مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و پنجم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۶، از صفحهٔ ۵۸۱ تا ۵۹۴

انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

بررسی شرایط فیزیکی و شکل‌گیری‌های تبلور ماگما با استفاده از توزیع اندازه بلور در گرانیتوئیدهای باتولیت بیارجمند، شمال ایران مرکزی

کاظم کاظمی[۱*]، علی کنعانیان[۱]، فاطمه سرجوقیان[۲]

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۶/۲۲، نسخه نهایی: ۹۵/۱۰/۱۱)

چکیده: باتولیت بیارجمند با سن پرکامبرین واقع در شمال سمنان، در شمال ایران مرکزی از نظر سنگ‌شناسی شامل گرانیت، گرانودیوریت، کوارتزمونزودیوریت و گابرودیوریت است. این سنگ‌ها بافت دانه‌ای و در برخی موارد بافت‌های گرانوفیری، پرتیتی و پوئی‌کلیتیک دارند. بررسی‌های توزیع اندازه بلور (CSD) می‌تواند فرآیندهای ماگمایی را آشکار سازد. به منظور تعیین سهم حجمی، مدت زمان رشد، سرعت هسته‌بندی بلورهای فلدسپار و سرعت تبلور ماگما، بلورهای فلدسپار ۸ نمونه از سنگ‌های گرانیت، گرانودیوریت و کوارتز مونزودیوریتی به کمک نرم افزارهای JMicroVision و CSD Corrections آنالیز کمی شدند و سپس نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌های مختلف با هم مقایسه شدند. سهم حجمی محاسبه شده نشان می‌دهد که درصد این کانی از ۱۰٫۹۵(در کوارتزمونزودیوریت) تا ۳۹٫۲ (در گرانیت‌ها) متغیر است. با توجه به سرعت رشد (10^{-10} mms^{-1}) و شیب نمودارهای CSD_S (۳٫۹۳- تا ۶٫۸۸-)، نمونه‌ها در گستره‌ی زمانی متفاوتی رشد کرده‌اند و مدت زمان رشد در گرانودیوریت و گرانیت‌ها بیشتر از کوارتزمونزودیوریت-هاست به طوری که زمان رشد بلور در سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی ۵۴٫۲۹ تا ۸۱٫۹۳ سال و در سنگ‌های کوارتزمونزودیوریتی ۴۶٫۰۸ سال برآورد شده است. علاوه بر آن سرعت هسته‌بندی در کوارتز مونزودیوریت‌ها بیشترین مقدار و در گرانودیوریت و گرانیت‌ها کمترین مقدار است و موجب شده است تا بلورهای موجود در گرانودیوریت و گرانیت‌ها درشت‌تر از بلورهای کوارتزمونزودیوریت‌ها شوند و با مشاهدات سنگ‌نگاری هماهنگی دارد و نشانگر اهمیت شرایط مختلف فیزیکی حاکم بر انجماد ماگماست. در بعضی از نمودارهای توزیع پراکندگی شکستگی و خمیدگی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عملکرد آلودگی و اختلاط ماگمایی و فرآیند جدایش باشد.

واژه‌های کلیدی: *بیارجمند؛ گرانیتوئید CSD؛ سهم حجمی؛ سرعت هسته‌بندی.*

مقدمه

توده‌ی بیارجمند با روند شمال شرقی- جنوب غربی، در منتهی الیه شمال غرب نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ خارتوران و در شمال شرق نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ رزوه، در فاصله ۵ کیلومتری روستای کی‌کی، بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳ دقیقه شمالی، در استان سمنان واقع شده است و بر اساس تقسیم‌بندی نبوی [۱] جزئی از منطقه‌ی ایران مرکزی به شمار می‌رود. با استفاده از تعیین سن به روش پردازش یونی روی بلورهای زیرکن سن پرکامبرین برای این توده نفوذی به دست آمده است [۲].

بررسی بافت سنگ‌های آذرین و ویژگی‌های اجزای سازنده-ی آن‌ها (از جمله بلورها، شیشه‌ها و حفره‌ها) از دیرباز به عنوان متداول‌ترین روش برای ارزیابی فرایندهای فیزیکی و سیستم-های ماگمایی به کار رفته است، چرا که بافت سنگ‌های آذرین، تاریخچه‌ی فیزیکی تبلور را در خود ثبت می‌کند [۳].

بافت‌ها نتیجه‌ی متبلور شدن سنگ‌ها هستند و ضروری است که برای تعیین شرایط تبلور سنگ‌های آذرین از مدل‌های

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۲۴۹۳، نمابر: ۰۲۱۶۶۴۹۱۶۲۳، پست الکترونیکی: Kazem.kazemii@ut.ac.ir

کمی و بافتی کمک بگیریم [۴، ۵]. به منظور بررسی چگونگی سه بعدی اجزای سازنده‌ی بلورها و قطعات سنگی در زمین-شناسی روش‌های مختلفی به‌وسیله‌ی پژوهشگران مختلف در سال‌های اخیر به کار گرفته شده است. روش استخراج داده‌ها با توجه به عواملی مانند: ماهیت فیزیکی سنگ، نوع پراکندگی و اندازه‌ی کانی‌های مورد نظر، امکانات در دسترس و ... متغییر است [۶]. بررسی سه بعدی بلورها در سنگ‌ها می‌تواند به صورت بررسی مستقیم آن‌ها از طریق جدا کردن بلورها از زمینه‌ی سنگ و اندازه‌گیری ابعاد انجام شود. روش دیگر استفاده از روش‌های پرتونگاری و میکروپرتونگاری پرتو ایکس است. نمونه‌ای از بررسی‌های سه بعدی ساختار بلورها با این روش، بررسی ذرات الماس، گارنت، الیوین و شناسایی ساختار سه بعدی قطعات مختلف درون کندریت‌ها است [۷- ۹].

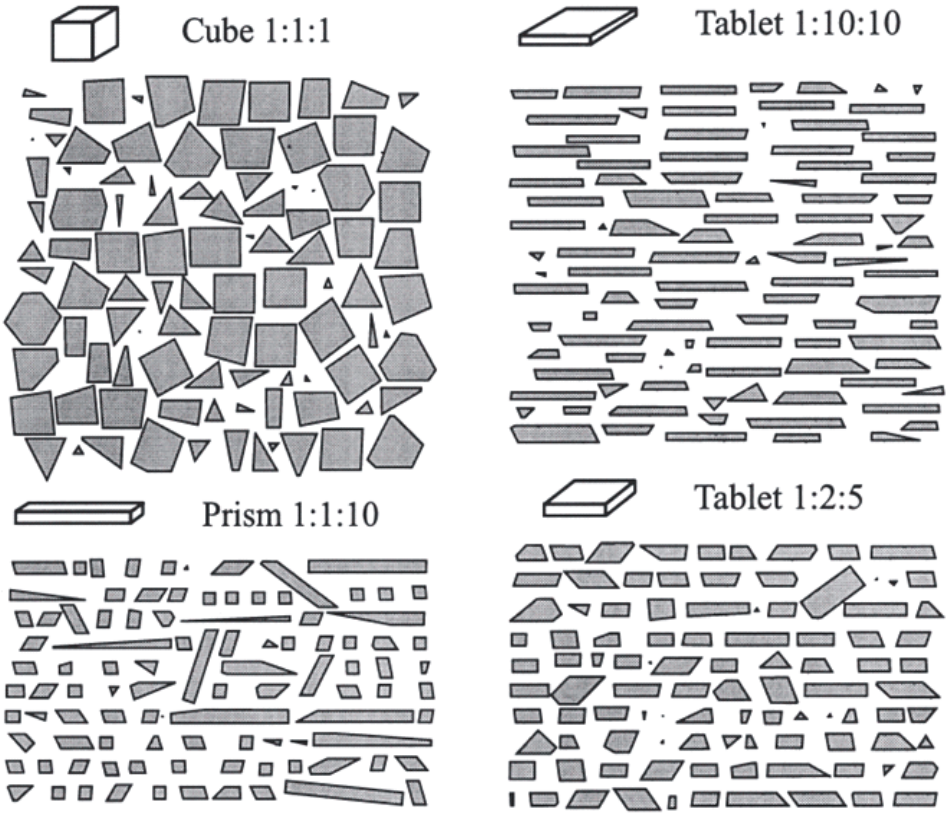
توزیع اندازه بلور در سه بعد (CSDs)، می‌تواند اطلاعات بسیاری را درباره مسائل سنگ‌شناسی [۱۰-۱۲] از قبیل شرایط تاریخچه گرمایی ماگما، سرعت و نرخ رشد و زمان استراحت یا زمان رشد ماگما در اختیار ما قرار دهد [۱۳، ۱۴]. در واقع CSD بازتاب کننده ویژگی‌های ذاتی یک سنگ همچون چگالی و یا ترکیب سنگ است [۱۵]. این روش دریچه‌ای حیاتی به فرآیندهای ماگمایی می‌گشاید، زیرا پراکندگی اندازه بلور بازتابی از تاریخ تبلور آن است [۱۶]. در نتیجه می‌توان از این روش به عنوان مکمل بررسی‌های شیمیایی در بررسی تشکیل و تحلیل شکل‌گیری سنگ‌های آذرین استفاده کرد [۱۷، ۱۸]. در طی ۴۰ سال گذشته بررسی‌های زیادی پیرامون اندازه‌های بلوری در سنگ‌های آذرین انجام گرفته است که یکی از مدعیان آن‌ها جکسون [۱۹] است. راندلف و لارسون نیز در سال ۱۹۷۱ با استفاده از توزیع اندازه دانه‌ها به بررسی گدازه‌ها پرداخته‌اند [۱۱]. محاسبات این پژوهندگان به صورت نظری ارائه شده بود که بعدها توسط مارش به صورت یک روش کاملاً علمی درآمد و نرم افزار CSD برای این روش طراحی شده است.

در این پژوهش، سرعت تبلور بلورهای فلدسپار پتاسیم، ۸ نمونه از توده‌ی گرانیتوئیدی بیارجمند به منظور تعیین شرایط تشکیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با استفاده از روش توزیع اندازه بلور (CSD)، زمان رشد، سرعت هسته‌بندی و سهم حجمی بلورهای فلدسپار محاسبه شدند. همچنین می‌توان با استفاده از اشکال نمودارهای CSD به تحولات ماگمایی و فرآیندهای تکامل ماگمایی از قبیل تبلور، اختلاط و آلودگی پی برد.

روش بررسی

روش‌های تحلیلی بافتی معمولاً از روش‌های متداول در مرجع [۱۶] استنتاج شده‌اند. در این پژوهش، برای بررسی کمّی توزیع اندازه‌ی بلور، نخست از نمونه‌های سنگی مقاطع نازک تهیه شد و سپس از آن‌ها عکسبرداری دیجیتالی انجام گرفت. در مرحله بعد بلورهای فلدسپار پتاسیم با استفاده از نرم افزار JMicroVision به صورت مجزا مشخص شده و مورد بررسی قرار گرفتند و نتیجه آن به صورت داده‌های دو بعدی (طول، عرض، مساحت و ...) استخراج شد. این داده‌های خام اندازه‌های بلوری تنها از یک سطح اندازه‌گیری شده‌اند و آشکار است که برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، داده‌ها یا اندازه‌گیری‌های سه بعدی مورد نیاز است. بنابراین لازم است داده‌های مقاطع دو بعدی به سه بعدی CSD_S تبدیل شوند که این کار با استفاده از نرم افزار CSD Corrections 1.3 صورت گرفته است [۲۰، ۲۱]. برای محاسبه CSD_S از اندازه‌گیری‌های 2D و با استفاده از CSD Corrections 1.3، نیاز به شناخت میانگین شکل بلور است، که به صورت نسبت تصویر بلور S:I:L (کوتاه- متوسط- بلند) بیان می‌شود. برآورد شکل سه بعدی با استفاده از داده‌های دو بعدی نخستین بار توسط هگینس [۲۲] پیشنهاد شد، به طوری که توزیع نسبت محور بلند به محور کوتاه در مقطع نازک سنگ، رابطه‌ی نزدیکی با شکل سه بعدی بلورها دارد. شکل ۱ رابطه‌ی بین فراوانی نسبت عرض به طول بلور در دو بعد و شکل سه بعدی آن را نشان می‌دهد. پارامتر دیگر در بخش shape input نرم‌افزار CSD، عامل گردشدگی است که ترکیبی از شکل بیضی و متوازی السطوح است و مقدار آن از صفر (برای متوازی السطوح) تا یک (برای بیضی سه محوره) متغیر است. با توجه به شکل‌دار بودن بیشتر بلورها، عامل گرد-شدگی برای همه‌ی نمونه‌ها ۰/۶ در نظر گرفته شد و فاکتور شکل نیز متناسب با شکل بلورها تعیین شد. (شکل‌های مکعبی ۱:۱:۱، منشوری ۱:۱:۱۰، تیغه‌ای ۱:۱۰:۱۰، صفحه‌ای ۱:۲:۵) [۵] تعیین شد. همچنین بافت همه نمونه‌ها توده‌ای در نظر گرفته شده است. در نهایت با توجه به پارامترها و اطلاعات وارد

شده، داده‌های CSD بر نمودار لگاریتمی (چگالی انباشتی) Ln برحسب اندازه (بلندترین بعد = L) ترسیم شد (شکل۶). با اقتباس از روش مارش، [۵]، واحد اندازه‌گیری برای بلورها mm و مقیاس چگالی انباشتی mm^{-4} در نظرگرفته شدند. با استفاده از داده‌ها و نمودارهای به دست آمده از نرم افزار CSD، سرعت و مدت رشد بلورها، سرعت هسته‌بندي و شاخص نیکویی برازش (که نشان می‌دهد که داده‌ها تا چه اندازه برای تشکیل یک CSD_S به صورت خط مستقیم اهمیت دارند) براي هر یک از نمونه‌ها محاسبه شد (جدول ۱).



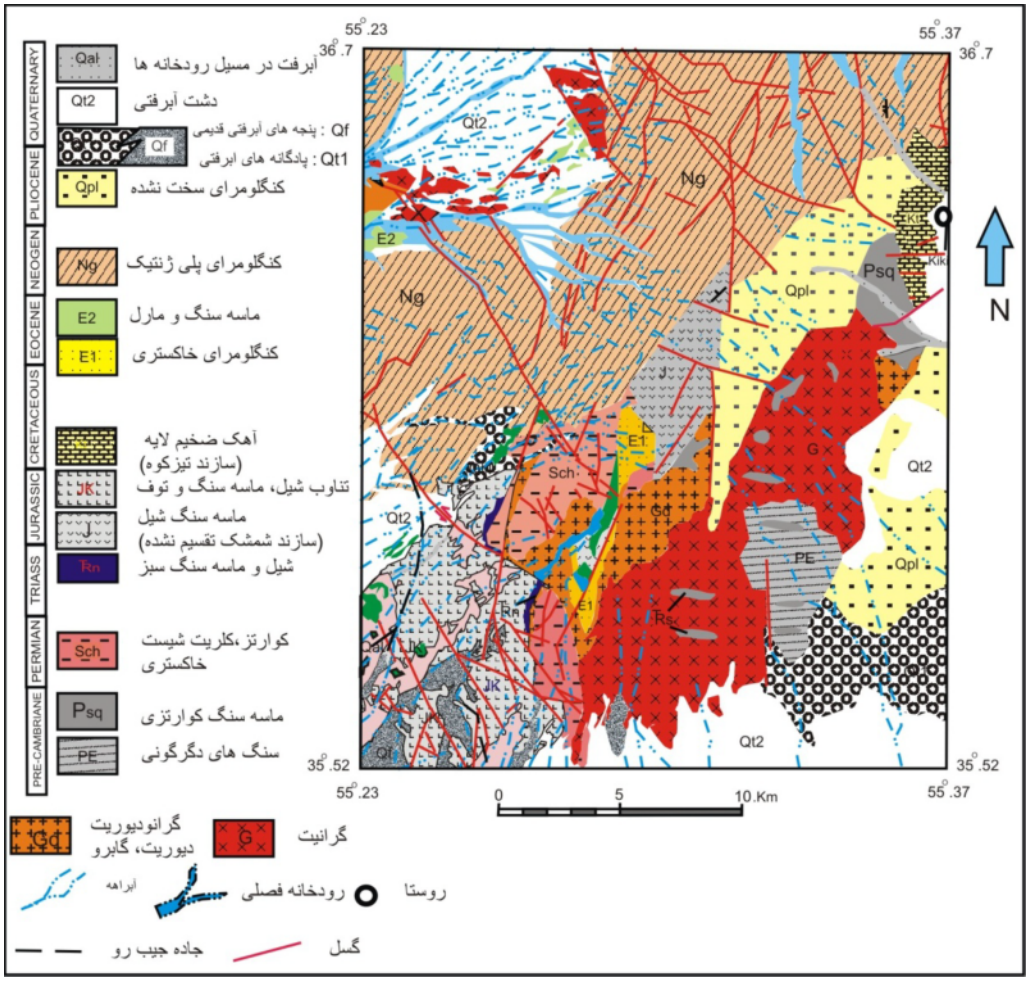
شکل ۱ نوع پراکندگی نسبت‌های طول به عرض بلور در دو بعد، نمودی از شکل سه بعدی (مکعبی، منشوری، تیغه‌ای و صفحه‌ای) آن است [۲۰].

جدول ۱ نتایج محاسبات حاصل از نمودارهای CSD برای نمونه‌های مورد بررسی.

شماره نمونه	سهم حجمی (%)	عرض از مبدا ln(n°)	شیب نمودار	مدت زمان رشد (yr)	طول مشخصه LD (mm)	پارامتر Q	سرعت هسته‌بندی (j) mm^{-3}/s	سرعت رشد (G)mm/s
KD6	۱۰٫۹۵	۴٫۰۷	-۶٫۸۸	۴۶٫۰۸	۰٫۱۴۵	۰٫۹۹۷	$۵٫۸۵\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KD11	۲۰٫۶۵	۲٫۹۷	-۳٫۹۳	۸۰٫۶۸	۰٫۲۵۴	۱	$۱٫۹۴\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KE3	۲۳٫۶	۳٫۸۲	-۵٫۸۴	۵۴٫۲۹	۰٫۱۷۱	۰٫۹۹۲	$۴٫۵۶\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KE4	۲۴٫۴۲	۳٫۳۲	-۴٫۸۲	۶۵٫۷۸	۰٫۲۰۷	۰٫۹۹۹	$۲٫۷۶\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KE1	۲۸٫۴۴	۳٫۵۵	-۵٫۲۸	۶۰٫۰۵	۰٫۱۸۹	۰٫۹۳	$۳٫۴۸\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KE5	۲۸٫۵۴	۳٫۶۹	-۵٫۴۵	۵۸٫۱۸	۰٫۱۸۳	۰٫۹۷۸	$۴٫۰۴\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KD8	۳۹٫۲	۳٫۷۶	-۵٫۴۵	۵۸٫۱۸	۰٫۱۸۳	۰٫۹۱۹	$۴٫۲۹\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$
KE2	۳۵٫۵۵	۲٫۹۱	-۳٫۸۷	۸۱٫۹۳	۰٫۲۵۸	۰٫۸۹	$۱٫۸۳\times۱۰^{-۹}$	$۱۰^{-۱۰}$

زمین‌شناسی عمومی

از نظر تقسیمات ساختاری توده‌ی نفوذی جنوب بیارجمند در منتهی الیه شمالی منطقه‌ی ایران مرکزی واقع شده است. براساس شرح نقشه‌های زمین‌شناسی (نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رزوه [۲۳]، نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بسطام [۲۴]، نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ جاجرم [۲۵] و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ خارتوران [۲۶]) و بررسی‌های صحرائی انجام شده، پیکره‌های سنگی منطقه شامل سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های آذرین درونی (گرانیتوئید بیارجمند) و بیرونی و آذرآواری به سن پرکامبرین تا کواترنری است (شکل ۲). سنگ‌های رسوبی مهم شامل گنگلومرا، ماسه‌سنگ همراه با میان لایه‌های شیلی هستند که در نقشه‌های زمین‌شناسی معادل سازند شمشک در نظر گرفته شده‌اند و سنگ میزبان توده‌ی گرانیتوئیدی بیارجمند است. البته گفتنی است که با توجه به بررسی‌های سن‌سنجی صورت گرفته (۵۷۲±۳۵ Ma) [۲] و شواهد صحرایی مبنی بر قطع شدگی این سنگ‌ها به‌وسیله‌ی دایک‌های گرانودیوریتی، به نظر می‌رسد، که ماسه‌سنگ‌های دربرگیرنده‌ی توده نفوذی وابسته به پرکامبرین باشند. سنگ‌های رسوبی با سن نئوکومین به طور دگرشیب سازند شمشک را پوشانده‌اند و این سنگ‌ها با سنگ آهک ضخیم لایه سازند تیزکوه که در بخش‌های پایینی دولومیتی شده است، دنبال می‌شوند. واحدهای ائوسن بیشترین گسترش را در منطقه دارند و از جنوب میامی تا شمال روستای کیکی گسترده شده‌اند. در ناحیه میامی نهشته‌های ائوسن بیشتر از سنگ‌های رسوبی تشکیل شده است و مقدار اندکی دارای سنگ‌های آتشفشانی است. ائوسن زیرین با پیشروی گسترده دریا همراه بوده که حاصل آن رسوب‌های کنگلومرایی و ماسه

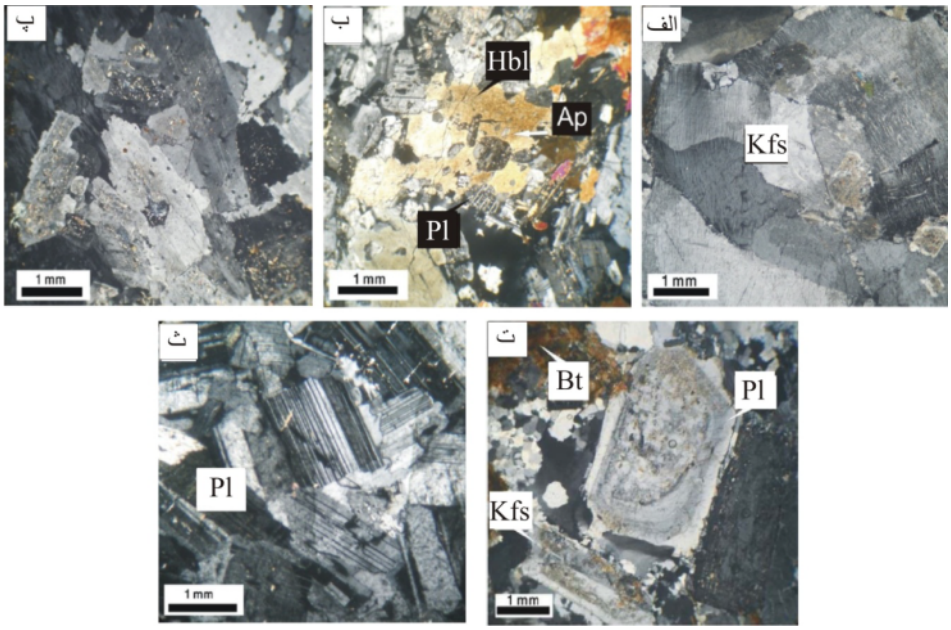


شکل۲ نقشه ساده زمین‌شناسی توده نفوذی جنوب غرب بیارجمند (اقتباس از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰رزوه، ۱:۱۰۰۰۰۰ بسطام، ۱:۲۵۰۰۰۰ خارتوران و ۱:۲۵۰۰۰۰ جاجرم با تغییرات جزئی).

سنگ و مارنی گسترده‌ای است که در شمال و شمال غربی روستای کیکی برونزد دارد. در ائوسن بالایی حوضه متلاطم‌تر شده و همراه با رسوب‌های کنگلومرا و ماسه‌سنگ و مارنی، گدازه‌های آندزیتی و آندزیتی بازالتی به درون حوضه ریخته شده است. رسوب‌های نئوژن بیشتر از کنگلومرا چندزایی به رنگ خاکستری روشن با سیمانی سست تشکیل شده است که با ناپیوستگی زاویه‌دار بر لایه‌های قدیمی‌تر از خود جای می‌گیرد. رسوب‌های کواترنری بیشتر شامل پادگانه‌های قدیمی و بادزن‌های آبرفتی و کنگلومرا سخت نشده قهوه‌ای رنگ هستند که این رسوب‌ها به همراه رسوب‌های نئوژن جوانترین واحدهای رسوبی منطقه‌ی مورد بررسی را تشکیل می‌دهند. توده نفوذی جنوب غرب بیارجمند درون ماسه‌سنگ‌های پرکامبرین تزریق شده و ضمن ایجاد دگرگونی همبری ضعیف، آپوفیزهایی را به داخل آنها وارد کرده که همه‌ی آنها حاکی از جوانتر بودن نسبی این توده نسبت به این سنگ‌هاست. به واسطه تأثیر گرمای ناشی از تزریق توده، سنگ‌های فراگیر در مجاورت بلافاصل توده، در حد رخساره آلبیت اپیدوت هورنفلس دگرگون شده‌اند.

سنگ‌نگاری

براساس بررسی‌های سنگ‌نگاری توده نفوذی جنوب غرب بیارجمند از دو واحد اسیدی و حدواسط- مافیک تشکیل شده است که واحد اسیدی دارای ترکیب سنگ‌شناسی گرانیت و گرانودیوریت است. در حالی که واحد حدواسط- مافیک از مجموعه سنگ‌شناسی گابرودیوریت و دیوریت تشکیل شده است. این توده در همبری با سنگ‌های میزبان دستخوش دگرشکلی خمیری شدید بوده و بر اساس شواهد بافتی دگرشکلی طی استقرار توده تنها در شرایط دمایی بالای انجماد و احتمالاً در حضور مقدار کمی گدازه رخ داده است [۲۷]. گرانیت‌ها از نظر مشخصه‌های ماکروسکوپیکی صورتی رنگ و دانه درشت هستند. کانی‌های فلسیک شامل فلدسپارقلیایی، پلاژیوکلاز و کوارتز بوده و بیوتیت به عنوان تنها کانی فرومنیزین در این سنگ‌ها حضور دارد. همچنین این سنگ‌ها فاقد مسکویت و کانی‌های آلومینوسیلیکاتی هستند. بافت غالب در گرانیت‌ها دانه‌ای است ولی گاهی بافت‌های گرانوفیری، پرتیتی و خال خال نیز مشاهده می‌شود (شکل ۳). فلدسپار قلیایی اغلب به صورت پورفیرهای درشت در متن سنگ دیده می‌شوند که طول آن‌ها گاه به ۲ سانتی‌متر نیز رسیده و حجم قابل توجهی از این سنگ‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. برخی از این کانی‌ها دارای ماکل کارلسباد هستند و به صورت جزئی به کائولینیت دگرسان شده‌اند. کوارتزها، دارای خاموشی موجی، حاشیه مضرس و شکستگی‌های فراوان هستند. پلاژیوکلازها با فراوانی کمتر، ماکل پلی‌سنتتیک و در برخی موارد با منطقه‌بندی دیده می‌شوند (شکل ۳). بیوتیت بین مجموعه کانی‌ها حضور دارد و گاهی به کلریت دگرسان شده است.



شکل ۳ الف: بافت پرتیتی در سنگ‌های گرانیتی، ب: هورنبلند واجد انکلوزیون‌های آپاتیت و پلاژیوکلاز و تشکیل بافت پوئی‌کیلیتیک، پ: تصویر میکروسکوپیکی از بافت دانه‌ای در گرانیت، ت: نمایی از منطقه‌بندی در پلاژیوکلاز، ث: نمایی از بافت دانه‌ای در نمونه کوارتز مونزودیوریتی.

بافت غالب در گرانودیوریت‌ها دانه‌ای بوده و از نظر کانی‌شناسی بیشتر از کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت و آمفیبول نوع هورنبلند تشکیل شده‌اند. کوارتز با خاموشی موجی بیشتر به صورت بافت ریزدانه‌ای با فلدسپارها همرشدی نشان می‌دهند. پلاژیوکلاز معمولاً به صورت خودشکل بوده و بیش از ۳۰ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است. این بلورها در برخی از نمونه‌ها دگرسان شده و به اپیدوت، سریسیت و کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. فلدسپار پتاسیم به صورت نیمه خودشکل تا بی‌شکل و میانگین اندازه آن حدود یک میلیمتر است. در برخی موارد این بلورها بافت پرتیتی دارند و یا به صورت میکروکلین با ماکل مشبک متبلور شده‌اند. این بلورها تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته و تا حدی به کائولینیت دگرسان شده‌اند. بیوتیت نیمه خودشکل و تا حدی متحمل دگرسانی به کلریت، اسفن و مانیتیت شده است .آمفیبول نیز خودشکل و از نوع هورنبلند سبز بوده و در برخی موارد به بیوتیت، کلریت و اپیدوت تبدیل شده است.

کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های گابرودیوریت و کوارتزمونزودیوریت جنوب غرب بیارجمند شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز هستند. بافت غالب در این سنگ‌ها دانه‌ای است. پلاژیوکلاز به صورت خودشکل تا نیمه خودشکل است و بیش از ۴۰ درصد از حجم سنگ را به خود اختصاص داده است (شکل ۳). پلاژیوکلازها در برخی موارد دارای ماکل پلی‌سنتتیک است و در برخی موارد ساختمان منطقه‌ای دارند. این کانی‌ها تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته و به سریسیت، کلسیت و اپیدوت دگرسان شده‌اند. آمفیبول به صورت نیمه خودشکل و به نسبت سالم است، در حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهد و در بعضی موارد به اپیدوت یا بیوتیت تبدیل شده است. بیوتیت‌ها نیمه خود شکل هستند و تا حدی به کلریت، اسفن و مگنتیت تبدیل شده‌اند. کوارتز و فلدسپار قلیایی نیز به صورت بی‌شکل در بین سایر کانی‌ها دیده می‌شود. فلدسپارهای قلیایی حدود ۱۰ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهند در حالی که کوارتزها سهم اندکی دارند. تبلور این دو کانی در بین سایر کانی‌ها بیانگر تبلور آنها در مراحل نهایی انجماد ماگمایی است.

بحث

توزیع اندازه بلور به صورت کمّی جمعیت بلور در سنگ را نشان می‌دهد [۱۴،۱۲،۱۱،۵]، و بررسی آن می‌تواند اطلاعات بسیاری را در مورد اینکه سنگ‌ها چگونه و تحت چه شرایطی متبلور شده‌اند، آشکار سازد. داده‌های مقاطع دو بعدی می‌توانند به آسانی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و مقاطع نازک به دست آیند، اما تبدیل این اطلاعات به صورت سه بعدی، پیچیده و دشوار است. از آنجا که داده‌های CSD معمولاً یک توزیع لگاریتمی تقریبی دارند، بهترین روش برای استفاده از اندازه لگاریتمی فاصله‌ها، اندازه‌گیری طول و عرض است [۲۸، ۲۹]. به کمک این روش و با استفاده از شمارش و بررسی شکل دانه‌ها و بازسازي تصوير سه بعدي بلورها، مي‌توان سرعت متوسط رشد، چگالي هسته‌بندي و سهم حجمي بلورها را محاسبه کرد. CSD یک روش تکميلي فيزيکي براي بررسي-های زمين‌شيمي و سنگ‌نگاری، و روشي مطمئن براي بررسي ماکروسکوپيکی مانند سرعت فرايندهاي فيزيکي تبلور است [۵]. به طور کلي مي‌توان بيان کرد که CSD بررسي‌های سنگ‌نگاری را یک گام از کيفي بودن به سمت کمّي شدن سوق داده است، و بر این اساس، روش اندازه‌گیری دانه‌ها در بلورها، مبنایی بر محاسبات سرعت و مدت رشد بلور است. داده‌های حاصل از بررسی‌های CSD معمولاً در قالب نمودارهایی نشان داده می‌شوند، که مهمترین آن‌ها نمودار لگاریتم طبیعی چگالی انباشتی بلور در برابر طول بلور است و خط حاصل از اتصال نقاط، CSD نامیده می‌شود [۳۰]. این نمودارها تغییرات فراوانی و اندازه بلورها را به صورت تابعی از زمان اقامت آن‌ها در سیستم توصیف می‌کنند. حالت آرمانی نمودارهای CSD خطوط صافی هستند، که انواع کلاسیک نام دارند. این خطوط معمولاً در اثر فرآیندهای فیزیکی فعال در حین تبلور از حالت خطی خارج شده و شیب‌های متفاوتی را در طول خود نشان می‌دهند [۱۵، ۳۱، ۳۲] و بیشتر تفسیرهای مربوط به تاریخچه تبلور بر اساس این نمودار به دست می‌آیند. مقادیر شیب و عرض در محور مختصات CSD، توسط وایازشی خطی با استفاده از روش‌های هگینس [۳۳] تعیین شده‌اند. در CSD، پارامتر Q (میزان انطباق)، بیانگر آن است که داده‌ها تا چه حد برای تولید CSD_S به صورت یک خط مستقیم، قابل استفاده هستند. مقادیر Q بزرگتر از ۰/۱ همخوانی خوبی با خط مستقیم نشان می‌دهند، البته مقادیر بزرگتر از ۰/۰۱ نیز قابل قبول هستند [۳۳]. در حالی که مقادیر Q خیلی پایین باشند، CSD_Sها دارای انحنا خواهند بود. با توجه به جدول ۱، مقدار Q در همه نمونه‌ها بیشتر از ۰/۱ است (۰/۹۹) در نتیجه

شکل نمودارها به خط مستیقم نزدیکتر است. طول مشخصه (متوسط طول کل بلورها در یک CSD مستقیم) (L_D یا C_i) از ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ تغییر می‌کند و عرض از مبداء (چگالی هسته-بندی اولیه) در گستره‌ای از ۲/۹۷ تا ۴/۰۷ قرار گرفته است. متوسط سهم حجمی فلدسپار در نمونه کوارتز مونزودیوریتی ۱۰/۹۵ است و در گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها در گستره‌ی ۲۰/۶۵٪ تا ۳۹/۲ ٪ تغییر می‌کند.

سهم حجمی

سهم حجمی کانی در یک سنگ برابر است با مساحت بلور در هر مقطع [۳۴] به طوری که بافت و جهت‌گیری در آن نقشی ندارد. سهم حجمی، میزان حجم اشغال شده توسط مجموع بلورهای فلدسپار است که می‌توان توسط نرم افزار JMicroVistion و یا با استفاده از محاسبات ریاضی که در فرمول (۱) خلاصه شده است، با استفاده از نرم افزار Excel به دست آورد (جدول ۱).

$$Vi = 6\delta n_{i0} Ci^4 \qquad (۱)$$

در معادله بالا Vi، هم سهم حجمی فاز i، n_{i0}، چگالی هسته-بندی نهایی فاز i و Ci، مقدار ثابتی است که طول مشخصه (شیب/1- =C_i) را بیان می‌کند و برابر است با متوسط طول کل بلورها در یک CSD مستقیم، که برای همه اندازه‌های بلوری بسط داده می‌شود [۱۱] و از صفر تا اندازه بی‌نهایت ادامه دارد. طول مشخصه هر CSD از رابطه (شیب/۱-) محاسبه می‌شود. در این معادله δ، عامل شکل فاز i است که طبق رابطه زیر برای نمونه‌ها برابر با ۰/۱۹۰ به دست آمده است.

$$\delta = [1 - \Omega(1 - \pi/6)]IS/L^2 \qquad (۲)$$

در این فرمول Ω ، عامل گردشدگی است که از صفر برای متوازی‌السطوح تا یک برای بیضی سه محوره متغیر است. این تعریف با عامل گردشدگی که در مرجع [۲۰] بیان شده است، همخوانی دارد و برای همه‌ی نمونه‌ها $\Omega = 0/6$ در نظر گرفته شد. S، I و L ترتیب ابعاد (یا محورهای) کوتاه، متوسط و بلند متوازی السطوح یا بیضی هستند.

مارش، نشان داد که CSD_S در بسیاری از سیستم‌های ماگمایی ساده توسط معادله زیر توصیف می‌شود [۱۱]:

$$N_i(L) = n_{i0} e^{-L/Ci} \qquad (۳)$$

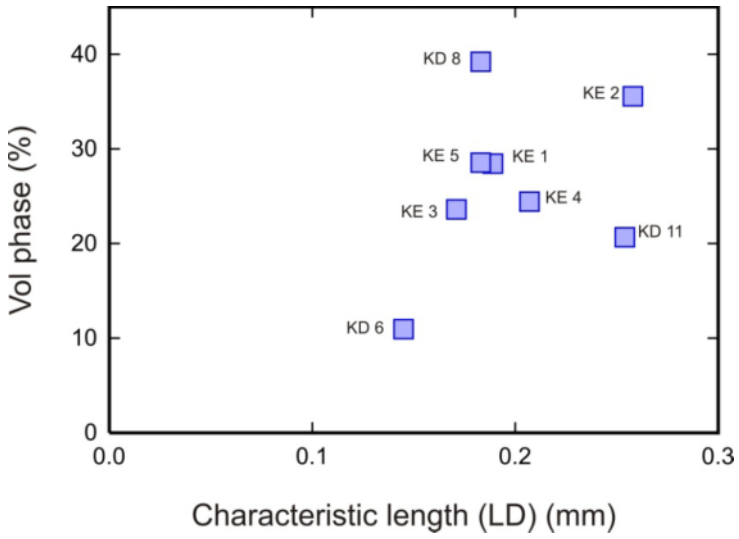
در این رابطه $N_i(L)$، چگالی انباشتی بلورهای فاز i برای اندازه L است. چگالی انباشتی عبارت است از تعداد بلورها با اندازه-های مشخص که در فواصل معین (برحسب mm) یافت می‌شوند که از فرمول n = dn/dl نیز به دست می‌آید، که در آن dn تعداد بلورها و dl اندازه بلورهاست. این توزیع روی یک نمودار $\ln[n_i(L)]$ برحسب اندازه، (L)، به صورت خطی است. عرض از مبداء آن برابر با $\ln(n_{i0})$ و شیب آن برابر با $-1/C_i$ است.

باتوجه به رابطه (۱)، بلورهای فلدسپار حجم‌های مختلفی از ۱۱ تا ۳۹ درصد از کل سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. زمان رشد و سرعت هسته‌بندی، رابطه مستقیمی با درصد سهم حجمی دارند. به این معنی که هرچه سرعت هسته‌بندی و زمان رشد بلورها افزایش یابد، بلور فضای بیشتری از کل سنگ را به خود اختصاص خواهد داد و از طرفی هرچه نرخ هسته‌بندی کمتری و مدت زمان رشد بلور بیشتر باشد، بلورهای دانه درشت‌تر خواهند بود. ولي این شرط به تنهایی کافي نیست و ترکیب شیمیایی نیز باید اجاره این رشد را به بلور بدهد. با توجه به این که در این مطالعه بلورهای فلدسپار مورد برررسی قرار گرفته‌اند، ترکیب شیمیایی نمونه‌های گرانیتی به‌ویژه سینوگرانیت‌ها (نمونه‌های KD8 و KE2) برای رشد فلدسپارها مساعد هستند و نمونه‌های مونزوگرانیتی و گرانودیوریتی (KE3، KE4 و KD11) در اولویت بعدی قرار می‌گیرند. نمونه کوارتز مونزودیوریتی (KD6) نیز سهم حجمی ۱۰/۹۵ را به خود اختصاص داده است (جدول ۱).

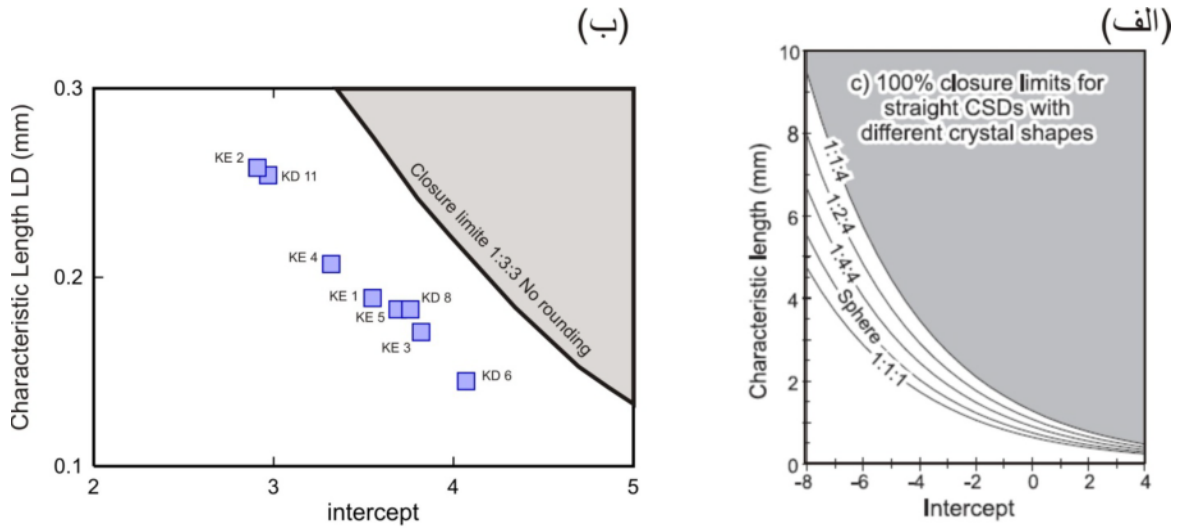
در نمودار طول مشخصه نسبت به درصد حجمی (شکل ۴)، نمونه کوارتز مونزودیوریتی نسبت به سایر نمونه‌ها دارای طول مشخصه کمتری است و با توجه به مدل مارش [۱۱] می‌توان نتیجه گرفت که زمان اقامت یا زمان رشد نمونه کوارتز مونزودیوریتی نسبت به بقیه نمونه‌های گرانیتی و گرانودیوریتی کمتر است. از طرفی، عرض از مبدأ بیشتر و فقدان بلورهای بزرگ در نمونه کوارتز مونزودیوریتی بیانگر آن است که هسته-بندی اهمیت تاحدودی بیشتری نسبت به رشد در نمونه کوارتز مونزودیوریتی داشته است (جدول ۱) که این امر احتمالاً بر اثر افزایش اشباع‌شدگی بوده است [۳۵]. ورود ماگمای جدید فاقد بلور به مخزن ماگمایی می‌تواند باعث فوق اشباع شدن و افزایش هسته‌بندی ماگما شود و در نتیجه در نمودارهای CSD به صورت شکستگی ظاهر می‌شود.

نمودار عرض از مبدأ نسبت به طول مشخصه (شکل ۵ الف) مرزهای مختلف محدوده محصور شده (Closure limit) (محدوده‌ای که اگر نمونه‌ها در داخل آن

واقع شوند دارای CSD منحنی شکل هستند و چنانچه در خارج از آن قرار گیرند CSD مستقیم خواهند داشت) را برای CSD_Sهای مستقیم با شکل‌های بلوری مختلف نشان می‌دهد. به طوری که CSDهای مستقیم تنها می‌توانند در زیر این خط وجود داشته باشند. چنانکه مشخص است موقعیت این خط برای شکل‌های بلوری مختلف فرق می‌کند. در اینجا فرض می‌شود که بلورها کامل حجم را پر کرده‌اند. محدوده‌های محصور شده برای هر شکل بلوری یک خمیدگی را وصف می‌کند. CSD_Sهای مستقیم تنها می‌توانند در زیر این خط موجود باشند و در بالای این محدوده CSD نمی‌تواند به صورت مستقیم باشد [۲۱]. CSDهای مستقیم روند کلی تبلور ماگما را نشان می‌دهند و شیب منفی این نمودارها، ناشی از افزایش رشد همراه با کاهش هسته‌بندی، افزایش اندازه بلورها، کاهش چگالی انباشتی و افزایش زمان است. درحالی که اگر هسته‌بندی با زمان افزایش می‌یافت، شیب نمودار مثبت می‌شد. شکل ۵ ب نیز موقعیت نمونه‌های مورد بررسی را روی این نمودار نشان می‌دهد. چنانکه دیده می‌شود با اینکه نمونه‌ها دور از محدوده محصور شده هستند و نمی‌توانند در بخش خاکستری رنگ قرار بگیرند، به خط مستقیم نزدیکترند و یک همبستگی شدید بین L_D و عرض از مبداء وجود دارد.



شکل ۴ موقعیت نمونه‌ها روی نمودار طول مشخصه (برحسب mm) نسبت به درصد حجمی فلدسپار.



شکل ۵ الف: محدوده‌های محصور شده برای شکل‌های بلوری مختلف در نمودار عرض از مبدأ نسبت به طول مشخصه [۲۱]. ب: موقعیت نمونه‌ها در نمودار عرض (از مبدأ) نسبت به طول مشخصه (برحسب mm)، مربع‌ها نماینده CSD_Sهای تقریباً مستقیم هستند.

مدت رشد و سرعت هسته‌بندي

مشخصه‌هایی مانند اندازه بلور، تعداد بلور و زمان تبلور به سرعت رشد و هسته‌بندی وابسته‌اند. در عین حال توزیع اندازه بلور (CSD_S) یک بینش اساسی و مورد زمان تغییرات هسته-بندی و رشد و همچنین سیستم‌های ماگمایی پویا را در اختیار ما قرار می‌دهد [۱۱]. کاهش هسته‌بندی با افت گدازه، در CSD، در زمان‌های پایانی انجماد با یک کاهش شدید در چگالی انباشتی (به خاطر اندازه‌های بلوری کوچک)، مشخص می‌شود. در شرایط عادی با رشد بلورها و بزرگتر شدن اندازه آن‌ها، هسته‌بندی و چگالی انباشتی کاهش می‌یابد و CSD دارای شیب منفی خواهد بود، اما در اثر ورود یک ماگمای جدید به مخزن ماگمایی و اختلاط ماگمایی، اشباع شدگی در نتیجه هسته‌بندی و انباشتی در اثر متبلور شدن بلورهای دانه ریز، چگالی افزایش می‌یابد که این امر باعث ایجاد شیب مثبت و شکستگی در CSD می‌شود. اندازه بلوری در اصل نتیجه هسته‌بندی ناهمگن و سریع، اضافه شدن پی در پی دانه و مهاجرت مرز دانه‌ها است.

با اندازه‌گیری ابعاد بلور می‌توان به سرعت و مدت رشد بلور پی برد. اگر هسته بندی بلورها نسبت به زمان متفاوت باشد، گستره متنوعی از اندازه بلورها را در سنگ می‌توان مشاهده نمود. به علاوه برای سرعت‌های رشد مشابه، زمان اقامت طولانی‌تر منجر به رشد بلورهای بزرگتر می‌شود. از این رو یک تغییر در شیب CSD با عرض از مبدأ یکسان ایجاد می‌شود. با مشخص بودن سرعت رشد بلور و شیب منفی نمودار CSD، می‌توان زمان اقامت را با استفاده از معادله (۴) محاسبه کرد. براساس نتایج کاشمن [۱۳] مقدار سرعت رشد برای نمونه‌ها $۱۰^{-۱۰}$ mm/s محاسبه شده است. با توجه به این سرعت رشد و شیب منفی CSD، مدت زمان رشد برای کوارتز مونزودیوریت ۴۶٫۰۸ و بیشترین مقدار آن برای نمونه‌های گرانیتی ۸۱٫۹۳ سال محاسبه شده است (جدول۱). سرعت رشد تأثیر چندانی بر زمان سرد شدن ندارد.

اگر نمودار فراواني لگاریتمی بلورها نسبت به اندازه دانه‌ها (برحسب میلی‌متر) رسم شود، یک رابطه لگاریتمی خطي-توزیعی با افزایش اندازه دانه‌ها به دست می‌آید (شکل ۶) و شیب این خط (S) برابر است با

$$\tau=C_i/G \text{ یا آهنگ رشد } \tau=(-1/S)/G \text{ یا } S=-1/G\tau \qquad (۴)$$

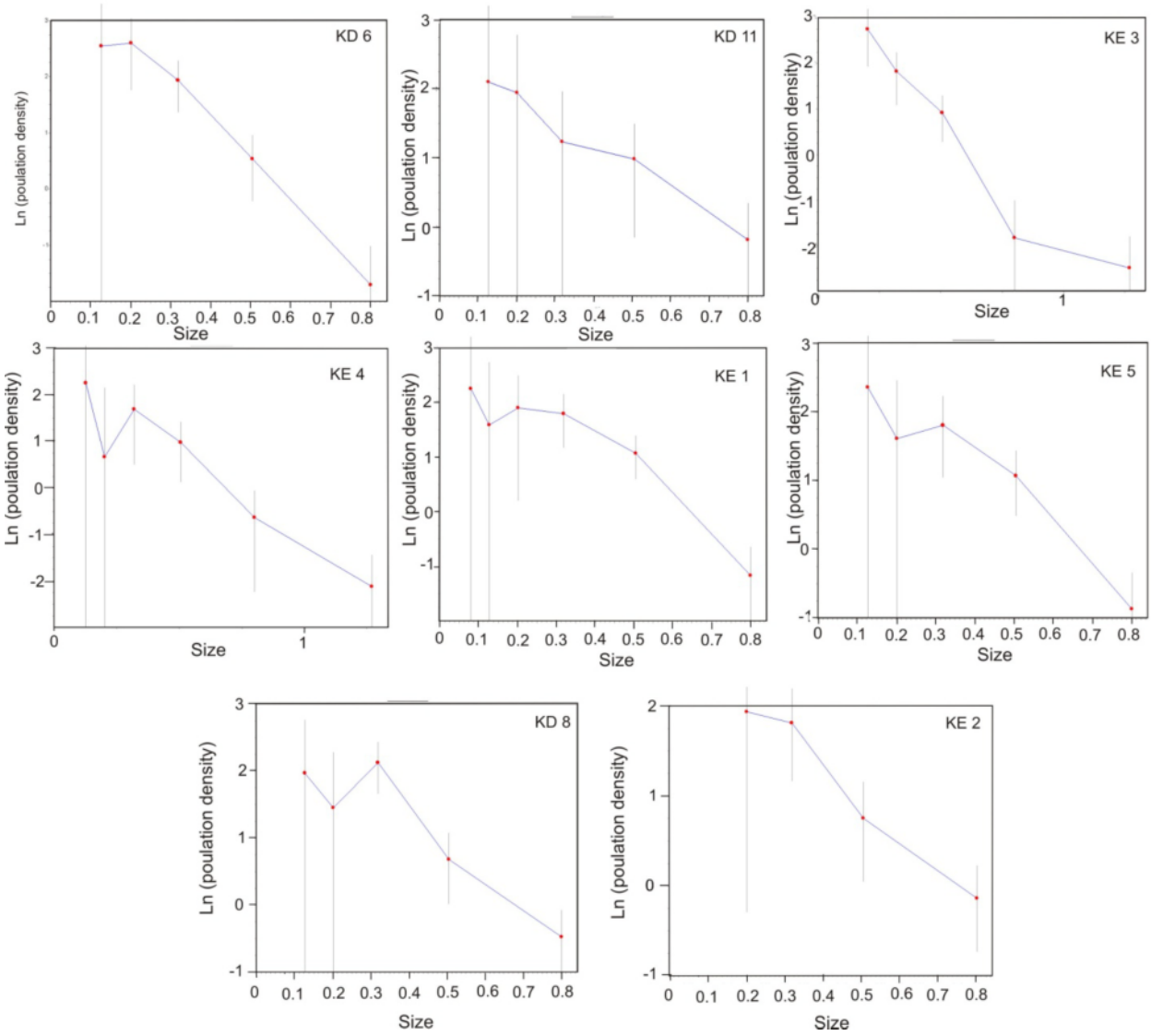
که G در آن سرعت رشد و τ زمان رشد بلورهاست. عرض از مبدا این خط یا نقطه تقاطع آن با محور چگالی انباشتی نیز برابر با چگالی هسته‌بندی اولیه (n^o) است (عرض از مبداء = $\ln(n^o)$). رابطه مستقیم لگاریتمی، مربوط به تبلور پیوسته و یکنواخت است که توسط سرعت رشد نسبتاً ثابت ایجاد می‌شود و اندازه بلور نیز تأثیری بر آن ندارد. سرعت هسته‌بندی (J) در $t = 0$ را نیز می‌توان از نمودار CSD و بر پایه معادله زیر محاسبه نمود [۵]

$$J = n^o\, G(\text{عرض از مبداء} = \ln(n^o)) \qquad (۵)$$

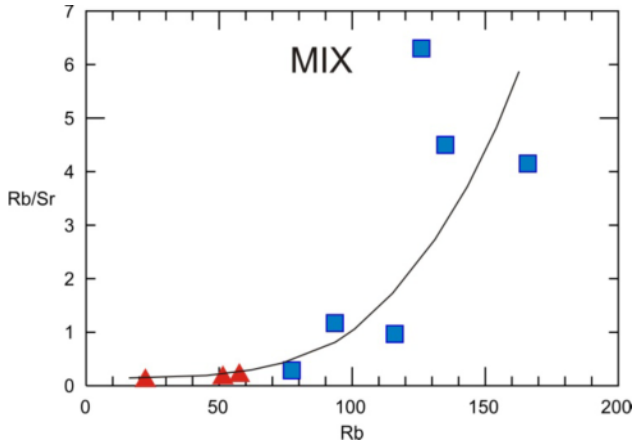
براساس محاسبات انجام شده، گرچه نمونه‌ها از نظر ترکیب شیمیایی به هم نزدیک هستند ولی مدت رشد آنها دارای گستره نسبتاً بزرگ ۴۹ تا ۸۲ سال است. به طوری که واحدهای اسیدی همگرایي خوبي دارند و مدت رشد ۵۴٫۲۹ تا ۸۱٫۹۳ سال و واحد کوارتز مونزودیوریتی ۴۶٫۰۸ سال را نشان می‌دهند. این اختلاف رشد در نتیجه اختلاف در نرخ هسته-بندی و سرعت سرد شدن است. عوامل زیادی ازجمله سرعت برونریزی گدازه (نفوذ ماگما)، ستبرای واحد، مدت ماندگاری در آشیانه ماگمایی و ترکیب شیمیایی در چگونگی سرد شدن دخالت دارند.

تحولات ماگمایي

در بررسی نمودارهاي به دست آمده از نرم افزار CSD همه نمونه‌ها شکستگی و انحنا نشان می‌دهند و از روند عادی تبلور پیروی نمی‌کنند (شکل۶). وجود شکستگی و انحنا در نمودارها نشان دهنده آلودگی و تغییرات ماگمایی است که می‌تواند با ورود یک ماگمای جدید به مخزن ماگمایی در حال تبلور و اختلاط ماگمایی رخ داده باشد [۳۶]. این واحدها در بررسی-های صحرایی داراي زینولیت‌های از سنگ میزبان هستند که باعث آلودگی این سنگ‌ها شده است. همچنین بافت پوئی‌کیلیتیک و پلاژیوکلاز منطقه می‌تواند حاکی از اختلاط ماگمایی در منطقه باشد. در نمودار Rb نسبت به Rb/Sr [۳۷] مشاهده می‌شود که میزان Rb روند افزایشی ملایمی دارد که می‌تواند به دلیل افزایش Sr موجود در ماگمای ورودی جدید و بیانگر فرآیند اختلاط در سنگ‌های مورد بررسی باشد (شکل۷).



شکل ۶ نمودارهاي لگاريتمي چگالي انباشتی برحسب اندازه دانه‌ها براي نمونه‌هاي مورد بررسی. KD8, KE2, KE3 و KE4: گرانیت. KD11: گرانودیوریت. KD6: کوارتز مونزودیوریت.

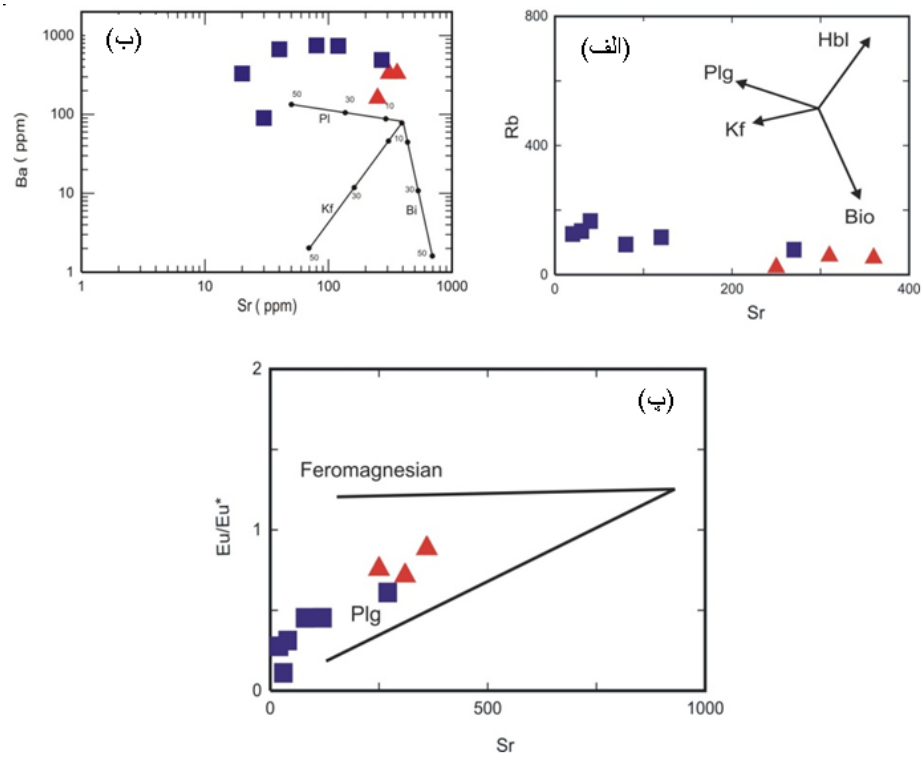


شکل ۷ روند افزایشی Rb نسبت به Rb/Sr ، که می‌تواند بیانگر فرایند اختلاط در سنگ‌های منطقه باشد [۳۷].

با توجه به نمودارهای Ba نسبت به Sr [۳۸]، Rb نسبت به Sr [۳۹] و *Eu/Eu نسبت به Sr [۴۰] به نظر می‌رسد که جدایش پلاژیوکلاز عامل مهمی در تاریخچه تحولات سنگ‌های ماگمایی منطقه بوده است (جدول ۲، شکل ۸) [۴۱]. به علاوه حسینی [۴۲] چندین مرحله تزریق ماگمایی را در منطقه شناسایی کرده است که در مواردی سنگ‌های یک فاز، سنگ-های فاز قبلی را در بر گرفته و گاهی نیز مجموعه قبلی را قطع کرده‌اند و به صورت دایک‌ها و انکلاوهایی برجای مانده‌اند. ایشان همچنین عملکرد فرآیند جدایش را برای تحولات ماگمایی نتیجه گرفت. ته نشست بلوری و جدایش می‌تواند عامل ایجاد بی نظمی و انحنا در بعضی از نمودارها باشد [۵]. نمونه KE3 نیز شکستگی هم روند را نشان می‌دهدکه می‌تواند به عنوان اختلاط ماگمای همجنس تفسیر شود [۴۳].

جدول ۲ نتایج بررسی زمین‌شیمی سنگ‌های توده نفوذی بیارجمند.

	گرانودیوریت	دیوریت		گرانودیوریت	گرانیت				
نمونه	KD6	KD10	KE5	KD11	KE9	KE4	KE11	KD8	KD9
SiO_2	۳٫۵۰	۴٫۵۴	۵٫۵۶	۵٫۶۹	۲٫۷۳	۲٫۷۴	۵٫۷۴	۷۵	۷۶
TiO_2	۴۶٫۰	۷٫۰	۹۱٫۰	۳۲٫۰	۱۱٫۰	۱۳٫۰	۰۴٫۰	۰۳٫۰	۰۴٫۰
Al_2O_3	۷٫۱۸	۱۵	۶٫۱۵	۱۳	۷٫۱۲	۴٫۱۲	۲٫۱۱	۷٫۱۱	۱۲
FeO	۷۶٫۴	۶۱٫۵	۰۱٫۵	۱۱٫۲	۷۴٫۰	۱٫۱	۵۸٫۰	۳۹٫۰	۵۲٫۰
Fe_2O_3	۸۷٫۱	۸٫۲	۴۸٫۲	۴۱٫۱	۶۵٫۰	۹۴٫۰	۵۱٫۰	۳۶٫۰	۵٫۰
MnO	۱۲٫۰	۲۱٫۰	۱۸٫۰	۰۸٫۰	۰۲٫۰	۰۵٫۰	۰۲٫۰	×	×
MgO	۶۲٫۵	۹۷٫۳	۷۳٫۳	۶۶٫۰	۲٫۰	۲۳٫۰	۱۴٫۰	۰۵٫۰	۰۷٫۰
CaO	۱۰	۱۸٫۷	۱۹٫۷	۷۲٫۲	۹۸٫۰	۲۴٫۱	۴۴٫۰	۲۸٫۰	۶۷٫۰
Na_2O	۷٫۱	۶٫۲	۴٫۲	۵٫۳	۵٫۳	۳٫۳	۴٫۳	۳٫۳	۳٫۳
K_2O	۶۴٫۰	۲۸٫۱	۳۲٫۱	۹۵٫۱	۱۸٫۴	۰۸٫۴	۱۳٫۴	۷٫۴	۹۶٫۴
P_2O_5	۰۸٫۰	۱۶٫۰	۱۹٫۰	۰۸٫۰	۰۴٫۰	۰۳٫۰	۰۱٫۰	×	×
loi	۶۱٫۱	۴۹٫۱	۶۹٫۱	۷۱٫۰	۴۵٫۰	۵۴٫۰	۳۶٫۰	۴۷٫۰	۳۱٫۰
Sum	۵٫۹۶	۱٫۹۶	۸٫۹۷	۳٫۹۶	۹٫۹۶	۳٫۹۸	۵٫۹۵	۴٫۹۶	۴٫۹۸
Ba	۱۶۰	۳۳۰	۳۳۰	۴۹۰	۷۵۰	۷۴۰	۳۳۰	۶۷۰	۹۰
Rb	۳٫۲۲	۶٫۵۷	۴٫۵۱	۳٫۷۷	۵٫۹۳	۱۱۶	۱۲۶	۱۶۶	۱۳۵
Sr	۲۵۰	۳۱۰	۳۶۰	۲۷۰	۸۰	۱۲۰	۲۰	۴۰	۳۰
Zr	۱۶۷	۳٫۹۱	۸٫۷۴	۱۷۷	۱٫۷۸	۱۰۲	۸٫۷۰	۵٫۶۰	۸٫۶۳
Nb	۲	۶	۵	۱۱	۵	۸	۷	۷	۱۲
Ni	۳۰	۲۲	۲۰	۱۶	۶	۴۹	۸	۱۰	۵۸
Co	۵٫۲۹	۲۳	۱٫۲۱	۵٫۴	۵٫۱	۷٫۱	۷٫۰	۶٫۰	۹٫۰
Zn	۶۰	۱۳۲	۱۵۴	۶۰	۱۳	۳۴	۱۸	۱۰	۱۳
La	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۶٫۱۸	۳۲	۴٫۳۰	۱٫۱۱	۷٫۱۶	۴٫۱۲
Ce	۴٫۲۶	۵٫۳۲	۲٫۲۸	۵٫۳۲	۵٫۶۷	۲٫۵۷	۵٫۲۳	۷٫۳۰	۱٫۲۵
Pr	۲۹٫۳	۶۷٫۴	۶۷٫۳	۲۱٫۴	۵۷٫۷	۵۱٫۶	۸۴٫۲	۸۵٫۳	۶۹٫۳
Nd	۱٫۱۳	۷٫۱۹	۲٫۱۵	۶٫۱۶	۲٫۲۷	۸٫۲۳	۴٫۱۱	۹٫۱۴	۱٫۱۶
Sm	۵٫۲	۷٫۴	۲٫۳	۵٫۴	۸٫۴	۶٫۴	۹٫۲	۴٫۳	۵٫۵
Eu	۶۳٫۰	۱۳٫۱	۹۵٫۰	۱	۶۷٫۰	۶۹٫۰	۲۸٫۰	۳۷٫۰	۲۲٫۰
Gd	۵۳٫۲	۸۶٫۴	۲۹٫۳	۵۳٫۵	۰۱٫۴	۵۷٫۴	۲۷٫۳	۸۲٫۳	۶۶٫۶
Tb	۴۱٫۰	۷۷٫۰	۴۸٫۰	۱	۵۶٫۰	۷۶٫۰	۵۵٫۰	۶۶٫۰	۱۷٫۱
Dy	۳۵٫۲	۷۹٫۴	۷۸٫۲	۰۹٫۶	۵۲٫۳	۹۴٫۴	۵۵٫۳	۱۱٫۴	۳۹٫۷
Ho	۵۳٫۰	۰۱٫۱	۶۱٫۰	۳۲٫۱	۷٫۰	۰۵٫۱	۷۵٫۰	۸۹٫۰	۵۸٫۱
Er	۵٫۱	۰۵٫۳	۷۴٫۱	۸۱٫۳	۱٫۲	۲۸٫۳	۲۵٫۲	۵۹٫۲	۵۵٫۴
Tm	۲۲٫۰	۴۴٫۰	۲۴٫۰	۵۴٫۰	۳۱٫۰	۵۱٫۰	۳۶٫۰	۳۷٫۰	۶۷٫۰
Yb	۴٫۱	۲٫۳	۸٫۱	۵٫۳	۲	۵٫۳	۴٫۲	۷٫۲	۵٫۴
Lu	۱۹٫۰	۴۸٫۰	۲۴٫۰	۴۹٫۰	۲۷٫۰	۵٫۰	۳۹٫۰	۳۶٫۰	۶۱٫۰
Y	۴٫۱۳	۲٫۲۹	۴٫۱۵	۹٫۳۵	۲٫۱۹	۱٫۳۰	۲٫۲۰	۹٫۲۳	۹٫۴۲
Cs	۸٫۲	۷٫۰	۷٫۰	۴٫۳	۱	۵٫۱	۶٫۱	۱	۹٫۰
Hf	۵	۳	۲	۵	۳	۴	۳	۳	۴
Ga	۱۹	۱۹	۱۸	۱۸	۱۶	۱۵	۱۵	۱۵	۱۸
Sn	×	۲	۴	۳	۲	۱	۲	۲	×
Th	۳٫۳	۲٫۴	۷٫۲	۸٫۶	۳٫۱۱	۳٫۱۴	۴٫۷	۳٫۱۱	۱٫۱۸
U	۵۳٫۰	۴۶٫۱	۰۳٫۱	۴۸٫۲	۱۸٫۱	۴	۶۴٫۱	۴۹٫۲	۸۲٫۳
V	۱۷۵	۲۱۰	۲۱۱	۳۶	۱۲	۱۴	۱۱	۱۳	۱۱
Cu	۳۳	۲۶	۱۴	۸	۸	۱۹۶	۸	۶	۱۷۸
K2O/Na2O	۳۷٫۰	۴۹٫۰	۵۵٫۰	۵۵٫۰	۱۹٫۱	۲۳٫۱	۲۱٫۱	۴۲٫۱	۵٫۱
×Eu/Eu	۷۵٫۰	۷۱٫۰	۸۸٫۰	۶۱٫۰	۴۵٫۰	۴۵٫۰	۲۷٫۰	۳۱٫۰	۱۱٫۰



شکل ۸ الف: نمودار Rb نسبت به Sr [۳۹]. ب: نمودار Ba نسبت به Sr [۳۸]. پ: نمودار *Eu/Eu نسبت به Sr [۴۰].

برداشت

براساس جمع‌بندی اطلاعات به دست آمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و نتایج بررسی‌هایCSD نمونه‌های گرانیتوئیدی جنوب غرب بیارجمند، نتایج زیر به دست آمده است:

- سهم حجمی متفاوت بلورهای فلدسپار از ۱۰/۹۵ درصد در کوارتز مونزودیوریت تا ۳۹/۲ درصد در گرانیت بیانگر شرایط انجماد و ترکیب شیمیایی متفاوت است.
- با توجه به سرعت رشد و شیب نمودارهای CSDs، نمونه‌ها در بازه‌های زمانی متفاوتی رشد کرده‌اند. زمان رشد بلور در سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی ۵۴/۲۹ تا ۸۱/۹۳ سال و سنگ‌های کوارتز مونزودیوریتی ۴۶/۰۸ سال برآورد شده است.
- سرعت هسته‌بندی در کوارتز مونزودیوریت‌ها بیشترین مقدار و در گرانودیوریت و گرانیت‌ها کمترین مقدار را داراست به همین دلیل بلورهای موجود در کوارتز مونزودیوریت‌ها نسبت به گرانیت‌ها دانه ریزتر هستند که این مسئله نشانگر اهمیت شرایط مختلف فیزیکی حاکم بر انجماد ماگما است.
- در بررسی نمودارهای به دست آمده از نرم افزار CSD همه نمونه‌ها شکستگی و انحنا دارند و از روند عادی تبلور پیروی نمی‌کند. انباشت بلوری، آلودگی به‌وجود آمده از اختلاط ماگمایی و زینولیت‌های سنگ میزبان و فرآیند جدایش از مهمترین فرآیندهای تکامل ماگمایی هستند که باعث ایجاد شکستگی و کمی انحنا در نمودارهای CSD شده است. نمونه KE3 نیز شکستگی هم روند را نشان می‌دهدکه می‌تواند به عنوان اختلاط ماگمای همجنس تفسیر شود.

قدردانی

این پژوهش حاصل طرح تحقیقاتی "پترولوژی و ژئوشیمی توده نفوذی جنوب کیکی" است که با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است لذا بدین وسیله از همکاری ارزنده آن معاونت محترم قدردانی می‌گردد. به جاست مؤلفین از هیئت تحریریه و داوران محترم مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران نیز سپاسگزاری نمایند.

مراجع

[۱] نبوی م.ح.، *"دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۵۵) ص ۱۰۹.

[2] Hassanzadeh J., Stockli D., Horton B., Axen G., Stockli L., Grove M., Schmitt A., Walker J, *"U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic–Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography,*

magmatism, and exhumation history of Iranian basement", Tectonophysics 451 (2008) 71-96.
[3] Seaman S.J., *"Crystal Clusters, Feldspar Glomerocrysts, and Magma Envelopes in the Atascosa Lookout Lava Flow, Southern Arizona, USA: Recorders of Magmatic Events"*, Journal of Petrology 41 (2000) 693-716.
[4] Higgins M.D., *"Origin of anorthosite by textural coarsening: Quantitative measurements of a natural sequence of textural development",* Journal of Petrology 39 (1998) 1307–1325.
[5] Marsh B.D., *"On the interpretation of Crystal Size Distributions in magmatic systems",* Journal of Petrology 39 (1998) 553–600.
[6] Jerram D.A., Higgins M.D., *"3D Analysis of rock textures: quantifying igneous microstructures"*, Elements 3 (4) (2007) 239–245.
[7] Rowe T., Kappelman J., Carlson W.D., Ketcham R.A., Denison C., *"High-resolution computed tomography; a breakthrough technology for earth scientists",* Geotimes 42 (1997) 23-27.
[8] Jerram D.A., Mock A., Davis G.R., Field M., Brown R.J., *"3D crystal size distributions: A case study on quantifying olivine populations in kimberlites"*, Lithos 112S (2009) 223- 235.
[9] Hezel D.C., Elangovan P., Viehmann S., Howard L., Abel R.L., Armstrong R., *"Visualization and quantification of CV chondrite petrography using micro-tomography",* Geochimica et Cosmochimica Acta 116 (2013) 33-40.
[10] Cashman K.V., *"Textural constraints on the kinetics of crystallization of igneous rocks*", In Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy 24 (1990) 259–314.
[11] Marsh B., *"Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization"*, I. Theory. Contributions to Mineralogy and Petrology 99 (1988) 277–291.
[12] Cashman K.V., Marsh B.D., *"Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallisation II. Makaopuhi lava lake",* Contributions to Mineralogy and Petrology 99 (1988) 292–305.
[13] Cashman K.V., *"Relationship between plagioclase crystallisation and cooling rate in basaltic melts",* Contributions to Mineralogy and Petrology 113 (1993) 126–142.
[14] Resmini R.G., Marsh B.D., *"Steady-state volcanism, paleoeffusion rates, and magma system volume inferred from plagioclase crystal size distributions in mafic lavas; Dome Mountain, Nevada",* Journal of Volcanology and Geothermal Research 68(4) (1995) 273–296.
[15] Higgins M.D., *"Verification of ideal semi-logarithmic, lognormal or fractal crystal size distributions from 2D datasets"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 154(2006a) 8-16.
[16] Higgins M.D., Roberge, J., *"Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Montserrat: evidence for dynamic crystallisation/textural coarsening cycles",* Journal of Petrology 44 (2003) 1401–1411.
[۱۷] مسعودي ف.، منفردي ب.، *"تخمين زمان رشد و سرعت هسته‌بندي پلاژيوکلازهاي واحد آندزي_بازالت در منطقه چهار گنبد، شمال شرق سيرجان با روش توزيع اندازه بلور (CSD)"*، پانزدهمين همايش بلورشناسي و کاني‌شناسي ايران، (۱۳۸۶).
[۱۸] مسعودي ف.، منفردي ب.، *"کاربرد روش (CSD) براي تعيين سهم حجمي بلورهاي پلاژيوکلاز آندزي بازالت‌هاي منطقه جاجرم"*، دومين همايش تخصصي زمين‌شناسي دانشگاه پيام نور، (۱۳۸۷).
[19] Jackson E.D., *"Primary textures and mineral associations in the ultramafic zone of the Stillwater complex, Montana",* US Geological Survey Professional Paper 358 (1961) 106.
[20] Higgins M.D., *"Measurement of crystal size distributions",* American Mineralogist 85(2000) 1105–1116.
[21] Higgins M.D., *"Closure in crystal size distributions (CSD), verification of CSD calculations, and the significance of CSD fans",* American Mineralogist 87 (2002a) 171–175.
[22] Higgins M.D., *"Determination of crystal morphology and size from bulkmeasurements on thin sections: numerical modeling",* American Mineralogist 79 (1994) 113–119.
[۲۳] رحمتی ایلخچی م.، ندیمی ح.، سهندی م.، بهره‌مند م.، *"تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رزوه"*، سازمان زمین-شناسی کشور، (۱۳۸۲).
[۲۴] حاجی حسینی ع.، قاسمی ا.، کریمی‌نیا س.، سعیدی ا.، *"تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بسطام"*، سازمان زمین-شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۲).
[۲۵] افتخار نژاد خ.، آقانباتی ع.، *"تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ جاجرم"*، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۹۹۲).

[۲۶] نوایی ا.، صالحی راد م.،مجیدی ب.، *"نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ خارتوران"*، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۹۹۲).
[۲۷] کاظمی ک.، کنعانیان ع.، سرجوقیان ف.، *"شواهد سنگ-نگاری دگرشکلی دما بالا در حاشیه‌ی توده‌ی گرانیتوئیدی کیکی، ایران مرکزی"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۹۳) ص ۳-۱۴.
[28] Saltikov S.A., *"The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distributions of their sections. In H. Elias, Ed. Proceedings of the Second International Congress for Stereology"*, Springer-Verlag, Berlin (1967) 163–173.
[29] Sahagian D.L., Proussevitch A.A., *"3D particle size distributions from 2D observations; stereology for natural applications"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 84 (3–4) (1998) 173–196.
[30] Van der Zwan F.M., Chadwick J.P., Troll V.R., *"Textural history of recent basaltic-andesites and plutonic inclusions from Merapi volcano"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 166 (2013) 43-63.
[31] Resmini R.G., *"Modeling of crystal size distributions (CSDs) in sills"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 161 (2007) 118-130.
[32] Rannou E., Caroff M., *"Crystal Size Distribution in Magmatic Rocks: Proposition of a Synthetic Theoretical Model"*, Journal of Petrology 51 (2010) 1087-1098.
[33] Higgins M.D., *"Use of appropriate diagrams to determine ifcrystal size distributions (CSD) are dominantly semi-logarithmic,lognormal or fractal (scale invariant)"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006b) 8–16.
[34] Delesse M.A., *"Procedé méchanique pour déterminer la composition des roches"*, Comptes Rendus de l'academie des sciences (Paris) 25 (1847) 544–545.
[35] Higgins M.D., Roberge J., *"Three magmatic components in the 1973 eruption of Eldfell volcano, Iceland: evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 161 (2007) 247–260.
[36] Randolph A.D., Larson M.A., *"Theory of Particulate Processes"*, second edition, New York, Academic Press (1988) 369 pp.
[37] Xisheng Xu., Chun Wan D., Wuxian L., Xinmin Z., *"Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian SE China: the significance of the gabbro-diorite–granite association"*, Lithos 46 (1999) 299–315.
[38] Hanson G.N., *"The application of trace elements to the petrogenesis of Igneous rocks of granitic composition"*, journal of Earth and planetary science letters 38 (1) (1978) 26-43.
[39] EL-Nisr S.A., EL-Sayed M.M., Saleh G.M., *"Geochemistry and petrogenesis of Pan-African late- to postorogenic younger granitoids at Shalatin-Halaib, south Eastern Desert, Egypt"*, Journal of African Earth Sciences 33 (2001) 261-282.
[40] Chen B., Jahn B.M., Ye K., Liu J.B. *"Cogenetic relationship of the Yangkou gabbro-to-granite unit, Su-Lu terrane"*, J. Geol. Soc. London 159 (2002) 457-467.
[۴۱] کاظمی ک.، *"پترولوژی و ژئوشیمی توده نفوذی جنوب کی‌کی (جنوب غرب بیارجمند)"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی (گرایش پترولوژی)، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین‌شناسی، (۱۳۹۰) ۱۵۰ صفحه.
[۴۲] حسینی س.ح.، *"پترولوژی و ژئوشیمی گرانیت بند هزار چاه بیارجمند"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده علوم، (۱۳۷۴) ۱۴۷ صفحه.
[۴۳] مسعودی ف.، قربانی م.، رحیم‌زاده ب.، *"مطالعه شرایط فیزیکي و تحولات تبلور ماگما در سنگ‌هاي ولکانیکي شرق قزوین"*، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۱ (۱۳۸۸) ص ۶۷-۷۵.