



کانه نگاری و شیمی کانه‌ها در عدسی‌های سولفیدی - اکسیدی موجود در توده مافیک میشو (جنوب غرب مرنده، آذربایجان شرقی)

مهسا قربانی^{۱*}، محمدرضا حسین‌زاده^۱، محسن مؤید^۱، امیرمرتضی عظیم‌زاده^۲، نصیر عامل^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- دانشگاه علوم زمین و ژئوفیزیک کاربردی لئوین اتریش

(دریافت مقاله: ۹۱/۱۰/۳، نسخه نهایی: ۹۲/۲/۲۳)

چکیده: توده‌ی مافیک میشو در جنوب غرب مرنده و بخش مرکزی ارتفاعات میشو در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. بررسی‌های انجام شده بر روی این توده‌ی نفوذی وجود کانی‌سازی سولفیدی - اکسیدی را نشان می‌دهد. بخش سولفیدی بیشتر شامل پیرویت بوده که با کالکوپیریت، پنتلاندیت، اسفالریت، پیریت و ترویلیت همراه است. ایلمنیت و به مقدار کمتر مگنتیت فاز اکسیدی را تشکیل می‌دهند. کانی‌های سولفیدی اولیه در اثر دگرسانی به وسیله‌ی پیریت و ویولاریت جانشین شده‌اند. با توجه به حضور بافت جدایشی در نمونه‌های مورد بررسی مانند کالکوپیریت در اسفالریت می‌توان دماهای بالای 400°C را برای تشکیل فازهای سولفیدی در نظر گرفت. نسبت Co/Ni این سولفیدها نشانگر تشکیل آن‌ها در یک سیستم Ni-Fe-Cu آمیزش ناپذیر است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌های مافیک؛ کانی‌سازی سولفیدی؛ ریزپر دازش، آمیزش ناپذیر؛ میشو؛ مرنده.

مقدمه

بخش‌های مافیک حضور دارند. بررسی‌های انجام شده در منطقه میشو، وجود عدسی‌های سولفیدی - اکسیدی را داخل سنگ‌های مافیک نشان می‌دهد. بررسی‌های مقدماتی روی این همبافت شامل تهیه نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش تبریز - پلدشت توسط [۳] بود که طی آن، این مجموعه بعنوان همبافت افیولیتی معرفی شده است. در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مرنده [۴]، این مجموعه به عنوان سنگ-های آذرین درونی معمولی معرفی شده است. در [۵] توده‌ی مافیک و اولترامافیک میشو را از بقایای پوسته اقیانوسی پالئوتتیس اول به سن هرسنین تعریف شده‌اند. بررسی‌هایی نیز در مورد روابط بافتی کانی‌های تیره و سیلیکات‌ها در این سنگ‌ها توسط [۶] صورت گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی دقیق کانی‌شناسی عدسی‌های سولفیدی، با تکیه بر نتایج آنالیز ریزپر دازشی روی کانه‌های موجود است.

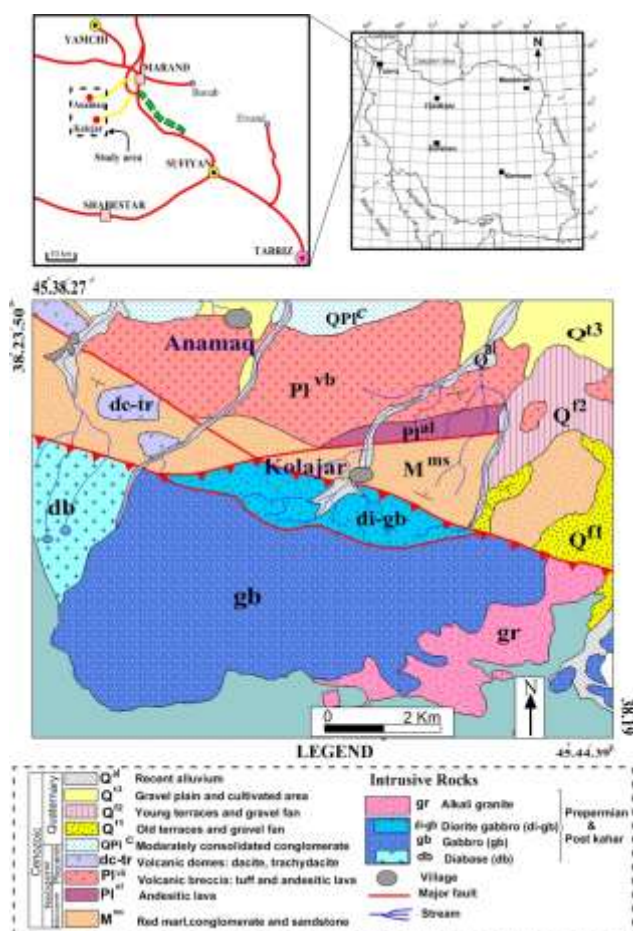
ذخایر سولفیدی $\text{Cu-Ni} \pm \text{PGE}$ ماگمایی در نتیجه‌ی جدایش و انباشت قطرات سولفید مایع از ماگمای مافیک یا اولترامافیک و ورود عناصر کالکوفیل به داخل این قطرات از ماگمای سیلیکاتی تشکیل می‌شوند [۱]. مایع سولفیدی به عنوان یک جمع کننده برای عناصر کبالت، مس، نیکل و گروه پلاتین عمل می‌کند به علت اینکه این عناصر به طور ترجیحی در مایع سولفیدی ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر مایع سیلیکاتی متمرکز می‌شوند [۲]. گستره‌ی مورد بررسی در فاصله‌ی ۸ کیلومتری جنوب-غربی مرنده استان آذربایجان شرقی، بین طول‌های جغرافیایی شرقی $38^{\circ}23'50''$ تا $38^{\circ}19'00''$ و عرض‌های جغرافیایی شمالی $45^{\circ}38'27''$ تا $45^{\circ}44'39''$ واقع شده است. توده‌ی مافیک میشو رخنمون اصلی این گستره را تشکیل می‌دهد و بخش‌های اولترامافیک با مرز گسل و به صورت پراکنده همراه

* نویسنده مسئول، تلفن-نمابر: ۳۳۹۲۷۱۶ (۰۴۱۱)، پست الکترونیکی: gorbani.mahsa@yahoo.com

زمین‌شناسی منطقه

توده‌ی مافیک - اولترامافیک میشو در منطقه‌ی مورد بررسی به طول حدود ۱۲ کیلومتر و عرض حدود ۵ کیلومتر در ۸ کیلومتری جنوب‌غرب مرند در استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). نمونه‌های مافیک دارای ترکیب گابرونوریت، تروکتولیت و الیوین گابرونوریت بوده و بخش اولترامافیک دارای ترکیب هارزبورژیت - لرزولیت‌اند. در داخل سنگ‌های مافیک، عدسی‌های سولفیدی رخنمون دارند که در بخش‌هایی از این عدسی‌ها کانه‌های سولفیدی دستخوش هوازدگی شده و به اکسیدهای آهن برون‌زا (بیشتر گوتیت) تبدیل شده و رنگ زرد مایل به قهوه‌ای تا آجری به آن‌ها داده است (شکل ۲). این توده سنگ‌های بیشتر شیلی- مارنی (تشکیلات کهر) به سن پرکامبرین را گسسته و باعث دگرگونی همبری در آنها شده است. از این رو سن این توده‌ها جوان‌تر از سازند کهر در نظر گرفته شده است. رسوب‌های پرمین به طور پیش‌رونده روی

سطح فرسایش یافته‌ی گرانیت A-type به سن هرسینین جای گرفته‌اند [۷] که خود آنها نیز در این مجموعه‌ی سنگی (توده مافیک - اولترامافیک) نفوذ کرده‌اند. بنابراین سن این توده به زمان پس از پرکامبرین و پیش از هرسینین نسبت داده می‌شود. توده‌ی گابرویی میشو در بخش شمالی در راستای یک گسل وارون در کنار سازندهای تخریبی - تبخیری میوسن (شامل مارن‌های سرخ، مارن‌های ژپس‌دار، ماسه سنگ‌های دارای نمک و ژپس) قرار گرفته است. این نهشته‌ها در بخش‌های شمالی‌تر به وسیله‌ی گنبدهای آتشفشانی کوچک (تراکی- داسیت تا داسیت) بریده شده و با سنگ‌های آذر آواری (توف‌ها و آگلومراها) و گدازه‌های آندزیتی پلیوسن پوشیده شده‌اند. نبود چینه‌ای دونین و کربونیفر و دگرشیبی زاویه‌دار بین نهشته‌های پیش‌رونده پرمین و طبقات پالئوزوئیک زیرین در کوه‌های میشو را می‌توان به حرکات کوهزایی هرسینین نسبت داد [۵].



شکل ۱ نقشه‌ی ساده شده‌ی توزیع واحدهای سنگی منطقه‌ی مورد بررسی (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مرند؛ [۴] با تغییرات) همراه با نقشه‌ی راه‌های دسترسی به منطقه.

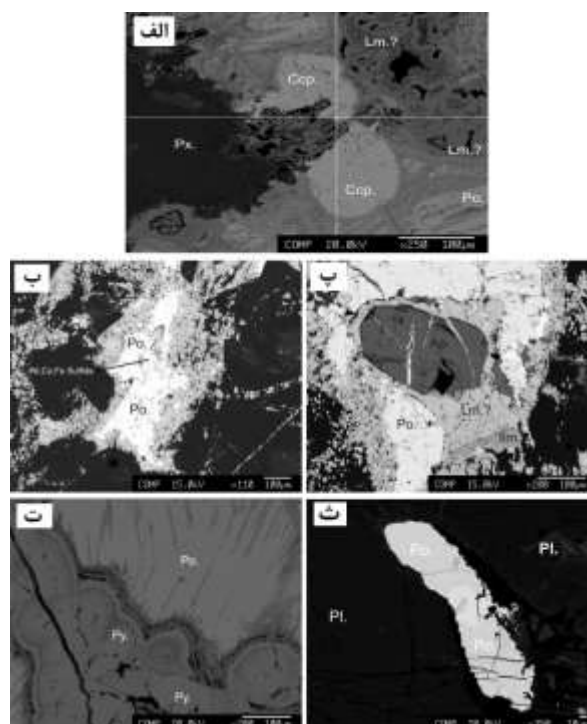


شکل ۲ تصاویر عدسی‌های سولفیدی موجود در داخل گابروها. در تصاویر الف، ب و پ آثاری از هوازدگی به گوشتیت مشاهده می‌شوند.

روش بررسی

تعداد ۱۵ مقطع صیقلی از سنگ‌های مافیک میشو مورد بررسی کانن نگاری قرار گرفتند. برای تعیین کانی‌شناسی دقیق عدسی‌های سولفیدی موجود در منطقه، ۳ نمونه سالم و نادگرسان از توده‌ی مافیک منطقه با یک ریزپردازنده‌ی الکترونی در آزمایشگاه Eugen F. stumpfl دانشگاه لئوبن

اتریش با یک ابریژونده‌ی مدل Jeol JXA 8200 آنالیز شده و تصاویر پس‌پراکنده نیز با استفاده از همین دستگاه تهیه شد (شکل ۳). این دستگاه به روش WDS سولفیدهای آهن، نیکل و مس موجود را با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ Kv، جریان پرتو الکترونی ۱۰ nA و بیشینه‌ی زمان تجزیه ۲۰ ثانیه تجزیه کرد.



شکل ۳ تصاویر Back-scatters از کانی‌سازی سولفیدی در نمونه‌های مافیک منطقه‌ی مورد بررسی. الف) کالکوپیریت و پیروتیت که در اطراف کانی پیروکسن دیده می‌شوند، ب) پیروتیت که دارای ادخال‌هایی از سولفیدهای Ni-Cu-Fe است، پ) پیروتیت که در اطراف آن کانی اکسیدی ایلمنیت مشاهده می‌شود، ت) پیریت نسل دوم حاصل از دگرسانی پیروتیت، ث) پیروتیت که فضای خالی بین کانی‌های پلاژیوکلاز را پر کرده است.

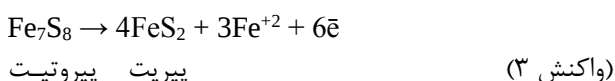
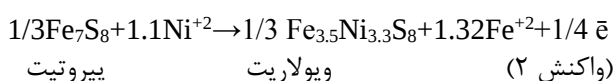
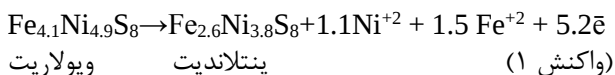
کانی شناسی

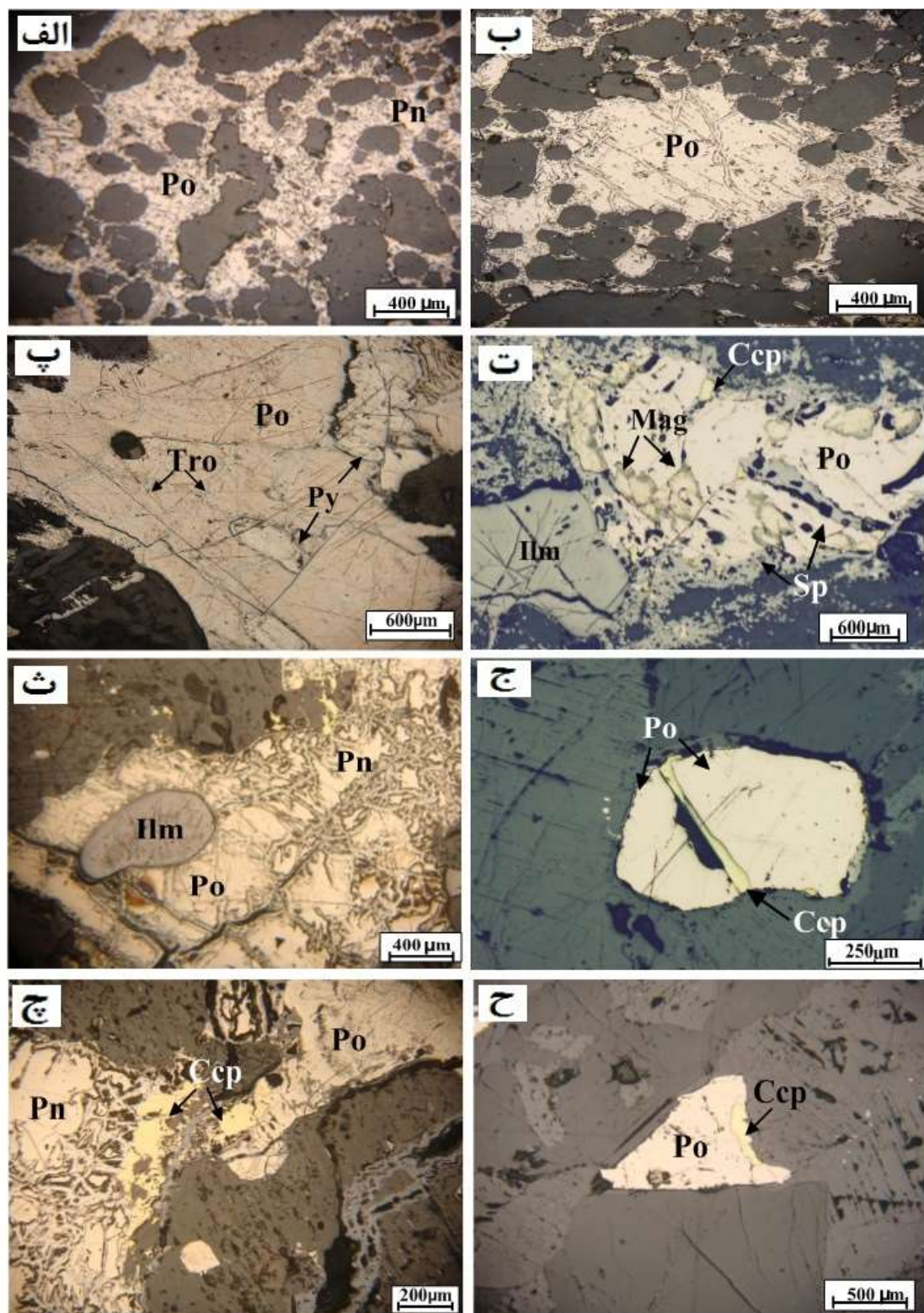
بررسی های میکروسکوپی نشان می دهد که کانی سازی در سنگ های مافیک میشو شامل فازهای سولفیدی (Fe, Ni, Cu) و اکسیدی (Fe, Ti) است. بخش سولفیدی بیشتر شامل پیرویتیت (Fe_{1-x}S)، بوده که با کالکوپیریت (CuFeS₂)، پنتلاندیت (Fe, Ni)₉S₈، اسفالریت (ZnS)، پیریت نسل اول (FeS₂) و ترویلیت (FeS) همراه است. ایلمنیت (FeTiO₂) و به مقدار کمتر مگنتیت (Fe₃O₄) فاز اکسیدی را تشکیل می دهند. کانی های ویولاریت (Ni₂FeS₄)، پیریت نسل دوم (FeS₂) از تبدیل کانی های سولفیدی اولیه و گوتیت (FeO.OH) طی هوازدگی کانی های سولفیدی تشکیل شده اند. کانی های باطله شامل پلاژیوکلاز، اورتوپروکسن، کلینوپروکسن، الیون و فازهای ثانویه شامل سرپانتین، تالک، کلسیت، سیرسیت، کلریت و کانی های رسی می شوند. کانی سازی سولفیدی در نمونه های مافیک مورد بررسی بیشتر به صورت بین دانه ای رخ داده است؛ بدین صورت که کانه های سولفیدی فضاهای خالی بین کانی های سیلیکاتی را پر کرده و در برخی از نمونه ها آن ها را کاملاً در برگرفته و همانند سیمان به هم چسبانده اند (شکل ۴- الف). پیرویتیت فراوانترین فاز سولفیدی موجود در نمونه های مورد بررسی بوده و تا ۶۰٪ نمونه ها را شامل می شود. رنگ قهوه ای مایل به زرد تا صورتی ناهمسانگرد بسیار قوی به رنگ زرد و آبی متمایل به خاکستری، قابل تشخیص بوده و تقریباً در تمام نمونه ها حضور دارند (شکل ۴ ب). در داخل برخی از پیرویتیت ها تیغه هایی به رنگ روشن و ترویلیت دیده می شوند. (شکل ۴ پ). گاهی پیرویتیت ها دارای نفوذی هایی از پیریت (شکل ۴ پ)، کالکوپیریت و اسفالریت (شکل ۴ ت) بوده و در بعضی از نمونه ها پیرویتیت جانشین مگنتیت (شکل ۴ ت) و ایلمنیت (شکل ۴ ث) شده است. همچنین در تعدادی از نمونه ها هم رشدی بین پیرویتیت و کالکوپیریت (شکل ۴ ج) مشاهده می شود. کالکوپیریت تا (۱۵٪)، در تعدادی از نمونه ها به صورت کاملاً بی شکل حضور داشته و بعضی از فضاهای بین بلورهای مجاور نظیر پیرویتیت را پر کرده است (شکل ۴ چ). همچنین این کانی در برخی از نمونه ها از حاشیه جانشین پیرویتیت شده (شکل ۴ ح) و گاهی به صورت ادخال در داخل کانی های پیرویتیت و اسفالریت (شکل ۵ الف) مشاهده می شود. پنتلاندیت تا (۲۰٪) با فرمول شیمیایی (Fe, Ni)₉S₈ دارای مقادیر متفاوتی آهن و نیکل است که اغلب میزان Ni آلی بیشتر از Fe است. این کانی با رنگ بازتابی کرم روشن قابل تشخیص بوده و در اغلب نمونه های مورد بررسی به صورت ادخال در پیرویتیت مشاهده می شود

(شکل ۵ ب). ترویلیت به مقدار (کمتر از ۰.۵٪) به صورت تیغه های روشن درون پیرویتیت دیده شده است (شکل ۴ پ). ترویلیت معمولاً در سنگ های آذرین مافیک وجود ندارد ولی حضور آن نشان می دهد که پیرویتیت بسیار غنی از آهن بوده و در دمای پایین به صورت جدا از ترویلیت قرار گرفته است [۸]. پیریت نسل اول تا (۵٪) به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار و نیز به صورت ادخال در داخل پیرویتیت مشاهده می شود (شکل ۵ پ). اسفالریت تا (۱۰٪) در برخی از نمونه های مورد بررسی به صورت بلورهای مستقل و نیز ادخال در پیرویتیت مشاهده شده و گاهی از حاشیه جانشین پیرویتیت شده است (شکل ۴ ت). در تعدادی از نمونه ها، اسفالریت دارای بیماری کالکوپیریت است (شکل ۵ ت، ث). کانی های اکسیدی Fe-Ti، در نمونه های منطقه ای مورد بررسی شامل ایلمنیت تا (۰.۵٪) به رنگ خاکستری تیره (شکل ۴ ت، ث و شکل ۵ ج) و به مقدار خیلی کمتر، مگنتیت (شکل ۴ ت) هستند که به صورت جزایری در کانه های پیرویتیت مشاهده می شوند.

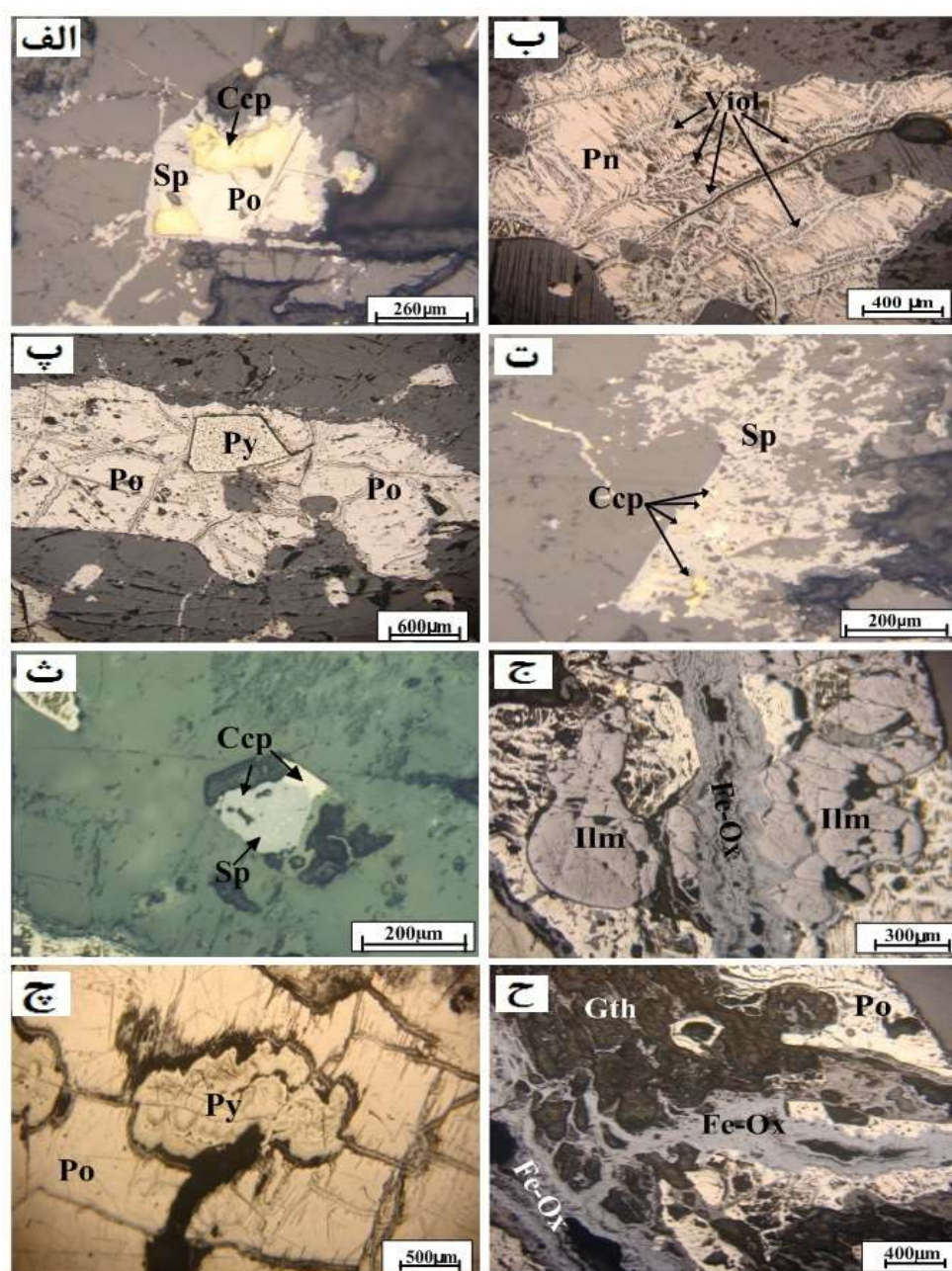
کانی های ثانویه

در نمونه های مورد بررسی پنتلاندیت و پیرویتیت در اثر دگرسانی در طول ریز شکستگی ها (شکل ۵ ب) به ویولاریت (Violarite) تبدیل شده اند طبق [۹] از تبدیل شدن پنتلاندیت به ویولاریت مقداری نیکل آزاد می شود (واکنش ۱) که این نیکل صرف تبدیل پیرویتیت به ویولاریت شده (واکنش ۲) و واکنش ها هنگامی که پنتلاندیت به طور کامل مصرف شد، متوقف می شوند. همچنین در برخی از نمونه ها پیرویتیت در اثر دگرسانی به پیریت ریزدانه دگرسان شده، که منجر به تشکیل بافتی به نام چشم پرده شده است (شکل ۵ چ). در جانیشینی پیرویتیت به وسیله ی پیریت نسل دوم (واکنش ۳)، فرض می شود که سولفور ثابت بوده و در نتیجه آهن و الکترون ها از سیستم خارج می شوند [۹]. در شرایط اکسایش شدید، پیرویتیت مستقیماً به هیدروکسی / اکسیدهای آهن مانند گوتیت تبدیل شده است (شکل ۵ ح) که به صورت حاشیه هایی در اطراف و رگه هایی در داخل پیرویتیت مشاهده می شوند.





شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های سولفیدی در نمونه‌های مورد بررسی (ppl). الف) کانه‌های سولفیدی پیروتیت و پنتلاندیت که کانی‌های سیلیکاتی را در برگرفته، ب) پیروتیت که در بیشتر نمونه‌های منطقه حضور دارد، پ) تیغه‌های به رنگ روشن ترویلیت و ادخال پیریت در پیروتیت، ت) پیروتیت دارای ادخال‌هایی از کالکوپیریت، اسفالریت و مگنتیت، ث) پیروتیت و پنتلاندیت که جانشین ایلمنیت شده‌اند، ج) هم رشدی پیروتیت و کالکوپیریت، چ) کالکوپیریت به صورت بی شکل که فضای بین بلورهای پیروتیت را پر کرده است، ح) کالکوپیریت که از حاشیه جانشین پیروتیت شده است.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های سولفیدی در نمونه‌های مورد بررسی (ppl). الف) ادخال کالکوپیریت در پیروتیت و اسفالریت که از حاشیه جانشین پیروتیت شده است. ب) پنتلاندیت که در اثر دگرسانی برونزادی به ویولاریت تبدیل شده است، پ) پیریت نسل اول نیمه شکل‌دار، که به صورت ادخال در پیروتیت مشاهده می‌شود، ت و ث) کانه اسفالریت که دارای بیماری کالکوپیریت است، ج) کانه اکسیدی ایلمنیت به رنگ خاکستری تیره و هیدروکسی / اکسیدهای آهن حاصل از اکسایش پیروتیت، چ) دگرسانی برونزادی پیروتیت به پیریت که منجر به تشکیل بافتی ثانویه به نام چشم پرنده شده است، ح) هیدروکسی / اکسیدهای آهن و گوتیت حاصل از اکسایش پیروتیت که به صورت حاشیه‌هایی در اطراف پیروتیت و رگه‌هایی که بلورهای پیروتیت را قطع کرده‌اند مشاهده می‌شوند. (پیروتیت: Po، پنتلاندیت: Pn، کالکوپیریت: Ccp، پیریت: Py، ترویلیت: Tro، اسفالریت: Sp، ایلمنیت: Ilm، مگنتیت: Mag، ویولاریت: Viol، گوتیت: Gth)

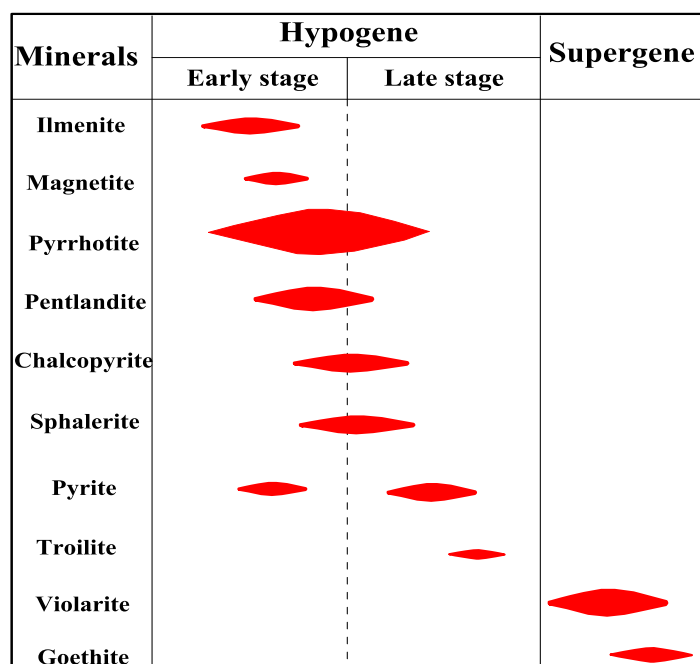
درهم که بعضی از آن‌ها نمایانگر بافت‌های جدایشی هستند، در کانه‌های سولفیدی میشو، معمول‌اند و شامل رشد کالکوپیریت

دنباله‌ی پاراژنتیکی کانی‌های درون‌زاد و برونزاد نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. بافت‌های رشد

آنالیز ریزپردازشی کانی‌های سولفیدی

از آنالیز ریزپردازشی کانی‌های سولفیدی نمونه‌های مافیک میشو به منظور شناسایی فازهای مجهول و نیز بررسی ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی صورت گرفته، اطلاعاتی در مورد ترکیب شیمیایی کانه‌ها و مقدار عناصر کمیاب در آنها به دست آمد. نتایج آنالیز ریزپردازشی ۳۰ نقطه از کانی‌های سولفیدی شامل ۲۰ نقطه پیروتیت، ۴ نقطه پنتلاندیت، ۴ نقطه پیریت و ۲ نقطه کالکوپیریت در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده شده‌اند.

در اسفالریت و ترولیت در پیروتیت می‌شوند. وجود کالکوپیریت در اسفالریت بیماری کالکوپیریت خوانده می‌شود. ساختار اسفالریت از نزدیک شبیه به کالکوپیریت است. انحلال جامد حداقل به طور محدود در دماهای بالا رخ می‌دهد و جدایش هنگام افت دما امکان پذیر است [۱۰، ۱۱]. اسفالریت و کالکوپیریت در دماهای بالای 350°C تا 400°C قادر به انحلال جامد بوده و کالکوپیریت در دماهای پایین‌تر از اسفالریت جدا می‌شود [۱۲].



شکل ۶ دنباله‌ی پاراژنتیکی کانی‌های درون‌زاد و برون‌زاد در منطقه‌ی مورد بررسی.

جدول ۱ نتایج آنالیز کانی‌های سولفیدی پیروتیت و پنتلاندیت نمونه‌ی مافیک (G.K.4) به روش ریزپردازش الکترونی.

Element %	Pyrrhotite				Pentlandite		
	G.K.4				G.K.4		
	۱	۴	۳	۲	۳	۲	۱
As	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۲
S	۳۶/۴۰	۳۶/۵۳	۳۶/۸۳	۳۶/۱۱	۳۳/۲۴	۳۳/۴۸	۳۲/۰۸
Te	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۵
Fe	۶۴/۰۵	۶۳/۷۸	۶۳/۳۲	۶۳/۸۴	۳۱/۵۳	۳۱/۶۰	۳۵/۰۵
Sb	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰
Sn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
Cu	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Au	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰
Zn	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Ni	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۰۰	۲۵/۱۷	۲۵/۵۹	۲۷/۵۲
Co	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱/۱۵	۱۰/۴۴	۴/۹۰
Total	۱۰۰/۴۶	۱۰۰/۴۴	۱۰۰/۴۱	۱۰۰/۰۷	۱۰۱/۳۹	۱۰۱/۵۵	۹۹/۸۲

جدول ۲ نتایج آنالیز کانی‌های سولفیدی پیروتیت، پیریت و کالکوپیریت نمونه مافیک (G.K.18) به روش ریزپردازش الکترونی.

Element %	Pyrrhotite								Pyrite			Chalcopyrite	
	G.K.18												
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۱	۲	۳	۱	۲
As	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
S	۳۸/۴۲	۳۸/۷۱	۳۷/۸۵	۳۸/۲۵	۳۸/۰۰	۳۸/۳۸	۳۶/۶۸	۳۸/۶۲	۴۸/۶۴	۵۲/۳۹	۵۲/۱۲	۳۴/۶۱	۳۵/۶۰
Te	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
Fe	۶۱/۶۱	۶۱/۸۰	۶۱/۷۳	۶۱/۹۱	۶۱/۵۱	۶۱/۵۷	۵۹/۴۹	۶۱/۳۱	۴۵/۲۴	۴۶/۷۴	۴۶/۶۲	۳۰/۶۷	۳۰/۶۵
Sb	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰
Sn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰
Cu	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۵/۴۱	۳۵/۵۰
Au	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۰
Zn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۵
Ni	۰/۰۰۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰
Co	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Total	۱۰۰/۱۲	۱۰۰/۶۷	۹۹/۶۷	۱۰۰/۳۵	۹۹/۷۶	۱۰۰/۰۴	۹۶/۲۶	۱۰۰/۱۰	۹۴/۰۰	۹۹/۲۹	۹۸/۹۰	۱۰۰/۸۲	۱۰۱/۸۰

جدول ۳ نتایج آنالیز کانی‌های سولفیدی پیروتیت، پنتلاندیت و پیریت نمونه مافیک (G.A. 9) به روش ریزپردازش الکترونی.

Element %	Pyrrhotite								Pentlandite		Pyrite	
	G.A.9								G.A.9		G.A.9	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۱		۱	
As	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰		۰/۰۱	
S	۳۸/۶۱	۳۷/۹۹	۳۹/۳۹	۳۸/۳۲	۳۸/۵۵	۳۸/۶۷	۳۸/۹۲	۴۱/۲۹	۳۰/۸۳		۵۰/۹۴	
Te	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۱۹		۰/۰۳	
Fe	۶۱/۰۹	۶۱/۳۶	۶۰/۹۸	۶۱/۰۰	۶۰/۸۳	۶۰/۸۰	۶۰/۸۱	۶۰/۹۴	۲۱/۴۱		۴۵/۵۲	
Sb	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰		۰/۰۱	
Sn	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰		۰/۰۲	
Cu	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰		۰/۰۱	
Au	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰		۰/۰۳	
Zn	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰		۰/۰۰	
Ni	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۵	۲۳/۵۰		۰/۵۱	
Co	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۵/۱۸		۰/۰۰	
Total	۱۰۰/۰۸	۹۹/۶۸	۱۰۰/۷۱	۹۹/۷۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۱	۱۰۰/۱۴	۱۰۲/۷۰	۱۰۱/۱۱		۹۷/۰۸	

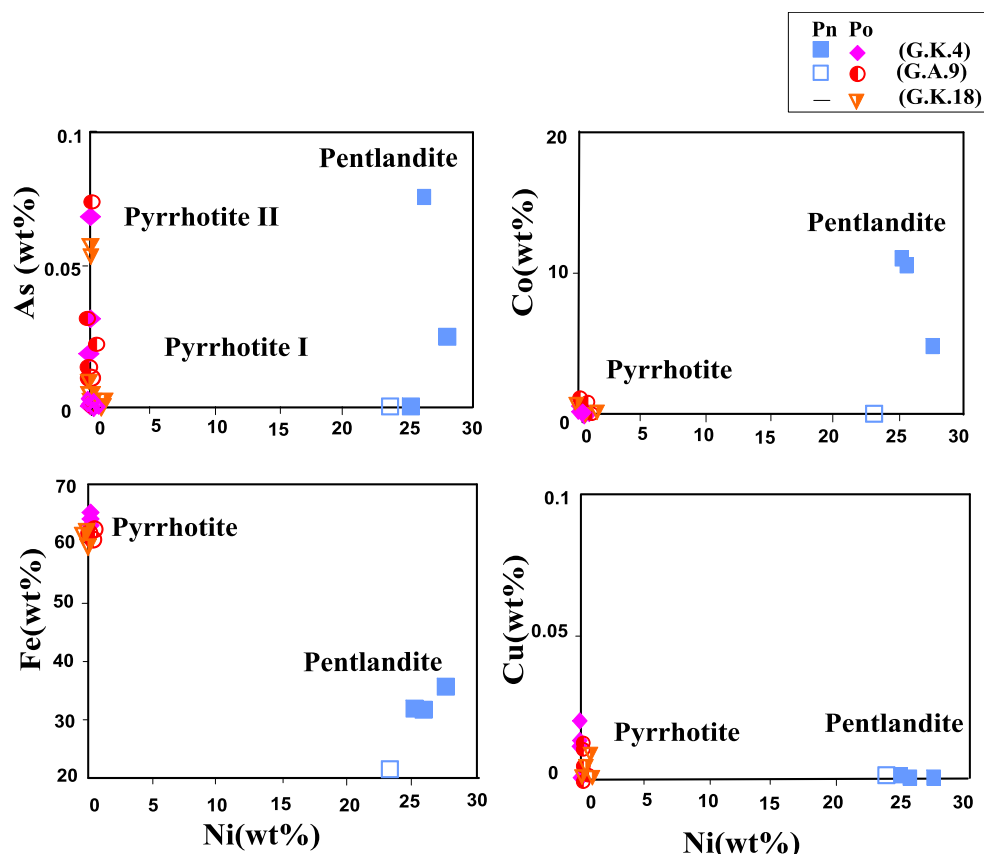
پیروتیت - پنتلاندیت

بر اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی و میزان تمرکز عناصر آرسنیک، کبالت، آهن و مس در مقابل نیکل، دو نوع پیروتیت در نمونه‌های مافیک مورد بررسی قابل شناسایی اند (شکل ۷). نوع اول نسبتاً غنی از آرسنیک (۰/۰۷ - ۰/۰۵٪) و نوع دوم نسبتاً فقیر از آرسنیک (۰/۰۳ - ۰٪) بوده و میزان کبالت در پیروتیت‌ها صفر است، بر همین اساس میزان Co در پنتلاندیت‌ها (۲۵/۲۰ - ۴/۹۰٪) بوده و نیز مقدار نیکل در پنتلاندیت‌ها (۲۵/۱۷ - ۲۷/۵۲٪) بسیار بالاتر از پیروتیت‌ها (۰/۰۱ - ۰/۳۲٪) است. از طرف دیگر میزان آهن در پیروتیت‌ها

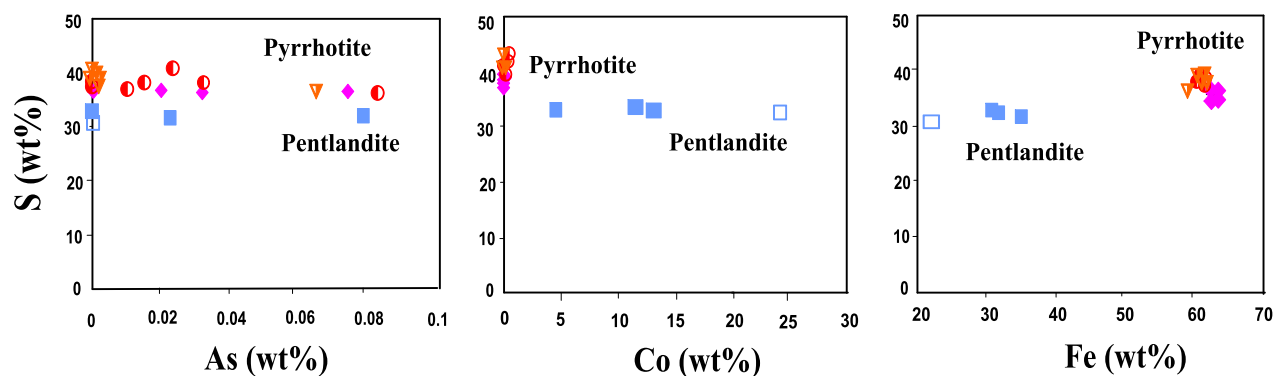
(۵۹/۵۰ - ۶۴/۰۵٪) بالاتر از میزان آن در پنتلاندیت‌ها (۲۱/۴۱ - ۳۵/۰۴٪) بوده است. با توجه به این که کبالت و نیکل در پنتلاندیت‌ها جانشین آهن می‌شوند [۱۳]، در نتیجه میزان بالای کبالت، نیکل و مقدار پایین آهن در پنتلاندیت‌ها قابل توجه است. در شکل ۸ میزان تمرکز آهن، کبالت و آرسنیک در مقابل گوگرد برای پیروتیت و پنتلاندیت نشان داده شده است. میزان گوگرد در پیروتیت‌ها با افزایش آهن و آرسنیک اندکی کاهش نشان می‌دهد. از طرف دیگر، میزان گوگرد با افزایش کبالت نسبتاً ثابت است. همچنین میزان گوگرد در پنتلاندیت‌ها با افزایش آرسنیک، آهن و کبالت تقریباً ثابت

موجود در پیرویت‌ها عبارتند از: Zn با میانگین ۰/۰۱ درصد، Te با میانگین ۰/۰۱ درصد، Sb با میانگین ۰/۰۲ درصد، Au با میانگین ۰/۰۱ درصد. بنابر محاسبات انجام شده روی مقادیر به دست آمده از آنالیز ریزپردازشی پیرویت (FeS تا $\text{Fe}_{0.8}\text{S}$) و پنتلاندیت دارای فرمول $[\text{Fe}_{4.96}, \text{Ni}_{3.68}, \text{Co}_{0.64}]\text{S}_8$ هستند.

مانده است. طبق [۱۴] با مقایسه‌ی نسبت‌های Co/Ni در کان-های سولفیدی، می‌توان ذخایر اکسیدی آهن ($\text{Co/Ni} > 1$) را از اکسیدهای Fe-Ti ماگمایی و ذخایر Ni-Fe-Cu نامیزاک ماگمایی ($\text{Co/Ni} < 1$)، تمیز داد. میانگین نسبت Co/Ni در پیرویت‌های منطقه صفر بوده و در پنتلاندیت‌ها ۰/۵ است که نشان دهنده‌ی خاستگاه ماگمایی آن‌هاست. عناصر فرعی



شکل ۷ نقشه‌ی تمرکز عناصر As , Co , Fe و Cu نسبت به Ni برای پیرویت و پنتلاندیت نمونه‌های مافیک میشو، [۱۵].

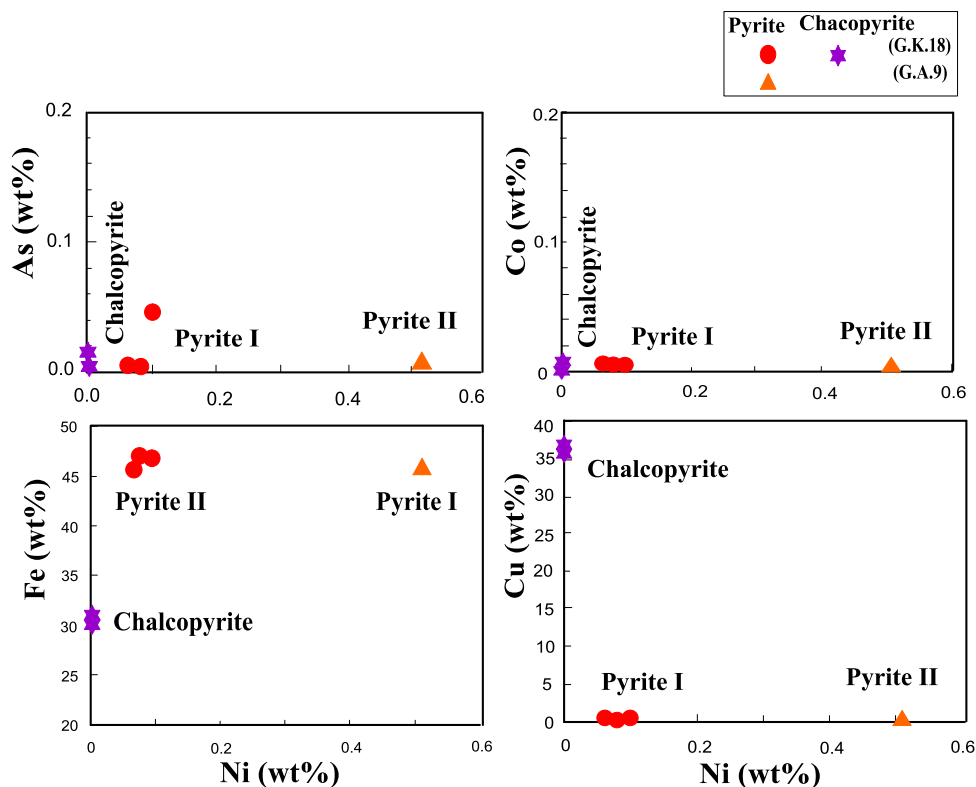


شکل ۸ نقشه‌ی تمرکز عناصر Fe , Co , As و S نسبت به گوگرد برای پیرویت و پنتلاندیت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵].

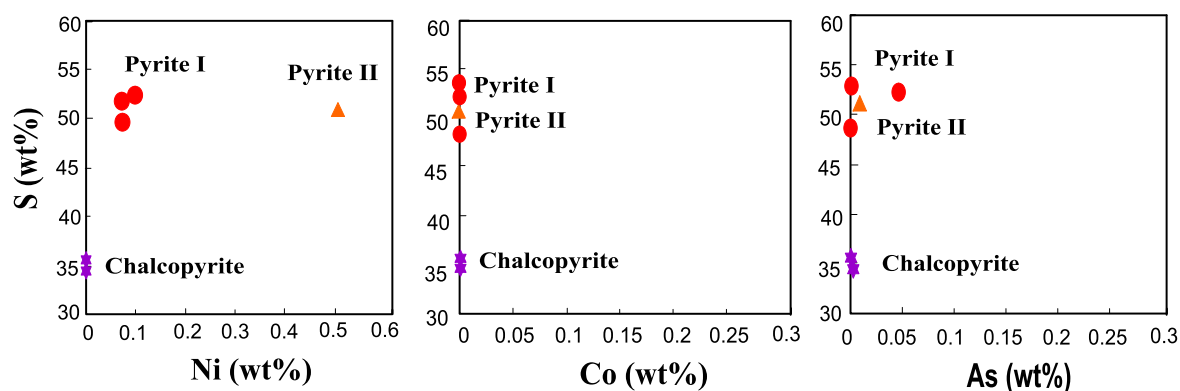
پیریت - کالکوپیریت

پیریت در نمونه‌های مورد بررسی بر اساس ویژگی‌های شیمیایی، به دو نوع رده‌بندی می‌شود. نوع اول نسبتاً غنی از نیکل (۰/۵۱٪) و نوع دوم نسبتاً فقیر از نیکل (۰/۰۷-۰/۱٪) (شکل ۹). کالکوپیریت با نسبت بالای Cu و میزان پایین As و Co نسبت به پیریت‌ها مشخص شده است. میزان تمرکز گوگرد در مقابل Ni، Co و As برای پیریت و کالکوپیریت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در نمودار مثلثی As-Ni-Co، پیریت غنی از نیکل (نوع ۱) روی خط Ni-As و کاملاً نزدیک به Ni واقع شده، در حالی که پیریت نسبتاً فقیر از نیکل (نوع ۲) روی خط Ni-As، متمایل به سمت As قرار گرفته است (شکل ۱۱ الف). در دیاگرام مثلثی S-Fe-Cu [۱۵]، هر دو نوع پیریت بر روی خط S-Fe، با مقدار نسبتاً بیشتر S، واقع شده‌اند. از طرف دیگر در این نمودار کالکوپیریت‌ها تقریباً در وسط مثلث قرار گرفته‌اند که نشان دهنده‌ی مقادیر تقریباً یکسان S، Fe و Cu در آن‌هاست (شکل ۱۱ ب). میانگین نسبت Co/Ni در پیریت‌ها و کالکوپیریت‌های نمونه مافیک صفر می‌باشد که

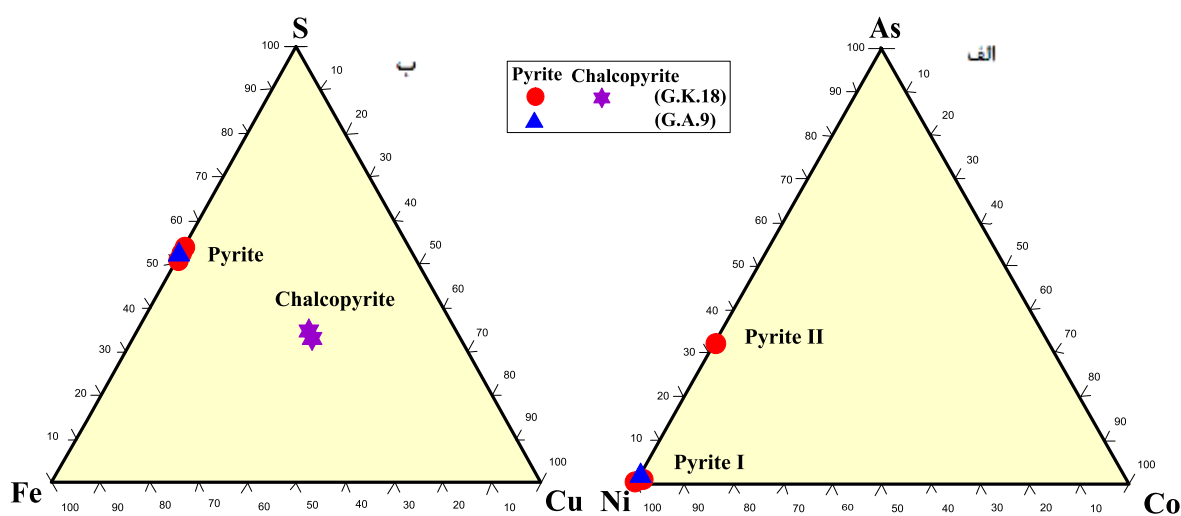
نشان دهنده‌ی خاستگاه ماگمایی آن‌هاست. عناصر فرعی موجود در پیریت‌ها عبارتند از: Te با میانگین ۰/۰۱ درصد، Sb با میانگین ۰/۰۱ درصد، Sn با میانگین ۰/۰۱ درصد، Au با میانگین ۰/۰۳ درصد و در کالکوپیریت‌ها عبارتند از: Zn با میانگین ۰/۰۴ درصد، Te با میانگین ۰/۰۱ درصد، Au با میانگین ۰/۰۴ درصد. بنابر محاسبات انجام شده روی مقادیر به دست آمده از آنالیز ریزپردازشی، پیریت دارای فرمول ($\text{Fe}_{1.02}\text{S}_2$ تا $\text{Fe}_{1.07}\text{S}_2$) و کالکوپیریت ($\text{Cu}_{0.99}$, $\text{Fe}_{0.97}$, S_2) هستند. ترکیب فازهای سولفیدی پیروتیت، پنتلاندیت، پیریت و کالکوپیریت در نمودار S-Fe-Ni [۱۶] رسم شده است (شکل ۱۲ الف). در این نمودار ترکیب شیمیایی پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت تقریباً در وسط خط S-Fe قرار دارند، و ترکیب پنتلاندیت در مرکز سیستم واقع شده است که نشان دهنده‌ی میزان برابر S، Fe و Ni در آن است. در مثلث As-Cu-Ni (شکل ۱۲ ب) کاهش میزان Ni با افزایش As و Cu مشاهده می‌شود که این پدیده به تکامل ماگمای مافیک وابسته است.



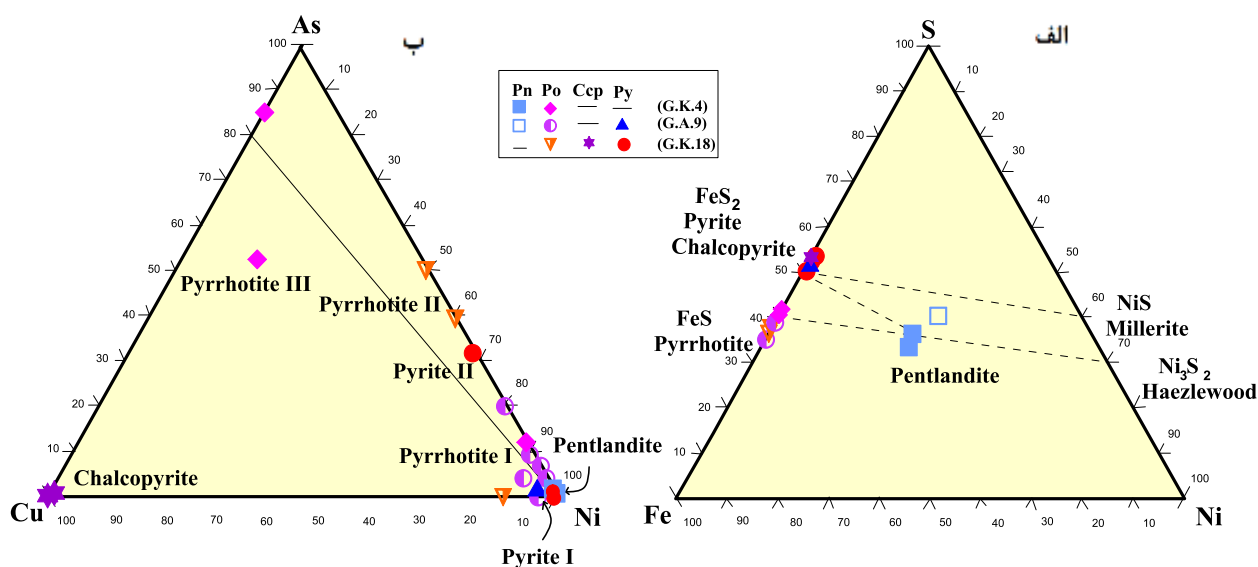
شکل ۹. نقشه‌ی عناصر Fe, Co, As و Cu نسبت به Ni برای پیریت و کالکوپیریت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵].



شکل ۱۰ نقشه‌ی عناصر Ni, Co و As نسبت به گوگرد برای پیریت و کالکوپیریت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵].



شکل ۱۱ نمودارهای مثلثی نشان دهنده‌ی ترکیب عنصری پیریت و کالکوپیریت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵]. (الف) نمودار As-Ni-Co (ب) نمودار S-Fe-Cu.



شکل ۱۲ نمودارهای مثلثی (الف) S-Fe-Ni [۱۶]، (ب) As-Cu-Ni [۱۵]، نشان دهنده‌ی ترکیب کانی‌های سولفیدی (پیریت، پنتلاندیت، پیریت و کالکوپیریت) نمونه‌های مافیک میشو.

تشکیل فازهای کانیاپی تیره در سنگ‌های مافیک میشو

کانی‌های تیره در سنگ‌های مافیک میشو شامل فازهای اکسیدی و سولفیدی بوده که فضاهای بین کانی‌های سیلیکاتی را پر کرده‌اند. وجود انبوهه‌های گرد شده و خمیده اکسیدی و سولفیدی و یا احاطه و سیمانی شدن کانی‌های سیلیکاتی به-وسیله‌ی سولفیدها، می‌تواند نشان دهنده‌ی این باشد که در روند تبلور ماگمای تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها، سه فاز مایع نامیژاک سیلیکاتی، سولفیدی و اکسیدی شرکت داشته است. گابروهای میشو از یک خاستگاه گوشته استنوسفری تهی‌شده با رخساره‌ی اسپینل-لرزلیت با ذوب بخشی ۲۰ - ۳۰ درصد، از اعماق کمتر از ۸۰ کیلومتر ریشه گرفته [۱۷] و نخست اکسیدها و سولفیدها به صورت هم‌آمیز در سیلیکات‌ها حضور داشته‌اند. با کاهش تدریجی دما و خارج شدن بخشی از سیلیکات‌های دیرگدازتر از فاز مایع، تمرکز اکسیدها به تدریج در فاز مایع افزایش یافته است. فازهای کانیاپی اکسیدی دارای نقطه انجماد بالاتر نسبت به سولفیدها هستند، و به همین دلیل غلظت اکسیدها با کاهش تدریجی دما افزایش یافته و قطره‌های بسیار ریز اکسیدی (به حالت تعلیقی) از مایع سیلیکاتی جدا شده و به صورت یک فاز مایع نامیژاک در آمده و این در حالی است که سولفیدها هنوز به صورت محلول در سیلیکات‌ها حضور داشتند. با پیشرفت تبلور سیلیکات‌ها و خارج شدن بخش بزرگ آن‌ها از فاز مایع، غلظت اکسیدها و سولفیدها مرتب رو به افزایش گذاشته و بر مقدار فاز مایع نامیژاک اکسیدی افزوده شده است. فازهای کانیاپی اکسیدی شروع به تبلور کرده (کانه اکسیدی ایلمنیت در دمای 800°C درجه و مگنتیت در دمای 600°C درجه [۱۸])، که این پدیده در نفوذی‌های آذرین مافیک معمول است) و باعث افزایش غلظت سولفیدها در مایع باقی مانده شده است. با خارج شدن پیوسته فازهای کانیاپی سیلیکاتی - اکسیدی از مایع باقیمانده و کاهش بیشتر دما به عنوان مهمترین عامل اشباع گوگرد [۱۹]، غلظت سولفیدها افزایش یافته و قطره‌های بسیار ریز سولفیدی به عنوان یک فاز مایع نامیژاک در ماگما شکل گرفته است. در این مرحله، بخش بزرگ سیلیکات‌ها متبلور شده و فازهای مایع فضاهای خالی بین بلورهای از پیش تشکیل شده را پر می‌کنند.

این مایع نامیژاک به شکل محلول جامد منوسولفید غنی از S، Ni، Cu و Co در دماهای پایین‌تر از 600°C درجه تشکیل می‌شود. با کاهش دما تا پایین‌تر از 300°C درجه‌ی سانتیگراد، محلول جامد منوسولفید پایدار نبوده و به پیروتیت، پنتلاندیت و کالکوپیریت تجزیه می‌شود [۸، ۲۰، ۲۱]. زمان بسیار طولانی فرایند تبلور در ماگمای مافیک این فرصت را برای قطره‌های بسیار ریز مایع سولفیدی در خمیر بلوری فراهم کرده تا به تدریج به صورت یک فاز فرعی و چگال به هم پیوندند و به قطره‌های بزرگ‌تر تبدیل شده و سپس از حجم نسبتاً بزرگی از سنگ‌های اطراف خود زهکشی شده و به صورت عدسی‌های غنی از سولفید در گابروها انباشته شوند. از آنجایی که منطقه-های غنی از فازهای کانیاپی اکسیدی در نمونه‌های مافیک مورد بررسی دیده نشده، شاید بتوان چنین استنباط کرد که فاز مایع اکسیدی به دلیل داشتن نقطه‌ی انجماد بالاتر نسبت به سولفیدها، بسیار زودتر از سولفیدها و همگام با سیلیکات‌ها از فاز مایع خارج شده و فرصت و امکان مهاجرت و انباشت (همانند سولفیدها) را نداشته است.

برداشت

بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌سازی در سنگ-های مافیک میشو شامل فازهای سولفیدی و اکسیدی (Fe-Ti) است که به صورت بین دانه‌ای ایجاد شده‌اند به این صورت که کانه‌های سولفیدی فضاهای خالی بین کانی‌های سیلیکاتی را پر کرده‌اند و در برخی از نمونه‌ها کاملاً در برگرفته و همانند سیمانی آن‌ها را به هم چسبانده‌اند. حالت شناوری کانی‌های سیلیکاتی در سولفیدها نشان می‌دهد که مذاب سولفیدی، پس از تشکیل بخش بزرگی از کانی‌های سیلیکاتی متبلور شده است. بخش سولفیدی بیشتر شامل پیروتیت (Fe_{1-x}S)، بوده که به‌وسیله‌ی کالکوپیریت (CuFeS_2)، پنتلاندیت (Fe_9NiS_8)، اسفالریت (ZnS)، پیریت (FeS_2) و تروپیت (FeS) همراه است. ایلمنیت (FeTiO_2) و به مقدار کمتر مگنتیت (Fe_3O_4) فاز اکسیدی را تشکیل می‌دهند. کانه‌های ویولاریت (Ni_2FeS_4) و پیریت (FeS_2) در طول دگرسانی و گوتیت (FeO.OH) در طول هوازدگی کانه‌های سولفیدی تشکیل شده‌اند. بافت‌های جدایشی در کانه‌های سولفیدی میشو،

- [8] Kissin S. A., Scatt S. D., "phase relation involving pyrrhotite below 350°C", Economic.
- [9] Nickel E. H., Ross J. R., Thornber, M. R., "The supergene alteration of Pyrrhotite – Pentlandite ore at Kambalda, Western Australia", Economic Geology V.69, (1974) pp 93-107
- [10] Ixer R. A., Duller P. R., "Virtual Atlas of Opaque and Ore Minerals in Their Associations", Internet Digital Atlas, Sponsored by SME. (1998).
- [11] Ramdohr P., "The Ore Minerals and Their Intergrowths, Pergamon", Oxford. (1980).
- [12] Freud H., "Applied Ore Microscopy", The MacMilan Company, (1966) p. 607
- [13] Barnes S-J., Lightfoot P.C., "Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents", In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.) Economic Geology 100th Anniversary Volume, (2005). p. 179-213.
- [14] Mazdab FK, Force ER., "Comparison of cobalt and nickel contents in sulfides from iron-oxide (Cu-Au-U-REE) occurrences with others hydrothermal and magmatic systems", Abstr. Annu. Meet. Geol.Soc. (1998) Am. 30: 369. (Abstract).
- [15] Abdel-Karim A. A. M., "Petrographic and chemical characterization of Fe-Ti oxides and sulfides hosted in mafic intrusions, south Sinai, Egypt", Implication for genesis (2009).
- [16] Halkoaho TAA, Alapieti TT, Lahtinen JJ, "The Sompjarvi PGE Reef in the Penikat layered intrusion, Northern Finland", Mineralogy and Petrology (1990) 42: 39-56.
- [۱۷] قربانی م، حسین‌زاده ق، مؤید م، عظیم‌زاده ا، "بررسی-های پترولوژیکی و ژئوشیمیایی توده مافیک میشو (جنوب غرب مرنده - آذربایجان شرقی)"، مجله پترولوژی اصفهان (در دست چاپ).
- [18] Hassan N., "Genese des depots de Fe-Ti-P associes aux intrusions lites (exemples: l'intrusion mafique de Sept-Iles, au Quebec; complexe de Duluth aux Etats-Unis)", PH.D., Universite du Quebec a Chicoutimi a Montreal. (2003).

معمول‌اند و شامل رشد کالکوپیریت در اسفالریت و ترویلیت در پیروتیت هستند. از این میان بافت جدایشی کالکوپیریت در اسفالریت بیانگر دماهای ۳۵۰°C تا ۴۰۰°C است. نسبت Co/Ni سولفیدها، نشان می‌دهد که آن‌ها در یک سیستم Ni-Fe-Cu سولفید ماگمایی نامیژاک تشکیل شده‌اند. از آنجا که منطقه‌های غنی از فازهای کانیای اکسیدی در نمونه‌های مورد بررسی دیده نشده‌اند، می‌توان چنین استنباط کرد که فاز مایع اکسیدی به دلیل داشتن نقطه‌ی انجماد بالاتر نسبت به سولفیدها، بسیار زودتر از سولفیدها و همگام با سیلیکات‌ها از فاز مایع خارج شده و فرصت و امکان مهاجرت و انباشت (همانند سولفیدها) را نداشته است.

مراجع

- [1] Naldrett A. J., "secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magmas", Economic Geology V.105, (2010) 669-688
- [2] Michael P. F., Micheal L. Z., Douglas P. K., "Magmatic sulfide deposits (Models 1, 2b, 5a, 5b, 6a, 6b, and 7a; Page, 1986a-g)", U.S. Department of the Interior, (1995) pp 28- 38
- [۳] افتخارزاد ج، قرشی م، مهرپرتو م، ارشدی س، زهره بخش ا، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تبریز - پلدشت" سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۰).
- [۴] محجل م، حاجی علیلو ب، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مرنده"، سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۳).
- [۵] مؤید م، مؤذن م، "نگرشی نو بر موقعیت خط درز پالئوتئیس در ایران"، فشرده مقالات ششمین همایش زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۸۱).
- [۶] کلاگری ع، مؤذن م، مجتهدی م، عامری ع، "بررسی کانیهای مات (سولفیدها و اکسیدها) در کمپلکس آذرین مافیک-اولترامافیک میشو، جنوب غرب مرنده، شمال غرب ایران"، (۱۳۸۳).
- [۷] مؤید م، حسین‌زاده ق، "سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی گرانیتوئیدهای A-Type شرق کوه‌های میشو با نگرشی بر اهمیت ژئودینامیکی آن‌ها"، بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران (۱۳۹۰).

< 51". Experiment in Geosciences 6/2, (1997) 57-58.

[21] Kojonen K, Gervilla F, Merkle RK., "Mineralogy of the Keivitsa Cu-Ni-PGE deposits, northern Finland", Abstract. EGS-EUG-AUG Joint Assembly, Nice April (2003), session VGP 330.

[19] Gauert C., "Sulphide and oxide mineralization in the Uitkomst Complex, South Africa", Origin in a magma conduit. Journal of African Earth Sciences, 32 (2), (2001) 149-161.

[20] Sinyakova EF, Kosyakov VI, Shestakov VA., "Liquidus surface of the Fe-Ni-S system at the XS