

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 کانی‌شناسی 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 (آندرادیست) و پیروکسن (دیوپسید - هدربرژیت) 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 خضرآباد 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

پی بردن به خاستگاه اسکارن‌ها، دمای تشکیل و تشخیص کانی‌های با ارزش اقتصادی است. اسکارن آهن پناهکوه در اثر نفوذ استوک گرانیوتئیدی 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 زمین شیمیایی، 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-صیقلی 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] منطقه‌ی 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 منطقه‌ی مورد بررسی متشکل از طیف گسترده‌ای از واحدهای رسوبی پرکامبرین تا

ترشیباری است (شکل ۱) که به‌وسیله‌ی سنگ‌های نفوذی قطع شده است. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه، شامل سازند کهر و دولومیت سلطانیه است که پی‌سنگ منطقه را تشکیل می‌دهد. جوان‌ترین واحدهای زمین‌ساختی 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 به‌وسیله‌ی گرانیوتئیدهای 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].

گرانیوتئید 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 دوره‌ی 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 منطقه‌ی 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.

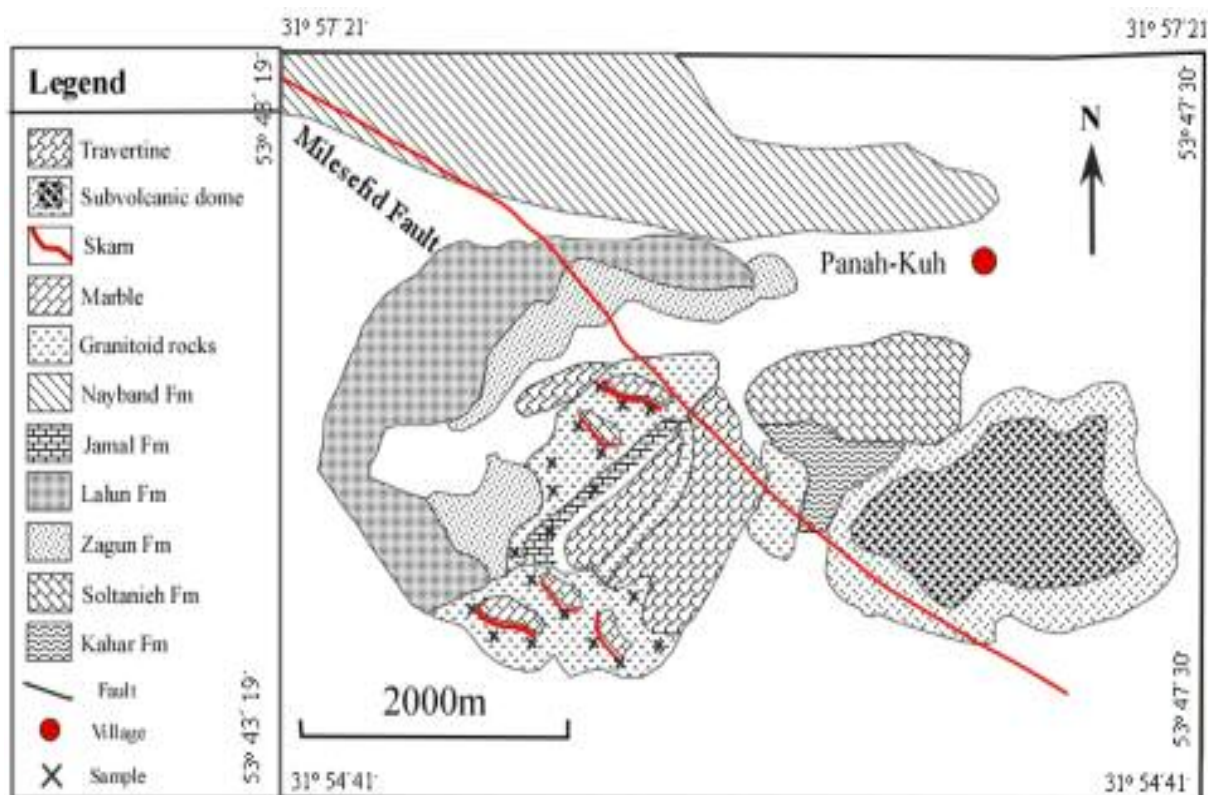
بررسی‌های سنگ نگاری

توده‌های نفوذی

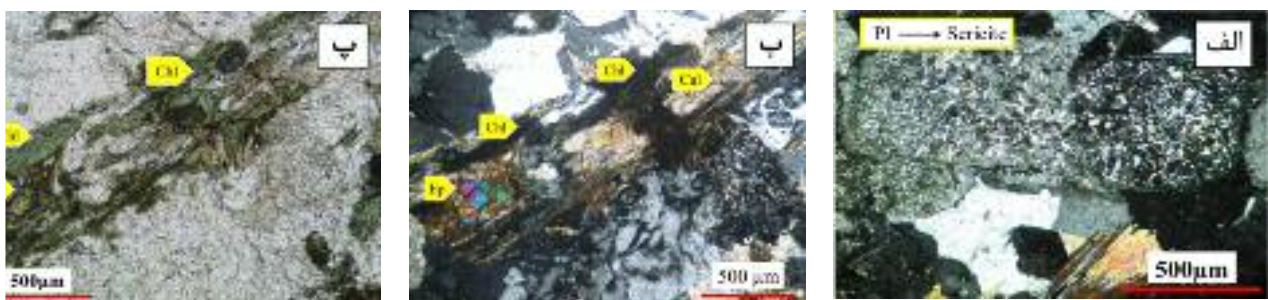
واحد گرانیوتئیدی پناهکوه به صورت درشت دانه تا میان دانه به رنگ خاکستری بوده و کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت در آن قابل مشاهده است. مشاهدات سنگ‌نگاری گرانیوتئیدهای منطقه‌ی پناهکوه نشان می‌دهد که این دسته از گرانیوتئیدها دارای تنوع ترکیبی بوده است. بر اساس بررسی‌های کانی شناسی به روش مدال،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

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. سرسیتی 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 خضراآباد با تغییرات).



شکل ۲ الف: دگرسانی کامل پلاژیوکلاز به سرسیت 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

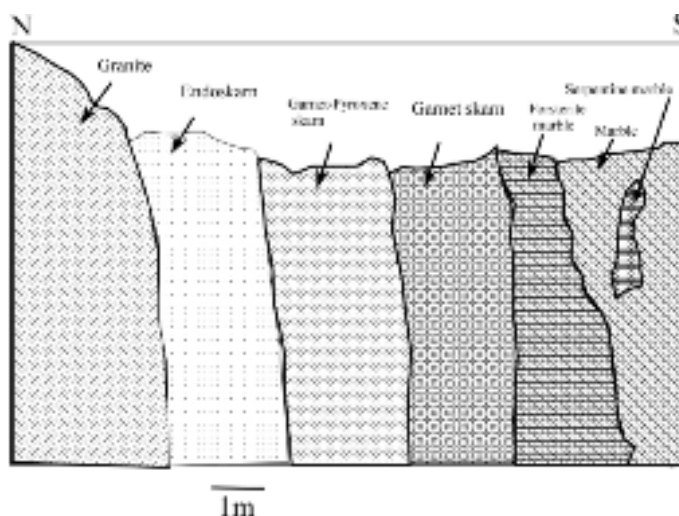
در منطقه‌ی پناهکوه، درون اسکارن در سنگ‌های آپلیتی

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 میلی متر تا ۲۰ سانتی متر 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.

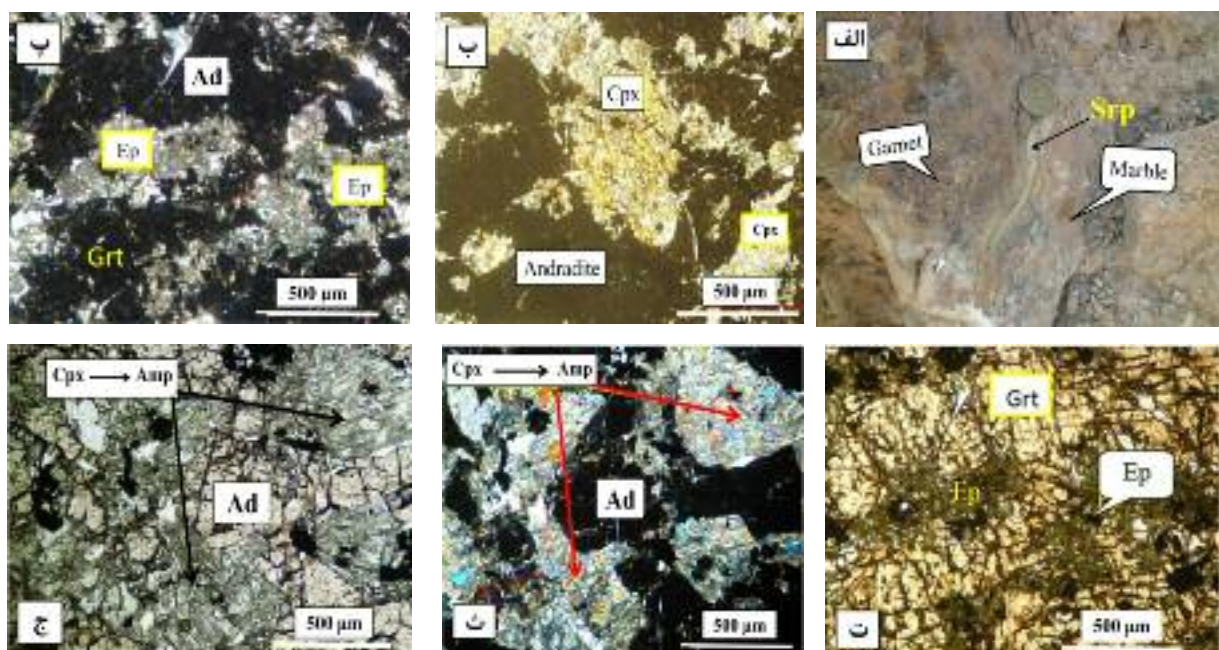
گارنت پیروکسن اسکارن

ساختار منطقه‌ای این زون شامل مرم، سرپانتین‌های سفید رنگ و گارنت‌های شکلاتی رنگ هستند (شکل الف-۵). رگچه‌های سرپانتینی به رنگ سفید مرمها 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 دگرتهادی 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 مرم گسترش یافته است (شکل الف-۶) و ساختار منطقه‌ای متشکل از مرم، اولیون و سرپانتین را تشکیل می‌دهد (شکل ب-۶). در چنین ساختار منطقه‌ای اولیون‌های به شدت سرپانتینی و کدر شده به رنگ سیاه به صورت رگچه‌ای فضای بین شکستگی‌های مرم را پر کرده است. (شکل پ-۶) اولیون و پیروکسن فراوان‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این زون‌اند به طوری که ۳۰ تا ۳۵ درصد سنگ را تشکیل داده است. اولیون مستعدترین کانی برای دگرسانی شیمیایی است. سرپانتینی شدن، معمولی‌ترین محصول دگرسانی اولیون در اسکارن منیزی پناهکوه است.

سرپانتینی شدن به طور کامل در اولیون‌ها 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 سنگ نگاری دو نسل اولیون وجود دارند. نسل اول اولیون‌ها 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 اولیون، 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، اولیون‌های بی‌شکل با حواشی گردند (شکل پ-۷). این نسل از اولیون‌ها کوچکتر بوده و به صورت ادخال در درون کلسیت مشاهده می‌شود. سرپانتین‌های حاصل از تجزیه این گونه اولیون‌ها به صورت مدور، ریز دانه و پراکنده در متن بافت گرانوبلاستیک مرمها وجود دارند و تشکیل شبه‌ریخت سرپانتین در قالب بلورهای اولیون را داده است زیرا در همیافتی با این گونه سرپانتین‌ها اولیون‌هایی 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 هیچ گونه دگرسانی را نشان نمی‌دهند.



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



شکل ۶ الف: پیدایش اسکارن منیزی بین واحدهای مرمر ب: ساختار منطقه‌ای متشکل از مرمر، اولیون و سرپانتین در اسکارن منیزی 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 شبه‌ریخت حاصل از آن ب: سرپانتینی شدن اولیون و تشکیل بافت شبکه‌ای حاصل از آن در اسکارن منیزی. پ: درشت بلورهای اولیون سالم با پیرامون گرد شده (Resorbed) در اسکارن منیزی.

شیمی کانی‌ها

برای بررسی شیمی کانی‌های بنیادی اسکارن کلسیمی (پيروكسن و گارنت) و منیزیمی (اولیوین و پيروكسن) 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 - پيروكسن 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 آندرایت 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).

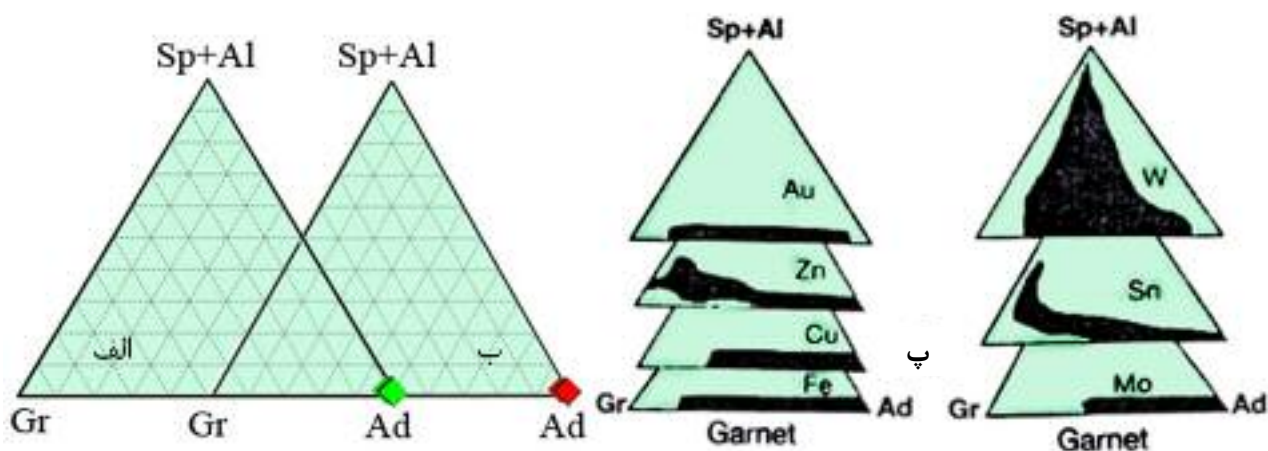
پيروكسن: بر اساس مشاهدات کانی‌شناسی، پيروكسن تنها در دو زون گارنت پيروكسن اسکارن و اسکارن منیزیمی وجود دارد. نتایج حاصل از آنالیز ریزپردازشی ۹ نقطه از بلورهای پيروكسن در زون اسکارن منیزیمی و ۸ نقطه در زون گارنت پيروكسن اسکارن به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. بر اساس داده‌های حاصل از این نتایج، ترکیب پيروكسن‌ها در زون اسکارن منیزیمی از نوع دیوپسید خالص است (شکل ۹) و در مقایسه با اسکارن‌های جهان در جایگاه پيروكسن‌های اسکارنی آهن قرار می‌گیرند (شکل ۹). همچنین ترکیب پيروكسن‌ها در زون گارنت - پيروكسن از نوع محلول جامد دیوپسید- هدنبرژیت بوده که در مقایسه با ترکیب پيروكسن در اسکارن‌های شناخته شده‌ی جهانی در جایگاه پيروكسن‌های 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	۳۲.۸۳
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 ^{۲+}	۱.۹۵	۱.۸۷	۱.۸۲	۱.۹۰	۱.۹۸	۲.۰۰	۱.۹۷	۱.۹۷	۱.۹۸
Fe ^{۳+}	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 ^{۳+}	۲٫۰۱	۱٫۹۸	۲٫۰۱	۱٫۹۹	۱٫۹۸	۱٫۹۶	۲٫۰۱	۲٫۰۱	۲٫۰۱
Fe ^{۲+}	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



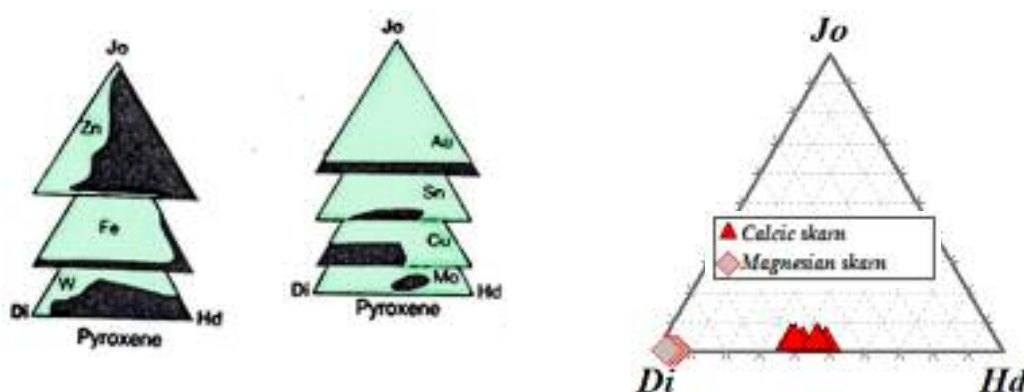
شکل ۸ نمودار توزیع ترکیب اعضای نهایی گارنت‌های پناهکوه در دو زون گارنت اسکارن (الف) و گارنت پیروکسن اسکارن (ب) و پ: مقایسه آن با ترکیب گارنت در اسکارن‌های شناخته شده جهانی [۶] نمودار نشان می‌دهد که ترکیب گارنت‌های اسکارن پناهکوه با ترکیب گارنت‌های اسکارنی آهن همخوانی دارد.

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	۳٫۳۶	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	۲۲٫۸۹	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
Al4	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	۰٫۰۰	-۰٫۰۱	-۰٫۰۸	-۰٫۰۱
Al6	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

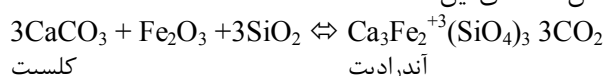
جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی کانی کلینوپیروکسن در اسکارن منیزیمی.

Sample	M1۷-۱	M1۷-۲	M-۱۷-۳	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	۱۴٫۰۱	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	۲۲٫۰۰	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
Al4	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al6	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	۹۴٫۰۰	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 ۹ تصویر اعضای نهایی پیروکسن‌ها در زون اسکارن منیزیمی و گارنت پیروکسن اسکارن و مقایسه آن با ترکیب پیروکسن در کانسارهای شناخته شده اسکارنه، [۶].

۱۰). با توجه به این که کلینوپیروکسن در این زون دیده نمی-
شود، بنابراین گارنت در این زون در اثر نفوذ ماگمای شاری
آهن و سیلیسیم‌دار طی واکنش‌های دگرتهادی پیشرونده با
سنگ کربناتی میزبان به صورت واکنش زیر تشکیل شده است.
فروپاشی گارنت به مگنتیت، کوارتز، کلسیت، اپیدوت و کلریت
نشان‌دهنده این ادعاست.



اولیوین: در منطقه‌ی پناهکوه اولیوین تنها در زون اسکارن منیزیمی یافت می‌شود. نتایج حاصل از آنالیز ریزدازی ۸ نقطه از درشت بلورهای اولیوین نشان داد که ترکیب اولیوین در زون اسکارن منیزیمی از نوع فورستريت است (جدول ۵).

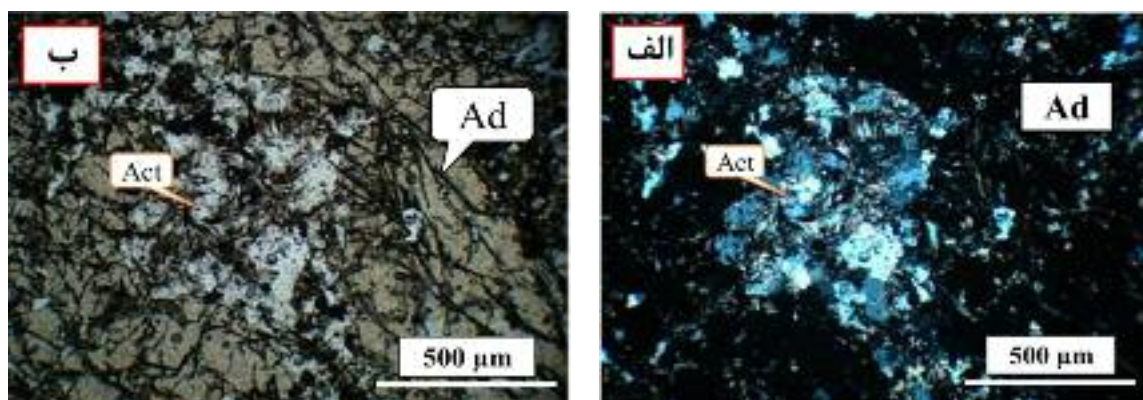
تکامل فیزیکوشیمیایی در شکل‌گیری زون‌های اسکارنی

زون گارنت اسکارن

آندرادیت‌های همسانگرد و بی‌شکل شاخص‌ترین کانی در این
زون است که فضای بین آنها با اکتینولیت پر شده است (شکل

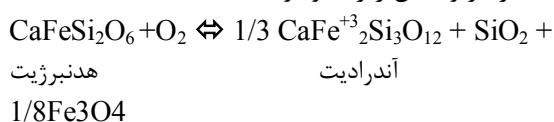
جدول ۵ نتایج آنالیز ریزپردازی کانی اولیوین در اسکارن منیزیمی.

Sample	MhⅣ-1	MhⅣ-2	MhⅣ-3	MhⅣ-4	MhⅣ-5	MhⅣ-6	MhⅣ-7	MhⅣ-8	MhⅣ-9
Oxide composition (wt. %)									
SiO ₂	38.2	38.39	38.24	38.04	38.33	38.14	38.44	38.66	38.71
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03	0.0	0.0	0.04	0.03
FeO	63.3	63.3	63.5	63.6	62.8	63.43	63.05	63.87	63.99
MnO	0.55	0.48	0.52	0.61	0.54	0.49	0.39	0.47	0.48
MgO	53.07	53.71	53.76	53.68	53.59	53.61	53.93	54.64	54.29
CaO	0.0	0.1	0.06	0.15	0.07	0.05	0.22	0.09	0.09
Total	98.15	98.82	98.94	98.88	98.86	98.73	99.03	99.77	99.63
Number of ions on the basis of 4 oxygene atoms									
Si	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Ti	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe ²⁺	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12
Fe ³⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.96	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.98	1.97
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0
Total	3.05	3.05	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.05
Olivine components (mole fraction, %)									
%Fo	93.73	93.89	93.79	93.76	93.83	93.7	94.08	94.31	94.17
%Fa	6.27	6.11	6.21	6.24	6.17	6.3	5.92	5.69	5.83

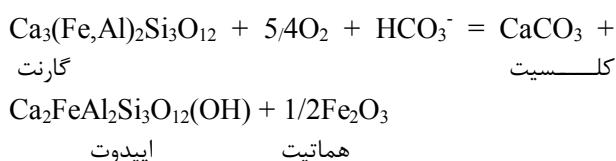


شکل ۱۰ قرار گرفتن اکتینولیت به صورت مستقل و در همراهی با کوارتز در فضای بین آندرایت‌ها (الف: نیکل عمود ب: نیکل موازی).

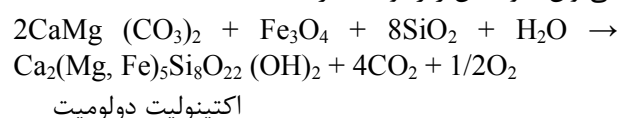
پيروكسن- گارنت) (شکل ب-۵). با توجه به فراوانی کانی‌های پيروكسن و مگنتیت در سنگ می‌توان نتیجه گرفت که گارنت آندرایت در اثر واکنش زیر به وجود آمده است:



تمام کانی‌های این گام در سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). همچنانکه دیده می‌شود آندرایت میدان پایداری گسترده‌ای از ۳۹۰ تا ۷۰۰°C و گریزندگی اکسیژن ۱۵- تا ۲۶- را نشان می‌دهد. آندرایت با ولاستونیت + مگنتیت در ۷۰۰°C > T و هدنبرژیت + ولاستونیت در ۵۵۰°C > T حضور کوارتز جانشین می‌شود. از آنجا که چنین همیافتی کانیاپی در اسکارن پناهکوه دیده نشده است، لذا گارنت‌زایی در ۵۵۰°C < T رخ داده است. سپس در مرحله‌ی دگرته‌ای 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].



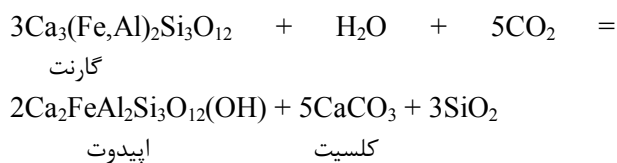
بدنبال گارنت‌سازی، آنچنان که شواهد کانی‌شناسی نشان می‌دهد، شکل‌گیری کانی‌های سیلیکاتی آبدار اکتینولیت در همیافتی با کوارتز و کلسیت انجام گرفته است (شکل ۱۰). در نمودار T-X (CO₂) بیشینه دمای پایداری مجموعه فوق ۵۱۰°C است (شکل ۱۱). شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهد که اکتینولیت می‌تواند به دو صورت آزاد و مستقل 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]:



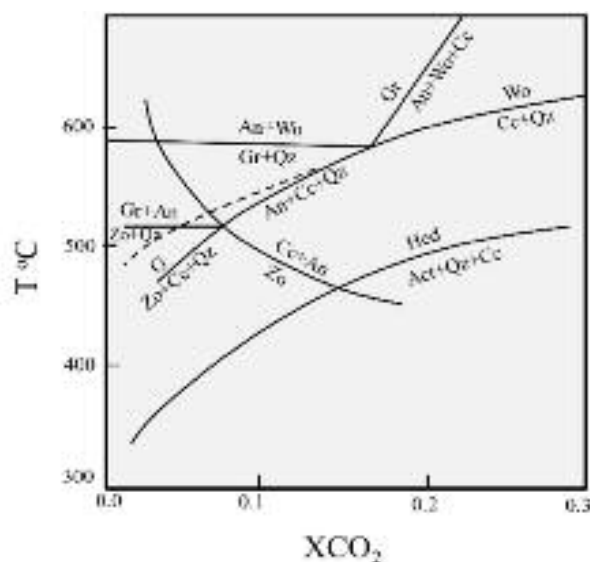
برای تعیین شرایط احتمالی P-T-X می‌توان سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H (شکل ۱۲) را در نظر گرفت، عدم وجود پيروكسن در این زون و تشکیل آندرایت با نفوذ ماگمای آهن و سیلیسیم‌دار شاری طی واکنش‌های دگرته‌ای پیشرونده با سنگ کربناتی میزبان، نشان‌دهنده‌ی تشکیل اسکارن در گستره‌ی دمایی ۴۰۰-۴۳۰°C و $f\text{O}_2$ بین ۱۰^{-۲۳}-۱۰^{-۲۶}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

زون گارنت- پيروكسن اسکارن

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

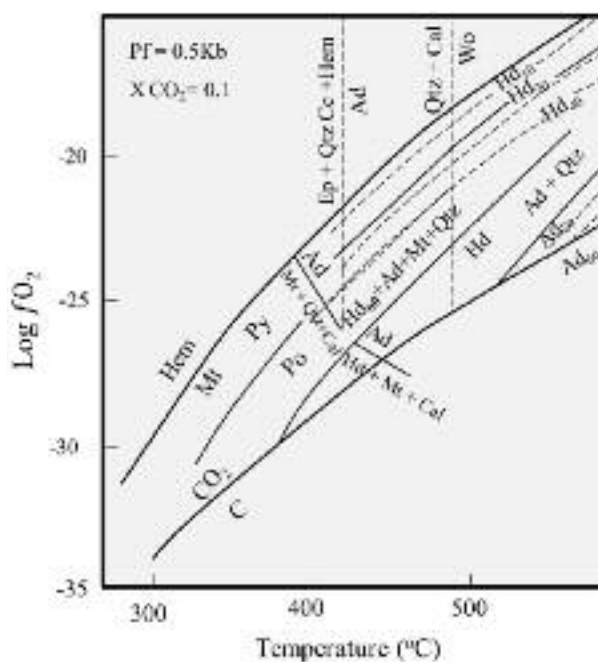


در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که گرمایی‌های غنی از H_2O و CO_2 حضور دارند، اپیدوت می‌تواند در نتیجه ناپایداری گارنت در اثر واکنش زیر تشکیل شود:



شکل ۱۱ نمودار روابط فازی $T-XCO_2$ در سامانه $[Ca-Fe-Si-C-O-H]$.

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



شکل ۱۲ نمودار روابط فازي $T\text{-log } fO_2$ در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H. [۱۱].

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

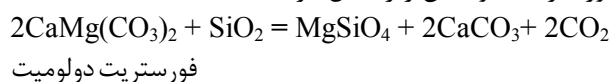
زون اسکارن منیزی

نفوذ استوک پناهکوه با ترکیب گرانودیوریت - کوارتز دیوریت در سازند آهکی - دولومیتی جمال باعث پیدایش اسکارن منیزی در منطقه شده است. بررسی‌های سنگ‌نگاری زون اسکارن منیزی در منطقه پناهکوه نشان می‌دهد که مراحل تکامل اسکارن منیزی 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:

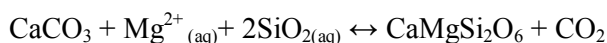
۱- مرحله پیشرونده که خود شامل دو مرحله است:

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 فورستريت و دیوپسید هستند. با توجه به نمودار نسبی X_{CO_2} -T، فورستريت 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، فورستريت با واکنش زیر شکل گرفته است:



در مرحله بعد تاثیر 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:

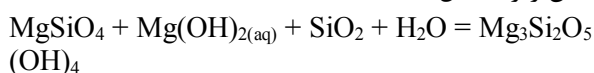


کلسيت

دیوپسید

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

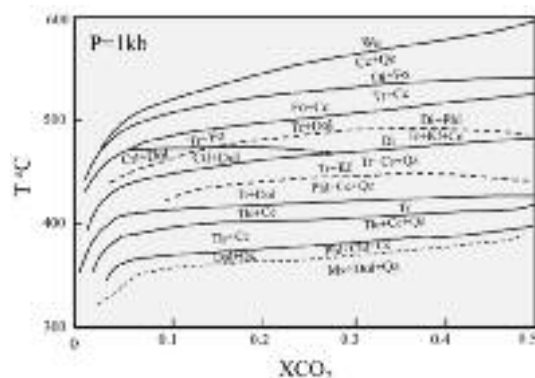
الف- مرحله‌ی پسرونده پیشین: در این مرحله سیلیکات‌های منیزی بدون آب تشکیل شده در مرحله‌ی قبل در اثر ورود گرماب‌های با دما پایین و فرایند آبکافت و کربن‌گیری دگرسان شده و به مجموعه‌ای از کانی‌های اکسیدی مانند مگنتیت، هماتیت، سیلیکات‌های منیزی آبدار مثل سرپانتین و کربناتی مثل کلسیت تبدیل می‌شود. در این مرحله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



فورستريت

سرپانتین

ب- مرحله‌ی پسرونده پسین: مجموعه کانی‌های تشکیل شده در مرحله پیشین تحت تاثیر گرماب‌های کم دما به مجموعه‌ای از کانی‌های ریز دانه مانند تالک، کلسیت و کانی‌های رسی تبدیل می‌شود که رخداد این مرحله در گستره‌ی دمای زیر ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رخ می‌دهد. از آنجا که تمام کانی‌های مشاهده شده در اسکارن منیزی 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 فازي $T-X_{CO_2}$ در سامانه Al-K-Ca-Mg-Si-H-C-O [۱۲].

(علامت اختصاری کانی‌ها: Wo = wollastonite; Cc = Calcite; Qtz = 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 اسکارن زایی 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 فاز، 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 $380-400^{\circ}\text{C}$ 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

- [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).

[3] Berberian M., King G. C. P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences 18(1981) 210-265.

[۴] 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.