

Type of Garnet Zoning in Skarns of Ghohroud Intrusion, south of Kashan

F. Masoudi, B. Mehrabi, F. Farazdel

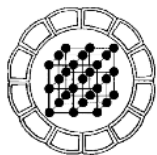
Department of Earth Sciences, Tarbiat Moalem University, Tehran, Iran.

E- mail: masoudi@saba.tmu.ac.ir

(Received: 8/9/2004, received in revised form: 20/1/2005)

Abstract: Next to the Ghohroud granitic intrusive body in the south of Kashan, skarns are outcropped, of which some contain garnet crystals with obvious zoning. In order to investigate characteristics of this zonation, garnet crystals were analyzed from core to rim by EDX point analysis, using scanning electron microscope. Obtained data show that garnet crystals belong to grandite (grossular-andradite) series and oscillatory and complex zoning are widespread. Variation of Al and Fe from center to rim of analyzed crystal indicates sharp variation in X_{Gras} in grandite solid solution series. Therefore, garnet zoning formed during crystal growth and diffusion has an insignificant effect. However, based on the BSE images, oscillatory zoning has been disturbed by fluid infiltration next to fractures. Pattern of variation on X_{Gras} from core to rim indicates that the main factor on formation of oscillatory zonings was immiscibility in grandite series which followed by changes in hydrothermal solution composition. Sharp micron-scale boundaries in zonation and preservation of zoned garnet reveal that skarns have not experienced thermal overprint after formation and emplacement of pluton and formation of skarns were not followed by further thermal geological event like regional metamorphism in the area.

Keywords: *Skarn, Garnet, Zoning, Ghohroud intrusion.*



نوع ساختمان منطقه‌ای گارنت در اسکارنهای توده نفوذی قهرود، جنوب کاشان

فریبرز مسعودی، بهزاد مهرابی، فرانک فرازدل

گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم

پست الکترونیکی: masoudi@saba.tmu.ac.ir

(دریافت مقاله ۸۳/۶/۱۷، دریافت نسخه نهایی ۸۳/۱۰/۳۰)

چکیده: در حاشیه توده نفوذی قهرود در جنوب کاشان، رخنمون‌هایی از اسکارن دیده می‌شود که در برخی از آنها بلورهای گارنت ساختمان منطقه‌ای واضحی را نشان می‌دهند. به منظور تعیین نوع ساختمان منطقه‌ای در این گارنت‌ها بررسی نقطه‌ای SEM از مرکز به سمت حاشیه بلور انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که گارنت‌ها متعلق به سری گراندیت (گروسولار - آندرادیت) و ناحیه - بندی در آنها نوسانی و پیچیده است. چگونگی تغییر عناصر Fe و Al از مرکز به سمت حاشیه گویای آن است که نوسان از مرکز تا حاشیه بلور در میزان دو عضو انتهایی گروسولار و آندرادیت در سری محلول جامد گراندیت رخ داده است، لذا ساختمان منطقه‌ای گارنت‌ها هنگام رشد بلور به وجود آمده و فرایند نشر در تشکیل آنها نقشی نداشته است. با این وجود ترکیب گارنت در حوالی برخی از شکستگی‌ها متفاوت بوده و این تفاوت در تصویر BSE کانی دیده می‌شود. لذا ساختمان منطقه‌ای ایجاد شده در اثر نشت آب‌گونه‌ها در کانی به صورت موضعی به هم خورده است. الگوی تغییرات X_{GrS} از مرکز به حاشیه بلور نشان می‌دهد که عامل اصلی ایجاد ساختمان منطقه‌ای نوسانی در گارنت‌های منطقه، نامیختگی در سیستم دوتایی گروسولار - آندرادیت بوده که با تغییر در ترکیب آب‌گونه‌های گرمایی ادامه یافته است. حفظ ساختمان منطقه‌ای گارنت در مقیاس چند میکرون و وجود مرزهای ناگهانی در تغییر ترکیب شیمیایی بلورهای گارنت نشان‌دهنده آن است که اسکارن‌های منطقه پس از تشکیل، تحت تأثیر گرادیان گرمایی بعدی، مانند دگرگونی ناحیه‌ای، که باعث ایجاد نشر و از بین رفتن ساختمان منطقه‌ای شود، قرار نگرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: اسکارن، گارنت، ساختمان منطقه‌ای، توده نفوذی قهرود.

مقدمه

مطالعات کمی ساختمان منطقه‌ای شیمیایی در کانیهای آذرین و دگرگون، به منظور تعیین و بررسی چگونگی تشکیل آنها، از اوایل دهه ۷۰ میلادی، یعنی همزمان با ظهور میکروسکوپ الکترونی آغاز شد. قبل از این زمان، بررسی ساختمان منطقه‌ای تنها از طریق مطالعه رنگ کانیها (مثل پیروکسن، آمفیبول، تورمالین)، تفاوت ضریب شکست درون بلوری (مثل گارنت) و تفاوت در زاویه خاموشی (مثل پلاژیوکلاز) امکان پذیر بود. اولین مطالعات کمی منتشر شده از ساختمان منطقه‌ای، در کانیهای دگرگونی، بر روی ساختمان منطقه‌ای در گارنتها بود [۱ تا ۶].

ساختمان منطقه‌ای گارنت در سنگهای دگرگونی می‌تواند در طی فرایندهای متفاوتی چون رشد بلور [۷ و ۸]، نشر [۹ تا ۱۱] و یا در اثر نشت آبگونه‌ها در بلورهای گارنت قبلاً تشکیل شده [۱۲ و ۱۳]، به وجود آید. ساختمان منطقه‌ای رشدی طی تبلور کانی و انواع ساختمان منطقه‌ای نشتی یا ساختمان منطقه‌ای ایجاد شده در اثر آبگونه‌های ثانوی بعد از تبلور گارنت به وجود می‌آیند. اگر چه تغییرات به وجود آمده طی رشد، مهمترین عامل تشکیل ساختمان منطقه‌ای گارنت است، اما فرایندهای نشر و نشت آبگونه‌ها پس از تبلور گارنت باعث می‌شود که تعادل اولیه گارنت از بین برود. بنابراین به سادگی نمی‌توان از این کانی در تعیین شرایط حاکم در زمان رشد بلور، دمای دگرگونی و یا مسیر P-T استفاده کرد [۱۴ تا ۱۷]. لذا استفاده و تعبیر و تفسیر داده‌های حاصل از آنالیز گارنت‌های زونه به تعیین نوع ساختمان منطقه‌ای گارنت بستگی دارد.

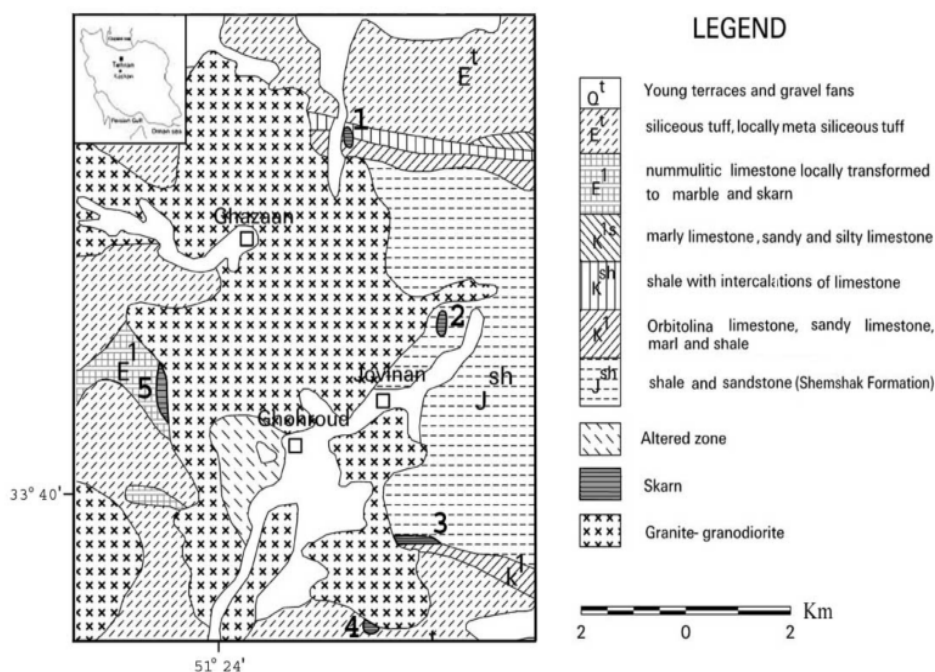
در مجاورت توده نشتی قهرود جنوب کاشان، گارنتهایی در اسکارنها تشکیل شده که در برخی موارد ساختمان منطقه‌ای بارزی از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق با استفاده از تجزیه نقطه‌ای SEM ساختمان منطقه‌ای گارنتهای موجود در این اسکارنها مورد مطالعه قرار گرفت و عوامل تشکیل آن بررسی شده‌اند.

زمین شناسی عمومی

در جنوب شهر قمصر و روی کمر بند آتشفشانی ارومیه - دختر، توده نشتی تقریباً یکنواختی رخنمون دارد. این توده نشتی با مساحت تقریبی حدود ۶۵ کیلومتر مربع و با سن میوسن میانی در مجموعه‌ای از سنگهای ژوراسیک، کرتاسه و ائوسن نفوذ کرده است (شکل ۱). مطالعات ژئوشیمیایی براساس عناصر اصلی مشخص کرده است که این توده از نوع متاآلومینوس و کالکوالکالن بوده و در گروه گرانیتوئیدهای نوع I قرار دارد و علت تشکیل آن را فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی و برخورد دو بلوک عربستان و ایران می‌دانند [۱۸ تا ۲۳].

قدیمی‌ترین سنگهای مشاهده شده در مجاورت توده سازند شمشک با سن ژوراسیک است که بیشتر در شرق توده رخنمون دارند. این واحد مجموعه‌ای شامل ضخامت قابل ملاحظه از لایه‌های ماسه سنگی ریزدانه سبز زیتونی تا خاکستری تیره، سیلتستون و شیل‌های ورقه‌ورقه سیاه رنگ است که در برخی از نقاط با میان لایه‌های آهکی - شیلی همراه است. سنگهای مذکور در اطراف توده نشی قهرود دستخوش دگرگونی مجاورتی شده‌اند. برخی از متاسندستون‌ها به دلیل لیتولوژی خاص خود آثار دگرگونی را فقط به صورت تبلور مجدد و درشتتر شدن دانه‌های کوارتز و تشکیل زوایای ۱۲۰ درجه بین آنها، نشان داده‌اند. در برخی از نقاط که سنگ مادر متاسندستون، آرکوز، گریوک و تا حدی پلیتی بوده است، کانیهای آندالوزیت، بیوتیت و مسکویت نیز قابل تشخیص است و هورنفلسهای آندالوزیت‌دار به صورت محدود تشکیل شده‌اند.

در شمال و جنوب سنگهای ژوراسیک، مجموعه‌ای از سنگهای کرتاسه، شامل آهکهای اربیتولین‌دار، ماسه سنگهای آهکی، آهک ماسه‌ای دولومیتی و آهک اولیتی با فسیل اوریبتولین همراه با لایه‌های نازک آهک شیلی متعلق به کرتاسه زیرین رخنمون دارند.



شکل ۱ موقعیت اسکارنهای مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ کاشان).

آهکهای کرتاسه با دگرشیبی زاویه‌ای به واسطه چند متر میکروکنگلومرای قاعده‌ای بر روی لایه‌های قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. آهکهای کرتاسه در محل تماس با توده نشتی قهرود، دستخوش دگرگونی مجاورتی شده و در برخی از نقاط به اسکارن تبدیل شده‌اند. نفوذ محلولهای کانسار ساز به درون این اسکارنها موجب ایجاد رگه‌های سیاه رنگ ماگنیتیت در اسکارنهای جنوب شرق قهرود شده است.

در بخش شمالی، غربی و جنوبی، توده نشتی با سنگهای ائوسن در تماس است. سری آتشفشانی رسوبی ائوسن، آمیخته‌ای از سنگهایی با بافت، ساخت و ترکیب شیمیایی بسیار متنوع در سطح وسیع است که به طور دگرشیب روی آهکهای کرتاسه زیرین و گاهی تشکیلات شمشک قرار گرفته است. بخشهای رسوبی و آذر آواری این سری، لایه‌بندی کاملاً واضحی دارد، ولی گدازه‌ها و برشهای آتشفشانی غالباً توده‌ای هستند. این مجموعه دارای ضخامت قابل توجهی بوده و شامل توفهای دگرگون شده سیلیسی، توفهای اسیدی، توفیتها، توفهای مارنی، توفهای آهکی و گاهی کنگلومرای آتشفشانی و توف برشی است.

در جنوب و جنوب شرق قهرود، مجموعه‌ای مرکب از سنگ آهک و سنگهای آذرآواری در بخش بالایی سنگهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن قرار گرفته است که فسیلهای ائوسن بالایی و شروع الیگوسن در آنها یافت می‌شود. سن قدیمی‌ترین لایه‌های فسیل‌دار سنگهای ائوسن در منطقه، ائوسن میانی است [۲۴].

اسکارنها

نفوذ استوک گرانودیوریتی - تونالیتی قمصر - قهرود موجب دگرگونی مجاورتی سنگهای اطراف خود شده و مجموعه‌ای از سنگهای دگرگونی مجاورتی شامل متاسندستون، متاپلیت، متاولکانیت و اسکارن را به وجود آورده است.

اسکارنها در ۵ منطقه اصلی در حاشیه توده نشتی قهرود مطالعه شده‌اند. این مناطق در شکل ۱ با شماره مشخص شده‌اند. پراژنرکانیها در هر منطقه تا حدی با مناطق دیگر متفاوتند اما اسکارنهای مطالعه شده براساس نوع سنگهایی که اسکارن جایگزین آنها می‌شوند، عمدتاً از نوع برون اسکارن هستند. در این منطقه درون اسکارن نیز گزارش شده است [۲۵]. بر اساس ترکیب شیمیایی، اسکارنهای منطقه، عمدتاً از نوع اسکارنهای کلسیک بوده و تنها اسکارن واقع در جنوب شرق قهرود (شمال غرب کوه کلاه برفی) از نوع اسکارن سیلیکاته است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، سنگ میزبان اسکارنهای منطقه ۲، آهکی و سنگ میزبان اسکارنهای منطقه ۱، ۳ و ۵، آهک دولومیتی بوده است. سنگ میزبان اسکارنهای منطقه ۴، به احتمال قوی سنگهای آذرآواری اپی کلاستیک و ولکانیت‌ها هستند.

رخنمون اسکارنها اغلب محدود و زون‌بندی خاصی در آنها قابل تشخیص نیست، لذا اسکارنهای مطالعه شده بر اساس کانی‌شناسی، بر اساس نام و موقعیت جغرافیایی تفکیک شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات اسکارنهای منطقه مورد مطالعه

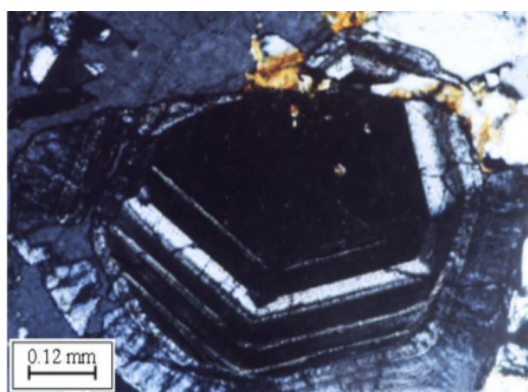
نوع سنگ مادر و سن آن	کانی شناسی	نام اسکارن	موقعیت جغرافیایی
آهک‌های کرتاسه	کلسیت، دولومیت، گارنت، اپیدوت، اسفن	گارنت اسکارن	شمال شرق قهرود، جنوب شرق قمصر (شکل ۵-۴، منطقه ۱)
	دولومیت، گارنت، کلینوپیروکسن	پیروکسن گارنت اسکارن	
آهک (بعد از ژوراسیک)	گارنت، کلینوپیروکسن، اپیدوت، کوارتز، کلسیت، کلریت، وزوویانیت، اسفن، اکتینولیت	اپیدوت پیروکسن گارنت اسکارن	شمال شرق قهرود، شمال شرق جوینان (منطقه ۲ در شکل ۱)
آهک‌های کرتاسه	مگنتیت، گارنت، کوارتز، تالک، کلسیت	گارنت مگنتیت اسکارن	جنوب شرق قهرود، (منطقه ۳ در شکل ۱)
ولکانیت‌ها و سنگهای آذرآواری ائوسن	گارنت، دیوپسید، کوارتز، پلاژیوکلاز	پیروکسن گارنت اسکارن	جنوب شرق قهرود، شمال غرب کوه کلاه برفی (منطقه ۴ در شکل ۱)
	کوارتز، دیوپسید	پیروکسن اسکارن	
	اپیدوت، کوارتز، پلاژیوکلاز، اسفن، آلکالی فلدسپات	اپیدوت اسکارن	
آهک های ائوسن	کلینوپیروکسن، گارنت، کلسیت، کوارتز، کلریت، اکتینولیت	گارنت پیروکسن اسکارن	شمال غرب قهرود، (منطقه ۵ در شکل ۱)
	اپیدوت، کلسیت، گارنت، وزوویانیت، کلریت، کوارتز، آلبریت، اسفن، تالک	گارنت اپیدوت اسکارن	
	گارنت، کلسیت، کوارتز، تالک، کلریت	گارنت اسکارن	
	گارنت، ولاستونیت، کلسیت، وزوویانیت، کلینوپیروکسن	پیروکسن ولاستونیت گارنت اسکارن	

گارنت

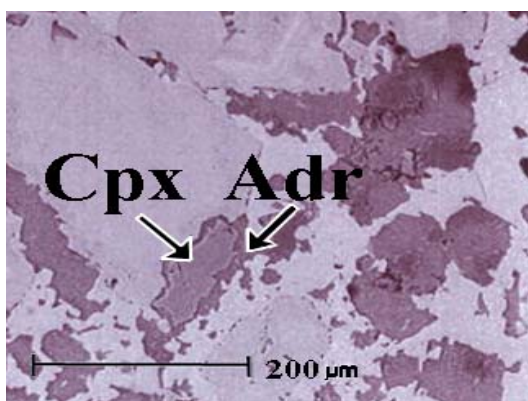
کانی گارنت یکی از کانیهای تشکیل دهنده اغلب اسکارنهای منطقه است. اما گارنتهای زونه تنها در اسکارنهای شمال شرق جوینان، که در نقشه با شماره ۲ مشخص شده، یافت می‌شوند. گارنتهای موجود در اسکارنهای مناطق ۱، ۳ و ۴ همسانگرد و فاقد ناحیه‌بندی هستند. اسکارنهای شمال غرب قهرود (منطقه ۵) به‌صورت همسانگرد و ناهمسانگرد مشاهده می‌شوند ولی عمدتاً فاقد زون‌بندی بوده و تنها تعداد معدودی از گارنتها دارای حاشیه زونه هستند. با وجود اینکه سنگ میزبان اسکارنها در این بخش دولومیتی‌تر از اسکارنهای شمال شرق جوینان است ولی ترکیب شیمیایی گارنتهای این منطقه، تفاوت کمی با اسکارنهای شمال شرق جوینان دارد. میزان اسپسارتین در این ناحیه بسیار کم شده و دربرخی از نمونه‌ها اصلاً

وجود ندارد. این در حالی است که مقدار بسیار ناچیزی از عضو انتهایی پیروپ در ترکیب محلول جامد وارد شده است.

اسکارنهای شمال شرق جوینان به صورت اپیدوت پیروکسن گارنت اسکارن هستند. گارنتهای قهوه‌ای رنگ، خود شکل و درشت بلور به آسانی در اسکارنهای منطقه قابل تشخیص است. از نظر میکروسکوپی گارنتهای مذکور متعلق به سری اوگراندیت و عمدتاً زونه بوده و به صورت تناوبی از گارنتهای همسانگرد و ناهمسانگرد هستند. گارنتهای این منطقه از نظر ترکیب شیمیایی متشکل از درصد بالایی از گروسولار ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، آندرادیت ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) و درصد کمی اسپسارتین ($\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) هستند. به نظر می‌رسد که گارنتهای موجود در اسکارنهای شمال شرق جوینان طی دو نسل به وجود آمده‌اند. گارنتهای نسل اول در مراحل اولیه تشکیل اسکارن همراه با پیروکسن به وجود آمده و ساختمان منطقه‌ای در آنها مشاهده شده است (شکل ۲). گارنتهای نسل دوم حاصل دگرگونی برگشتی بوده و از تبدیل کلینوپیروکسنها حاصل شده‌اند (شکل ۳). آثار خوردگی پیروکسنها در کنار بلور گارنت و حضور اذخالیهای کلینوپیروکسن که در داخل گارنت حبس شده‌اند، نشانه تشکیل گارنت از پیروکسن در طی دگرگونی برگشتی است. این نسل از گارنتها فاقد ساختمان منطقه‌ای هستند.



شکل ۲ تصویر میکروسکوپی از نسل اول بلورهای گارنت در اپیدوت پیروکسن گارنت اسکارن شمال شرق جوینان. حاشیه بلور گارنت طی دگرگونی برگشتی به ایدوگراز تبدیل شده است.

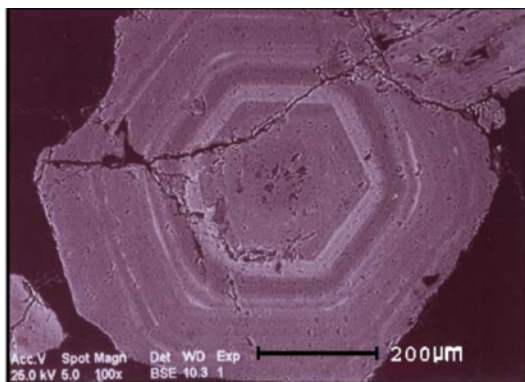


شکل ۳ تصویر BSE از نسل دوم بلورهای گارنت که از تبدیل بلورهای کلینوپیروکسن در اپیدوت پیروکسن گارنت اسکارن شمال شرق جوینان به وجود آمده‌اند.

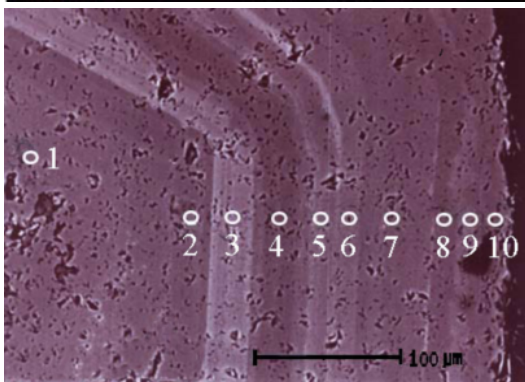
کلینوپیروکسن: Cpx
آندرادیت: Adr

الگوی ساختمان منطقه‌ای گارنت

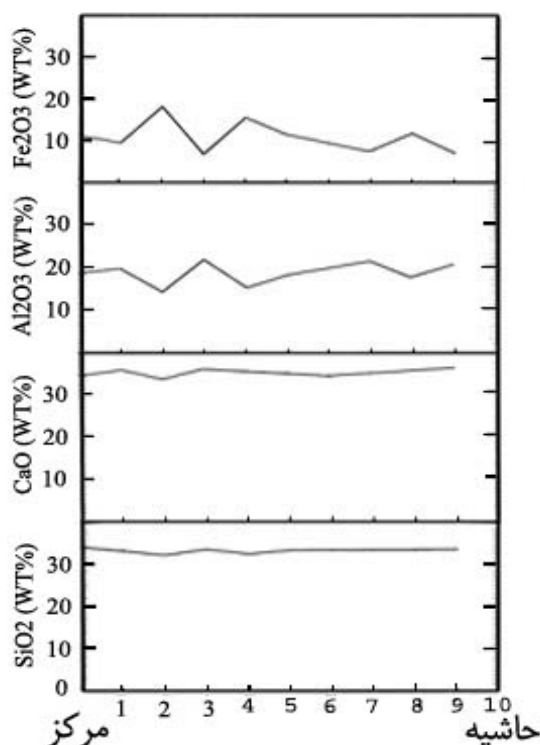
تجزیه نقطه‌ای به روش EDX به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) فیلیپس مدل XL30 روی نمونه‌های نازک صیقلی تهیه شده دارای گارنت‌های زونه اسکارنهای شمال شرق جوینان انجام شد. شکل ۴ تصویر BSE یک بلور گارنت با زون‌بندی مشخص از اسکارنهای شمال شرق جوینان را نشان می‌دهد. در این شکل، افزایش درجه روشنایی در بلور گارنت، نشانه افزایش عضو انتهایی آندرادیت در سری محلول جامد گروسولار - آندرادیت بوده و برعکس کاهش روشنایی، نشانه افزایش عضو انتهایی گروسولار در سری محلول جامد است. شکل ۴ به خوبی گویای ناحیه‌بندی رشدی نوسانی در بلور گارنت است. در این شکل مرز بین دو زون کاملاً مشخص می‌باشد که نشانه تغییرات ناگهانی در ترکیب شیمیایی مواد تشکیل دهنده گارنت است. در شکل ۵ مکان تجزیه نقطه‌ای با دوایر سفید رنگ مشخص شده است. تعداد ۱۰ تجزیه نقطه‌ای از مرکز به سمت حاشیه بلور انجام شد. شکل ۶ تغییرات درصد وزنی اکسیدهای CaO و SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 را از مرکز به سمت حاشیه بلور نشان داده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد وزنی Fe_2O_3 و Al_2O_3 به شدت نوسان نشان می‌دهند. در نقاطی که درصد وزنی Fe_2O_3 (شاخص آندرادیت) کاهش یافته است، درصد وزنی Al_2O_3 (شاخص گروسولار) افزایش نشان می‌دهد و برعکس. تغییرات این دو اکسید در مرکز بلور بیشتر و در حاشیه کمتر است. درصد وزنی SiO_2 و CaO از مرکز به حاشیه تغییرات ناچیزی را نشان داده و تقریباً ثابت است.



شکل ۴ تصویر BSE از یک بلور گارنت کاملاً زونه متعلق به سری گراندیت. افزایش درجه روشنایی گویای افزایش عضو انتهایی آندرادیت در سری محلول جامد گروسولار - آندرادیت است.



شکل ۵ تصویر BSE از یک بلور گارنت با زون بندی رشدی نوسانی. دواير سفید رنگ نشان‌دهنده مکان تجزیه نقطه‌ای SEM است.



شکل ۶ نتایج تغییرات درصد وزنی اکسیدهای SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 از مرکز به سمت حاشیه بلور.

بحث

نوع ساختمان منطقه‌ای گارنت

تغییرات در زمان رشد، پدیده نشر و نشت آب‌گونه‌ها در بلور می‌توانند به وجود آورنده پدیده ساختمان منطقه‌ای در گارنت‌ها باشند. الگوی ساختمان منطقه‌ای گارنت‌های منطقه، تغییرات نوسانی را برای این گارنت‌ها نشان می‌دهد. چگونگی تشکیل و خصوصیات هر یک از انواع ساختمان منطقه‌ای، در ادامه آورده شده تا بتوان انطباق الگوی نوسانی گارنت‌های منطقه را با هر یک از انواع ساختمان منطقه‌ای تعیین کرد. ساختمان منطقه‌ای رشدی در اثر تغییرات ممتد و یا غیرممتد در ترکیب موادی که حین رشد کانی با سطح بلور تماس دارند، به وجود می‌آید. اصولاً ساختمان منطقه‌ای رشدی به پدیده تفریق در طول رشد نسبت داده شده است. [۷ و ۲۶]. عمدتاً این نوع ناحیه‌بندی در درجات پائین تا متوسط دگرگونی مشاهده شده است. در سیستم‌های بسته، پدیده ناحیه‌بندی رشدی به صورت غنی‌شدگی یک یا چند عنصر خاص در مرکز و کاهش تدریجی آنها به سمت حاشیه بلور همراه است. برعکس، عناصر دیگری در

حاشیه بلور غنی شده و به سمت مرکز بلور از میزان آنها کاسته می‌شود. برای مثال گارنتهای زونه غنی از آلماندین دارای هسته غنی از منگنز و کلسیم و حاشیه غنی از منیزیم و آهن است [۱، ۷، ۲۶ و ۲۷]. نیمرخهای زنگ مانند اینگونه کانیه‌ها، برای عناصر منگنز و کلسیم شاخص ناحیه‌بندی رشدی در آنهاست. در صورتی که پدیده انتشار پس از تشکیل اینگونه کانیه‌های زونه سریع باشد، ممکن است باعث از بین رفتن ناحیه‌بندی رشدی اولیه شود. یاردلی [۸] با بررسی ساختمان منطقه‌ای رشدی گارنتهای رخساره استارولیت - سیلیمانیت، درزون پلیتی دالرادین در ایرلند به این نتیجه رسید که دگرگونی با درجه بالای مجدد اینگونه سنگها موجب سریعتر شدن پدیده انتشار و حذف ساختمان منطقه‌ای رشدی اولیه شده است. در سیستمهای باز و یا در سیستمهایی که شرایط حاکم بر محیط در طی تبلور تغییر کند، تغییر عناصر، دیگر به صورت منظم و خطی نخواهد بود.

ساختمان منطقه‌ای در اثر نشر در بلورهای همگن و یا ناهمگنی که از قبل وجود داشته‌اند، ایجاد شده و با رشد همراه نیست. پدیده انتشار در اثر انتقال مواد از محلی به محل دیگر به وجود آمده و عامل اصلی آن، گرادیان پتانسیل شیمیایی ترکیبی و یا گرمایی است. ناحیه‌بندی انتشاری با توزیع مجدد اتمها در ساختمان بلوری و تغییر در فراوانی نسبی اتمها همراه است. این نوع ناحیه‌بندی عمدتاً در درجات دگرگونی بالا مشاهده می‌شود. گاهی دمای زیاد موجب انتشار درون بلوری کامل (انتشار حجمی) و همگن شدن نیمرخ رشد ناحیه‌بندی پیشین شده است. ناحیه‌بندی انتشاری در گارنتهای سری پیرالسپیت که در مناطقی با درجه دگرگونی بالا مشاهده شده‌اند، عمدتاً منحصر به حاشیه بلور بوده و تقریباً در سایر قسمت‌ها ترکیب یکنواختی وجود دارد [۹ تا ۱۱]. در این نوع گارنتها تمرکز Mn در حاشیه بلور بیشتر از هسته آن است.

ایجاد ساختمان منطقه‌ای در اثر تراوش در شرایط حضور آب‌گونه‌ها حاوی عناصر قابل جایگزین با عناصر موجود در گارنت انجام می‌شود. این نوع از ساختمان منطقه‌ای وابسته به توزیع درزها و شکستگیها در بلور و سنگ است و از این رو معمولاً تعادل ثانوی کامل در تمام بلور به طور یکسان مشاهده نمی‌شود [۱۵].

گارنتهای مطالعه شده تغییرات ناگهانی و نوسانی میزان عناصر را نشان می‌دهند که تکرار تغییرات مشخص گویای آن است که این پدیده در اثر پدیده نشر تشکیل نشده ولی در طی رشد، امکان ایجاد اینگونه نوسانات ممکن است. از این رو تغییرات طی رشد ایجاد کننده ساختمان منطقه‌ای گارنتهای بررسی شده است. با این وجود در حوالی برخی از شکستگیها ترکیب گارنت متفاوت بوده و این تفاوت در تصویر BSE کانی دیده می‌شود (شکل ۷). لذا

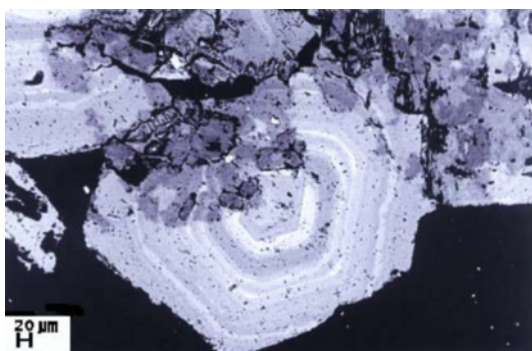
ساختمان منطقه‌ای رشدی ایجاد شده، در اثر نشت آبگونها در کانی به صورت موضعی از بین رفته است.

عوامل تشکیل ساختمان منطقه‌ای رشدی نوسانی

ناحیه‌بندی نوسانی کانیها در محیطهای زمین‌شناسی گوناگون از دماهای بسیار پائین، در حد دیاژنز [۲۹ و ۳۰]، تا رژیمهای حرارتی بالا حتی هنگام تبلور ماگما [۳۱ و ۳۲] مشاهده می‌شود. امروزه مطالعات زیادی بر روی گارنتهای واجد ساختمان منطقه‌ای نوسانی انجام شده است و محققان عقیده دارند که بررسی ناحیه‌بندی نوسانی در گارنتهای سری گراندیت می‌تواند راهگشای شناخت سیستم حاکم بر محیط در زمان تشکیل اسکارن باشد [۳۳ و ۳۴]. به عبارت دیگر هر زون بازگو کننده شرایط حاکم بر آبگونها هیدروترمال، در زمان تشکیل خود است [۳۵ تا ۴۱].

مطالعات انجام گرفته روی پاراژنزکانیها و داده‌های آبگونهای درگیر در گارنتهای زونه موجود در اسکارنها نشان داده است که دمای تشکیل مرکز و حاشیه بلور این گونه گارنتها مشابه یکدیگر است. بنابراین دما نمی‌تواند عامل ایجاد ناحیه‌بندی رشدی نوسانی در گارنتها باشد [۳۸]. درمورد ناحیه‌بندی رشدی نوسانی در اینگونه گارنتها دو دلیل اصلی می‌تواند وجود داشته باشد، که عبارتند از [۳۴]: (۱) عوامل خارجی، که عمدتاً تغییرات در ترکیب آبگونهای گرمایی است که گارنت از آنها رسوب می‌کند، (۲) نا آمیختگی درسیستم دوتایی گروسولار - آندرادیت.

یکی از عوامل ناحیه‌بندی نوسانی در گارنتها، تغییر ترکیب آبگونهای گرمایی و یا فرآیندهایی است که در آبگونها نزدیک به سطح گارنت رخ می‌دهد. ترکیب آبگونهای موجود در منافذ یا ترکهای موجود در سنگ به وسیله عوامل خارجی (نشت) و داخلی (تجزیه کانیهای موجود در سنگ) کنترل می‌شود. ظاهراً در زونهایی که عضو انتهایی گروسولار افزایش نشان می‌دهد، کنترل‌کننده‌های داخلی و در زونهایی که عضو انتهایی آندرادیت افزایش نشان می‌دهد، کنترل‌کننده‌های خارجی نقش بیشتری دارند.



شکل ۷ تصویر BSE از اثر تراوش آبگونها در داخل شکستگی‌های بلور گارنت و تغییر در ساختمان منطقه‌ای گارنت.

عنصر Al عضو عناصر ^1HFS بوده و در آبگونهای گرمابی به کندی انتقال می‌یابد، بنابراین به نظر می‌رسد که تجزیه کانیهای محلی نقش عمده‌ای در تأمین یون Al^{3+} مورد نیاز جهت رشد گارنت داشته باشند. هنگامی که نرخ شارش آبگون و نرخ رشد گارنت کند باشد، تجزیه کانیهای محلی موجب می‌شود که میزان یون Al^{3+} در آبگونهای گرمابی ثابت بماند. کاهش سریع در تمرکز Al با افزایش سریع عضو انتهای اندرادیت همراه است. در این مرحله، کنترل کننده‌های خارجی نقش مهمتری در تغییر ترکیب آبگونها دارند.

باردلی و همکاران [۴۱] عقیده دارند که دوره‌های متناوب شارش آبگون در سیستمهای گرمابی با جوشش همراه است. پدیده جوشش موجب اکسایش در آبگون و افزایش نسبت $a_{\text{Fe}^{3+}}/a_{\text{Al}^{3+}}$ شده که همین امر موجب تمرکز بالای عضو انتهای اندرادیت در محلول جامد شده است. گارنتهایی که در فاصله زمانی بین دوره‌های جوشش رشد می‌کنند، میزان گروسولار بالاتری در سری محلول جامد دارند. در این زمان، فوگاسیته اکسیژن به وسیله مجموعه کانیهای محلی پائین نگه داشته می‌شود و میزان Fe^{3+} در ترکیب آبگون به دلیل کاهش فوگاسیته اکسیژن، پائین می‌آید. در اینجا مجموعه کانیهای محلی به عنوان بافرهای فوگاسیته اکسیژن عمل می‌کنند و میزان $f\text{O}_2$ را در حد پایین، ثابت نگه می‌دارند.

تمرکز بالای اندرادیت در سری محلول جامد، با رشد سریع گارنت و شارش سریع آبگونهای گرمابی همراه است [۳۷ و ۳۸]. افزایش $f\text{O}_2$ ، X_{CO_2} و آبگونهای با شوری بالا شرایط را برای افزایش عضو انتهای اندرادیت در سری محلول جامد گراندیت مهیا می‌کند [۴۲].

کلچنکو و ولی [۳۳] با مطالعه ایزوتوپ پایدار اکسیژن و آنالیز عناصر اصلی در گارنتهای زونه سری گراندیت، دو منشأ را برای آبگونهای گرمابی مؤثر در تشکیل گارنتها در نظر گرفتند. به عقیده این محققین، زونهای دربردارنده مقادیر بالای Fe^{3+}/Al دارای $\delta^{18}\text{O}$ بالایی بوده و زونهای دربردارنده مقادیر پایین Fe^{3+}/Al دارای $\delta^{18}\text{O}$ پایینی هستند. مقدار بالای $\delta^{18}\text{O}$ نشان‌دهنده منشأ ماگمایی آبگونها بوده و بازگوکننده آن است که آبگونهای غنی از Fe از تبلور توده‌نشستی حاصل شده‌اند، و برعکس مقدار پایین $\delta^{18}\text{O}$ نشان‌دهنده تأثیر آبگونهای جوی در

منطقه بوده و ترکیب آن با آبگونها ماگمایی نقش مهمی در کاهش میزان Fe^{3+}/Al و در نتیجه کاهش عضو انتهایی آندرادیت، در سری محلول جامد اوگراندیت، ایفا کرده است. یکی دیگر از دلایل ناحیه‌بندی رشدی نوسانی در گارنت‌هایی که با تغییرات ناگهانی در ترکیب شیمیایی همراه هستند، نا آمیختگی در سیستم دوتایی گروسولار-آندرادیت است. فقدان ترکیب شیمیایی مشخصی از محلول جامد سری گراندیت، در دماها و فشارهای مختلف توسط عده‌ای از محققان گزارش شده است. برای مثال هاکنهولز و فر [۴۳] با آزمایش‌های تجربی دریافتند که نا آمیختگی در سیستم گراندیت در حدود $300^{\circ}C$ و فشار بیش از ۳ kbar با دمای بحرانی $450^{\circ}C$ تا $500^{\circ}C$ به وقوع می‌پیوندد. این نا آمیختگی در محدوده ترکیبی بین $0.08 < X_{Grs} < 0.5$ وجود دارد. انجی و ورسین [۴۴] وجود نا آمیختگی را در دمای $350^{\circ}C$ و در محدوده ترکیبی $0.09 < X_{Grs} < 0.65$ گزارش کرده‌اند. نمودار تغییرات Al و Fe (شکل ۶) نشان می‌دهد که میزان این دو عنصر در مرکز بلور به‌طور ناگهانی تغییر و جانشین یکدیگر می‌شوند. این می‌تواند نا آمیختگی در سیستم گراندیت را نشان دهد. اما این جانشینی در حاشیه‌های بلور کمتر می‌شود که می‌تواند به دلیل تغییر ترکیب آبگونها موجود در محیط هنگام رشد بلور باشد.

شواهد کانی‌شناسی در اسکارنهای شمال شرق جویان گوپای آن است که تغییر در ترکیب آبگونها گرمایی و شرایط حاکم بر آنها در زمانهای متفاوت وجود داشته است. در نمونه‌های حاوی گارنت‌های زونه، رگچه‌های اپیدوت و رگچه‌های کوارتز و کلسیت دربردارنده فرو اکتینولیت گارنت‌های زونه را قطع کرده‌اند. هر یک از این دو کانی در فوگاسیته اکسیژن خاص خود به وجود می‌آیند [۴۵]. لذا حضور این دو کانی در اسکارنهای شمال شرق جویان گوپای عدم پایداری شرایط fO_2 و در نتیجه شرایط آگون در منطقه است. تبدیل پیروکسن و تشکیل گارنت نسل دوم نیز دلیلی بر تغییر شرایط حاکم بر محیط است. لذا به نظر می‌رسد ساختمان منطقه‌ای گارنت‌ها به دلیل نا آمیختگی در سیستم گراندیت آغاز شده و سپس تحت تأثیر تغییر ترکیب آبگونها محیط ادامه یافته است.

ساختمان منطقه‌ای و گرادیان دمایی

ساختمان منطقه‌ای گارنت تنها به‌طور موضعی و در امتداد شکستگی‌ها در اثر نفوذ محلولهای ثانویه تغییر کرده است (شکل ۷) و در اکثر موارد، ساختمان منطقه‌ای در گارنت‌های مطالعه شده در حد میکرون حفظ شده است. این گوپای آن است که بلورهای گارنت تحت تأثیر فرایند نشر قرار نگرفته‌اند. بدین معنی که سرد شدن بلورهای گارنت پس از تشکیل بسیار سریع نبوده

و گرادیان دمایی بین حاشیه بلور و مرکز آن به وجود نیامده است. وجود شواهد بافتی و پاراژنز کانیه‌ها مانند تبدیل برخی از پیروکسین‌ها در تشکیل نسل دوم گارنت نیز نشان‌دهنده کندی بودن فرایند سردشدن توده و فرصت کافی برای تبدیل کانیه‌هاست. تغییرات ساختمان منطقه‌ای در حاشیه شکستگی‌ها گویای حضور و گردش محلول‌ها در سنگ و امکان واکنش‌های برگشتی در حضور آبگون است. از طرفی نفوذ توده آذرین و تشکیل اسکارنها آخرین پدیده مهم ماگماتیسم و متامورفیسم اتفاق افتاده در منطقه است، زیرا در صورت وجود دگرگونی‌های ناحیه‌ای و یا فازهای بعدی پلوتونیسم در منطقه، تغییرات گرادیان دمایی باعث به‌وجود آمدن پدیده نشر در گارنت‌ها می‌شد و امکان حفظ ساختمان منطقه‌ای آنها بدین ترتیب میسر نبود.

برداشت

در اسکارنهای شمال شرق جوینان، دو نسل گارنت همراه با کانیه‌های پیروکسن، کلسیت، کوارتز، اپیدوت، فرواکتینولیت، ایدوکراز و اسفن مشاهده‌اند. گارنت‌های نسل اول در مطالعه میکروسکوپی زونه هستند. گارنت‌های نسل دوم از نوع آندرادیت بوده و همسانگرد هستند.

تجزیه نقطه‌ای SEM که به‌منظور تعیین نوع ساختمان منطقه‌ای بر گارنت‌های نسل اول اسکارنهای شمال شرق جوینان انجام شده نشان داده که گارنت‌ها، دارای زون‌بندی نوسانی هستند و مرز بین زونها ناگهانی بوده که نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در ترکیب شیمیایی مواد تشکیل دهنده است. تغییرات ناگهانی و نوسانی در میزان عناصر تشکیل‌دهنده زونها، گویای آن است که این نوع ناحیه‌بندی هنگام رشد کانی به‌وجود آمده است.

ساختمان منطقه‌ای شدید با ناآمیختگی در سیستم دوتایی گروسولار- آندرادیت شروع شده و با تغییر در ترکیب آبگون‌های گرمابی در اثر جریان‌های همرفتی در منطقه، خروج مداوم آبگون‌ها از محیط و ورود آبگون‌های خارجی ادامه یافته است.

گارنت‌های نسل دوم در اثر افزایش fO_2 در محیط و یا کاهش دما از بلورهای پیروکسن به وجود آمده‌اند.

دوره‌های متناوب جریان آبگون در سیستم حاکم بر اسکارنها، می‌تواند با دوره‌های جوشش همراه باشد. پدیده جوشش سبب افزایش fO_2 شده و موجب افزایش آندرادیت در سری محلول جامد اوگراندیت می‌شود و در فاصله زمانی بین این دوره‌ها عضو انتهایی گروسولار به دلیل کاهش fO_2 ، افزایش می‌یابد.

ساختمان منطقه‌ای گارنت‌ها به طور موضعی در اثر نفوذ آبگون‌ها از بین رفته است. اما این تغییرات تنها محدود به اطراف شکستگی‌هاست.

پدیده نشر در گارنتها دیده نمی‌شود. لذا سردشدن اسکارنها سریع نبوده و گارنتها تحت تأثیر گرادیان گرمایی ثانویه قرار نگرفته‌اند.

مراجع

- [1] Atherton M. P., Edmunds W. M., "*A electron Microprobe Study of some Zoned garnets from metamorphic rocks*", Earth Planet. Sci. Lett. (1966) pp. 185-193.
- [2] Banno S., "*Notes on Rock Forming minerals, Zonal structure of pyralspit in Sanbagawa schists in the Bessi area, Shikoku*", J. Geol. Soc. Japan 71 (1965) pp. 185-188.
- [3] Chinner, G.A., "*Almandine in thermal aureoles*", J. Petrol. 3 (1962) pp. 316-340.
- [4] Debethune P., Goossens P., Berger P., "*Emploi des grenats zonaires comme indicoteure du degre de metamorphisme*", C. R. Acad. Sci. Paris 260 (1965) 6940-6949.
- [5] Evans B. W., Guidohi C. V., "*The sillimanite – Potash feldspar isograd in western Maine*", USA. Contrib. Mineral. Petrol. 12 (1966) pp. 25-62.
- [6] Harte B., Henley K. J., "*Occurrence of compositionally zoned almanditic garnets in regionally metamorphosed rocks*", Nature 210 (1966) 689.
- [7] Hollister L. S., "*Garnet Zoning; An interpretation based on the Rayleigh fractionation model*", Science 154 (1966) 1647-1651.
- [8] Yardley B. W. D., "*An empirical study of diffusion in garnet*", American Mineralogist 62 (1977) 793-800.
- [9] Blackburn W. H., "*Zoned and unzoned garnets from the Grenville Gneisses around Gananoque Ontario*", Canadian Mineral. 9 (1969) 691-698.
- [10] Grant J. A., Weiblen P. W., "*Retrograde zoning in garnet near the end Sillimanite isograd*", Am. J. Sci, (1971) pp. 270-296.
- [11] Massachusetts, "*Contrib. Mineral*", Petrol. 30 (1971) pp. 177-195.
- [12] Hwang S. L., Yui T. F., Chu H. T., Shen P., "*Submicron polyphase inclusions in garnet from the Tananao Metamorphic Complex, Taiwan, a key to unraveling other wise unrecognized metamorphic events*", J. of Metamorphic Geology 19 (2001) pp. 599-605.

- [13] Whitney D. L., Mechum T. A., Dilek Y., Kuehner S. M., "Modification of granet by fluid infiltration during regional metamorphism in garnt through sillimanite-zone rocks", Dutchess county, New York, American Mineralogist 81 (1996) 696-706.
- [14] Frost B. R., Tracy R. J., "P-T paths from zoned garnets , Some minimum criteria", American J. of Science 291 (1991) pp. 917-939.
- [15] Hwang S. L., Shen P., Yui T. F., Chu H. T., "On the mechanism of resorption zoning hn metamorphic garnet", J. metamorphic Geol. 21 (2003) pp. 761-769.
- [16] Spear F. S., Peacocok S. M., "Metamorphic pressure temperature-time paths. Short Course in Geology", 7. American Geophysical Union (1989) Washington, DC.
- [17] Spear F. S., Selverstone J., Hickmott D., Crowley P., Hodges K. V., "P-T paths from garnet zoning, a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes", Geology 12 (1984) pp. 87-90.
- [18] Berberian M., King G. C. P., "Towards a paleogeography and tectonic Evolution of Iran", Canadian J. of Earth Sciences V.18, No.2 (1981) pp. 210-265.
- [19] Jung D., Kursten M., "Post mesozoic Volcanism in Iran and its relation to the subduction of the Afro-Araban-Under the Eurasian Plate" (1975).
- [20] Karig D. E., "Origin and development of marginal basin in the western Pacific", J. Geophys. Res. 76 (1971) 2542-2561.
- [21] Moine Vaziri H., "Volcanisme tertiaire et quaternaire en Iran. Thesed Etat", Univer Paris-Sud, Orsay (1985).
- [22] Nowroozi A. A., "Seismotectonics of the Persian Plateau, Eastern Turkey, Causasus and Hindu-Kush region", Bull. of the Seismological society of America 61, No.2 (1971) 317-341.
- [23] Takin M., "Iranian geology ans Zeih Continental drift in middle East", Geol. Survy, Iran, noten 81 (1971).
- [۲۴] حسن‌زاده ج., "مطالعه زمین‌شناسی و پترولوژی سنگهای آذرین ناحیه قمصر کاشان، ایران مرکزی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۵۷).
- [۲۵] نوربخش پ., "مطالعه کانی‌شناسی، پتروگرافی و پترولوژی اسکارنه‌های شرق قهرود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد، واحد شمال (۱۳۷۹).
- [26] Atherton M. P., "The variaty in garnet biotite and chlorite composite in Medium grade pelitic rocks from the Dalradian, Scotland, with

- particular reference to Zonation in garnet*", Contrib. Mineral Petrol. 18 (1968) pp. 347-371.
- [27] Evans B. W., "Microprobe study of Zoning in eclogite garnets", Geol. Soc. Am. Spec. Paper 87 (1966) 54.
- [28] Hollister L. S., "Contact metamorphism in the kwoiek area of British columbia; An end-membler of the metamorphic process", Geol. Soc. Am. Bull. 80 (1969) 2464-2494.
- [29] Reeder R. J., Grams J. C., "Sector Zoning in Calcite cement Crystals, Implications for trace element distributions in carbonates", Geochimica et Cosmochimica Acta 51 (1987) pp. 187-194.
- [30] Reeder R. J., Prosky J. L., "Compositional sector zoning in dolomite", J. of Sedimentary Petrology 56 (1986) 137-247.
- [31] Bottinga Y., Kudo A., Weill D., "Some Observations of oscillatory Zoning and Crystallization of magmatic plagioclase", American Mineralogist 51 (1966) pp. 792- 806.
- [32] Sibley D. F., Vogel T. A., Walther B. M., Byerly G., "The Origin of Oscillatory Zoning in Plagioclase, Adiffusion and growth controlled model", American J. of Science 276 (1976) pp. 275-281.
- [33] 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. metamorphic Geol. 21 (2003) pp. 771-784.
- [34] Jamtveit B., "Oscillatory Zonation Patterns in hydrothermal grossular – andradite garnet, Nonlinear behavior in regions of immiscibility", Am. Mineralogist 76 (1991) 1319–1327.
- [35] Chamberlain C. P., Conrad M. E., "Oxygen isotope zoning in garnet", Science 254 (1991) 403-406.
- [36] Crowe D. E., Riciputi L. R., Bezenek S., Ignatiev A., "Oxygen isotope and trace element zoning in hydrothermal garnets, Windows into large-scale fluid flow behavior", Geology 29 (2001) pp. 479-482.
- [37] Jamtveit B., Hervig R. L., "Constraints on transport and Kinetics in Hydrothermal systems from Zoned Garnet Crystals", Science 263 (1994) pp. 505–508.

- [38] Jamtveit B., Wogelius R. A., Fraser D. G., "Zonation Patterns of skarn garnets, Records of hydrothermd system evolution", *Geology* 21 (1993) pp. 113-116.
- [39] Lee C. G., Atkinson W. W., "Geochemistry of zoned garnets from the San Pedro mine, Sante Fe Country", *New Mexico, New Mexico Geology* 7 (1985) pp. 69-74.
- [40] Nakano T., Takahara H., Nishida N., "Intracrystalline distribution of major elements in zoned garnet from skarn in Chichibu mine, Central Japan, Illustration by color coded maps", *Canadian Mineralogist* 27 (1989) pp. 499-507.
- [41] Yardley B. W. D., Rochelle C. A., Barnicoat A. C., Lloyd G. E., "Oscillatory Zoning in metamorphic minerals, An indicator of infiltration metasomatism", *Mineralogical Magazine* 55 (1991) pp. 357-365.
- [42] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "Rock-Forming Minerals", *Orthosilicates Garnet Groups 1A* (1989) pp. 467 – 657.
- [43] Huckenholz H. G., Fehr K. T., "Stability relationships of grossular + quartz + Wollastonite + anorthite II, The effect of grandite – hydrgrandite Solid Solution", *Neues Jahrbuch fur Mineralogie abhandlungen* 145. (1982). pp. 1–33.
- [44] Engi M., Wersin P., "Derivation and application of a solution model for Cacic garnet", *Schweizerische Mineralogische and petrographische Mitteilungen* 67 (1987) pp. 53- 73.
- [45] Spear F. S., "Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths", *Mineralogical Society of America* (1993).

