



سنگنگاری، زمین‌شیمی و سنگ‌زایی اسکارن پناهکوه، غرب یزد

اعظم زاهدی*، محمد بومرو

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 همبrij 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 پارازنتیکی 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 کانی‌ای 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 زمین‌شیمی‌ای 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.

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 گستردۀ در جنوب غرب یزد شده است که اسکارن پناهکوه از آن جمله است. اسکارن‌زایی یک از مهم‌ترین رخدادهای زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی است.

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

مقدمه منطقه‌ی پناهکوه در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر تفت و در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضرآباد در چهارگوش آباده 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 آتشفسانی نهوزن بر اهمیت این منطقه افزوده

ترشیاری 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 تراوerten‌های عهد حاضر که هم‌اکنون از چشم‌های تراوerten ساز در حال نهشته شدن است، تشکیل می‌دهد. ائوسن در این منطقه با تشکیل کنگلومرا کرمان شروع می‌شود و سپس با خروج سنگ‌های آتشفسانی ائوسن در راستای گسل دهشیر- بافت ادامه می‌یابد. این واحدهای آتشفسانی بهوسیله‌ی گرانیتوئیدهای الیگومیوسن قطع شده است. گنبد آتشفسانی نئوژن در شرق منطقه مهمترین آتشفسان نئوژن را تشکیل داده است [۴] که نفوذ گرمابهای حاصل از آن سبب کاهه‌زایی مس- آهن در دولومیت‌های سازند سلطانیه شده است [۲].

گرانیتوئید پناهکوه با سن الیگومیوسن بخشی از توده‌های آذرین در کمربند ماقمایی - 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 ماقمای پتاسیم قلایی کلسیمی بالا و آلومینیم متوسط تا پر‌آلومینیمی نوع I است که در یک محیط زمین- ساختی ماقمایی مرتبط با کمان‌های آتشفسانی و همزمان با برخورد شکل گرفته است.

بررسی‌های سنگ‌نگاری توده‌های نفوذی

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

بی‌بردن 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 زمین شیمیایی، به شرایط فیزیکوشیمیایی و دمای تشکیل اسکارن در منطقه پناهکوه پی‌برد.

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 دهنده‌ی ۱۵ کیلووات و جریان تابشی 10^{-8} amp در بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن انجام شد.

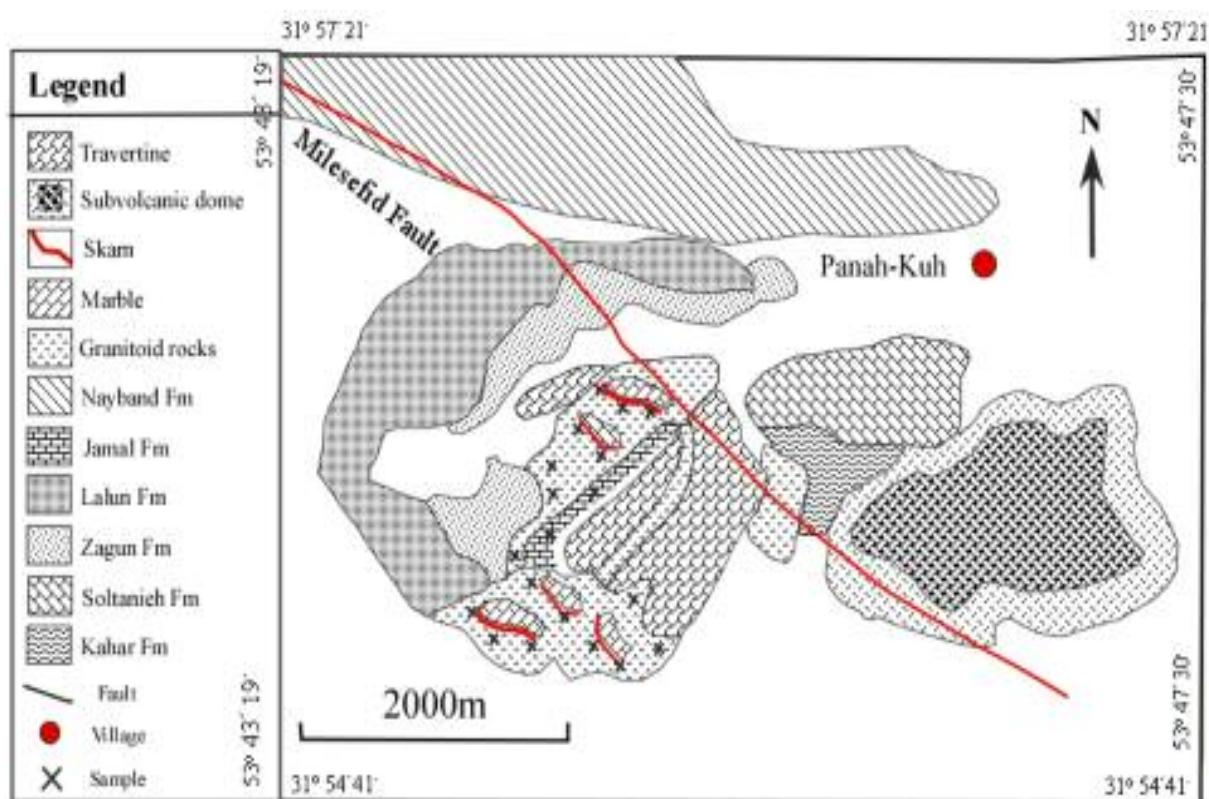
بحث و بررسی

زمین‌شناسی منطقه

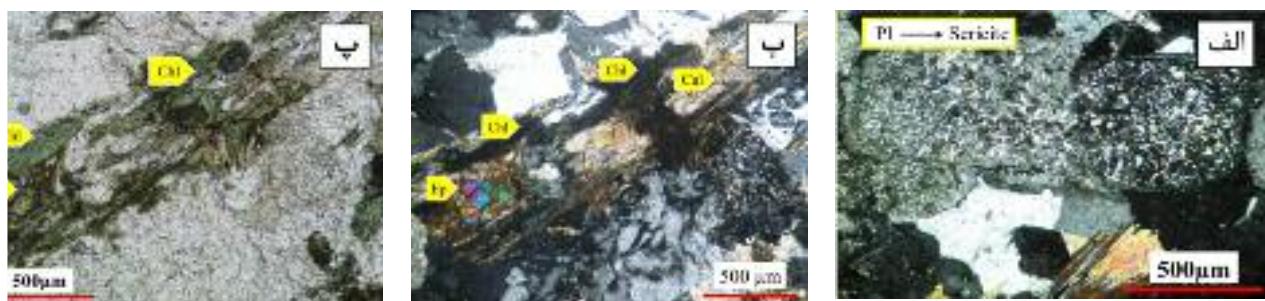
کانسار اسکارن پناهکوه در شمال غرب شهرستان تفت (استان یزد) واقع شده و از نظر جایگاه زمین‌ساختی در زون ساختاری ایران مرکزی و کمربند ماقمایی ارومیه - دختر قرار دارد [۳] منطقه‌ی پناهکوه از نظر زمین‌ساختی تحت تاثیر گسل بزرگ دهشیر- بافت و شاخه‌های فرعی حاصل از آن نظیر گسل میل سفید واقع شده است. این گسل، تمام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

پلازیوکلاز است که در نتیجه آن پلازیوکلاز به مجموعه‌ای از کلریت، اپیدوت، اکتینولیت و کلسیت تبدیل شده است (شکل ب، پ-۲). فراوانی هورنبلند در این نوع گرانیتوئیدها نشان می‌هد که مagma‌های تشکیل دهنده‌ی آنها آبدار و با حداقل فشار بخار مagma 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 magma‌ای گرانیتوئید پناهکوه است.

گرانودیوریت (گرانودیوریت هورنبلنددار و گرانودیوریت بیوتیت‌دار)، گرانودیوریت پورفیری و آپلیت است. بافت غالب این سنگ‌ها دانه‌ای بوده و کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی آن شامل کوارتز (۲۰-۳۰ درصد)، پلازیوکلاز (۳۰-۴۰ درصد) و فلدسپار قلیایی (۱۰-۱۵ درصد) است. سریسیتی شدن در بعضی از نمونه‌ها به قدری شدید است که تمام بلور پلازیوکلاز 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 منطقه‌ی پناهکوه واقع در غرب استان یزد بر اساس مطالعات صحرایی و استفاده از عکس‌های هوایی (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد با تغییرات).



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

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

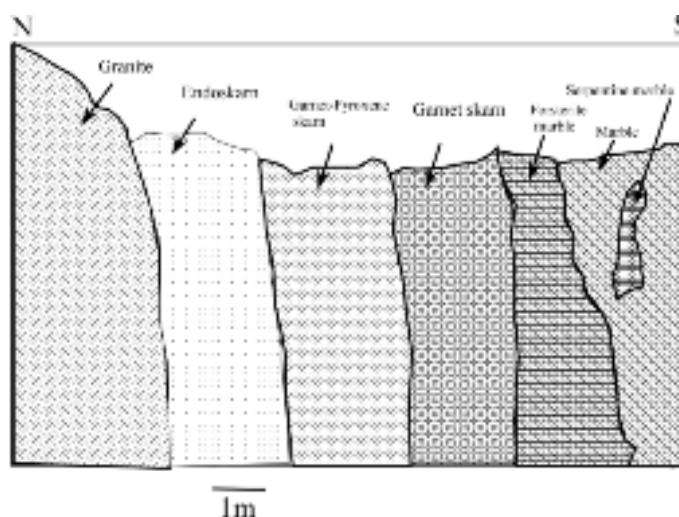
گارنت اسکارن مهم‌ترین بخش زون برون اسکارن را تشکیل می‌دهد و از لحاظ ریخت‌شناسی در مشاهدات صحرایی به صورت نواههای باریک قهوه‌ای رنگ بین لایه‌های مرمر دیده می‌شوند. ضخامت این نواهها از چند میلی متر تا ۲۰ سانتی متر تغییر می‌کند. وجود شکستگی‌های فراوان، برشی شدن اسکارن‌ها و مرمرهای همراه نشان دهنده وجود 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، بی‌شكل و همسانگرد همراه با شکستگی‌های فراوان هستند (شکل پ-۴) که فضای بین آنها را اکتینولیت با بافت نماتوبلاستیک پر کرده است.

دگرگونی و اسکارن‌زاوی در منطقه پناهکوه

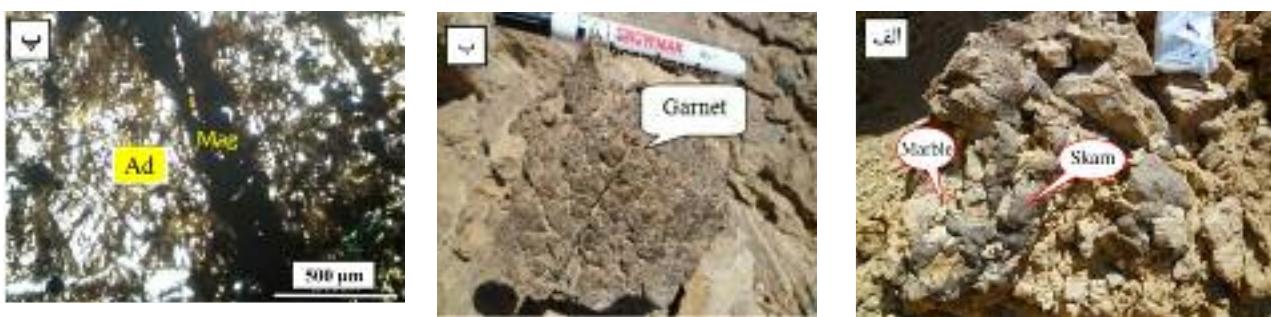
در نتیجه جایگزینی توده‌های گرانیتوئیدی در منطقه پناهکوه، سنگ‌های مجاور آن دستخوش دگرگونی مجاورتی شده‌اند. در نتیجه‌ی فرایند دگرگونی، سنگ‌های شیلی، ماسه‌سنگی و آهکی سازند نایبند به ترتیب به هورنفلس، کوارتزیت و مرمر تبدیل شده است. نفوذ توده گرانیتوئیدی پناهکوه به داخل سازند آهکی جمال، باعث پیدایش اسکارن کلسیمی و منیزیمی در منطقه شده است. زون‌بندی دگرگونی، کانه‌زاوی و دگرسانی در این منطقه دیده می‌شود، به طوری که در همبودی 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 توده نفوذی قرار دارد و در نهایت واحدهای مرمریتی فاقد کانه‌زاوی 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 اندازه می‌شود و به صورت رگچه‌ای واحدهای مرمریتی را قطع کرده است. برون اسکارن مهم‌ترین زون اسکارنی در منطقه پناهکوه است که از توده نفوذی به سمت آهک جمال دارای منطقه‌بندی است و به صورت گارنت اسکارن، گارنت-پیروکسن اسکارن و مرمر فورستیت‌دار (اسکارن منیزیمی) دیده می‌شود. در زیر به شرح این زون‌های اسکارنی می‌پردازیم.

زون درون اسکارن

در منطقه‌ی پناهکوه، درون اسکارن در سنگ‌های آپلیتی



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.

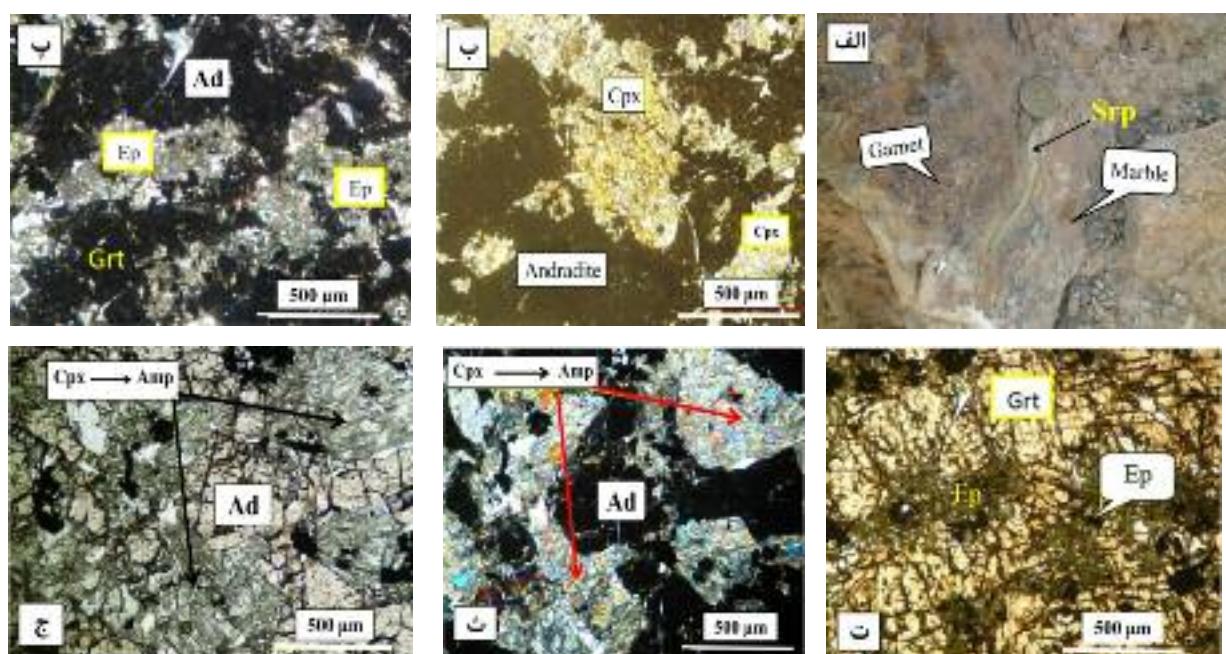
سرپاتینی شدن به طور کامل در اولیوین‌ها رخ داده و تشکیل شبیریخت‌ها رویدادی است عادی و می‌توان آنها را از روی شکل مشخص بلورهای اولیه تشخیص داد (شکل الف-۷). در مکان‌هایی شاره‌های بعدی باعث کدر شدن کامل سرپاتین‌ها شده و رنگ سیاه را به سنگ داده است. بر اساس مشاهدات سنگ نگاری دو نسل اولیوین وجود دارند. نسل اول اولیوین‌ها درشت بلور و نیمه شکل‌دار بوده که به شدت به سرپاتین، تالک و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. فقدان رخ یا ناهمسانگرد بودن ساختار بلوری در اولیوین، تاثیر مهمی بر نحوه پیشرفت سرپاتینی شدن دارد. دگرسانی در راستای شکستگی‌های نامنظم شروع می‌شود و شبکه‌ی نامنظمی از رگچه‌های سرپاتین رشته‌ای یا صفحه‌ای ایجاد می‌شود و بافت شبکه‌ای را تشکیل می‌دهند (شکل ب-۷). نسل دوم، اولیوین‌های بی‌شکل با حواشی گردنده (شکل پ-۷). این نسل از اولیوین‌ها کوچکتر بوده و به صورت ادخال در درون کلسیت مشاهده می‌شود. سرپاتین‌های حاصل از تجزیه این گونه اولیوین‌ها به صورت مدور، ریز دانه و پراکنده در متن بافت گرانوبلاستیک مرمرها وجود دارند و تشکیل شبیریخت سرپاتین در قالب بلورهای اولیوین را داده است زیرا در همیافتی با این گونه سرپاتین‌ها اولیوین‌هایی که کاملاً سرپاتینی 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 منیزیمی اغلب سالم مانده و هیچ گونه دگرسانی را نشان نمی‌دهند.

گارنت پیروکسن اسکارن

ساختار منطقه‌ای این زون شامل مرمر، سرپاتین‌های سفید رنگ و گارنت‌های شکلاتی رنگ هستند (شکل الف-۵). رگچه‌های سرپاتینی 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 قهقهایی 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 شبه‌ریخت‌ها رخدادی است عادی (ث-۵ و ج-۵).

زون اسکارن منیزیمی

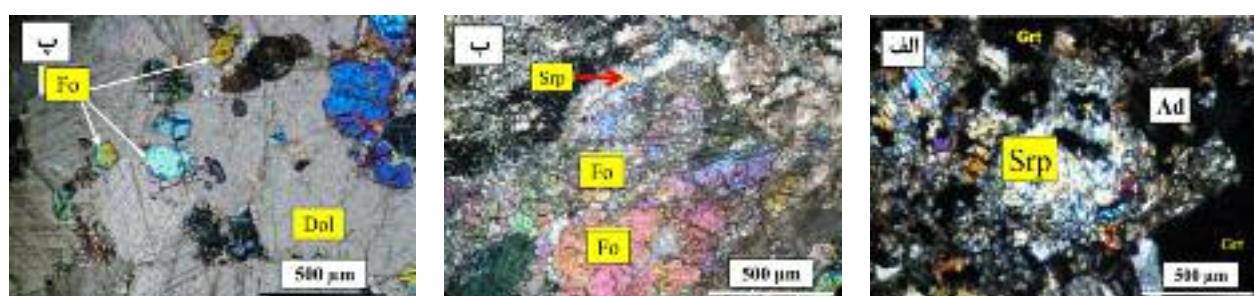
بر اساس مشاهدات صحرایی این زون به ضخامت تقریبی ۲۰ سانتی متر بین واحدهای مرمر گسترش یافته است (شکل الف-۶) و ساختار منطقه‌ای متشکل از مرمر، اولیوین و سرپاتین را تشکیل می‌دهد (شکل ب-۶). در چنین ساختار منطقه‌ای اولیوین‌هایی به شدت سرپاتینی و کدر شده به رنگ سیاه به صورت رگچه‌ای فضای بین شکستگی‌های مرمر را 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 شیمیابی است. سرپاتینی شدن، معمولی‌ترین محصول دگرسانی اولیوین در اسکارن منیزیمی پناهکوه است.



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: شبهریخت پیروکسن که کاملاً با آمفیبول رشتہ‌ای (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، اولیوین و سرپانتین در اسکارن منیزیمی پ: اولیوین‌های به شدت سرپانتینی شده و کدر شده به رنگ سیاه در بین واحدهای مرمریتی.



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

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- هدنبرژیت 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.

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:

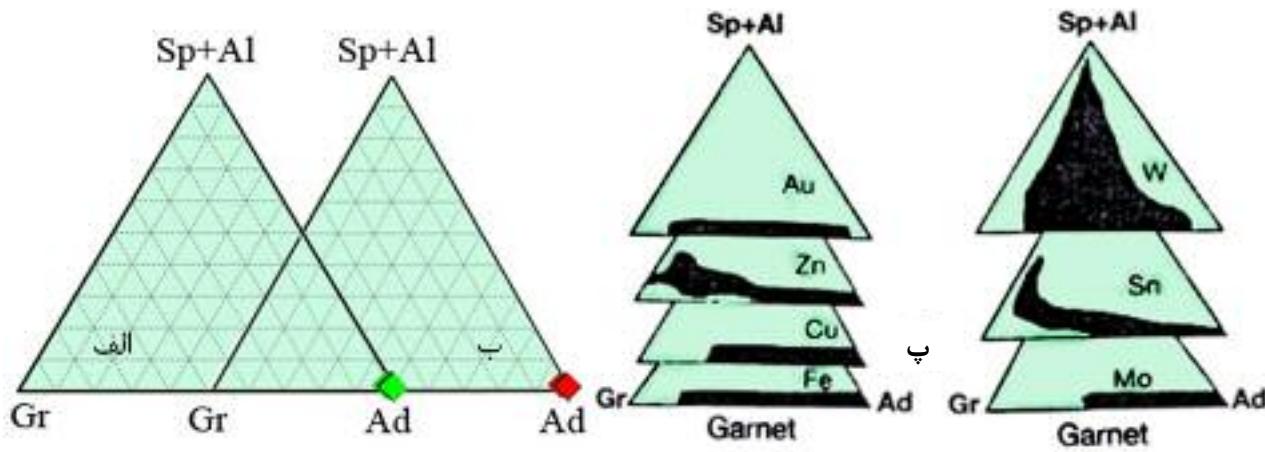
گارنت: بر اساس مشاهدات کانی‌شناسی، اسکارن منیزیمی فاقد گارنت بوده و گارنت‌های همسانگرد و بی‌شک تنها در اسکارن کلسیمی یافت می‌شوند. نتایج حاصل از آنالیز ریزپردازشی روی گارنت‌های موجود در اسکارن کلسیمی در دو زون گارنت اسکارن و گارنت – پیروکسن اسکارن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. بر اساس 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

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 _۲	۳۵,۸۸	۳۶,۱۳	۳۶,۳۸	۳۵,۹۶	۳۵,۸۴	۳۵,۸۹	۳۶,۴۹	۳۶,۱۷	۳۶,۰۵
TiO _۲	۰,۰۰	۰,۰۵	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۴۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Al _۲ O _۳	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 oxygen 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	۱,۰۹	۱,۶۰	۱,۴۴

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

Sample	M12-1	M12-2	M12-3	M12-4	M12-5	M12-6	M12-7	M12-8	M12-9
Oxide composition (wt. %)									
SiO ₄	35.46	35.73	35.26	35.93	35.38	35.01	36.11	36.2	36.17
TiO ₄	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	0.15	0.11	0.13	0.17	0.11	0.17	0.15	0.11	0.06
FeO(T)	29.44	28.94	29.12	29.01	28.28	27.81	29.48	29.59	29.59
MnO	0.72	0.78	0.67	0.47	0.55	0.73	0.80	0.64	0.70
MgO	0.03	0.05	0.03	0.01	0.03	0.05	0.01	0.04	0.09
CaO	32.19	32.10	31.80	32.86	32.23	31.52	32.61	32.52	32.62
Total	98.18	97.72	97.06	96.55	96.72	95.73	99.06	99.25	99.25
Number of ions on the basis of 12 oxygene atoms									
Si	2.97	3.00	2.99	2.99	3.00	3.01	3.00	3.00	2.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Fe ³⁺	2.01	1.98	2.01	1.99	1.98	1.96	2.01	2.01	2.01
Fe ²⁺	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
Mn	0.05	0.06	0.05	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05
Mg	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Ca	2.89	2.89	2.89	2.93	2.93	2.91	2.90	2.90	2.89
Total	7.97	8	8	7.99	7.99	8.01	8.02	8.02	8
Al+Fe+Mn	2.10	2.05	2.08	2.04	2.03	2.03	2.07	2.07	2.06
Garnet components (mole fraction, %)									
%And	96.86	96.73	97.06	97.55	97.49	96.54	97.05	97.05	97.33
%gro	0.71	0.54	0.63	0.83	0.54	0.84	0.24	0.24	0.29
%Spes	2.42	2.73	2.31	1.61	1.97	2.62	2.71	2.71	2.38



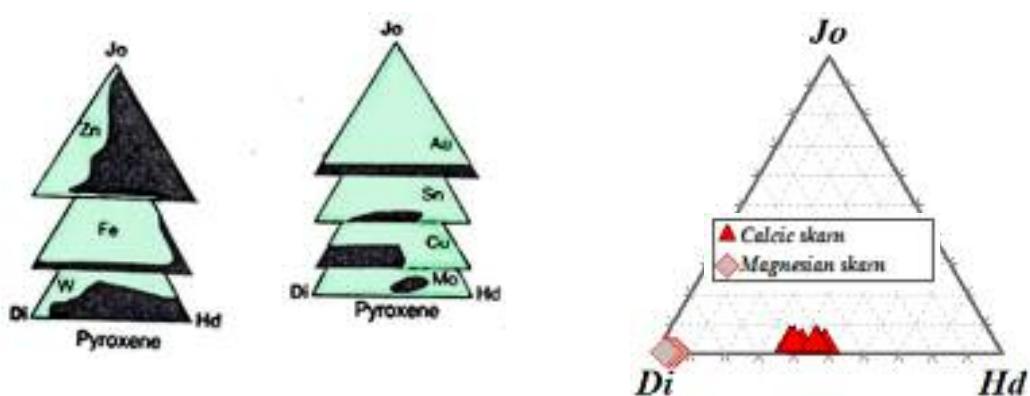
شکل ۸ نمودار توزیع ترکیب اعضای نهایی گارنت‌های پناهکوه در دو زون گارنت اسکارن (الف) و گارنت پیروکسن اسکارن (ب) و پ: مقایسه آن با ترکیب گارنت در اسکارن‌های شناخته شده جهانی [۶] نمودار نشان می‌دهد که ترکیب گارنت‌های اسکارن پناهکوه با ترکیب گارنت‌های اسکارن آهن هم خوانی دارد.

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

Sample	M12-1	M12-2	M12-3	M12-4	M12-5	M12-6	M12-7	M12-8
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	۱۲.۶۰
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	۲۲.۸۶	۲۳.۳۳	۲۲.۸۹	۲۴.۱۱	۲۳.۵۹	۲۵.۵۶	۲۳.۵۴	۲۲.۹۷
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 _۶	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	۹.۹۵	۹.۹۵	۹.۹۹	۹.۹۷	۱۱۴	۱۰۵	۹.۹۸
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 ^{۳+} + 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

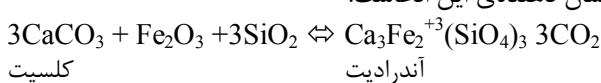
جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی کانی کلینوپیروکسن در اسکارن منیزیمی.

Sample	M17-1	M17-2	M-17-3	M17-4	M17-5	M17-6	M17-7	M17-8	M17-9
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	۱۷.۷۷	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 _۶	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	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	۹.۴۰	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 ^{۳+} + 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	۲.۶۶
%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 اسکارنی [۶].

۱۰). با توجه به این که کلینوپیروکسن در این زون دیده نمی‌شود، بنابراین گارنت در این زون در اثر نفوذ مagma شاری آهن و سیلیسیم‌دار طی واکنش‌های دگرنهادی پیشرونده به سنگ کربناتی میزبان به صورت واکنش زیر تشکیل شده است. فروپاشی گارنت به مگنتیت، کوارتز، کلسیت، اپیدوت و کلریت نشان دهنده این ادعاست.



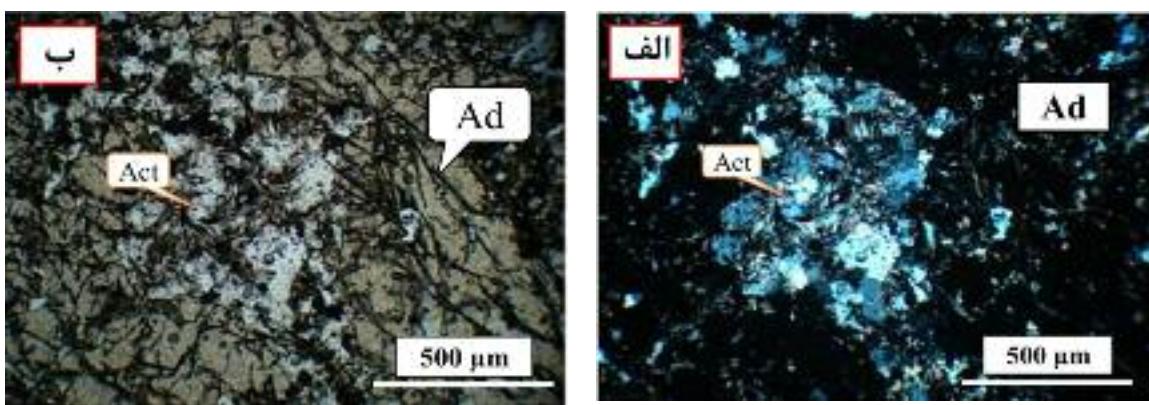
اولیوین: در منطقه‌ی پناهکوه اولیوین تنها در زون اسکارن منیزیمی یافت می‌شود. نتایج حاصل از آنالیز ریزپرازی ۸ نقطه از درشت بلورهای اولیوین نشان داد که ترکیب اولیوین در زون اسکارن منیزیمی از نوع فورسترتیت است (جدول ۵).

تمامی فیزیکوشیمیابی 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

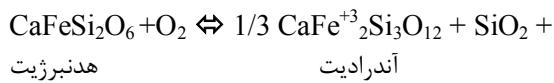
جدول ۵ نتایج آنالیز ریزپرازی کانی اولیوین در اسکارن منیزیمی.

Sample	Mh۱۷-۱	Mh۱۷-۲	Mh۱۷-۳	Mh۱۷-۴	Mh۱۷-۵	Mh۱۷-۶	Mh۱۷-۷	Mh۱۷-۸	Mh۱۷-۹
Oxide composition (wt. %)									
SiO ₂	۳۸,۲	۳۸,۳۹	۳۸,۲۴	۳۸,۴	۳۸,۳۳	۳۸,۱۴	۳۸,۴۴	۳۸,۶۶	۳۸,۷۱
TiO ₂	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴	۰,۰۳
FeO	۶,۳۳	۶,۲۳	۶,۳۵	۶,۳۶	۶,۲۸	۶,۴۳	۶,۰۵	۵,۸۷	۵,۹۹
MnO	۰,۵۵	۰,۴۸	۰,۵۲	۰,۶۱	۰,۵۴	۰,۴۹	۰,۳۹	۰,۴۷	۰,۴۸
MgO	۵۳,۰۷	۵۳,۷۱	۵۳,۷۶	۵۳,۶۸	۵۳,۵۹	۵۳,۶۱	۵۳,۹۳	۵۴,۶۴	۵۴,۲۹
CaO	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۶	۰,۱۵	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۲۲	۰,۰۹	۰,۰۹
Total	۹۸,۱۵	۹۸,۸۲	۹۸,۹۴	۹۸,۸۸	۹۸,۸۶	۹۸,۷۲	۹۹,۰۳	۹۹,۷۷	۹۹,۶۳
Number of ions on the basis of 4 oxygen atoms									
Si	۰,۹۵	۰,۹۵	۰,۹۴	۰,۹۴	۰,۹۴	۰,۹۴	۰,۹۴	۰,۹۴	۰,۹۴
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Fe ²⁺	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۲
Fe ³⁺	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Mn	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱
Mg	۱,۹۶	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۷	۱,۹۸	۱,۹۷
Ca	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰
Total	۳,۰۵	۳,۰۵	۳,۰۶	۳,۰۶	۳,۰۶	۳,۰۶	۳,۰۶	۳,۰۶	۳,۰۵
Olivine components (mole fraction, %)									
%Fo	۹۳,۷۳	۹۳,۸۹	۹۳,۷۹	۹۳,۷۶	۹۳,۸۳	۹۳,۷	۹۴,۰۸	۹۴,۳۱	۹۴,۱۷
%Fa	۶,۲۷	۶,۱۱	۶,۲۱	۶,۲۴	۶,۱۷	۶,۳	۵,۹۲	۵,۶۹	۵,۸۳



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

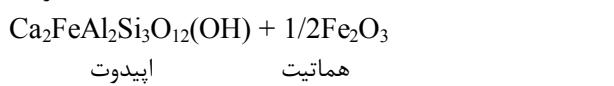
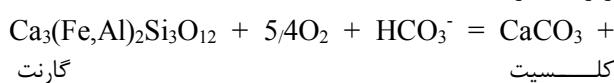
پیروکسن- گارنت) (شکل ب-۵). با توجه به فراوانی کانی‌های پیروکسن و مگنتیت در سنگ می‌توان نتیجه گرفت که گارنت آندرادیت در اثر واکنش زیر به وجود آمده است:



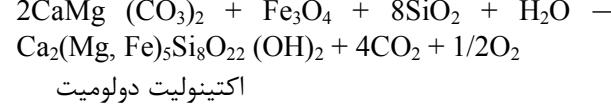
آندرادیت

$1/8 \text{Fe}_3\text{O}_4$

تمام کانی‌های این گام در سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). همچنانکه دیده می‌شود آندرادیت میدان پایداری گسترده‌ای از 390°C تا 700°C و گریزندگی اکسیژن 15°C -تا 26°C -را نشان می‌دهد. آندرادیت با ولستونیت + مگنتیت در $T > 700^{\circ}\text{C}$ و هدنبرژیت + ولستونیت در $T < 550^{\circ}\text{C}$ رخ داده است. سپس در مرحله‌ی دگرنهادی حضور کوارتز جانشین می‌شود. از آنجا که چنین همیافتد کانی‌ای در اسکارن پناهکوه دیده نشده است، لذا گارنت‌زایی در $550^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$ رخ داده است. پس در مرحله‌ی دگرنهادی پسروند، در اثر برهمکنش گرمابی‌های 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 همیافتد با کوارتز و کلسیت انجام گرفته است (شکل ۱۰). در نمودار T-X (CO_2) بیشینه دمای پایداری مجموعه فوق 510°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]:

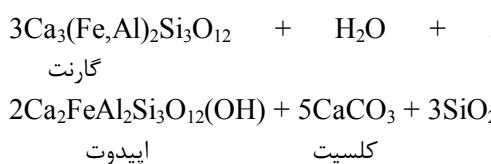


اکتینولیت دولومیت

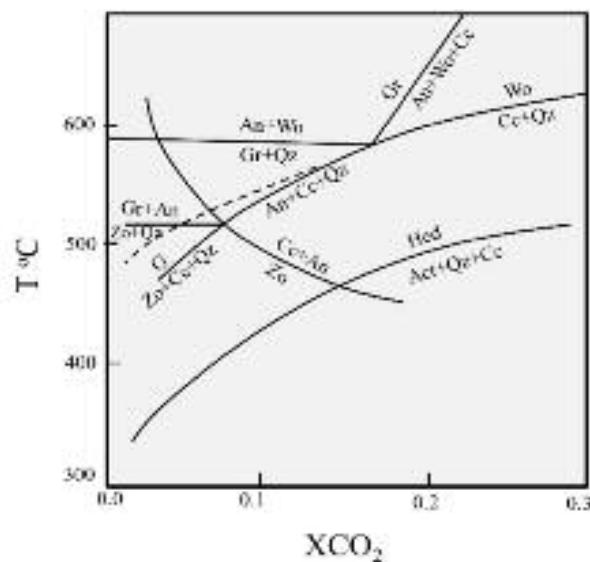
برای تعیین شرایط احتمالی P-T-X می‌توان سامانه‌ی Si-C-O-H (شکل ۱۲) را درنظر گرفت، عدم وجود پیروکسن در این زون و تشکیل آندرادیت با نفوذ ماقمای آهن و سیلیسیم‌دار شاری طی واکنش‌های دگرنهاد پیشرونده با سنگ کربناتی میزبان، نشان‌دهنده‌ی تشکیل اسکارن در گستره‌ی دمایی $400^{\circ}\text{C} - 430^{\circ}\text{C}$ و $f\text{O}_2$ بین $10^{-22} - 10^{-26}$ است.

زون گارنت- پیروکسن اسکارن

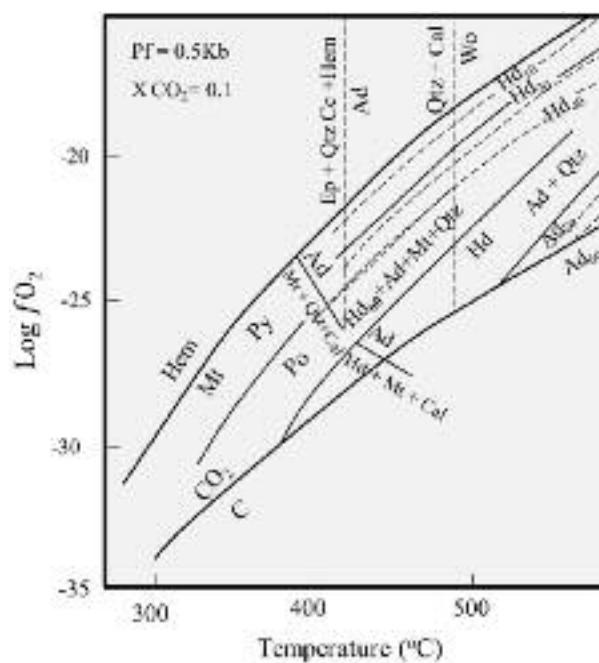
کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این زون شامل پیروکسن و گارنت است. در این زون نخست پیروکسن‌ها در مرحله دگرنهاد پیشرونده به صورت مستقل شکل گرفته است. به دنبال آن گام، شاره‌های آهن‌دار با هجوم خود، گارنت‌های آندرادیتی را به محیط اسکارنی تحمیل کرده‌اند (بر مبنای شواهد بافتی



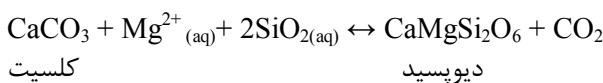
در محل شکستگی‌ها و در مناطقی که گرمابی‌های غنی از H_2O و CO_2 حضور دارند، اپیدوت می‌تواند در نتیجه ناپایداری گگارنت در اثر واکنش زیر تشکیل شود:



شکل ۱۱ نمودار روابط فازی $T-XCO_2$ در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H (علامت اختصاری کانی‌ها: Gr = Garnet; An = Anortite; Hd = Hedenbergite; Qz = Quartz; Act = Actinolite; Cc = calcite; Wo = Wollastonite).

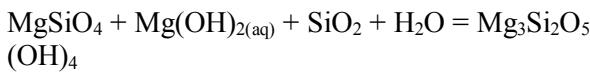


شکل ۱۲ نمودار روابط فازی $\log fO_2$ در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H [۱۱]. علامت اختصاری کانی‌ها: (Ad = andradite; Cal = calcite; Hem = hematite; Hd = hedenbergite; Mt = magnetite; Qtz = quartz; Wo = wollastonite; Ep = epidote; C = graphite).



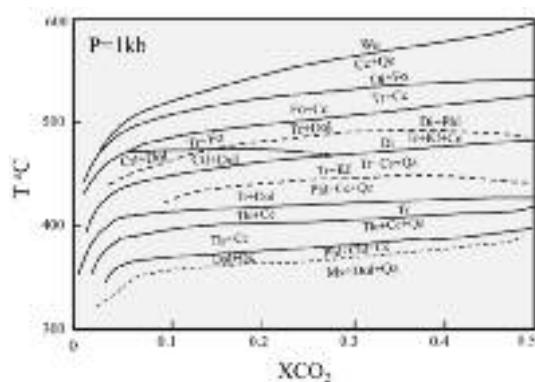
- مرحله‌ی پسروند: این مرحله به دو زیر مرحله تقسیم می‌شود:

الف- مرحله‌ی پسروند 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:



سرپانتین
فورستریت

ب- مرحله‌ی پسروند 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 دمایی زیر ۳۰۰ درجه‌ی سانتی گراد رخ می‌دهد. از آنجا که تمام کانی‌های مشاهده شده در اسکارن منیزیمی پناهکوه در سیستم CMS-HC (شکل ۱۳) قرار دارند، بنابراین می‌توان دمای 0°C ، فشار ثابت دو کیلوبار و $\text{XCO}_2 = 0.1-0.6$ را برای اسکارن مورد بررسی برآورد کرد.



شکل ۱۳ نمودار روابط فازی T-XCO_2 در سامانه $\text{Al-K-Ca-Mg-Si-H-C-O}$ [۱۲].

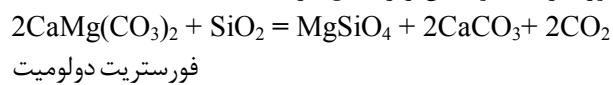
Wo = wollastonite; Cc = Calcite; Qz = Quartz; Di = Diopside; Fo = Forsterite; Tr = Tremolie; Dol = Dolomite; Ctl = Chrysotile; Kf = Feldspar; Phl = Phlogopite; Chl = Clinochlore; Tlc = (Talc; Ms = Muscovite).

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 پسروند است که هر کدام با مجموعه‌های پاراژنزی و بافت‌های شاخص هر مرحله مشخص می‌شود. روابط پاراژنتیکی کانی‌ها به ترتیب زمان تشکیل عبارتند از:

۱- مرحله‌ی پیشرونده که خود شامل دو مرحله است:
الف: دگرگونی مجاورتی: این مرحله طی صعود ماقما 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 ماقما و فشار حاصل از ماقماهای شاری آزاد شده، شکستگی-هایی در سنگ‌های آهکی- دولومیتی سازند جمال ایجاد شده که جابه جایی و انتقال عنصر به وسیله‌ی شاره‌های کانسارساز را امکان پذیر می‌سازد. برخلاف واکنش‌های مرحله‌ی دگرگونی مجاورتی که گریزندگی گازها در واکنش‌ها نقش دارند، در واکنش‌های این مرحله غلظت یون‌ها حائز اهمیت است. شاره‌هایی که در فرایند دگرگونی و دگرنهادی از سنگ‌های کربناتی عبور می‌کنند اصولاً دارای XCO_2 پایین (0.1) هستند [۱۱]. کانی‌های اصلی تشکیل شده در این مرحله فورستریت و XCO_2-T , دیوپسید و فورستریت در دمای بیش از 475°C درجه‌ی سانتی گراد تشکیل می‌شود (شکل ۱۳). با توجه به روابط پاراژنتیکی کانی‌ها می‌توان درنظر گرفت که در آغاز مرحله دگرنهادی پیشرونده، فورستریت با واکنش زیر شکل گرفته است:



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

- [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 ام، "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 $Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2$ ", 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) 749-755.
- [10] Shoji T., "The stability of clinopyroxene of the diopside-hedenbergite series in H_2O-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.

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 بررسی‌های 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 مرمرهای منطقه‌ی پناهکوه مشخص می‌شود. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و برآذش با نمودارهای تعادل فازی، نخست مامگای شاری با دمای بالا ($600^{\circ}C$) 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 $380-400^{\circ}C$ شکل گرفته‌اند. کانی‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی اسکارن پناهکوه نشان دهنده شکل‌گیری آن در شرایط اکسایشی، سطوح پوسته‌ای کم عمق و مشابه شرایط تشکیل دیگر سیستم‌های اسکارنی آهن و مس است.

قدرتمندی

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

مراجع

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