

Mineralogy, minerals-chemistry and sulfur isotope geochemistry of Baharieh copper deposit (NE Kashmar): implications for ore genesis

Razieh Rezaeihamid and Ebrahim Tale Fazel *

Department of Geology, Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

The Baharieh copper deposit with an approximately of 1 million tons of copper ore, located in Khorasan Razavi Province, 30 km northeast of Kashmar. On the base of structural view point of Iran, the deposit is situated in Sabzevar zone and Taknar metallogenic area. The mineralization as stratabound nature in an ore-horizon with a length of approximately 200 m and 5 to 10 meters thickness, trending E-W occurs in the middle Eocene andesitic to rhyolitic-tuff. Chalcopyrite and pyrite are the main sulfide minerals, which are accompanied by accessory minerals including bornite, galena, sphalerite, covellite, chalcocite, malachite and hematite. According to the data obtained by electron probe micro analysis (EPMA) the maximum gold amount (0.21 wt%) and the silver content (0.1 wt%) are in the chalcopyrite and the highest silver concentration (0.14 wt%) is in the galena. The average ratio of Co/Ni (2.71) in the pyrite study can be indication of its hydrothermal source. On the base of geo-thermometry data as well as Sb/Bi ratio in the galena and the geochemistry of the sphalerite (high content of Cd with an average value of 0.92 wt% and low Zn/Cd=67.54) the physico-chemical and the thermodynamic conditions of ore-bearing fluid in the Baharieh deposit consistent with an average-temperature hydrothermal-magmatic deposits. The variation ranges of $\delta^{34}\text{S}$ isotopic in the chalcopyrite and the pyrite samples vary from -7.3 to 0.5 ‰. According to the results obtained from sulfur isotopic data, the origin of primary magma for $\delta^{34}\text{S}$ values close to zero and its relative depletion was confirmed as a result of performance of reduce processes for negative $\delta^{34}\text{S}$ values. The overall, the primary fine-grained pyrites in the mineralized host rock are most likely the source of sulfur in the sulfide mineralization of the area under study, which caused the negative $\delta^{34}\text{S}$ values.

Key words: Baharieh Cu deposit, mineral chemistry, sulfur isotope, Kashmar, Sabzevar zone

* e.talefazel@basu.ac.ir

کانی‌شناسی، شیمی کانی‌ها و زمین‌شیمی ایزوتوپی گوگرد در کانسار مس بهاریه (شمال خاوری کاشمر): رهیافتی برای دستیابی به پیدایش کانسار

راضیه رضایی حمید و ابراهیم طالع فاضل *

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

چکیده

کانسار بهاریه با تناژ نزدیک به یک میلیون تن مس، در استان خراسان رضوی و فاصله ۳۰ کیلومتری شمال خاوری شهرستان کاشمر جای دارد. برپایه پهنه‌های ساختاری زمین‌شناسی ایران، این ذخیره در پهنه سبزواری و منطقه فلزایی تکنار جای گرفته است. کانه‌زایی به صورت چینه‌کران در یک افق معدنی با درازای نزدیک به ۲۰۰ متر، سبزی ۵ تا ۱۰ متر و راستای خاوری-باختری، در سنگ میزبان آندزیت و ریولیت‌توفی به سن ائوسن میانی رخ داده است. کالکوپیریت و پیریت کانه‌های سولفیدی اصلی هستند. بورنیت، گالن، اسفالریت، کوولیت، کالکوسیت، مالاکیت و هماتیت نیز به صورت فرعی آنها را همراهی می‌کنند. برپایه داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی (EPMA)، بیشینه طلا و نقره در میزبان کالکوپیریت به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۰/۱ درصدوزنی و بیشینه نقره در ترکیب کانی گالن برابر با ۰/۱۴ درصدوزنی به دست آمد. برپایه بررسی‌های شیمی کانی، در پیریت‌های کانسار بهاریه، میانگین نسبت Co/Ni برابر با ۲/۷۱ به دست آمد. این مقدار چه‌بسا نشان‌دهنده خاستگاه گرمابی آنهاست. برپایه داده‌های زمین‌دماسنجی، نسبت Sb/Bi در گالن و زمین‌شیمی اسفالریت (تمرکز بالای Cd با مقدار میانگین برابر با ۰/۹۲ درصدوزنی و نسبت ناچیز Zn/Cd با مقدار برابر با ۶۷/۵۴) شرایط فیزیکیوشیمیایی و ترمودینامیکی سیال کانه‌دار در کانسار بهاریه با کانسارهای گرمابی-ماگمایی دما متوسط همخوانی دارد. دامنه تغییرات ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ برای نمونه‌های کالکوپیریت و پیریت برابر با ۷/۳- تا ۰/۵ پرمیل است. برپایه داده‌های به‌دست‌آمده از تفسیر داده‌های ایزوتوپی گوگرد، خاستگاه ماگمایی نخستین برای مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ نزدیک به صفر است. همچنین، تهی‌شدگی نسبی آن در پی رویداد فرایندهای احیایی برای مقادیر منفی $\delta^{34}\text{S}$ تأیید شد. بر این پایه، پیریت‌های نخستین ریزبلور در سنگ میزبان کانه‌زایی، محتمل‌ترین سرچشمه تأمین سولفور برای کانی‌سازی سولفیدی در کانسار بهاریه هستند و در پیدایش مقادیر منفی $\delta^{34}\text{S}$ نقش داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: کانسار مس بهاریه، شیمی کانی، ایزوتوپ گوگرد، کاشمر، پهنه سبزواری

* e.talefazel@basu.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

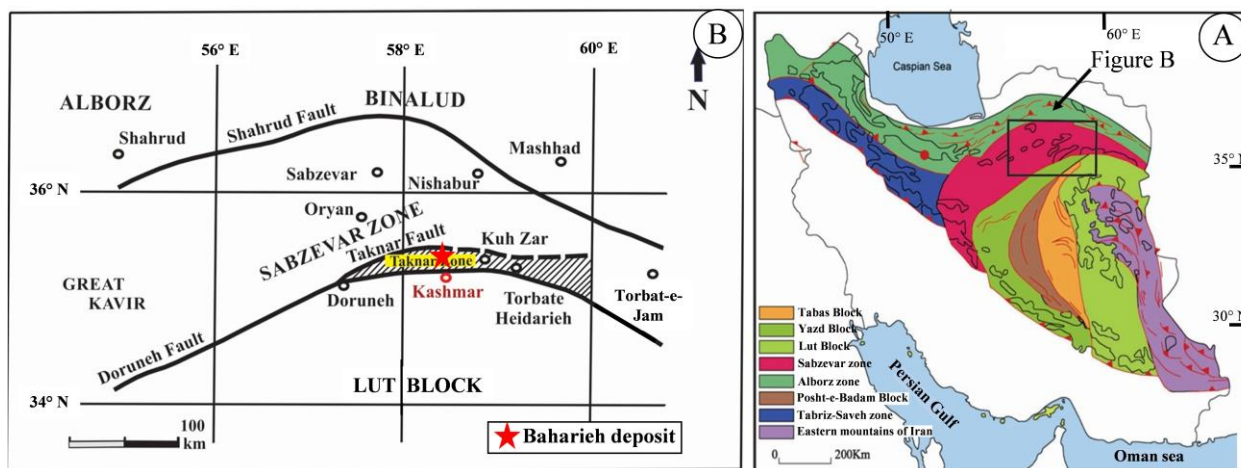
DOI: <https://doi.org/10.22108/ijp.2019.115778.1122>

مقدمه

کانسار مس بهاریه (در مختصات $35^{\circ}29'$ تا $28^{\circ}35'$ طول جغرافیایی خاوری و $58^{\circ}67'$ تا $66^{\circ}58'$ عرض جغرافیایی شمالی) در استان خراسان رضوی و ۳۰ کیلومتری شمال خاوری شهرستان کاشمر (شمال خاوری ایران) جای گرفته است. از دیدگاه Khoei و همکاران (۱۹۹۹)، منطقه فلزایی تکنار در شمال خاوری ایران، از مهم ترین پهنه های فلزایی مس در ایران به شمار

می رود (شکل ۱).

وجود اندیس ها و کانی سازی های فلزی (آهن، طلا، مس، نقره، کروم، سرب و روی) (Almasi *et al.*, 2016) و غیر فلزی (کائولینیت، بوکسیت و باریت) فراوان فعال و متروک در این مجموعه، به همراه ویژگی های زمین ساختی، ماگمایی و دگرسانی، به ویژه در بازه زمانی ترشیری، این منطقه را از دیدگاه زمین شناسی از پهنه های مستعد برای پتانسیل های معدنی فلزی و غیر فلزی کرده است (Khoei *et al.*, 1999).



شکل ۱- (A) نقشه ساختاری ایران (Alavi, 1991) و نمایش موقعیت پهنه سبزواری در آن؛ (B) جایگاه منطقه فلزایی تکنار در پهنه سبزواری و جایگاه کانسار بهاریه در آن که با نماد ستاره سرخ رنگ نمایش داده شده است

گرم در تن است (Atiyeh Kansar Joyan Co., ۲۰۱۴). در این پژوهش افزون بر معرفی ویژگی های زمین شناسی و کانی سازی در کانسار مس بهاریه، با کمک بررسی های ایزوتوپ های پایدار گوگرد در کانی های سولفیدی، ویژگی های فیزیکوشیمیایی و تحول سیال کانه ساز بررسی شدند. بررسی حضور پیریت در ترکیب سنگ میزبان آندزیت پورفیری و نقش آن در رخداد کانه زایی مس در منطقه معدنی بهاریه از دستاوردهای اصلی این پژوهش است. برپایه جایگاه کانسار بهاریه در پهنه سبزواری و وجود نشانه های معدنی فراوان مس در این پهنه، چه بسا

کانسار مس بهاریه یکی از این رخدادهای معدنی است که بررسی زمین شناسی، چگونگی رخداد کانی سازی و ویژگی های زمین شیمیایی آن افزون بر جنبه پژوهشی، نقش مهمی در پیشبرد اهداف اکتشافی در منطقه معدنی بهاریه خواهد داشت. تازه ترین فعالیت های انجام شده در منطقه معدنی بهاریه را شرکت آتیه کانسار جویان (Atiyeh Kansar Joyan Co., 2014) در غالب اکتشاف های تفصیلی انجام داده است. تناژ کانسار بهاریه نزدیک به یک میلیون تن، عیار مس آن برابر با ۱ درصد (با حداکثر عیار بازیابی ۲۲ درصد) و میانگین نقره ۵

کاربرد این داده‌ها در راستای اهداف اکتشافی و

معدنکاری در کانسار بهاریه و بخش‌های مجاور سودمند است و به ردیابی ذخایر مشابه در این زیرپهنه کمک می‌کند.

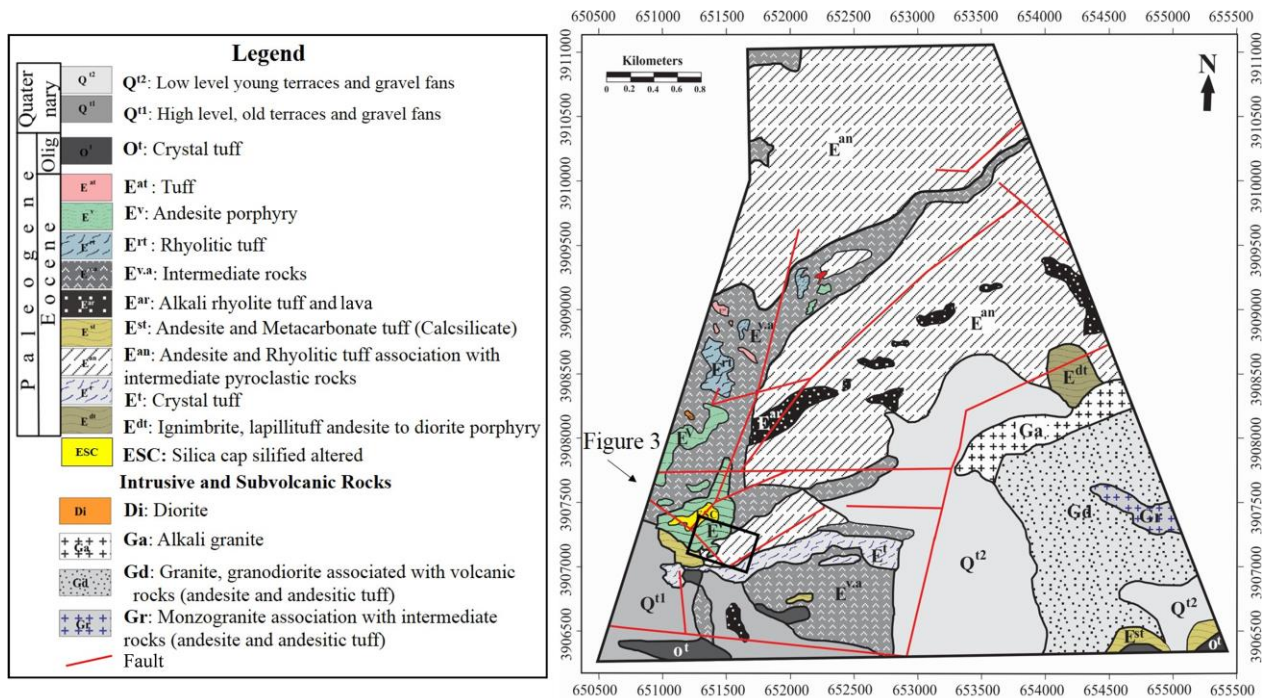
زمین‌شناسی منطقه

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، کانسار بهاریه در پهنه سبزواری است و با گسل تکنار (ریوش) در شمال و گسل درونه در جنوب فراگرفته شده است (Alavi, 1991). منطقه فلززایی تکنار که به صورت مجموعه ماگمایی گوه‌ای شکل در شمالی‌ترین برونزد خردقاره ایران مرکزی رخنمون دارد. برپایه برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه بهاریه

گروه سنگی با چینه‌نگاری اصلی دیده می‌شوند:

- ۱- واحدهای آذرین خروجی تا نیمه‌ژرف؛
- ۲- توده‌های نفوذی با سن ائوسن زیرین تا الیگوسن در منطقه رخنمون دارند که نهشته‌های آبرفتی عهدحاضر بخش‌هایی از این واحدها را پوشانده است (شکل ۲).

گروه‌های سنگی آتشفشانی منطقه دربردارنده آندزیت، ریولیت، گروه‌های سنگی آذرآواری و توف‌های آندزیتی تا ریولیتی و گروه‌های سنگی آذرین نیمه‌درونی و درونی دربردارنده توده‌های دیوریت پورفیری، گرانودیوریت، آلکالی‌گرانیت و مونزوگرانیت هستند.



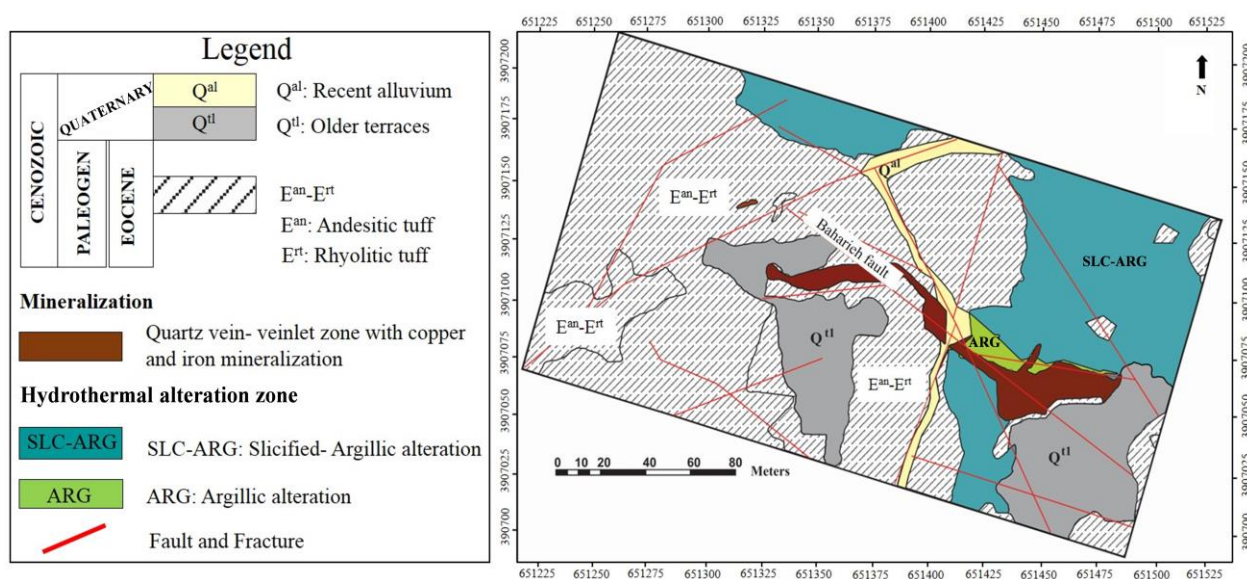
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه بهاریه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (با تغییرات از Atiyeh Kansar Joyan Co., ۲۰۱۴) (کادر مستطیلی موقعیت کانسار بهاریه را نشان می‌دهد)

واحدهای سنگی ائوسن بیشترین حجم سنگ‌های منطقه را دربر گرفته‌اند. این سنگ‌ها به ترتیب از قدیم به جدید دربردارنده واحد ایگنمبریت، لاپیلی توف، آندزیت تا

دیوریت پورفیری (E^{dt})، واحد توف بلورین (E^t)، واحد آندزیت و ریولیت توف به همراه سنگ‌های آذرآواری حد واسط (E^{an})، واحد آندزیت و متاکربنات توف (Est)،

می‌شوند. سنگ‌های آذرآواری حد واسط با ترکیب داسیت و ریوداسیت نیز در واحد سنگی E^{an} شناسایی شدند. بیشتر آنها بافت جریان‌ی و پورفیریتیک دارند و از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز در زمینه‌ای ریزبلور از همین بلورها ساخته شده‌اند و کانه‌زایی نشان نمی‌دهند. در منطقه بهاریه، مجموعه توده‌های آذرین نیمه‌درونی و بیرونی طیف گسترده‌ای از سنگ‌های اسیدی تا حد واسط را نشان می‌دهند. از دیدگاه بررسی‌های ساختاری، واحد آندزیت و ریولیت‌توف (E^{an}) سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی به‌شمار می‌رود و محیط شکنای خوبی برای گسترش شکستگی‌ها و گسلش پدید آورده است؛ به‌گونه‌ای که کانه‌زایی در رگه‌ها و در راستای گسل‌ها و شکستگی‌های واحد میزبان کانه‌دار بسیار افزایش می‌یابد. گسل اصلی بهاریه (F1) با روند خاوری-باختری و در برخی بخش‌ها مایل به شمال‌باختری-جنوب‌خاوری، با درازای نزدیک به ۲۰۰ متر، مورب‌لغز معکوس و با شیب ۷۰ تا ۸۰ درجه به‌سوی جنوب در مرکز منطقه روی داده است. این گسل هم‌راستا با گسل درونه و از کنترل‌کننده‌های مهم کانه‌زایی در منطقه است (شکل ۳).

آلکالی‌ریولیت‌توف و لاوا (E^{ar})، سنگ‌های حد واسط دگرسان‌شده ($E^{v.a}$)، واحد ریولیت‌توف با دگرسانی آرژیلیک و فلیک (E^{rt})، واحد هورنبلندآندزیت پورفیری (E^v) و واحد سنگی توف سیلیسی (E^{al}) هستند (شکل ۲). پس از این سنگ‌ها، واحد توف بلورین الیگوسن (O^1) و نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های آبرفتی کهن، مخروط‌های گراولی (Qt^1) و پادگانه‌های آبرفتی جوان (Qt^2) نیز در منطقه رخنمون دارند. در این میان، اصلی‌ترین گروه سنگی منطقه معدنی بهاریه که میزبان کانه‌زایی نیز به‌شمار می‌رود، سری پیوسته‌ای از واحدهای آندزیت و ریولیت‌توف (E^{an}) است (شکل ۳). بخش آندزیتی این واحد به رنگ خاکستری تا سبز است و بیشتر از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (الیگوکلاز تا آندزین) و کانی‌های فرعی هورنبلند و بیوتیت در خمیره‌ای ریزبلور از همین جنس ساخته شده است. کانی‌های کمیاب زیرکن و آپاتیت نیز در این واحد سنگی شناسایی شدند. بخش ریولیت‌توف نیز به رنگ سفید تا زرد نخودی دیده می‌شود. رگه کوارتز-کالکوپیریت در میزبان بخش ریولیت‌توف روی داده است. کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز و به‌طور ناچیز بیوتیت به‌صورت ریز در زمینه سنگ دیده



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی معدنی ساده‌شده منطقه بهاریه با مقیاس ۱:۵۰۰، با تغییراتی پس از Atiyeh Kansar Joyan Co. (۲۰۱۴)

روش انجام پژوهش

بازدید صحرایی و نمونه‌برداری‌های از واحدهای گوناگون سنگی در منطقه بهاریه انجام و شمار ۱۰۰ نمونه سنگی برداشت شد. در این راستا، برای دستیابی به ویژگی‌های سنگ‌های منطقه، شمار ۱۸ مقطع نازک از نمونه‌های سطحی و شمار ۹ مقطع نازک از مغزه‌های حفاری تهیه شد. همچنین، برای بررسی ویژگی‌های کانه‌نگاری بخش‌های کانی‌سازی و سنگ‌نگاری رگه‌های کانه‌دار، شمار ۱۱ مقطع نازک- صیقلی و ۹ مقطع صیقلی ساخته و با میکروسکوپ عبوری- بازتابی زایس (مدل Axioplan2) بررسی شدند. برای شناسایی ترکیب شیمیایی کانه‌ها، شمار ۴۵ نقطه از کانی‌های سولفیدی کانسار مس بهاریه (مانند: کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت، گالن به‌همراه مگنتیت) همراه با تصاویر الکترونی برگشتی (BSE) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، به روش ریزکاو الکترونی (EPMA) تجزیه شدند. این آزمایش روی مقطع‌های نازک- صیقلی با پوشش کربنی و با به‌کارگیری دستگاه ریزکاو الکترونی (مدل Cameca SX100) در جریان ۲۰ میلی‌آمپر، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ تا ۲۵ کیلو ولت، قطر باریکه الکترونی ۱۰-۳ میکرومتر و زمان شمارش ۱۲ تا ۱۵ ثانیه انجام شد. همچنین، برای به‌دست‌آوردن نسبت ایزوتوپی گوگرد، شمار ۴ نمونه کالکوپیریت (نسل دوم) و ۵ نمونه پیریت (نسل دوم) در آزمایشگاه ایزوتوپی گروه علوم‌زمین و محیط زیست دانشگاه آریزونا تجزیه شدند. ایزوتوپ پایدار گوگرد با به‌کارگیری دستگاه طیف‌سنج جرمی MAT252 اندازه‌گیری شد و داده‌ها به‌صورت دلتا، در هزار (%، δ) به‌دست آورده شدند. مقادیرهای $\delta^{34}\text{S}$ در برابر استاندارد شهاب‌سنگ کانیون دیابلو (VCDT) و با دقت تجزیه برابر با ± 0.2 در هزار به‌دست آمدند.

کانه‌زایی

کانه‌زایی در کانسار بهاریه با سرشت چینه‌کران در افق معدنی با راستای خاوری- باختری، درازای نزدیک به ۲۰۰ متر و سستی برای برابر با ۵ تا ۱۰ متر رخ داده است. این افق معدنی با شیب نزدیک به قائم و ژرفای بیشینه ۲۰ متر در سنگ میزبان آندزیت‌توف تا ریولیت‌توف (E^{an}) به سن ائوسن میانی روی داده است. در سنگ میزبان، پیریت‌های دانه‌پراکنده و پرکننده فضای تهی حضور گسترده‌ای نشان می‌دهند. ماده معدنی در افق یادشده بیشتر با بافت و ساخت‌های رگه- رگچه‌ای، دانه‌پراکنده، برشی و جانشینی در واحدهای سنگی E^{an} و ناچیز E^{v} پدید آمده است. برپایه ویژگی‌های صحرایی و بررسی‌های زمین‌فیزیکی (Atiyeh Kansar Joyan Co., 2014)، کانی‌سازی مس بیشتر با شکستگی‌ها و گسل‌های اصلی منطقه وابستگی مستقیم نشان می‌دهد و از روندهای کلی E-W تا NW-SE پیروی می‌کند (Rezaeihamid, 2016). برپایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت کانه‌زایی، دست‌کم دو مرحله کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن در کانسار بهاریه دیده می‌شود. کانه‌زایی هیپوژن در بردارنده چهار مرحله است:

- مرحله نخست: کانه‌زایی شکافه‌پرکن تا رگه- رگچه‌ای پرعیار کالکوپیریت، پیریت‌های دانه‌پراکنده و درهم‌رشدی‌های هماتیت تیغه‌ای (\pm مگنتیت)؛

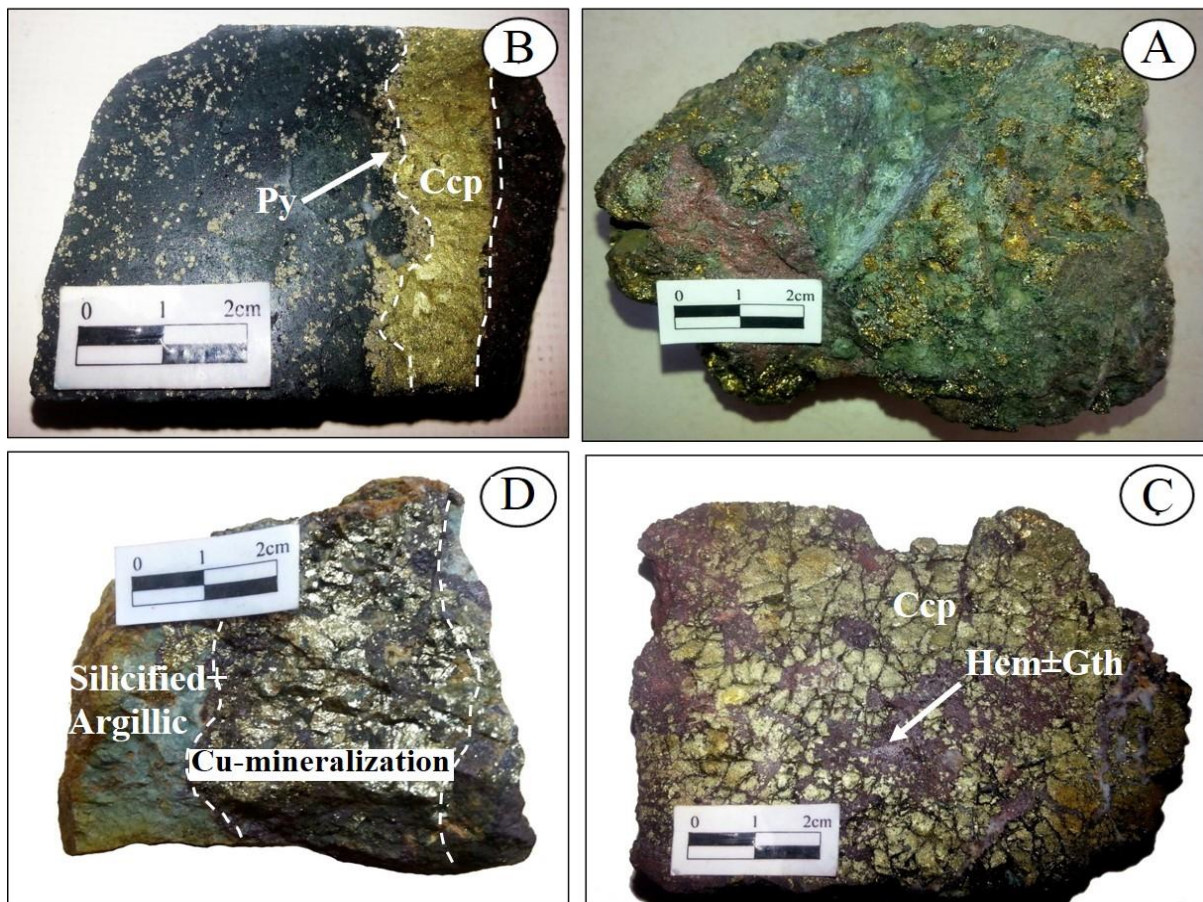
- مرحله دوم: کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کالکوپیریت؛

- مرحله سوم: کانه‌زایی رگه- رگچه‌ای کوارتز، کالکوپیریت دانه‌پراکنده (همراه با میانبارهای ریز گالن و اسفالریت)؛

- مرحله چهارم: کانه‌زایی برشی با سیمان کوارتز (\pm کلسیت)، به‌همراه کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت دانه‌پراکنده، پیریت و بورنیت.

می‌شوند. در این منطقه که به منطقه اکسایش یا اکسیدان شناخته می‌شود، هیدروکسیدهای آهن (مانند: گوتیت) به‌جای می‌مانند و کانی‌های مالاکیت و آزوریت، در بخش زیرین پهنه اکسیدان و در بالای سطح آب زیرزمینی پدید می‌آیند (Evans, 1993). برخورد محلول‌های فلزدار با سطح آب در محیط‌های احیایی، رسوب فازهای حل‌شده و جایگزینی سولفیدهای هیپوزن با سولفیدهای سوپرزن را در پی دارد (Putter *et al.*, 2010). پیدایش کانه‌های ثانویه هماتیت و گوتیت، کالکوسیت، کوولیت و کربنات‌های آبدار مس (مالاکیت و آزوریت) از ویژگی‌های پهنه سوپرزن در منطقه بهاریه است (شکل ۴).

پس از رویداد این مرحله‌ها، بخش بزرگی از کانه‌زایی هیپوزن به‌همراه یکسری واکنش‌های شیمیایی محدود، پهنه غنی‌سازی سوپرزن را پدید آورده‌اند. هنگام انحلال سولفیدها، آب‌های سرشار از اکسیژن و گاز کربنیک آب‌های اسیدی را پدید می‌آورند. این فرایند شستشو و انحلال عنصرهای فراوان، به‌ویژه سولفیدهای کالکوپیریت، اسفالریت و پیریت را در پی دارد و به‌جای آنها هیدروکسیدهای آهن و سولفوریک اسید پدید می‌آورد (Evans, 1993; Guilbert and Park, 1986). شستشوی عنصرها تا بالای سطح آب‌های زیرزمینی روی می‌دهد و بسیاری از عنصرهای محلول از منطقه بالای سطح آب زیرزمینی با گذر زمان خارج

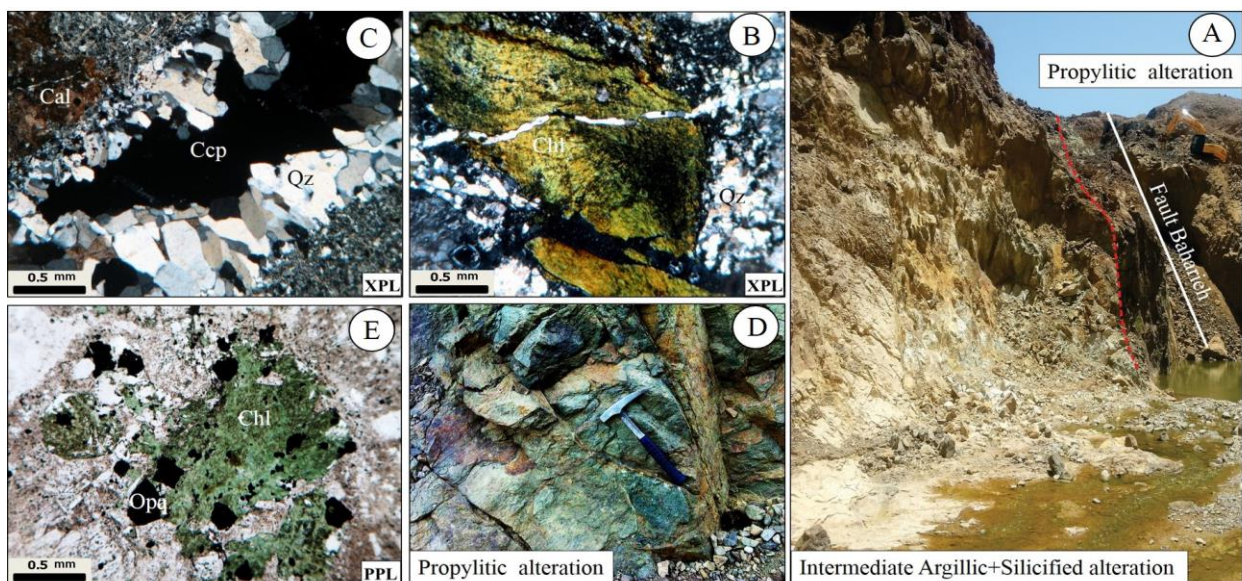


شکل ۴- تصویر نمونه‌های دستی و مغزه حفاری از کانی‌زایی منطقه بهاریه. (A) دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) همراه با کانی‌سازی مس؛ (B) کانی‌زایی با بافت شکافه‌پرکن کالکوپیریت نسل نخست در کنار پیریت با بافت دانه‌پراکنده؛ (C) کانی‌زایی مرحله سوم با حضور کالکوپیریت و بافت برشی هماتیت؛ (D) توف ریولیتی با دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک حد واسط همراه با کانی‌سازی مس

دگرسانی

دگرسانی‌های سیلیسی، کلسیتی، کلریتی و آرژیلیک حد واسط از مهم‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی در کانسار بهاریه هستند. ماده معدنی بیشتر همراه با دگرسانی‌های کلسیتی و کلریتی (واحد آندزیت‌توف) و دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک (واحد ریولیت‌توف) دیده می‌شود. دگرسانی‌های کلریتی و کلسیتی به صورت دگرسانی پروپیلیتیک با کانی اصلی کلریت و با رنگ سبز، به‌ویژه در توف‌های آندزیتی میزبان کانی‌سازی به رنگ سبز تا قهوه‌ای روشن شناسایی شدند (شکل ۵). این دگرسانی که به رنگ سبز تا قهوه‌ای روشن است در پی تجزیه کانی‌های اولیه

سنگ‌ها مانند پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین (آمفیبول و بیوتیت) و جایگزینی همه یا بخشی از آنها با کانی‌های ثانویه دگرسانی (کلریت، اپیدوت و کلسیت) روی داده است. دگرسانی آرژیلیک حد واسط از دگرسانی‌های دیده‌شده در واحد میزبان ریولیت‌توف است. کانی‌های کائولینیت، مونت‌موریلونیت، آلبیت و کوآرتز از مهم‌ترین کانی‌های این دگرسانی به‌شمار می‌روند. دگرسانی آرژیلیک حد واسط، به‌ویژه در راستای گسل F1 و بخش‌های مرکز و شمال‌باختر منطقه، به رنگ زرد نخودی دیده می‌شود (شکل ۵). این دگرسانی بیشتر در سنگ‌های آندزیت‌توف میزبان کانی‌سازی دیده می‌شود.



شکل ۵- تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های منطقه بهاریه. (A) نمایی از محل همبندی واحد توف آندزیتی با دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) و ریولیت‌توف با دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک در راستای گسل بهاریه (دید رو به خاور)؛ (B) دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) در میزبان توف آندزیتی؛ (C) دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک در میزبان ریولیت‌توف؛ (D) تصویر صحرایی از دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) در توف آندزیت؛ (E) دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی) همراه با کانی‌سازی (نام اختصاری کانی‌ها برپایه Whitney و Evans (۲۰۱۰): Ccp: کالکوپیریت؛ Opq: کانی کدر؛ Qz: کوآرتز؛ Cal: کلسیت)

کانی‌شناسی

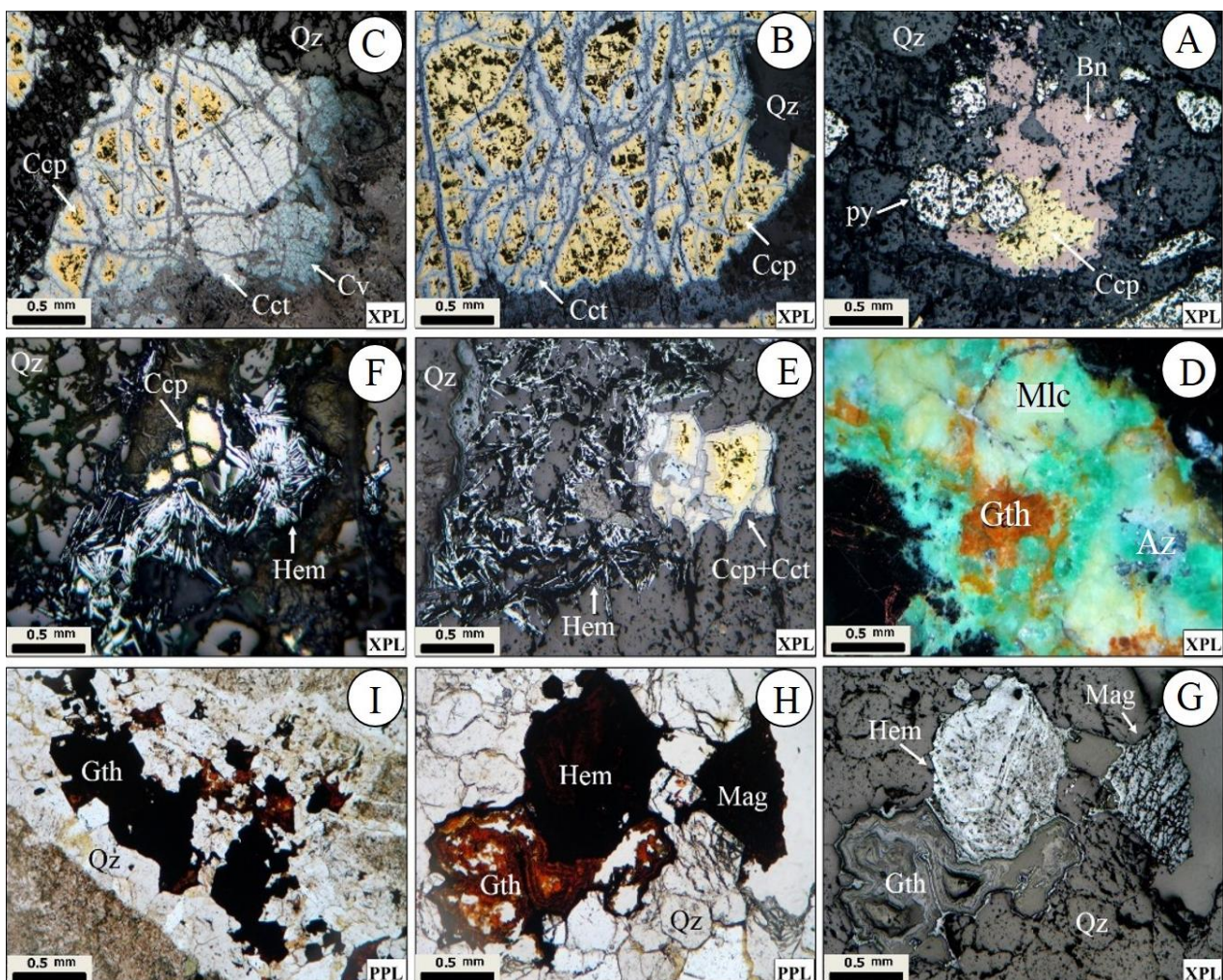
برپایه بررسی‌های کانه‌نگاری، کانی‌های سولفیدی، کربناته مس و اکسیدی-هیدروکسیدی

آهن به‌ترتیب از مهم‌ترین فازهای کانه‌شناسی در کانسار بهاریه به‌شمار می‌روند. در پهنه هیپوزن، سولفیدهای اصلی کالکوپیریت و پیریت از مهم‌ترین

فاز کانه‌زایی منطقه بهاریه هستند. در این مرحله، کانی‌های سولفیدی فرعی و کمیاب (مانند: بورنیت، اسفالریت، گالن، دیژنیت، تتراهدریت) با فراوانی کمتر همراه با کالکوپیریت دیده می‌شوند. کالکوپیریت با فراوانی بالا کانی اصلی به‌شمار می‌رود. پیریت نیز پس از کالکوپیریت با فراوانی کمابیش بالا در همهٔ مرحله‌های کانی‌سازی (به‌صورت پارائزن با کالکوپیریت) حضور دارند. بورنیت به رنگ صورتی با

فراوانی کمتر از کالکوپیریت است. پیریت از دیگر کانی‌های سولفیدی منطقه است که بیشتر به‌صورت جانشینی در حاشیه کالکوپیریت در دو نسل دیده می‌شود (شکل ۶- A):

- ۱- نسل نخست به‌صورت هیپوژن با درگیری تماسی و هم‌مرز با کالکوپیریت؛
- ۲- نسل دوم به‌صورت ثانویه با بافت‌های جانشینی در پیرامون کالکوپیریت.



شکل ۶- تصویرهای میکروسکوپ عبوری- بازتابی از کانه‌های فلزی منطقه بهاریه. A) در هم‌رشدی بورنیت پیرامون کالکوپیریت؛ B، C) جانشینی کالکوسیت (آبی مایل به سفید) و کوولیت (آبی پررنگ) پیرامون کالکوپیریت؛ D) مالاکیت با بافت شکافه‌پرکن در حاشیهٔ دانه‌های کالکوپیریت؛ E، F) هماتیت‌های تیغه‌ای اولیه در کنار کالکوپیریت؛ G، H، I) هماتیت مارتیتی ثانویه در کنار گوتیت و مگنتیت (نام اختصاری کانی‌ها بر پایهٔ Whitney و Evans (۲۰۱۰): Bn: بورنیت؛ Ccp: کالکوپیریت؛ Py: پیریت؛ Cct: کالکوسیت؛ Cv: کوولیت؛ Mlc: مالاکیت؛ Hem: هماتیت؛ Mag: مگنتیت؛ Gth: گوتیت؛ Qz: کوارتز؛ Cal: کلسیت)

شیمی کانی‌ها

برای شناسایی ترکیب شیمیایی کانه‌ها، نزدیک به ۵۰ ریزنقطه از کانی‌های سولفیدی کانسار بهاریه، مانند کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت، گالن و مگنتیت تجزیه شدند. در ادامه، به بررسی داده‌های به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود:

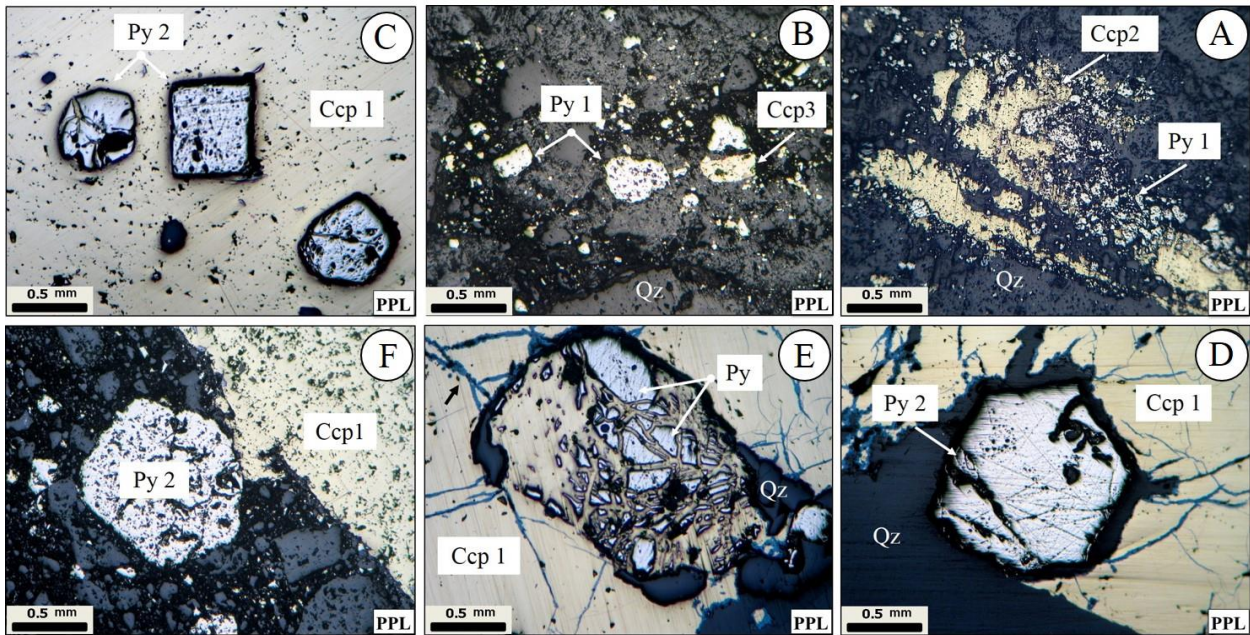
کالکوپیریت: برپایه نوع بافت و همراهی با کانه‌های گوناگون، کالکوپیریت در چهار شکل مختلف دیده می‌شود:

- ۱- کالکوپیریت- پیریت ± هماتیت با بافت شکافه پرکن تا رگه‌ای پرعیار؛
- ۲- کالکوپیریت رگه‌ای تا توده‌ای پرعیار؛
- ۳- کالکوپیریت دانه‌پراکنده در رگه- رگچه کوارتز؛
- ۴- کالکوپیریت ± پیریت برشی با سیمان کوارتز و کلسیت.

در کل، برپایه تجزیه شمار ۲۱ ریزنقطه از کانه کالکوپیریت، فراوانی عنصرهای مس (wt%) و آهن (۳۳/۵۹ - ۴۲/۹۸)، آهن (۳۳/۴ - ۵۳/۵۸ wt%) که سازنده‌های اصلی کالکوپیریت هستند به‌دست آورده شد. در این کانی، بیسموت با فراوانی بیشینه ۰/۲۴wt%، نیکل با فراوانی بیشینه ۰/۰۲wt%، کادمیم با فراوانی بیشینه ۰/۱۲wt% و آنتیموان با فراوانی بیشینه ۰/۰۶wt% از عنصرهای فرعی با فراوانی کم هستند. همچنین، فراوانی بیشینه طلا در کالکوپیریت برابر با ۰/۲۱wt% و فراوانی بیشینه نقره برابر با ۰/۰۹wt% است. کالکوپیریت، با داشتن بیشترین میزان تمرکز طلا (فراوانی بیشینه ۰/۲۱ درصدوزنی) در ساختمان خود، مهم‌ترین حامل طلا در کانسار بهاریه دانسته می‌شود (شکل ۷؛ جدول ۱).

در پهنه سوپرژن، کانی‌های اکسیدی- هیدروکسیدی آهن (مانند هماتیت و گوتیت) و کانی‌های سولفیدی مس (مانند: کالکوسیت، کوولیت و کانی‌های کربنات‌های آبدار مس شامل مالاکیت و آزوریت) از مهم‌ترین کانی‌های ثانویه هستند. این کانی‌ها به دنبال اکسیدشدگی و آزاد شدن آهن از ساختمان کالکوپیریت و تغلیظ آرام آرام مس در حاشیه و شکستگی‌های آن جانشین شده‌اند (شکل‌های ۶-B تا ۶-D).

برپایه ویژگی‌های صحرایی و مغزه‌های حفاری، یک پوشش اکسیدی- کربناته آبدار به سترای نزدیک به ۱۰ متر کانسنگ سولفیدی منطقه را فرا گرفته است. این بخش، از کانی‌های هیدروکسیدی آهن و مس (مانند: گوتیت، مالاکیت، آزوریت و لیمونیت) سرشار است. در منطقه بهاریه، رخداد مالاکیت از آزوریت بیشتر است. هماتیت فراوان‌ترین کانی اکسیدی در کانسار بهاریه است و در بررسی‌های میکروسکوپی به شکل‌های صفحه‌ای و تیغه‌ای (اسپیکولاریت)، بیشتر به‌صورت درهم‌رشدی همراه کالکوپیریت و پیریت (شکل‌های ۶-E و ۶-F) و هماتیت مارتیتی (که در پی افزایش اکسیژن محیط در مرحله سوپرژن جانشین مگنتیت‌ها شده‌اند) دیده می‌شود. مهم‌ترین ساخت هماتیت در مقیاس صحرایی، به‌صورت هماتیت ثانویه رگه‌ای و رگه‌ای- برشی است. این رگه‌ها کانی‌های سولفیدی اصلی کالکوپیریت و پیریت را قطع کرده‌اند. از این‌رو، نسبت به آنها در زمان پیدایش تأخیر نشان می‌دهند. رخداد گوتیت در منطقه نیز چه‌بسا نشان‌دهنده افزایش فوگاسیته اکسیژن در برابر گوگرد است. در پی این پدیده، کانی‌های اکسیدی (مانند: هماتیت) با فازهای آبدار کم‌دمای ثانویه‌ای (مانند: گوتیت) جایگزین می‌شوند (شکل‌های ۶-G تا ۶-I). در کانسار بهاریه، کانی‌های کوارتز، کلسیت و کلریت از مهم‌ترین باطله‌های همراه کانسنگ هستند.



شکل ۷- تصاویرهای میکروسکوپ بازتابی عادی از کالکوپیریت و پیریت‌های منطقه بهاریه. (A, B) پیریت دانه‌پراکنده نسل نخست در کنار کالکوپیریت‌های رگچه‌ای نسل دوم؛ (C, D) پیریت‌های خوش‌وجه نسل دوم پیرامون کالکوپیریت‌های شکافه‌پرکن پرعیار نسل نخست؛ (E) پیریت‌های جزیره‌ای؛ (F) پیریت‌های خوش‌وجه نسل دوم پیرامون کالکوپیریت شکافه‌پرکن پرعیار نسل نخست (نام اختصاری کانی‌ها بر پایه Whitney و Evans (۲۰۱۰): Ccp: کالکوپیریت؛ Py: پیریت)

جدول ۱- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصدوزنی) برای کالکوپیریت در کانسار بهاریه

Generation	Ccp1	Ccp1	Ccp1	Ccp1	Ccp2	Ccp2	Ccp2	Ccp2	Ccp2	Ccp2
Cu	34.37	34.73	34.26	33.82	34.63	34.34	34.62	34.88	42.98	34.21
S	35.12	34.97	34.6	34.93	35.05	35.23	34.77	35.05	33.04	35.42
Fe	31.16	31.01	31.34	30.37	29.91	30.59	30.33	30.22	23.93	30.91
Au	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.21	<0.01	<0.01	0.11	0.02
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
Bi	<0.01	<0.01	0.05	0.04	<0.01	0.24	0.09	0.15	0.18	<0.01
Ag	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.07	0.04
Mn	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
Sb	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.01
As	0.04	<0.01	<0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.45	<0.01	0.05
Ni	<0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
Total	100.76	100.74	100.27	99.2	99.66	100.68	99.91	100.76	100.35	100.69

Generation	Ccp3	Ccp3	Ccp3	Ccp3	Ccp3	Ccp4	Ccp4	Ccp4	Ccp4	Ccp4	Ccp4
Cu	34.47	34.47	34.57	34.98	34.59	33.87	33.84	33.54	34.51	34	33.59
S	35.38	35.44	35.29	34.15	34.33	34.82	34.77	35.59	34.34	34.68	35.6
Fe	30.2	30.5	30.48	30.2	30.4	29.78	30.54	29.31	30.22	30.46	29.98
Au	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.01
Cd	<0.01	0.02	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	<0.01	0.03
Bi	<0.01	0.01	<0.01	0.08	0.02	<0.01	<0.01	0.12	0.06	0.01	<0.01
Ag	0.07	0.02	0.05	<0.01	0.09	0.03	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.09
Mn	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Sb	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
As	0.06	<0.01	0.02	0.06	0.04	0.01	0.03	0.04	<0.01	0.22	0.03
Ni	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	100.18	100.49	100.5	99.49	99.48	98.51	99.19	99.38	99.16	99.37	99.37

است. گاه پیریت به صورت میانبارهای درشت تا ریز (۲۲۰-۱۵ میکرون) شکل‌دار تا بی‌شکل در کالکوپیریت دیده می‌شود. تجزیه شماره ۱۲ ریزنقطه از این کانه نشان می‌دهد دو عنصر گوگرد (۵۴/۲۶-۵۱/۸ درصدوزنی) و آهن (۴۷/۳۱-۴۴/۵ درصدوزنی) سازنده‌های اصلی این کانی هستند و بیشترین فراوانی را در ترکیب پیریت دارند. همچنین، در ساختمان پیریت، فراوانی بیشینه نیکل برابر با ۰/۰۴wt%، کادمیم برابر با ۰/۰۶ wt% و بیسموت برابر با ۰/۱۳ wt% است. پیریت‌های سرشار از آرسنیک بیش از ۳/۱ درصدوزنی آرسنیک دارند (Lin et al., 2011). در منطقه بهاریه، فراوانی بیشینه آرسنیک در ساختمان پیریت برابر با ۰/۰۷ wt% به دست آورده شد. حضور عنصر مس در این کانی با فراوانی بیشینه ۰/۵۸ wt% نشان می‌دهد فاز سولفیدی پیریت نخستین، در حمل و تمرکز عنصر مس در منطقه نقش مهمی داشته است. همچنین، در فاز سولفیدی، فراوانی بیشینه عنصر طلا برابر با ۰/۱ درصدوزنی و نقره برابر با ۰/۱ درصدوزنی است. پس در کانسار بهاریه، کانه سولفیدی پیریت نیز انتقال‌دهنده خوبی برای عنصرهای طلا و نقره بوده است (جدول ۲).

پیریت: دست کم دو نسل کانی پیریت در منطقه دیده می‌شود (شکل ۷):

۱- پیریت‌های نخستین ریزدانه‌پراکنده و بی‌شکل؛

۲- پیریت‌های خوش‌وجه دانه‌درشت.

در بررسی میکروسکوپی، پیریت با بافت‌های بافت‌های پرکننده فضاهای تهی، جان‌شینی، برشی (کاتاکلاستیک)، جزیره‌ای و گاه به صورت میانبار در کنار دیگر کانی‌ها شناسایی شد. برخی شکل‌های دانه‌پراکنده پیریت در پی فشارهای بعدی دچار تبلور دوباره شده‌اند. این دانه‌ها به صورت شکل‌های خوش‌وجهی از پیریت در آمده‌اند که در سنگ میزبان به فراوانی یافت می‌شوند. همچنین، بخش بزرگی از این پیریت‌ها در اثر فرایندهای سوپرژن و در اثر سیال‌های کانه‌ساز اکسیدان سرشار از مس با سولفیدهای مس و هماتیت جان‌شین شده‌اند و به طور کامل و یا از حاشیه و در راستای شکستگی‌ها با اکسید و هیدروکسیدهای ثانویه آهن (گوتیت و هماتیت) جایگزین شده‌اند. میانبارهای کوچک کالکوپیریت، اسفالریت، گالن در برخی پیریت‌های همراه با کانه‌زایی نیز نشان‌دهنده پیدایش پیریت نخستین در همه مرحله‌های کانه‌زایی

جدول ۲- داده‌های تجزیه ریز کاو الکترونی (بر پایه درصدوزنی) برای پیریت در کانسار بهاریه

Generati on	Py1	Py1	Py1	Py1	Py1	Py1	Py2	Py2	Py2	Py2	Py2	Py2
S	53.39	53.05	53.8	53.24	53.34	54.26	53.07	52.29	53.58	53.87	52.44	51.8
Fe	45.73	46.03	45.68	45.74	45.73	44.5	47.03	45.98	46.3	44.6	46.11	47.31
Cu	0.05	0.08	0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.08	0.26	0.04	0.08	0.58	0.58
Bi	<0.01	0.06	0.13	<0.01	<0.01	0.08	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Ag	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.1
As	0.06	<0.01	0.04	<0.01	0.06	0.07	0.05	0.01	0.04	0.03	0.03	0.05
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.06	<0.01	<0.01	<0.01
Ni	0.05	0.06	0.04	<0.01	0.11	<0.01	0.11	0.03	0.01	0.07	0.05	<0.01
Mn	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
Au	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.1	<0.01	0.04	0.05	<0.01	0.01
Co	<0.01	0.31	0.23	0.36	0.42	0.74	0.01	0.35	<0.01	0.41	0.31	<0.01
Total	99.27	99.25	99.71	99.09	99.16	99.06	100.41	99.04	100.08	98.68	99.17	99.94

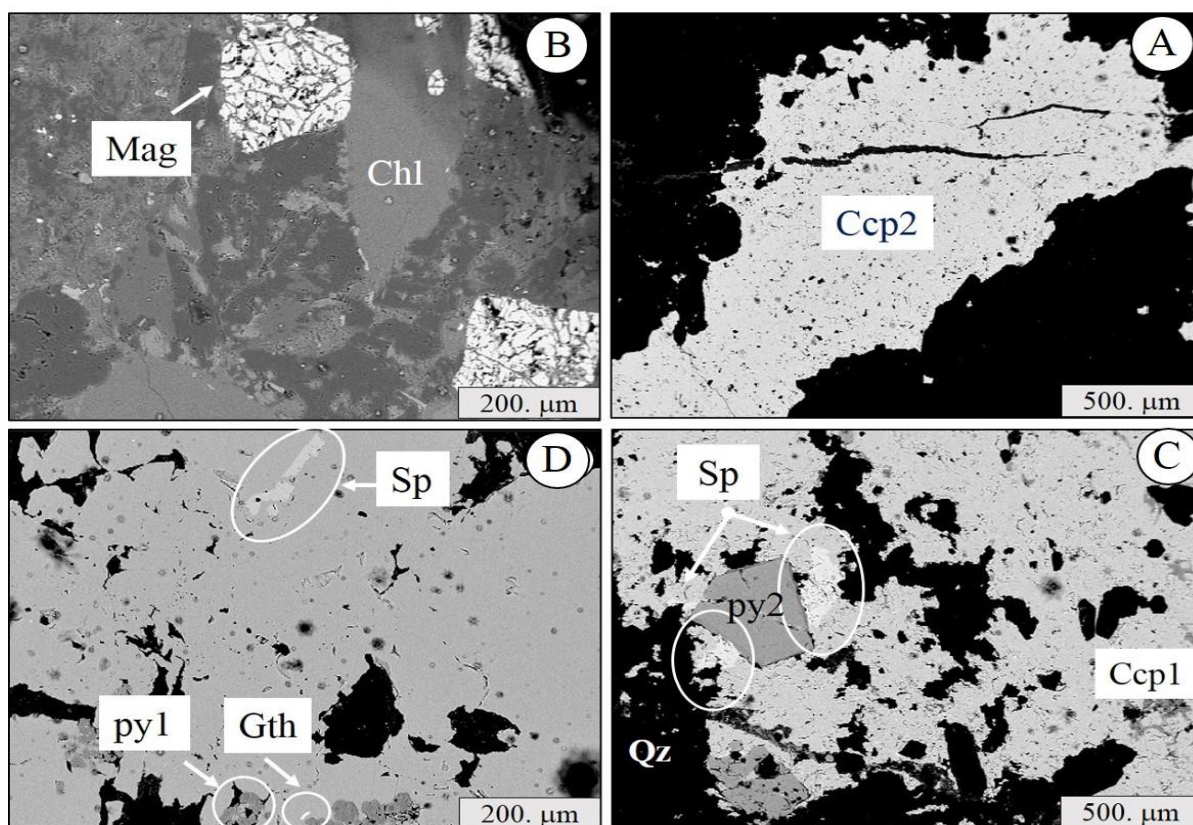
مگنتیت در این کانسار، بسیار اندک است. شمار ۸ ریزنقطه از کانه مگنتیت تجزیه شد که بر این پایه، مقدار اکسید عنصرهای آهن (۷۷/۵۳wt% - ۷۵/۸۴)، تیتانیوم

مگنتیت: مگنتیت در منطقه بهاریه به صورت بلورهای تجمعی و بافت توده‌ای تا موزاییکی همراه کانسنگ مس دیده می‌شود (شکل‌های ۶-G، ۶-H و ۸-B). رخداد

وانسادییم (۱۲/۳۸ - ۱۳/۵۲ wt%)، وانسادییم (۰/۴۸ - ۰/۵۴ wt%)، کلسیم (۰/۰۲ - ۰/۰۶ wt%)، گوگرد (۰/۰۱ - ۰/۰۵ wt%)، کروم (۰/۰۴ - ۰/۰۶ wt%)، منگنز (۰/۱۹ - ۱/۴۱ wt%)، سیلیس (۰/۰۷ - ۰/۱۳ wt%)، فسفر (۰/۰۲ - ۰/۰۷ wt%)، و نیکل (۰/۰۱ - ۰/۰۲ wt%) در ترکیب مگنتیت گزارش شده است (جدول ۳).

جدول ۳- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصدوزنی) برای مگنتیت در کنسار بهاریه

Point No.	۱	۲	۳	۴	۵	۶
SiO ₂	0.11	0.1	0.13	0.07	0.1	0.11
TiO ₂	12.93	13.39	13.51	12.38	13.03	13.52
Cr ₂ O ₃	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
FeO	77.53	77.1	75.84	76.88	77.51	76.36
MnO	0.87	0.41	0.39	1.41	0.19	1.1
CaO	<0.01	0.02	0.06	0.03	0.02	0.05
NiO	0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.06	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.07
V ₂ O ₃	0.53	0.5	0.54	0.49	0.5	0.48
SO ₂	0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01
Total	92.11	91.58	90.6	91.31	91.39	91.74



شکل ۸- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (BSE) و میکروسکوپ عبوری- بازتابی از کانی‌های کمیاب منطقه بهاریه. (A) کالکوپیریت نسل نخست با بافت پرعیار شکافه‌پرکن همراه با میانبارهای ریز سیلیکات؛ (B) مگنتیت‌های توده‌ای؛ (C) اسفالریت در کنار بلور خودشکل پیریت به‌صورت میانبار در کالکوپیریت؛ (D) میانبارهای ریز اسفالریت و گالن و پیریت در زمینه کالکوپیریت (نام اختصاری کانی‌ها: Ccp: کالکوپیریت؛ Py: پیریت؛ Mag: مگنتیت؛ Qz: کوارتز؛ Chl: کلسیت؛ Sp: اسفالریت؛ Gn: گالن)

اسفالریت: اسفالریت در بررسی میکروسکوپی

فراوانی کمی دارد و بیشتر به صورت میانبارهای کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون در میزبان کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل‌های ۸-C و ۸-D). همچنین، گاه دانه‌های کالکوپیریت در اسفالریت به صورت میانبارهای ریز کالکوپیریت دیده می‌شوند. شمار ۵ ریزنقطه از این کانه تجزیه شدند. بر این پایه، مقدار آهن در اسفالریت‌ها برابر با ۰/۳ تا ۴/۶ درصدوزنی (معادل درصدمولی FeS برابر با ۰/۵ تا ۷/۱) است. دو عنصر روی با فراوانی برابر با ۶۴/۲ تا ۵۵/۸۷ درصدوزنی و گوگرد با فراوانی برابر با ۳۳/۸۱ تا ۳۳/۲۱

درصدوزنی از سازنده‌های اصلی این کانی هستند و بیشترین فراوانی را در ترکیب اسفالریت‌ها دارند. همچنین، در اسفالریت، مقدار مس برابر با ۴/۳۷-۰/۸۵ درصدوزنی، کادمیم برابر با ۱/۲-۰/۳۵ درصدوزنی، بیشینه مقدار کبالت برابر با ۰/۱۰۱ درصدوزنی، بیشینه مقدار بیسموت برابر با ۰/۰۶ درصدوزنی، بیشینه مقدار نیکل برابر با ۰/۰۲ درصدوزنی و بیشینه مقدار آرسنیک برابر با ۰/۰۲ درصدوزنی به دست آورده شده‌اند. همچنین، مقدارهای فراوانی بیشینه طلا برابر با ۰/۱۵ درصدوزنی و نقره برابر با ۰/۰۷ درصدوزنی هستند (جدول ۴).

جدول ۴- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی (برپایه درصدوزنی) برای اسفالریت در کانسار بهاریه

Point No.	Zn	S	Fe	Cu	Cd	Ag	As	Mn	Ni	Au	Bi	Te	Total
۱	55.87	33.73	4.64	4.37	0.53	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	99.22
۲	63.69	33.83	0.39	0.12	1.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.06
۳	64.2	33.21	0.27	0.17	0.73	0.02	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	98.68
۴	63.6	33.22	1.41	0.89	1.2	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	100.41
۵	64.03	33.30	1.42	0.85	1.12	<0.01	0.02	0.01	0.02	0.15	<0.01	<0.01	100.93

گالن: گالن مهم‌ترین کانی سولفیدی سرب در

کانسار بهاریه است. در بررسی میکروسکوپی، این کانه بیشتر به صورت میانبارهای ریز با اندازه ۴۰-۱۵ میکرون در زمینه کالکوپیریت دیده می‌شود و با اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل ۸-D). شمار ۲ ریزنقطه از این کانی با روش EPMA تجزیه شدند. داده‌های به دست آمده نشان می‌دهند دو عنصر سرب با فراوانی برابر با ۸۷ تا ۸۶/۶۷ درصدوزنی و عنصر گوگرد با فراوانی برابر با ۱۲/۱۸ تا ۱۱/۹۱ درصدوزنی از سازنده‌های اصلی این کانی هستند و بیشترین فراوانی

را در ترکیب گالن نشان می‌دهند. عنصر نقره با بالاترین مقدار تمرکز در گالن، از دیدگاه اقتصادی محصول جانبی ارزشمندی به شمار می‌رود. مقدار فراوانی نقره در گالن‌های بررسی شده برابر با ۰/۱۴ تا ۰/۱ درصدوزنی است. مقدار مس در گالن برابر با ۰/۳ تا ۰/۰۹ درصدوزنی، آهن برابر با ۰/۶ تا ۰/۰۲ درصدوزنی، بیشینه آرسنیک برابر با ۰/۱۶ درصدوزنی، بیشینه کادمیم برابر با ۰/۰۸ درصدوزنی، تلوریم برابر با ۰/۰۵ تا ۰/۰۱ درصدوزنی و بیشینه آنتیموان برابر با ۰/۰۳ درصدوزنی به دست آورده شده است (جدول ۵).

جدول ۵- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی (برپایه درصدوزنی) برای گالن در کانسار بهاریه

Point No.	Pb	S	Cu	Fe	As	Ag	Cd	Te	Sb	Bi	Total
-----------	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	-------

۱	86.67	12.18	0.43	0.02	<0.01	0.14	0.08	0.05	0.03	<0.01	99.6
۲	87	11.91	0.09	0.06	0.16	0.1	<0.01	0.01	<0.01	0.01	99.34

در پیریت برابر با ۰/۱ درصدوزنی هستند. بیشترین مقدار نقره گزارش شده برای کالکوپیریت نیز برابر با ۰/۰۹ درصدوزنی، در پیریت برابر با ۰/۱ درصدوزنی و در اسفالریت برابر با ۰/۰۷ درصدوزنی به دست آمده است. مرحله‌های زمانی رخداد کانه‌زایی در کانسار مس بهاریه به‌طور شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است.

طلا و نقره: داده‌های شیمیایی به دست آمده از تجزیه سولفیدهای مس بررسی شده در کانسار مس بهاریه نشان‌دهنده بیشترین مقدار طلا در کالکوپیریت (برابر با ۰/۲۱ درصدوزنی) و بیشترین مقدار نقره در گالن (برابر با ۰/۱۴ درصدوزنی) هستند. بیشترین هم‌چنین، مقدارهای طلای گزارش شده در اسفالریت برابر با ۰/۱۵ درصدوزنی و

Stages Minerals	Main ore-stage (hypogene)				Post ore-stage (supergene)
	substage I	substage II	substage III	substage IV	
Magnetite	—				
Hematite	— Hem 1				— Hem 2
Chalcopyrite	—	—	—	— Py 2	
Pyrite	— Py 1			—	
Bornite				—	
Sphalerite			—		
Galena			—		
Chalcocite					—
Covellite					—
Digenite					—
Azurite					—
Malachite					—
Geothite					—
Gangue minerals					
Quartz			—	—	—
Calcite				—	—
Chlorite					—

Strong Intermediate Weak Locally

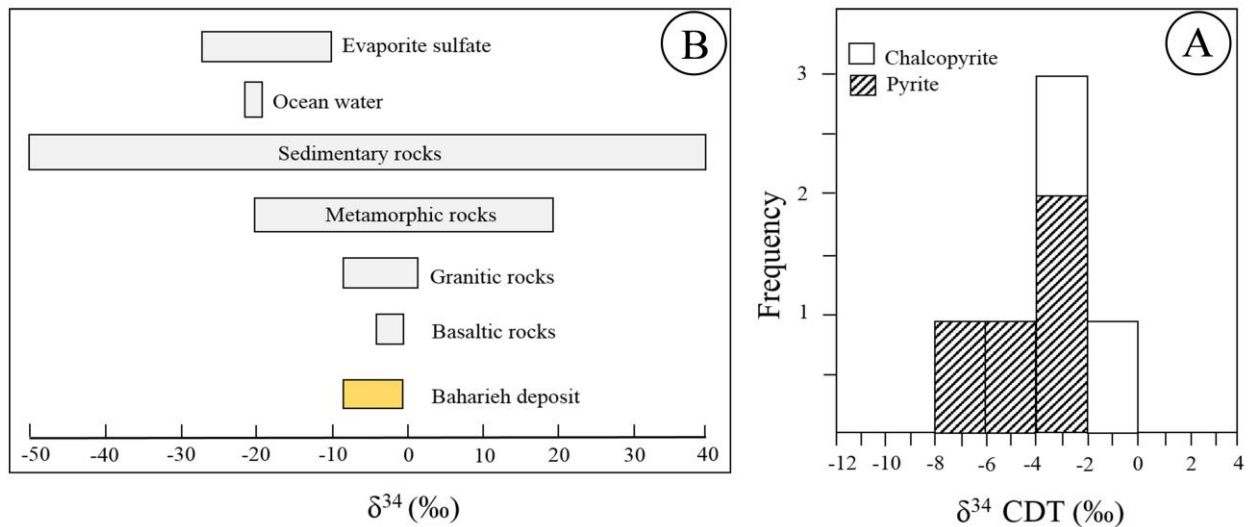
شکل ۹- توالی پاراژنتیک کانسار مس بهاریه (ضخامت خط‌ها نشان‌دهنده فراوانی است)

مقدار $\delta^{34}S$ در کانی‌های سولفیدی بر پایه تغییرات دمایی، شرایط احیایی، تغییرات pH و نیز مقدار ایزوتوپ، خاستگاه نخستین پدید می‌آید (Ohmoto, ۱۹۷۲). برای به دست آوردن نسبت ایزوتوپ گوگرد سیال مرتبط با پیدایش کالکوپیریت و پیریت از معادله تصحیح دمایی پیشنهادی Ohmoto و Rye (۱۹۹۷) بهره گرفته شد:

$$\delta^{34}S_{\text{mineral}} = \delta^{34}S_{\text{fluid}} + \left(\frac{10^6}{T^2} - 1 \right) \times 10^3$$

ایزوتوپ پایدار گوگرد: خاستگاه گوگرد مورد نیاز برای پیدایش کانسار با به کارگیری ایزوتوپ‌های گوگرد را به دست آورده می‌شود. همچنین، دماسنجی سیال کانه‌دار، سنجش نسبت مؤثر آب به سنگ در هنگام رویداد کانی‌سازی، ارزیابی درجه تعادل در سیستم و در پایان بررسی سازوکار پیدایش و ته‌نشست مواد معدنی از دیگر کاربردهای ایزوتوپ‌های گوگرد است (Hoefs, 2015). در کل، تغییرات در

۲ □□□□□□□□□□ □□ □□□□□□ □□□ □□□ (۱۹۹۷)



شکل ۱۰- A) نمودار فراوانی $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی کانسار بهاریه؛ B) موقعیت ترکیب ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ کانسار بهاریه در برابر محدوده‌های ایزوتوپی گوگرد در سنگ‌های گوناگون (Hofes, 2015)

بحث

ارزیابی شرایط دمایی و وضعیت سولفیداسیون

کاربرد شیمی کانی‌ها یکی از روش‌های کارآمد برای دستیابی به ویژگی‌های زمین‌شیمی کانسار و شرایط پیدایش کانسنگ و سنگ میزبان به‌شمار می‌رود و از این‌رو، در این پژوهش به آن پرداخته شده است. برپایه بررسی‌های Bralía و همکاران (۱۹۷۹)، محتوا و نسبت دو عنصر Ni و Co در پیریت برای شناسایی خاستگاه فلزها کاربرد دارد:

۱- پیریت با خاستگاه رسوبی با مقادارهای کم کبالت و نیکل و همچنین، مقادارهای کم

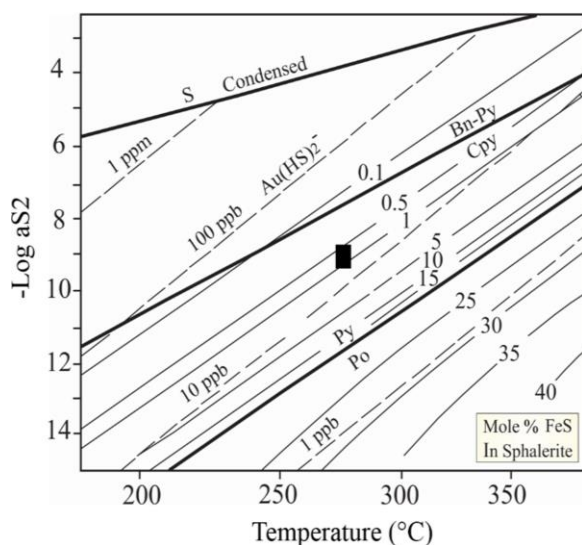
نسبت $\text{Co/Ni} = 0/63$ شناخته می‌شود؛

۲- پیریت‌های گرمابی مقادارهای متفاوتی از کبالت و نیکل دارند و با نسبت‌های متوسط $\text{Co/Ni} = 1/17$ شناخته می‌شوند؛

۳- پیریت با خاستگاه آتشفشانی- برون‌دمی در نهشته‌های سولفید توده‌ای و با نسبت بالای Co/Ni برابر با ۵-۵۰ (میانگین: ۸/۷) شناخته می‌شود.

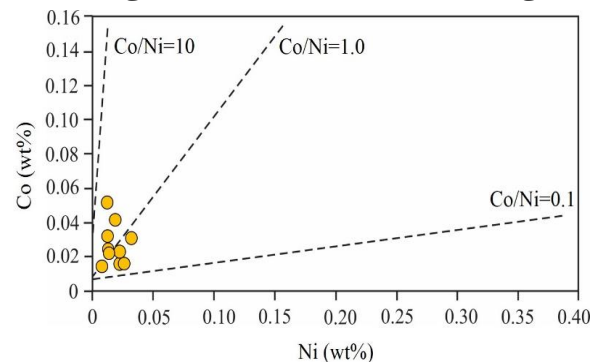
در منطقه بهاریه، هیچگونه کانی مستقلی از کبالت در بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های معدنی شناسایی نشد و داده‌های تجزیه نقطه‌ای نشان‌دهنده حضور Co در ساختمان پیریت و اسفالریت هستند. برپایه داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برای پیریت‌های کانسار بهاریه، میانگین Co برابر با ۳۸۳ ppm، میانگین Ni برابر با ۱۴۱ ppm و میانگین نسبت Co/Ni برابر با ۲/۷۱ به دست آمدند (جدول ۲). این مقادارها چه بسا نشان‌دهنده خاستگاه گرمابی پیریت هستند (شکل ۱۱). برپایه نمودار دو محوری کبالت- نیکل (پایه درصدوزنی یا wt%) برای نسل‌های گوناگون پیریت در منطقه بهاریه، نمونه‌های با نسبت Co/Ni کمتر از ۰/۱ در محدوده پیریت‌های رسوبی فرامبوئیدال و نمونه‌های با نسبت Co/Ni بیشتر از ۰/۱ در محدوده پیریت‌های گرمابی خوش‌وجه جای می‌گیرند. بر این پایه، نمونه‌های منطقه بهاریه در محدوده پیریت‌های گرمابی خوش‌وجه جای گرفته‌اند (شکل ۱۱). در همین راستا، شیمی کانه گالن نیز گویای دمای

شرایط پیدایش کانسنگ، مقدار آهن در اسفالریت با دما نسبت مستقیم و با فعالیت گوگرد و فشار حاکم (fS) نسبت عکس دارد. همچنین، با افزایش دما، مقدار FeS در اسفالریت با ثابت بودن فشار افزایش می‌یابد و با ثابت بودن دما به ازای افزایش فشار، مقدار FeS کاهش می‌یابد (Barnes, 1997). از این رو، برپایه داده‌های شیمیایی نمونه‌های اسفالریت بهاریه، محتوای آهن برابر با ۰/۳ تا ۴/۶ درصدوزنی و تغییرات درصد مولی FeS برابر با ۰/۵ تا ۷/۱ به دست آورده شد. اسفالریت‌ها بیشتر به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شوند و محتوی آهن آنها کم تا متوسط است. این ویژگی نشان‌دهنده سولفیدشدگی حد واسط ذخیره بهاریه و پیدایش آن در دماهای متوسط است (جدول ۴؛ شکل‌های C-۸ و D-۸). با رسم تغییرات درصد مولی FeS (۰/۵ - ۷/۱) نمونه‌های اسفالریت در نمودار دوتایی T در برابر $\text{Log } a_{S_2}$ (Scott and Barnes, 1971)، برای $\text{Log } a_{S_2}$ سیال مقدار عددی ۹ به دست آمد (شکل ۱۲). این مقدار شرایط سولفیداسیون حد واسط را برای ذخیره گرمابی بهاریه پیشنهاد می‌کند.



شکل ۱۲- نمودار ارتباط فازی در سیستم Fe-Zn-S (Scott, ۱۹۷۱). خط‌های پیوسته و ناپیوسته به ترتیب مقدار درصد مولی

نسبی پیدایش کانسار است و داده‌های به دست آمده از بررسی سیال‌های درگیر نیز آن را تأیید می‌کنند.



شکل ۱۱- نمودار مقادیر کبالت- نیکل در پیریت‌های منطقه بهاریه

مقدار Bi و Sb در گالن به دمای پیدایش وابسته است و نسبت Sb/Bi در گالن شرایط رویداد کانی‌سازی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که نسبت Bi/Sb کمتر از ۰/۶ نشان‌دهنده شرایط دما و فشار بالا برای پیدایش گالن و نسبت Sb/Bi برابر با ۶ تا ۱۳ نشان‌دهنده شرایط دما و فشار کم برای پیدایش گالن است (Malakhov, 1968). برپایه داده‌های به دست آمده از تجزیه ریزکاو الکترونی برای نمونه‌های گالن در منطقه بهاریه، مقدار میانگین نسبت Sb/Bi برابر ۲ است و از این رو، این مقدار میان دو بازه دما و فشار کم و دما و فشار بالاست. پس پیدایش گالن منطقه بهاریه در شرایط دما و فشار متوسط کانی‌سازی و در دمای متوسط گرمابی روی داده است (جدول ۵). همچنین، اسفالریت با فرمول ساده‌اش، طیف گسترده‌ای از عنصرهای کمیاب را از راه جانشینی ساده به جای Zn در ساختار خود دارد (Cook et al., 2009; Lin et al., 2011).

آهن اصلی‌ترین عنصری است که در ترکیب اسفالریت جانشین روی می‌شود. مقدار تراکم آهن در ترکیب اسفالریت چه بسا نشان‌دهنده دما و فشار پیدایش آن است. اسفالریت با آهن بیشتر به رنگ تیره‌تر و در نمونه‌های با آهن کمتر روشن‌تر است. در

منطقه بهاریه، میانگین تراکم Zn در نمونه‌های اسفالریت برابر با ۶۲۲۷۸۰ ppm است و تراکم Cd بالایی دارند (۱۱۲۰۰ ppm - ۵۳۰۰؛ میانگین: ۹۲۲۰ ppm). همچنین، نسبت Zn/Cd ناچیزی برابر با ۶۷/۵۴ نشان می‌دهند (جدول ۴).

همبستگی منفی آهن با کادمیم در این نمونه‌ها به‌روشنی دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که مقدار کادمیم در اسفالریت‌های روشن بیشتر از اسفالریت‌های تیره‌تر است. از سوی دیگر، میان کادمیم با روی همبستگی مثبت دیده می‌شود. این دو عنصر با آهن همبستگی منفی دارند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش آهن در اسفالریت‌ها، تراکم عنصرها روی و کادمیم کاسته می‌شود. برپایه بررسی‌های دما- فشارسنجی اسفالریت‌های منطقه بهاریه، فشارسنجی برپایه نمودار دوتایی دما در برابر %mol FeS در اسفالریت (که به‌علت قرار نگرفتن اسفالریت منطقه بهاریه در محدوده، این نمودار ارایه نشده است)، فشاری بیشتر از ۱۰ کیلو بار (معادل ۱۳Kb) به‌دست آورده شد. روشن است که این فشار با شرایط زمین‌شناسی منطقه بهاریه همخوانی ندارد و این نکته چه‌بسا پیامد نبود پیرویت در کانسار بهاریه (مقایسه شود با Toulmin *et al.*, 1991) و همچنین، آغشتگی اسفالریت با CuS است که روی درصدمولی FeS در اسفالریت اثر می‌گذارد.

خاستگاه گوگرد

گوگرد در محیط طبیعی دو خاستگاه نخستین و اصلی دارد: خاستگاه ماگمایی و خاستگاه آب دریا (Hoefs, 2015). معمول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین خاستگاه گوگرد، سولفات‌های دریایی هستند (Ghazban *et al.*, 1994). در شرایط فیزیکی و شیمیایی در نظر گرفته شده برای

FeS و میزان حضور طلا را نشان می‌دهند. برپایه میانگین دمای پیدایش کانسار بهاریه و مقدار درصدمولی FeS (کادر سیاه‌رنگ) به تغییرات $\log a_{S_2}$ پی‌برده می‌شود.

در همین راستا، مقدار تراکم Cd و نسبت Zn/Cd در اسفالریت موضوع تازه‌ترین پژوهش‌ها روی رده‌بندی‌های گوناگون ذخیره‌های سرب و روی در چین است و برپایه ۷۰ نمونه اسفالریت جداشده (از شمار ۹ کانسار شناخته‌شده) که تجزیه شدند، این ذخیره‌ها به سه گروه دما بالا، کم دما و پروندمی (متصاعدی- رسوبی یا SEDEX) رده‌بندی شده‌اند (Schmitt *et al.*, 2009):

الف) سیستم دما بالا که طیف گسترده‌ای از ذخیره‌های گرمایی با خاستگاه وابسته به توده‌های نفوذی، پورفیری، اسکارنی و سولفید توده‌ای را دربر می‌گیرد، در شرایط دمایی میان 250°C - 200°C روی داده است. در این سیستم، مقدار میانگین تراکم Cd برابر با ۴۱۲۶ - ۲۴۱۰ (میانگین: ۲۹۳۳ ppm) و نسبت Zn/Cd برابر با ۲۲۳ - ۱۵۵ (میانگین: ۱۹۵ ppm) است؛

ب) سیستم کم دما در ذخیره‌های نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) دیده می‌شود. روشن است که این سیستم در دمای کمتر از 200°C روی می‌دهد و در آن، مقدار Cd تراکم بالا (۳۴۹۸۱ تا ۲۴۱۵ ppm؛ میانگین: ۹۳۹۹ ppm) و نسبت Zn/Cd از گروه‌های دیگر کمتر است (۲۰۱ - ۱۷ ppm؛ میانگین: ۱۰۱ ppm)؛

پ) سیستم ذخیره‌های SEDEX که با مقدارهای ناچیز تراکم Cd (۹۹۶ ppm - ۵۹۵؛ میانگین: ۸۳۲ ppm) و نسبت Zn/Cd چشمگیر (۳۶۸ تا ۳۱۶ ppm؛ میانگین: ۳۵۳ ppm) شناخته می‌شوند.

برپایه داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برای

مقدارها نشان می‌دهند گوگرد از فرایندهایی خاستگاه گرفته است که غلظت $\delta^{34}\text{S}$ در ترکیب آنها را کاهش داده است. مهم‌ترین فرایندی که مقدارهای ایزوتوپی گوگرد برای این کانسار را منفی کرده است، فرایند احیای باکتریایی سولفات آب دریاست. باکتری‌ها در اثر احیای سولفات آب دریا هنگامی که مواد آلی-کربنی اکسید می‌شوند، انرژی دریافت می‌کنند. از سوی دیگر، باکتری‌های حوضه با مصرف مواد آلی، سولفات آب دریا را دچار احیای شدید باکتریایی می‌کنند. در کانسار بهاریه نیز فعالیت میکروارگانیسم‌های احیاءکننده سولفات آب دریا را احیاء می‌کنند و گوگرد آزاد می‌شود. سپس با واکنش این گوگرد با آهن محیط، پیریت پدید می‌آید که نخستین سولفید است و به‌صورت پرکننده فضای تهی و پیریت‌های ریزدانه پراکنده در سنگ میزبان آندزیت پورفیری دیده می‌شود. در این مرحله، حضور پیریت عامل مهمی برای پیدایش وضعیت احیایی در سنگ میزبان کانه‌زایی به‌شمار می‌رود. در کل، برپایه داده‌های چینه‌شناسی و کانی‌شناسی سنگ میزبان، پیریت‌های نخستین ریزبلور در زمینه‌سنگ میزبان محتمل‌ترین خاستگاه گوگرد برای کانی‌سازی سولفیدی در کانسار بهاریه دانسته شده‌اند. این پیریت‌ها در منفی شدن مقدارهای ایزوتوپ گوگرد در بهاریه نقش داشته‌اند. برپایه بررسی‌های کانه‌نگاری، پیریت‌های دانه‌ریز و خوش‌وجه در کانسار بهاریه به‌صورت پراکنده و بیشتر به‌صورت درگیر با کالکوپیریت هستند. در کانسار بهاریه، حضور پیریت به‌صورت دانه‌ریز پراکنده در زمینه سنگ آشکارتر است. حضور پیریت و وضعیت احیایی این واحد سنگی عامل اصلی تمرکز کانه‌زایی مس در منطقه است و

مرحله اصلی سیال ($T < 300^\circ\text{C}$ و pH و Eh کم)، سهم اصلی گوگرد به‌صورت H_2S است. در این دماها، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در سولفیدها همانند مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ در سیال است (Ohmoto and Rye, ۱۹۹۷). با فرض اینکه سولفات‌های دریایی خاستگاه گوگرد باشند، تغییر در مقدار $\delta^{34}\text{S}$ چه‌بسا به فرایند احیاء SO_4 به H_2S مربوط است. این فرایند در پی فرایندهای باکتریایی و یا شیمیایی (احیای ترموشیمیایی سولفات) رخ می‌دهد (Machel, 2001). دامنه تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ در سولفیدهای گرمایی با خاستگاه ماگمایی برابر با ۳- تا +۱ پرمیل است (Hoefs, 2015). خاستگاه گوگرد ماگمایی نیز ترکیبی است از گوگرد حل‌شده از نفوذی‌ها و استوک‌ها و گوگرد شسته‌شده از سنگ‌های میزبان آتشفشانی (Carrillo-Rosúa et al., 2014; Kojima et al., ۲۰۰۸). همچنین، دامنه تغییر $\delta^{34}\text{S}$ برای گوگرد خاستگاه گرفته از سنگ‌های آذرین برابر با ۲- تا +۱۰ پرمیل است. در کل، داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه‌های کالکوپیریت و پیریت کانسار بهاریه دامنه تغییرات اندکی نشان می‌دهند که از نزدیک به صفر تا مقدارهای کمی منفی (۷/۳- تا ۰/۵ پرمیل) است. این مقدارها نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی نخستین برای مقدارهای نزدیک به صفر $\delta^{34}\text{S}$ و تهی‌شدگی نسبی آن به سبب فرایندهای احیایی برای داده‌های کمابیش منفی $\delta^{34}\text{S}$ هستند. در کانسار بهاریه، خاستگاه گوگرد ماگمایی برای مقدارهای ایزوتوپی نزدیک به صفر $\delta^{34}\text{S}$ ، چه‌بسا ترکیبی از گوگرد حل‌شده از نفوذی‌ها و گوگرد شسته‌شده از سنگ‌های میزبان آتشفشانی است. نکته جالب درباره کانسار بهاریه داشتن مقدارهای کمابیش منفی $\delta^{34}\text{S}$ است. این

گوگرد از سولفیدهای مس نخستین در بخش‌های شمالی شیلی، کمابیش به‌خوبی همگن شده‌اند و بیشتر آنها دامنه‌های کمی منفی و نزدیک به صفر و خاستگاه ماگمایی را برای گوگرد را نشان می‌دهند (Kojima *et al.*, 2008; Carrillo-Rosúa *et al.*, 2014). همانند دیگر کانسارهای تیپ مانتو در دنیا، رخداد کانه‌زایی کانسار بهاریه دو مرحله مهم را سپری کرده است:

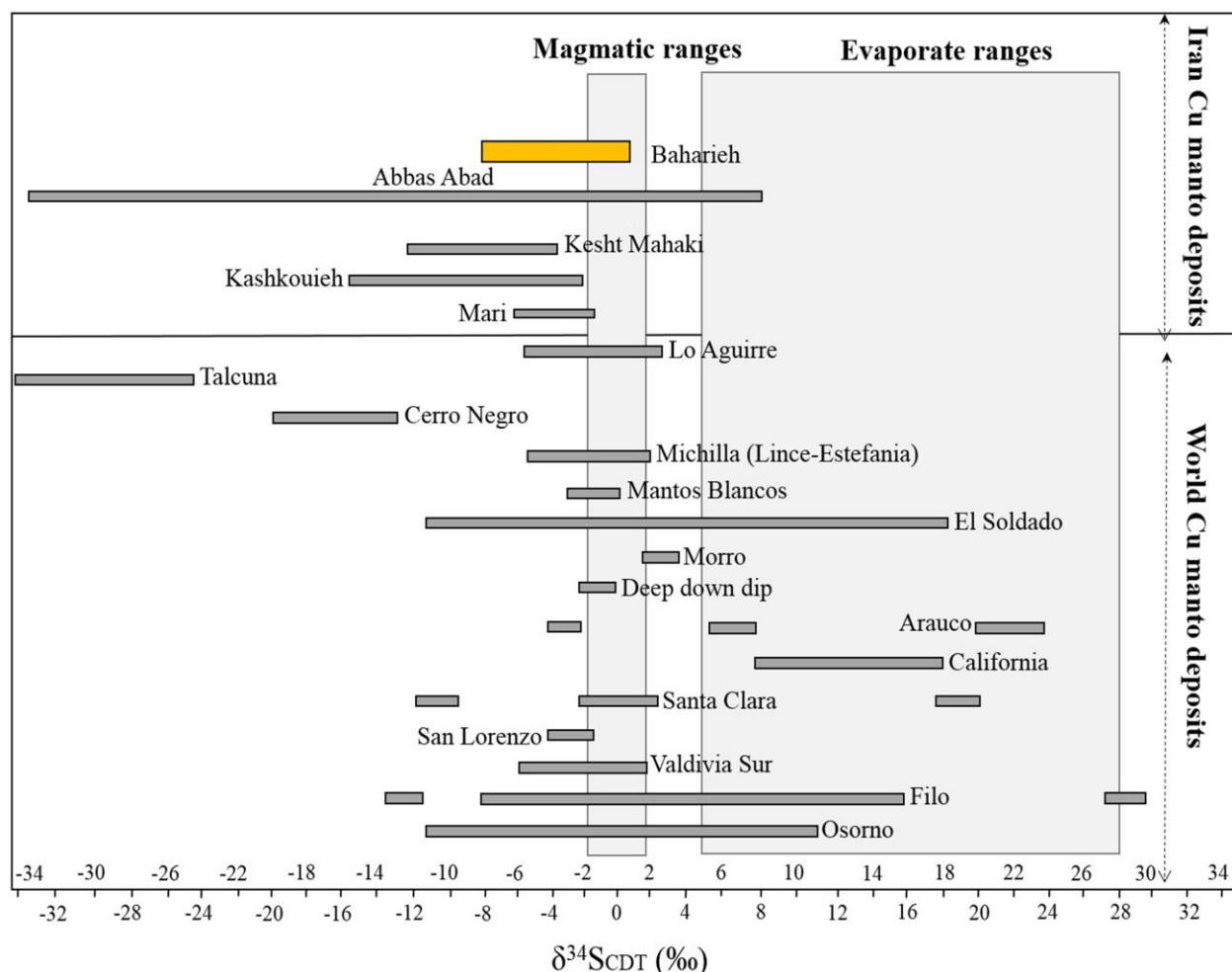
- ۱- پیدایش پیریت در زمینه سنگ آندزیت پورفیری و پیدایش شرایط احیایی در محیط؛
- ۲- ورود سیال‌های اکسیدان سرشار از مس که با جانشینی سولفیدهای مس و هماتیت به‌جای پیریت فاز نخست، کانه‌زایی مس را به‌دنبال داشته است.

با وجود دیدگاه‌های گوناگون درباره چگونگی پیدایش کانسارهای مس مانتو، الگوی پیدایش اپی‌ژنتیک- دیاژنتیک برای پیدایش کانسار بهاریه پیشنهاد می‌شود. به‌باور پژوهشگرانی مانند Kirkham (۱۹۹۶) و Guerra و Campano (۱۹۷۵)، مقدارهای بالایی از مس به‌طور نخستین در سنگ میزبان بوده‌اند و در هنگام رویداد دیاژنز تدفینی و دگرسانی گرمایی، فروشت شده‌اند. در کل، در کانسار بهاریه، با رویداد فرایند آتشفشانی (پیش از کانه‌زایی) و با حاکم شدن شرایط کشتی بر پهنه درون کمان آتشفشانی ائوسن در پهنه سبزوار، همزمان گدازه‌ها به‌صورت متناوب با توف‌ها بیرون‌ریخته‌اند (با فرایندهای آتشفشانی زبردیریایی به‌همراه دگرسانی پروپلیتیک) و سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی را پدید آورده‌اند که مقدار مس در آنها بالاست. به‌دنبال آن، با رویداد مرحله پیریت‌زایی (پیش از کانی‌زایی) در هنگام رویداد دیاژنز نخستین، فعالیت میکروارگانیسم‌های احیاء‌کننده سولفات آب دریا

محدودبودن کانه‌زایی به این واحد نشان‌دهنده وضعیت چینه‌کران کانسار بهاریه است. حضور پیریت‌های پراکنده دانه‌ریز در منطقه نشان می‌دهد محیط پیدایش کانسار بهاریه در دوره‌ای پس از پیدایش ذخیره، احیایی شده است. رخداد شرایط احیایی، محیط خوبی برای پیدایش پیریت احیایی و جانشینی کانی‌های سولفیدی در آنها پدید آورده است (Subias *et al.*, 2003). در چنین شرایطی، کالکوپیریت و بورنیت به‌جای پیریت دانه‌پراکنده جانشینی می‌شوند و بافت جانشینی را پدید می‌آورند. ظاهر خوش‌وجه پیریت نیز از شکل‌های متداول پیریت است که در مرحله دیاژنز نخستین از واکنش سولفید (پدیدآمده از احیای سولفات‌ها) با آهن دوظرفیتی یا سه‌ظرفیتی (پدیدآمده از احیای باکتریایی Fe^{+3}) پدید می‌آید (Taylor and Macquaker, 2000). این پیریت‌ها در مرحله پایانی دیاژنز پدید می‌آیند (Hajikazemi *et al.*, 2010). برپایه ویژگی‌های شناسایی‌شده، رخداد کانه‌زایی مس کانسار بهاریه همانند کانسارهای مس (نقره) تیپ مانتو در شیلی است. همچنین، داده‌های ایزوتوپی گوگرد کانسار مس بهاریه همانند اندوخته مس نوع مانتو است (شکل ۱۳). در بسیاری از اندوخته‌های تیپ مانتو، رویداد فرایند باکتریایی احیای سولفات (Bacterial Sulfate Reduction) گزارش شده است (Nejhadhadad *et al.*, 2018; Carrillo-Rosúa *et al.*, 2014; Wilson, 2000; Wilson and Zentilli, 2006). خاستگاه عمده گوگرد در اندوخته‌های مس نوع مانتو در بخش‌های شمالی شیلی، ماگمایی و در اندوخته‌های بخش‌های مرکزی شیلی، بیشتر سولفات آب دریایی است که باکتری‌ها آن را احیاء کرده است. ایزوتوپ‌های

است و با آب‌زدایی واحدهای آذرآواری مس‌دار، فلزها از ساختار کانی‌ها آزاد شده و به شورابه حوضه‌ای وارد شده‌اند. در پی این فرایند، تحرک سیال‌های شورابه‌ای در میان توالی‌های آتشفشانی روی داده است (Barnes, 1997). به‌همراه ورود سیال‌های سرشار از مس در واحد میزبان احیایی، جانشینی سولفیدهای مس به‌جای پیریت‌های نخستین و کانه‌زایی در منطقه رخ داده است.

سولفات آب دریا را احیاء کرده و گوگرد آزاد شده است. سپس این گوگرد در واکنش با آهن محیط، پیریت را به‌صورت پرکننده فضای تهی و دانه‌پراکنده در سنگ میزبان آندزیت و ریولیت توف پدید آورده است که نخستین سولفید پدیدآمده به‌شمار می‌رود. این پدیده وضعیت حوضه را احیایی کرده است. در مرحله دیازنز تدفینی (مرحله هیپوژن)، به‌دنبال افزایش ستبرای رسوب‌ها، فرونشست حوضه روی داده



شکل ۱۳- ترکیب ایزوتوپی کانسار بهاریه در مقایسه با شماری از کانسار با خاستگاه متفاوت (Marschik *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 1998; Gehlen *et al.*, 1983)

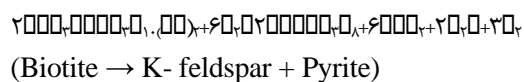
نشان‌دهنده اهمیت فرایندهای وابسته به سنگ‌های آتشفشانی در کانه‌زایی مس، افزون‌بر

ویژگی‌های فیزیکی سیال و ته‌نشینی سولفید رخداد تیپ کانه‌زایی مس در منطقه بهاریه

فرایندهای وابسته به رویدادهای آذرین درونی سازنده کانه‌زایی است. در کل، برپایه شواهد گمان می‌رود کانی‌زایی و دگرسانی در کانسار مس بهاریه پیامد رفتار سیال‌های سرشار از گوگرد، pH اسیدی، شوری متوسط و با دمای بالا تا متوسط بوده‌اند. رویداد کانی‌سازی برپایه سرشت زمین‌شیمیایی سنگ‌های میزبان گویای وجود کمانی ماگمایی و بالغ در منطقه است. در هنگام رویداد فرایند دیاژنز نخستین (Early diagenesis) در کانسارهای مس، به‌دنبال هیدرولیز کانی‌های سیلیکاتی (مانند: هورنبلند و بیوتیت) آهن از شبکه آنها آزاد می‌شود و به‌صورت هیدروکسید آهن فریک (پیش‌ماده نخستین هماتیت) در می‌آید. همچنین، در هنگام دیاژنز نخستین و در پی تخریب مواد آلی، اسید هومیک پدید می‌آید و در محیط اسیدی ناشی از آن، تخریب برخی کانی‌های سیلیکاتی ادامه می‌یابد. در پی تخریب کانی‌های سیلیکاتی، جانشینی پلاژیوکلاز با پتاسیم‌فلدسپار درج‌ازا (اوتوژنیک) و نیز شسته‌شدن بیوتیت، عنصرهای فلزی از شبکه آنها آزاد و جذب هیدروکسیدهای آهن و اسمکتیت موجود در زمینه می‌شوند. از آنجایی که آهن در ساختمان کانی‌های فرومنیزین مانند بیوتیت تمرکز یابد، با تخریب این کانی و دیگر کانی‌های همانند آن، با حضور یون‌های گوگرد، آهن از ساختمان این کانی آزاد می‌شود و پیریت را می‌سازد (واکنش ۱). در مراحل بعدی دیاژنز، هنگام تبلور و بلوغ اکسیدهای آهن بی‌شکل و جانشینی آنها با هماتیت (Chan et al., 2000)، محتوای فلزی درون این کانی‌ها، از مس و نقره، آزاد و وارد سیال اکسیدان می‌شوند و با آن حمل می‌شوند. سیال اکسیدان کانه‌دار در رخداد کانسار مس

بهاریه، مس و دیگر فلزهای آزادشده از کانی‌های سیلیکاتی ناپایدار را به‌صورت کمپلکس کلریدی حمل می‌کند و در مسیر چرخش خود درون لایه‌ها، با رسیدن به افق‌های احیایی سرشار از مواد آلی و در پی برخورد با سیال احیایی در این بخش، کمپلکس کلریدی حامل مس را ناپایدار می‌کند. از این‌رو، دانه‌های پیریت نخستین آرام‌آرام با کانه‌های سولفیدی مس (مانند: کالکوپیریت و بورنیت) جانشین می‌شوند. همچنین، سولفیدهای مس ته‌نشین و جانشین بخش‌هایی از پیریت احیایی می‌شوند. در واقع باکتری‌های بی‌هوازی با گرفتن انرژی مورد نیاز خود از مواد آلی، سولفات موجود در آب میان‌سازندی را به H₂S احیاء می‌کنند. از این‌رو، مقدار بالایی از H₂S پدیدآمده از احیای سولفات به‌دست باکتری‌ها در محیط آزاد می‌شود و در نتیجه، افزون‌بر پیدایش گوگرد، باعث شستشو (Bleaching) در افق سرشار از مواد آلی می‌شوند (Brown, 2005). در این حالت، به‌دنبال شرایط احیایی، اکسیدهای آهن از بخش‌های احیاء‌شده در نزدیکی گوگرد به‌صورت پیریت دیاژنتیک در سنگ‌میزبان ته‌نشست پیدا می‌کنند. این پیریت‌های دانه‌پراکنده پدیدآمده از فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی، نخستین مراحل دیاژنتیک هستند که هنگام رویداد فرایند سنگ‌زایی (lithification) در سنگ میزبان کانه‌زایی منطقه پدید آمده‌اند. این فرایند به‌طور معمول محیط احیایی خوبی را برای ته‌نشست کانی‌های سولفیدی فراهم می‌کند. از این‌رو، کانی‌های سولفیدی مانند کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، با بافت‌های جانشینی، سیمان میان‌دانه‌ای و دانه‌پراکنده، در مرحله دیاژنز میانی و پیش از دیاژنز تدفینی پدید آمده‌اند (واکنش ۱).

واکنش ۱:



نتیجه گیری

برپایه ویژگی‌های یادشده، چکیده‌ای از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش در زیر آورده شده‌اند:

۱- کانه‌زایی مس در کانسار بهاریه با سرشت چینه‌کران در یک افق معدنی با راستای خاوری-باختری، درازای نزدیک به ۲۰۰ متر و ستبرای ۵ تا ۱۰ متر، شیب نزدیک به قائم و ژرفای بیشینه ۲۰ متر در سنگ میزبان آندزیت‌توف تا ریولیت‌توف (E^{an}) به سن ائوسن میانی رخ داده است. تمرکز کانه‌زایی مس در این واحد پیامد شرایط احیایی این محیط و حضور پیریت در این سنگ بوده است؛

۲- کانی‌های سولفیدی و کربناته مس و اکسیدی-هیدروکسیدی آهن به ترتیب از مهم‌ترین فازهای کانه‌شناسی در کانسار بهاریه هستند. در پهنه درون‌زاد، سولفیدهای اصلی کالکوپیریت و پیریت از مهم‌ترین فاز کانه‌زایی منطقه بهاریه به‌شمار می‌روند. کانی‌های سولفیدی فرعی و کمیاب مانند بورنیت، اسفالریت، گالن، دیژنیت، تتراهدريت با فراوانی کمتر همراه کالکوپیریت دیده می‌شوند. کانی‌های اکسیدی-هیدروکسیدی آهن (هماتیت ثانویه و گوتیت) و کانی‌های سوپرژن سولفیدی مس (کالکوسیت، کوولیت) و کانی‌های کربنات‌های آبدار مس (مالاکیت و آزوریت) از مهم‌ترین کانی‌های ثانویه و پیامد فرایند غنی‌سازی سوپرژن هستند؛

۳- در میزبان کالکوپیریت، فراوانی بیشینه طلا و نقره به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۰/۱ درصدوزنی و در ترکیب

گالن، بیشینه نقره برابر با ۰/۱۴ درصدوزنی اندازه‌گیری شد. کالکوپیریت با بالاترین میزان تمرکز طلا در ساختمان خود، مهم‌ترین حامل طلا در کانسار بهاریه دانسته می‌شود. پس از آن، کانه سولفیدی پیریت نیز، حامل خوبی برای عنصر طلا و نقره در کانسار بهاریه به‌شمار می‌رود. همچنین، حضور عنصر مس با فراوانی بیشینه ۰/۵۸ درصد وزنی در پیریت نشان می‌دهد فاز سولفیدی پیریت نخستین، در حمل و تمرکز عنصر مس در منطقه نقش مهمی داشته است. عنصر نقره نیز با بالاترین مقدار تمرکز در گالن، از دیدگاه اقتصادی محصول جانبی ارزشمندی به‌شمار می‌رود؛

۴- میانگین نسبت Co/Ni در پیریت‌های کانسار بهاریه، برابر با ۲/۷۱ به‌دست آمد و چه‌بسا نشان‌دهنده خاستگاه گرمایی برای پیریت است. برپایه داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نقطه‌ای گالن نیز مقدار میانگین نسبت Sb/Bi برابر با ۲ به‌دست آمد. از ازیرو، دمای پیدایش گالن کانسار بهاریه در شرایط دما و فشار متوسط کانی‌سازی بوده است. برپایه داده‌های شیمیایی، فراوانی آهن در نمونه‌های اسفالریت، برابر با ۰/۳ تا ۴/۶ درصدوزنی است و تغییرات درصدمولی FeS برابر با ۰/۵ تا ۷/۱ به‌دست آورده شد. اسفالریت‌ها بیشتر به رنگ خاکستری روشن و با محتوی آهن کم تا متوسط هستند. این نکته نشان‌دهنده شرایط سولفیداسیون حد واسط و پیدایش کانسار بهاریه در دماهای متوسط است؛

۵- دامنه تغییرات ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ برای نمونه‌های کالکوپیریت و پیریت کانسار بهاریه برابر با ۷/۳ تا ۰/۵ پرمیل است. در بررسی‌های ایزوتوپ گوگرد کانسار بهاریه، بازه محدود مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در کانی‌های گوگردار نشان‌دهنده خاستگاه گوگرد کمابیش شناخته‌شده‌ای است و پیشنهاد می‌کند که هم

ترکیب ایزوتوپی خاستگاه و هم فرایندهای تفکیکی میان اجزای گوگرد در سیال کانه‌دار در طول کانی‌سازی یکسان بوده است. این نکته نشان‌دهنده پیدایش کانی‌های سولفیدی منطقه از سیالی است که سولفور آن خاستگاه ماگمایی داشته است. در کل، برپایه داده‌های به‌دست‌آمده از تفسیر داده‌های ایزوتوپی، خاستگاه ماگمایی اولیه برای مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ نزدیک به صفر و تهی‌شدگی نسبی آن در پی رفتار فرایندهای احیایی برای مقادیر منفی $\delta^{34}\text{S}$ ، تأیید شد. بر این پایه، پیریت‌های نخستین ریزبلور در سنگ میزبان کانه‌زایی، محتمل‌ترین خاستگاه گوگرد برای کانی‌سازی سولفیدی در کانسار بهاریه هستند و در پیدایش مقدار منفی $\delta^{34}\text{S}$ نقش داشته‌اند.

منابع

- Alavi, M. (1991) Sedimentary and structural characteristics of the Paleo- Tethys remnants in Northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103(3): 983- 992.
- Almasi, A., Karimpour, M. H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Rahimi, B. and Klötzli, U. (2016) Geology and geochemistry of subvolcanic and plutonic bodies of Kashmar (North of Lut Block). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 24(3): 539- 556 (in Persian).
- Atiyeh Kansar Joyan Co. (2014) Report physical advance of reconnaissance in the Baharieh Cu deposit, (Kashmar, Khorasan Razavi Province).
- Barnes, H. L. (1997) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley Sons.
- Bralia, A., Sabatoini, G. and Troja, F. (1979) A revaluation of the Co/Ni ratio in Pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. *Mineralium Deposita* 14 (2): 352- 374.
- Brown, A. C. (2005) Refinements for footwall red- bed diagenesis in the sediment-hosted stratiform copper deposits model. *Economic Geology* 100 (4): 765–771.
- Campano, P. and Guerra, N. (1975) Distribución de Cr, Ni, Co, Cu, Zn y Pb en rocas ígneas y sedimentarias del norte de Chile. MSc Thesis, University of Norte, Antofagasta, Chile.
- Carrillo- Rosúa, J., Boyce, A.J., Morales- Ruano, S., Morata, D., Roberts, S., Munizaga, F. and Moreno- Rodríguez, V. (2014) Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean manto- type Cu– (Ag) deposits, Coastal Range of central Chile, *Ore Geology Reviews* 56(3): 13–24.
- Chan, M. A., Parry, W. I. and Bowman, J. R. (2000) Diagenetic hematite and manganese oxides and fault-related fluid flow in Jurassic sandstones, southeastern Utah. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 84(3): 1281- 1310.
- Cook, N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizue M., Danyushevsky L., Saini- Eidukat B. and Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: A LA- ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(4): 4761–4791.
- Evans, A. M. (1993) *Ore geology and industrial minerals: An introduction*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با تأمین منابع مالی با قرارداد گرنٹ ۸۵–۹۶ توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از جناب آقای دکتر شجاع‌الدین نیرومند، عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، برای پیشنهادهای سازنده صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود. از مدیریت محترم شرکت آتیه‌کانسارجویان و به‌ویژه جناب آقای مهندس پورنیک که امکان دسترسی به منطقه مطالعاتی را فراهم کردند، سپاس‌گزاری می‌شود.

- Fazli, S., Taghipour, B., Moore, F. and Lentz, D. (2019) Fluid inclusions, S isotopes, and Pb isotopes characteristics of the Kuh- e Surmeh carbonate- hosted Zn–Pb deposit in the Zagros Fold Belt, southwest Iran: Implications for the source of metals and sulfur and MVT genetic model. *Ore Geology Reviews*. 10.1016/j.oregeorev.2019.04.006.
- Ghazban, F., McNutt, R. H. and Schwarcz, H. P. (1994) Genesis of sediment- hosted Zn- Pb- Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan Area, West- Central Iran. *Economic Geology* 89(5): 1262–1278.
- Guilbert, J. M. and Park, C. F. (1986) *The geology of ore deposits*. William H. Freeman and Company, New York.
- Hajkazemi, E., Al- Aasm, I. S. and Coniglio, M. (2010) Subaerial exposure and meteoric diagenesis of the Cenomanian–Turonian upper Sarvak formation, southwestern Iran. *The Geological Society (Special Publication)* 330(3): 253–272.
- Hoefs, J. (2015) *Stable isotope geochemistry*. Springer Verlag, Berlin.
- Khoei, N., Ghorbani, M. and Tajbakhsh, P. (1999) Copper deposits in Iran. *Organization geology and mineral explorations of Iran*.
- Kirkham, R. V. (1996) Volcanic redbed copper. In Eckstrand, O. R., Sinclair, W. D. and Thorpe, R. I. (eds.) *Geology of Canadian mineral deposit types*. Geological Survey of Canada (Geology of Canada) 8(3): 241–252.
- Kojima, S., Trista- Aguilera, D. and Hayashi, K. (2008) Genetic Aspects of the Manto- type Copper Deposits Based on Geochemical Studies of North Chilean Deposits. *Resource Geology* 59(4): 87–98.
- Lin, Y., Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Liu, Y. P., Zhang, Q., Gao, W., Yang, Y. L. and Danyushevsky L. V. (2011) Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA- ICP- MS study. *Ore Geology Reviews* 39(3): 188–217.
- Machel, H. G. (2001) Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic setting. *Sedimentary Geology* 140(4): 143–175.
- Malakhov, A. A. (1968) Bismuth and antimony in galena, indicators of conditions of ore deposition. *Geokhimiya* 11(2): 1283–1296.
- Nejadhaddad, M., Taghipour, B. and Lentz, D. (2018) Geochemical, isotopic, and fluid inclusion signatures of Zn- Pb mineralization in the Tiran mining district, Isfahan, Sanandaj- Sirjan zone (Iran). *Ore Geology Reviews*. 10.1016/j.oregeorev.2018.08.005.
- Ohmoto, H. (1972) Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 67(3): 551–579.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O. (1997) Isotopes of sulphur and carbon. In: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (Ed. Barnes, H. L.) 509- 567. Wiley- Interscience, New York.
- Putter, T. D., Mees, F., Decrée, S. and Dewaele, S. (2010) Malachite, an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment (Katanga, Democratic Republic of Congo). *Ore Geology Reviews* 38(5): 90- 100.
- Rezaeihamid, R. (2016) *Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of the Baharieh Cu deposit, Taknar Metallogenic Belt (NE Kashmar)*. Thesis of Master of Science, Bu- Ali Sina University.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation*. Longman Scientific and Technical, New York.
- Schmitt, A. D., Galer, S. J. G. and Abouchami, W. (2009) High- precision cadmium stable isotope measurements by double spike thermal ionization mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 24(3): 1079–1088.

- Scott, S. D. and Barnes, H. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology* 66(4): 653–669.
- Subias, I., Fanlo, I. and Mateo, J. (2003) A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematic. *Ore Geology Reviews* 23(3): 55–70.
- Taylor, K. G. and Macquaker, J. H. S. (2000) Early diagenetic pyrite morphology in a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, eastern England. *Sedimentary Geology* 131(5): 77–86.
- Toulmin, P., Barton, P. B. and Wiggins, L. B. (1991) Commentary on the sphalerite geobarometer. *American Mineralogist* 76(3): 1038–1051.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95(1): 185–187.
- Wilson, N. S. F. (2000) Organic petrology, chemical composition, and reflectance of pyrobitumen from the El Soldado Cu deposit, Chile. *International Journal of Coal Geology* 43(3): 53–82.
- Wilson, N. S. F. and Zentilli, M. (2006) Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chile. *International Journal of Coal Geology* 65(2): 158–169.