

بررسی محیط فیزیکوشیمیایی در کانسار مس پورفیری سونگون با استفاده از ویژگی‌های شیمیایی کانی‌ها (شمال خاور تبریز)

مه‌ری محمدیان^۱، محمد بومری^۱، علی احمدی^۱، علی اصغر مریدی فریمانی^۱، هال داکلاس^۲ و مهدی جمالی^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
^۲ اداره میکرو آنالیز، دانشگاه نیوبرونزویک، فردریکتون، کانادا.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۶/۲۵

چکیده

کانسار مس پورفیری سونگون در ۱۳۰ کیلومتری شمال خاور تبریز، شمال باختر ایران واقع شده است. این کانسار حاوی ۷۹۶ میلیون تن کانسنگ با عیار متوسط ۰/۶۱ درصد وزنی مس، ۰/۰۱ درصد مولیبدن، ۰/۰۱۶ گرم در تن طلا، ۲/۲۱ گرم در تن نقره، ۹/۵۷ گرم در تن بیسموت و رنیم (۰/۰۹ درصد وزنی مولیبدنیت) است. این پژوهش به منظور مطالعه محیط فیزیکوشیمیایی با استفاده از ویژگی‌های کانی‌های این کانسار انجام شده است. تشکیل این کانسار به فعالیت‌های گرمایی مرتبط با یک استوک گرانودیوریتی و چندین دایک دیوریتی-گرانودیوریتی نسبت داده می‌شود که در گستره زمانی اولیگوسن تا میوسن در سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی کرتاسه و اتوسن نفوذ کرده‌اند. دگرسانی‌های اصلی مشاهده شده در این توده‌ها از طرف توده به سمت خارج، پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک بوده‌اند که شاخص کانسارهای مس پورفیری نوع حاشیه قاره‌ای هستند. همزمان با تشکیل زون برونزاد بسیار ضعیف، یک کلاهدک آهنی متشکل از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن، اکسید مس، مس خالص، سولفات‌ها، کربنات‌ها و فسفات‌های مس در بالاترین بخش کانسار و در امتداد شکستگی‌ها تشکیل شده است. با توجه به نتایج کانی‌شناسی، در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۵ کیلو بار (شرایط برآوردی تشکیل کانسنگ در زون پتاسیک)، $\log f_{S_2}$ از -۱۸ تا -۲۴ و pH میان ۲/۵ تا ۷/۵ است. در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۵ کیلو بار (شرایط برآوردی تشکیل کانسنگ در زون فیلیک)، $\log f_{O_2}$ میان ۲۰- تا ۳۳- و $\log f_{S_2}$ میان ۶- تا ۱۵- است.

کلیدواژه‌ها: سونگون، ایران، پورفیری، مس.

*نویسنده مسئول: مه‌ری محمدیان

E-mail: mehrimohamadian@gmail.com

۱- مقدمه

در مناطق مختلف کانسارهای پورفیری، می‌توان کمکی به شناخت دقیق‌تر آنها کرد. در این مطالعه سعی شده است با بررسی نوع کانی‌ها در زون کانسنگ و مناطق دگرسانی، ویژگی‌های شیمیایی شاخص آنها و همبودی کانی‌ها، به تفسیر مراحل ژن، محیط حاکم بر آن و ویژگی‌های شیمیایی کانی‌های ایجاد شده در شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم پرداخته شود. بررسی شیمی کانی‌های این کانسار به روش EPMA در دانشگاه Akita ژاپن و SEM در دانشگاه New Brunswick کانادا انجام شده است.

۲- موقعیت جغرافیایی کانسار

کانسار مس پورفیری سونگون در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان تبریز، ۷۵ کیلومتری شمال باختر اهر و ۳۰ کیلومتری شمال خاور ورزقان در استان آذربایجان شرقی در شمال باختر ایران قرار دارد. در شکل ۱ جایگاه کانسار سونگون در ایران نشان داده شده است.

۳- جایگاه زمین‌شناسی کانسار

در تقسیم‌بندی (آقانباتی) ۱۳۶۴ کانسار سونگون در زون البرز باختری-آذربایجان قرار می‌گیرد. کمر بند مس ارومیه-دختر در این زون قرار دارد. این زون میزبان کانسارهای مس پورفیری عظیمی همچون سرچشمه است. ترکیب سنگی منطقه سونگون بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه بالایی و اتوسن با ترکیب آندزیت-تراکی آندزیت و آهک ریفی است. در پالتوسن، مونزونیت-میکرومونزونیت در بخش باختری منطقه نفوذ کرده است. این واحدها به وسیله سنگ‌های نفوذی اولیگوسن-میوسن قطع شده‌اند. واحدهای جدیدتر عبارتند از آتشفشانی‌های پلیوسن و کواترنر با ترکیب تراکیت-تراکی آندزیت. عامل کانی‌سازی سونگون، توده نفوذی به سن میوسن است که در مرکز منطقه رخنمون دارد (Calagari & Hosseinzadeh, 2005).

اصطلاح کانسار پورفیری از دهه ۱۹۲۰ برای توصیف کانسارهایی با عیار کم و منبع زمین‌شناسی زیاد به کار می‌رود (Parsons, 1933). یک کانسار مس پورفیری شامل هر کانسار افشان پیریت-کالکوپیریت و مولیبدنیت است که منطقه‌بندی هم‌مرکز خوبی به نمایش می‌گذارد اما همه پورفیری‌ها کانسنگ افشان ندارند و منطقه‌بندی خوبی نشان نمی‌دهند (Lowell, 1974). بنابراین، می‌توان با مطالعه ویژگی‌های شیمیایی کانی‌های کانسارهای مس پورفیری، قدمی به سمت شناسایی این کانسارها بدون توجه به بافت و منطقه‌بندی ارائه داد که در اکتشاف این کانسارها نقش مهمی خواهد داشت. گرانودیوریت، دیوریت، مونزونیت کواتردار، کواترتز مونزونیت و گرانیت، سنگ‌های رایج در همه کانسارهای پورفیری هستند (Hezarkhani, 2005).

کانسار مس پورفیری سونگون، قسمتی از کمر بند فلززایی ارومیه-دختر در زون البرز باختری-آذربایجان است. با توجه به جایگاه این کانسار در میان دیگر کانسارهای مس پورفیری در این کمر بند، مطالعه شیمی کانی‌های این کانسار بسیار مهم است زیرا باعث شناخت بهتر این نوع کانسارها می‌شود. کانسار مس پورفیری سونگون به دلیل منبع زمین‌شناسی در حدود ۷۹۶ میلیون تن، کیفیت خوب کانسنگ با عیار میانگین ۰/۶۱ درصد وزنی مس، ۰/۰۹ درصد رنیم در مولیبدنیت (مه‌ربرتو و ترکیان، ۱۳۷۲) و به دلیل نقش مس در تمدن پیشرفته امروز، جایگاه ویژه‌ای در اقتصاد ایران دارد. با وجود مطالعات دقیق ژئوشیمی (Hezarkhani et al, 1999; Hezarkhani, 2002; Hezarkhani, 2005; Calagari & Hosseinzadeh, 2005) روی کانسار مس پورفیری سونگون، تاکنون ویژگی‌های شیمیایی کانی‌های این کانسار به‌طور کامل و دقیق مطالعه نشده است.

با استفاده از روش‌های متفاوت می‌توان به بررسی کانسارهای پورفیری پرداخت که از آن جمله، مطالعه میان‌بادهای سیال موجود در کانی‌های مختلف و ترکیب شیمیایی کانی‌های موجود در آنها است. با مشخص کردن ویژگی‌های کانی‌شناسی

۴- اهداف مطالعه

هدف اصلی این مطالعه، بررسی محیط فیزیکیوشیمیایی کانسار مس پورفیری سونگون با استفاده از ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های کانی‌ها است. بررسی محیط فیزیکیوشیمیایی تشکیل یک کانسار به شناخت آن کانسار کمک شایانی می‌کند. با مشخص کردن رابطه کانی‌ها، ترتیب زایش و ترکیب شیمیایی آنها می‌توان به عوامل حاکم بر محیط فیزیکیوشیمیایی تشکیل آنها پی برد و مراحل مختلف پیدایش کانسار را بررسی کرد. با توجه به این که مطالعه ویژگی‌های شیمی کانسار مس پورفیری سونگون، از جمله هاله‌های ژئوشیمیایی اطراف کانسار و ایزوتوپ‌های پایدار به آسان کردن مراحل اکتشاف و تفسیر ژئو این نوع کانسارها بسیار کمک کرده است، بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌های این کانسار لازم به نظر می‌رسد.

۵- روش کار

پس از بررسی کامل و مطالعه میکروسکوپیک دقیق نمونه‌ها و تعیین نوع قرارگیری و ترتیب زایش کانی‌ها نسبت به هم و مطالعات سنگ‌شناسی، مقاطع مورد نظر برای تجزیه به کانادا و ژاپن فرستاده شدند. تجزیه کانی‌ها به دو روش میکروپروب و میکروسکوپ الکترونی انجام گرفته است.

در هر دو نوع تجزیه، از مقاطع صیقلی با اندازه استاندارد استفاده شده است. برای استفاده از روش میکروپروب برای تجزیه نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها به طور کامل مطالعه شدند و سپس بر روی بخش‌هایی از نمونه که تصمیم به انجام تجزیه بود، علامت‌گذاری شد. با توجه به هدایت ویژه هر قسمت می‌توان تغییرات را ثبت کرد. حتی مقادیر بسیار کم عناصر با این روش قابل بررسی هستند. شرایط ویژه مطالعه کانی‌ها با میکروپروب GEOL J*A-8600 در دانشگاه Yamagata ژاپن به شرح زیر است: برای سیلیکات‌ها، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلو ولت، جریان اشعه ۲۰ nA، قطر الکترون‌های متمرکز حدود ۵ میکرون و با استفاده از برنامه ZAF در XM-۸۶ ترکیب شده با GEOL بوده است. برای استاندارد آپاتیت، ولاستونیت، آلپیت، آدولانا و سینتیک، SiO_2 , TiO_2 , NaCl , CaF_2 , MgO , MnO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 استفاده شده است. تجزیه با میکروسکوپ الکترونی در دانشگاه New Brunswick کانادا انجام شده است. داده‌های تجزیه (که به صورت درصد وزنی اکسیدهای اصلی هستند) در جدول‌هایی مرتب و با روش‌های استوکیومتری به درصد عناصر تبدیل شده‌اند. با توجه به فرمول فرضی از کانی تجزیه شده، اتم‌ها در ساختمان بلور کانی مورد نظر قرار داده می‌شوند.

۶- محیط فیزیکیوشیمیایی کانسار پورفیری سونگون

عوامل مؤثر در کانه‌زایی سولفید مس عبارتند از: pH، فعالیت اکسیژن، فعالیت گوگرد و فعالیت یون کلرید. برای تعیین میزان اهمیت هر کدام از عوامل یاد شده، از مطالعات کانی‌شناسی در کنار نتایج آزمایش‌های اخیر (Hezarkhani et al., 1998, 1999) استفاده شده است.

۷- دما و فشار حاکم

مطالعات مفصلی برای تعیین دما و فشار این کانسار صورت گرفته است (Calagari, 1997). بر اساس مطالعات، مرحله اول کانی‌سازی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری ۱۵٪ و فشار ۰/۵ کیلو بار صورت گرفته است. براساس مطالعات میانبارهای سیال و اطلاعات ایزوتوپ که توسط (Hezarkhani et al., 1999, 1998) بر روی کانسار مس سونگون انجام شده است، دمای حاکم بر تشکیل دگرسانی پتاسیک ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و دگرسانی فلیک ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به ترکیب شیمیایی اسفالریت (مقدار آهن در اسفالریت)، دمایی در حدود ۳۵۰ درجه برای زون فلیک ارزیابی می‌شود.

با توجه به جایگیری کانسنگ در فصل مشترک میان این دو منطقه دگرسانی، بیشتر مس در مرحله کاهش فعالیت گرمایی سیال اورتوماگمایی و در دمایی میان ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نهشته شده است. انحلال مس با کاهش دما به سرعت کاهش می‌یابد و حجم زیادی از کالکوپریت در سونگون به وسیله رگچه‌های شکل گرفته در این دما میزبانی شده‌اند. در نمودار شکل ۳ می‌توان روند تشکیل کانی‌های مختلف سولفیدی را با نزول دما و فعالیت گوگرد مشاهده کرد. در اولین مراحل که همزمان با تشکیل دگرسانی پتاسیک است، کالکوپریت، پیریت و مقداری بورنیت تشکیل می‌شود. در دماهای کمتر (۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) همزمان با تشکیل دگرسانی فلیک، تانتیت، کولیت و پیریت ایجاد می‌شوند. در مراحل بعدی و همزمان با گسترش دگرسانی آرژلیک، کولیت و کالکوسیت ایجاد می‌شوند.

قرارگیری اسفالریت بر روی کالکوپریت، در برخی مقاطع دیده شده است (شکل ۴) که این ادخال برای دما فشارسنجی مناسب است و جدایشی در دمای کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این دو کانی برای تشکیل محلول جامد به دمایی در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارند.

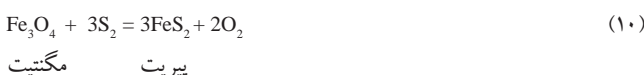
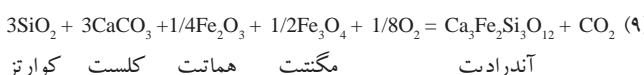
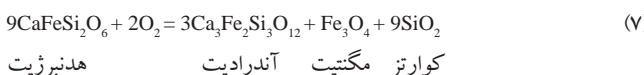
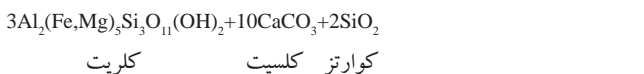
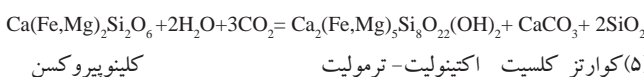
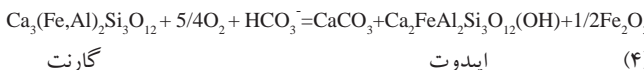
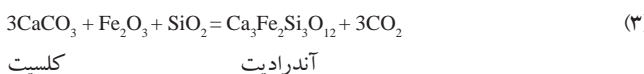
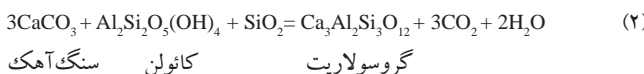
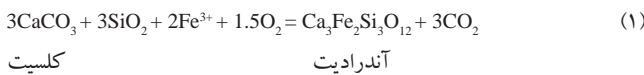
تجزیه اسفالریت از منطقه دگرسانی پتاسیک، مقداری پیرویت در ترکیب آن نشان داده است. بهترین توالی همبود برای انجام عمل دماسنجی روی اسفالریت همراهی این کانی با پیرویت و پیریت است. مقدار آهن وارد شده در ترکیب اسفالریت نمایان‌گر میزان فشار حاکم بر محیط ژئو این کانی است. هرچه مقدار پیرویت محلول در اسفالریت بیشتر باشد محیط تشکیل فشار کمتری داشته است. نمودار ۵ نشان‌دهنده موقعیت اسفالریت‌های تجزیه شده از کانسار مس سونگون است. فشار حاکم بر محیط تشکیل این محلول جامد در حدود ۰/۵ کیلو بار و دمای حاکم ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. با توجه به نمودار، $\log a_{\text{S}_2}$ میان ۱- تا ۱۰- است. pH محیط تشکیل اسفالریت از مگنتیت و پیرویت کمتر و از کالکوپریت و تتراهدريت بیشتر است. بنابراین، ترتیب تشکیل این کانی‌ها از سیال گرمایی که pH آن در حال کاهش است به این صورت خواهد بود: مگنتیت، پیرویت، اسفالریت، کالکوپریت و تتراهدريت (Scott, 1973).

کانی‌های سیلیکاتی در منطقه دگرسانی پتاسیک در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. در دگرسانی پتاسیک، متاسوماتیسم پتاسیم و سدیم پایین بوده است و محلول‌ها زمان زیادی در این شرایط نبوده‌اند. پلاژیو کلاز به مقدار جزئی به اورتوز تبدیل شده و بیشتر ترکیب اولیه آندزین را حفظ کرده است. مقدار کمی بیوتیت در نمونه‌ها یافت می‌شود. شرایط تشکیل دگرسانی پتاسیک در کانسار در نمودار هم‌دمای pH و فعالیت O_2 در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۵ کیلو بار، که شرایط برآوردی برای بیشتر کانه‌زایی مولیبدین و دگرسانی پتاسیک همراه با آن در سونگون هستند (با توجه به نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی)، رسم شده است (شکل ۷). با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و تصاویر BSE گرفته شده از کانی مولیبدینیت که توسط کالکوپریت احاطه شده است (شکل ۶)، می‌توان موقعیت تشکیل کانی مولیبدینیت نسبت به کالکوپریت را در نمودار مشخص کرد.

$\log f_{\text{O}_2}$ برای شرایط حاکم در محیط ژئو کانسار مس سونگون از ۱۸- تا ۲۴- و pH از ۲/۵ تا ۷/۵ بوده است (شکل ۷). همان‌گونه که قابل پیش‌بینی است، در شکل ۷ نیز محل قرارگیری مولیبدینیت توسط کالکوپریت و دیگر کانی‌ها دربر گرفته شده است. در مقاطع مختلف مطالعه شده، پیریت نیز توسط کالکوپریت دربر گرفته شده است (شکل ۸) و این مسئله، تقدم پیریت را نسبت به کالکوپریت نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد مس در مراحل پایانی گسترش دگرسانی پتاسیک ایجاد شده باشد. کاهش دما باعث تشکیل کانی‌های مس شده است.

نمودار هم‌دمای فعالیت O_2 و فعالیت S_2 در دمای ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد طراحی شده است (Hezarkhani et al., 1999). در (شکل ۹)، میدان پایداری کانی‌هایی

فیلک هستند و نمونه‌های سولفیدی همچون پیریت، گالن و اسفالریت در اسکارن نشان داده‌اند که دامنه گوگرد میان $4/6-0/2$ درصد است. این اطلاعات اشاره به یک منشأ ماگمایی دارد (Ohmoto & Rye, 1979). محتوای Mg ، Fe ، Si سیال با فعالیت بالا و همراه با مرحله اکسایش بالا، عامل ایجاد واکنش‌های کربنات زدایی و گسترش کالک‌سیلیکات‌های بدون آب غنی از Fe بوده است. واکنش ۱۰، برای این فرایند بیان می‌کنند (Cepedal et al., 2000). آندرادیت در دمای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار نیست. شرایط مناسب برای تشکیل آندرادیت فشار ۱ کیلو بار و غلظت CO_2 در حدود ۰/۱ است.



وجود ولاستونیت در میان کالک‌سیلیکات‌ها نشان از این دارد که آندرادیت و هدنبرژیت از سیال متاسوماتیک با دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک کیلو بار، تبلور یافته‌اند (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). وجود بافت درهم‌رشدی و نبود مرزهای جانیشینی میان بلورهای گارت و پیروکسن، بیان می‌کند که این کانی‌ها از سیالی با دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فعالیت اکسیژن میان 10^{-26} - 10^{-33} ، ایجاد شده‌اند (Calagari & Hosseinzadeh, 2005).

در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، سیال‌های در تعادل با استوک (دگرسانی فیلک)، دیگر نمی‌توانستند با گروه کالک‌سیلیکات‌های بدون آب در تعادل باشند. در این مرحله دگرسانی پسروده شروع شده است. بنابراین، گارت‌ها با آپیدوت، کوارتز، پیریت و کربنات‌ها تبدیل شده‌اند. در مطالعات میکروسکوپ الکترونی،

مثل پیریت، پیرویت، مگنتیت، بورنیت، کالکوپیریت، هماتیت و کانی‌های دگرسانی مثل پتاسیم فلدسپار و بیوتیت گرمایی مشخص شده است. $\log fO_2$ برای شرایط برآوردی ژنر کانسار سونگون در این دما میان ۲۰- تا ۳۳- و $\log fS_2$ میان ۶- تا ۱۵- است (مطابق نمودار رسم شده). قابل توجه است که مگنتیت می‌تواند در دمای بالا (۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) با بیوتیت گرمایی همراه باشد در حالی که در دمای کمتر از ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد، بیوتیت گرمایی در میدان پایداری هماتیت قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰، میدان پایداری کانی‌ها برای دگرسانی‌های پتاسیک و فیلک در نمودارهای فعالیت Na^{2+} بر H^+ در برابر فعالیت K^+ بر H^+ نشان داده شده‌اند (Hezarkhani et al., 1999).

هنگامی که سیال‌ها از یک منشأ نفوذی گرم مهاجرت می‌کنند و دمای آنها کاهش می‌یابد، میدان پایداری فلدسپار قلیایی با مصرف آلیت گسترده‌تر می‌شود که دگرسانی پتاسیک سنگ دیواره را مشخص می‌کند (Barnes, 1967). واکنش وارون، زمانی رخ می‌دهد که سیال مهاجرت‌کننده به منبع گرمایی در محیط برسد و میدان پایداری آلیت با مصرف فلدسپار قلیایی گسترده‌تر شود. دگرسانی فیلک توسط ادامه کاهش دما، بر روی دگرسانی پتاسیک ایجاد می‌شود. در مقاطع مطالعه شده از زون فیلک، کوارتز به صورت حفره‌دار و به تعداد فراوان دیده شده است. میدان پایداری مسکوویت با مصرف آلیت افزایش می‌یابد (Hezarkhani et al., 1999). همان‌گونه که از نمودارهای شکل ۱۰ مشخص است، میدان پایداری فلدسپار قلیایی در شرایط برآوردی برای کانسار سونگون در منطقه دگرسانی پتاسیک رو به گسترده‌گی است. در منطقه دگرسانی فیلک این شرایط برای کانی مسکوویت ایجاد می‌شود. کانی شلیت نیز که پیش‌تر، از این کانسار گزارش شده است (موسوی حرمی، ۱۳۶۷)، به مقدار بسیار کم دیده شد.

۸- محیط فیزیکوشیمیایی در کانسار اسکارن سونگون

سامانه‌ای که کانی‌های مناطق دگرسانی اسکارن در آن بررسی می‌شوند Ca-Fe-Si-C-O-H و سامانه کانسنگ Cu-Fe-S است. از داده‌های تجزیه کلیوپروکسن در بخش اسکارن برای محاسبات زمین‌فشارسنجی استفاده شده است. برای فشارسنجی کلیوپروکسن‌ها می‌توان از نمودار Al^{VI} در برابر Al^{IV} استفاده کرد (Aoki & Shiba, 1973). رسم موقعیت کلیوپروکسن‌های مطالعه شده در این نمودار، محدوده‌ای میان فشار متوسط تا پایین (۰/۷ کیلو بار) را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).

مطالعات کانی‌شناسی و بافتی (وجود در هم‌رشدی، مرز بلورهای جانیشین شده میان کانی‌های کدر و کالک‌سیلیکات‌های بدون آب) بیان می‌کنند که میزان نامحسوسی از کانی‌های کدر (اکسیدها و سولفیدها) در سنگ‌های هورنفلس، طی زیر مرحله I ایجاد شده‌اند (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). وجود بافت جانیشینی میان کانی‌های کدر و کالک‌سیلیکات‌های بدون آب و بافت پرکننده فضای خالی میان کالک‌سیلیکات‌های بدون آب و هم‌رشدی میان کانی‌های کدر و کالک‌سیلیکات‌های آب‌دار (آپیدوت و ترمولیت - اکتینولیت)، مدارکی کامل مبنی بر گسترش کانی‌های کدر و کالک‌سیلیکات‌های آب‌دار طی دگرسانی پسروده اولیه (مرحله فرعی III) هستند (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). توالی همبود آنها به صورت گالن، اسفالریت، پیریت، مگنتیت، هماتیت، کالکوپیریت و بورنیت است. به نظر می‌رسد تبلور کانی‌های کدر توسط ترکیب کانی‌های کالک‌سیلیکات بدون آب و فضاهای خالی، کنترل شده باشد (مطابق مطالعات این بررسی).

تمرکز کانی‌های کدر در فاصله ۲۰- تا ۰- متری از توده نفوذی، این نظریه را حمایت می‌کند که فراوانی و نوع کانی‌های کدر، به فاصله آنها از توده نفوذی مربوط است (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). طبق داده‌های به دست آمده از مطالعات (Calagari & Hosseinzadeh, 2005)، ایزوتوپ سولفور از نمونه‌های سولفیدی همچون پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت، که بیشتر از منطقه دگرسانی

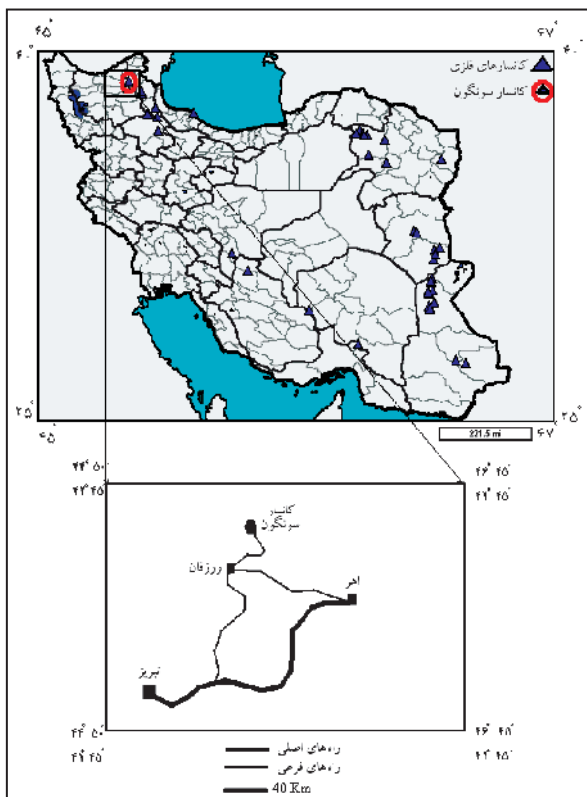
(۰/۷ کیلو بار) قرار می‌گیرد که البته این مقدار با فشار به دست آمده برای قسمت پورفیری، متفاوت است.

مقداری پیرویت به صورت محلول جامد در اسفالریت موجود در منطقه دگرسانی پتاسیک، مشخص شده که با توجه به نمودار مربوط به درصد پیرویت در اسفالریت، موقعیت کانسار سونگون در فشار ۰/۵ کیلو بار قرار گرفته است. کانی‌های پیروکسن تجزیه شده از دگرسانی پتاسیک و اسکارن بیشتر در محدوده کانی دیوپسید قرار داشتند. در مقاطع مطالعه شده از منطقه دگرسانی فلیک، کوارتز به صورت حفره دار و به تعداد فراوان دیده شده است.

کانسنگ همراه با تشکیل دگرسانی پتاسیک و فلیک با دمای میان ۳۵۰-۴۵۰ درجه سانتی گراد شکل گرفته و بین این دو دگرسانی متمرکز شده است. در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد و فشار ۰/۵ کیلو بار (شرایط برآوردی تشکیل کانسنگ در دگرسانی پتاسیک)، $\log f_{S_2}$ میان ۱۸- تا ۲۴- و pH میان ۲/۵ تا ۷/۵ است. در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد و فشار ۰/۵ کیلو بار (شرایط برآوردی تشکیل کانسنگ در دگرسانی فلیک) $\log f_{O_2}$ میان ۲۰- تا ۳۳- و $\log f_{S_2}$ میان ۶- تا ۱۵- است. کانسنگ اسکارن در سومین مرحله کانی‌سازی که با اولین مرحله اسکارن پسروده همراهی می‌کند، $\log f_{S_2}$ میان ۱- تا ۶- و دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد ایجاد شده است. این نتایج با توجه به نمودارهای رسم شده در این بررسی ارائه شده است.

سیاسکزاری

بدین وسیله نگارندگان، مراتب سپاس و امتنان خود را از مدیریت محترم معدن مس سونگون، برای فراهم آوردن تسهیلات لازم در انجام پژوهش بالا ابراز می‌دارند و از جناب آقای دکتر بهزاد حاجعلیلو، مدیر گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور تبریز، برای کمک‌هایشان در مطالعات آزمایشگاهی کمال قدردانی را دارند.



شکل ۱- جایگاه کانسار سونگون در ایران و نقشه راه‌های منتهی به معدن سونگون (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۴).

کلینوپیروکسن که به‌طور بخشی به اپیدوت تبدیل شده است دیده می‌شود که متعلق به این شرایط محیطی است (شکل ۱۲- الف). وجود کلینوپیروکسن‌هایی که در کناره‌ها به کلسیت دگرسان شده‌اند مدرکی دیگر بر نوع محیط حاکم در این مرحله در کانسار است (شکل ۱۲- ب).

طی زیر مرحله III، یون Ca^{2+} در دمای بیشتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، به تدریج از کالک‌سیلیکات‌ها و برخی کربنات‌ها شسته می‌شود (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). آندرادیت حتی در مراحل با سولفیدی شدن بالا پایدار است (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فعالیت گوگرد کمتر از 10^{-6} ، سیال با آندرادیت در تعادل نبوده و در نتیجه به کوارتز، کلسیت و پیریت دگرسان شده است. با کاهش سولفیدی شدن، گروه کانی‌های کوارتز، کلسیت و مگنتیت ایجاد می‌شوند (Calagari & Hosseinzadeh, 2005). مدرکی بر این رویداد را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد.

با همراهی مگنتیت، کوارتز و کلسیت در زیر مرحله III، ثابت می‌شود که فعالیت S_2 سیال متاسوماتیسم، تقریباً مساوی $10^{-6/5}$ و دمای آن کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. تشکیل گالن پیش از مگنتیت نشان می‌دهد که در مراحل اولیه فعالیت S_2 ، مقداری بیش از $10^{-6/5}$ است (Calagari & Hosseinzadeh, 2005).

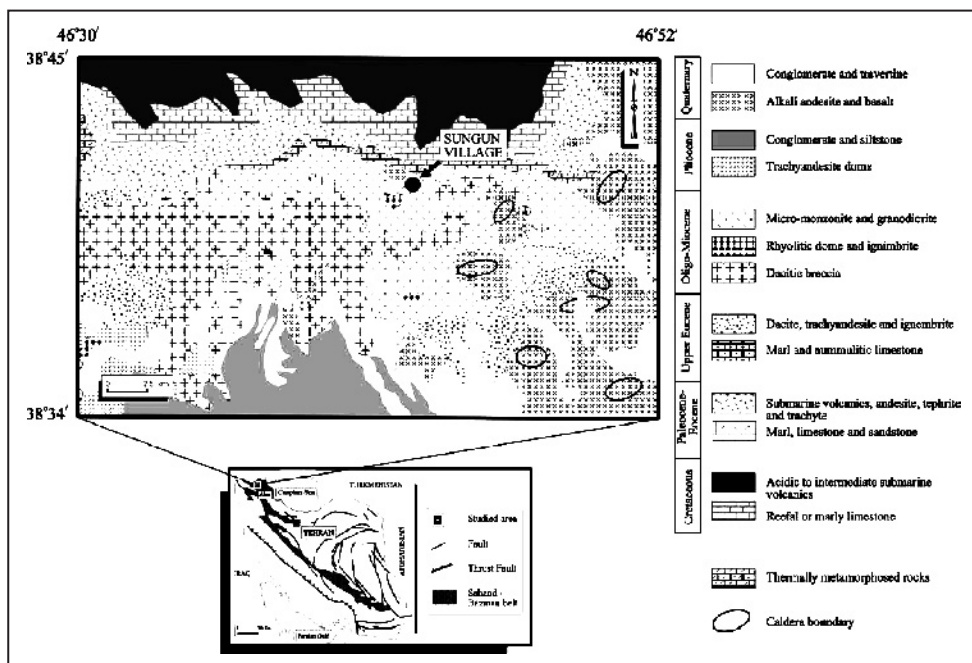
گسترش کانی‌های با دمای کم همچون کلرید و کانی‌های رسی با دانه‌های ریز هماتیت و کلرید ثانویه، نشان‌دهنده فعالیت اکسیژن بالا و ماهیت هیدرولیز کنندگی سیال‌های متاسوماتیک تأخیری در زیر مرحله IV هستند. در شکل ۱۳ موقعیت دما و $\log f_{S_2}$ در محیط تشکیل کالکوپیریت و پیریت موجود در کانسار اسکارن سونگون مشخص شده است. $\log f_{S_2}$ حدوداً میان ۱- تا ۶- است. در این شرایط، آندرادیت و اندریت هم تشکیل می‌شود.

نبود ولاتونیت در همراهی گارنت و پیروکسن در زیر مرحله دوم مرحله اسکارن پسروده، نشان‌دهنده دمای حاکم ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و f_{O_2} میان 10^{-33} تا 10^{-26} است. در اسکارن پسروده با دمای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کالک‌سیلیکات‌های بدون آب پایدارند اما در دمای کمتر از این درجه همراه با کاهش pH کالک‌سیلیکات‌های آبدار (اپیدوت، ترمولیت و اکتینولیت)، سولفیدها (گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت و بورنیت)، کربنات‌ها (کلسیت و آنکرایت) و اکسیدها (مگنتیت و هماتیت) پایدار می‌شوند (خوئی و فارسی نیا، ۱۳۷۲).

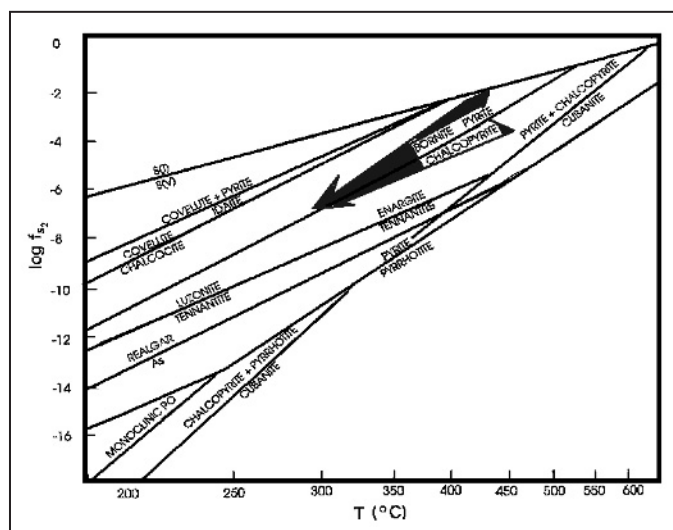
۹- نتیجه‌گیری

کالکوپیریت در منطقه دگرسانی پتاسیک با کولیت به صورت جایگزین یافت شده است؛ به این صورت که بیشتر در کناره‌های کالکوپیریت‌ها می‌توان کولیت جایگزین شده را مشاهده کرد. از این مورد می‌توان برای دماسنجی استفاده کرد زیرا این حالت نشان‌دهنده ادخال است که در دمای ۳۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. کانی دیگری که به صورت جدایشی با کالکوپیریت همراهی می‌کند، بورنیت است. این کانی به صورت جانشینی با کالکوپیریت هم دیده می‌شود. قرارگیری اسفالریت بر روی کالکوپیریت در برخی مقاطع دیده شد که این ادخال برای دماسنجی مناسب است و جدایشی در دمای کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. برای تشکیل محلول جامد این دو کانی دمایی بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد لازم است. موزایت به صورت میانبار درون مسکوویت در منطقه اکسیدی و همراه با آپاتیت در کنار رگچه‌ای از کلسیت در منطقه دگرسانی پتاسیک دیده شده است. آمفیبول‌هایی تجزیه شده از دایک DK2، نشان می‌دهند که ترکیب آنها بیشتر در محدوده آمفیبول نوع هورنبلند قرار می‌گیرد و فرومنیزین هستند.

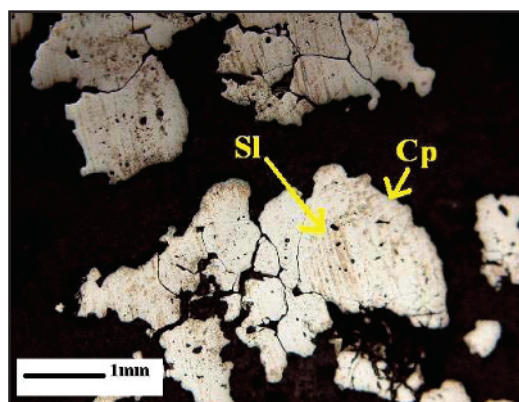
از نتایج تجزیه کانی پیروکسن اسکارن برای زمین‌فشارسنجی استفاده شد. در نمودار (Aoki & Shiba (1973)، کانسار سونگون در موقعیت فشار متوسط تا پایین



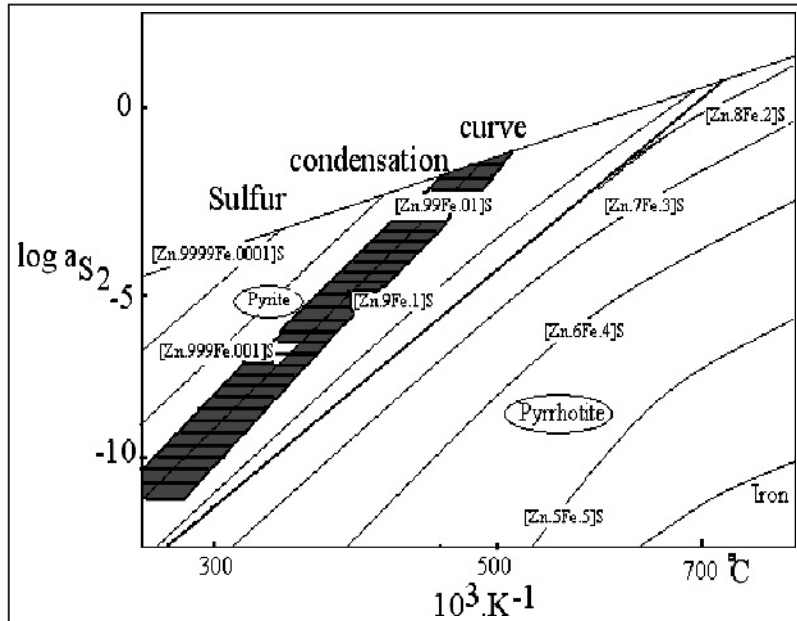
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه کانسار سونگون (Hezarkhani, 2005).



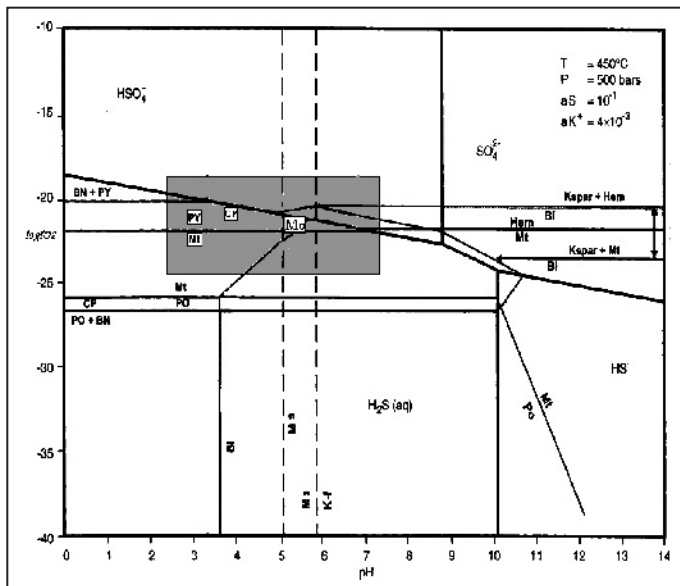
شکل ۳- نمودار روند تشکیل کانی‌های مختلف سولفیدی با نزول دما و $\log f_{S_2}$ (برگرفته از Barnes, 1967).



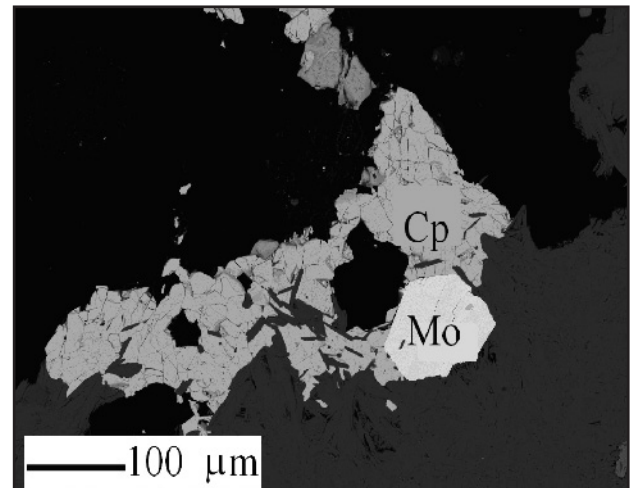
شکل ۴- تصویری در نور بازتابی از کالکوپیریت و اسفالریت که به صورت جدایشی در زون پتاسیک بر روی آن قرار دارد.



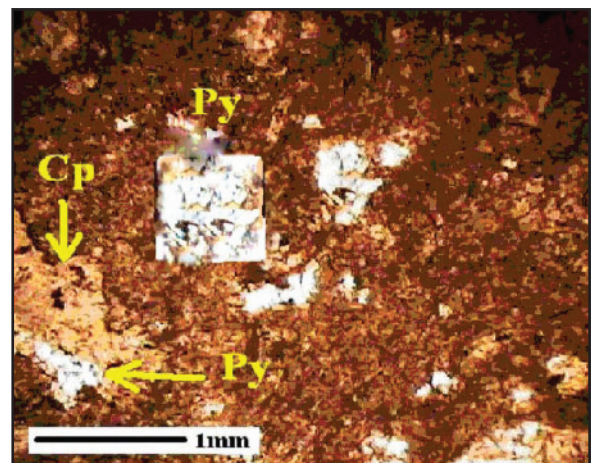
شکل ۵- موقعیت اسفالریت‌های تجزیه شده در نمودار $\log aS_2$ و دما (بر گرفته از Barnes, 1967 با تغییرات).



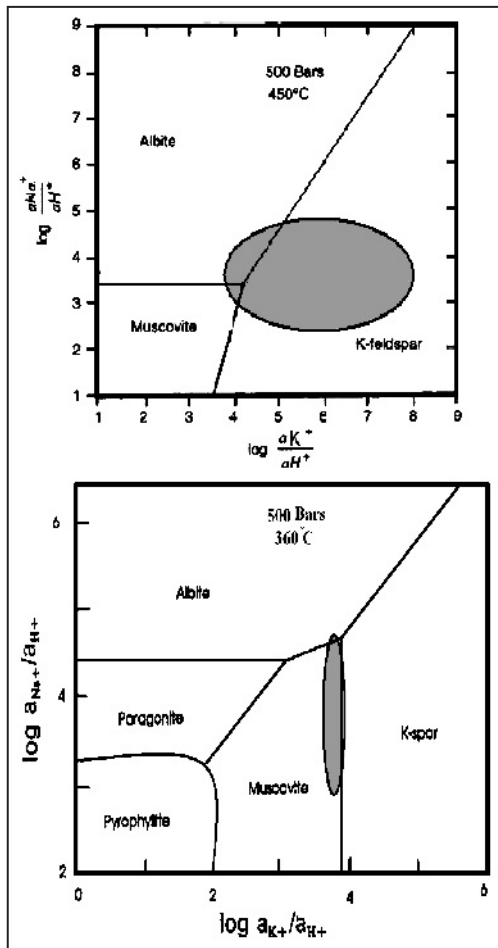
شکل ۷- نمودار هم‌دمای $\log fO_2$ و pH در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰۰ بار (شرایط برآوردی برای بیشتر کانه‌زایی مولیبدنیت و دگرسانی پتاسیک همراه با آن در سونگون) رسم شده است (بر گرفته از Hezarkhani et al., 1999).



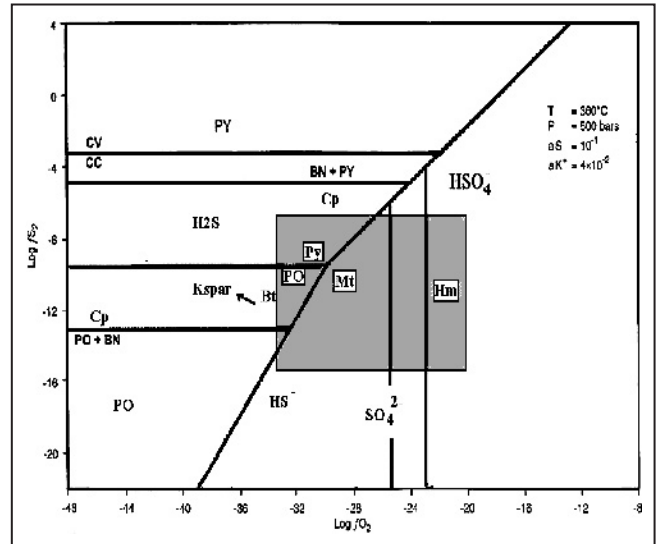
شکل ۶- تصویر BSE از مولیبدنیت هزاگونال و کالکوپیریت در زون پتاسیک.



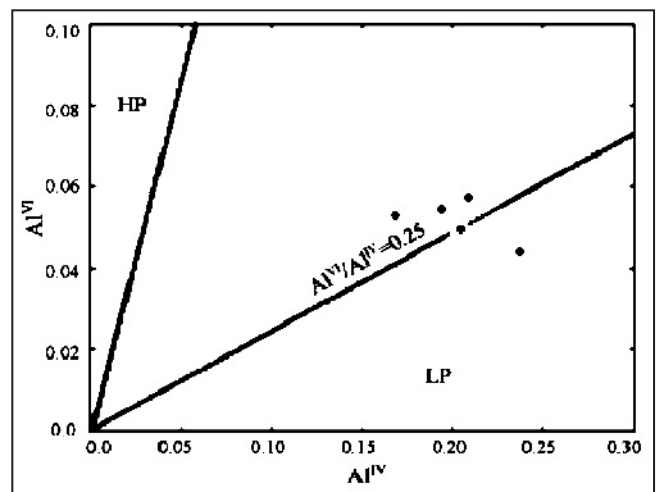
شکل ۸- تصویر در نور بازتابی از کانی پیریت که توسط کانی‌های ثانویه جانشین شده است. در گوشه سمت چپ تصویر می‌توان دربر گرفته شدن پیریت توسط کالکوپیریت را دید.



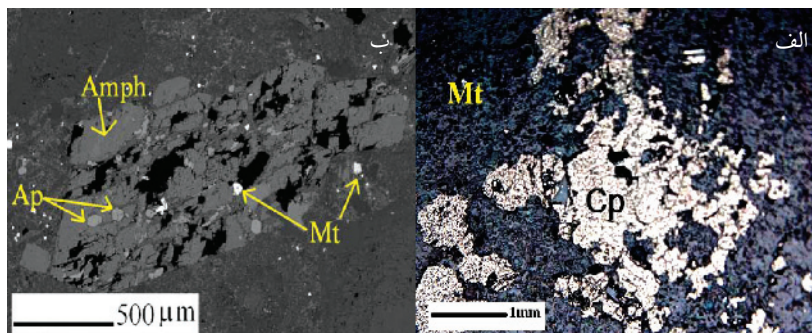
شکل ۱۰- الف) میدان پایداری کانی‌ها برای دگرسانی فیلیک در نمودار فعالیت Na^{2+} بر H^+ در برابر فعالیت K^+ بر H^+ را نشان می‌دهد (برگرفته از Barnes, 1967). ب) میدان پایداری کانی‌ها برای دگرسانی پتاسیک در نمودار فعالیت Na^{2+} بر H^+ در برابر فعالیت K^+ بر H^+ را نشان می‌دهد (برگرفته از Hezarkhani et al., 1999).



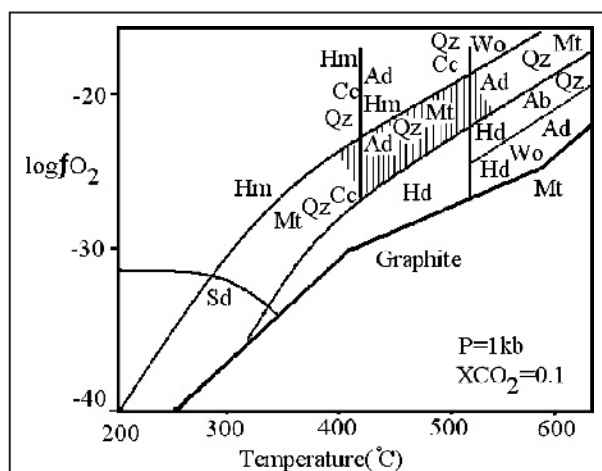
شکل ۹- نمودار با متغیرهای فعالیت f_{S_2} و f_{O_2} ، میدان پایداری کانی‌هایی مثل پیریت، پروتیت، مگنتیت، بورنیت، هماتیت و کانی‌های دگرسانی مثل فلدسپار قلیایی و بیوتیت گرمایی مشخص شده است (برگرفته از Hezarkhani et al., 1999).



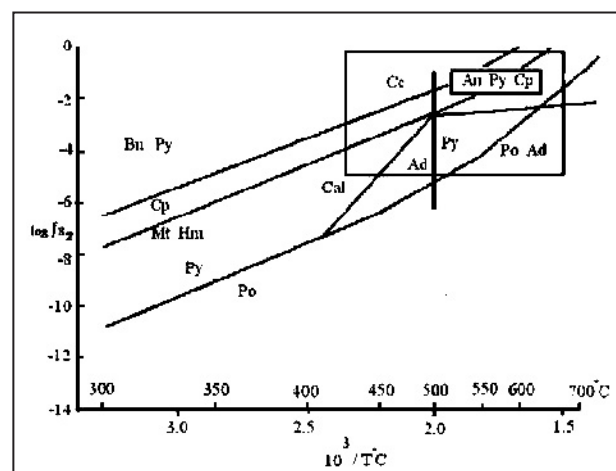
شکل ۱۱- توزیع محوطه فشار تبلور کلینوپیروکسن‌ها برحسب Al^{VI}/Al^{IV} در بخش اسکارن سونگون (Aoki & Shiba, 1973).



شکل ۱۲- الف) کالکوپیریت را در کنار مگنتیت در اسکارن سونگون در نور بازتابی نشان می‌دهد. ب) تصویر BSE از درشت بلور آمفیبول یا میانبارهای آپاتیت، تیتانیت، مگنتیت و زنجیره‌ای از کلریت و سیدریت در خمیره کوارتز، کلریت، سیلیکات آلومینیوم، آمفیبول و تیتانومگنتیت است.



شکل ۱۴- نمودار دو متغیره، $\log fO_2$ و دما برای کانی‌های محدوده اسکارن کانسار (برگرفته از Calagari & Hosseinzadeh, 2005).



شکل ۱۳- نمودار دو متغیره، $\log fS_2$ و $10^3/T$ برای کانی‌های اسکارن سونگون (برگرفته از Calagari & Hosseinzadeh, 2005).

کتابنگاری

- آفانباتی، ع.، ۱۳۶۴- نقشه تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری ایران، مقیاس ۱:۲۰۰۰۰۰.
- خوئی، ن.، فارسی‌نیا، ع.، ۱۳۷۲- سونگون‌نگینی دیگر بر کمربند مس، فصلنامه علوم زمین، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۴- نقشه راه‌های استان آذربایجان شرقی، مقیاس ۱:۵۰۰۰.
- موسوی حرمی، ر.، ۱۳۶۷- رسوب‌شناسی، موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.
- مهرپر تو، م. و ترکیان، م.، ۱۳۷۲- پژوهشی در سیالات درگیر نهشته‌های مس-مولیبدن پورفیری سونگون، فصلنامه علوم زمین، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

References

- Aoki, K. & Shiba, I., 1973- Pyroxenes from Inerzolite inclusions of Itinom e-gata, Japan. *Lithos*, 6: 41-51.
- Barnes, H. L., 1967- *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 404-460 p.
- Calagari, A. A., 1997- *Geochemical, Stable isotope, noble gas, and fluid inclusion studies of mineralization and alteration at Sungun porphyry copper deposit, East Azarbaiddan, Iran: Implication for genesis*, PhD Thesis, Manchester University, 537 p.
- Calagari, A. A., Hosseinzadeh, GH., 2005- *The mineralogy of copper-bring Skarn to the east of the Sungun-Chay river, East Azarbaiddan, Iran*. *Asian Earth Sciences*.
- Cepedal, A., Martin-Izard, A., Roguilon, R., Rodriguez, L., Spiering, E. & Gonzales-Nistal, S., 2000- Origin and evolution of the calcic and magnesian skarns hosting the El Valle-Boinas Copper-gold deposit, Asturias (Spain). *Geochemical exploration*, 71: 119-151.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A. E. & Gammons, C., 1998- Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran, *Economic Geology*, 93: 651-670.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A. E. & Gammons, C., 1999 - Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the sungun porphyry copper deposit, Iran, *Mineralium Deposita*, 34: 770-783.
- Hezarkhani, A., 2002- Mass changes during hydrothermal alteration /mineralization in a porphyry copper deposit, eastern Sungun, north western Iran, Department of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineering, Amirkabir University, *Asian Earth Sciences*.
- Hezarkhani, A., 2005- *Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran*, Department of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineering, Amirkabir University, *Asian Earth Sciences*.
- Lowell, J. D., 1974- Variations in zoning patterns in porphyry copper deposits. *Canadian Institute of mining and metallurgy Bulletin*, 99 p.
- Ohmoto, H. & Rye, R. O., 1979- *Isotopes of sulfur and carbon*, in New York, Rinehart and Winston, 509 p.
- Parsons, A. B., 1933- *The Porphyry copper*, New York, 581 p.
- Scott, S. D., 1973- Experimental calibration of the Sphalerite geobarometer., *Economic Geology*, 68: 466-474.