



ویژگی‌های کانی‌سازی و سیالات درگیر ذخیره مس چینه کران (نوع مانتو) پیرمردان، جنوب غرب شاهرود

سوسن ابراهیمی*

گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۷

چکیده

محدوده معدنی پیرمردان در ۱۳۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان شاهرود و ۲۵ کیلومتری غرب روستای ترود واقع شده و از نظر زمین‌شناسی در کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین قرار گرفته است. سنگ میزبان کانی‌سازی، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت، برش آتشفشانی و توف است که متحمل دگرسانی‌های سریستی-کربناتی و پروپلیتیکی شده‌اند. کانه‌زایی به صورت رگه‌ای و چینه کران تشکیل شده و دارای بافت پراکنده، پرکننده فضای خالی، داربستی و رگچه‌ای است. کالکوسیت و مالاکیت کانه‌های اصلی مس هستند که با مقادیری هماتیت، کالکوپیریت، پیریت، کولیت و رگچه‌های کلسیت و کوارتز همراه هستند. داده‌های میان‌بارهای سیال کلسیت مربوط به مرحله کانی‌سازی، نشان‌دهنده دمای همگن‌شدگی ۱۱۷ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۱/۳ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، بافت و ساخت کانسنگ و داده‌های حاصل از میان‌بارهای سیال، کانی‌سازی پیرمردان قابل مقایسه با ذخایر مس نوع مانتو است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌سازی مس، سیالات درگیر، مس نوع مانتو، شاهرود، ترود-چاه شیرین

مقدمه

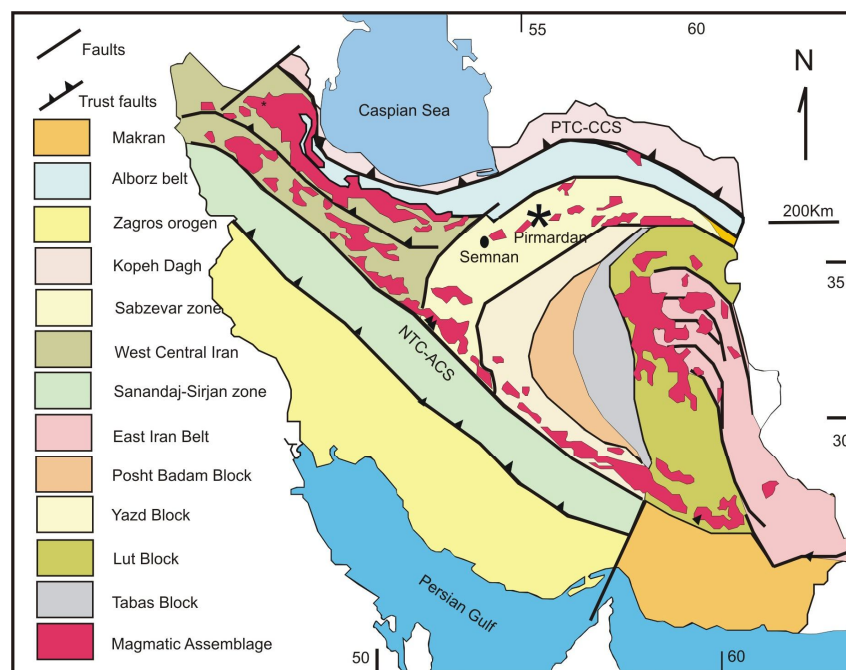
ترود-چاه شیرین قرار گرفته است. این محدوده در تقسیم‌بندی ساختاری ایران (شکل ۱) در شمال زون ماگمایی شرق ایران و در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده است (Stöcklin, 1968; Alavi, 1991). تعداد زیادی ذخایر و آثار معدنی فلزات پایه و گران‌بها در زون ترود-چاه شیرین گزارش شده است که می‌توان به کانسار پلی‌متال مس-سرب-روی چاه موسی و قله کفتران (Imamjomeh et al., 2008)، کانسار رگه‌ای طلای باغو (Rashidnejad Omran, 1992)، کانسار ماسیو سولفاید مس-نقره گرمابه پایین (Tashi et al.,)

محدوده معدنی پیرمردان در ۲۵ کیلومتری غرب روستای ترود، ۱۳۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان شاهرود و در استان سمنان واقع شده است. این منطقه در چهار گوش ۱:۲۵۰۰۰۰ ترود و در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان قرار گرفته است و منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع در بازه طول شرقی ۴۳' ۴۴" ۵۴° تا ۳۷' ۴۵" ۵۴° عرض شمالی ۲۷' ۰۴" ۳۵° تا ۳۴' ۲۸" ۳۵° را شامل می‌شود. سنگ میزبان کانی‌سازی، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن هستند و از نظر زمین‌شناسی در کمان ماگمایی

معرفی شده‌اند. شناخت و تعیین مدل کانی‌سازی این نوع ذخایر در مناطق مرکزی، شرق و شمال شرق ایران، می‌تواند چشم‌انداز نوینی را در اکتشاف و بهره‌برداری مس داشته باشد (Samani, 2002). بررسی‌های تفصیلی در محدوده مورد بحث شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰، بررسی‌های ژئوفیزیک به روش ژئوالکتریک (IP, Rs)، حفر ۵۴۰ متر مکعب ترانشه، حفر ۶ گمانه اکتشافی (اغلب حفاری‌ها با شیب عمود و تقریباً عمودی) با عمق‌های ۳۴ تا ۴۵ متر (مجموع ۲۶۰ متر) و آنالیز شیمیایی بیش از ۸۰ نمونه ICP-OES برای عیارسنجی و تخمین ذخیره اولیه انجام شده است. حداکثر مقدار مس ۳/۳۵ درصد، کمترین مقدار آن ۰/۰۷ درصد و میانگین ۲ درصد است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی ویژگی‌های کانی‌سازی بر مبنای بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و سیالات درگیر است.

(2017)، ذخیره اپی‌ترمال طلا و فلزات پایه گندی و ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004) اشاره کرد.

همچنین شواهد بسیاری از کانی‌سازی مس افشان (نوع مانتو)، در شمال شرق ایران وجود دارد که می‌توان به کانسارهای محدوده معدنی عباس‌آباد (معدن بزرگ، لب‌کال، آسیادیو، دامن‌جلا) (Salehi et al., 2016)، چغندرسر (Tavasoli and Lotfi, 2007)، کانسار مس ورزگ-قائن (Alizadeh et al., 2013)، کانسار مس چشمه‌گز (نسیم) (Mahvashi and Malekzade, 2016) و کانسار مس گرماب (Adelpour et al., 2016) اشاره کرد. این ذخایر اغلب در بالاترین ردیف آتشفشانی ائوسن واقع شده است (Samani, 2002) و با عنوان‌های گوناگونی مانند ماسیوسولفاید (Lotfi and Nouroozi, 2001)، رگه‌ای و گرمایی (Alinia and Dehghannejad, 2004) و نوع مانتو (Alizadeh et al., 2013; Salehi et al., 2016; Adelpour et al., 2016; Mahvashi and Malekzedeh Shafaroudi, 2016)



شکل ۱. نقشه ساده‌شده زمین‌ساخت ایران با زون‌های زمین‌ساختی گوناگون و توزیع مجموعه‌های ماگمایی سنوزوئیک برگرفته از علوی و استوکلین (Stöcklin, 1968; Alavi, 1991)، علامت ستاره موقعیت محدوده پیرمردان در شمال شرق ایران را نشان می‌دهد.

Fig. 1. Simplified tectonic map of Iran showing various geological divisions and distribution of the Cenozoic magmatic assemblages (after Alavi, 1991; Stöcklin, 1968). The star shows the location of the Pirmardan area in northeast Iran.

روش مطالعه

این پژوهش بر مبنای مشاهدات میدانی و نمونه‌برداری از رخنمون‌های سطحی برای بررسی‌های آزمایشگاهی استوار است. برای شناخت کانی‌شناسی کانسنگ و دگرسانی سنگ میزبان، ۴۰ مقطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی، توسط میکروسکوپ نور انعکاسی در دانشگاه صنعتی شاهرود مورد بررسی قرار گرفت و سپس ۸ نمونه برای بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال انتخاب شد. بررسی میان‌بارهای سیال، با استفاده از صفحه گرم‌کننده و سردکننده مدل MDS600 ساخت شرکت Linkam در آزمایشگاه میکروترموپارامتری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شده است. درستی اندازه‌گیری‌ها برای دماهای گرمایش $\pm 2^{\circ}\text{C}$ و برای سرمایش $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ است. برای بررسی‌های دقیق‌تر کانی‌شناسی سنگ میزبان دگرسان‌شده و عیار کانی‌سازی، تعداد ۱۰ نمونه به روش پراش پرتو X^۱ و ۸۰ نمونه به روش ICP-OES توسط شرکت نوین شیمیار مورد آنالیز قرار گرفت.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کمان ماگمایی تروود-چاه‌شیرین با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران قرار گرفته است و جزئی از ایران مرکزی محسوب می‌شود (Stöcklin, 1968). این ناحیه از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری در شمال‌زون ماگمایی شرق ایران و در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده است (Alavi, 1991). کمان ماگمایی تروود-چاه‌شیرین به صورت یک برآمدگی (فرازمین) بین گسل‌های تروود در جنوب و انجیلو در شمال قرار گرفته و به طور غالب از سنگ‌های آذرین ترشیری تشکیل شده است (Hushmandzadeh et al., 1978); اگرچه به طور پراکنده سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک و مزوزوئیک نیز در آن گسترش یافته‌اند. شروع فعالیت‌های ماگمایی در این ناحیه مربوط به اتوسن میانی است که تا پلیوسن ادامه یافته و از

قدیم به جدید به سه دسته تقسیم شده‌اند: ۱- فعالیت‌های آتشفشانی ریولیت و ریوداسیت همراه با جریان‌های آندزیتی و توف، ۲- سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری آندزیت، تراکی‌آندزیت و آندزیت بازالتی و ۳- توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب داسیت و ریوداسیت (Hushmandzadeh et al., 1978). سنگ‌های آتشفشانی این ناحیه با مقادیر بالای CaO، دارا بودن ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا، غنی‌شدگی عناصر LILE و تهی‌شدگی عناصر HFSE و ویژگی‌های مناطق کمان آتشفشانی درون قاره‌ای مرتبط با فرورانش را نشان می‌دهند (Rashidnejad Omran, 1992; Shamanian et al., 2004; Haghghi et al., 2013).

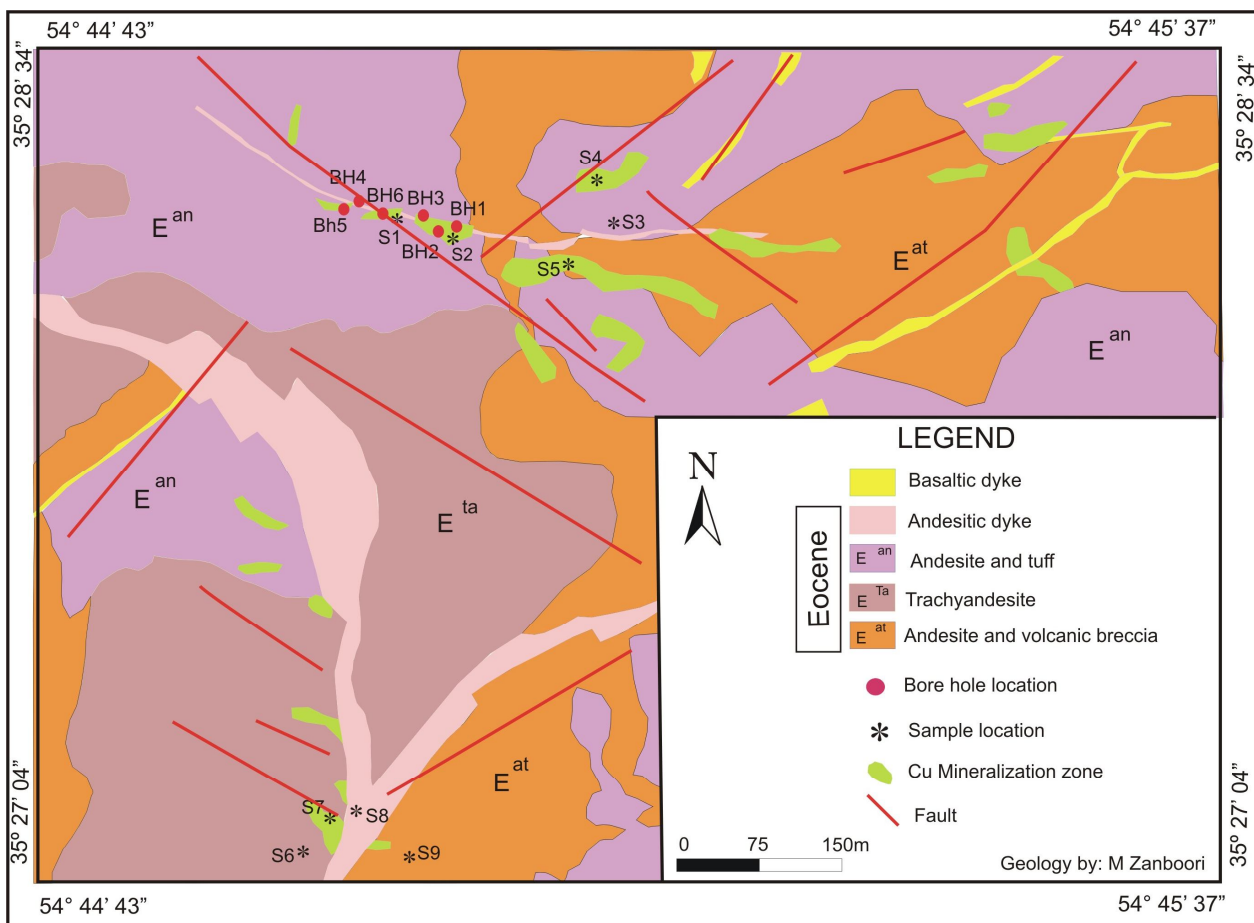
زمین‌شناسی منطقه‌ای

قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناختی در منطقه پیرمردان (شکل ۲)، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب آندزیت و برش آتشفشانی هستند (E^{at}). این واحد در نواحی میانی و جنوب نقشه گسترش بیشتری دارد و دگرسانی پروپلیتیک و به مقدار کمتر کربناتی را متحمل شده است و رگچه‌های سیلیسی-کربناتی شکستگی‌های ظریف سنگ را پر کرده است. واحد E^{ta} که اغلب در نواحی میانی و غربی نقشه برون‌زد دارد، از تراکی‌آندزیت تشکیل شده و متحمل دگرسانی‌های سریستی-کربناتی و پروپلیتیک شده است و حفره‌ها و شکستگی‌های سنگ توسط سیلیس پر شده است. تعدادی از رخنمون‌های کانه‌زایی در برخورد این واحد با واحد قدیمی‌تر مشاهده شده است. واحد E^{an} که بخش وسیعی از شمال منطقه را پوشانده شامل آندزیت و توف است که متحمل دگرسانی پروپلیتیک شده و شکستگی‌های ظریف آن اغلب توسط کربنات پر شده است. تعدادی از رخنمون‌های کانه‌زایی نیز در این واحد مشاهده شده است.

جوان‌ترین رخداد ماگمایی در منطقه، دایک‌هایی با ترکیب بازالتی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب هستند که در میان

جنوب غرب و شمال غرب-جنوب شرق حضور دارند (شکل ۲). این دایک‌ها نیز کانه‌زایی را قطع کرده است و در برخی مناطق آثار کانی‌سازی مالاکیت در مجاورت این دایک‌ها مشاهده می‌شود. ضخامت دایک‌های موجود در منطقه ۰/۵ تا ۷۰ متر و طول آنها چند ده متر تا ۱ کیلومتر هستند.

واحدهای موجود در منطقه تزریق شده‌اند و در بعضی موارد کانه‌زایی را قطع کرده‌اند؛ اما در مجاورت این دایک‌ها شواهدی از کانه‌زایی مشاهده نشده است (شکل ۲). ضخامت این نوع دایک‌ها ۰/۵ تا ۱۰ متر و طول آنها تا ۱ کیلومتر است. دایک‌های قدیمی‌تر با ترکیب آندزیتی با روند شمال-شمال شرقی، جنوب-



شکل ۲. نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی-معدنی محدوده کانی‌سازی پیرمردان. موقعیت گمانه‌های اکتشافی نیز مشخص شده است. اقتباس از زنبوری (Zanboori, 2017)

Fig. 2. Simplified geological- mineral map of the Pirmardan area. Locations of the boreholes are shown (after Zanboori, 2017)

با روند NW-SE است. اغلب زون‌های کانی‌سازی روند تقریبی NE-SW را نشان می‌دهند که با روند گسل‌های نرمال هم‌خوانی دارد (Zanboori, 2017). بررسی‌های صحرائی و مقاطع نازک نشان می‌دهد، سنگ میزبان

بررسی‌های صحرائی بر روی شکستگی‌ها و گسل‌ها نشان می‌دهد، اغلب شکستگی‌ها در دو راستای کلی با روند N10 و N40 با شیب متغیر SW و SE هستند. گسل‌های چپ‌گرد و نرمال با روند تقریبی SW-NE و گسل‌های راست‌گرد فشارشی

قابل تشخیص است که واحدهای منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. مهم‌ترین دگرسانی‌های شناسایی شده در منطقه شامل دگرسانی پروپیلیتیک و سریستی-کربناتی هستند. کانی‌های حاصل از دگرسانی به صورت جانیشینی کانی‌های اولیه و در مواردی شکستگی‌ها و حفره‌های موجود در سنگ را پر کرده است. دگرسانی سریستی-کربناتی اغلب در مجاورت توده‌های معدنی دیده می‌شود و ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی مس دارد که با مقادیر کمتری از سیلیس همراه است. گسترش این دگرسانی در اطراف توده‌های معدنی به ۱۰ متر نیز می‌رسد. سریست، کوارتز، کلسیت، هماتیت و کانی‌های رسی مانند ایلیت، کائولینیت و مونت موریلونیت کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی هستند که واحدهای سنگ میزبان را تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۳-B و C). کربنات و کوارتز، شکستگی‌ها و حفره‌های موجود در سنگ و کانی‌هایی نظیر پلاژیوکلاز و پیروکسن را پر کرده‌اند. دگرسانی پروپیلیتیک از گسترش بیشتری در منطقه برخوردار بوده و با دگرسانی سریستی-کربناتی هم‌پوشانی دارد. این دگرسانی علاوه بر سنگ‌های میزبان کانی‌سازی در نقشه زمین‌شناسی پیرمردان، سنگ‌های خارج از محدوده را نیز تحت تأثیر قرار داده است. مهم‌ترین کانی‌های موجود در این دگرسانی کلریت و اپیدوت هستند که با مقادیری سریست، کلسیت و اکسیدهای آهن همراه هستند (شکل ۳-D). محلول‌های داغ کلسیک، بلورهای پلاژیوکلازها را به کلریت و گاه به اپیدوت تبدیل کرده است و کانی‌های تیره مانند هورنبلند و پیروکسن به کلریت و اپیدوت و مقادیر کمتری کربنات تجزیه شده‌اند.

کانه‌زایی و کانی‌شناسی

با توجه به بررسی‌های انجام شده، کانی‌سازی کربناتی-سولفیدی مس پیرمردان از نوع استراتاباند بوده و در ارتباط با فعالیت‌های گرمابی است که از شکستگی‌های موجود در منطقه پیروی می‌کند و به صورت رگه و رگچه‌های ظریف در واحدهای آندزیت، تراکی آندزیت و برش آتشفشانی ائوسن به وقوع پیوسته است (شکل ۴). سنگ میزبان کانی‌سازی در عمق نیز آندزیت،

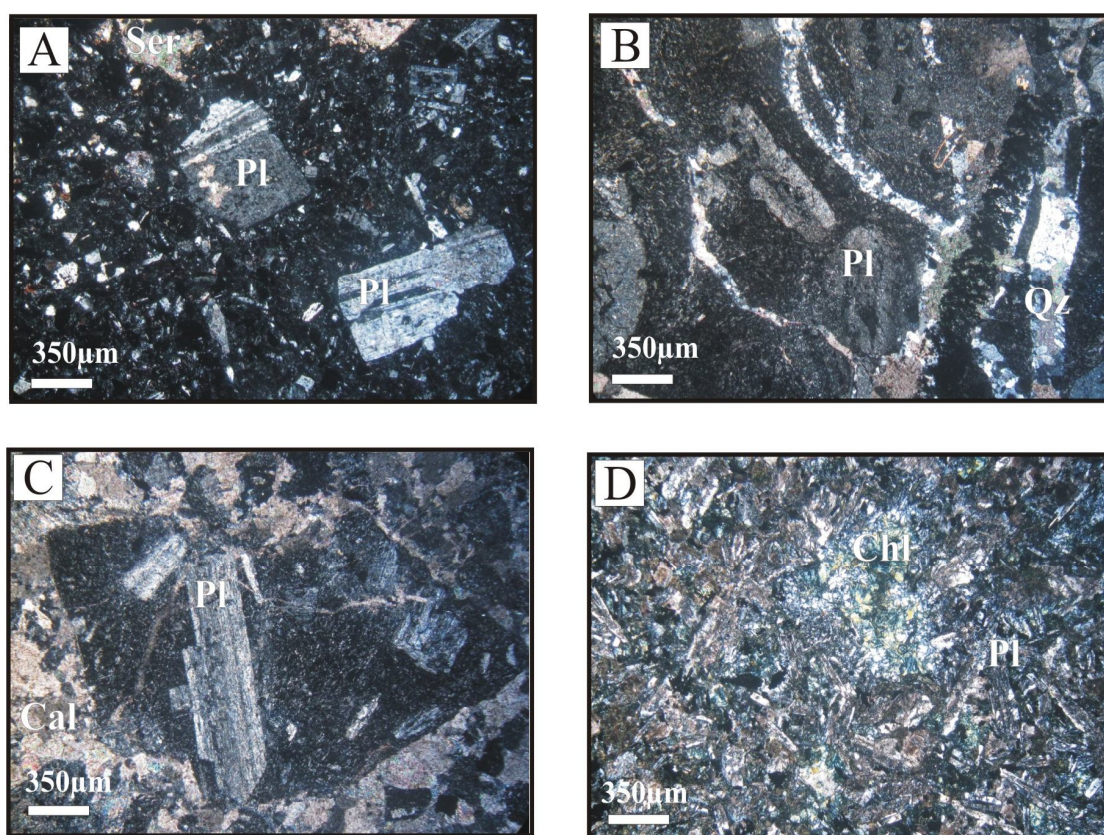
اصلی کانی‌سازی شامل آندزیت، تراکی آندزیت و برش آتشفشانی است. واحد آندزیت با بافت پورفیریک و خمیره شیشه‌ای-میکروولیتی تشکیل شده است (شکل ۳-A). میکروولیت‌ها اغلب حاوی پلاژیوکلاز، هورنبلند و کانی‌های تیره هستند. پلاژیوکلاز و هورنبلند فنوکریست‌ها را تشکیل داده‌اند. پلاژیوکلاز با ابعادی تا ۱ میلی‌متر و با فراوانی ۲۰ درصد در متن سنگ دیده شد و هورنبلند با ابعادی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و فراوانی ۵ درصد مشاهده شد. هورنبلند در مواردی اوپاسیتی شدن را نشان می‌دهد. واحد تراکی آندزیت با بافت پورفیریک و خمیره شیشه‌ای-میکروولیتی تشکیل شده است (شکل ۳-B). خمیره سنگ به‌طور عمده از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، کانی‌های تیره و شیشه تشکیل شده است. فنوکریست-های آن از پلاژیوکلاز و هورنبلند و به مقدار کمتری پیروکسن تشکیل شده است. پلاژیوکلاز با ابعادی تا ۰/۷ میلی‌متر با ماکل آلبیتی تشکیل شده است و حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. این کانی اغلب وجه‌دار بوده و در بسیاری موارد به سریست و کربنات تجزیه شده است. هورنبلند به رنگ سبز، ۱۵ درصد ترکیب مودال سنگ را تشکیل می‌دهد که اغلب اوپاسیتی شدن را نشان می‌دهد و در بسیاری از موارد به کلریت و اکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند. برش آتشفشانی از زمینه آندزیتی تشکیل شده است که دارای خمیره شیشه‌ای و میکروولیتی است (شکل ۳-C). فنوکریست‌ها از پلاژیوکلاز و قطعات برشی از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیتی تشکیل شده است. پلاژیوکلاز و کانی‌های تیره به کلریت و اپیدوت و در مواردی به سریست و کانی‌های رسی تبدیل شده است که نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک و کربناتی است.

دگرسانی سنگ میزبان

دگرسانی گرمابی در منطقه پیرمردان از گسترش وسیعی برخوردار است و محدود به رخنمون‌های معدنی نیست. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و نتایج آنالیز XRD دو نوع دگرسانی در ابعاد محلی و ناحیه‌ای در محدوده پیرمردان

شکستگی‌های سنگ میزبان با کربنات و کوارتز همراه با مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و مقادیر جزئی پیریت پر شده است. برای آگاهی از کانی‌شناسی کانسنگ و باطله و روابط همیافتی آنها و دگرسانی‌های موجود در منطقه، ۴۰ مقطع نازک-صیقلی، نازک و صیقلی تهیه و بررسی شد.

تراکی‌اندزیت، توف با ترکیب آندزیتی و برش آتشفشانی است. دگرسانی‌های موجود در منطقه شامل پروپلیتیک، سریسیتی-کربناتی هستند که دگرسانی پروپلیتیک بیشترین گسترش و کمترین تغییرات را در عمق نشان می‌دهد. پهنای بخش کانی‌زایی از ۰/۵ تا حدود ۲۰ متر و طول آنها از ۵ تا ۳۰۰ متر متغیر است که تا عمق ۲۸ متری ادامه دارد. اغلب درزه و



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از سنگ میزبان کانی‌سازی و دگرسانی‌های موجود در منطقه پیرمردان، A: سنگ میزبان آندزیت حاوی فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از میکرولیت و شیشه که به سریسیتی تجزیه شده است، نمونه مربوط به عمق ۲۲ متری از گمانه Bh3، B: سنگ میزبان تراکی‌اندزیت که متحمل دگرسانی سریسیتی شده و حاوی رگچه‌های کوارتزی است، نمونه مربوط به سطح است (S6)، C: برش آتشفشانی که حاوی قطعات آندزیتی بوده و متحمل دگرسانی سریسیتی-کربناتی شده است، نمونه مربوط به عمق ۳ متری از گمانه Bh2 و D: تبدیل کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز به اپیدوت و کلریت طی دگرسانی پروپلیتیک، نمونه مربوط به سطح است (S3)، علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ser: سریسیتی، Pl: پلاژیوکلاز، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Chl: کلریت).

Fig. 3. Microscopic images of mineralization and alterations in the Pirmardan area, A: Andesitic host rock including plagioclase phenocrysts in the microlithe and glassy of the groundmass which altered to sericite. Sample from Bh3, 22m depth, B: Trachyandesite host rock which bearing sericitic alteration and contain quartz veinlets. Sample related to the surface (S6), C: Volcanic breccia contains fragments of andesite and bearing sericitic-carbonate alteration. Sample from Bh2, 3m depth, and D: Hornblende and plagioclase minerals convert to epidote and chlorite during propylitic alteration. Sample related to the surface (S3). Abbreviations after Whitney and Evans, (2010) (Ser: sericite, Pl: plagioclase, Cal: calcite, Qz: quartz, Chl: chlorite).



شکل ۴. نمایی از کانی‌سازی مس کربناتی با سنگ میزبان تراکی‌اندزیت در منطقه پیرمردان، با ترانشه‌ای به طول ۲۰ متر (دید به سمت جنوب‌غرب)

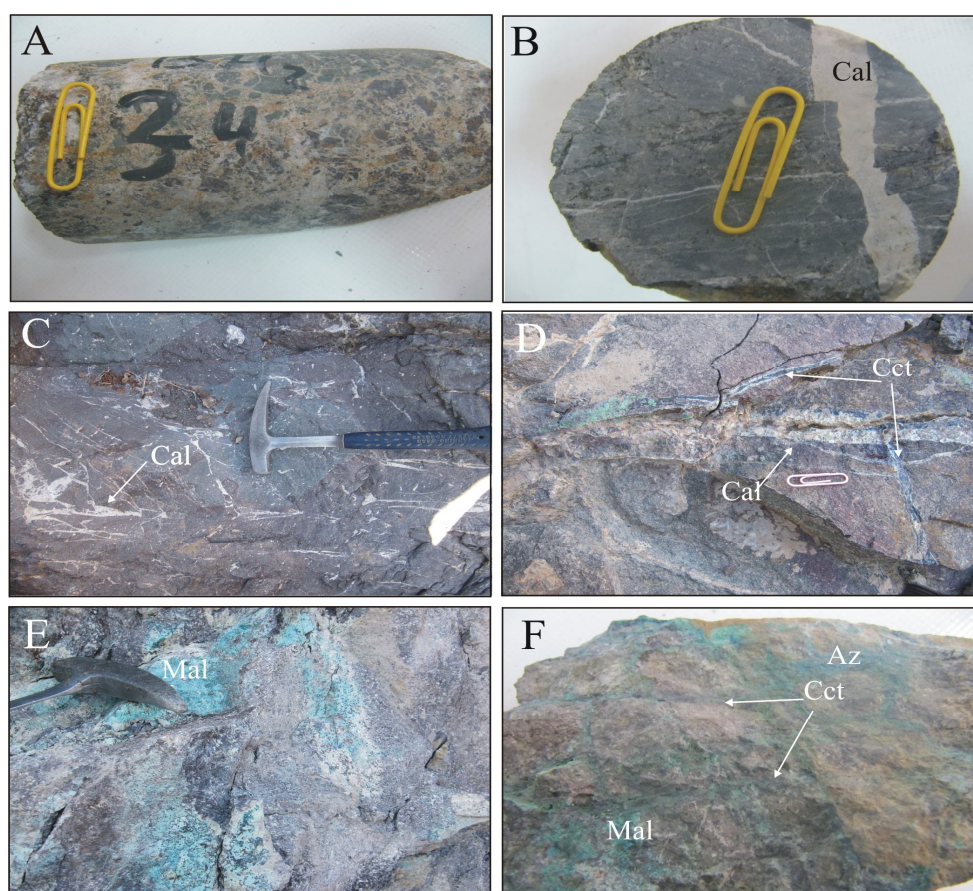
Fig. 4. The view of carbonate copper mineralization with the trachyandesite host rock in the Pirmardan area, with the length of 20 m trench (View to the southwest)

مرحله سوپرژن به دو زیر مرحله سولفیدی و اکسیدی تقسیم می‌شوند. در مرحله آغازین کانی‌سازی هیپوژن پیریت و کالکوپیریت همراه با اپیدوت، کلریت و سربیسیت و مقادیری کوارتز و کلسیت تشکیل شده است. پیریت به مقدار بسیار کم و با ابعادی کمتر از ۵۰ میکرون در حفره‌های متن سنگ به صورت افشان دیده می‌شود (شکل ۶-۱). کالکوپیریت با فراوانی بسیار کم و به صورت دانه‌های نیمه‌وجه‌دار تا بی‌وجه با ابعادی کمتر از ۱۰۰ میکرون به صورت افشان و شکافه پرکن در حفره‌ها و فضاهای خالی سنگ حضور دارند (شکل ۶-۲). شروع تشکیل کالکوسیت و همچنین رگچه‌های کوارتز و کلسیت در این مرحله بوده؛ اگرچه فراوانی آنها در مرحله اصلی کانی‌سازی هیپوژن بیشتر است. در مرحله اصلی کانی‌سازی هیپوژن کالکوسیت و هماتیت (اغلب به صورت تیغه‌ای) تشکیل شده است (شکل ۶-۲ و ۳). کالکوسیت مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی سولفیدی مس است که به صورت رگچه‌ای و پراکنده در شکستگی‌ها و فضاهای خالی سنگ و کانی‌ها (پلاژیوکلاز-هورنبلند-پیروکسن) تشکیل شده است که در مواردی

کانی‌سازی به صورت رگه و رگچه‌ای، پراکنده، داربستی، پرکننده فضای خالی و برشی (شکل ۵-۱) در سنگ میزبان تشکیل شده است (شکل ۵). رگچه‌های کلسیتی و به مقدار کمتر سیلیسی نیز همراه با ماده معدنی شکستگی‌ها را پر کرده و ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی در منطقه نشان می‌دهند (شکل ۵-۲، ۳ و ۴). رگچه‌های حاوی ماده معدنی از دو میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر متغیر است (شکل ۵-۴) و اغلب شکستگی‌های موجود در سنگ‌ها و کانی‌ها را پر کرده است. بررسی‌های کانی‌شناسی در منطقه، تشکیل مس به صورت کانی‌های کربناتی و سولفیدی مانند مالاکیت، آزوریت و کالکوسیت همراه با مقادیر بسیار کمی پیریت و کالکوپیریت را نشان می‌دهد (شکل ۵-۴ و ۵). ماده معدنی به طور عمده در شکستگی‌ها و حفره‌های سنگ و همچنین در حفره‌ها و شکستگی‌های ریز کانی‌هایی نظیر هورنبلند، پلاژیوکلاز و پیروکسن تشکیل شده است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، روابط بافت، ساخت و کانی‌شناسی می‌توان کانی‌سازی را به دو مرحله هیپوژن و سوپرژن تقسیم کرد (شکل ۷). مرحله هیپوژن به دو زیر مرحله آغازین و اصلی و

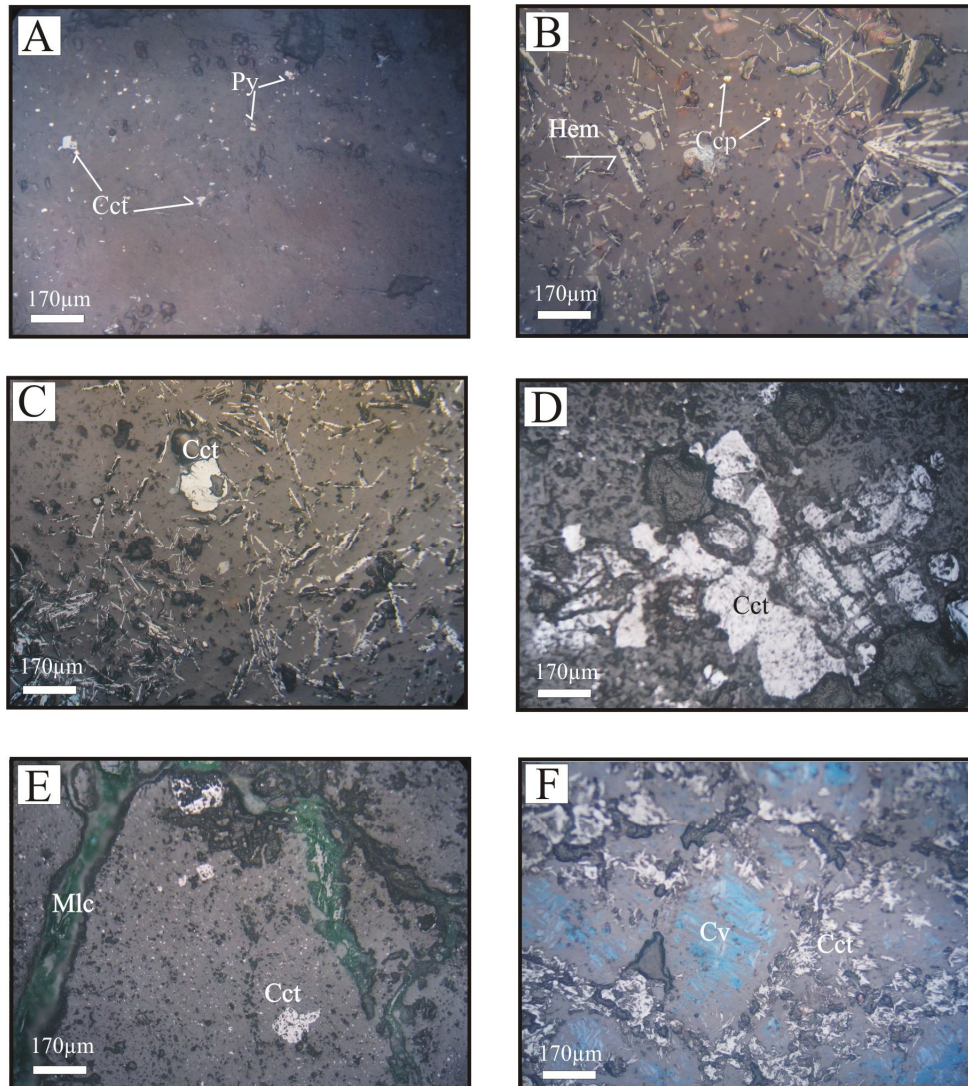
کانی‌های اکسیدی شامل مالاکیت، آزوریت و گوتیت است. کانی‌های مالاکیت و آزوریت که اغلب شکستگی‌ها و حفره‌های سنگ را پر کرده است، از اکسایش کانی‌های سولفیدی تشکیل شده است (شکل ۶-E و F) و گوتیت نیز از دگرسانی کانی‌های اکسید آهن مانند هماتیت و مگنتیت و یا پیریت تشکیل شده است.

کالکوسیت به کوولیت تجزیه شده است (شکل ۶-D و F). رگچه‌های کلسیتی و به مقدار کمتر کوارتزی در این مرحله گسترش بیشتری داشته و ماده معدنی مانند کالکوسیت درون این رگچه‌ها تشکیل شده است. مرحله سوپرژن به دو گروه کانی‌های اکسیدی و سولفیدی تقسیم می‌شود. کانی‌های سولفیدی شامل کالکوسیت ثانویه (حاصل تجزیه کالکوپیریت) و کوولیت است که از تجزیه کالکوسیت اولیه و کالکوپیریت حاصل شده‌اند.



شکل ۵. تصاویر ماکروسکوپی از بافت کانی‌سازی و ماده معدنی در کانی‌سازی مس پیرمردان، A: بافت برشی در سنگ میزبان آندزیتی، نمونه از عمق ۳۴ متری از گمانه Bh2، B و C: رگچه‌های کلسیتی در سنگ میزبان آندزیت، نمونه مربوط به عمق ۲۰ متری از گمانه Bh1، D: رگچه‌های کالکوسیت همراه با کلسیت در سنگ میزبان آندزیت که ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی مس نشان می‌دهد، E: کانی‌سازی کربناتی مس (مالاکیت و آزوریت) در سنگ میزبان آندزیتی و F: بافت داربستی همراه با کانی‌سازی کربناتی-سولفیدی مس. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (کلسیت: Cal، آزوریت: Az، مالاکیت: Mal، کالکوسیت: Cct).

Fig. 5. Macroscopic images of the textures and minerals in the Pirmardan area, A: Breccias texture in the andesitic host rock. Sample from Bh2, 34m depth, B and C: Veinlets of calcite in the andesitic host rock, Sample from Bh1, 20m depth, D: Calcite associated chalchocite veinlets in andesitic host rock, which are related to copper mineralization, E: Carbonate copper mineralization (malachite and azurite) in the andesitic host rock, and F: Stockwork texture associated copper carbonate- sulfide mineralization. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Az: azurite, Mal: malachite, Cct: chalchocite).



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌سازی مس پیرمردان، A: کانی‌های پیریت و کالکوسیت در حفره‌های سنگ میزبان آندزیتی (مربوط به مرحله اول هیپوژن)، نمونه مربوط به سطح است (S5)، B: پراکندگی کالکوپیریت، هماتیت و کالکوسیت در سنگ میزبان آندزیتی (مربوط به مرحله اصلی هیپوژن)، نمونه مربوط به سطح است (S4)، C: دانه‌های وجه‌دار کالکوسیت همراه با تیغه‌های هماتیت در حفره‌های سنگ میزبان (مربوط به مرحله اصلی هیپوژن)، نمونه مربوط به سطح است (S4)، D: دانه‌های درشت کالکوسیت در سنگ میزبان (مربوط به مرحله اصلی هیپوژن)، نمونه مربوط به سطح است (S5)، E: شکستگی‌های پر شده با مالاکیت (مربوط به مرحله اکسیدی سوپرژن)، نمونه از عمق ۱۳ متری مربوط به گمانه Bh4 و F: تبدیل کالکوسیت به کوولیت (مربوط به مرحله سولفیدی سوپرژن)، نمونه از عمق ۱۳ متری مربوط به گمانه Bh4، علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Py: پیریت، Cct: کالکوسیت، Hem: هماتیت، Ccp: کالکوپیریت، Mlc: مالاکیت، Cv: کوولیت).

Fig. 6. Microphotographs images from Pirmardan copper mineralization, A: Pyrite and chalcocite minerals in the andesitic host rock cavities, (related to the early hypogene stage); sample from surface (S5), B: Chalcopyrite, hematite and chalcocite minerals in the andesitic host rock cavities, (related to the main hypogene stage); sample from surface (S4), C: Euhedral chalcocite grains associated hematite in the host rock cavities, (related to the main hypogene stage); sample from surface (S4), D: Coarse grains chalcocite in the host rock, (related to the main hypogene stage); sample from surface (S5), E: Microfractures filled by malachite, (related to the oxidation stage); sample from borehole Bh4, 13m depth, and F: Chalcocite replaced by covellite, (related to the sulfidation stage); sample from borehole Bh4, 13m depth, Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Py: pyrite, Cct: chalcocite, Hem: hematite, Ccp: chalcopyrite, Mal: malachite, Cv: covellite).

Mineral	Hypogene Stage		Supergene Stage	
	Early Stage	Main Stage	Sulfidation Stage	Oxidation Stage
Chlorite	-----	-----		
Sericite	-----	-----		
Epidote	-----	-----	-----	
Quartz	-----	-----		
Calcite	-----	-----		
Hematite		-----		
Pyrite	-----	-----		
Chalcopyrite	-----	-----		
Chalcocite		-----	-----	
Covellite			-----	
Malachite				-----
Geothite				-----
Azorite				-----

شکل ۷. توالی پاراژنتیکی مراحل کانی‌سازی در منطقه پیرمردان

Fig. 7. Mineralization paragenesis sequence in the Pirmardan area

تک‌فازی مایع و تک‌فازی بخار تشخیص داده شد. درجه پرشدگی میان‌بارهای سیال بین ۰/۶۷ تا ۰/۹۴ است. آزمایش‌های ریزدماسنجی به‌طور عمده بر روی میان‌بارهای غنی از مایع که با ناپدید شدن بخار همگن می‌شوند، انجام شده است. علت انتخاب میان‌بارهای غنی از مایع این است که به هنگام گرم شدن میان‌بارهای غنی از بخار (بیش از ۶۰ درصد بخار)، حباب بخار تیره‌رنگ به‌سرعت با حاشیه تیره میان‌بار (دیواره کانی میزبان) تداخل می‌کند و در این حالت خطای اندازه‌گیری بالا می‌رود؛ از این‌رو برای پرهیز از خطا، در بیشتر موارد از میان‌بارهای غنی از مایع استفاده شده است. با توجه به محتوای میان‌بارها و معیارهای تشخیص میکروسکوپی، هیچ شاهدهی از حضور CO₂ مایع یا گاز و کانی‌های نوزاد در میان‌بارها دیده‌نشده.

بررسی سیالات درگیر

برای آگاهی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، منبع و تحول سیال کانه‌دار، ۸ مقطع دوبر-صیقلی (از رگچه‌های کلسیت و کوارتز) با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر تهیه و بررسی شد. پس از پتروگرافی میان‌بارهای سیال، ۶ نمونه کلسیت مربوط به مرحله اصلی کانی‌سازی، برای اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی انتخاب شد. نمونه‌های مورد بررسی، از ترانشه و گمانه‌های حفاری هستند (جدول ۱).

مطابق با معیارهای رودر (Roedder, 1984)، میان‌بارهای بررسی شده به‌طور عمده از نوع اولیه هستند. میان‌بارها اغلب به شکل‌های نامنظم، کروی، بیضوی و کشیده هستند و اندازه آنها از ۵ تا ۶۰ میکرون متغیر است. در بررسی‌های انجام شده چهار نوع میان‌بار دوفازی غنی از مایع، دوفازی غنی از بخار،

نامنظم، کشیده و کروی و به دور از شکستگی‌های ریز و میکروسکوپی قرار دارند (شکل ۸-A و B). همراهی میان‌بارهای غنی از بخار و غنی از سیال نیز در کلسیت مشاهده شد (شکل ۸-C).

رگچه‌های کلسیتی فاز غالب در رگه‌ها بوده و مربوط به مرحله اصلی کانی‌سازی است که اندازه‌گیری‌ها بر روی آن انجام شده است. اندازه میان‌بارهای مورد بررسی بین ۵ تا ۶۰ میکرون است. این میان‌بارها اولیه بوده، به صورت پراکنده و با شکل‌های



شکل ۸. تصاویری از میان‌بارهای سیال در کانی کلسیت از کانسار پیرمردان، A و B: شکل‌های نامنظم، کشیده و کروی میان‌بارهای سیال که از نوع اولیه هستند و C: همراهی میان‌بارهای غنی از بخار (V) و غنی از سیال (L) در کانی کلسیت

Fig. 8. Fluid inclusion images in the calcite mineral from Pirmardan deposit, A and B: Acrostic, linear and spherical forms of primary fluid inclusion, and C: Coexistence of liquid- rich (L) and vapor- rich (V) inclusions in calcite mineral

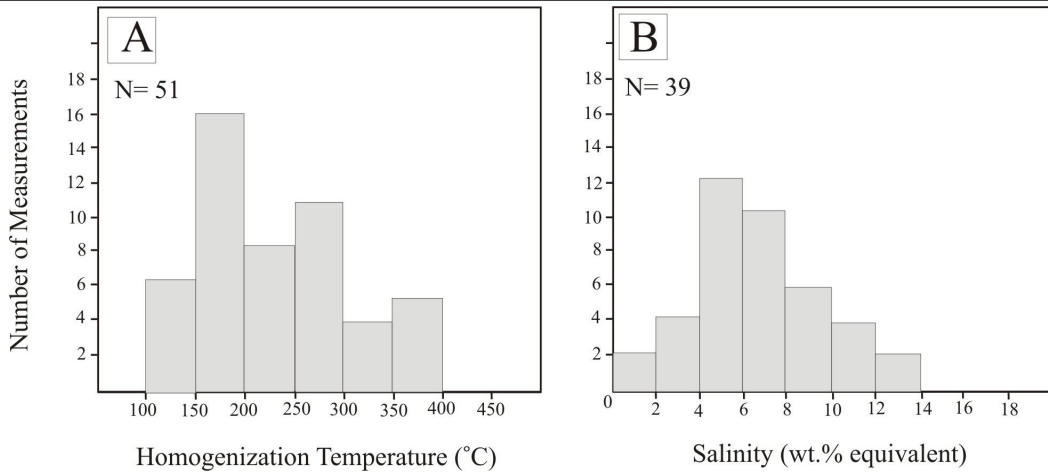
۱/۳ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۱). نمودارهای تغییرات دمای همگن‌شدگی و شوری سیالات درگیر در نمونه‌های کلسیت در شکل (۹-A و B) آمده است. میانگین شوری سیال ۶/۳ و میانگین دما ۲۳۴ درجه سانتی‌گراد است. مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی سیال را بین ۰/۷۴ تا ۱/۰۶ نشان می‌دهد. در نمونه‌های بررسی شده، مقادیر شوری و چگالی سیال توسط نرم‌افزار مدلینگ PVTX شرکت Linkam اندازه‌گیری شده است.

آزمایش همگن‌سازی بر روی ۵۱ میان‌بار که اغلب اولیه بوده‌اند، انجام شد. دمای همگن‌شدن برای میان‌بارهای سیال در کانی کلسیت ۱۱۷ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱). تعیین دمای ذوب یخ بر روی ۳۹ میان‌بار انجام شد که برای میان‌بارهای سیال در کلسیت بین ۹/۲- تا ۰/۸- درجه سانتی‌گراد به دست آمده است (جدول ۱). دمای ذوب یخ یا نقطه اوتکتیک $Te <$ ۲۰.۸°C است. میزان شوری‌های به دست آمده (معادل درصد وزنی کلرید سدیم) برای میان‌بارهای سیال در کانی کلسیت،

جدول ۱. داده‌های میان‌بار سیال برای کانی کلسیت در منطقه پیرمردان. نمونه‌ها مربوط به سطح (S1) و گمانه (Bh1, Bh2, Bh4) و از عمق‌های ۹ تا ۳۴ متری برداشت شده است.

Table 1. Fluid Inclusion data for calcite mineral in the Pirmardan area. Samples have taken from surface (S1) and bore holes (Bh1, Bh2, Bh4) from 9 to 34m depths.

Sample No.	Mineral	FI Type	N	Th Range	Th Avg.	Tm Range	Salinity Range	Salinity Avg.	Phases
S1	Calcite	P	9	176-312	226	-2.2, -5.4	3.6-8.3	6	L>V
BH2-19	Calcite	P	9	121-290	204	-0.8, -9.2	1.3-13	5.2	L>V
BH2-34	Calcite	P	5	170-304	237	-3.3, -5.2	5.3-8	6.5	L>V
BH1-22	Calcite	P	10	140-295	200	-3.6, -7.8	5.7-11.5	8.5	L>V
BH1-20	Calcite	P	5	228-395	300	-3.8, -8.7	6-12.5	8.8	L>V
BH4-9	Calcite	P	13	117-400	260	-1.5, -5.6	2.5-8.6	5.4	L>V

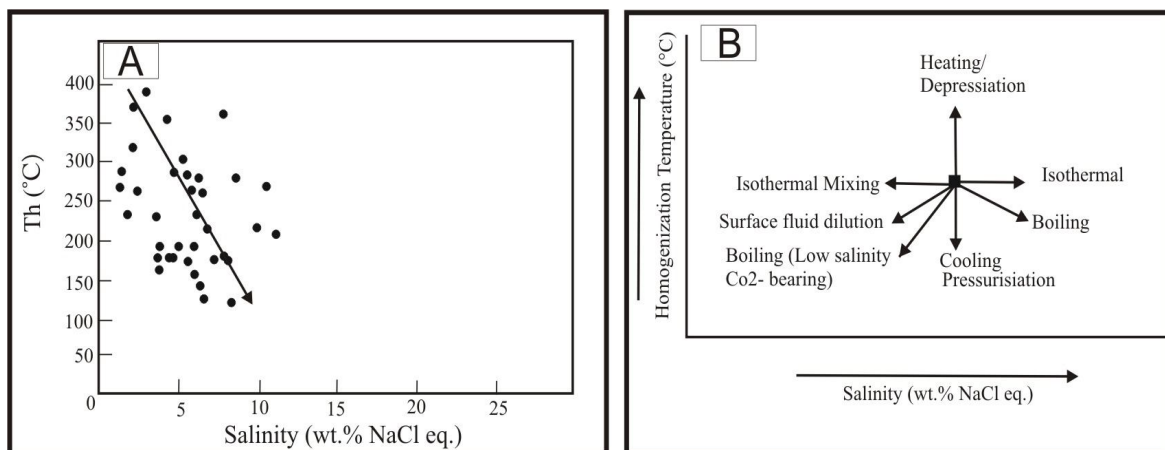


شکل ۹. نمودار میان‌بارهای سیال برای نمونه‌های پیرمردان، A: توزیع دمای همگن‌شدگی و B: شوری برای کانی کلسیت

Fig. 9. Fluid inclusion diagram for the Pirmardan samples, A: Distribution of the homogenization temperature, and B: Salinity for calcite mineral

(1973). حضور میان‌بارهای غنی از سیال و غنی از بخار و همچنین حضور برش‌های موجود در سنگ تأییدی بر فرایند جوشش است. نمودار دما و شوری در شکل A-۱۰ نشان می‌دهد، سیالی با دمای بالا و شوری پایین، طی فرایند جوشش به سیالی با دمای پایین و شوری بالا تبدیل شده است.

پراکندگی داده‌های میان‌بار سیال در نمودار تغییرات شوری نسبت به دما برای کانی کلسیت و مقایسه آن با نمودار ویلکینسون (Wilkinson, 2001) نشان می‌دهد، داده‌ها در محدوده جوشش قرار می‌گیرند (شکل A-۱۰ و B). جوشش و آمیختگی دو فرایند مؤثر در تغییرات شوری هستند (Seward,



شکل ۱۰. نمودار شوری در برابر دما در منطقه پیرمردان، A: تغییرات دمای همگن‌شدگی در برابر شوری (برحسب درصد وزنی معادل NaCl) برای دمای همگن‌شدن و شوری سیال برای کانی کلسیت. این نمودار نشان‌دهنده تبدیل سیالی با دمای بالا و شوری پایین به سیالی با دمای پایین و شوری بالا تحت شرایط رخداد جوشش است (مقایسه با شکل B) و B: نمودار دمای همگن‌شدگی در برابر شوری (Wilkinson, 2001)

Fig. 10. Salinity versus temperature diagram in the Pirmardan area, A: Distribution of (Th) vs. salinity (equivalent wt.% NaCl) for calcite mineral. This diagram implying a high temperature fluid with a lower salinity convert to a higher salinity and low temperature during of occurrence of boiling. (Comparison with Fig. B), and B: Homogenization temperature versus salinity diagram (Wilkinson, 2001)

بحث و نتیجه‌گیری

محدوده معدنی مس پیرمردان و سایر ذخایر مس نوع مانتو در شمال شرق ایران، اغلب در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری نوع فلسیک (ائوسن) و در کمان آتشفشانی زون فرورانش تشکیل شده‌اند (Samani, 2002; Tavasoli and Lotfi, 2007; Imamjomeh et al., 2008; Salehi et al., 2016; Mahvashi and Malekzade Shafaroudi, 2016). بررسی‌های زمین‌شناسی در محدوده معدنی پیرمردان نشان می‌دهد، منطقه تحت‌تأثیر دو دگرسانی اصلی قرار گرفته که حاصل چرخش سیالات گرمابی است. سیالات غنی از کلسیم، سنگ‌های آتشفشانی را تحت‌تأثیر قرار داده و باعث دگرسانی‌های کلریتی و کربناتی-سرسیستی شده‌اند که قابل مقایسه با منطقه تالکونا در شیلی است (Oyarzun et al., 1998). این دگرسانی که با دگرسانی‌های کلسیمی و سیلیسی همراه است، ارتباط نزدیکی با کانه‌زایی مس و رگچه‌های کلسیتی و کوارتزی نشان می‌دهد. بررسی‌های صحرایی در منطقه نشان می‌دهد، کانی‌سازی با شکستگی‌ها و گسل‌های محلی مرتبط بوده‌اند و به‌صورت رگه و رگچه‌های سولفیدی-کربناتی تشکیل شده است.

بررسی‌های ریزدماسنجی در نمونه‌های پیرمردان نشان می‌دهد، ماده معدنی در دما و شوری کم تا متوسط (۱۱۷ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری‌های ۱/۳ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده است. این مقادیر با داده‌های ذخایر مس استراتیفرم کوستال کوردیلرا شمال شیلی و ذخایر تالکونا و معدن بزرگ عباس‌آباد همخوانی دارد (Kojima et al., 2003; Oyarzun et al., 1998; Salehi et al., 2016). سیمونز و براون (Simmons and Brown, 2000) و آلینسون و همکاران (Albnsen et al., 2001) شوری‌های نسبتاً بالا را با شورابه‌های فیسیلی، حوضه‌های بسته پلایا، آب‌های جوی که با رسوبات تبخیری مرتبط بوده و یا منبع ماگمایی مرتبط می‌دانند؛ ولی دامنه نسبتاً وسیع شوری و دما در منطقه پیرمردان می‌تواند توسط فرایند جوشش سیال اتفاق افتاده باشد (Oyarzun et al., 1998; Kojima et al., 2003; Wilson and Zentilli,

2006). فرایند جوشش در سیالات هیدروترمال، اهمیت به‌سزایی در تشکیل کانی‌سازی، بافت و خواص سیال کانه‌ساز دارد (Oyarzun et al., 1998). از شواهد مهم جوشش سیال در منطقه پیرمردان، می‌توان به حضور برش‌های هیدروترمال، هم‌زمانی میان‌بارهای غنی از بخار و غنی از مایع و فراوانی میان‌بارهایی با شوری بالا اشاره کرد (Oyarzun et al., 1998). جوشش سیالات با pH نزدیک به خنثی، می‌تواند باعث افزایش قابل ملاحظه مقادیر کربن شده و در نتیجه به ته‌نشست کلسیت منجر شود (Matsuhisa, 1986).

با توجه به نمودارهای شکل ۱۰ (نمودار شوری در برابر دمای منطقه پیرمردان و ویلکینسون)، منطقه کانی‌سازی پیرمردان نمی‌تواند از مدل سیالات ماگمایی-جوی پیروی کند که حاصل اختلاط آب‌های ماگمایی گرم و شور با آب‌های جوی سرد باشد (Oyarzun et al., 1998). از طرفی به دلیل دمای بالا و شوری پایین سیال اولیه در منطقه پیرمردان، و همچنین نبود رسوبات تبخیری در منطقه، حضور شورابه‌های تبخیری نیز متفی می‌شود. نتایج این نمودار نشان می‌دهد، سیالی با دمای بالا و شوری پایین طی فرایند جوشش به سیالی با دمای پایین و شوری بالا تبدیل شده است و در نهایت به ته‌نشست کانی‌سازی در منطقه منجر شده است.

نتایج بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد، کانی‌سازی مس پیرمردان در افق خاصی از سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است و در گروه کانی‌سازی‌های مس چینه‌کران (نوع مانتو) قرار می‌گیرد. سامانی (Samani, 2002) فاز پسین ولکانیسم ائوسن در منطقه تروود-عباس‌آباد و قم-ساوه را عامل اصلی این نوع کانی‌سازی می‌داند. از نظر شکل کانسار، نوع سنگ میزبان، ترکیب کانی‌شناسی سنگ میزبان این ذخیره بسیار شبیه کانسارهای نوع مانتو در شیلی است (Kojima et al., 2006; Wilson and Zentilli, 2003). که ذخایر با همین ویژگی‌ها در امریکا و کانادا تحت‌عنوان طبقات سرخ آتشفشانی و میشیگان معرفی شده‌اند (Cabral and Beauoin, 2007). این ذخایر با دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی، سریستی، آلیتی و

لطف و همکاری را داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از آقای مهندس مصطفی زنبوری برای همراهی در انجام عملیات صحرایی و امکان استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین‌شناسی-معدنی قدردانی می‌شود. از همکاری صمیمانه سرکار خانم دکتر پادیار و خانم مهندس ابراهیمی مسئولین محترم آزمایشگاه میکروترموتری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تشکر و قدردانی می‌شود.

زئولیتی همراه هستند و کانی‌سازی اغلب به صورت پراکنده، رگچه‌ای و پرکننده حفره‌های سنگ میزبان تشکیل می‌شوند که با کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کولیت، مس طبیعی، هماتیت و مقادیری نقره همراه هستند.

قدردانی

از جناب آقای مهندس شاهیلانی، مدیریت محترم شرکت ارمغان پدیده کاشان که در امکان استفاده از داده‌های منطقه نهایت

References

- Adelpour, M., Rasa, I., Masoudi, F. and Hosseini, M., 2016. Determination of mineralization zones interpretation of IP and RS data in the Garmab copper deposit (south Khorasan province). *Journal of Economic Geology*, 8(1):129–146. (in Persian with English abstract)
- 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. and Chomiak, B., 2001. Control on formation of low- sulfidation epithermal deposits in Mexico: Constrain from fluid inclusion and stable isotope data. In: T. Albinson and C.E. Nelson (Editors), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*. Society of Economic Geologists, Inc, Special Publication 8, Littleton, pp. 1–32.
- Alinia, F. and Dehghan Nejad, M., 2004. Economic geology of Abbass Abad mining area and estimation of their potential, Shahrood. 1th Engineering Mining Conference, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- Alizade, V., Momenzadeh, M. and Emami, M.H., 2013. Petrology, geochemistry, mineralogy, fluid inclusions and mineralization study of Vorezg-Qayen copper deposit. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 86(4): 47–58. (in Persian with English abstract)
- Cabral, A.R. and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexander, Quebec Appalachians, Canada. *Mineralium Deposita*, 42(8): 901–912.
- Haghighi, E., Alirezaei, S. and Ashrafpour, E., 2013. Mineralization, alteration and ore fluid characteristic in Cheshmeh hafez base and precious metals deposit, Toroud- Chahshirin range, north central Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 22(8): 99–110. (in Persian with English abstract)
- Hushmandzadeh, A.R., Alavi Naini, M. and Haghypour, A.A., 1978. Evolution of geological phenomenon in Totud area. Geological Survey of Iran, Tehran, Report H5, 136 pp. (in Persian)
- Imamjomeh, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnejad Omran, N., 2008. An introduction to individual disseminated-veinlet and vein mineralization system of Cu (Pb-Zn) in the Chahmoosa- Gholekaftaran mining district, eastern part of Toroud- Chahshirin magmatic arc. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 70(4): 112–125. (in Persian with English abstract)
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. and Hayashi, K.I., 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of stratiform copper deposits in the coast

- Corillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38(2): 208–216.
- Lotfi, M. and Nouroozi, R., 2001. Copper genesis of the Abbass Abad area and their geodynamic characteristics, Semnan Province. 20th Earth Science Conference, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Mahvashi, M. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2016. Cheshmeh Gaz (Nasim) copper deposit, northwest Bardaskan: Mineralogy, alteration, geochemistry and determination model. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 24(3): 419–434. (in Persian)
- Matsuhisa, Y., 1986. Effect of mixing and boiling of fluids on isotopic composition of quartz and calcite from epithermal deposition. *Mining Geology*, 36(3):487–493.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. and Oyarzun, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita*, 33(6): 547–559.
- Rashidnejad Omran, N., 1992. Petrology and tectonomagmatic environment and relationships to the gold mineralization of the Bagho district. M.Sc. thesis, Tarbiat Moalem University, Tehran, Iran, 132 pp.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.H. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy*, V. 12. Mineralogical Society of America, Vancouver, 644 PP.
- Salehi, L., Rasa, I., Alirezaei, S. and Kazemi Mehrnia, A., 2016. The Madan Bozorg, volcanic-hosted copper deposit, East Shahrud; an example of Manto type copper deposits in Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 98(4): 93–105. (in Persian with English abstract)
- Samani, B., 2002. Metallogenic of the Manto type copper deposit. 6th Geological Society of Iran Conference, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
- Seward, T.M., 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 37(2): 370–399.
- Shamanian, G.H., Hedenquist, J., Hattori, K. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandi and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. *Economic Geology*, 99(4): 691–712.
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands- Ohaaki geothermal system: Implication for understanding low- sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, 95(5): 971–999.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258.
- Tashi, M., Mousivand, F. and Ghasemi, H., 2017. Cu-Ag Besshi type volcanogenic massive sulfide mineralization in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence: the case of Garmabe Paen deposit, southeast of Shahrood. *Journal of Economic Geology*, 9(1):213–233. (in Persian with English abstract)
- Tavasoli, A. and Lotfi, M., 2007. Mineralization and tectonomagmatic environment of the Choghondar Sar, east Semnan. 26th Earth Science Conference, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- 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*, 68(3):158–169.
- Zanboori, M., 2017. Geological- Mineral map of Pirmardan, Scale 1:1000. Armaghan Padideh Kashan Company, Kashan, Iran.