مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و دوم، شماره‌ی سوم، پاییز ۹۳، از صفحهٔ ۳۴۳ تا ۳۵۶

انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

کانه نگاری و شیمی کانه‌ها در عدسی‌های سولفیدی – اکسیدی موجود در توده مافیک میشو (جنوب‌غرب مرند، آذربایجان‌شرقی)

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 لئوبن اتریش

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

چکیده: توده‌ی مافیک میشو در جنوب‌غرب مرند و بخش مرکزی ارتفاعات میشو در استان آذربایجان‌شرقی قرار دارد. بررسی‌های انجام شده بر روی این توده‌ی نفوذی وجود کانی‌سازی سولفیدی – اکسیدی را نشان می‌دهد. بخش سولفیدی بیشتر شامل پیروتیت 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 به‌وسیله‌ی پیریت و ویولاریت جانشین شده‌اند. با توجه به حضور بافت جدایشی در نمونه‌های مورد بررسی مانند کالکوپیریت در اسفالریت می‌توان دماهای بالای ۴۰۰°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؛ ریزپردازش، آمیزش ناپذیر؛ میشو؛ مرند.*

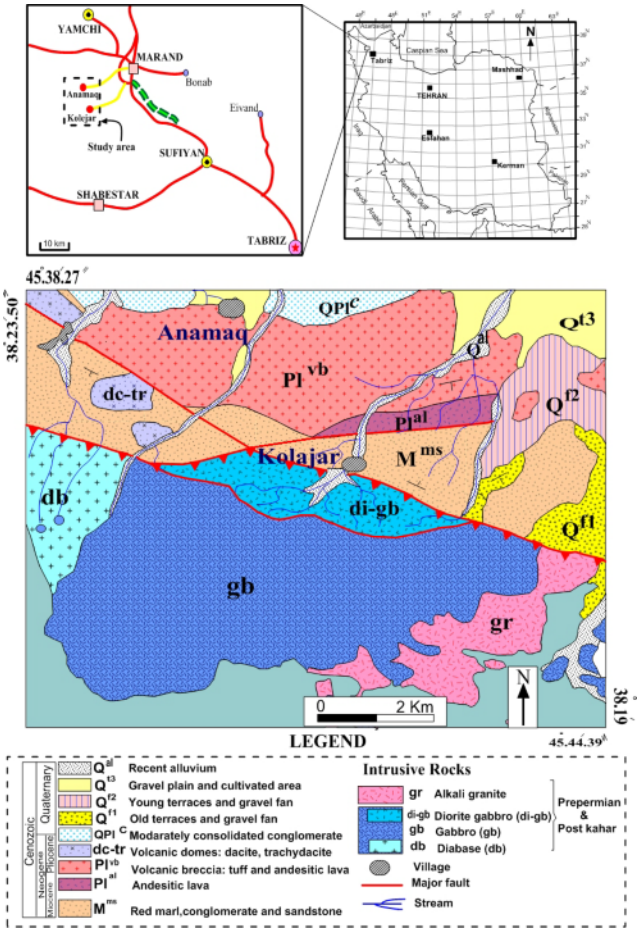
مقدمه

ذخایر سولفیدی Cu-Ni ± 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 مرند استان آذربایجان‌شرقی، بین طول‌های جغرافیایی شرقی″۵۰ ′۲۳ °۳۸ تا ″۱۹ ′۳۸ °۳۸ و عرض‌های جغرافیایی شمالی″۲۷ ′۳۸ °۴۵ تا ″۳۹ ′۴۴ °۴۵ واقع شده است. توده‌ی مافیک میشو رخنمون اصلی این گستره را تشکیل می‌دهد و بخش‌های اولترامافیک با مرز گسل و به صورت پراکنده همراه 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 مرند [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 هرسینین 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 ریزپردازشی روی کانه‌های موجود است.

* 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 آذربایجان‌شرقی 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 ژیپس‌دار، ماسه سنگ‌های دارای نمک و ژیپس) قرار گرفته است. این نهشته‌ها در بخش‌های شمالی‌تر به‌وسیله‌ی 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].

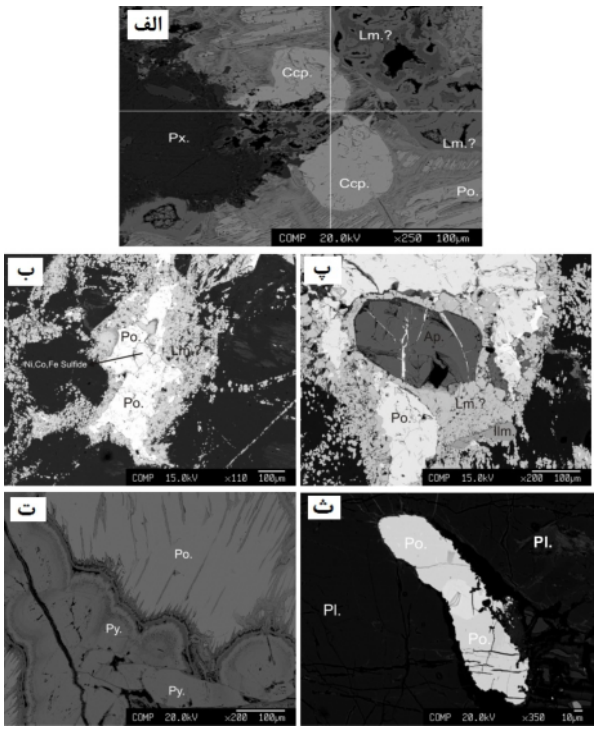


شکل ۱ نقشه‌ی ساده شده‌ی توزیع واحدهای سنگی منطقه‌ی مورد بررسی (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مرند؛ [۴] با تغییرات) همراه با نقشه‌ی راه‌های دسترسی به منطقه.

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

روش بررسی

تعداد ۱۵ مقطع صیقلی از سنگ‌های مافیک میشو مورد بررسی کانه نگاری قرار گرفتند. برای تعیین کانی‌شناسی دقیق عدسی-های 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 ابرپژوهنده‌ی 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 ۲۰Kv، جریان پرتو الکترونی ۱۰nA 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.

کانی‌شناسی

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که کانی‌سازی در سنگ‌های مافیک میشو شامل فازهای سولفیدی (Fe, Ni, Cu) و اکسیدی (Fe,Ti) است. بخش سولفیدی بیشتر شامل پیروتیت ($Fe_{1-x}S$)، بوده که با کالکوپیریت ($CuFeS_2$)، پنتلاندیت ($(Fe,Ni)_9S_8$)، اسفالریت (ZnS)، پیریت نسل اول (FeS_2) و ترویلیت (FeS) همراه است. ایلمنیت ($FeTiO_2$) و به مقدار کمتر مگنتیت (Fe_3O_4) فاز اکسیدی را تشکیل می‌دهند. کانی‌های ویولاریت (Ni_2FeS_4)، پیریت نسل دوم (FeS_2) از تبدیل کانی‌های سولفیدی اولیه و گوتیت (FeO.OH) طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی تشکیل شده‌اند. کانی‌های باطله شامل پلاژیوکلاز، اورتوپیروکسن، کلینوپیروکسن، الیوین و فازهای ثانویه شامل سرپانتین، تالک، کلسیت، سریسیت، کلریت و کانی‌های رسی می‌شوند. کانی‌سازی سولفیدی در نمونه‌های مافیک مورد بررسی بیشتر به صورت بین دانه‌ای رخ داده است؛ بدین صورت که کانه‌های سولفیدی فضاهای خالی بین کانی‌های سیلیکاتی را پر کرده و در برخی از نمونه‌ها آن‌ها را کاملاً در برگرفته و همانند سیمان به هم چسبانده‌اند (شکل ۴- الف). پیروتیت فراوانترین فاز سولفیدی موجود در نمونه‌های مورد بررسی بوده و تا ۶۰ ٪ نمونه‌ها را شامل می‌شود. رنگ قهوه‌ای مایل به زرد تا صورتی ناهمسانگرد بسیارقوی به رنگ زرد و آبی متمایل به خاکستری، قابل تشخیص بوده و تقریباً در تمام نمونه‌ها حضور دارند (شکل ۴ ب). در داخل برخی از پیروتیت‌ها تیغه‌هایی به رنگ روشن و ترویلیت دیده می‌شوند. (شکل ۴ پ). گاهی پیروتیت‌ها دارای نفوذی‌هایی از پیریت (شکل ۴ پ)، کالکوپیریت و اسفالریت (شکل ۴ ت) بوده و در بعضی از نمونه‌ها پیروتیت جانشین مگنتیت (شکل ۴ ت) و ایلمنیت (شکل ۴ ث) شده است. همچنین در تعدادی از نمونه‌ها هم‌رشدی بین پیروتیت و کالکوپیریت (شکل ۴ ج) مشاهده می‌شود. کالکوپیریت تا (۱۵٪)، در تعدادی از نمونه‌ها به صورت کاملاً بی‌شکل حضور داشته و بعضی از فضاهای بین بلورهای مجاور نظیر پیروتیت را پر کرده است (شکل ۴ چ). همچنین این کانی در برخی از نمونه‌ها از حاشیه جانشین پیروتیت شده (شکل ۴ ح) و گاهی به صورت ادخال در داخل کانی‌های پیروتیت و اسفالریت (شکل ۵ الف) مشاهده می‌شود. پنتلاندیت تا (۲۰٪) با فرمول شیمیایی $(Fe,Ni)_9S_8$ 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 نمونه‌های مورد بررسی به صورت ادخال در پیروتیت مشاهده می‌شود (شکل ۵ ب). ترویلیت به مقدار (کمتر از ۵٪) به صورت تیغه‌های روشن درون پیروتیت دیده شده است (شکل ۴ پ). ترویلیت معمولاً در سنگ‌های آذرین مافیک وجود ندارد ولی حضور آن نشان می‌دهد که پیروتیت بسیار غنی از آهن بوده و در دمای پایین به صور جدا از ترویلیت قرار گرفته است [۸]. پیریت نسل اول تا (۵٪) به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و نیز به صورت ادخال در داخل پیروتیت مشاهده می‌شود (شکل ۵ پ). اسفالریت تا (۱۰٪) در برخی از نمونه‌های مورد بررسی به صورت بلورهای مستقل و نیز ادخال در پیروتیت مشاهده شده و گاهی از حاشیه جانشین پیروتیت شده است (شکل ۴ ت). در تعدادی از نمونه‌ها، اسفالریت دارای بیماری کالکوپیریت است (شکل ۵ ت، ث). کانی‌های اکسیدی Fe-Ti، در نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی شامل ایلمنیت تا (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 کانه‌های پیروتیت مشاهده می‌شوند.

کانی‌های ثانویه

در نمونه‌های مورد بررسی پنتلاندیت و پیروتیت در اثر دگرسانی در طول ریز شکستگی‌ها (شکل ۵ ب) به ویولاریت (Violarite) تبدیل شده‌اند طبق [۹] از تبدیل شدن پنتلاندیت به ویولاریت مقداری نیکل آزاد می‌شود (واکنش ۱) که این نیکل صرف تبدیل پیروتیت به ویولاریت شده (واکنش ۲) و واکنش‌ها هنگامی که پنتلاندیت به طور کامل مصرف شد، متوقف می‌شوند. همچنین در برخی از نمونه‌ها پیروتیت در اثر دگرسانی به پیریت ریزدانه دگرسان شده، که منجر به تشکیل بافتی به نام چشم پرنده شده است (شکل ۵ چ). در جانشینی پیروتیت به‌وسیله‌ی پیریت نسل دوم (واکنش ۳)، فرض می‌شود که سولفور ثابت بوده و در نتیجه آهن و الکترون‌ها از سیستم خارج می‌شوند [۹]. در شرایط اکسایش شدید، پیروتیت مستقیماً به هیدروکسی/ اکسیدهای آهن مانند گوتیت تبدیل شده است (شکل ۵ ح) که به صورت حاشیه‌هایی در اطراف و رگه‌هایی در داخل پیروتیت مشاهده می‌شوند.

$$Fe_{4.1}Ni_{4.9}S_8 \rightarrow Fe_{2.6}Ni_{3.8}S_8 + 1.1Ni^{+2} + 1.5\,Fe^{+2} + 5.2\bar{e}$$

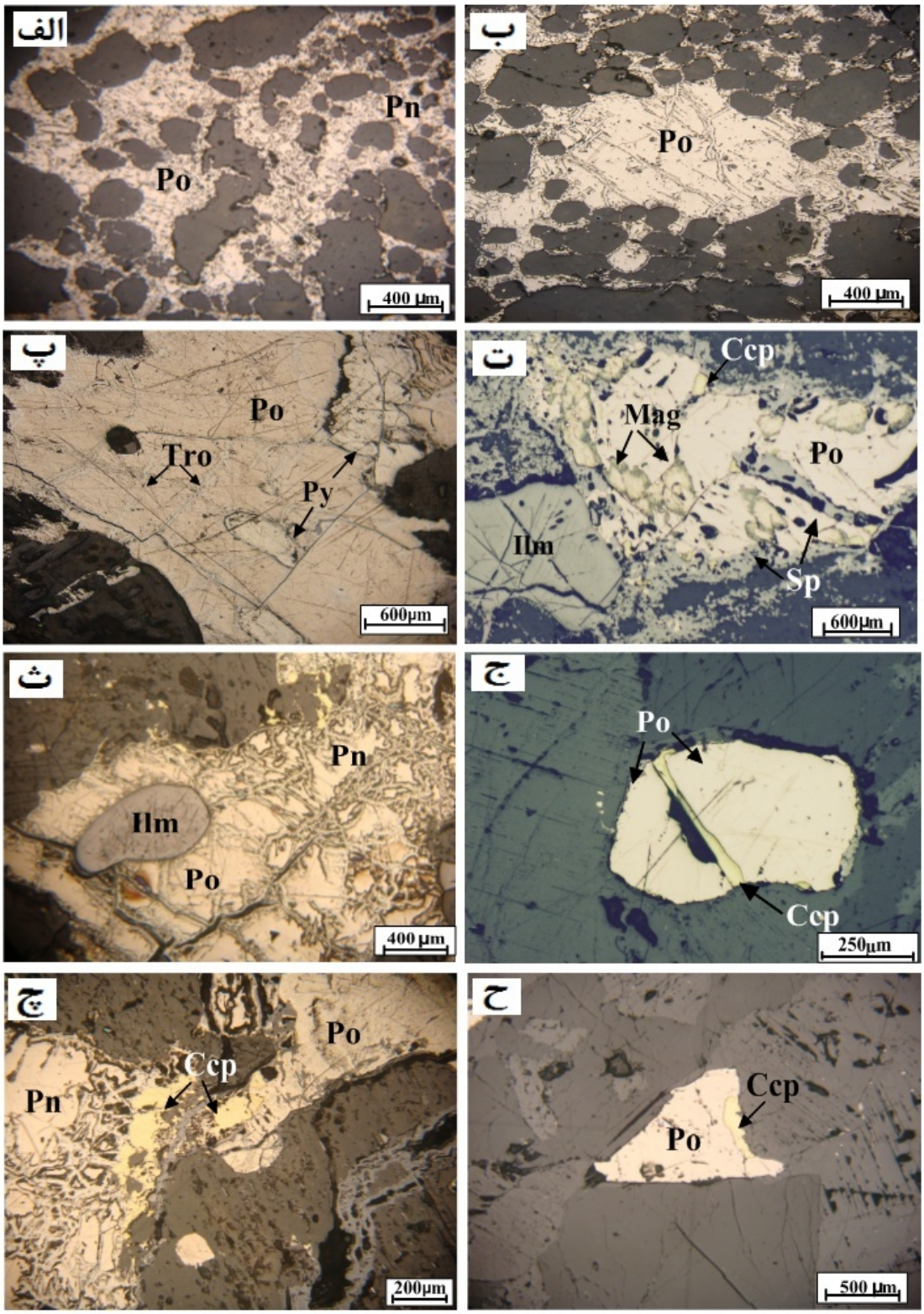
پنتلاندیت ویولاریت (واکنش ۱)

$$1/3Fe_7S_8 + 1.1Ni^{+2} \rightarrow 1/3\,Fe_{3.5}Ni_{3.3}S_8 + 1.32Fe^{+2} + 1/4\,\bar{e}$$

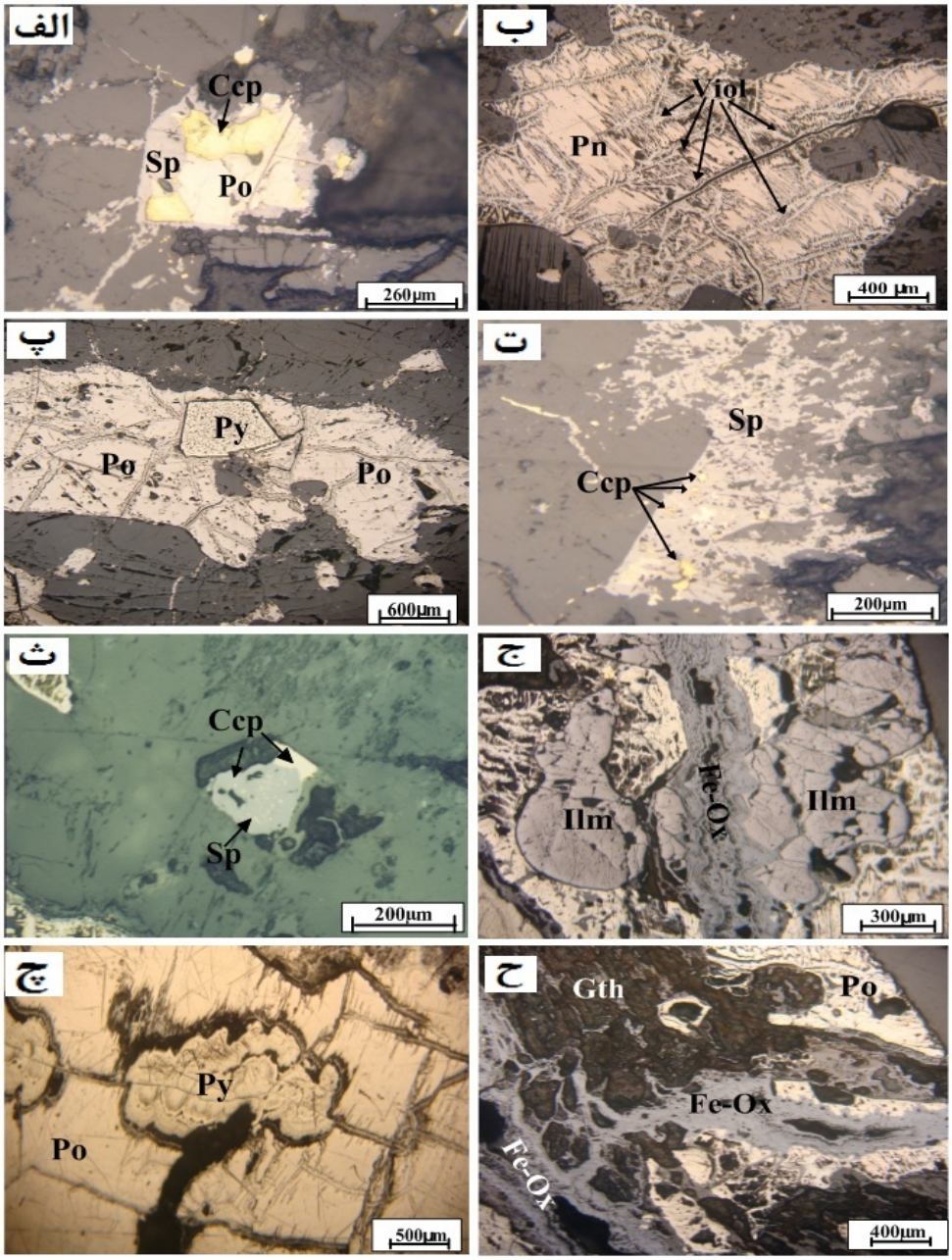
ویولاریت پیروتیت (واکنش ۲)

$$Fe_7S_8 \rightarrow 4FeS_2 + 3Fe^{+2} + 6\bar{e}$$

پیریت پیروتیت (واکنش ۳)



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی ازکانه‌های 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 به‌رنگ 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.



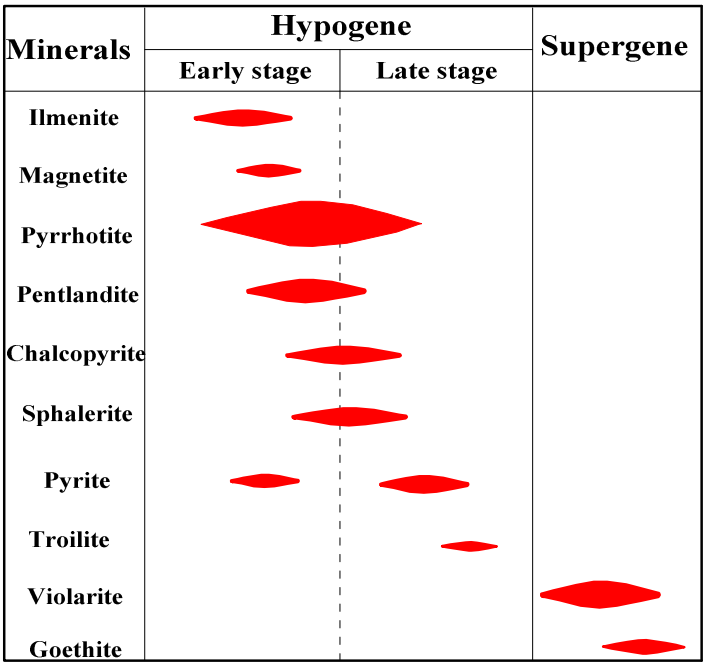
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی ازکانه‌های سولفیدی در نمونه‌های مورد بررسی (ppl). الف) ادخال کالکوپیریت در پیروتیت و اسفالریت که از حاشیه جانشین پیروتیت شده است. ب)پنتلاندیت که در اثر دگرسانی برونزادی به ویولاریت تبدیل شده است، پ) پیریت نسل اول نیمه شکل‌دار، که به صورت ادخال در پیروتیت مشاهده می‌شود، ت و ث) 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)

دنباله‌ی پاراژنتیکی کانی‌های درون‌زاد و برونزاد نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. بافت‌های رشد درهم که بعضی از آن‌ها نمایانگر بافت‌های جدایشی هستند، در کانه‌های سولفیدی میشو، معمول‌اند و شامل رشد کالکوپیریت

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 [۱۱،۱۰]. اسفالریت و کالکوپیریت در دماهای بالای ۳۵۰°C تا ۴۰۰°C قادر به انحلال جامد بوده و کالکوپیریت در دماهای پایین‌تر از اسفالریت جدا می‌شود [۱۲].

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.



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 G.K.4					Pentlandite 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	۰/۰۸	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

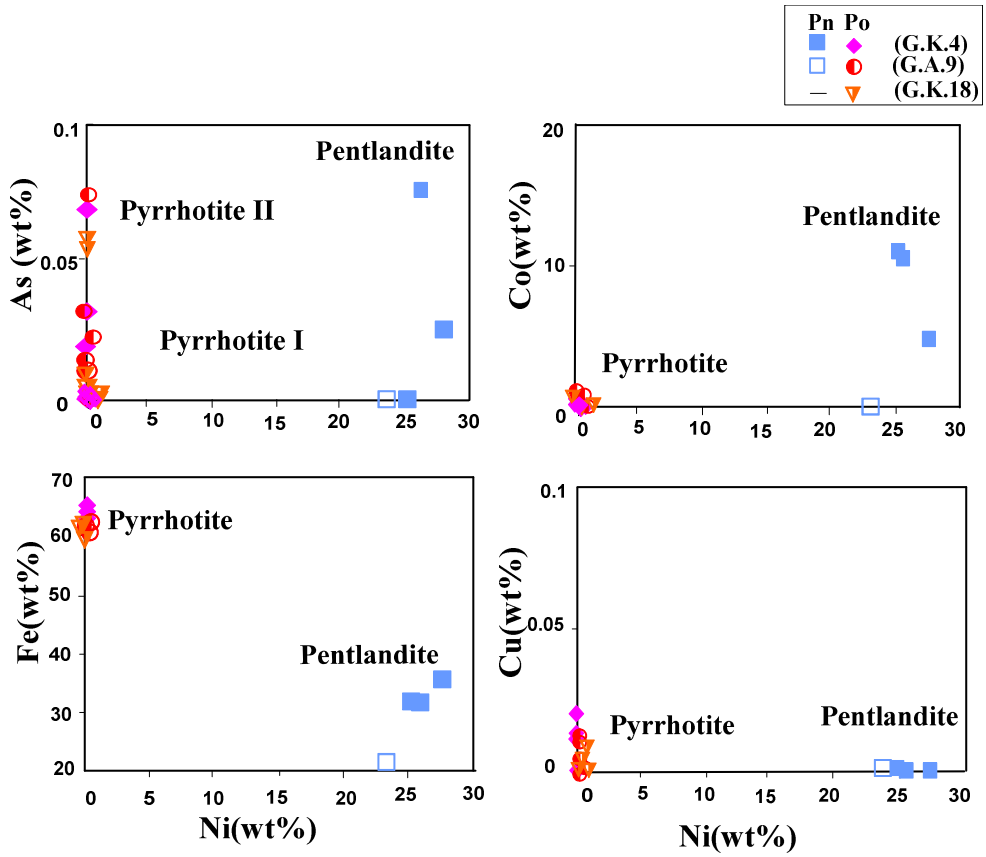
جدول ۳ نتایج آنالیز کانی‌های سولفیدی پیروتیت، پنتلاندیت و پیریت نمونه مافیک (G.A. 9) به روش ریزپردازش الکترونی.

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

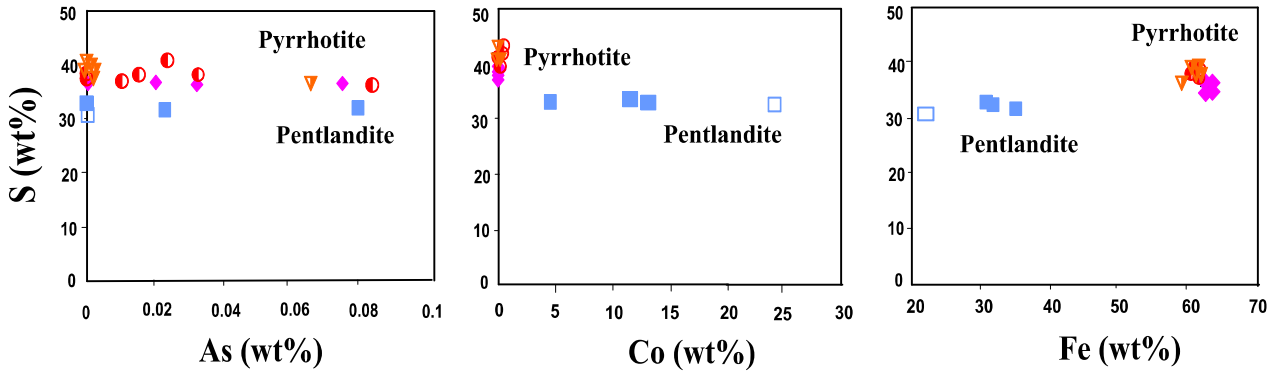
پیروتیت – پنتلاندیت

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 شناسایی‌اند (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 توجیه 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

مانده است. طبق [۱۴] با مقایسه‌ی نسبت‌های Co/Ni در کانه-های سولفیدی، می‌توان ذخایر اکسیدی آهن (Co/Ni>1) را از اکسیدهای Fe-Ti ماگمایی و ذخایر Ni-Fe-Cu نامیژاک ماگمایی (Co/Ni<1)، تمیز داد. میانگین نسبت Co/Ni در پیروتیت‌های منطقه صفر بوده و در پنتلاندیت‌ها ۰/۵ است که نشان دهنده‌ی خاستگاه ماگمایی آن‌هاست. عناصر فرعی موجود در پیروتیت‌ها 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 پیروتیت ($Fe_{0.8}S$ تا FeS) و پنتلاندیت دارای فرمول [$(Fe_{3.16}, Ni_{3.33}, Co_{3.5})_9 S_8$ تا $(Fe_{4.96}, Ni_{3.68}, Co_{0.64})S_8$] هستند.



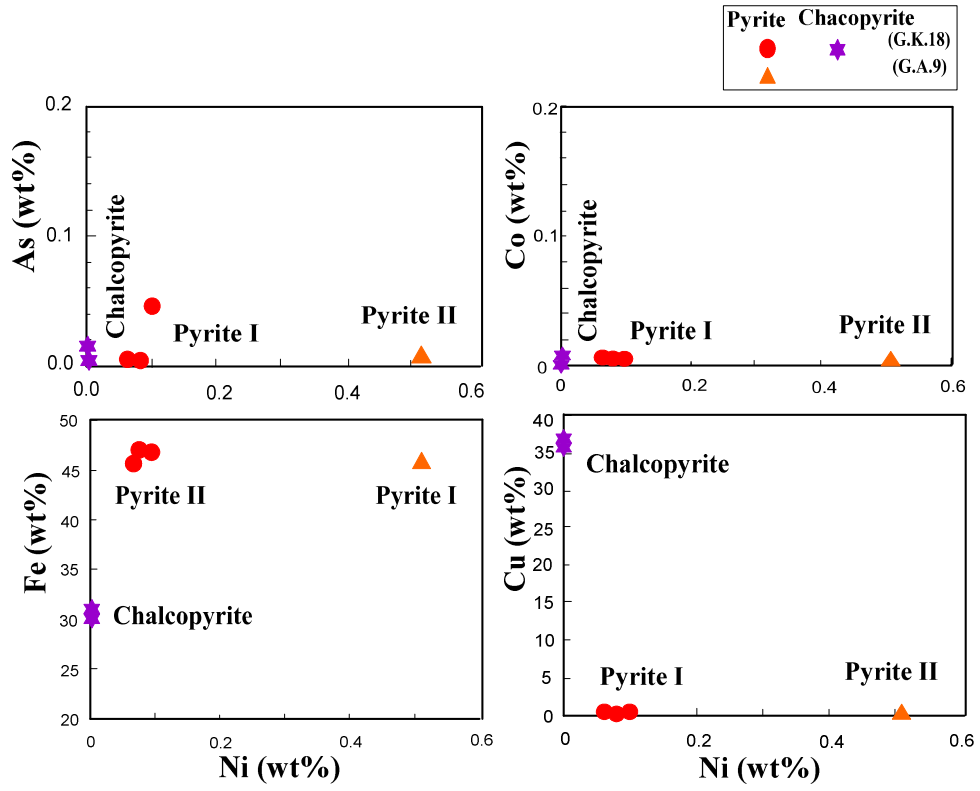
شکل ۷ نقشه‌ی تمرکز عناصر Fe, Co, As و Cu نسبت به Ni برای پیروتیت و پنتلاندیت نمونه‌های مافیک میشو، [۱۵].



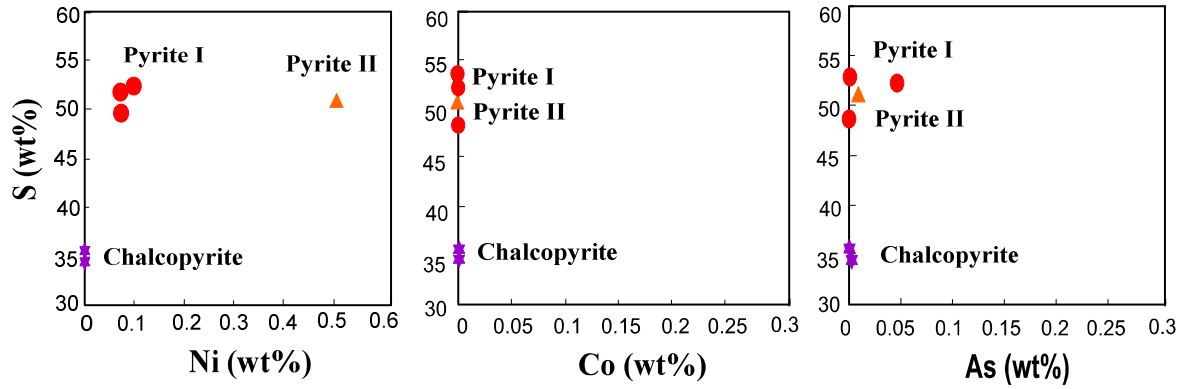
شکل ۸ نقشه‌ی تمرکز عناصر As, Co و Fe نسبت به گوگرد برای پیروتیت و پنتلاندیت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵].

پیریت – کالکوپیریت

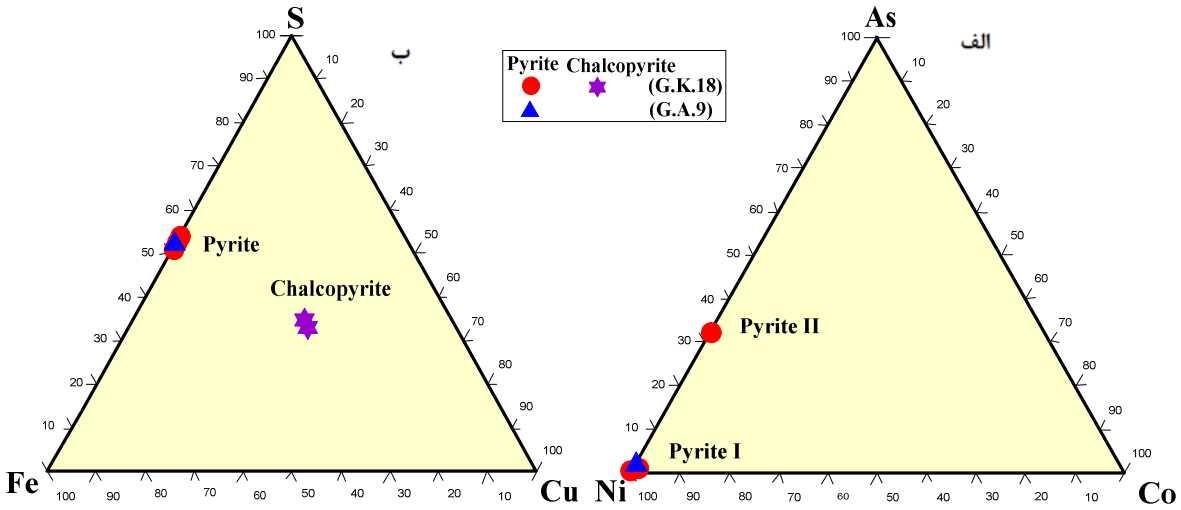
پیریت در نمونه‌های مورد بررسی بر اساس ویژگی‌های شیمیایی، به دو نوع رده‌بندی می‌شود. نوع اول نسبتاً غنی از نیکل (۰٫۵۱ ٪) و نوع دوم نسبتاً فقیر از نیکل (۰٫۱- ۰٫۰۷ ٪) (شکل ۹). کالکوپیریت با نسبت بالای Cu و میزان پایین As و Co نسبت به پیریت‌ها مشخص شده است. میزان تمرکز گوگرد در مقابل Ni، Co و As برای پیریت و کالکوپیریت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در نمودار مثلثی As-Ni-Co [۱۵]، 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 درکالکوپیریت‌ها 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 ($Fe_{1.07}S_2$ تا $Fe_{1.02}S_2$) و کالکوپیریت ($Cu_{0.99}$, $Fe_{0.97}$, S_2 تا $Cu_{1.02}$, Fe, 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.



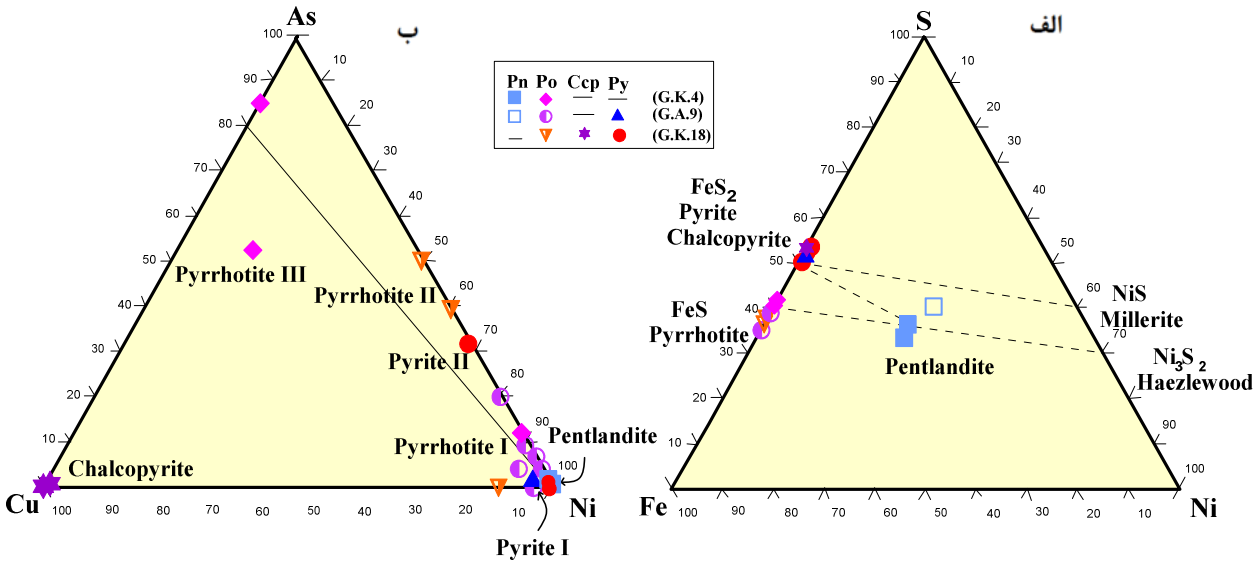
شکل ۹ نقشه‌ی عناصر Fe, Co, As و Cu نسبت‌به Ni برای پیریت و کالکوپیریت نمونه‌های مافیک میشو [۱۵].



شکل ۱۰ نقشه‌ی عناصر Ni, Co و As نسبت‌به گوگرد برای پیریت وکالکوپیریت 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 (پیروتیت، پنتلاندیت، پیریت و کالکوپیریت) نمونه‌های مافیک میشو.

تشکیل فازهای کانیایی 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 به‌وسیله‌ی 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- لرزولیت با ذوب بخشی ۲۰ - ۳۰ درصد، از اعماق کمتر از ۸۰ کیلومتر ریشه گرفته [۱۷] و نخست اکسیدها و سولفیدها به صورت همامیز 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 کانیایی 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 کانیایی اکسیدی شروع به تبلور کرده (کانه اکسیدی ایلمنیت در دمای $۸۰۰C^{\circ}$ درجه و مگنتیت در دمای $۶۰۰C^{\circ}$ 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 کانیایی 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 $۶۰۰ C^{\circ}$ درجه تشکیل می‌شود. با کاهش دما تا پایین‌تر از $۳۰۰C^{\circ}$ 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 بپیوندند و به قطره‌های بزرگ‌تر تبدیل شده و سپس از حجم نسبتا بزرگی از سنگ‌های اطراف خود زهکشی شده و به صورت عدسی‌های غنی از سولفید در گابروها انباشته شوند. از آنجایی که منطقه‌های غنی از فازهای کانیایی 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 سنگ‌های 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 $(Fe,Ni)_9S_8$)، اسفالریت (ZnS)، پیریت (FeS_2) و ترویلیت (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،

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] افتخارنژاد ج.، قرشی م.، مهرپرتو م.، ارشدی س.، زهره بخش ا.، *"نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تبریز – پلدشت"* سازمان زمین شناسی ایران (۱۳۷۰).

[۴] محجل م.، حاجی علیلو ب.، *"نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مرند"*، سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۳).

[۵] مؤید م.، مؤذن م.، *"نگرشي نوبر موقعیت خط درز پالئوتتیس در ایران"*، فشرده مقالات ششمین همایش انجمن زمین شناسي 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، جنوب‌غرب مرند، شمال‌غرب 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).

[8] Kissin S. A., Scatt S. D., *"phase relation involving pyrrhotite below 350C°"* , 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 processses 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 Sompujarvi 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 ژئوشیمیائی توده مافیک میشو (جنوب‌غرب مرند - آذربایجان شرقی)"*، مجله پترولوژی اصفهان (در دست چاپ).

[18] Hassan N., *"Genese des depots de Fe-Ti-P associes aux intrusions litees (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).

[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 < 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.