

کانسار چندفلزی ایپیک (جنوب اشتهارد): کانه‌زایی اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهر

عاطفه مددی^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، میرعلی اصغر مختاری^۳ و ناهید رحمتی^۴

۱ و ۴- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲ و ۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

نویسنده مسئول: kouhestani@znu.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۲

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲

چکیده

کانسار چندفلزی ایپیک در فاصله ۱۴ کیلومتری جنوب اشتهارد (استان البرز) واقع شده و بخشی از کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهر است. کانه‌زایی به صورت پهنه‌های سیلیسی- سولفیدی (N90E/60-70N) درون توالی توفی و گدازه‌های ائوسن زیرین- میانی رخ داده و دارای ارتباط فضایی با توده کوارتز مونزودیوریتی- پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی ائوسن میانی است. پهنه اصلی کانه‌دار حدود ۱ کیلومتر درازا و تا ۲ متر پهنای داشته و توسط هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط به ضخامت ۳ تا ۱۰ متر دربر گرفته شده است. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوپسیت، پسیلوملان، کوارتز، باریت، کلسیت و سربسیت- ایلیت، کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسنگ در کانسار ایپیک هستند. سروریت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کالکوسیت و گوتیت در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. انواع بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه- رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرمانند، تیغه‌ای، پُرکننده فضای خالی و جانشینی می‌باشد. شش مرحله کانه‌زایی در ایپیک قابل تفکیک است که کانه‌زایی مس، سرب و روی به صورت رگه‌ها و برش‌های کوارتز- پیریت- کالکوپیریت- گالن- اسفالریت در مرحله دوم رخ داده است. دگرسانی گرمایی شامل دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک می‌باشد. الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های کانه‌دار، توده کوارتز مونزودیوریتی و سنگ‌های میزبان (کریستال توف و گدازه آندزیت بازالتی)، مشابه است. این امر بیانگر نقش دگرسانی و شسته‌شدن عناصر از سنگ‌های میزبان آتشفشانی در تشکیل کانه‌زایی است. ویژگی‌های کانه‌زایی در کانسار چندفلزی ایپیک با کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی مس- سرب- روی، کانسار اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط، ایپیک، اشتهارد، مردآباد- بوئین‌زهر

۱- پیشگفتار

نزدیکی با توده‌های نفوذی ائوسن میانی (کازمپی و همکاران، ۲۰۲۲) نشان می‌دهند. کانسار چندفلزی ایپیک (با مختصات ۳۹۴۳۸۵۱ شمالی و ۴۳۹۵۰۶ خاوری در زون ۳۹S) یکی از کانه‌زایی‌های موجود در کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهر می‌باشد که در ۵۰ سال قبل به صورت زیرزمینی مورد استخراج قرار گرفته و در حال حاضر به صورت معدن متروکه و غیرفعال است. با این وجود، تاکنون پژوهش علمی دقیقی بر روی این کانسار انجام نشده است. در پژوهش حاضر، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، دگرسانی و زمین‌شیمی در کانسار ایپیک مورد بررسی قرار گرفته و نوع کانه‌زایی آن تعیین شده است. مطالعه دقیق این نوع کانه‌زایی‌ها می‌تواند عوامل کلیدی توزیع مکانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه را معرفی کرده و به عنوان الگوی اکتشافی در کمر بند آتشفشانی

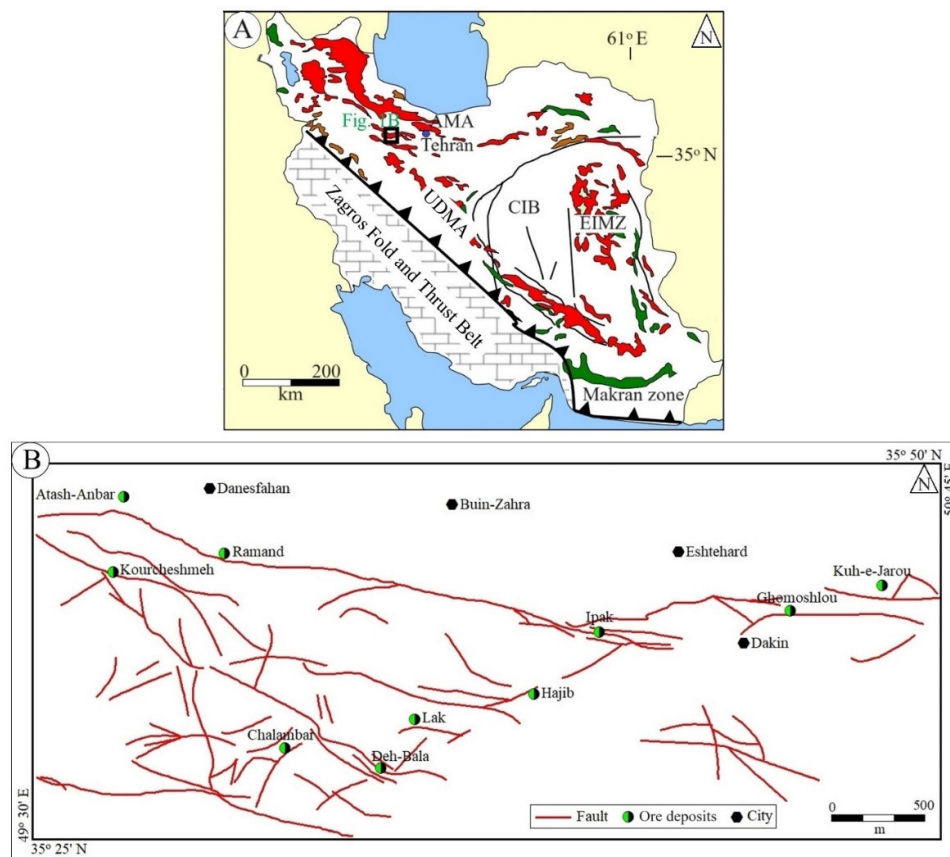
کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهر به عنوان بخشی از کمان ماگمایی ارومیه- دختر (شکل ۱- A)، میزبان مهمی برای کانه‌زایی‌های فلزی (مس، سرب، روی و طلا) است. از کانسارها و نشانه‌های معدنی مهم موجود در این کمر بند آتشفشانی می‌توان به کانسارهای لک، ده‌بالا، ایپیک، کوه جارو، رودک، گوموشلو، گوموش‌داش، قزل‌چشمه، بیدستان، افشارآباد، بوجعفر، گیلان‌دره، آتش‌انبار، رامند و کورچشمه (حبیبی، ۱۳۸۶؛ گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱؛ ابراهیمی، ۱۳۹۴؛ طالع‌فاضل و همکاران، ۱۴۰۱a, b؛ ۲۰۲۳؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۱۷؛ خان‌احمدلو، ۱۴۰۲؛ خان‌احمدلو و همکاران، ۱۴۰۱a, b، ۱۴۰۱) اشاره کرد (شکل ۱- B). این کانه‌زایی‌ها اغلب در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیرین- میانی رخ داده و ارتباط مکانی و زمانی

کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران تجزیه شدند. برای بررسی ضرایب همبستگی عناصر در بخش‌های کانه‌دار، علاوه بر ۹ نمونه اشاره شده، از نتایج آنالیزهای ۹۲ نمونه برداشت‌شده از پهنه‌های کانه‌دار توسط شرکت ایمکو (۱۳۸۵) که به روش ICP-OES در آزمایشگاه شرکت کان‌پژوه در تهران آنالیز شده‌اند، نیز استفاده شده است. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین ۰/۱ تا ۱ گرم در تن بوده است. برای تعیین میزان فلزات پایه، به‌صورت جداگانه حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه در تیزاب سلطانی داغ (۹۵ درجه سانتی‌گراد) حل گردید. برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Igppt2007 و برای ترسیم نقشه‌ها و مدل‌ها از نرم‌افزارهای AutoCad2007 و ArcGIS10.6 استفاده شده است.

مردآباد- بوئین‌زهرا و دیگر بخش‌های کمان ماگمایی ارومیه- دختر مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش شامل دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی می‌باشد. در مطالعات صحرایی، به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه و چگونگی ارتباط پهنه‌های کانه‌دار با سنگ‌های میزبان، تعداد ۷۰ نمونه برای مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. از این بین، تعداد ۸ عدد مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک- صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و ساخت و بافت، تهیه و مطالعه شد. در مرحله بعد، براساس مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، تعداد ۹ نمونه از بخش‌های کانه‌دار و ۳ نمونه از سنگ‌های میزبان انتخاب و برای تعیین مقدار عناصر



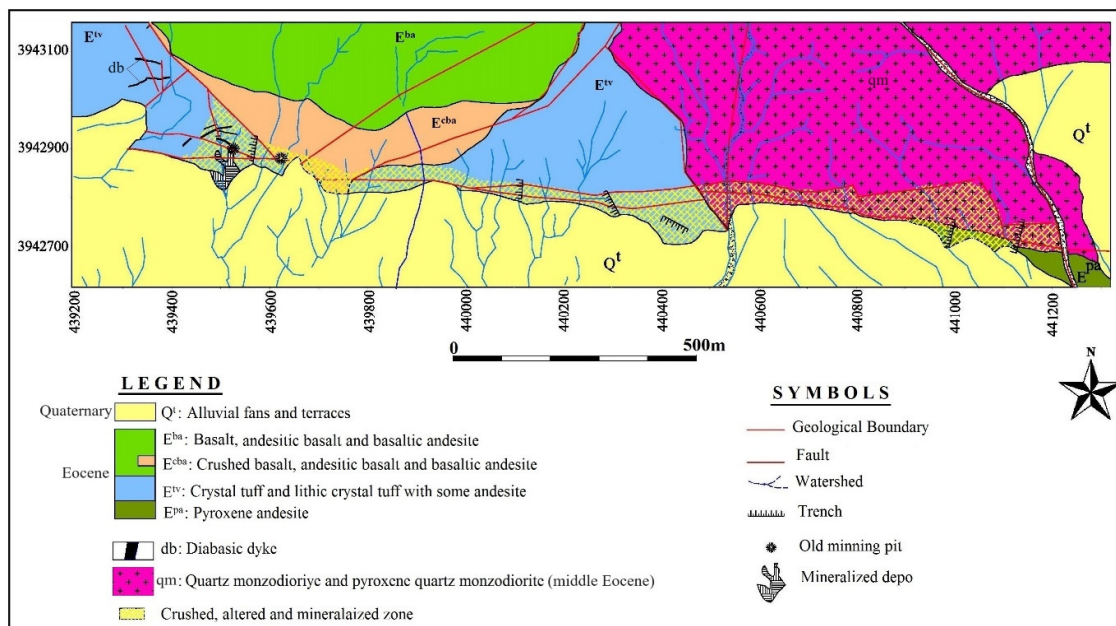
شکل ۱. A: زون‌های ساختاری ایران و موقعیت کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهرا بر روی کمان ماگمایی ارومیه- دختر (با تغییرات از علوی، ۱۹۹۱). B: موقعیت کانسار ایبک و دیگر کانسارهای فلزی در کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهرا (با تغییرات از نوگل‌سادات و هوشمندزاده، ۱۹۸۴). (AMA: کمان ماگمایی البرز، EIMZ: زون ماگمایی شرق ایران، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه- دختر)

Fig. 1. A: Structural zones of Iran, showing the location of the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt within the Urumieh-Dokhtar magmatic arc (after Alavi, 1991). B: Location of the Ipak deposit and other ore deposits within the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt (modified after Nogole-Sadat and Houshmandzadeh, 1984). (AMA: Alborz Magmatic Arc, EIMZ: East Iranian Magmatic Zone, UDMA: Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc)

۳- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی کانسار ایپک

با توجه به مطالعات صحرایی انجام شده در قالب تهیه نقشه ۱:۱۰,۰۰۰ (شکل ۲)، واحدهای سنگی موجود در منطقه ایپک مربوط به تناوب واحدهای توفی و گدازه‌های ائوسن زیرین - میانی بوده و شامل گدازه‌های پیروکسن آندزیت (واحد E^{pa})، بازالت، بازالت آندزیتی و آندزیت بازالتی (واحد

E^{ba})، تراکی آندزیت - ریوداسیت، توف و ایگنیمبریت (واحد E^{iv}) است که توسط توده نفوذی با ترکیب کوارتز مونوزودیوریت - پیروکسن کوارتز مونوزودیوریت (qm) و دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند. زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی این واحدها از قدیم به جدید به شرح زیر است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱,۰۰۰ کانسار ایپک (با تغییرات از آقازاده و براتی، ۱۳۸۵).

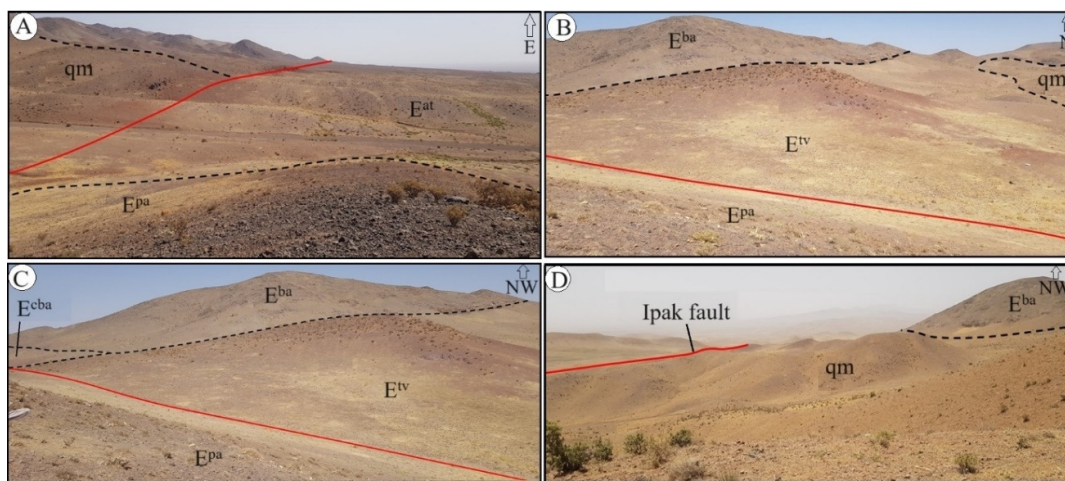
Fig. 2. Geologic map, scale: 1:1,000 of the Ipak deposit (modified after Aghazadeh and Barati, 2006)

این واحد سنگی میزبان بخشی از پهنه کانه‌زایی منطقه است. به سمت شمال، این سنگ‌ها توسط واحد گدازه‌ای E^{ba} به صورت هم‌شیب پوشیده می‌شوند (شکل ۳-B و C). براساس مطالعات سنگ‌شناسی، نمونه‌های توفی برداشت شده از واحد E^{iv} دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، آمفیبول‌های جانشین شده و کانی‌های کدر می‌باشند (شکل ۴-A و B). قطعات سنگی با فراوانی کم، دیگر متشکله این سنگ‌ها هستند. کانی‌های یادشده به همراه قطعات سنگی در سیمانی از کلسیت پراکنده هستند. بلورهای کلسیت موجود در زمینه دارای ماکل نواری مشخصی هستند. پلاژیوکلازها به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار و عمدتاً به حالت شکسته شده با گوشه‌های تیز دیده می‌شوند. قطعات سنگی (با ابعاد تا ۲ میلی‌متر) زاویه‌دار تا نیمه‌گردشده بوده و دارای بافت پورفیری تا پورفیری میکرولیتی هستند. تعدادی کانی جانشین شده توسط کلسیت و هیدروکسیدهای آهن نیز در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود

واحد E^{pa} شامل گدازه‌های پیروکسن آندزیتی است که به صورت یک رخنمون کوچک در گوشه جنوب‌خاوری منطقه و در مجاورت با توده کوارتز مونوزودیوریتی - پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی رخنمون دارد (شکل ۲). این سنگ‌ها دارای رنگ تیره بوده و در امتداد زون گسله بین این واحد و توده نفوذی، میزبان بخش کوچکی از پهنه دگرسانی و کانه‌زایی منطقه هستند. به سمت خاور و جنوب‌خاور، واحد E^{pa} توسط توالی توفی و توف ماسه‌ای اسیدی (واحد E^{ai}) که در بیرون از محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰,۰۰۰ رخنمون دارند، پوشیده می‌شود (شکل ۳-A). به سمت شمال، این واحد به صورت هم‌شیب توسط واحد توفی - گدازه‌ای E^{iv} پوشیده شده است (شکل ۳-B و C). واحد E^{iv} از کریستال توف و لیتیک کریستال توف حدواسط - اسیدی همراه با مقداری گدازه‌های آندزیتی تشکیل شده است که به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع در بخش شمالی پهنه کانه‌زایی رخنمون دارند (شکل ۲).

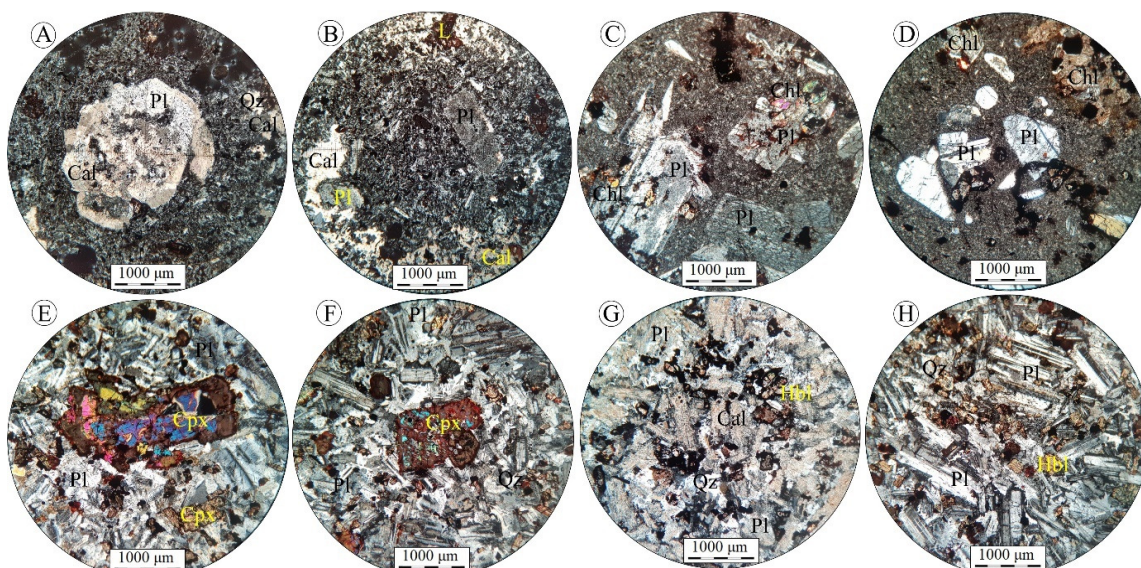
دیده می‌شوند. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز، منطقه‌بندی داشته و برخی دارای ادخال پیروکسن می‌باشند. این بلورها بعضاً به کانی‌های رسی و تا حدودی سرسپیت دگرسان شده‌اند. برخی بلورهای پلاژیوکلاز بافت غربالی نشان می‌دهند. کلینوپیروکسن‌ها (ابعاد عمدتاً کمتر از ۱ میلی‌متر) با شدت‌های مختلفی به کلریت دگرسان شده‌اند. در برخی از بلورهای کلینوپیروکسن، دگرسانی به کلسیت و کلریت همراه با تشکیل کانی‌های کدر نیز مشاهده می‌شود. یکسری بلورهای منشوری در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود که توسط کلسیت و حاشیه متشکل از کانی‌های کدر جانشین شده‌اند. این بلورها احتمالاً آمفیبول بوده‌اند. به‌صورت بسیار محدود، بلورهای کوارتز گردشده با حاشیه واکنشی در این سنگ‌ها دیده می‌شود که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان بیگانه‌بلور در نظر گرفت. کانی‌های کدر، هم به‌صورت اولیه و هم در نتیجه دگرسانی کانی‌های مافیک تشکیل شده‌اند.

که به نظر می‌رسد کانی اولیه از نوع آمفیبول بوده است. واحد E^{ba} شامل گدازه‌های بازالتی، بازالت آندزیتی و آندزیت بازالتی است که در بخش‌های شمالی منطقه رخنمون دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها به‌صورت هم‌شیب بر روی واحد توفی - گدازه‌ای E^{IV} قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۱). در بخش‌های جنوبی و در مجاورت با واحد توفی - گدازه‌ای E^{IV} ، در امتداد گسل اصلی منطقه، این سنگ‌ها خرد و دگرسان شده و میزبان بخشی از کانه‌زایی منطقه هستند. این بخش‌های خردشده، بر روی نقشه زمین‌شناسی با عنوان واحد E^{cba} تفکیک شده است (شکل ۲ و ۳-C). براساس مطالعات سنگ‌شناسی، بازالت‌ها و بازالت‌های آندزیتی دارای بافت‌های پورفیری و گلومروفیری هستند (شکل ۴-C و D). درشت‌بلورهای این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و آمفیبول‌های جانشین‌شده توسط کلسیت و کانی‌های کدر در یک زمینه دانریز می‌باشند. پلاژیوکلازها (ابعاد تا ۳ میلی‌متر) به‌صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار با ماکل نواری



شکل ۳. تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی در کانسار ایپک. A: نمایی از گدازه‌های پیروکسن آندزیتی واحد E^{pa} بر روی توفی و توف ماسه‌ای اسیدی واحد E^{al} . توده نفوذی کوارتز مونزودیوریتی - پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) در سمت چپ تصویر قابل مشاهده است. B: نمایی از گدازه‌های پیروکسن آندزیتی واحد E^{pa} ، سنگ‌های توفی - گدازه‌ای واحد E^{IV} و گدازه‌های آندزیتی واحد E^{ba} . توده کوارتز مونزودیوریتی - پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) که به داخل واحد E^{IV} نفوذ کرده است نیز در تصویر دیده می‌شود. C: نمایی از گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی واحد E^{ba} بر روی واحد E^{IV} در سمت چپ تصویر، بخش خردشده گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی واحد E^{cba} قابل مشاهده است. D: نمایی از توده کوارتز مونزودیوریتی - پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) که به داخل گدازه‌های بازالتی و بازالت آندزیتی واحد E^{ba} نفوذ کرده است. گسل ایپک در سمت چپ تصویر قابل مشاهده است.

Fig. 3. Field photographs of the rock units in the Ipak deposit. A: A view of pyroxene andesite lavas of the E^{pa} unit on the tuff and acidic sandy tuff sequence of the E^{al} unit, looking to the east. The quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite intrusion (qm) is observed on the left side of the photo. B: A view of pyroxene andesite lavas of the E^{pa} unit, tuff-lava rocks of the E^{IV} unit, and andesitic lavas of the E^{ba} unit, looking to the north. The quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite body (qm) that intruded into the E^{IV} unit is also observed. C: A view of basalt and basaltic andesite lavas of the E^{ba} units on the E^{IV} unit, looking northwest. The crushed part of basalt and andesitic basalt lavas of the E^{cba} unit is observed on the left side of the photo. D: A view of quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite body (qm) that intruded into the basalt and basaltic andesite lavas of the E^{ba} units, looking northwest. Ipak fault is observed on the left side of the photo.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌شناسی و بافت واحدهای سنگی در کانسار ایک. A: دگرسانی درشت‌بلور پلاژیوکلاز به کلسیت همراه با کوارتز در کریستال توف تا لیتیک کریستال توف‌های حدواسط-اسیدی. B: پلاژیوکلاز و کانی‌های جانشین‌شده توسط کلسیت در کریستال توف تا لیتیک کریستال توف‌های حدواسط-اسیدی. C: بافت پورفیری با بلورهای درشت پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز در گدازه‌های بازالتی-بازالت آندزیتی. D: بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن کلریتی‌شده و هورنبلندهای کلسیتی‌شده در گدازه‌های بازالتی-بازالت آندزیتی. E: بافت‌های هتروگرانولار و افیتیک با بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیکروکسن در توده پیروکسن کوارتز مونزودیوریت. F: ادخال پلاژیوکلاز در کلینوپیکروکسن و تشکیل بافت افیتیک در توده پیروکسن کوارتز مونزودیوریت. G و H: بافت‌های میکروگرانولار تا پورفیروئیدی با بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلندهای با حاشیه اوپاسیته در توده کوارتز مونزودیوریت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Cpx: کلریت، کلینوپیکروکسن، Hbl: هورنبلند، L: قطعه سنگی، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز)

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted crossed polarized light, XPL) of minerals and textures of the rock units in the Ipak deposit. A: Coarse-grained plagioclase altered to calcite along with quartz in intermediate-acidic crystal tuff to lithic crystal tuffs. B: Plagioclase and minerals replaced by calcite in intermediate-acidic crystal tuff to lithic crystal tuffs. C: Porphyry texture with coarse-grained plagioclase within fine-grained matrix in basalt-andesitic basalt lavas. D: Plagioclase, chloritized pyroxene, and calcitic hornblende in basalt-andesitic basalt lavas. E: Heterogranular and ophitic textures with plagioclase and clinopyroxene minerals in pyroxene quartz monzodiorite body. F: Plagioclase inclusion within clinopyroxene forming ophitic texture in pyroxene quartz monzodiorite body. G and H: Microgranular to porphyroid textures with plagioclase minerals and hornblende with opacitic rims in quartz monzodiorite body. Mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Chl: chlorite, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende, L: rock fragment, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Qz: quartz)

هورنبلند، کوارتز، آلکالی فلدسپار و کانی‌های کدر بوده و کانی‌های ثانویه شامل کلریت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر هستند. کانی اصلی این سنگ‌ها پلاژیوکلاز است. پلاژیوکلازها به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و دارای ماکل نواری بوده و برخی از آن‌ها دارای منطقه‌بندی می‌باشند. فراوانی این بلورها حدود ۶۰ درصد بوده و دارای ابعاد متغیر هستند به نحوی که طول آن‌ها به ۲/۵ میلی‌متر هم می‌رسد ولی عمدتاً ابعاد آن‌ها حدود ۱ میلی‌متر است. کلینوپیکروکسن‌ها به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار دیده شده و عمدتاً به کلریت و کانی‌های کدر ثانویه دگرسان شده‌اند. بعضاً، بقایای کلینوپیکروکسن به صورت جزیره‌ای در داخل کلریت‌ها قابل شناسایی است. فراوانی کلینوپیکروکسن‌ها حدود ۲۰ درصد بوده و ابعاد آن‌ها نیز کمتر از ۱ میلی‌متر (عمدتاً حدود ۰/۵ میلی‌متر)

توده نفوذی (qm) در بخش‌های خاوری و شمال‌خاوری منطقه ایک رخمون داشته و توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن را قطع کرده است (شکل‌های ۲ و ۳-A، B و D). بخش‌های حاشیه‌ای این توده دارای بافت دانه‌ریزتر و رنگ تیره‌تر نسبت به بخش‌های داخلی آن می‌باشد. به دلیل عملکرد گسل، بخش‌های جنوبی این توده متحمل خردشدگی و دگرسانی شده است. با توجه به مطالعات کاظمی و همکاران (۲۰۲۲)، سن این توده احتمالاً ائوسن میانی باشد. با توجه به مطالعات سنگ‌شناسی، توده نفوذی دارای ترکیب پیروکسن کوارتز مونزودیوریت در بخش حاشیه‌ای و کوارتز مونزودیوریت در بخش‌های مرکزی می‌باشد. پیروکسن کوارتز مونزودیوریت‌ها دارای بافت هتروگرانولار و افیتیک می‌باشند (شکل ۴-E و F). کانی‌های اولیه آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیکروکسن،

تیره با ستبرای حداکثر ۱۰ متر بوده و با راستای غالب شمال‌خاور - جنوب‌باختر دیده می‌شوند.

۳-۱- کانه‌زایی و دگرسانی

براساس مطالعات صحرایی، کانه‌زایی مس، سرب و روی در کانسار ایپیک به‌صورت پهنه‌های سیلیسی - سولفیدی درون توالی توفی و گدازه‌ای ائوسن زیرین - میانی رخ داده است (شکل ۵-A و B). پهنه کانه‌دار دارای روند تقریبی خاوری - باختری با شیب حدود ۷۰-۶۰ درجه به سمت شمال بوده و حدود ۱ کیلومتر درازا و تا ۲ متر پهنای دارد. آثار اکتشافی و استخراجی قدیمی به‌صورت حفر ترانشه‌های اکتشافی و تونل‌های استخراجی در چندین بخش از پهنه کانه‌زایی دیده می‌شود (شکل ۵-C) که در برخی نقاط، حجم کوچکی از ماده معدنی استخراجی در حاشیه آن‌ها انباشته شده است. دگرسانی آرژیلیک حدواسط به ضخامت ۳ تا ۱۰ متر در اطراف پهنه کانه‌دار و به‌ویژه در کمر بالای آن قابل مشاهده است (شکل ۵-B تا E). ساخت و بافت ماده معدنی در مقیاس رخنمون بیشتر از نوع برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، دانه‌پراکنده و پرکننده فضاهای خالی است (شکل ۵-F). عیار نمونه‌های برداشت‌شده از پهنه کانه‌دار تا بیش از ۱۰ درصد سرب، بیش از ۱۰ درصد روی، ۴/۷ درصد مس و تا بیش از ۲۰۰ گرم در تن نقره را مشخص کرده است (شرکت آیمکو، ۱۳۸۵).

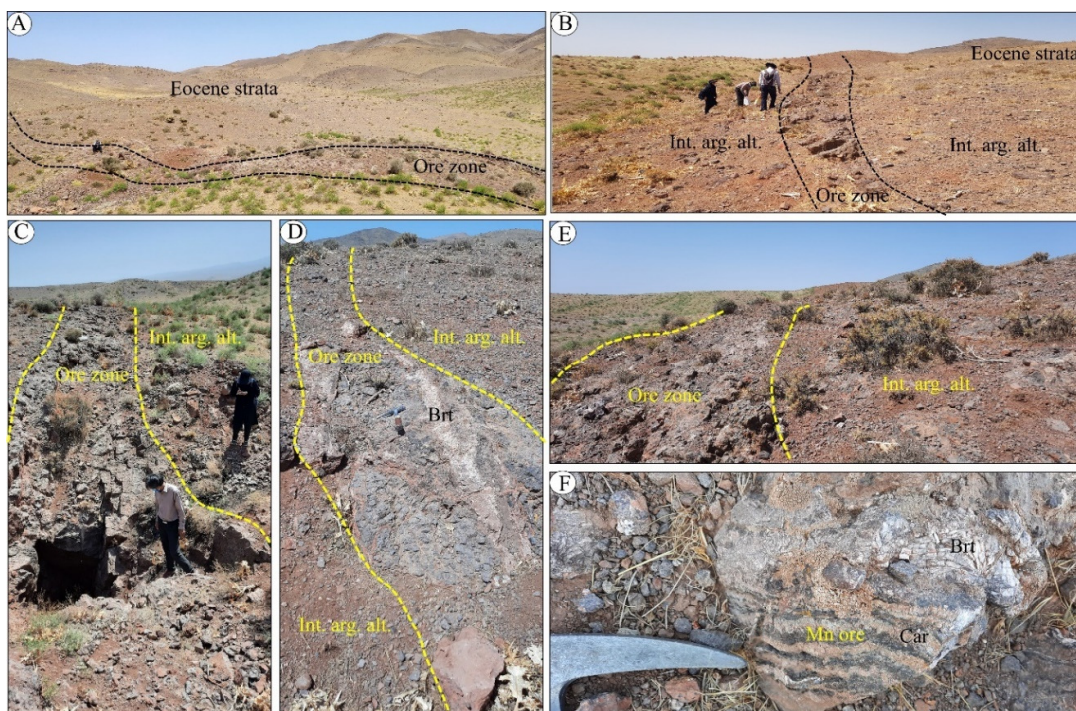
دگرسانی گرمایی در کانسار ایپیک شامل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، کربناتی، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک است. دگرسانی سیلیسی به‌صورت رگه - رگچه‌ای و سیمان برش‌های گرمایی دیده شده و منطبق بر پهنه‌های کانه‌دار است (شکل ۶-A و B) ستبرای رگچه‌های کوارتزی در این دگرسانی تا ۵ میلی‌متر می‌رسد. در مقاطع میکروسکوپی، کوارتز به‌صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل قابل مشاهده است. دگرسانی کربناتی به دو نوع قابل تفکیک است. دگرسانی کربناتی نوع اول شامل کلسیت‌های با بافت تیغه‌ای است که همراه با کوارتز در سیمان برش‌های گرمایی دیده می‌شوند (شکل ۶-C). این نوع از دگرسانی کربناتی ارتباط نزدیکی با پهنه‌های سیلیسی کانه‌دار دارد. نوع دوم دگرسانی کربناتی شامل کلسیت با بافت‌های رگه - رگچه‌ای و بعضاً پرکننده فضاهای خالی است (شکل ۶-D). رگه - رگچه‌های کلسیتی این نوع از دگرسانی کربناتی معمولاً رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار را

می‌باشد. در برخی از بلورهای کلینوپیروکسن، ادخال پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود که منجر به تشکیل بافت افیتیک شده است. هورنبلند کاملاً توسط کلریت و کانی‌های رسی جانشین شده است. فراوانی هورنبلندها حدود ۱۰ درصد بوده و ابعاد آن‌ها عموماً ۰/۵ میلی‌متر و کمتر است. بلورهای بی‌شکل کوارتز با فراوانی حدود ۵ درصد در ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در فضای بین دیگر کانی‌ها دیده می‌شود. آلکالی فلدسپار به‌صورت بلورهای بی‌شکل با فراوانی حدود ۵ درصد و ابعاد حدود ۰/۵ میلی‌متر در فضای بین کانی‌ها وجود دارد. کانی‌های کدر هم به‌صورت اولیه و هم به‌صورت ثانویه و با فراوانی حدود ۳ درصد در متن سنگ پراکنده هستند.

کوارتز مونوزودیوریت‌ها دارای بافت‌های میکروگرانولار تا پورفیروئیدی هستند (شکل ۴-G و H). کانی‌های اولیه این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز، آلکالی فلدسپار و کلینوپیروکسن بوده و کانی‌های ثانویه عبارت از سریسیت، کلسیت، کلریت، کانی‌های کدر و کوارتز است. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و کانی‌های کدر اولیه می‌باشند. کانی مهم و غالب این سنگ‌ها پلاژیوکلاز با فراوانی حدود ۵۰ درصد است. ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز تا ۲ میلی‌متر رسیده و برخی از آن‌ها دارای منطقه‌بندی هستند. پلاژیوکلازها اغلب به کلسیت و سریسیت دگرسان شده‌اند. هورنبلندها فراوانی حدود ۲۵ درصد داشته و ابعاد آن‌ها تا ۱ میلی‌متر هم می‌رسد. هورنبلندها تماماً به‌وسیله کلسیت و کانی‌های کدر جانشین شده‌اند. کوارتز به‌صورت بلورهای بی‌شکل در ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر (عمدتاً کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) با فراوانی بیشتر از ۱۰ درصد حضور دارد. در برخی نقاط، بافت شبه‌گرافیکی در نتیجه هم‌رشدی کوارتز و آلکالی فلدسپار تشکیل شده است. کلینوپیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای شکل‌دار با فراوانی محدود و کمتر از ۲ درصد در این سنگ‌ها حضور دارند که ابعاد آن‌ها عمدتاً کمتر از ۱ میلی‌متر است. کلینوپیروکسن‌ها با درجات شدیدی به کلریت و کلسیت دگرسان شده‌اند. کانی‌های کدر شامل کانی‌های کدر شکل‌دار اولیه و کانی‌های کدر ثانویه بی‌شکل حاصل از دگرسانی کلینوپیروکسن‌ها و آمفیبول‌ها در این سنگ‌ها حضور دارند. دایک‌های دیابازی (db) عمدتاً در بخش باختری منطقه ایپیک دیده شده و واحد توفی - گدازه‌ای E^{IV} را قطع کرده‌اند (شکل ۲). این دایک‌ها دارای رنگ عمومی

با مقادیر اندکی کوارتز و کلسیت تشخیص داد (شکل ۶-۶). دگرسانی پروپیلیتیک با گسترش زیاد اغلب در خارج از پهنه کانه‌دار رخ داده است. در رخنمون‌های صحرایی این دگرسانی عموماً به رنگ سبز دیده می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک دارای شدت‌های کم تا متوسط است به‌نحویکه بافت کانی‌ها معمولاً در آن حفظ می‌شود. این دگرسانی بیشتر با جانشینی پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن توسط مجموعه کلریت، اپیدوت، سریسیت و کربنات مشخص می‌شود (شکل ۶-۶). طی دگرسانی پروپیلیتیک، کوارتز به میزان کم در زمینه سنگ تشکیل می‌شود.

قطع می‌کنند که نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در مراحل پایانی دگرسانی گرمایی است. دگرسانی آرژیلیک حدواسط با ضخامت ۳ تا ۱۰ متر، در اطراف و کمر بالای پهنه سیلیسی-سولفیدی کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۵-۵ تا E). این دگرسانی عموماً توسط شکستگی‌ها کنترل شده و در مقیاس رخنمون سبب تغییر رنگ سنگ‌ها به سفید تا زرد و قرمز آجری شده است. در مقاطع میکروسکوپی، دگرسانی آرژیلیک حدواسط را می‌توان به‌صورت جانشینی پلاژیوکلاز توسط مجموعه ایلیت و سریسیت (شناسایی توسط آنالیز پراش پرتو ایکس) همراه



شکل ۵. تصاویر صحرایی از پهنه کانه‌دار در کانسار ایپک. A و B: نماهایی از پهنه کانه‌دار که توالی سنگی ائوسن را قطع کرده است (دید به ترتیب به سمت شمال و باختر). در تصویر B، هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط (Int. arg. alt.) اطراف پهنه کانه‌دار را پوشانده است. C: نمایی از تونل استخراجی قدیمی حفر شده بر روی پهنه کانه‌دار (دید به سمت باختر). هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط در کمر بالای پهنه کانه‌دار قابل مشاهده است. D و E: نماهایی از هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط در اطراف و کمر بالای پهنه کانه‌دار (دید هر دو تصویر به سمت خاور). F: نمایی نزدیک از بافت‌های برشی، پوسته‌ای و گل‌کلمی ماده معدنی در مقیاس رخنمون. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Brt: باریت، Car: کربنات)

Fig. 5. Field photos of the ore zone in the Ipak deposit. A and B: Views of the ore zone cut the Eocene rock strata, looking to the north and west, respectively. In B, intermediate argillic alteration (Int. Arg. Alt.) halo covered the ore zone. C: A view of the old mining tunnel excavated on the ore zone, looking to the west. The intermediate argillic alteration halo is observed in the hanging wall of the ore zone. D and E: Views of intermediate argillic alteration halo around and in the hanging wall of the ore zone, both looking to the east. F: A close view of breccia, crustiform, and colloform textures of ore in outcrop scale. Mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010). (Brt: barite, Car: carbonate)

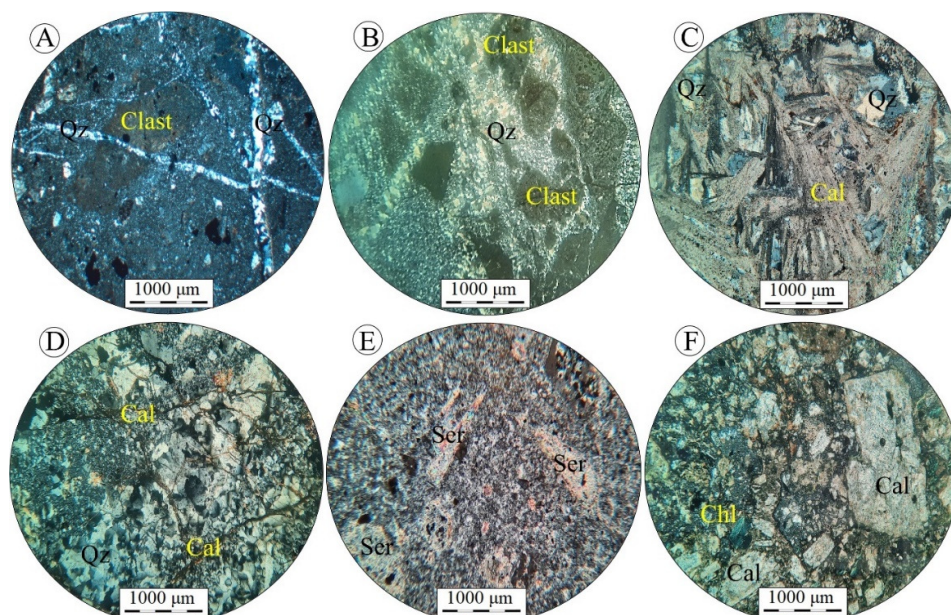
اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کالکوسیت ثانویه و گوتیت در اثر فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. انواع بافت کانسنگ شامل دانه‌پراکنده، رگه-رگچه‌ای، برشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرماند، تیغه‌ای، جزیره‌ای، پُرکننده

۲-۲-۳- کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت، پسولومان، کوارتز، باریت، کلسیت و سریسیت-ایلیت، کانی‌شناسی کانسنگ در کانسار ایپک هستند. سروزیت،

سانتی‌متر) در بخش‌های کانه‌دار حضور دارد. در بیشتر نمونه‌ها، گالن‌ها از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به سروزیت دگرسان شده است (شکل D-۷ تا F). در برخی از بخش‌ها، ادخال‌های ریزی از کالکوپیریت داخل گالن دیده می‌شود (شکل D-۷). گالن معمولاً با اسفالریت هم‌رشدی نشان می‌دهد (شکل E-۷ و F). اسفالریت بیشتر به صورت بلورهای ریز تا متوسط بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار به رنگ عسلی (فقیر از آهن) در بخش‌های کانه‌دار دیده می‌شود. اسفالریت معمولاً با گالن هم‌رشدی دارد (شکل E-۷ و F). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی از گالن درون اسفالریت دیده می‌شود (شکل F-۷). اسفالریت معمولاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است (شکل G-۷).

فضای خالی و جاننشینی است. پیریت به صورت بلورهای بی‌شکل ریز تا درشت (اندازه بین ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر) با بافت دانه‌پراکنده در بخش‌های کانه‌دار حضور دارد. این کانی معمولاً از حاشیه‌ها و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت دگرسان شده است (شکل A-۷). در برخی از نمونه‌ها، ادخال‌هایی ریز از پیریت درون کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل B-۷). کالکوپیریت معمولاً به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با اندازه متوسط تا درشت (بعضاً تا اندازه ۲ سانتی‌متر) با بافت دانه‌پراکنده در بخش‌های کانه‌دار دیده می‌شود. در بیشتر بخش‌های کانه‌دار، کالکوپیریت توسط گوتیت و گاه کالکوسیت ثانویه جانشین شده است (شکل C-۷). گالن بیشتر به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل درشت (تا اندازه ۲



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی‌ها در کانسار ایپک. A و B: کوارتز با بافت رگه-رگچه‌ای (A) و سیمان برش‌های گرمابی (B) در دگرسانی سیلیسی. C: کلسیت‌های تیغه‌ای در دگرسانی کربناتی نوع اول در سیمان برش‌های گرمابی. D: رگچه‌های کلسیتی تأخیری در دگرسانی کربناتی نوع دوم. E: دگرسانی پلاژیوکلاز به سریسیت-ایلیت در دگرسانی آرزیلیک حدواسط. F: دگرسانی پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیکی به کلسیت و کلریت در دگرسانی پروپیلیتیک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت

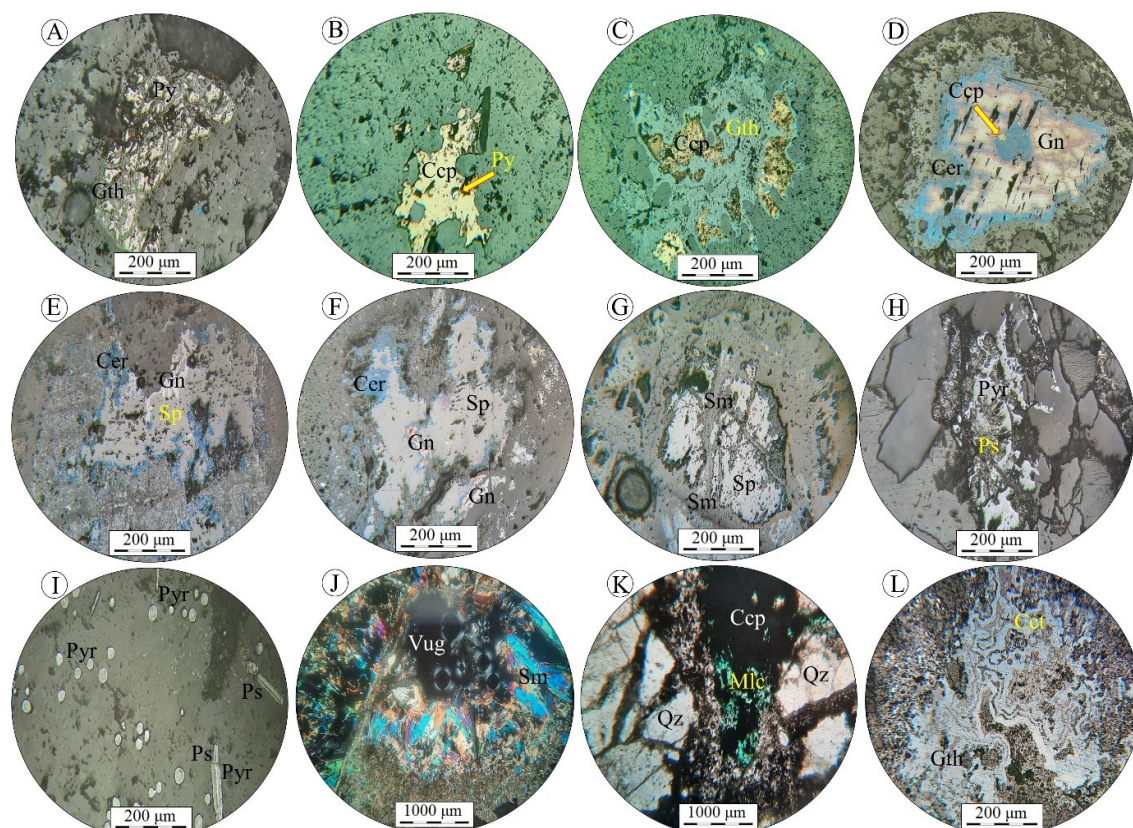
Fig. 6. Photomicrographs (transmitted crossed polarized light, XPL) of hydrothermal alteration types in the Ipak deposit. A and B: quartz with vein-veinlet (A) and hydrothermal breccia cement (B) in silica alteration. C: Bladed calcite within hydrothermal breccia cement in type-1 carbonate alteration. D: Late calcite veinlets in type-2 carbonate alteration. E: Alteration of plagioclase to sericite-illite in intermediate argillic alteration. F: Alteration of plagioclase and mafic minerals to calcite and chlorite in propylitic alteration. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Cal: calcite, Chl: chlorite, Qz: quartz, Ser: sericite)

معمولاً با یکدیگر هم‌رشدی دارند. (شکل H-۷ و I). در برخی از نمونه‌ها، پیرولوسیت و پسیلوملان بافت تیغه‌ای ناشی از جاننشینی این کانی‌ها به جای کلسیت‌های تیغه‌ای را نشان می‌دهند (شکل I-۷). سروزیت، اسمیت‌زونیت،

پیرولوسیت و پسیلوملان با فراوانی محدود در رگه و رگچه‌های کوارتز-کلسیتی منگن‌دار حضور دارند. این کانی‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با بافت‌های پرکننده فضای خالی و گل‌کلمی دیده شده و

بخش اصلی اسفالریت طی فرایندهای برون‌زاد به اسمیت‌زونیت دگرسان شده است. مالاکیت معمولاً بافت پرکننده فضای خالی نشان می‌دهد (شکل ۷-ک). کالکوسیت ثانویه اغلب جانشین کالکوپیریت شده است (شکل ۷-ل). گوتیت محصول دگرسانی پیریت و کالکوپیریت است (شکل ۷-ا و ج). در برخی از نمونه‌ها، گوتیت در همراهی با کالکوسیت ثانویه، جانشین کالکوپیریت شده است (شکل ۷-ل).

مالاکیت، کالکوسیت ثانویه و گوتیت کانی‌های برون‌زاد در کانسار اپیک هستند که در بخش‌های کم‌عمق پهنه‌های کانهدار دیده می‌شوند. سروزیت و اسمیت‌زونیت به ترتیب جانشین گالن و اسفالریت شده‌اند (شکل ۷-د تا ج). اسمیت‌زونیت معمولاً به صورت بلورهای رشته‌ای و شعاعی در مسیر شکستگی‌ها و حفرات در بخش‌های سطحی پهنه‌های کانهدار دیده می‌شود (شکل ۷-ج). با توجه به فراوانی محدود اسفالریت در نمونه‌های سطحی، احتمالاً

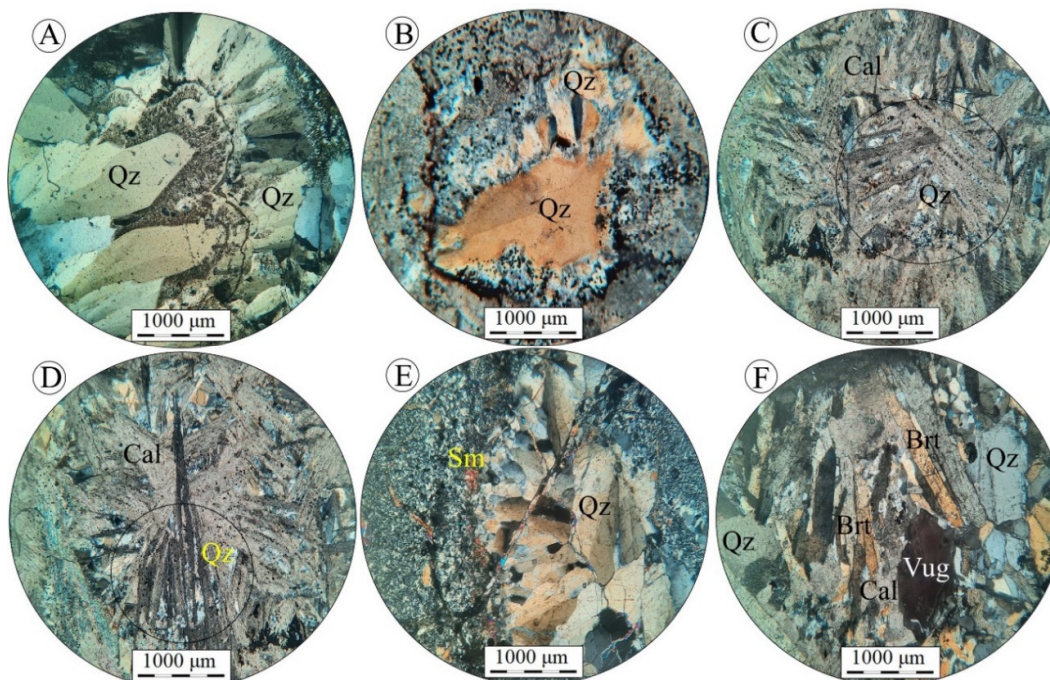


شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی (تصاویر J و K به ترتیب در نور عبوری پلاریزه متقاطع XPL و صفحه‌ای PPL و بقیه تصاویر در نور بازتابی) از کانی‌شناسی و بافت مواد معدنی در کانسار اپیک. A: دگرسانی پیریت به گوتیت در امتداد شکستگی‌ها. B: ادخال پیریت درون کالکوپیریت. C: دگرسانی کالکوپیریت به گوتیت در امتداد شکستگی‌ها. D: بلور بی‌شکل گالن با حاشیه دگرسان‌شده به سروزیت و دارای ادخال ریز کالکوپیریت. E و F: هم‌رشدی گالن و اسفالریت. دگرسانی گالن به سروزیت و ادخال گالن داخل اسفالریت نیز در تصاویر دیده می‌شود. G: دگرسانی اسفالریت به اسمیت‌زونیت. H: پیرولوسیت و پسیلوملان با بافت گل‌کلمی. I: پیرولوسیت و پسیلوملان با بافت‌های گل‌کلمی و تیغه‌ای. J: اسمیت‌زونیت با بافت پرکننده فضای خالی. K: مالاکیت با بافت پرکننده فضای خالی. L: دگرسانی کالکوپیریت به کالکوسیت ثانویه و گوتیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Ccp: کالکوپیریت، Cer: سروزیت، Cct: چالکوسیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Mlc: مالاکیت، Ps: پسیلوملان، Py: پیریت، Pyr: پیرولوسیت، Qz: کوارتز، Sm: اسمیت‌زونیت، Sp: اسفالریت)

Fig. 7. Photomicrographs (J and K, respectively, in transmitted crossed- and plane-polarized light, XPL and PPL, and the rest in reflected light) of the ore mineralogy and texture in the Ipak deposit. A: Alteration of pyrite to goethite along the boundaries. B: Pyrite inclusion within chalcopyrite. C: Alteration of chalcopyrite to goethite along the boundaries. E and F: Intergrowth of galena and sphalerite. Alteration of galena to cerussite and galena inclusion within sphalerite are also observed. G: Alteration of sphalerite to smithsonite. H: Pyrolusite and psilomelane with colloform texture. I: Pyrolusite and psilomelane with colloform and bladed textures. J: Smithsonite with vug infill texture. K: Malachite with vug infill texture. L: Alteration of chalcopyrite to secondary chalcocite and goethite. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Ccp: chalcopyrite, Cer: cerussite, Cct: chalcocite, Gn: galena, Gth: goethite, Mlc: malachite, Ps: psilomelane, Py: pyrite, Pyr: pyrolusite, Qz: quartz, Smt: smithsonite, Sp: sphalerite)

تا E). باریت بیشتر به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در مقاطع میکروسکوپی دیده شده و ابعاد طولی بلورهای درشت آن گاه تا ۲ سانتی‌متر می‌رسد (شکل ۸-F). کلسیت بیشتر به صورت بلورهای بی‌شکل تا شکل‌دار دیده شده و معمولاً بافت‌های رگچه‌ای، پرکننده فضا خالی و تیغه‌ای نشان می‌دهد (شکل‌های ۶-C و ۸-D، ۸-D و ۸-F). سربیسیت- ایلیت به صورت بلورهای ریز (۵ تا ۵۰ میکرون) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده می‌شوند که جانشین پلاژیوکلز شده‌اند (شکل ۶-E).

کوارتز، باریت، کلسیت و سربیسیت- ایلیت کانی‌های باطله در کانسار ایپک هستند. کوارتز فراوان‌ترین کانی باطله در این کانسار است که به صورت بلورهای بی‌شکل تا شکل‌دار ریز (کمتر از ۲۰۰ میکرون) و درشت (تا یک سانتی‌متر) در رگه- رگچه‌های سیلیسی و سیمان سیلیسی برش‌های گرمایی دیده می‌شود. کوارتزها اغلب دارای بافت‌های رگه- رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی هستند. در نمونه‌های مربوط به مرحله دوم کانه‌زایی، کوارتزها بافت‌های پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، تیغه‌ای (جانشین شده در قالب کلسیت‌های تیغه‌ای) و پرماند نشان می‌دهند (شکل ۸-A-۸)



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از کانی‌های باطله و بافت آن‌ها در کانسار ایپک. A: بافت‌های پوسته‌ای، گل‌کلمی و پرماند کوارتز. B: رشد کوارتز با بافت کاکلی بر روی خرده کانی کوارتز. C و D: کوارتز با بافت تیغه‌ای (به بخش‌های مشخص شده با دایره مشکی توجه شود). E: بلورهای درشت کوارتز با بافت پرماند. F: منشورهای کشیده و درشت باریت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده‌اند. (Brt: باریت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Sm: اسمیت‌زونیت، Vug: فضای خالی)

Fig. 8. Photomicrographs (transmitted crossed-polarized light, XPL) of gangue minerals and textures in the Ipak deposit. A: Crustiform, colloform, and plumose textures of quartz. B: Cockade texture of quartz developed on the quartz fragment. C and D: Quartz with bladed texture (note the parts marked by black circles). E: Coarse-grained quartz crystals with plumose texture. F: Coarse-grained and elongated prismatic of barite. Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Brt: barite, Cal: calcite, Qz: quartz, Sm: smithsonite, Vug: open space).

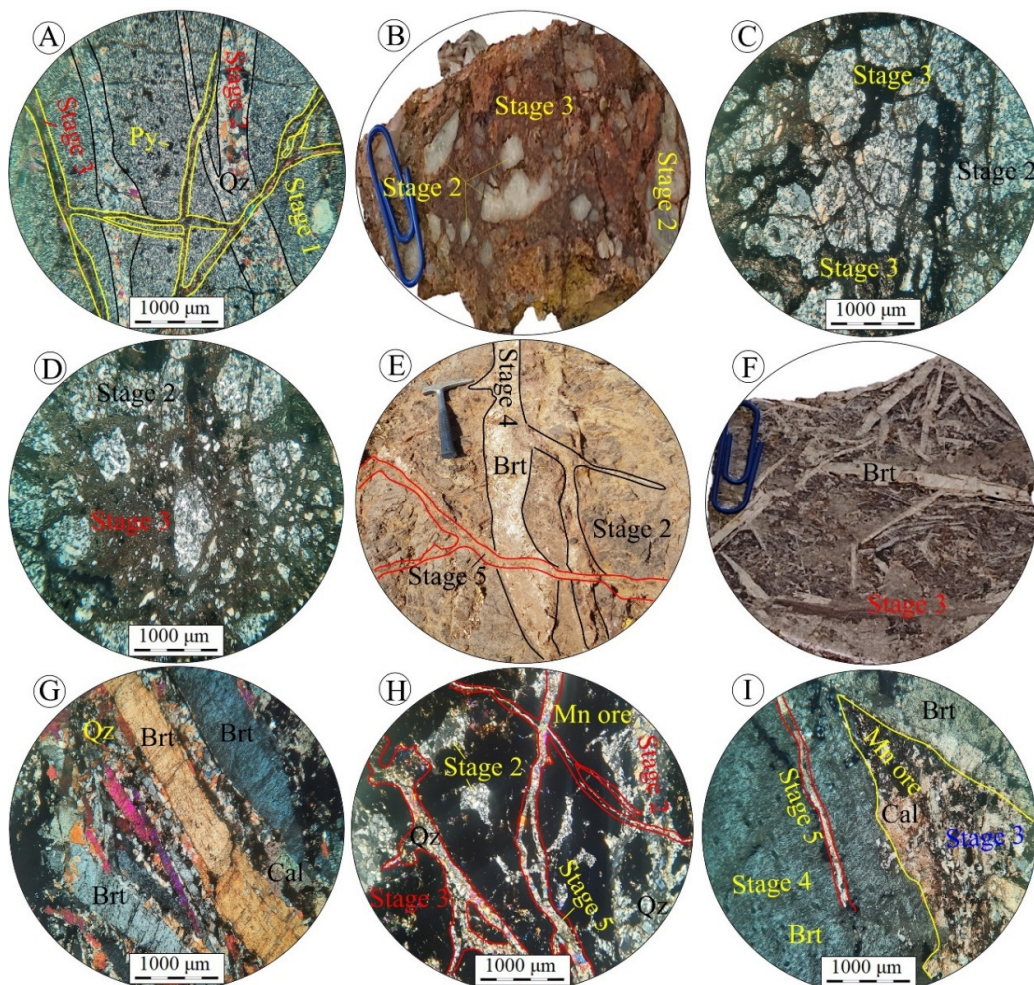
می‌شود. این مرحله از کانه‌زایی معمولاً توسط مراحل بعدی کانی‌سازی قطع و برشی شده است (شکل ۹-A). مرحله دوم کانه‌زایی با حضور رگه- رگچه‌ها و برش‌های گرمایی با سیمان کوارتزی مشخص می‌شود که دارای مقادیر متغیری پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت است. ضخامت رگه و رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار این مرحله تا ۵ سانتی‌متر

۳-۳- مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنتیک کانی‌ها

بر مبنای ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت و ارتباط قطع‌کنندگی رگه و رگچه‌ها، کانه‌زایی در کانسار ایپک به شش مرحله قابل تفکیک است. مرحله اول کانه‌زایی با دگرسانی سیلیسی سنگ‌های میزبان همراه با اندکی پیریت ریز و بی‌شکل (اغلب اکسیده) با بافت دانه‌پراکنده مشخص

سیمان برش‌های گرمابی مشخص می‌شود. این مرحله عموماً مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۹- A تا D) و خود توسط رگچه‌های مراحل بعدی کانه‌زایی قطع شده است (شکل ۸-۳- F تا I).

می‌رسد. مرحله دوم کانه‌زایی معمولاً مرحله اول کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۹- A) و خود توسط مراحل بعدی کانه‌زایی قطع و برشی شده است (شکل ۹- A تا E). مرحله سوم کانه‌زایی با حضور کوارتز و کلسیت همراه با اندکی کانه‌های منگنز (پیرولوسیت و پسیلوملان) در رگه‌ها و



شکل ۹. مراحل کانه‌زایی در کانسار ایپک. A: مرحله اول کانه‌زایی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان که توسط رگچه‌های مرحله دوم قطع شده است. رگچه‌های مرحله سوم که مرحله دوم کانه‌زایی را قطع کرده‌اند نیز در تصویر دیده می‌شوند. B: قطعات برشی مرحله دوم کانه‌زایی درون رگه مرحله سوم کانه‌زایی. C و D: برشی شدن مرحله دوم کانه‌زایی توسط رگچه‌های مرحله سوم کانه‌زایی. E: قطع شدن مرحله دوم کانه‌زایی توسط رگه‌های باریتی مرحله چهارم کانه‌زایی. رگه‌های باریتی خود توسط رگه‌های کلسیتی مرحله پنجم قطع شده‌اند. F و G: قطع شدن رگه‌های کلسیتی مرحله پنجم توسط رگه‌ها و رگچه‌های باریتی مرحله چهارم کانه‌زایی. H: برشی شدن رگچه‌های کوارتزی مرحله دوم و رگچه‌های منگنزدار مرحله سوم توسط رگچه‌های کوارتزی مرحله پنجم کانه‌زایی. I: قطع شدن رگچه کلسیتی - اکسید منگنزی مرحله سوم توسط رگچه‌های باریتی مرحله چهارم که خود توسط رگچه کلسیتی مرحله پنجم کانه‌زایی قطع شده است. تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL) تهیه شده‌اند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Brt: باریت، Cal: کلسیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز)

Fig. 9. Mineralization stages in the Ipak deposit. A: Stage 1 mineralization as silicification of the host rock that is crosscut by stage 3 veinlets. Stage 3 veinlets that cut the stage 2 mineralization are also observed. B: Breccia clasts of stage 2 mineralization within the vein of stage 3 mineralization. C and D: Brecciation of stage 2 mineralization by stage 3 veinlets. E: Stage 2 mineralization that crosscut by barite veins of stage 4 mineralization. Barite veins, in turn, are cut by calcite veins of stage 5. F and G: Crosscutting of stage 3 veins by barite veins and veinlets of stage 4 mineralization. H: Brecciation of stage 2 quartz veinlets, and stage 3 Mn-bearing veinlets by quartz veinlets of stage 5 mineralization. I: Crosscutting of stage 3 calcite- Mn oxide veinlet by stage 4 barite veinlets that, in turn, are cut by calcite veinlets of stage 5 mineralization. Microscopic photos were taken in transmitted crossed-polarized light (XPL). Mineral abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Brt: barite, Cal: calcite, Py: pyrite, Qz: quartz)

پرکننده فضاهای خالی مشخص می‌شود. ضخامت رگه- رگچه‌های کوارتزی و کلسیتی این مرحله تا ۵ سانتی‌متر نیز می‌رسد. این رگچه‌ها مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند (شکل ۹-E، H و I). مرحله ششم کانه‌زایی مربوط به فرایندهای برون‌زاد بوده و طی آن کانی‌های سروزیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت، کالکوسیت و گوتیت با بافت‌های پرکننده فضای خالی، بازماندی و جانیشینی تشکیل شده‌اند. مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار اپیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مرحله چهارم کانه‌زایی با رگه و رگچه‌های باریتی به ضخامت تا ۱۰ سانتی‌متر مشخص می‌شود که مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده (شکل ۳-E و F) و خود توسط رگه و رگچه‌های کوارتز و کلسیتی مرحله پنجم کانه‌زایی قطع شده‌اند (شکل ۳-E و I). هیچ کانی سولفیدی با این مرحله تشکیل نشده است. مرحله پنجم کانه‌زایی به آخرین فعالیت‌های گرمایی در کانسار اپیک مرتبط بوده و هیچ کانی سولفیدی و اکسیدی با آن تشکیل نشده است. این مرحله با حضور کوارتز و کلسیت به‌صورت رگچه‌ای و

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Supergene
Ore	Pyrite						
	Chalcopyrite						
	Galena						
	Sphalerite						
	Pyrolusite						
	Psilomelane						
	Malachite						
	Chalcocite						
	Cerussite						
	Smithsonite						
Goethite							
Gangue	Quartz						
	Barite						
	Calcite						
	Sericite-illite						
Texture	Disseminated						
	Brecciated						
	Vein-Veinlets						
	Comb						
	Cockade						
	Colloform-Crustiform						
	Vug Infill						
	Replacement						

شکل ۱۰. توالی پاراژنزی و ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانسار اپیک.

Fig. 10. Paragenetic sequences showing the structure and texture of gangues and ore minerals at Ipak deposit.

دارند. نقره همبستگی مثبت ضعیف با آرسنیک (۰/۰۷) و متوسط با مس (۰/۴۴) دارد. باریم همبستگی مثبت ضعیف با سرب و روی (به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۱۳) و همبستگی ضعیف منفی با مس (۰/۱۵-) دارد. منگنز همبستگی منفی ضعیف با سرب و روی (به ترتیب ۰/۲۰- و ۰/۰۷-) نشان می‌دهد.

۴-۲- الگوی توزیع عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

الگوی عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانسنگ، توده کوارتز مونوزودیوریت و سنگ‌های میزبان (کریستال توف و گدازه آندزیت بازالتی) در کانسار اپیک که نسبت به کندریت (تامپسون، ۱۹۸۲) بهنجار شده‌اند در شکل ۱۱-A نشان داده شده است. طبق این شکل، نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی عناصر کمیاب مشابه هستند که می‌تواند در ارتباط با تشکیل

۳-۴- داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی به‌دست آمده از نمونه‌های کانسار اپیک در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

۴- بحث و بررسی

۴-۱- ضرایب همبستگی عناصر

ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز در کانسار اپیک که براساس داده‌های جدول‌های ۱ و ۲ محاسبه شده است، در جدول ۳ آورده شده است. بر این اساس، سرب همبستگی مثبت قوی با روی (۰/۶۲) و همبستگی مثبت متوسط با نقره (۰/۵۳) و آرسنیک (۰/۴۲) دارد. همبستگی مثبت سرب با نقره می‌تواند بیانگر حضور نقره در شبکه گالن باشد. سرب و روی همبستگی مثبت ضعیف (به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۱۸) با مس

کوارتز مونزودیوریت و سنگ‌های میزبان سالم، نمونه‌های کانسنگ مقادیر پایین‌تری از عناصر کمیاب (به جزء باریم، استرانسیم و تا حدودی اورانیم) می‌باشند که می‌تواند ناشی از خروج این عناصر از محیط طی فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی باشد.

آن‌ها توسط یک فرایند کانه‌زایی باشد. همچنین، الگوی عناصر کمیاب در توده کوارتز مونزودیوریت و سنگ‌های میزبان تا حدودی مشابه با الگوی این عناصر در نمونه‌های کانسنگ است. این امر می‌تواند بیانگر نقش توده نفوذی و سنگ‌های میزبان به‌عنوان منشأ عناصر کانه‌ساز باشد. در مقایسه با توده

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

Table 1. ICP-MS data (ppm) of ore samples and host rocks from the Ipak deposit.

D.L.	Ag	As	Ba	Cd	Ce	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	In	K
D.L.	0.1	0.5	1	0.1	0.5	0.5	1	0.1	0.1	0.1	100	0.05	0.5	0.5	100
IP-02	7.3	19.1	>1%	15.6	<0.5	0.6	67	0.7	0.5	4.74	15457	1.3	<0.5	<0.5	<100
IP-09	>100	32.6	3190	3367.7	<0.5	0.7	8958	0.2	0.1	0.87	5107	0.62	0.5	<0.5	751
IP-10	>100	20.4	1428	100	<0.5	0.7	1590	0.2	<0.1	0.44	7749	0.68	<0.5	<0.5	346
IP-12	>100	17.6	895	11.8	<0.5	0.8	2673	0.2	<0.1	0.42	8049	0.68	<0.5	<0.5	572
IP-16	0.8	24.5	1517	0.2	55	1.5	32	3.9	1.7	1.58	63176	4.43	2.8	<0.5	54858
IP-17	3.8	16.2	1497	9.1	112	7.9	38	2.8	1.5	1.3	37816	3.37	4	<0.5	69915
IP-19	0.9	12	911	0.4	59	1.5	40	5.1	2.7	1.12	37293	4.66	4.8	<0.5	23248
IP-25	>100	62.7	1404	42.7	<0.5	0.6	47636	0.5	0.2	0.59	23887	0.95	<0.5	<0.5	<100
IP-26	113	34.1	3841	2122.7	<0.5	0.5	6307	<0.1	<0.1	0.9	3736	0.57	<0.5	<0.5	<100
IP-27	>100	46.2	2814	2343.7	<0.5	0.6	14043	0.2	<0.1	0.89	4617	0.59	<0.5	<0.5	<100
IP-28	2.4	7.4	2741	3.4	<0.5	0.6	33	0.5	0.2	0.94	2422	0.78	<0.5	<0.5	<100
D.L.	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Nb	Nd	P	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sc
D.L.	1	1	0.1	100	5	0.5	1	0.5	10	1	0.05	1	50	0.5	0.5
IP-02	13	3	<0.1	155	6121	<0.5	<1	7.5	<10	2220	3.54	<1	3495	4.1	1.1
IP-09	5	<1	<0.1	505	66	<0.5	3.5	3.8	<10	>30000	1.91	5	3919	12.4	1.1
IP-10	7	70	<0.1	597	96	1.1	1.5	3.8	30	>30000	2.2	1	5887	<0.5	1.3
IP-12	5	54	<0.1	638	126	1.5	1.5	3.8	<10	>30000	2.25	3	4495	1.4	1.4
IP-16	29	14	0.3	2365	2642	0.6	18.3	22.4	2515	38	5.95	122	494	7.4	18.9
IP-17	31	3	0.2	1862	1140	0.5	36	22	1227	937	6.79	214	188	18.7	9
IP-19	25	19	0.5	10866	926	1.5	10.1	21.4	1272	13	5.76	69	224	1.3	13.6
IP-25	8	18	<0.1	593	186	8.5	<1	4.4	<10	>30000	2.44	<1	1804	3.3	1.4
IP-26	4	<1	<0.1	337	82	<0.5	1.8	3.4	16	>30000	1.81	<1	4602	35	0.9
IP-27	5	<1	<0.1	372	88	0.7	<1	3.3	<10	>30000	1.88	<1	4689	6.5	1.1
IP-28	4	<1	<0.1	190	1101	<0.5	<1	3.6	<10	26	1.81	<1	3442	<0.5	1.3
D.L.	Sm	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl	Tm	U	V	Y	Yb	Zn	Zr
D.L.	0.1	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.1	0.1	0.1	1	0.5	0.05	1	5
IP-02	6.1	300.7	<0.1	0.2	<0.5	<0.1	<10	<0.1	<0.1	0.29	443	5.7	1.29	240	<5
IP-09	1.2	499.8	0.1	<0.1	1.8	<0.1	<10	0.1	<0.1	1.1	8	1.1	<0.05	>30000	<5
IP-10	0.6	804.4	<0.1	<0.1	0.6	<0.1	<10	0.1	<0.1	1	35	1.1	0.05	13646	<5
IP-12	0.5	581.1	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1	<10	0.1	<0.1	1.6	34	1	0.06	4313	<5
IP-16	5	350.3	1.2	0.7	0.6	4.2	7847	0.8	0.3	0.8	221	12.7	1.85	27	105
IP-17	4.1	174.6	1	0.6	1	26.7	3976	1.8	0.2	1.7	141	14.6	1.63	770	144
IP-19	4.7	249.9	1.2	0.8	<0.5	8.6	4337	0.5	0.5	1.7	116	20.2	3.5	113	209
IP-25	0.9	552.4	<0.1	0.1	0.9	<0.1	<10	<0.1	<0.1	14.7	92	2.1	0.39	>30000	<5
IP-26	1.1	623.2	0.1	<0.1	2.8	<0.1	<10	<0.1	<0.1	0.9	8	0.9	<0.05	>30000	<5
IP-27	1.1	466.4	<0.1	<0.1	1.8	<0.1	<10	<0.1	<0.1	1.3	11	1.1	<0.05	>30000	<5
IP-28	1.1	3630.1	<0.1	0.1	1.9	<0.1	<10	<0.1	<0.1	0.2	21	2.6	<0.05	45	<5

IP-02: Stage 3 Qz-Cal-Mn vein; IP-09, IP-10, IP-12, IP-25, IP-26, and IP-27: Stage 2 Qz-Cu-Pb-Zn vein; IP-16: Barren crystal tuff; IP-17: Barren Qz monzodiorite; IP-19: Barren basaltic andesite; IP-28: Stage 5 Qz-Cal vein

سنگین، الگوی تقریباً مسطح در عناصر کمیاب خاکی سنگین و آنومالی‌های منفی در عناصر سربیم و بیتریمیم می‌باشند. غنی‌شدگی نسبی عناصر کمیاب خاکی سبک در نمونه‌های کانسنگ می‌تواند در ارتباط با قابلیت تحرک این عناصر در مقایسه با عناصر کمیاب خاکی سنگین باشد که منجر به غنی‌شدگی بیشتر آنها در رگه‌های کانه‌دار شده است (رولند و همکاران، ۲۰۰۳). بی‌هنجاری منفی سربیم می‌تواند در ارتباط با شرایط احيائي سیال و محیط نهشت کانه‌ها باشد (ویتفورد و همکاران، ۱۹۸۸).

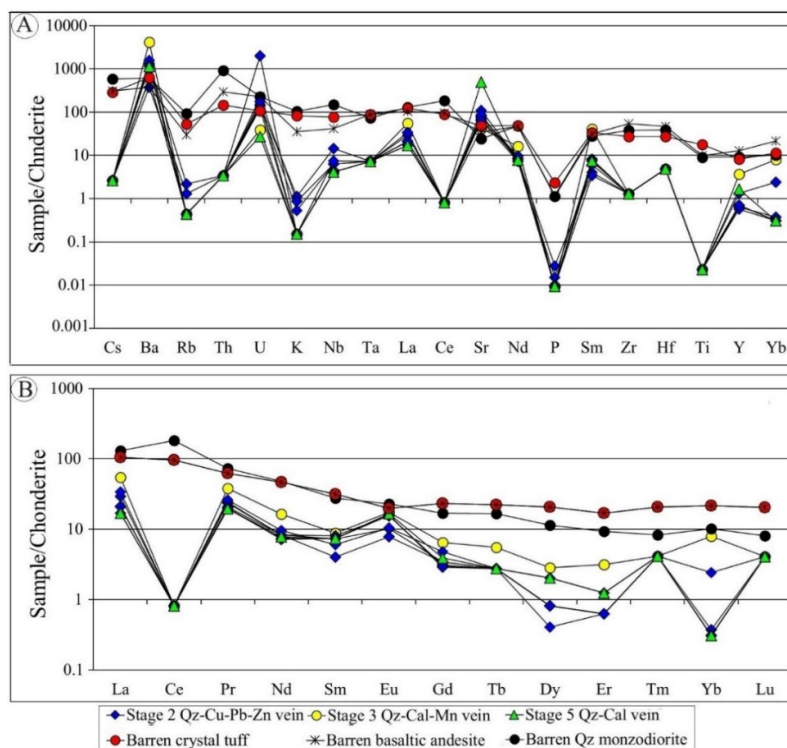
در الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (مک‌دوناف و سان، ۱۹۹۵) نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی تقریباً مشابه (به جزء تهی‌شدگی در عناصر سربیم و بیتریمیم) با توده کوارتز مونزودیوریت و سنگ‌های میزبان هستند (شکل ۱۱-۱). این امر نیز نشان‌دهنده نقش توده کوارتز مونزودیوریتی و سنگ‌های میزبان در تشکیل رگه‌های کانه‌زایی است. براساس این شکل، نمونه‌های کانسنگ دارای الگوی عناصر کمیاب خاکی تقریباً مشابه با نسبت متوسط تا پایین عناصر کمیاب خاکی سبک به عناصر کمیاب خاکی

جدول ۲. داده‌های تجزیه ICP-OES (گرم در تن) نمونه‌های کانسنگ در کانسار ایپیک (شرکت آیمکو، ۱۳۸۵).

Table 2. ICP-OES data (ppm) of ore samples from the Ipak deposit (IMCO Co., 2006).												
	P-38X1	P-40X1	P-42X1	P-43X1	P-46X1	P-50X1	P-53X1	P-54X1	P-55X1	P-67X1	P-68X1	P-68X2
Ag	1	68	8	200	1	6	7	2	1	6	2	1
As	50	200	50	50	50	70	50	50	50	50	50	50
Ba	1990	8840	18500	23500	2560	5170	2130	670	8560	16700	730	7160
Cd	20	150	10	20	10	70	50	10	10	20	10	10
Cu	19700	2970	950	4490	790	7280	1150	13300	120	360	160	180
Mn	2350	2550	200	980	460	3040	4740	3250	11300	1890	3070	4790
Mo	10	40	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pb	1680	98200	22900	100000	300	10750	18000	510	160	10300	290	1800
Zn	1420	100000	800	5580	950	11000	40000	2210	420	19100	690	540
	P-78X1	P-87X1	Tu-1	Tu-2	Tu-3	Tu-4	Tu-5	Tu-6	Tu-7	Tu-8	Tu-9	Tu-10
Ag	119	3	10	8	3	11	13	28	15	4	5	2
As	50	50	50	60	50	50	90	410	80	50	50	50
Ba	6620	7520	7280	5380	1230	2300	360	6150	1110	1400	1740	4520
Cd	10	20	400	120	340	60	40	100	30	10	10	10
Cu	7450	6320	790	1070	960	710	1560	2790	720	490	520	180
Mn	1330	2630	4400	4610	4780	3300	4140	950	3920	4820	3880	3450
Mo	10	20	10	10	10	10	10	10	30	10	10	10
Pb	13200	2850	40000	31000	7250	31000	33000	100000	50000	8460	12000	3400
Zn	740	2980	50000	27000	41000	47000	21000	15000	14000	12000	12500	12000
	Tu-11	Tu-12	Tr1-3-1	Tr1-4-1	Tr1-4-2	Tr1-5-1	Tr1-5-2	Tr1-8-2	Tr1-9-1	Tr1-9-2	Tr1-10-1	Tr1-10-2
Ag	3	5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
As	50	50	38	38	38	38	38	50	38	38	38	38
Ba	1360	3890	2960	500	2770	2020	2110	5050	4860	3630	3390	3640
Cd	10	10	10	8	8	10	10	8	10	8	8	8
Cu	230	290	240	7560	1350	390	1590	210	50	140	70	50
Mn	3570	4450	2590	2080	3630	4620	4570	2490	2160	2300	1970	1820
Mo	10	10	8	10	8	8	8	10	10	10	10	10
Pb	1900	3550	1010	720	1840	2180	950	920	560	660	800	460
Zn	7410	7290	1340	490	850	1340	1520	1500	620	660	540	1110
	Tr1-11-1	Tr1-11-2	Tr1-12-1	Tr1-12-2	Tr1-13-1	Tr1-13-2	Tr1-14-1	Tr1-14-2	Tr1-15-1	Tr1-15-2	Tr1-16-1	Tr1-16-2
Ag	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	1
As	38	38	38	38	38	38	38	38	38	50	38	38
Ba	3610	4250	4640	6970	4700	4990	3870	4520	3830	2240	2070	1980
Cd	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Cu	80	40	80	140	110	120	180	420	1040	1130	880	680
Mn	2030	2040	1980	2470	2230	2250	2230	1880	1740	1850	2420	1470
Mo	10	10	8	20	10	10	10	10	20	100	70	10
Pb	1250	530	440	1110	910	1420	760	490	520	10350	4000	920
Zn	600	620	670	2190	1200	1100	1340	3550	7150	11500	3380	690
	Tr1-17	Tr1-18	Tr1-19-1	Tr1-19-2	Tr1-20-1	Tr1-20-2	Tr1-21-1	Tr1-21-2	Tr2-1-1	Tr2-1-2	Tr2-2-1	Tr2-2-2
Ag	4	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
As	38	38	38	38	38	38	38	50	38	38	70	100
Ba	2030	1730	840	950	1270	1000	1440	3260	4810	5520	6420	4280
Cd	40	8	8	8	8	8	10	8	8	8	8	8
Cu	2050	1400	1980	2240	2220	3530	2160	490	310	840	300	400
Mn	3320	4420	3210	3480	4780	5140	4620	1970	1380	2650	2080	2980
Mo	10	10	10	10	10	10	10	10	8	10	10	10
Pb	3920	200	610	1940	2090	1370	1400	760	200	430	590	520
Zn	300	120	340	440	240	300	240	360	350	580	660	470
	Tr2-3-1	Tr2-3-2	Tr2-4-1	Tr2-4-2	Tr2-6-2	Tr2-7-1	Tr2-7-2	Tr2-9	Tr2-10-1	Tr2-10-2	Tr2-10-3	Tr2-11-1
Ag	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
As	120	110	50	70	38	38	38	38	38	38	38	38
Ba	3280	4490	12050	5210	1330	1180	990	1710	4780	3430	2850	7700
Cd	8	8	8	8	8	10	8	8	8	10	40	80
Cu	300	310	790	300	100	560	210	490	530	340	650	650
Mn	2720	2850	2220	1770	950	1810	1530	2050	2150	2780	5650	9180
Mo	10	8	10	8	10	8	8	8	8	8	10	20
Pb	340	300	890	270	130	110	60	680	340	410	2500	6290
Zn	480	880	520	320	150	320	250	370	1370	970	3690	3620
	Tr2-11-2	Tr2-12-1	Tr2-12-2	Tr2-13-1	Tr2-13-2	Tr2-14-1	Tr2-14-2	Tr2-15-1	Tr2-15-2	Tr2-15-3	Tr3-9	Tr3-10
Ag	4	2	3	19	36	9	26	14	30	34	1	1
As	38	60	38	410	70	150	110	50	38	50	70	80
Ba	8100	18000	14750	18450	18100	19400	12800	8390	15950	5640	2610	7050
Cd	110	240	150	160	30	40	60	10	80	50	10	10
Cu	570	370	400	820	1210	340	1090	440	920	930	1470	400
Mn	7790	8860	3630	3280	570	3340	1870	1830	1900	1090	990	1650
Mo	8	8	10	360	20	20	60	40	10	30	8	8
Pb	2480	2860	2750	26100	66800	5340	44900	14400	32200	71400	840	380
Zn	2690	1430	3020	47500	36100	5980	25700	18000	13100	27400	410	1050

ادامه جدول ۲. داده‌های تجزیه ICP-OES (گرم در تن) نمونه‌های کانسنگ در کانسار ایپک (شرکت آیمکو، ۱۳۸۵).

Continued Table 2. ICP-OES data (ppm) of ore samples from the Ipak deposit (IMCO Co., 2006).												
	Tr3-11	Tr3-12	Tr3-13	Tr3-14	Tr3-15	Tr3-16	Tr3-17	Tr3-18	Tr3-19	Tr3-20	Tr3-21	Tr3-22
Ag	1	3	3	8	1	1	1	1	1	1	1	1
As	38	50	50	50	90	38	38	38	38	38	38	70
Ba	3080	3000	4680	5420	10000	7090	11950	5300	4830	5260	4770	7190
Cd	20	10	40	10	20	20	10	10	8	10	10	20
Cu	200	210	330	870	490	190	150	610	120	110	60	190
Mn	1300	810	2520	1120	2830	2290	1660	2380	2540	2580	1650	1910
Mo	8	8	8	10	8	10	10	10	10	8	8	8
Pb	290	5240	400	1210	2260	880	930	1440	790	350	160	390
Zn	520	1140	1760	7220	1530	970	1540	2800	2270	2010	1370	2470
	Tr3-23	Tr3-24	Tr3-25	Tr3-26	Tr3-27	Tr3-28	Tr3-29	Tr3-30	Tr3-31	Tr3-32	Tr3-33	Tr3-34
Ag	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	2	1
As	60	60	38	38	38	50	38	38	38	38	38	38
Ba	9330	14400	7500	3220	10300	4540	21400	13450	17350	17250	18550	14750
Cd	10	40	50	20	60	110	70	150	8	8	8	20
Cu	500	350	320	150	220	170	370	440	250	240	220	590
Mn	2500	2200	2580	2370	2940	4400	2620	6630	910	1800	520	2930
Mo	8	8	8	8	8	8	10	8	10	10	8	8
Pb	560	410	510	300	1030	2200	20100	5740	18200	4050	26000	1470
Zn	3900	1870	2420	2830	2650	2800	6630	4500	25500	29800	12500	3230
	Tr3-35	Tr3-37	Tr3-38	Tr3-39	Tr3-40	Tr3-41	Tr3-42	Tr3-43	Tr3-44	Tr3-45		
Ag	1	1	1	1	13	1	10	1	1	1		
As	38	38	50	90	100	50	50	38	38	38		
Ba	17000	12400	21600	17400	8870	12450	10950	14650	1730	3260		
Cd	10	10	10	50	10	50	50	170	20	10		
Cu	680	960	950	1230	860	470	1010	770	420	340		
Mn	2540	2440	2380	3490	2290	2930	1570	4450	2360	2070		
Mo	8	8	8	8	20	20	10	8	8	8		
Pb	810	1230	1290	2580	133333	10300	79000	2530	710	570		
Zn	1750	1540	2110	4060	27400	3650	16500	6310	2000	1440		



شکل ۱۱. A: الگوی تغییرات عناصر کمیاب برای نمونه‌های کانسنگ، توده کوارتز مونزودایوریتی و سنگ‌های میزبان در کانسار ایپک که نسبت به کندریت (تامپسون، ۱۹۸۲) بهنجار شده‌اند. B: الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانسنگ، توده کوارتز مونزودایوریتی و سنگ‌های میزبان در کانسار ایپک که نسبت به کندریت (مک‌دوناف و سان، ۱۹۹۵) بهنجار شده‌اند. در هر دو نمودار، مقادیر حد آشکارسازی برای مقادیر کمتر از حد آشکارسازی انتخاب شده است.

Fig. 11. A: Chondrite-normalized (Thompson, 1982) rare elements pattern for the ore samples, quartz monzonite body, and barren host rocks in the Ipak deposit. B: Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE pattern for the ore samples, quartz monzonite body, and barren host rocks in the Ipak deposit. In both diagrams, detection values were chosen for below detection limit values.

جدول ۳. ضرایب همبستگی عناصر (محاسبه شده بر مبنای جدول‌های ۱ و ۲) برای نمونه‌های کانسنگ در کانسار ایپک.

Table 3. Elemental correlation coefficient (calculated based on Tables 1 and 2) for ore samples at the Ipak deposit.

	Ag	As	Ba	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn
Ag	1								
As	0.07	1							
Ba	0.09	0.20	1						
Cd	0.48	-0.02	-0.06	1					
Cu	0.44	0.02	-0.15	0.24	1				
Mn	-0.34	-0.02	0.00	-0.18	-0.19	1			
Mo	0.01	0.62	0.18	-0.04	-0.04	0.02	1		
Pb	0.53	0.42	0.24	0.16	0.13	-0.20	0.13	1	
Zn	0.35	0.38	0.13	0.31	0.18	-0.07	0.31	0.62	1

۴-۳- تپ کان‌زایی و الگوی تشکیل

در مقایسه با کانسارهای رگه‌ای فلزات پایه و گرانبها، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کان‌زایی، دگرسانی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت در کانسار ایپک بیشترین شباهت را با کانسارهای ایپک ترمال (کوک و سیمونز، ۲۰۰۰؛ جان، ۲۰۰۱؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵) دارد. نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در کانسار ایپک نشان می‌دهد: ۱- کان‌زایی مس، سرب و روی در کانسار ایپک به صورت پهنه‌های کوارتز-سولفیدی درون ساختارهای گسلی رخ داده و دارای سنگ میزبان توفی و گدازه‌ای ائوسن زیرین-میانی می‌باشد. ۲- دگرسانی‌های گرمایی در کانسار ایپک شامل کانی‌های دگرسانی دما پایین تا متوسط مانند مجموعه کلسیت، سربیسیت-ایلیت و کلریت است. ۳- کان‌های معدنی در کانسار ایپک شامل پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت همراه با مقادیر اندکی پیرولوئیت و پسیلوملان است که با کانی‌های باطله کوارتز، باریت، کلسیت و سربیسیت-ایلیت همراهی می‌شوند. ۴- ساخت و بافت‌های موجود در کانسارهای ایپک ترمال مانند دانه پراکنده، رگه-رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل کلمی، کاکلی، تیغه‌ای، پرمانند و پُرکننده فضای خالی به خوبی در کانسار ایپک توسعه یافته است. مقایسه این ویژگی‌ها با انواع کانسارهای ایپک ترمال نوع سولفیداسیون بالا، سولفیداسیون پایین و سولفیداسیون حدواسط (وایت و هدنکوئیست، ۱۹۹۰؛ کوک و سیمونز، ۲۰۰۰؛ جان، ۲۰۰۱؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳؛ گمل، ۲۰۰۴؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵؛ اندریووا و همکاران، ۲۰۱۳؛ ساندرس و همکاران، ۲۰۱۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که این مجموعه کانیایی، ساخت و بافت و الگوی دگرسانی بیشترین شباهت را با کانسارهای ایپک ترمال سولفیداسیون حدواسط (هدنکوئیست و همکاران، ۲۰۰۰؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳؛ گمل، ۲۰۰۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) داشته و قابل مقایسه

با این نوع از کانسارهای ایپک ترمال در کمربند آتشفشانی مردآباد-بوئین‌زهر (طالع‌فاضل و همکاران، ۱۴۰۱b، ۲۰۲۳؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۱۷؛ خان‌احمدلو، ۱۴۰۲؛ خان‌احمدلو و همکاران، ۱۴۰۲a، b)، کمربند فلزایی طارم-هشتجین (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوهستانی و همکاران، ۲۰۱۸، a، ۲۰۱۹b؛ ۲۰۲۰؛ ۲۰۲۲a، b؛ میکائیلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شهبازی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زمانیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ قاسمی سیانی و همکاران، ۲۰۲۲) و دیگر نقاط جهان (آلبینسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ جان، ۲۰۰۱؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۵؛ ییلماز و همکاران، ۲۰۱۰؛ سابوا و همکاران، ۲۰۱۷) است. کانی‌های دگرسانی (مجموعه سربیسیت-ایلیت، کلسیت و کلریت) در کان‌زایی چندفلزی ایپک جزء دگرسانی‌های گرمایی حرارت پایین تا متوسط هستند که شاخص کانی‌های دگرسانی در کانسارهای ایپک ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط محسوب می‌شوند (هدنکوئیست و همکاران، ۲۰۰۰؛ آلبینسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ اینودی و همکاران، ۲۰۰۳). در جدول ۴، ویژگی‌های اصلی کانسار ایپک با برخی از کانسارهای ایپک ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند آتشفشانی مردآباد-بوئین‌زهر و کمربند فلزایی طارم-هشتجین مقایسه شده است. براساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی و آزمایشگاهی، مراحل تکوین و تکامل کانسار ایپک به صورت یک توالی سه مرحله‌ای است (شکل ۱۲). مرحله اول با تشکیل توالی‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن در کمربند آتشفشانی مردآباد-بوئین‌زهر همراه است (شکل ۱۲-A). در مرحله دوم، همزمان با فاز کوهزایی پیرنه در زمان ائوسن میانی-پایانی، واحدهای سنگی ائوسن چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آن‌ها تشکیل شده است (شکل ۱۲-B). در این مرحله، توده‌های کوارتز مونوزودیوریتی-پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی اغلب کم‌عمق، هم راستا با

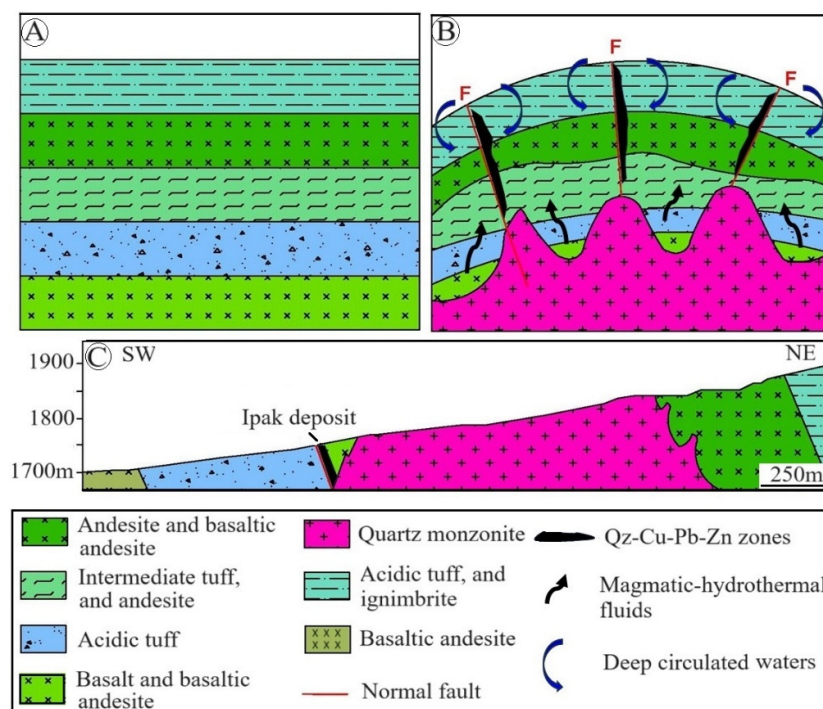
کوارتز مونوزودیوریتی - پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی منشاء گرفته باشد نیز وجود دارد (طالع فاضل و همکاران، ۲۰۱۳). مرحله سوم با بالا آمدگی منطقه و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و طی آن ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۲- C).

روندهای ساختاری در واحدهای سنگی ائوسن نفوذ کرده‌اند (کاظمی و همکاران، ۲۰۲۲). این توده‌ها معمولاً به‌عنوان موتور حرارتی عمل کرده و سبب چرخش آب‌های جوی و به تبع آن توسعه پهنه‌های دگرسانی گرمایی و تشکیل رگه‌های اپی‌ترمال فلزات قیمتی و پایه می‌شوند (شکل ۱۲- B). احتمال اینکه بخشی از ماده معدنی و سیالات گرمایی از توده‌های

جدول ۴. مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار ایپک با برخی از کانسارهای اپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمربند آتشفشانی مردآباد-بوئین‌زهره و کمربند فلزایی طارم-هشتجین.

Table 4. Comparison of main characteristics of the Ipak deposit with some intermediate-sulfidation type of epithermal deposits in the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt, and the Tarom-Hashtjin metallogenic belt.

ایپک	کورچشمه	آتش‌انبار	ورمزبار	تثویر	زاجکان
جنوب اشتهارد	جنوب‌باختر تاکستان	جنوب‌باختر دانسفهان	شمال زنجان	خاور زنجان	جنوب‌خاور زنجان
مردآباد- بوئین‌زهره	مردآباد- بوئین‌زهره	مردآباد- بوئین‌زهره	طارم- هشتجین	طارم- هشتجین	طارم- هشتجین
توف و گدازه حدواسط	توف و گدازه حدواسط	داسیت- رپولیت پورفیری	توف‌های حدواسط و اسیدی	توف و گدازه	توف‌های حدواسط و اسیدی
ائوسن	ائوسن	ائوسن	ائوسن	ائوسن	ائوسن
گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها	گسل‌ها و شکستگی‌ها
پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیرولوسیت، پسیلوملان	کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، تنانتیت- تتراهدريت، پیرولوسیت، پسیلوملان	پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، تتراهدريت، طلا، الکتروم	گالن، اسفالریت، پیریت، پیرولوسیت، پسیلوملان	کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت، گالن، اسفالریت	کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، هماتیت
دانه پراکنده، رگه- رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرماند، تیغه‌ای، پُرکننده فضای خالی	دانه پراکنده، رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کاکلی، گل‌کلمی، پرماند، پُرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، دانه پراکنده، شانه‌ای، پوسته‌ای، پُرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، گل‌کلمی، کاکلی، پرماند، تیغه‌ای، پُرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، پوسته‌ای، گل‌کلمی، پرماند، پُرکننده فضای خالی	رگه- رگچه‌ای، پرشی، شانه‌ای، پوسته‌ای، کاکلی، پرماند، پُرکننده فضای خالی
سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، آرژلیک، سرسیستی، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط، کلریتی، پروپیلیتیک	سیلیسی، کربناتی، آرژلیک حدواسط، پروپیلیتیک
ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	ایپ‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط
نتایج حاصل از این پژوهش	خان‌احمدلو (۱۴۰۲)، خان‌احمدلو و همکاران (۱۴۰۲a, b)	همکاران (۱۴۰۱b)، طالع فاضل و همکاران (۲۰۱۳)	قربانی (۱۳۹۹)، قربانی و همکاران (۱۴۰۰)	کوهستانی و مختاری (۱۳۹۷)، کوهستانی و همکاران (۲۰۲۲b)	محضی (۱۳۹۹)، محضی و همکاران (۱۴۰۱)



شکل ۱۲. A تا C: تصاویر شماتیک از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در کانسار ایپک. برای توضیح به متن مراجعه شود.
Fig. 12. A-C: Schematic representation of mineralization evolution stages at Ipak deposit. See text for details.

۵- نتیجه‌گیری

کانه‌زایی در کانسار ایپک به صورت پهنه‌های سیلیسی حاوی مس، سرب و روی درون توالی توفی و گدازه‌ای ائوسن زیرین-میانی رخ داده و توسط هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط دربر گرفته شده است. شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، الگوی دگرسانی‌ها، کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ در ایپک نشان می‌دهد که این کانسار از نوع کانسارهای ایپی‌ترمال فلزات پایه بوده و قابل مقایسه با سایر کانه‌زایی‌های ایپی‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط در کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهرا و کمر بند فلز زایی طارم- هشتجین است. تشابه روند الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانسنگ و سنگ‌های میزبان نشان‌دهنده نقش عمده سنگ‌های میزبان در تأمین عناصر کانه‌ساز است. ژئومتری رگه‌ای کانه‌زایی در کانسار ایپک و دیگر کانه‌زایی‌های ایپی‌ترمال در کمر بند آتشفشانی مردآباد- بوئین‌زهرا نشان می‌دهد که ساختارهای گسلی مجرای اصلی عبور سیالات کانه‌ساز بوده‌اند. همچنین، این کانه‌زایی‌ها اغلب درون توالی توفی و گدازه‌ای ائوسن زیرین-میانی و در ارتباط فضایی نزدیک با توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن میانی تشکیل شده‌اند. لذا، بررسی پهنه‌های گسلی موجود در توالی سنگی ائوسن زیرین-

میانی به‌ویژه در مناطقی که توسط توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن میانی قطع شده‌اند، می‌تواند از نظر اکتشاف کانسارهای ایپی‌ترمال دارای اهمیت باشد.

۶- قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از سردبیر و داوران محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی به‌خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر می‌نمایند.

References

- Aghazadeh, M. and Barati, B (2006) Geological map of the Ipak deposit, scale 1: 250,000. AIMCO Co., Tehran.
- AIMCO Co (2006) Exploration report of the Ipak deposit. IMIDRO Co., Tehran, 220 pp. (in Persian)
- Alavi, M (1991) Tectonic map of the Middle East, scale: 1:5,000,000. Geological Survey of Iran.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D., Chomiak, B (2001) Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constraints from fluid inclusion and stable isotope data. *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America* (Eds, Albinson, T. and Nelson, C. E.) Society of Economic Geologists, 1-32. doi.org/10.5382/SP.08.01.

- E.) Society of Economic Geologists, 245–277. doi.org/10.5382/Rev.13.07.
- Humphries, S. E (1984) The mobility of the rare earth elements in the crust. Developments in Geochemistry (Ed, Henderson, P.) Elsevier, 317–342.
- John, D. A (2001) Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, western USA: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 96 (8): 1827–1853. doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827.
- Kazemi, K., Modabberi, S., Xiao, Y., Sarjoughian, F., Kananian, A (2022) Geochronology, whole-rock geochemistry, Sr–Nd isotopes, and biotite chemistry of the Deh-Bala intrusive rocks, Central Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (Iran): Implications for magmatic processes and copper mineralization. *Lithos*, 408–409: 106544. doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106544.
- Khanahmadlou, S (2023) Geology, geochemistry, and genesis of Kourcheshmeh Pb–Zn–Cu mineralization, southwest of Takestan. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 74 pp. (in Persian with English abstract)
- Khanahmadlou, S., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Rahmati, N (2023a) Geological and mineralization characteristics of the Kourcheshmeh Pb–Zn–Cu occurrence, SW Takestan, Qazvin Province. 41st Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Khanahmadlou, S., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Rahmati, N (2023b) Kourcheshmeh occurrence: Intermediate-sulfidation epithermal base metal mineralization in the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt. 26th Conference of Geological Society of Iran, Urmia University, Urmia, Iran (in Persian)
- Khanahmadlou, S., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Rahmati, N (2024) Intermediate-sulfidation epithermal base metal mineralization in the Kourcheshmeh deposit (SW Takestan): Constraints on geology, mineralization, and geochemistry. *Journal of Economic Geology*, in press (in Persian with extended English abstract)
- Kouhestani, H. and Mokhtari, M. A. A (2019) Tashvir ore occurrence, NE Zanjan: Intermediate-sulfidation style of epithermal base metal (Ag) mineralization in the Tarom–Hashtjin zone. *Scientific Quarterly Journal of Geoscience*, 28 (110): 97–108 (in Persian with English abstract). doi.org/10.22071/gsj.2018.91903.1193.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z (2022a) Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of epithermal base metal veins in the Armaqan Khaneh mining district, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 69 (6): 844–860. doi.org/10.1080/08120099.2022.2033320.
- Andreeva, E., Matsueda, H., Okrugin, V. M., Takahashi, R., One, S (2013) Au–Ag–Te mineralization of the low-sulfidation epithermal Aginskoe deposit, Central Kamchatka, Russia. *Resource Geology*, 63 (4): 337–349. doi.org/10.1111/rge.12013.
- Cooke, D. R. and Simmons, S. F (2000) Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Gold in 2000* (Eds, Hagemann, S. G. and Brown, P. E.) Society of Economic Geologists, 221–244. doi.org/10.5382/Rev.13.06.
- Ebrahimi, S (2016) Study of Dehbala intensive, related alteration and mineralization (south Buin-Zahra). Unpublished M.Sc. Thesis, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, 167 pp. (in Persian with English abstract)
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., Inan, E. E (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth (Eds, Simmons, S. F. and Graham, I.) Society of Economic Geologists, 285–313. doi.org/10.5382/SP.10.15.
- Gemmell, J. B (2004) Low- and intermediate-sulfidation epithermal deposits. 24th Ct Gold Workshop (Eds, Cooke, D. R. Deyel, C. L., Pongratz J.) University of Tasmania, 57–63.
- Ghasemi Siani, M., Mehrabi, B., Nazarian, M., Lotfi, M., Corfu, F (2022) Geology and genesis of the Chomalu polymetallic deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 143: 104763. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104763.
- Ghorbani, A (2020) Geology, geochemistry, and genesis of Varmazyar Pb–Zn (Ag) mineralization, north of Zanjan. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 88 pp. (in Persian with English abstract).
- Ghorbani, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A (2022) Genesis of the Varmazyar Pb–Zn (Ag) occurrence, Tarom-Hashtjin metallogenic belt: Insights from ore geology, geochemistry and fluid inclusion studies. *Journal of Economic Geology*, 14 (1): 1–38 (in Persian with extended English abstract).
- Goodarzi, Z., Moghaddasi, S. J., Barzegar, H (2012) The formation and evolution of Lak polymetal ore deposit based on fluid inclusion studies, southwest of Boein Zahra, Qazvin province. *New Findings in Applied Geology*, 6 (12): 74–89 (in Persian with English abstract).
- Habibi, J (2007) Studies of mineralogy, geochemistry, and genesis of Lak polymetallic deposit in volcanic rocks, SW Buin-Zahra, Qazvin Province. Unpublished M.Sc. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, 155 pp. (in Persian with English abstract).
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., Gonzalez-Urien, E (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Gold in 2000* (Eds, Hagemann, S. G. and Brown, P.

- Iran. *Ore Geology Reviews*, 78: 41–57. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.016.
- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M. R., Moayyed, M., Maghfouri, S (2018) The Shah-Ali-Beiglou Zn–Pb–Cu (Ag) deposit, Iran: An example of intermediate-sulfidation epithermal type mineralization. *Minerals*, 8 (4): 148. doi.org/10.3390/min8040148.
- Nogole-sadat, M. A. A. and Hoshmandzadeh, A (1984) Geological map of Saveh, scale 1: 250,000. Geological Survey of Iran.
- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A. M., Pennacchioni, G., Mancktelow, N (2003) Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth Planet Scientific Letters*, 214 (1): 203–219. doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00372-8.
- Sabeva, R., Mladenova, V., Mogessie, A (2017) Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au–Ag deposit in Western Srednogie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 88: 400–415. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013.
- Saunders, J. A., Hofstra, A. H., Goldfarb, R. J., Reed, M. H (2014) Geochemistry of hydrothermal gold deposits. *Treatise on Geochemistry* (Eds, Holland, H. D. and Turekian, K. K.) Elsevier-Pergamon, 33–424.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P (2019) Mineralogy, alteration, and sulfur isotope geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit. NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28 (6): 882–901. doi.org/10.3906/yer-1902-1.
- Simmons, S. F., White, N. C., John, D. A (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *One Hundredth Anniversary Volume* (Eds, Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., Richards, J. P.) Society of Economic Geologists, 485–522. doi.org/10.5382/AV100.16.
- Tale Fazel, E., Alaei Moghtader, N., Oroji, A (2022a) Temperature condition, sulfidation state, and gold formation mechanism of the Atash-Anbar polymetallic deposit (south Qazvin) based on mineralization, alteration, and chemistry of ore minerals. *Petrological Journal*, 13 (2): 121–150 (in Persian with English abstract). doi.org/10.22108/jjp.2020.124097.1194.
- Tale Fazel, E., Moradi, M., Najafi Rashed, S (2022b) Genesis of Eocene volcanic-hosted copper deposits in the Kuh-e-Jarou Mining District (South Eshtehard): constraints from geology, mineralization and fluid inclusions. *Journal of Economic Geology*, 14 (1): 67–108 (in Persian with English abstract). doi.org/10.22067/econg.2021.52100.88283.
- Tale Fazel, E., Nevolko, P. A., Päsava, J., Xie, Y., Alaei, N., Oroji, A (2023) Geology, geochemistry, fluid Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z., Johnson, A. C (2018) Intermediate-sulfidation type base metal mineralization at Aliabad–Khanchy, Tarom–Hashtjin metallogenic belt. NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 93: 1–18. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.012.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Chang, Z., Qin, K. Z., Aghajani Marsa, S (2022b) Fluid inclusion, zircon U–Pb geochronology, and O–S isotopic constraints on the origin and evolution of ore-forming fluids of the Tashvir and Varmazyar epithermal base metal deposits, NW Iran. *Frontiers in Earth Science*, 10: 990761. doi.org/10.3389/feart.2022.990761.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhang, X. N (2020) Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidences from ore geology, fluid inclusion and O–S isotopes. *Ore Geology Reviews*, 126: 103752.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhao, J. X (2019a) Fluid inclusion and stable isotope constraints on ore genesis of the Zajkan epithermal base metal deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 109: 564–584. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.014.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A., Qin, K. Z., Zhao, J. X (2019b) Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb–Zn–Cu (Ag) deposit, Tarom–Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 113: 103087. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103087.
- Lottermoser, B. G (1992) Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7 (1): 25–41. doi.org/10.1016/0169-1368(92)90017-F.
- Mahzi, B (2020) Geology, geochemistry and genesis of Zajkan precious and base metal deposit, Tarom Sofla, Qazvin province. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 90 pp. (in Persian with English abstract)
- Mahzi, B., Kouhestani, H., Mokhtari, M. A. A (2022) Investigation of type and genesis of base metal mineralization in the Zajkan deposit (Tarom-e-Sofla, Qazvin Province) using geology, geochemistry, and fluid inclusions data. *Journal of Advanced Applied Geology*, 12 (3): 365–392 (in Persian with extended English abstract).
- McDonough, W. F. and Sun, S (1995) Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253. doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M., Marsh, E. E (2016) Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Gulojeh district, NW

- inclusions, and H–O–C–S–Pb isotope constraints on the genesis of the Atash-Anbar epithermal gold deposit, Urumieh–Dokhtar magmatic arc, central-northern Iran: *Ore Geology Reviews*, 153: 105285. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105285.
- Thompson, R. N (1982) Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18 (1): 49–107. doi.org/10.1144/sjg18010049.
- Wang, L., Qin, K. Z., Song, G. Y., Li, G. M (2019) A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023.
- White, N. C. and Hedenquist, J. W (1990) Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 36 (1–3): 445–474.
- Whitford, D. J., Korsch, M. J., Porritt, P. M., Craven, S. J. (1988) Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68 (1–2): 105–119. doi.org/10.1016/0009-2541(88)90090-3.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95 (1): 185–187. doi.org/10.2138/am.2010.3371.
- Yilmaz, H., Oyman, T., Sonmez, F. N., Arehart, G. B., Billor, Z (2010) Intermediate-sulfidation epithermal gold-base metal deposits in Tertiary subaerial volcanic rocks, Sahinli/Tespil Dere (Lapseki/Western Turkey). *Ore Geology Reviews*, 37 (3–4): 236–258. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.04.001.
- Yousefi, M., Rashidnejad Omran, N., Lotfi, M., Bazoobandi, M. H (2017) Copper and gold mineralization features in Deh Bala region, south of Takestan: *Open Journal of Geology*, 7 (7): 1022–1046. doi.org/10.4236/ojg.2017.77069.
- Zamanian, H., Rahmani, S., Zareisahameih, R (2019) Fluid inclusion and stable isotope study of the Lubin-Zardeh epithermal Cu–Au deposit in Zanjan Province, NW Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 112: 103014. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103014.

Ipak polymetal deposit (south Eshtehard): Intermediate-sulfidation epithermal style mineralization in the Mardabad–Bouinzahra volcanic belt

A. Madadi¹, H. Kouhestani^{2*}, M. A. A. Mokhtari³ and N. Rahmati⁴

1, 4- M. Sc. student, Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2, 3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* kouhestani@znu.ac.ir

Received: 2024.2.21 Accepted: 2024.6.1

Abstract

The Ipak polymetal deposit is located about 14 km south of Eshtehard (Alborz Province) and is part of the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt. Mineralization occurred as silica-sulfide zones (N90E/60-70N) hosted by Early-Middle Eocene tuff and lava units and has a close spatial relationship with the Middle Eocene quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite intrusion. The main ore zone is about 1 kilometer in length and up to 2 meters in thickness and is covered by a 3-to-0-meters intermediate argillic alteration halo. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrolusite, psilomelane, quartz, barite, calcite, and sericite-illite are the ore-forming minerals in the Ipak deposit. Cerussite, smithsonite, malachite, chalcocite, and goethite are formed during supergene processes. The ore minerals show disseminated, vein-veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, plumose, bladed, vug infill, and replacement textures. Six stages of mineralization can be distinguished at Ipak, where Cu, Pb, and Zn mineralization occurred as quartz-pyrite-chalcopyrite-galena-sphalerite veins and breccias in the second stage. Hydrothermal alteration comprises silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration. Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of ore samples, quartz monzodiorite intrusion, and host rocks (crystal tuff, and basaltic andesite lava) are comparable. This specifies that alteration and leaching of elements from the host volcanic rocks are involved in mineralization. Characteristics of the Ipak polymetal deposit are similar to the intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.

Keywords: Cu-Pb-Zn mineralization, Intermediate-sulfidation style of epithermal deposit, Ipak, Eshtehard, Mardabad–Bouinzahra

Introduction

As part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt hosts several Cu, Pb, Zn, and Au deposits and occurrences like Lak, Deh-Bala, Ipak, Kuh-e Jarou, Rudak, Ghomoshlou, Ghomoshdash, Qezel-Ahmad, Bidestan, Afshar-Abad, Boujafar, Guilan-Darreh, Atash-Anbar, Raman, Hajib, Chalambar, and Kourcheshmeh. These deposits are generally hosted by Early-Middle Eocene volcanic and volcanoclastic rocks and are temporally/spatially associated with Middle Eocene intrusions.

The Ipak polymetal deposit is located about 14 km south of Eshtehard, Alborz Province, and is part of the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt. This deposit has been extracted as underground mining for the past 50 years and is currently inactive as an abandoned mine. However, no comprehensive studies have been

conducted on the geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of the Ipak deposit. In this paper, we investigate the detailed geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry, and alteration styles of the Ipak deposit to constrain its ore genesis and mineralization evolution. These outcomes might be useful for the regional exploration of epithermal base and precious metal deposits in the Mardabad-Bouinzahra volcanic belt and other parts of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc.

Materials and methods

This research includes two parts, field and laboratory studies. During the fieldwork, the geological map, scale 1:1,000, of the Ipak deposit was prepared, and approximately seventy samples were collected from different rock units and ore veins and breccias. Among these, eight thin and fifteen polished thin

sections were examined using a transmitted and reflected polarized light microscope in the laboratory of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. The chemical composition of ore samples ($n = 9$), and fresh and barren host rocks ($n = 3$) was analyzed at the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran, Iran using the ICP-MS method.

Results and Discussion

The rock units outcropped in the Ipak deposit belong to the Early-Middle Eocene tuff and lava units and include pyroxene andesite, andesite, andesitic basalt, and trachyandesite-rhyodacite lavas, tuff, and ignimbrite, that intruded by Middle Eocene quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite intrusion and diabasic dykes. Mineralization at Ipak occurred as silica-sulfide zones within the early-middle Eocene tuff and lava sequence and is covered by 3-to-10-meter intermediate argillic alteration halos. The main ore zone has an N90E/60-70N trend and is about 1 kilometer in length and up to 2 meters in thickness. Hydrothermal alteration includes silicification, carbonate, intermediate argillic, and propylitic alteration; the first three are closely related to mineralization. Pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrolusite, psilomelane, quartz, barite, calcite, and sericite-illite are the ore-forming minerals in the Ipak mineralization. Cerussite, smithsonite, malachite, chalcocite, and goethite are formed during supergene processes. The ore minerals show

disseminated, vein-veinlets, brecciated, crustiform, colloform, cockade, plumose, bladed, vug infill, and replacement textures.

The mineralization processes at the Ipak deposit can be divided into six stages. Stage 1 is represented by the silicification of host rocks along with minor disseminated pyrite (often oxidized). Stage 2 is characterized by vein-veinlets and breccias with quartz cement that contain variable amounts of pyrite, chalcopyrite, galena, and sphalerite. Stage 3 is marked by quartz and calcite along with manganese ores (psilomelane, pyrolusite) veins and breccia cement. Stage 4 is marked by barite vein-veinlets with no sulfide minerals. Stage 5 is represented by quartz and calcite as vein-veinlets and vug infill. Stage 6 is related to supergene processes. The Chondrite-normalized trace elements and REE patterns of mineralized samples, quartz monzodiorite intrusion, and fresh host rocks (crystal tuff and basaltic andesite lava) are similar and indicate that host rocks are probably involved in mineralization. These patterns are almost similar for different ore samples, which can indicate they were formed by the same mineralization system.

Conclusions

Our data reveal that the characteristics of the Ipak polymetal deposit are similar to the intermediate-sulfidation type of epithermal deposits.