

سال هجدهم، شمارهی ۲، تابستان ۸۹، از صفحهی ۲۰۹ تا ۲۲۲



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

محمدعلی مکیزاده*^{(۲}، محمد رهگشای⁽، بتول تقی پور^۲، صدیقه تقی پور^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 زمین شناسی، 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 گرانیتوئدی 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. کلینو پیروکسن، گارنت، ایلوائیت (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 ایلوائیت همیافتی نزدیکی را با زون کلینوپیروکسن (هدنبرژیت) و گارنت (آندرادیت) دارند، احتمالا این همیافتی جانشینی را نشان میدهد. شکل گیری ایلوائیت با واکنش زیر امکانپذیر است:

Andradite + Fe (OH)₂ + CO₂ = ilvaite + magnetite + quartz + calcite + H₂ Hedenbergite + magnetite + Fe (OH)₂ = ilvaite کانیهای اولیه اسکارن زرو دردمای [°]C شکل گرفتهاند. دگرسانی کانیهای بی آب و ساخت مجموعههای کانیائی آبدار از دمای تقریبی زیر [°]C ۴۷۰ در فوگاسیته بالای اکسیژن شروع شده است.

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

زمين شناسي منطقه مورد مطالعه

برپایهی نقشه زمینشناسی آباده [۱] و برداشتهای صحرایی، قدیمی ترین واحدهای سنگشناسی وابسته به پالئوزوئیک (؟) در شرق منطقه (مشرف به فرورفتگی زمین ساختی گاوخونی – طاقستان) رخنمون 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 می شوند. مرمرسازی و اسکارن سازی در سازندهای کربناتی این منطقه دیده می شود که آثار حفاری های 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 بهوسیله 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 بهدست نشان نداده است.

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



شکل ۱ نقشهی زمین شناسی منطقهی زرو و نمایش موقعیت اسکارن با مقیاس ۱۱/۲۵۰۰۰۰، 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 ضخیم تر بخش-هایی از سنگ میزبان مرمرها مشاهده می شوند 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. ییروکسن ها با بافت شانهای (Comb texture) عمود بر سنگ دیواره دیده می شوند و مناطق کانی سازی شده نیز در تودههای بزرگتر به چشم میخورد، در حالی که 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 می شود. کانی کمیاب ایلوائیت (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) دیدہ می شود. ایلوائیت یک سیلیکات

کلسیم و آهن، آمیخته ظرفیت (mixed valence) با فرمول عمومی (OH) CaFe²⁺Fe³⁺Fe²⁺Si₂O₈ 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].

کانی شناسی و سنگ نگاری اسکارن ـ مرمر

پیروکسنها بیشترین حجم کانیزائی را در اسکارن زرو دارند. پیروکسن در زمینهی کلسیت و نیز کوارتزهای تأخیری با بافت پروکسنهای 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 به صورت بلورهای کشیده تا سوزنی همراه کوارتز و کلسیت دیده میشوند. هجوم تاخیری شارههای سرشار از SiO₂ 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 شده است. در این گونه موارد بازماندهی پیروکسنها با بافت شبحی (ghost texture) دیده میشود.

گارنتها بیشتر همسانگرد و تودهای هستند و به رنگ زرد عسلی در PPL دیده میشوند. گارنتهای ناهمسانگرد با ماکلهای پیچیده بیشتر نیمه شکلدار تا تمام شکلدارند. این گارنتها در همراهی با پیروکسنهای دگرسان شده، پرکنندهی شکافها همراه کوارتز ـ کلسیت و یا درحال جانشینی پیروکسنها دیده میشوند (شکل ۳ الف). جانشینی گارنتها در پیروکسنها دیده میشوند (شکل ۳ الف). جانشینی گارنتها در پیروکسنهای منهای منشوری شبهریختی متمایل به سیاه است و پلئوکرویسم ضعیفی از قهوهای زرد تا سیاه در برخی موارد نشان میدهد. این کانی در بیشتر موارد به متمایل به سیاه است و گارنت (relicts) به شکل ادخال درون بقایای پیروکسن و گارنت (relicts) به شکل ادخال درون ایلوائیت، این پدیده را به وضوح نشان میدهد. جانشینی تدریجی ایلوائیت در راستای رخها و شکستگیهای پیروکسنها



شكل ٢. الف

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

همراهی با کوارتز و گارنتها دیده میشود (شکل۳ ت).

از موارد کمیاب رخداد ایلوائیت شکل گیری آن به صورت مستقل در کلسیتها می باشند. به این نحو که با شکلهای آمیبی در محل مرزهای دانه ای کلسیتها با بافت چند گوشی (اتصال سه گانه) رشد کرده است. رخداد ایلوائیت نیز در شکستگیهای گارنت دیده شده است. به طور کلی ایلوائیت بیشترین همیافتی را با پیروکسنها نشان می دهد. مگنتیت درهمراهی با گارنتها و پیروکسنها و نیز ایلوائیت (کمتر) دیده می شوند. این کانی پرکننده ی شکستگیهای گارنت – پیروکسن را پر کرده و جانشین آنها می شود. کالکوپیریت به مقدار کم در این همراهی ها دیده شده است.



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



شکل ۳ الف. گارنتهای تمام شکلدار، ناهمسانگرد و دارای ساخت منطقهای درمیان پیروکسنهای دگرسانXPL. ب. جانـشینی ایلوائیـت در راستای رخهای پیروکسن PPL. پ. پرشدگی فضای بین گارنتها با ایلوائیت PPL. ت. همراهی ایلوائیت با کوارتز و گارنت PPL.

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

(شکل۴ الـف). وزوویانیـتها با رنـگ تـداخلی غیـر عـادی در همراهی با کلسیت بهطور مستقل نیز دیده شدهاند (شکل۴ ب).

شیمی کانیها ییروکسن

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



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

L =h =1 (0/)	- 27	57	یں ،حضروعی ،ر چیرو	ویر پر در	14.7	15.7
Label (%)	3-Z	5-Z	/-Z	8-Z	14-Z	15-Z
SiO_2	49,81	۴٩ _/ ٧٩	49,·9	۴۸٬۵۸	44,41	47'22
TiO ₂	•,••	• /• ١	•,••	• / •)	۰٬۰۲	•,••
Al ₂ O ₃	• , • Y	٠٫١٣	۰, • ۵	•,••	• / • •	• ۶۱
Cr ₂ O ₃	•,••	• / • •	•,••	• / • •	۰٬۰۲	•,•۶
FeO	۲۰,۰۴	۱۵,۲	۲۴٫۴۸	۲ ۱, Y ۱	۲۲٫۷۲	۲۳٬۰۵
MnO	۲٫۳۴	۵,۴۲	١,۴٨	٣,٣۴	κ'γγ	٥.
MgO	۴,۱۳	۵,۲۰	۲٫۰۷	۳٫۰۱	۰, ۲ ۹	٣٫٢٢
CaO	۲۲٬۸۳	۲۳٫۳۹	۲۳٬۵۵	۲۳٬۵۹	۲۳٬۲۸	۲۳٬۰۲
Na ₂ O	•,•٣	۰,۰۵	• , • Y	•,•۴	• ٫• ١	•,18
K ₂ O	•,••	۰,۰۲	•,••	•,••	• /• •	•,•٢
Total	۹۹ _/ ۰۲	٩٩,٧١	۱۰۰٫۷۶	٩ ٩ _/ • ٩	۲۰۰٬۳	٩٩, ۴ ٧
Label (ppm)	کاتیون ها بر پایه شش اکسیژن					
Si	٢	۲,۳۴	١٫٩٨	١,٩٧	۱٬۹۸	۱/۹۶
Ti	•,••	•,••	•,••	•,••	• /• •	•,••
Al	•,••	• ، • ۱	•,••	•,••	•,/• •	۳.,۲
Fe2+	<i>۰٫</i> ۶۷	۱۶۱	۰٫۸۲	٠٫٧٣	• , YY	۸۷ _/
Mn	• ,• A	۰٫۲۱	۰, • ۵	•, ١ •	۰,۱ ۲	•,•۴
Mg	۰,۲۵	۰,۳۶	• ، ۱۲	• ، ۱۸	۰,۰۵	•,1•

جدول ۱ دادههای ریز پردازش الکترونی از پیروکسنهای اسکارن زر



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

گارنت

تجزیهی EDS بر گارنتهای منطقه زرو نیز ترکیب آندرادیتی را نـشان مـیدهـد (شـکل ۶). تجزیـهی WDS گارنـتهـا و محاسبهی اعضای پایانی آنها در جدول ۲ آمدهاند. شکل ۷ نیز تصویر BSE یک بلـور گارنـت بـا سـاختار منطقـهای را نـشان میدهد. این بلور در بخش انتقالی پیروکسن بـه گارنـت در اثر جانشینی شکل گرفته است. افزایش درجهی سفیدی در تصویر BSE بلور نشانی از افزایش عضو انتهـایی آنـدرادیت در سـری محلول جامد گروسولار ـ آندرادیت و برعکس کـاهش درجـهی سفیدی نشانگر افزایش عضو انتهایی گروسولار در سری محلول جامد است. نگـاهی بـه الگـوی تغییـرات عناصر Fa Ca و IA بهعنوان همنـههـای اصـلی گارنـت (شـکل ۸) تغییـرات انـدک نوسانی (oscillatory) را نشان میدهد. بـهنظـر میرسـد کـه بیهنجاریهای عمده در قلهها به حضور ادخـال یـا حفـرههـای ایجاد شده هنگام آماده سازی نمونه ارتباط داشته باشد.

بررسی منطقهبندی نوسانی در گارنتهای گروه اوگراندیت میتواند راهنمایی برای شناخت سامانهی تشکیل اسکارن باشد[۵، ۶]. بررسیهای انجام شده برروی همیافتی کانیها و ادخالهای درگیر گارنتهای با منطقهبندی نوسانی در اسکارنها، نشان داده است که دمای تشکیل مرکز هسته و حاشیهی بلور گارنت شبیه به یکدیگرند، لذا دما نمیتواند عامل ایجاد چنین پدیدهای در هنگام رشد گارنتها باشد [۴]. در مورد شکل گیری گارنتهای حاوی منطقهبندی علل زیر را می-توان بیان کرد:

الف) جنبشهای گسلی بهویژه حرکتهای مستمر و ضربانی (palsic fault movements) این جنبشها میتوانند سبب تغییر دورهای فشار بر سامانههای گرمابی شوند. این تغییرات دورهای احتمالاً میتواند با جوشش و اکسایش دورهای گرمابی و نهشت دورهای آندرادیت – گروسولر همراه باشد [۷].

ب) شکل گیری سلول های همرفت (convection cells) از گردش آب های جوی در پیرامون توده های نفوذی و مشارکت

این آبها در سامانههای گرمابی مـیتوانـد باعـث تغییراتـی در ویژگیهای فیزیکوـ شـیمیایی شـارههـای (Eh ،pH و دمـا) آن سامانهها شود. از آنجا که این آبهای بیگانه متأثر از شرایط

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



شکل ۶ نمودار توزیع ترکیب تجزیههای ریز پردازش الکترونی گارنتهای زرو، و مقایسه آنها با ترکیب گارنتهای اسکارن بر نمودارهای جهانی .[٨].

	0					. (0
Label (%)	٩	١.))	١٢	١٣	١٧
SiO ₂	۳۷٫۷۳	۳۵٫۴۹	۳۵٫۵۴	88,88	۳۵٫۴۱	۳۵٫۴۶
TiO ₂	•,•٢	•,• ٢	• / • •	• ، ۲۷	• /•)	•,•٣
Al ₂ O ₃	۱,۱۰	۳۳ ٫	۲,۴۲	٧,۴٩	۵٫۲۳	• _/ Y •
FeO	۲۸٬۱۱	77,74	۲۶٬۵۶	۱٩,٧۴	۲۳٬۵۳	۲۸٫۷۲
MnO	•,44	۶۵ _/ ۰	• ,84	۰٫۹۵	<i>۰</i> ٬۶۹	۰ ،۵۱
MgO	•,•٢	•,• ٢	• / • •	•,••	• /• •	•,1•
CaO	۳۴٬۵۰	۳۴٫۷۸	۳۷٫۷۸	٣۴٫٨٩	۳۵٬۰۹	۳۴,۴۳
Total	१९ _/ ९⋏	१ ९,९४	१ ९ _/ ११	१ ९ _/ ९९	૧ ٩ _/ ૧૧	۹۹٫۷۸
Label (ppm)	کاتیونها بر پایه ۲۴ اکسیژن					
Si	۶٫۳۸	۶٫۳۷	۶٫۳۳	۶٫۲۱	۶,۱۶	۶,۳۶
Ti	•,•)	• / • •	• / • •	۰,۰۲	• / • •	•,••
Al	۳۲٬۰	• / • ۶	۰ _/ ۵۰	١,۴٩	١,•٧	• ۲۱
Fe2+	۴٬۱۸	۴٫۳۷	٣٫٩٢	۲٫۷۹	٣٫۴٠	۴٫۲۷
Mn	۰,۰۶	• /•)	٠,٠٩	۲ ۱۲	• , 1 •	۰,۲۶
Mg	۰,۰۵	• / • •	• / • •	/ • •	• / • •	• /• •
Ca	۶,۶۰	۶ _/ ۶۸	۶ ₁ 8۰	۶٫۳۴	۶,۵۴	۶٬۵۹

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





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.

ايلوائيت

بلورهای منشوری سیاه رنگ ایلوائیت در زرو شاخص این کانی کمیاب هستند که اولین دستیابی به آن در ایران مرکزی یا سراسر ایران (؟) 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 ایلوائیت 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 ایلوائیت تودهای با ادخال تحلیل رفته پیروکسن در آن دیده میشود (شکل ۱۰). همه ی این تجزیهها نزدیک به ترکیب شیمیایی آرمانی ایلوائیت و پیروکسن

(هدنبرژیت) میباشد. در ادامه از تجزیه نقطهای دو نمونه ایلوائیت برای محاسبه ی فرمول ساختاری این کانی برپایه ۸٫۵ اکسیژن استفاده شده است (جدول ۳). تجزیه نمونهی ایلوائیت 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 فلـزی اسکارن مقـدار Fe₂O₃ را تـا 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 ایلوائیت خالص و مقایسهی آن با نمونهی مرجع.

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

ِ Cu-Au، ایگاراپـه باهیـا، برزیـل	، بــا نمونــەى ايلوائيــت كانــسار	وائیـت زرو (۱و۲) و مقایـسهی آز	ریز پردازشـی از دو نمونـه ایلو	۱ دادههای	جدول ۳
			.['	(Core,	Rime)

Label (%)	Core	Rime	١	٢				
SiO ₂	۲٩,٠۲	29,4V	۲۸,۹۹	۲۸,۹۶				
TiO ₂	• , • A	• /•)	•,•٣	• / • •				
Al ₂ O ₃	۰٬۰۱	• / • •	۰,۷۹	۰,۹۵				
FeO	55,94	۵۳٬۹۸	49,80	46'10				
MgO	• , ۱ ۱	• / \ ·	• / ۱ ۱	۰,۰ ۸				
CaO	١٣,٧٣	15/15	۱۳٫۹	18,88				
MnO	۰٫۹۷	۱,۰۱	۲٫۸۱	۵٬۴۵				
Na2O	• / • •	• / • •	• / •)	•,•۶				
K2O	•,••	• / • •	•,••	• ,•)				
Total			٩۶	۹۵,۶۵				
	کاتیون بر پایه ۸٫۵ اکسیژن							
Si	۱٬۹۸	۲٫۰۱	۲, • ۸	۲٬۰۹				
Ti	• / • •	• / • •	۰,۰۱	• / • •				
Al	•,••	۱,۰۰	۰,۰۶	۰,۰۸				
Fe ²⁺	۲,۹۶	۱/۹۶	۲٬۹۵	۲٫۸۲				
Mg	• /•)	• /•)	• / •)	• / • •				
Ca	۱,۰۰	۰,۹۶	۶،۱	١,٠٣				
Mn	۰, • ۶	•,•••,•۶	•,1٧	۲۳٫				
Na	•,••	• / • •	•,••	۰,۰۱				
K	• / • •	• / • •	•,••	• / • •				



شکل ۱۱ نمودار روابط فازی Log fO2-T در XCO₂ = 0.1 و فشار ۵۰۰ بار برای سامانهی Ca-Fe-Si-C-O-H [۳].

احیاءسازی این شاره با مجموعـه کلینوپیروکـسن _ گارنـت در اسکارن انجام میگیرد و این همه بهعلت توانایی اکـسیژنزائی سازهی هدنبرژیت پیروکسنها در مواجه با شارههای کانـهساز است. با فرض ثابت بودن دما، pH و میـزان کـل سـولفید حـل شده در محلول، حلالیت کـانیهای سـولفیدی فلـزات پایـه در محیط احیاء نسبت به محیط اکسایش پایین میآیـد. بنـابراین کانیهای سولفیدی میتوانند به خوبی در مرز محیطهای احیاء و اکسایش نهشته شوند: SO₄-2 \rightarrow S⁻² + 2O₂

در نتیجه یون احیائی 2 2 با کاتیونهای فلزی دو ظرفیتی (M) از جمله Cu ،Zn ،Pb وارد واکنش شده و کانیهای سولفیدی را خواهد ساخت.

 $(M^{+2}) + S^{-2} \rightarrow MS$ بر اساس مشاهدات حاضر و همخوانی آن با نتایج بررسیهای تجربی به طورکلی تشکیل کانه سولفیدی مس در اسکارن زرو را در ارتباط با واکنشهای اکسایش - احیاء از نوع فوق است. حضور نفوذی های مگنتیت در و یا همراه با ایلوائیت و نیز همراهی پاراژنتیکی کوارتز و کلسیت واکنش شکل گیری ایلوائیت را چنین پیشنهاد می کند [۹]: Magnetite + Calcite + Quartz + H_2O = Ilvaite + $CO_{2} + O_{2}$ بررسیهای کانیشناسی نمونه های اسکارنی زرو نشان میدهد که شکل گیری ایلوائیت به بهای پیروکسن ها با بررسی های سنگ شناختی در زرو انجام شده است. چگونگی و کم و کیف این واکنشها توسط چند پژوهشگران در اسکارنهای مختلف نیز پیشنهاد شده است: الف) ایلوائیت هنگام دگرسانی قهقرائی با واکنش زیر شکل گرفته است [۱۳]: $4Fe^{2+}CaSi_2O_6 + 2H^+ + 2CO_2 + 2O_2 =$ هدنبرژيت $2CaFe^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH) + 4SiO_2 + 2CaCO_3 + \frac{1}{2}$ ايلوائيت

لذا در اینجا با توجه به فاکتورهای کنترل شرایط تعادل در دگرگونی مناطق مورد بررسی میتوان درنظر گرفت که در اوج دگرگونی تأثیر شارههای جریان یافته حاوی SiO₂ و Fe₂O₃ بر سنگهای آهکی منجربه پیدایش هدنبرژیت در اسکارنهای دگرنهادی شده است [۱۰]. $2Fe_{3}O_{4} + 6CaCO_{3} + 12SiO_{2} = 6CaFeSi_{2}O_{6} +$ مگنتىت كلسىت هدنبرژيت $6CO_2 + O_2$ از آنجا که فرویاشی 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 بهصورت محلی در بخـشهـای غـنـی از پیروکسن، گارنتهای آندرادیتی بـه بهای هدنبرژیت تـشـکـیل شـدهانـد [۱۱]. $4CaFeSi_2O_6 + 2CaCO_3 + O_2 = 2Ca_3Fe_2Si_3O_{12} + O_2 = 2Ca_3Fe_2Si_3O_{12} + O_2 = 0$ گارنت هدنبرژيت $2SiO_2 + 2CO_2$ بررسیهای تجربی [۱۲]. نشان داده است که اکسیژن میتواند در سازهی CaFeSi₂O₆ کلینوپیروکسن نقش تپانه را بازی کرده و بنابر واکنش زیر در پیدایش آندرادیتهای اسکارن زرو مؤثر باشد. $9CaFeSi_2O_6 + 2O_2 = 3Ca_3Fe_2Si_3O_{12} + 9SiO_2 +$ گارنت هدنبرژيت Fe₃O₄ مگنتىت این واکنش می تواند همراهی مگنتیت با گارنت و پیروکسن را، هرچند به شکل تأخیری، توجیه کند. همیافتی کانههای سولفیدی در مجموعه یگارنت _ پیروکسن زرو هرچند اندک از

این رهگذر قابل توجیه است، برای تشکیل کانیهای سولفیدی میبایست شارههای کانهساز به حالت احیا، برسد. کار

بر اساس قوانین فاز، حصول تعادل در سنگهای دگرگون در

نقاط T_{max} یعنی در بالاترین شرایط دگرگونی امکان پذیر است،

 H_2O

واکنشهای دگرگونی و سنگزایی

219

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

 $CaFe^{2+}[SiO_3]_2 + 0.5Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4 + (0.5 Fe(OH)_2) = CaFe_2^{2+}Fe^{3+}(Si_2O_7)O(OH)$ [يلوائيت

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

 $Ca_3Fe_2^{+3}(SiO_4)_3 + 2.5 Fe (OH)_2 + 2CO_2 =$ iندرادیت $CaFe_2^{2+}Fe^{+3}[Si_2O_7] O (OH) + 0.5 Fe^{2+}Fe_2^{+3}O_4 +$ Iیلوائیت $SiO_2 + 2CaCO_3 + 2H_2$

كلسيت كوارتز

واکنشهای انجام یافته در مرحلهی پیشرونده اسکارن (تسکیل پیروکسن و گارنت) CO₂ بهوجود آمده است. واکنشهای بالا از نوع کربنزدائی (Decarbonation) هستند[۱۴]. میدانیم کرده است. آن گونه که مشاهده شد، برخی از واکنشهای شکل گیری ایلوائیت CO₂ مصرف کردهاند. از طرفی در برش-شکل گیری ایلوائیت CO₂ مصرف کردهاند. از طرفی در برش-قای میکروسکوپی به روشنی تجزیهی پیروکسنها به کلسیت و گفت که در گام تاخیری دگرگونی مجاورتی عمل رقیق شدن یا خروج CO₂ 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:

 $6CaFeSi_{2}O_{6} + 6CO_{2} + O_{2} = 2Fe_{3}O_{4} + CaCO_{3} +$ کلسیت مگنتیت هدنبرژیت $12SiO_{2}$



Ca-Fe میتوان سامانهی P-T-X میتوان سامانهی Ca-Fe میتوان سامانهی P-T-X میتوان سامانهی Ca-Fe میتوان سامانه ی دورد Si-C-O-H میتوان سامانه جای می گیرند [۳]. این نمودار برپایهی Λ بررسی در این سامانه جای می گیرند [۳]. این نمودار برپایهی Λ مکن Λ کیلوبار فشار و 1.0 = 200 بنا شده است که ممکن است دقیقاً همان شرایط اسکارن زرو نباشد. ولی وجود سنگ میزبان آهکی ($1.0 \sim 200$) و نیز شکل گیری اسکارن در شکافها و فضاهای خالی سنگ آهک دور از توده می عمیق (فشار کم) تا حدودی با شرایط درنظر گرفته شده همخوانی دارد.

 fO_2 هدنبرژیت در مقایسه با فراوردههای دگرسانی خود در پایینتر پایدار است و در دماهای بالاتر از ^C°۴۳۰-۳۸۵ با آندرادیت + کوارتز + کلسیت، بسته به اندازهی fO₂، و در دماهای پایین تر با کلسیت + کوار تز + مگنتیت جانشین شده است. در اسکارن زرو واکنشهای برگشتی اخیر از طریق روابط کانیائی میکروسکوپی به روشنی دیده شده است. لذا دمای این گونه دگرسانی را میتوان در حدود ۴۰۰[°] ۲۰ درنظر گرفت. آندرادیت گسترهی پایداری گستردهای را از ۴۰۰ تـا C°۷۰۰ و ۲۵ – تا Log fO₂ = –۱۵ نشان میدهد (شکل ۱۱). آندرادیت با مجموعهی ولاستونیت + هدنبرژیت در $T > \delta \delta \cdot {}^{\circ}C$ (بسته به در حضور کوارتز جانشین می شود. از آنجا که چنین (fO_2 دگرسانیهایی در زرو دیده نشده است پیشنهاد بر این است که دمای تشکیل کمتر از ۵۵۰°C بوده است. در مورد پیدایش ایلوائیت کـه کـانی ویـژه زرو اسـت، بـه بررسـیهـای [۱۵] گوستاوسون میتوان اشاره کرد. پژوهشهای نامبرده و دیگران[۱۲] نشان داده است که در فشار بالای شارهی ایلوائیت در دمای تقریبی زیر ۴۷۰°۴۷۰ و در گسترهی FO₂ یایدار است (شکل ۱۲). در تأیید این گسترهی دمایی، با استفاده از زمین-دماسنجی کلریت، دمای ۳۰۰ تا ۲۵۰°C نیز به دست آمده است[۹]. شکل ۱۲ نمودار گسترهی پایداری کانی های مختلف در ارتباط با فشار مؤثر اکسیژن[۱۲]. PH2O = 1 kb برای واکنش هایی که حاوی کانی های آبدار (به غير از اپيدوت) هستند. $2CaMg(CO_3)_2 + 2CaAl_2Si_2O_8(aq) + 5SiO_2 + 6CaO$ مرمرهای مجاور اسکارنهای زرو دارای مجموعه ی غالب آنور تيت دولوميت ترموليت + گارنـت + وزوويانيـت + كلـسيت + كـوارتز هـستند. $+ 2H_2O =$ بەنظر مىرسد كە معمول ترين روش تشكيل ترموليت واكنش $Ca_{10}Al_4Mg_2Si_9O_{34}(OH)_4 + 2CO_2$ زیر باشد[۱۱]. وزوويانيت $5CaMg(CO_3)_2$ +8SiO₂ +H₂O در برگرفته شدن بخشی گارنت با وزوویانیت و محو شدن دولوميت گارنتهای درون وزوویانیت می تواند نمایانگر واکنش پیشنهادی $Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 3CaCO_3 + 7CO_2$ زیر باشد: ترموليت $2Ca_{3}Al_{2}Si_{3}O_{12} + 4CaMg(CO_{3})_{2} + 2SiO_{2} + 2H_{2}O =$ بوخر و فری [۱۵] با دو واکنش تـ شکیل ترمولیت را بـ ه بهای گارنت دیویسید و تالک معرفی کردهاند. از آنجا که در مقاطع مرمرها $Ca_{10}Al_4Mg_2Si_9O_{34}(OH)_4 + 2MgCO_3 + 6CO_2$ آثاری یا بازمانده ی تجزیه نشدهای (relict) از این کانیها دیده وزوويانيت نشد، بهنظر میرسد که ترمولیتها با توجه به شواهد روابط پاراژنتیکی این مجموعه روی نمودارهای ACF و CMS-میکروسکویی بهطور آزاد شکل گرفتهاند. HC نشان داده شده است (شکل ۱۳). چنانکه در شکل ۱۴ وجود گارنت در این مجموعه بهصورت مستقل و نیز جانـشینی دیده می شود، ترمولیت در فاصله دمایی باریکی (تقریباً C°۸۰ محدود ترمولیت دیده شده است. با فرض تأمین Al مورد نیاز با با دمای بیشینه ۵۴۰[°]c یایدار است [۱۵]. بررسی های تجربی بستههای ساختاری آنورتیت (CaAl₂Si₂O₈) و یا کلوئیدی در [۱۶] شرایط پایداری وزوویانیت را در فشار ثابت ۲ کیلوبار، شاره می توان واکنش زیر را پیشنهاد کرد. وجود شبح ترمولیت دمای ۴۲۰ تا ۴۷۵°C در XCO₂ پایین دانستهاند. لذا گسترهی (ghost texture) در برخی از گارنتهای همسانگرد، یـشتیبان دمایی تشکیل مجموعه غالب مرمرها در گسترهی دمایی ۴۲۰ این واکنش است: تا ۵۴۰°C درنظر گرفته میشود. مجموعه ی دیگری نیز در $Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + CaAl_2Si_2O_8(aq) + 4H_2O +$ شرایط دمایی پایین تری شکل گرفته است. مجموعهی کلسیت أنورتيت ترموليت + گارنت + کلریت + اپیدوت نیز در مرمرها حضور دارد (شکل $Ca_3(Al, Fe)_2Si_3O_{12} + 7SiO_2 + = Fe_2O_3$ ۱۵). به عقیده ی شلی [۱۷] ناخالصی هایی از سیلیکات های گارنت برگهای در مرمرهای کلسیتی و دولومیتی منجر به پیدایش $5Mg(OH)_2 + \frac{3}{2}O_2$ کانی های آلومینیم دار اپیدوت و گارنت غنی از کلسیم در رخسارهی شیست سبز می شود. شکل گیری وزوویانیت در این مجموعه از طریق مستقل در زمینهی مرمر و نیز به بهای گارنتها (جانشینی) رخ داده است:



CMS-HC نمودار ACF نمودار Tr + Ves + Grs + Cal الف) نمودار باراژنز برای مجموعهٔ Quartz and Calcite in excess



شکل ۱۴ نمودار روابط فازی موجود در مرمرهای 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

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

مرکزی) با آنکه نشانی از حضور یا عملکرد تودهی نفوذی در گسترهی اسکارنسازی در دسترس نیست، ولی احتمالا توده در زیر منطقهی اسکارن قرار دارد. لـذا زرو را یـک اسـکارن دور از [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., "Nomencalture of pyroxens. Subcommitee on pyroxens", International Mineralogical Association. Con. Mineral. 27, 1989, p. 143-156.

[5] Jamtveit B., "Oscilatory 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 I. 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 می گیریم. چگونگی شکل گیری کالک سیلیکاتهای در رخنمون صحرایی نوعی پرشدگی سادهی شکستگیها و شکافهای سنگهای آهکی به وسیلهی نهشت شارههای داغ را تداعی می کند. همجواری بسیار روشن و ناگهانی کالک سیلیکاتهای اسکارن (با کرانه های روشن و ناگهانی کالک سیلیکاتهای اسکارن (با کرانه های نسبتاً نامنظم) با سنگ دیواره، گواه این پدیده است. در محل نسبتاً نامنظم) با سنگ دیواره، گواه این پدیده است. در محل محواری هیچ مرز تدریجی دیده نشده است. لذا منطقی است که این گونه اسکارنها را از دیدگاه ریختشناسی و چگونگی جای گیری اسکارنهای پرشده ی نوع کارستی Karst type (Karst type.

مشاهدات ما از اینگونه جای گیری 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 شارهها و کانیسازی ساخت برشی سنگهای آهکی اولیه هنوز در تودهی اسکارن دیده میشود.

برپایه دادههای کانی شناختی، اسکارن زرو نیز یک اسکارن چند زادی است. دنبالهی تشکیل کانی ها در اسکارن و مرمرهای زرو را می توان نشان داد. چنانکه دیده می شود در اوج تاثیر شاره (گام پیشرونده) نخست پیروکسن ها تشکیل شدهاند و در گام بعد کانی سازی گارنت به دنبال پیروکسن ها به بهای آن ها و یا به طور مستقل انجام گرفته است. تاثیر شاره های حاوی آب زیاد همراه با کاهش دما در گام دگر گونی 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 زمین شناسی اصفهان (به دلیل انجام آنالیزهای EDS در دانشگاه اکلاهماسیتی آمریکا) قدردانی نماییم.

[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.