

سنگ‌نگاری و شیمی گارنت‌ها در کانسار اسکارن خوت، شمال غرب تفت، استان یزد

اعظم زاهدی*، محمد بومری

بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۰/۹/۱۳، نسخه نهایی: ۹۱/۲/۱۶)

چکیده: کانسار اسکارن خوت واقع در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر تفت در نتیجه نفوذ توده گرانودیوریتی خوت به درون سنگ‌های کربناتی ناخالص تریاس بالایی تشکیل شده است. مشاهدات صحرایی و بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهد که اسکارن خوت از نوع کلسیمی بوده و برون اسکارن مهم‌ترین افق اسکارنی در منطقه بوده که همراه با کانه‌زایی است. آنالیز ریزپردازشی نشان داد که دو نوع گارنت در زون گارنت-پیروکسن اسکارن وجود دارد: (۱) گارنت‌های ناهمسانگرد شامل ۶۳/۱۷-۵۱/۷۶ درصد مولی گروسولار و (۲) گارنت‌های همسانگرد دارای ۲۸/۱۰-۱۷/۷۷ درصد مولی گروسولارند. مشاهدات سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که گارنت‌های ناهمسانگرد منطقه بندی و ماکل قطاعی آشکاری را نشان می‌دهند. بررسی منطقه بندی گارنت در اسکارن خوت با ریزپردازش الکترونی نشان می‌دهد که از مرکز به حاشیه تغییرات اساسی در مقادیر عناصر تیتانیوم، آلومینیم، آهن، منگنز و منیزیم دیده می‌شود. در زون‌های مختلف، تغییرات عناصر آلومینیم، تیتانیوم و آهن به طور متناوب تکرار شده است. بنابراین، عامل اصلی بوجود آورنده منطقه‌بندی در گارنت، تغییرات تناوبی آهن، آلومینیم و تیتانیوم در فاز شاری بوده است که نشان دهنده‌ی پالس‌های پی‌درپی شارش گرمایی‌هاست.

واژه‌های کلیدی: اسکارن؛ سنگ‌نگاری؛ منطقه‌بندی؛ گارنت؛ خوت؛ یزد.

مقدمه

جدایش انواع اسکارن‌ها موثر واقع شود. گارنت یکی از فراوان‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده اسکارن خوت است که در نتیجه واکنش گرماب حاصل از توده آذرین با سنگ میزبان آهنی در سنگ‌های اسکارنی تشکیل می‌شود. این گارنت‌ها دارای منطقه‌بندی پیچیده و ماکل قطاعی (ساخت ساعت شنی) هستند. تغییرات در شیمی گارنت، نشان‌دهنده تغییرات در فازهای محل تبلور آنهاست. با مطالعه شیمی گارنت‌ها می‌توان اطلاعات زیادی در مورد خاستگاه و سیر تکاملی سیالات تشکیل دهنده آن به دست آورد. بررسی منطقه‌بندی شیمیایی در گارنت‌های اسکارن خوت یکی از مهم‌ترین ابزارها در تشخیص تغییرات ترکیب شیمیایی گرماب در زمان کانه‌زایی است، لذا به منظور رسیدن به این هدف، در این مقاله ضمن بررسی سنگ‌نگاشت دقیق سنگ‌های اسکارنی به بررسی ترکیب گارنت و تغییرات ترکیبی آن می‌پردازیم.

منطقه‌ی خوت در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر تفت در استان یزد به مختصات جغرافیایی $25^{\circ} 42' 53''$ طول شرقی و $58^{\circ} 52' 31''$ عرض شمالی واقع شده است. گسترده‌ترین سنگ‌های رسوبی منطقه، آهک‌های سازند نایبند با سن تریاس بالایی هستند که میزبان اصلی اسکارن‌ها بوده و همراه با کانه‌زایی مس نیز هستند. بر اساس بررسی‌های یزدی [۱] کانسار مس خوت وابسته به توده‌های نفوذی حدواسط تا اسیدی با بافت پورفیری بوده و از نوع اسکارن مس معرفی شده است. کانه‌زایی مس در اسکارن خوت به صورت افشان و رگچه‌ای در داخل توده‌های نفوذی نیز رخ داده است. گارنت‌ها از سازندگان اصلی اسکارن‌ها هستند و منطقه‌بندی داخلی و تغییرات متنوع آنها، تابعی از تغییرات فیزیکوشیمیایی ترکیب‌های شاره است. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها می‌تواند در تعیین ماهیت و

روش بررسی

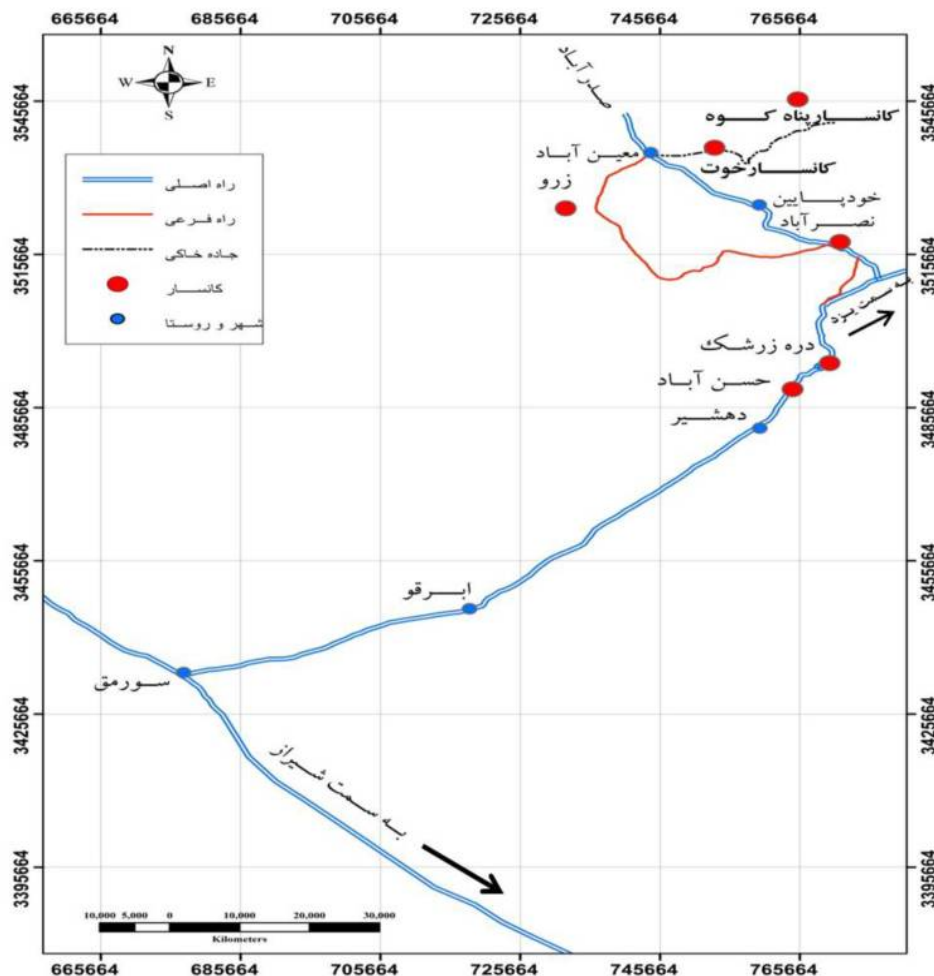
پس از بررسی‌های سنگ‌شناختی، از نمونه‌های اسکارنی مورد بررسی مقطع نازک صیقلی تهیه شد و سپس به منظور بررسی منطقه‌بندی گارنت‌های منطقه، آنالیز ریزپردازشی در چند نقطه از مرکز به حاشیه بر روی گارنت‌های منطقه صورت گرفت. ترکیب شیمیایی گارنت و پیروکسن از حاشیه تا مرکز توسط میکروسکوپ الکترونی مدل JEOL JXA- Superprobe با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلووات و جریان پرتوی 2×10^{-8} amp در دانشگاه یاماگاتای ژاپن انجام شد.

بحث و بررسی

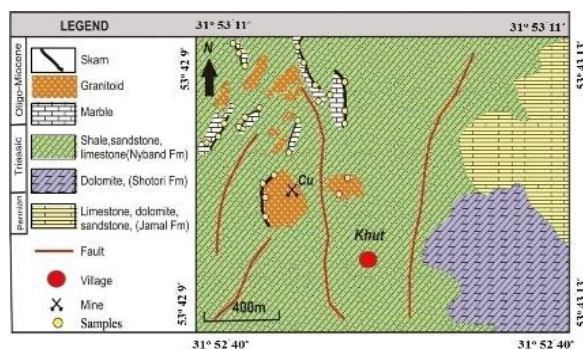
زمین شناسی منطقه

کانسار اسکارن خوت از نظر جایگاه زمین‌شناختی در بخش مرکزی کمر بند ولکانوپلوتونیک ایران مرکزی واقع شده است. کمر بند ولکانوپلوتونیک ایران مرکزی مهم‌ترین جایگاه

زمین‌شناسی کانسارهای مس پورفیری و نیز بیشتر اسکارن‌ها و اسکارن- پورفیری‌های مس و کانسارهای اپی‌ترمال وابسته به ماگماتیسم گرانیتوئیدی سنوزوئیک در ایران است [۲]. منطقه-ی خوت از نظر زمین‌ساختی تحت تاثیر گسل بزرگ دهشیر - بافت و شاخه‌های فرعی حاصل از آن واقع شده است که از چند کیلومتری غرب معدن می‌گذرد. در اطراف کانسار خوت در ناحیه‌ی تفت، کانسارهای متعددی از جمله کانسارهای مس نصرآباد، چاه خطاب ندوشن، علی آباد و دره‌ی زرشک وجود دارند که همگی آنها در راستای گسل دهشیر - بافت و کانسار مس سرچشمه و میدوک قرار دارند (شکل ۱). چینه‌نگاری ناحیه‌ای در منطقه‌ی خوت، از قدیمی‌ترین تا جدیدترین، شامل شتری (تریاس میانی)، سازند نایبند (تریاس بالایی)، سازند سنگستان (کرتاسه پایینی)، سازند تفت (کرتاسه بالایی) و استوک گرانودیوریتی به سن الیگومیوسن است (شکل ۲).



شکل ۱ موقعیت کانسارهای اسکارنی واقع شده در غرب یزد و راه‌های دسترسی به آن‌ها با اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد [۳].



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۰۰۰۰ تهیه شده از منطقه خوت (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضرآباد با تغییرات) [۳].

اسکارن‌ها

زون‌های اسکارنی در کانسار خوت به دو زون گارنت-پیروکسن اسکارن و گارنت اسکارن قابل تقسیم‌بندی است. مشاهدات سنگ‌نگاری در زون‌های اسکارنی به شرح زیر بیان می‌شود:

زون گارنت - پیروکسن اسکارن

گارنت یکی از شاخص‌ترین کانی‌های موجود در این زون است. اسکارن خوت است. این کانی بخش بزرگی از سنگ را تشکیل می‌دهد و به صورت دانه‌ای همراه با کلینوپیروکسن، کوارتز و کلسیت قابل مشاهده است. از ویژگی‌های چشم‌گیر گارنت‌های درشت بلور و ناهمسانگرد، منطقه‌بندی همبافت و نیز ماکل قطاعی است (شکل الف- ۳). منطقه‌بندی نوسانی بلورهای گارنت، بیانگر عدم تعادل و تغییرات ترکیب فاز شاری حین رشد کانی است [۴]. منطقه‌بندی نوسانی، در نتیجه خودسازماندهی ژئوشیمیایی (Geochemical self-organization) به وجود می‌آید که از بازخور واکنش‌های انتقال دهنده (Reaction-transport feedbacks) و عدم تعادل، حاصل شده است [۴]. گارنت در اثر واکنش‌های قهقرایی در مرحله‌ی دگرنهادی پسرونده به کلریت، ترمولیت - اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند (شکل ب- ۳). گاه دگرسانی به قدری شدید است که گارنت‌ها به شدت خرد و کاملاً به کلریت، اپیدوت و هماتیت تبدیل شده‌اند به طوری که تنها شبه‌ریختی (Pseudomorph) از گارنت باقی مانده است. دگرسانی شدید گارنت‌ها به کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های کدر نشان‌دهنده‌ی دگرگونی پسرونده آنها در مناطق برشی یا گسلی است زیرا در سیستم شکستگی‌ها فشار کاهش می‌یابد و جریان محلول بالاست. همچنین در این نقاط کرنش‌های منطقه برشی باعث تجدید تبلور کامل، تغییر بافت، حذف شواهد و آثار وابسته به وجود مواد اولیه‌ی با دمای بالاتر می‌شود. در این زون بیشترین

قدیمی‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل دولومیت‌های شتری است که در بخش شرقی منطقه رخنمون دارد و به گستردگی بیش از ۲۰۰ کیلومتر مربع است. رسوب‌های شیلی، ماسه سنگی و آهکی سازند نایبند بیشترین گسترش را در منطقه دارند که به وسیله‌ی دایک‌ها و سیل‌هایی با ترکیب گرانیتی قطع می‌شوند. با نگاهی به سرشت دو سازند نایبند و سنگستان، سنگ‌های کربناتی، ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها در فرایند دگرنهادی توده‌ی آذرین، سنگ‌های دگرگونی‌ی گوناگونی را پدید آورده‌اند، ولی بیشترین سنگ‌های رسوبی منطقه مورد بررسی که کانه‌زایی در آن صورت گرفته به سازند نایبند وابسته است. توده‌های گرانیتوئیدی در منطقه خوت به شکل استوک، دایک و زبانه‌های پراکنده بین سازند نایبند رخنمون داشته‌اند. در سطح زمین این توده‌های نفوذی به صورت زبانه‌هایی موجب قطع لایه‌های رسوبی سازند نایبند شده‌اند. نفوذ زبانه‌هایی از توده آذرین خوت به درون سنگ‌های کربناتی سازند نایبند منجر به اسکارن‌زایی و تشکیل مرم‌مر شده است. تمرکز کانه‌زایی در مرم‌رها بیشتر بوده و کانه‌زایی اغلب به صورت رگه‌ای و رگچه‌ای و گاهی به صورت انتشاری در اسکارن‌ها نیز مشاهده می‌شوند. کانی‌های اصلی مشاهده شده شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، پیروتیت، هماتیت و مگنتیت و گوتیت است. مالاکیت و آزوریت بر اثر انحلال و اکسایش سولفیدهای اولیه مس و آهن تشکیل شده‌اند.

سنگ‌نگاری

توده‌های نفوذی

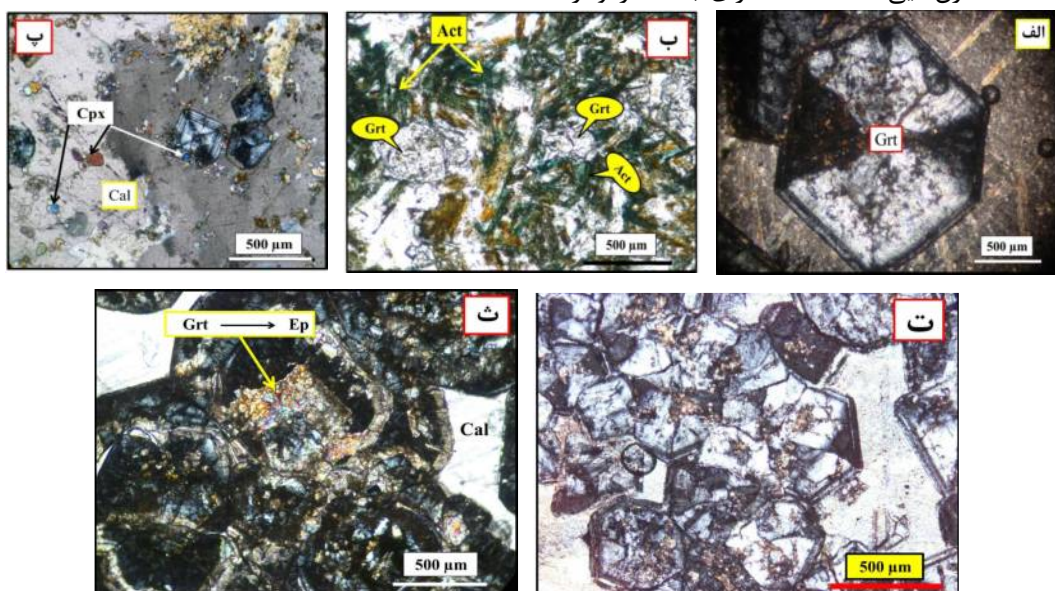
با نگاهی به سنگ‌نگاشت‌ها، توده نفوذی نیمه ژرف ناحیه کانسار خوت، دارای تنوع ترکیبی اندکی بوده و غالباً دارای ترکیب گرانودیوریت با بافت پورفیرئید هستند. کوارتز و پلاژیوکلاز فراوان‌ترین درشت بلور تشکیل دهنده‌ی آن هستند که در آن کوارتز ۴۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد

بوده و تماما از گارنت‌های خود شکل و ناهمسانگرد تشکیل شده است (شکل ت-۳) و کانه‌زایی مس در آنها مشاهده شده است. این دسته از گارنت‌های منطقه‌بندی نوسانی و ماکل قطاعی را به روشنی نشان می‌دهند. دسته دوم گارنت اسکارن‌هایی هستند که دارای بافت گرانوبلاستیک بوده و از گارنت‌های همسانگرد و خود شکل تشکیل شده است (شکل ث، ۳). این دسته از گارنت‌ها فاقد منطقه بندی نوسانی و ماکل قطاعی هستند و تنها ناهمسانگردی ضعیفی در حاشیه نشان می‌دهند. دگرسانی گارنت‌های همسانگرد به اپیدوت، کلریت و کلسیت در بخش مرکزی آشکار است (شکل ث-۳). این دسته از گارنت‌ها به کانه‌زایی مس وابسته نیستند.

کانه‌زایی مس رخ داده است. کلینوپیروکسن اغلب به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار مشاهده می‌شود. این کانی به صورت ادخال در گارنت تشکیل شده است که نشان-دهنده رشد همزمان این دو کانی یا تبلور زودتر کلینوپیروکسن است (شکل پ-۳). روابط پاراژنزی کانی‌ها در این زون در جدول ۱ نشان داده شده است.

گارنت اسکارن

میزان گارنت در این زون بالاست و بیش از ۹۰ درصد آن از گارنت تشکیل شده است. با توجه به بررسی‌های کانی شناسی، گارنت اسکارن در منطقه خوت به دو شکل کاملا متفاوت وجود دارند. یک دسته اسکارن‌هایی هستند که دارای بافت گرانولار



شکل ۳ الف: زون بندی نوسانی گارنت‌های ناهمسانگرد در اسکارن‌های منطقه خوت. ب: جانشینی گارنت توسط اکتینولیت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده. پ: وجود ادخال‌های کلینوپیروکسن در گارنت‌های ناهمسانگرد. ت: بافت دانه‌ای در گارنت‌های ناهمسانگرد در مرحله متاسوماتیسم پیش‌رونده. ث: گارنت‌های همسانگرد خود شکل با بافت گرانولار در اسکارن پیش‌رونده و دگرسانی مرکز آن به اپیدوت و کلریت. (Grt: گارنت؛ Ep: اپیدوت؛ Act: اکتینولیت).

جدول ۱ روابط پاراژنتیکی کانی‌ها در اسکارن خوت.

Stage	Prograde stage		Retrograde stage	
	Early	Late	Early	Late
Substage	430-500°C	350-430°C	350°C	250°C
Temperature				
Clinopyroxene	-----			
Garnet	----- (Gro25-67)	----- (And70-99)		
Actinolite			-----	-----
Quartz	-----			
Calcite		-----		
Epidote			-----	-----
Chlorite			-----	-----
Magnetite	-----			
Ore mineral		-----	-----	-----

کانه‌زایی

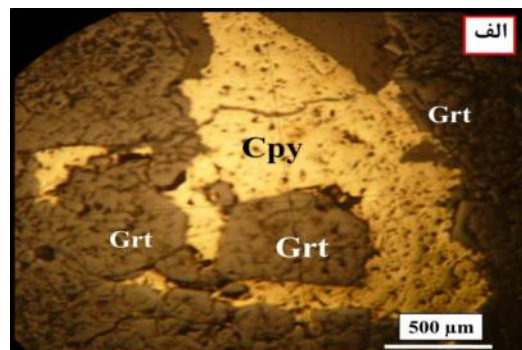
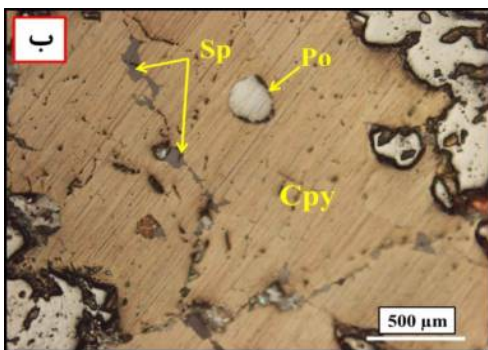
کانه‌زایی مس اغلب به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و گاهی به صورت انتشاری و جانمایی در اسکارن‌ها و مرمرها مشاهده می‌شود. کانی‌های سولفیدی و اکسیدی که به صورت اولیه تشکیل شده‌اند بیشتر شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، پیروتیت و مگنتیت است. کانیهایی که به صورت ثانویه در اثر اکسایش و تجزیه کانی‌های اولیه حاصل شده‌اند شامل اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن مانند هماتیت، لیمونیت، گوتیت و کربنات‌های مس مثل ملاکیت و آزوریت هستند. کانی‌های فلزی تقریباً ۳٪ ترکیب مودال اسکارن را تشکیل می‌دهند. بر اساس بررسی مقاطع صیقلی، پیریت و کالکوپیریت، کانی‌های سولفیدی اصلی در این زون هستند که با مقادیر کمتری از کانی‌های اکسیدی نظیر هماتیت و مگنتیت همراهی می‌شوند. پیریت و کالکوپیریت غالباً فضای بین گارنت‌ها را پر کرده‌اند و احتمالاً در پایان مرحله پیشرونده یا در مرحله دگرسانی پسرونده تشکیل شده‌اند (شکل الف ۴). پیروتیت و اسفالریت به ترتیب به شکل افشان و رگچه‌ای در مرمرها حضور دارد (شکل ب ۴).

شیمی کانی‌ها

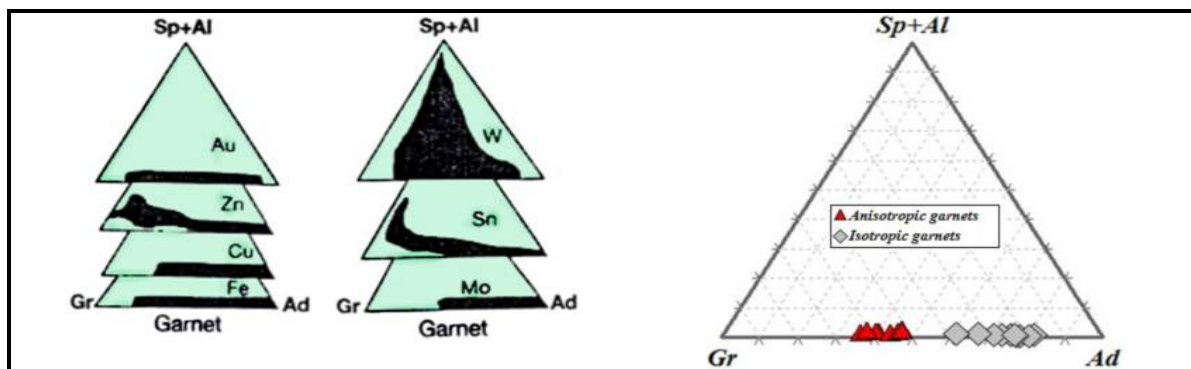
گارنت

بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی (آنالیز ریزپردازشی) در زون گارنت- پیروکسن اسکارن، دو نوع گارنت با ترکیب متفاوت مشاهده شده است (جدول ۲) که نتایج حاصل از آن به شرح زیر است.

ترکیب گارنت‌های ناهمسانگرد در گستره گارنت‌های گراندیتی قرار می‌گیرند و ترکیب آنها از نوع گروسولار-آندرادیت است و تنها درصد ناچیزی اسپسارتین و آلماندین دارند. گارنت‌های ناهمسانگرد غنی در گروسولار دارای ۶۳/۱۷-۵۱/۷۶ درصد مولی گروسولار و ۳۵/۹۰-۴۶/۶۲ درصد مولی آندرادیت هستند (جدول ۲ و شکل ۵). جایگاه ترکیب گارنت‌های ناهمسانگرد در نمودار مثلثی و مقایسه‌ی آن با جایگاه ترکیبی گارنت‌ها در اسکارن‌های کلسیمی دیگر نشان داد که گستره‌ی ترکیبی گارنت‌های ناهمسانگرد منطقه خوت با گستره‌ی ترکیبی گارنت در اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهانی همخوانی دارد (شکل ۵).



شکل ۴ الف: کالکوپیریت به صورت شکافه پرکن در فضای بین گارنت‌ها ب: کان‌زایی پیروتیت به صورت افشان و کان‌زایی اسفالریت به شکل رگچه‌ای در مرمرها (Cpy: کالکوپیریت؛ Grt: گارنت؛ Sp: اسفالریت).



شکل ۵ نمودار توزیع ترکیب تجزیه‌های نقطه‌ای کمی گارنت‌های ناهمسانگرد و همسانگرد در اسکارن خوت و مقایسه آن با اسکارن‌های جهان [۴] (Sp: spessartine, Al: almandine; Gr: grossular; Ad: andradite).

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزپردازشی گارنت‌های ناهمسانگرد و همسانگرد در اسکارن خوت محاسبه فرمول ساختاری آنها بر اساس ۱۲ اکسیژن.

Garnet type	Anisotropic garnet						Isotropic garnet									
	Kh10-Core	Kh6-3-1	Kh6-3-3	Kh6-2-6	Kh6-3-6	Kh6-Rim	Kh6-1-3	Kh6-1-1	Kh6-1-5	Kh6-1-6	Kh6-1-7	Kh6-1-8	Kh6-1-12	Kh6-2-1	Kh6-2-2	Kh6-2-4
SiO ₂	۳۸,۷۲	۳۸,۱۷	۳۸,۸	۳۸,۱	۳۷,۳۹	۳۷,۷۲	۳۶,۷۷	۳۷,۰۰	۲۸,۷۴	۳۶,۵۱	۳۶,۵۹	۳۶,۶۹	۳۶,۹۸	۳۶,۳۵	۳۷,۶۰	۳۶,۷۹
TiO ₂	۰,۱۷	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۲۰	۱,۸۶	۱,۱۰	۰,۱۹	۰,۱۸	۰,۴۶	۰,۰۵	۰,۳۳	۰,۷۸	۰,۰۶	۰,۱۴	۰,۴۵	۰,۰۲
Al ₂ O ₃	۱۳,۲۱	۱۱,۷۱	۱۴,۲۰	۱۱,۸۱	۱۲,۴۳	۱۱,۰۴	۵,۱۵	۵,۷۹	۳,۷۴	۴,۵۷	۴,۱۵	۵,۸۵	۷,۰۶	۴,۹۱	۸,۰۰	۴,۸۵
Fe ₂ O ₃	۱۴,۳۸	۱۴,۳	۱۱	۱۴,۲۰	۱۰,۹۴	۱۳,۹۷	۲۲,۳۴	۲۱,۵۳	۲۰,۸۲	۲۱,۸۸	۲۳,۸۲	۲۰,۱۲	۱۹,۸۲	۲۲,۴۵	۱۸,۱۲	۲۲,۵۱
MnO	۰,۳۹	۰,۵۶	۰,۲۹	۰,۳۷	۰,۴۵	۰,۴۳	۰,۱۸	۰,۱۹	۰,۱۹	۰,۰۹	۰,۱۶	۰,۲۰	۰,۳۳	۰,۱۶	۰,۳۱	۰,۲۵
MgO	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۹	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۶۵	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۸
CaO	۳۵,۸۷	۳۵,۳۲	۳۵,۸۱	۳۵,۴۵	۳۵,۵۳	۳۵,۵۴	۳۴,۶۹	۳۵,۳۵	۲۸,۷۳	۳۵,۰۸	۳۴,۷۹	۳۵,۱۸	۳۴,۹۲	۳۴,۸۹	۳۵,۱۶	۳۴,۵۸
Total	۱۰۱,۷۹	۱۰۰,۲۳	۱۰۰,۲۴	۱۰۰,۰۲	۹۸,۶۹	۹۹,۸۸	۹۹,۳۳	۱۰۰,۰۰	۸۳,۱۸	۹۸,۱۸	۹۹,۸۵	۹۸,۸۶	۹۹,۲۱	۹۸,۹۳	۹۹,۷۱	۹۹,۱
Si	۲,۹۸	۲,۹۷	۲,۹۹	۲,۹۸	۲,۹۶	۲,۹۶	۲,۹۷	۲,۹۶	۲,۷۸	۲,۹۸	۲,۹۵	۲,۹۷	۲,۹۷	۲,۹۵	۲,۹۹	۲,۹۸
Ti	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۵	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۰
Al	۱,۲۰	۱,۰۸	۱,۲۹	۱,۰۹	۱,۱۶	۱,۰۲	۰,۴۹	۰,۵۵	۰,۴۳	۰,۴۴	۰,۳۹	۰,۵۶	۰,۶۷	۰,۴۷	۰,۷۵	۰,۴۶
Fe ³⁺	۰,۸۳	۰,۹۷	۰,۷۳	۰,۹۴	۰,۷۱	۰,۹۲	۱,۵۴	۱,۵۱	۱,۹۵	۱,۵۹	۱,۶۶	۱,۴۱	۱,۳۹	۱,۶۱	۱,۲۱	۱,۵۷
Fe ²⁺	۰,۰۰	۰	۰,۰۱	۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Mn	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲
Mg	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۹	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱
Ca	۲,۹۵	۲,۹۵	۲,۹۵	۲,۹۷	۳,۰۱	۲,۹۹	۳,۰۰	۳,۰۳	۲,۹۷	۳,۰۷	۳,۰۱	۳,۰۵	۳,۰۰	۳,۰۳	۳,۰۰	۳,۰۰
Tot. Cat	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰	۸,۰۰
Al+Fe+Mn	۲,۰۶	۲,۰۹	۲,۰۴	۲,۰۵	۱,۹۰	۱,۹۷	۲,۰۵	۲,۰۷	۲,۴۰	۲,۰۳	۲,۰۶	۱,۹۸	۲,۰۸	۲,۰۹	۱,۹۸	۲,۰۵
%Ad	۴۰,۵۱	۴۶,۴۶	۳۵,۹۰	۴۵,۷۶	۳۷,۳۰	۴۶,۶۲	۷۵,۴۳	۷۳,۰۲	۸۱,۵۸	۷۸,۰۴	۸۰,۳۱	۷۱,۲۱	۶۶,۸۰	۷۵,۰۵	۶۷,۱۵	۷۶,۶۰
%Gr	۵۸,۲۷	۵۱,۷۶	۶۳,۱۷	۵۳,۰۴	۶۱,۱۱	۵۱,۹۳	۲۳,۹۷	۲۶,۳۶	۱۷,۷۷	۲۱,۶۵	۱۹,۱۶	۲۸,۱۰	۳۲,۱۳	۲۲,۴۳	۳۷,۸۰	۲۲,۵۷
%Sp	۱,۲۲	۱,۷۸	۰,۹۳	۱,۱۹	۱,۵۹	۱,۴۵	۰,۶۰	۰,۶۲	۰,۶۵	۰,۳۱	۰,۵۳	۰,۶۹	۱,۰۸	۰,۵۳	۱,۰۵	۰,۸۴

هدنبرزیت است (جدول ۳) و هیچ آثاری از تغییرات ترکیبی و منطقه‌بندی در بلورهای پیروکسن مشاهده نشده است. ترکیب پیروکسن‌های خوت مشابه با پیروکسن‌های اسکارن‌های مس و آهن در دیگر نقاط دنیا است (شکل ۶).

بررسی ژئوشیمیایی منطقه‌بندی در گارنت‌ها

بررسی منطقه‌بندی شیمیایی در گارنت، یکی از مهم‌ترین ابزارها در تشخیص تغییرات ترکیب شیمیایی گرماب در زمان کانه‌زایی است [۶]. ترکیب شیمیایی بلورهای گارنت از حاشیه تا مرکز متغیر است (جدول ۴). این تغییرات شامل تغییر در عناصری همچون سیلسیم، آلومینیم، آهن، منیزیم و کلسیم است (جدول ۴).

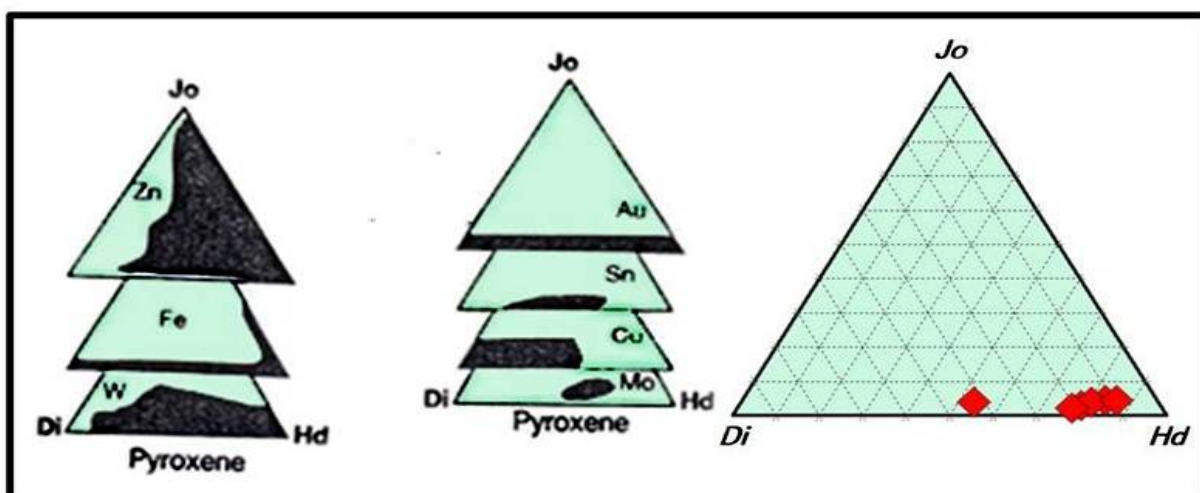
گارنت‌های همسانگردی که نسبت به گارنت‌های ناهمسانگرد تمایل زیادی به قطب آهن‌دار سری گراندیت (آندرادیت) دارند (جدول ۲ و شکل ۵) که نشان‌دهنده و رخداد واکنش‌های دگرنهادی و تشکیل اسکارن در شرایط اکسایش است. گارنت‌های همسانگرد غنی در آندرادیت شامل ۸۱,۵۸-۷۱,۲۱ درصد مولی آندرادیت و ۲۸,۱۰-۱۷,۷۷ درصد مولی گروسولار هستند. بر اساس نمودار Meinert [۵] ترکیب این نوع گارنت‌ها در گستره‌ی اسکارن‌های آهن، مس و طلا قرار می‌گیرد (شکل ۵).

پیروکسن

ترکیب کلینوپیروکسن در اسکارن خوت از نوع دیوپسید-

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه‌ی کانی کلینوپیروکسن در اسکارن خوت و محاسبه فرمول ساختاری آنها براساس ۱۶ اکسیژن.

Sample No	Kh-6-1	Kh-6-2	Kh-6-3	Kh-6-4	Kh-6-5	Kh-6-6
SiO ₂ (wt%)	۵۰٫۴۹	۵۱٫۰۰	۵۰٫۶۹	۵۱٫۳۹	۵۰٫۵	۵۶٫۲۷
TiO ₂	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al ₂ O ₃	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۱۸	۰٫۰۷	۰٫۱۹
FeOT	۲۵٫۲۳	۲۳٫۳۹	۲۴٫۷۶	۲۳٫۷۷	۲۵٫۶۳	۱۶٫۷۱
MnO	۱٫۳۳	۰٫۸۷	۱٫۱۷	۰٫۷۱	۱٫۲۹	۱٫۲۱
MgO	۲٫۰۱	۳٫۰۵	۲٫۶۶	۳٫۶۱	۱٫۵۹	۷٫۴۰
CaO	۲۲٫۳۳	۲۲٫۷۲	۲۲٫۷۳	۲۲٫۳۱	۲۱٫۹۶	۲۰٫۶۷
Na ₂ O	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۷۰	۰٫۱۲
Total	۱۰۱٫۵۴	۱۰۱٫۲	۱۰۲٫۲	۱۰۲٫۱	۱۰۱٫۱	۱۰۲٫۶
Si	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۱	۲٫۰۲	۲٫۰۳	۲٫۰۹
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ²⁺	۰٫۸۴	۰٫۷۸	۰٫۸۲	۰٫۷۸	۰٫۸۶	۰٫۵۲
Fe ³⁺	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mn	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۴
Mg	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۲۱	۰٫۰۹	۰٫۴۱
Ca	۰٫۹۵	۰٫۹۶	۰٫۹۶	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۸۲
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Total	۳٫۹۹	۳٫۹۸	۳٫۹۹	۳٫۹۸	۳٫۹۸	۳٫۹۱
Fe ²⁺ +Mg+Mn	۱٫۰۱	۰٫۹۸	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱	۰٫۹۷
%Di	۱۱٫۸۹	۱۸٫۳	۱۵٫۴۶	۲۰٫۸۳	۹٫۵	۴۲٫۳۱
%Hd	۸۳٫۶۴	۷۸٫۷۳	۸۰٫۶۸	۷۶٫۸۴	۸۶٫۱۱	۵۳٫۶۶
%Jo	۴٫۴۷	۲٫۹۷	۳٫۸۶	۲٫۳۳	۴٫۳۹	۴٫۰۳

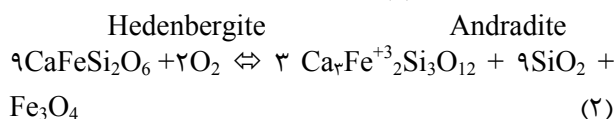
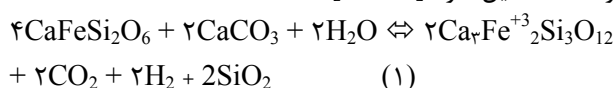


شکل ۶ نمودار توزیع ترکیب تجزیه‌های نقطه‌ای کمی کلینوپیروکسن‌ها و مقایسه آن با اسکارن‌های جهان [۴] (Di: diopside; Hd: johannsenite:hedenbergite).

جدول ۴ نتایج ریزپزدازی حاصل از منطقه بندی گارنت (محاسبه‌ی فرمول ساختاری بر اساس ۱۲ اکسیژن) جدایش آهن با استفاده از صفحات گسترده (spread sheet) محاسبه شد.

Sample	Kh10 Gr-Core	Kh10-Gr-Core 2	Kh10-3-Core.3	Kh10-4-Core.4	Kh10-5-Core.5	Kh10-4-Rim
SiO ₂	۳۸,۰۱	۳۷,۸	۳۷,۸۷	۳۷,۸۴	۳۷,۷۱	۳۶,۸۶
TiO ₂	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۱۷
Al ₂ O ₃	۰,۳۳	۹,۶۵	۱۰,۹۲	۹,۵۱	۱۰,۷۶	۶,۹۶
FeO(T)	۱۷,۵۶	۱۶,۶۱	۱۵,۶۳	۱۶,۶۸	۱۶,۶۷	۲۰,۲۱
MnO	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۲	۰,۳۲	۰,۴۲	۰,۱۶
MgO	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۱۱	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۳
CaO	۳۴,۶۳	۳۴,۷۲	۳۴,۹۹	۳۵,۱۲	۳۴,۷۹	۳۴,۵۵
Total	۱۰۰,۰۳	۹۹,۳۱	۹۹,۹۸	۹۲,۵۲	۱۰۰,۰۴	۹۸,۹۴
Si	۳,۰۰۴	۳,۰۰۱	۲,۹۷۵	۲,۹۹۷	۲,۹۵۶	۲,۹۷۰
Ti	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۱۰
Al	۰,۸۶۹	۰,۹۰۳	۱,۰۱۱	۰,۸۸۸	۰,۹۹۷	۰,۶۶۱
Fe ³⁺	۱,۱۲۳	۱,۰۹۵	۱,۰۳۷	۱,۱۱۸	۱,۰۹۴	۱,۳۷۹
Fe ²⁺	۰,۰۳۸	۰,۰۰۸	۰	۰	۰	۰
Mn	۰,۰۲۹	۰,۰۲۹	۰,۰۲۸	۰,۰۲۱	۰,۰۲۸	۰,۰۱۱
Mg	۰,۰۰۶	۰,۰۱۱	۰,۰۱۳	۰,۰۰۸	۰,۰۰۷	۰,۰۰۴
Ca	۲,۹۳۲	۲,۹۵۳	۲,۹۴۵	۲,۹۸۰	۲,۹۲۲	۲,۹۸۳
Tot. Cat	۸	۸	۸	۸	۸	۸
Al+Fe+Mn	۲,۰۲	۲,۰۳	۲,۰۸	۲,۰۳	۲,۱۲	۲,۰۵
%And	۵۵,۵۷	۵۴,۰۲	۴۹,۹۵	۵۵,۱۶	۵۱,۷۰	۶۷,۲۴
%Gr	۴۳,۰۰	۴۴,۵۵	۴۸,۷۰	۴۳,۸۱	۴۶,۹۸	۳۲,۲۳
%Sp	۱,۴۳	۱,۴۳	۱,۳۵	۱,۰۴	۱,۳۲	۰,۵۴

در گریزندگی بالای اکسیژن، تشکیل گارنت به خرج هدنبرژیت امکان پذیر است. در این صورت هدنبرژیت به گارنت نوع آندرادیت تبدیل می‌شود. بنابراین، آندرادیت می‌تواند در اثر گسترش ترکیب هدنبرژیت در یک واکنش پی در پی در نتیجه‌ی افزایش گریزندگی اکسیژن و آب، بنابر واکنش‌های (۱) و (۲)، تشکیل شود [۱۱، ۱۲].



Hedenbergite Andradite Quartz
Magnetite

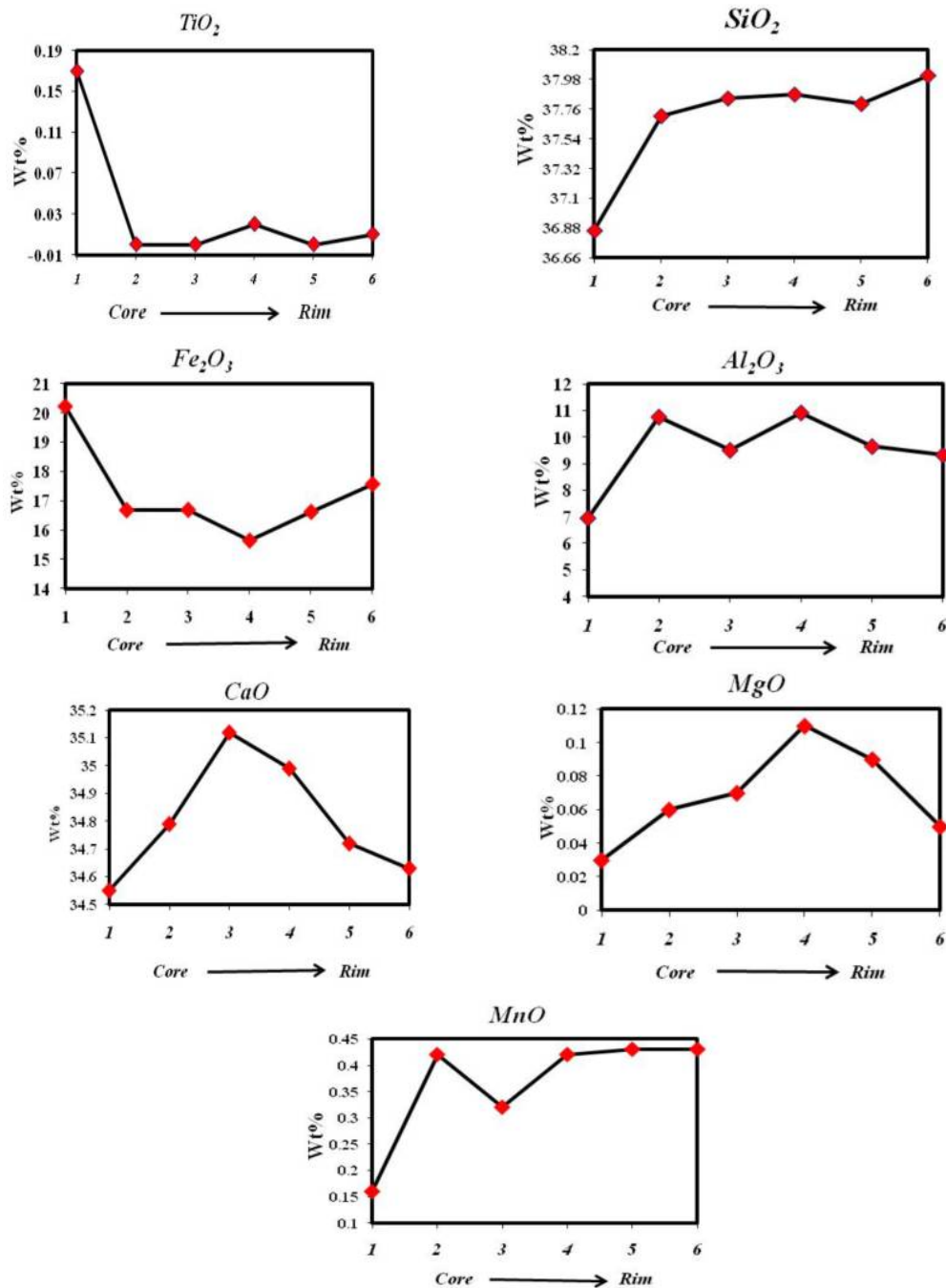
بررسی‌های انجام شده روی همیافتی کانی‌ها و شاره‌های درگیر در گارنت‌های با منطقه بندی نوسانی در اسکارن‌ها نشان داده است که دمای تشکیل مرکز هسته و حاشیه بلور گارنت شبیه به یکدیگرند، لذا دما نمی‌تواند تنها عامل ایجاد چنین پدیده‌ای هنگام رشد گارنت‌ها باشد [۱۳]. از این رو روندهای منطقه بندی در گارنت‌ها می‌تواند در نتیجه تغییرات ترکیبی سیال گرمایی زمان رشد گارنت و یا در نتیجه فرایندهای متقابل گارنت-سیال رخ دهد [۱۴]. شاید بتوان علاوه بر تفسیرهای انجام شده

در بیشتر سامانه‌های اسکارنی، ترکیب گارنت‌های پیشرونده پیشین غنی از Al است و گارنت‌های بعدی یا پسرونده، غنی از Fe هستند [۷-۱۰] نکته قابل توجه رابطه‌ی بین ناهمسانگردی و نسبت $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Al})$ است (جدول ۲) به طوری که معمولا گارنت‌های آندرادیتی ($\text{Ad}>90$) همسانگردند در حالی که گراندیت‌های حدواسط ناهمسانگرد هستند. گارنت‌های ناهمسانگرد دارای گستره‌ی ترکیبی گسترده‌ای هستند که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ناهمگنی عناصر اصلی پروتولیت باشد.

نمودار تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به نقاط تجزیه شده در شکل ۷ آورده شده است. بر اساس این نمودار تغییرات درصد وزنی MgO و CaO از مرکز به حاشیه شبیه یکدیگرند. درصد وزنی Al₂O₃ و Fe₂O₃ به شدت نوسان داشته و اکسیدهای آلومینیم و آهن جایگزین یکدیگر شده‌اند. میزان تغییرات در عناصر آلومینیم و آهن از مرکز به حاشیه بیانگر آن است که منطقه بندی از مرکز تا حاشیه‌ی بلور در ترکیب دو عضو انتهایی گروسولار و آندرادیت در سری محلول جامد گراندیت رخ داده است. در حاشیه‌ی گارنت، آهن یا عضو انتهایی آندرادیت بالاتر از آلومینیم یا عضو انتهایی گروسولار است. در حضور شاره ماگمایی غنی از آب، برهمکنش هدنبرژیت و کلسیت می‌تواند گارنت آندرادیت را بوجود آورد.

ب) شکل‌گیری سلول‌های همرفت حاصل از گردش آب‌های جوی پیرامون توده‌های نفوذی و مشارکت این آب‌ها در سامانه‌های گرمایی می‌تواند باعث تغییرات در سرشتی‌های فیزیکوشیمیایی شاره‌ها (pH، Eh و دما) شود. از آنجا که این آب‌های بیگانه متأثر از شرایط جوی سطحی زمین هستند، لذا تغییرات دوره‌ای آنها می‌تواند این گونه بر سامانه‌های گرمایی تاثیر بگذارد.

در مورد گارنت‌های حاوی منطقه‌بندی علل دیگری نیز تحت عنوان عوامل خارجی به شرح زیر بیان کرد [۱۵]:
الف) جنبش‌های گسلی به ویژه حرکت‌های مستمر و تپنده‌ی گسل دهشیر- بافت: این جنبش‌ها می‌تواند سبب تغییر دوره‌ای فشار بر سامانه‌های گرمایی شود. این تغییرات دوره‌ای احتمالاً می‌تواند با جوشش و اکسایش دوره‌ای گرماب و نهشت دوره‌ای آندرادیت - گروسولار همراه باشد.



شکل ۷ تغییرات عناصر اصلی در منطقه‌بندی‌های تجزیه شده‌ی گارنت.

[4] Ciboanu C.L., Cook N.J., "Skarn texture and a case study: The ocna de Fier- Dognceea orefield, Banat, Romania", Ore geology reviews 24 (2004) 315-370.

[5] 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.

[6] Dziggel A., Wulf K., Kolb J., Meyer F.M., Lahaye Y., "Significance of Oscillatory and Bell-Shaped Growth Zoning in Hydrothermal Garnet: Evidence from the Navachab Gold Deposit, Namibia", Chemical Geology, 262 (2009) 262-276.

[7] Meinert L.D., "Skarns and skarn deposits", Geoscience Canada 19 (1992) 145-162.

[8] Meinert L. D., "Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration", Exploration and Mining Geology 6 (1997) 185-208.

[9] Nakano T., Takahara H., Naorimasa N., "Intracrystalline distribution of major element in zoned garnet from skarn in the Chichibu mine, central Japan; illustration by color-coded maps", Canadian Mineralogist 27 (1989) 499-507.

[10] Einaudi M.T., Meinert L. D., Newberry R. J., "Skarn deposits", Econ. Geol. 75 (1981) 317-391.

[11] Liou J.G., "Stability Relations of Anderadite – Quartz in System Ca – Fe – Si – O – H", American Mineralogist, 59(1974). 1016 – 1025.

[12] Taylor B.E., Liou J.G., "The Low Temperature Stability of Anderadite in C – O – H Fluids", American Mineralogist, 63(1978) 378 – 393.

[13] Morimoto N., Chairman B., "Nomenclature of pyroxens. Subcommitee on pyroxens", International Mineralogical Association. Con. Mineral, 27(1989) 143-156.

[14] Jamtveit B., Wogelius R.A., Fraser, D.G., "Zonation patterns of sakrn garnets, records of hydrothermal system evolution", Geology, 21(1993) 113-116.

[۱۵] مکی زاده م.ع.، "مطالعات کانی شناسی و پترولوژیکی اسکارن‌های ایران مرکزی (استان یزد)"، رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۸۷). ۱۹۲ صفحه.

برداشت

نفوذ توده‌ی گرانودیوریتی خوت به درون سنگ‌های کربناتی سازند نایبند منجر به تشکیل اسکارن کلسیمی شده است. برون اسکارن در اسکارن خوت، زون اصلی را تشکیل داده و خود شامل دو زون مشخص گارنت اسکارن و گارنت – پیروکسن اسکارن است. مقایسه‌ی ترکیب شیمیایی گارنت با جایگاه ترکیبی گارنت در اسکارن‌های کلسیمی دیگر نشان داد که گستره‌ی ترکیبی گارنت‌های منطقه‌ی خوت با گستره‌ی ترکیبی گارنت در اسکارن‌های مس، آهن و طلای جهانی همخوانی دارد. از ویژگی‌های شاخص گارنت‌های نوع گروسولار – آندرادیت، منطقه‌بندی موجود در آنهاست که به طور آشکار در گارنت‌های خوت مشاهده می‌شود. این ساختار منطقه‌ای هم مرکز، نشان دهنده‌ی عدم تعادل بلور و تغییرات ترکیب حین رشد کانی است. گارنت‌های غنی از گروسولار می‌تواند حاصل برهمکنش سنگ میزبان با شاره‌های غنی از H_2O باشد که سرشتی گارنت‌های اسکارنی گرمایی است. این منطقه‌بندی نشان‌دهنده‌ی پالس‌ها مستمر گرمایی‌هاست و معمولاً پیرامون گارنت‌ها نسبت به هسته از آندرادیت غنی‌تر است. در زون‌های مختلف گارنت‌های خوت، عناصر آهن و آلومینیم به طور کامل جایگزین یکدیگر شده‌اند که طی دوره‌های مختلف باعث بوجود آمدن منطقه‌بندی همبافت در گارنت شده‌اند.

قدردانی

از همکاری‌های بی‌دریغ پرفسور ناکاشیما از بخش علوم زمین دانشگاه یاماگاتا در ژاپن برای انجام تجزیه‌ی ریزپرندازش الکترونی کانی‌ها و تهیه تصاویر SEM تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [۱] یزدی م.، "مطالعه زمین شناسی اقتصادی و لیتولوژی کانسار خوت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۷۰). ۲۰۷ صفحه.
- [2] Jankovic S., "Metallogeny of the Alpine granitoids in the Tethyan-Eurasian metallogenic belt", proceeding of the 27th International Geological Congress 12 (1984) 247-273.
- [3] Hajmolla Ali A., "Geological quadrangle map of Khezr abad: Sreies sheet", 6753, ministry of mines and metals. Geological survey of Iran, Tehran (1993).