

# بررسی کانی‌سازی و نحوه رخداد کانسار مس بهاریه (شمال خاور کاشمر) بر مبنای شواهد کانه‌نگاری، ژئوشیمی و میانبارهای سیال

راضیه رضایی حمید<sup>۱\*</sup>، ابراهیم طالع فاضل<sup>۲\*</sup> و شجاع الدین نیرومند<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶

## چکیده

کانسار مس بهاریه با تناژ تقریبی یک میلیون تن در ۳۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان کاشمر قرار دارد. کانه‌زایی در این منطقه به صورت یک افق معدنی با درازای تقریبی ۲۰۰ متر و راستای خاوری-باختری در میزبان آندزیت و ریولیت توف با سن ائوسن میانی رخ داده است. سنگ‌های منطقه اغلب شامل آندزیت، داسیت و ریولیت هستند که بر مبنای شواهد ژئوشیمی عناصر کمیاب غیر متحرک (نظیر Zr و La، Yb)، این سنگ‌ها در جایگاه پهنه‌های فروران‌ش حاشیه‌قاره‌ای قرار می‌گیرند. کالکوپریت و پیریت کانه‌های سولفیدی اصلی هستند که بورنیت، کوولیت و کالکوسیت به صورت فرعی آنها را همراهی می‌کنند. دگرسانی‌های کم‌مای سیلیسی، کلسیتی، کلریتی و آرژلیک، مهم‌ترین دگرسانی‌های منطقه هستند. طبق مطالعات، دو نوع میانبار سیال آبگین شامل میانبارهای دوفازی غنی از مایع (LV-type) و غنی از گاز (VL-type) در رگه‌های کوارتز-کانه‌دار کانسار بهاریه تشخیص داده شد که تغییرات دمای همگن‌شدگی آنها بین ۱۸۷ تا ۳۵۶ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۰/۹۹ تا ۱۸/۷ درصد معادل نمک طعام به دست آمد. خصوصیات نظیر ساخت و بافت‌های رگه‌ای، برشی و حفره‌ای، سنگ میزبان آتشفشانی، وجود دگرسانی‌های کم‌مای، ترکیب کانه‌شناسی ساده، دما و شوری متوسط سیال و سایر موارد، گویای شباهت کانسار بهاریه با کانسارهای مس (نقره) تیپ مانتو (طبقات سرخ آتشفشانی) در شیلی است.

**کلیدواژه‌ها:** ژئوشیمی، آندزیت توف، کانسار مس بهاریه، کاشمر.

**\*نویسنده مسئول:** ابراهیم طالع فاضل

E-mail: tale.fazel@gmail.com

## ۱- پیش‌نویس

بیش از ۲۰۰ ذخیره و اندیس فلزی مس در نقشه فلززایی مس توسط Bazin and Hubner (1969) در ایران گزارش شده که کانسار مس بهاریه از جمله آنهاست (شکل ۱). کانسار مس بهاریه (مختصات  $35^{\circ}29'$  تا  $35^{\circ}28'$  طول خاوری و  $67^{\circ}58'$  تا  $66^{\circ}58'$  عرض شمالی)، در استان خراسان رضوی و ۳۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان کاشمر قرار دارد. از دیدگاه ساختاری-زمین‌شناسی (Alavi, 1991)، کانسار بهاریه در پهنه کویر-سبزوار و کمپلکس تکنار قرار می‌گیرد که این ناحیه از دیدگاه خوبی و همکاران (۱۳۷۸) به ایالت فلززایی تکنار (Taknar Metallogenic Province) موسوم است.

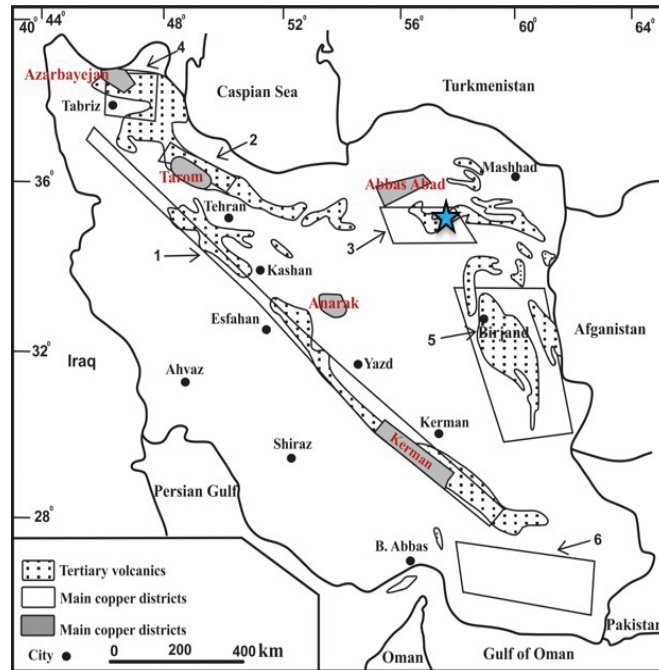
کمپلکس تکنار به صورت یک مجموعه ماگمایی گوه‌ای شکل در شمالی‌ترین برنزد خردقاره ایران مرکزی، از مهم‌ترین ایالت‌های فلززایی مس در ایران محسوب می‌شود (خوبی و همکاران، ۱۳۷۸؛ شکل ۲). مطالعات مختلفی در غالب گزارش‌های اکتشافی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (صفری، ۱۳۸۸) و شرکت‌های مشاور مواد معدنی (آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳) و پژوهش‌های علمی (Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2005)؛ الماسی و همکاران، ۱۳۹۴؛ طالع فاضل، ۱۳۹۵) در منطقه فلززایی تکنار انجام شده و جدیدترین فعالیت‌های انجام شده در منطقه معدنی بهاریه در غالب اکتشافات تفصیلی توسط شرکت آتیه کانسار جویان (۱۳۹۳) بوده است. کانسار بهاریه تناژ کمتر از یک میلیون تن، عیار مس ۱ درصد (با حداکثر عیار بازیابی ۲۲ درصد) و متوسط نقره ۵ گرم در تن (ppm) دارد (آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳؛ رضایی حمید، ۱۳۹۵). در این پژوهش ضمن معرفی خصوصیات زمین‌شناسی و کانی‌سازی در کانسار مس بهاریه، تحولات ژئوشیمیایی سنگ میزبان و خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز مورد بررسی قرار گرفته و همچنین به منظور بررسی خصوصیات ژنتیکی این کانسار و تشخیص تیپ کانه‌زایی، ویژگی‌های اساسی کانسار بهاریه با ذخایر تیپ مانتو، مقایسه شده است.

## ۲- زمین‌شناسی

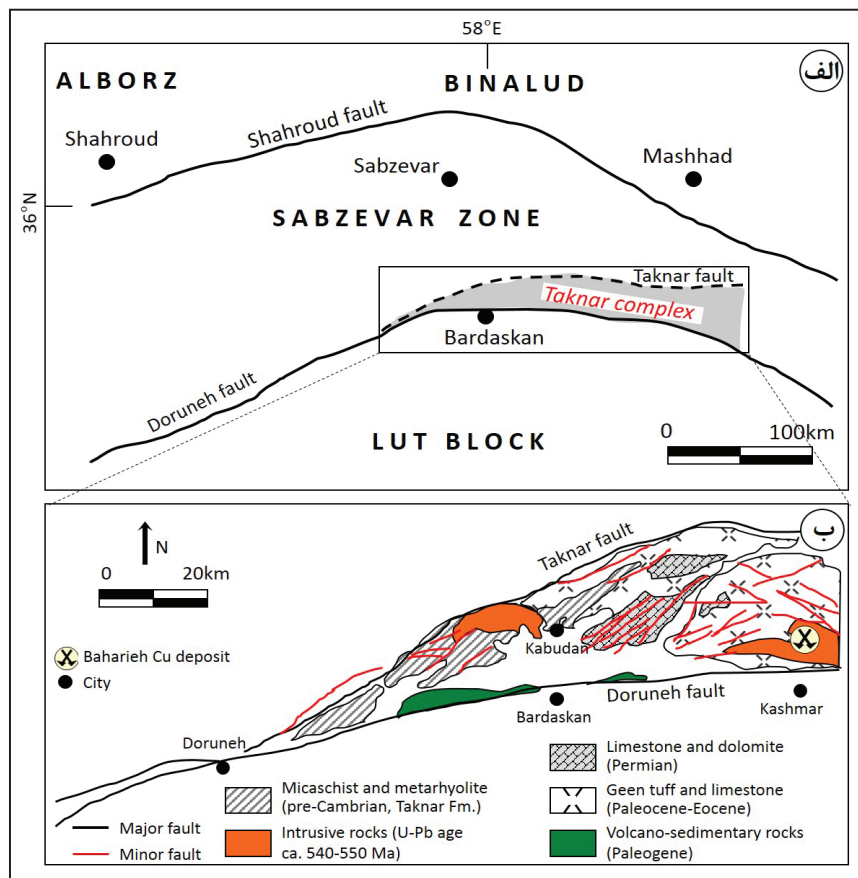
پهنه ساختاری تکنار در استان خراسان رضوی و در محدوده شمال باختر شهرستان کاشمر جای گرفته است. منطقه بهاریه در چهارگوش زمین‌شناسی  $1:250000$  تربت حیدریه (واعظی‌پور و همکاران، ۱۳۶۴) و ورقه زمین‌شناسی  $1:100000$  فیض‌آباد (بهریزی و علوی نائینی، ۱۳۶۶) قرار می‌گیرد. مطالعات زمین‌شناسی پرکامبرین-پالئوزوئیک زون تکنار توسط Muller and Walter (1983)، مطالعات زمین‌شناسی سازنده‌های بعد از پالئوزوئیک در زون تکنار و نواحی مجاور توسط Lindenber and Jacobshagen (1983) و بررسی سنگ‌شناسی گرانیتوئیدهای منطقه تکنار-سربرج توسط سپاهی (۱۳۷۱) انجام شده است. کمپلکس تکنار توسط گسل درونه در جنوب، از بلوک لوت و به واسطه گسل تکنار (رئوش) در شمال از زون افیولیتی سبزوار جدا می‌شود که به صورت یک باریکه مثلثی شکل بالا آمده از پی‌سنگ پرکامبرین-پالئوزوئیک با راستای WSW-ENE توسط واحدهای سنگی مزوزوئیک تا سنوزوئیک پوشیده شده است (شکل ۲-ب). کمپلکس تکنار با ضخامت تقریبی ۱۸۰۰ متر از سنگ بستر شیست سبز و ماسه‌سنگ دگرگون تشکیل شده و دارای سه عضو زیرین (متاریولیت و توف)، میانی (تناوبی از سنگ‌های کربناته و متآرکوز) و بالایی (سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی همراه با تناوب دولومیت ریزبلور و شیل) بوده (Muller and Walter, 1983) که بر اساس سن‌سنجی‌های U-Pb انجام شده بر روی بلورهای زیرکن موجود در متاریولیت‌ها، سن معادل  $552 \pm 5/67$  میلیون سال (اواخر نئوپروتریویک) برای آن به دست آمده است (منظمی باقرزاده و همکاران، ۱۳۹۵). بر مبنای نقشه‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای اشاره شده، مجموعه سنگ‌چینه‌ای وسیعی از نهشته‌های آذرآری و ولکانیکی با ضخامت تقریبی ۱۵۰۰ متر متشکل از توف، ایگنمریت، آندزیت، بازالت و جریان‌های لاهاری به ویژه طی پالئوسن-ائوسن منطقه بهاریه را پوشانده است که این نهشته‌ها بعداً توسط رسوبات قاره‌ای نئوژن پوشیده شده‌اند. علاوه بر این، توده‌های نفوذی حدواسط تا اسیدی با ترکیب مونزوگرنایت تا لوکوگرنایت-گرانودیوریت موسوم به گرانیتوئیدهای کاشمر (Shafaii Moghadam et al., 2015) و متعلق به ائوسن میانی،

دارند و متعلق به گرانیتوئیدهای تیب I هستند (Shafaii Moghadam et al., 2015). رخنمون‌هایی از این توده‌ها در خاور معدن بهاریه وجود دارد (شکل ۳). واحدهای ولکانیک و آذرآواری ائوسن به عنوان میزبان کانی‌سازی مس در منطقه بهاریه هستند.

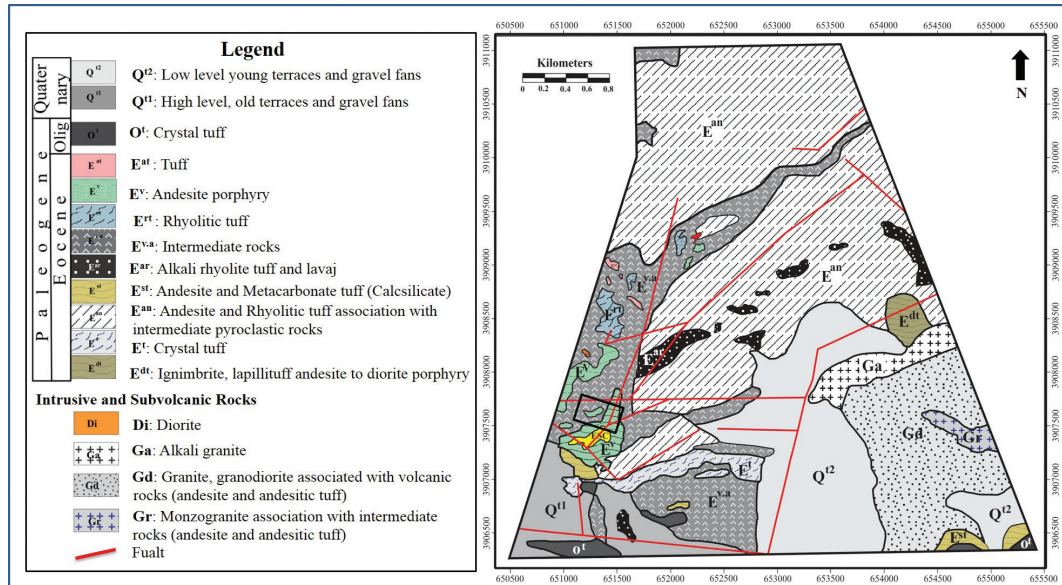
واحدهای سنگ‌چینه‌ای ولکانیک با سن ائوسن زیرین تا میانی را قطع کرده‌اند. مطالعات سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن‌ها، گویای محدوده سنی ۴۰ تا ۴۱ میلیون سال (Bartonian) است. این سنگ‌ها ماهیت متآلومین تا پراآلومین و کالک‌آلکالن



شکل ۱- نقشه کانی‌زایی‌های اصلی مس در ایران از دیدگاه (Bazin and Hubner, 1969). شامل: (۱) زون ارومیه- دختر، (۲) زون البرز باختری، (۳) زون کویر- سبزواری، (۴) زون سیلان، (۵) زون لوت و (۶) زون مکران. منطقه بهاریه در نقشه با علامت ستاره مشخص شده است.



شکل ۲- الف) باریکه گوه‌ای شکل کمپلکس تکنار میان بلوک لوت و زون سبزواری؛ ب) نقشه ساده شده کمپلکس تکنار که در آن موقعیت کانسار مس بهاریه نشان داده شده است (نقشه پایه از (Nogole-Sadat and Almasian, 1993).



شکل ۳- نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه بهاریه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (با تغییرات از گزارش آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳). کادر مستطیلی درون نقشه موقعیت کانسار بهاریه را نشان می‌دهد که در شکل ۴ تصاویر صحرایی- ساختمانی آن نشان داده شده است.

### ۳- روش پژوهش

بازدید صحرایی و نمونه برداری‌های هدفمند از واحدهای مختلف سنگی انجام و طی آن در مجموع ۱۰۰ نمونه برداشت شده است. پس از مطالعات سنگ شناسی و اطمینان از غیر دگرسان بودن سنگ‌های آذرین، با هدف دستیابی به خصوصیات ژئوشیمیایی سنگ میزان، ۱۲ نمونه سالم به منظور تعیین میزان عناصر اکسیدی اصلی توسط دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه شد. مقادیر LOI یا مواد فرار سنگ نیز با استفاده از کوره حرارتی در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  به دست آمد. حد تشخیص عناصر مورد تجزیه بین ۰/۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm) و خطای تجزیه برای عناصر اصلی کمتر از ۱ درصد وزنی است. همچنین، ۱۲ نمونه مذکور به منظور تعیین عناصر کمیاب و نادر خاکی (REE) با ابعاد ۷۵ میلی‌متر پودر و برای تجزیه دستگاهی به روش طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شدند. حد تشخیص برای عناصر کمیاب بین ۰/۰۵ تا ۱ تا ۰/۱ و برای عناصر نادر خاکی بین ۰/۰۱ تا ۰/۳ گرم در تن است. ۵ نمونه سنگی مناسب نیز پس از جداسازی قسمت‌های مورد نظر برای انجام تجزیه کانی شناسی- دگرسانی پراش اشعه ایکس (XRD) ارسال شد. همچنین تجزیه ریزکاو الکترونی (EPMA) همراه با تصاویر الکترونی برگشتی (BSE) به منظور شناسایی ترکیب شیمیایی کانه‌ها، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و مطالعات میانبارهای سیال نیز با استفاده از مقاطع دوبرصیقل (ضخامت تقریبی ۱۲۰ میکرون) در دانشگاه خوارزمی تهران انجام شد.

اندازه‌گیری پارامترهای دمایی به کمک سکوی گرمایش و سردایش لینکام مدل THMS600 نصب شده بر روی میکروسکوپ زایس (ZEISS) انجام شده و دامنه حرارتی دستگاه بین  $120^{\circ}\text{C}$  تا  $450^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در تغییر است. کالیبراسیون سکو در مرحله گرمایش با دقت  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$  توسط نیترات سزیم (Cesium nitrate) و نقطه ذوب  $414^{\circ}\text{C}$  و در مرحله سردایش با دقت  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  و توسط ماده استاندارد ان- هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب  $94/3^{\circ}\text{C}$  انجام شد.

اندازه‌گیری پارامترهای دمایی به کمک سکوی گرمایش و سردایش لینکام مدل THMS600 نصب شده بر روی میکروسکوپ زایس (ZEISS) انجام شده و دامنه حرارتی دستگاه بین  $120^{\circ}\text{C}$  تا  $450^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در تغییر است. کالیبراسیون سکو در مرحله گرمایش با دقت  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$  توسط نیترات سزیم (Cesium nitrate) و نقطه ذوب  $414^{\circ}\text{C}$  و در مرحله سردایش با دقت  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  و توسط ماده استاندارد ان- هگزان (n-Hexane) با نقطه ذوب  $94/3^{\circ}\text{C}$  انجام شد.

### ۴- سنگ شناسی و توزیع فضایی سنگ‌های منطقه

بر مبنای برگه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ بهاریه (آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳)، دست کم دو تیپ واحد سنگ چینه‌نگاری اصلی شامل واحدهای آذرین خروجی تا نیمه عمیق و توده‌های نفوذی با سن ائوسن زیرین تا الیگوسن در منطقه رخنمون

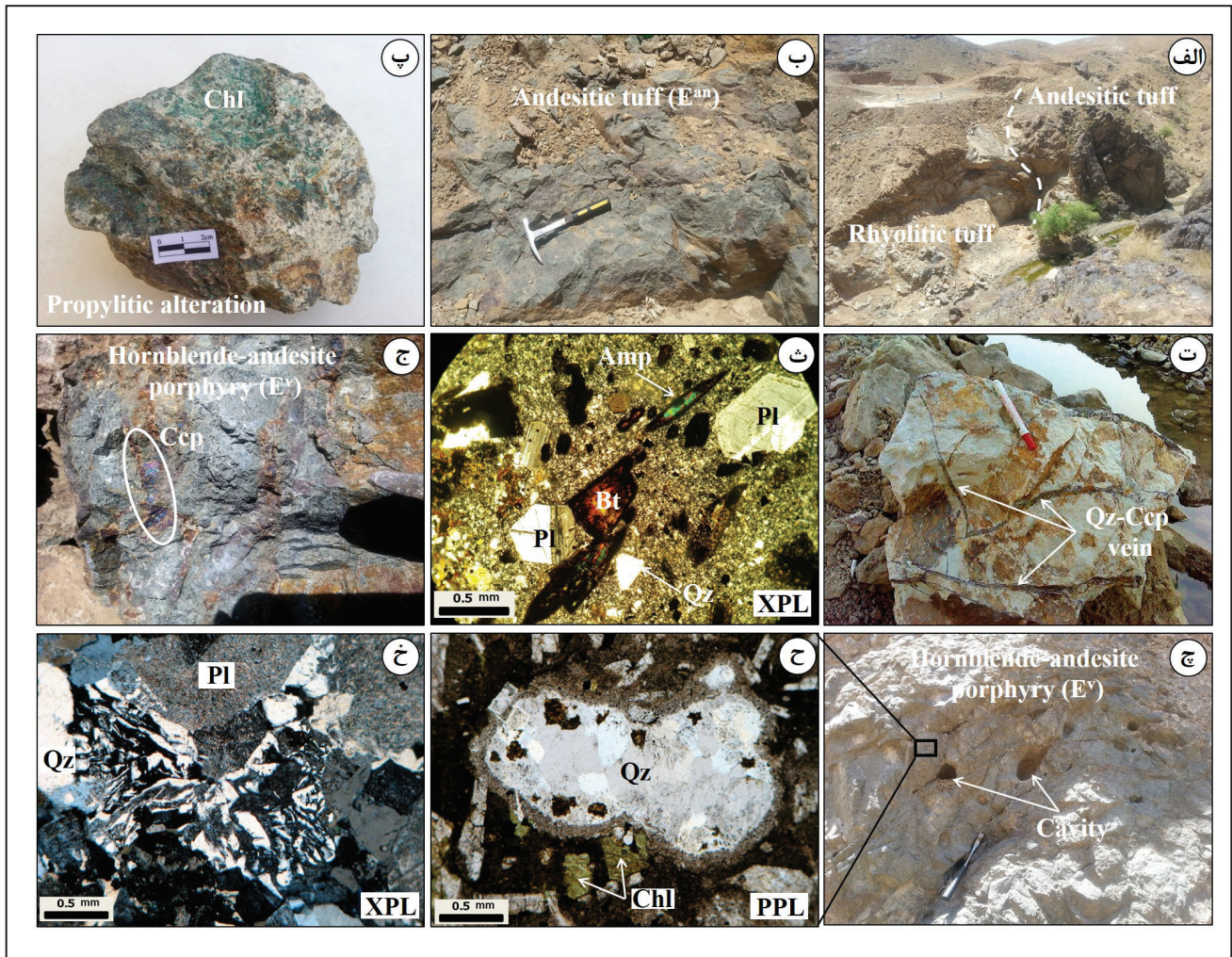
دارند که نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر بخش‌هایی از این واحد را پوشانده‌اند (شکل ۳). واحدهای سنگی ائوسن بیشترین حجم سنگ‌های منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که به ترتیب از قدیم به جدید شامل واحد ایگنمبریت، لاپیلی توف، آندزیت تا دیوریت پورفیری ( $E^{dt}$ )، واحد توف بلورین ( $E^l$ )، واحد آندزیت و ریولیت توف به همراه سنگ‌های پیرو کلاستیکی حدواسط ( $E^{an}$ )، واحد آندزیت و توف اسکارنویید ( $E^{st}$ )، واحد آلکالی ریولیت توف و لاوا ( $E^{ar}$ )، واحد سنگ‌های حدواسط دگرسان شده ( $E^{v-d}$ )، واحد ریولیت توف با دگرسانی آرژلیک و فلیک ( $E^{fl}$ )، واحد هورنبلند آندزیت پورفیری ( $E^v$ ) و واحد سنگی توف سیلیسی ( $E^{st}$ ) هستند (شکل ۳). پس از این واحدها، واحد توف بلورین الیگوسن ( $O^l$ ) و نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌های گراولی ( $Q^l$ ) و پادگانه‌های آبرفتی جوان ( $Q^2$ ) نیز در منطقه وجود دارند. در این میان، فراوان‌ترین واحدهای سنگی منطقه معدنی بهاریه که میزان کانه‌زایی نیز هستند به شرح زیر است:

#### ۴-۱. واحد آندزیت و ریولیت توف ( $E^{an}$ )

سری پیوسته‌ای از واحدهای آندزیت تا ریولیت توف در منطقه بهاریه رخنمون دارد که این واحدها به عنوان میزان کانی‌سازی هستند (شکل‌های ۳ و ۴-الف). بخش آندزیتی این واحد به رنگ خاکستری تا سبز (شکل ۴-ب)، اغلب از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (الیگوکلاز تا آندزین) تشکیل شده است که کانی‌های فرعی هورنبلند و بیوتیت در خمیره‌ای ریزبلور از همین جنس تشکیل شده‌اند. کانی‌های کمیاب زیرکن و آپاتیت نیز در این واحد سنگی تشخیص داده شد. دگرسانی‌های مشاهده شده در این واحد شامل دگرسانی پروپیلیتیک با کانی اصلی کلریت است (شکل ۴-پ). بخش ریولیت توف نیز به رنگ سفید تا زرد مشاهده می‌شود که رگه کوارتز- کالکوپیریت در میزان بخش ریولیت توف تشکیل شده است (شکل ۴-ت).

کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز و به‌طور ناچیز بیوتیت، به‌صورت ریز در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. سنگ‌های پیرو کلاستیک حدواسط با ترکیب داسیت و ریوداسیت نیز در واحد سنگی  $E^{an}$  تشخیص داده شد که اغلب با بافت جریانی و پورفیریتیک از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز در زمینه‌ای ریزبلور از همین جنس تشکیل شده است (شکل ۴-ث).

سنگ‌های پیرو کلاستیک فاقد کانه‌زایی تشخیص داده شدند ولی به منظور بررسی ترکیب شیمیایی، مورد تجزیه‌های ژئوشیمیایی قرار گرفتند (جدول ۱).



شکل ۴- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی عبوری از سنگ‌های منطقه بهاریه شامل: الف و ب) نمایی از واحد آندزیت و ریولیت توف (E<sup>an</sup>) (دید به سمت شرق)؛ پ) دگرسانی پروپلیتیک در واحد آندزیت توف (E<sup>an</sup>)؛ ت) کان‌زایی رگه‌ای در میزبان واحد ریولیت توف (E<sup>an</sup>)، ث) تصویر میکروسکوپی از داسیت‌های پیروکلاستیک واحد E<sup>an</sup>؛ ج) کان‌زایی ناچیز در میزبان واحد هورنبلاند آندزیت پورفیری (E<sup>v</sup>)؛ چ و ح) تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحد هورنبلاند آندزیت پورفیری با بافت حفره‌دار؛ خ) بافت میکروگرافیک در واحد آلکالی‌گرانیت (علامت اختصاری: Qz، کوآرتز، Ccp، کالکوپریت، Op، کانی کدر، Chl، کلریت، Pl، پلاژیوکلاز، Ap، آپاتیت).

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه سنگ کل به روش XRF (عناصر اصلی، بر حسب درصد وزنی) و ICP-MS (عناصر کمیاب و نادر خاکی بر حسب گرم در تن) واحدهای سنگی منطقه بهاریه.

Sample no. Rock type	BA-01 Qan	BA-02 Gr	BA-03 Rda	BA-04 Rda	BA-05 Rtu	BA-06 And	BA-07 Qan	BA-08 Rtu	BH5-1 Qan	BH5 Rda	BH6 And	BH8 Dc
wt%												
SiO <sub>2</sub>	58.27	65.83	64.31	69.23	65.57	57.6	67.14	63.91	57.87	67.06	59.54	59.62
TiO <sub>2</sub>	0.73	0.53	0.47	0.55	0.55	0.81	0.66	0.38	0.52	0.69	0.84	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.19	15.78	15.91	16.36	17.68	17.83	14.79	13.85	16.79	14.61	16.57	15.77
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.83	3.63	4.2	3.83	3.74	5.73	5.87	7.23	8.45	4.06	6.71	7.29
MnO	0.24	<0.05	<0.05	<0.05	ND	0.26	0.23	0.26	0.5	0.18	ND	0.36
MgO	2.54	3.14	<0.05	<0.05	<0.05	4.22	1.5	1.91	4.13	1.65	2.66	3.45
CaO	0.64	0.41	3.12	0.43	0.33	1.06	0.36	0.32	0.36	0.51	0.75	0.63
Na <sub>2</sub> O	2.48	3.52	3.58	3.37	1.23	2.19	0.19	3.04	0.31	4.01	3.74	3.5
K <sub>2</sub> O	5.75	4.9	3.66	3.85	6.7	7.02	6.93	3.19	7.91	5.22	6.12	5.21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.42	0.29	0.17	0.22	0.26	0.29	0.27	0.25	0.21	0.24	0.32	0.27
LOI <sup>1</sup>	2.9	1.98	4.58	2.15	4.65	3	2.06	5.74	2.95	1.78	2.66	2.91
Total	99.99	100.01	100	99.99	99.48	100.01	100	100.01	100	100.01	99.91	99.67
ppm												
Ba	1136	966	563	698	802	104	966	968	1652	698	938	872

ادامه جدول ۱

Sample no. Rock type	BA-01 Qan	BA-02 Gr	BA-03 Rda	BA-04 Rda	BA-05 Rtu	BA-06 And	BA-07 Qan	BA-08 Rtu	BH5-1 Qan	BH5 Rda	BH6 And	BH8 De
Co	13.6	6.9	9.6	8.6	14.4	13.7	6.3	7.8	13.3	5.5	11.6	16
Cu	202	29	65	46	43.6	93.5	1787	61.5	675	173	160	47
W	1.2	2.2	3.3	2.1	5.4	2.7	4.9	4.2	2.7	11.8	5.3	2.3
Rb	96.2	111	113	136	156	138	134	66.7	119	81.6	104	89.4
Sr	78.7	67	54	33	43.3	128	48.6	42.9	63.1	42	73	46.6
Y	6.9	5.7	6.3	10.1	5.9	12.1	8.9	6.9	5.8	6.2	7	6.1
Zr	59.6	20.2	56.3	42.3	68.7	94.2	104	64.5	62.2	84.8	63.4	67.9
Nb	10.5	11.9	12.3	13.2	18.2	12.8	13.3	13.1	11.5	13	11.1	9.6
Th	1.6	4	2.3	2.1	1.5	2.1	2.1	2.1	1	0.8	1	1
Pb	9	24	32	8	14	16	13	4	13	8	12	9
Ni	12.8	5.4	3.3	5.2	3	8.8	6.9	9.4	10.4	4.8	8.8	7.2
V	128	53.6	12.3	45.7	33.8	150	41.7	37.9	139	35.8	121	118
Cr	38.4	39.2	36.3	42.5	22.5	37.4	45	34.3	39.7	24	34.2	30.3
Hf	1.84	0.81	2.34	1.36	2.09	2.81	2.92	1.97	1.89	2.63	2.17	2.06
Cs	1.05	0.76	0.85	1.54	4.08	1.77	0.61	1.25	0.82	0.54	0.7	0.49
Ta	0.73	1	0.98	1.03	1.47	0.87	0.92	1.02	0.82	0.95	0.85	0.72
La	6.6	13.3	3.5	4.6	5.7	11.9	9.6	4.2	7.7	7.9	7.1	7.1
Ce	14.3	27.2	14.5	9.5	10.3	25	18.6	9.69	14.2	16.1	14.4	16.8
Pr	1.98	3.27	3.2	2.3	1.35	3.27	2.7	1.36	1.94	2.26	1.93	2.26
Nd	8.11	12.3	4.6	11.5	5.24	13.6	10.3	6.04	7.59	9.65	8.29	9.64
Sm	2.25	2.66	3.2	3.5	1.53	3.29	2.54	1.6	2.05	2.14	2.22	2.49
Eu	0.72	0.59	0.35	0.45	0.43	0.92	0.49	0.35	0.69	0.51	0.62	0.73
Gd	1.99	2.23	1.23	2.35	1.38	3.2	2.24	1.52	1.75	2.14	1.96	2.02
Tb	0.25	0.25	0.17	0.23	0.19	0.41	0.29	0.2	0.2	0.26	0.26	0.25
Dy	1.53	1.23	1.12	1.36	1.17	2.39	1.68	1.37	1.42	1.5	1.56	1.56
Ho	0.28	0.22	0.35	0.45	0.23	0.46	0.33	0.25	0.24	0.24	0.29	0.25
Er	0.79	0.68	0.69	0.87	0.64	1.35	0.93	0.77	0.72	0.79	0.74	0.8
Tm	0.1	0.09	0.13	0.22	0.09	0.17	0.14	0.12	0.1	0.09	0.1	0.11
Yb	0.6	0.6	1.3	0.6	0.5	1.1	0.9	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6
Lu	0.1	0.08	0.05	0.12	0.09	0.17	0.15	0.12	0.1	0.1	0.11	0.11

(ND) عدم تشخیص، علامت اختصاری: (Qan) کوارتز آندزیت، (Gr) مونزو گرانیت-سینو گرانیت، (Rda) ریوداسیت، (Rtu) توف ریولیتی، (And) آندزیت، (De) داسیت.

<sup>\*</sup>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as FeO total

<sup>1</sup>Loss on ignition

#### ۴-۲. هورنبلند آندزیت پورفیری (E<sup>v</sup>)

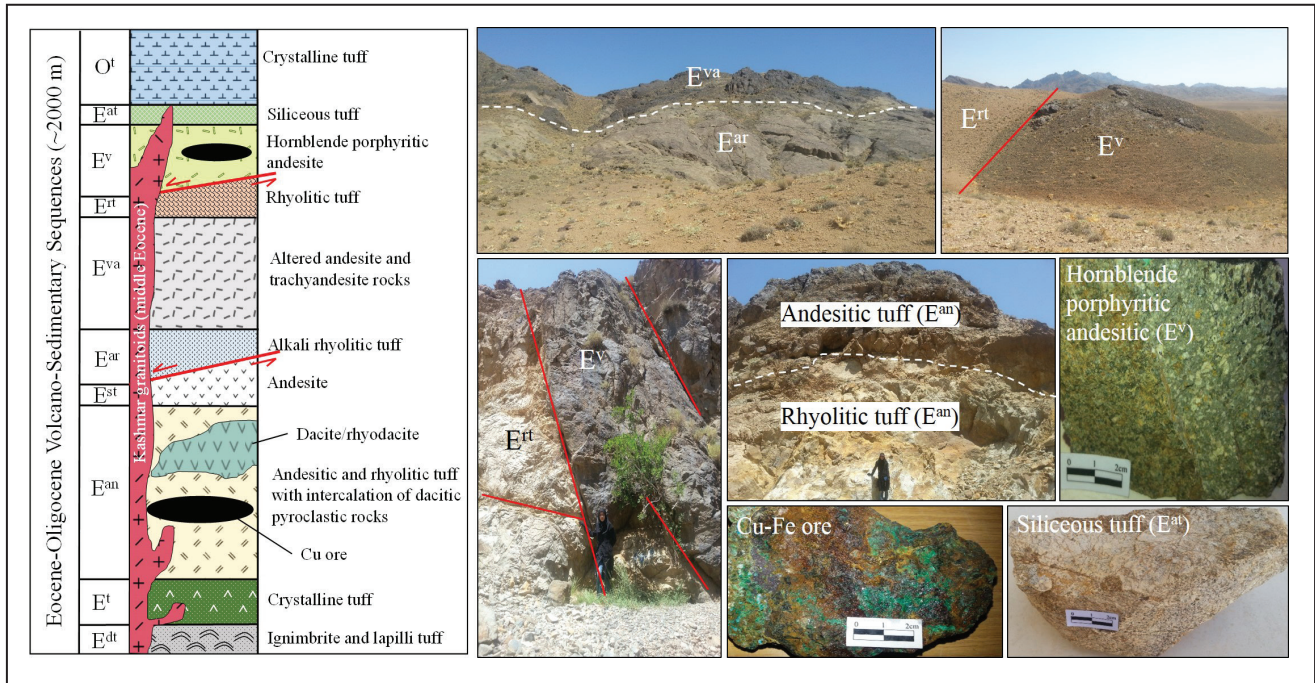
این واحد سنگی به رنگ خاکستری تیره و بافت دانه ریز تا دانه متوسط در معدن بهاریه رخمون دارد (شکل ۳). این سنگ‌ها در مقایسه با واحدهای میزبان کانی‌سازی، دگرسانی کمتری را متحمل شده‌اند و اغلب کانی‌سازی ضعیف دارند (شکل ۴-ج). این واحد سنگی دارای کانی‌های اصلی درشت بلور پلاژیو کلاز (از نوع الیگو کلاز تا آندزین) به همراه آمفیبول (هورنبلند) است که این کانی‌ها به صورت ریز بلور در خمیرسنگ نیز یافت می‌شوند. فلدسپار پتاسیم، بیوتیت و کانی‌های کدر به عنوان کانی فرعی حضور دارند. آپاتیت و لوکوکسن در مقادیر ناچیز مشاهده می‌شوند. بافت‌های میکروپورفیریک میکروولیتی، گلوپورفیریک و آمیگدال در واحد هورنبلند آندزیت پورفیری منطقه مشاهده شد که آمیگدال‌ها اغلب توسط کوارتزهای ثانویه اشغال شده‌اند (شکل‌های ۴-چ و ح). دگرسانی‌های کلریتی، کلسیتی و سیلیسی مهم‌ترین دگرسانی‌های این واحد سنگی هستند.

گرانودیوریت (Gd) و مونزو گرانیت (Gr) هستند که اغلب در خاور معدن بهاریه رخمون دارند و واحدهای ولکانیکی قبلی را قطع کرده‌اند. از لحاظ زمانی سن این توده‌ها معادل گرانیتوئیدهای کاشمر و متعلق به اتوسن میانی است (Shafaii Moghadam et al., 2015؛ شکل ۵). رخمون‌هایی از این توده‌ها در ۵ کیلومتری خاور معدن بهاریه قابل مشاهده است (شکل ۳). در مقاطع میکروسکوپی کانی‌های کوارتز، ارتو کلاز، پلاژیو کلاز (طیف الیگو کلاز تا آل بیت) و بیوتیت با بافت میکرو گرانولار و میکرو گرافیک تشخیص داده شد (شکل ۴-خ). کانی‌های زیرکن، آپاتیت، تیتانیت و کدر نیز به صورت کمیاب حضور دارند.

دگرسانی‌های سریستی، کلریتی، اپیدوتی و آغشتگی‌های اکسید آهن به طور ناچیز در توده‌های نفوذی منطقه بهاریه قابل تشخیص هستند (راضی حمید، ۱۳۹۵). طبق شواهد صحرایی و نقشه‌های زمین‌شناسی، ستون چینه‌شناسی به همراه واحدهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۴-۳. توده‌های نفوذی (واحدهای Gd، Ga و Gr) خاور معدن بهاریه

این واحدهای نفوذی شامل سنگ‌های آلکالی گرانیت (Ga)، گرانیت-گرانیت-

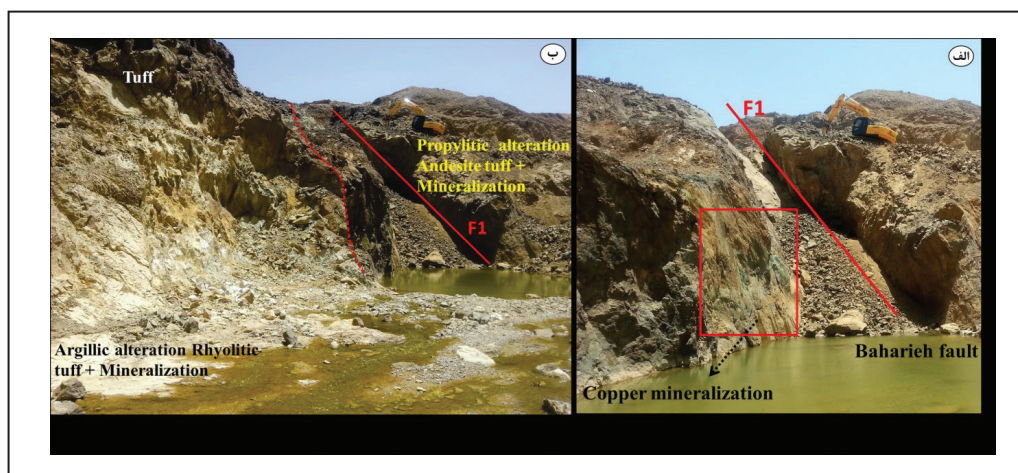


شکل ۵- ستون چینه‌شناسی منطقه بهاریه به همراه تصاویر رخنمون‌های سنگی و نمونه‌های دستی از واحدهای مختلف.

### ۵- زمین‌شناسی ساختاری

مورب‌لغز با مؤلفه ساختاری معکوس، شیب زیاد به سمت جنوب و طول تقریبی ۷۰ متر هستند. گسل‌های عرضی (F3) با راستای شمال باختر- جنوب خاور و شمال خاور- جنوب باختر، به صورت مورب‌لغز، با شیب زیاد و طول تقریبی ۱۳۰ متر هستند. حرکت این گسل‌ها باعث جابه‌جایی گسل F1 و جایگیری بخشی از ماده معدنی در امتداد خود شده است. گسل‌های مورب (F4) با روند شمالی- جنوبی، به صورت مورب‌لغز معکوس و با مؤلفه راست‌گرد به طول تقریبی ۱۸۰ متر هستند. حرکت گسل F4، باعث جابه‌جایی گسل F1 و جابه‌جایی راست‌گرد زون کانی‌سازی شده است. با توجه به شواهد صحرایی و بررسی‌های ژئوفیزیکی، کانی‌سازی مس اغلب در ارتباط مستقیم با شکستگی‌ها و گسل‌های اصلی منطقه است و از راستای کلی آنها یعنی E-W تا NW-SE پیروی می‌کند (شکل ۶).

واحد آندزیت و ریولیت توف (E<sup>an</sup>)، به عنوان سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی، یک محیط شکنای مناسب جهت توسعه شکستگی‌ها و گسلش ایجاد کرده است (شکل ۶). طبق برگه زمین‌شناسی- ساختاری منطقه در مقیاس ۱:۵۰۰ (آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳)، گسل‌های اصلی منطقه بهاریه شامل چهار دسته، (۱) گسل بهاریه (F1)، (۲) گسل‌های امتدادی (F2)، (۳) گسل‌های عرضی (F3) و (۴) گسل‌های مورب (F4) هستند. گسل بهاریه (F1) با امتداد خاوری- باختری و در برخی نقاط متمایل به شمال باختر- جنوب خاور در مرکز منطقه وجود دارد که هم‌راستا با گسل درونه و از کنترل‌کننده‌های مهم کانه‌زایی در منطقه است. این گسل به طول تقریبی ۲۰۰ متر، از نوع مورب‌لغز معکوس و با شیب ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب است. گسل‌های امتدادی (F2) هم‌راستا با زون کانی‌سازی هستند و راستای تقریبی خاوری- باختری دارند. این دسته گسل‌ها



شکل ۶- شواهد صحرایی گسل اصلی بهاریه (F1) شامل: الف) آثار کانی‌سازی مس (مالاکیت) در سطح گسل F1 (کادر قرمز)؛ ب) نمایی دیگر از گسل F1 در واحد آندزیت توف تا ریولیت توف که در اطراف آن دگرسانی‌های کلریتی و آرزبلیک رخنمون دارند. دید تصاویر به سمت جنوب شرق است.

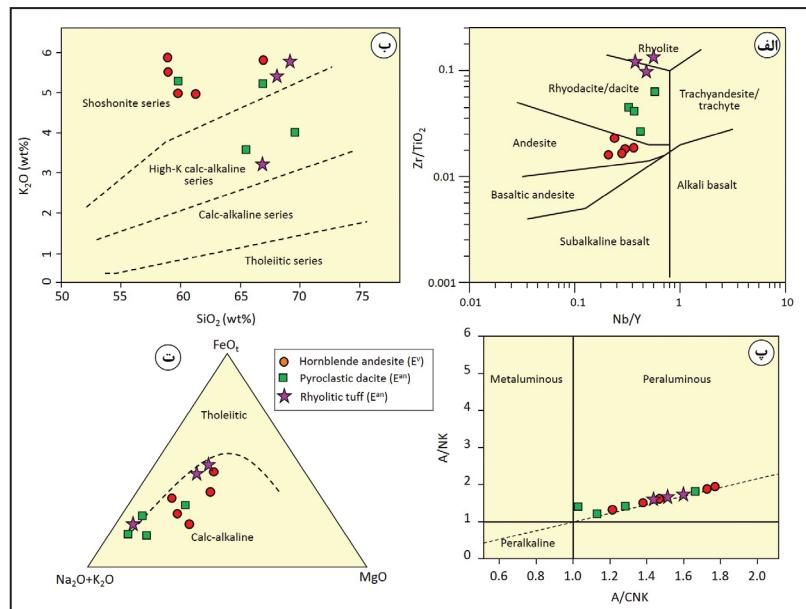
### ۶- ژئوشیمی سنگ های منطقه

به منظور تفکیک سری های ماگمایی کالک آلکان (کلسیمی قلیایی) از تولیتی (غنی از آهن) نیز از نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) استفاده شد، که بر اساس این نمودار واحدهای سنگی منطقه در موقعیت سری کالک آلکان قرار گرفتند (شکل ۷- ت).

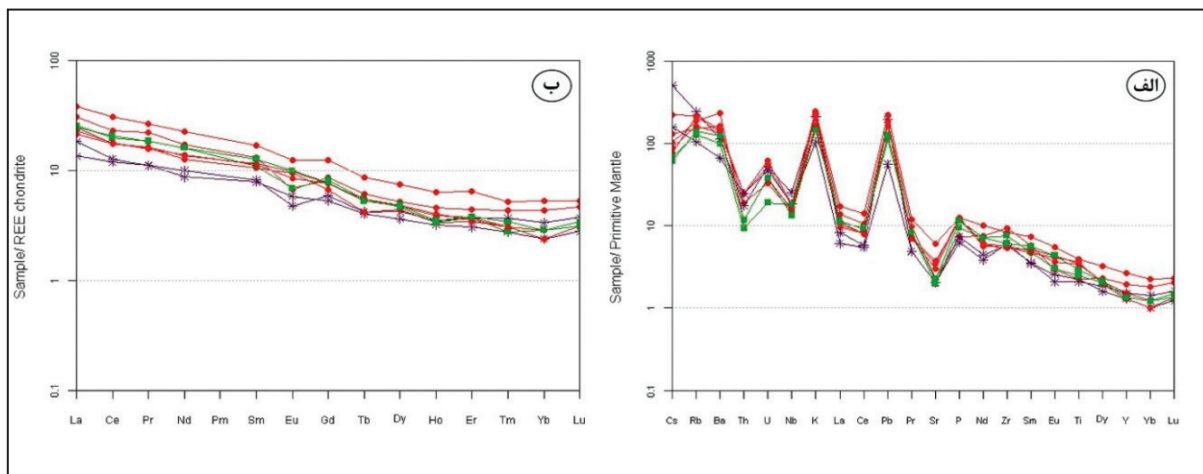
به منظور پی بردن به محیط پتروژنز سنگ های منطقه از الگوی توزیع عناصر نادر خاکی و کمیاب در قالب نمودارهای عنکبوتی استفاده شد. در نمودار بهنجار شده سنگ ها بر اساس گوشه نخستین توسط (Sun and McDonough, 1989) منطقه، در عناصر La، Ce، Nb، Th و Sr بی هنجاری منفی و نیز در عناصر K، Pb و U بی هنجاری مثبت نشان می دهند (شکل ۸- الف).

رفتار ژئوشیمیایی عناصر ذکر شده گویای وجود یک رژیم زمینی ساختمانی فرورانش در منطقه مورد مطالعه است. این نمونه ها با محتوای عناصر نادر خاکی کل ( $\Sigma REE$ ) بین ۱۱۲ تا ۱۸۶/۵ ppm در نمودار بهنجار شده سنگ ها نسبت به کندریت توسط (Boynton, 1984) یک غنی شدگی نسبی در حوزه LREE نسبت به HREE نشان می دهند ( $\Sigma LREE/\Sigma HREE=26/12$ ) (شکل ۸- ب) (جدول ۱).

به منظور رده بندی و نام گذاری سنگ های منطقه، از نمودارهای سنگ شناسی عناصر اکسیدی اصلی و عناصر کمیاب غیر متحرک استفاده شد. بر اساس نمودار دوتایی نسبت Nb/Y در مقابل نسبت Zr/TiO<sub>2</sub> (Winchester and Floyd, 1977)، سنگ های میزان کانه زایی در محدوده آندزیت، داسیت و ریولیت قرار گرفتند (شکل ۷- الف). محتوای سیلیس در سنگ های منطقه بین ۵۷/۶ تا ۶۹ درصد وزنی و نسبت عناصر قلیایی K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O در آنها بین ۱ تا ۴ درصد وزنی، در تغییر است (جدول ۱). بر این اساس، به منظور تعیین سری های ماگمایی که توسط میزان آلکالینیتی (درجه قلیایی) بیان می شود، از نمودار دوتایی SiO<sub>2</sub> در مقابل K<sub>2</sub>O توسط (Le Maitre et al., 1989) استفاده شد که سنگ ها در گستره کالک آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی قرار گرفتند (شکل ۷- ب). همچنین به منظور تعیین درجه اشیاعی از آلومین (اندیس اشیاع آلومین)، از نمودار دوتایی نسبت های مولار A/CNK یا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) در مقابل (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO) یا A/NK توسط (Maniar and Piccoli, 1989) استفاده شد که کلیه نمونه ها با یک روند خطی در محدوده پر آلومین قرار گرفتند (شکل ۷- پ).



شکل ۷- رده بندی و ژئوشیمی سنگ های آذرین میزان کانه زایی در منطقه بهار، شامل: الف) نمودار دوتایی نسبت Nb/Y در مقابل نسبت Zr/TiO<sub>2</sub> (Winchester and Floyd, 1977)؛ ب) تعیین میزان آلکالینیت سنگ های منطقه با استفاده از نمودار دوتایی SiO<sub>2</sub> در مقابل K<sub>2</sub>O (Le Maitre et al., 1989)؛ پ) گستره پر آلومین سنگ های منطقه در نمودار دوتایی A/CNK در مقابل A/NK (Maniar and Piccoli, 1989)؛ ت) قرار گرفتن سنگ های منطقه در سری کالک آلکان در نمودار سه تایی AFM (Irvine and Baragar, 1971)



شکل ۸- الف) نمودار عنکبوتی مقادیر عناصر کمیاب سنگ های منطقه که نسبت به گوشه اولیه بهنجار شده اند (Sun and McDonough, 1989)؛ ب) نمودار عنکبوتی توزیع عناصر نادر خاکی سنگ های منطقه که نسبت به کندریت بهنجار شده اند (Boynton, 1984). نمادها مطابق شکل ۷ است.

می‌شود که محدود به واحدهای سنگی  $E^{an}$  و به‌طور ناچیز  $E^v$  هستند. از این نظر با توجه به همراهی کانه‌زایی با واحدهای سنگی ذکر شده می‌توان به ماهیت چینه‌کران کانه‌زایی در کانسار بهاریه دست یافت. از سوی دیگر، طبق شواهد ساختاری که در بخش قبل اشاره شد، به نظر می‌رسد که گسل مورب‌لغز F1 با راستای E-W تا NW-SE و هم‌راستا با گسل اصلی درونه، در شکل‌گیری افق مس بهاریه موثر است. بر این مبنای، بنظر می‌رسد کانه‌زایی در منطقه بهاریه ابتدا به‌صورت دانه‌پراکنده و محدود به واحد آندزیتی  $E^{an}$  تشکیل شده (کنترل‌کننده چینه‌شناسی) و متعاقباً بر اثر فرایندهای زمین‌ساختی و گسل‌خوردگی و فضای مناسب برای مهاجرت سیال، این کانه‌زایی در گسل‌های خاوری-باختری به‌صورت رگه‌های ضخیم پر عیار تمرکز پیدا کرده است (کنترل‌کننده ساختاری). ماده معدنی اغلب با دگرسانی‌های کلسیتی و کلریتی (واحد آندزیت توف) و سیلیسی و آرزلیک (واحد ریولیت توف) همراه است.

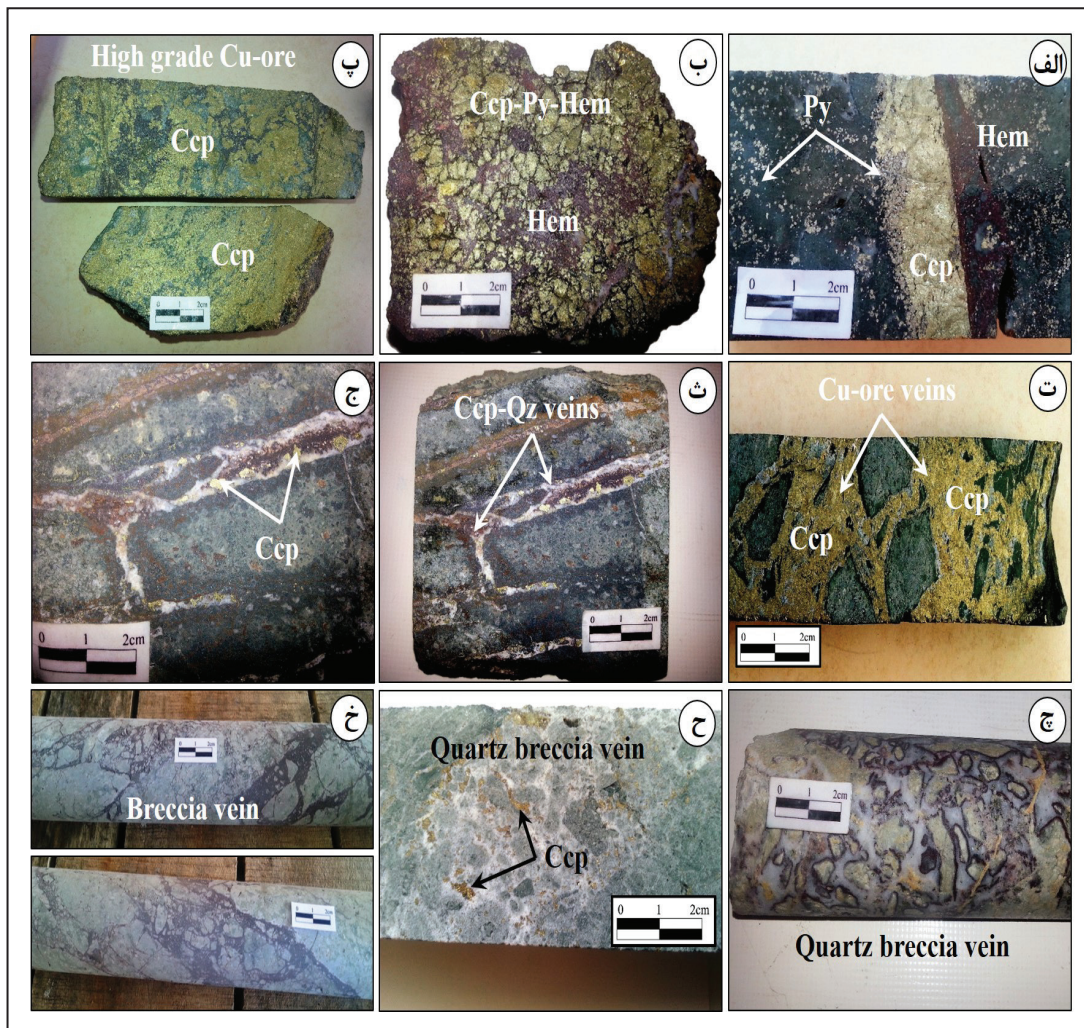
#### ۷-۱. کانه‌نگاری

کالکوپیریت به عنوان کانه اصلی منطقه بهاریه در چهار شکل مختلف شامل، (۱) کالکوپیریت-پیریت  $\pm$  هماتیت رگه‌ای، (۲) کالکوپیریت رگه‌ای تا توده‌ای پر عیار بدون باطله، (۳) کالکوپیریت دانه‌پراکنده در رگه-رگچه کوارتز، و (۴) کالکوپیریت  $\pm$  پیریت برشی با سیمان کوارتز و کلسیت مشاهده شد (شکل‌های ۹-الف تا خ).

همچنین نسبت  $(La/Yb)_n$  بین ۹/۲ تا ۲۳/۳ در تغییر است (جدول ۱). وجود یک ته‌شدگی نسبی در موقعیت Eu با تغییرات بین ۰/۸ تا ۱/۳ گویای تبلور تفریقی آلکالی‌فلدسپار در سنگ‌های منطقه است (شکل ۸-ب). با توجه به این شواهد ژئوشیمی، به نظر می‌رسد که آلاش ماگمایی با سنگ‌های پوسته نقش مهمی در شکل‌گیری سنگ‌های منطقه داشته باشد. غنی‌شدگی از عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بالا (LILE) نظیر Rb، Cs، U و Pb نسبت به عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) و همچنین ته‌شدگی از La و Nb همراه با غنی‌شدگی LREE، از ویژگی‌های سنگ‌های آذرین پس از برخورد قاره‌ای است و می‌تواند از نشانه‌های آلودگی پوسته‌ای و یا ذوب مجدد آن باشد (Swain et al., 2003).

#### ۷-۲. کانه‌زایی و ژئومتری کانسنگ

کانه‌زایی مس در کانسار بهاریه در یک افق معدنی با راستای خاوری-باختری، درازای تقریبی ۲۰۰ متر و ضخامت متغیر ۵ تا ۱۰ متر، رخ داده است. این افق معدنی با شیب نزدیک به قائم و عمق حداکثری ۲۰ متر در سنگ میزبان آندزیت توف تا ریولیت توف (واحد  $E^{an}$ ) به سن ائوسن میانی، تشکیل شده است. ماده معدنی در افق ذکر شده اغلب با بافت و ساخت‌های رگه-رگچه‌ای، دانه‌پراکنده، برشی و جانیشینی مشخص



شکل ۹- تصاویر نمونه‌های دستی از مغزه‌های حفاری منطقه شامل: الف و ب) کالکوپیریت نسل اول همراه با پیریت‌های دانه‌پراکنده و هماتیت؛ پ و ت) کانه‌زایی پر عیار کالکوپیریت بدون باطله؛ ث و ج) کالکوپیریت دانه‌پراکنده در رگه-رگچه کوارتز؛ چ و ح) رگه برشی کوارتز همراه با کالکوپیریت دانه‌پراکنده؛ خ) نمایی دیگر از کانسنگ برشی (علائم اختصاری: Qz) کوارتز، Ccp) کالکوپیریت، Py) پیریت، Hem) هماتیت.

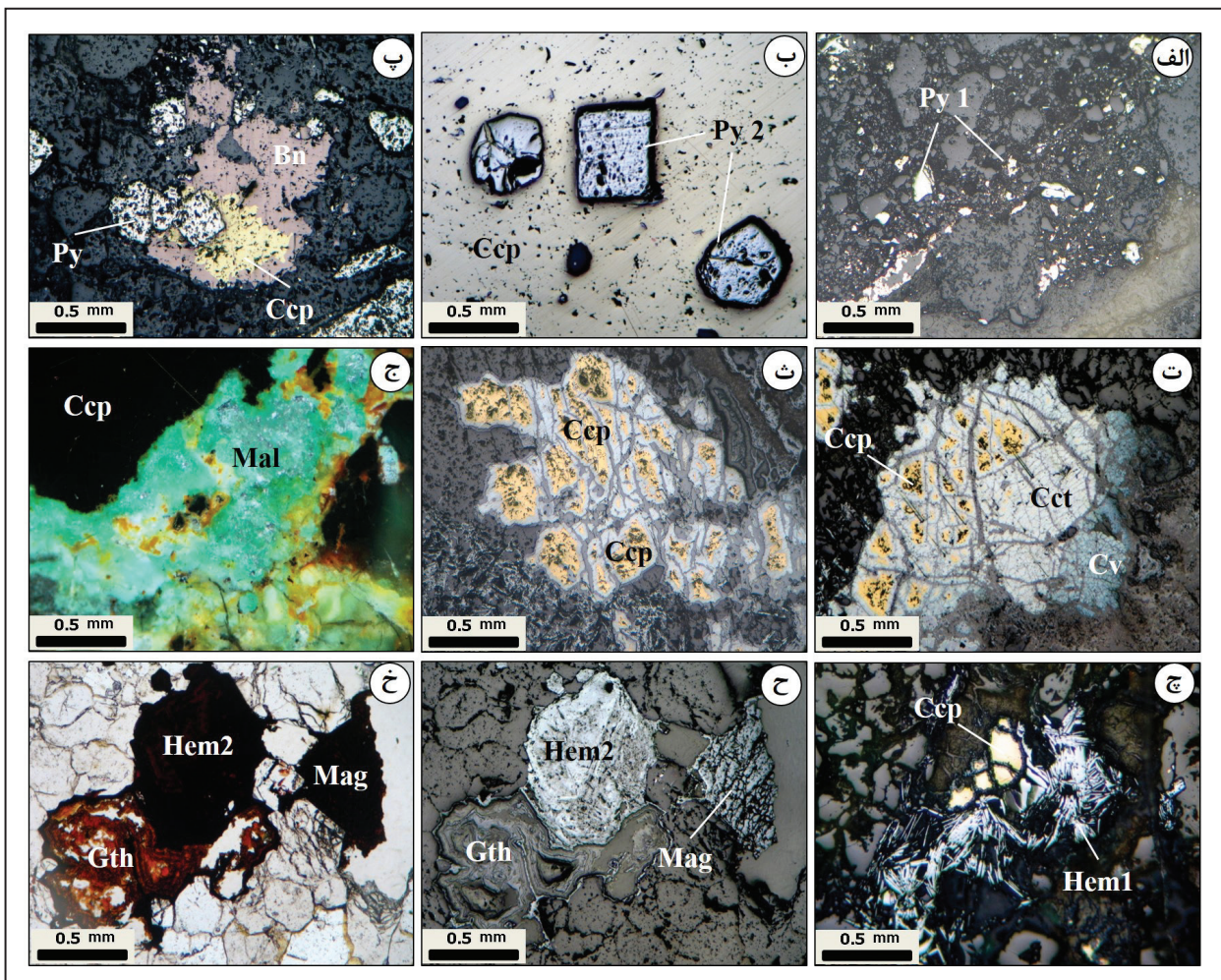


سطحی منطقه‌ی بهاریه قابل مشاهده هستند (شکل ۱۰-ج). پس از کانه‌های سولفیدی، فراوان‌ترین کانه در کانسار بهاریه هماتیت بوده که شامل دو نوع تیغه‌ای و ماریتی است. هماتیت تیغه‌ای اغلب به صورت درهم‌شده‌ی همراه کالکوپیریت و پیریت مشاهده شد (شکل ۱۰-ج).

هماتیت‌های ماریتی نیز در نتیجه افزایش اکسیژن محیط در مرحله سوپرژن جانشین مگنتیت‌ها شده‌اند (شکل‌های ۱۰-ح و خ). کانی‌های فرعی اسفالریت و گالن نیز اغلب به صورت ادخال‌های کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون در میزبان کالکوپیریت تشخیص داده شدند. طبق مطالعات EPMA، در اسفالریت‌های کانسار بهاریه محتوای آهن بین ۰/۳ تا ۴/۶ درصد وزنی (معادل FeS mol بین ۰/۵ تا ۷/۱) و محتوای روی بین ۵۵/۹ تا ۶۴/۲ درصد وزنی در تغییر است (جدول ۲).

همچنین، در ترکیب گالن‌ها نیز مقادیر مس (متوسط ۰/۵ درصد وزنی) و نقره (متوسط ۰/۲ درصد وزنی) ثبت شد (جدول ۲). مگنتیت به عنوان دیگر کانه فرعی در کانسار بهاریه به صورت بلورهای تجمعی در کانسنگ مس مشاهده شد (شکل ۱۰-ح).

بر مبنای مطالعات تجزیه نقطه‌ای EPMA، کالکوپیریت‌های کانسار بهاریه با محتوای مس ۳۳/۶ تا ۴۳/۰ درصد وزنی، آهن ۲۴/۰ تا ۳۱/۳ درصد وزنی و گوگرد ۳۳/۴ تا ۵۴ درصد وزنی (جدول ۲)، به ترکیب نهایی خود نزدیک هستند. دست کم دو نسل کانی پیریت شامل، (۱) پیریت‌های دیاژنتیک دانه‌پراکنده و (۲) پیریت‌های خوش‌وجه طی مطالعات کانه‌نگاری تشخیص داده شده که به صورت درگیر با کالکوپیریت هستند (شکل‌های ۱۰-الف و ب). پیریت با محتوای آهن ۴۴/۵ تا ۴۷/۳ درصد وزنی و گوگرد ۵۲ تا ۵۴/۳ درصد وزنی، همانند کالکوپیریت ترکیب ثابت داشته است و مقادیر جزئی عناصر کبالت، روی، کادمیم، آنتیموان و نقره با فراوانی کمتر از ۱ درصد وزنی در آن تشخیص داده شد (جدول ۲). بورنیت از دیگر کانی‌های سولفیدی همراه کالکوپیریت است که اغلب به صورت جانشینی در حاشیه کالکوپیریت مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-پ). کالکوسیت و کوولین به عنوان فراوان‌ترین کانه‌های سولفیدی سوپرژن اغلب با بافت جانشینی در شکستگی‌های کالکوپیریت تشکیل شده است (شکل‌های ۱۰-ت و ث). مالاکیت و آزوریت با بافت‌های شعاعی، تحت تأثیر فرایندهای ثانویه بر سولفیدهای مس در رخنمون‌های



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ بازتابی از کانه‌های فلزی منطقه بهاریه شامل: الف) پیریت‌های پراکنده دیاژنتیک؛ ب) پیریت‌های خوش‌وجه در میزبان کالکوپیریت؛ پ) درهم‌شده بورنیت اطراف کالکوپیریت؛ ت و ث) جانشینی کالکوسیت (آبی مایل به سفید) و کوولین (آبی پررنگ) در اطراف کالکوپیریت؛ ج) مالاکیت با بافت شعاعی و شکافه پرکن در حاشیه‌ی دانه‌های کالکوپیریت؛ چ) درهم‌شده هماتیت‌های تیغه‌ای اولیه و کالکوپیریت؛ ح و خ) هماتیت ماریتی ثانویه در کنار گوتیت و مگنتیت (علامت اختصاری: Bn) بورنیت، Ccp) کالکوپیریت، Py) پیریت، Cct) کالکوسیت، Cv) کوولین، Mal) مالاکیت، Hem) هماتیت، Mag) مگنتیت، Gth) گوتیت.

جدول ۲- داده‌های تجزیه نقطه‌ای ریز کاو الکترونی (EPMA) در کانسار بهاریه. بر حسب درصد وزنی.

	Ccp (n=21)	Py (n=13)	Sp (n=5)	Gn (n=2)	Mag (n=8)
Cu	33.59-42.98	0.01-0.58	0.12-4.37	0.09-0.43	ND
Fe	23.93-31.34	44.5-47.31	0.27-4.64	0.02-0.06	75.84-77.53
S	33.4-53.58	51.8-54.26	33.21-33.83	11.91-12.18	0.01-0.05
Zn	0.01- 0.06	0.01-0.09	55.87-64.2	ND	ND
Au	0.01-0.21	0.01-0.01	0.01-0.15	ND	ND
Ag	0.01-0.09	0.01-0.1	0.01-0.07	0.1-0.14	ND
As	0.01-0.45	0.01-0.07	0.01-0.02	0.01-0.16	ND
Bi	0.01-0.24	0.01-0.13	0.01-0.06	0.01-0.01	ND
Ca	ND	ND	ND	ND	0.01-0.06
Cd	0.01-0.12	0.01-0.06	0.53-1.2	0.01-0.08	ND
Co	ND	0.01-0.35	0.01-0.01	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	0.04-0.06
Mn	0.01-0.01	0.01-0.03	0.01-0.02	ND	0.19-1.41
Mg	ND	ND	ND	ND	0.01-0.01
Ni	0.01-0.02	0.01-0.04	0.01-0.02	ND	0.01-0.02
Pb	ND	ND	ND	86.67-87	ND
Sb	0.01-0.06	0.01-0.02	0.01-0.01	0.01-0.03	ND
Si	ND	ND	ND	ND	0.07-0.13
Ti	ND	ND	ND	ND	12.38-13.52
V	ND	ND	ND	ND	0.48-0.54

n تعداد نقاط آنالیز شده، ND عدم تشخیص، علامت اختصاری: Ccp) کالکوپیریت، Py) پیریت، Sp) اسفالریت، Gn) گالن، Mag) مگنتیت، مقادیر Mn و V، Ti، Fe در مگنتیت بر حسب اکسید محاسبه شده است.

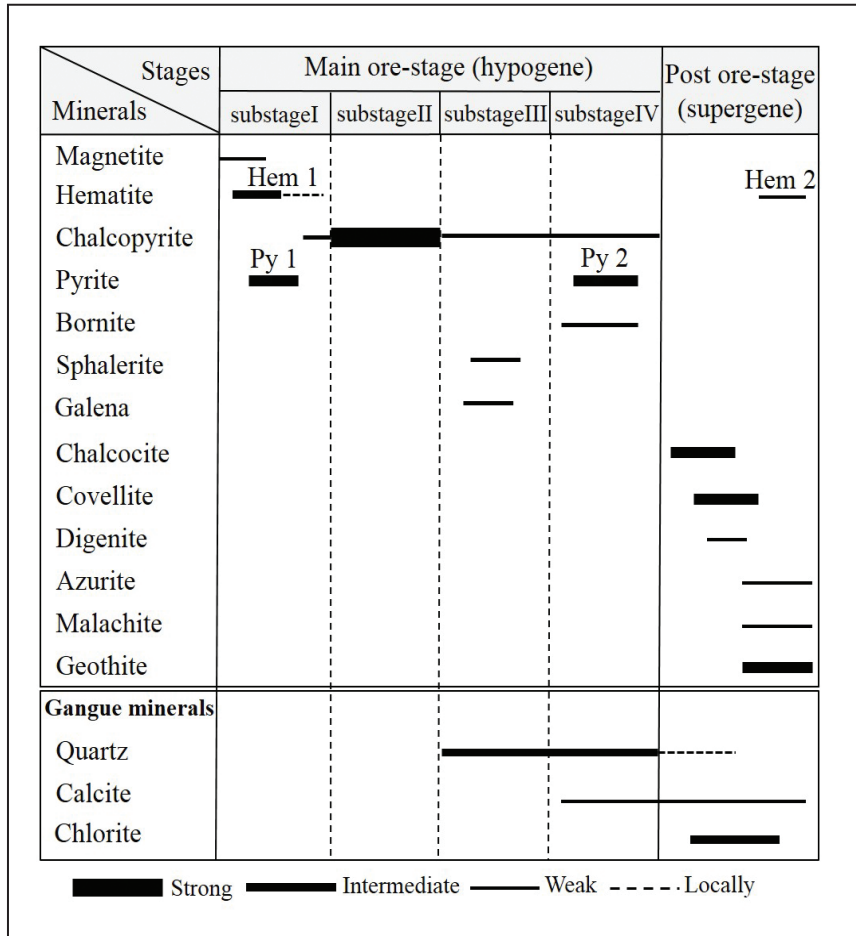
## ۲-۷. مراحل زمانی رخداد کانه‌زایی

با توجه به شواهد زمین‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت کانه‌زایی، حداقل دو مرحله کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن در کانسار بهاریه وجود دارد. کانه‌زایی هیپوژن خود متشکل از چهار زیرمرحله یا فاز است؛ شامل: فاز اول) کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای متشکل از کانی‌های کالکوپیریت، پیریت‌های دانه پراکنده و درهم‌شدی‌های هماتیت تیغه‌ای ( $\pm$  مگنتیت)؛ فاز دوم) کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای با کانی اصلی کالکوپیریت؛ فاز سوم) کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای با کانی شناسی کوارتز، کالکوپیریت دانه پراکنده (همراه با ادخال‌های ریز گالن و اسفالریت)؛ فاز چهارم) کانه‌زایی برشی با سیمان کوارتز ( $\pm$  کلسیت) همراه با کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت دانه پراکنده، پیریت و بورنیت. پس از تشکیل این مراحل، همزمان با بالا آمدن سطح ایستابی و در بر گرفته شدن ذخیره توسط آب‌های زیرسطحی احیایی، بخش زیادی از کانه‌زایی هیپوژن توسط یک سری فعل و انفعالات شیمیایی نسبتاً محدود، منجر به تشکیل فرایند غنی‌سازی سوپرژن شده است. این مرحله با حضور کانه‌های مس پر عیار نظیر کالکوسیت، کوولین و دیژنیت مشخص می‌شود که اغلب با بافت جانشینی در حاشیه کالکوپیریت یا شکستگی‌های آن تشکیل شده‌اند. طبق شواهد صحرایی و حفاری، یک پوشش اکسیدی-کربناته آب‌دار به ضخامت تقریبی ۱۰ متر کانسنگ سولفیدی منطقه را فرا گرفته که این بخش، غنی از کانی‌های هیدروکسیدی آهن و مس (نظیر گوتیت، مالاکیت، آزوریت و لیمونیت) است. مراحل زمانی رخداد کانه‌زایی در کانسار مس بهاریه به‌طور شماتیک در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

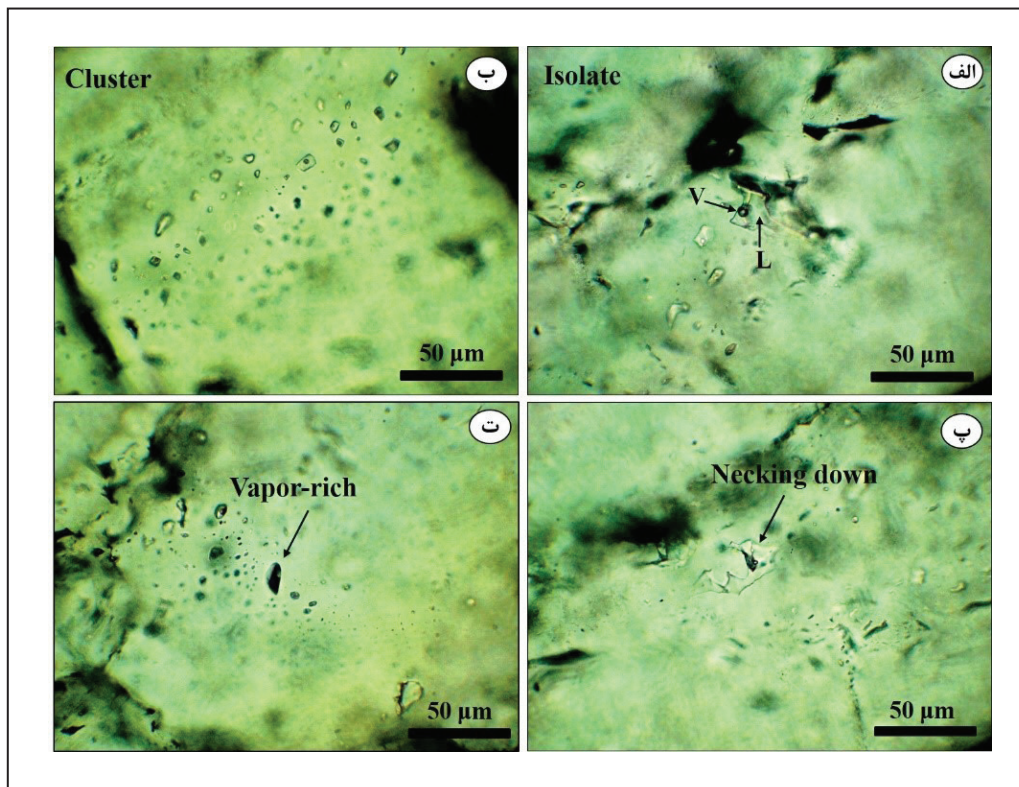
## ۸- میانبارهای سیال

مطالعات میانبارهای سیال بر روی کوارتزهای مرتبط با کانی‌سازی کالکوپیریت

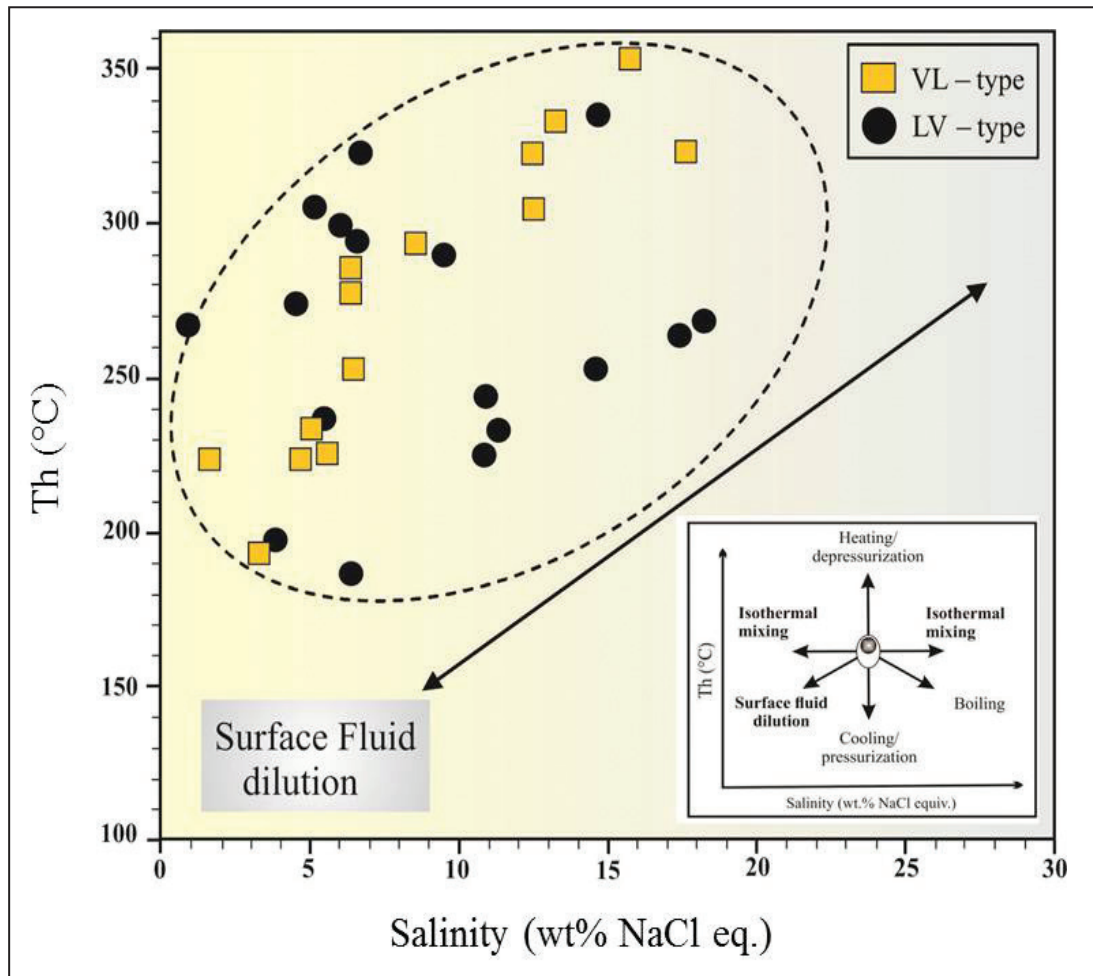
(زیرمرحله سوم) انجام شد. طبق این مطالعات، میانبارهایی با ابعاد ۵ تا ۲۰ میکرون با ماهیت اولیه و موقعیت منفرد (Isolate) تا درون‌دانه‌ای (Intergrain)، مورد آزمایش دماسنجی قرار گرفتند. میانبارهای مشاهده شده اغلب دارای شکل‌های دوکی، بی‌شکل و کروی هستند. میزان شوری و چگالی میانبارهای سیال به ترتیب بر پایه معادله Hall et al. (1988) و نرم‌افزار FLINCOR (Brown, 1989) به دست آمد. بر پایه تقسیم‌بندی انجام شده توسط Shepherd et al. (1985) و Roedder (1984)، میانبارهای سیال به ترتیب فراوانی شامل دوفازی غنی از مایع (L+V)، دوفازی غنی از بخار (V+L) و تک‌فازی مایع (L) و گاز (V) هستند و شواهدی از وجود میانبارهای دارای فاز جامد حالت یا حضور CO<sub>2</sub> مایع (LCO<sub>2</sub>) در آنها مشاهده نشد. میانبارهای دوفازی غنی از مایع اغلب از لحاظ تجمعی همراه با میانبارهای تک‌فاز مایع و میانبارهای دوفازی غنی از گاز نیز همراه با میانبارهای تک فاز گاز مشاهده شدند (شکل ۱۲). دمای همگن‌شدگی نهایی میانبارهای دو فازی غنی از مایع (Th<sub>LV</sub>) بین ۱۸۷ °C تا ۳۲۶ °C (متوسط ۲۵۶/۵ °C) به دست آمد. همچنین، تغییرات دمای ذوب نهایی یخ (T<sub>mice</sub>) در این میانبارها بین ۲/۱- تا ۱۵/۱ °C (متوسط ۸/۶- °C)، معادل شوری بین ۳/۴۳ تا ۱۸/۷ درصد وزنی معادل نمک طعام (wt% NaCl eq) و چگالی بین ۰/۹۴ تا ۰/۵ g/cm<sup>3</sup> به دست آمد (جدول ۳). دمای همگن‌شدگی نهایی میانبارهای سیال دوفازی غنی از بخار (Th<sub>VL</sub>) نیز بین ۲۶۸ تا ۳۵۶ °C (متوسط ۳۱۲ °C) و تغییرات دمای ذوب نهایی یخ (T<sub>mice</sub>) در آنها بین ۰/۶- تا ۱۱/۷ °C (متوسط ۶/۱۵- °C) معادل شوری ۰/۹۹ تا ۱۵/۶۶ درصد معادل نمک طعام (wt% NaCl eq) به دست آمد (جدول ۳). چگالی این میانبارها نیز بین ۰/۹۲ g/cm<sup>3</sup> تا ۱/۰۳ g/cm<sup>3</sup> در تغییر است. نمودار دمای همگن‌شدگی در مقابل شوری در شکل ۱۳ دیده می‌شود.



شکل ۱۱- توالی پاراژنتیک کانسار مس بهاریه.



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی میانبارهای سیال کانسار بهاریه، شامل: الف) میانبار سیال بی شکل دوفازی غنی از مایع (L+V) با موقعیت منفرد درون دانه‌ای؛ ب) اجتماعی از میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (L+V)؛ پ) پدیده باریک شدن؛ ت) اجتماعی از میانبارهای دوفازی غنی از گاز (V+L).



شکل ۱۳- نمودار دمای همگن‌شدگی در برابر شوری که در آن پدیده اختلاط و رقیق‌شدگی سیال گرمایی قابل تشخیص است.

جدول ۳- داده‌های میکروترمومتری میانبارهای سیال در میزبان کوارتز.

Sample no.	Type	n	Size (μm)	Te (°C)	Tm <sub>ice</sub> (°C)	Th (°C)	Salinity (wt% NaCl eq.)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Bh-01	LV	7	8-15	-26.5 to -21.4	-14.5 to -2.2	187 to 269	18.2 to 3.59	1.05 to 0.94
Bh-02	LV	5	10-17	-27.5 to -23.8	-15.1 to -3.6	207 to 265	17.7 to 5.77	1.05 to 0.96
Bh-03	LV	8	12-20	-22.6 to -18.2	-10.5 to -0.6	268 to 337	14.46 to 0.99	1.02 to 0.92
Bh-04	VL	6	5-15	-24.5 to -21.8	-13.7 to -2.1	195 to 326	17.51 to 3.43	1.04 to 0.94
Bh-05	VL	10	5-15	-23.5 to -21.8	-11.7 to -1.1	221 to 356	15.66 to 1.81	1.03 to 0.93

n تعداد میانبارهای سیال اندازه‌گیری شده.

## ۹- بحث

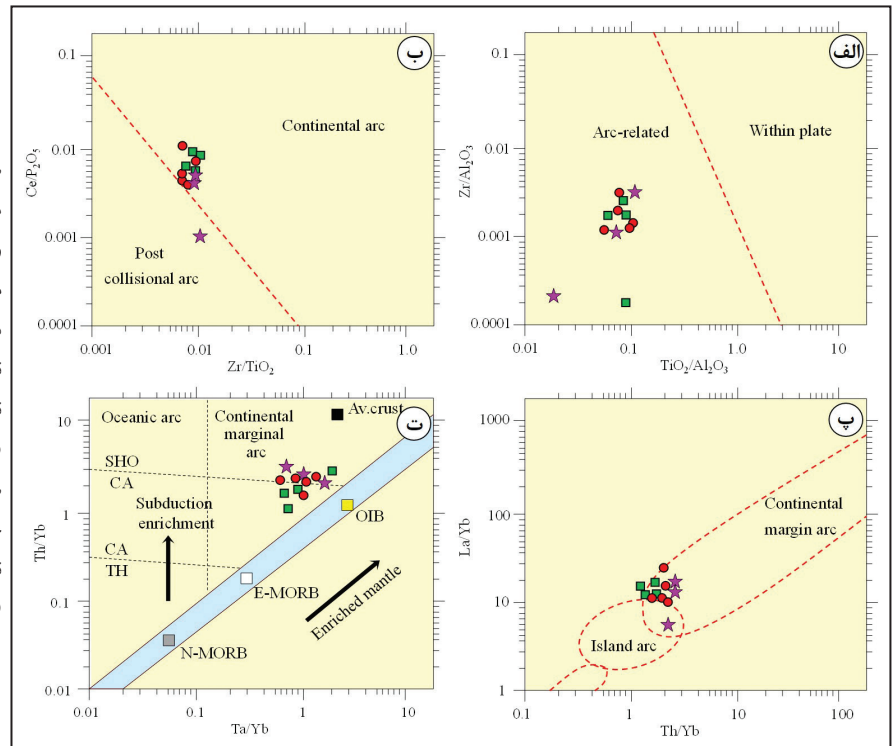
### ۹-۱. پتروزنز و جایگاه زمین‌ساختی

نمایش می‌دهند. برای دست‌یابی به جایگاه ژئودینامیک سنگ‌های منطقه بهاریه از نسبت‌های عناصر نادر خاکی و کمیاب، استفاده شده است. به منظور تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی از نمودار دوتایی  $TiO_2/Al_2O_3$  در مقابل  $Zr/Al_2O_3$  Muller and Groves (2016) استفاده شد که در آن ماگماهای درون صفحه‌ای (within plate) از ماگماهای قوسی (arc-related) تفکیک می‌شوند. با توجه

گرانیتوئیدهای شمال کاشمر که بخشی از منطقه بهاریه را نیز تشکیل می‌دهند توسط روش سن‌سنجی U-Pb بر روی زیرکن، سنی در حدود ۴۰ تا ۴۱ میلیون سال دارند (Shafaii Moghadam et al., 2015) که در سنگ‌های ولکانیکی ائوسن نفوذ کرده‌اند. این گرانیتوئیدها با ترکیب کالک‌آلکالن، ماهیت متآلومین تا پراآلومین و تیپ I، خصوصیات ژئوشیمی ماگماهای کششی مرتبط با حوزه‌های فرورانش را

به این نمودار، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محیط‌های مرتبط با قوس قاره قرار گرفتند (شکل ۱۴- الف). به منظور تفکیک محیط‌های قوس قاره‌ای (arc continental) و قوس‌های پس از برخورد (post collisional arc) نیز از نمودار دوتایی نسبت  $Zr/TiO_2$  در مقابل  $Ce/P_2O_5$  (Muller and Groves, 2016) استفاده شد که با توجه به این نمودار، تمام نمونه‌های منطقه مورد مطالعه به جز یک مورد در محیط‌های قوس قاره‌ای قرار گرفتند (شکل ۱۴- ب). بر اساس نمودار دوتایی، نسبت عناصر  $Th/Yb$  در مقابل  $La/Yb$  (Condie, 1989)، که در آن ماگماهای قوس قاره‌ای

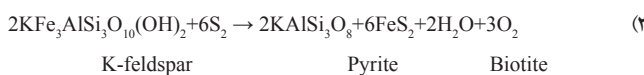
از جزایر قوسی (Island arc) متمایز می‌شوند؛ بخش اعظم سنگ‌های منطقه در بخش کمان حاشیه‌ی قاره قرار گرفتند (شکل ۱۴- پ). با استفاده از نمودار دوتایی نسبت‌های عنصری کمیاب  $Th/Yb$  در مقابل  $Ta/Yb$  (Pearce, 2008)، که در آن ماهیت شیمیایی سنگ‌ها به همراه جایگاه زمین‌ساختی آنها مشخص می‌شود، نمونه‌های سنگی منطقه مورد مطالعه با ماهیت کالک‌آلکان تا شوشونیتی در نتیجه عملکرد یک گوشته غنی شده در موقعیت قوس‌های فعال حاشیه قاره قرار گرفتند (شکل ۱۴- ت).



شکل ۱۴- الف) موقعیت پتروژنتیک سنگ‌های آذرین منطقه بهاریه در نمودار  $Zr/Al_2O_3$  در مقابل  $TiO_2/Al_2O_3$  و جایگاه سنگ‌ها در محدوده محیط‌های قوسی؛ ب) موقعیت پتروژنتیک سنگ‌های منطقه در نمودار  $Zr/TiO_2$  در مقابل  $Ce/P_2O_5$  و جایگاه سنگ‌ها در موقعیت قوس قاره‌ای؛ پ) قرار گرفتن نمونه‌های منطقه در بخش کمان قاره‌ای بر اساس نمودار نسبت عناصر  $Th/Yb$  در مقابل  $La/Yb$ ؛ ت) نمودار  $Th/Yb$  در مقابل  $Ta/Yb$  که در آن سنگ‌های منطقه با ماهیت کالک‌آلکان تا شوشونیتی در نتیجه عملکرد یک گوشته غنی شده در محیط قوس‌های فعال حاشیه قاره تشکیل شده‌اند (TH = تولیتی؛ CA = کالک‌آلکان؛ SHO = شوشونیتی). نمادها مطابق شکل ۷ است.

## ۹-۲. خصوصیات فیزیکوشیمی سیال و تهنشینی مس

نتیجه افزایش شوری محیط (فراوانی NaCl و KCl)، میزان کلرینته سیال بالا می‌رود و این فرایندها شرایط تخریب هر چه بیشتر کانی‌های فرومنیزیم (نظیر بیوتیت، هورنبلند و پیروکسن) را فراهم می‌کنند. از آنجایی که آهن می‌تواند در ساختمان کانی‌های فرومنیزیم نظیر بیوتیت تمرکز یابد، با تخریب این کانی و سایر کانی‌های مشابه با حضور یون‌های گوگرد، آهن از ساختمان این کانی آزاد می‌شود و پیریت را می‌سازد (واکنش ۳):

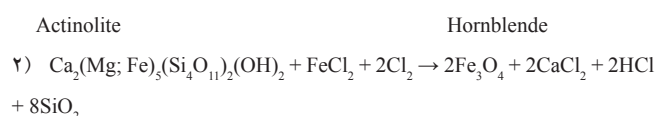
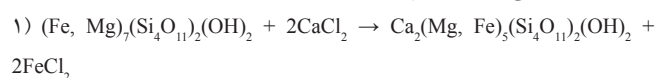


در این شرایط با حضور پیریت‌های دیاژنتیک در سنگ میزان کانه‌زایی، شرایط احیایی در محیط ایجاد و مقادیر بالای  $H_2S$  ناشی از احیا سولفات توسط باکتری‌ها (Bacterial Sulfate Reduction) در محیط آزاد می‌شود. دانه‌های پیریت اولیه تدریجاً توسط کانه‌های سولفیدی مس (نظیر کالکوپیریت و بورنیت) جانشین می‌شوند (شکل‌های ۹- الف و ۱۰- پ). در بسیاری از ذخایر تپ ماتو فرایند احیای سولفات توسط باکتری (BSR) گزارش شده است (Rosúa et al., 2014; Wilson, 2000; Wilson and Zentilli, 2006) که مقادیر دقیق عددی آن نیاز به شواهد ایزتوپ پایدار گوگرد ( $\delta^{34}S$ ) دارد.

## ۹-۳. تپ ذخیره

مثال‌های متعددی از ذخایر مس تپ ماتو یا طبقات سرخ آتشفشانی تاکنون در خاور ایران و به ویژه پهنه مس سرکوب-سبزوار معرفی شده است که از جمله آنها می‌توان به کانسارهای مس ورزگ-قاین (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۱)، مس معدن بزرگ (صالحی و همکاران، ۱۳۹۴)، مس کال ابری

شواهد صحرایی و مطالعات میکروسکوپی کانسار بهاریه نشان‌دهنده تشکیل این ذخیره توسط سیالات غنی از گوگرد، pH اسیدی، شوری و دمای متوسط است. در ذخایر سولفیدی چینه‌کران که حاوی کانی‌سازی‌های همزمان سولفیدی و اکسیدی هستند، تغییرات فشار نسبی اکسیژن ( $f_{O_2}$ ) و گوگرد ( $f_{S_2}$ ) محیط یکی از عوامل مهم رخداد ذخیره گرمایی است (Cooke and Simmons, 2000; Seward et al., 2014). طبق شواهد کانی‌شناسی به نظر می‌رسد در زمان تشکیل سنگ میزبان آندزیت، تحت شرایط احیایی ذرات پراکنده پیریت ناشی از فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی تشکیل شده است. این پیریت‌های دانه‌پراکنده نخستین مراحل دیاژنتیک هستند که طی فرایند سنگ‌زایی (lithification) در منطقه شکل گرفته‌اند. هماتیت و مگنتیت‌های تشکیل شده در این مرحله نیز می‌توانند ناشی از آهن‌های آزاد شده از ساختمان کانی‌های سیلیکاته آهن‌دار نظیر هورنبلند و پیروکسن باشند که در ساختمان سنگ‌های ولکانیک وجود دارد. طی این واکنش‌ها در ابتدا هورنبلند به اکتینولیت تبدیل شده (واکنش ۱) و تدریجاً با افزایش محتوای شوری و کلرینته سیال مگنتیت از ساختمان اکتینولیت آزاد می‌شود (واکنش ۲):



با گذشت زمان، افزایش آلکالینته (ناشی از شستشوی کانی‌های فلسیک) و در

(Oliveros et al., 2008). کالکوپیریت مهم‌ترین کانه فلزی در کانسار بهاریه است که کانه‌های فرعی پیریت، بورنیت، کالکوسیت، کولین و هماتیت همراه با مقادیر ناچیز اسفالریت، گالن و مگنتیت کانی‌سازی را همراهی می‌کند. بافت‌های پورفیری، آفانیتیک، آمیگدال یا بادامکی و برشی شاخص‌ترین بافت‌های سنگ میزبان در ذخایر تیپ مانتو هستند که مشابه ساخت و بافت کانه‌زایی در منطقه بهاریه است. دگرسانی‌های سیلیسی، کلسیتی، کلریتی و آرژلیک نیز، دگرسانی‌های اصلی مرتبط با کانه‌زایی در کانسار بهاریه هستند. عیار مس در ذخایر تیپ مانتو بین ۱/۵ تا ۳ درصد وزنی (%wt) و محتوای نقره بین ۵ تا ۲۰ گرم در تن (ppm) بوده و اغلب فاقد طلا معرفی شده‌اند (Boric et al., 2002). تناژ ذخایر مانتو بین ۵۰ هزار تن تا ۴۳ میلیون تن گزارش شده است (Sato, 1984). کانسار بهاریه تناژ تقریبی یک میلیون تن، عیار مس ۱ درصد (با حداکثر عیار ۲۲ درصد) و متوسط نقره ۵ گرم در تن (ppm) دارد (آتیه کانسار جویان، ۱۳۹۳). تغییرات دمای همگن‌شدگی و شوری در میانبارهای سیال ذخایر مانتو به ترتیب بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ و ۲ تا ۴۰ درصد وزنی نمک طعام گزارش شده است (Ramirez et al., 2006; Kojima et al., 2008). مقادیر شوری و دمای میانبارهای سیال در کانسار مس بهاریه نیز با تیپ ذخایر مانتو تشابه دارد (جدول ۴).

(جباری و همکاران، ۱۳۹۶) و کانسار ماری زنجان (Maghfouri et al., 2016) اشاره کرد. در کشورهای کانادا و شمال آمریکا نیز تیپ‌های مشابهی از این ذخایر معرفی شده که به نام‌های مس بازالتی، مس کویناوی، میشیگان و طبقات سرخ آتشفشانی شناخته می‌شوند (Lefebure and Church, 1996; Cabral and Beaudoin, 2007). بیش از ۳۰ ذخیره و اندیس مس تیپ مانتو در شیلی توسط Sato (1984) گزارش شده که دارای محدوده سنی ژوراسیک تا اوایل تشریری هستند. بر این مبنای، سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه بهاریه نیز سن ائوسن میانی- بالایی دارد. ذخایر تیپ مانتو اغلب دارای ۴ ویژگی هستند که عبارتند از: ۱) سنگ میزبان ولکانیک قاره‌ای و دریایی با سن ژوراسیک تا ائوسن؛ ۲) ماده معدنی اغلب در سیمان سنگ‌های برشی یا پرکننده آمیگدال‌های لاوا رخ داده است؛ ۳) کالکوپیریت، بورنیت و کالکوسیت مهم‌ترین کانه‌های مس هستند که اغلب همراه با پیریت و هماتیت (یا مگنتیت) مشاهده می‌شوند؛ ۴) دگرسانی اغلب شاخص نیست و شامل دگرسانی‌های کم دمای سیلیسی، کربناتی و کلریتی است. سنگ‌های میزبان ذخایر تیپ مانتو شامل آندزیت تا بازالت با ماهیت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا تولیتی هستند که در محیط‌های کشتی مرتبط با فرورانش آند و حوضه‌های پشت کماتی تشکیل شده‌اند

جدول ۴- مقایسه خصوصیات زمین‌شناسی و کانه‌زایی کانسار بهاریه با ذخایر تیپ مانتو.

خصوصیات کانسار	کانسار بهاریه	ذخایر تیپ مانتو
سنگ میزبان	آندزیت توف پورفیری	گدازه‌های بازالتی و آندزیتی
سری ماگمایی	کالک‌آلکانل تا شوشونیتی	کالک‌آلکانل
جایگاه زمین‌ساختی	فرورانش حاشیه قاره‌ای	آتشفشانی قاره‌ای
پاراژنز کانی‌ها	کالکوپیریت، پیریت، بورنیت، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، آزوریت، دیزنیت، هماتیت، مگنتیت، گوتیت، اسفالریت، گالن	کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، کوبریت، مس طبیعی، مالاکیت و کربزو کولا
محصول فرعی	آهن و نقره	نقره
بافت کانسار	پرکننده فضاهای خالی، رگه- رگچه‌ای، برشی، جانیشینی و افشان	رگه‌ای و پرکننده فضاهای خالی
کانی‌های دگرسانی	کوارتز، کلسیت، کلریت	کلریت، آلپیت، کوارتز، اپیدوت
سن کانه‌زایی	ائوسن میانی	ژوراسیک تا تشریری
موقعیت	شمال خاور کاشمر	کانسار بوتاسپرانتزا (شیلی)
منابع	این پژوهش	Ruiz et al. (1971) Sato (1984), Sillitoe (1989)

## ۱- نتیجه‌گیری

پیریت، بورنیت، کالکوسیت، کولین و هماتیت تیغه‌ای به ترتیب فازهای اصلی کانی‌سازی در منطقه بهاریه هستند. طبق شواهد به نظر می‌رسد که سیال گرمایی تکامل یافته از قوس‌های فعال حاشیه قاره، به دلیل ترکیب اسیدی، فشار بالای گوگرد و فوگاسیته پایین اکسیژن شرایط لازم را برای ته‌نشست مس به صورت کالکوپیریت فراهم کرده است. طبق شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، بافت و ساخت، دگرسانی، میانبارهای سیال و تناژ- عیار ذخیره، کانسار بهاریه بیشترین شباهت را با ذخایر تیپ مانتو در شیلی دارد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیریت محترم شرکت آتیه کانسار جویان و به ویژه جناب آقای مهندس پورنیک که امکان دسترسی به معدن را فراهم کردند و همچنین از مدیریت مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران که نقش بسزایی در به ثمر رسیدن این پژوهش داشته‌اند سپاسگزاری می‌شود.

پهنه فلززایی تکتار در شرق ایران دارای کانسارها و اندیس‌های مس فراوانی بوده که اغلب با ژئومتری رگه‌ای و ماهیت چینه‌کران در میزبان سنگ‌های آتشفشانی آندزیت و بازالتهای تشریری تشکیل شده است. کانسار مس بهاریه در سنگ میزبان توف آندزیت تا توف ریولیت به سن ائوسن میانی تشکیل شده است. کانسارهای مرتبط با فعالیت آتشفشانی واقع در خشکی‌ها (کانسارهای غیرهمزاد با ارتباط آذرین) با ترکیب حدواسط تا اسیدی از نقطه نظر محیط تکتونوماگمایی، به مازات زون‌های فرورانش حاشیه قاره‌ها قرار دارند. شواهد صحرایی گویای آن است که تزریق رگه- رگچه‌های سیلیسی و کانی‌سازی مس همزمان در چند مرحله انجام شده و تزریق رگه‌ها به صورت برش گسلی، شکستگی‌های مرتبط با گسل‌ها و همچنین در درزه‌های کشتی رخ داده است. استفاده از نسبت‌های عنصری کمیاب (نظیر Th/Yb در مقابل Ta/Yb) حاکی از آن است که نمونه‌های سنگی منطقه بهاریه با ماهیت کالک‌آلکانل تا شوشونیتی در نتیجه عملکرد یک گوشته غنی شده در موقعیت قوس‌های فعال حاشیه قاره تشکیل شده‌اند. کانه‌های فلزی کالکوپیریت،

## کتابنگاری

- الماسی، ع.، کریم‌پور، م. ح.، نصرآبادی، خ.، رحیمی، ب.، کلوتزلی، ا. و سانتوز، ف.، ۱۳۹۴- زمین‌شناسی، کانی‌سازی، سن‌سنجی U-Pb و ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd توده‌های نفوذی شمال خاور کاشمر. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، ص. ۶۹ تا ۹۰.
- آبیه کانسار جویان، ۱۳۹۳- گزارش پیشرفت فیزیکی عملیات اکتشافی در محدوده مس بهاریه (کاشمر، استان خراسان رضوی)، ص. ۳۲۲.
- بهروزی، ا. و علوی نائینی، م.، ۱۳۶۶- برگه زمین‌شناسی فیض آباد در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- جباری، ا.، ملک‌زاده شفارودی، آ. و کریم‌پور، م. ح.، ۱۳۹۶- کانسار مس چینه‌کران (نوع ماتو) کال ابری در مجموعه آتشفشانی رسوبی اتوسن شمال باختری بردسکن، شمال خاوری ایران. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۳.
- خوبی، ن.، قربانی، م. و تاجبخش، پ.، ۱۳۷۸- کانسارهای مس در ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۴۲۱ ص.
- رضایی حمید، ر.، ۱۳۹۵- زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسار مس بهاریه، کمان فلززایی تکنار (شمال خاوری کاشمر). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، ۲۱۶ ص.
- سپاهی، ع. ا.، ۱۳۷۱- سنگ‌شناسی گرانیتوئیدهای منطقه تکنار-سربرج (شمال باختر کاشمر)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۲۰۲ ص.
- صالحی، ل.، رسا، ا.، علیرضایی، س. و کاظمی مهرنیا، ا.، ۱۳۹۴- کانسار مس معدن بزرگ با میزبان آتشفشانی، نمونه‌ای از کانسارهای مس نوع ماتو، خاور شاهرود. فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۴، ص. ۹۳ تا ۱۰۴.
- صفری، م.، ۱۳۸۸- گزارش پی‌جویی برگه ۱:۲۵۰۰۰ کیودان (منطقه بردسکن)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقه شمال خاور.
- طالع‌فاضل، ا.، ۱۳۹۵- خصوصیات لیتوژئوشیمیایی و تحولات ماگمایی مرتبط با کانی‌سازی در ذخایر سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد: مطالعه موردی نشانه‌های معدنی شمال کیودان (کمپلکس تکنار). هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه زنجان.
- علیزاده، و.، مومن زاده، م. و هاشم امامی، م.، ۱۳۹۱- سنگ‌نگاری، ژئوشیمی، کانی‌شناسی، مطالعه میانبارهای سیال و تعیین نوع کانه‌زایی کانسار مس ورزگ-قاین. فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۶، ص. ۴۷ تا ۵۶.
- منظمی باقرزاده، ر.، کریم‌پور، م. ح.، فارمر، ج. ل.، استرن، ج.، سانتوس، ژ. ف.، ریبرو، س.، رحیمی، ب. و حیدریان شهری، م.، ۱۳۹۵- ژئوکرونولوژی U-Pb زیرکن، سنگ‌نگاری، ژئوشیمی و رادویزوتوپ‌های متاریولیت‌های برنورد (مرکز زون تکنار- شمال باختر بردسکن). مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، ص. ۲۳۹ تا ۲۶۴.
- واعظی‌پور، م. ح. و علوی نائینی، م.، ۱۳۶۴- چهارگوش زمین‌شناسی تربت حیدریه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.

## References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in Northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103, 983- 992.
- Bazin, D. and Hubner, H., 1969- Copper deposits in Iran. Geological survey of Iran, Report No. 13. p.232.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N. S. F. and Zentilli, M., 2002- The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. In Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective, V. 2, PGC Publishing, Adelaide 163- 184.
- Boynton, W. V., 1984- Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (eds) Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63- 114.
- Brown, P. E., 1989- Flincor: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. American Mineralogist 74, 1390- 1393.
- Cabral, A. R. and Beaudoin, G., 2007- Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexander, Quebec Appalachina. Mineralium Deposita, 42, 901- 912.
- Condie, K. C., 1989- Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: identification and significance. Lithos, 23, 1- 18.
- Cooke, D. R. and Simmons, S. F., 2000- Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. Review of Economic Geology, 13, 221- 244.
- Hall, D. L., Sterner, S. M., Bodnar, R. J., 1988- Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O. Economic Geology, 83, 197- 202.
- Irvine, T. and Baragar, W., 1971- A guide to the Chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8, 523- 548.
- Karimpour, M. H. and Maleckzadeh, A., 2005- Taknar polymetal (Cu-Zn-Au-Ag-Pb) deposit: A new type magnetite-rich VMS deposit, northeast of Iran. Journal of sciences, Islamic Republic of Iran, 16, 239- 254.
- 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, 87- 98.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A. R. and Zanettin, B., 1989- Classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 193 p.
- Lefebure, D. V. and Church, B. N., 1996- Volcanic Redbed Cu, in Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 – Metallic Deposits, Lefebure, D. V. and Hōy, T, Editors, British Columbia Ministry of Employment and Investment, 13, 5- 7.

- Lindenberg, H. G. and Jacobshagen, V., 1983- Post-Paleozoic geology of the Taknar zone and adjacent area, NE Iran, Khorasan. Geological Survey of Iran (GSI). 51, 145- 163.
- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M., Movahednia, M. and Choulet, F., 2016- Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran. Ore Geology Reviews, 81, 10- 22.
- Maniar, P. D., and Piccoli, P. M., 1989- Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101, 635- 643.
- Muller, D. and Groves, D. I., 2016- Potassic Igneous Rocks and Associated Gold–Copper Mineralization. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, 1- 238.
- Muller, R. and Walter, R., 1983- Geology of the Precambrian-Paleozoic Taknar inlier north east of Kashmar, Khorasan Province, NE Iran. Geological Survey of Iran (GSI). 51, 165- 183.
- Nogole-Sadat, M. A. A. and Almasian, M., 1993- Tectonic map of Iran, Scale 1:1,000,000. Geological Survey of Iran.
- Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Ramírez, L., Fornari, M., Palacios, C. and Parada, M., 2008- Detailed  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. Miner Deposita, 43, 281- 293.
- Pearce, J. A., 2008- Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100, 14- 48.
- Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Fernandez- Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M. and Lehmann, B., 2006- The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. Mineral Deposita, 41, 246- 258.
- Roedder, E., 1984- Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, Mineralogical Society of America, 644 p.
- Rosúa, J., Boyce, A., Morales-Ruano, S., Morata, D., Roberts, S., Munizaga, F., 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, 13- 24.
- Ruiz, C., Aguilar, A., Egert, E., Espinoza, W., Peebles, F., Quezada, R. and Serrano, M., 1971- Stratabound copper sulphide deposits of Chile. Journal of the Mineralogical Society of Japan, Special Issue 3, 252- 260.
- Sato, T., 1984- Manto type copper deposits in Chile: A review. Bull. Geol. Surv. Jpn, 35, 565- 582.
- Seward, T. M., Williams-Jones, A. E. and Migdisov, A. A., 2014- The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids. Treatise on Geochemistry 2nd Edition, 1- 29.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X. H., Ling, X. X., Santos, J. F., Sternd, R. J., Li, Q. L. and Ghorbani, G., 2015- Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U–Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. Lithos, 216- 217, 118- 135.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. and Alderton, D. H., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies, Glasgow Blackie and Sons, Glasgow, 239p.
- Sillitoe, R. H., 1989- Gold deposits in western Pacific island arcs: The magmatic connection. Economic Geology Monograph, 6, 274- 291.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special, 42, 313- 345.
- Swain, G., Barovich, K., Hand, M., Ferris, G. and Schwarz, M., 2003- Petrogenesis of the St Peter Suite, southern Australia: Arc magmatism and Proterozoic crustal growth of the South Australian Craton, Precambrian. Research, 166, 283- 296.
- 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, 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, 158- 169.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1977- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation product using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325- 343.



# Mineralization and ore genesis of the Baharieh Cu deposit (NE Kashmar) based on mineralography, geochemistry and fluid inclusion evidences

R. Rezaie Hamid<sup>1</sup>, E. Tale Fazel<sup>2\*</sup> and Sh. Niroomand<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Faculty of Geology, College of Science, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2017 November 11

Accepted: 2018 April 15

## Abstract

The Baharieh copper deposit with 1 Mt Cu ore is located in 30 km of NE Kashmar city. The copper mineralization with 200m length and east-west trending which occurs in andesitic- to rhyolitic-tuff (middle Eocene). Volcanic to subvolcanic rocks are composed of andesite, dacite and rhyolite and according to geochemistry of immobile trace elements (e.g., La, Yb and Zr); the igneous rocks straddle within active continent margin arcs. The vein minerals consist of main sulfide minerals such as chalcopyrite and pyrite, which accompanied with bornite, covellite, and chalcocite. Silicic, calcitic, chloritic and argillic are the main alteration assemblage with mineralization. Two types of fluid inclusions including of liquid-rich (LV-type) and vapor-rich (VL-type) are distinguished in quartz-ore stage of the Baharieh deposit. Homogenization temperature and salinity are recorded varies from 187 to 356 °C and 0.99 to 18.7 wt% NaCl eq. Some characteristic as vein, breccia and vuggy textures, volcanic host rocks, low temperature alteration, simple ore minerals and high chalcopyrite content, temperature and salinity of fluids and the other evidences shows Baharieh copper deposit is similar to in Cu (Ag) manto-type (volcanic red bed) deposit at Chile.

**Keywords:** Geochemistry, Andesitic tuff, Baharieh Cu deposit, Kashmar.

For Persian Version see pages 43 to 58

\*Corresponding author: E. Tale Fazel; E-mail: tale.fazel@gmail.com