



ویژگی های کانی سازی 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 زمین شناسی در کمان ماگمایی ترود-چاه شیرین قرار گرفته است. سنگ میزبان کانی سازی، شامل مجموعه ای از سنگ های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت، برش آتشفشانی و توف است که متحمل دگرسانی های سریستی-کربناتی و پروپلیتیکی شده اند. کانه زایی به صورت رگه ای و چینه کران تشکیل شده و دارای بافت پراکنده، پرکننده فضای خالی، داربستی و رگچه ای است. کالکوسیت و مالاکیت کانه های اصلی مس هستند که با مقادیری هماتیت، کالکوپیریت، پیریت، کوولیت و رگچه های کلسیت و کوارتز همراه هستند. داده های میان بارهای سیال کلسیت مربوط به مرحله کانی سازی، نشان دهنده دمای همگن شدگی ۱۱۷ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و شوری بین ۱/۳ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام است. با توجه به ویژگی های زمین شناسی، کانی شناسی، بافت و ساخت کانسنگ و داده های حاصل از میان بارهای سیال، کانی سازی پیرمردان قابل مقایسه با ذخایر مس نوع مانتو است.

واژه های کلیدی: کانی سازی مس، سیالات درگیر، مس نوع مانتو، شاهرود، ترود-چاه شیرین

مقدمه

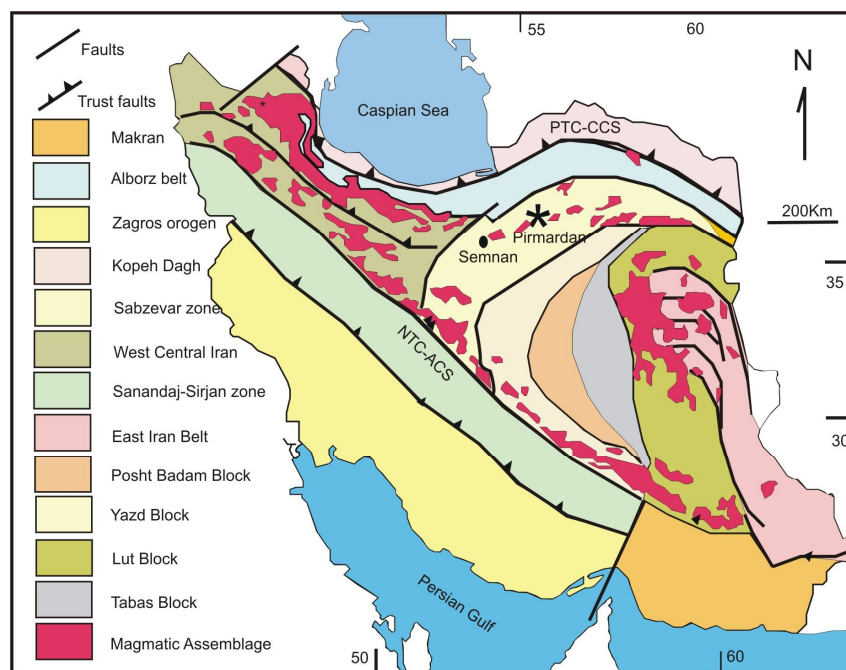
ترود-چاه شیرین قرار گرفته است. این محدوده در تقسیم بندی ساختاری ایران (شکل ۱) در شمال زون ماگمایی شرق ایران و در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده است (Stöcklin, 1968; Alavi, 1991). تعداد زیادی ذخایر و آثار معدنی فلزات پایه و گران بها در زون ترود-چاه شیرین گزارش شده است که می توان به کانسار پلی متال مس-سرب-روی چاه موسی و قله کفتران (Imamjomeh et al., 2008)، کانسار رگه ای 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 منطقه ای به وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع در بازه طول شرقی ۴۳' ۴۴' ۵۴" تا ۳۷' ۵۴' ۴۵" و عرض شمالی ۲۷' ۰۴" تا ۳۵' ۲۸' ۳۴" را شامل می شود. سنگ میزبان کانی سازی، سنگ های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن هستند و از نظر زمین شناسی 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)، 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 گرمابی (Alinia and Alizadeh et al., 2004) و نوع مانتو (Dehghannejad, 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 و 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 به‌روش پراش پرتو X^1 و ۸۰ نمونه به‌روش ICP-OES توسط شرکت نوین شیمیار مورد آنالیز قرار گرفت.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کمان ماگمایی ترو-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 شمال زون ماگمایی شرق ایران و در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده است (Alavi, 1991). کمان ماگمایی ترو-چاه‌شیرین به‌صورت یک برآمدگی (فرازمین) بین گسل‌های ترو-چاه‌شیرین به‌صورت در شمال قرار گرفته و به‌طور غالب از سنگ‌های آذرین ترشیری تشکیل شده است (Hushmandzadeh et al., 1978); اگرچه به‌طور 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 کالک‌آلکال 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; Haghighi et al., 2013).

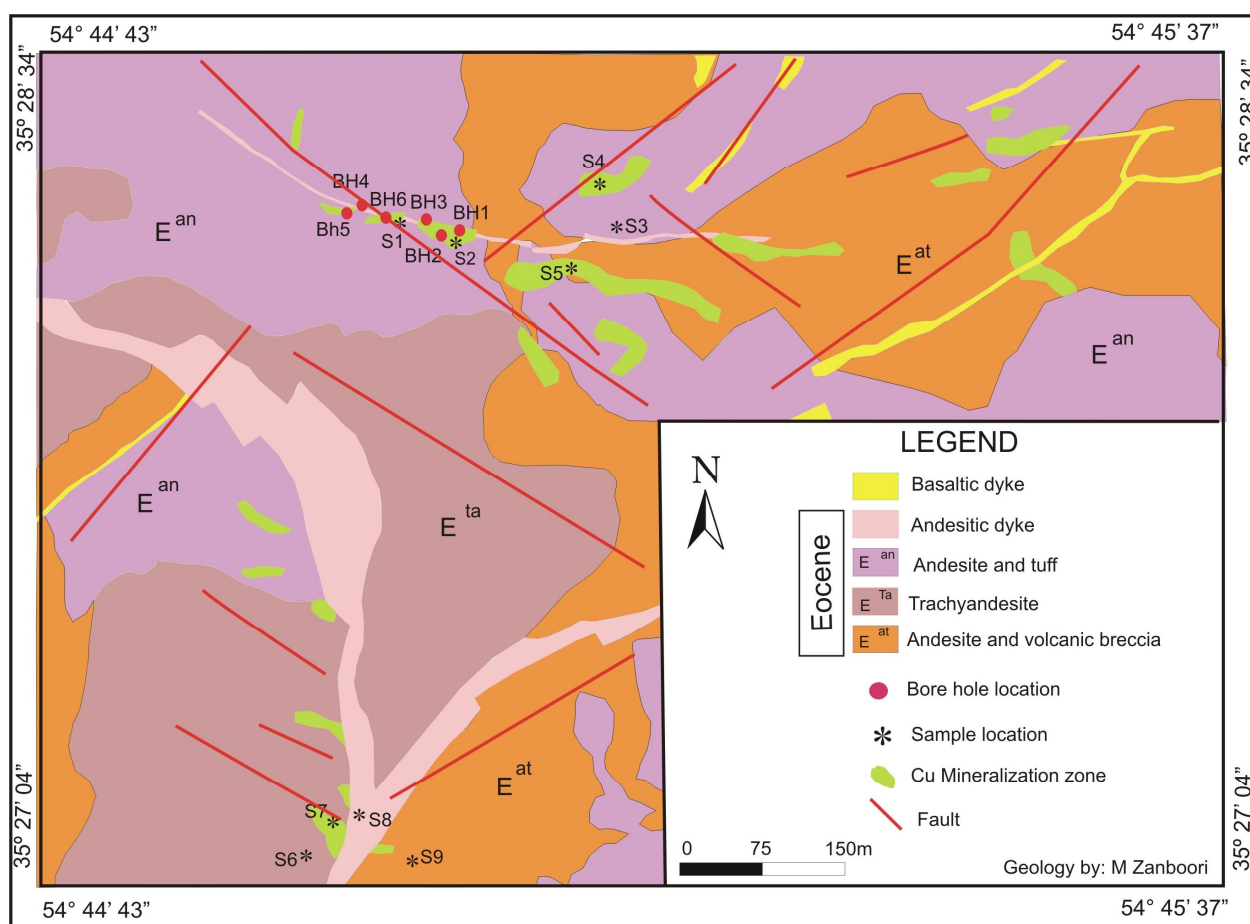
زمین‌شناسی منطقه‌ای

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 به‌مقدار 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 صحرایی و مقاطع نازک نشان می‌دهد، سنگ میزبان

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

اصلی کانی‌سازی شامل آندزیت، تراکی‌آندزیت و برش آتشفشانی است. واحد آندزیت با بافت پورفیریک و خمیره شیشه‌ای-میکرولیتی تشکیل شده است (شکل ۳-۱). میکرولیت‌ها اغلب حاوی پلاژیوکلاز، هورنبلند و کانی‌های تیره هستند. پلاژیوکلاز و هورنبلند فلوکریست‌ها 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 تراکی‌آندزیت با بافت پورفیریک و خمیره شیشه‌ای-میکرولیتی تشکیل شده است (شکل ۳-۲). خمیره سنگ به‌طور عمده از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، کانی‌های تیره و شیشه تشکیل شده است. فلوکریست‌های 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 میکرولیتی است (شکل ۳-۳). فلوکریست‌ها 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 پروپلیتیک و کربناتی است.

قابل تشخیص است که واحدهای منطقه را تحت تأثیر قرارداد است. مهم‌ترین دگرسانی‌های شناسایی شده در منطقه شامل دگرسانی پروپلیتیک و سریستی-کربناتی هستند. کانی‌های حاصل از دگرسانی به‌صورت جاننشینی 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، کانولینیت و مونت موریلونیت کانی‌های تشکیل‌دهنده این دگرسانی هستند که واحدهای سنگ میزبان را تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۳-۳ و ۳-۴). کربنات و کوارتز، شکستگی‌ها و حفره‌های موجود در سنگ و کانی‌هایی نظیر پلاژیوکلاز و پیروکسن را پر کرده‌اند. دگرسانی پروپلیتیک 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 قرارداد است. مهم‌ترین کانی‌های موجود در این دگرسانی کلریت و اپیدوت هستند که با مقداری سریست، کلسیت و اکسیدهای آهن همراه هستند (شکل ۳-۴). 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

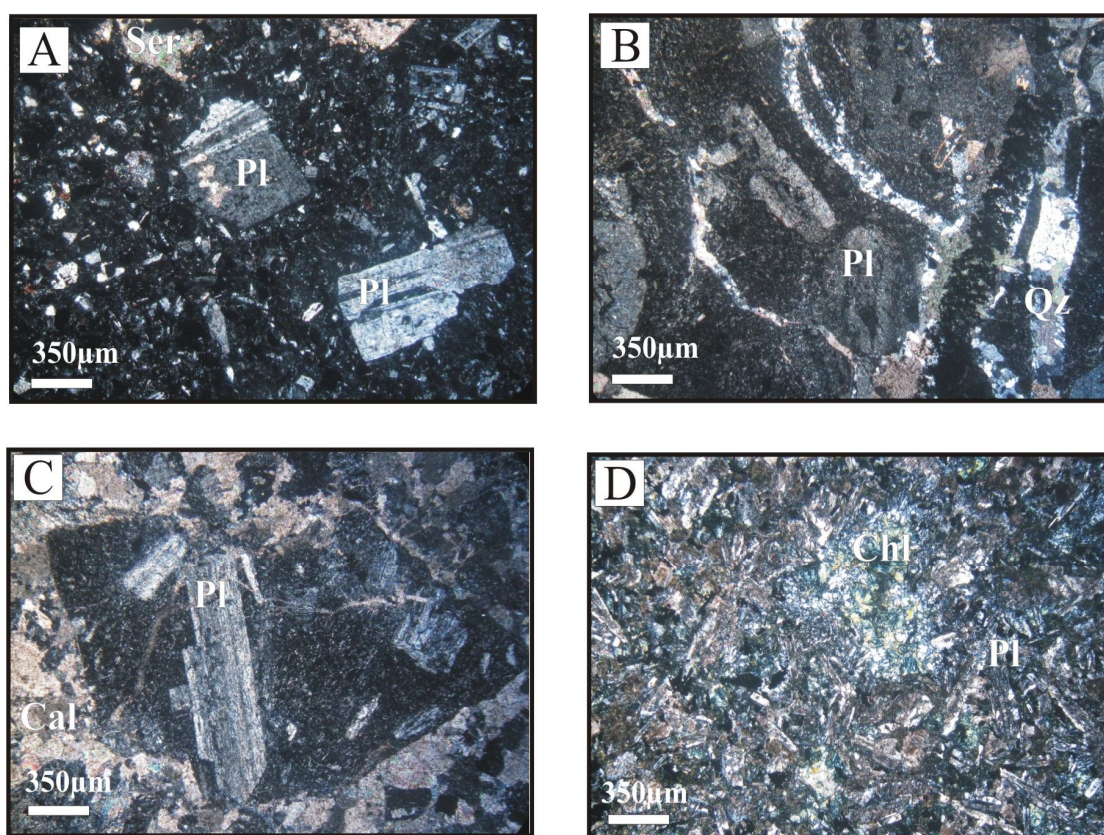
با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، کانی‌سازی کربناتی-سولفیدی مس پیرمردان از نوع استراتاباند بوده و در ارتباط با فعالیت‌های گرمابی است که از شکستگی‌های موجود در منطقه پیروی می‌کند و به‌صورت رگه و رگچه‌های ظریف در واحدهای آندزیت، تراکی‌آندزیت و برش آتشفشانی ائوسن به‌وقوع پیوسته است (شکل ۴). سنگ میزبان کانی‌سازی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

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.

تراکی‌آندزیت، توف با ترکیب آندزیتی و برش آتشفشانی است. دگرسانی‌های موجود در منطقه شامل پروپیلیتیک، سریسیتی-کربناتی هستند که دگرسانی پروپیلیتیک 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 سریسیت تجزیه شده است، نمونه مربوط به عمق ۲۲ متری از گمانه B: Bh3، B: سنگ میزبان تراکی‌آندزیت 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 پروپیلیتیک، نمونه مربوط به سطح است (S3)، علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ser: سریسیت، 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)

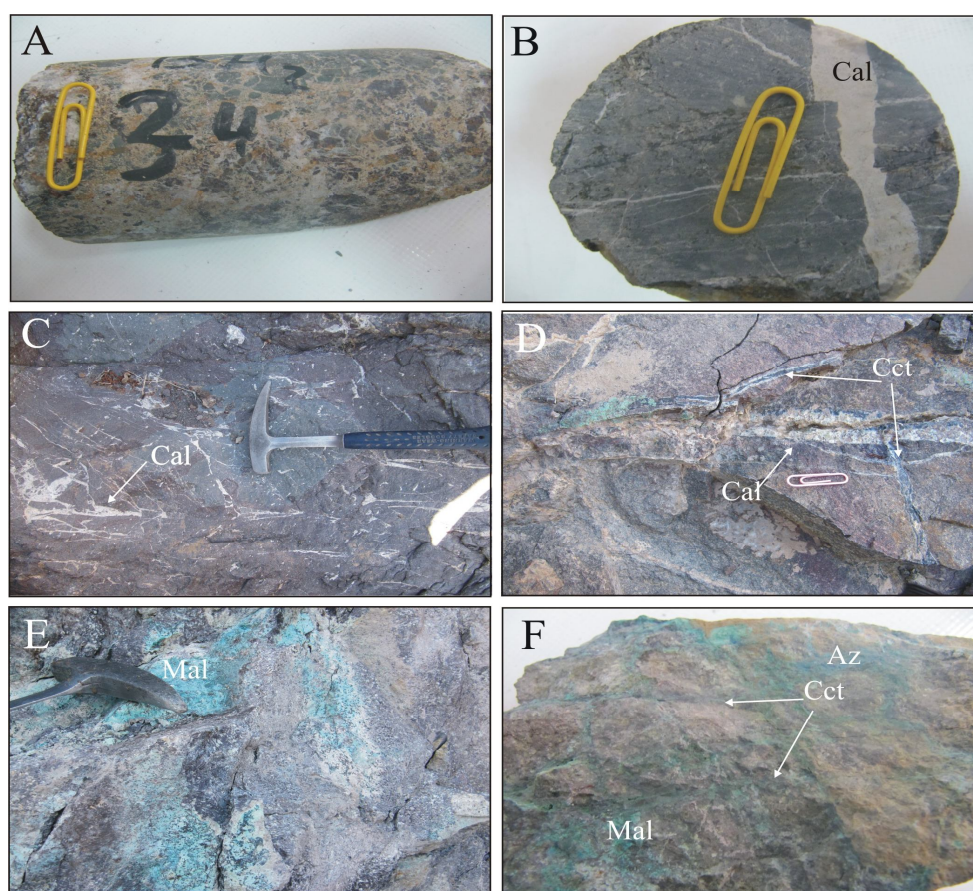
Fig. 4. The view of carbonate copper mineralization with the trachyandesite host rock in the Pirmardan area, with the length of 20 m trench (View to the southwest)

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 ۶-۵). 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 ۶-۵). 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 ۶-۵ و ۶-۷). 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 ۵-۵) 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 ۵-۵، B و C و D). رگچه‌های حاوی ماده معدنی از دو میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر متغیر است (شکل ۵-۵) 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 ۵-۵ و ۵-۶). 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

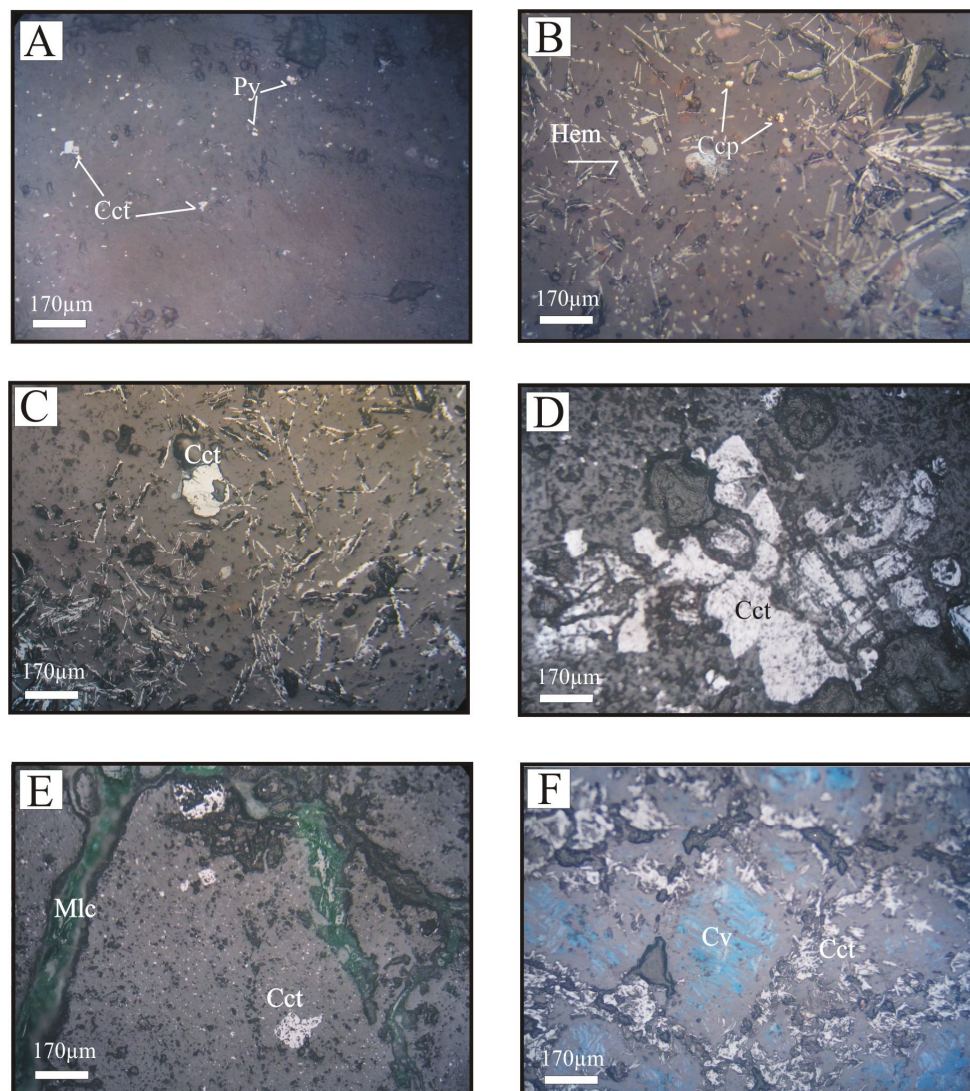
کانی‌های اکسیدی شامل مالاکیت، آزوریت و گوتیت است. کانی‌های مالاکیت و آزوریت که اغلب شکستگی‌ها و حفره‌های سنگ را پر کرده است، از اکسایش کانی‌های سولفیدی تشکیل شده است (شکل ۶-E و F) و گوتیت نیز از دگرسانی کانی‌های اکسید آهن مانند هماتیت و مگنتیت و یا پیریت تشکیل شده است.

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 chalcocite 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: chalcocite).



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 کالکوپریت، 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: کالکوپریت، 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

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،

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 به سرعت 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 شواهدی از حضور CO₂ مایع یا گاز و کانی‌های نوزاد در میان‌بارها دیده نشد.

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: Acrostatic, linear and spherical forms of primary fluid inclusion, and C: Coexistence of liquid-rich (L) and vapor-rich (V) inclusions in calcite mineral

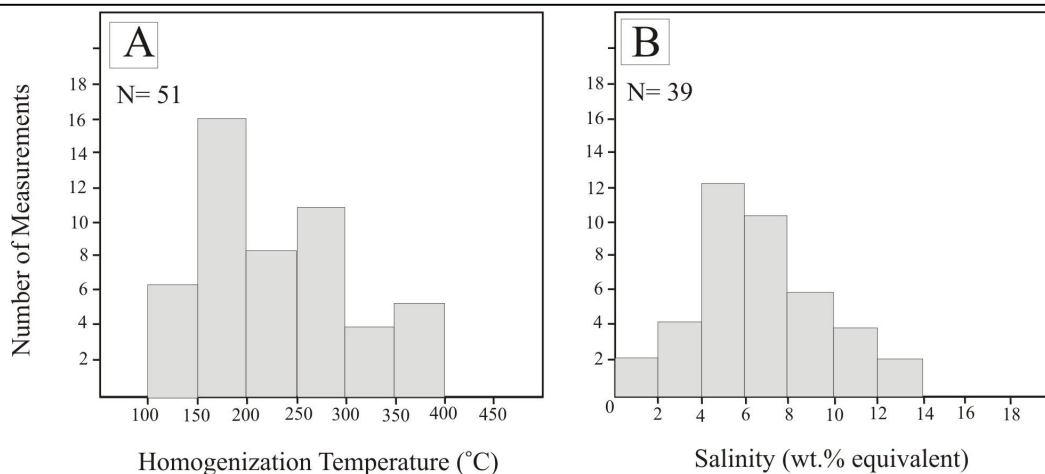
۱/۳ تا ۱۳ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۱). نمودارهای تغییرات دمای همگن‌شدگی و شوری سیالات درگیر در نمونه‌های کلسیت در شکل (۹-A و B) آمده است. میانگین شوری سیال ۶/۳ و میانگین دما ۲۳۴ درجه سانتی‌گراد است. مقادیر اندازه‌گیری‌شده چگالی سیال را بین ۰/۷۴ تا ۱/۰۶ نشان می‌دهد. در نمونه‌های بررسی‌شده، مقادیر 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 به‌دست آمده است (جدول ۱). دمای ذوب یخ یا نقطه اوتکتیک $Te < -20.8^{\circ}\text{C}$ است. میزان شوری‌های به‌دست 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

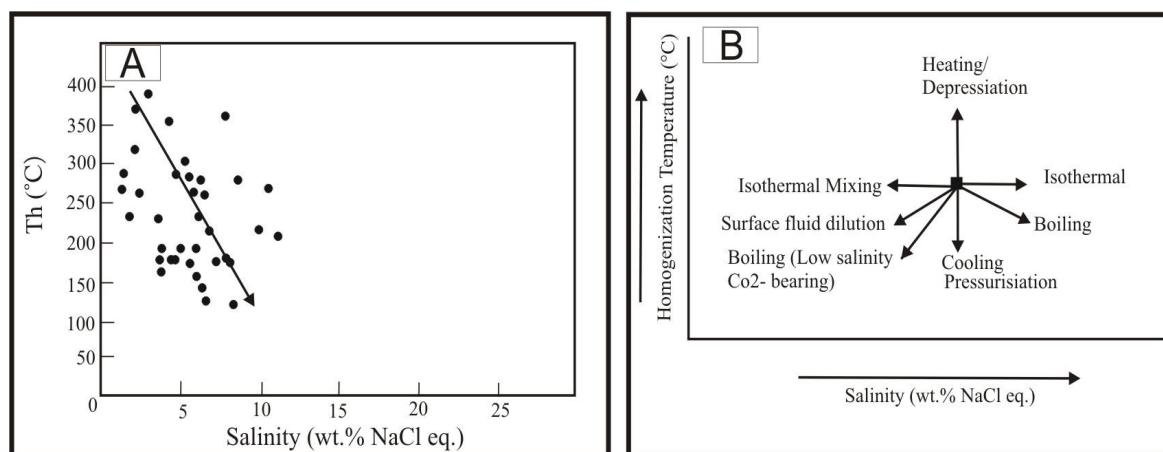


شکل ۹. نمودار میان‌بارهای سیال برای نمونه‌های پیرمردان، A: توزیع دمای همگن‌شدگی و B: شوری برای کانی کلسیت

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 تحت تأثیر دو دگرسانی اصلی قرار گرفته که حاصل چرخش سیالات گرمابی است. سیالات غنی از کلسیم، سنگ‌های آتشفشانی را تحت تأثیر قرار داده و باعث دگرسانی‌های کلریتی و کربناتی-سریسیتی 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 کوهستان 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 (Albnson et al., 2001) شوری‌های نسبتاً بالا را با شورابه‌های فسیلی، 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 تروند-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 تحت عنوان طبقات سرخ آتشفشانی و میشیگان معرفی شده‌اند (Cabral and Beauoin, 2007). این ذخایر با دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی، سریسیتی، 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 میکروترمومتری 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، کوولیت، 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: Constrains 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 Haghipour, 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.



Mineralization and Fluid Inclusion Characteristics of Pirmardan Stratabound Copper Deposit (Manto Type), SW Shahrood)

Susan Ebrahimi*

Mining Exploration Department, Faculty of Mining Engineering, Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Submitted: Jan. 21, 2018

Accepted: July 18, 2018

Keywords: *Copper mineralization, Fluid Inclusion, Copper Manto Type, Shahrood, Torud-Chahshirin*

Introduction

Located in the NE Iran, the early Tertiary volcanic sequences host a vast stratabound Cu mineralization (manto type), which is likely to be significant economically (Samani, 2002). The Pirmardan copper deposit is located 130 km southwest of Shahrood and is classified as a manto type mineralization, hosted by altered andesite to trachyandesite, volcanic breccia and tuff. The host rock suffers from two kinds of local and regional hydrothermal alterations of sericite-carbonate, and propylitic, respectively. Sulfide minerals occur as disseminated vein and veinlet forms in the host rock. Manto mineralization type in the northeast and central Iran could be a new prospective for the copper deposits subsequence of the Cu porphyry deposits in Iran (Samani, 2002).

Our studies focus on the mineralogy, geology, fluid inclusion and ore formation in an attempt to understand the characteristics of ore fluids and mechanisms of ore formation, and to develop exploration criteria for Pirmardan and similar occurrences in the northeast of Iran.

Materials and methods

Various rock types and alteration assemblages, and mineral paragenesis, were characterized by transmitted and reflected light microscopy, X-ray diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF) analysis. Representative samples from drill holes were selected for fluid inclusion studies. Microthermometric measurements were carried

out by the linkam stage for heating and freezing system at the Geological Survey of Iran (GSI).

Results

Several mineralized zones with the width of 0.5-20 m and length of 5-300 m have been found in the Pirmardan area. Mineralization occurs in the shape of vein and veinlet, breccia, stockwork and open space filling. The copper mineralization in the area occurs as strata bound and sulfide minerals are disseminated in the andesitic rock in a depth of 30 m up to 20 m thickness. The ore grade is about 2% and ore minerals include chalcocite, malachite, azurite, hematite, pyrite and chalcopyrite. Based on microscopic and macroscopic studies, the mineralization at the Pirmardan area is divided into two stages: hypogene stage, which is further subdivided into early and main stages; and supergene stage, which includes sulfidation and oxidation stages.

Given the results of the geological and geophysical investigations carried out in the study area, six exploration bore-holes were suggested to be drilled to a depth ranging from 34 to 45 m. The results of drilling confirmed a level of mineralization containing amounts of copper. Mineralization in the depth of (0 to 28 m) occurs in the forms of vein and veinlet with a disseminated texture.

Fluid inclusions in the veinlet of calcite from the main hypogene stage occur typically as isolated bodies. Homogenization temperatures are between 117 and 400 °C. The final melting temperatures

*Corresponding authors Email: ebrahimisusan@gmail.com

are between -0.8 and -9.2 °C, giving apparent fluid salinities of 1.3 to 13.0 % weight NaCl equivalent.

Discussion

The study area is located in the Pirmardan district along with other manto type Cu deposits in the northeast of Iran that occur mostly in the felsic-intermediate volcanic and pyroclastic rocks of Tertiary range. The geological studies in this area indicate the two main hydrothermal events of copper mineralization and alterations resulting from circulating heated waters (e.g. Oyarzun et al., 1998). It is likely that both of the hydrothermal events have contributed to extensive mineralization in shallow and deeper parts of the subsurface area. Mineralization in the shallow depths is controlled by local faults and fractures. These fractures are mineralized by chalcocite, malachite, pyrite, chalcopyrite and Fe-oxides minerals associated with veinlets of calcite and quartz.

Microthermometric data indicate that the ore formation was mainly related to the low to moderate temperatures (117-400 °C) and salinities (1.3 to 13 wt.% NaCl). The widespread salinity in the Pirmardan area could be explained by the processes of boiling. Mixing and boiling are two important processes during the ore formation in the hydrothermal systems (Oyarzun et al., 1998). The occurrence of hydrothermal breccias and coexistence of fluid-rich and vapor-rich inclusions (Oyarzun et al., 1998) in calcite indicate that boiling is one of the main ore-forming processes, especially during the main hypogene stage in the Pirmardan district.

Overall, the host rocks, alteration, ore mineralogy, ore structure and texture and fluid inclusions characteristics in the Pirmardan district are similar to those deposits belonging to the Cenozoic manto

type deposits in the South America (Kojima et al., 2003; Wilson and Zentilli, 2006).

Acknowledgments

I would like to thank Mr. Shahilani, manager of the Armaghan Padideh Kashan Company for his kind cooperation for providing information of the Pirmardan area and collecting samples from the area. I would like to thank M. Zanboori for his kind cooperation in the field of geology and for preparing the geological map of the Pirmardan area. Furthermore, also I would like to thank F. Padiar and N. Ebrahimi from the Geological Survey of Iran for their assistance in the thermobarometry analysis.

References

- 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.
- 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.
- Samani, B., 2002. Metallogenic of the Manto type copper deposit. 6th Geological Society of Iran Conference, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
- 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.