

استفاده از مدل‌سازی عددی به منظور برآورد سرعت هسته‌بندی و زمان رشد میکروولیت‌های پلاژیوکلاز در روانه‌های بازالت کواترنری گندم بریان، شمال خاور کرمان

داود رئیسی^{۱*}، سارا درگاهی^۲، سید حسام‌الدین معین‌زاده^۲ و محسن آروین^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۱۷

چکیده

گندم بریان نوعی سرتخت (Messa) پوشیده از روانه‌های گدازه‌ای بسیار تیره رنگ است که به عنوان بخشی از فعالیت آتشفشانی زمان کواترنری ایران شناخته می‌شود. این روانه‌ها که از نوع آلکالی‌یونین بازالت‌های سالم یا با دگرسانی کم هستند حدود ۴۸۰ کیلومتر مربع از بخش جنوبی کویر لوت در شمال خاور کرمان را در برمی‌گیرند. بافت کلی جریان‌های بازالتی پورفیری تا گلومروپورفیری با زمینه اینترسرتال تا اینترگرانولار است. کانی‌های اصلی جریان شامل درشت‌بلورهای الیون و کلینوپیکروکسن همراه با میکروولیت‌های پلاژیوکلاز هستند. میکروولیت‌های پلاژیوکلاز به عنوان کانی اصلی این سنگ‌ها شناخته می‌شوند. با پردازش تصاویر مقاطع نازک و با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور (CSD)، شکل سه‌بعدی بلورهای پلاژیوکلاز و همچنین زمان رشد و سرعت هسته‌بندی این بلورها برآورد شد. بر این اساس شکل میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، تخته‌ای و نسبت محورهای کوتاه: متوسط: بلند به ترتیب برابر با ۱:۱۰:۱۰ مشخص شد. یکنواختی نمودار CSD و شب‌ثابت آن تأثیر بسیار کم فرایندهای فیزیکی همچون آمیختگی ماگمایی را در هنگام صعود ماگمای بازالتی و رسیدن آن به سطح زمین نشان می‌دهد. بر اساس این محاسبات، زمان رشد (t) و سرعت هسته‌بندی (J) از دو مدل متفاوت ارائه شده در روش CSD به ترتیب برابر با ۲/۵۳ تا ۳/۲۱ سال و $10^{-4} \text{mm}^3/\text{s}^{-1}$ تا $10^{-4} \text{mm}^3/\text{s}^{-1}$ برآورد شد. نتایج حاصل با طبیعت ماگماهای آلکالی‌بازالتی همخوانی کامل دارد.

کلیدواژه‌ها: سرتخت گندم بریان، پراکندگی اندازه بلور، شکل سه‌بعدی، آمیختگی ماگمایی

*نویسنده مسئول: داود رئیسی

E-mail: d.raeisi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بیشتر اطلاعات در ارتباط با تاریخ سرد شدن بازالت‌ها از طریق مطالعات بافتی بر روی آنها به دست آمده است. توسعه بافت در سنگ‌های بازالتی تحت کنترل عواملی همچون آهنگ سرد شدن، جریان سیالات، ترکیب مایع، آهنگ رشد و هسته‌بندی، هسته‌بندی هتروژن و ته‌نشینی یا شناوری بلورها است. در علم سنگ‌شناسی به طور کلی طبیعت سنگ از آغاز تشکیل تا فرایندهایی که طی رشد با آنها مواجه شده است و انجماد نهایی سنگ، همگی مورد بررسی قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری‌های شیمیایی و ایزوتوپی حجم زیادی از اطلاعات سنگ‌شناختی کنونی را در بر می‌گیرند، اما نقش روابط بافتی را در این بین نباید نادیده گرفت. یکی از متداول‌ترین روش‌ها در اندازه‌گیری‌های بافتی، روش پراکندگی اندازه بلور (Crystal Size Distribution) است که به اختصار به عنوان روش CSD شناخته می‌شود. در واقع بازتاب‌کننده ویژگی ذاتی یک سنگ همچون چگالی و یا ترکیب سنگ است (Higgins, 2006). این روش یک پنجره حیاتی به فرایندهای ماگمایی باز می‌کند، چرا که پراکندگی اندازه بلور بازتابی از تاریخ تبلور آن است (Higgins & Roberge, 2003). تبلور ماگما موضوعی است که به نظر می‌رسد اولین بار توسط جیمز هال در سال ۱۸۰۵ بر اساس کارهای تجربی روی بافت‌ها مورد بحث قرار گرفت (Cashman & Marsh, 1988). در روش CSD به طور کلی یک دید از آخرین مرحله تحول بافتی در سنگ فراهم می‌شود، اگر چه گاهی اطلاعات کمی از بافت‌های پیشین موجود نیز حاصل می‌شود (Marsh, 1988). مطالعه بر روی توزیع اندازه بلورها در سنگ‌های آذرین و دگرگونی به منظور بررسی سرعت و زمان تبلور به طور گسترده در دهه نود میلادی مورد استفاده توجه قرار گرفته است (Marsh, 1998; 1988). در واقع مطالعات یاد شده شرایط فیزیکی حاکم در طی تبلور ماگما را مشخص می‌کند که این نتایج کامل‌کننده مطالعات شیمیایی هستند. گفتنی است که تئوری CSD اولین بار توسط Randolph & Larson (1971) ارائه شد و اولین کاربرد زمین‌شناسی این تئوری توسط Cashman & Marsh (1988) در دریاچه گدازه‌ای ماکوپولی انجام شد.

در این مطالعات (Higgins, 2006; Morgan & Jerram, 2006). در این مطالعات (Cashman & Marsh (1988) چگالی هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز از ماگمای بازالتی را اندازه‌گیری کردند و میزان آن را تابع زمان و آهنگ سرد شدن دانستند. اگر چه مطالعات CSD توسط (Cashman & Marsh (1988) آغاز گشت، اما هیچکدام روی نظم فضایی بلورها کار نکرده‌اند و مطالعات به دو بعد مقطع نازک محدود بودند. اما در حقیقت بلورها دارای سه بعد هستند و اندازه سه‌بعدی بلور باید برای مطالعات پراکندگی اندازه بلور به کار رود تا برآورد نزدیک‌تری برای زمان سرد شدن و تبلور بلورها فراهم شود. به منظور برآورد شکل سه‌بعدی بلورها (Higgins (1994) یک مدل‌سازی عددی بر پایه اجسام مکعبی ارائه داد. (Morgan & Jerram (2006) نیز پژوهش‌های کامل‌تری به منظور برآورد شکل سه‌بعدی بلورها ارائه دادند. در مطالعه کنونی از هر دو روش ارائه شده برای برآورد بهتر پراکندگی اندازه بلورها (دو بعدی و سه‌بعدی) استفاده شده است. در ابتدا اندازه‌گیری‌های دو بعدی مقاطع انجام و سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی، شکل سه‌بعدی بلورها پلاژیوکلاز برآورد و در پایان با بهره‌گیری از نرم‌افزار CSD correction 1.39، زمان رشد و هسته‌بندی آنها تعیین شد. دلیل انتخاب پلاژیوکلاز در پژوهش حاضر آن است که این بلور در محدوده زیادی از شرایط ماگمایی پایدار است. وجود تغییرات احتمالی ترکیبی در آشیانه ماگمایی، در بلورهای پلاژیوکلاز به ثبت می‌رسد. شواهد ژئوشیمیایی موجود در پلاژیوکلاز همچون تغییرات ترکیب آنورتیت از مرکز تا حاشیه بلور می‌تواند به عنوان تغییر در ترکیب ماگما در آشیانه ماگمایی در اثر فرایندهای فیزیکی همچون تفریق بلوری و یا تزریق ماگمایی تفسیر شود.

۲- زمین‌شناسی صحرایی

سرتخت گندم بریان در حاشیه جنوبی کویر لوت و در امتداد گسل نابیند به صورت

در این معادله، t_f زمان اقامت بلور در ماگمای فوران کرده به سال، G آهنگ رشد بلور بر اساس میلی‌متر بر ثانیه، m شیب نمودار و حاصل 31536000 برای تبدیل واحد ثانیه به سال است (Cashman & Marsh, 1988). شیب زیاد نمودار نشان‌دهنده زمان اقامت کم در سامانه است که درجه بیشتری از فروچاپیدگی (Undercooling) را نشان می‌دهد و یک شیب صاف‌تر، یک زمان اقامت بیشتر در سامانه را نشان می‌دهد که با فروچاپیدگی بالاتری همراهی می‌شود. میزان هسته‌بندی بلورها نیز در این نمودارها قابل برآورد است؛ به طوری که هرچه بلورها بزرگ‌تر باشند هسته‌بندی کمتری خواهند داشت و بالعکس.

Cashman (1993) آهنگ رشد پلاژیوکلاز در ماگمای بازالتی را بررسی کرد و متوجه شد آهنگ سرد شدن متغیر و برای یک آهنگ سرد شدن ۳ ساله، آهنگ رشد 10^{-9} mm/s و برای سرد شدن ۳۰۰ ساله، آهنگ رشد 10^{-11} mm/s است. به طور کلی ماگماهایی که گرانیروی بالاتری دارند، آهنگ انتشار کمتری خواهند داشت. افزایش آهنگ رشد به میزان یک واحد، زمان اقامت را به اندازه ۱۰ برابر کاهش می‌دهد و بالعکس. این مسئله نشان دهنده حساسیت زمان اقامت به مقدار آهنگ رشد است. CSD برای مطالعاتی همچون بررسی آمیختگی ماگمایی، وضعیت تفریق بلوری، تغییر شکل ماگما و بلورها و شکستگی آنها و همچنین زمان و سرعت سرد شدن و بالا آمدن ماگما و توقف تبلور هنگام بالا آمدن کاربرد دارد (Higgins, 2000).

۳-۱. مبانی نظری مدل‌سازی عددی به منظور برآورد شکل سه‌بعدی بلورها

برای رسم دقیق نمودار CSD، اندازه‌گیری و تعیین شکل سه‌بعدی از دوبعد نیاز است تبدیل اندازه‌های دو بعدی به سه‌بعدی یک کار پیچیده استرئولوژی (Stereological) است (Mock and Jerram, 2005). استرئولوژی شاخه‌ای از علم ریاضی است که کاربری اصلی آن در راستای مطالعات زیستی است؛ اما با هدف زمین‌شناسی نیز توسط Peterson (1996)؛ Cashman and Marsh (1988)؛ Proussevitch & Sahagian (2001) مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی می‌توان این گونه بیان کرد که داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری بلور در یک مقطع نازک، در واقع تنها اندازه‌گیری سطح مقطع بلور در امتداد سطح برش است (شکل ۳)، در حالی که در مباحث تحلیلی فرایندهای سنگ‌شناختی، داده‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی مورد نیاز است (Higgins, 2000).

در بیشتر مواد طبیعی اندازه بلورها متغیر است. متغیر بودن نسبت محور کوتاه تقسیم بر محور متوسط S/L توسط Cashman (1990) به عنوان بازتابی از تغییر شرایط تبلور با زمان و همچنین افزایش تحرک و جنبش ماگما هنگام فوران مطرح شده است. در بین عامل‌هایی که شکل بلور را کنترل می‌کنند ساختار بلور و درجه پتانسیل شیمیایی اهمیت بیشتری دارند؛ به عبارت دیگر شکل و رفتار بلور توسط شرایط فیزیکی- شیمیایی کنترل می‌شوند (Higgins, 1996).

Higgins (1994) اولین بار برای تعیین ابعاد بلور در یک مکعب راست گوشه، یک صفحه معرف کانی در مقطع نازک سنگ‌ها با جهت‌یابی اختیاری فرض و ابعاد آن را محاسبه کرد. در روش پیشنهادی وی، بیشترین نسبت عرض به طول در مقطعی که دورترین لبه‌های بلور را قطع کند، پیدا می‌شود. مقدار این نسبت برابر $(L_2+I_2)1/2S$ است. Higgins (1994) به طور شاخص برای S عدد یک و برای L و I، اعداد ۱، ۲، ۵، ۱۰ را برای جهت‌دهی‌های محدود و غیر محدود در نظر گرفت. شکل بلور (متغیرهای I، S و L) از داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری عرض به طول بلورها در برابر فراوانی آنها به دست می‌آید.

دومین بار Morgan & Jerram (2006) طرحی جدید از مدل‌سازی ارائه دادند که در آن برای تعیین ابعاد بلور، نسبت عرض به طول را در برابر فراوانی رسم می‌کنند. برای کانی‌های ایزومتریک یا Massive یک پیک پهن در نسبت عرض به طول یا محورهای short/intermediate وجود دارد و بلورها حالت منشوری دارند

دستی پوشیده شده از گدازه‌های بازالتی است. این بازالت‌ها را می‌توان به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم کرد. در بخش شمالی بازالت‌ها فرسایش بیشتری متحمل شده و در زیر رسوبات نئوژن قرار گرفته‌اند، بنابراین از نظر سنی باید از این رسوبات قدیمی‌تر به شمار آیند. در این بخش چهار مخروط آتشفشانی نیز خودنمایی می‌کنند که ارتباط آنها با بازالت‌ها چندان روشن نیست. بخش جنوبی که دشت بازالتی را شامل می‌شود منطقه‌ای به وسعت تقریبی ۳۵۰ کیلومتر مربع پوشیده از گدازه‌های بازالتی است (شکل‌های ۱ و ۲). این بازالت‌ها به دلیل جوان بودن، دگرسانی کمی متحمل شده‌اند و بر روی رسوبات نئوژن قرار گرفته‌اند و به طور مشخص از بازالت‌های بخش شمالی جوان‌تر هستند. قرارگیری جریان‌های بازالتی و مخروط‌های خروجی در امتداد گسل ناپیند نقش گسل یادشده را در خروج ماگما آشکار می‌سازد. سامانه گسلی موجود در منطقه از روند شمالی- جنوبی پیروی می‌کند و خروج جریان نیز در همین امتداد بوده است. سنگ‌های بازالتی موجود در دشت بازالتی ویژگی‌های بافتی تقریباً یکسانی دارند. این سنگ‌ها همگی آفاتیکیک و حاوی درشت‌بلورهای بسیار کم الیوین هستند. سنگ‌ها به طور کلی تیره رنگ هستند و آثار ایدنگزیتی شدن الیوین‌ها نیز در آنها دیده می‌شود.

۳-۲. نظریه پراکندگی اندازه بلور (CSD)

برای محاسبه بر اساس آن پراکندگی اندازه بلور در سنگ‌ها Marsh (1988) و Cashman & Marsh (1988) یک تئوری ارائه دادند که لگاریتم طبیعی چگالی تراکمی بلور (n) در برابر طول بلور (L) رسم می‌شود و خط حاصل CSD نامیده می‌شود. این روش به طور وسیع در تفسیر فرایندهای ماگمایی بر اساس بافت‌های مشاهده شده در سنگ آذرین درونی و بیرونی استفاده شده است. در مورد سنگ‌های آذرین، CSD ممکن است اطلاعاتی از تاریخچه سرد شدن، آهنگ رشد بلورها و فرایندهای ماگمایی همچون دمای سکونت و هضم بلورها فراهم کند. همچنین CSD ممکن است برای پی‌بردن به دینامیک مخزن ماگمایی و جزئیات تاریخچه فوران نیز به کار رود. متغیرهای بافتی همچون اندازه چیره بلورها، چگالی بلورها و حجم جزئی بلورها از سیر قهقراپی خط CSD مشتق گرفته می‌شوند (Higgins, 2000; Cashman & Marsh, 1988; Cashman, 1990; Higgins, 1994; Mock & Jerram, 2005; Higgins, 2006; 1996; Jerram & Higgins, 2007). شناسایی مراحل مجزای سرد شدن ماگما برای مشخص کردن این که انجماد ماگما از یک سامانه تبلور منفرد و یا سامانه انجماد با دو تبلور متفاوت (آمیختگی ماگمایی) حاصل شده است نیز با این روش قابل بررسی است (Monfaredi et al., 2009). هدف اصلی CSD، بررسی روابط بین اندازه بلور و چگالی تراکمی بلور است و منحنی حاصل یک ارتباط مشخص را نشان می‌دهد. این نمودارها تغییرات در فراوانی و اندازه بلور را به عنوان تابعی از زمان جریان در سامانه نشان می‌دهند (Marsh, 1988). هدف اصلی مطالعات CSD بررسی ارتباطات بین اندازه بلور (mm) و چگالی تراکمی بلور (n) است. پراکندگی اندازه بلوری برای به دست آوردن اطلاعات کمی از ابعاد و ارتباط بلورها در سنگ‌های آذرین استفاده می‌شود. در نمودار اندازه در برابر چگالی تراکمی عموماً یک ارتباط آشکار بین متغیرها دیده می‌شود (Cashman & Marsh, 1988; Higgins, 1994; 1998; 2000). این نمودارها تغییرات در فراوانی و اندازه بلورها را به عنوان تابعی از زمان اقامت آنها در سامانه و تابعی از خروج آنها از سامانه توصیف می‌کنند. نمودار حاصل برای بلورها همیشه به صورت ایده‌آل و مستقیم نیست؛ به طوری که گاهی تحت اثر عواملی همچون آمیختگی و یا تغییر سرعت تبلور می‌تواند خطوط به صورت شکسته درآیند و یا شیب‌های متفاوت نشان دهند. ارتباط خطی شیب نمودار با میانگین زمان اقامت بلور در سامانه ارتباط دارد که این زمان با استفاده از یک معادله ساده تعیین می‌شود:

$$t_f = -1/(G \times m \times 31536000)$$

پایدار و در سامانه باز تاریخ تبلور ساده به صورت یک خط راست در سامانه نیمه لگاریتمی ظاهر می‌شود که معادله آن به صورت زیر است:

$$n = n_0 \exp(-L/Gt)$$

در این معادله $n = dn/dL$ است که N مساوی با تعداد کل بلورهای با اندازه کمتر از L و L اندازه بلورها در هر بازه است. G میانگین آهنگ رشد خطی و t میانگین زمان اقامت بلور در سامانه است. مقدار n_0 چگالی هسته‌بندی در نقطه‌ای است که L به صفر میل می‌کند. آهنگ هسته‌بندی J از راه $n_0 = J/G$ به دست می‌آید که در آن n_0 کمیت ثابت است و از تقاطع محور چگالی تراکمی اندازه بلور به دست می‌آید. با توجه به معادلات بیان شده و با در نظر گرفتن میزان آهنگ رشد 10^{-9} mm/s و شیب نمودار و مقدار n_0 ، زمان اقامت و سرعت هسته‌بندی به ترتیب برابر با $2/53$ سال و 10^{-9} mm/s¹ مشخص شد (جدول ۱). در روش دوم پس از تعیین شکل سه‌بعدی بلور با استفاده از روش مدل‌سازی عددی، برای تعیین شیب نمودار و یافتن نقطه n_0 از نرم‌افزار 1.39 CSD corrections بهره‌گرفته و سپس بر اساس آن میانگین زمان اقامت میکروولیت‌های پلاژیوکلاز در سامانه و سرعت هسته‌بندی آنها به ترتیب $3/21$ سال و 10^{-9} mm/s¹ تعیین شد (جدول ۱). گفتنی است که در هنگام استفاده از این نرم‌افزار باید اطلاعاتی از میزان گردش بلور، میزان جهت‌یافتگی نمونه‌ها، برآورد شکل سه‌بعدی، درصد حفرات در نمونه‌های اندازه‌گیری شده و درصد پلاژیوکلاز در مقطع مشخص شوند و در پایان نمودار با توجه به داده‌های بیان شده توسط نرم‌افزار رسم می‌شود (شکل ۱۲).

۴- نتیجه‌گیری

در ماگمای بازالتی گندم بریان با توجه به سرعت سریع سرد شدن، زمان سکونت کافی برای تبلور بلورها وجود ندارد، بنابراین بلورهای پلاژیوکلاز که نسبت به الیوین و پیروکسن سرعت رشد کمتر و در نتیجه سرعت هسته‌بندی بیشتری دارند، رشد کمتری خواهند داشت. علت اصلی پرشیب بودن منحنی، سرعت زیاد سرد شدن ماگمای بازالتی است که به تشکیل میکروولیت‌های کوچک منجر شده است. با توجه به آن که ماگماهایی که چسبندگی کمتری دارند آهنگ انتشارشان بیشتر است، بنابراین در بازالت‌های گندم بریان با توجه به چسبندگی کم آنها، قابلیت هسته‌بندی زیاد بوده است، اما بلورها رشد کمی حاصل کرده‌اند. به عبارتی سرعت رشد بلورهای آنها از سرعت هسته‌بندی‌شان بیشتر است. اثر آهنگ سرد شدن به طور کلی در ارتباط با آهنگ هسته‌بندی یا چگالی هسته‌بندی بحث می‌شود. اگر آهنگ هسته‌بندی کم و آهنگ رشد زیاد باشد، بلورهای بزرگ پدید می‌آیند، اما اگر آهنگ هسته‌بندی زیاد باشد منجر به ایجاد بلورهای کوچک‌تر می‌شود. به عبارت دیگر اندازه بلورها تابعی از میزان نسبت سرعت نطفه‌بندی به سرعت رشد آنها است، به طوری که کانی‌هایی که به سختی نطفه تشکیل می‌دهند، اما به آسانی رشد می‌کنند بلورهای بزرگی را به وجود می‌آورند، اما در صورتی که عمل نطفه‌بندی به راحتی صورت گیرد بلورهای کوچک اما فراوان ظاهر می‌شوند. در ماگمای بازالتی گندم بریان بلورهای الیوین و پیروکسن فاز ابتدایی تبلور را تشکیل داده و نطفه‌بندی کم اما سرعت رشد بالا داشته‌اند، بنابراین شکل‌های چندوجهی و درشت پدید آورده‌اند. حال آن که پلاژیوکلازها در فاز دوم تبلور ایجاد شده‌اند که پیدایش کانی‌هایی با تعداد فراوان و اندازه کوچک نشانه سرد شدن سریع و نطفه‌بندی فراوان است. یکنواختی نمودار CSD و شیب ثابت آن، تأثیر بسیار کم فرایندهای فیزیکی همچون آمیختگی ماگمایی در ماگمای بازالتی هنگام صعود و رسیدن به سطح زمین را نشان می‌دهد. بر اساس پژوهش حاضر، زمان رشد (t) و سرعت هسته‌بندی (J) برای بازالت‌های گندم بریان به ترتیب برابر با $2/53$ سال و 10^{-9} mm/s¹ بر اساس روش اول و $3/21$ سال و 10^{-9} mm/s¹ بر اساس روش دوم برآورد شد. نتایج حاصل با طبیعت ماگماهای آلکالی بازالتی همخوانی کامل دارد.

(شکل ۴)، اما بلورهای تخته‌ای (tabular) یک پیک مشخص در S/I دارند (شکل ۵). محور کوچک S را ثابت «یک» در نظر می‌گیرند. در هر دو حالت یاد شده محور متوسط نیز قابل تعیین است؛ اما محور بزرگ روی نمودار، تنها از پیک کمکی که نشان دهنده I/L است مشخص می‌شود. گاهی این پیک در پراکندگی طبیعی، کوچک و یا نامشخص است، بنابراین از تقریب دیگری بهره می‌برند که محاسبه I و L از راه چولگی (Skewness) پراکندگی است. در واقع یک تطابق بین چولگی و I/L برای بیشتر جامدها به جز آنهایی که تقریباً هم‌بعدند وجود دارد (Higgins, 2006). چولگی می‌تواند برای برآورد متغیر L به کار رود حتی اگر زیاد دقیق نباشد. با این حال بهترین راه یافتن مقدار L در مقاطع نازک است. برای دانه‌هایی که شکل تخته‌ای دارند نسبت عرض به طول (W/L) برابر با نسبت محور کوتاه به متوسط ($S/I=W/L$) است (Higgins, 2000; 2006).

$$\text{چولگی} = \frac{\text{mean } W/L - \text{mode } W/L}{\text{Standardienation } W/L}$$

$$\frac{I}{L} = 0.5 + \text{چولگی}$$

با این حال این معادله نتایج مناسبی برای اشکال هم‌بعد نمی‌دهد. Garrido et al. (2001) روش دیگری برای تعیین I/L نشان دادند. آنها یک ارتباط گرافیکی بین میانگین مد W/L و I/L برقرار کردند (Higgins, 2006).

$$\frac{I}{L} = \frac{(\text{mean } w/L + 1.9(\text{mode } w/L) - 2 - 1.49(\text{mode } w/L) + 0.056)}{0.126}$$

با بهره‌گیری از معادلات و مثال‌های بیان شده می‌توان برآورد مناسبی از شکل سه‌بعدی بلورها و با استفاده از نرم‌افزار 1.39 CSD correction، اندازه‌گیری دقیق‌تری از میزان اقامت بلور در سامانه و آهنگ هسته‌بندی بلورها به دست آورد.

۳-۲. نتایج تحلیل‌های دوبعدی برای میکروولیت‌های پلاژیوکلاز

پس از تهیه عکس دیجیتالی از مقاطع نازک، به منظور پوشش بهتر، عکس‌ها با نرم‌افزار فتوشاپ (Adobe Photoshop CS6) کنار هم چیده و میکروولیت‌ها به طور مجزا رسم و اندازه‌گیری شدند (شکل‌های ۶ و ۷). تعداد بلورهای اندازه‌گیری شده (۵۱۹ عدد) برای یک بررسی آماری مناسب است، چرا که Morgan & Jerram (2006) تعداد بلور اندازه‌گیری شده بیش از ۱۰۰ عدد را برای نتیجه‌گیری قابل قبول در مطالعات CSD پیشنهاد می‌دهند. بر اساس فراوانی رده‌های مختلف و تراکم بلورها، نمودار لگاریتم طبیعی چگالی تراکمی (n) در برابر اندازه بلور (L) رسم می‌شود. شیب این نمودار مساوی با $(-1/GT)$ و محل تقاطع آن با محور چگالی تجمعی، با چگالی هسته‌بندی (n_0) که یک کمیت ثابت است برابر می‌باشد. در اینجا $L=0$ است و می‌توان معادله سرعت هسته‌بندی (J) در لحظه توقف بلور را مشخص کرد که J از معادله ($J=n_0/G$) حاصل می‌شود. آهنگ رشد با توجه به مطالب بیان شده برای ماگمای بازالتی به دلیل سرعت سرد شدن بالا، 10^{-9} mm/s در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸).

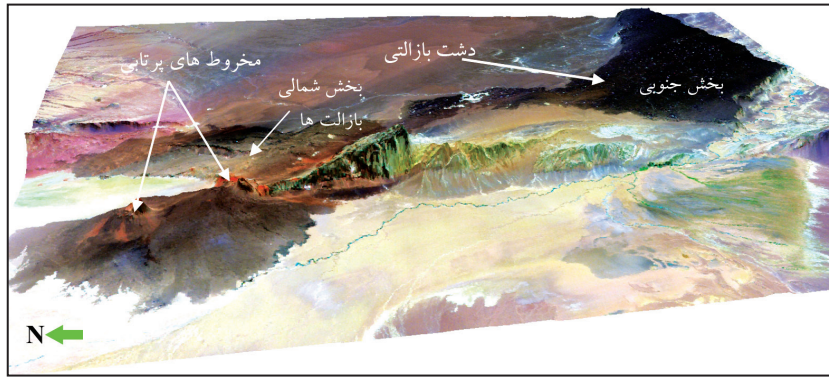
۳-۳. نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی میکروولیت‌های پلاژیوکلاز

در روش دوم، برآورد زمان اقامت و سرعت هسته‌بندی میکروولیت‌های پلاژیوکلاز با بهره‌گرفتن از مدل‌سازی سه‌بعدی و استفاده از نرم‌افزار 1.39 CSD correction انجام شد. تعداد بلورهای اندازه‌گیری شده در مجموع ۳۱۰ عدد است (شکل‌های ۹ و ۱۰). داده‌ها در نرم‌افزار Ecel 2007 وارد و نسبت S/I بلورها تعیین شد (شکل ۱۱).

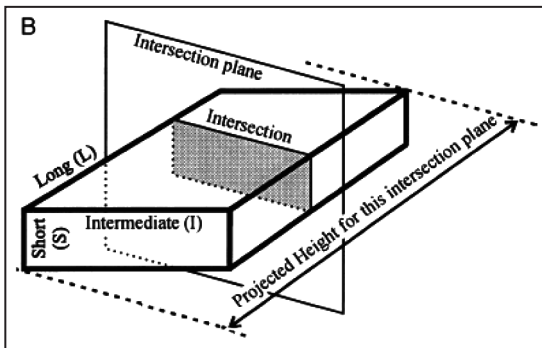
به منظور رسم نمودار، اعداد به دست آمده در بازه‌های مناسب جدا شدند. سپس با توجه به پیک مشخص و مقایسه با آزمایش‌های پیشین، نسبت محورهای کوتاه، متوسط و بلند (long:intermediate:short) به دست آمد. با توجه به نمودار تهیه شده، شکل بلورهای پلاژیوکلاز، تخته‌ای (tablet) تعیین و ابعاد بلور (۱۰:۱۰:۱) مشخص شد (شکل ۱۱).

۳-۴. نتایج تحلیل‌ها

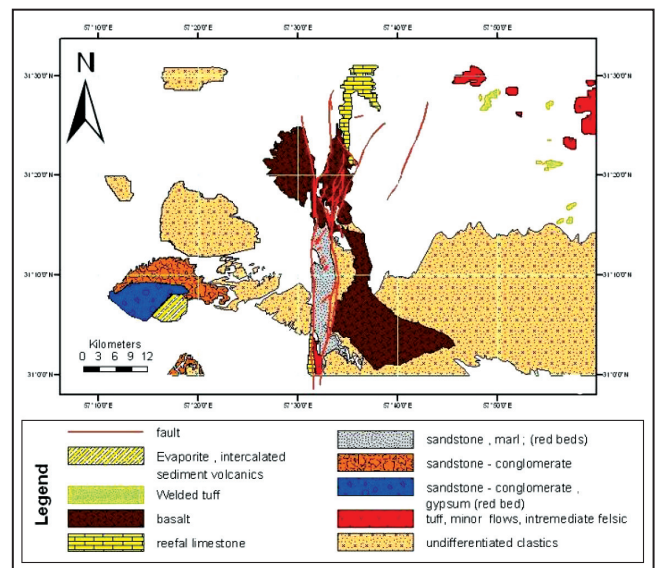
روش دوبعدی: پراکندگی اندازه بلور بازالتی از تاریخ تبلور آن است. در شرایط



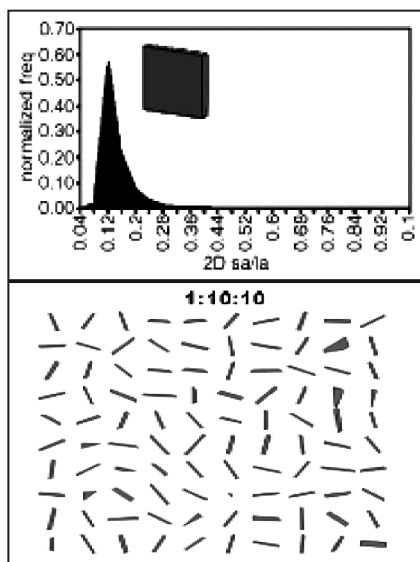
شکل ۱- تصویر لندست سه‌بعدی از دشت بازالته و مخروط‌های آتشفشانی (تصویر لندست برگرفته شده از، www.usgs.gov)



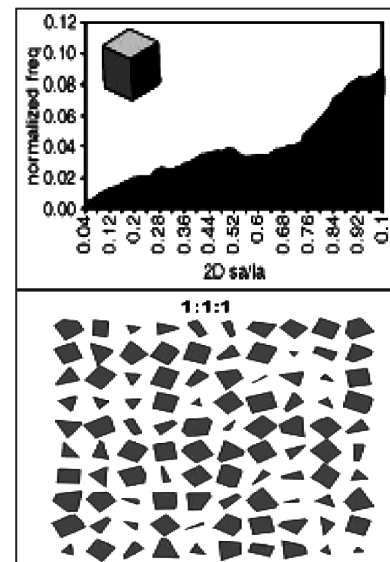
شکل ۳- در مقطع سنگ، ابعاد S و I قابل مشاهده‌اند (Higgins, 2000)



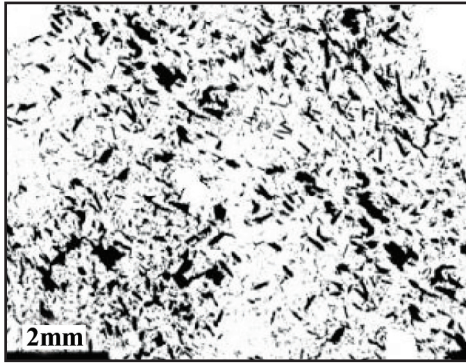
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه گندم بریان (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ ناحیه لکرکوه، سایت سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، www.GSI.ir)



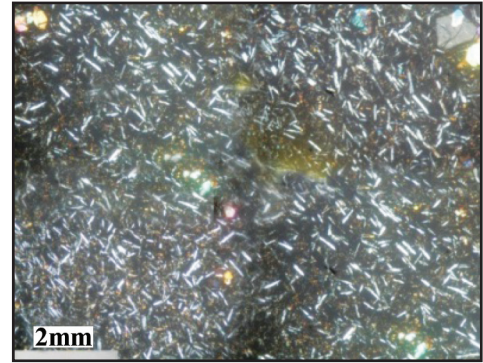
شکل ۵- نمودار نسبت عرض به طول مجموعه‌ای از بلورهای تخته‌ای (Morgan & jerram, 2006)



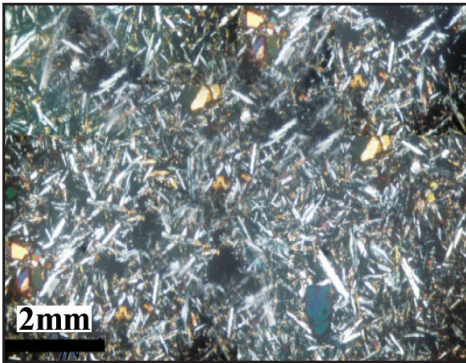
شکل ۴- نمودار نسبت عرض به طول برای بلور منشوری (Morgan & jerram, 2006)



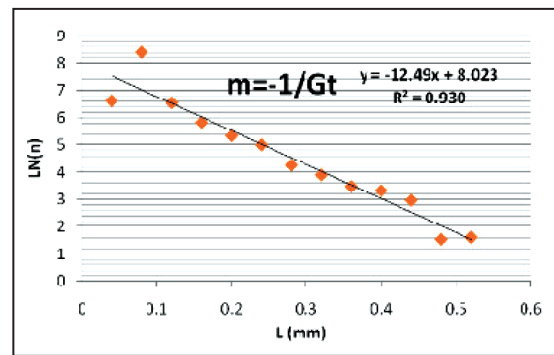
شکل ۷- نمونه الیون بازالت پردازش شده



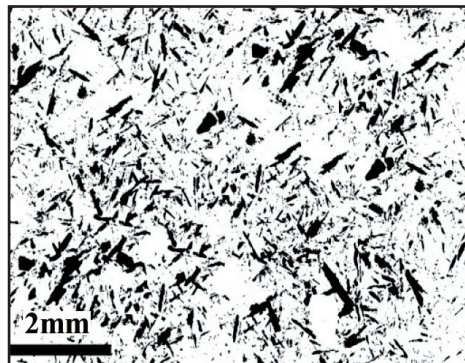
شکل ۶- نمونه الیون بازالت در نور پلاریزه



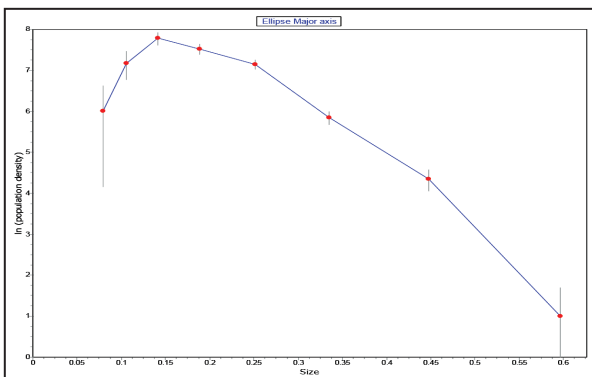
شکل ۹- نمونه مقطع نازک بازالت در نور پلاریزه



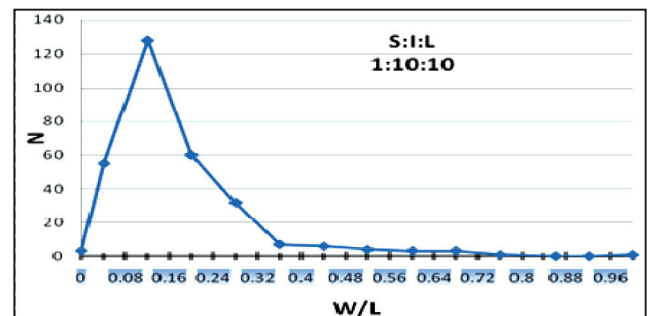
شکل ۸- برآورد ابعاد بلورها (محور کوتاه، متوسط، بلند)



شکل ۱۰- نمونه مقطع نازک بازالت پردازش شده



شکل ۱۲- نمودار حاصل از نرم افزار CSD correction 1.39 (محور افقی اندازه بزرگترین بعد بلور L و محور عمودی چگالی تراکمی Ln(n) است).



شکل ۱۱- نمودار برآورد ابعاد بلورهای پلاژیو کلاز (محور افقی مقدار عرض میکرولیت های پلاژیو کلاز تقسیم بر طول میکرولیت ها در مقاطع میکروسکوپی و محور عمودی فراوانی بلورها در هر بازه است).

جدول ۱- نتایج به دست آمده از روش پراکندگی اندازه برای تعیین زمان رشد و هسته‌های میکروولیت‌های پلاژیوکلاز در بازالت‌های گندم بریان

روش	شیب	عرض از مبدا	زمان رشد (t)	سرعت هسته‌بندی ($J=mm^3/s^4$)	سرعت رشد mm/s^{-1}
اول	-12.49	8.23	2.53 سال	0.17×10^{-9}	$10^{-9} mm/s^{-1}$
دوم	-9.87	9.32	3.21 سال	9.32×10^{-9}	$10^{-9} mm/s^{-1}$

References

- Cashman, K. V. & Marsh, B. D., 1988- Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallisation II. Makaopuhi Lava Lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 292-305.
- Cashman, K. V., 1990- Textural constraints on the kinetics of crystallization of igneous rocks. In: Nicholls, J., Russell, J.K. (Eds.), *Modern methods of igneous petrology: understanding magmatic processes*. Mineralogical Society of America, p: 259–314.
- Cashman, K. V., 1993- Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113: 126–142.
- Garrido, C. J. & Kelemen, P. B., Hirth, G., 2001- Variation of cooling rate with depth in lower crust formed at an oceanic spreading ridge; plagioclase crystal size distributions in gabbros from the Oman ophiolite. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2: 10.1029/2000GC000136.
- Higgins, M. D., 2002- Closure in crystal size distribution (CSD), verification of CSD calculations and the significance of CSD fans. *American Mineralogist*, 87, 160–164.
- Higgins, M. D. & Roberge, J., 2003- Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Montserrat: evidence for dynamic crystallization textural coarsening cycles. *Journal of Petrology*, 44: 1401-1411. .
- Higgins, M. D., 1994- Numerical modeling of crystal shapes in thin sections: estimation of crystal habit and true size. *American Mineralogist*, 79: 113–119.
- Higgins, M. D., 1996- Magma dynamics beneath Kameni Volcano Thera Greece, as revealed by crystal size and shape measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70: 37-48.
- Higgins, M. D., 1998- Origin of anorthosite by textural coarsening: quantitative measurements of ural sequence of textural development. *Journal of Petrology* 39: 1307–1325.
- Higgins, M. D., 2000- Measurement of crystal size distributions. *American Mineralogist*, 85: 1105-1116 .
- Higgins, M. D., 2006- Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press, 265p.
- Jerram, D. A. & Higgins, M. D., 2007- 3D analysis of rock textures: Quantifying igneous microstructures. *ELEMENTS*. 3: 239-245.
- Marsh, B., 1988- Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. *Theory Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 277–291.
- Marsh, B. D., 1998- On the interpretation of crystal size distribution in magmatic systems. *Journal of Petrology*, 39, 553-599.
- Mock, A. & Jerram, D. A., 2005- Crystal Size Distributions (CSD) in Three Dimensions: Insights from the 3D Reconstruction of a Highly Porphyritic Rhyolite. *Journal of Petrology*, 46: 1-17.
- Monfaredi, B., Masoudi, F. & Tabbakh, A. A., 2009- Magmatic Interaction as Recorded in Texture and Composition of Plagioclase Phenocrysts from the Sirjan Area, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 20: 243-251.
- Morgan, D. J. & Jerram, D. A., 2006- On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154: 1–7.
- Peterson, T. D., 1996- A refined technique for measuring crystal size distribution in thin section. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 7: 99-105.
- Proussevitch, A. A. & Sahagian, D. L., 2001- Recognition and separation of discrete objects within complex 3D voxelized structures. *Computers & Geosciences*, 27: 441–454.
- Randolph, A. D. & Larson, M. A., 1971- *Theory of Particulate Processes*, Academic Press, New York. 251 p.