

تغییرات ریخت‌شناسی بلورهای گارنت در استارولیت شیست‌های منطقه‌ی علی‌آباد دماق، جنوب همدان، ایران

علی اکبر بهاری فر^{۱*}، کوان نانگ پنگ^۲، سون لین چونگ^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران

۲- بخش علوم زمین، دانشگاه ملی تایوان، صندوق پستی ۱۳-۳۱۸، تایپه ۱۰۶، تایوان

(دریافت مقاله: ۹۵/۴/۳۱، نسخه نهایی: ۹۵/۸/۲)

چکیده: استارولیت شیست‌های علی‌آباد دماق دارای گارنت‌های غنی از آلماندین با شکل‌های بلوری {۱۱۰} و {۲۱۱}، و شکل‌های حدواسط این دو شکل هستند. بررسی تغییرات منطقه‌بندی نشان می‌دهد که الگوی منطقه‌بندی ترکیبی شکل‌های مختلف با هم تفاوت معنا داری ندارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات شکل بلوری در گارنت‌های غنی از آلماندین متأثر از ترکیب ۶۰ میکرون حاشیه‌ی بلور بوده و با نسبت (Mn+Mg)/Ca رابطه دارد به نحوی که در گارنت‌های شکل‌دار {۱۱۰} این نسبت بالا و در حدود ۸ بوده و در گارنت‌های شکل‌دار {۲۱۱} این نسبت تا کمتر از ۲ کاهش می‌یابد. تغییر نوع واکنش‌ها طی دگرگونی پیشرونده از انتقالی به تبادلی و در نتیجه تغییر نرخ انتشار کاتیون‌های مختلف (مانند Mn, Mg, Ca) در مراحل انتهایی رشد بلور، با توجه به تفاوت نرخ رشد سطوح ۱۱۰ و ۲۱۱ می‌تواند منجر به تغییر شکل بلوری شود.

واژه‌های کلیدی: گارنت؛ شکل بلوری؛ ترکیب شیمیایی؛ ریخت‌شناسی؛ استارولیت شیست؛ علی‌آباد دماق؛ همدان.

مقدمه

بیش از ۴۰ شکل بلوری برای گارنت‌ها گزارش شده است که حدود نیمی از آنها تایید نشده یا مشابه شکل‌های دیگر هستند. از میان شکل‌های یاد شده، دو شکل بلوری {۱۱۰} و {۲۱۱} بیشترین شکل مورد اشاره را تشکیل می‌دهند [۱]. دلایل تغییر شکل‌های یاد شده سال‌ها مورد بحث زمین‌شناسان و کانی‌شناسان بوده است. [۲] در سال ۱۹۴۳، با بررسی گارنت‌های منطقه‌ای در آلاسکا و تغییرات شکل بلوری آنها، این نتیجه به دست آمد که گارنت‌های کوچکتر از ۲ تا ۳ میلیمتر شکل بلوری ایکوزی تتراهدرال (تراپزوه‌درون) {۲۱۱} و گارنت‌های درشت، شکل بلوری دودکاه‌درون {۱۱۰} دارند. [۳] با اشاره به این نکته که گارنت‌های با اندازه‌های مختلف می‌توانند شکل -

های بلوری یکسان داشته باشند، تغییرات شکل بلوری را به نسبت کاتیون‌های دوظرفیتی به کاتیون‌های سه ظرفیتی (M^{2+}/M^{3+}) بلور گارنت و اندازه‌ی شعاع یاخته‌ی واحد نسبت داد و بدین ترتیب نتیجه گرفت که گارنت‌های گروه اوگراندیت بیشتر شکل بلوری {۱۱۰} و گروه پیرالسپیت، معمولاً شکل بلوری {۲۱۱} دارند. نسبت کاتیونی ۱/۶ به عنوان فاکتور تشکیل شکل در نظر گرفته شد به طوری که گارنت‌های با نسبت کاتیونی کوچکتر از ۱/۶ شکل {۲۱۱} و گارنت‌های با نسبت بزرگتر، شکل {۱۱۰} دارند. [۱] با اشاره به اینکه بیشتر گارنت‌ها دارای ترکیب شیمیایی نسبتاً یکسان و در نتیجه نسبت کاتیونی مشابه دارند، و هر دو شکل بلوری در آنها دیده می‌شوند، نقش دما و فشار و نیز کانی‌های همراه را در تغییر

تغییرات شکل بلوری، مقدور نیست. برای کاهش تعداد متغیرها برای رسیدن به نتیجه مطلوب، در این پژوهش معیارهای زیر در نظر گرفته شدند:

۱- تمامی نمونه‌های بررسی شده از لیتولوژی خاص (منطقه‌ی استارولیت) و در منطقه‌ای محدود (حدود ۱۰ متر مربع) جمع-آوری شدند تا نقش دما و فشار و ترکیب سنگ مادر حذف شده یا به حداقل کاهش یابد و تنوع ترکیبی در گارنت‌ها به حداقل برسد.

۲- سعی شد تمامی نمونه‌های مورد بررسی دارای اندازه‌ی کم و بیش یکسان باشند تا نقش احتمالی اندازه‌ی بلور در تغییر شکل، حذف شود. حد اشاره شده برای تغییر شکل بلوری توسط [۲] ۲-۳ میلیمتر بوده و قطر گارنت‌های مورد بررسی در این پژوهش، کمتر از ۱/۵ میلیمتر است.

۳- نمونه‌های انتخاب شده برای بررسی از شکل‌های مختلف، به صورت کامل از هسته تا حاشیه بررسی شدند تا نقش احتمالی منطقه‌بندی ترکیبی قابل بررسی باشد.

روش بررسی

بررسی‌های اولیه برای شناسایی و رده‌بندی شکل بلوری با میکروسکوپ‌های دوچشمی بیناکولر در آزمایشگاه دانشگاه پیام نور مرکز اهر انجام شد و پس از گروه‌بندی گارنت‌ها، ۵ بلور که نمونه‌های شاخص هر گروه بشمار می‌رفت، انتخاب و در آزمایشگاه Academia Sinica در تایوان، با ریزپردازنده‌ی الکترونیکی JEOL W-EPMA JXA8900-R و با استفاده از گزینه‌ی Line Analysis به صورتی که فاصله‌ی هر نقطه بررسی شده با نقطه بعدی در تمامی نمونه‌ها ۲۰ میکرون بوده و از حاشیه‌ی به هسته و حاشیه مقابل، بررسی شد. ولتاژ 15 Kv، جریان ۲۵ nA و قطر باریکه برای کاهش تاثیر منطقه-بندی ترکیبی، حدود ۲ میکرون انتخاب شدند. در مجموع از ۵ بلور از گارنت انتخابی، حدود ۲۵۰ نقطه بررسی شدند که مبنای مباحث بعدی قرار گرفتند. با توجه به حجم داده‌ها و محدودیت صفحات، از ارائه جدول کلیه داده‌ها خودداری شده ولی نتایج بررسی هسته و حاشیه شکل‌های مختلف در جدول ۱ به عنوان نتایج شاخص ارائه شدند. محاسبه‌ی آهن سه ظرفیتی بر پایه‌ی روش پیشنهادی [۱۳] و محاسبه اعضای انتهایی گارنت بر پایه‌ی روش پیشنهادی [۱۵] انجام شد. علائم اختصاری به کار رفته در متن مقاله و جدول‌ها و شکل‌ها، بر مبنای [۱۴] بوده‌اند.

شکل بلوری گارنت، محتمل دانستند. [۴] علاوه بر نقش دما و فشار، چرخش سیالات را نیز عامل احتمالی می‌داند. [۵] نشان داد که در گارنت‌های ایتريوم، هنگامی که سرعت رشد آهسته باشد، سطوح شکل {۱۱۰} گسترش می‌یابند و در صورت افزایش نرخ سرد شدن، سطوح شکل {۲۱۱} غالب می‌شوند. به عقیده‌ی [۶] علاوه بر دو شکل {۱۱۰} و {۲۱۱} یکی دیگر از شکل‌های بلوری رایج در گارنت، ترکیب دو شکل یاد شده است. [۷] نقش منطقه‌بندی ترکیبی بخشی و [۸] نیز نقش انتشار را در تغییر شکل بلور موثر می‌دانند.

در منطقه همدان بلورهای گارنت در انواع مختلف سنگ-های دگرگون و بعضی از سنگ‌های آذرین دیده می‌شوند. ۰. شکل بلوری گارنت در منطقه‌ی همدان نخستین بار توسط ۰. مورد بررسی قرار گرفت که براساس ترکیب شیمیایی کل گارنت، نتیجه گرفتند که گارنت‌های غنی از منگنز شکل دودکاهدرون و گارنت‌های غنی از آهن شکل تراپزوهیدرون دارند. بررسی‌های یاد شده توسط ۰ دنبال شد، و نشان دادند که ترکیب شیمیایی، به ویژه مقدار کلسیم در سنگ مادر، در کنار عواملی مانند دما، فشار، نرخ انتشار نقش موثری در تغییرات شکل بلوری گارنت دارد. [۱۲] با در نظر گرفتن این بررسی‌ها از گارنت‌های دارای شکل‌های بلوری مختلف منطقه تا آن زمان، نتیجه گرفت که در گارنت‌های غنی از آلماندن، در صورت پایین بودن نسبت $X_{Grs}/(X_{Sps}+X_{Prp})$ شکل بلوری دوزنقه‌ای و بالا بودن این نسبت، شکل بلوری دودکاهدرون تشکیل می‌شود و چنانکه این نسبت متوسط باشد، شکل‌های بلوری حدواسط بین دو شکل اصلی تشکیل می‌شود. وی همچنین نتیجه گرفت که شار گرمایی سریع در رشد گارنت، منجر به شکل‌گیری بلور دوزنقه وجهی کند، منجر به تشکیل دو بلور دودکاهدرون می‌شود.

بررسی‌های انجام شده در منطقه‌ی همدان که در بالا اشاره شد، معمولاً بلورهای گارنت از رخساره‌های مختلف آذرین و دگرگونی و با اندازه‌های مختلف را با هم مقایسه کرده‌اند. ضمناً منطقه‌بندی ترکیبی دقیق گارنت‌ها معمولاً مورد نظر قرار نگرفته است. بررسی بررسی‌های انجام شده در جهان و ایران نشان داد که تقریباً اندازه‌ی بلور، تغییرات نسبت کاتیونی، دما و فشار، سیالات، نرخ گرم‌شدگی به عنوان مهمترین عوامل تغییر شکل بلوری گارنت گزارش شده‌اند. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای یاد شده، عملاً نتیجه‌گیری قطعی در مورد علت

جدول ۱ نتایج منتخب بررسی مرکز و حاشیه و مقادیر کاتیون‌ها و اعضای انتهایی شکل‌های بلوری گارنت در منطقه همدان.

Form	۱		۲		۳		۴		۵	
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core
SiO ₂	۳۵٫۶۴	۳۶٫۹۹	۳۸٫۳۹	۳۶٫۷	۳۵٫۹۵	۳۷٫۱۸	۳۸٫۰۶	۳۷٫۷۸	۳۷٫۵۲	۳۷٫۴۴
Al ₂ O ₃	۲۱٫۴۱	۲۱٫۸۵	۲۲٫۲۱	۲۱٫۶۳	۲۱٫۹۳	۲۱٫۷۶	۲۲٫۲۱	۲۱٫۳۱	۲۲٫۸۱	۲۲٫۰۳
Cr ₂ O ₃	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱	۰	۰	۰
FeO	۳۶٫۱۳	۳۳٫۵	۳۶٫۶۶	۲۹٫۱۸	۳۵٫۹۵	۲۸٫۶۳	۳۷٫۳۹	۳۲٫۰۱	۳۷٫۳	۳۲٫۴۵
MnO	۲٫۵۳	۵٫۵	۱٫۶۶	۹٫۸۷	۱٫۶۳	۹٫۷	۰٫۴۵	۶٫۰۱	۰٫۱۹	۴٫۶۸
MgO	۲٫۳۵	۲٫۲۶	۱٫۹۸	۱٫۶	۲٫۱۶	۱٫۵۴	۲٫۱۸	۱٫۶۲	۱٫۸۳	۱٫۵۹
CaO	۰٫۵۸	۱٫۰۸	۱٫۰۴	۱٫۱۱	۲٫۱۱	۲٫۴	۱٫۵۹	۲٫۲۹	۲٫۱۷	۱٫۹۱
Total	۹۸٫۶۳	۱۰۱٫۱۷	۱۰۱٫۹۳	۱۰۰٫۰۹	۹۹٫۷۳	۱۰۱٫۲۱	۱۰۱٫۸۷	۱۰۱٫۰۱	۱۰۱٫۸۲	۱۰۱٫۰۹
Formula unit (based on 12 Oxygens)										
Si	۲٫۹۳	۲٫۹۴	۳	۲٫۹۵	۲٫۹	۲٫۹۵	۲٫۹۸	۳	۲٫۹۴	۲٫۹۷
Al	۲٫۰۷	۲٫۰۵	۲٫۰۵	۲٫۰۵	۲٫۰۸	۲٫۰۴	۲٫۰۵	۱٫۹۹	۲٫۱۱	۲٫۰۶
Cr	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ³⁺	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷
Fe ²⁺	۲٫۴۱	۲٫۲۳	۲٫۴	۱٫۹۶	۲٫۴۲	۱٫۹	۲٫۴۵	۲٫۱۲	۲٫۴۵	۲٫۲۲
Mn	۰٫۱۸	۰٫۳۷	۰٫۱۱	۰٫۶۷	۰٫۱۱	۰٫۶۵	۰٫۰۳	۰٫۴	۰٫۰۱	۰٫۳۱
Mg	۰٫۲۹	۰٫۲۷	۰٫۲۳	۰٫۱۹	۰٫۲۶	۰٫۱۸	۰٫۲۵	۰٫۱۹	۰٫۲۱	۰٫۱۹
Ca	۰٫۰۵	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۱	۰٫۱۸	۰٫۲	۰٫۱۳	۰٫۲	۰٫۱۸	۰٫۱۶
Sum	۸	۸٫۰۱	۷٫۹۴	۷٫۹۹	۸٫۰۳	۸	۷٫۹۶	۷٫۹۷	۷٫۹۷	۷٫۹۷
% Alm	۸۱	۷۴	۸۳	۶۶	۸۰	۶۳	۸۳	۷۱	۸۴	۷۵
% Grs	۲	۳	۳	۳	۶	۷	۵	۷	۶	۵
% Prp	۱۰	۹	۸	۶	۹	۶	۹	۶	۷	۶
% Sps	۶	۱۲	۴	۲۲	۴	۲۲	۱	۱۴	۰	۱۱
% Adr	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

زمین‌شناسی عمومی منطقه

فلدسپار هورنفلس. مجموع سنگ‌های دگرگونی فوق طی مزوزوئیک (ژوراسیک) تشکیل شده‌اند.

استارولیت شیست‌ها که موضوع بحث این مقاله است، در شمال علی‌آباد دماق رخنمون دارند و شامل کانی‌های استارولیت، گارنت، بیوتیت، کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی و مقادیر کمتری مسکویت، پلاژیوکلاز، کانی‌های تیره و گرافیت به عنوان کانی‌های فرعی و جزئی و کلریت به عنوان مهمترین کانی ثانویه هستند. دمای تشکیل این سنگ‌ها در حدود ۵۵۸ درجه‌ی سانتیگراد و در فشار ۵/۵ کیلو بار برآورد شده‌اند.

انواع فرم بلوری گارنت در منطقه

گرچه تغییرات شکل بلوری در گارنت‌های منطقه کاملاً تدریجی بوده و مرز روشنی ندارند، ولی بر اساس بررسی‌های انجام شده و در تکمیل رده‌بندی [۱۲۰] می‌توان آنها را به ۵ گروه به شرح زیر تقسیم کرد (شکل ۲):

- ۱- شکل بلوری {۱۱۰} بدون سطوح به شکل {۲۱۱}
- ۲- شکل بلوری {۱۱۰} با سطوح بلوری محدود {۲۱۱}

منطقه‌ی علی‌آباد دماق، بخشی از منطقه‌ی ساختاری سندج – سیرجان (شکل ۱ الف) است که در جنوب شرقی همدان و در راستای جاده اصلی همدان – تویسرکان قرار دارد (شکل ۱ ب). منطقه‌ی همدان متشکل از انواع سنگ‌های آذرین و دگرگون به سن مزوزوئیک است (شکل ۱ پ) [۹]. توده‌ی الوند به سن ژوراسیک، مهمترین پدیده‌ی آذرین منطقه است که در شمال غربی گستره‌ی مورد بررسی بخش‌هایی از آن رخنمون دارند. سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی همدان را می‌توان به سه گروه سنگ‌های دگرگونی گرماب فعال، سنگ‌های دگرگونی مجاورتی و میگماتیت‌ها، تقسیم کرد [۹]. سنگ‌های دگرگونی گرماب فعال عبارتند از: اسلیت، فیلیت، گارنت شیست، آندالوزیت گارنت شیست، فیبرولیت – استارولیت – آندالوزیت شیست، استارولیت شیست و سیلیمانیت شیست. سنگ‌های دگرگون مجاورتی نیز شامل شیست لکه‌دار، هورنفلس شیست، کردیریت هورنفلس، آندالوزیت – کردیریت – هورنفلس، گارنت – آندالوزیت – فیبرولیت هورنفلس، سیلیمانیت هورنفلس، سیلیمانیت – پتاسیم

شکل‌ها پیروپ، منطقه‌بندی محدودی دارند به نحوی که از هسته به حاشیه‌ی گارنت، درصد آن افزایش می‌یابد ولی در حدود ۴۰ تا ۸۰ میکرون حاشیه (شکل ۳، با توجه به فاصله نقاط بررسی شده که ۲۰ میکرون است)، در بیشتر پیکربندی‌ها، کاهش جزئی پیروپ مشاهده می‌شود. به طور کلی درصد پیروپ در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۱۰ درصد مولی بوده و بین ۶ تا ۱۰ درصد مولی تغییر می‌کند.

تغییرات اسپسارتین: بیشترین دامنه‌ی تغییرات در این سازنده‌ها مشاهده می‌شود به نحوی که منطقه‌بندی روشنی در بیشتر نمونه‌ها و به خصوص شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. در هسته‌ی همه نمونه‌ها، درصد مولی اسپسارتین بالا بوده و به سمت حاشیه، درصد آن‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین درصد اسپسارتین در هسته‌ی بلور شماره‌ی ۲ و ۳ در حدود ۲۲ درصد مولی و کمترین مقدار آن در حاشیه فرم بلوری شماره ۵، در حدود صفر درصد است. اگر چه مقدار مطلق اسپسارتین در شکل‌های بلوری مختلف متفاوت است، ولی روند تغییرات یکسان بوده و با توجه به الگوی منطقه‌بندی، با رشد یک مرحله‌ای در حین دگرگونی پیشرونده، همخوانی دارد [۱۴].

۳- شکل بلوری مرکب که سطوح بلوری شکل‌های {۱۱۰} و {۲۱۱} گسترش تقریباً یکسان دارند

۴- شکل بلوری دارای سطوح {۲۱۱} بصورت گسترده و سطوح محدودی از شکل {۱۱۰}

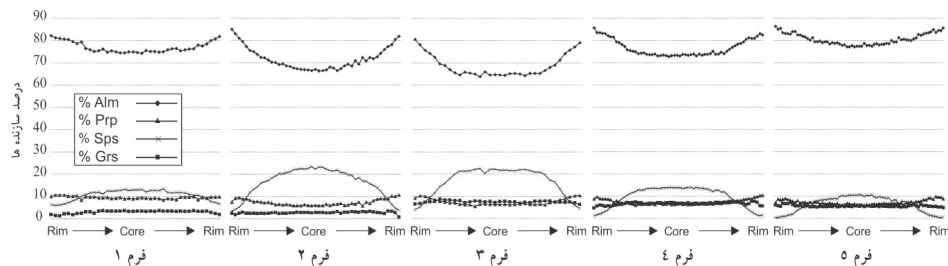
۵- شکل بلوری کامل {۲۱۱} بدون سطوح شکل {۱۱۰}

بررسی ترکیب شیمیایی و منطقه‌بندی ترکیبی

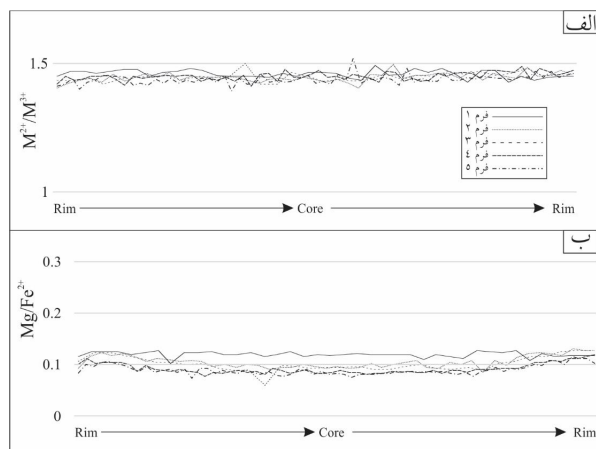
منطقه‌بندی بلورهای به شکل‌های مختلف در منطقه‌ی علی‌آباد دماق در شکل ۳ و نتیجه‌ی بررسی ترکیب شیمیایی هسته و حاشیه به شکل‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده‌اند:

تغییرات آلماندن: آلماندن فراوانترین سازنده‌ی گارنت‌های بررسی شده است، به نحوی که تمام گارنت‌ها غنی از آلماندن هستند. به طور کلی درصد آلماندن از هسته به حاشیه در تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. کمترین مقدار آلماندن در هسته شکل بلوری شماره‌ی ۳ مشاهده می‌شود که در حدود ۶۳ درصد مولی است و بیشترین درصد نیز در حاشیه‌ی فرم بلوری شماره‌ی ۵ به ۸۴ درصد مولی می‌رسد.

تغییرات پیروپ: غیر از شکل بلوری شماره‌ی ۱، در بقیه‌ی



شکل ۳ الگوی منطقه‌بندی گارنت‌های منطقه به شکل‌های مختلف (فاصله نقاط بررسی از یکدیگر در تمام گارنت‌ها ۲۰ میکرون است).



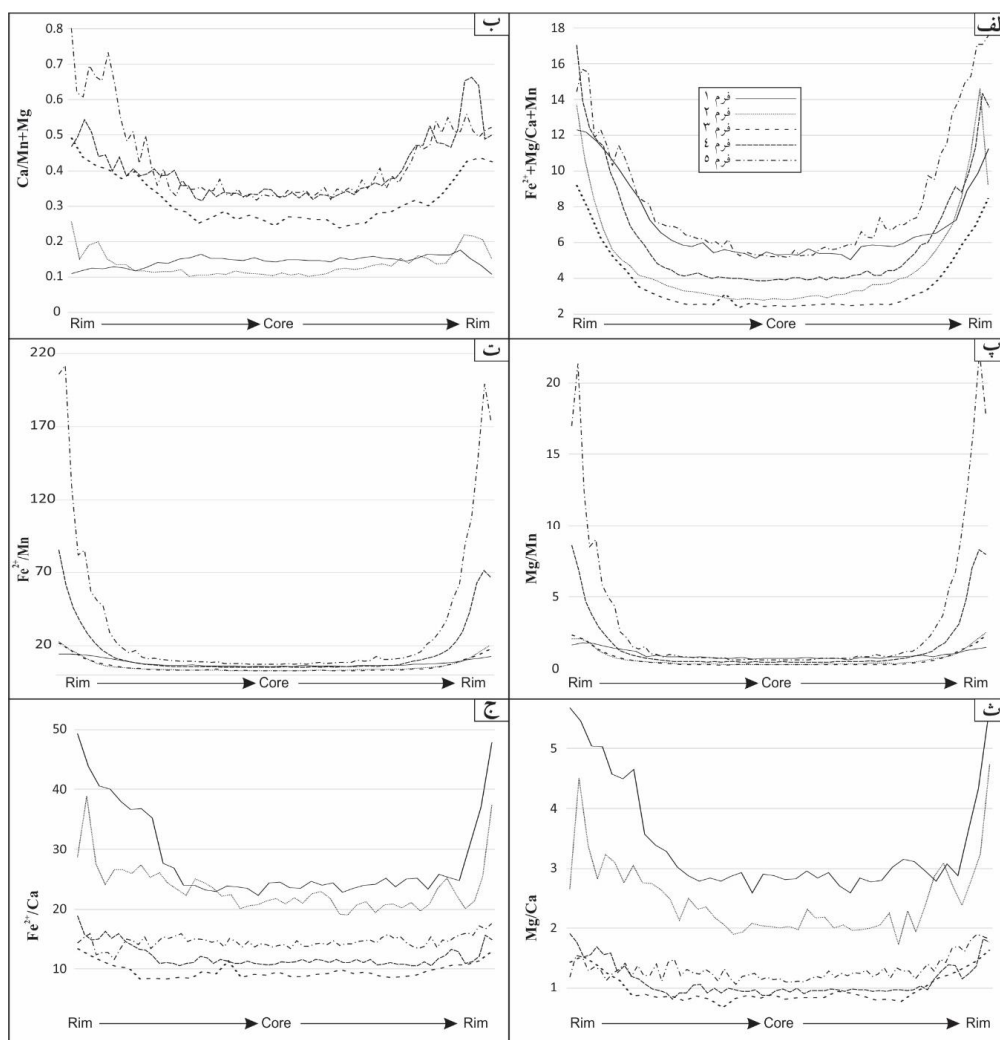
شکل ۴ الف- نسبت کاتیون‌های دوظرفیتی به کاتیون‌های سه ظرفیتی (M^{2+}/M^{3+})، ب- نسبت منیزیم به آهن دوظرفیتی (Mg^{2+}/Fe^{2+}) در فرم‌های مختلف.

منطقه‌بندی یا درصد مطلق سازنده‌ها و شکل بلوری وجود ندارد. هیچیک از سازنده‌های اصلی، تغییرات منظمی از فرم بلوری یک تا ۵ نشان نمی‌دهند. به علاوه، الگوی منطقه‌بندی همه سازنده‌ها تقریباً مشابه بوده و نشان دهنده‌ی رشد یک مرحله‌ای در طی یک دگرگونی پیشرونده است.

بررسی نسبت سازنده‌ها

چنانکه در مقدمه اشاره شد، نسبت سازنده‌های مختلف به یکدیگر، می‌تواند عامل تغییر شکل بلوری در نظر گرفته شود. لذا در این بخش به بررسی تغییرات نسبت‌های مختلف در شکل‌های بلوری مختلف می‌پردازیم

تغییرات گروسولار: سازنده‌ی گروسولار تغییرات منطقه‌بندی شدیدی نشان نمی‌دهد و در بیشتر نمونه‌ها، روند نسبتاً خطی از هسته به حاشیه دارد. تنها تغییرات قابل مشاهده، در ۱۰۰ میکرون پایانی بعضی از شکل‌ها مشاهده می‌شود که درصد گروسولار نوسان محدودی دارد. به طور کلی از شکل بلوری ۱ تا ۳ افزایش نسبی درصد گروسولار، قابل مشاهده است ولی در شکل‌های بلوری ۴ و ۵ این روند ادامه نمی‌یابد. در مجموع، درصد مولی نابهنجار در نمونه‌ها از ۲ تا ۷ درصد مولی متغیر است. درصد مولی آندراپیت در تمام نمونه‌ها حدود ۲ درصد بوده و تغییر خاصی نشان نمی‌دهد. با توجه به بررسی منطقه-بندی گارنت‌ها مشخص شد که رابطه‌ی خاصی بین الگوی



شکل ۵ تغییرات نسبت‌های کاتیونی از هسته تا حاشیه بلورها در فرم‌های مختلف گارنت در منطقه همدان؛ الف- $(Fe^{2+}+Mg)/(Mn+Ca)$ ، ب- $Ca/(Mn+Mg)$ ، پ- Mg/Mn ، ت- Fe^{2+}/Mn ، ج- Fe^{2+}/Ca ، ث- Mg/Ca .

نسبت کاتیون‌های دو ظرفیتی به سه ظرفیتی بلور گارنت (M^{2+}/M^{3+})

یکی از اولین دلایلی که برای تغییرات شکل بلوری گارنت‌ها عنوان شد، تغییرات نسبت کاتیون‌های دو و سه ظرفیتی است [۱۵]. نسبت کاتیونی $۱/۶$ توسط [۱۵] و نسبت $۱/۷۴$ توسط [۴] به عنوان فاکتور تشکیل شکل در نظر گرفته شده‌اند؛ به نحوی که گارنت‌های با نسبت یونی کوچکتر از مقدارهای فوق شکل {۲۱۱} و گارنت‌های با نسبت بزرگتر، شکل {۱۱۰} دارند. در شکل ۴ الف تغییرات این نسبت برای شکل‌های بلوری مختلف از هسته تا حاشیه‌ی گارنت نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود این نسبت در تمام گارنت‌های منطقه از هسته تا حاشیه تغییر معنی داری نداشته و نسبتاً ثابت است. به علاوه، مقدار مطلق آن کمتر از $۱/۵$ است (حدود $۱/۴$) که با توجه به معیارهای ارائه شده‌ی [۱۵،۴] باید تمامی نمونه‌ها به شکل {۲۱۱} باشند که عملاً اینگونه نیست. لذا در مورد گارنت‌های غنی از آلوماندن، نسبت کاتیون‌های دو ظرفیتی به سه ظرفیتی را نمی‌توان فاکتور موثر در تغییر شکل بلوری در نظر گرفت.

نسبت منیزیم به آهن دو ظرفیتی (Mg/Fe^{2+})

نسبت Mg/Fe^{2+} از آن جهت دارای اهمیت است که با افزایش دما در طی دگرگونی پیشرونده، مقدار آن افزایش می‌یابد و تغییرات آن، می‌تواند نقش بالقوه‌ی دما را در تغییرات شکل نشان دهد [۱۷]. در شکل ۴ ب تغییرات مقدار این نسبت در شکل‌های بلوری مختلف نشان داده شده است. این نسبت در تمام پیکربندی‌های بلوری منطقه، در حدود $۰/۱$ بوده و دامنه‌ی نوسانی محدودی دارند. اگرچه مقدار این نسبت به طور کلی در فرم بلوری ۱ بیشتر از فرم‌های بلوری دیگر است و در فرم بلوری ۵ نیز نسبت به بقیه فرم‌ها کمتر است، اما اولاً دامنه‌ی تغییرات بسیار محدود بوده و ثانیاً به صورت منظم از شکل ۱ تا شکل ۵ کاهش این نسبت مشاهده نمی‌شود. در کل می‌توان گفت که احتمال دارد این نسبت رابطه‌ی محدودی با تغییرات فرم بلوری داشته باشد.

نسبت $(Fe^{2+}+Mg)/(Mn+Ca)$

تغییرات نسبت $(Fe^{2+}+Mg)/(Mn+Ca)$ در هسته‌ی گارنت به عنوان یکی از دلایل تغییر شکل بلوری مطرح شده است [۴]. چنانکه در شکل ۵ الف مشاهده می‌شود، در هسته یا حاشیه‌ی گارنت‌های بررسی شده، رابطه‌ی منطقی بین تغییرات شکل

بلوری و نسبت فوق وجود ندارد به نحوی که شکل‌های ۱ و ۵ در هسته، دارای مقادیر تقریباً یکسانی از نسبت فوق هستند. در حاشیه‌ی بلورها نیز گرچه نسبت فوق در شکل‌های مختلف متغیر است، ولی فاقد ارتباط معنی‌دار با شکل بلوری دارد.

نسبت $Ca/(Mn+Mg)$

به باور [۱۲] در صورت پایین بودن نسبت $X_{Grs}/(X_{Sps}+X_{Prp})$ شکل بلوری تراپزوه‌درون و در صورت بالا بودن این نسبت، شکل بلوری دودکاه‌درون تشکیل می‌شود و چنانچه این نسبت میانگین باشد، شکل‌های بلوری حدواسط بین دو فرم اصلی تشکیل شود. در شکل ۵ ب تغییرات $Ca/(Mn+Mg)$ نشان داده شده است. بنابراین شکل در هسته‌ی گارنت‌ها رابطه‌ی معنی داری بین این نسبت و دنباله‌ی شکل‌های بلوری وجود ندارد ولی به سمت حاشیه‌ی بلورها رابطه تقریباً منطقی است به نحوی که مقدار این نسبت در شکل ۱ کمترین و در شکل ۵ بیشترین مقدار است که این نتیجه گرچه با نتیجه گیری [۱۲] در مورد نقش این نسبت در تغییرات شکل بلوری همسوست، ولی بر عکس برداشت نامبرده است. البته شکل بلوری شماره ۴ ناهماهنگی‌هایی در یک سمت از حاشیه‌ها (حاشیه سمت چپ) نشان می‌دهد. تغییرات مشاهده شده در حاشیه‌های مختلف بلورها، می‌تواند ناشی از کانی‌های همزیست در سنگ باشد [۱۵].

نسبت‌های Fe^{2+}/Mn و Mg/Mn

با توجه به اینکه این عناصر تغییرات شدیدتری در منطقه‌بندی نشان می‌دهند برای بررسی رابطه‌ی احتمالی تغییرات آنها با شکل بلور، نسبت آنها در نظر گرفته شده است. بنابر شکل‌های ۵ پ و ۵ ت، الگوی هر دو نسبت تقریباً یکسانند. این نسبت‌ها در هسته‌ی بلور تغییرات چندانی نشان نمی‌دهند ولی در حاشیه‌ی بلور، به سرعت تغییر کرده و نسبت هر دوی آنها در شکل‌های بلوری ۵ و ۴ تفاوت چندانی با شکل‌های بلوری دیگر دارد. در حدود ۶۰ میکرونی انتهایی بلورها (با توجه به اینکه فاصله‌ی نقاط مورد بررسی از یکدیگر حدود ۲۰ میکرون است و تغییرات در سه تا چهار نقطه حاشیه‌ای بلورهای رخ می‌دهد)، تفاوت محسوسی در شکل‌های بلوری مختلف ظاهر می‌شود که تنها در حاشیه‌ی سمت چپ بلورها (شکل ۵ پ) نسبت Mg/Mn با تغییرات شکل بلوری هماهنگ است. با توجه به هماهنگی هر دو نسبت در بلورهای مختلف، می‌توان نتیجه

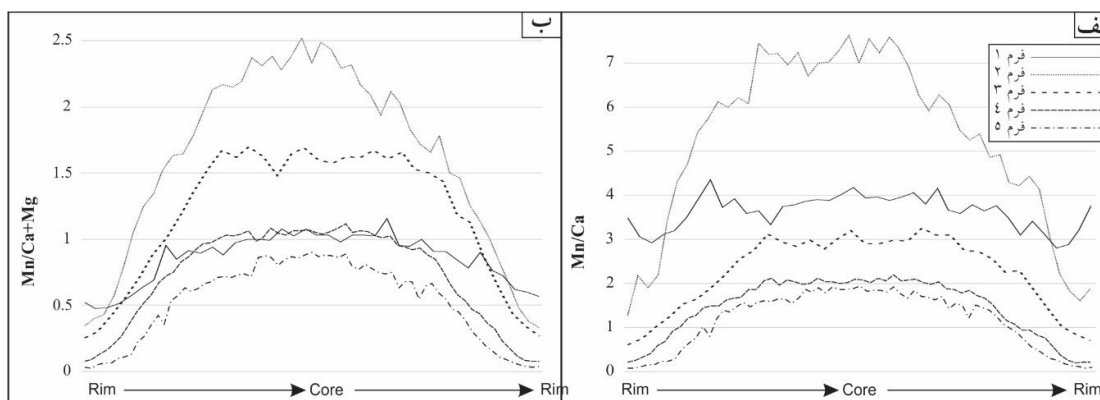
گرفت که Mn احتمالاً یکی از متغیرها در تغییرات شکل بلوری است. نسبت‌های Mg/Ca و Fe^{2+}/Ca کلسیم یکی از عناصری است که تغییرات آن در گارنت با فشار و تغییرات آهن و منیزیم، تابعی از دماست [۱۶]. برای بررسی نقش احتمالی تغییرات همزمان دما و فشار، نسبت آهن و منیزیم به کلسیم در شکل‌های ۵ ث، ج ارائه شده است. بنابر شکل‌ها، اولاً روند تغییرات هر دو عنصر نسبت به کلسیم نسبتاً یکسان بوده و ثانیاً به غیر از ناهم‌آهنگی موجود در شکل بلوری ۳، می‌توان گفت که مقدار این نسبت‌ها از شکل ۱ به شکل ۵ افزایش می‌یابد، گرچه تفاوت مقدار این نسبت‌ها در هسته و حاشیه بلورها، روند نسبتاً ثابتی دارد، ولی میزان تغییرات در حاشیه‌های بلور نسبت به هسته بلورها بیشتر است و تفاوت آشکارتر می‌شود.

نسبت‌های Mn/Ca و $Mn/(Ca+Mg)$

با توجه به نمودارهای مختلف بررسی شده در (شکل ۵)، مشخص می‌شود که در نمودارهایی که کلسیم و منگنز بررسی شدند، ارتباط کم و بیش معنی داری بین تغییرات نسبت‌ها و شکل بلوری وجود داشت که ارتباط کاملی نبودند. لذا در شکل ۶ الف نسبت Mn/Ca نشان داده شد. اگر چه هسته‌ی بلور شکل ۲ دارای بالاترین مقدار این نسبت است، ولی در ۶۰ میکرون پایانی، به طور مشخص، شکل بلوری ۱ دارای بالاترین نسبت و شکل بلوری ۵ دارای کمترین نسبت است، و روند تغییرات معنی‌دار است. بنابراین می‌توان نسبت یاد شده را یکی از عوامل موثر در کنترل شکل بلور در نظر گرفت. با توجه به رابطه‌ی منیزیم در نمودارهای قبلی، در شکل ۶ ب نسبت

تغییرات نسبت‌ها در حاشیه‌های بلورها

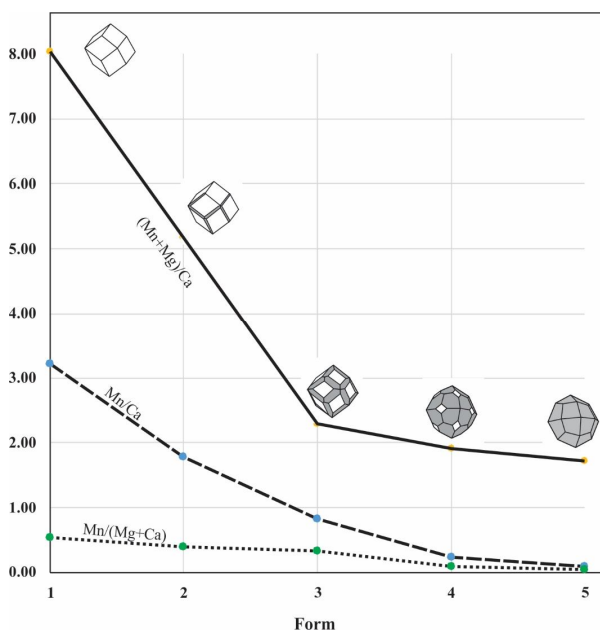
چنانکه از نمودارهای قبلی (شکل‌های ۵ و ۶) برداشت شد، در بسیاری از نمودارها، تغییرات در هسته‌ی بلورها ناچیز بوده و در ۳ تا ۴ نقطه‌ی بررسی شده‌ی حاشیه بلور (۶۰ تا ۸۰ میکرون)، نسبت‌ها اختلاف مشخصی با هم دارند. از طرف دیگر، چنانکه در نمودارهای شکل ۶ دیده می‌شود، در ۶۰ میکرون حاشیه، تغییرات شکل بلوری ارتباط معنی داری با شکل‌های بررسی شده دارد. لذا به نظر می‌رسد عامل اصلی تغییر فرم بلوری، تغییرات سازنده‌ها در ۶۰ میکرون حاشیه بلوری است. در جدول ۲ مقادیر مختلف عنصرها و نسبت‌ها با در نظر گرفتن میانگین ۶۰ میکرون حاشیه‌های هر بلور ارائه شده‌اند. بنابر شکل ۵ و جدول ۲، سه متغیر Mn/Ca ، $Mn/(Mg+Ca)$ و $(Mn+Mg)/Ca$ با تغییرات شکل بلوری گارنت ارتباط نشان می‌دهند و با کاهش آنها، شکل بلور از ۱ به ۵ تغییر می‌یابد (شکل ۷). در این میان، بیشترین تغییر در نسبت $(Mn+Mg)/Ca$ دیده می‌شود که مقدار آن در شکل ۱ برابر با ۸ و در شکل ۵ برابر با ۱/۷۱ است. ضریب همبستگی تغییرات نسبت $(Mn+Mg)/Ca$ در شکل‌های مختلف، حدود ۰/۹۵ است که ضریب همبستگی بالایی محسوب می‌شود.



شکل ۶ تغییرات نسبت‌های Mn/Ca و $Mn/(Ca+Mg)$ از هسته تا حاشیه بلورها در فرم‌های مختلف گارنت در منطقه همدان.

جدول ۲ میانگین میزان کاتیون‌ها، درصد سازنده‌ها و نسبت‌های مختلف، در ۶۰ میکرون حاشیه بلور در فرم‌های مختلف (با در نظر گرفتن اینکه فاصله نقاط بررسی شده ۲۰ میکرون می‌باشد، سه نقطه بررسی حاشیه از هر سمت بلور به عنوان میانگین ۶۰ میکرون در نظر گرفته شده است و چون در هر بلور دو سمت حاشیه بررسی شده‌اند، هر عدد در جدول میانگین ۶ اندازه‌گیری است).

Form	۱	۲	۳	۴	۵
Fe ²⁺	۲,۴۶	۲,۴۶	۲,۳۵	۲,۵۲	۲,۵۶
Mn	۰,۱۹	۰,۱۵	۰,۱۶	۰,۰۴	۰,۰۱
Mg	۰,۲۹	۰,۲۹	۰,۲۹	۰,۲۸	۰,۲۶
Ca	۰,۰۶	۰,۰۹	۰,۲۰	۰,۱۷	۰,۱۶
Alm	۸۱,۴۹	۸۱,۹۷	۷۸,۰۳	۸۳,۵۶	۸۵,۳۴
Grs	۱,۷۷	۲,۷۳	۶,۶۷	۵,۵۷	۵,۴۱
Prp	۹,۹۵	۹,۹۹	۹,۷۳	۹,۴۵	۸,۷۵
Sps	۶,۵۱	۵,۱۲	۵,۵۶	۱,۳۵	۰,۵۰
Mg Fe ²⁺	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۱	۰,۱۰
MgMn	۱,۵۳	۱,۹۵	۱,۷۵	۷,۰۰	۱۷,۳۵
Fe ²⁺ /Mn	۱۲,۸	۱۶,۴	۱۴,۳	۶۳,۳	۱۷۲
Fe ²⁺ /Ca	۴۰,۷	۲۸,۷	۱۱,۹	۱۵,۱	۱۶,۱
MgCa	۴,۹۷	۳,۵۵	۱,۴۶	۱,۶۹	۱,۶۴
Mn/Ca	۳,۲۲	۱,۷۸	۰,۸۲	۰,۲۴	۰,۰۹
Mn/(Mg+Ca)	۰,۵۴	۰,۳۹	۰,۳۴	۰,۰۹	۰,۰۴
(Mn+Mg)/Ca	۸,۰۴	۵,۱۸	۲,۲۹	۱,۹۱	۱,۷۱



شکل ۷ تغییرات نسبت‌های Mn/Ca ، $Mn/(Mg+Ca)$ و $(Mn+Mg)/Ca$ در فرم‌های مختلف با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۲ (میانگین ۶۰ میکرون حاشیه دو سمت بلور).

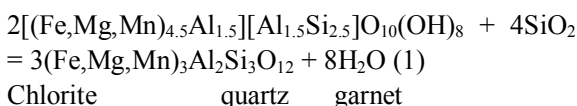
بحث

براساس بررسی‌های انجام شده، عوامل متعددی در تغییر شکل بلور گارنت، موثر دانسته شده‌اند. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که مهمترین عامل در گارنت‌های غنی از آلماندن، تغییرات نسبت $Mn+Mg/Ca$ در گارنت است. در

مقایسه با بررسی قبلی، چنانکه [۱۵] نشان می‌دهد و بر خلاف تصور [۲]، تغییر اندازه‌ی بلور، عامل موثری در تغییر شکل نیست. در این مقاله نیز با توجه به استفاده از بلورهای ۱ تا ۲ میلیمتری و شکل بلوری مختلف، تاثیر اندازه‌ی بلور در تغییر شکل، مشاهده نمی‌شود، زیر بر اساس معیار ارائه شده توسط

تغییر شکل بلوری است که البته به تنهایی کافی نبوده و با تغییرات هر چند جزئی منیزیم و کلسیم، وابستگی شدیدی دارد.

بررسی‌های انجام شده نشان داده است که منگنز در مراحل اولیه رشد گارنت، تمایل شدیدی به تمرکز در گارنت دارد به همین دلیل، هسته‌ی گارنت‌های دگرگون معمولاً منگنز بیشتری نسبت به حاشیه دارد که منطقه‌بندی گارنت‌های دگرگونی را توجیه می‌کند [۱۴]. اولین واکنش‌های تولید گارنت آلماندن غنی از منگنز، واکنش انتقالی کلریت و کوارتز است [۱۷]



با کاهش منگنز در کلریت، میزان آن در گارنت نیز کاهش یافته و رشد گارنت با واکنش‌های تبدیلی ادامه می‌یابد [۱۷]:

$\text{Fe biotite} + \text{Mg garnet} = \text{Fe garnet} + \text{Mg biotite}$,
 $\text{Mn biotite} + \text{Mg garnet} = \text{Mn garnet} + \text{Mg biotite}$,
 واکنش‌های تبدیلی، معمولاً گرادیان شیمیایی بالایی تولید نمی‌کنند ولی واکنش‌های انتقالی، گرادیان شیمیایی بالایی تولید کرده و انتشار در آنها فعالتر است [۱۷]. کاهش مقدار منگنز و افزایش آهن و منیزیم در نتیجه‌ی تغییر واکنش‌های دگرگونی و ترکیب کانی‌های واکنش دهنده، منجر به تغییر ترکیب گارنت در حاشیه‌ی بلور می‌شود. از طرف دیگر، گارنت‌های مختلف در زمان‌های مختلف شروع به رشد در سنگ می‌کنند [۱۸]. لذا ترکیب هسته گارنت‌ها تفاوت‌هایی با هم دارند، ولی در حاشیه، کم و بیش یکسان خواهند بود. اگرچه نرخ واکنش‌ها معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود [۱۹]، ولی نرخ رشد گارنت، به افت و خیز واکنش‌ها طی دگرگونی ارتباط دارد [۲۰] در آغاز تشکیل گارنت، شکل بلوری مشخص نیست ولی احتمالاً هم سطوح ۱۱۰ و هم سطوح ۲۱۱ در اولین گارنت تشکیل شده، وجود دارند، ولی نرخ رشد سطوح ۱۱۰ سریعتر از سطوح ۲۱۱ است [۱۸]. مجموع عوامل یاد شده باعث می‌شود که گارنت‌ها در آغاز رشد، که مواد لازم بیشتر بوده و انتشار شدیدتر است، سریعتر رشد کرده و سطوح ۱۱۰ گسترش یابند. با پیشرفت دگرگونی و تبدیل واکنش‌های انتقالی به تبدیلی،

[۲] کلیه بلورهای دارای اندازه‌ی کوچکتر از ۲ تا ۳ میلی‌متر باید شکل بلوری {۲۱۱} داشته باشند که در منطقه‌ی علی آباد دمق اینگونه نیست. نسبت کاتیون‌های دو ظرفیتی به سه ظرفیتی که توسط [۱۵،۴] اشاره شد، با در نظر گرفتن گارنت‌های مختلف از گروه‌های پیرالسپیت و اوگراندیت محاسبه شده است و نیز ترکیب کلی گارنت بدون توجه به الگوی منطقه‌بندی ترکیبی مورد نظر قرار گرفته است. لذا به نظر می‌رسد که اگرچه ممکن است در توجیه تغییرات شکل بلوری گارنت‌های گروه پیرالسپیت و گروه اوگراندیت، نسبت اشاره شده موثر باشد، ولی در گارنت‌هایی که ترکیب سازنده‌ی اصلی آنها کم و بیش یکسان بوده و تغییرات عناصر جزئی است ولی فاکتور موثری بشمار نمی‌رود. عواملی مانند تغییرات دما و فشار نیز که توسط [۱] مطرح شده اند، با توجه به برداشت نمونه‌ها از محدوده‌ای کوچک، عملاً نمی‌تواند فاکتور موثری بشمار آید، و نیز نسبت‌هایی مانند $X_{\text{Gr}}/(X_{\text{Sp}}+X_{\text{Prp}})$ که توسط [۱۲] اشاره شده است، بیشتر بر پایه‌ی ترکیب کل بلور به دست آمده‌اند. با توجه به منطقه‌بندی ترکیبی روشن در گارنت‌ها (شکل ۲) و روند تغییرات متفاوت در هسته و حاشیه‌ی بلورها (شکل‌های ۵ و ۶)، نمی‌توان ترکیب کل بلور را به کار برد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد گارنت‌های منطقه‌ی علی آباد دمق، تمام گارنت‌های منطقه دارای منطقه‌بندی ترکیبی هستند که اگر چه این منطقه‌بندی دارای شدت و ضعف است، ولی در همه‌ی گارنت‌ها وجود دارد. از طرف دیگر، بررسی نسبت‌های مختلف نشان می‌دهد که در هسته‌ی گارنت‌های دارای شکل‌های بلوری مختلف، تغییرات روشن یا معنی‌دار نیست و در ۸۰ تا ۶۰ میکرون حاشیه، تفاوت نسبت‌های بررسی شده روشن شده و در مواردی نیز معنی‌دار می‌شود. لذا به نظر می‌رسد شکل بلوری گارنت بر خلاف تصور [۴]، متأثر از ترکیب هسته‌ی گارنت نبوده و ناشی از تغییرات ترکیبی در حدود ۶۰ تا ۸۰ میکرون حاشیه بلورها است. بررسی الگوی منطقه‌بندی ترکیبی نشان می‌دهد که منگنز دارای تغییرات شدید مخصوصاً در حاشیه است. تغییرات منیزیم کمتر بوده و کلسیم نیز تغییرات کمی دارد. وابستگی شکل بلور به نسبت $\text{Mn}+\text{Mg}/\text{Ca}$ حاکی از نقش موثر کاهش منگنز در

(مسئول ریزپردازشگر الکترونی) از آکادمی سینیکای تایوان برای هماهنگی و کمک در بررسی نمونه‌ها به‌وسیله‌ی ریزپردازشگر الکترونی سپاس‌گزارند. همچنین نویسنده مسئول خود را مدیون حمایت، و همکاری‌های دانشگاه ملی و آکادمی سینیکای تایوان در مدت اقامت در تایپه می‌داند و نیز به‌خاطر تامین هزینه‌های مالی بررسی‌ها و اقامت، کمال تشکر را دارد.

مراجع

- [1] Kostov I., Kostov R.I., "Crystal Habits of Minerals", Bulgarian Academic Monographs 1 (1999) 415p.
- [2] Pabst A., "Large and small garnets from Fort Wrangell, Alaska", American Mineralogist 28 (1943) 233-245.
- [3] Kostov I., "Notes on the morphology of the garnet crystals", Ann. University Sofia 46 (1950) 329-338.
- [4] Tzankova N., "Habit evolution of garnets from metamorphic rocks in the Sakar region (SE Bulgaria)", Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences 60 (2007) 401-406.
- [5] Nielsen J.W., Dearborn E.F., "The growth of single crystals of magnetic garnets", Journal of Physics and Chemistry of Solids 5 (1958) 202-207.
- [6] Elwell D., Scheel H. J., "Crystal growth from high-temperature solutions", Academic Press (1975) 634p.
- [7] Stowell H., Zuluaga C., Boyle A., Bulman G., "Garnet sector and oscillatory zoning linked with changes in crystal morphology during rapid growth, North Cascades, Washington", American Mineralogist 96 (2011) 1354-1362.
- [8] Oulbin Yu. L., Glazov A. I., "Morphological Evidence for Diffusion Controlled Growth of Garnet from Metapelites", Geology of Ore Deposits 55 (2013) 686-691.

[۹] بهاری فر ع.ا.، "پترولوژی سنگ‌های دگرگونی منطقه

همدان"، رساله دکترا، دانشگاه خوارزمی (۱۳۸۳) ۲۱۸ ص.

[۱۰] بهاری فر ع.ا.، سپاهی ع.ا.، "بررسی عامل کنترل کننده

هابیت بلوری گارنت در شیست‌های زمان آباد، منطقه همدان"،

گزارش داخلی شرکت اپال (۱۳۷۶) ۵۵ ص.

[۱۱] حسین میرزایی ز.، سپاهی ع.ا.، مؤذن م.، حسین میرزایی

ز.، "بررسی عوامل کنترل کننده‌ی ریخت‌شناسی بلورهای گارنت

نرخ رشد گارنت کاهش یافته و سطوح دارای نرخ رشد کم یعنی سطوح ۲۱۱ گسترش می‌یابند. با توجه به الگوی منطقه‌بندی بررسی شده، تغییر واکنش‌های انتقالی به تبادلی در بلورهای بررسی شده، در حدود ۶۰ تا ۸۰ میکرون پایانی رشد گارنت رخ داده است که تغییر ترکیب و نسبت‌های کاتیونی، نشان دهنده‌ی آن است.

برداشت

گارنت‌های منطقه‌ی علی‌آباد دماق دارای شکل‌های بلوری مختلف از دودکاهدرون کامل تا تراپزوهدرون و شکل‌های میانگین این دو شکل هستند. بررسی ترکیب شیمیایی گارنت‌ها نشان می‌دهد که گارنت‌های منطقه‌ی غنی از آلماندن و با منطقه‌بندی ترکیبی عادی هستند که در طی دگرگونی پیشرونده شکل گرفته‌اند. با توجه به بررسی نقش کاتیون‌ها و نسبت‌های مختلف، به نظر می‌رسد که نسبت $Mn+Mg/Ca$ عامل اصلی کنترل کننده شکل بلوری در گارنت‌های غنی از آلماندن است. این نسبت در حاشیه‌ی بلور (۶۰ میکرون تا سطح بلور) نقش خود را به روشنی نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از تغییر واکنش‌های تشکیل گارنت از انتقالی به تبادلی است. نوع و واکنش‌های دگرگونی که نرخ انتشار را کنترل می‌کنند، عامل موثر در تغییر ترکیب و در نتیجه، تغییر شکل بلوری هستند که منجر به کاهش نرخ رشد گارنت شده و در نتیجه با گسترش سطوح بلوری ۲۱۱، گارنت‌ها از شکل {۱۱۰} به شکل {۲۱۱} تغییر می‌یابند. به نظر می‌رسد که تغییر شکل بلور حتی با تغییر کم در نسبت‌های کاتیونی نیز رخ می‌دهد و مقایسه‌ی گارنت‌های دارای اختلاف ترکیبی شدید برای بررسی عامل کنترل کننده‌ی شکل بلوری، نتایج صحیحی نخواهد داد. به عبارت دیگر، تغییرات شکل بلوری در هر گروه از ترکیبات گارنت رخ می‌دهد و علت آن، باید در همان گروه و تغییرات حتی جزئی عناصر بررسی شود.

قدردانی

از داوران محترم مجله که با ارائه نقطه نظرهای خود منجر به بهبود کیفیت مقاله گردیدند، کمال تشکر را دارد. نویسندگان از مساعدت‌های دکتر Iizuka (مسئول آزمایشگاه) و خانم Hseih

- [17] Spear F.S., "The duration of near-peak metamorphism from diffusion modelling of garnet zoning", *Journal of Metamorphic Geology* 32 (2014) 903–914.
- [18] Kretz R., "The morphology and growth of garnet, $(Fe_{0.74}Mg_{0.13}Mn_{0.09}Ca_{0.04})_3Al_2Si_3O_{12}$ in Archean schist near Yellowknife, Northwest Territories, Canada", *Canadian Mineralogist* 48 (2010) 537–548.
- [19] Kretz R., "A garnet population in Yellowknife schist, Canada", *Journal of Metamorphic Geology* 11 (1993) 101–120.
- [20] Jamtveit B., Andersen T.B., "Morphological instabilities during rapid growth of metamorphic garnets", *Physics and Chemistry of Minerals* 19 (1992) 176–184.
- در سنگ‌های دگرگون و آذرین منطقه‌ی همدان" مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران ۴ (۱۳۸۹) ۵۱۹–۵۳۰.
- [12] Sepahi A.A., "A detailed study of morphology and chemistry of garnet crystals with suggestion of new subdivisions: data from pelitic schists, hornfelses and aplites of Hamedan region, Iran", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction* 31 (2007) 281–289.
- [13] Droop G.T.R., "A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", *Mineralogical Magazine*, 51(1987) 431–435.
- [14] Kertz R., "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogist*, 68(1983) 277–279.
- [15] Kostov I., "Mineralogy", Oliver and Boyd, Edinburgh, U.K. (1968) 587p.
- [16] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "Rock-Forming Minerals, Volume 1A: Orthosilicates", Longman (1982) 919p.