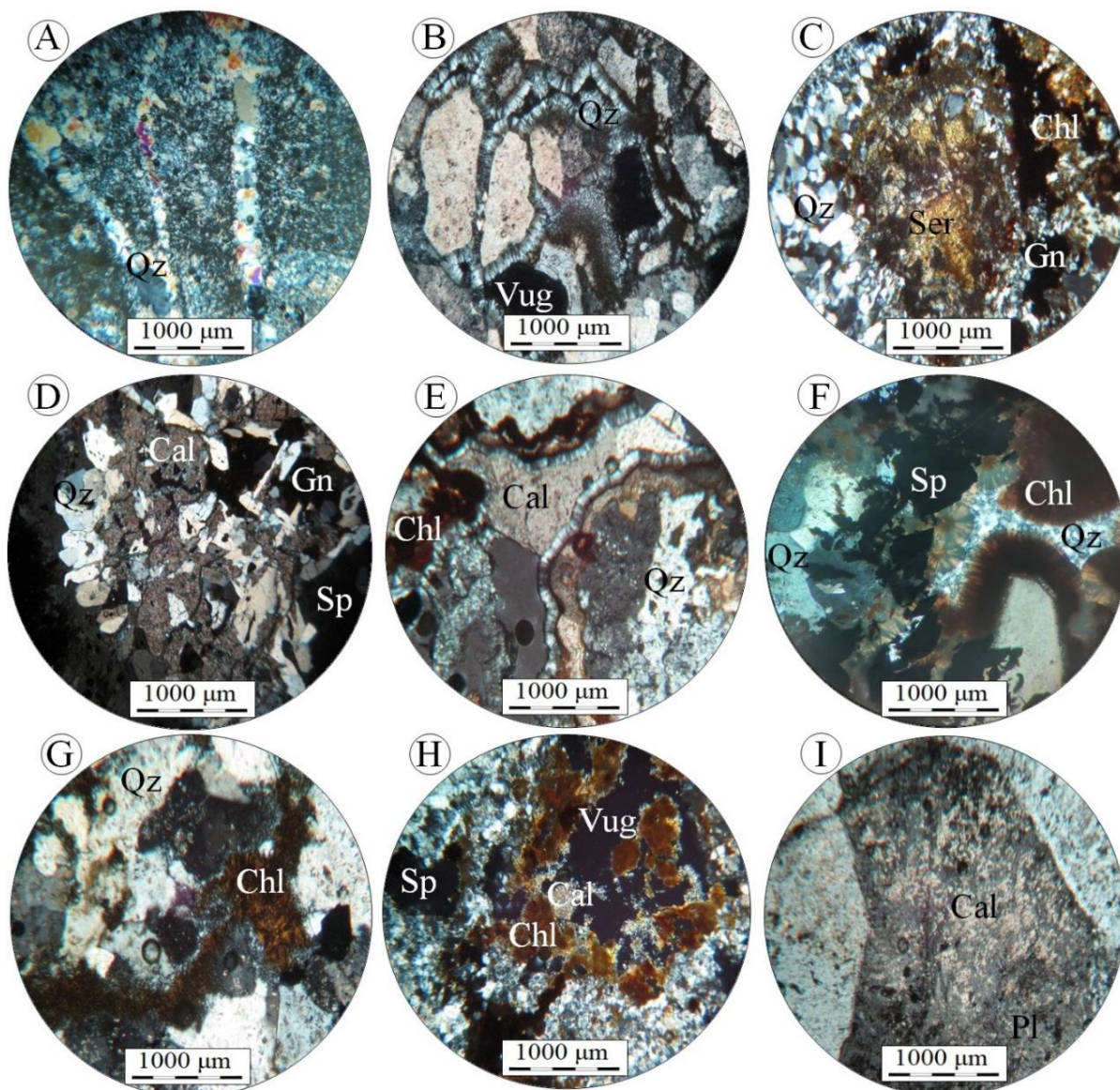
رگه‌های کانهدار، فرایند کانه‌زایی در کانسار قبیجاق به پنج مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی شامل سیلیسی شدن سنگ‌های میزبان است که با اندکی پیریت همراهی می‌شود (شکل ۵-۴). سیلیسی شدن شامل تشکیل کوارتزهای ریزبلور است. پیریت به صورت بلورهای ریز دانه‌پراکنده بی‌شکل در زمینه سیلیسی شده سنگ دیده می‌شود. این مرحله اغلب توسط مرحله دوم کانی‌سازی قطع شده است (شکل ۵-۴ تا C). مرحله دوم (اصلی) کانه‌زایی با حضور رگه-رگچه‌ها و برش‌های گرمابی با سیمان کوارتز-سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت،  $\pm$  طلا  $\pm$  رآلگار) به ضخامت چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر قابل شناسایی است. این مرحله کانه‌زایی، اغلب مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۵-۴ و C) و خود توسط رگه‌های مراحل بعدی کانه‌زایی قطع شده است (شکل ۵-۴ تا L). کوارتز و سولفیدها معمولاً به صورت بلورهای ریز تا متوسط و گاهی درشت در رگه‌ها و سیمان گرمابی برش‌های این مرحله از کانه‌زایی، اغلب در سیمان گرمابی برش‌های مرحله سوم کانه‌زایی دیده می‌شوند (شکل ۵-۴ E و F). کانه‌زایی مرحله سوم با حضور کوارتز و اکسیدها-هیدروکسیدهای منگنز (پسیلوملان، پیرولوویت و براونیت) در رگه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها مشخص می‌شود. این مرحله اغلب مرحله دوم کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۵-۴ E و F) و خود توسط مرحله چهارم کانه‌زایی قطع شده است (شکل ۵-۴ J). مرحله چهارم کانه‌زایی با حضور رگه و رگچه‌های کوارتز (کلسیت-کلریت) با ضخامت چند میلی‌متر تا کمتر از ۱ سانتی‌متر مشخص می‌شود که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل ۵-۴ G تا J). هیچ‌گونه کانی سولفیدی یا اکسیدی با این مرحله مشاهده نمی‌شود. کانه‌زایی مرحله پنجم با فراوانی کلسیت به صورت رگچه‌ای (ضخامت تا ۲ میلی‌متر) و پرکننده فضاهای خالی مشخص می‌شود که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده است (شکل ۵-۴ K و L).

دگرسانی سیلیسی به صورت رگه-رگچه‌ای و یا سیمان گرمابی برش‌ها رخ داده و منطبق بر بخش‌های کانهدار است (شکل ۴-۴ A و B). ضخامت رگه و رگچه‌های کوارتزی بین ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر متغیر است. در مقاطع میکروسکوپی، بلورهای کوارتز موجود در رگچه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و گاهی شکل‌دار دیده می‌شوند. دگرسانی آرژلیک متوسط با ضخامت بین ۲ تا ۱۰ متر به شدت توسط شکستگی‌ها کنترل شده و به صورت هاله‌ای سفید تا زرد رنگ اطراف رگه‌های کانهدار در در بر گرفته است (شکل ۳-۴ C و H). در مقیاس میکروسکوپی، این دگرسانی شامل بلورهای ریز سرسیت و ایلیت در همراهی با کلریت و مقدار کمی کلسیت است (شکل ۴-۴ C). دگرسانی کربناتی در کانسار قبیجاق به دو نوع قبل تفکیک است. در نوع اول، دگرسانی کربناتی شامل کلسیت‌هایی است که همراه با کوارتز و کلریت در رگه و رگچه‌های کانهدار دیده می‌شوند (شکل ۴-۴ D). دگرسانی کربناتی نوع دوم که در مراحل پایانی دگرسانی گرمابی تشکیل شده است، شامل کلسیت به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی است (شکل ۴-۴ E). دگرسانی کلریتی شامل رخداد کلریت همراه با کوارتز و کلسیت در رگه و رگچه‌های کانهدار است. در مقاطع میکروسکوپی، کلریت‌ها به رنگ قهوه‌ای روشن دیده شده و گاهی بافت اسفرولیتی نشان می‌دهند (شکل ۴-۴ F و G). دگرسانی پروپلیتیک بیشتر در بخش‌های بیرونی پهنه‌های دگرسانی دیده می‌شود. این دگرسانی دارای شدت ضعیف تا متوسط بوده و معمولاً بافت کانی‌ها در آن حفظ شده است. دگرسانی پروپلیتیک معمولاً با جانشینی پلاژیوکلاز، آمفیبول و کلبیوپروکسن توسط مجموعه کلریت، اپیدوت، سرسیت و کلسیت مشخص می‌شود (شکل ۴-۴ H و I). کوارتز حاصل از این دگرسانی به میزان کم در زمینه سنگ دیده می‌شود.

## بحث و بررسی

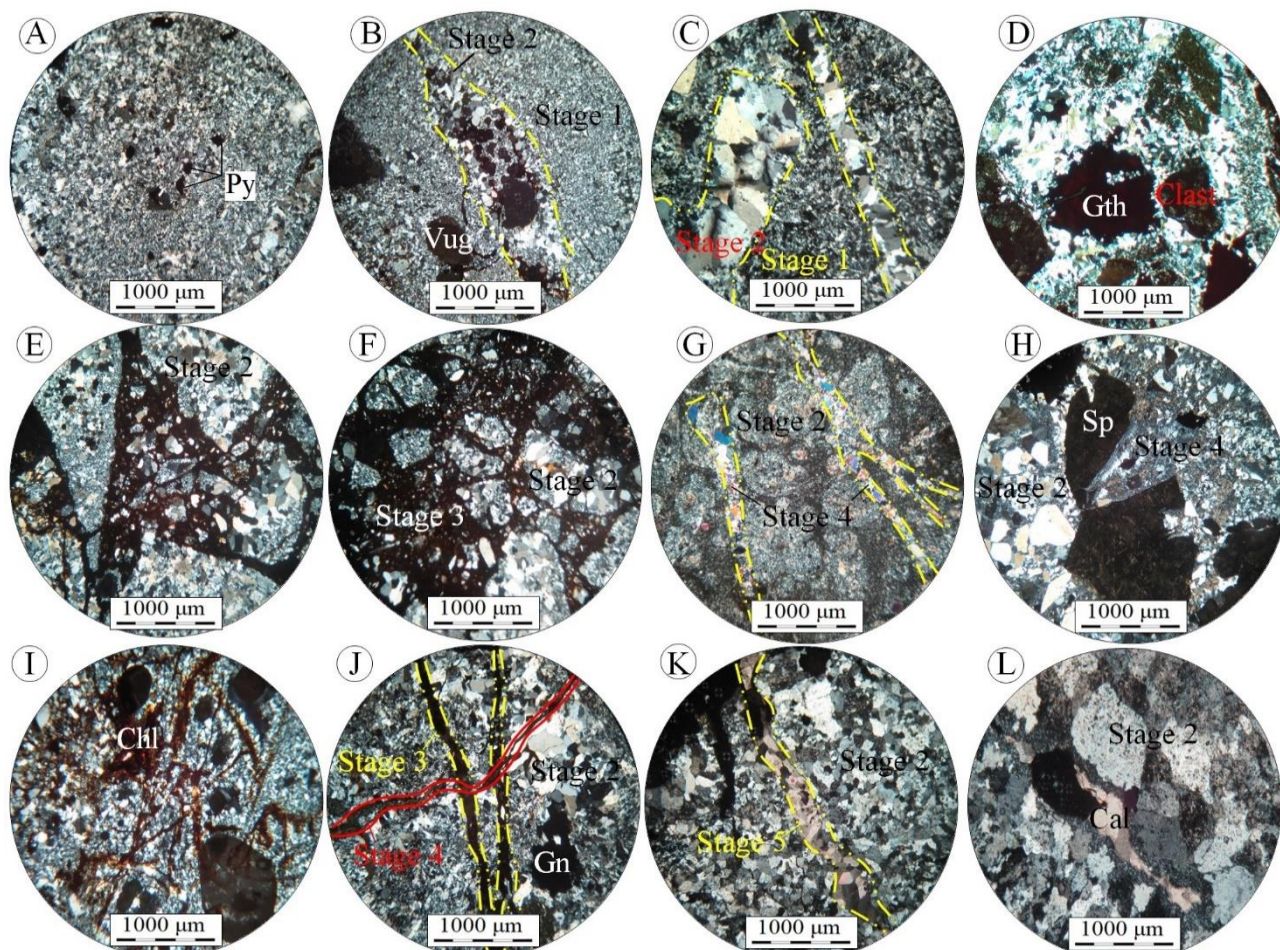
### مراحل کانه‌زایی

با توجه به مجموعه کانی‌شناسی، روابط بافتی و ارتباط قطع‌کنندگی



**شکل ۴.** تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌های گرمابی در کانسار قیچاق. A و B: دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های کوارتزی و سیمان گرمابی برش‌ها، C: دگرسانی آرژیلیک متوسط شامل حضور سریسیت همراه با کلریت در بخش‌های کانه‌دار، D و E: دگرسانی کربناتی به صورت رگچه‌های سیلیسی-کربناتی (D) و بافت پرکننده فضاهای خالی (E). در E، کلسیت بافت گل‌کمی نشان می‌دهد، F و G: دگرسانی کلریتی شامل کلریت با بافت اسفرولیتی در فضاهای خالی (F) و کلریت رگچه‌ای (G)، H و I: دگرسانی پلاژیوکلاز به کلریت و کلسیت (H) و کلسیت (I) در دگرسانی پروپلیتیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Gn: گالن، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Sp: اسفالریت، Vug: فضای خالی).

**Fig. 4.** Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Qebchaq deposit. A and B: Silica alteration as quartz veinlets and hydrothermal breccia cement, C: Intermediate argillic alteration as the presence of sericite and chlorite within ore zones, D and E: Carbonate alteration as quartz-calcite veinlets (D), and open space filling texture (E), F and G: Chlorite alteration as chlorite with spherulitic texture within vugs (F) and chlorite veinlets (G), H and I: Plagioclase altered to chlorite and calcite (H), and calcite (I) in propylitic alteration. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Chl: chlorite, Gn: galena, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ser: sericite, Sp: sphalerite, Vug: open space).



**شکل ۵.** تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از مراحل کانه‌زایی در کانسار قیچاق. A تا C: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان حاوی پیریت‌های ریزبلور و دانه پراکنده که توسط رگچه‌های کوارتز-سولفیدی مرحله دوم (B و C) قطع شده است. در A، ذرات ریز دانه پراکنده پیریت در متن سیلیسی سنگ قابل مشاهده است، D: مرحله دوم کانه‌زایی به صورت سیمان گرمایی برش‌ها، E و F: قطعه‌های برشی مرحله دوم با سیمان گرمایی مرحله سوم، G: قطعه‌های برشی مرحله دوم که توسط رگچه‌های کوارتزی مرحله چهارم قطع شده‌اند، H: بلور درشت اسفالریت مرحله دوم که توسط رگچه‌های کوارتزی-کلسیتی-کلریتی مرحله چهارم قطع و برشی شده است، I: رگچه‌های کلریتی مرحله چهارم که مرحله دوم را قطع کرده‌اند، L: رگچه‌های کوارتز-اکسیدی مرحله سوم که مرحله دوم را قطع کرده و خود توسط رگچه‌های کلریتی مرحله چهارم قطع شده‌اند، K و L: مرحله پنجم کانه‌زایی به صورت کلسیت رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت، Vug: فضای خالی).

**Fig. 5.** Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of the mineralization stages in the Qebchaq deposit. A–C: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock with disseminated fine-grained pyrite that crosscut by stage 2 quartz-sulfide veinlets (B and C). In A, fine-grained disseminated pyrites are observed in the silicified rock matrix, D: Stage 2 mineralization as hydrothermal breccia cement, E and F: Stage 2 breccia clasts with stage 3 hydrothermal cement, G: Stage 2 breccia clasts that crosscut by stage 4 quartz veinlets, H: Coarse-grained stage 2 sphalerite that crosscut and brecciated by stage 4 quartz-calcite-chlorite veinlets, I: Stage 4 chlorite veinlets that crosscut stage 2 mineralization, J: Stage 3 quartz-oxide veinlets that crosscut stage 2 mineralization and, in turn, cut by stage 4 chlorite veinlets, K and L: Stage 5 mineralization as calcite veinlets and vug infill. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Chl: chlorite, Gn: galena, Gth: goethite, Py: pyrite, Sp: sphalerite, Vug: open space).

### کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

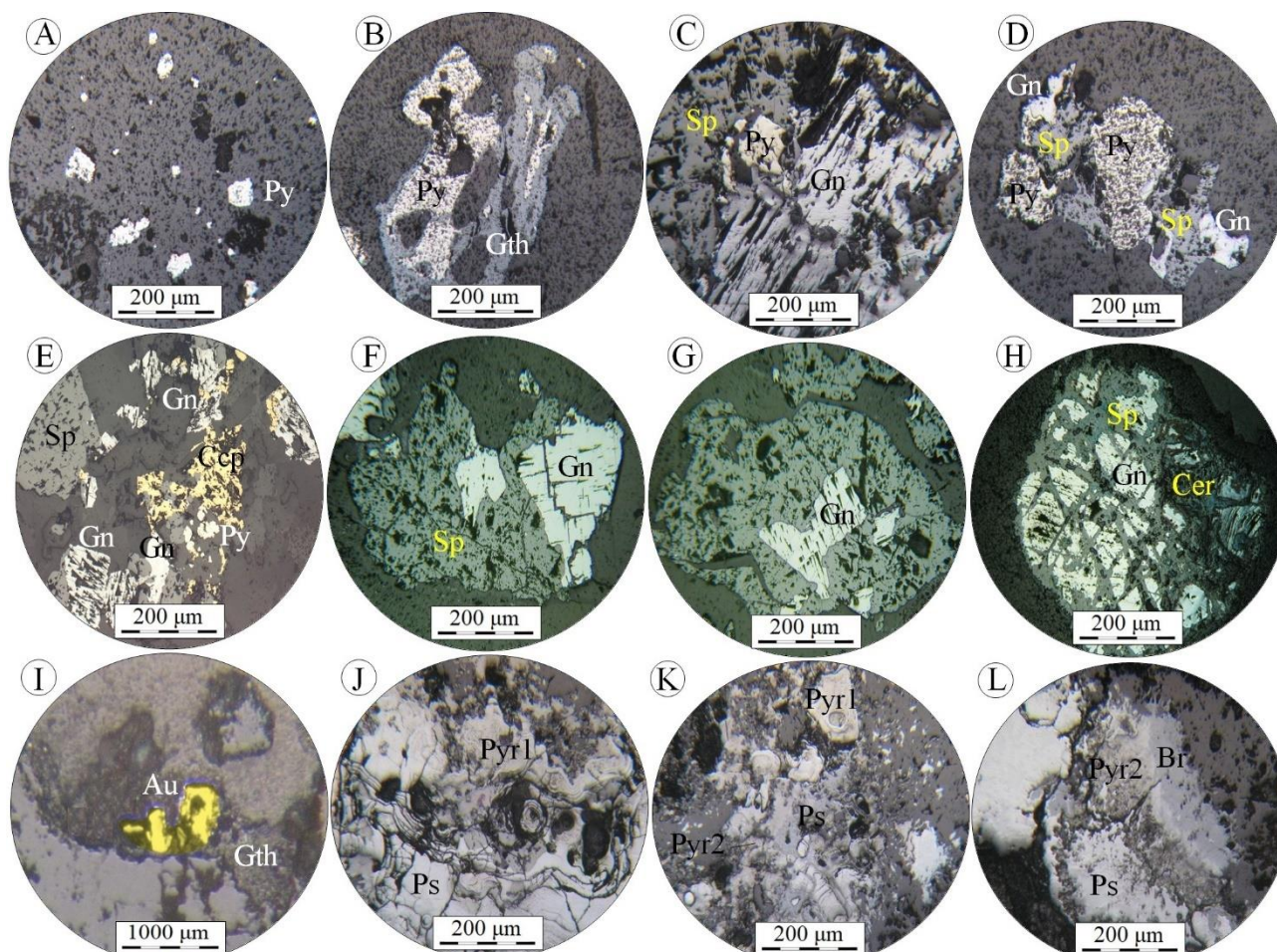
پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت، کانی‌شناسی اصلی ماده معدنی در کانسار قیچاق هستند که با اندکی طلا، رآلگار، پسیلوملان و پیرولولزیت همراهی می‌شوند. کوارتز، سربیسیت، کلریت و کلسیت مواد باطله در این کانسار هستند. مالاکیت، آزوریت، اسمیت‌زونیت، سروزیت، گوتیت، پیرولولزیت ثانویه و براونیت نیز در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. ساخت و بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه-رگچه‌ای، برشی، پُرکننده فضای خالی، شانهای، کاکلی، گل‌کلمی، پوسته‌ای، پرماند، بازماندی، اسکلتی و جانیشینی است.

پیریت به صورت بلورهای ریز تا درشت (اندازه بین ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر) نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و گاهی شکل‌دار با بافت دانه‌پراکنده دیده می‌شود (شکل ۶-۱). پیریت‌های درشت اغلب به گوتیت دگرسان شده و بافت‌های بازماندی و اسکلتی نشان می‌دهند (شکل ۶-۲). پیریت به صورت ادخال درون گالن و اسفالریت نیز دیده می‌شود که بیانگر تشکیل آن قبل از گالن و اسفالریت است (شکل ۶-۳). گاهی پیریت با گالن و اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۶-۴). کالکوپیریت معمولاً به صورت بلورهای درشت (تا اندازه ۱ سانتی‌متر) نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل قابل مشاهده است. کالکوپیریت بیشتر به طور کامل به مالاکیت و آزوریت دگرسان شده است. کالکوپیریت هم‌رشد با پیریت، گالن و اسفالریت نیز دیده می‌شود (شکل ۶-۵). گالن بیشتر به صورت بلورهای درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با اندازه تا ۲ سانتی‌متر قابل مشاهده است. گالن اغلب هم‌زمان با کالکوپیریت و اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۶-۶)؛ اما در برخی از بخش‌ها، ادخال‌های گالن درون اسفالریت قابل مشاهده است (شکل ۶-۷). گالن تا حدودی به سروزیت دگرسان شده است (شکل ۶-۸). اسفالریت به صورت بلورهای با رنگ عسلی روشن (فقیر از آهن) در کانسار قیچاق دیده می‌شود. این کانی معمولاً به صورت بلورهای درشت (تا اندازه ۸ سانتی‌متر) نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل قابل مشاهده است. اسفالریت اغلب

هم‌زمان با کالکوپیریت و گالن تشکیل شده است (شکل ۶-۱) تا (F). در برخی از بخش‌ها، اسفالریت بلورهای پیریت (شکل ۶-۲) و گالن (شکل ۶-۳) را دربر می‌گیرد که نشان می‌دهد اسفالریت بعد از پیریت و گالن تشکیل شده است. اسفالریت گاهی از حاشیه‌ها به اسمیت‌زونیت دگرسانی نشان می‌دهد. طلا به مقدار کم و به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا اندازه بیشینه ۲۰۰ میکرون در بخش‌های کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۶-۴). طلا معمولاً به صورت آزاد درون کوارتز و یا بخش‌های گوتیتی شده پیریت‌ها حضور دارد. رآلگار به میزان اندک و در بخش‌های سطحی رگه کانه‌دار دوم و در همراهی با بخش‌های گالن و اسفالریت‌دار دیده می‌شود (شکل ۶-۳).

کانی‌های منگنزدار در کانسار قیچاق شامل پسیلوملان، پیرولولزیت و براونیت هستند. پسیلوملان بیشتر به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار حضور دارد. این کانی معمولاً با پیرولولزیت‌های اولیه هم‌رشد بوده و بافت گل‌کلمی دارد (شکل ۶-۱). پسیلوملان معمولاً از حاشیه‌ها به پیرولولزیت ثانویه و یا براونیت دگرسان شده است (شکل ۶-۲ و ۳). پیرولولزیت به دو صورت اولیه و ثانویه دیده می‌شود. پیرولولزیت‌های اولیه به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل و نیمه‌شکل‌دار و هم‌رشد با پسیلوملان بوده و بافت گل‌کلمی دارند (شکل ۶-۴). پیرولولزیت‌های ثانویه محصول دگرسانی پسیلوملان هستند (شکل ۶-۵ و ۶). براونیت محصول دگرسانی پسیلوملان و پیرولولزیت‌های اولیه است (شکل ۶-۷).

کوارتز، کلسیت، سربیسیت و کلریت، کانی‌های باطله در کانسار قیچاق هستند. کوارتز کانی باطله اصلی در این کانسار است که معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار (اندازه کمتر از ۲۰۰ میکرون تا ۲ سانتی‌متر) در رگه-رگچه‌های سیلیسی دیده می‌شود. کوارتزها معمولاً شفاف و بی‌رنگ هستند؛ اما در برخی از قسمت‌ها، کوارتزهای خاکستری تا شیری رنگ نیز دیده می‌شود.

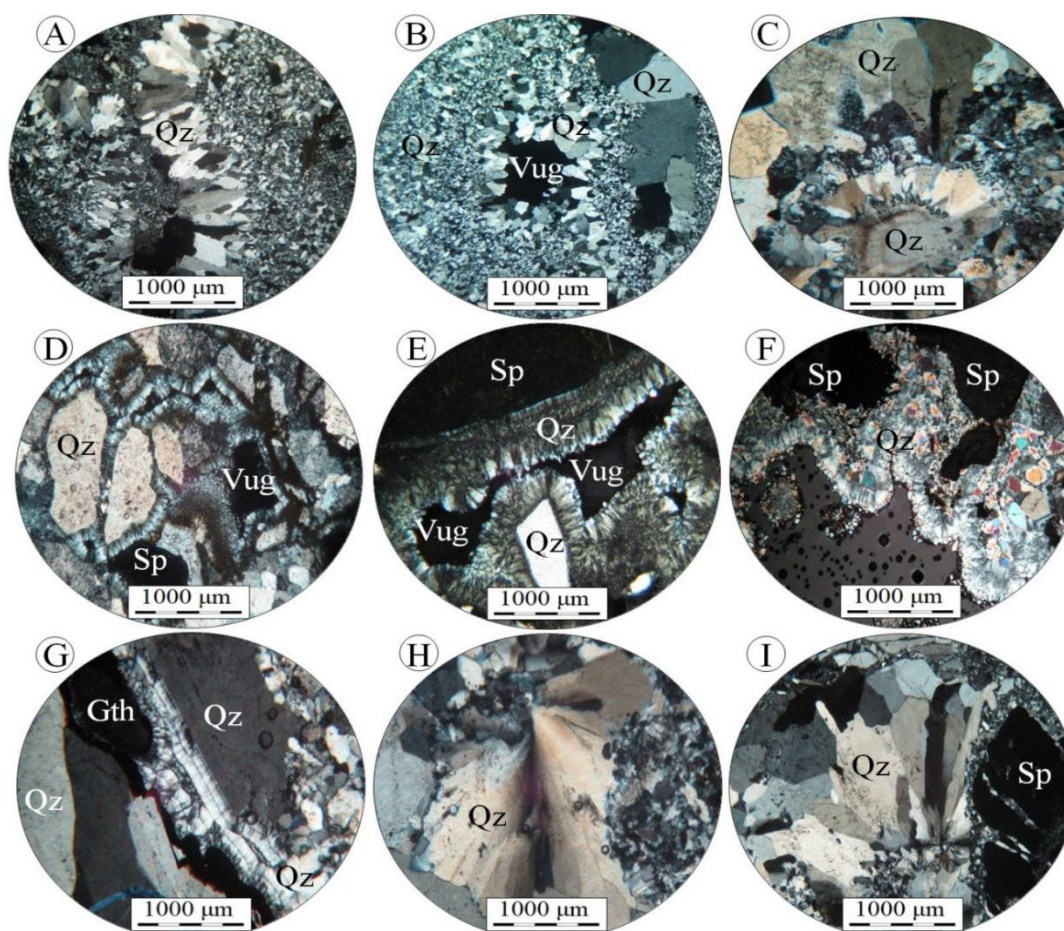


**شکل ۶.** تصویرهای میکروسکوپی (نور بازتابی) از کانی‌های معدنی در کانسار قیچاق. A: بلورهای ریز پیریت با بافت دانه‌پراکنده، B: درشت‌بلور پیریت دگرسان‌شده به گوتیت و تشکیل بافت‌های بازماندی و اسکلتی، C: ادخال پیریت داخل اسفالریت. هم‌رشدی گالن و اسفالریت نیز دیده می‌شود، D: هم‌رشدی پیریت، گالن و اسفالریت، E: هم‌رشدی کالکوپیریت، پیریت، گالن و اسفالریت، F: هم‌رشدی گالن و اسفالریت، G: ادخال گالن درون اسفالریت، H: بلور بی‌شکل گالن دگرسان‌شده به سروزیت از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها، I: ذرات طلای آزاد، J: هم‌رشدی بلورهای پسیلوملان و پیرولوزیت اولیه با بافت گل‌کلمی، K: بلور درشت و بی‌شکل پسیلوملان هم‌رشد با پیرولوزیت اولیه با بافت گل‌کلمی. پسیلوملان به پیرولوزیت ثانویه دگرسانی نشان می‌دهد و L: بلور بی‌شکل پسیلوملان که از حاشیه به پیرولوزیت ثانویه و براونیت دگرسان‌شده است. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Au: طلای آزاد، Br: براونیت، Ccp: کالکوپیریت، Cer: سروزیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Ps: پسیلوملان، Py: پیریت، Pyr1: پیرولوزیت اولیه، Pyr2: پیرولوزیت ثانویه، Sp: اسفالریت).

**Fig. 6.** Photomicrographs (reflected light) of ore minerals in the Qebchaq deposit. A: Fine-grained disseminated pyrite, B: Coarse-grained pyrite altered to goethite, forming relict and skeletal textures, C: Inclusion of pyrite in sphalerite. Intergrowth of galena and sphalerite is also observed, D: Intergrowth of pyrite, galena and sphalerite, E: Intergrowth of chalcopyrite, pyrite, galena and sphalerite, F: Intergrowth of galena and sphalerite, G: Inclusion of galena in sphalerite, H: Anhedronal galena crystal altered to cerussite along boundaries and cracks, I: Native gold grains, J: Intergrowth of psilomelane and colloform primary pyrolusite, K: Anhedronal coarse-grained psilomelane crystal intergrowth with colloform primary pyrolusite. Psilomelane altered to secondary pyrolusite, and L: Anhedronal psilomelane crystal altered to secondary pyrolusite and braunite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010). (Au: Native gold, Br: braunite, Ccp: chalcopyrite, Cer: cerussite, Gn: galena, Gth: goethite, Ps: psilomelane, Py: pyrite, Pyr1: primary pyrolusite, Pyr2: secondary pyrolusite, Sp: sphalerite).

گل کلمی را نشان می‌دهد (شکل ۴-D و E و شکل ۵-K و L). سریسیت به صورت بلورهای ریز با اندازه بیشینه تا ۵۰ میکرون (شکل ۴-C) و کلریت به صورت بلورهای قهوه‌ای روشن با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و اسفرولیتی (شکل ۴-C و F تا H)، در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده می‌شوند.

کوارتزها بیشتر بافت شانهای و پرکننده فضای خالی دارند (شکل ۷-A و B). در کوارتزهای موجود در رگه-رگچه‌های کانه‌دار و سیمان گرمایی برش‌ها، بافت‌های کاکلی (شکل ۷-C تا E)، گل کلمی-پوسته‌ای (شکل ۷-E تا G) و پرماند (شکل ۷-H و I) نیز قابل مشاهده است. کلسیت دومین کانی باطله در کانسار قیچاق است که معمولاً بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع بافت کوارتز در کانسار قیچاق. A: کوارتز با بافت شانهای، B: کوارتز با بافت پرکننده فضای خالی، C، D و E: بافت کاکلی کوارتز. در E، بافت‌های گل کلمی و پوسته‌ای نیز قابل مشاهده است، F و G: کوارتزهای ریزبلور با بافت‌های گل کلمی و پوسته‌ای، H و I: کوارتزهای درشت‌بلور با بافت پرماند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gth: گوتیت، Qz: کوارتز، Sp: اسفالریت، Vug: فضای خالی).

**Fig. 7.** Photomicrographs (transmitted polarized light, XPL) of quartz textures in the Qebchaq deposit. A: Quartz with comb texture, B: Vug infill quartz, C, D and E: Cockade texture of quartz. In E, colloform and crustiform textures of quartz are also observed, F and G: Fine-grained quartz crystals with colloform and crustiform textures, H and I: Coarse-grained quartz crystals with plumose texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Gth: goethite, Qz: quartz, Sp: sphalerite, Vug: open space).



## توالی همبرزادی

بر اساس بررسی‌های صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی، توالی هم‌یافتی کانی‌ها در کانسار قیچاق را می‌توان به پنج مرحله تقسیم کرد (شکل ۸): مرحله اول، با حضور پیریت به صورت دانه‌پراکنده در متن سنگ میزبان سیلیسی شده، مشخص می‌شود. مرحله دوم با رگه-رگچه‌های کوارتزی-سولفیدی و برش‌های گرمابی مشخص می‌شود که حاوی مقادیر متغیری پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت  $\pm$  طلا  $\pm$  رآلگار هستند. مرحله سوم با حضور کوارتز و اکسیدها-هیدروکسیدهای منگنز (پسیلوملان و پیرولوزیت اولیه) در رگه-رگچه‌ها و سیمان گرمابی برش‌ها

مشخص می‌شود. بافت‌های برشی، کاکلی، گل‌کلمی، پوسته‌ای، شانه‌ای و پرماند از بافت‌های مهم مراحل دوم و سوم هستند. مرحله چهارم با حضور رگه-رگچه‌های کوارتز-کلریت-کلسیت مشخص می‌شود. مرحله پنجم شامل کلسیت با بافت‌های رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضاها‌ی خالی است. مرحله برون‌زاد با تشکیل کانی‌های ثانویه مانند مالاکیت، آزوریت، سرروزیت، اسمیت‌زونیت، گوتیت، پیرولوزیت ثانویه و براونیت با بافت‌های جانیشینی، پرکننده فضاها‌ی خالی، بازماندی و اسکلتی مشخص می‌شود.

|                      | Stage 1  | Stage 2  | Stage 3  | Stage 4  | Stage 5 | Supergene |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|
| Pyrite               |          | ████████ |          |          |         |           |
| Chalcopyrite         |          | ████████ |          |          |         |           |
| Galena               |          | ████████ |          |          |         |           |
| Sphalerite           |          | ████████ |          |          |         |           |
| Gold                 |          | ████████ |          |          |         |           |
| Realgar              |          | ████████ |          |          |         |           |
| Psilomelane          |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Pyrolusite           |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Malachite-Azurite    |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Cerussite            |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Smithsonite          |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Braunite             |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Goethite             |          | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Quartz               | ████████ | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Sericite-illite      | ████████ | ████████ | ████████ |          |         |           |
| Calcite              | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Chlorite             |          | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Disseminated         | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Brecciated           | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Vein-Veinlets        | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Comb                 | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Cockade              | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Colloform-Crustiform | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Plumose              | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Vug Infill           | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Relict-Skeletal      | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |
| Replacement          | ████████ | ████████ | ████████ | ████████ |         |           |

شکل ۸. توالی هم‌یافتی، فراوانی نسبی، ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانسار قیچاق

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

جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

## داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های کانسار قیچاق در

**جدول ۱.** داده‌های تجزیه شیمیایی (بر حسب گرم در تن) برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار قیچاق. داده میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم از صحتبلو (Sohbatloo, 2022) است. (Q-01: گدازه داسیتی، Q-02: توده کوارتز دیوریتی - گابرویی دگرسان‌شده، Q-03: میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم، Q-04: رگه برشی کوارتز طلا دار، Q-05 تا Q-07: رگه کوارتز - سولفیدی منگنز دار، Q-08 تا Q-10: رگه کوارتز - گالن - اسفالریت، Q-11 و Q-12: رگه برشی کوارتز - پیریت، Q-13 و Q-14: رگه کوارتز - کالکوپیریت)

**Table 1.** Geochemical data (in ppm) for mineralized samples and host rocks from the Qebchaq deposit. Mean data of fresh quartz diorite-gabbro body is from Sohbatloo (2022). (Q-01: dacitic lava, Q-02: altered quartz diorite-gabbro body, Q-03: fresh quartz diorite-gabbro body, Q-04: Au-bearing breccia Qz vein, Q-05 to Q-07: Mn-bearing Qz-sulfide vein, Q-08 to Q-10: Qz-Gn-Sp vein, Q-11 and Q-12: Qz-Py breccia vein, Q-13 and Q-14: Qz-Ccp vein)

|      | Ag    | As    | Ba    | Cd    | Ce   | Co     | Cr   | Cs   | Cu     | Dy     | Er   | Eu    | Fe     |
|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|------|------|--------|--------|------|-------|--------|
| Q-01 | 0.4   | 20.6  | 1083  | 2.6   | 43   | 1.9    | 5    | 3    | 12     | 2.02   | 0.94 | 1.36  | 10941  |
| Q-02 | 0.2   | 18.9  | 630   | 0.3   | 27   | 19.6   | 7    | 2.4  | 55     | 3.79   | 1.81 | 1.09  | 48398  |
| Q-03 | 0.23  | 29.63 | 390   | 046   | 27.7 | 19.5   | 16.4 | 0.99 | 42.6   | 3.73   | 1.73 | 0.87  | 46935  |
| Q-04 | 6.4   | >100  | 887   | 7.7   | 30   | 2.6    | 17   | 2.2  | 393    | 2.09   | 0.76 | 1.33  | 60261  |
| Q-05 | 9.2   | >100  | 1927  | 43    | 16   | 14     | 13   | 1.1  | 751    | 5.07   | 2.78 | 2.62  | 93719  |
| Q-06 | 45    | >100  | 1662  | 22.6  | 7    | 9.9    | 17   | 4    | 669    | 1.3    | 0.33 | 1.83  | 19537  |
| Q-07 | 6.2   | >100  | 318   | 47.2  | 13   | 3.5    | 20   | <0.5 | 474    | 2.26   | 0.96 | 0.94  | 28930  |
| Q-08 | 118.7 | >100  | 9     | 936.1 | 9    | 2.8    | 6    | <0.5 | 659    | 0.9    | 0.15 | 0.3   | 7381   |
| Q-09 | 163   | >100  | 4     | 333.3 | 102  | 4.4    | 9    | <0.5 | 300    | 2.9    | 1.08 | 1.49  | 12967  |
| Q-10 | 48.5  | >100  | 12    | 346.5 | 39   | 2.5    | 12   | <0.5 | 1370   | 2.31   | 0.72 | 0.65  | 22131  |
| Q-11 | 6.2   | >100  | 1130  | 2.8   | 13   | 1.1    | 6    | 0.6  | 50     | 1.08   | 0.31 | 1.25  | 10795  |
| Q-12 | 5.4   | >100  | 770   | 2.8   | 22   | 4.4    | 15   | 0.5  | 49     | 1.15   | 0.39 | 0.89  | 35144  |
| Q-13 | 262.2 | >100  | 254   | 29.6  | 3    | 16.6   | 22   | 1.6  | >50000 | 0.86   | 0.2  | 0.42  | 92092  |
| Q-14 | 208.1 | >100  | 33    | 32.6  | 7    | 10.6   | 8    | <0.5 | >50000 | 1.21   | 0.32 | 0.3   | 33274  |
|      | Gd    | Hf    | K     | La    | Lu   | Mn     | Nb   | Nd   | P      | Pb     | Pr   | Rb    | S      |
| Q-01 | 2.46  | 1.9   | 30939 | 27    | 0.2  | 547    | 8.5  | 12.7 | 189    | 436    | 4.67 | 103   | 494    |
| Q-02 | 2.84  | 0.51  | 34832 | 15    | 0.24 | 1445   | 10   | 13.9 | 539    | 54     | 3.89 | 105   | 341    |
| Q-03 | 2.77  | 0.68  | 8641  | 15.4  | 0.28 | 998    | 8.14 | 14.3 | 565    | 58.3   | 3.82 | 18.14 | 319    |
| Q-04 | 2.34  | 0.64  | 4879  | 17    | 0.1  | 215    | 4.8  | 11.2 | 1438   | 2511   | 3.46 | 16    | 6098   |
| Q-05 | 2.95  | <0.5  | 2028  | 10    | 0.42 | >20000 | 2.5  | 8.8  | 1452   | 552    | 2.27 | 2     | 4383   |
| Q-06 | 1.37  | <0.5  | 1588  | 2     | <0.1 | >20000 | 2.2  | 3.2  | 130    | 4350   | 0.82 | 2     | 1067   |
| Q-07 | 1.89  | <0.5  | 677   | 9     | <0.1 | >20000 | 2.3  | 7.2  | 138    | 2597   | 1.99 | <1    | 688    |
| Q-08 | 1.32  | <0.5  | 116   | 6     | <0.1 | 1022   | 2.1  | 3    | 60     | >30000 | 1.2  | <1    | >30000 |
| Q-09 | 4.49  | <0.5  | 111   | 72    | <0.1 | 1789   | 2.1  | 33.6 | 51     | >30000 | 9.44 | <1    | >30000 |
| Q-10 | 2.72  | <0.5  | 124   | 26    | <0.1 | 593    | 2.1  | 17.3 | 81     | >30000 | 4.55 | <1    | >30000 |
| Q-11 | 1.25  | <0.5  | 1704  | 8     | <0.1 | 146    | 3.9  | 3.2  | 86     | 392    | 1.21 | 1     | 2085   |
| Q-12 | 1.61  | <0.5  | 1129  | 13    | <0.1 | 471    | 3.4  | 5.8  | 116    | 441    | 2.17 | <1    | 10622  |
| Q-13 | 1.16  | <0.5  | 5701  | 3     | <0.1 | 3494   | 2.4  | 1.5  | 247    | 1206   | 0.63 | 17    | 2327   |
| Q-14 | 1.37  | <0.5  | 434   | 5     | <0.1 | 106    | 2.3  | 3.8  | 1422   | 205    | 1.04 | <1    | 2848   |

**ادامه جدول ۱.** داده‌های تجزیه شیمیایی (بر حسب گرم در تن) برای نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های میزبان در کانسار قیچاق. داده میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم از صحتلو (Sohbatloo, 2022) است. (Q-01: گدازه داسیتی، Q-02: توده کوارتز دیوریتی - گابرویی دگرسان‌شده، Q-03: میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم، Q-04: رگه برشی کوارتز طلا دار، Q-05 تا Q-07: رگه کوارتز - سولفیدی منگنز دار، Q-08 تا Q-10: رگه کوارتز - گالن - اسفالریت، Q-11 و Q-12: رگه برشی کوارتز - پیریت، Q-13 و Q-14: رگه کوارتز - کالکوپریت)

**Table 1 (Continued).** Geochemical data (in ppm) for mineralized samples and host rocks from the Qebchaq deposit. Mean data of fresh quartz diorite-gabbro body is from Sohbatloo (2022). (Q-01: dacitic lava, Q-02: altered quartz diorite-gabbro body, Q-03: fresh quartz diorite-gabbro body, Q-04: Au-bearing breccia Qz vein, Q-05 to Q-07: Mn-bearing Qz-sulfide vein, Q-08 to Q-10: Qz-Gn-Sp vein, Q-11 and Q-12: Qz-Py breccia vein, Q-13 and Q-14: Qz-Ccp vein)

|      | Sb   | Sm    | Sr  | Ta   | Tb   | Th    | Ti   | Tm   | U    | Y    | Yb    | Zn    | Zr   |
|------|------|-------|-----|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| Q-02 | 6.8  | 4.47  | 83  | 1.02 | 0.32 | 9.74  | 1216 | 0.12 | 3.2  | 9.7  | 0.9   | 397   | 56   |
| Q-03 | 2.4  | 3.62  | 401 | 0.85 | 0.51 | 10.37 | 4262 | 0.24 | 0.6  | 18   | 2     | 137   | 11   |
| Q-04 | 2.36 | 2.48  | 328 | 0.83 | 0.50 | 3.91  | 4586 | 0.25 | 0.87 | 17.9 | 2.13  | 136   | 14.8 |
| Q-10 | 32.8 | 3.92  | 295 | 0.5  | 0.35 | 6.07  | 1314 | <0.1 | 3.6  | 10.2 | 1.1   | 504   | 29   |
| Q-14 | >100 | 8.14  | 356 | 0.36 | 0.64 | 2.22  | <10  | 0.39 | 3.4  | 33.5 | 3.1   | 6725  | 5    |
| Q-16 | >100 | 5.13  | 164 | 0.33 | 0.21 | 0.73  | <10  | <0.1 | 1.6  | 5.1  | 0.3   | 2215  | <5   |
| Q-21 | >100 | 0.74  | 142 | 0.37 | 0.35 | 0.8   | <10  | 0.15 | 1.6  | 11.7 | 0.7   | 13008 | <5   |
| Q-24 | >100 | <0.02 | 23  | 0.29 | 0.17 | 0.48  | <10  | <0.1 | 1    | 2.7  | <0.05 | >3%   | <5   |
| Q-31 | >100 | 3.24  | 7   | 0.32 | 0.53 | 0.59  | <10  | <0.1 | 2.4  | 11.1 | 0.4   | >3%   | <5   |
| Q-10 | >100 | 0.97  | 14  | 0.33 | 0.43 | 0.67  | <10  | <0.1 | 3.5  | 10.8 | 0.4   | >3%   | <5   |
| Q-11 | 16.6 | 2.47  | 30  | 0.55 | 0.17 | 2.44  | 318  | <0.1 | 1.7  | 5    | 0.4   | 133   | 29   |
| Q-12 | 16.5 | 1.33  | 33  | 0.43 | 0.22 | 2.27  | 59   | <0.1 | 1.5  | 4.8  | 0.4   | 131   | 14   |
| Q-13 | >100 | <0.02 | 31  | 0.33 | 0.14 | 1.78  | <10  | <0.1 | 1.6  | 3    | 0.5   | 4603  | <5   |
| Q-14 | >100 | <0.02 | 20  | 0.29 | 0.18 | 0.89  | <10  | <0.1 | 6.9  | 7.2  | 0.2   | 20226 | <5   |

### ضرایب همبستگی عناصر

ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز در کانسار قیچاق که بر اساس داده‌های جدول ۲ محاسبه شده است، در جدول ۳ آورده شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. بر این اساس، طلا در عمل با هیچ‌یک از عناصر همبستگی مثبت نداشته و با برخی عناصر (مانند روی و مس) همبستگی منفی ضعیف نشان می‌دهد (جدول ۳ و شکل ۹) که با عیارهای بالای طلا در رگه‌های کوارتزی مجزا همخوانی دارد. نقره همبستگی مثبت ضعیف با آنتیموان (۰/۲۱)، همبستگی مثبت متوسط با سرب (۰/۴۳)، روی (۰/۴۴) و آرسنیک (۰/۵۳) و همبستگی مثبت قوی با کادمیم (۰/۷۳) دارد (جدول ۳ و شکل ۹). همبستگی مثبت

نقره با سرب و روی می‌تواند به حضور نقره در شبکه کانی‌های گالن و اسفالریت دلالت داشته باشد. نقره همبستگی مشخصی با طلا و مس نشان نمی‌دهد. سرب همبستگی مثبت قوی با آنتیموان (۰/۸۰) و کادمیم (۰/۷۲)، همبستگی مثبت متوسط با آرسنیک (۰/۶۳) و روی (۰/۶۲)، مس (۰/۵۵) و نقره (۰/۴۳) نشان می‌دهد (جدول ۳ و شکل ۹). همبستگی مثبت سرب، روی و مس با همراهی این عناصر در رگه‌های کوارتزی سرب و روی و مس دار در منطقه مطابقت دارد. روی همبستگی مثبت متوسط با کادمیم (۰/۶۵) نشان می‌دهد که این امر می‌تواند به دلیل شباهت ویژگی‌های شیمیایی  $Zn^{2+}$  با  $Cd^{2+}$  و جایگزینی کادمیم به جای روی در ساختار اسفالریت باشد. روی

همبستگی مثبت متوسط با سرب (۰/۶۲) و آنتیموان (۰/۶۰) و مثبت  
 ضعیف با مس (۰/۴۹)، نقره (۰/۴۴) و آرسنیک (۰/۲۱) دارد (جدول  
 ۳ و شکل ۹). مس همبستگی مثبت با آنتیموان (۰/۶۱)، سرب (۰/۵۵)،  
 روی (۰/۴۹) و کادمیم (۰/۴۲) و همبستگی مثبت ضعیف با آرسنیک  
 (۰/۲۹) دارد. مس با نقره و طلا همبستگی مشخصی نشان نمی‌دهد  
 (جدول ۳ و شکل ۹).

**جدول ۲.** داده‌های تجزیه شیمیایی طلا (بر حسب میلی‌گرم در تن) و عناصر کانه‌ساز (بر حسب گرم در تن) برای نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های کانه‌دار در کانسار قیچاق.

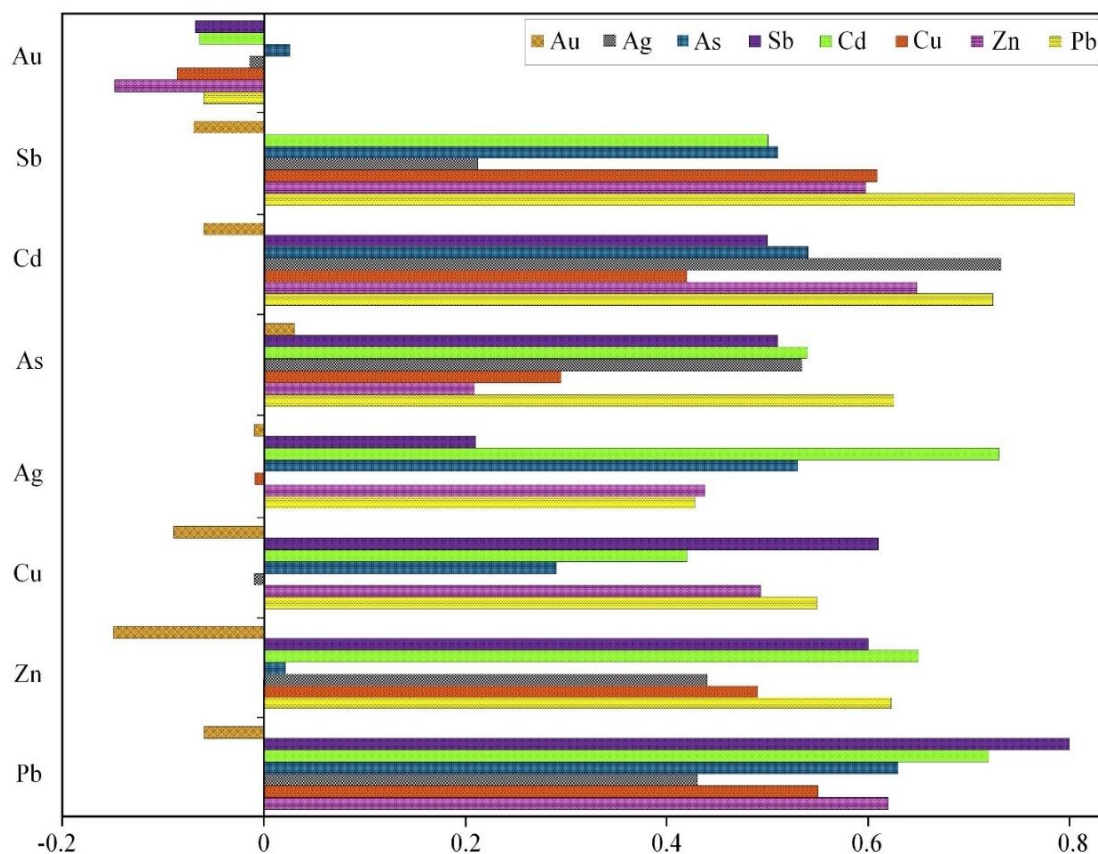
**Table 2.** Geochemical data of gold (in ppb) and ore-forming elements (in ppm) for samples collected from mineralized veins at the Qebchaq deposit.

|      | Pb    | Zn     | Cu   | Ag   | As     | Cd     | Sb     | Au   |
|------|-------|--------|------|------|--------|--------|--------|------|
| Q-15 | 4     | 373    | 237  | 0.35 | 59.5   | 8.4    | 1.03   | 5    |
| Q-16 | 9     | 69     | 31   | 0.28 | 676.2  | 3      | 0.86   | 7    |
| Q-17 | 20000 | 484    | 340  | 45   | 10000  | 142.5  | 141.3  | 113  |
| Q-18 | 5841  | 1744   | 348  | 8.5  | 3159   | 25     | 260    | 4641 |
| Q-19 | 138   | 593    | 73   | 0.38 | 1122.7 | 7.1    | 21.4   | 153  |
| Q-20 | 3217  | 857    | 430  | 2.5  | 952.8  | 8.5    | 30.9   | 37   |
| Q-21 | 3156  | 2543   | 262  | 2.9  | 3031.2 | 27     | 474.4  | 19   |
| Q-22 | 3228  | 2110   | 2808 | 3.3  | 3938.3 | 62.9   | 34.7   | 435  |
| Q-23 | 20000 | 6965   | 1858 | 6.8  | 3849.5 | 33.9   | 38.9   | 98   |
| Q-24 | 718   | 20000  | 1058 | 2.9  | 1331   | 31.6   | 27.3   | 17   |
| Q-25 | 3422  | 13772  | 1679 | 7.5  | 1570.6 | 31.2   | 53.4   | 24   |
| Q-26 | 20000 | 20000  | 402  | 45.8 | 1935.7 | 193.4  | 186.7  | 198  |
| Q-27 | 2731  | 5799   | 887  | 28.5 | 1382   | 21.9   | 202.4  | 24   |
| Q-28 | 1756  | 2871   | 230  | 11.7 | 6177.5 | 33     | 102.3  | 42   |
| Q-29 | 708   | 2076   | 182  | 10.7 | 2817.8 | 21.5   | 201.1  | 57   |
| Q-30 | 20000 | 20000  | 401  | 34.9 | 5995.8 | 85.5   | 2632.3 | 76   |
| Q-31 | 4044  | 4201.3 | 815  | 0.5  | 1385   | 16.32  | 69     | 5    |
| Q-32 | 7993  | 289.75 | 176  | 1.5  | 4362   | 2.43   | 225    | 123  |
| Q-33 | 3155  | 7273.3 | 1197 | 0.8  | 755    | 92.51  | 47     | 5    |
| Q-34 | 2441  | 2193.4 | 408  | 1.1  | 2367   | 18.53  | 72     | 198  |
| Q-35 | 3390  | 1872.3 | 426  | 3.4  | 2171   | 30.5   | 43     | 1169 |
| Q-36 | 1600  | 1507.6 | 368  | 0.84 | 1992   | 6.25   | 66     | 87   |
| Q-37 | 2381  | 1458.3 | 155  | 1.2  | 1289   | 5.39   | 46     | 47   |
| Q-38 | 313   | 597.06 | 284  | 0.65 | 774    | 8.26   | 63     | 92   |
| Q-39 | 4882  | 276.05 | 353  | 2.1  | 3064   | 2.09   | 520    | 176  |
| Q-40 | 11031 | 6712.7 | 1073 | 3.8  | 3475   | 47.14  | 809    | 51   |
| Q-41 | 51773 | 22110  | 3969 | 12.6 | 7452   | 155.63 | 6011   | 5    |
| Q-42 | 35103 | 12123  | 567  | 8.6  | 3754   | 78.75  | 1075   | 87   |

**جدول ۳.** ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه‌شده بر مبنای جدول ۲) برای نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های کانهدار در کانسار قیچاق

**Table 3.** Elemental correlation coefficient (calculated based on Table 2) for samples collected from mineralized veins at the Qebchaq deposit.

|    | Pb    | Zn    | Cu    | Ag    | As   | Cd    | Sb    | Au |
|----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----|
| Pb | 1     |       |       |       |      |       |       |    |
| Zn | 0.62  | 1     |       |       |      |       |       |    |
| Cu | 0.55  | 0.49  | 1     |       |      |       |       |    |
| Ag | 0.43  | 0.44  | -0.01 | 1     |      |       |       |    |
| As | 0.63  | 0.21  | 0.29  | 0.53  | 1    |       |       |    |
| Cd | 0.72  | 0.65  | 0.42  | 0.73  | 0.54 | 1     |       |    |
| Sb | 0.80  | 0.60  | 0.61  | 0.21  | 0.51 | 0.50  | 1     |    |
| Au | -0.06 | -0.15 | -0.09 | -0.01 | 0.03 | -0.06 | -0.07 | 1  |



**شکل ۹.** نمودار همبستگی عناصر کانه‌ساز برای نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های کانهدار در کانسار قیچاق

**Fig. 9.** Elemental chart of ore-forming elements for samples collected from mineralized veins at the Qebchaq deposit

### الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانه‌دار، گدازه داسیتی و توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم و دگرسان‌شده که نسبت به کندریت (Thompson, 1982) بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۰-A و B نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نمونه‌های کانه‌دار الگوی تقریباً مشابهی دارند که می‌تواند بیانگر تشکیل آنها در ارتباط با یک سامانه کانه‌زایی باشد. تفاوت‌های موجود در آنومالی‌های مثبت و منفی برخی عناصر در رگه‌های کانه‌دار بیانگر تفاوت کانی‌شناسی آنها است؛ از طرف دیگر، الگوی عناصر کمیاب در نمونه‌های کانه‌دار تقریباً مشابه با الگوی این عناصر در گدازه داسیتی (شکل ۱۰-A) و توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم و دگرسان‌شده (شکل ۱۰-B) است. در حالت کلی، نمونه‌های کانه‌دار در مقایسه با سنگ‌های میزبان از عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند که این امر می‌تواند در ارتباط با شسته‌شدن این عناصر طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی باشد.

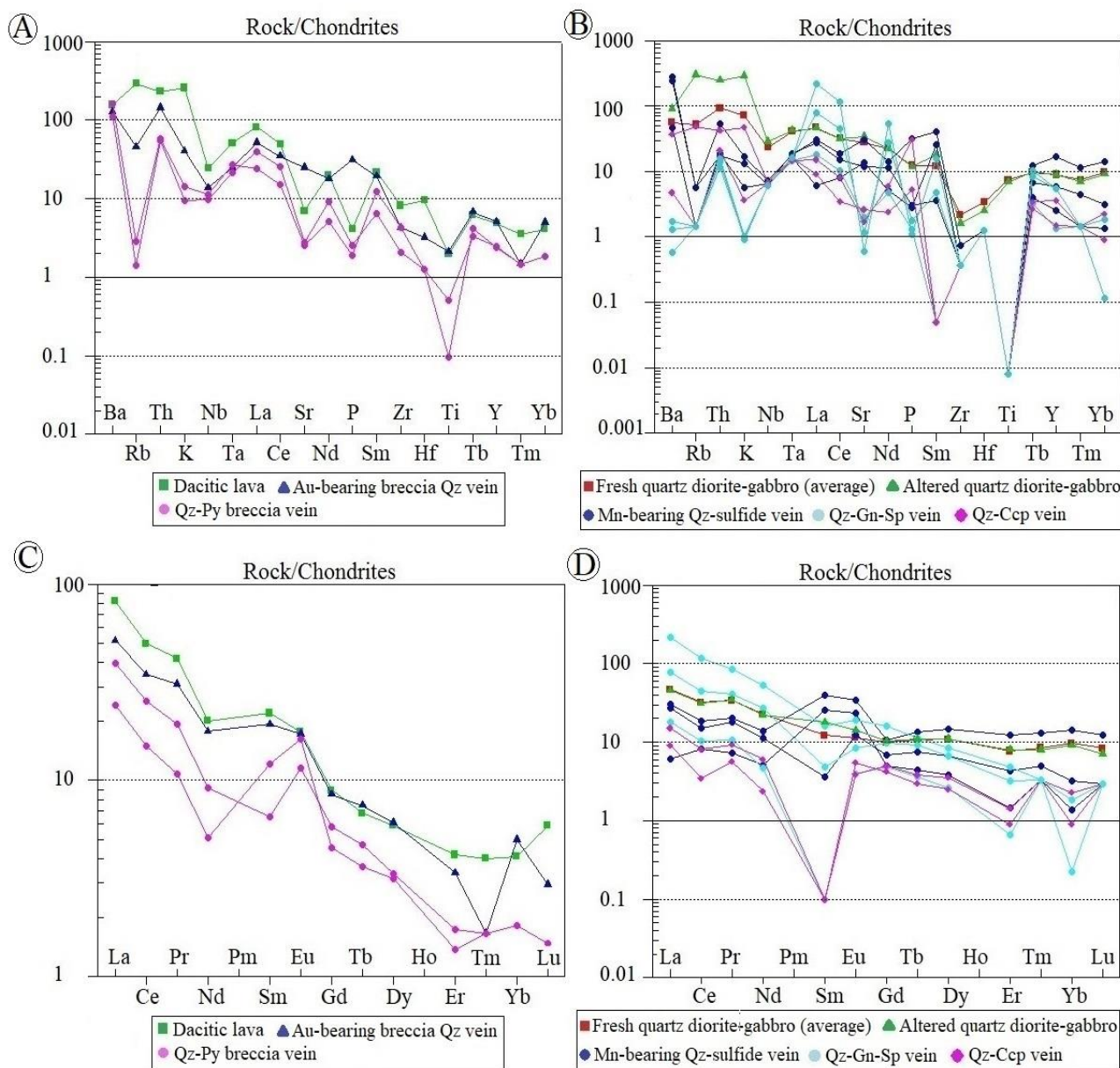
الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (Nakamura, 1974) برای نمونه‌های کانه‌دار، گدازه داسیتی و توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم و دگرسان‌شده در شکل ۱۰-C و D نشان داده شده است. بر اساس این شکل، الگوی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار تقریباً شبیه با الگوی این عناصر در سنگ‌های میزبان است که این امر نیز می‌تواند بیانگر نقش احتمالی سنگ‌های میزبان در تأمین عناصر برای کانه‌زایی باشد. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز - پیریت، رگه برشی کوارتز طلا‌دار و گدازه داسیتی، پرشیب با نسبت بالای عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین است (شکل ۱۰-C)؛ در حالی که الگوی این عناصر برای نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز - سولفیدی منگن‌دار، رگه کوارتز - گالن - اسفالریت، رگه کوارتز - کالکوپیریت و توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم و دگرسان‌شده کم شیب بوده و دارای نسبت متوسط تا پایین عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین است (شکل ۱۰-D).

### تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار

برای بررسی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عنصری مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی در کانسار قیچاق، مقادیر عناصر در نمونه‌های کانه‌دار نسبت به مقادیر آنها در گدازه داسیتی و توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم و دگرسان‌شده بهنجار شد (شکل ۱۱، شکل ۱۲ و شکل ۱۳).

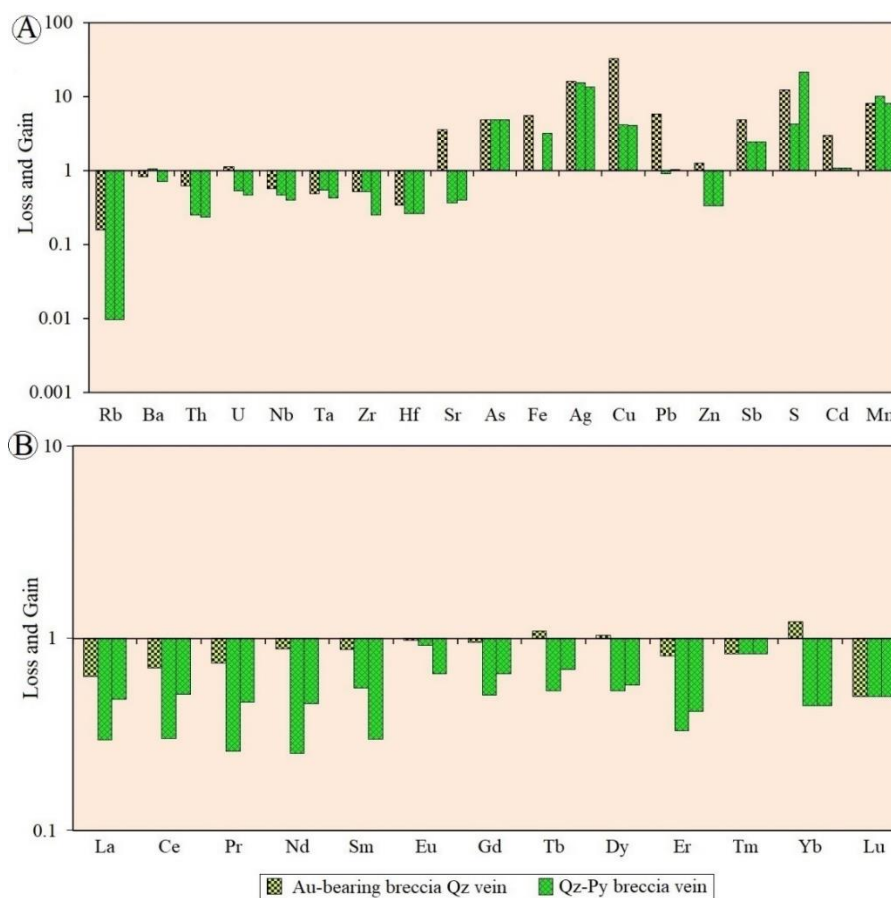
بر اساس شکل ۱۱-A، نمونه‌های برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز - پیریت و رگه برشی کوارتز طلا‌دار نسبت به گدازه داسیتی میزبان از عناصر Pb، Cu، Ag، Fe، As، Cd، S، Sb، Zn و Mn غنی‌شدگی و از سایر عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که نمونه‌های برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز - پیریت در عنصر Zn تهی‌شدگی داشته و نمونه برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز طلا‌دار در عنصر Sr و تا حدودی U غنی‌شدگی نشان می‌دهد. نمونه‌های برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز - پیریت و رگه برشی کوارتز طلا‌دار نسبت به گدازه داسیتی اغلب از همه عناصر کمیاب خاکی تهی‌شده‌اند و فقط نمونه برداشت‌شده از رگه برشی کوارتز طلا‌دار غنی‌شدگی ضعیفی در عناصر Dy، Tb و Yb نشان می‌دهد (شکل ۱۱-B).

نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز - سولفیدی منگن‌دار، رگه کوارتز - گالن - اسفالریت و رگه کوارتز - کالکوپیریت نسبت به میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم از عناصر S، Cd، Sb، Zn، Pb، Cu، Ag، As، U و Mn غنی و از سایر عناصر کمیاب تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۲-A). تنها دو نمونه از نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز - سولفیدی منگن‌دار در عنصر Ba غنی‌شدگی دارند. نمونه‌های کانه‌دار نسبت به میانگین توده کوارتز دیوریتی - گابرویی سالم در اغلب عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۲-B). نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز - سولفیدی منگن‌دار و رگه کوارتز - گالن - اسفالریت در برخی از عناصر کمیاب خاکی سبک و یکی از نمونه‌های برداشت‌شده از رگه‌های کوارتز - سولفیدی منگن‌دار در برخی از عناصر کمیاب خاکی سنگین غنی‌شدگی دارند.



شکل ۱۰. A: الگوی تغییرات عناصر کمیاب برای رگه‌های کانه‌دار و گدازه داسیتی در کانسار قیچاق که نسبت به کندریت (Thompson, 1982) بهنجار شده‌اند، B: الگوی تغییرات عناصر کمیاب برای رگه‌های کانه‌دار و توده کوارتز دیوریتی-گابروی سالم و دگرسان‌شده در کانسار قیچاق که نسبت به کندریت (Thompson, 1982) بهنجار شده‌اند، C: الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کانه‌دار و گدازه داسیتی در کانسار قیچاق که نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده‌اند و D: الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای رگه‌های کانه‌دار و توده کوارتز دیوریتی-گابروی سالم و دگرسان‌شده در کانسار قیچاق که نسبت به کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده‌اند.

**Fig. 10.** A: Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare element patterns for the mineralized veins and dacitic lava in the Qebchaq deposit, B: Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare element patterns for the mineralized veins and fresh and altered quartz diorite-gabbro body in the Qebchaq deposit, C: Chondrite-normalized (Nakamura, 1974) REE patterns for the mineralized veins and dacitic lava in the Qebchaq deposit, and D: Chondrite-normalized (Nakamura, 1974) REE patterns for the mineralized veins and fresh and altered quartz diorite-gabbro body in the Qebchaq deposit.



**شکل ۱۱. A:** نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های رگه برشی کوارتز-پیریت و رگه برشی کوارتز طلادار در کانسار قیچاق که نسبت به گدازه داسیتی (نمونه شماره Q-01، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و **B:** نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های رگه برشی کوارتز-پیریت و رگه برشی کوارتز طلادار در کانسار قیچاق که نسبت به گدازه داسیتی (نمونه شماره Q-01، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

**Fig. 11. A:** Loss and gain histogram of rare elements in the Qz-Py breccia vein and Au-bearing breccia Qz vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against dacitic lava sample (sample Q-01, Table 1), and **B:** Loss and gain histogram of rare earth elements in the Qz-Py breccia vein and Au-bearing breccia Qz vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against dacitic lava sample (sample Q-01, Table 1).

از رگه کوارتز-سولفیدی منگن‌دار در عناصر Sm، Eu و Pr به طور ضعیف و موردی در عناصر کمیاب خاکی سنگین و نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز-گالن-اسفالریت در عنصر Pr غنی‌شدگی دارند (شکل ۱۳-B).

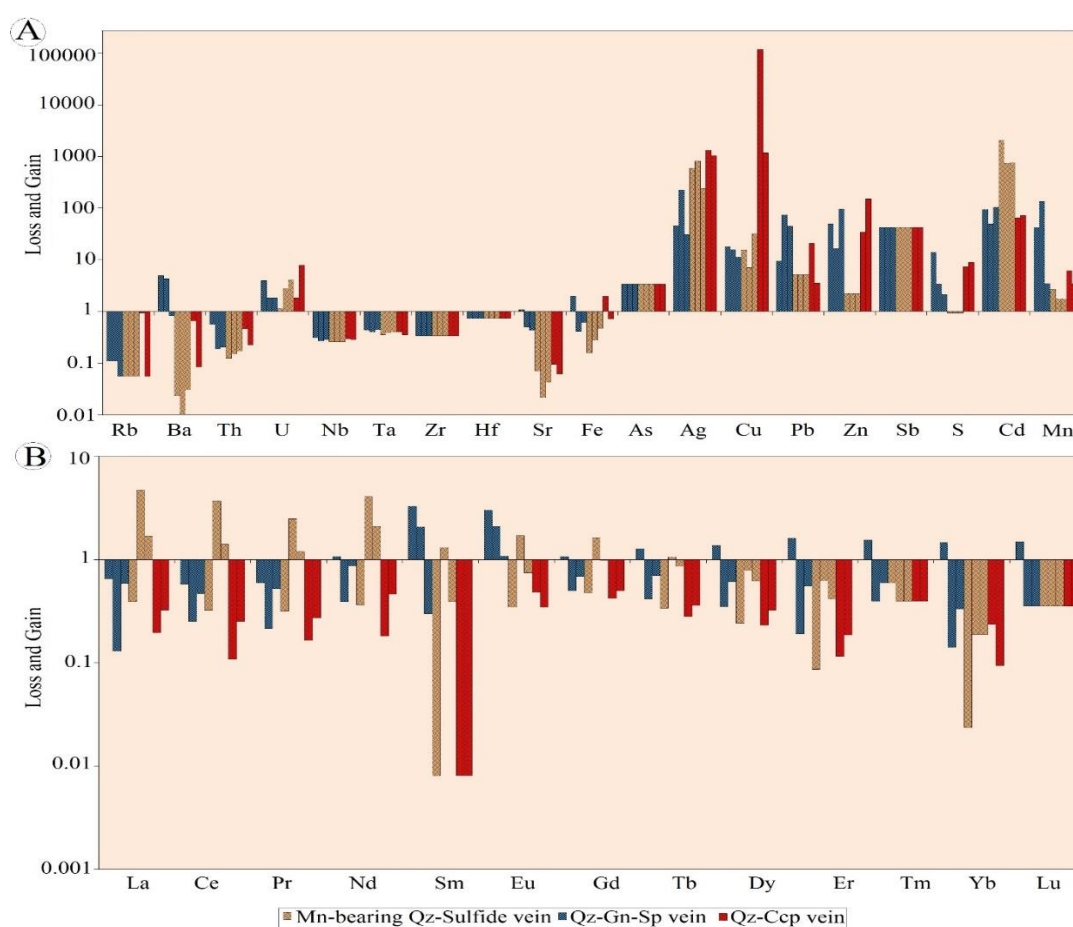
به طور معمول، رفتار زمین‌شیمی عناصر کمیاب خاکی در محیط‌های کانه‌زایی و دگرسانی تحت تأثیر فرایندهایی از قبیل واکنش سیال با سنگ، نهشت سیال، جذب، تجزیه به اجزا، تغییرات دما، فشار، pH،

در مقایسه با توده کوارتز دیوریت-گابرو دگرسان‌شده، نمونه‌های کانه‌دار از عناصر Mn و U، As، Ag، Cu، Pb، Zn، Sb، S، Cd غنی و از سایر عناصر کمیاب تهی شده‌اند (شکل ۱۳-A) و تنها دو نمونه از نمونه‌های برداشت‌شده از رگه کوارتز-سولفیدی منگن‌دار در عنصر Ba غنی‌شدگی نشان می‌دهند. نسبت به توده کوارتز دیوریت-گابرو دگرسان‌شده، نمونه‌های کانه‌دار در اغلب عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی داشته و تنها نمونه‌های برداشت‌شده



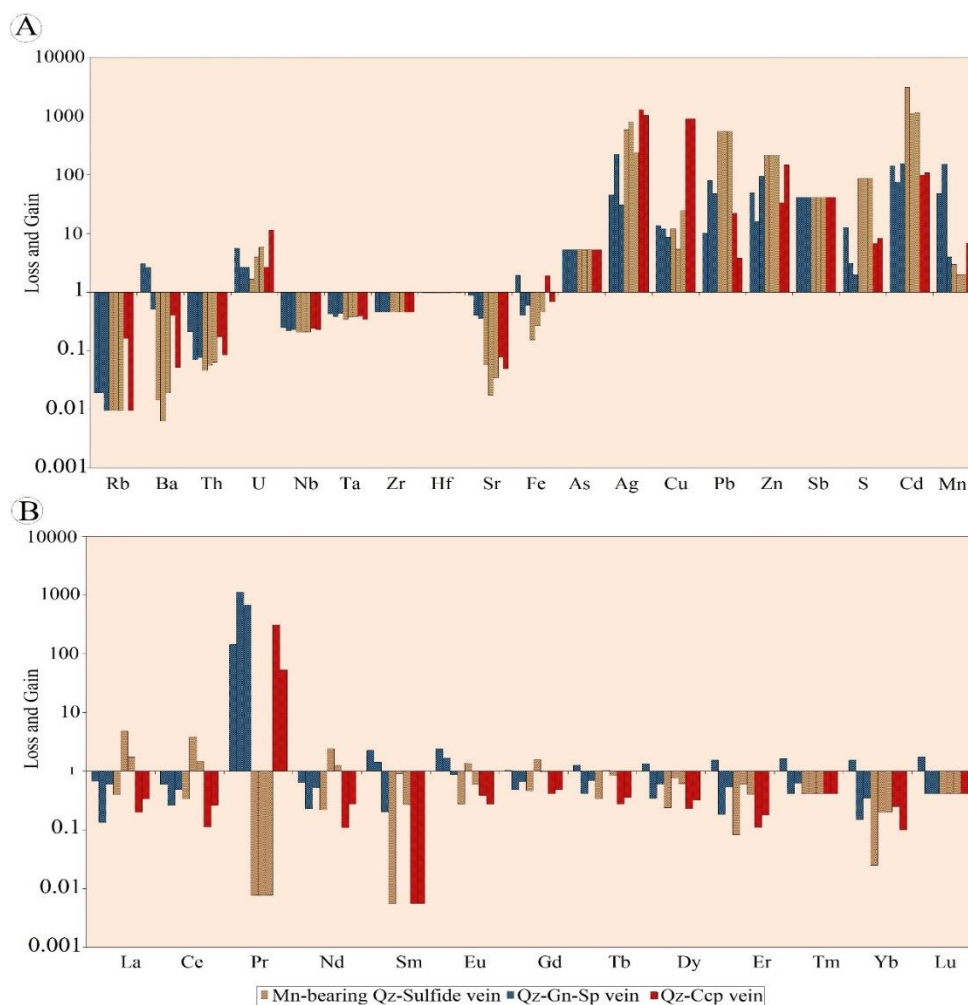
میزان عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانهدار نسبت به سنگ‌های میزبان سالم و دگرسان‌شده در کانسار قیچاق نشان می‌دهد که حجم و یا شیمی سیالات گرمایی برای تحرک این عناصر در این کانسار کافی بوده و می‌تواند بیانگر میزان نسبتاً بالای واکنش بین سیالات کانها و سنگ‌های میزبان باشد. این امر با رخدادهای دگرسانی نسبتاً گسترده در اطراف رگه‌های کانهدار مطابقت دارد.

Eh، آلکالینیتی و تمرکز سیال وابسته است (Humphris, 1984; Lottermoser, 1992). طی فرایندهای دگرسانی و کان‌زایی، سیالات غنی از F، Cl و CO<sub>2</sub> در نسبت‌های بالای سیال به سنگ قادر به تحرک عناصر کمیاب خاکی هستند (Murphy and Hynes, 1986; Whitford et al., 1988; Bienvenu et al., 1990). به اعتقاد این پژوهشگران، کمپلکس‌های هالوژنی و کربنیک عامل اصلی انتقال و تحرک عناصر مزبور محسوب می‌شوند. کاهش نسبی در



شکل ۱۲. A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های رگه کوارتز-سولفیدی منگنزدار، رگه کوارتز-گالن-اسفالریت و رگه کوارتز-کالکوپریت در کانسار قیچاق که نسبت به توده کوارتزدیوریتی-گابرویی سالم (نمونه شماره Q-03، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های رگه کوارتز-سولفیدی منگنزدار، رگه کوارتز-گالن-اسفالریت و رگه کوارتز-کالکوپریت در کانسار قیچاق که نسبت به توده کوارتزدیوریتی-گابرویی سالم (نمونه شماره Q-03، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

**Fig. 12.** A: Loss and gain histogram of rare elements in the Mn-bearing Qz-sulfide vein, Qz-Gn-Sp vein and Qz-Ccp vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against fresh quartz diorite-gabbro sample (sample Q-03, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements in the Mn-bearing Qz-sulfide vein, Qz-Gn-Sp vein and Qz-Ccp vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against fresh quartz diorite-gabbro sample (sample Q-03, Table 1).



**شکل ۱۳.** A: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب برای نمونه‌های رگه کوارتز-سولفیدی منگنزدار، رگه کوارتز-گالن-اسفالریت و رگه کوارتز-کالکوپیریت در کانسار قیچاق که نسبت به توده کوارتزدیوریتی-گابرویی دگرسان‌شده (نمونه شماره Q-02، جدول ۱) بهنجار شده‌اند و B: نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های رگه کوارتز-سولفیدی منگنزدار، رگه کوارتز-گالن-اسفالریت و رگه کوارتز-کالکوپیریت در کانسار قیچاق که نسبت به توده کوارتزدیوریتی-گابرویی دگرسان‌شده (نمونه شماره Q-02، جدول ۱) بهنجار شده‌اند.

**Fig. 13.** A: Loss and gain histogram of rare elements in the Mn-bearing Qz-sulfide vein, Qz-Gn-Sp vein and Qz-Ccp vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against altered quartz diorite-gabbro sample (sample Q-02, Table 1), and B: Loss and gain histogram of rare earth elements in the Mn-bearing Qz-sulfide vein, Qz-Gn-Sp vein and Qz-Ccp vein samples in the Qebchaq deposit that normalized against altered quartz diorite-gabbro sample (sample Q-02, Table 1).

مهم‌ترین شواهد این مقایسه عبارتند از: ۱) کان‌زایی در کانسار قیچاق توسط ساختارهای گسلی کنترل شده است. ۲) دگرسانی‌های گرمایی در کانسار قیچاق با مجموعه سریسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت در نزدیکی رگه‌های کان‌دار مشخص می‌شود. ۳) کان‌زایی در کانسار

### نوع کان‌زایی و الگوی تشکیل

مقایسه شواهد زمین‌شناسی، کان‌زایی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در کانسار قیچاق با انواع کانسارهای فلزهای پایه و گران‌بها نشان می‌دهد، کان‌زایی در این کانسار در دسته کانسارهای اپی‌ترمال قرار دارد. (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005)

میلیون سال در نظر گرفت. در مرحله دوم، مجموعه سنگ‌های ائوسن تحت‌تأثیر فازهای فشارشی پیرنه در ائوسن پایانی قرار گرفته و گسل‌ها، شکستگی‌ها و چین‌خوردگی‌های فراوانی در آنها ایجاد شده است (شکل ۱۴-B).

این ساختارها، معابر مناسبی را برای نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی در منطقه ایجاد کرده و طی آن به ترتیب توده‌های کوارتزدیوریتی-گابروی و گرانیتی-آلکالی گرانیتی الیگوسن (Asadian et al., 1993) در واحدهای سنگی ائوسن نفوذ کرده‌اند. مرحله سوم با نفوذ گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی به داخل مجموعه آتشفشانی و نفوذی ائوسن-الیگوسن مشخص می‌شود (شکل ۱۴-C). داده‌های سن‌سنجی برای این گنبد‌ها در دسترس نیست؛ اما بر اساس روابط صحرائی، در نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ بستان‌آباد (Behrouzi et al., 1998)، سن گنبد‌های مزبور الیگومیوسن لحاظ شده است. رخنمون این گنبد‌ها در بخش‌های غربی منطقه و در اطراف کان‌زایی‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بهای قزل‌احمد، کورملا و تیمکه‌دش قابل مشاهده است که احتمالاً می‌تواند بیانگر ارتباط زمانی و مکانی این گنبد‌ها و کان‌زایی‌های اپی‌ترمال باشد. چنین ارتباطی برای کان‌زایی‌های اپی‌ترمال فلزهای پایه و گران‌بهای موجود در زیرپهنه طارم-هشتجین توسط پژوهشگران مختلف مانند مهرابی و همکاران (Mehrabi et al., 2016) و کوهستانی و همکاران (Kouhestani et al., 2018; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Kouhestani et al., 2022) بیان شده است. گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی به عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آب‌های جوی در منطقه شده‌اند. این آب‌ها علاوه بر توسعه پهنه‌های دگرسانی در منطقه، سبب شسته‌شدن عناصر فلزی از سنگ‌های مسیر و تمرکز مجدد آنها به صورت رگه‌های سیلیسی-سولفیدی کان‌دار شده است (شکل ۱۴-C). بررسی داده‌های زمین‌شیمی نیز بیانگر شباهت الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های برداشت شده از رگه‌های کان‌دار و سنگ‌های میزبان است (شکل

قیچاق شامل مجموعه کان‌یابی پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، طلا، رآلگار و کان‌ی‌های منگنزدار (پسیلوملان و پیرولولوزیت) است که با مجموعه کان‌ی‌های باطله کوارتز، سریسیت، کلریت و کلسیت همراهی می‌شوند. (۴) ساخت و بافت‌های کلنه‌زایی اپی‌ترمال مانند رگه-رگچه‌ای، برشی، شان‌های، کاکلی، گل‌کلمی، پوسته‌ای، پرمانند و پُرکننده فضای خالی به خوبی در کانسار قیچاق توسعه یافته است. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای اپی‌ترمال نشان می‌دهد که این مجموعه کان‌یابی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون متوسط (Hedenquist et al., 2000; Einaudi et al., 2005; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Gemmel, 2004; Wang et al., 2019) دارد. نبود بافت کوارتز حفره‌ای و دگرسانی آرزیلیک پیشرفته با مجموعه کان‌ی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت و همچنین نبود مجموعه کان‌یابی آدولاریا، انارژیت، لوزونیت و تنانیت در رگه کان‌دار کانسار قیچاق بیانگر متفاوت بودن کلنه‌زایی فلزهای پایه و گران‌بها در کانسار قیچاق از کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین و بالاست. به علاوه، کان‌ی‌های دگرسانی (مجموعه سریسیت، ایلیت، کلسیت و کلریت) در کانسار قیچاق جزو دگرسانی‌های گرمابی حرارت پایین تا متوسط هستند که شاخص کان‌ی‌های دگرسانی در کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون متوسط هستند (Hedenquist et al., 2000; Albinson et al., 2001; Einaudi and Hedenquist, 2003; Sillitoe and Hedenquist, 2005; et al., 2005). در جدول ۴، ویژگی‌های اصلی کانسار قیچاق با برخی از کانسارهای مشابه در ایران مقایسه شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرائی، بررسی‌های سنگ‌شناسی و کان‌نگاری و روابط هم‌بزرادی کان‌ی‌ها، مراحل تکوین و تکامل کانسار قیچاق را می‌توان به صورت یک توالی چهار مرحله‌ای به شرح زیر خلاصه کرد (شکل ۱۴):

مرحله نخست با تشکیل توالی‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن در منطقه همراه است (شکل ۱۴-A). بر اساس پژوهش وردل و همکاران (Verdel et al., 2011)، سن توالی‌های مزبور را می‌توان ۴۹ تا ۴۱

2018; Wang et al., 2019; Kouhestani et al., 2019a; Kouhestani et al., 2019b; Kouhestani et al., 2020; Kouhestani et al., 2022). لذا احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی منشأ گرفته باشد نیز وجود دارد. مرحله چهارم با بالا آمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۴- D).

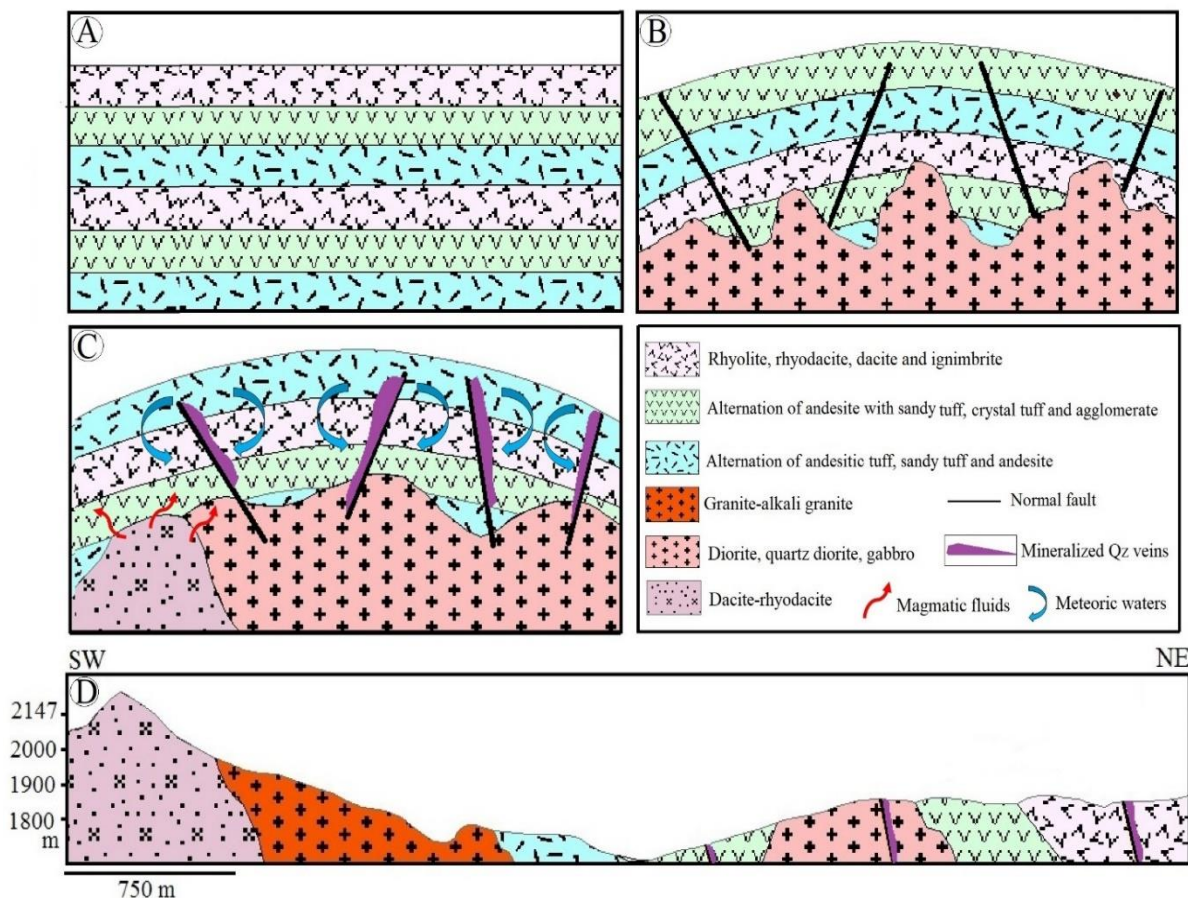
۱۰) که نشان می‌دهد بخشی از عناصر کانه‌ساز از شست‌وشوی سنگ‌های میزبان تأمین شده است. بررسی‌های ایزوتوپی انجام شده بر روی کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نشان می‌دهد که سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی در این کانه‌زایی‌ها مخلوطی از سیالات ماگمایی و جوی بوده و گوگرد و مواد معدنی توسط توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان تأمین شده‌اند (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Kouhestani et al.,

**جدول ۴.** مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار قیچاق با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون متوسط در ایران

**Table 4.** Comparison of main characteristics of the Qebchaq deposit with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in Iran

|                                   | Qebchaq  | Sharafabad   | Varmazyar  | Golijeh                                   | Qomish Tappeh   |
|-----------------------------------|--|--|--|---|---|
| <b>Location</b>                   | NW Qarahchaman   | NW Varzaqan  | N Zanjan   | N Zanjan                                  | SW Zanjan   |
| <b>Tectonic zone</b>              | Western Alborz-Azerbaijan  | Western Alborz-Azerbaijan                                  | Tarom-Hashtjin   | Tarom-Hashtjin                            | Uromieh-Dokhtar   |
| <b>Host rock</b>                  | Tuff, lava, quartz diorite-gabbro  | Tuff, porphyritic andesite                                 | Acidic and intermediate tuff   | Andesite, pyroclastic rocks               | Acidic tuff, crystal-vitric dacitic tuff                |
| <b>Age of host rock</b>           | Eocene-Oligocene   | Eocene   | Eocene   | Eocene                                    | Pliocene  |
| <b>Ore-controlling structures</b> | Normal faults  | Normal faults  | Normal faults  | Normal faults                             | Normal faults   |
| <b>Ore Minerals</b>               | Py, Ccp, Gn, Sp, Au, Rlg, Ps, Pyr  | Py, Ccp, Gn, Sp  | Gn, Sp, Py, Ps, Pyr  | Py, Ccp, Gn, Sp, Ttr-Tnt                  | Py, Ccp, Apy, Bn, Gn, Sp, Ttr-Tnt                       |
| <b>Ore texture</b>                | Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, cockade, plumose | Vein-veinlet, crustiform, vug infill                       | Vein-veinlet, breccia, vug infill, comb, crustiform, colloform, plumose, cockade, bladed | Vein-veinlet, comb, crustiform, colloform | Vein-veinlet, breccia, vug infill, crustiform           |
| <b>Alteration</b>                 | Silica, intermediate argillic, carbonatization, chloritization, propylitic       | Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic | Silica, intermediate argillic, carbonatization, propylitic                               | Silica, intermediate argillic, propylitic | Silica, argillic, carbonatization, argillic, propylitic |
| <b>References</b>                 | Sohbatloo (2022), This study   | Ebrahimi et al. (2009)                                     | Ghorbani Lisar et al. (2022)   | Khodabandehlou et al. (2018)              | Salehi et al. (2011); Salehi et al. (2015)              |

Abbreviations: Au: native gold, Apy: arsenopyrite, Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Gn: galena, Py: pyrite, Pyr: pyrolusite, Ps: psilomelane, Rlg: realgar, Sp: sphalerite, Tnt: tennantite, Ttr: tetrahedrite. Mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010).



**شکل ۱۴.** تصویر شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در کانسار قبچاق. A: تشکیل توالی آتشفشانی ائوسن، B: چین خوردگی واحدهای سنگی ائوسن طی فاز کوه‌زایی پیرنه (ائوسن بالایی) و نفوذ توده‌های کوارتز دیوریت- گابرو و گرانیت- آلکالی گرانیت الیگوسن به داخل آنها، C: نفوذ گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیت- ریوداسیت الیگومیوسن به داخل واحدهای سنگی ائوسن و الیگوسن. نفوذ این گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی سبب چرخش آب‌های جوی و شکل‌گیری کانه‌زایی به صورت رگه‌های سیلیسی- سولفیدی کانه‌دار درون واحدهای آتشفشانی و نفوذی منطقه شده است و D: بالا آمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش

**Fig. 14.** Schematic representation of mineralization evolution stages at Qebchaq deposit. A: Formation of Eocene volcanic sequence, B: Folding of Eocene rock units during Pyrenean orogeny (late Eocene) and intrusion of Oligocene quartz diorite-gabbro and granite-alkali granite plutons within these units, C: Intrusion of Oligo-Miocene dacite-rhyodacite subvolcanic domes within Eocene and Oligocene rock strata. Intrusion of these subvolcanic domes caused circulation of meteoric waters and formation of mineralized quartz-sulfide veins within volcanic units and intrusion bodies in the area, and D: Regional exhumation and development of weathering and erosion processes

### نتیجه‌گیری

کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون متوسط در ایران است.  
 (۲) تشابه روند الگوی بهنجارشده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در رگه‌های کانه‌دار بیانگر تشکیل آنها در ارتباط با یک سامانه کانه‌زایی است.

(۱) شواهدی از قبیل مشاهدات صحرائی، ساخت و بافت، سنگ میزان، هم‌یافت، زمین‌شیمی و الگوی دگرسانی‌ها در کانسار قبچاق نشان می‌دهد که این کانسار از نوع کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون متوسط بوده و از این نظر قابل مقایسه با

دگرسانی و سنگ‌میزبان می‌تواند از نظر اکتشاف کانسارهای اپی‌ترمال در این منطقه حائز اهمیت باشد.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه 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 به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر می‌نمایند.

۳) بررسی نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در کانسار قیچاق نشان‌دهنده تمرکز عناصر کانساز (مانند Ag، Cd، Sb، Zn، Pb، Cu و Mn) در رگه‌های کانسار است. تهی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در این نمودارها بیانگر میزان نسبتاً بالای واکنش بین سیالات کانساز و سنگ‌میزبان در کانسار قیچاق است. ۴) ژئومتری رگه‌ای کانسار قیچاق نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی معبر اصلی برای عبور جریان سیالات کانساز بوده‌اند. این رگه‌ها ارتباط نزدیکی با پهنه‌های دگرسانی سیلیسی، آرژیلیک متوسط، کربناتی و کلریتی دارند. از این رو، بررسی‌های دورسنجی از طریق تلفیق داده‌های مربوط به روندهای زمین‌ساختی،

## References

- Adeli, Z., Rasa, I. and Darvishzadeh, A., 2015. Fluid inclusion study of the ore-quartz veins at Haftcheshmeh porphyry copper (Mo) deposit, Ahar–Arasbaran Magmatic Belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 502–511.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.022>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- 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>
- Asadian, A., Amini Fazl, A. and Khodabandeh, A., 1993. Geological map of Torkamanchay–Qarachaman, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Baghban, S., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Mokhtari, M.A.A. and Gregory, D., 2015. Geology, mineral chemistry and formation conditions of calc-silicate minerals of Astamal Fe–LREE distal skarn deposit, Eastern Azarbaijan Province, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 68: 79–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.016>
- Baghban, S., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., Mokhtari, M.A.A., Gregory, D. and Mahmoudi Nia, H., 2016. Chemical composition and evolution of the garnets in the Astamal Fe–LREE distal skarn deposit, Qara-Dagh–Sabalan metallogenic belt, Lesser Caucasus, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 166–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.020>
- Behrouzi, A., Amini Fazl, A. and Amini Azar, R., 1998. Geological map of Bostanabad, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M. and Dmitriev, L. 1990. MORB alteration: Rare earth element/non-rare hydromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1–14.  
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90070-N](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90070-N)
- Ebrahimi, S., Alirezaei, S. and Yuanming, P., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. In: A.N. Sial, J.S. Bettencourt, C.P. De Campos and V.P. Ferreira (Editor), *Granite Related Ore Deposits: An Introduction*. Geological Society of London, Special Publication, London, 350, pp. 133–147.  
<https://doi.org/10.1144/SP350.8>
- Ebrahimi, S., Pan, Y., Alirezaei, S. and MehrPartou, M., 2009. Fluid inclusion and mineralogical studies of the Sharafabad epithermal gold deposit, NW Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(71): 149–154.  
<http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2010.57004>
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E., 2005. 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>
- Gemmell, J. B., 2004. Low- and intermediate-sulfidation epithermal deposits. In: D.R. Cooke, C.L. Deyel and J. Pongratz (Editors), *24 Ct Gold Workshop*. University of Tasmania, Hobart, Australia, pp. 57–63. Retrieved July 20, 2022 from  
<http://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=40195>
- Ghorbani, A., Kouhestani, H. and Mokhtari, M.A.A., 2022. Genesis of the Varmazyar Pb–Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashhtjin 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>
- Hezarkhani, A. and Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic*

- Geology, 93: 651–670.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.5.651>
- Humphris, S.E., 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (Editor), *Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 317–342.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50014-9>
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A.M. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, 52 (2): 608–630.  
<https://doi.org/10.1080/00206810903416323>
- Khodabandehlou, Z., Ghaderi, M. and 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. *Advanced Applied Geology*, 8(2): 9–20.  
<https://doi.org/10.22055/aag.2018.24286.1802>
- 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., 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>
- 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. and Zhang, X.N., 2022. 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>
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7 (1): 25–41.  
[https://doi.org/10.1016/0169-1368\(92\)90017-F](https://doi.org/10.1016/0169-1368(92)90017-F)
- Maghsoudi, A., Yazdi, M., Mehrpartou, M., Vosoughi, M. and Younesi, S., 2014. Porphyry Cu–Au mineralization in the Mirkuh-e-Ali Mirza magmatic complex, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(B): 932–941.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.002>
- 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>
- Mokhtari, M.A.A., 2012. The mineralogy and petrology of the Pahnava Fe skarn, in the Eastern Azarbaijan, NW Iran. *Central European Journal of Geosciences*, 4(4): 578–591.  
<https://doi.org/10.2478/s13533-012-0106-y>
- Mokhtari, M.A.A., Moinvaziri, H., Ghorbani, M.R. and Mehrpartou, M., 2014. Geology and Geochemistry of Aniq-Qarachilar Au- Cu- Mo Mineralization (NE of Kharvana, Eastern Azarbaijan). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 23 (4): 135–150.  
<http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2014.43973>
- Murphy, J.B. and 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.  
<https://doi.org/10.1139/e86-112>
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in Carbonaceous and Ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38 (5): 757–775.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90149-5](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(74)90149-5)
- Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2011. Mineralogy and geochemistry of rare earth elements in Qomish Tappeh Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, southwest of Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 2 (2): 235–254. (in Persian with English abstract)



- <https://doi.org/10.22067/ECONG.V2I2.7853>  
Salehi, T., Ghaderi, M. and Rashidnejad-Omran, N., 2015. Epithermal base metal-silver mineralization at Qomish Tappeh deposit, southwest of Zanjan. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(97): 329–346. (in Persian with English abstract)  
<https://doi.org/10.22071/GSJ.2015.41519>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic 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. Economic Geology Special Publication 10*, Littleton, pp. 315–343. Retrieved July 20, 2022 from <https://www.researchgate.net/publication/285488888>
- Simmonds, V. and Moazzen, M., 2015. Re–Os dating of molybdenites from Oligocene Cu–Mo–Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): Implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan and Iran. *International Geology Review*, 57 (3): 290–304.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2014.1003339>
- Simmonds, V., Moazzen, M. and Mathur, R., 2017. Constraining the timing of porphyry mineralization in northwest Iran in relation to Lesser Caucasus and Central Iran; Re–Os age data for Sungun porphyry Cu–Mo deposit. *International Geology Review*, 59(12): 1561–1574.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1285258>
- 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>
- Sohbatloo, M., 2022. *Geology, geochemistry and genesis of Qebchaq base and precious metals mineralization, NW Qarehchaman*. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 105 pp. (in Persian with English abstract)
- Thompson, R.N., 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18(1): 49–107.  
<https://doi.org/10.1144/sjg18010049>
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J. and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30(3).  
<https://doi.org/10.1029/2010TC002809>
- 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>
- Whitford, D.J., Korsch, M.J., Porritt, P.M. and 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.  
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90090-3)
- 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>