



مقاله پژوهشی

بررسی زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، شیمی کانی‌ها و سیالات در گیر اسکارن آهن کلاته‌شب (شرق سریش، خراسان جنوبی)

فاطمه یاری*، محمدحسین زرین کوب و سیدسعید محمدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳

چکیده

اسکارن آهن کلاته‌شب در ۱۰۵ کیلومتری شرق سریش (جنوب شرق بیرجند) در استان خراسان جنوبی، در شرق ایران واقع شده است. یک ماگما با ترکیب حدواسط به درون سنگ‌های آهکی با سن پالئوسن-ائوسن نفوذ کرده و باعث تشکیل اسکارن آهن کلاته‌شب شده است. سنگ‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی مولد اسکارن شامل: دیوریت، کوارتز دیوریت، کوارتز دیوریت پورفیری و دیوریت پورفیری هستند. اسکارن آهن کلاته‌شب به صورت اگزواسکارن رخ داده و کانی‌های پیروکسن، گارنت، ایدوکراز، اپیدوت و مگنتیت را تشکیل داده است. بر اساس آنالیزهای الکترون مایکروپروب^۱ و پراش پرتو مجهول^۲، پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید و گارنت‌ها از نوع آندرادیت هستند. بررسی‌های ژئوترمومتری بر مبنای بررسی‌های سیالات در گیر در محدوده اسکارن، بیانگر رخداد واکنش‌های دگرگونی در حضور سیالی با دمای ۱۷۱ تا ۲۸۶ درجه سانتی‌گراد و شوری (معادل NaCl) ۱۱/۸۱ تا ۱۴/۷۷ درصد وزنی است.

واژه‌های کلیدی: شیمی کانی، ژئوترمومتری، اسکارن، کلاته‌شب، سریش، زون سیستان

مقدمه

(Tirrul et al., 1983) در شرق ایران واقع شده است. اعتقاد کلی بر آن است که زمین درز سیستان یک مجموعه به هم افزوده است که در زمان بسته شدن اقیانوس سیستان به عنوان باریکه‌ای از اقیانوس نئوتتیس - که پهنه‌های قاره‌ای افغان و لوت را از هم جدا کرده است - در اواخر کرتاسه-پالئوسن جای‌گیری شده است. ماگماتیسیم رخ داده در بخش شمالی زون سیستان را می‌توان در پنج مرحله کرتاسه زیرین، کرتاسه بالایی، ائوسن

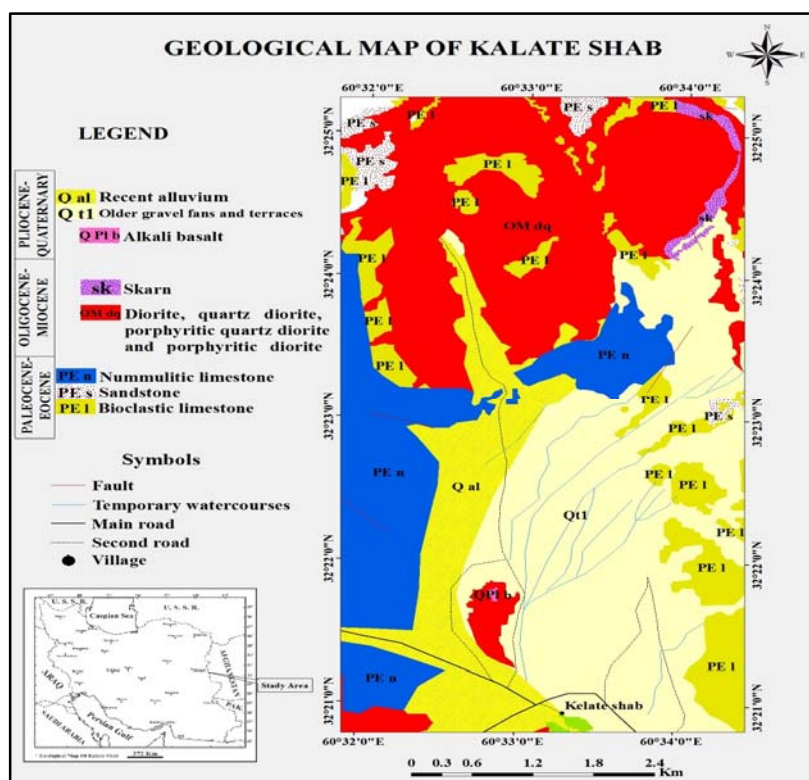
منطقه مورد بررسی در ۱۰۵ کیلومتری شرق سریش، در شمال روستای کلاته‌شب قرار گرفته است. این محدوده به عنوان بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماسرود (Guillou et al., 1981)، بین طول‌های جغرافیایی ۳۱° ۶۰' و ۳۵° ۶۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۱° ۳۲' و ۲۶° ۳۲' شمالی در استان خراسان جنوبی (شکل ۱) و در بخش شمالی زمین‌درز سیستان

*مسئول مکاتبات: f_yari@birjand.ac.ir

DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v12i4.77836>

1. EPMA
2. XRD

زیرین، ائوسن میانی- الیگوسن و میوسن- کواترنری تقسیم کرد (Zarrinkoub et al., 2012).
 که هر کدام دارای ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاصی هستند



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه شمال کلاته‌شب (برگرفته از گایلو و همکاران (Guillou et al., 1981) با کمی تغییرات)

Fig. 1. Geological map of the north of Kalateh Shab area (After Guillou et al., 1981; slightly modified)

نفوذ توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با سن الیگومیوسن (Guillou et al., 1981) به درون واحدهای رسوبی (کربناته) در شمال کلاته‌شب باعث اسکارن‌زایی شده است که در این پژوهش به سنگ نگاری، شیمی کانی‌ها و سیالات درگیر پرداخته شده است.

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش، ۱۴۰ مقطع نازک، ۱ مقطع صیقلی و ۵ مقطع نازک صیقلی تهیه و بررسی شد. ۳ نمونه برای آنالیز XRD در آزمایشگاه دانشگاه بیرجند، ۳ نمونه برای آنالیز سیالات درگیر در آزمایشگاه دانشگاه پیام‌نور مشهد و ۴ نمونه

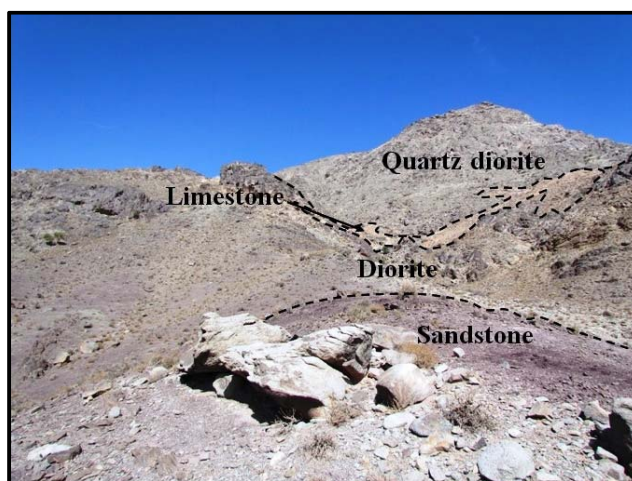
ماگماتیسیم ائوسن-الیگوسن در بخش شمالی زون سیستان به صورت توده‌های نفوذی، نیمه‌نفوذی، گدازه‌ای و آذرآواری از فراوانی خاصی برخوردار است (Pang et al., 2013). نفوذ این توده‌ها به درون واحدهای رسوبی کربناتی در زون سیستان باعث دگرگونی مجاورتی و در مواردی بروز اسکارن شده است. دگرگونی مجاورتی و اسکارن سیاه کمر حاشیه توده نفوذی گرانیتوئید کوه ریگی (Biabangard et al., 2015)، کانی‌زایی آهن در محدوده کلاته ناصر (Saadat, 2016)، اسکارن‌زایی در منطقه بیشه و حاج الیاس (Zarrinkoub et al., 2011; Nakhaei et al., 2013; Nakhaei et al., 2015) و اسکارن کلاته‌شب نمونه‌هایی از این رخداد است.

کانی‌زایی شده است (Yari, 2014; Yari et al., 2016). واحدهای نفوذی-نیمه‌نفوذی شامل دیوریت، دیوریت پورفیری، کوارتز دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری هستند (شکل ۱). دیوریت و دیوریت پورفیری توسط کوارتز دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری میزبانی می‌شوند. مجاورت این توده‌ها با ماسه‌سنگ‌ها باعث پختگی و در تماس با سنگ آهک‌ها باعث دگرگونی به صورت تبلور مجدد و بروز اسکارن آهن شده است (شکل ۲).

برای آنالیز میکروپروپ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انتخاب و مورد آنالیزهای یادشده، قرار گرفتند.

زمین‌شناسی

قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در منطقه شمال کلاته‌شب ماسه‌سنگ و سنگ‌های آهکی با سن پالئوسن-ائوسن هستند. این واحدها توسط توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی الیگومیوسن (Guillou et al., 1981) مورد هجوم قرار گرفته و باعث



شکل ۲. نفوذ توده‌های دیوریتی و کوارتز دیوریتی در سنگ آهک و ماسه‌سنگ‌های پالئوسن-ائوسن منطقه شمال کلاته‌شب. دید عکس به سمت شمال شرق

Fig. 2. Diorite and quartz diorite have intruded into the Paleocene-Eocene limestone and sandstone in the north of Kalateh Shab area. View to the northeast

نیمه‌شکل‌دار و حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. کانی‌های فرعی شامل بیوتیت آپاتیت، زیرکن و اسفن هستند. کانی‌های رسی، کربنات کلسیم، کلریت، اپیدوت و کانی‌های کدر از جمله کانی‌های ثانویه در این واحد سنگی هستند (Yari, 2014; Yari et al., 2014).

کوارتز دیوریت: بافت‌های گرانولار، میکروگرانولار، اینترگرانولار و پوئی کیلیتیک در این واحد متداولند. پلاژیو کلازهای شکل‌دار با ماکل پلی‌سننتیک و پریکلین دارای منطقه‌بندی، ۶۰ تا ۷۰ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند.

سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی توده‌های نفوذی

دیوریت: بافت‌های گرانولار، میکروگرانولار و پوئی کیلیتیک در این واحد سنگی رایج است. بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیو کلاز (الیگو کلاز-آندزین) با ماکل پلی‌سننتیک و در برخی موارد دارای منطقه‌بندی، یکی از سازندگان اصلی این واحد سنگی است. پلاژیو کلازها ۷۰ تا ۸۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. هورنبلند مهم‌ترین کانی فرومیزین این سنگ است که بیشتر شکل‌دار و گاهی

پلاژیوکلازها به صورت شکل دار بیشترین حجم فنوکریست‌ها (۶۵ تا ۷۵ درصد) را تشکیل داده‌اند. هورنبلند، بیوتیت و کلینوپیروکسن نیز به صورت شکل دار تا حدود ۲۵ درصد حجم فنوکریست‌ها را تشکیل می‌دهند. کانی‌های آپاتیت، زیرکن و اسفن فرعی و کانی‌های کدر، کلریت، کانی‌های رسی، کربنات، اپیدوت، زوئیزیت و کلینوزوئیزیت ثانویه هستند (Yari, 2014; Yari et al., 2014).

سنگ‌های دگرگونی

همبری توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با سنگ‌های آهکی در شمال کلاته شب باعث ایجاد یک مرز متاسوماتیک ضخیم با کانه‌زایی آهن شده است (Yari et al., 2014). سنگ‌های دگرگونی منطقه شامل مرمر و اسکارن است. شواهد صحرایی و پتروگرافی نشان می‌دهد که دگرگونی در دو مرحله پیش‌رونده و پس‌رونده ایجاد شده است و هر کدام دارای مجموعه‌های همیافتی و بافت‌های مشخص هستند.

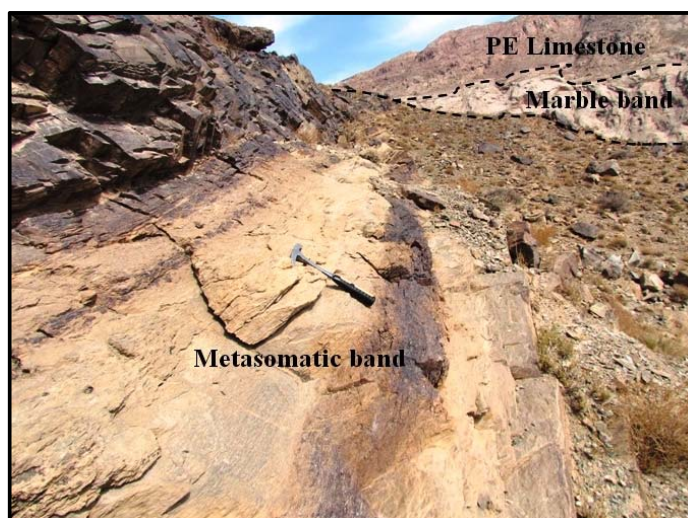
(۱) **مرحله پیش‌رونده:** در این مرحله کانسارسازی صورت نمی‌گیرد و آماده‌سازی زمینه است. همبری ماگما با سنگ آهک باعث تبلور مجدد آنها و تشکیل باندهای مرمری و بروز اسکارن در منطقه شده است (شکل ۳).

هورنبلندهای شکل دار و نیمه‌شکل دار ۱۰ تا ۲۰ درصد و کوارتزهای بی‌شکل ۵ تا ۱۰ درصد کانی‌های اصلی این سنگ را می‌سازند. کانی‌های فرعی شامل بیوتیت، آپاتیت، زیرکن و اسفن هستند (Yari, 2014; Yari et al., 2014).

سنگ‌های نیمه نفوذی

کوارتز دیوریت پورفیری: این سنگ‌ها دارای بافت پورفیری با زمینه میکروگرانولار، پوئی کیلیتیک و گلوپورفیری هستند. پلاژیوکلازهای شکل دار (الیگوکلاز-آندزین) بیشترین حجم فنوکریست‌ها (۶۵ تا ۷۵ درصد) را تشکیل داده و دارای ماکل پریکلین، آلبیتی و منطقه‌بندی هستند. هورنبلند ۱۵ تا ۲۰ درصد، کوارتز به صورت ریزدانه و بی‌شکل در زمینه و همچنین به صورت فنوکریست‌های گرد شده، ۵ تا ۷ درصد و بیوتیت ۱ تا ۲ درصد سنگ را می‌سازند. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، زیرکن و اسفن هستند. کانی‌های ثانویه نیز شامل کانی‌های کدر، کلریت، کانی رسی، کربنات کلسیم و اپیدوت هستند (Yari, 2014; Yari et al., 2014).

دیوریت پورفیری: بافت این سنگ پورفیری با زمینه میکروگرانولار، پوئی کیلیتیک و گلوپورفیری است. دارای زمینه دانه‌ریز متشکل از پلاژیوکلاز، کوارتز و هورنبلند است.

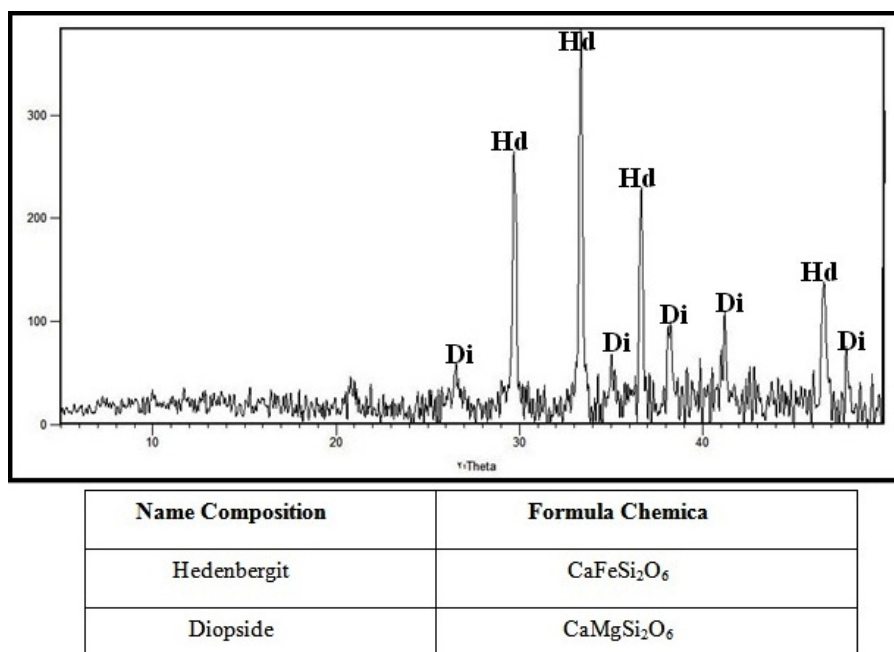


شکل ۳. تشکیل مرمر در مجاورت توده‌های دیوریتی شمال کلاته شب (دید به سمت شرق).

Fig. 3. Marble has formed in the contact of dioritic body of the north of Kalateh Shab area (veiw to the East)

حاوی Mg, Si, Fe با تحرک بالا و حالت نسبتاً اکسند، می‌تواند بروز واکنش‌های کربن‌زدایی و گسترش سیلیکات‌های کلسیمی غنی از آهن نظیر آندرادیت را باعث شود (Einaudi, 1982).

مرحله تشکیل اسکارن: با آماده‌شدن زمینه در مرحله دگرگونی مجاورتی و در ادامه تبلور ماگما، شرایط نهشت کانی‌های سیلیکاتی-کلسیمی بدون آب از جمله گارنت (آندرادیت-گروسولار) و پیروکسن (هدنبرژیت-دیوپسید) (شکل ۴) در منطقه فراهم شده است. ادامه تبلور ماگما و آزادشدن مواد فرار



شکل ۴. نتایج آنالیز XRD نمونه پیروکسن هورنفلس منطقه شمال کلاته‌ش‌ب. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Hd: هدنبرژیت، Di: دیوپسید).

Fig. 4. Results of XRD analysis of pyroxene hornfels of the north of Kalateh Shab area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Hd: Hedenbergite, Di: Diopside).

(شکل ۵-۵A). همچنین در دیوریت پورفیری که در مجاورت با سنگ آهک قرار دارد، تشکیل کانی‌های اکتینولیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کوارتز را می‌توان مشاهده کرد (شکل ۵-۵B).

اگزواسکارن: اگزواسکارن که در درون سنگ کربناته همبر با توده آذرین تشکیل می‌شود، بر اساس کانی‌شناسی سنگ کربناته رده‌بندی می‌شوند. اسکارن‌های کلسیک حاوی کانی‌های سیلیکات کلسیم یا کلسیم-آهن مانند گارنت، پیروکسنوئیدها یا اپیدوکراز هستند. بیشتر ذخایر اقتصادی

کانی‌های اسکارن از نظر مکانی به دو گروه اندواسکارن و اگزواسکارن تقسیم می‌شوند:

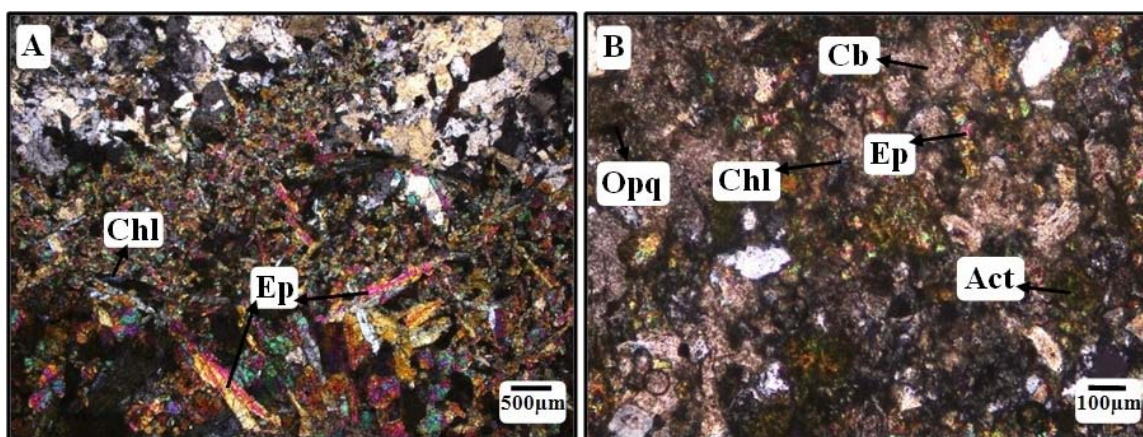
اندواسکارن: اندواسکارن در محل همبری توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با سنگ‌های کربناته و درون توده‌ها تشکیل شده است. سنگ‌های این زون، بافت آذرین خود را حفظ و مقادیر قابل ملاحظه‌ای از کانی‌های شاخص اسکارن از جمله اکتینولیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کوارتز را دارا هستند (شکل ۵). در کوارتز دیوریت منطقه در مجاورت با سنگ‌های کربناته می‌توان با حفظ بافت تشکیل اپیدوت و کلریت را دید

منطقه‌بندی است (شکل ۶). در بین گارنت‌ها می‌توان تشکیل اکتینولیت (شکل ۶-A و B) و روی گارنت جانشینی کلسیت و اپیدوت (شکل ۶-A و C) را مشاهده کرد که نشان‌دهنده مرحله پس‌رونده است. گارنت‌ها از مرکز به سمت حاشیه ناهمگن و دارای زون‌بندی نوسانی هستند (شکل ۶-C و D) و مرز ناگهانی بین زون‌ها که نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در ترکیب شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده است. پس منطقه‌بندی در طی رشد کانی به وجود آمده است. نتایج حاصل از آنالیز XRD ترکیب گارنت را، آندرادیت-گروسولار مشخص کرد (شکل ۷).

اسکارن دنیا در آگزواسکارن‌های کلسیک به وجود می‌آید (Einaudi, 1982). تشکیل آندرادیت در سنگ میزبان آهنی مستلزم اضافه شدن Fe (به صورت FeO , Fe_2O_3 و یا هر دو) است. سیلیس ممکن است توسط سنگ میزبان دیواره و یا سیالات هیدروترمال تأمین شود. واکنش احتمالی (Deer et al., 1992) به صورت زیر است:

$$3CaCO_3 \text{ (calcite)} + Fe_2O_3 \text{ (hematite)} + 3SiO_2 \text{ (quartz)} = Ca_3Fe_2Si_3O_{12} \text{ (andradite)} + 3CO_2$$

گارنت از کانی‌های مهم تشکیل‌شده در زون آگزواسکارن در شمال کلاته‌شب است که به صورت شکل دار و دارای



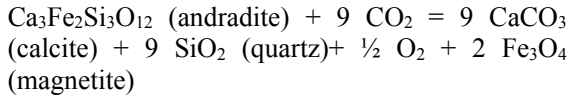
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه‌های اولیه و ثانویه در اندواسکارن منطقه شمال کلاته‌شب با پروتولیت، A: کوارتز دیوریت، B: دیوریت پورفیری با بافت اولیه، تصویر در XPL: Crossed Polarized Light. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Cb: کربنات، Opq: کانی کدر، Act: اکتینولیت).

Fig. 5. Microphotographs of primary and secondary ore minerals in endoskarn of the north of Kalateh Shab area with protolith A: quartz diorite, and B: diorite porphyry with primary texture, image in XPL: Crossed Polarized Light. . Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: Chlorite, Ep: Epidote, Cb: Carbonate mineral, Opq: Opaque mineral, Act: Actinolite).

درجه سانتی‌گراد نسبت‌داد (Zharikov, 1970). در این مرحله سیلیکات‌های کلسیمی بدون آب اسکارن مانند گارنت و پیروکسن در اثر ورود محلول‌های هیدروترمال دما پایین به مجموعه‌ای از سیلیکات‌های آب‌دار مانند اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت، کانی‌های اکسیدی و سولفیدی تبدیل می‌شود. گارنت به کلسیت، کوارتز، هماتیت، اپیدوت، وزوویانیت (ایدوگراز) و کلریت آلتره شده و کلینوپیروکسن تبدیل به

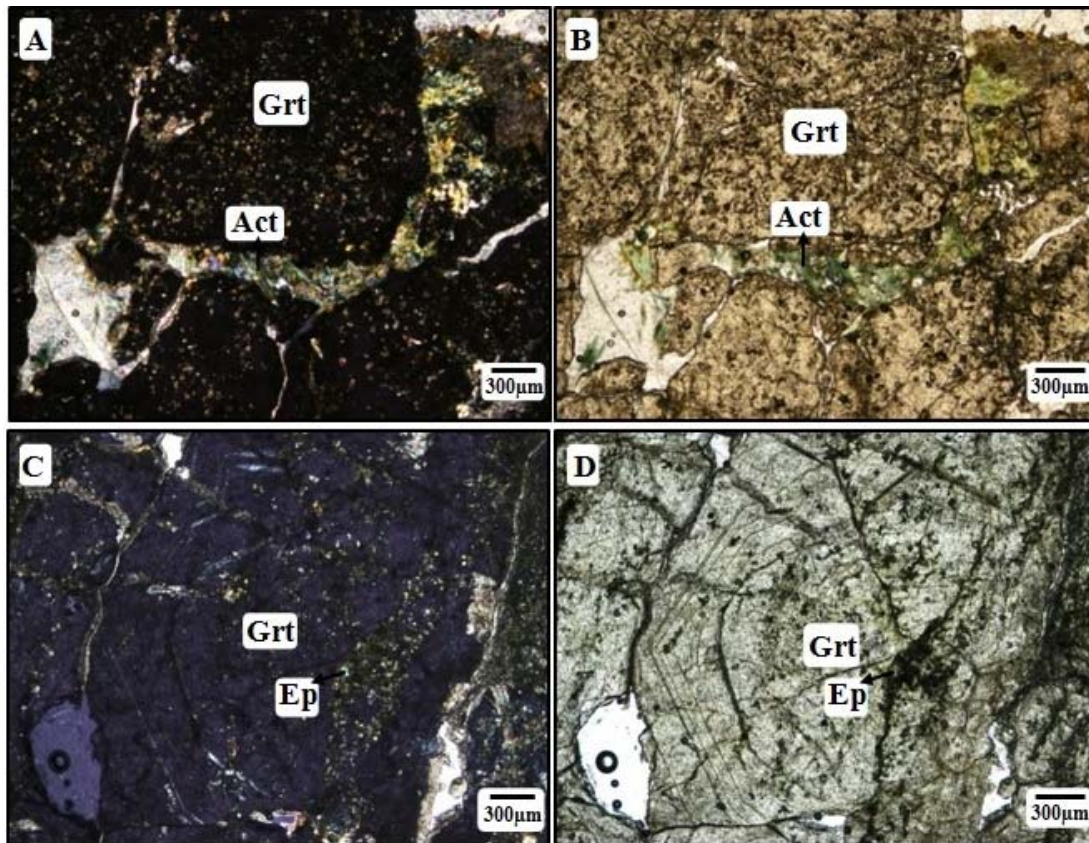
(۲) **مرحله پس‌رونده:** دگرسانی پس‌رونده در بسیاری از ذخایر اسکارنی رایج است (Meinert, 1992) و در برخی از ذخایر ممکن است سیلیکات‌های کلسیم بدون آب پیش‌رونده را کاملاً تخریب کند (James, 1976). این مرحله خود شامل دو مرحله آغازی و تأخیری است:

مرحله پس‌رونده آغازی: شروع دگرگونی پس‌رونده را می‌توان با مجموعه گارنت-اپیدوت به دمایی پایین‌تر از ۴۵۰



در اسکارن کلاته شب جانشینی کانی‌ها را در شکستگی‌ها و حاشیه آندرادیت را در شکل ۸-۸ در نور پلاریزه^۱ و در شکل ۸-۸ در نور طبیعی^۲ می‌توان مشاهده کرد.

آمفیبول (ترمولیت-اکتینولیت)، کلسیت و کوارتز می‌شود. جانشینی کلسیت، کوارتز و مگنتیت به آندرادیت واکنش پس‌رونده مهمی است که در حالت سولفیداسیون نسبتاً پایین، در اسکارن‌های غنی از آندرادیت تشکیل می‌شود که می‌توان به صورت زیر نشان داد (Einaudi, 1982):

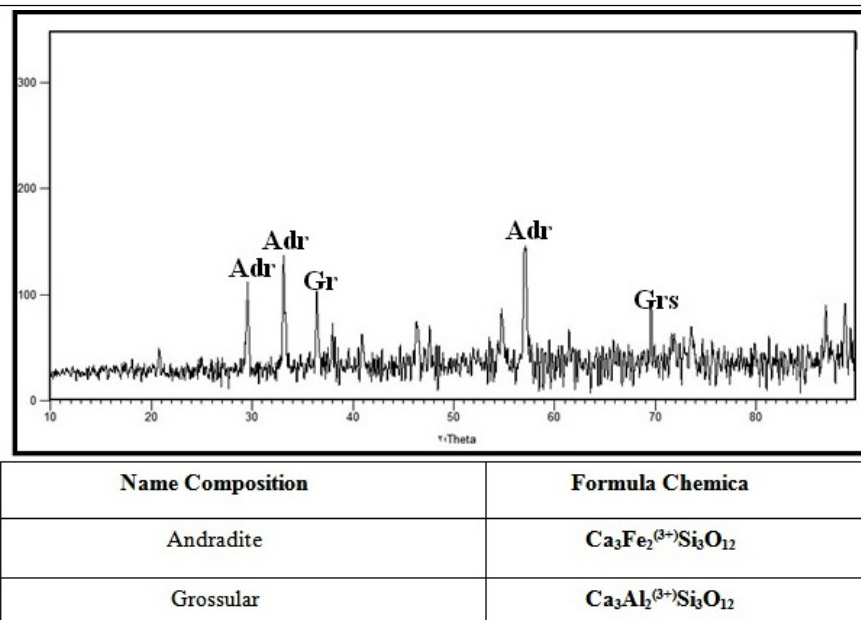


شکل ۶. A: تصویر میکروسکوپی جانشینی کلسیت و اپیدوت روی گارنت و در بین گارنت‌ها حضور اکتینولیت در مرحله پس‌رونده در اسکارن کلاته شب در XPL، B: تصویر میکروسکوپی حضور اکتینولیت در بین گارنت‌ها در مرحله پس‌رونده در اسکارن کلاته شب در PPL، C: جانشینی کلسیت و اپیدوت روی گارنت با منطقه‌بندی در اسکارن کلاته شب در XPL و D: منطقه‌بندی کانی گارنت در اثر تغییرات ناگهانی در ترکیب شیمیایی کانی در اسکارن کلاته شب در PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Grt: گارنت، Act: اکتینولیت، Ep: اپیدوت).

Fig. 6. A: Microphotographs of substitution of calcite and epidote on garnet and presence of actinolite in among garnets in retrograde phase in Kalate Shab skarn in XPL, B: Microphotographs of presence of actinolite in among garnets in retrograde phase in Kalate Shab skarn in PPL, C: Substitution of calcite and epidote on garnet with zoning in Kalate Shab skarn in XPL, and D: Zoning garnet effect sudden changes in mineral composition in Kalate Shab skarn in PPL. (PPL: Plane Polarized Light, XPL: Crossed Polarized Light). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Grt: garnet, Act: actinolite, Ep: epidote).

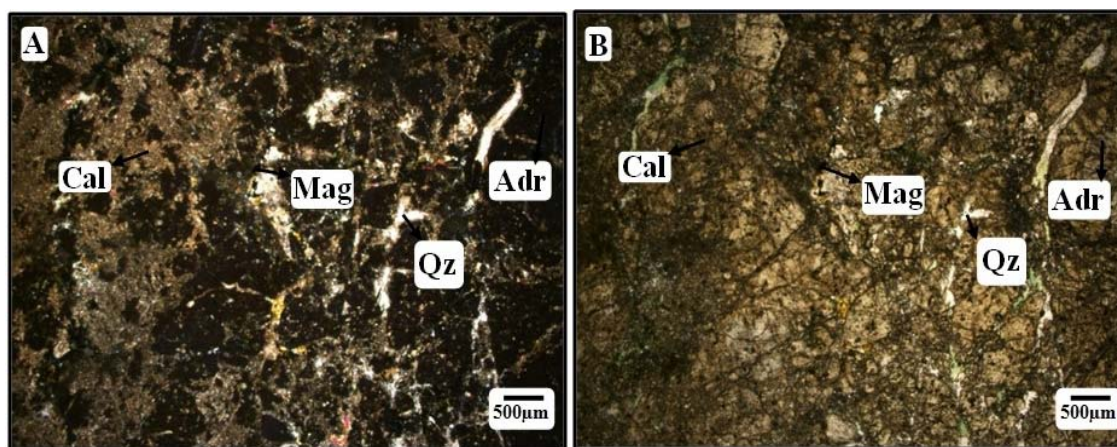
1. XPL

2. PPL



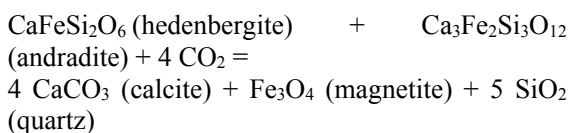
شکل ۷. آنالیز XRD نمونه گارنت اسکارن کلاته شب

Fig. 7. XRD analysis of garnet samples in Kalateh Shab skarn



شکل ۸. A: حضور آندرادیت (گارنت)، مگنتیت، کوارتز و کلسیت در اسکارن شمال کلاته شب در XPL و B: حضور آندرادیت (گارنت)، مگنتیت، کوارتز و کلسیت در اسکارن شمال کلاته شب در PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Adr: آندرادیت، Mag: مگنتیت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت).

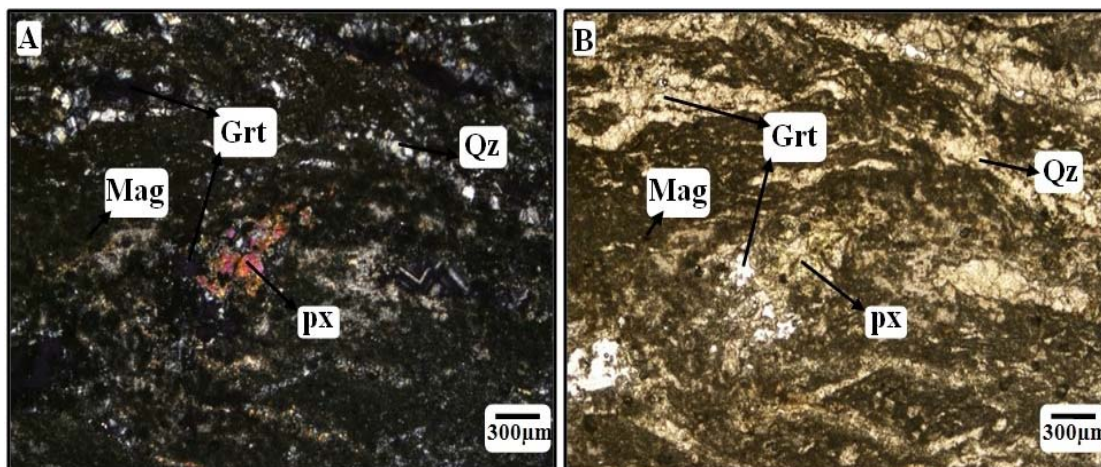
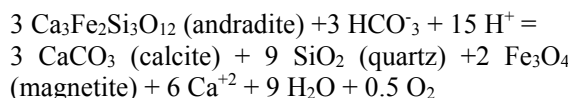
Fig. 8. A: Presence of andradite (garnet), magnetite, quartz and calcite in north of Kalateh Shab skarn in XPL, and B: Presence of andradite (garnet), magnetite, quartz and calcite in north of Kalateh Shab skarn in PPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Adr: andradite, Mag: magnetite, Qz: quartz, Cal: calcite).



حضور آندرادیت و هدنبرژیت با مگنتیت (± کوارتز و کلسیت)
با معادله زیر توجیه پذیر است (Lentz et al., 1995):

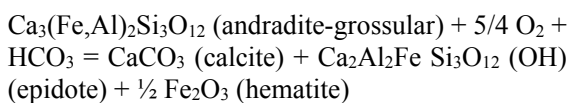
حضور گارنت (آندرادیت) و پیروکسن (هدنبرژیت) با مگنتیت، کوارتز و کلسیت در اسکارن کلاته‌شب با نور پلاریزه در شکل ۹-۸ و حضور این کانی‌ها را در نور طبیعی در شکل ۹-۹ قابل مشاهده است.

واکنش زیر برای جانشینی گارنت بدون تغییرات حجم پیشنهاد می‌شود (Atkinson and Einaudi, 1978):



شکل ۹. A: حضور گارنت، پیروکسن، مگنتیت و کوارتز در اسکارن شمال کلاته‌شب در XPL و B: حضور گارنت، پیروکسن، مگنتیت و کوارتز در اسکارن شمال کلاته‌شب در PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Grt: گارنت، Px: پیروکسن، Mag: مگنتیت، Qz: کوارتز).

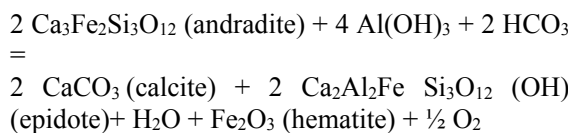
Fig. 9. A: Presence of garnet, pyroxene, magnetite and quartz in of the north of Kalateh Shab skarn in XPL, B. Presence of garnet, pyroxene, magnetite and quartz in of the north of Kalateh Shab skarn in PPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Grt: garnet, Px: pyroxene, Mag: magnetite, Qz: quartz).



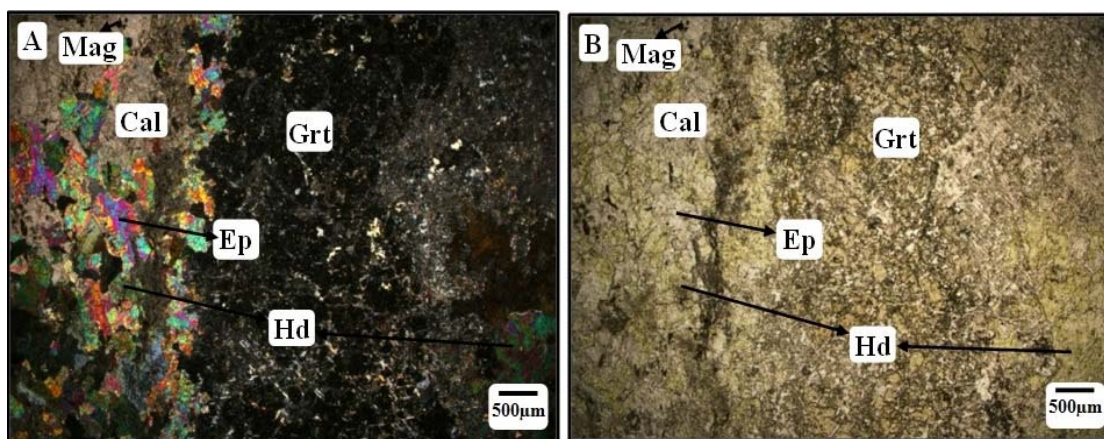
حضور کانی‌های گارنت (آندرادیت-گروسولار (شکل ۷)، کلسیت، اپیدوت و هماتیت را در اسکارن کلاته‌شب با نور پلاریزه در شکل ۱۰-۸ و حضور این کانی‌ها را در نور طبیعی در شکل ۱۰-۹ می‌توان دید.

کانی وزوویانیت (شکل ۱۱) همراه با گارنت، اپیدوت و پیروکسن یافت می‌شوند. در اسکارن کلاته‌شب حضور کانی‌های وزوویانیت، گارنت، اپیدوت و پیروکسن را در نور پلاریزه در شکل ۱۲-۸ و حضور این کانی‌ها را در نور طبیعی در شکل ۱۲-۹ می‌توان مشاهده کرد. نتایج آنالیز XRD حضور این کانی را تأیید کرد (شکل ۱۳) (Yari et al., 2015).

متداول‌ترین محصول آلتراسیون گارنت که تقریباً در تمام اسکارن‌های کلسیک دیده می‌شود، اپیدوت است. این حالت نشان دهنده زون زوئیزیت-اپیدوت اسکارن بر روی زون قدیمی تر گارنت اسکارن است (Berman, 1988).



در این معادله گارنت به صورت آندرادیت خالص (Ad₁₀₀) در نظر گرفته شده؛ ولی از آنجا که گارنت‌های اسکارن منطقه سری آندرادیت-گروسولار (Ad-Gr) است، بنابراین احتمال اضافه شدن Al (که عنصری تقریباً غیرمتحرک است) توسط سیالات هیدروترمال منتفی است و واکنش زیر پیشنهاد می‌شود:



شکل ۱۰. A: گارنت، پیروکسن (هَدنبرژیت)، مگنتیت، اپیدوت و کلسیت در اسکارن شمال کلاته‌شب در XPL و B: گارنت، پیروکسن (هَدنبرژیت)، مگنتیت، اپیدوت و کلسیت در اسکارن شمال کلاته‌شب در PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Grt: گارنت، Hd: هَدنبرژیت، Mag: مگنتیت، Ep: اپیدوت، Cal: کلسیت).

Fig. 10. A: Garnet, pyroxene (hadenbergite), magnetite, epidote and calcite in north of Kalateh Shab skarn in XPL, and B: Garnet, pyroxene (hadenbergite), magnetite, epidote and calcite in north of Kalateh Shab skarn in PPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Grt: garnet, Hd: hadenbergite, Mag: magnetite, Ep: epidote, Cal: calcite).



شکل ۱۱. وزوویانیت با ابعاد درشت در اسکارن شمال کلاته‌شب

Fig. 11. Large crystals of vesuvianite in the north of Kalateh Shab skarn

سیالات است.

مرحله پس‌رونده تاخیری: در این مرحله سیلیکات‌های کلسیمی آبدار و بدون آب تشکیل شده در مراحل قبلی اسکارن‌زایی، توسط سیالات حرارت پایین دچار دگرسانی شده و مجموعه‌های ریزدانه شامل کلریت، کلسیت، کوارتز و

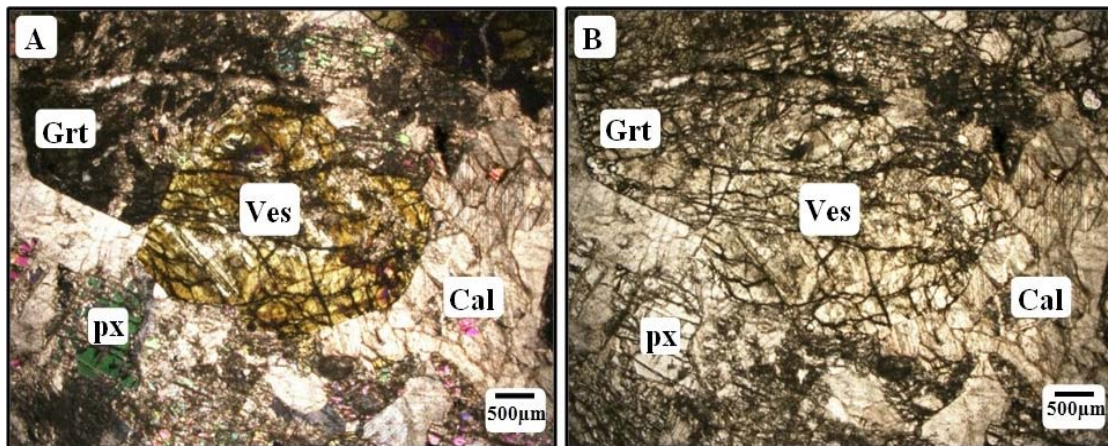
در نتیجه واکنش‌های انجام‌شده در مرحله دگرگونی پس‌رونده، کانی‌های اولیه اسکارن در نهایت باعث جانشینی سیلیکات‌های کلسیمی غنی از کلسیم توسط مجموعه‌ای از سیلیکات‌های آبدار با کلسیم کمتر، اکسیدهای آهن و کرنات‌ها می‌شوند. ته‌نشست کانه‌ها در اثر کاهش درجه حرارت و یا خنثی شدن

$3Al_2(Mg,Fe)_5Si_3O_{10}(OH)$ (chlorite) + $10CaCO_3$ (calcite) + $21SiO_2$ (quartz)

در اسکارن کلاته شب اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت، کلریت، کلسیت، کوارتز را در نور پلاریزه در شکل ۱۴-A و این کانی‌ها را در نور طبیعی در شکل ۱۴-B می‌توان مشاهده کرد.

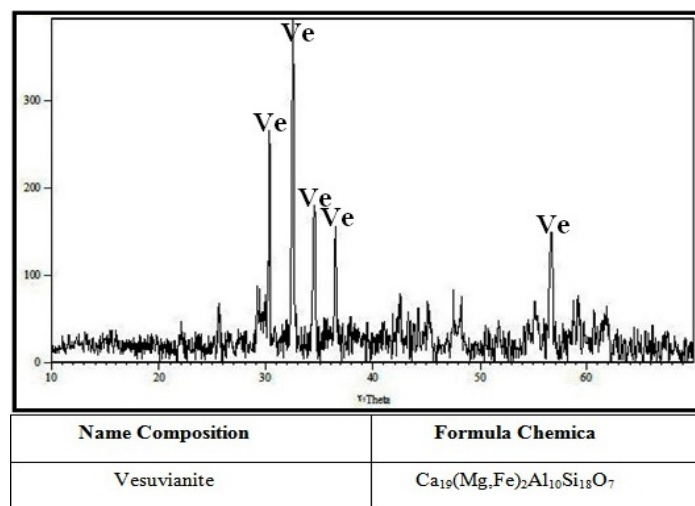
کانی‌های رسی را ایجاد کرده‌اند. این مجموعه نیز بیشتر در شکستگی‌ها جانشین و متمرکز شده است (شکل ۱۴).

$2Ca_2Al_2FeSi_3O_{12}(OH)$ (epidote)
 $+3Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$ (tremolite-actinolite)
 $+10CO_2 + 8H_2O =$



شکل ۱۲. A: حضور وزوویانیت، گارنت، پیروکسن و کلسیت در اسکارن شمال کلاته شب در XPL و B: حضور وزوویانیت، گارنت، پیروکسن و کلسیت در اسکارن شمال کلاته شب در PPL. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ves: وزوویانیت، Grt: گارنت، px: پیروکسن، Cal: کلسیت).

Fig. 12. A: Presence of vesuvianite, garnet, pyroxene and calcite in the north of Kalateh Shab skarn in XPL, B: Presence of vesuvianite, garnet, pyroxene and calcite in the north of Kalateh Shab skarn in PPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ves: vesuvianite, Grt: garnet, px: pyroxene, Cal: calcite).



شکل ۱۳. آنالیز XRD نمونه وزوویانیت اسکارن شمال کلاته شب

Fig. 13. XRD analysis of vesuvianite samples in the north of Kalateh Shab skarn

شیمی کانی

نمایش داده شده است. بر این مبنای نیز ترکیب پیروکسن در

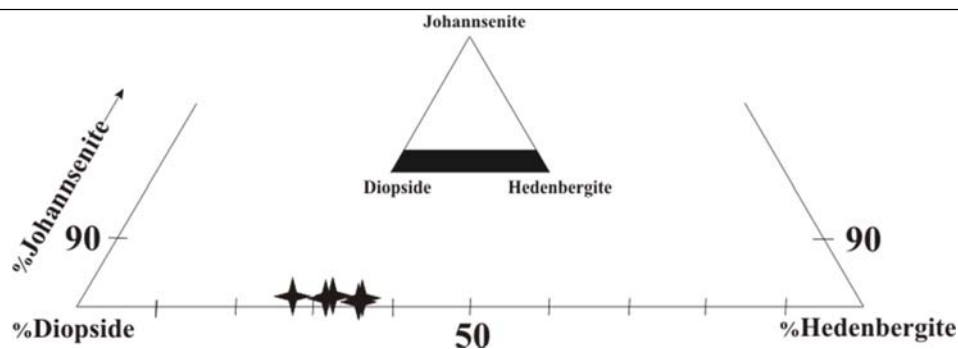
اسکارن از نوع دیوپسید است (شکل ۱۶) (Yari et al., 2017b).

تعداد ۵ نقطه بر روی پیروکسن موجود در اسکارن کلاته‌شب، در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت. نتایج این آنالیز در جدول ۱

جدول ۱. نتایج آنالیز میکروپروب (برحسب درصد وزنی) پیروکسن در اسکارن کلاته‌شب

Table 1. Results of microprob analysis (wt.%) of pyroxene in Kalate Shab skarn

Samples Oxides	72 / 1 .	72 / 2 .	72 / 3 .	72 / 4 .	72 / 5 .
SiO₂	54.65	54.84	54.72	54.97	54.76
TiO₂	0.07	0.12	0.02	0.04	0
Al₂O₃	1.49	0.41	0.4	0.3	0.9
Cr₂O₃	0.02	0.05	0.03	0.05	0.03
FeO	7.44	8.84	9.2	8.64	8.44
MnO	0.3	0.31	0.32	0.32	0.36
MgO	11.17	10.68	9.2	10.26	9.74
CaO	23.83	24.31	24.89	24.26	24.6
Na₂O	0.41	0.35	0.26	0.21	0.25
K₂O	0.01	0	0.01	0	0.01
Totals	99.41	99.92	99.11	99.07	99.11
Cations on the basis of 6 oxygens					
Si	2.063	2.071	2.066	2.075	2.068
Ti	0.002	0.003	0.001	0.001	0
Al	0.066	0.018	0.018	0.013	0.04
Fe⁺³	0	0	0	0	0
Cr⁺³	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe⁺²	0.235	0.279	0.29	0.273	0.267
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.012
Mg	0.629	0.601	0.518	0.577	0.548
Ca	0.964	0.983	1.007	0.981	0.995
Na	0.03	0.026	0.019	0.015	0.018
Diopside	71.998	67.529	63.261	67.108	67.352
Hedenbergite	26.903	31.357	35.489	31.703	32.255
Johannsonite	1.099	1.114	1.250	1.189	1.393

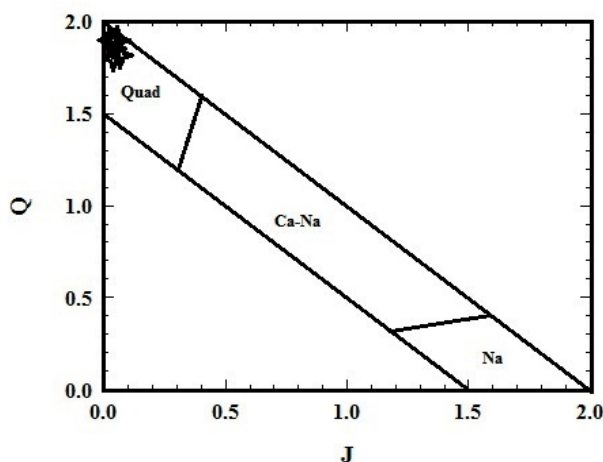


شکل ۱۶. نمایش ترکیب پیروکسن‌های اسکارن کلاته‌شب در نمودار لیک و همکاران (Leake et al., 1997)

Fig. 16. Plot of pyroxene composition in Kalate Shab skarn on the Leake et al., 1997, diagram

پتدونیت) تقسیم می‌شوند. با قرار دادن نمونه‌های تجزیه‌شده بر روی نمودار موریموتو و کی‌تامورا (Morimoto and Kitamura, 1983)، تمام پیروکسن‌ها در محدوده Quad قرار می‌گیرند (شکل ۱۷).

در نمودار ارائه‌شده توسط موریموتو و کی‌تامورا (Morimoto and Kitamura, 1983) پیروکسن‌ها به چهار گروه شامل: پیروکسن‌های $(\text{Quad}) \text{Fe}^{+2} + \text{Mg} + \text{Ca}^{+2}$ ، پیروکسن‌های Na ، پیروکسن‌های $\text{Ca} - \text{Na}$ و سایر پیروکسن‌ها (کانوئیت،



شکل ۱۷. نمایش موقعیت کلینوپيروکسن‌های اسکارن کلاته‌شب در نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988)

Fig. 17. Plot of clinopyroxenes in Kalate Shab skarn on Q-J diagrams (Morimoto et al., 1988)

(Weiblen, 1971)، نشت سیالات در بلورهای گارنت قبلاً تشکیل شده (Whitney et al., 1996)، پدیده تفریق در طول رشد (Atherton, 1968) به وجود آیند. گارنت‌های منطقه با توجه به آنالیز XRD از نوع آندرادایت و گروسولار هستند (Yari, 2014).

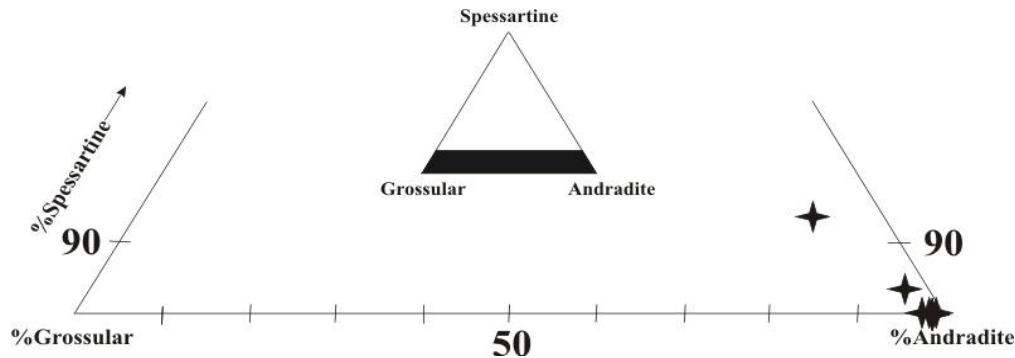
تعداد ۸ نقطه بر روی گارنت‌های اسکارن کلاته‌شب، مورد

$$J = 2\text{Na}, Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}$$

گارنت از کانی‌های مهم تشکیل شده در اسکارن کلاته‌شب است که به صورت شکل دار و دارای منطقه‌بندی است (شکل ۶). ساختمان منطقه‌ای گارنت در سنگ‌های دگرگونی می‌تواند در طی فرایندهای متفاوتی مثل رشد بلور (Hollister, 1966; Blackburn, 1969; Grant and Yardley, 1977)، نشر (Blackburn, 1969; Grant and

سمت حاشیه ناهمگن و دارای زون‌بندی نوسانی هستند و مرز ناگهانی بین زون‌ها نشان‌دهنده تغییرات در ترکیب شیمیایی است. ترکیب شیمیایی گارنت بر اساس آنالیز نقطه‌ای آندرادیت و گروسولار است (شکل ۱۸) (Yari et al., 2017b).

آنالیز نقطه‌ای قرارگرفت (جدول ۲). گارنت طی روند تشکیل مجموعه کالک‌سیلیکات با نفوذ توده پورفیری ایجاد می‌شود. کانی‌های آمفیبول، اپیدوت و اکسید آهن در مرحله دگرسانی قهقرایی گارنت اسکارن مشاهده می‌شود. گارنت‌ها از مرکز به



شکل ۱۸. نمایش ترکیب گارنت‌ها در اسکارن منطقه کلاته‌شب در نمودار لیک و همکاران (Leake et al., 1997)
Fig. 18. Plot of garnets composition in Kalate Shab skarn on the diagram of Leake et al., 1997

سیالات در گیر

مرحله پس‌رونده در دمای بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر انجام می‌شود و در طی آن گارنت به کلسیت، کوارتز، هماتیت، اپیدوت، وزوویانیت و کلریت آلتره می‌شود (Rose and Burt, 1979). بدین منظور از بخش‌های مختلف زون متاسوماتیسم نمونه‌برداری شد و پس از بررسی فازهای کانی‌سازی در نمونه‌های دستی و مقاطع صیقلی، ۳ مقطع دوبرصیقل برای بررسی سیالات در گیر تهیه شد. بررسی سیالات در گیر با استفاده از دماسنجی بر روی ۶۹ سیال کانی‌های کلسیت که بیشتر اولیه بودند، انجام شد (جدول ۳). برای مطالعه پتروگرافی سیالات در گیر منطقه مورد بررسی از میکروسکوپ پلاریزان مدل Linkam در دانشگاه پیام‌نور مشهد استفاده شده است. در این بررسی‌ها نوع و نسبت حجمی فازهای شناخته‌شده در سیالات در گیر، فاز غالب، شکل و ابعاد سیالات در گیر تعیین شد. سیالات در گیر این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی متداول (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985) از نوع دو فازی، مایع-گاز (غنی از فاز مایع) هستند. مشخصات این سیالات در گیر در جدول ۴ آورده شده است.

بررسی اولیه بررسی اسکارن‌ها شامل جمع‌آوری داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی است که می‌تواند ارزیابی شرایط P-T تشکیل اسکارن (با استفاده از روش‌های تجربی و محاسبات تعادلی) را نیز دربرگیرد. بدیهی است این داده‌ها به تنهایی برای تشخیص دما (T) و ترکیب سیال در طی تشکیل اسکارن کافی نیست (Bowman et al., 1985). برای تکمیل بررسی‌های پترولوژیکی و رفع بسیاری از ابهامات لازم است از روش‌های بررسی و مطالعه سیال‌های در گیر و ایزوتوپ‌ها نیز استفاده شود. کانی‌سازی آهن در محدوده شمال روستای کلاته‌شب به‌عنوان کانی‌سازی نوع اسکارن معرفی شده است (Yari, 2014). اطلاعات زیادی در مورد ویژگی‌های سیالات در گیر و دمای همگن شدن این نوع کانسارها ارائه شده است؛ به‌طوری‌که دمای همگن شدن آنها اغلب بین ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها ۲ تا ۶۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است (Wilkinson, 2001). در این پژوهش سیال‌های در گیر اولیه و ثانویه کاذب در زون گارنت در مرحله پس‌رونده اسکارن محدوده شمال کلاته‌شب مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲. نتایج آنالیز میکروپروب (برحسب درصد وزنی) گارنت اسکارن کلاته شب
 Table 2. Results of microprob analysis (wt.%) of garnet in the Kalate Shab skarn

Samples Oxides	80 / 14	80 / 15	80 / 16	80 / 17	80 / 18	80 / 19	80 / 20	80 / 21
SiO ₂	37.65	37.49	37.67	37.6	38.15	37.68	39.36	37.83
TiO ₂	0	0.01	0.01	0	0	0	0.02	0
Al ₂ O ₃	0.09	0.18	0.06	0.05	0.05	0.56	2.31	0.02
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0
FeO	27.75	27.31	27.79	27.81	27.57	26.72	24.51	26.51
MnO	0.23	0.21	0.26	0.2	0.25	0.11	0.55	0.22
MgO	0	0.09	0	0	0.04	0	0	0
CaO	33.24	33.36	33.29	33.58	34.78	33.66	33.6	33.53
Na ₂ O	0.07	0	0.03	0.02	0	0	0.02	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0.01	0
Totals	99.03	98.66	99.11	99.27	100.84	98.73	100.43	98.12
Cations on the basis of 12 Oxygens								
Si	3.360	3.352	3.359	3.349	3.342	3.353	3.378	3.388
Ti	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	0.009	0.019	0.006	0.005	0.005	0.059	0.234	0.002
Cr	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.071	2.042	2.072	2.072	2.020	1.988	1.759	1.986
Mn	0.017	0.016	0.020	0.015	0.019	0.008	0.040	0.017
Mg	0.000	0.012	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	3.178	3.196	3.180	3.205	3.265	3.209	3.090	3.218
Total	8.636	8.638	8.638	8.648	8.655	8.618	8.503	8.611
Fe ³⁺	1.631	1.628	1.634	1.645	1.653	1.588	1.386	1.610
Fe ³⁺ = 0 if Fe ³⁺ < 0	1.631	1.628	1.634	1.645	1.653	1.588	1.386	1.610
Fe ²⁺ = total Fe ²⁺ - Fe ³⁺	0.440	0.414	0.438	0.427	0.367	0.400	0.373	0.376
Fe ³⁺ = total Fe ²⁺ if Fe ³⁺ > total Fe ²⁺	1.631	1.628	1.634	1.645	1.653	1.588	1.386	1.610
Fe ²⁺ = 0 if Fe ³⁺ > total Fe ²⁺	0.440	0.414	0.438	0.427	0.367	0.400	0.373	0.376
Andradite	99.4	98.8	99.6	99.6	99.7	96.4	85.5	99.9
Grossular	0	0	0	0	0	3.2	12.8	0
Pyrope	0	0.5	0	0	0.2	0	0	0
Spessartine	0.6	0.6	0.4	0.3	0.1	0.3	1.6	0.1

جدول ۳. نتایج بررسی سیالات درگیر اسکارن منطقه کلاته‌شب

Table 3. Results of fluid inclusions study in skarn of Kalate Shab area

Samples	Th	TFm	Tm	NaCl%wt	P(Bar)	P(g/cm ³)	dP/dt(bar/°C)
133	171 - 248	-55 - -57.3	-9.5 - -11	13.4 - 14.77	7 - 29	0.935 - 0.996	15.6 - 19.8
80-1	187 - 240	-55 - -57.3	-8.1 - -9.7	11.81 - 13.62	11 - 25	0.931 - 0.982	15.8 - 18.3
45-1	194 - 286	-55 - -57.4	-9.8 - -10.1	12.05 - 14.04	25 - 53	0.884 - 0.931	13.5 - 15.7

جدول ۴. پتروگرافی سیالات درگیر اسکارن منطقه کلاته‌شب

Table 4. Petrography of fluid inclusions in skarn of Kalate Shab area

Filling degree	Diameter μm	Width μm	Length μm	Shape	Dominant phase	Phase	Group
0.8-0.9	1-2	1-2	2-5	Shaped to bug stretched, Triangular, Cone	V+L	V+L	LV
0.8-0.9	1-2	1-2	2-5	Shaped to bug stretched, Triangular	V+L	V+L	LV
0.8-0.9	1-2	1-2	2-5	Amorphous and pulled	V+L	V+L	LV

L: Liquid, V: Vapour

و دمای همگن شدن در محدوده سیستم‌های اسکارنی است (شکل ۲۰). همچنین چگالی سیالات درگیر در محدوده ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی متر مکعب قرار می‌گیرد (شکل ۲۱) (Yari et al., 2017a).

بحث و بررسی

قرارگیری توده‌های دیوریتی در کنار سنگ‌های آهکی باعث ایجاد سنگ‌های دگرگونی و بروز کانی‌های کالک-سیلیکاته و کانی‌زایی آهن به صورت اسکارن در منطقه کلاته‌شب شده است. در این فرایند تبلور ماگما و سیالات گرمابی نقش عمده را به عهده داشته‌اند. با توجه به مشاهدات صحرائی و ویژگی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی، اسکارن آهن کلاته‌شب در دو مرحله تشکیل شده است:

در کلسیت موجود در اسکارن مگنتیتی منطقه (گارت اسکارن و گارت پیروکسن اسکارن) سیال‌های درگیر اولیه و ثانویه فراوان است. سیال‌های درگیر اولیه منعکس‌کننده ترکیب سیال در حین تشکیل فازهای اسکارن هستند.

دمای همگن شدن (Th) فاز بخار سیالات درگیر، ۱۷۱ تا ۲۸۶ با دمای میانگین ۲۲۲ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به دمای درجه ذوب نهایی (T_{fm}) که بین ۵۵- تا ۵۷/۴- درجه سانتی‌گراد است، فازهای نمک موجود از نوع NaCl و KCl، CaCl₂ هستند و شوری سیال بین ۱۱/۸ تا ۱۴/۸ با شوری میانگین ۱۳/۲ درصد وزنی محاسبه شده است.

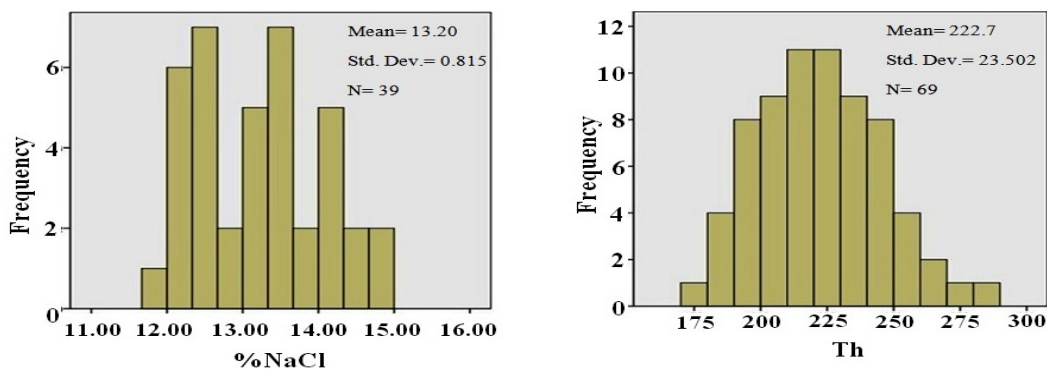
هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن و شوری سیالات درگیر در اسکارن کلاته‌شب، به تفکیک در شکل ۱۹ نشان داده شده است (Yari et al., 2017a).

موقعیت قرارگیری نمونه‌های کلاته‌شب با توجه به درصد شوری

سایر نقاط ایران نیز گزارش شده است. از جمله نفوذ توده گرانیتوئیدی گوزل‌دره به درون سنگ‌های کربناتی سازندهای سلطانیه و باروت (Moghaddasi et al., 2019)، نمونه‌ای از کانی‌سازی آهن به صورت اسکارنی و به شکل توده‌ای و رگه‌ای است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی سیالات درگیر در کلسیت در اسکارن مورد مطالعه، محلول گرمابی متولی واکنش‌های کانی‌زا، دارای دمای میانگین ۲۲۲ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۱۱/۸ تا ۱۴/۸ با شوری میانگین ۱۳/۲ درصد وزنی بوده است. با استفاده از درصد شوری و دمای همگن شدن سیالات درگیر، موقعیت نمونه‌ها در نمودار شوری-درجه حرارت همگن شدن در محدوده اسکارن تعیین شده است (شکل ۲۰) (Yari et al., 2017a). این نمودار توسط ویل کنسن (Wilkinson, 2001) ارائه شده و در آن محل قرارگیری سیال‌های مربوط به کانسارهای مختلف مشخص شده است. شوری کمتر از ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام قرار می‌گیرند و آنها را می‌توان محصول فرایند سرمایه‌ش و کاهش چگالی به‌شمار آورد. به عبارت دیگر، بخار دما بالا با شوری پایین ممکن است کم‌کم از شورابه جدا و به سیالات غنی از بخار یا مایع تکامل یابد (Heinrich et al., 1999; Heinrich, 2005). بعد از جدایش سیالات از ماگما، بخار دما بالا و شوری پایین به سیالات غنی از بخار دما پایین و سیالات آبدار غنی از مایع با شوری پایین تکامل می‌یابد (Zhang et al., 2014). نمودار دمای همگن شدن-شوری به همراه خطوط کنتوری با چگالی ثابت، نموداری است که می‌توان توسط آن چگالی سیال را تعیین کرد (Bodnar, 1983). محدوده چگالی نمونه‌های منطقه کلاته‌شب را ۰/۹ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان می‌دهد (شکل ۲۱).

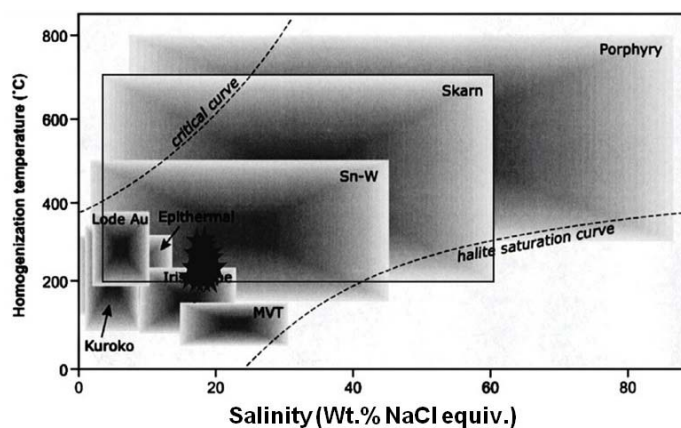
به نظر می‌رسد میزان بالای کلرید در محلول‌های متاسوماتیکی احتمالاً بیشترین کنترل کننده انتقال و ته‌نشست آهن در اسکارن مورد بررسی باشد؛ زیرا این شرایط می‌تواند انجام واکنش با سنگ دیواره و ته‌نشست مگنتیت را تسهیل کند (Meinert, 1995).

۱) نفوذ توده دیوریتی به درون سنگ میزبان کربناته و تشکیل مرمر و کانی‌های سیلیکات کلسیم-منیزیم بدون آب و
 ۲) سرد شدن توده نفوذی همراه با متاسوماتیسم و تشکیل مجموعه‌ای از سیلیکات‌های آب‌دار در اثر ورود محلول‌های هیدروترمال دما پایین، همراه با کانی‌سازی اصلی آهن.
 تراوش سیالات آبی سبب گسترش واکنش‌های دگرگونی به‌خصوص در کربنات‌های هم‌مرز با توده نفوذی می‌شود (Ague, 2002; Ague, 2003). مجموعه کانی‌های خاصی مانند وزوویانیت، گروسولار، ولاستونیت، زوئیزیت و کوارتز معمولاً در سنگ‌های کالک-سیلیکات‌هایی که تحت نفوذ سیالات غنی از آب قرار گرفته‌اند، به وجود می‌آیند (Cartwright and Oliver, 1992). با نفوذ ماگما و همبندی آن با سنگ‌های آهنی، آماده شدن زمینه در مرحله دگرگونی مجاورتی و در شرایط نهشت کانی‌های سیلیکاتی-کلسیمی بدون آب از جمله گارنت (آندرادیت-گروسولار) و پیروکسن (هدنبریت-دیوپسید) در منطقه فراهم شده است. ادامه تبلور ماگما و آزاد شدن مواد فرار حاوی Fe، Si، Mg با تحرک بالا و حالت نسبتاً اکسند، می‌تواند باعث بروز واکنش‌های کربن-زدایی و گسترش سیلیکات‌های کلسیمی غنی از آهن نظیر آندرادیت شود. برهم‌کنش سیالات گرمابی با سنگ‌های کربناته می‌تواند سبب شکل‌گیری معادن اسکارنی با ارزشی شود (Karimzadeh Somarin and Moayyed, 2002; Karimzadeh Somarin, 2004; Mollai et al., 2009). با پایان یافتن تبلور و کاهش دما، دگرگونی پس‌رونده رخ داده و سیلیکات‌های کلسیمی بدون آبی که در مرحله دگرگونی پیش‌رونده تشکیل شده‌اند، از جمله گارنت و پیروکسن، در اثر ورود محلول‌های هیدروترمال دما پایین به مجموعه‌ای از سیلیکات‌های آب‌دار مانند اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت، کانی‌های اکسیدی و سولفیدی تبدیل می‌شود. مهم‌ترین کانی فلزی تشکیل شده در این مرحله مگنتیت است. کانی‌سازی آهن اغلب به شکل توده‌های نامنظم، عدسی و رگه‌ای با خلوص زیاد در اسکارن کلاته‌شب بروز کرده است. بروز چنین پدیده‌ای در



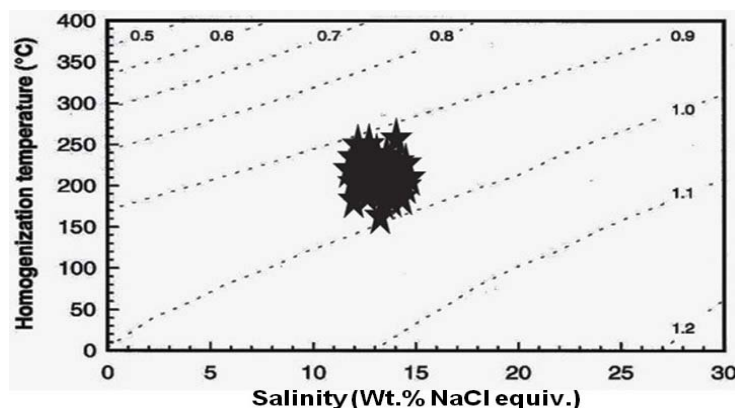
شکل ۱۹. هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدن (Th) و شوری سیالات درگیر (NaCl) در اسکارن کلاته‌شب

Fig. 19. Frequency histogram of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in Kalate Shab



شکل ۲۰. محدوده‌های دما و شوری سیالات درگیر کانسارهای مختلف (Wilkinson, 2001) و نمایش نقاط مربوط به داده‌های سیالات درگیر اسکارن کلاته‌شب

Fig. 20. Temperature and salinity range of fluids inclusion in various deposits (Wilkinson, 2001) and showing points related to the fluid inclusion data in Kalate Shab skarn



شکل ۲۱. چگالی میان‌بار سیالات درگیر اسکارن کلاته‌شب بر حسب g/cm^3 (Bodnar, 1983)

Fig. 21. The density of inclusions in the north of Kalateh Shab skarn in g/cm^3 (Bodnar, 1983)

نتیجه‌گیری

هدنبرژیت هستند. در مرحله پس‌رونده سیلیکات‌های آب‌دار از آلتره‌شدن سیلیکات‌های کلسیمی بدون آب تشکیل می‌شوند که عبارتند از مگنتیت، اپیدوت، وزوویانیت، کلریت، ترمولیت-اکتینولیت، کلسیت و کوارتز. داده‌های میکروترمومتری محدوده کلاته‌شب، شوری و دمای متوسط را نشان می‌دهند. عوامل مؤثر در نهشت آهن در زون اسکارن، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان در مراحل پایانی کانی‌سازی و در نتیجه کاهش درجه حرارت و خنثی شدن سیالات است.

همبری توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با ترکیب دیوریت و کوارتز دیوریت با سنگ‌های آهکی، باعث تشکیل اسکارن در محدوده کلاته‌شب شده است. سنگ‌های دگرگونی منطقه شامل مرمر و اسکارن است که در دو مرحله پیش‌رونده و پس‌رونده ایجاد شده است. در مرحله پیش‌رونده باندهای مرمری و اسکارن تشکیل شده است. در مرحله تشکیل اسکارن کانی‌های سیلیکات کلسیم بدون آب از جمله گارنت و پیروکسن ایجاد شده است. تجزیه شیمیایی کانی‌ها به روش میکروپروب نشان می‌دهد گارنت از نوع آندرادایت و پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید-

References

- Ague, J.J., 2002. Gradients in fluid composition across metacarbonate layers of the Wepawug Schist, Connecticut, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(1): 38–56.
- Ague, J.J., 2003. Fluid infiltration and transport of major, minor and trace elements during regional metamorphism of carbonate rocks, Wepawug Schist, Connecticut, USA. *American Journal of Science*, 303(9): 753–816.
- Atherton, M.P., 1968. The variety ingarnet biotite and chlorite composite in medium grad pelitic rocks from the Dalradian, Scotland, with particular reference to zonation in garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 18(4): 347–371.
- Atkinson, Jr., W.W. and Einaudi, M.T., 1978. Skarn formation and mineralization in the contact aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. *Economic Geology*, 73(7): 1326–1365.
- Berman, R., 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. *Journal of Petrology*, 29(2): 445–522.
- Biabangard, H., Ghanjalipour, R. and Ahmadi, A., 2015. Mineralogy, Paragenesis and the conditions for the formation of Siah kamar Skarn, West of Deh Salm, East of Lut Zone. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(1): 31–42. (in Persian)
- Blackburn, W.H., 1969. Zoned and unzoned garnets from the Grenville Gneisses around Gananoque Ontario. *The Canadian Mineralogist*, 9(5): 691–698.
- Bodnar, R.J., 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties on inclusion fluids. *Economic Geology*, 78(3): 535–542.
- Bowman, J.R., O'Neil, J.R. and Essene, E.J., 1985. Contact skarn formation at Elkhorn, Montana. II Origin and evolution of C-O-H skarn fluids. *American Journal of Science*, 285(7): 621–660.
- Cartwright, I. and Oliver, N.H.S., 1992. Direction of fluid flow during contact metamorphism around the Burstall Granite, Australia. *Journal of the Geological Society*, 149(5): 693–696.
- Deer, W.A., Hawie, R.A. and Zussman, J., 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Longman Scientific and Technical, London, 696 pp.
- Einaudi, M.T., 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons: southwestern North America. In: S.R. Titley (Editor), *Advances in geology of*

- porphyry copper deposits: southwestern North America. University Arizona Press, Tucson, pp. 185–209.
- Grant, J.A. and Weiblen, P.W., 1971. Retrograde zoning in garnet near the end Sillimanite isograd. *American Journal of Science*, 270(4): 281–296.
- Guillou, Y., Maurizot, P. and Villeon H.de la., 1981. Mahrud geological map, Geological map of Iran, 1:100000 series: Sheet 8154. Geological and mineral survey of Iran.
- Heinrich, C.A., 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. *Mineralium Deposita*, 39(8): 864–889.
- Heinrich, C., Günther, D., Audétat, A. and Ulrich, T. and Frischknecht, R., 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27(8): 755–758.
- Hollister, L.S., 1966. Garnet Zoning; An interpretation based on the Rayleigh fractionation model. *Science*, 154(1): 647–651.
- James, A.H., 1976. Zoned alteration in limestone at porphyry copper deposits, Ely, Nevada. *Economic Geology*, 71(2): 488–512.
- Karimzadeh Somarin, A., 2004. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 81(1-3): 47–57. (in Persian with English abstract)
- Karimzadeh Somarin, A. and Moayyed, M., 2002. Granite- and gabbrodiorite skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 20(3–4): 127–138.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W. and Guo, Y., 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(1): 219–246.
- Lentz, D.R., Walker, J.A. and Stirling, J.A.R., 1995. Millstream Cu-Fe skarn deposit: an example of a Cu-bearing magnetite-rich skarn system in northern New Brunswick. *Exploration and Mining Geology*, 4(1):15–31.
- Meinert, L.D., 1992. Skarn and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19(4): 145–162.
- Meinert, L.D., 1995. Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits-Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. In: J.F.H. Thompson (Editor), *Magma, fluids and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada, Canada, pp. 401–418.
- Moghaddasi, S.J., Ebrahimi, M. and Mohammadi, F., 2019. Mineralogy, geochemistry and genesis of the Gozaldarreh iron skarn deposit, southeast Zanzan. *Journal of Economic Geology*, 11(1): 33–55. (in Persian with English abstract)
- Mollai, H., Yaghubpur, A.M. and Sharifiyan Attar, R., 2009. Geology and geochemistry of skarn deposits in the northern part of Ahar batholith, East Azarbaijan, NW Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 1(1): 15–34.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of Pyroxene. *Bulletin de Mineralogie*, 111(5): 535–550.
- Morimoto, N. and Kitamura, M., 1983. Q-J diagram for classification of pyroxene. *The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, 78: 141.
- Nakhaei, M., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Heydariyan, M.R. and Zarrinkoub, M.H., 2013. Petrography and geochemistry of intrusive-subvolcanic bodies and their association with iron mineralization in Bisheh area (East Iran, South of Birjand). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 21(3): 457–470. (in Persian)
- Nakhaei, M., Mazaheri, S.A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S. and Heydariyan, M.R., 2015. Geochronologic, geochemical and isotopic constraints on petrogenesis of dioritic rocks associated with Fe skarn in Bisheh area, Eastern Iran. *Arabian Journal of*

- Geosciences, 8(10): 8481–8495.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y. and Lo, C.H., 2013. Eocene– Oligocene post– collisional magmatism in the Lut– Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180: 234–251.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.H. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, Virginia, pp. 337–360.
- Rose, A.W. and Burt, D.M., 1979. Hydrothermal alteration, In: H.L. Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 173–235.
- Saadat, S., 2016. Geology, Geochemistry and Ground Magnetic Survey on Kalateh Naser Iron Ore Deposit, Khorasan Jonoubi Province. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 593–607. (in Persian with English abstract)
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Glasgow and London (Blackie), New York, 239 pp.
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R.J. and Comp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134–140.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Whitney, D.L., Mechum, T.A., Dilek, Y. and Kuehner, S.M., 1996. Modification of garnet by fluid infiltration during regional metamorphism in garnet through sillimanite-zone rocks. *American Mineralogist*, 81(5–6): 696–706.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Yardley, B.W.D., 1977. An empirical study of diffusion in garnet. *American Mineralogist*. 62(7–8): 793–800.
- Yari, F., 2014. Petrography and geochemistry of subvolcanic rocks related to skarn in north kalate shab area (North of Doroh, east of southern Khorasan province). M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 124 pp.
- Yari, F., Zarrinkoub, M.H. and Miri Bidokht, R., 2017a. Fluids Inclusion Study on Kalate Shab Skarn (North of Doroh, East of Sarbisheh). 9th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Birjand, Birjand, Iran.
- Yari, F., Zarrinkoub, M.H. and Mohammadi, S.S., 2014. Petrography and Mineralogy of Intrusive and subvolcanic rocks related to skarn in north kalate shab area (North of Doroh, South of Gazik). 6th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Zahedan, Zahedan, Iran.
- Yari, F., Zarrinkoub, M.H. and Mohammadi, S.S., 2015. Semi-precious gem stones in Kalated Shab iron skarn, north Doroh, Southern Khorasan. 23th Symposium of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, University of Damghan, Damghan, Iran.
- Yari, F., Zarrinkoub, M.H. and Mohammadi, S.S., 2016. Skarnification in North Kalateh shab (North of Doroh, East of Sarbisheh). 2th National Conference of Geology and Exploration of Resources, Conference Center for Scientific Conferences, Shiraz, Iran.
- Yari, F., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S. and Mahdavi, A., 2017b. Petrography and Chemistry of Skarn Minerals in kalate shab (North of Doroh, East of Sarbisheh). 9th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Birjand, Birjand, Iran.
- Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Chung, S.L. and Mohammadi, S.S., 2012. Analysis of the development of Cenozoic magmatism in the eastern part of Iran (northern part of Sistan structural state). Research Project, University of Birjand, Birjand, Iran, 115 pp. (in Persian)
- Zarrinkoub, M.H., Ketabi, P., Shiva, M. and Askari, M., 2011. Mineralogy of Haj-Elyas iron deposit, northwest of Nehbandan, East of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 19(1): 73–82. (in Persian)
- Zhang, H.D., Zhang, H.F., Santosh, M. and Li, S.R., 2014. Fluid inclusions from the Jinchang Cu–Au deposit, Heilongjiang Province, NE China: Genetic style and magmatic-hydrothermal evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 82(12): 103–114.
- Zharikov, V.A., 1970. Skarns (Part 1). *International Geology Review*, 12(5): 541–559.



Geology, petrography, mineral chemistry and fluids inclusion of the Kalate Shab iron skarn (East of Sarbisheh, Southern Khorasan)

Fatemeh Yari*, Mohammad Hossein Zarrinkoub and Seyyed Saeid Mohammadi

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Submitted: Dec. 24, 2018

Accepted: Apr. 22, 2020

Keywords: *mineral chemistry, Geothermometry, skarn, Kalate Shab, Sarbisheh, Sistan suture zone*

Introduction

Extensive Eocene–Oligocene magmatic rocks in the Lut–Sistan region, eastern Iran crop out as a huge magmatic province (Pang et al., 2013). Skarnification in Paleocene–Eocene limestones in the Sistan suture zone is very popular (e.g. Nakhaei et al., 2013; Nakhaei et al., 2015; Zarrinkoub et al., 2011) and the Kalate Shab skarn is one of them. Geological and geochemical studies and the results of magnetic measurements in the area of interest and its applicability in exploration of other potential iron deposits in the neighboring areas (Saadat, 2016) are of interest. Metamorphic (the Siah Kamar Skarn) edge of the Mount Rigi granitoid intrusion is calcium type (Biabangard et al., 2015). This skarn is located 105 kilometers east of Sarbisheh, north of the Kalate Shab village. This area is a part of 1: 100,000 geological map of Mahirud (Guillou et al., 1981), with 60° 31' to 60° 35' longitudes, and 32° 21' to 32° 26' latitudes, in the southern Khorasan province (Figure 1), and in the northern part of the Sistan suture zone (Tirrul et al., 1983) in the east of Iran. The Sistan suture zone represents a deformed accretionary prism that was emplaced during the destruction of a small Neotethyan ocean basin, referred to as the Sistan Ocean, which once separated the Lut and Afghan continental blocks from each other (Tirrul et al., 1983). Late Cretaceous adakitic granodiorites and Early Eocene A-type granites have been emplaced in the suture (Zarrinkoub et al., 2012). This was followed by widespread Eocene–Oligocene calc-alkaline volcanic activity in the suture zone and to the west in the Lut block (Pang et al., 2013). Oligomiocene intrusive and sub volcanic bodies

(Guillou et al., 1981) have intruded into the sedimentary units and caused skarnification in the north of the Kalate Shab.

Materials and methods

This study was done based on 140 thin sections, 1 polished section and 5 polished thin sections with 3 XRD analysis at the University of Birjand laboratory. 3 samples for fluid inclusions have been studied in the laboratory of the Payame Noor University of Mashhad. Microprobe analysis on 4 samples have been done at the Laboratory of Iran Mineral Processing Research Center.

Results

Intrusive and sub volcanic bodies with composition of diorite and quartz diorite have intruded into limestone and have produced Fe skarn in the Kalate Shab area. Mineralogical evidence suggests two stages of progressive and retrograde metamorphism in the region. Microprobe analysis of minerals in the skarn zone shows that garnets are andradite and pyroxene is of diopside-hedenbergite type. Average salinity and temperature of fluid based on micro thermometric data in the Kalate Shab are 13.2 wt% and 222°C, respectively. Magmatic and meteoric waters mixing and chemical changes in carbonate host rock are the main factors for genesis of Fe deposit.

Discussion

An intermediate magma has intruded into the Paleocene–Eocene limestone, and has caused Fe-skarnification in the Kalate Shab region. The intrusive and sub volcanic rocks are diorite, quartz

*Corresponding author Email: f_yari@birjand.ac.ir

diorite, porphyritic quartz diorite and porphyritic diorite. Skarnification has occurred as exo skarn with pyroxene, garnet, idocrase, epidote and magnetite minerals. Pyroxenes are diopside-hedenbergite type and garnets are andradite based on EPMA and XRD analyses. Micro thermometric data in the Kalate Shab skarn show temperatures ranging from 171 to 286 ° C and salinity from 11.81 to 14.77%. Petrological studies show that the magnetite formation has occurred in the final stage of skarnification.

Acknowledgements

We thank Dr. Rouhollah Miri Bidokht and Dr. Amir Mahdavi for their consulting in microthermometry studies.

References

- Biabangard, H., Ghanjalipour, R. and Ahmadi, A., 2015. Mineralogy, Paragenesis and the conditions for the formation of Siah kamar Skarn, West of Deh Salm, East of Lut Zone. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(1): 31–42. (in Persian)
- Guillou, Y., Maurizot, P. and Villeon H.de la., 1981. Mahrud geological map, Geological map of Iran, 1:100000 series: Sheet 8154. Geological and mineral survey of Iran.
- Nakhaei, M., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Heydariyan, M.R. and Zarrinkoub, M.H., 2013. Petrography and geochemistry of intrusive-subvolcanic bodies and their association with iron mineralization in Bisheh area (East Iran, South of Birjand). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 21(3): 457–470. (in Persian)
- Nakhaei, M., Mazaheri, S.A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S. and Heydariyan, M.R., 2015. Geochronologic, geochemical and isotopic constraints on petrogenesis of dioritic rocks associated with Fe skarn in Bisheh area, Eastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10): 8481–8495.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y. and Lo, C.H., 2013. Eocene– Oligocene post– collisional magmatism in the Lut– Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180: 234–251.
- Saadat, S., 2016. Geology, Geochemistry and Ground Magnetic Survey on Kalateh Naser Iron Ore Deposit, Khorasan Jonoubi Province. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 593–607. (in Persian with English abstract)
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R.J. and Comp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134–140.
- Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Chung, S.L. and Mohammadi, S.S., 2012. Analysis of the development of Cenozoic magmatism in the eastern part of Iran (northern part of Sistan structural state). Research Project, University of Birjand, Birjand, Iran, 115 pp. (in Persian)
- Zarrinkoub, M.H., Ketabi, P., Shiva, M. and Askari, M., 2011. Mineralogy of Haj-Elyas iron deposit, northwest of Nehbandan, East of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 19(1): 73–82. (in Persian)