



سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و سنگ‌زایی اسکارن پناهکوه، غرب یزد

اعظم زاهدی*، محمد بومری

بخش زمین‌شناسی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۱۹، نسخه نهایی: ۹۱/۳/۲۵)

چکیده: اسکارن پناهکوه در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر تفت در استان یزد واقع شده است. نفوذ استوک پناهکوه با ترکیب گرانودیوریت-کوارتز دیوریت در سازند آهکی جمال، منجر به رخداد اسکارن‌زایی در منطقه شده است. مشاهدات صحرایی و کانی-شناسی نشان می‌دهد که اسکارن پناهکوه شامل دو زون درون اسکارن و برون اسکارن است. برون اسکارن از نوع اسکارن کلسیمی و منیزیمی بوده که در همبری با مرمرها تشکیل شده است، در حالی که درون اسکارن با گسترش محدودی در توده‌ی نفوذی تشکیل شده است. کانی‌های غالب در اسکارن کلسیمی شامل گارنت (آندرادیت) و پیروکسن (دیوپسید-هدنبرژیت) و در اسکارن منیزیمی شامل فورستریت، دیوپسید، سرپانتین و تالک است. حداقل دو مرحله‌ی پاراژنتیکی در شکل‌گیری اسکارن پناهکوه تشخیص داده شده است: در تشکیل اسکارن اولیه (مرحله‌ی اول) کانی‌هایی بی‌آب نظیر پیروکسن و گارنت در اسکارن کلسیمی و فورستریت و دیوپسید در اسکارن منیزیمی غالب است. با توجه به مجموعه کانیایی تشکیل شده در این مرحله می‌توان دمایی کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را برای رخداد اسکارنی شدن بیان کرد. در مرحله‌ی دوم مجموعه اسکارنی اولیه تشکیل شده به وسیله‌ی مجموعه اسکارنی آبدار نظیر سرپانتین و تالک، جایگزین شده است. کانی‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی اسکارن پناهکوه نشان‌دهنده‌ی شکل‌گیری آن در شرایط اکسایشی، سطوح پوسته‌ای کم عمق و مشابه شرایط تشکیل سیستم‌های اسکارنی آهن است.

واژه‌های کلیدی: اسکارن؛ سنگ‌نگاری سنگ‌زایی؛ زمین‌شیمی؛ پناهکوه؛ یزد.

مقدمه

است به طوری که چندین ذخیره مس و آهن به صورت اسکارن - پورفیری، پورفیری و رگه‌ای چند فلزی در منطقه گزارش شده است [۲]. سنگ‌های گرانیتوئیدی به سن الیگومیوسن باعث تشکیل ذخایر اسکارنی گسترده در جنوب غرب یزد شده است که اسکارن پناهکوه از آن جمله است. اسکارن‌زایی یک از مهم‌ترین رخداد‌های زمین‌شناسی در منطقه‌ی مورد بررسی است.

بررسی‌های کانی‌شناختی ابزاری مهم در تشخیص و تعیین انواع اسکارن‌هاست. همچنین کانی‌شناسی یک عامل مهم برای

منطقه‌ی پناهکوه در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر تفت و در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضراباد در چهارگوش آباد واقع شده است. منطقه‌ی غرب یزد از لحاظ تنوع زمین‌شناسی و گسترش کانه‌زایی اسکارن، یکی از مناطقی محسوب می‌شود که همواره مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های زراسوندی و همکاران [۱] وجود باتولیت گرانیتی شیرکوه، توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن (۳۰-۱۶ میلیون سال) و گنبد‌های آتشفشانی نئوژن بر اهمیت این منطقه افزوده

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۷۷۰۳۳۷۲۴، پست الکترونیکی: Zahedi.geochemistry@gmail.com

ترشباری است (شکل ۱) که به وسیله سنگ‌های نفوذی قطع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه، شامل سازند کهر و دولومیت سلطانیه است که پی‌سنگ منطقه را تشکیل می‌دهد. جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناختی منطقه را آبرفت‌ها، کنگلومرا و نیز تراورتن‌های عهد حاضر که هم‌اکنون از چشمه‌های تراورتن ساز در حال نهشته شدن است، تشکیل می‌دهد. ائوسن در این منطقه با تشکیل کنگلومرای کرمان شروع می‌شود و سپس با خروج سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در راستای گسل دهشیر- بافت ادامه می‌یابد. این واحدهای آتشفشانی به وسیله گرانیتوئیدهای الیگومیوسن قطع شده است. گنبد آتشفشانی نئوژن در شرق منطقه مهم‌ترین آتشفشان نئوژن را تشکیل داده است [۴] که نفوذ گرماب‌های حاصل از آن سبب کانه‌زایی مس- آهن در دولومیت‌های سازند سلطانیه شده است [۲].

گرانیتوئید پناهکوه با سن الیگومیوسن بخشی از توده‌های آذرین در کمربند ماگمایی - ارومیه دختر است که در راستای گسل اصلی دهشیر- بافت طی فاز کوهزایی آلپین در دوره الیگومیوسن ظاهر شده است، بنابراین گسل اصلی دهشیر- بافت و گسل‌های فرعی حاصل از آن نظیر گسل میل سفید در جایگیری و تبلور توده آذرین در منطقه پناهکوه نقش اساسی داشته است. بررسی‌های زمین‌شیمیایی توسط شریفی [۲] نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی منطقه پناهکوه دارای ویژگی‌های یک ماگمای پتاسیم-قلیایی کلسیمی بالا و آلومینیم متوسط تا پر آلومینیمی نوع I است که در یک محیط زمین-ساختی ماگمایی مرتبط با کمان‌های آتشفشانی و همزمان با برخورد شکل گرفته است.

بررسی‌های سنگ نگاری

توده‌های نفوذی

واحد گرانیتوئیدی پناهکوه به صورت درشت دانه تا میان دانه به رنگ خاکستری بوده و کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت در آن قابل مشاهده است. مشاهدات سنگ‌نگاری گرانیتوئیدهای منطقه پناهکوه نشان می‌دهد که این دسته از گرانیتوئیدها دارای تنوع ترکیبی بوده است. بر اساس بررسی‌های کانی شناسی به روش مدال، متداول‌ترین سنگ‌های پلوتونیک شناخته شده در گرانیتوئید پناهکوه شامل تونالیت،

پی بردن به خاستگاه اسکارن‌ها، دمای تشکیل و تشخیص کانی‌های با ارزش اقتصادی است. اسکارن آهن پناهکوه در اثر نفوذ استوک گرانیتوئیدی الیگومیوسن به درون سازند آهکی جمال (پرمین) تشکیل شده است. این اسکارن شامل دو زون درون اسکارن و برون اسکارن است. درون اسکارن با گسترش محدودی در سنگ‌های آپلیتی تشکیل شده است در حالی که برون اسکارن شامل دو زون اسکارن کلسیمی و منیزیمی بوده و در همبری با مرمرها تشکیل شده است. در این مقاله سعی شده است تا ضمن جدایش زون‌های اسکارنی، با استفاده از مجموعه کانیایی تشکیل شده در فرایند اسکارن‌زایی و شواهد زمین‌شیمیایی، به شرایط فیزیکوشیمیایی و دمای تشکیل اسکارن در منطقه پناهکوه پی برد.

روش بررسی

بررسی‌های انجام شده روی اسکارن‌های منطقه پناهکوه، شامل بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و نیز بررسی‌های زمین-شیمیایی (ریزپردازش الکترونی) می‌شوند. پس از بررسی‌های دقیق صحرایی به منظور کانی‌شناسی ۵۰ نمونه از سنگ‌های آذرین و اسکارنی برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و تهیه مقاطع نازک-سیقلی انتخاب شدند. آنالیزهای ریزپردازش الکترونی روی کانی‌های گارنت، پیروکسن و اولیوین با ابر کاوشگر خودکار مدل JEOL. JXA-8600 با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلووات و جریان تابشی 2×10^{-8} amp در بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن انجام شد.

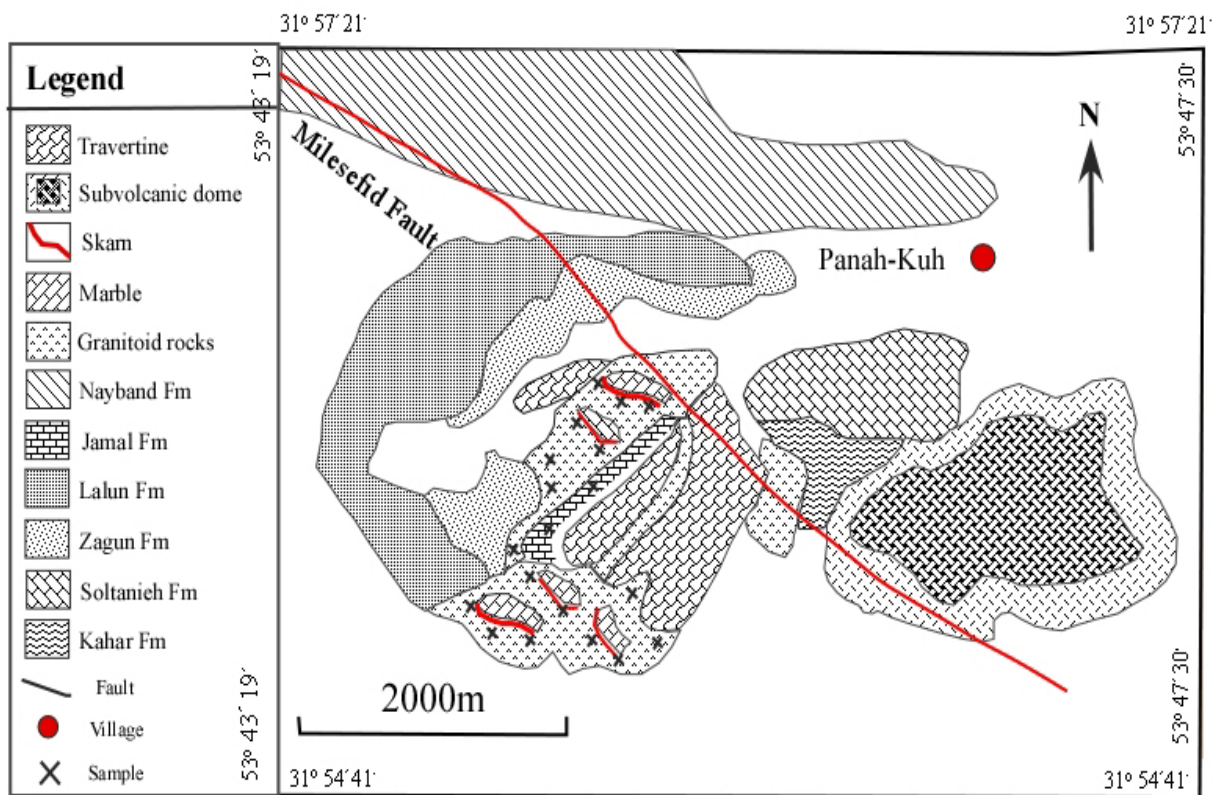
بحث و بررسی

زمین شناسی منطقه

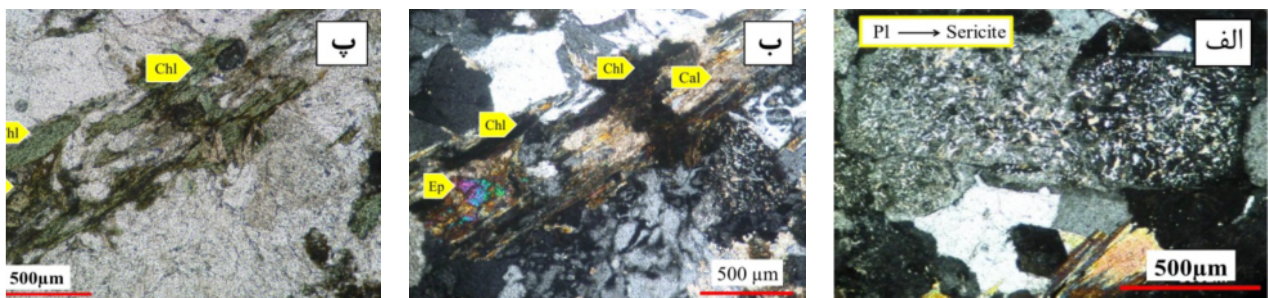
کانسار اسکارن پناهکوه در شمال غرب شهرستان تفت (استان یزد) واقع شده و از نظر جایگاه زمین‌ساختی در زون ساختاری ایران مرکزی و کمربند ماگمایی ارومیه - دختر قرار دارد [۳] منطقه پناهکوه از نظر زمین‌ساختی تحت تاثیر گسل بزرگ دهشیر - بافت و شاخه‌های فرعی حاصل از آن نظیر گسل میل سفید واقع شده است. این گسل، تمام واحدهای سنگی را تحت تاثیر قرار داده و سبب جابه‌جایی و ایجاد درز و شکاف در این سازندها شده است [۲]. به طور کلی منطقه مورد بررسی متشکل از طیف گسترده‌ای از واحدهای رسوبی پرکامبرین تا

پلاژیوکلاز است که در نتیجه آن پلاژیوکلاز به مجموعه‌ای از کلریت، اپیدوت، اکتینولیت و کلسیت تبدیل شده است (شکل ب، پ-۲). فراوانی هورنبلند در این نوع گرانیتوئیدها نشان می‌دهد که ماگمای تشکیل دهنده‌ی آنها آبدار و با حداقل فشار بخار ماگما ۴٪ بوده است [۵]. حضور مقادیر قابل توجهی از کانی‌های فرعی نظیر، بلورهای شکل‌دار اسفن، مگنتیت و مقادیر ناچیز ایلمنیت بیانگر شرایط اکسایشی در شکل‌گیری ماگمایی گرانیتوئید پناهکوه است.

گرانودیوریت (گرانودیوریت هورنبلنددار و گرانودیوریت بیوتیت-دار)، گرانودیوریت پورفیری و آپلیت است. بافت غالب این سنگ‌ها دانه‌ای بوده و کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی آن شامل کوارتز (۲۰-۳۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۳۰-۴۰ درصد) و فلدسپار قلیایی (۱۵-۱۰ درصد) است. سریسیتی شدن در بعضی از نمونه‌ها به قدری شدید است که تمام بلور پلاژیوکلاز را در بر گرفته است و تنها قالبی از آن باقی مانده است (شکل الف-۲). دگرسانی پروپیلیتی یکی دیگر از دگرسانی‌های شاخص



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه پناهکوه واقع در غرب استان یزد بر اساس مطالعات صحرایی و استفاده از عکس‌های هوایی (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضراًباد با تغییرات).



شکل ۲ الف: دگرسانی کامل پلاژیوکلاز به سریسیت در گرانودیوریت‌های منطقه‌ی پناهکوه - ب و پ دگرسانی پلاژیوکلاز به کانی‌های کلریت، اپیدوت، اسفن و کلسیت در نتیجه‌ی دگرسانی پروپیلیتی (ب: نیکل عمود ج: نیکل موازی).

دگرگونی و اسکارن‌زایی در منطقه پناهکوه

در نتیجه جایگزینی توده‌های گرانیتوئیدی در منطقه پناهکوه، سنگ‌های مجاور آن دستخوش دگرگونی مجاورتی شده‌اند. در نتیجه‌ی فرایند دگرگونی، سنگ‌های شیلی، ماسه‌سنگی و آهکی سازند نایبند به ترتیب به هورنفلس، کوارتزیت و مرمر تبدیل شده است. نفوذ توده‌ی گرانیتوئیدی پناهکوه به داخل سازند آهکی جمال، باعث پیدایش اسکارن کلسیمی و منیزیمی در منطقه شده است. زون‌بندی دگرگونی، کانه‌زایی و دگرسانی در این منطقه دیده می‌شود، به طوری که در همبری توده‌ی نفوذی یک نوار باریک درون اسکارن به ضخامت ۵ متر شکل گرفته است، سپس زون برون اسکارن متشکل از اسکارن کلسیمی و منیزیمی در حاشیه‌ی توده‌ی نفوذی قرار دارد و در نهایت واحدهای مرمریتی فاقد کانه‌زایی ظاهر می‌شود (شکل ۳). گسترش طولی زون برون اسکارن تقریباً ۲۰۰ متر بود که بین لایه‌های آهکی دارای ضخامت‌های متغیر بوده و ضخامت تقریبی ۳۰ تا ۴۰ متر را تشکیل می‌دهد. اسکارن منیزیمی دارای ضخامت تقریبی اندک بوده و به صورت رگچه‌ای واحدهای مرمریتی را قطع کرده است. برون اسکارن مهمترین زون اسکارنی در منطقه پناهکوه است که از توده‌ی نفوذی به سمت آهک جمال دارای منطقه‌بندی است و به صورت گارنت اسکارن، گارنت-پیروکسن اسکارن و مرمر فورستریت‌دار (اسکارن منیزیمی) دیده می‌شود. در زیر به شرح این زون‌های اسکارنی می‌پردازیم.

زون درون اسکارن

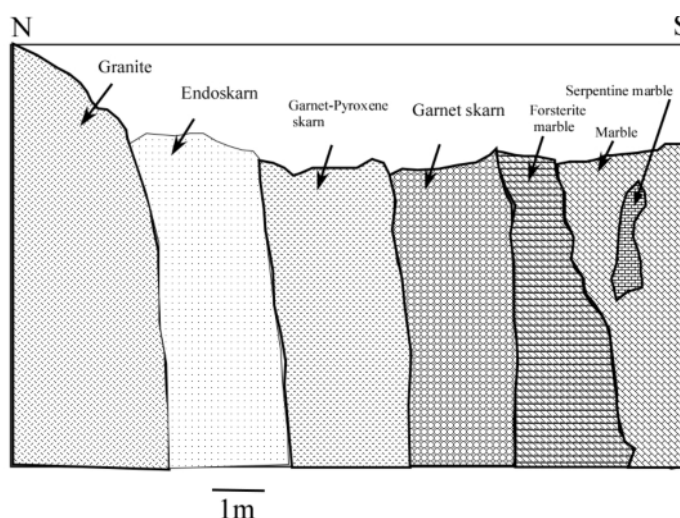
در منطقه‌ی پناهکوه، درون اسکارن در سنگ‌های آپلیتی

تشکیل شده است که متشکل از کانی‌های کوارتز، ارتوز پرتیتی و آمفیبول است. بر اساس مشاهدات صحرایی، این زون با تغییر رنگ سبز در حاشیه‌ی گرانیتوئید پناهکوه قابل تشخیص است. گسترش سطحی این زون محدود به حاشیه‌ی توده نفوذی بوده و رنگ سبز آن به دلیل دگرسانی پروپیلیتی در نتیجه تشکیل کانی‌های اپیدوت، اکتینولیت و کلریت است.

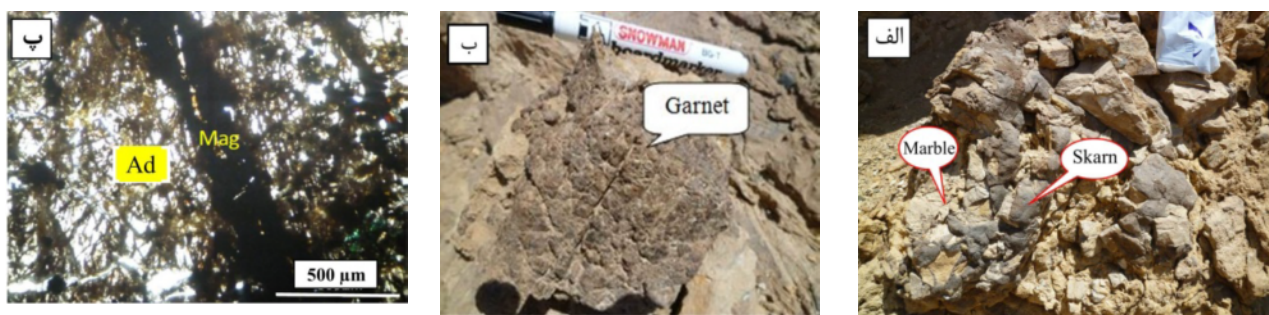
زون برون اسکارن

الف- گارنت اسکارن

گارنت اسکارن مهم‌ترین بخش زون برون اسکارن را تشکیل می‌دهد و از لحاظ ریخت‌شناسی در مشاهدات صحرایی به صورت نوارهای باریک قهوه‌ای رنگ بین لایه‌های مرمر دیده می‌شوند. ضخامت این نوارها از چند میلی‌متر تا ۲۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. وجود شکستگی‌های فراوان، برشی شدن اسکارن‌ها و مرمرهای همراه نشان دهنده‌ی وجود زمین‌ساختی شدید در منطقه است و بیانگر تاثیر گسل‌ها در تشکیل کانسار پناهکوه است (شکل الف-۴). گارنت اسکارن در این بخش به صورت انباشت‌های توده‌ای در لایه‌های غنی از گارنت دیده می‌شود. بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سنگ-نگاری، گارنت کانی اصلی و مهم در این نوع زون اسکارنی است و بیش از ۹۰ درصد سنگ را تشکیل داده است (شکل ب-۴). گارنت‌های موجود در این زون، درشت بلور، بی‌شکل و همسانگرد همراه با شکستگی‌های فراوان هستند (شکل پ-۴) که فضای بین آنها را اکتینولیت با بافت نماتوبلاستیک پر کرده است.



شکل ۳ منطقه‌بندی هاله دگرگون مجاورتی شامل اسکارن، مرمر، آهک و توده نفوذی در منطقه‌ی پناهکوه.



شکل ۴ الف: برشی شدن مرمرها و اسکارن‌های همراه آن ب: گارنت اسکارن با بیش از ۹۰ درصد گارنت پ: گارنت‌های همسانگرد بی‌شکل با شکستگی‌های فراوان که با اکسیدهای آهن پر می‌شود.

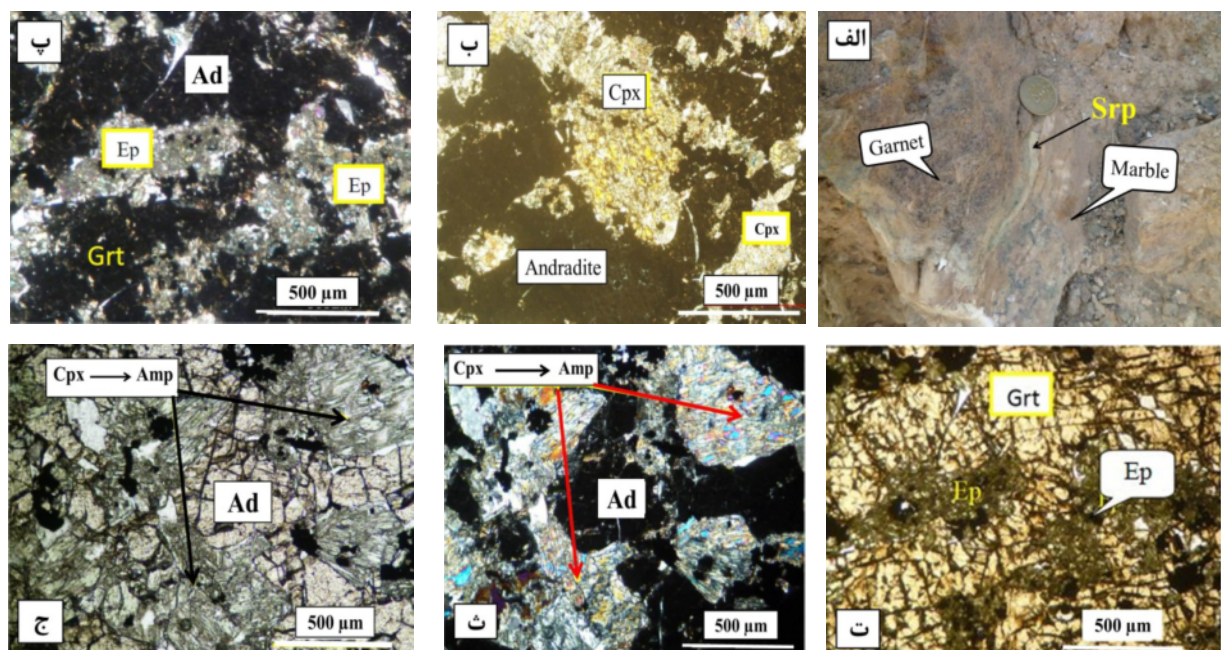
گارنت پیروکسن اسکارن

ساختار منطقه‌ای این زون شامل مرمر، سرپانتین‌های سفید رنگ و گارنت‌های شکلاتی رنگ هستند (شکل الف-۵). رگچه‌های سرپانتینی به رنگ سفید مرمرها را قطع کرده است. گارنت‌های این زون کاملاً بی‌شکل و همسانگردند و در همراهی با پیروکسن‌های به شدت دگرسان شده یافت می‌شوند که با بافت غیر تعادلی مشخص می‌شوند (شکل ب-۵). گارنت در اثر واکنش‌های قهقرایی در مرحله‌ی دگرنهادی به کلریت، اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن تبدیل شده - است (پ-۵ و ت-۵). پیروکسن‌ها به شدت تجزیه شده‌اند به طوری که تنها قالبی از آن باقی مانده است. اکتینولیتی شدن به طور کامل در پیروکسن‌ها صورت گرفته و تشکیل شبه-ریخت‌ها رخدادی است عادی (ث-۵ و ج-۵).

زون اسکارن منیزی

بر اساس مشاهدات صحرایی این زون به ضخامت تقریبی ۲۰ سانتی متر بین واحدهای مرمر گسترش یافته است (شکل الف-۶) و ساختار منطقه‌ای متشکل از مرمر، اولیوین و سرپانتین را تشکیل می‌دهد (شکل ب-۶). در چنین ساختار منطقه‌ای اولیوین‌های به شدت سرپانتینی و کدر شده به رنگ سیاه به صورت رگچه‌ای فضای بین شکستگی‌های مرمر را پر کرده است. (شکل پ-۶) اولیوین و پیروکسن فراوان‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این زون‌اند به طوری که ۳۰ تا ۳۵ درصد سنگ را تشکیل داده است. اولیوین مستعدترین کانی برای دگرسانی شیمیایی است. سرپانتینی شدن، معمولی‌ترین محصول دگرسانی اولیوین در اسکارن منیزی پناهکوه است.

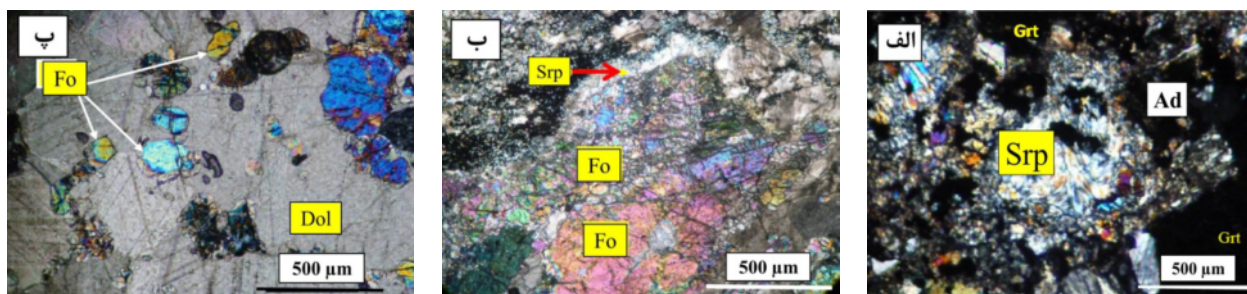
سرپانتینی شدن به طور کامل در اولیوین‌ها رخ داده و تشکیل شبه‌ریخت‌ها رویدادی است عادی و می‌توان آنها را از روی شکل مشخص بلورهای اولیه تشخیص داد (شکل الف-۷). در مکان‌هایی شاره‌های بعدی باعث کدر شدن کامل سرپانتین‌ها شده و رنگ سیاه را به سنگ داده است. بر اساس مشاهدات سنگ‌نگاری دو نسل اولیوین وجود دارند. نسل اول اولیوین‌ها درشت بلور و نیمه شکل‌دار بوده که به شدت به سرپانتین، تالک و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. فقدان رخ یا ناهمسانگرد بودن ساختار بلوری در اولیوین، تاثیر مهمی بر نحوه‌ی پیشرفت سرپانتینی شدن دارد. دگرسانی در راستای شکستگی‌های نامنظم شروع می‌شود و شبکه‌ی نامنظمی از رگچه‌های سرپانتین رشته‌ای یا صفحه‌ای ایجاد می‌شود و بافت شبکه‌ای را تشکیل می‌دهند (شکل ب-۷). نسل دوم، اولیوین‌های بی‌شکل با حواشی گردند (شکل پ-۷). این نسل از اولیوین‌ها کوچکتر بوده و به صورت ادخال در درون کلسیت مشاهده می‌شود. سرپانتین‌های حاصل از تجزیه این گونه اولیوین‌ها به صورت مدور، ریز دانه و پراکنده در متن بافت گرانوبلاستیک مرمرها وجود دارند و تشکیل شبه‌ریخت سرپانتین در قالب بلورهای اولیوین را داده است زیرا در همیافتی با این‌گونه سرپانتین‌ها اولیوین‌هایی که کاملاً سرپانتینی نشده و سالم مانده‌اند، دیده می‌شود. پیروکسن‌های موجود در این زون شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده که به صورت درشت بلور و ریزبلور در زمینه کلسیتی یافت می‌شود. درشت بلورهای پیروکسن بافت دانه‌ای را در سنگ تشکیل داده‌اند. پیروکسن‌ها در زون اسکارن منیزی اغلب سالم مانده و هیچ‌گونه دگرسانی را نشان نمی‌دهند.



شکل ۵ الف: ساختار زونه متشکل از سرپانتین، مرمر و گارنت در زون گارنت- پیروکسن اسکارن ب: جانشینی پیروکسن با گارنت در زون گارنت - پیروکسن. پ و ت: جانشینی گارنت با اپیدوت در زون گارنت-پیروکسن (پ: نیکل عمود و ت: نیکل موازی). ث و ج: شبریخت پیروکسن که کاملاً با آمفیبول رشته‌ای (اکتینولیتی شدن) جایگزین شده است (ث: نیکل عمود و ج: نیکل موازی).



شکل ۶ الف: پیدایش اسکارن منیزیمی بین واحدهای مرمر ب: ساختار منطقه‌ای متشکل از مرمر، اولیون و سرپانتین در اسکارن منیزیمی پ: اولیون‌های به شدت سرپانتینی شده و کدر شده به رنگ سیاه در بین واحدهای مرمریتی.



شکل ۷ الف جانشینی کامل اولیون با سرپانتین و تشکیل شبریخت حاصل از آن ب: سرپانتینی شدن اولیون و تشکیل بافت شبکه‌ای حاصل از آن در اسکارن منیزیمی. پ: درشت بلورهای اولیون سالم با پیرامون گرد شده (Resorbed) در اسکارن منیزیمی.

شیمی کانی‌ها

برای بررسی شیمی کانی‌های بنیادی اسکارن کلسیمی (پیروکسن و گارنت) و منیزیمی (اولیوین و پیروکسن) در منطقه پناهکوه از آنالیز ریزپردازشی استفاده شد که نتایج و تفسیر آنالیز حاصل از آن به شرح زیرند:

گارنت: بر اساس مشاهدات کانی‌شناسی، اسکارن منیزیمی فاقد گارنت بوده و گارنت‌های همسانگرد و بی‌شکل تنها در اسکارن کلسیمی یافت می‌شوند. نتایج حاصل از آنالیز ریزپردازشی روی گارنت‌های موجود در اسکارن کلسیمی در دو زون گارنت اسکارن و گارنت - پیروکسن اسکارن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج ریزپردازش الکترونی، ترکیب تمام گارنت‌ها در این دو زون از نوع آندرادیت خالص است که نشان دهنده‌ی رخداد واکنش‌های دگرنهادی و تشکیل اسکارن در شرایط اکسایشی است. جایگاه ترکیب گارنت‌های منطقه‌ی پناهکوه در نمودار مثلثی و مقایسه‌ی آن با جایگاه ترکیبی گارنت‌ها در اسکارن‌های کلسیمی دیگر نشان داد که گستره‌ی ترکیبی گارنت‌های منطقه‌ی پناهکوه با گستره‌ی

ترکیبی گارنت در اسکارن‌های آهن دنیا همخوانی دارد (شکل ۸).

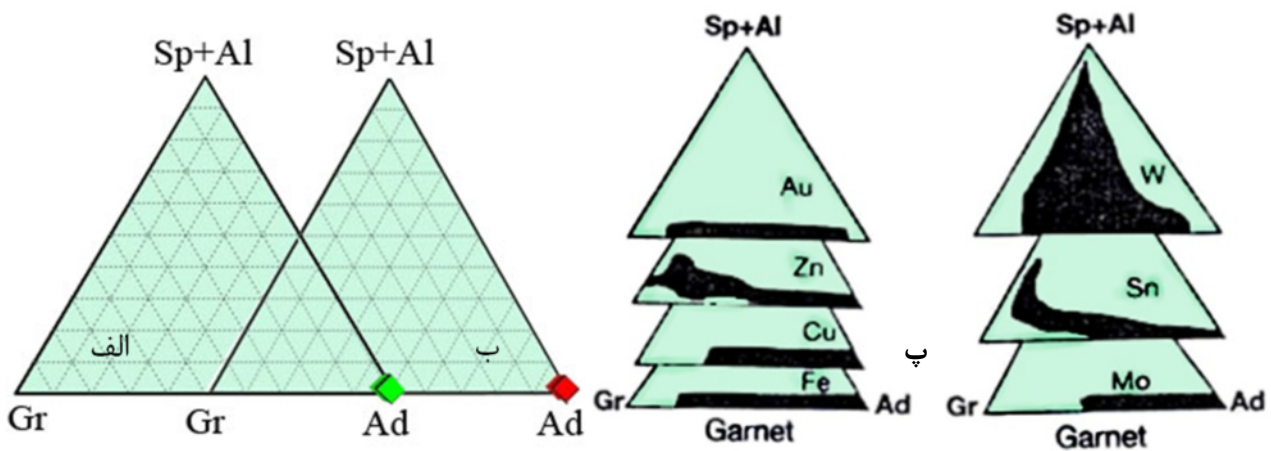
پیروکسن: بر اساس مشاهدات کانی‌شناسی، پیروکسن تنها در دو زون گارنت پیروکسن اسکارن و اسکارن منیزیمی وجود دارد. نتایج حاصل از آنالیز ریزپردازشی ۹ نقطه از بلورهای پیروکسن در زون اسکارن منیزیمی و ۸ نقطه در زون گارنت پیروکسن اسکارن به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. بر اساس داده‌های حاصل از این نتایج، ترکیب پیروکسن‌ها در زون اسکارن منیزیمی از نوع دیوپسید خالص است (شکل ۹) و در مقایسه با اسکارن‌های جهان در جایگاه پیروکسن‌های اسکارنی آهن قرار می‌گیرند (شکل ۹). همچنین ترکیب پیروکسن‌ها در زون گارنت - پیروکسن از نوع محلول جامد دیوپسید- هدرنبرژیت بوده که در مقایسه با ترکیب پیروکسن در اسکارن‌های شناخته شده‌ی جهانی در جایگاه پیروکسن‌های اسکارنی آهن قرار می‌گیرند (شکل ۹) که با ترکیب گارنت‌ها و بررسی‌های کانی‌شناختی همخوانی دارد.

جدول ۱ نتایج آنالیز ریزپردازشی گارنت‌های همسانگرد در زون گارنت اسکارن.

Sample	Sk-۱	Sk-۲	Sk-۳	Sk-۴	Sk-۵	Sk-۶	Sk-۷	Sk-۸	Sk-۹
Oxide composition (wt. %)									
SiO ₂	۳۵٫۸۸	۳۶٫۱۳	۳۶٫۳۸	۳۵٫۹۶	۳۵٫۸۴	۳۵٫۸۹	۳۶٫۴۹	۳۶٫۱۷	۳۶٫۰۵
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۴۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۰٫۸۳	۰٫۹۲	۱٫۰۰	۰٫۳۰	۰٫۰۲	۰٫۱۰	۰٫۱۲	۰٫۰۰	۰٫۰۳
FeO(T)	۲۸٫۰۳	۲۷٫۱۲	۲۷٫۰۷	۲۷٫۱۹	۲۷٫۹۵	۲۸٫۶۹	۲۹٫۳۰	۲۹٫۰۷	۲۸٫۸۷
MnO	۰٫۷۵۳	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۵۶	۰٫۵۸	۰٫۶۰	۰٫۴۶	۰٫۴۵	۰٫۴۱
MgO	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۴
CaO	۳۳٫۰۴	۳۳٫۰۶	۳۲٫۷۹	۳۲٫۹۷	۳۳٫۱۴	۳۲٫۹۸	۳۳٫۱۱	۳۲٫۷۱	۳۲٫۸۲
Total	۹۸٫۳۷	۹۷٫۸۰	۹۷٫۷۵	۹۶٫۹۸	۹۷٫۶۶	۹۸٫۲۵	۹۹٫۴۸	۹۸٫۴۶	۹۸٫۲۲
Number of ions on the basis of 12 oxygene atoms									
Si	۲٫۹۸	۳٫۰۲	۳٫۰۴	۳٫۰۳	۳٫۰۱	۳٫۰۰	۳٫۰۱	۳٫۰۱	۳٫۰۱
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ³⁺	۱٫۹۵	۱٫۸۷	۱٫۸۲	۱٫۹۰	۱٫۹۸	۲٫۰۰	۱٫۹۷	۱٫۹۷	۱٫۹۸
Fe ²⁺	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰٫۰۱	-۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۴
Mn	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳
Mg	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ca	۲٫۹۴	۲٫۹۶	۲٫۰۴	۲٫۹۸	۲٫۹۸	۲٫۹۵	۲٫۹۳	۲٫۹۲	۲٫۹۴
Al+Fe+Mn	۲٫۰۷	۱٫۹۹	۱٫۹۵	۱٫۹۷	۲٫۰۲	۲٫۰۵	۲٫۰۱	۲٫۰۰	۲٫۰۱
Garnet components (mole fraction, %)									
%And	۹۴٫۳۰	۹۳٫۷۸	۹۳٫۲۴	۹۶٫۴۵	۹۷٫۸۷	۹۷٫۴۶	۹۷٫۸۱	۹۸٫۴۰	۹۸٫۴۱
%gro	۳٫۹۱	۴٫۵۶	۵٫۰۷	۱٫۵۲	۰٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۶۰	۰٫۰۰	۰٫۱۵
%Spes	۱٫۷۹	۱٫۶۵	۱٫۶۹	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۵	۱٫۵۹	۱٫۶۰	۱٫۴۴

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزپردازشی گارنت‌های همسانگرد در زون گارنت - پیروکسن.

Sample	M۱۲-۱	M۱۲-۲	M۱۲-۳	M۱۲-۴	M۱۲-۵	M۱۲-۶	M۱۲-۷	M۱۲-۸	M۱۲-۹
Oxide composition (wt. %)									
SiO _۲	۳۵,۴۶	۳۵,۷۳	۳۵,۲۶	۳۵,۹۳	۳۵,۳۸	۳۵,۰۱	۳۶,۱۱	۳۶,۲	۳۶,۱۷
TiO _۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲
Al _۲ O _۳	۰,۱۵	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۱۷	۰,۱۱	۰,۱۷	۰,۰۵	۰,۰۱	۰,۰۶
FeO(T)	۲۹,۴۴	۲۸,۹۴	۲۹,۱۲	۲۹,۰۱	۲۸,۲۸	۲۷,۸۱	۲۹,۴۸	۲۹,۵۹	۲۹,۵۹
MnO	۰,۷۲	۰,۷۸	۰,۶۷	۰,۴۷	۰,۵۵	۰,۷۳	۰,۸۰	۰,۶۴	۰,۷۰
MgO	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۹
CaO	۳۲,۱۹	۳۲,۱۰	۳۱,۸۰	۳۲,۸۶	۳۲,۲۳	۳۱,۵۲	۳۲,۶۱	۳۲,۵۲	۳۲,۶۲
Total	۹۸,۱۸	۹۷,۷۲	۹۷,۰۶	۹۶,۵۵	۹۶,۷۲	۹۵,۷۳	۹۹,۰۶	۹۹,۰۶	۹۹,۲۵
Number of ions on the basis of 12 oxygene atoms									
Si	۲,۹۷	۳,۰۰	۲,۹۹	۲,۹۹	۳,۰۰	۳,۰۱	۳,۰۰	۳,۰۰	۲,۹۹
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Al	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
Fe ^{۲+}	۲,۰۱	۱,۹۸	۲,۰۱	۱,۹۹	۱,۹۸	۱,۹۶	۲,۰۱	۲,۰۱	۲,۰۱
Fe ^{۳+}	۰,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۳	۳,۰۳	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴
Mn	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۶	۰,۰۵
Mg	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱
Ca	۲,۸۹	۲,۸۹	۲,۸۹	۲,۹۳	۲,۹۳	۲,۹۱	۲,۹۰	۲,۹۰	۲,۸۹
Total	۷,۹۷	۸	۸	۷,۹۹	۷,۹۹	۸,۰۱	۸,۰۲	۸,۰۲	۸
Al+Fe+Mn	۲,۱۰	۲,۰۵	۲,۰۸	۲,۰۴	۲,۰۳	۲,۰۳	۲,۰۷	۲,۰۷	۲,۰۶
Garnet components (mole fraction, %)									
%And	۹۶,۸۶	۹۶,۷۳	۹۷,۰۶	۹۷,۵۵	۹۷,۴۹	۹۶,۵۴	۹۷,۰۵	۹۷,۰۵	۹۷,۳۳
%gro	۰,۷۱	۰,۵۴	۰,۶۳	۰,۸۳	۰,۵۴	۰,۸۴	۰,۲۴	۰,۲۴	۰,۲۹
%Spes	۲,۴۲	۲,۷۳	۲,۳۱	۱,۶۱	۱,۹۷	۲,۶۲	۲,۷۱	۲,۷۱	۲,۳۸



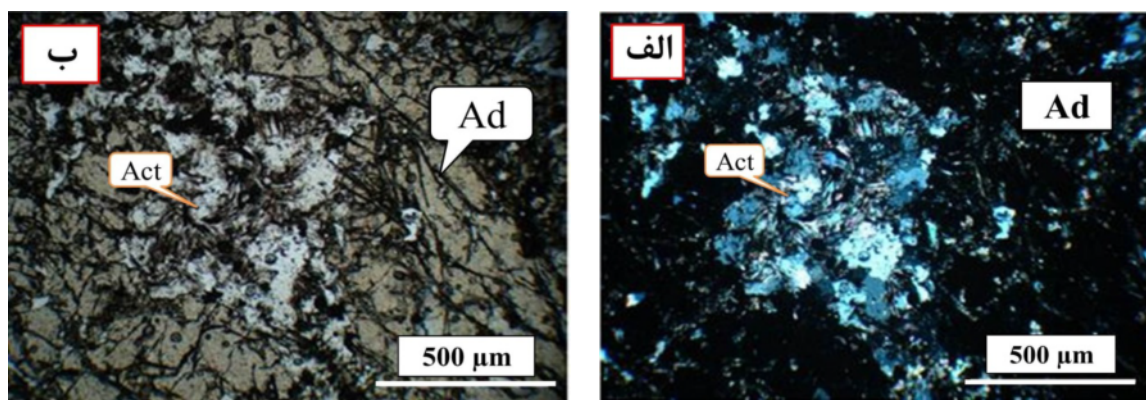
شکل ۸ نمودار توزیع ترکیب اعضای نهایی گارنت‌های پناهکوه در دو زون گارنت اسکارن (الف) و گارنت پیروکسن اسکارن (ب) و پ: مقایسه آن با ترکیب گارنت در اسکارن‌های شناخته شده جهانی [۶] نمودار نشان می‌دهد که ترکیب گارنت‌های اسکارن پناهکوه با ترکیب گارنت‌های اسکارنی آهن همخوانی دارد.

جدول ۳ نتایج آنالیز ریزپردازشی کانی کلینوپیروکسن در زون گارنت- پیروکسن اسکارن.

Sample	M1۲-۱	M1۲-۲	M1۲-۳	M1۲-۴	M1۲-۵	M1۲-۶	M1۲-۷	M1۲-۸
Oxide composition (wt. %)								
SiO _۲	۵۱٫۸۶	۵۳٫۲۵	۵۲٫۲۱	۵۲٫۵۱	۵۲٫۳۵	۴۸٫۱۵	۵۰٫۱۲	۵۲٫۵۱
Al _۲ O _۳	۰٫۱۰	۰٫۲۷	۰٫۲۱	۰٫۱۳	۰٫۹۴	۰٫۲۲	۰٫۰۹	۰٫۰۲
FeO	۱۲٫۱۹	۱۱٫۴۷	۱۱٫۱۸	۱۲٫۴۸	۱۱٫۱۰	۲۳٫۳۶	۱۱٫۰۱	۱۳٫۶۰
Fe _۲ O _۳	۰٫۴۴	۰٫۰۰	۱٫۹۵	۱٫۳۲	۲٫۳۶	۸٫۶۰	۰٫۰۰	۰٫۵۴
MnO	۰٫۸۳	۱٫۰۹	۱٫۰۱	۰٫۸۱	۱٫۱۰	۱٫۱۲	۰٫۹۳	۱٫۱۵
MgO	۸٫۳۵	۱۰٫۳۴	۱۰٫۰۹	۹٫۶۳	۹٫۵۵	۱۰٫۲۶	۷٫۱۲	۸٫۹۱
CaO	۲۳٫۸۶	۲۳٫۳۳	۲۳٫۸۹	۲۴٫۱۱	۲۳٫۶۹	۲۵٫۵۶	۲۳٫۵۴	۲۳٫۹۷
Na _۲ O	۰٫۳۳	۰٫۶۰	۰٫۶۳	۰٫۳۱	۰٫۶۳	۰٫۴۴	۰٫۲۲	۰٫۳۱
Total	۹۹٫۹۱	۱۰۰٫۵۷	۱۰۰٫۰۰	۱۰۱٫۱۶	۱۰۱٫۵۷	۹۶٫۸۳	۹۳٫۰۶	۱۰۰٫۹۷
Number of ions on the basis of 6 oxygene atoms								
Si	۲٫۰۱	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۱	۲٫۰۰	۲٫۰۱	۲٫۰۸	۲٫۰۱
Al _۴	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	۰٫۰۰	-۰٫۰۱	-۰٫۰۸	-۰٫۰۱
Al ₆	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۸	۰٫۰۱
Fe ^{۲+}	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ^{۳+}	۰٫۴۶	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۴۰	۰٫۳۶	۰٫۱۲	۰٫۳۸	۰٫۴۴
Mn	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴
Mg	۰٫۴۸	۰٫۵۸	۰٫۵۸	۰٫۵۵	۰٫۵۴	۰٫۶۴	۰٫۴۴	۰٫۵۱
Ca	۹٫۹۹	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۱٫۱۴	۱٫۰۵	۰٫۹۸
Na	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Total	۳٫۹۹	۳٫۹۹	۴	۴	۴	۴	۴	۴
Fe ^{۲+} + Mg + Mn	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۴	۰٫۸۰	۰٫۸۵	۰٫۹۸
Clinopyroxene components (mole fraction, %)								
%Hd	۴۷٫۴۳	۳۶٫۹۸	۳۷٫۰۳	۴۰٫۹۵	۳۸٫۱۵	۱۴٫۷۵	۴۴٫۶۸	۴۴٫۳۸
%Di	۴۹٫۷۶	۹۵٫۴۶	۵۹٫۵۸	۵۶٫۳۵	۵۸٫۰۵	۸۰٫۲۷	۵۱٫۵۰	۵۱٫۸۲
%Jo	۲٫۸۱	۳٫۵۶	۳٫۳۹	۲٫۶۹	۳٫۸۰	۴٫۹۸	۳٫۸۲	۳٫۸۰

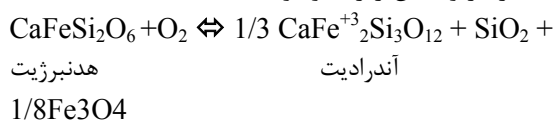
جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی کانی کلینوپیروکسن در اسکارن منیزیمی.

Sample	M1۷-۱	M1۷-۲	M-1۷-۳	M1۷-۴	M1۷-۵	M1۷-۶	M1۷-۷	M1۷-۸	M1۷-۹
Oxide composition (wt. %)									
SiO _۲	۵۱٫۵۵	۵۵٫۳۲	۵۶٫۴۲	۵۶٫۴۵	۵۵٫۸۶	۵۶٫۴۳	۵۶٫۳۵	۵۵٫۸۳	۵۵٫۹۵
Al _۲ O _۳	۰٫۰۹	۰٫۲۰	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۲۲	۰٫۱۰	۰٫۰۶	۰٫۱۲
FeO	۱٫۲۷	۱٫۱۰	۱٫۱۵	۱٫۳۵	۰٫۹۹	۱۴٫۱	۱٫۹۲	۱٫۶۴	۱٫۲۴
Fe _۲ O _۳	۰٫۳۲	۱٫۳۹	۰٫۲۴	۰٫۰۰	۰٫۶۵	۰٫۱۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
MnO	۰٫۲۱	۰٫۲۹	۰٫۱۹	۰٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۱۱	۲۲٫۰	۰٫۱۷
MgO	۱۷٫۷۵	۱۷٫۴۱	۱۸٫۱۶	۱۸٫۱۱	۱۷٫۹۶	۱۸٫۳۹	۱۷٫۷۲	۱۷٫۶۷	۱۸٫۲۳
CaO	۲۵٫۹۰	۲۵٫۹۸	۲۶٫۲۰	۲۶٫۲۰	۲۵٫۹۳	۲۵٫۹۰	۲۶٫۱۱	۲۵٫۹۲	۲۵٫۷۵
Total	۱۰۱٫۰۵	۱۰۱٫۶۶	۱۰۲٫۴۹	۱۰۲٫۲۰	۱۰۱٫۷۵	۱۰۲٫۴۷	۱۰۲٫۱۲	۱۰۱٫۳۱	۱۰۱٫۴۳
Number of ions on the basis of 6 oxygene atoms									
Si	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰
Al _۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al ₆	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ^{۲+}	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ^{۳+}	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۹۵	۹۴٫۰	۰٫۹۶	۰٫۹۶	۰٫۹۶	۰٫۹۷	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۷
Ca	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹
Fe ^{۲+} + Mg + Mn	۱٫۰۰	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱
Clinopyroxene components (mole fraction, %)									
%Hd	۳٫۸۲	۳٫۳۸	۳٫۴۰	۳٫۹۹	۲٫۹۸	۳٫۳۴	۵٫۷۱	۴٫۹۲	۳٫۶۶
%Di	۹۵٫۵۴	۹۵٫۷۱	۹۶٫۰۳	۹۵٫۵۰	۹۶٫۳۵	۹۵٫۹۸	۹۳٫۹۶	۹۴٫۴۲	۹۵٫۸۴
%Jo	۰٫۶۴	۰٫۹۱	۰٫۵۷	۰٫۵۱	۰٫۶۷	۰٫۶۸	۰٫۳۳	۰٫۶۷	۰٫۵۱

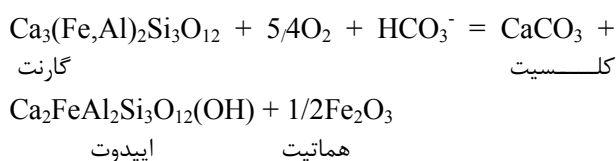


شکل ۱۰ قرار گرفتن اکتینولیت به صورت مستقل و در همراهی با کوارتز در فضای بین آندرادیت‌ها (الف: نیکل عمود ب: نیکل موازی).

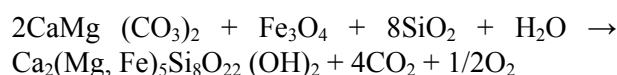
پیروکسن-گارنت (شکل ب-۵). با توجه به فراوانی کانی‌های پیروکسن و مگنتیت در سنگ می‌توان نتیجه گرفت که گارنت آندرادیت در اثر واکنش زیر به وجود آمده است:



تمام کانی‌های این گام در سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). همچنانکه دیده می‌شود آندرادیت میدان پایداری گسترده‌ای از ۳۹۰ تا ۷۰۰°C و گریزندگی اکسیژن ۱۵- تا ۲۶- را نشان می‌دهد. آندرادیت با ولاستونیت + مگنتیت در ۷۰۰°C > T و هدنبرژیت + ولاستونیت در ۵۵۰°C > T حضور کوارتز جانشین می‌شود. از آنجا که چنین همیافتی کانیایی در اسکارن پناهکوه دیده نشده است، لذا گارنت‌زایی در ۵۵۰°C < T رخ داده است. سپس در مرحله‌ی دگرتهادی پسروده، در اثر برهمکنش گرمایی‌های با دمای پایین با مجموعه‌های کلسیمی- سیلیکاتی، مقادیر زیادی فازهای سیلیکاتی (کوارتز) و کلسیمی- منیزیمی سیلیکاتی آبدار (اپیدوت، ترمولیت- اکتینولیت) به همراه اکسیدها (مگنتیت و هماتیت) و کربنات تشکیل شده است. اپیدوت، متداول‌ترین کانی دگرسان در این مرحله است. احتمالاً افزایش محلی گریزندگی اکسیژن نقش مهمی در تشکیل اپیدوت بنابر واکنش زیر ایفا کرده است [۹،۸].



دنبال گارنت‌سازی، آنچه‌ان که شواهد کانی‌شناسی نشان می‌دهد، شکل‌گیری کانی‌های سیلیکاتی آبدار اکتینولیت در همیافتی با کوارتز و کلسیت انجام گرفته است (شکل ۱۰). در نمودار T-X (CO₂) بیشینه دمای پایداری مجموعه فوق ۵۱۰°C است (شکل ۱۱). شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهد که اکتینولیت می‌تواند به دو صورت آزاد و مستقل در همراهی با کوارتز و یا از فروپاشی دیوپسید تشکیل شود. مشاهدات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که در زون گارنت اسکارن، اکتینولیت به صورت مستقل و در همراهی با کوارتز مشاهده شده است (شکل ۹)، بنابراین تشکیل اکتینولیت‌های آزاد را می‌توان با واکنش زیر توجیه کرد [۷]:



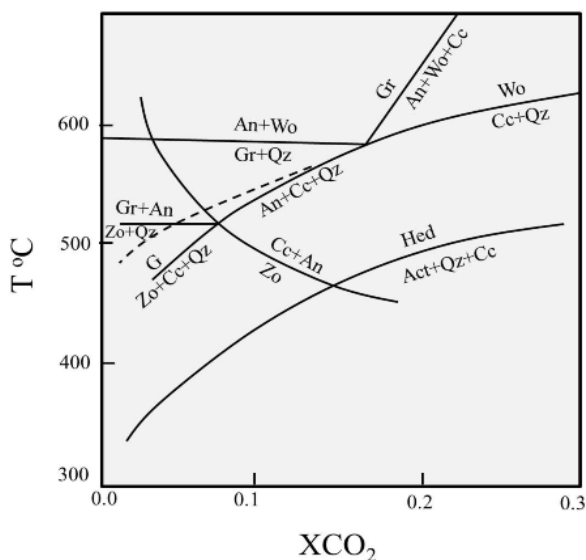
اکتینولیت دولومیت

برای تعیین شرایط احتمالی P-T-X می‌توان سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H (شکل ۱۲) را در نظر گرفت، عدم وجود پیروکسن در این زون و تشکیل آندرادیت با نفوذ ماگمای آهن و سیلیسیم‌دار شاری طی واکنش‌های دگرتهاد پیشرونده با سنگ کربناتی میزبان، نشان‌دهنده‌ی تشکیل اسکارن در گستره‌ی دمایی ۴۳۰-۴۰۰°C و $f\text{O}_2$ بین ۱۰^{-۲۳}-۱۰^{-۲۶} است.

زون گارنت- پیروکسن اسکارن

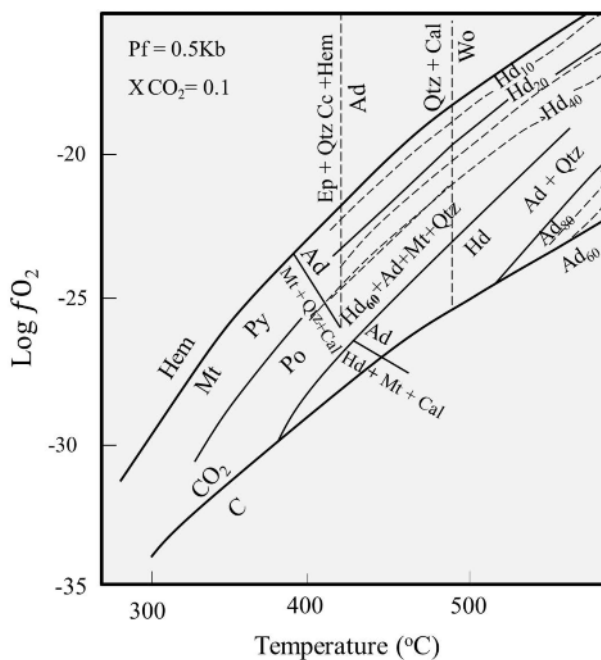
کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این زون شامل پیروکسن و گارنت است. در این زون نخست پیروکسن‌ها در مرحله دگرتهاد پیشرونده به صورت مستقل شکل گرفته است. به دنبال آن گام، شاره‌های آهن‌دار با هجوم خود، گارنت‌های آندرادیتی را به محیط اسکارنی تحمیل کرده‌اند (بر مبنای شواهد بافتی

$3\text{Ca}_3(\text{Fe,Al})_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2 =$ در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که گرمایی‌های غنی از
 گارنت $2\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) + 5\text{CaCO}_3 + 3\text{SiO}_2$ CO_2 و H_2O حضور دارند، اپیدوت می‌تواند در نتیجه ناپایداری
 اپیدوت کلسیت گارنت در اثر واکنش زیر تشکیل شود:



شکل ۱۱ نمودار روابط فاز T-XCO₂ در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H [۱۰].

Gr = Garnet; An = Anortite; Hd = Hedenbergite; Qz = Quartz; Act = Actinolite; Cc = calcite; (Wo = Wollastonite).
 (علامت اختصاری کانی‌ها:)



شکل ۱۲ نمودار روابط فاز T-log fO₂ در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H [۱۱].

(Ad = andradite; Cal = calcite; Hem = hematite; Hd = hedenbergite; Mt = magnetite; Qtz = quartz; (Wo = wollastonite; Ep = epidote; C = graphite).
 (علامت اختصاری کانی‌ها:)

زون اسکارن منیزیمی

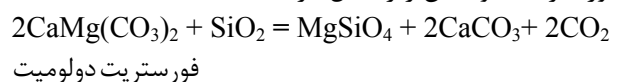
نفوذ استوک پناهکوه با ترکیب گرانودیوریت- کوارتز دیوریت در سازند آهکی - دولومیتی جمال باعث پیدایش اسکارن منیزیمی در منطقه شده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری زون اسکارن منیزیمی در منطقه‌ی پناهکوه نشان می‌دهد که مراحل تکامل اسکارن منیزیمی به موازات جایگیری توده‌ی نفوذی گرانیتوئیدی در منطقه رخ داده است. فرایندهای اسکارن‌زایی در این زون شامل دو مرحله‌ی پیشرونده و پسرونده است که هر کدام با مجموعه‌های پاراژنزی و بافت‌های شاخص هر مرحله مشخص می‌شود. روابط پاراژنتیکی کانی‌ها به ترتیب زمان تشکیل عبارتند از:

۱- مرحله پیشرونده که خود شامل دو مرحله است:

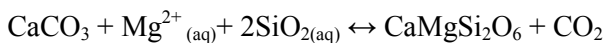
الف: دگرگونی مجاورتی: این مرحله طی صعود ماگما و قرار گرفتن آن در برخوردگاه سنگ‌های آهکی و دولومیتی سازند جمال رخ داده است که طی آن سنگ‌های کربناتی تبلور دوباره یافته است.

ب: مرحله‌ی تشکیل اسکارن دگرنهادی: در این مرحله سیلیکات‌های منیزیم بدون آب شکل می‌گیرند. با ادامه‌ی تبلور ماگما و فشار حاصل از ماگماهای شاری آزاد شده، شکستگی-هایی در سنگ‌های آهکی- دولومیتی سازند جمال ایجاد شده که جابه‌جایی و انتقال عناصر به وسیله‌ی شاره‌های کانسار ساز را امکان پذیر می‌سازد. بر خلاف واکنش‌های مرحله‌ی دگرگونی مجاورتی که گریزندگی گازها در واکنش‌ها نقش دارند، در واکنش‌های این مرحله غلظت یون‌ها حائز اهمیت است. شاره-هایی که در فرایند دگرگونی و دگرنهادی از سنگ‌های کربناتی عبور می‌کنند اصولاً دارای X_{CO_2} پایین (۰/۱) هستند [۱۱].

کانی‌های اصلی تشکیل شده در این مرحله فورستریت و دیوپسید هستند. با توجه به نمودار نسبی X_{CO_2} -T، دیوپسید و فورستریت در دمای بیش از ۴۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تشکیل می‌شود (شکل ۱۳). با توجه به روابط پاراژنتیکی کانی‌ها می‌توان در نظر گرفت که در آغاز مرحله دگرنهادی پیشرونده، فورستریت با واکنش زیر شکل گرفته است:



در مرحله بعد تأثیر شاره‌های جریان یافته حاوی SiO_2 و MgO بر سنگ‌های آهکی منجر به پیدایش دیوپسید در اسکارن‌های دگرنهادی شده است [۷]. واکنش احتمالی چنین واکنشی به صورت زیر است:

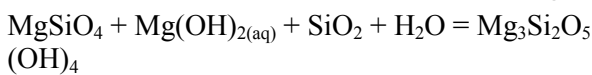


کلسیت

دیوپسید

۲- مرحله‌ی پسرونده: این مرحله به دو زیر مرحله تقسیم می‌شود:

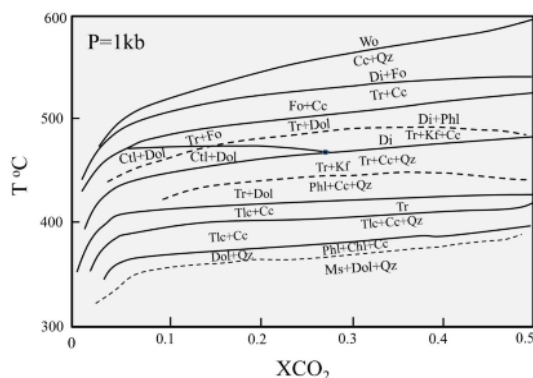
الف- مرحله‌ی پسرونده پیشین: در این مرحله سیلیکات‌های منیزیمی بدون آب تشکیل شده در مرحله‌ی قبل در اثر ورود گرماب‌های با دما پایین و فرایند آبکافت و کربن‌گیری دگرسان شده و به مجموعه‌ای از کانی‌های اکسیدی مانند مگنتیت، هماتیت، سیلیکات‌های منیزیمی آبدار مثل سرپانتین و کربناتی مثل کلسیت تبدیل می‌شود. در این مرحله SiO_2 و H_2O بالا در شاره‌های داغ می‌تواند فورستریت را به سرپانتین، بنابر واکنش زیر، تبدیل کند:



فورستریت

سرپانتین

ب- مرحله‌ی پسرونده پسین: مجموعه کانی‌های تشکیل شده در مرحله پیشین تحت تأثیر گرماب‌های کم دما به مجموعه‌ای از کانی‌های ریز دانه مانند تالک، کلسیت و کانی‌های رسی تبدیل می‌شود که رخداد این مرحله در گستره‌ی دمایی زیر ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رخ می‌دهد. از آنجا که تمام کانی‌های مشاهده شده در اسکارن منیزیمی پناهکوه در سیستم CMS-HC (شکل ۱۳) قرار دارند، بنابراین می‌توان دمای $0C$ ۶۵۰-۳۰۰، فشار ثابت دو کیلو بار و X_{CO_2} ۰/۱-۰/۶ را برای اسکارن مورد بررسی برآورد کرد.



شکل ۱۳ نمودار روابط فاز $T-X_{CO_2}$ در سامانه Al-K-Ca-Mg-Si-H-C-O [۱۲].

Wo = wollastonite; Cc = Calcite; (علامت اختصاری کانی‌ها); Qz = Quartz; Di = Diopside; Fo = Forsterite; Tr = Tremolite; Dol = Dolomite; Ctl = Chrysotile; Kf = Feldspar; Phl = Phlogopite; Chl = Clinocllore; Tlc = (Talc; Ms = Muscovite).

برداشت

نفوذ استوک پناهکوه با ترکیب گرانودیوریت- کوارتز دیوریت در سازند آهکی جمال منجر به اسکارن‌زایی در منطقه شده است که در محیطی کم عمق با گرماب‌های اکسایشی وابسته به یک توده نفوذی آهکی- قلیایی شکل گرفته است. بر اساس بررسی- های کانی‌شناختی، اسکارن پناهکوه یک اسکارن چند زادی (polygenic) است. اسکارن پناهکوه، گذر از اسکارن‌های منیزیمی به کلسیمی را نشان می‌دهد. اسکارن کلسیمی شامل دو زون درون اسکارن و برون اسکارن است. برون اسکارن شامل دو منطقه گارنت اسکارن و گارنت-پیروکسن اسکارن است. اسکارن منیزیمی با پیدایش فورستریت و دیوپسید در مرم‌های منطقه‌ی پناهکوه مشخص می‌شود. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و برازش با نمودارهای تعادل فازی، نخست ماگمای شاری با دمای بالا (حدود 600°C) باعث دگرنهادی پیشرونده شده و موجب پیدایش پیروکسن اسکارن کلسیمی شده است. سپس در گام بعدی با ورود آهن به سامانه، اسکارن‌های تراوشی غنی از آهن یا گارنت اسکارن‌ها در دمای 380°C - 400°C شکل گرفته‌اند. کانی‌شناسی و ویژگی‌های زمین- شیمیایی اسکارن پناهکوه نشان دهنده‌ی شکل‌گیری آن در شرایط اکسایشی، سطوح پوسته‌ای کم عمق و مشابه شرایط تشکیل دیگر سیستم‌های اسکارنی آهن و مس است.

قدردانی

از آقای پرفسور ناکاشیما از بخش علوم زمین دانشگاه یامگاتای ژاپن به خاطر انجام تجزیه‌ی ریزپردازش الکترونی کانی‌ها تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [3] Berberian M., King G. C. P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences 18(1981) 210-265.
- [4] حاج ملاعلی ا.، "گزارش نقشه زمین‌شناسی خضرآباد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور"، تهران (۱۳۷۱).
- [5] Shelley D., "Igneous and metamorphic rocks under the microscope", Chapman & Hall (1993) 445 p.
- [6] Meinert L. D., "A review of skarns that contain gold, In D. R. Lentz, Ed., Mineralized intrusion-related skarn systems", Mineralogical Association of Canada, Short Course 26(1989) 359-414.
- [7] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", seventeenth impression, Longman (1991).
- [8] Berman R. G., "Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ ", Journal of petrology, 29(1988) 455-522.
- [9] Perkins E.H., Brown T.H., Berman, "R.G PTX-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams", Computers and Geoscience, 12 (1986) 749-75.5.
- [10] Shoji T., "The stability of clinopyroxene of the diopside-hedenbergite series in $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mixtures", Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 75(1980)221-229.
- [11] Einaudi M. T., Burt D. M., "Introduction Terminology, Classification, and Composition of Skarn Deposits", Economic. Geology 77 (1982) 745-754.
- [12] Tracy R. J., Frost B. R., "Phase equilibria and thermobarometry of calcareous, ultramafic and mafic rocks", and iron formation. Rev. Mineral, 26(1991) 207-289.

[1] Zarasvandi A., Liaghat S., Zentilli M. A., "Geology of Darreh- Zerreshk and Ali- Abad porphyry copper deposits", Central Iran, International Geology Reviews 46(2005)

[۲] شریفی ر.، "بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی اندیس‌های فلزی در منطقه پناه‌کوه یزد با دیدگاه اکتشافی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، (۱۳۸۷).