



کانی‌شناسی، ژئوشیمی و سنگ‌زایی اسکارن منطقه‌ی زرو (شمال غربی استان یزد)

محمدعلی مکی‌زاده^{۱*}، محمد رهگشای^۱، بتول تقی‌پور^۲، صدیقه تقی‌پور^۴

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

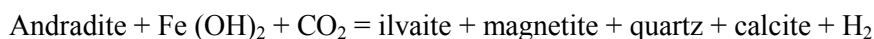
۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

۳- بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۴- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۸/۴/۲۲، نسخه نهایی: ۸۸/۱۰/۲۲)

چکیده: اسکارن زرو در شمال غربی استان یزد در کمربند ماگمایی سنوزوئیک ایران مرکزی قرار دارد. گستره‌ی سنگ‌های این منطقه، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن همراه با توده‌ی نفوذی گرانیتوئیدی است. سنگ آهک‌های سازند تفت (کرتاسه زیرین) در غرب منطقه‌ی زرو، میزبان اسکارن و مرمر زائی با کانی‌سازی مس و به دور از توده‌ی نفوذی هستند. کلینوپیروکسن، گارنت، ایلوایت (ilvaite)، وزوویانیت، ترمولیت، اپیدوت، کالکوپیریت، مگنتیت، کلسیت و کوارتز از مجموعه کانی‌های مشاهده شده هستند. روابط پاراژنتیکی این کانی‌ها یک خاستگاه چندزادی را برای مجموعه اسکارنی نشان می‌دهد. بلورها و توده‌های سیاه رنگ ایلوایت همیافتی نزدیکی را با زون کلینوپیروکسن (هدنبرژیت) و گارنت (آندرادیت) دارند، احتمالاً این همیافتی جانشینی را نشان می‌دهد. شکل‌گیری ایلوایت با واکنش زیر امکان‌پذیر است:



کانی‌های اولیه اسکارن زرو دردمای 550°C شکل گرفته‌اند. دگرسانی کانی‌های بی آب و ساخت مجموعه‌های کانیائی آبدار از دمای تقریبی زیر 470°C در فوگاسیته بالای اکسیژن شروع شده است.

واژه‌های کلیدی: اسکارن، زرو، ایران مرکزی، پیروکسن، گارنت، ایلوایت، مگنتیت.

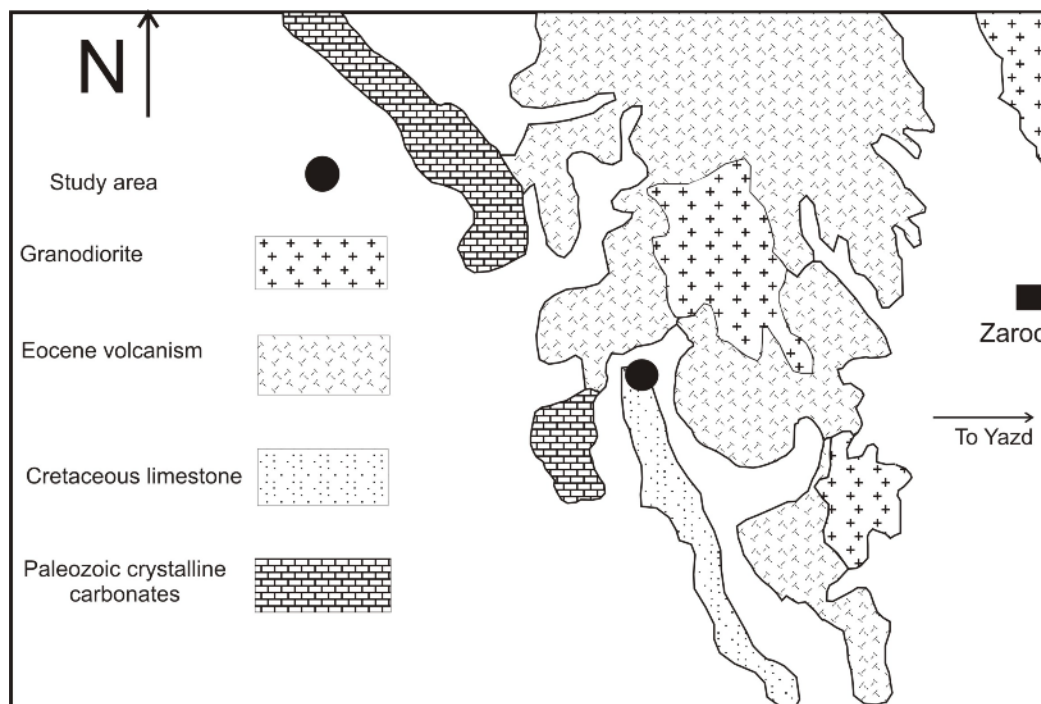
زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

برپایه‌ی نقشه زمین‌شناسی آباده [۱] و برداشت‌های صحرایی، قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی وابسته به پالئوزوئیک (?) در شرق منطقه (مشرق به فرورفتگی زمین‌ساختی گاوخونی - طاقستان) رخمون دارند و شامل شیست‌های پلیتی، آهک‌ها، دولومیت‌های متبلور و کوارتزیت‌اند (شکل ۱). سازند تخریبی سنگستان متشکل از ماسه سنگ و کنگلومرا و در پی آن سنگ‌های آهکی موسوم به سازند تفت به صورت ارتفاعات کشیده با راستای شمال غربی - جنوب شرقی در مجاورت گسلی همراه با واحدهای دیگر مشاهده می‌شوند. مرمرسازی و اسکارن‌سازی در سازندهای کربناتی این منطقه دیده می‌شود که آثار حفاری‌های معدنی (تونل و برداشت‌های روباز) وجود

مس (Cu) را نشان می‌دهد. گدازه‌های آندزیتی که به وسیله‌ی شاخه‌های دایک مانند تاخیری با ترکیب اسیدی و لوکوگرانیت و دایک‌های بازی قطع شده‌اند، منحصراً در شرق منطقه دیده می‌شوند. مجموعه‌ی این سنگ‌های آتشفشانی به وسیله توده‌های نفوذی کوچک گرانیتی - گرانودیوریت، دیوریت و میکرودیوریت قطع شده است. برداشت‌های صحرایی تاکنون هیچ ارتباطی را بین اسکارن - مرمر با نفوذی‌ها و سنگ‌های آذرین منطقه به دست نشان نداده است.

نزدیک‌ترین رخمون توده‌های نفوذی در ۵ کیلومتری شرق منطقه است. بنابراین بنا بر الگوی ارائه شده این اسکارن‌ها از نوع دور از توده‌ی نفوذی هستند.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۷۹۳۲۱۶۲ (۰۳۱۱) ۹۸+، نمابر: ۷۹۳۲۱۵۹ (۰۳۱۱) ۹۸+، پست الکترونیکی: ma_mackizade@yahoo.com



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی زرو و نمایش موقعیت اسکارن با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، برگرفته از [۱].

برداشت‌های صحرایی

از دیدگاه‌های صحرایی نخست توده‌های، پیروکسن سبز زیتونی رنگ است که در نظر اول جلب توجه می‌کنند. این توده‌ها به-شکل رگه‌ای سنگ میزبان شامل آهک‌های کرتاسه با تبلور مجدد و مرمری را قطع کرده‌اند، در رگه‌های ضخیم‌تر بخش-هایی از سنگ میزبان مرمرها مشاهده می‌شوند که به شکل ادخال‌های بزرگی در توده‌های پیروکسن (نوع هدنبرژیت) درگیر هستند. همجواری هدنبرژیت‌ها با سنگ دیواره نیز در برخی موارد نشانگر پرشدگی حفره‌های سنگ دیواره است. پیروکسن‌ها با بافت شانه‌ای (Comb texture) عمود بر سنگ دیواره دیده می‌شوند و مناطق کانی‌سازی شده نیز در توده‌های بزرگتر به چشم می‌خورد، در حالی‌که گسترش گارنت در اسکارن زرو خیلی کمتر از پیروکسن است. گارنت‌های قهوه‌ای در داخل پیروکسن‌ها به شکل جانشینی دیده شده‌اند (شکل ۲). در بعضی موارد بازمانده‌ی پیروکسن‌ها مشاهده می‌شود. کانی کمیاب ایلوایت (Ilvaite) که اولین گزارش پیدایش آن در این نقطه ایران مرکزی است [۲] به شکل بلورهای ستونی و منشوری سیاه رنگ، کشیده و طویل شده با جلای نیمه فلزی - کدر (شکل ۳) دیده می‌شود. ایلوایت یک سیلیکات

کلسیم و آهن، آمیخته ظرفیت (mixed valence) با فرمول عمومی $\text{CaFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})$ است که در سیستم راست‌گوشه یا تک میل متبلور شده است، و به‌عنوان کانی قهقرائی در نهشته‌های اسکارن Zn-Pb و Fe و نیز اسکارن Sn-W-F(Be) گزارش شده است [۳].

کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری اسکارن - مرمر

پیروکسن‌ها بیشترین حجم کانی‌زائی را در اسکارن زرو دارند. پیروکسن در زمینه‌ی کلسیت و نیز کوارتزهای تأخیری با بافت پرفیروبلاستیک در موارد محدودی حضور دارند. تجزیه‌ی پیروکسن‌های درشت به کلسیت + کوارتز، بویژه در مناطقی که گارنت وجود دارد. در کرانه‌ها و در راستای کلیواژهای پیروکسن‌ها دیده می‌شود. در این گونه دگرسانی بازمانده‌ی پیروکسن‌ها به‌صورت بلورهای کشیده تا سوزنی همراه کوارتز و کلسیت دیده می‌شوند. هجوم تأخیری شاره‌های سرشار از SiO_2 سبب شده است که فضای خالی بین پیروکسن‌ها با کوارتز پر شود و در مواردی ناپایداری پیروکسن‌ها را موجب شده است. در این گونه موارد بازمانده‌ی پیروکسن‌ها با بافت شبی (ghost texture) دیده می‌شود.

نیز متداول است (شکل ۳ ب). ایلوئیت به شکل پرکننده‌ی فضای خالی گارنت‌ها (شکل ۳ پ) و نیز به شکل مستقل در

همراهی با کوارتز و گارنت‌ها دیده می‌شود (شکل ۳ ت). از موارد کمیاب رخداد ایلوئیت شکل‌گیری آن به صورت مستقل در کلسیت‌ها می‌باشند. به این نحو که با شکل‌های آمیبی در محل مرزهای دانه‌های کلسیت‌ها با بافت چند گوشه‌ای (اتصال سه‌گانه) رشد کرده است. رخداد ایلوئیت نیز در شکستگی‌های گارنت دیده شده است. به‌طور کلی ایلوئیت بیشترین همیافتی را با پیروکسن‌ها نشان می‌دهد. مگنتیت در همراهی با گارنت‌ها و پیروکسن‌ها و نیز ایلوئیت (کمتر) دیده می‌شوند. این کانی پرکننده‌ی شکستگی‌های گارنت - پیروکسن را پر کرده و جانشین آن‌ها می‌شود. کالکوپیریت به مقدار کم در این همراهی‌ها دیده شده است.

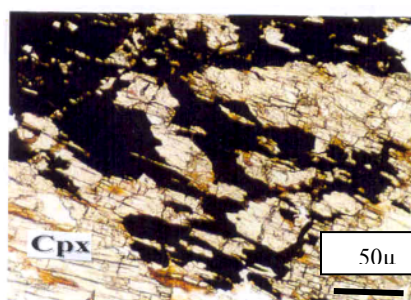


شکل ۲. ب

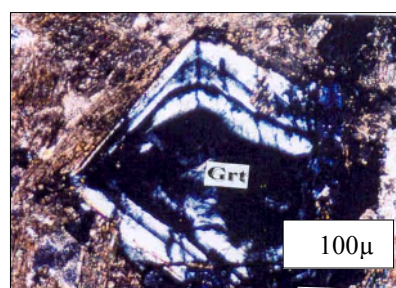


شکل ۲. الف

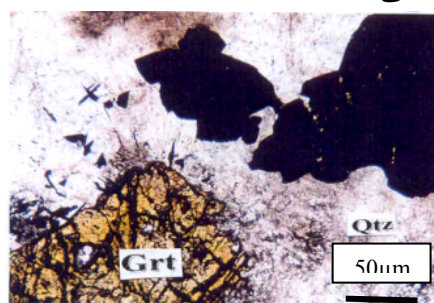
شکل ۲ الف. منطقه‌بندی پیروکسن، گارنت، کوارتز، ایلوئیت، ب. بلورهای منشوری ایلوئیت.



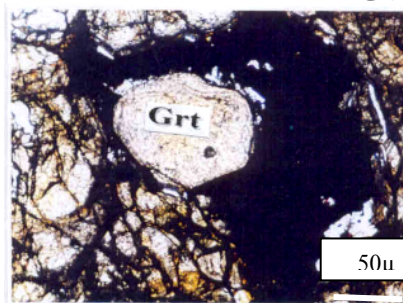
ب



الف



ت



پ

شکل ۳ الف. گارنت‌های تمام شکل‌دار، ناهمسانگرد و دارای ساخت منطقه‌ای درمیان پیروکسن‌های دگرسان XPL. ب. جان‌شینی ایلوئیت در راستای رخ‌های پیروکسن PPL. پ. پرشدگی فضای بین گارنت‌ها با ایلوئیت PPL. ت. همراهی ایلوئیت با کوارتز و گارنت PPL.

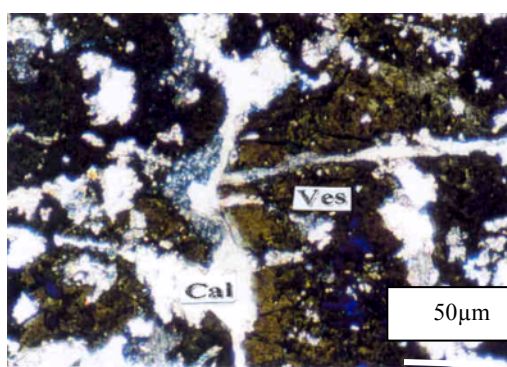
(شکل ۴ الف). وزوویانیت‌ها با رنگ تداخلی غیر عادی در همراهی با کلسیت به‌طور مستقل نیز دیده شده‌اند (شکل ۴ ب).

شیمی کانی‌ها

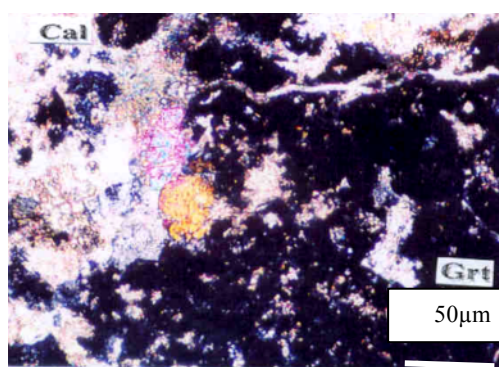
پیروکسن

برای تعیین نوع پیروکسن از آزمایش کیفی (EDS) و کمی (WDS) استفاده شد (جدول ۱). با توجه به نتایج این آزمایش‌ها پیروکسن به روشنی ترکیب هدرنبرژیت را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای Q-J (شکل ۵) همه پیروکسن‌ها در گستره‌ی پیروکسن‌های کلسیم - منیزیم - آهن‌دار (Quad) قرار می‌گیرند و از نوع هدرنبرژیت هستند [۴].

در مجاورت بلافصل اسکارن‌ها، مرمهرهای خاکستری توده‌ای قرار دارند و مرمهرها چون غلافی اسکارن‌ها را در برگرفته‌اند. این مرمهرها با کانی‌های کالک سیلیکات فاقد گونه‌ی کانی‌سازی فلزی مشخص هستند. بافت گرانوبلاستیک از کلسیت به تنهایی و یا در همراهی با گارنت در آن‌ها فراوان است. گارنت‌های این مرمهرها که کاملاً بی‌شکل و همسانگردند، در همراهی با وزوویانیت نیز دیده شده‌اند که با بافت نامتعادل مشخص می‌شوند. ترمولیت و کلریت از دیگر کانی‌های این مرمهرها هستند. اپیدوت نیز در زمینه‌ی کلسیت و در همراهی با گارنت‌ها دیده می‌شود و به‌نظر می‌رسد که از تجزیه‌ی گارنت‌ها حاصل شده‌اند



ب



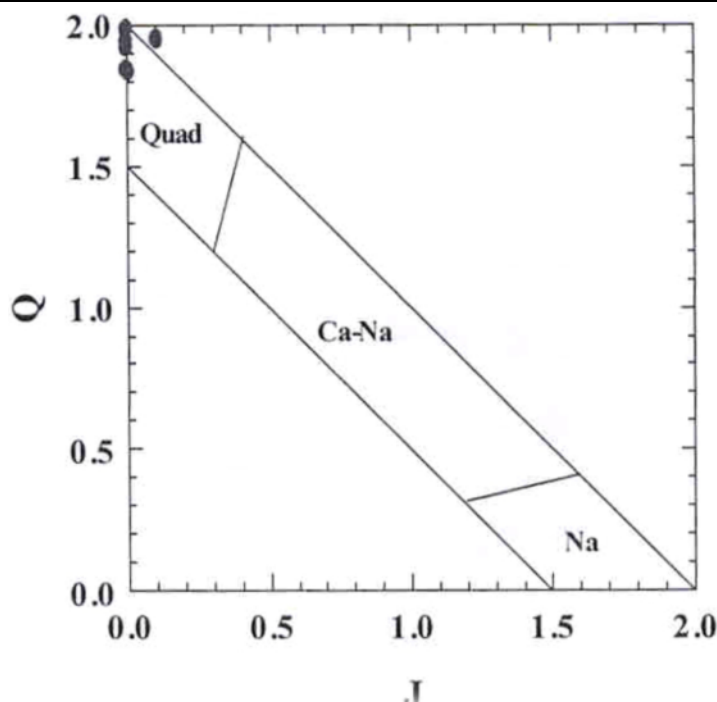
الف

شکل ۴ الف. همراهی اپیدوت، گارنت و کلسیت XPL. ب. رشد وزوویانیت‌های بی‌شکل در زمینه‌ی کلسیت XPL.

جدول ۱ داده‌های ریز پردازش الکترونی از پیروکسن‌های اسکارن زرو.

Label (%)	3-Z	5-Z	7-Z	8-Z	14-Z	15-Z
SiO ₂	۴۹٫۶۱	۴۹٫۷۹	۴۹٫۰۶	۴۸٫۵۸	۴۸٫۴۱	۴۸٫۲۸
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۰٫۰۷	۰٫۱۳	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۶۱
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۶
FeO	۲۰٫۰۴	۱۵٫۷	۲۴٫۴۸	۲۱٫۷۱	۲۲٫۷۲	۲۳٫۰۵
MnO	۲٫۳۴	۵٫۴۲	۱٫۴۸	۳٫۳۴	۴٫۸۸	۱٫۰۵
MgO	۴٫۱۳	۵٫۲۰	۲٫۰۷	۳٫۰۱	۰٫۷۹	۳٫۲۲
CaO	۲۲٫۸۳	۲۳٫۳۹	۲۳٫۵۵	۲۳٫۵۹	۲۳٫۲۸	۲۳٫۰۲
Na ₂ O	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۱۶
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲
Total	۹۹٫۰۲	۹۹٫۷۱	۱۰۰٫۷۶	۹۹٫۰۹	۱۰۰٫۳	۹۹٫۴۷
Label (ppm)	کاتیون‌ها بر پایه شش اکسیژن					
Si	۲	۲٫۳۴	۱٫۹۸	۱٫۹۷	۱٫۹۸	۱٫۹۶
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳
Fe ²⁺	۰٫۶۷	۰٫۶۱	۰٫۸۲	۰٫۷۳	۰٫۷۷	۰٫۷۸
Mn	۰٫۰۸	۰٫۲۱	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۱۷	۰٫۰۴
Mg	۰٫۲۵	۰٫۳۶	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۰۵	۰٫۱۰

Ca	۰٫۹۸	۱٫۱۷	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۰
Na	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱



شکل ۵ نمودار Q-J برپایه داده‌های تجزیه پیروکسن‌های زرو [۴].

گارت

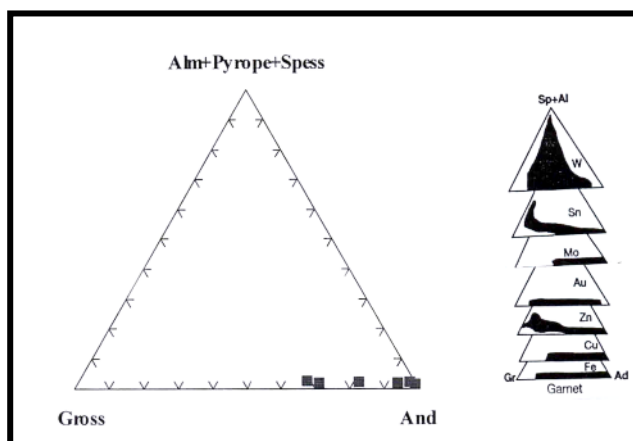
تجزیه‌ی EDS بر گارت‌های منطقه زرو نیز ترکیب آندرادیتی را نشان می‌دهد (شکل ۶). تجزیه‌ی WDS گارت‌ها و محاسبه‌ی اعضای پایانی آن‌ها در جدول ۲ آمده‌اند. شکل ۷ نیز تصویر BSE یک بلور گارت با ساختار منطقه‌ای را نشان می‌دهد. این بلور در بخش انتقالی پیروکسن به گارت در اثر جانشینی شکل گرفته است. افزایش درجه‌ی سفیدی در تصویر BSE بلور نشانی از افزایش عضو انتهایی آندرادیت در سری محلول جامد گروسولار - آندرادیت و برعکس کاهش درجه‌ی سفیدی نشانگر افزایش عضو انتهایی گروسولار در سری محلول جامد است. نگاهی به الگوی تغییرات عناصر Ca، Fe و Al به‌عنوان هم‌نه‌های اصلی گارت (شکل ۸) تغییرات اندک نوسانی (oscillatory) را نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد که بیهنجاری‌های عمده در قله‌ها به حضور اذخال یا حفره‌های ایجاد شده هنگام آماده‌سازی نمونه ارتباط داشته باشد.

بررسی منطقه‌بندی نوسانی در گارت‌های گروه اوگراندیت می‌تواند راهنمایی برای شناخت سامانه‌ی تشکیل اسکارن باشد [۵، ۶]. بررسی‌های انجام شده بر روی همیافتی کانی‌ها و اذخال‌های درگیر گارت‌های با منطقه‌بندی نوسانی در اسکارن‌ها، نشان داده است که دمای تشکیل مرکز هسته و حاشیه‌ی بلور گارت شبیه به یکدیگرند، لذا دما نمی‌تواند عامل ایجاد چنین پدیده‌ای در هنگام رشد گارت‌ها باشد [۴]. مورد شکل‌گیری گارت‌های حاوی منطقه‌بندی علل زیر را می‌توان بیان کرد:

الف) جنبش‌های گسلی به‌ویژه حرکت‌های مستمر و ضربانی (palsic fault movements) این جنبش‌ها می‌توانند سبب تغییر دوره‌ای فشار بر سامانه‌های گرمایی شوند. این تغییرات دوره‌ای احتمالاً می‌تواند با جوشش و اکسایش دوره‌ای گرمایی و نهشت دوره‌ای آندرادیت - گروسولر همراه باشد [۷].
ب) شکل‌گیری سلول‌های همرفت (convection cells) از گردش آب‌های جوی در پیرامون توده‌های نفوذی و مشارکت

جوی سطحی زمین هستند، لذا تغییرات دوره‌ای آن‌ها می‌تواند به این نحو بر سامانه‌های گرمایی اثر بگذارد.

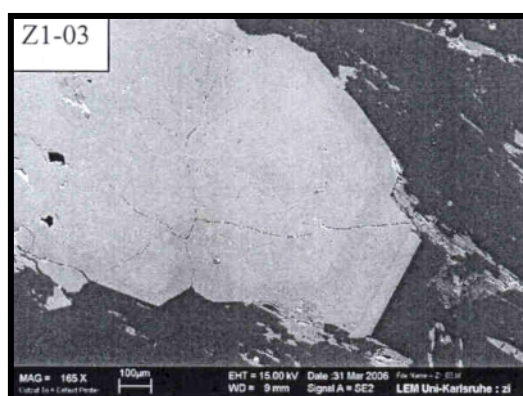
این آب‌ها در سامانه‌های گرمایی می‌تواند باعث تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی شاره‌های (pH, Eh و دما) آن سامانه‌ها شود. از آنجا که این آب‌های بیگانه متأثر از شرایط



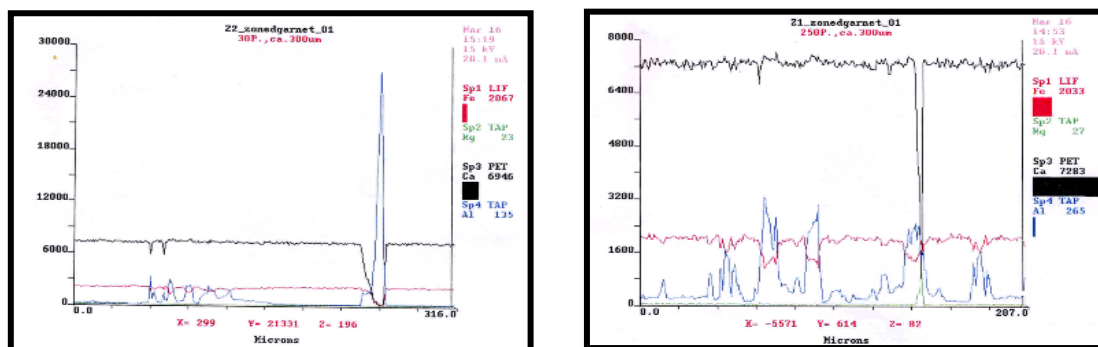
شکل ۶ نمودار توزیع ترکیب تجزیه‌های ریز پردازش الکترونی گارنت‌های زرو، و مقایسه آنها با ترکیب گارنت‌های اسکارن بر نمودارهای جهانی [۸].

جدول ۲ داده‌های تجزیه ریز پردازش الکترونی گارنت و محاسبه‌ی فرمول ساختاری براساس ۲۴ اکسیژن.

Label (%)	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۷
SiO ₂	۳۷٫۷۳	۳۵٫۴۹	۳۵٫۵۴	۳۶٫۶۳	۳۵٫۴۱	۳۵٫۴۶
TiO ₂	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۲۷	۰٫۰۱	۰٫۰۳
Al ₂ O ₃	۱٫۱۰	۰٫۳۳	۲٫۴۲	۷٫۴۹	۵٫۲۳	۰٫۷۰
FeO	۲۸٫۱۱	۲۲٫۲۴	۲۶٫۵۶	۱۹٫۷۴	۲۳٫۵۳	۲۸٫۷۲
MnO	۰٫۴۴	۰٫۵۶	۰٫۶۴	۰٫۹۵	۰٫۶۹	۰٫۵۱
MgO	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۰
CaO	۳۴٫۵۰	۳۴٫۷۸	۳۷٫۷۸	۳۴٫۸۹	۳۵٫۰۹	۳۴٫۴۳
Total	۹۹٫۹۸	۹۹٫۹۷	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۹	۹۹٫۷۸
Label (ppm)	کاتیون‌ها بر پایه ۲۴ اکسیژن					
Si	۶٫۳۸	۶٫۳۷	۶٫۳۳	۶٫۲۱	۶٫۱۶	۶٫۳۶
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۲۳	۰٫۰۶	۰٫۵۰	۱٫۴۹	۱٫۰۷	۰٫۲۱
Fe ²⁺	۴٫۱۸	۴٫۳۷	۳٫۹۲	۲٫۷۹	۳٫۴۰	۴٫۲۷
Mn	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۱۴	۰٫۱۰	۰٫۷۶
Mg	۰٫۰۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Ca	۶۶۰	۶۶۸	۶۶۰	۶۳۴	۶۵۴	۶۵۹



شکل ۷ تصویر BSE نمونه گارنت در زمینه‌ی کانی‌های سیلیکاتی دیگر با ساختار منطقه‌ای ضعیف.



شکل ۸ الگوی منطقه‌بندی نوسانی در گارنت‌های زرو. ریز پردازش الکترونی روبشی از راست (هسته) به چپ (حاشیه) انجام گرفته است.

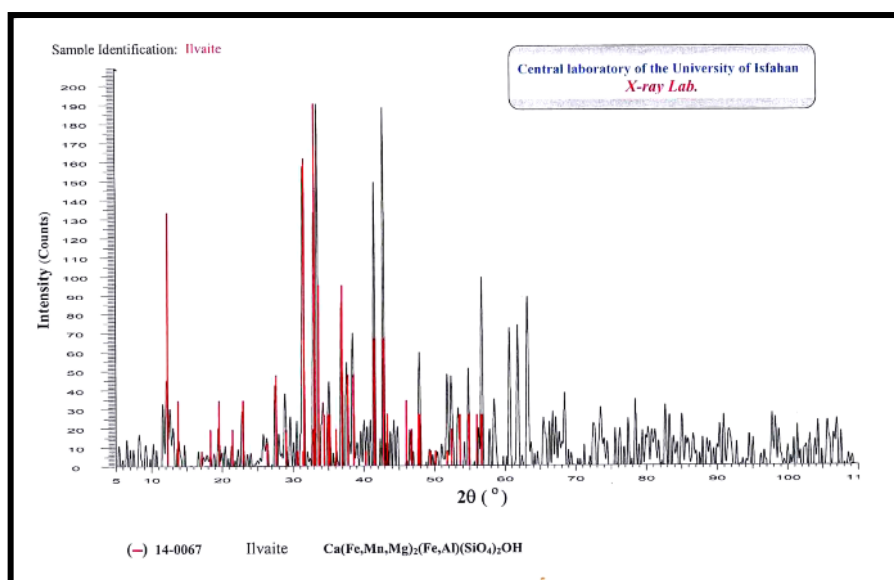
ایلوئیت

بلورهای منشوری سیاه رنگ ایلوئیت در زرو شاخص این کانی کمیاب هستند که اولین دستیابی به آن در ایران مرکزی یا سراسر ایران (۹) است. برای شناسایی این کانی از تجزیه‌های دستگاهی کمک گرفته شد. پراش سنجی پرتو X نخستین گام برای اثبات وجود ایلوئیت در اسکارن زرو است. چنانکه دیده می‌شود (شکل ۹) الگوی پراش نمونه‌ی خالص ایلوئیت کاملاً با نمونه پراش مرجع همخوانی دارد. برای بررسی بیشتر این کانی از جداسازی انرژی (EDS) به وسیله‌ی EPMA کمک گرفته شد. روش EDS برای آنالیز کیفی سریع بسیار مناسب است. تجزیه و تصویر نمونه ایلوئیت توده‌ای با ادخال تحلیل رفته پیروکسن در آن دیده می‌شود (شکل ۱۰). همه‌ی این تجزیه‌ها نزدیک به ترکیب شیمیایی آرمانی ایلوئیت و پیروکسن

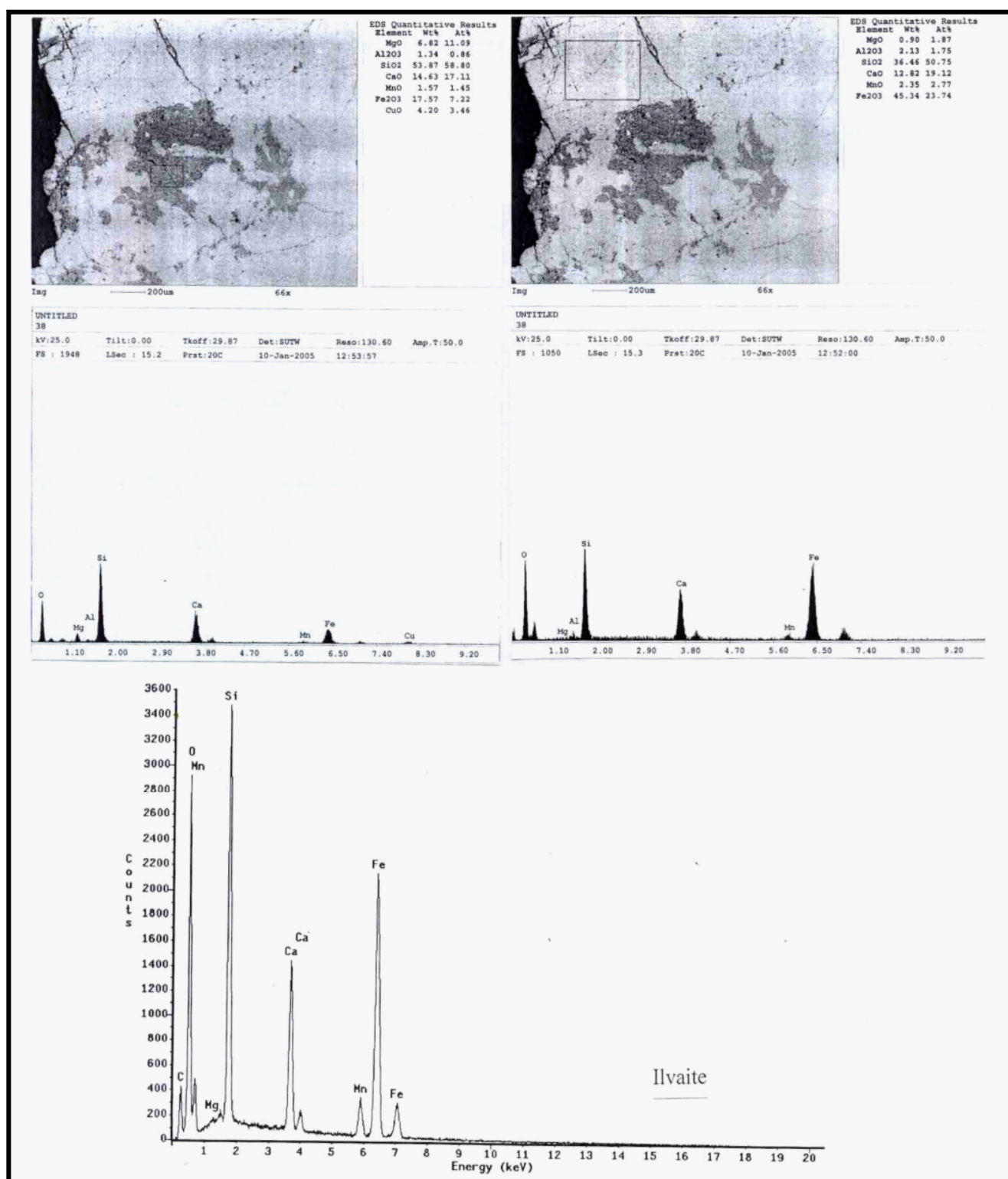
(هندبرژیت) می‌باشد. در ادامه از تجزیه نقطه‌ای دو نمونه ایلوئیت برای محاسبه‌ی فرمول ساختاری این کانی برپایه ۸/۵ اکسیژن استفاده شده است (جدول ۳). تجزیه نمونه‌ی ایلوئیت برزیل [۹] نیز در جدول ۳ برای مقایسه آمده است.

مگنتیت، کانه مس

پس از مشاهدات میکروسکوپی این کانی‌ها، تجزیه‌های EDS در همراهی با گارنت‌های آن‌درادیتی و پیروکسن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱۱). تجزیه‌ی نمونه‌ای مشکوک از بخش کانی‌سازی شده فلزی اسکارن مقدار Fe_2O_3 را تا ۳۰/۷۲٪ و Cu را تا ۳۵۳۶۹ ppm نشان داده است. این مقدار مس تأییدی بر وجود کالکوپیریت (مشاهده شده در مقاطع صیقلی) است.



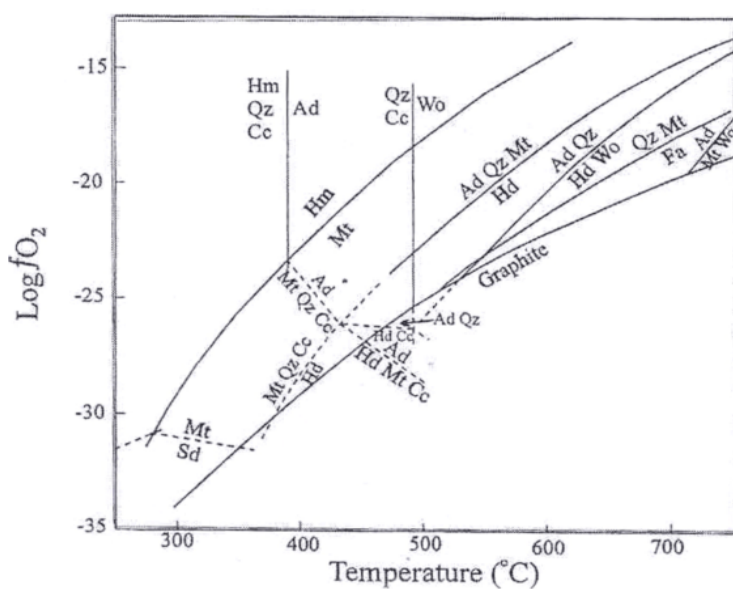
شکل ۹ الگوی پراش پرتو X نمونه ایلوایت خالص و مقایسه‌ی آن با نمونه‌ی مرجع.



شکل ۱۰ تصویر BSE از ایلوئیت (خاکستری روشن) با ادخال پیروکسن (خاکستری تیره) و تجزیه‌های EDS آن‌ها.

جدول ۳ داده‌های ریز پردازشی از دو نمونه ایلوئیت زرو (۲۱) و مقایسه‌ی آن با نمونه‌ی ایلوئیت کانسار Cu-Au، ایگاراپه باهیا، برزیل (Core , Rime) [۹].

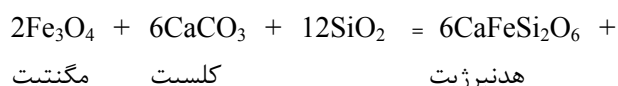
Label (%)	Core	Rime	۱	۲
SiO ₂	۲۹٫۰۲	۲۹٫۴۷	۲۸٫۹۹	۲۸٫۹۶
TiO ₂	۰٫۰۸	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۷۹	۰٫۹۵
FeO	۵۳٫۹۴	۵۳٫۹۸	۴۹٫۳۵	۴۶٫۷۹
MgO	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۰۸
CaO	۱۳٫۷۳	۱۳٫۱۳	۱۳٫۹	۱۳٫۳۶
MnO	۰٫۹۷	۱٫۰۱	۲٫۸۱	۵٫۴۵
Na ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۶
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Total			۹۶	۹۵٫۶۵
کاتیون بر پایه ۸٫۵ اکسیژن				
Si	۱٫۹۸	۲٫۰۱	۲٫۰۸	۲٫۰۹
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۸
Fe ²⁺	۲٫۹۶	۱٫۹۶	۲٫۹۵	۲٫۸۲
Mg	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Ca	۱٫۰۰	۰٫۹۶	۱٫۰۶	۱٫۰۳
Mn	۰٫۰۶	۰٫۰۰۰۰۰۶	۰٫۱۷	۰٫۳۲
Na	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰



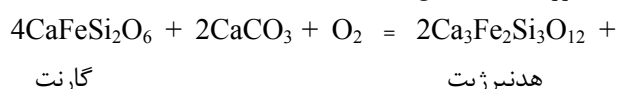
شکل ۱۱ نمودار روابط فاز $\text{Log } f\text{O}_2$ - T در $\text{XCO}_2 = 0.1$ و فشار ۵۰۰ بار برای سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H [۳].

واکنش‌های دگرگونی و سنگ‌زایی

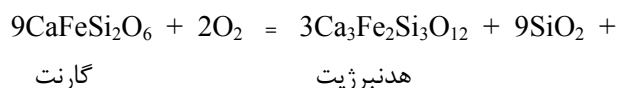
بر اساس قوانین فاز، حصول تعادل در سنگ‌های دگرگون در نقاط $T_{\max}$ یعنی در بالاترین شرایط دگرگونی امکان‌پذیر است، لذا در اینجا با توجه به فاکتورهای کنترل شرایط تعادل در دگرگونی مناطق مورد بررسی می‌توان در نظر گرفت که در اوج دگرگونی تأثیر شارهای جریان یافته حاوی SiO_2 و Fe_2O_3 بر سنگ‌های آهکی منجر به پیدایش هیدرژیت در اسکارن‌های دگرنهاده شده است [۱۰].



از آنجا که فروپاشی پیروکسن به کلسیت، کوارتز و مگنتیت (کم) در نمونه‌های میکروسکوپی آشکار است. لذا واکنش فوق در گام‌های پسین به شکل برگشت نیز در اسکارن زرو رخ داده است. با افزایش فوگاسیته اکسیژن به صورت محلی در بخش‌های غنی از پیروکسن، گارنت‌های آندرادیته به بهای هیدرژیت تشکیل شده‌اند [۱۱].

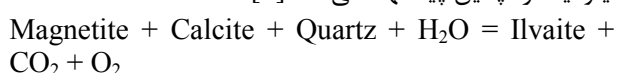
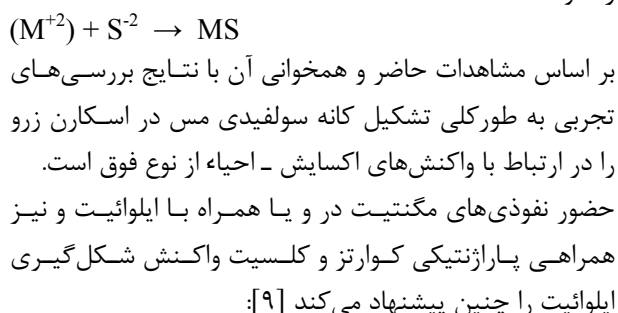
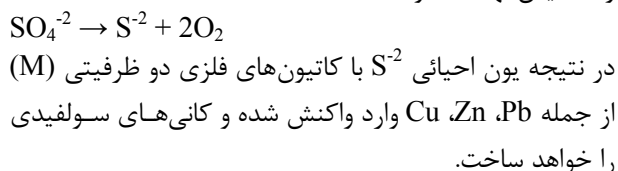


بررسی‌های تجربی [۱۲]. نشان داده است که اکسیژن می‌تواند در سازه‌ی $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ کلینوپیروکسن نقش تپانه را بازی کرده و بنابر واکنش زیر در پیدایش آندرادیته‌های اسکارن زرو مؤثر باشد.

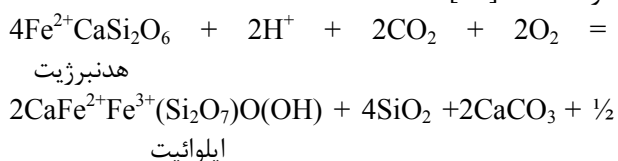
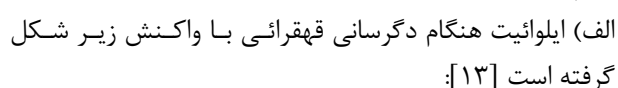


این واکنش می‌تواند همراهی مگنتیت با گارنت و پیروکسن را، هرچند به شکل تأخیری، توجیه کند. همیافتی کانه‌های سولفیدی در مجموعه‌ی گارنت - پیروکسن زرو هرچند اندک از این رهگذر قابل توجیه است، برای تشکیل کانی‌های سولفیدی می‌بایست شارهای کانه‌ساز به حالت احیاء برسد. کار

احیاءسازی این شار به مجموعه کلینوپیروکسن - گارنت در اسکارن انجام می‌گیرد و این همه به علت توانایی اکسیژن‌زایی سازه‌ی هیدرژیت پیروکسن‌ها در مواجه با شارهای کانه‌ساز است. با فرض ثابت بودن دما، pH و میزان کل سولفید حل شده در محلول، حلالیت کانی‌های سولفیدی فلزات پایه در محیط احیاء نسبت به محیط اکسایش پایین می‌آید. بنابراین کانی‌های سولفیدی می‌توانند به خوبی در مرز محیط‌های احیاء و اکسایش نهشته شوند:



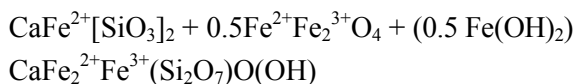
بررسی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های اسکارنی زرو نشان می‌دهد که شکل‌گیری ایلوایت به بهای پیروکسن‌ها با بررسی‌های سنگ‌شناختی در زرو انجام شده است. چگونگی و کم و کیف این واکنش‌ها توسط چند پژوهشگران در اسکارن‌های مختلف نیز پیشنهاد شده است:



برای تعیین شرایط احتمالی P-T-X می‌توان سامانه‌ی Ca-Fe-Si-C-O-H را در نظر گرفت، چرا که همه‌ی کانی‌های مورد بررسی در این سامانه جای می‌گیرند [۳]. این نمودار برپایه‌ی ۰/۵ کیلو بار فشار و $XCO_2 = 0.1$ بنا شده است که ممکن است دقیقاً همان شرایط اسکارن زرو نباشد. ولی وجود سنگ میزبان آهکی ($XCO_2 \sim 0.1$) و نیز شکل‌گیری اسکارن در شکاف‌ها و فضاهای خالی سنگ آهک دور از توده‌های عمیق (فشار کم) تا حدودی با شرایط در نظر گرفته شده همخوانی دارد.

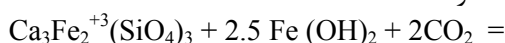
هدنبرژیت در مقایسه با فراورده‌های دگرسانی خود در fO_2 پایین‌تر پایدار است و در دماهای بالاتر از $385-430^\circ C$ با آندرادیت + کوارتز + کلسیت، بسته به اندازه‌ی fO_2 ، و در دماهای پایین‌تر با کلسیت + کوارتز + مگنتیت جانشین شده است. در اسکارن زرو واکنش‌های برگشتی اخیر از طریق روابط کانیایی میکروسکوپی به روشنی دیده شده است. لذا دمای این گونه دگرسانی را می‌توان در حدود $400^\circ C$ در نظر گرفت. آندرادیت گستره‌ی پایداری گسترده‌ای را از $400^\circ C$ تا $700^\circ C$ و $Log fO_2 = -15$ تا -25 نشان می‌دهد (شکل ۱۱). آندرادیت با مجموعه‌ی ولاستونیت + هدنبرژیت در $550^\circ C > T$ (بسته به fO_2) در حضور کوارتز جانشین می‌شود. از آنجا که چنین دگرسانی‌هایی در زرو دیده نشده است پیشنهاد بر این است که دمای تشکیل کمتر از $550^\circ C$ بوده است. در مورد پیدایش ایلوایت که کانی ویژه زرو است، به بررسی‌های [۱۵] گوستاوسون می‌توان اشاره کرد. پژوهش‌های نامبرده و دیگران [۱۲] نشان داده است که در فشار بالای شاره‌ی ایلوایت در دمای تقریبی زیر $470^\circ C$ و در گستره‌ی FO_2 پایدار است (شکل ۱۲). در تأیید این گستره‌ی دمایی، با استفاده از زمین-دماسنجی کلریت، دمای $300^\circ C$ تا $350^\circ C$ نیز به دست آمده است [۹].

ب) الکساندرف [۱۴] واکنش زیر را برای تشکیل ایلوایت به خرج هدنبرژیت به جای مگنتیت در شرایط اکسایشی تر ضمن افزایش دما پیشنهاد کرده است:

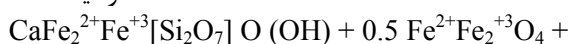


ایلوایت

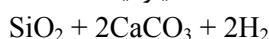
بر اساس این بررسی‌های و با توجه به موقعیت کانی ایلوایت در نمونه‌های اسکارنی زرو چنین به نظر می‌رسد که پیدایش ایلوایت به بهای گارنت‌ها نیز بوده است. لذا واکنش زیر را می‌توان پیشنهاد کرد:



آندرادیت

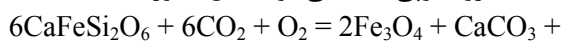


ایلوایت



کلسیت کوارتز

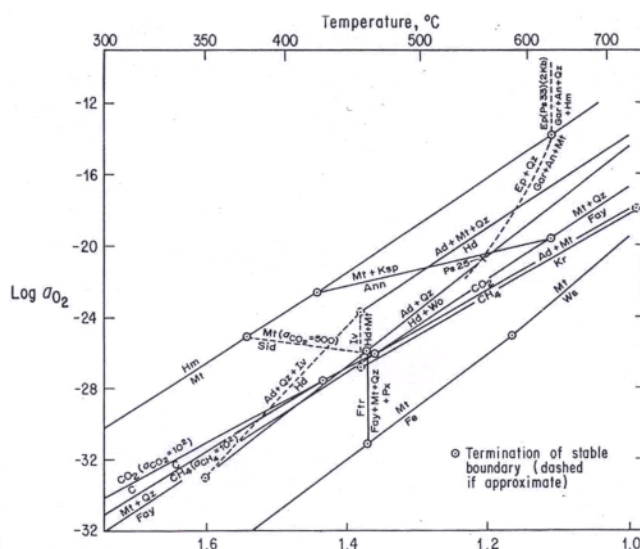
واکنش‌های انجام یافته در مرحله‌ی پیشرونده اسکارن (تشکیل پیروکسن و گارنت) CO_2 به وجود آمده است. واکنش‌های بالا از نوع کربن‌زدائی (Decarbonation) هستند [۱۴]. می‌دانیم XCO_2 اضافی در واکنش‌های بازگشتی (retrograde) شرکت کرده است. آن گونه که مشاهده شد، برخی از واکنش‌های شکل‌گیری ایلوایت CO_2 مصرف کرده‌اند. از طرفی در برش‌های میکروسکوپی به روشنی تجزیه‌ی پیروکسن‌ها به کلسیت و کوارتز به صورت بخشی یا کامل دیده می‌شود. پس می‌توان گفت که در گام تاخیری دگرگونی مجاورتی عمل رقیق شدن یا خروج CO_2 به خوبی انجام نگرفته است و واکنش بازگشتی زیر برای تجزیه پیروکسن‌ها به سازه‌های اولیه (آن گونه که در برش‌های میکروسکوپی دیده می‌شود) قابل تصور است:



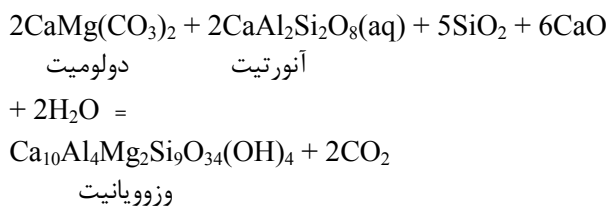
کلسیت مگنتیت

هدنبرژیت

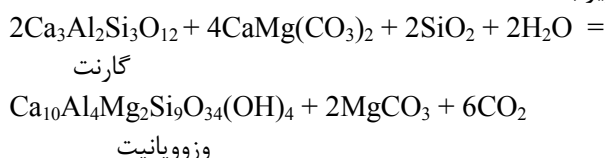
کوارتز



شکل ۱۲ نمودار گستره‌ی پایداری کانی‌های مختلف در ارتباط با فشار مؤثر اکسیژن [۱۲]. $\text{PH}_2\text{O} = 1 \text{ kb}$ برای واکنش‌هایی که حاوی کانی‌های آبدار (به غیر از اپیدوت) هستند.

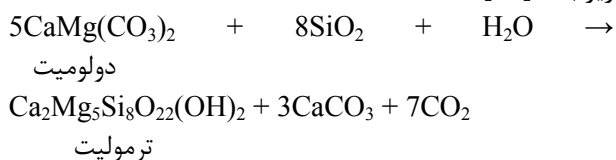


در برگرفته شدن بخشی گارنت با وزوویانیت و محو شدن گارنت‌های درون وزوویانیت می‌تواند نمایانگر واکنش پیشنهادی زیر باشد:



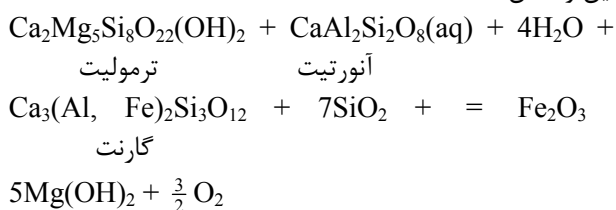
روابط پاراژنتیکی این مجموعه روی نمودارهای ACF و CMS- HC نشان داده شده است (شکل ۱۳). چنانکه در شکل ۱۴ دیده می‌شود، ترمولیت در فاصله دمایی باریکی (تقریباً 80°C با دمای بیشینه 540°C پایدار است [۱۵]. بررسی‌های تجربی [۱۶] شرایط پایداری وزوویانیت را در فشار ثابت ۲ کیلوبار، دمای 420°C تا 475°C در XCO_2 پایین دانسته‌اند. لذا گستره‌ی دمایی تشکیل مجموعه غالب مرمرها در گستره‌ی دمایی 420°C تا 540°C در نظر گرفته می‌شود. مجموعه‌ی دیگری نیز در شرایط دمایی پایین‌تری شکل گرفته است. مجموعه‌ی کلسیت + گارنت + کلریت + اپیدوت نیز در مرمرها حضور دارد (شکل ۱۵). به عقیده‌ی شلی [۱۷] ناخالصی‌هایی از سیلیکات‌های برکه‌ای در مرمرهای کلسیتی و دولومیتی منجر به پیدایش کانی‌های آلومینیم‌دار اپیدوت و گارنت غنی از کلسیم در رخساره‌ی شیست سبز می‌شود.

مرمرهای مجاور اسکارن‌های زرو دارای مجموعه‌ی غالب ترمولیت + گارنت + وزوویانیت + کلسیت + کوارتز هستند. به نظر می‌رسد که معمول‌ترین روش تشکیل ترمولیت واکنش زیر باشد [۱۱].

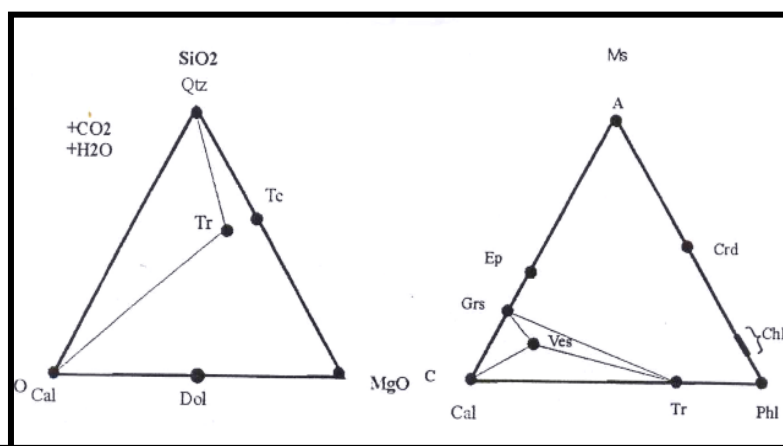


بوخر و فری [۱۵] با دو واکنش تشکیل ترمولیت را به بهای دیوپسید و تالک معرفی کرده‌اند. از آنجا که در مقاطع مرمرها آثاری یا بازمانده‌ی تجزیه نشده‌ای (relict) از این کانی‌ها دیده نشد، به نظر می‌رسد که ترمولیت‌ها با توجه به شواهد میکروسکوپی به‌طور آزاد شکل گرفته‌اند.

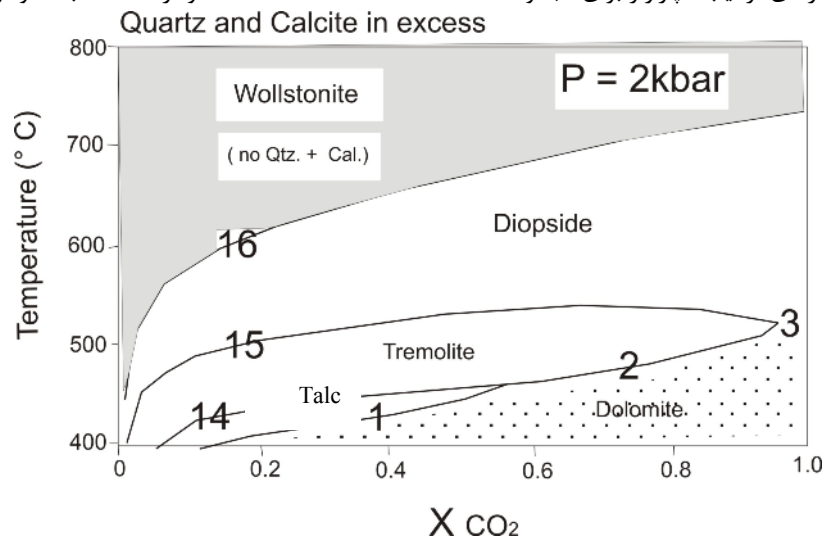
وجود گارنت در این مجموعه به‌صورت مستقل و نیز جانشینی محدود ترمولیت دیده شده است. با فرض تأمین Al مورد نیاز با بسته‌های ساختاری آنورتیت ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) و یا کلونیدی در شاره می‌توان واکنش زیر را پیشنهاد کرد. وجود شبح ترمولیت (ghost texture) در برخی از گارنت‌های همسانگرد، پشتیبان این واکنش است:



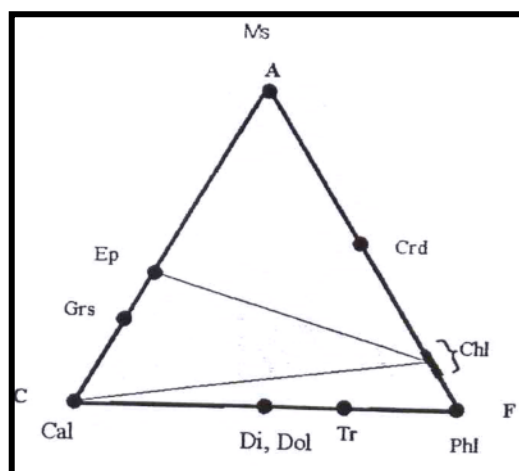
شکل‌گیری وزوویانیت در این مجموعه از طریق مستقل در زمینه‌ی مرمر و نیز به بهای گارنت‌ها (جانشینی) رخ داده است:



شکل ۱۳ نمودارهای ترکیب - پاراژنز برای مجموعه Tr + Ves + Grs + Cal (الف) نمودار ACF، (ب) نمودار CMS-HC



شکل ۱۴ نمودار روابط فازی موجود در مرم‌های کالک سیلیکات حاوی کوارتز و کلسیت اضافی، تحت فشار ثابت دو کیلو بار (هاله‌های دگرگونی مجاورتی) [۱۵].



شکل ۱۵ نمودار ترکیب - پاراژنز برای مجموعه Chl + Ep + Gr + Cal.

برداشت

مرکزی) با آنکه نشانی از حضور یا عملکرد توده‌ی نفوذی در گستره‌ی اسکارن‌سازی در دسترس نیست، ولی احتمالاً توده در زیر منطقه‌ی اسکارن قرار دارد. لذا زرو را یک اسکارن دور از

توده‌ی اسکارن زرو از دیدگاه رخداد صحرایی قابل اهمیت است. برخلاف اسکارن‌های کلاسیک مشاهده شده (حداقل در ایران

[۱] عمیدی س. م.، "نقشه زمین‌شناسی آباد"، مقیاس ۱:۲۵۰/۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۹۸۳.

[2] Rahgoshay M., Noorbehesht I., Daliran F., Mackizadeh M. A., "First occurrences of ilvaite from central Iran skarns, *Berichte der Deutschen Min. Ges.*", Beih, Z. Eur. J. Mineral., 16, 1, 2004, p. 111.

[3] Einaudi M. T., Meinert L. D., Newberry R. J., "Skarn deposits. In *Econ. Geol.*". 75th Anniv. Econ. Geo. Publ. Co, (ed. B. J. Skinner), 1981, p. 317-391.

[4] Morimoto N., Chairman B., "Nomenclature of pyroxens. Subcommittee on pyroxens", International Mineralogical Association. Con. Mineral. 27, 1989, p. 143-156.

[5] Jamtveit B., "Oscillatory Zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet", Nonlinear behavior in regions of immiscibility, Am. Min., 76, 1991, p. 1319-1327.

[6] Clechenko C. C., Valley J. W., "Oscillatory Zoning in garnet from the Willsboro wollastonite Skarn", Adirondack Mts, New York: a record of shallow hydrothermal processes preserved in a granulite facies terrane, J. Metam. Geol., 21, 2003, p. 771-784.

[7] Jamtveit B., Wogelius R. A., Fraser D. G., "Zonation patterns of skarn garnets", records of hydrothermal system evolution, Geo., 21, 1993, p. 113-116.

[8] Meinert L. D., "Skarns and skarn deposits", Geoscience Canada, v. 19, 1992, P. 145-162.

[9] Tallarico F. H. B., "Occurrence of ilvaite in the Igarape Bahia Cu-Au deposit", Carajas province, Brazil Revista Brasileira de Geociencias, 32, 1, 2002, p. 142-152.

[10] Deer W.A., Howie R.A., zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", seventeenth impression, Longman, 1991, 528p.

[11] Klein C., Hurlbut C. S., "Manual of Mineralogy", 21st edn, Wiley, New York, 1993, 681 p.

[12] Rose A. W., Burt D. M., "Hydrothermal alteration In H. L. Barnes, Ed.", Geochemistry of Hydrothermal ore Deposits, John wiley and sons, 1979, P. 173-235.

[13] Logan M. A., "Mineralogy and geochemistry of the Gualilan skarn deposit in the Precordillera of western Argentina", Ore Geology Reviews 17, 2000, p. 113-138.

توده‌ی نفوذی و مستقل (Distal) در نظر می‌گیریم. چگونگی شکل‌گیری کالک سیلیکات‌های در رخنمون صحرایی نوعی پرشدگی ساده‌ی شکستگی‌ها و شکاف‌های سنگ‌های آهکی به وسیله‌ی نهشت شارهای داغ را تداعی می‌کند. همجواری بسیار روشن و ناگهانی کالک سیلیکات‌های اسکارن (با کرانه‌های نسبتاً نامنظم) با سنگ دیواره، گواه این پدیده است. در محل همجواری هیچ مرز تدریجی دیده نشده است. لذا منطقی است که این گونه اسکارن‌ها را از دیدگاه ریخت‌شناسی و چگونگی جای‌گیری اسکارن‌های پرشده‌ی نوع کارستی (Karst type filling skarns) بنامیم.

مشاهدات ما از اینگونه جای‌گیری اسکارن در نقاط دیگر نوار ماگماتیسم سنوزوئیک ایران مرکزی شامل شمال غربی اصفهان (کامو - میمه) نیز چنین نشان داده است. در این منطقه کانی‌زایی گارنت - مگنتیت به روشنی در محل و در راستای مناطق خرد شده‌ی گسلی و قابل نفوذ سنگ‌های آهکی کرتاسه انجام گرفته است. به‌طوری که پس از نفوذ شارها و کانی‌سازی ساخت برشی سنگ‌های آهکی اولیه هنوز در توده‌ی اسکارن دیده می‌شود.

برپایه داده‌های کانی‌شناختی، اسکارن زرو نیز یک اسکارن چند زادی است. دنباله‌ی تشکیل کانی‌ها در اسکارن و مرمرهای زرو را می‌توان نشان داد. چنانکه دیده می‌شود در اوج تاثیر شار (گام پیشرونده) نخست پیروکسن‌ها تشکیل شده‌اند و در گام بعد کانی‌سازی گارنت به دنبال پیروکسن‌ها به بهای آن‌ها و یا به طور مستقل انجام گرفته است. تاثیر شارهای حاوی آب زیاد همراه با کاهش دما در گام دگرگونی پس رونده پاراژنزهای آبدار را پدید آورده است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه شیراز برای این کار پژوهشی تشکر می‌کنند. همچنین لازم است از سرکار خانم دکتر فرحناز دلیران (دانشگاه فنی کالسروهه آلمان) و آقای دکتر خلیلی از گروه زمین‌شناسی اصفهان (به دلیل انجام آنالیزهای EDS در دانشگاه اکلاهاماسیتی آمریکا) قدردانی نماییم.

مراجع

[14] Guggenheims S., "The brittle micas, In *Micas (Baily, S. W., ed.) Mineralogical Society of America*", Review in mineralogy, 13, 1984, p. 61-101.

[۱۵] بوخر، کورت و فری، مارتین، ۱۹۹۴ "پتروژنز سنگ‌های دگرگونی"، ترجمه ولی‌زاده، محمد ولی و صادقیان محمود. ۱۳۷۹، انتشارات دانشگاه تهران.

[16] Plyusnina L. P., Likhoidov G., "Vesuvianite stability in water and water-carbon dioxide fluids, *Russian Academy of Sciences*", *Geochemiya*, in-Russian, 5, p. 1993, 644-654.

[17] Shelly D., "Igneous and metamorphic rocks under the Microscope". Chapman and Hall, London, 1993, 445p.