

شناخت منشأ کانی‌های تیتانومگنتیت و انادیم‌دار عطائیه در جنوب باختر مشهد با روش‌های XRM، SEM و EPMA

بهزاد حاج علیلو^۱، مرتضی رزم‌آرا^{۲*} و نسیم حاج علیلو^۳

^۱دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

^۲دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

چکیده

کانسار پلاسری عطائیه در جنوب باختر مشهد و در شمال خاور میکروپلیت ایران مرکزی قرار دارد. مطالعه مقاطع نازک و صیقلی نشان داد که کانی‌های موجود در کانسار پلاسری VTM (تیتانومگنتیت و انادیم‌دار) از نظر فراوانی به ترتیب مگنتیت، تیتانومگنتیت، هماتیت و ایلمنیت می‌باشند. همچنین مطالعات پتروگرافی مشخص کرد که واحدهای گابرویی و اولترامافیکی بیشترین مقدار کانی‌های فلزی را دارند. بررسی‌های کانه‌نگاری و تجزیه‌های EPMA، SEM-EDX و XRM بر روی کانسار پلاسری و سنگ منشأ آن نتایج جالب توجهی را نشان داده است. مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM نشان داد که گرچه سکنس افیولیتی به عنوان منشأ این کانسار محسوب می‌شود اما در طی تبلور ماده مذاب در درجه حرارت‌های بالا، ابتدا محلول جامد کاملی بین تیتانومگنتیت و ایلمنیت در بالاتر از ۱۱۰۰ °C تشکیل شده که با کاهش دما و پیشرفت تفریق در بالاتر از دماهای ۶۰۰ °C فازهای ایلمنیت و مگنتیت به صورت تیغه‌های اکسلوشنی از یکدیگر تفکیک و در عین حال از فاز تیتانومگنتیت جدا گردیده‌اند. با تداوم تبلور، تیتانیم و انادیم در سنگ‌های گابرویی وارد فازهای ایلمنیتی و تیتانومگنتیتی می‌شوند. آنالیزهای EPMA که بر روی واحدهای گابرویی انجام شده نشان داد که این واحدها منشأ Ti و V برای تأمین واحدهای پلاسری بوده است.

کلیدواژه‌ها: کانسار پلاسری، VTM، تیتانومگنتیت و انادیم‌دار، EPMA، SEM.

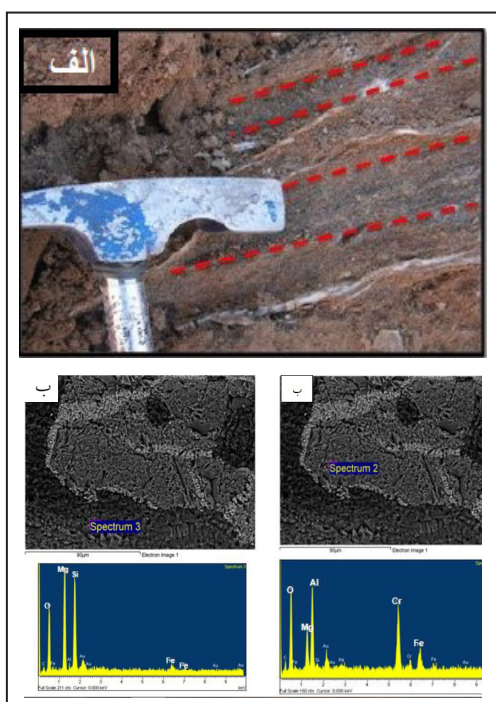
*نویسنده مسئول: مرتضی رزم‌آرا

E- mail: razmaramorteza@gmail.com

۱-پیش‌نوشتار

خاوری است. با بررسی‌هایی که بر روی این کانسار پلاسری انجام شد مشخص گردید که منشأ اولیه این کانسار از افیولیت‌ها بوده است. کانسار پلاسری تیتانومگنتیت و انادیم‌دار منطقه عطائیه یک کانسار از نوع VMT است که در آنها آنومالی بالایی از V و Ti دیده می‌شود (Razmara, 2010) (شکل ۲).

منطقه مورد مطالعه در جنوب باختر مشهد و در حد فاصل نیشابور تا کاشمر قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه از نظر زمین‌شناسی در شمال خاور میکروپلیت ایران مرکزی قرار گرفته که متشکل از واحدهای رسوبی مربوط به بعد از دوره کرتاسه است. این منطقه جزئی از حوضه فلیشی می‌باشد (افتخارنژاد، ۱۳۵۰) که در بین افیولیت‌های سبزوار و تربت حیدریه قرار گرفته و دارای روند شمال باختری - جنوب



شکل ۲- پلاسرهای تیتانومگنتیت در اندازه‌های میلی‌متری در بستر آبراهه‌های موجود در منطقه عطائیه؛ (ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از پلاسرهای تیتانومگنتیت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.

می‌شود که بر اساس مقدار عنصر در آن نقطه، ارتفاع پیک‌ها تغییر می‌کند. هر چه تمرکز عنصر در نقطه آنالیز بالاتر باشد پیک مربوط به آن عنصر بلندتر خواهد بود. در روش نگاشت پرتو X، تمرکز عنصر در کانی یا تعدادی از کانی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند که متناسب با تغییرات شدت پرتو X، مقدار نسبی عناصر در طول سطح نشان داده می‌شود، به صورتی که تمرکز هر عنصر در تصویر با روشن بودن رنگ در نظر گرفته می‌شود. در بررسی میکروسکوپ الکترونی (SEM) به روش EDS به دلیل اینکه نمی‌توان تمامی عناصر را (به ویژه در نگاشت پرتو X) مورد بررسی قرار داد، لذا برای بررسی تأثیرات دگرسانی بر روی توزیع عناصر، تنها عناصر آهن و کروم مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های KS، Em3 و TH نمونه‌های مربوط به سنگ‌های منشأ می‌باشند. در ابتدا کانی اسپینل مورد بررسی قرار گرفت که در زمینه سرپانتینی شده قرار گرفته است. ۳ نقطه برای انجام آنالیز مشخص و بعد از آن رگچه‌های آهن موجود در سرپانتینی‌ها بررسی شد. در ادامه چند آنالیز نقطه‌ای و سپس نگاشت پرتو X مورد بررسی قرار گرفت. آنالیزهای نقطه‌ای مربوط به کانی اسپینل از سه سنگ هارزبورگیت، لروولیت و پریدوتیت سرپانتینی شده به عمل آمد. در ابتدا آنالیزهای مربوط به هارزبورگیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این سنگ، ۴ کانی اسپینلی، ۳۵ نقطه مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت. با آنالیزهای انجام شده از بلورهای اسپینل و مشاهده نتایج آن مشخص گردید که در این کانی، مجموعه‌ای از عناصر Al ، Cr ، Mg ، Fe و Si وجود دارند. گاهی عنصر آهن به صورت محلول جامد در درون اسپینل وجود دارد. آنالیز نقطه‌ای از سه نقطه کانی اسپینل، رگچه درون آهن و همچنین زمینه‌ای که کانی اسپینل در آن قرار دارد انجام شد. در نمونه دیگری از زمینه سنگ آنالیز انجام شده که با بررسی مقادیر عناصر، مشخص شد که مقادیر Mg ، Si و O بالا و مقادیر Fe و Cr پایین می‌باشد (شکل ۳- الف). این امر کاملاً منطقی می‌باشد زیرا زمینه سرپانتینی است. همچنین زمانی که از بلور اسپینل آنالیز به عمل آمد (شکل ۳- ب) مشاهده شد که تمرکز Al ، Cr و Mg بالا و تمرکز Fe پایین‌تر از بقیه عناصر است در شکل ۳- ج که از رگچه‌های داخل اسپینل آنالیز انجام شده، مشاهده می‌شود که تمرکز آهن در این باندها بالا است و بقیه عناصر مانند Cr به مقدار خیلی کم وجود دارند. از مشاهده نتایج آنالیز ۳۵ نقطه از کانی‌های اسپینل و بررسی آنها می‌توان نتیجه گرفت که رگچه‌هایی که در کانی اسپینل وجود دارند، اکسید آهن می‌باشند. اسپینل‌هایی که میزان Cr ، Mg ، Fe و Al بالایی دارند از چند کانی اسپینلی به صورت محلول جامد تشکیل شده‌اند. این عناصر می‌توانند در ساختار بلوری جایگزین یکدیگر شده و به صورت محلول جامد با هم قرار داشته باشند. با توجه به میزان عناصر در پیک‌ها و نیز مقایسه این نوع اسپینل با انواع دیگر اسپینل‌ها در اشکال بعدی می‌توان چنین عنوان نمود که مجموعه‌ای از کانی‌های اسپینلی شامل سری اسپینل $MgAl_2O_4$ و هرسینیت $Fe^{+2}Al_2O_4$ (سری اسپینل)، منیزیکرومیت $MgCr_2O_4$ و کرومیت $Fe^{+2}Cr_2O_4$ (سری کرومیت)، منزیوفریت $MgFe_2^{+3}O_4$ و مگنتیت $Fe^{+2}Fe_2^{+3}O_4$ در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در واقع می‌توان عنوان کرد که آهن، آلومینیوم، منیزیم و کروم در ساختار اسپینل دیادوکیک (Diadochic) هستند. این واژه برای بیان قابلیت عناصر مختلف در اشغال یک موضع بلوری مشابه در شبکه به کار گرفته شده است (Mason and Moore, 1966). بر این اساس می‌توان عنوان کرد، عناصری که در اسپینل جایگزین یکدیگر می‌شوند با تغییر شرایط (دما یا فشار) از حالت محلول جامد خارج و کانی‌های مجزای اسپینلی را تشکیل می‌دهند.

در شکل ۴ نگاشت پرتو X مربوط به کانی اسپینل در سنگ هارزبورگیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانگونه که مشخص است شش عنصر منیزیم، کروم، آهن، آلومینیوم، سیلیسیم و اکسیژن نشان داده شده است. با بررسی آنها مشخص شد که در رگه سفید داخل بلور اسپینل، تمرکز Cr ، Al و Si پایین اما تمرکز Fe بالا است و نشان‌دهنده این است که آهن روندی کاملاً متفاوت با دیگر عناصر دارد.

مطالعات کانی‌شناسی بر روی این کانسار نشان می‌دهد که کانی اصلی تشکیل دهنده این پلاسار، تیتانومگنتیت می‌باشد. کانه‌های این کانسار عبارتند از مگنتیت، تیتانو مگنتیت، ایلمنیت و همتایت. در این نوع کانسار، کانی‌ها به صورت‌های مختلفی از جمله تیتانومگنتیت، مگنتیت دارای جانشینی محدود تیتانیم و نیز مگنتیت‌های دارای وانادیم و تیتانیم بالا دیده می‌شود. منشأ این پلاسرها ماسه‌سنگ‌های الیگوسن و کنگلومرای میوسن و پلیوسن است که بسیاری از اجزای این واحدها نشأت گرفته از توالی‌های افیولیتی مجاور این توده‌ها است. به منظور بررسی ژئز کانسار پلاسری و تعیین منشأ اکسیدهای آهن و تیتانیم در این منطقه لازم بود که مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمی تفصیلی از سنگ منشأ پلاسرها به عمل آید. این آنالیزها شامل SEM، XRM و EPMA می‌باشند. بر این اساس از واحدهای اولترامافیک و مافیک که بیشترین مقدار کانی‌های اکسید آهن و تیتانیم را دارند آنالیز به عمل آمد. علاوه بر این دیگر کانی‌های سنگین واحد پلاسری نیز مورد آنالیز قرار گرفت تا از نظر ژئوشیمی کانیایی با کانی‌های فلزی موجود در دیگر واحدهای اولترامافیک و مافیک سکانس افیولیتی مقایسه شوند.

۲- روش مطالعه

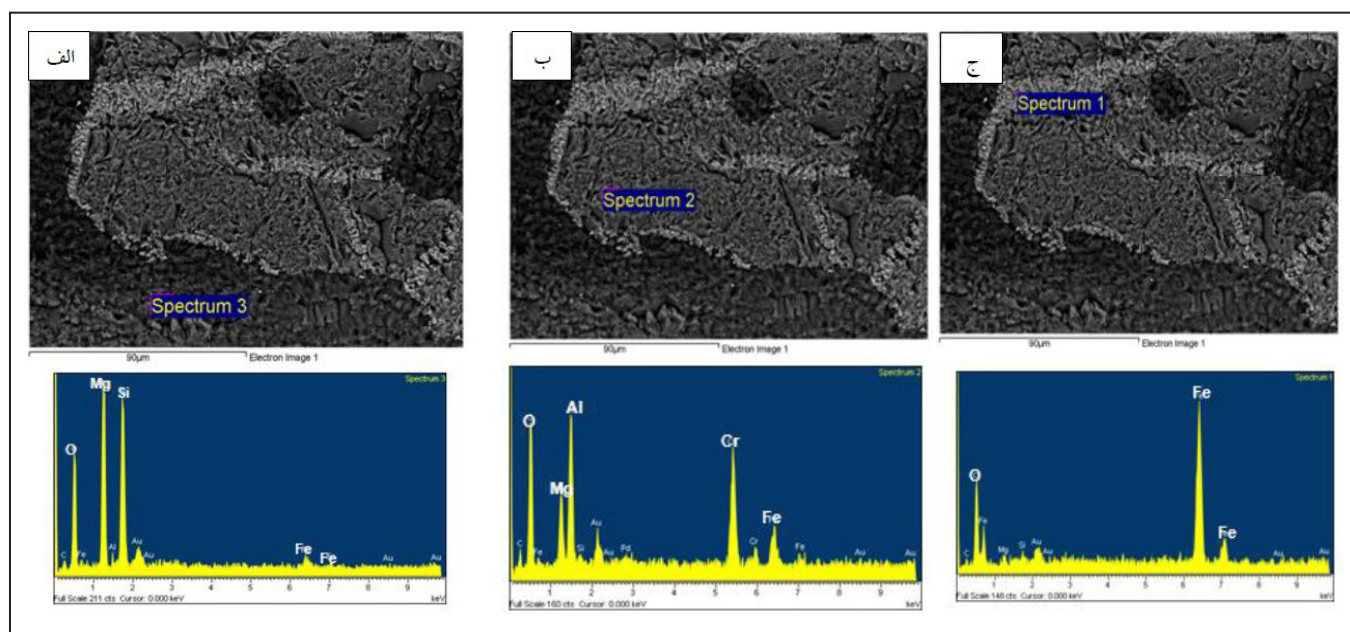
با توجه به اینکه بیشترین مقدار آهن در واحدهای اولترامافیک و مافیکی منطقه وجود دارد، مطالعات برای تعیین منشأ کانی‌های سنگین کانسار پلاسری بر روی کانی‌های فلزی این واحدها متمرکز شد. نمونه‌هایی که برای مطالعات SEM انتخاب شدند شامل دو گروه می‌باشند، نمونه‌های مربوط به مقاطع نازک و نمونه‌های مربوط به مقاطع صیقلی. تعدادی از نمونه‌ها از سنگ‌های پریدوتیت سرپانتینی شده و هارزبورگیت برای مقطع نازک و نمونه‌هایی از پلاسرها منطقه عطائیه برای مقطع صیقلی انتخاب شدند. این نمونه‌ها قبل از آنالیز توسط SEM، با میکروسکوپ پلاریزان و انعکاسی مطالعه و محل‌های مورد نظر برای آنالیز انتخاب شدند. دستگاه SEM مورد استفاده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد مدل LEO145 VP ساخت کشور آلمان می‌باشد.

حداکثر ولتاژ آن ۳۰ Kev و قدرت تفکیک دستگاه ۲/۵ nm می‌باشند. در این مطالعه برای آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه CV 620 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. عناصر پوشش دهنده نمونه‌ها، طلا و پلاتین، می‌باشند. سیستم EDS مورد استفاده ساخت شرکت آکسفورد انگلستان است. در این مطالعه امکان مطالعه استفاده از نمونه‌هایی به بزرگی $20\text{ }\mu\text{m}$ وجود دارد. نمونه‌های مورد استفاده برای آنالیزهای EPMA نیز شامل کانی‌های غیرفلزی سنگ‌های مافیک و نیز کانی‌های فلزی در مقاطع صیقلی می‌باشند. این آزمایشات در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران صورت گرفت. دستگاه الکترون ماکروپروب این مرکز مدل SX100 ساخت شرکت camera کشور فرانسه می‌باشد. اندازه پرتو مورد استفاده در این آنالیز $5-2\text{ }\mu\text{m}$ بوده است. باریکه الکترونی استفاده شده ۱۵ kev بوده و برای تجزیه نمونه از جریانی به شدت ۲۰ نانوآمپر استفاده شد. به دلیل تشابه کانه‌شناسی در نمونه‌های پلاسری موجود در چاهک‌ها و ترائشه‌های منطقه، مقاطع صیقلی برای آنالیز نقطه‌ای و مقاطع نازک از اجزای گابرویی موجود در کنگلومرای منطقه انتخاب شدند. در مجموع ۱۷ آنالیز نقطه‌ای توسط مایکروپروب در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج انجام گردید. این نمونه‌ها به منظور تعیین ترکیب شیمیایی دقیق کانی‌های موجود در پلاسرها منطقه، ارزیابی دما و فشار حاکم بر این کانی‌ها و در نهایت تعیین منشأ آنها مورد آنالیز قرار گرفتند.

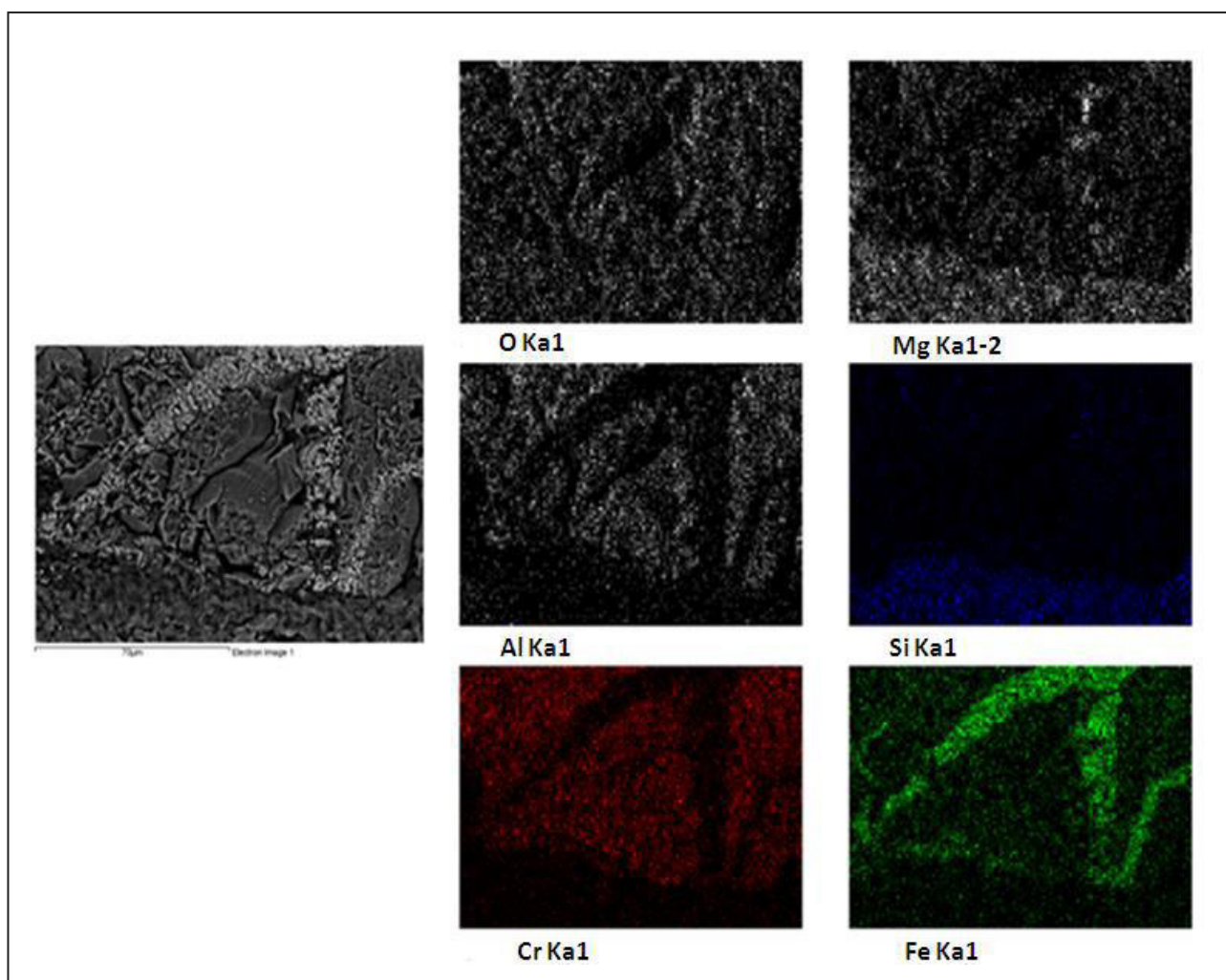
۳- بحث و بررسی

۳-۱- بررسی آنالیزهای SEM مربوط به اجزای اولترامافیک در مقاطع نازک

کانی‌های فلزی موجود در پریدوتیت سرپانتینی شده و هارزبورگیت برای انجام آنالیز انتخاب شدند. در آنالیزهای این نمونه‌ها از سیستم EDS استفاده شد. در مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM از دو نوع آنالیز استفاده شده است: ۱- آنالیز نقطه‌ای و ۲- روش نگاشت پرتو X (XRM). در آنالیز نقطه‌ای، نتایج به صورت پیک نشان داده



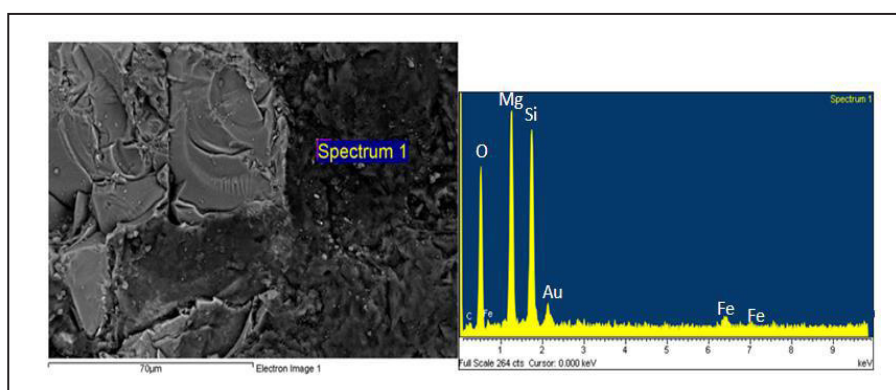
شکل ۳- الف) آنالیز نقطه‌ای از زمینه سرپانتینی شده در نمونه Em3؛ ب) آنالیز نقطه‌ای از بلور اسپینل (در نمونه Em3)؛ ج) آنالیز نقطه‌ای از رگه‌های سفید رنگ (در نمونه Em3).



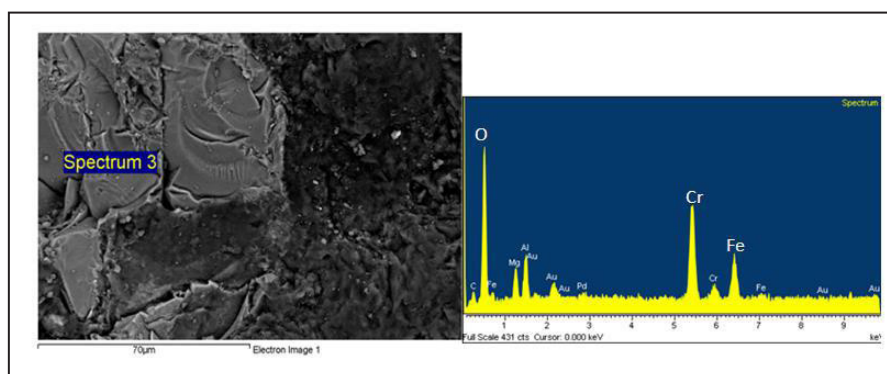
شکل ۴- نگاشت عنصری از بلورهای اسپینل و رگه‌های داخل و اطراف آن در نمونه Em3.

و منیزیم روند معکوس را نشان می‌دهند. روند آهن با این دو گروه متفاوت و یک روند تدریجی است. نکته جالب توجه اینکه اگر از سمت داخل بلور به سمت خارج آنالیز انجام گیرد در وسط بلور که مقدار آهن زیاد و پیک بلند است مقدار آلومینیم و سیلیسیم کاهش می‌یابد ولی در جایی که مقدار سیلیسیم و آلومینیم افزایش می‌یابد مقدار آهن کاهش می‌یابد. این اختلاف می‌تواند به دلیل متفاوت بودن نوع اسپینل‌ها باشد. در این اسپینل‌ها آهن به صورت مگنتیت از محلول جامد خارج نشده است. نمونه بعدی مورد بررسی اسپینل‌های موجود در پریدوتیت‌های سرپانتینی می‌باشد. نقاطی که مورد آنالیز قرار می‌گیرند اکسیدهای آهن موجود در درز و شکاف‌ها می‌باشند. در ابتدا آنالیز نقطه‌ای و سپس نگاشت عنصری انجام گردید. نمونه بعدی رگچه‌های آهن نمونه سرپانتینیت و سرپانتینیت‌های موجود در نمونه پریدوتیت سرپانتینی شده بود. آنالیز رگه‌های اکسیدی نشان داد که میزان Fe در آنها بالا ولی میزان Mg پایین است (شکل ۱۰). ولی با آنالیز زمینه سرپانتینی، مشاهده شد که مقدار عناصر Mg و Si بالا ولی مقدار Fe پایین می‌باشد (شکل ۱۱).

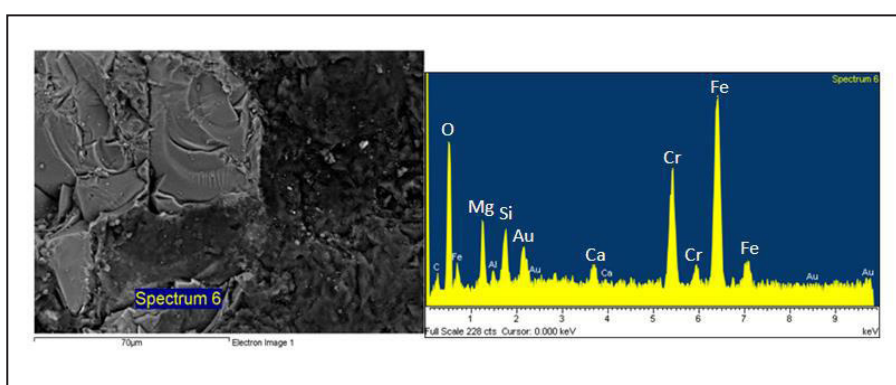
آنالیز اسپینل‌های موجود در سنگ لرزولیت نشان داد که در زمینه سنگ، تمرکز Si و Mg بالا ولی تمرکز Fe و Cr پایین است (شکل ۵). همچنین تمرکز Cr و Fe در بلور اسپینل بالا اما مقدار Cr بیشتر از Fe می‌باشد (شکل ۶). آنالیز از حاشیه بلور اسپینل نشان داد که در این قسمت‌ها نیز تمرکز آهن و کروم بالا ولی مقدار آهن بیشتر از کروم می‌باشد (شکل ۷). با توجه به نوع کانی و عناصر آن می‌توان نتیجه گرفت که این اسپینل‌ها مربوط به گروه کرومیت بوده که به صورت محلول جامد قابل مشاهده است. شکل ۸ نگاشت عنصری از بلور اسپینل در نمونه لرزولیت را نشان می‌دهد که مشخص است که در بلور اسپینل مقادیر Fe، Cr و Al بالا می‌باشد اما در زمینه سرپانتینی مقدار عناصر Mg و Si بالا است. در شکل ۹، آنالیز خطی از بلور اسپینل مشاهده می‌شود که از قسمت وسط بلور به سمت خارج آنالیز گردیده است. همچنان که در شکل ۹ دیده می‌شود، تمرکز هر عنصر با پیک خاص مشخص شده است. عناصر کروم با آلومینیم و همچنین سیلیسیم با منیزیم روند مشابهی را نشان می‌دهند. روند کروم و آلومینیم از داخل کانی به طرف حاشیه، کاهش ولی سیلیسیم



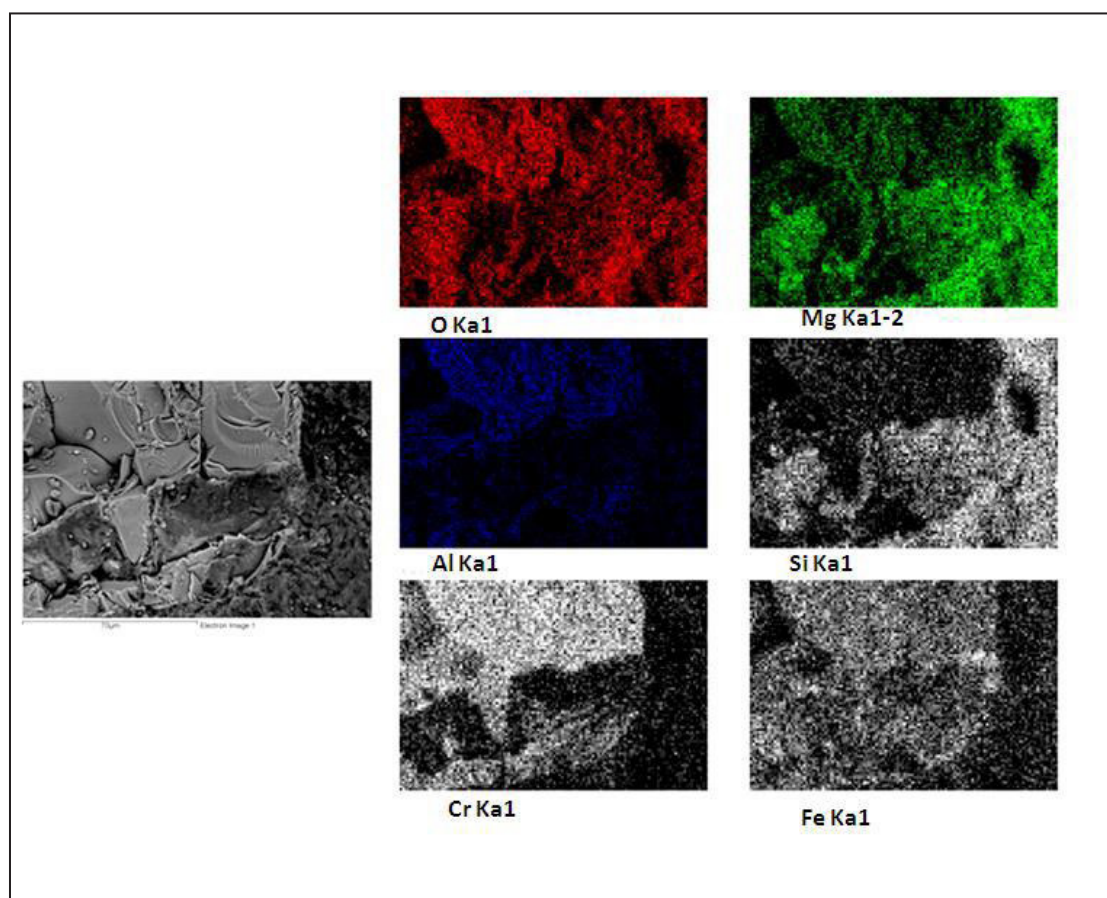
شکل ۵- آنالیز نقطه‌ای از زمینه سرپانتینی در نمونه KS.



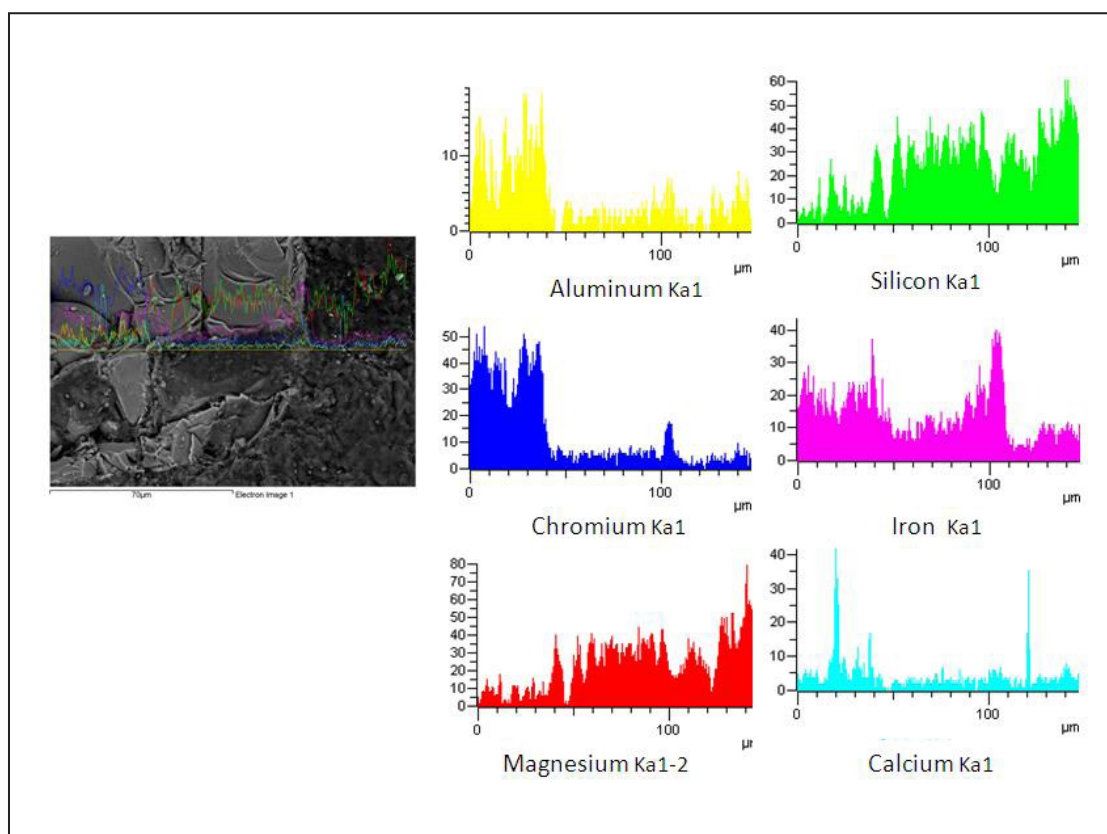
شکل ۶- آنالیز نقطه‌ای از بلور اسپینل در نمونه KS



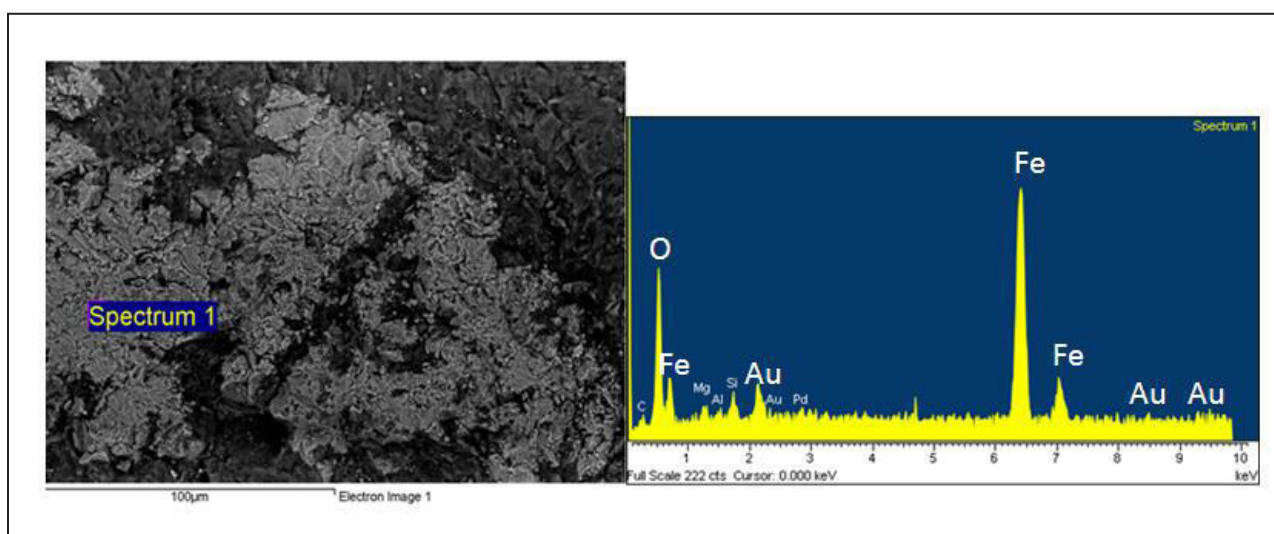
شکل ۷- آنالیز از حاشیه بلور اسپینل در نمونه KS.



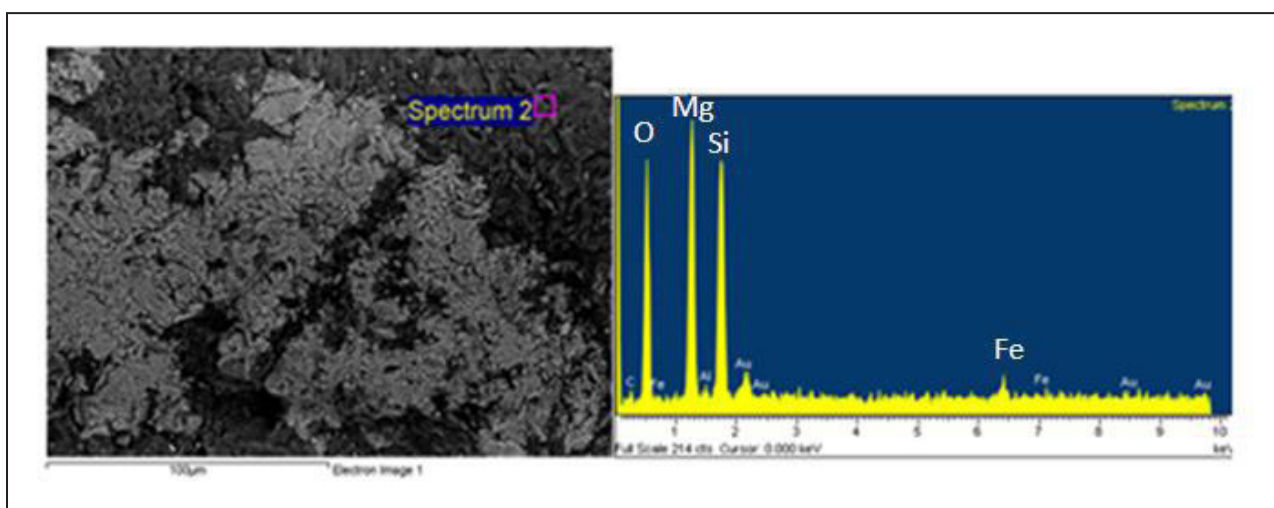
شکل ۸- نگاشت عنصری از بلور اسپینل در نمونه لرزولیت.



شکل ۹- آنالیز خطی از بلور اسپینل در نمونه لرزولیت.



شکل ۱۰- آنالیز نقطه‌ای از رگچه‌های آهن در نمونه سرپانتینیت.



شکل ۱۱- آنالیز نقطه‌ای از زمینه سرپانتینیتی در نمونه پریدوتیت سرپانتینیتی شده.

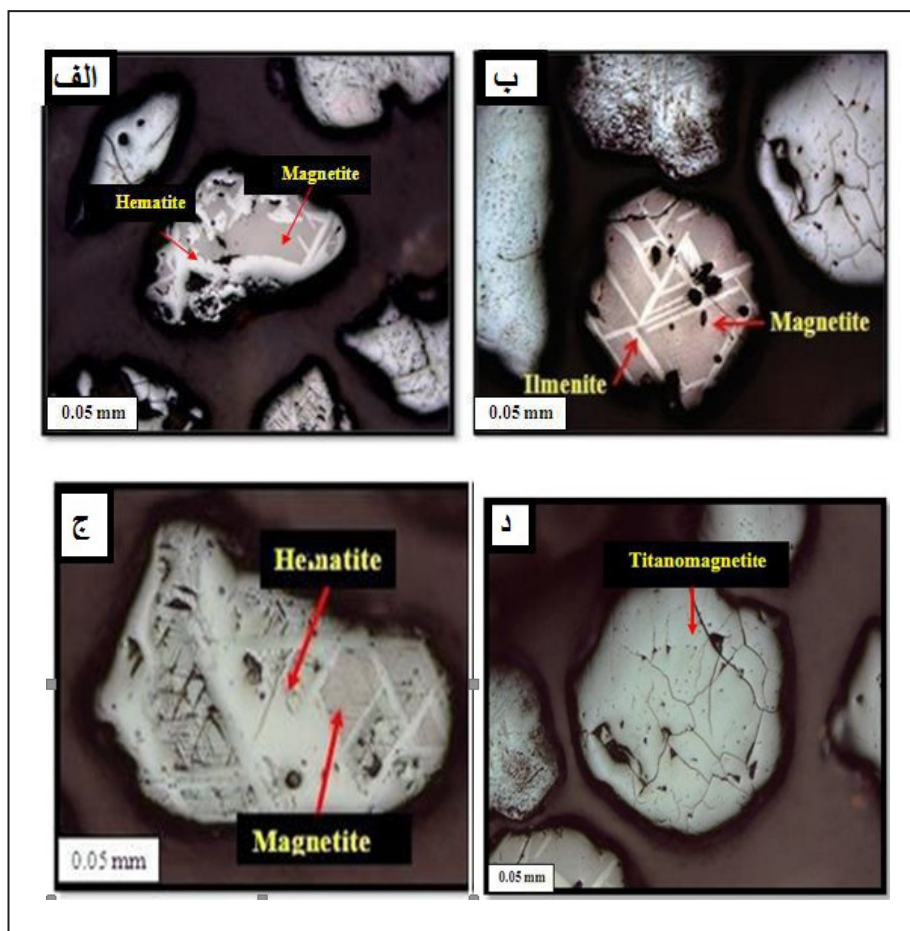
۲-۳. بررسی مقاطع صیقلی

ایلمنیت در مگنتیت، رنگ بنفش کم رنگ تا خاکستری در مقاطع صیقلی، همچنین مقدار بالای Ti نسبت به Fe و انطباق آن با نتایج EPMA، می‌توان گفت جنس این تیغه‌ها ایلمنیت می‌باشد. در شکل ۱۶ نگاشت عنصری از بلور مگنتیت نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود تمرکز تیتانیم در جهت رخ‌ها بالا است. آهن و اکسیژن نیز در سرتاسر بلور تمرکز بالایی دارند. با توجه به تصاویر آنالیز نقطه‌ای و نگاشت عنصری چنین بر می‌آید که تیتانیم در سه قسمت از بلورهای مگنتیت جایگیری کرده است: ۱- در حفرات بلوری، ۲- در تیغه‌های اکسولوشنی ۳- در جهت رخ‌ها با توجه به آنالیزهای انجام گرفته مشخص شد که بیشترین میزان تیتانیم در اولیون گابروها می‌باشد. با توجه به آنالیزهای کمی که بر روی مگنتیت‌ها انجام شد میزان TiO_2 در آنها حدود ۸٪ می‌باشد. این مقدار با میزان تیتانیم در گابروها و دیابازهای صفحه‌ای منطبق می‌باشد (Buddington and Lindsley, 1964). با توجه به اینکه جایگزینی عناصر در محلول‌های جامد با محدودیت همراه می‌باشد، بنابراین جایگزینی تیتانیم به جای آهن نیز تا حد معینی انجام می‌شود (Mason and Moore, 1966). البته در درجه حرارت‌های بالا، انحلال پذیری عناصر بیشتر خواهد بود. بنابراین در طی تبلور ماگما و تشکیل بلورهای تیتانومگنتیت در درجه حرارت‌های بالا، تیتانیم به مقدار بیشتری در

با توجه به اینکه در کانه‌های نوع VTM منطقه، آنومالی آهن و تیتانیم وجود دارد جایگاه تیتانیم و جابجایی عناصر در مگنتیت‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا به منظور بررسی عناصر در مگنتیت موجود در پلاسره‌های منطقه از کانی‌های سنگین موجود در مقاطع صیقلی آنالیزهای نقطه‌ای و نگاشت عنصری به عمل آمد. در شکل ۱۲ چند تصویر از کانه VTM نشان داده شده است. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که مقدار تیتانیم بالاست و تمرکز آهن نیز در این نقطه بالا می‌باشد که شکل ۱۳ نشان دهنده آن است که تیتانیم در نقایص بلوری جایگزینی کرده و کانی تیتانومگنتیت (مگنتیت حاوی تیتانیم) را به وجود آورده است. این نتایج با نتایج حاصل از آنالیزهای EPMA نیز مطابقت دارد به صورتی که وجود کانی تیتانومگنتیت در آنجا به اثبات رسیده است. آنالیز بعدی از بلور مگنتیت انجام شده است، همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است میزان آهن بالا ولی میزان تیتانیم در این نقطه پایین می‌باشد. اکسیژن نیز در این نقطه تمرکز بالایی دارد و بقیه عناصر در زمینه قرار دارند که نشان می‌دهد این نقطه از مگنتیت، از اکسید آهن تشکیل شده است. آنالیز تیغه‌های اکسولوشنی نشان داد که در آنها تمرکز تیتان بالا است (شکل ۱۵). جنس این تیغه‌ها می‌تواند از ایلمنیت و یا از الواسپیتل باشد. با توجه به مزدوج بودن تیغه‌های

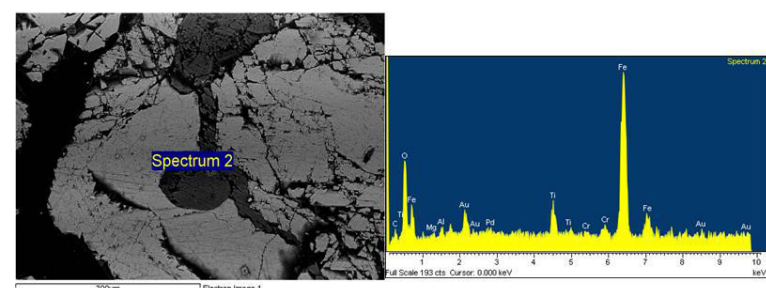
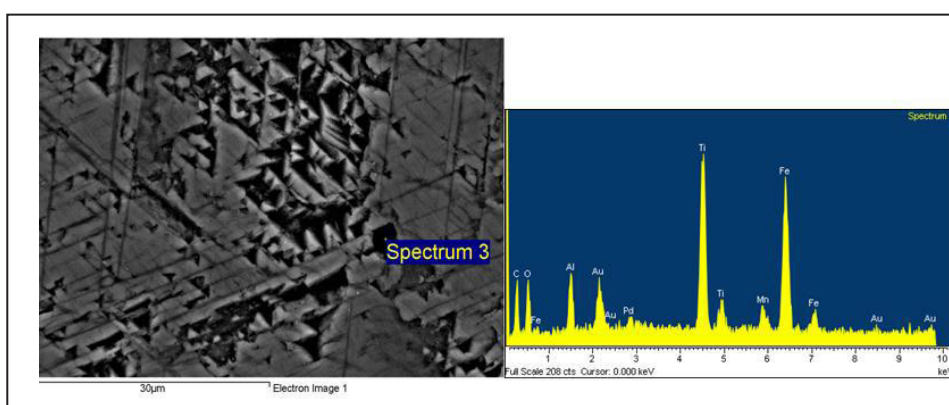
و شکستگی‌ها را می‌شود و محلول جامدهایی مانند الواسپینل را تشکیل می‌دهد (Craig and Vaughan, 1994).

مگنتیت جای می‌گیرد و در درجه حرارت‌های پایین، به دلیل پایین آمدن قابلیت انحلال، مقدار تیتانیم در مگنتیت پایین می‌آید. بنابراین تیتانیم در نقایص بلوری

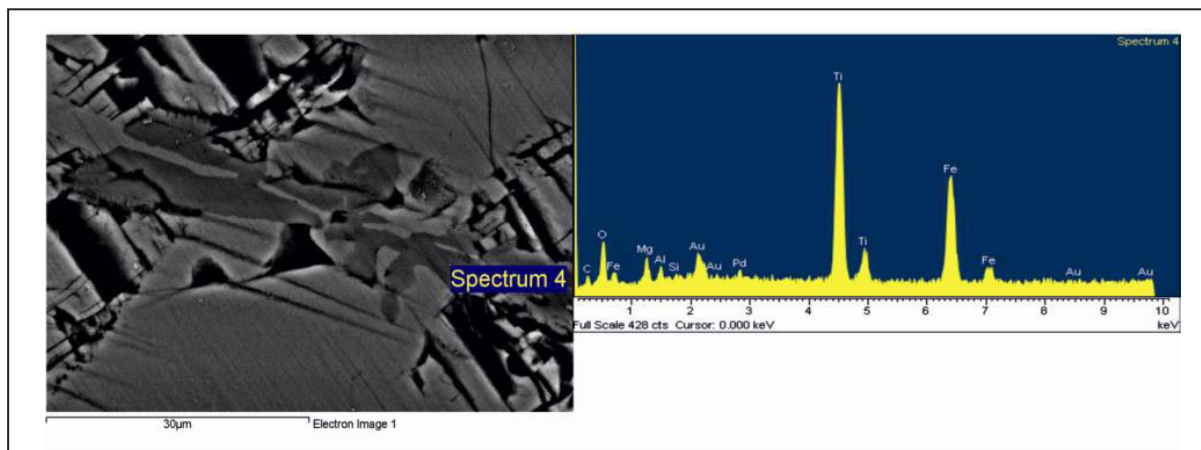


شکل ۱۲- (A) بلور مگنتیت و هماتیت با بافت مار تیتی منظم؛ (B) بافت داربستی مگنتیت همراه با تیغه‌های محلول جامدی از ایلمنیت؛ (C) بافت داربستی - جعبه‌ای که باقی مانده‌هایی از مگنتیت با رنگ خاکستری متمایل به صورتی و هماتیت با رنگ خاکستری وجود دارد؛ (D) بلور تیتانومگنتیت به صورت همگن و گرد شده.

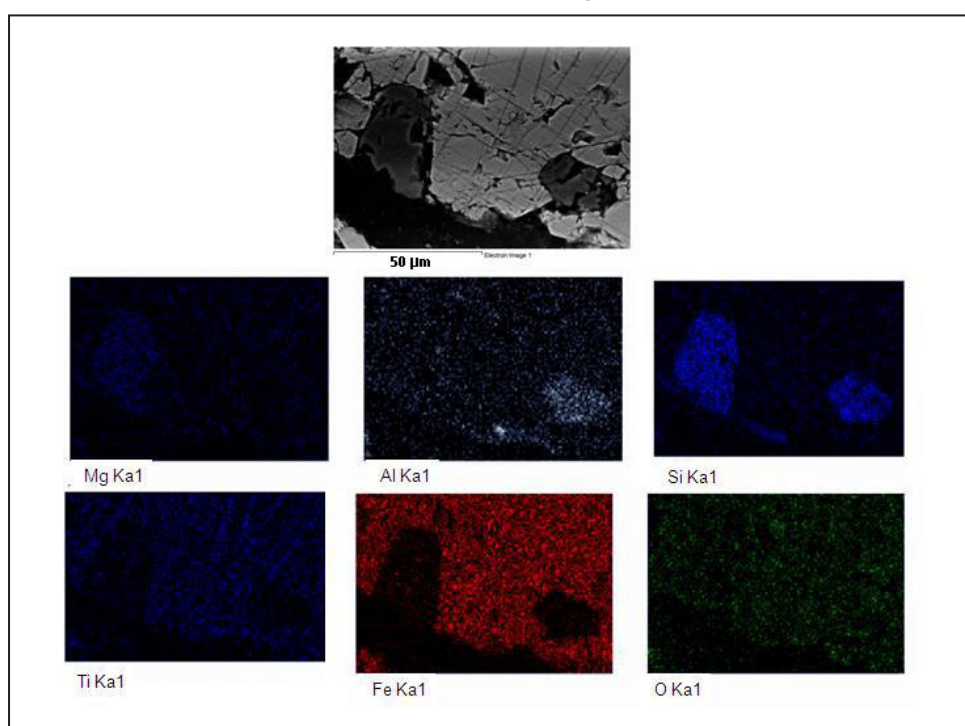
شکل ۱۳- آنالیز نقطه‌ای از بلور مگنتیت در مقطع صیقلی. در این نقطه تمرکز آهن و تیتانیم بالاست.



شکل ۱۴- آنالیز نقطه‌ای از بلور مگنتیت در مقطع صیقلی. در این نقطه تمرکز آهن بالاست.



شکل ۱۵- آنالیز نقطه‌ای از تیغه‌های محلول جامد بلوری مگنتیت در مقطع صیقلی، در این نقطه تمرکز تیتانیم بالاست.



شکل ۱۶- نگاشت عنصری از بلور مگنتیت، این تصویر تمرکز عناصر را در بلور مگنتیت نشان می‌دهد. در این تصویر تمرکز تیتانیم در جهت رخ‌ها بالا است.

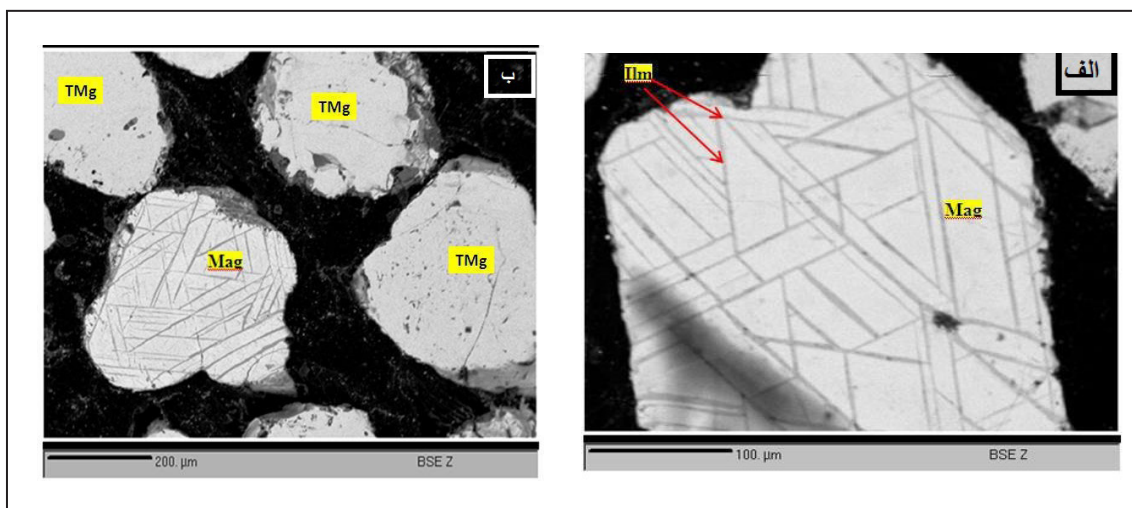
۳-۳. بررسی آنالیزهای EPMA کانی‌های سنگین پلاستی

همانطور که در بالا اشاره شد برای تعیین ترکیب شیمیایی و تعیین منشأ کانسار VTM، سه کانی مگنتیت، تیتانومگنتیت و ایلمنیت که بیشترین و مهمترین کانی‌های سنگین در منطقه هستند مورد آنالیز قرار گرفتند. مگنتیت به عنوان کانه اصلی در نمونه‌ها به سه صورت دیده می‌شود: ۱- هموژن، ۲- جانشینی ثانویه، ۳- محلول جامد. در مورد اول، مگنتیت بدون هیچ جانشینی عنصری در درز و شکاف دیده می‌شود. در مورد دوم در داخل درز و شکاف‌های مگنتیت، هماتیت جانشین شده که به آن مارتیتی شدن گفته می‌شود. چون رخ‌ها و درزها نقاط ضعف بلورها بوده، فرآیند دگرسانی از این محل‌ها شروع و نهایتاً به سطح کل بلور گسترش پیدا می‌کند. در مورد سوم نیز مگنتیت با ایلمنیت به صورت محلول جامد قرار دارند و پاراژنز یکدیگر می‌باشند. کانی تیتانومگنتیت نیز به صورت هموژن دیده می‌شود. تمرکز Ti به این صورت، نشان دهنده محدود بودن قابلیت انحلال تیتان در محلول جامد تیتانومگنتیت در دمای پایین می‌باشد در شکل ۱۷- الف اکسلوشن‌های ایلمنیت در مگنتیت مشخص شده است و در شکل ۱۷- ب تیتانومگنتیت و مگنتیت با هم دیده می‌شوند.

یکی از بهترین نمودارهایی که مراتب تبلور ماگما را نشان می‌دهد نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971) می‌باشد. در طی تبلور یک ماگمای تولیتی، ماگما یک مسیر عادی را طی می‌کند به صورتی که ابتدا کانی‌های حرارت بالا مثل الیون‌ها و پیروکسن‌ها و واحدهای سنگی اولترامافیک و مافیکی تشکیل می‌شوند. در ادامه نیز برخی دیگر از کانی‌های سیلیکاتی مثل آمفیبول و پلاژیوکلازهای غنی از کلسیم و در نهایت سنگ‌های فلسیک و اسیدی به وجود می‌آیند. اما در طی تبلور ماگمای کالک‌آلکال مسیر عادی تبلور ماگما عوض خواهد شد به صورتی که به دلیل بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در طی تبلور ماگما، کانی‌های اکسیدی آهن‌دار به جای سیلیکات‌های آهن‌دار تشکیل و مسیر تبلور ماگما تغییر می‌یابد (Mason and Moore, 1966). در ماگمای تولیتی نیز در مراحل آخر تبلور ماگما که ماگما به سطح نزدیک است و به دلیل بالا رفتن فوگاسیته اکسیژن، مگنتیت و تیتانومگنتیت شروع به تبلور کرده و به صورت بلورهای دانه ریز متبلور می‌شوند. ابتدا کانی‌های اکسیدی مانند تیتانومگنتیت تشکیل می‌شوند سپس مگنتیت و ایلمنیت به صورت تداخلی رشد می‌کنند (Wechsler et al., 1984). در نمونه‌های

حرارت‌های پایین‌تر، به دلیل پایین آمدن قابلیت انحلال، مقدار تیتانیم در مگنتیت پایین می‌آید. بنابراین تیتانیم در نقایص بلوری و شکستگی‌ها رها و محلول جامدهایی مانند ایلمنیت را تشکیل می‌دهد (Craig and Vaughan, 1994). در تمام نمونه‌های مورد مطالعه، ایلمنیت به صورت محلول جامد با مگنتیت مشاهده می‌شود یعنی شرایط تشکیل آن با مگنتیت مشابه بوده است (در واقع پاراژنز یکدیگر به شمار می‌آیند).

مورد مطالعه، ایلمنیت به صورت تیغه‌های محلول جامد در مگنتیت قرار گرفته است. با توجه به اینکه جایگزینی عناصر در محلول‌های جامد تا یک مقدار خاص انجام می‌گیرد لذا جایگزینی تیتانیم به جای آهن نیز تا یک مقدار معین انجام می‌شود (Mason and Moore, 1966). بنابراین در طی تبلور ماگما و تشکیل بلورهای تیتانومگنتیت در درجه حرارت‌های بالا، تیتانیم به مقدار بیشتری در مگنتیت جای می‌گیرد. در درجه



شکل ۱۷- الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از اکسلوشن‌های ایلمنیت در مگنتیت؛ ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی تیتانومگنتیت و مگنتیت.

۶۰۰°C فازهای ایلمنیت و مگنتیت به صورت تیغه‌های محلول جامد از یکدیگر تفکیک و در عین حال از فاز تیتانومگنتیت جدا می‌گردند. با تداوم تبلور تیتانیم و وانادیم در سنگ‌های گابرویی وارد فازهای ایلمنیتی و تیتانومگنتیتی می‌شوند.

۳-۴. بررسی آنالیزهای EPMA کانی‌های سنگین در گابرو

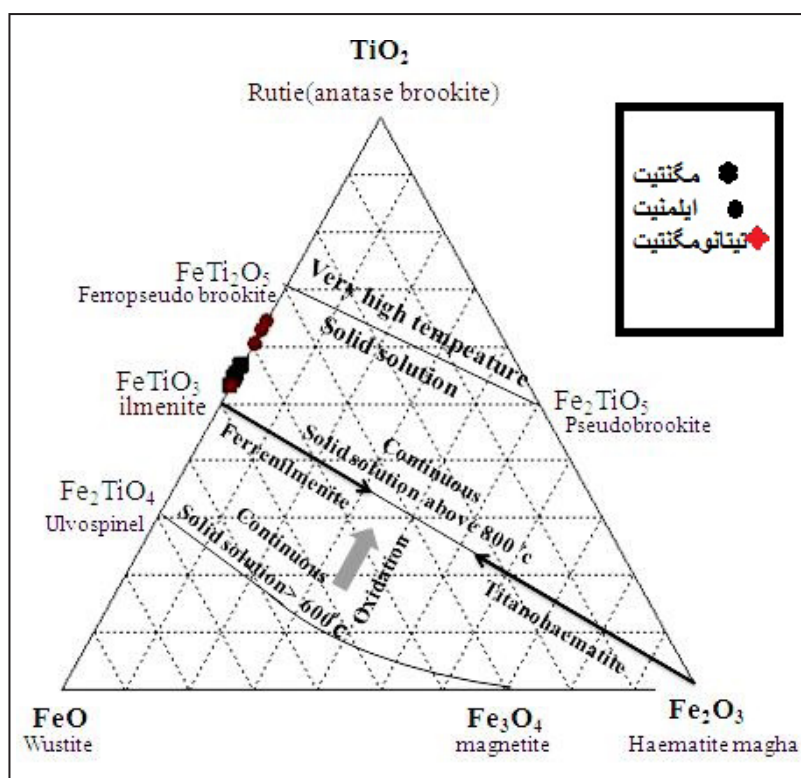
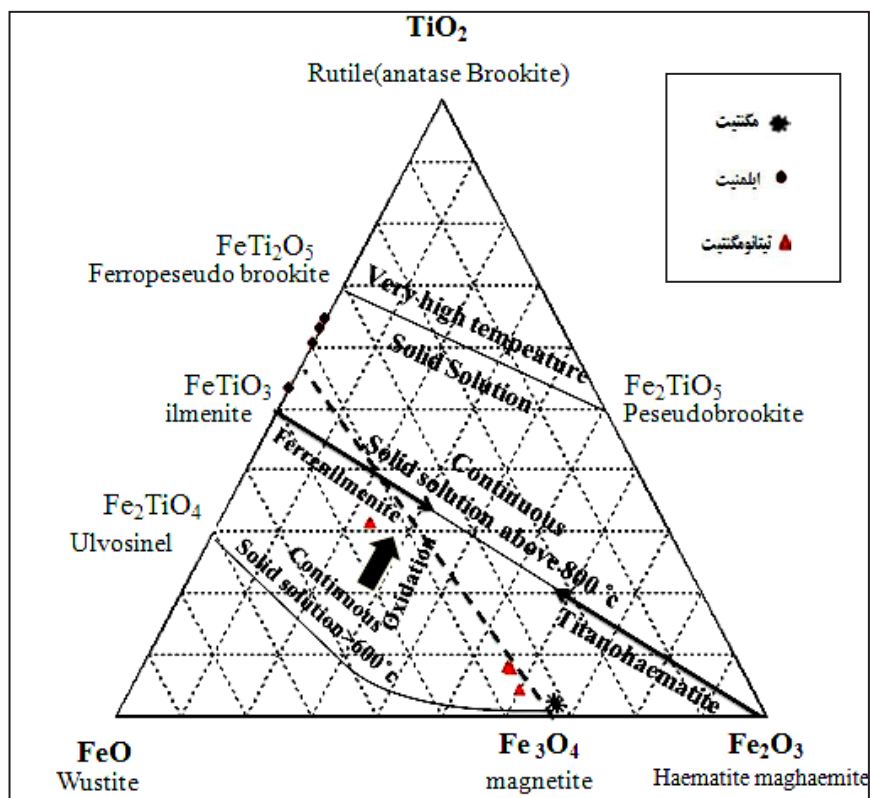
به منظور تعیین ارتباط بین کانی‌های سنگین و سنگ منشأ احتمالی، از کانی‌های موجود در اجزای گابرویی درون کنگلومراهای منطقه عطائیه، آنالیز به عمل آمد. مطالعات قبلی انجام شده بر روی این منطقه گواه بر این بود که منشأ اولیه این کانی‌های سنگین، سکانس‌های افیولیتی بوده است (Razmara, 2010). در این بخش سعی شده تا با استفاده از آنالیزهای میکروسکوپ‌های الکترونی به ارتباط بین این کانی‌های سنگین و منشأ آن در افیولیت‌ها پی برده شود. هر چند که چندین کیلومتر فاصله بین افیولیت‌ها تا منطقه مورد مطالعه وجود دارد. در مطالعات میکروسکوپ الکترونی (SEM)، بیشتر واحدهای اولترامافیک مد نظر قرار گرفتند اما برای تعیین دقیق منشأ کانی‌های سنگین در افیولیت‌ها از ریز کاوشگر الکترونی (EPMA) نیز استفاده شد. از واحدهای گابرویی آنالیز بیشتری به عمل آمد تا ارتباط این واحدها با واحدهای پلاسری مشخص شود. برای انتخاب نمونه‌های مورد آنالیز ابتدا سعی شد تا با استفاده از مطالعات میکروسکوپ‌های نوری، نمونه‌های مناسب انتخاب شود تا نتیجه‌گیری بهتری صورت گیرد. مطالعات EPMA نشان داد که مقادیر قابل توجهی از کانی‌های تیتانومگنتیت و ایلمنیت در نمونه‌ها وجود دارند. بدلیل ریز بودن کانی‌های تیتانومگنتیت موجود در نمونه‌های انتخاب شده، انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر روی این کانی‌ها مشکل بود. کانی‌های ایلمنیت برای انجام آزمایشات EPMA مناسب‌تر هستند به همین لحاظ از این کانی‌ها برای انجام مطالعات ژئوشیمی کانیایی و انطباق نتایج آن با نتایج داده‌های به دست آمده از ژئوشیمی کانی‌های سنگین در واحدهای پلاسری استفاده شد. کانی‌های آهن و تیتان دار در نمونه‌های گابرویی شامل ایلمنیت، مگنتیت و تیتانومگنتیت است. کانی‌های مذکور اکسیدهای غالب در منطقه هستند و در تمامی مناطق مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. نتایج آنالیز نقطه‌ای این نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. لازم به ذکر است که به دلیل ریز بودن تیتانومگنتیت، امکان آنالیز نقطه‌ای از آن وجود نداشت و طیف‌های EDS مربوط به آن تهیه شد.

در جدول ۱ آنالیزهای مربوط به پلاسره‌های مگنتیت، تیتانومگنتیت و ایلمنیت نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود TiO_2 و V_2O_5 در ایلمنیت بیشترین مقدار را دارا می‌باشند ولی در مگنتیت کمترین مقدار را دارند. Cr_2O_3 نیز بیشترین مقدار را در کانی تیتانومگنتیت دارا می‌باشد. لازم به ذکر است جدایش FeO و Fe_2O_3 توسط روش استوکیومتری از طریق محاسبه FeO_4 اسپینل‌ها توسط نرم‌افزار انجام شده است. نمودار سه تایی سیستم جامد $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ ترکیبات اکسیدی $\text{Fe}-\text{Ti}$ را نشان می‌دهد (شکل ۱۸) که نمونه‌های مگنتیت، ایلمنیت و تیتانومگنتیت منطقه مورد مطالعه در آن نشان داده شده است. همانطوری که از نمودار شکل ۱۸ دیده می‌شود نمونه‌های ایلمنیت منطقه، در محدوده بین ایلمنیت و فرو پزدوبروکیت قرار گرفته است که محلول جامد بین این دو کانی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ایلمنیتی معمولاً بر روی محدوده ایلمنیت قرار می‌گیرند در ایلمنیت‌های منطقه مورد مطالعه به دلیل بالا بودن مقدار تیتانیم، در محدوده بین ایلمنیت و فرو پزدوبروکیت یعنی بالاتر از خط انحلال جامد جای گرفته‌اند. گرچه نمونه‌های مگنتیت در نزدیکی محل مگنتیت قرار گرفته ولی به دلیل داشتن مقداری Ti در داخل شبکه بلوری، کمی از خط هماتیت-وستیت فاصله گرفته است. در نمودار (Dunlop and Ozdemir, 1997) و (Broska et al., 2003) در شکل ۱۹ مشخص است که تیتانومگنتیت‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده تیتانومگنتیت و در نزدیکی خط تیتانومگنتیت قرار گرفته‌اند. اگر خطی از نمونه‌های مگنتیتی به نمونه‌های ایلمنیتی وصل شود ارتباط بین ایلمنیت و مگنتیت مشخص می‌شود که نشان‌دهنده محلول جامد بین این دو می‌باشد. با مشخص کردن نمونه‌های تیتانومگنتیت در نمودار، محلول جامد بین مگنتیت و ایلمنیت معلوم می‌شود. ایلمنیت‌ها به دلیل پایین آمدن درجه حرارت و همچنین بالا بودن مقدار Ti به صورت تیغه‌های محلول جامد از ترکیب محلول جامد جدا شده و در محدوده بین ایلمنیت و فرو پزدوبروکیت قرار گرفته‌اند که باز هم نشان‌دهنده بالا بودن مقدار Ti در ماگمای اولیه است. در طی تبلور ماده مذاب در درجه حرارت‌های بالا، ابتدا محلول جامد کاملی بین تیتانومگنتیت و ایلمنیت در بالاتر از ۸۰۰°C تشکیل می‌شود که با کاهش دما و پیشرفت تفریق در بالاتر از

واحدهای پلاستی، گابروهای موجود در افیولیت‌ها می‌باشند. در شکل ۱۹ آنالیزهای EPMA کانی‌های ایلمنیت واحدهای پلاستی با رنگ قرمز و کانی‌های ایلمنیت واحدهای گابرویی با رنگ سیاه مشخص شده‌اند. با توجه به شکل ۱۹ مشخص می‌شود که محل قرار گرفتن ایلمنیت‌های واحد پلاستی و ایلمنیت‌های واحد گابرویی مشابه است و می‌توان نتیجه گرفت که منشأ تیتانومگنتیت‌ها و ایلمنیت‌های واحدهای پلاستی، گابروها می‌باشند.

همانطور که در بررسی ایلمنیت‌های واحدهای پلاستی توضیح داده شد، محل قرار گرفتن آنالیز این کانی‌ها در نمودار سه تایی TiO_2 - FeO - Fe_2O_3 در حدواسط بین ایلمنیت و فروپسیدوبروکیت قرار می‌گیرد. با قرار دادن آنالیز ایلمنیت‌های مربوط به واحدهای گابرویی نتایج جالبی به دست می‌آید که نشان می‌دهد محل قرار گرفتن ایلمنیت‌های واحد پلاستی و ایلمنیت‌های واحد گابرویی مشابه است. با توجه به این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که منشأ تیتانومگنتیت‌ها، مگنتیت‌ها و ایلمنیت‌های

شکل ۱۸ - نمودار سه تایی سیستم جامد FeO - Fe_2O_3 - TiO_2 که خطوط اتصالی انحلال جامد بین کانی‌های مگنتیت ایلمنیت، مگنتیت - الواسپینل، پزدوبروکیت و فروپزدوبروکیت را نشان می‌دهد (modified after Buddington and Lindsley 1964.) (Broska et al, 2003)



شکل ۱۹ - نمودار سه تایی FeO - Fe_2O_3 - TiO_2 محل پلات شدن آنالیزهای EPMA کانی‌های ایلمنیت واحدهای پلاستی (بارنگ قرمز) و کانی‌های ایلمنیت واحدهای گابرویی (بارنگ سیاه).

جدول ۱ - نتایج آنالیز نقطه‌ای مایکروپروپ مگنتیت، تیتانومگنتیت و ایلمنیت‌های پلاسمای منطقه عطائیه کاشمر.

Sample	Mag 1.1	Mag 1.3	Tmag 1.1	Tmag 2.1	Tmag 5.1	Tmag 6.1	Ilm 6.1	Ilm 7.1	Ilm 8.1	Ilm 9.1
SiO ₂	0.16	0.12	0.11	0.34	0.41	0.42	0.04	0.12	0.13	0.13
TiO ₂	1.67	2.13	6.69	6.38	3.7	25.75	51.09	53.69	48.61	42.67
Al ₂ O ₃	3.90	4.31	4.5	4.67	0.72	1.68	0.19	0.43	0.22	0.44
V ₂ O ₅	0.65	0.58	0.57	0.67	0.8	1.58	2.47	2.62	2.57	2.32
Fe ₂ O ₃	59.90	58.65	48.32	49.28	56.21	19.49	0	0	0	0
FeO	27.96	28.00	30.86	30.14	33.86	37.84	33.4	29.74	28.74	37.65
MnO	0	0.38	0.5	0.62	0.93	1.13	2.61	1.56	1.29	1.69
MgO	3.81	3.84	4.46	4.73	0.45	9.89	8.84	9.86	16.4	14.17
Cr ₂ O ₃	0.35	0.36	1.71	1.68	1.56	0.74	0.18	0.14	0.15	0.24
Total	98.35	98.38	97.72	99.11	98.64	98.52	98.82	98.16	98.11	99.31

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای اکسیدهای Fe-Ti گابروهای منطقه عطائیه.

	1.1	2.1	3.1	4.1	2.1	3.1	4.1
SiO ₂	0.21	0.15	0.27	0.28	0.16	0.48	0.2
TiO ₂	48.85	51.75	51.98	50.45	46.26	47.94	47.39
Al ₂ O ₃	0.1	0.08	0.09	-	-	-	-
FeO	40.57	43.61	44.49	44.47	37.42	36.39	36.35
V ₂ O ₅	2.13	2.48	2.39	2.31	2.28	2.27	2.32
MnO	8.81	-	-	0.74	13.24	11.21	12.22
MgO	-	-	-	-	0.09	0.08	0.08
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.24	0.1	0.35
Total	100.57	98.02	99.13	98.25	99.79	98.55	99.18

۴- نتیجه‌گیری

که محل قرار گرفتن ایلمنیت‌های واحد پلاسمای و ایلمنیت‌های واحد گابرویی مشابه است. با توجه به این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که منشأ تیتانومگنتیت‌ها و ایلمنیت‌های واحدهای پلاسمای، گابروها می‌باشند.

- مطالعات EPMA نشان داد که بین مقادیر V، Ti و Mn رابطه مستقیم وجود دارد اما Ti با Cr روند معکوسی را نشان می‌دهند.

- مطالعات میکروسکوپ‌های الکترونی نشان داد که منشأ اصلی آهن و تیتان واحد پلاسمای از گابروها می‌باشد.

- در طی تبلور ماده مذاب در درجه حرارت‌های بالا، ابتدا محلول جامد کاملی بین تیتانومگنتیت و ایلمنیت در بالاتر از ۸۰۰ °C تشکیل می‌شود که با کاهش دما و پیشرفت تفریق در بالاتر از ۶۰۰ °C فازهای ایلمنیت و مگنتیت به صورت تیغه‌های محلول جامد از یکدیگر تفکیک و در عین حال از فاز تیتانومگنتیت جدا می‌گردند. در سنگ‌های گابرویی با تداوم تبلور، تیتانیم و وانادیم وارد فازهای ایلمنیتی و تیتانومگنتیتی می‌شوند.

بر اساس بررسی‌های کاننگاری و تجزیه‌های انجام شده که برای نخستین بار با روش SEM-EDX و EPMA بر روی کانسار پلاسمای تیتانومگنتیت عطائیه انجام گردید می‌توان نتایج زیر را به اختصار مطرح نمود:

- آنالیزهای به عمل آمده از کانی‌های گروه اسپینل در سنگ‌های الترامافیکی و سریانتیت‌های حاوی رگچه‌های آهن مشخص نمود که Ti در این کانی‌ها اندک می‌باشد.

- آنالیزهای به عمل آمده بر روی نمونه‌های پریدوتیتی از طریق میکروسکوپ الکترونی SEM نشان می‌دهد که دو نوع اسپینل در پریدوتیت‌ها وجود دارد: ۱-

اسپینل‌های Fe، Al، Mg، Cr و بالا و ۲- اسپینل‌های غنی از Cr و Fe.

- مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM بر روی اسپینل‌ها در سنگ‌های پریدوتیتی مشخص نمود که این کانی‌ها بیشتر از نوع آلومینیم بالا هستند و نشان‌دهنده درجه ذوب پایین گشته می‌باشند.

- با پلات کردن آنالیز ایلمنیت‌های مربوط به واحدهای گابرویی مشخص گردید

کتابنگاری

افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۰ - تفکیک بخش‌های مختلف ایران از لحاظ وضعیت ساختاری در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت ایران، شماره ۸۲.

References

- Broska, I., Uher, P. and Ondrejka, M., 2003- Geochemical and mineralogical characterization of the Fe-Ti oxide paragenesis in the magmatic and hydrothermal systems. Slovak Academy of Sciences. Web page: geol.sav.sk.
- Buddington, A. F. and Lindsley, D. H., 1964- Iron-Titanium oxide minerals and synthetic equivalents. J. petrol. 5, 310-357 pp.
- Craig, J. R. and Vaughan, D., 1994- Ore microscopy and ore petrography. 2nd edition. John Wiley and Sons, press. pp 434.
- Dunlop, D. J. and Özdemir, O., 1997- Effect of crystal defects and internal stress on the domain structure and magnetic properties of magnetite. Geophys. Res. 102. 20211-20224 pp.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A., 1971- A guide chemical classification of common volcanic rocks. Canadian journal of earth sciences 8, 523-547 p.
- Mason, B. and Moore, B., 1966- Principles of Geochemistry, 3rd edition, 329 p.
- Razmara, M., 2010- Petrology, geochemistry and Ti-Fe – vanadium oxide mineralization in the NW of Rivash area. The first international applied geological congress.
- Wechsler, B. A., Lindsley, D. H. and Prewitt, C. T., 1984- Crystal structure and cation distribution in titanomagnetite, American Mineralogist, Volume 69, pages 754-770.

Identification of the origin of Ataieh vanadium bearing titanomagnetite minerals in southwest Mashhad by XRM, SEM and EPMA methods

B. Hajalilou¹, M. Razmara^{2*} and N. Hajalilou³

¹Associate Professor, Department of Geology, Payam Noor University, Tabriz, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

³M.Sc., Department of Geology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017 August 28

Accepted: 2018 April 29

Abstract

The placer ore deposit of Ataieh is located southwest of Mashhad and northeast of central Iranian microplate. Mineralogical studies showed that in VTM (vanadium bearing titanomagnetite) placer ore deposit, magnetite, titanomagnetite, hematite and ilmenite have the highest values, respectively. Petrographical studies also showed that gabbroic and ultramafic units have the highest amounts of ore minerals. The EPMA, EDS-SEM and XRM studies of placer ore deposit and its source rock have shown interesting results. Electron microscopy (SEM) studies demonstrated that although the ophiolite sequence is the source of the deposit, during the crystallization of molten material at high temperatures, a complete solid solution was first formed between titanomagnetite and ilmenite above 1100 °C, and by decreasing temperature and progress in fractional differentiation (up 600 °C), the ilmenite and magnetite phases are segregates from each other in the form of exsolution blades and at the same time are separated from the titanomagnetite phase. In gabbroic rocks, with the continuation of crystallization, titanium and vanadium enter the ilmenite and titanomagnetic phases. EPMA analyses on gabbro units showed that these units were the source of Ti and V for placer units.

Keywords: VTM, Vanadium- bearing titanomagnetite, XRM ,SEM, EPMA, Ataieih.

For Persian Version see pages 53 to 64

*Corresponding author: M. Razmara; E-mail: razmaramorteza@gmail.com.