

بررسی ترکیب شیمیایی و مینرال شیمی مگنتیت اسکارن آهن خاک سرخ، باختر یزد، کلید اکتشافات ژئوشیمیایی منطقه‌ای

ساسان ملکی^۱، علی اصغر کلاگری^۲، کمال سیاه چشم^۳ و سعید علیرضایی^۴

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۴دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۲۰

چکیده

کانسار آهن خاک‌سرخ در باختر شهرستان ندوشن در استان یزد قرار گرفته است. سنگ میزبان کانه‌زایی، واحدهای آهنکی و سنگ آهک دولومیتی شده تریاس بالایی-ژوراسیک است که مورد نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن قرار گرفته‌اند. کانی‌زایی آهن شامل مگنتیت بوده و سرپانتین باطله اصلی کانسنگ است. کانی‌های پهنه اسکارن عبارتند از دیوپسید، گارنت، ترمولیت، سرپانتین، فلوگوپیت و اپیدوت. شاخص‌های کانی‌زایی در این منطقه عبارتند از وجود سرپانتین به عنوان کانی باطله اصلی، وجود واحدهای ماسه‌سنگ هورنفلسی میان توده‌های نفوذی و واحدهای سنگ‌آهک اسکارنی شده، وجود سولفیدهای Fe-Ni-Co-As، بالا بودن مقادیر Mn و Co، As، Zn در نتایج تجزیه شیمیایی مگنتیت و روندهای افزایش عبار Fe و کاهش میزان Mg مگنتیت در نتایج مینرال شیمی هم در مقیاس بلوری و هم در مقیاس کانسار. بر پایه ترکیب عناصر اصلی و جزئی وجود دو نسل مگنتیت مشهود بوده و ترکیب مگنتیت افزایش Fe و کاهش Al، Mg و Ti را تحت تأثیر فرایندهای تعادل دوباره نشان می‌دهد. نتایج داده‌های ژئوشیمی به خوبی با شاخص‌های مگنتیت تپ گرمایی و اسکارن مطابقت دارد، از جمله مقادیر پایین Cr (کمتر از ۱۰ ppm)، مقادیر بالای Mg (۲/۲ تا ۷/۵ درصد)، مقادیر پایین TiO₂ (۰/۱ تا ۰/۳ درصد)، مقادیر پایین و کمتر از حد تشخیص دستگاهی عناصر ناسازگار در ساختار مگنتیت، مانند Ag (کمتر از ۱ ppm)، Mo (کمتر از ۱ ppm) و Na (کمتر از ۰/۱ درصد)، و همبستگی مثبت آشکار بین Al و V در ترکیب مگنتیت. نمودارهای نسبت (wt% Ca+Al+Mn)/(wt% Ti+V) و نسبت TiO₂/V₂O₅ برای داده‌های ژئوشیمی تأیید می‌کنند که کانه‌زایی در این محدوده از نوع کانسارهای اسکارنی است.

کلیدواژه‌ها: اسکارن آهن، مگنتیت، مینرال شیمی، خاک سرخ، یزد

*نویسنده مسئول: ساسان ملکی

E-mail: sasan.maleki@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

پهنه ارومیه- دختر میزبان انواعی از کانسارهای مربوط به کمان‌های ماگمایی است؛ مانند مس- طلا- مولیبدن پورفیری، اسکارن‌های فلزات پایه و کانسارهای رگه‌ای فلزات پایه و گرانپها. مطالعات پیشین در این پهنه بیشتر بر بخش جنوبی این کمان، موسوم به کمر بند مس کرمان (Shahabpour and Kramer, 1987; Hassanzadeh, 1993; Shafeie et al., 2008) و ادامه شمال باختری آن موسوم به کمر بند فلززایی ارسباران (Jamali et al., 2009; Hassanpour et al., 2015; Hajalilou and Aghazadeh, 2016) تمرکز داشته و بخش‌های مرکزی آن کمتر بررسی شده است. بخش میانی کمر بند ارومیه- دختر که بخش‌هایی از استان‌های اصفهان و یزد را فرامی‌گیرد از دید کانی‌سازی فلزی اهمیت زیادی دارد. پهنه باختر یزد میزبان ذخایر مس نوع پورفیری و نیز ذخایر اسکارنی است. برای نمونه‌هایی از این ذخایر می‌توان به کانسارهای پورفیری علی‌آباد و دره زرشک (Zarasvandi et al., 2005)، اسکارن آهن پناه‌کوه (زاهدی و بومری، ۱۳۹۲ ب)، اسکارن مس و آهن خوت (زاهدی و بومری، ۱۳۹۲ الف؛ Zahedi et al., 2014)، اسکارن مس زرو (مکی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶)، اسکارن مس خوت (Zahedi et al., 2014) و سرب و روی دارای میزبان رسوبی مانند دره زنجیر، منصورآباد و فرح‌آباد (Rajabi et al., 2015) مغفوری و همکاران، (۱۳۹۵) اشاره کرد (شکل ۱). توده‌های نفوذی مولد کانه‌زایی اسکارن در باختر یزد از نوع کمان ماگمایی نوع I با ماهیت کالک‌آلکال و سن الیگومیوسن معرفی شده‌اند (شریفی، ۱۳۸۷؛ قلمقاش و همکاران، ۱۳۸۲). محدوده خاک سرخ در ۴۲ کیلومتری جنوب باختر شهرستان ندوشن در باختر شهرستان یزد قرار گرفته است. این محدوده و پیرامون آن با گسترش واحدهای سنگ‌آهک، سنگ‌آهک دولومیتی و شیل مزوزوییک و توده‌های نفوذی سنوزوییک مشخص می‌شود. نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی در شمال محدوده خاک سرخ سبب تبدیل واحدهای رسوبی

به هورنفلس و اسکارن شده است. تأثیر عوامل ساختاری بر کانه‌زایی به صورت مرزهای همراه با خردشدگی میان رگه‌های مگنتیت و بخش‌های هورنفلسی، ایجاد برش در سنگ‌های میزبان و بخش‌های کانه‌دار دیده می‌شود. کارهای اکتشافی انجام شده در محدوده خاک سرخ عبارتند از تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ (بنی آدم، ۱۳۹۲)، نقشه انجام عملیات ژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی در شبکه‌ای با ابعاد ۱۰*۱۰ متر در مساحت حدود ۱۲۰ هکتار (جوادی‌پور و راکی، ۱۳۹۱) و حفر ۱۵ گمانه با متراژ کلی حدود ۶۰۰ متر روی بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی. مگنتیت میزبان عناصر جزئی مانند Mn, Al, Ti, V, Si, Ca است و بررسی این عناصر کمک شایانی به درک فرایندهای کانه‌زایی می‌کند (Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2012). همچنین این عناصر در تفکیک نسل‌های مختلف کانه‌زایی مگنتیت در یک کانسار مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Muller et al., 2003; Dare et al., 2012). در این پژوهش از دو روش تجزیه کلی (bulk analysis) و تجزیه ریزکاواکترونی برای بررسی تغییرات عناصر اصلی و جزئی (trace) رگه‌های مگنتیت و بررسی تغییرات کانی‌ها و پاراژنز استفاده شده است. همچنین سعی شده است تا با تعیین فراوانی عناصر مرتبط با کانی‌زایی، ردیاب‌های احتمالی برای این نوع کانی‌زایی برای بررسی‌های ناحیه‌ای پیشنهاد شود.

۲- روش مطالعه

در این بررسی ۷۰ نمونه از مغزه‌های حفاری و رخنمون‌های سطحی برداشت شد. پس از مطالعات میکروسکوپی، ۱۰ نمونه معرف از کانه مگنتیت برای تجزیه ریزکاواکترونی انتخاب و نمونه‌های ریزکاواکترونی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی کرج و دانشکده علوم زمین دانشگاه اسلو تجزیه شدند. تجزیه ریزکاواکترونی نمونه‌ها در هر دو آزمایشگاه با استفاده از دستگاه

در کنار سنگ‌های منسوب به پالئوزویک نمایان هستند. انباشته‌های تخریبی کراتاسه آغازی - سازند سنگستان به گونه همشیب و ناپیوسته روی سازند شمشک جای دارند. گسل دهشیر به عنوان مهم‌ترین گسل موجود در منطقه و گسل‌های موازی آن یک پهنه برشی راست‌بر در بخش شمال خاوری نقشه پدید آورده‌اند و در مجاورت آن رخنمون محدودی از آمیزه افیولیتی مربوط به مجموعه افیولیتی ناین- بافت با مرزهای گسلی نمایان است (قلمقاش و همکاران، ۱۳۸۲). ولی در منطقه خاک سرخ رخنمونی از این واحدها به چشم نمی‌خورد.

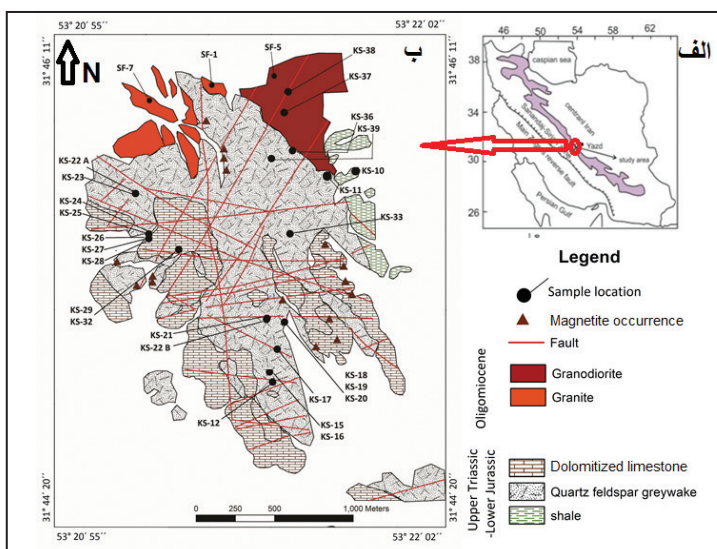
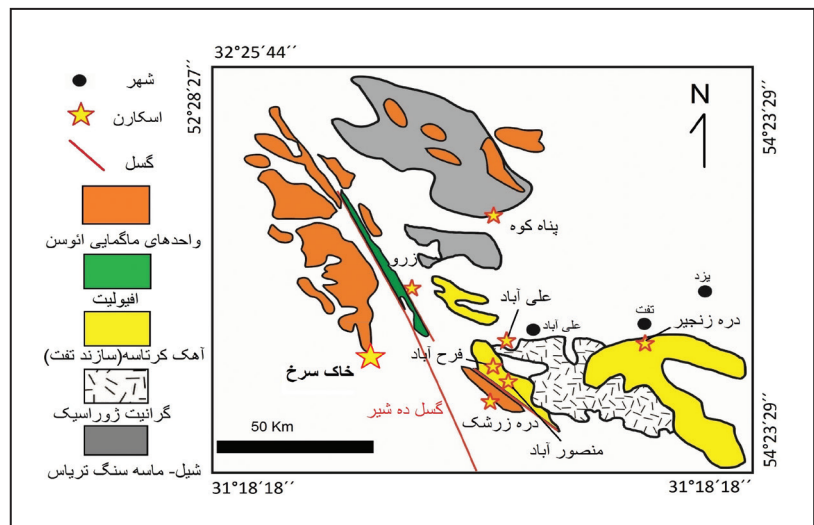
رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده را می‌توان بر پایه نقشه زمین‌شناسی محلی (نقشه ۱:۵۰۰۰) به دو دسته کلی تقسیم کرد: (۱) واحدهای رسوبی شامل سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ گری‌وکی از کراتاسه و شیل‌های تریاس بالایی؛ (۲) واحدهای نفوذی با ترکیب گرانیته تا گرانودیوریت به سن الیگومیوسن (شکل ۲). جایگیری توده‌های گرانیته‌ی سبب دگرگونی و متاسوماتیسم واحدهای رسوبی به صورت هورنفلسی‌شدن بخش گری‌وک و اسکارنی شدن بخش‌های آهکی شده است. کانی‌زایی بیشتر در سنگ آهک دولومیتی که اسکارنی شده و به مقدار کمتر به صورت عدسی‌های مگنتیت در گری‌وک هورنفلسی دیده می‌شود (شکل ۳). مجموعه کانی‌های همراه با مگنتیت شامل سرپانتین، دیوپسید، گارنت، تالک، ترمولیت، فلوگوپیت و اپیدوت و چیره بودن سرپانتین به عنوان باطله اصلی، نشانگر چیرگی رخداد متاسوماتیسم منیزیمی در محدوده است.

CAMECA SX100 صورت گرفت. در این روش تجزیه از قطر پرتو در حد ۵ تا ۲ میکرون، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلووات و زمان شمارش ۶۰ ثانیه برای هر عنصر و در مجموع ۵۴ نقطه روی مگنتیت تجزیه شد. همچنین ۷ نمونه از مغزه‌های حفاری پس از خردایش و جداسازی مگنتیت به روش‌های مغناطیسی (Frantz separator) و کانی سنگین، به روش ICP-AES در آزمایشگاه مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی کرج تجزیه شدند. به دلیل تمرکز این نوشتار روی شیمی مگنتیت داده‌های مربوط به دیگر کانی‌ها ارائه و بررسی نشد.

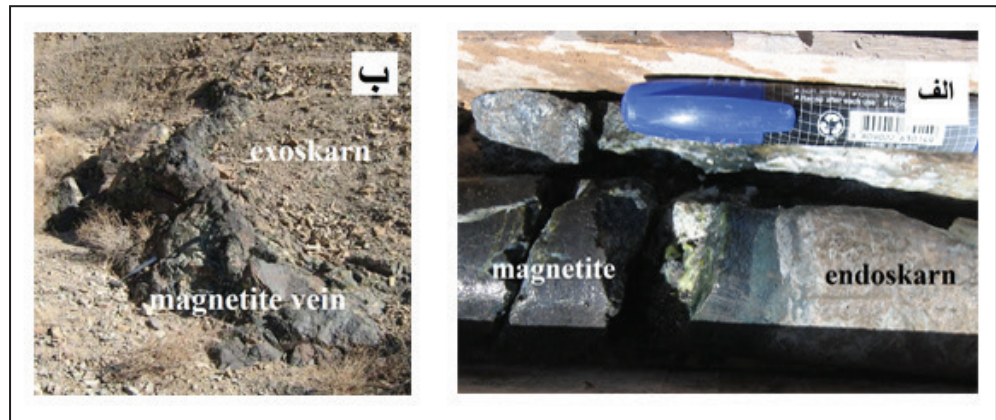
۳- زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه

محدوده خاک سرخ در محدوده جغرافیایی میان طول‌های ۵۳°۲۲'۵۰" تا ۳۱°۴۴'۴۵" شمالی و در باختر شهر یزد جای گرفته است. این محدوده در بخش شمال خاوری چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ کفه تاقستان قرار دارد. در برکه کفه تاقستان رخنمون‌های ارومیه- دختر از شمال خاوری تا جنوب برکه امتداد دارند. در این رخنمون‌ها سنگ‌های نفوذی الیگوسن- میوسن با سنگ‌های آتشفشانی همین زمان و توده‌های نیمه‌ژرف پلیوسن با حجم کمتر در کنار واحدهای ائوسن جای دارند. کهن‌ترین سنگ‌های موجود در نقشه، کوارتزآرنایت‌های مربوط به پرمین هستند که با روابط گسلی در منطقه میانی دو پهنه ارومیه- دختر و سندج- سیرجان رخنمون دارند. هرچند واحدهای سنگی تریاس آغازی در منطقه بروزند ندارند؛ ولی در منطقه میانی دو پهنه، رسوبات سازند شمشک به گونه گسلی

شکل ۱- نقشه ساده شده زمین‌شناسی ناحیه‌ای به همراه موقعیت محدوده‌های اسکارن و سرب و روی کربناته در باختر یزد.



شکل ۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه روی پهنه ارومیه- دختر (اصلاح شده پس از Stocklin and Nabavi, 1973؛ گوشه سمت راست) و نقشه زمین‌شناسی منطقه در مقیاس ۱:۵۰۰۰ (اصلاح شده پس از بنی‌آدم، ۱۳۹۲) همراه با موقعیت نمونه‌های سطحی برداشت شده.



شکل ۳- تصاویر اشکال مختلف کانه‌زایی مگنتیت در رخنمون‌ها و نمونه‌های حفاری. الف) مرز میان رگه مگنتیت و بخش درون اسکارن؛ ب) رخنمون رگه مگنتیت در بخش برون اسکارن.

ژوراسیک پایینی موجب ایجاد پدیده‌های تبلور دوباره بخش‌های آهنی، اسکارنی شدن و تشکیل کانه آهن در محدوده خاک سرخ شده است.

مجموعه کانی‌های سیلیکات بدون آب (پیروکسن و گارنت)، کانی‌های آبدار (فلوگوپیت، اپیدوت، اکتینولایت)، کانی‌های دگرسانی تأخیری (کلسیت و کوارتز) و وجود سرپانتین به عنوان باطله اصلی همراه با مگنتیت، شواهد وجود اسکارن منیزی در منطقه هستند. تشکیل اسکارن در سه مرحله رخ داده است. مرحله پیش‌رونده که به طور چیره شامل کانی‌های پیروکسن و گارنت است. کانی‌های این مرحله در دو مجموعه پیروکسن-گارنت اسکارن و گارنت اسکارن دیده می‌شوند. این مرحله به طور معمول در دماهای حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود (Einaudi et al., 1981).

ترکیب پیروکسن شامل تغییرات ۸۳ تا ۹۹/۴ درصد دیوپسید، ۰/۴ تا ۱۶/۷ درصد هیدنبرژیت و ۰ تا ۰/۹ درصد ژوهانسیت است. ترکیب گارنت شامل تغییرات ۶۴/۷۸ تا ۱۰۰ درصد آندرادایت، ۰ تا ۳۴/۵۸ درصد گروسولاریت، ۰ تا ۴/۶۵ درصد پیروپ و ۰ تا ۰/۵۶ درصد اسپسارتین است. مرحله پس‌رونده شامل کانی‌های سرپانتین، فلوگوپیت، مگنتیت، اپیدوت است.

کانی‌های این مرحله به صورت جانشینی جزئی کلینوپيروکسن به وسیله اپیدوت، ترمولیت، کلسیت و جانشینی گارنت به وسیله اکسیدهای آهن، کوارتز و کلسیت در مناطق برون اسکارن دیده می‌شوند. به نظر می‌رسد که سرپانتین از جانشینی کانی‌های سیلیکات منیزیم‌دار (الیوین، دیوپسید) حاصل شده است. بلورهای باقیمانده الیوین درون اکسیدهای آهن در زمینه سرپانتینی شاهد رخداد این جانشینی در محدوده مورد مطالعه است. مگنتیت به صورت اولیه و ثانویه در دو نسل تشکیل شده و اختلاف آنها کاهش میزان منیزیم و افزایش عیار آهن مگنتیت‌های ثانویه است. حجم کانی‌های سولفیدی در این محدوده به طور کل پایین و محدود به وجود رگه‌های تأخیری پیریت، پیرویت و آرسنوپیریت است. هردو بخش درون اسکارن و برون اسکارن در این محدوده گسترش یافته و گسترش پهنه برون اسکارن بیشتر است. اپیدوتی شدن به صورت رگه‌های اپیدوت ± پیریت و اپیدوتی شدن در بخش درون اسکارن به ویژه در واحد گرانودیوریتی، دگرسانی‌های چیره هستند. از ویژگی‌های دگرسانی بخش درون اسکارن می‌توان به این موارد اشاره کرد: تبدیل کانی‌های مافییک به ترمولیت-اکتینولیت که میان آنها را بلورهای ریز اپیدوت-کلینوزویسیست همراه با کلسیت پر کرده است؛ کلریتی شدن بیوتیت‌های اولیه؛ تبدیل فلدسپارهای اولیه به مجموعه اپیدوت-کلینوزویسیست و گاهی آلپیت و وجود رگه‌های تأخیری اپیدوت که متن سنگ را قطع کرده‌اند.

جانشینی کانی‌های پیروکسن-گارنت و کانی‌های کدر به جای کانی‌های مافییک اولیه و مجموعه ترمولیت-اکتینولیت، کانی‌های کدر، سرسیت و مسکوویت به ترتیب کانی‌های مشخصه پهنه پیش‌رونده و پس‌رونده هستند. تنها موارد دیده شده از منطقه‌بندی نواحی درون اسکارن و برون اسکارن شامل تبدیل مجموعه کانی‌های

توده‌های نفوذی شامل گرانیت و گرانودیوریت در شمال محدوده رخنمون دارند. روابط قطع‌شدگی میان این واحدها در محدوده دیده نمی‌شود؛ ولی بر پایه کارهای ناحیه‌ای واحد گرانودیوریتی جوان‌تر است (قلعقاش و همکاران، ۱۳۸۲). واحد گرانودیوریتی بافت‌های پورفیری تا سریالی با زمینه ریزبلور (میکروکریستالین) کوارتز-فلدسپار دارد.

کانی‌های درشت بلور شامل پلاژیوکلاز، کوارتز و اورتوکلاز با فراوانی حدود ۵۰ درصد، بافت‌های خوشه‌ای و گلومروفیریک را به وجود آورده‌اند. اپیدوتی شدن کانی‌های پلاژیوکلاز و مافییک و آرژیلی شدن پلاژیوکلاز دگرسانی‌های چیره این واحد هستند. نام‌گذاری توده‌های گرانیتیویدی بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری صورت گرفته است. واحد گرانودیوریتی بافت‌های پورفیری تا سریالی با زمینه ریزبلور دارد و کانی‌های اصلی آن پلاژیوکلاز، کوارتز و اورتوکلاز هستند که در یک زمین‌دانه‌ریز کوارتز-فلدسپار جای دارند. این واحد حدود ۵۰ درصد درشت بلور دارد. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (با طول ۲ تا ۴ میلی‌متر) حدود ۴۰ درصد فراوانی دارند.

این درشت‌بلورها به صورت خوشه‌ای دیده می‌شوند و بافت گلومروفیریک را به وجود آورده‌اند. کوارتز به صورت درشت بلور کمتر از ۱۰ درصد فراوانی دارد، ولی در زمینه سنگ به صورت ریزبلور و همراه با ارتوز دیده می‌شود و نمی‌توان درصد دقیقی را برای آن تعیین کرد. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، ایلمنیت، مگنتیت و زیرکن کمتر از ۵ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند.

توده گرانیتی بافت‌های گرانولار و گرافیتی دارد. کانی‌های اصلی آن شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و بیوتیت هستند. آلکالی فلدسپار به صورت پرتیت و اورتوکلاز دیده می‌شود و پلاژیوکلازها بیشتر از نوع آلپیت-الیگوکلاز هستند.

بلورهای کوارتز با ارتوکلاز درهم‌رشدی دارند و بافت میرمیکتی را به وجود آورده‌اند. مقدار زمینه کمتر از ۱۰ درصد و بیشتر شامل بلورهای ریز کوارتز است. کانی‌های فرعی شامل مگنتیت، زیرکن و موناژیت است. تحت تأثیر سیال‌های گرمایی بیوتیت در حال تبدیل شدن به کلریت و معمولاً همراه با کانی‌های تیره است. دگرسانی در این توده بیشتر به صورت آرژیلی شدن در پلاژیوکلاز و کلریتی شدن در بیوتیت دیده می‌شود. توده‌های گرانیتیویدی در منطقه چاه ترش در شمال محدوده توسط یاجم و همکاران (۱۳۸۷) بررسی و به نوع متاآلمینوس سری I نسبت داده شده‌اند.

سن توده گرانودیوریتی و گرانیتی به روش ID-TIMS تعیین شد که به ترتیب سن $29/49 \pm 0/1$ و $30/049 \pm 0/058$ میلیون سال برای آنها به دست آمده است

(ملکی و همکاران، ۱۳۹۵-الف).

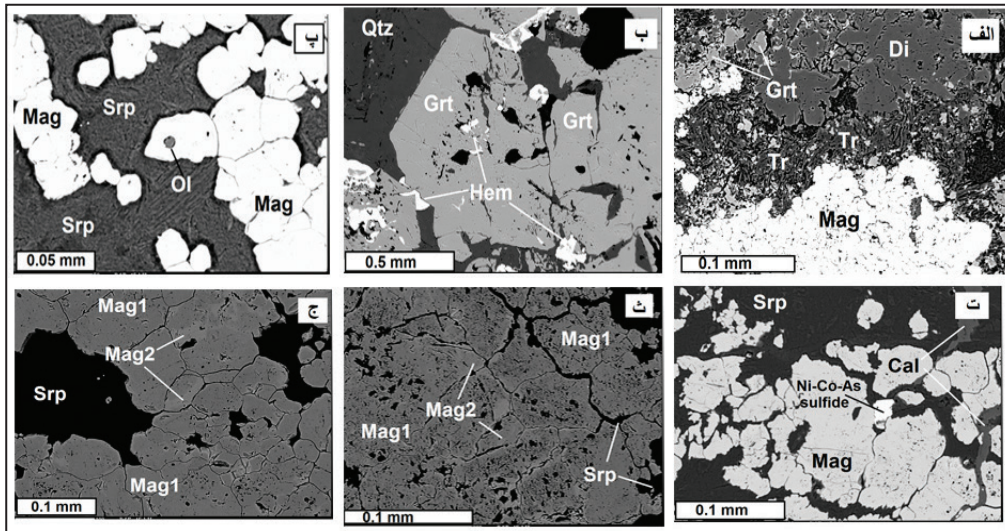
۴- سنگ‌شناسی اسکارن و کانه‌زایی

نفوذ توده‌های گرانیتیویدی البگوسن به درون واحدهای رسوبی تریاس بالایی -

۵- بحث و بررسی داده‌های مینرال شیمی و ژئوشیمی

در بررسی برای مطالعه رفتار توزیع عناصر گوناگون، نمونه‌های معرف مگنتیت از کانسار خاک سرخ مورد تجزیه ICP-AES و ریزکاوالکترونی قرار گرفتند. در بررسی ریزکاوالکترونی بخش‌های مختلف بلورهای مگنتیت برای بررسی وجود احتمالی نسل‌های مختلف و تغییرات ترکیب برای عناصر اصلی، جزئی و برخی عناصر کمیاب تجزیه شدند. سپس مقادیر سنسورد جایگزین و بهنجارسازی شد و برای بررسی روابط میان عناصر و مقایسه نتایج ICP-AES و ریزکاوالکترونی، تجزیه فاکتوری بر پایه ضرایب همبستگی به دست آمد (جدول ۱). نتایج ICP-AES و ریزکاوالکترونی به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

پیروکسن-گارنت پهنه پیشرونده در مناطق نزدیک به رخنمون‌های نفوذی به مجموعه‌های دگرسانی پسرونده شامل ترمولیت، اکتینولیت، سرپانتین، تالک و تبدیل شدن به واحدهای سنگ میزبان سنگ آهک متبلور و هورنفلس است. کانه‌زایی اصلی در محدوده خاک سرخ به صورت مگنتیت (بیشتر به صورت توده‌ای) و به مقدار کمتری هماتیت بوده و باطله اصلی آن سرپانتین است که افزایش آن عیار آهن را کاهش می‌دهد. کانی‌های فرعی همراه با کانی‌زایی عبارتند از سرپانتین، فلوگوپیت، اکتینولیت و آلیت (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵ ب) کانی‌های تأخیری شامل رگه‌های کوارتز و کلسیت کانه‌زایی مگنتیت هستند که کانی‌های مراحل پیشرونده و پسرونده را قطع کرده‌اند (شکل ۴). توالی پاراژنز کانی‌های اسکارن در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- تصاویر BSE نشان دهنده روابط بافتی و کانی‌های پاراژنز مگنتیت. الف) جانشینی دیوپسید به وسیله ترمولیت و درهم رشدی کانی‌های دیوپسید و گارنت در بخش پیشرونده. ب) جانشینی گارنت به وسیله کوارتز-مگنتیت. پ) ادخال الیون باقیمانده از سرپانتینی شدن در مگنتیت. ت) رگه کلسیت تأخیری که بلورهای مگنتیت را قطع کرده است به همراه کانی سولفید Ni-Co-As در بین بلورهای مگنتیت. ث و ج) جانشینی مگنتیت اولیه (Mag1) به وسیله مگنتیت ثانویه (Mag 2) در امتداد درز و شکاف ها (کلسیت = Ca، دیوپسید = Di، گارنت = Grt، مگنتیت = Mag، الیون = Ol، کوارتز = Qtz، سرپانتین = Srp، ترمولیت = Tr. Chl = chlorite. Ap = apatite, Cpx = clinopyroxene). علائم اختصاری کانی‌ها بعد از Kertz (1983)

	prograde		retrograde		ore stage	post ore
	early	late	early	late		
garnet	major					
pyroxene	major					
olivine	major					
tremolite			major	uncommonly		
chlorite			major			
biotite			major			
sericite			major			
calcite			major			
clinozoisite			major			
epidote			major			
sphene			major			
pyrite						major
chalcopryrite						major
serpentine			major			major
phlogopite			major			major
brucite			major			major
tourmaline			major			major
Hematite						major
malachite						major
magnetite			major			major
siderite			major			major
magnesite			major			major
quartz			major			major

شکل ۵- روابط پاراژنزی کانی‌ها و کانه‌ها در اسکارن خاک سرخ.

جدول ۱- نتایج تحلیل فاکتوری داده‌های میکروپروب و نتایج ICP-AES کانی مگنتیت.

Element (ppm)	Components of microprobe results				
	1	2	3	4	5
Mg	-۰/۳۵۷	-۰/۴۴۳	/۱۹۱	۰/۱۵۵	-۰/۷۰۵
Ca	۰/۰۵۵	۰/۰۱۵	۰/۸۹۴	۰/۲۸۳	۰/۱۵۴
Mn	-۰/۸۵۲	۰/۱۶۸	۰/۰۱۶	۰/۱۸۴	-۰/۰۹۶
Fe	۰/۲۴۷	۰/۳۶۴	-۰/۲۲۷	-۰/۲۲	۰/۷۶۲
S	-۰/۳۷۶	-۰/۱۱۱	۰/۱۶۳	۰/۱۸۳	۰/۷۰۳
Cu	۰/۲۳۲	۰/۷۲۱	۰/۱۰۲	۰/۰۹۵	۰/۰۹۸
Ni	۰/۷۹۶	۰/۲۴۸	-۰/۰۱۸	-۰/۱۰۸	-۰/۰۲۵
Zn	۰/۱۴۲	-۰/۰۱۴	-۰/۱۸۲	-۰/۸۳۲	-۰/۵۲
Pb	-۰/۳۷۰	-۰/۰۳۴	-۰/۰۲۵۴	۰/۸۳۱	-۰/۱۳۱
Ag	-۰/۰۶۰	۰/۸۳۲	-۰/۱۲	-۰/۳۳۶	۰/۱۰۱
Cd	-۰/۱۶	-۰/۲۴۹	-۰/۵۷	۰/۲۴۳	-۰/۳
Al	۰/۹۲۳	۰/۲۵	-۰/۰۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳
Si	۰/۲۸۱	۰/۷۹۹	۰/۱۶۷	۰/۱۵۸	۰/۱۳۴
Ti	۰/۹۳۶	۰/۲۵۶	-۰/۰۶۶	-۰/۰۲	۰/۰۳۸
P	-۰/۲۶۶	-۰/۰۳۴	۰/۸۴۶	-۰/۱۶۶	-۰/۱۱۱

Element (ppm)	Components of ICP results			
	1	2	3	4
Al	۰/۷۲۲	-۰/۲۶۴	-۰/۴۵۹	۰/۳۶۸
As	-۰/۱	-۰/۲۳۱	۰/۹۵۷	۰/۱۲۵
Co	۰/۳۱۴	۰/۸۷۲	-۰/۰۶۴	۰/۲۷۹
Cu	-۰/۱۳۳	۰/۹۶۹	-۰/۰۳۱	-۰/۲۰۶
Li	-۰/۶۴۳	۰/۴۱۰	-۰/۰۹۳	۰/۳۱۵
Mg	-۰/۳۸۰	-۰/۰۶۷	۰/۹۱۱	۰/۰۹۱
Mn	-۰/۰۵	۰/۴۵۷	۰/۳۲۵	۰/۸۰۶
Ni	۰/۹۴۸	۰/۰۳۲	-۰/۲۵۵	۰/۰۱۳
P	-۰/۱۹۵	۰/۱۶۸	۰/۸۸۲	-۰/۲۸۹
S	-۰/۱۶۷	۰/۹۶۷	-۰/۰۲۲	-۰/۱۹۱
Ti	۰/۹۶۳	-۰/۱۱۲	-۰/۱۷۲	۰/۱۶
V	۰/۹۲۴	۰/۰۵۳	-۰/۲۶۱	۰/۲۷
Zn	۰/۳۱۷	۰/۱۰۱	-۰/۲۲۳	۰/۹۰۸

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمی مگنتیت به روش ICP-AES

sample No	Ag (ppm)	Al (%)	As (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Mg (%)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Na (%)	Ni (ppm)	P (%)	S (%)	Ti (%)	V (ppm)	Zn (ppm)
OUT2	۰/۵	۰/۸	۱۷۸	۱۰۵	۲۰۴	۵	۳/۵	۲۱۱۰	۰/۵	۰/۰۵	۶۲	۰/۰۰۵	۰/۱۳	۰/۰۵	۶۵	۳۳۷
NH3-21-26.3	۰/۵	۰/۴	۲۵	۱۲۶	۳۵۱۰	۵	۴	۱۰۰	۰/۵	۰/۰۵	۱۶	۰/۰۰۶	۰/۶۷	۰/۰۰۵	۲۹	۱۳۲
BH3-22-31.5	۰/۵	۰/۶	۵	۱۷	۱۵	۵	۳/۷	۱۰۰۰	۰/۵	۰/۰۵	۵	۰/۰۰۵	۰/۱	۰/۰۰۵	۲۳	۱۳۳
BH3-20-19.3	۰/۵	۰/۵	۵	۳۰	۱۱	۵	۷/۹	۹۵۰	۰/۵	۰/۰۵	۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۹	۰/۰۰۵	۱۷	۱۰۰۱
BH3-29-43.2	۰/۵	۰/۵	۳۱۵	۴۰	۱۴	۵	۵/۷	۲۵۰۰	۰/۵	۰/۰۵	۵	۰/۰۰۲	۰/۰۹	۰/۰۰۲	۳۱	۲۵۸
BH3-24-3.5	۰/۵	۰/۴	۶۱۶	۳۶	۲۲	۵	۷/۵	۱۵۰۰	۰/۵	۰/۰۵	۵	۰/۱۴	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۴	۵۲
BH3-30-54	۰/۵	۰/۸	۴۱	۶۵	۵	۵	۷/۲	۷۶۰	۰/۵	۰/۰۵	۱۲۱	۰/۰۰۵	۰/۰۷	۰/۰۹	۸۳	۱۷۰

DataSet/ Point	4 / 1 .	5 / 1 .	6 / 1 .	8 / 1 .	9 / 1 .	10 / 1 .	13 / 1 .	14 / 1 .	15 / 1 .	16 / 1 .	17 / 1 .	18 / 1 .	19 / 1 .	20 / 1 .	21 / 1 .	22 / 1 .	23 / 1 .	24 / 1 .	25 / 1 .	26 / 1 .	27 / 1 .
sample No	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54	BH3-30-54
SiO ₂	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
Al ₂ O ₃	۱/۶۷	۱/۸۲	۱/۷۹	۱/۰۵	۱/۰۷	۱/۷۷	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۲
CaO	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۷	۰/۰۲
TiO ₂	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰	۰
FeO	۸۷/۹۰	۹۰/۵۲	۹۰/۱۲	۸۹/۲۶	۸۹/۵۲	۹۰/۹۷	۸۵/۱۱	۲/۹۲	۸۳/۹۱	۸۶/۵۲	۸۷/۲۵	۸۶/۳۷	۸۶/۶۸	۸۶/۱۶	۹۱/۷۶	۹۳/۴۹	۹۲/۰۳	۹۳/۵۴	۸۸/۱۰	۸۰/۵۷	۸۹/۹۹
MnO	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۵
MgO	2.08	2.33	2.52	2.33	2.12	1.99	8.65	8.45	8.29	8.51	8.44	4.23	5.24	6.13	2.46	2.43	0.00	1.61	8.60	11.49	2.17
NiO	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	۰/۰۱	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱
V ₂ O ₅	0.06	0.00	۰	۰/۰۱	۰/۰۷۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲
Total	92.05	94.97	۹۴۷۷۶	۹۴	۹۳/۰۲	۹۵/۱۵	۹۴/۰۱	۹۷/۶۲	۹۷/۴۳	۹۳/۲۶	۹۱/۷۸	۹۰/۹۴	۹۷/۱۹	۹۷/۵۶	۹۴/۴۴	۹۶/۱۵	۹۷/۳	۹۵/۴۷	۹۶/۹۴	۹۷/۳۶	۹۷/۴

توضیح: اعداد صفحہ نشان دہندہ مقدار زیر حد تشخیص دستگاہ هستند.

جدول ۳- نتایج تجزیہ ریز کار الکترونی مگنتیت.

ادامه جدول ۳

DataSet/ Point	3 / 1 .	5 / 1 .	6 / 1 .	15 / 1 .	16 / 1 .	17 / 1 .	18 / 1 .	22 / 1 .	23 / 1 .	26 / 1 .	29 / 1 .	30 / 1 .	33 / 1 .	34 / 1 .	10 / 1 .	16 / 1 .	17 / 1 .	48 / 1 .	49 / 1 .	50 / 1 .
sample No	KS-35	KS-35	KS-35	20-31	20-31	20-31	20-31	26-21.1	26-21.1	26-21.1	22-45	22-45	21-8.5	21-8.5	KS-26	KS-26	KS-26	OUT 2	OUT 2	OUT 2
SiO ₂	۰/۷۹	۰/۱۲	۰/۵۵	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱	۰	۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۳	۰/۰۹	۰	۰/۱۹	۰/۰۳
Al ₂ O ₃	۱/۷۳	۰/۰۹	۰	۰/۵۶	۰/۹۴	۰/۷۱	۰	۴۶	۱/۷۸	۱/۵۷	۰/۷۷	۱/۵۲	۲/۵۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۱	۱/۷۷	۰/۷	۱/۵۸
CaO	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۳۴	۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲
TiO ₂	۰/۳۵	۰/۰۸	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۳۴	۰/۰۳۷	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۷	۰/۱۲
FeO	۴/۳۹	۸۸/۹۱	۸۴/۳۳	۸۸/۶۳	۸۷/۷۷	۸۶/۶۶	۹۰/۱۹	۸۸/۶۸	۸۸/۳۱	۸۹/۶۱	۹۰/۱۴	۸۹/۲	۸۷/۷	۸۸/۸۷	۹۰/۴۶	۸۸/۸	۹۰/۹۹	۸۷/۵	۸۷/۶۸	۸۹/۳۵
MnO	۱/۰۴	۰/۲۸	۱/۳۹	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۱۸	۰/۳۴	۱/۶۲	۱/۶۴	۱/۵۷	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۳
MgO	۰/۸۸	۰/۵۸	۳/۷۱	۲/۶۵	۲/۷۴	۳/۱۸	۱/۶۶	۱/۹۸	۱/۹۷	۱/۱۶	۰/۵۱	۱/۰۳	۲/۳۷	۱/۱	۰/۲۲	۰/۴۴	۰/۱	۱/۸۶	۱/۵۶	۱/۹۶
NiO	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Cr ₂ O ₃	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
V ₂ O ₅	۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۰/۰۴
Total	۹۷/۶۰	۹۱	۹۰/۴۵	۹۲/۳۱	۹۱/۷۲	۹۰/۷۷	۹۲/۲۲	۹۲/۳۴	۹۲/۳۹	۹۲/۶۵	۹۲/۰۷	۹۲/۳۵	۱/۵۶	۹۱/۰۳	۹۲/۵	۹۱/۶۲	۹۲/۹۲	۹۱/۰۳	۹۰/۴۸	۹۳/۳۹

۱

توضیح: اعداد صفر نشان دهنده مقدار زیر حد تشخیص دستگاه هستند.

DataSet/Point	23 / 1 .	24 / 1 .	25 / 1 .	26 / 1 .	27 / 1 .	28 / 1 .	29 / 1 .	30 / 1 .	31 / 1 .	32 / 1 .	51 / 1 .	52 / 1 .	26 / 1 .
sample No	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	BH3-22-35.3	OUT 2	OUT 2	30-57.7
SiO ₂	۰/۱۴	۰/۱۴	۱/۱	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰	۰/۰۳
Al ₂ O ₃	۰/۵	۰/۵۸	۱/۵۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۳	۰/۹۷	۱/۰۴	۱/۵۷
CaO	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰
TiO ₂	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۱۲
FeO	۷۹/۹۹	۸۱/۹۴	۸۱/۴۹	۸۸/۸	۹۰/۰۹	۸۹/۳۲	۸۱/۷۴	۸۲/۵	۸۲/۵۱	۸۸/۱۹	۸۸	۸۸/۵۴	۸۹/۹۱
MnO	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۱۳
MgO	۷/۷۵	۷/۹۷	۴/۵	۰/۵۹	۰/۹۸	۰/۷۸	۷/۹۳	۷/۹۹	۷/۷۸	۷/۳۸	۱/۷۹	۱/۸۷	۱/۱۹
NiO	۰	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Cr ₂ O ₃	۰/۰۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
V ₂ O ₃	۰/۰۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳
Total	۸۸/۵۹	۹۰/۲۵	۸۸/۸۹	۹۰/۰۳	۹۱	۹۰/۵۱	۸۹/۹۷	۹۰/۷۹	۹۰/۵۵	۹۰/۴۷	۹۱/۲۴	۹۱/۸۵	۹۲/۹۵

توضیح: اعداد صفر نشان دهنده مقادیر زیر حد تشخیص دستگاه هستند.

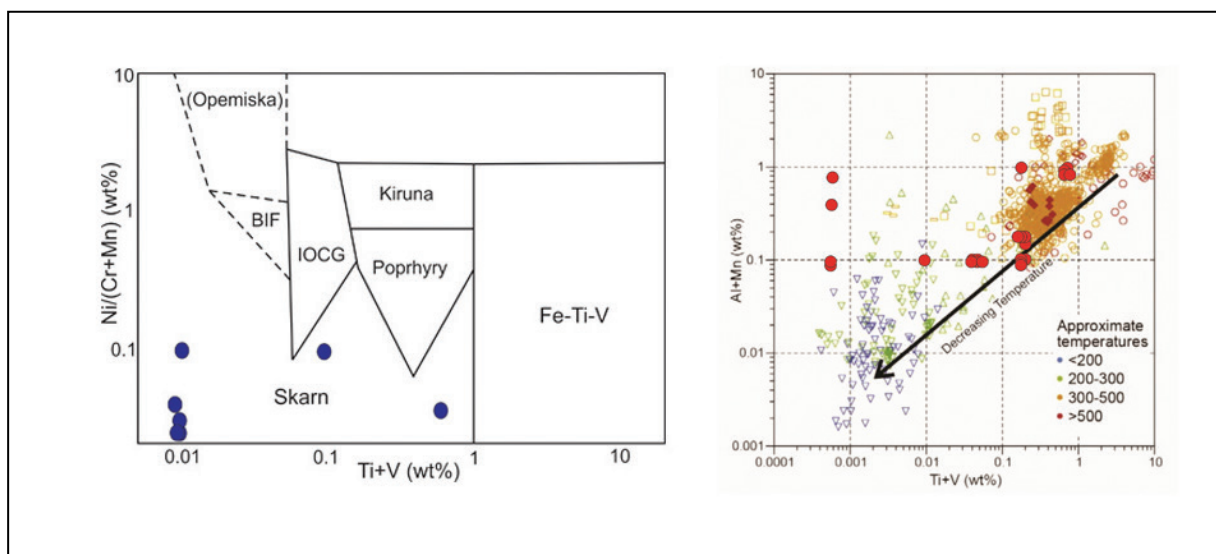
ادامه جدول ۳

عناصر Ni, Al, Ti و P در ترکیب مگنتیت تا حد زیادی تحت تأثیر ادخالها قرار می‌گیرند (Nadoll et al., 2014) و شواهد این مطلب در نمونه‌های خاک سرخ عبارتند از: نبود همبستگی مثبت میان Mg و دیگر عناصر در نتایج ریزکاوالکترونی، همبستگی Ca و P در نتایج ریزکاوالکترونی، همراهی Mg, P و As در فاکتور سوم نتایج ICP، مقادیر سنسورد عناصر Co و As در نتایج ریزکاوالکترونی، مشاهده سولفیدهای Ni-As-Co در بررسی EDS مقاطع صیقلی و همراهی عناصر Ca و P در فاکتور سوم نتایج ICP همراه با حضور ادخالهای آپاتیت. عناصر گوگرد دوست در مگنتیت عناصر ناسازگار هستند (Nadoll et al., 2014) و این با نتایج زیر حد تشخیص عناصر Ag و Mo (کمتر از ۱ ppm در نتایج ICP)، مقادیر پایین Ag (میانگین ۰/۱۴ در نتایج ریزکاوالکترونی) و مقادیر پایین Na (میانگین ۰/۰۲) در نتایج ریزکاوالکترونی و زیر حد تشخیص در نتایج ICP همخوانی دارد.

بر پایه Dupuis and Beaudoin (2011) عناصر V, Ti, Al با دمای تشکیل مگنتیت وابستگی دارند و از نمودار Al+Mn به Ti+V می‌توان برای تفکیک محیط تشکیل کانسارهای مگنتیت استفاده کرد. در شکل ۵ از این نسبت استفاده شده و قرار گرفتن بیشتر نمونه‌های مگنتیت در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، همراهی کانه‌زایی را با مرحله پس‌رونده پیشنهاد می‌کند. به دلیل اینکه مقادیر Cr و Ni نتایج ریزکاوالکترونی بیشتر زیر حد تشخیص دستگاه بوده است، نمودار Ni/(Cr+Mn) vs (Ti+V) (wt) % با استفاده از نتایج ICP-AES رسم شد (شکل ۶).

عناصر Ni, Al, Ti و عناصر مشترک دارای همبستگی بالا در فاکتور اول نتایج ICP و ریزکاوالکترونی هستند. جایگزینی کاتیونهای Ni به جای Fe^{2+} و Al و V به جای Fe^{3+} پیشنهاد شده برای مگنتیت توسط برخی پژوهشگران همراهی عناصر فاکتور ۱ را توجیه می‌کند (Barnes and Roeder, 2001; Richter et al., 2006). مقادیر عناصر Cr, V, Ti در نتایج ICP-AES. و ریزکاوالکترونی پایین و بیشتر زیر حد تشخیص است و با مقادیر موجود در مگنتیت‌های گرمابی و اسکارن همخوانی دارد (Nadoll et al., 2014). مقادیر TiO_2 نمونه‌ها نیز در کل پایین است و میانگین ۰/۰۳ % بر پایه نتایج ICP-AES. و ۱/۰ % طبق نتایج ریزکاوالکترونی با مقادیر کمتر از ۱% پیشنهاد شده برای مگنتیت گرمابی همخوانی دارند (شکل ۶ بر پایه Dupuis and Beaudoin, 2011).

از جمله عناصری که در تفکیک مگنتیت‌های گرمابی و ماگمایی کاربرد دارد Mg است. معمولاً انواع ماگمایی مگنتیت مقادیری میان ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm Mg و انواع گرمابی بیش از ۱% Mg دارند (Nadoll et al., 2014)، میانگین ۹/۴ % Mg برای نتایج ریزکاوالکترونی و ۴/۲ % برای نتایج ICP تأییدکننده محیط تشکیل اسکارن برای مگنتیت‌های این محدوده است. افزون بر منشأ گرمابی، میانگین Mg بالای ۱۰۰۰ ppm به عنوان مشخصه مگنتیت اسکارن‌های منیزیمی نیز عنوان شده و به برهم کنش گسترده میان سیال و سنگ دیواره ربط داده شده است (Nadoll et al., 2014). این مقدار با حضور میزبان آهک دولومیتی در محدوده خاک سرخ همخوانی دارد.



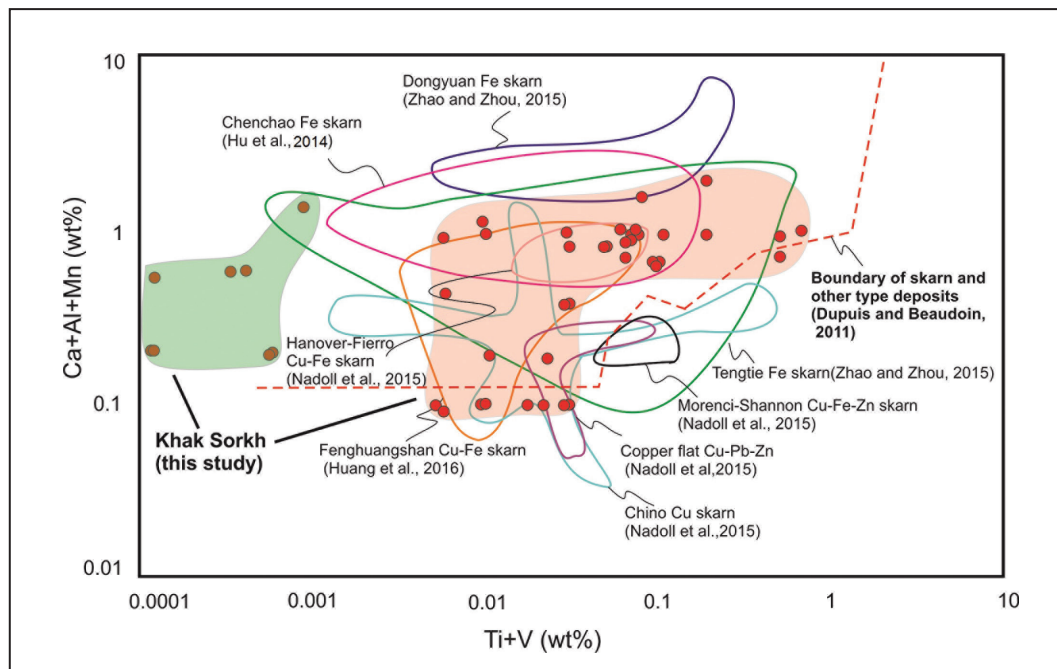
شکل ۶- الف) نمودار $Al+Mn(wt\%)/Ti+V(wt\%)$ پراکنده‌گی نتایج میکروپروب مگنتیت خاک سرخ (دوایر سرخ) که نشان دهنده وجود دست کم دو نسل کانه‌زایی مگنتیت در دو بازه دمایی متفاوت است (بر پایه Dupuis and Beaudoin, 2011)؛ ب) موقعیت نتایج ICP نمونه‌های خاک سرخ (دوایر آبی رنگ) در محدوده کانسارهای اسکارن (اصلاح شده پس از Dupuis and Beaudoin, 2011).

مشابهی در کانسارهای مگنتیت اسکارن تحت تأثیر فرایندهای تعادل دوباره همانند اکسی-اکسلوشن (oxy-exsolution) در کاهش محتوای Ti مگنتیت‌های ثانویه پیشنهاد شده و انحلال و ته‌نشست دوباره (Dissolution- reprecipitation process) توسط Hu et al. (2014) به عنوان فرایندهای مؤثر در کاهش عناصر Al, Mg, Ca و افزایش Fe مگنتیت‌های ثانویه پیشنهاد شده است.

همراهی عناصر فرعی و جزئی در نتایج بررسی تحلیل فاکتوری و همخوانی آنها با نتایج سنگ‌نگاری، عناصر و کانی‌های مناسب برای استفاده در پی‌جویی‌های ناحیه‌ای را پیشنهاد می‌کند؛ این موارد عبارتند از: همبستگی بالای S و Cu, Co همراه با وجود کانی‌های کالکوپیریت و کانی‌های سولفیدی Ni-Co-As تشکیل شده میان بلورهای مگنتیت، مقادیر بالای Zn با داشتن میانگین 170 ppm در نتایج ICP-AES به همراه حضور ادخال‌های اسفالریت در مگنتیت.

نمونه‌های خاک سرخ در این نمودار همگی در محدوده اسکارن جانمایی می‌شوند. با توجه به میانگین عناصر موجود در مگنتیت‌های اولیه و ثانویه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مگنتیت‌های اولیه دارای مقادیر Mg بالاتر و عیار آهن پایین‌تری نسبت به مگنتیت‌های تأخیری هستند و به نظر می‌رسد که سیال‌های کانه‌زا با گذشت زمان از Mg فقیر و از Fe غنی‌تر شده‌اند.

در شکل ۷ نتایج داده‌های ریزکاوالکترونی در نمودار نسبت Ca+Al+Mn/Ti+V (wt) ارائه شده است. در این نمودار نمونه‌های خاک سرخ با نتایج اسکارن‌های مختلف دنیا مقایسه شده است و نتایج ریزکاوالکترونی وجود دو محدوده برای ترکیب مگنتیت را نشان می‌دهد و در کل همه نتایج همخوانی خوبی با کانسارهای اسکارن آهن دارند. به دلیل اینکه مقادیر V بیشتر زیر حد تشخیص هستند، کاهش میزان نسبت Ti+V مگنتیت‌های ثانویه بیشتر تحت تأثیر کاهش Ti است. نتایج



شکل ۷- موقعیت نتایج میکروپروپروب خاک سرخ (دوایر سرخ) و مقایسه آنها با کانسارهای اسکارن (اصلاح شده پس از Huang et al., 2016). محدوده سرخ رنگ نشان دهنده نتایج مگنتیت‌های اولیه و محدوده سبز رنگ نتایج مگنتیت‌های ثانویه را نشان می‌دهد و اختلاف اصلی آنها در مقادیر پایین‌تر Ti در انواع ثانویه است.

۶- نتیجه‌گیری

عنوان عناصر ردیاب در اکتشاف ژئوشیمیایی ناحیه‌ای برای اسکارن آهن پیشنهاد می‌شوند.

سپاسگزاری

این مقاله در قالب طرح حمایتی سازمان توسعه و نوسازی معادن (ایمیدرو)، برای بررسی ICP و EPMA در مرکز تحقیقات و فراآوری مواد معدنی کرج انجام شده است که از پرسنل این سازمان سپاسگزاری می‌شود. امکان بررسی EPMA در دانشگاه اسلو در قالب فرصت مطالعاتی به وسیله وزارت علوم، تحقیقات و فناوری فراهم آمده است که از مسئولان دانشگاه تبریز نیز برای فراهم آوردن این فرصت سپاسگزاری می‌شود. از شرکت معدنکاران خاک سرخ ندوشن به دلیل فراهم کردن امکان دسترسی به محدوده و گزارشات پیشین سپاسگزاری می‌شود.

برپایه ژئوشیمی عناصر اصلی و جزئی، کانی‌زایی اسکارن مگنتیت در محدوده خاک سرخ در دو مرحله صورت گرفته است. ترکیب مگنتیت ثانویه در راستای افزایش Fe و کاهش Al, Mg و Ti تغییر پیدا کرده است و تأثیر فرایندهای تعادل دوباره در تغییر ترکیب مگنتیت همانند اکسی-اکسلوشن (oxy-exsolution) و فرایند انحلال-ته‌نشست دوباره (Dissolution- reprecipitation process) را پیشنهاد می‌کند. مگنتیت محدوده خاک سرخ از نوع Mg بالا است و Mg آن تا حد زیادی با سنگ میزبان دولومیتی ارتباط دارد. نتایج تجزیه ICP و بی‌هنجاری‌های حاصل با نتایج ریزکاوالکترونی و مجموعه پاراژنز مگنتیت همخوانی دارد و بازتابی از وجود کانی‌های همراه و ادخال درون مگنتیت است و استفاده از این کانی‌ها را در پی‌جویی کانی‌های سنگین در مقیاس ناحیه‌ای پیشنهاد می‌کند. بر پایه نتایج ICP و مجموعه کانی‌های همراه مگنتیت عناصر Ni, Co, As, Cu, Zn به عنوان

کتابنگاری

- بنی آدم، ف.، ۱۳۹۲- گزارش پایان عملیات اکتشاف معدن سنگ آهن خاک سرخ ندوشن، ۲۱۶ ص.
- جوادی پور، ش.، راکی، م.، ۱۳۹۱- گزارش ژئوفیزیک به روش مغناطیس سنجی در معدن آهن خاک سرخ ندوشن یزد، ۵۴ ص.
- زاهدی، ا. و بومری، م.، ۱۳۹۲ الف- سنگ نگاری و شیمی گارنت‌ها در اسکارن خوت، شمال باختر تفت، استان یزد. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲، صص. ۲۶۷ تا ۲۷۶.
- زاهدی، ا. و بومری، م.، ۱۳۹۲ ب- سنگ نگاری، زمین شیمی و سنگ زایی اسکارن پناه کوه، باختر یزد، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۳، صص. ۳۸۹ تا ۴۰۲.
- شریفی، ر.، ۱۳۸۷- بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی اندیس‌های فلزی در منطقه پناه کوه یزد با دیدگاه اکتشافی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه شیراز، ۱۸۶ ص.
- قلمقاش، ج.، محمدیها، ک. و قهرایی پور، م.، ۱۳۸۲- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کفه طاقستان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مغفوری، س.، حسین زاده، م.ر.، رجبی، ع. و عظیم زاده، ا.م.، ۱۳۹۵- تحلیل رخساره‌ای و جایگاه چینه‌ای افق‌های کانه زایی روی-سرب-باریت با میزان کربناته - تخریبی در توالی رسوبی کرتاسه پیشین، حوضه جنوب یزد، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۲، صص. ۲۳۳ تا ۲۴۶.
- مکی زاده، م.ع.، رهگشای، م. و دلیران، ف.، ۱۳۸۶- پیدایش گرونی آندراریتی در اسکارن های آهن سور، نوار افیولیتی-سورک، مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان، شماره ۲۷، صص. ۱۵۷ تا ۱۶۷.
- ملکی، س.، کلاگری، ع.ا.، سیاه چشم، ک.، علیرضایی، س.، کورفو، ف. و بنی آدم، ف.، ۱۳۹۵ الف- تعیین سن توده‌های گرانیتویدی همراه با کانه‌زایی مگنتیت تپ اسکارن، منطقه خاک سرخ، بیستمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تهران.
- ملکی، س.، کلاگری، ع.ا.، سیاه چشم، ک.، علیرضایی، س.، کورفو، ف. و بنی آدم، ف.، ۱۳۹۵ ب- کانی شناسی و مراحل تشکیل اسکارن مگنتیت دار خاک سرخ به کمک داده‌های میترال شیمی. بیستمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.

References

- Barnes, S. J. and Roeder, P. L., 2001- The range of spinel composition in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of petrology*, 42:2279-2302.
- Dare, S., Barnes, S. J. and Beaudoin, G., 2012- Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: implications for provenance discrimination. *Geochim Cosmochim Acta*, 88: 27-50.
- Dupuis, C. and Beaudoin, G., 2011- Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46: 319-335.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D. and Newberry, R. J., 1981- Skarn deposits. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*. 317-391.
- Hajalilou, B. and Aghazadeh, M., 2016- Geological, Alteration and Mineralization Characteristics of Ali Javad Porphyry Cu-Au Deposit, Arasbaran Zone, NW Iran. *Open Journal of Geology*, 6, 859-874, doi: 10.4236/ojg.2016.68066.
- Hassanpour, S., Alirezaei, S., Selby, D. and Sergeev, S., 2015- SHRIMP zircon U-Pb and biotite and hornblende Ar-Ar geochronology of Sungun, Haftcheshmeh, Kighal, Niaz porphyry Cu-Mo systems: evidence for an early Miocene porphyry-style mineralization in northwest Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 45-59.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province), Ph.D. thesis, Univ. of Calif., Los Angeles, 204 p.
- Hu, H., Li, J. W., Lentz, D., Ren, Z., Zhao, X. F., Deng, X. D. and Hall, D., 2014- Dissolution – reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite. *Ore Geology Reviews*. 57, 393-405.
- Huang, X.W., Gao, J. F., Qi, L., 2016- In-Situ LA-ICP-MS Trace Elements Analysis of Magnetite: The Fenghuangshan Cu-Fe-Au Deposit, Tongling, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 72: 746-759. Doi: 10.1016/j. Ore Geology Reviews. 2015.09.012.
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2009- Metallogeny and Tectonic Evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran Volcanic Belt, Northern Iran. *International Geology Reviews*, 52, 608-630.
- Kretz, R., 1983- Symbols of rock-forming minerals. *Am. Mineral*, 68: 277-279.
- Muller, B., Axelsson, M. D., Ohlander, B., 2003- Trace elements in magnetite from Kiruna, northern Sweden, as determined by LA-ICP-MS. *GFF* 125, 1-5.
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J. L., French, D. and Walshe, J., 2014- The chemistry of hydrothermal magnetic: a review. *Ore Geology Reviews*, 16: 1-32.
- Nadoll, P., Mauk, J. L., Hayes, T. S., Koenig, A. E. and Box, S. E., 2012- Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States. *Economic Geology*, 107: 1275-1292.
- Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E. and Alfonso, P., 2015- Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary- exhalative Zn- Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan-Chahmir basin, Central Iran.- *Int. Ore Geol. Rev.*, 64, 328-353.
- Righter, K., Leeman, W. P. and Hervig, R. L., 2006- Partitioning of Ni, Co and V between spinel – structured oxides and silicate melts: importance of spinel composition. *Chemical Geology*, 227: 1-25.
- Shahabpour, J. and Kramers, J. D., 1987- Lead isotope data from the Sar-Cheshmeh porphyry copper deposit, Iran: *Mineralium Deposita*, 22: 278-281.
- Shafiei, B., Shahabpour, J., Haschke, M., 2008- Transition from paleogene normal calcalkaline to Neogene adakitic-like plutonism and Cu-metallogeny in Kerman porphyry copper belt: response to Neogene crustal thickening. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 19, 67-84.
- Stocklin, J. and Nabavi, M. H., 1973- Tectonic map of Iran, 1: 250000, Geological Survey of Iran.
- Zahedi, A., Boomeri, M., Nakashima, K., Mackizadeh, M. A., Ban, M. and Lentz, D. R., 2014- Geochemical characteristics, origin and evolution of ore-forming fluids from the Khut copper skarn deposit (west of Yazd, Central Iran). *Resources Geology*, 64: 209-232.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M. A., 2005- Geology of Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, Central Iran, *International Geology Reviews*, 47: 620-646.

Investigating geochemical and mineral chemistry data of Khak Sorkh iron skarn magnetite, West of Yazd, a key to regional geochemical exploration

S. Maleki^{1*}, A. A. Calagari², K. Siahcheshm³ and S. Alirezaei⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Assistant professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴Assistant professor, Earth Science Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017 January 17

Accepted: 2017 May 10

Abstract

Khak Sorkh iron deposit located about 42 km northwest of Nadushan town in Yazd Province. Host rock include upper Triassic-Jurassic limestone which are intruded by Oligo-Miocene granitoid bodies. Mineralization is dominated by magnetite, and serpentine is the main waste mineral. Skarn mineral assemblages include clinopyroxene, garnet, tremolite phlogopite and epidote. The characteristics of mineralization are: magnetite mineralization in two generations, presence of serpentine as the main waste mineral, hornfelsed greywacke units which come between intrusive bodies and skarned limestone units, absence of obvious zoning in endoskarn and exoskarn parts, presence of Ni-Co-As sulfides, high amount of Zn, As, Co and Mn in magnetite geochemical results and the increasing Fe along with decreasing Mg contents in magnetite at both deposit and crystal scales from primary to secondary types. Minor elements contents of geochemical results have been used for distinguishing of different mineral deposits (e.g, Dare et al., 2012; Dupuis and Beaudoin, 2011; Nadoll et al., 2012) and they are in good accordance to hydrothermal and skarn type deposits like: low contents of Cr (less than 10 ppm), high contents of Mg (2.2 to 7.5 ppm), low TiO₂ (from 0.01 to 0.3 ppm), low amounts of incompatible elements including Ag (<1 ppm), Mo (1 ppm) and Na (<0.1%), and positive correlations between Al and V in magnetite analysis results. Ratios of Ca+Al+Mn wt% /Ti+V w% and V₂O₅/TiO₂ of geochemical data support skarn type mineralization for Khak Sorkh.

Keywords: Fe skarn, Magnetite, Mineral chemistry, Khak Sorkh, Yazd

For Persian Version see pages 55 to 66

*Corresponding author: S. Maleki1; E-mail: sasan.maleki@gmail.com