

تحلیل پراکندگی اندازه بلور پلاژیوکلاز در جریانات گدازه‌های الیوین بازالتی نئوزن-

کواترنری منطقه دهج- جوزم، شمال غرب شهر بابک، کرمان

مهديه بامروت؛ دانشجوی دکتری، پترولوژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

سارا درگاهی*؛ دانشیار، پترولوژی، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

محسن آروین؛ استاد، پترولوژی، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱

چکیده

جریانات گدازه‌های الیوین بازالتی نئوزن- کواترنری به صورت روانه‌هایی با گسترش نسبتاً محدود در منطقه دهج- جوزم، واقع در بخش شمالی نوار ماگمایی دهج- ساردوئیه، برون زد یافته‌اند. این سنگ‌ها حاوی درشت‌بلورهای الیوین و کلبیوپروکسن و به مقدار اندک پلاژیوکلاز هستند که در زمینه‌ای غنی از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز قرار گرفته‌اند. سنگ‌های الیوین بازالتی منطقه دهج- جوزم تنوع ترکیبی بازالت و تراکی بازالت و تفریت بازالت دارند که با طبیعت آکالن نمونه‌ها هماهنگ است. با توجه به آنکه کانی پلاژیوکلاز در بازسازی فرایندهای ماگمایی نقش مهمی ایفا می‌کند، شکل سه‌بعدی و زمان رشد و سرعت هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز سنگ‌های الیوین بازالتی منطقه دهج- جوزم با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور (CSD) بررسی شدند. بر اساس این مطالعات مشخص شد بلورهای پلاژیوکلاز عمدتاً دارای فرم تیغه‌ای هستند و سرعت هسته‌بندی 10^{-9} تا 10^{-6} $12/46 \times 10^{-9}$ و زمان رشد بلورها $2/33$ - $1/00$ سال است که بالا بودن سرعت سرد شدن و کوتاه بودن زمان اقامت ماگما در آشیانه ماگمایی را نشان می‌دهد. روند CSD غیرخطی نشان‌دهنده دو مرحله رشد با سرعت‌های متفاوت برای این بلورهاست که حاکی از تبلور مرحله‌ای ماگما در زمان صعود، فرایند درشت‌شدگی بافتی طی تبلور، تغییر در نحوه تبلور ماگما به علت تغییر محیط، و همچنین خروج گازها و مواد فرار است. جهت‌یابی پلاژیوکلازها در نمودارهای گل‌سرخ نمونه‌های مورد مطالعه بیانگر بافت جریان‌ی توسعه‌یافته در اثر چسبندگی پایین ماگماست. کلیدواژگان: پراکندگی اندازه بلور (CSD)، مجموعه ماگمایی ارومیه‌دختر، میزان رشد، نئوزن- کواترنری، هسته‌بندی.

مقدمه

بافت و اندازه فازهای بلورین در سنگ‌های ماگمایی اطلاعات اساسی درباره نحوه و شرایط فرایند تبلور را در خود حفظ می‌کنند و نقش مهمی در تعیین تاریخ تکاملی سنگ دارند. به طور خاص، توزیع اندازه بلورها (CSD) می‌تواند بینشی در ارتباط با کینتیک تبلور ماگما فراهم کند و اطلاعاتی درباره میزان و زمان اقامت ماگما ارائه دهد (ژنگ^۱ و همکاران ۲۰۱۹). نظریه CSD را نخستین بار راندولف^۲ و لارسن (۱۹۷۱) در شیمی مهندسی ارائه کردند و سپس در سال‌های بعد به دیگر علوم، از جمله زمین‌شناسی، راه یافت. هیگینز^۳ (۱۹۹۸) یک برنامه رایانه‌ای برای محاسبه پراکندگی اندازه بلور و

s.dargahi@uk.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول:

2. crystal size distribution

3. Zhang

4. Randolph

5. Higgins

رسم نمودار CSD ارائه کرد که به صورت نمودار نیمه‌لگاریتمی از چگالی فراوانی (تعداد بلورها در حجم واحد) در برابر اندازه بلور است. درحالی‌که معمولاً بیشتر مطالعات کمی درباره سنگ‌های آذرین بر شیمی سنگ کل صورت می‌گیرد. تفسیر و بررسی داده‌های کمی اندازه بلور با استفاده از منحنی‌های CSD یک روش پتروگرافی کمی است (هیگینز ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱). تلفیق داده‌های شیمیایی و ایزوتوپی بلورهای پلاژیوکلاز با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پراکندگی اندازه بلور ثابت کرده است روش CSD در تعیین فرایندهای ماگمایی بسیار موفقیت‌آمیز بوده است (سلیسبوری^۱ و همکاران ۲۰۰۸؛ فرناکیای^۲ ۲۰۱۵). در روش CSD ابعاد بلورها در ارتباط با مدت زمان محاسبه‌شده بر اساس برآورد میزان رشد است (وینت^۳ و هیگینز ۲۰۱۰). بدین ترتیب، تعداد بلورهای موجود در یک سنگ می‌تواند بیانگر اطلاعاتی راجع به هسته‌بندی و میزان رشد بلور در آن باشد. پارامترهای تبلور مدل CSD ارائه‌شده توسط مارش^۴ از جمله تراکم هسته، سرعت هسته، سرعت رشد را می‌توان به کمک اتصالات خطی برای به دست آوردن چگالی هسته‌بندی اولیه و شیب محاسبه کرد (ژنگ و همکاران ۲۰۱۹). مارش (۱۹۸۸) از روش CSD برای تعیین کینتیک تبلور استفاده کرد. از زمان ارائه این روش از سوی مارش (۱۹۸۸) محققان بی‌شماری این ایده و کاربردهای آن را در سنگ‌شناسی آذرین و دگرگونی دنبال کرده‌اند (مثلاً کاشمن^۵ و مارش ۱۹۸۸؛ کاشمن و فری ۱۹۸۸؛ هیگینز ۲۰۰۰؛ زینگ^۶ ۱۹۳۵؛ آزپروز^۷ و فرناندز^۸ ۲۰۰۳؛ بروگر^۹ و هامر ۲۰۱۰؛ مجن^{۱۰} و همکاران ۲۰۱۷؛ سیلوا^{۱۱} و همکاران ۲۰۱۷؛ ژنگ و همکاران ۲۰۱۹). از این موارد می‌توان به مطالعاتی در ارتباط با فرایندهای هسته‌بندی (گلوی^{۱۲} و جونز ۲۰۰۳)، سرعت رشد بلورها (کاشمن ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳؛ ویلهلم^{۱۳} و ورنر ۱۹۹۶)، و رفتار و نحوه جهت‌یابی بلورها (هیگینز ۱۹۹۱) اشاره کرد. همچنین سنگ‌های آذرین اطلاعاتی درباره تاریخچه سرد شدن (آرمینتی^{۱۴} و همکاران ۱۹۹۴؛ کاشمن و همکاران ۱۹۹۹)، نحوه ته‌نشینی بلورها (مارش ۱۹۹۸)، دینامیک مخزن ماگمایی (منگن^{۱۵} ۱۹۹۰)، و تاریخ دقیق فوران (هیگینز ۱۹۹۶؛ هامر^{۱۶} و همکاران ۱۹۹۹) در اختیار قرار می‌دهند. در عین حال، با توجه به تعداد و اندازه متوسط بلورها، می‌توان نحوه فرایند تفریق ماگمایی، مرحله‌ای که تبلور کانی‌ها در سیستم ماگمایی شروع می‌شود، طبیعت جریان ماگمایی، یا رئولوژی مجرا و عمق جای‌گیری توده آذرین را نیز تعیین کرد (مارش ۱۹۸۸؛ نگونگ^{۱۷} و همکاران ۲۰۱۳).

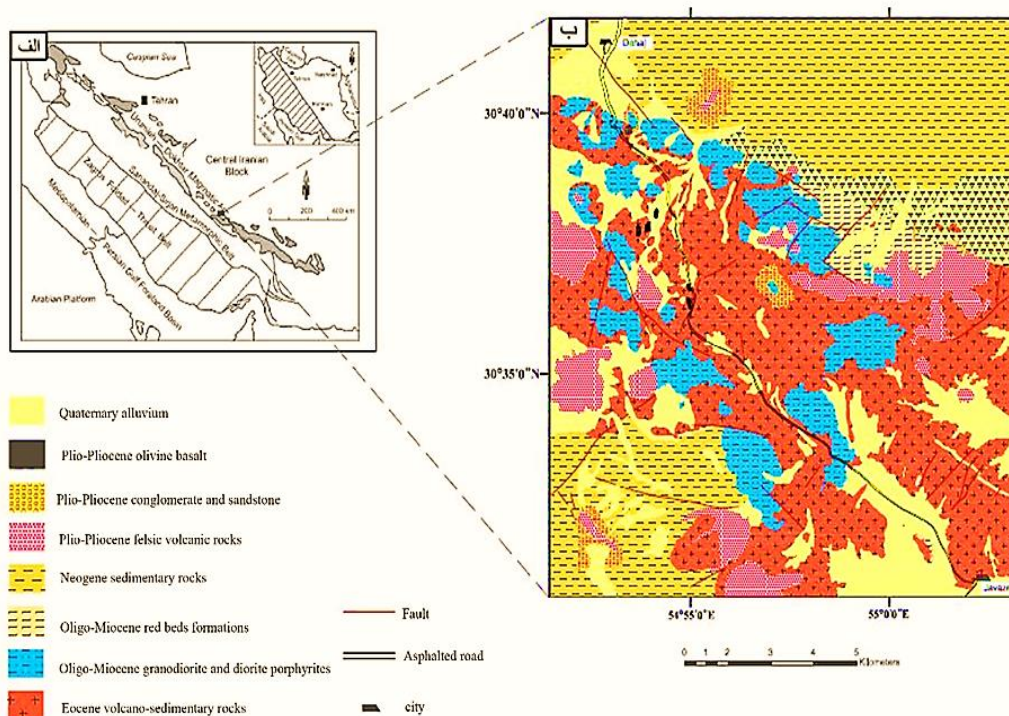
سنگ‌های بازالتی تحت تأثیر تاریخچه سرد شدن ماگما می‌توانند طیفی از انواع بافت‌های زمینه، از کاملاً شیشه‌ای تا انواع اینترسرتال و اینترگرانولار، را نشان دهند. از عواملی که باعث ایجاد تنوع بافتی در بازالت‌ها می‌شود می‌توان به درجه

1. Salisbury
2. Foranaciai
3. Vinet
4. Marsh
5. Cashman
6. Zingg
7. Azpiroz
8. Brugger
9. Mujin
10. Silva
11. Galwey
12. Wilhelm
13. Armienti
14. Mangan
15. Hammer
16. Ngonge

سردشدگی، جریان سیالات، ترکیب مایع، سرعت هسته‌بندی ناهمگون و ته‌نشینی یا شناوری بلورها، سرعت حرکت مذاب، محیط تبلور ماگما، مدت زمان اقامت، فرایندهای موجود در آشیانه ماگمایی، و میزان رشد اشاره کرد (میسلانکار^۱ و آیار ۲۰۰۹). در این نوشتار سعی بر آن است، با استفاده از تکنیک CSD، بلورهای پلاژیوکلاز موجود در سنگ‌های الیوین بازالتی منطقه دهج- جوزم مطالعه شود و با استخراج شکل سه‌بعدی و زمان رشد و سرعت هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز فرایندهای ماگمایی در زمان تشکیل سنگ‌ها بازسازی شود.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در شمال غرب شهر بابک بین طول‌های جغرافیایی $36^{\circ} 30'$ تا $39^{\circ} 30'$ خاوری و عرض‌های جغرافیایی $53^{\circ} 54'$ تا $54^{\circ} 55'$ شمالی قرار گرفته است و از لحاظ زمین‌شناختی جزئی از نوار آتشفشانی دهج- ساردوئیه دیمتریویچ^۲ (۱۹۷۳)، واقع در جنوب شرقی مجموعه ماگمایی ارومیه‌دختر به شمار می‌آید. جهت دسترسی به منطقه، باید از جاده آسفالت‌انار به سمت دهج رفت و با استفاده از جاده آسفالت‌دهج به جوزم می‌توان تا حوالی مناطق مورد مطالعه، که به صورت پراکنده‌اند، رسید و سپس با استفاده از جاده‌های خاکی امکان دسترسی به بازالت‌های مورد نظر وجود دارد (شکل ۱).



شکل ۱. الف) موقعیت بازالت‌های نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم در جنوب شرقی زون ارومیه- دختر (برگرفته از محجل ۲۰۰۳)؛ ب) نقشه زمین‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی دهج- جوزم (برگرفته از دیمتریویچ ۱۹۷۳)

1. Mislankar
2. Dimitrijevic
3. Mohajjel

مواد و روش‌ها

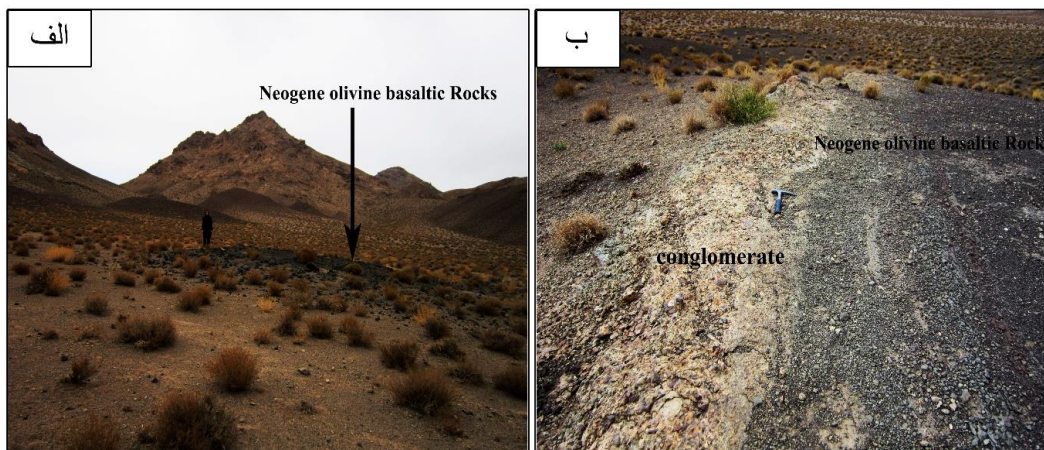
با توجه به اینکه سنگ‌های الیوین بازالتی منطقه دهج- جوزم به صورت رخنمون‌های کوچک و پراکنده در منطقه وجود دارند، برای مطالعه صحرایی از تک‌تک رخنمون‌ها نمونه‌برداری صورت گرفت و در نهایت تعداد ۶۰ نمونه برداشت و از آن‌ها مقطع نازک تهیه شد. سپس با میکروسکوپ پلاریزان مقاطع نازک مطالعه شد. در ادامه، برای مطالعات ژئوشیمیایی، تعداد ۶ نمونه از سنگ‌های با کمترین میزان دگرسانی انتخاب و برای تجزیه اکسیدهای اصلی به روش ICP-AES به آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا ارسال شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Iqpet 2007 استفاده شد. برای مطالعه آنالیز کمی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز بازالت‌های نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم، توسط میکروسکوپ پلاریزان، بررسی‌های دقیقی روی مقاطع نازک با کمترین میزان دگرسانی صورت پذیرفت. نهایتاً مطالعه بر چهار نمونه، که از لحاظ جغرافیایی کل منطقه را پوشش می‌دادند، انجام شد. با توجه به بافت همگن سنگ‌ها از هر نمونه یک تصویر که می‌توانست بازگوکننده وضعیت کل مقطع باشد تهیه شد. در ادامه، پردازش تصاویر جهت جداسازی بلورهای پلاژیوکلاز با استفاده از نرم‌افزار آدوب فتوشاپ نسخه ۱۳ دنبال شد. گفتنی است، برای شمارش دقیق‌تر و جلوگیری از خطا در بیان اندازه واقعی بلورها، بلورهای به هم چسبیده پلاژیوکلاز هنگام پردازش تصاویر از یک‌دیگر جدا شدند. از آنجا که تعداد بلورهای اندازه‌گیری شده برای مطالعات CSD باید حداقل ۲۰۰ تا ۲۵۰ عدد در هر نمونه باشد که بتوان نتایج مناسب را از آن برداشت کرد (مورگان^۲ و جرام^{۲۰۰۶})، در نمونه‌های مورد مطالعه تعداد حداقل ۲۰۰ مورد اندازه‌گیری برای هر نمونه و مجموعاً تعداد ۱۹۰۰ مورد پلاژیوکلاز اندازه‌گیری شد. سپس تصاویر به نرم‌افزار Image J منتقل و اندازه‌گیری‌های لازم- شامل طول، مساحت، زاویه، مکان مرکز بلورها (مختصات نقاط X و Y)- در محیط این نرم‌افزار انجام شد. گفتنی است با توجه به اینکه مطالعات روی تصاویر مقطع نازک انجام می‌شد برای رفع خطاهای ناشی از این موضوع همه تنظیمات نرم‌افزار بر اساس روش هیگینز (۲۰۰۶) وارد شد. سپس تحلیل‌های بعدی با استفاده از برنامه‌های مختلف، شامل برنامه صفحه گسترده Sclice 5 CSD و برنامه CSD Correction 1.40، انجام شد.

بحث و یافته‌های پژوهش

مطالعات صحرایی و پتروگرافی

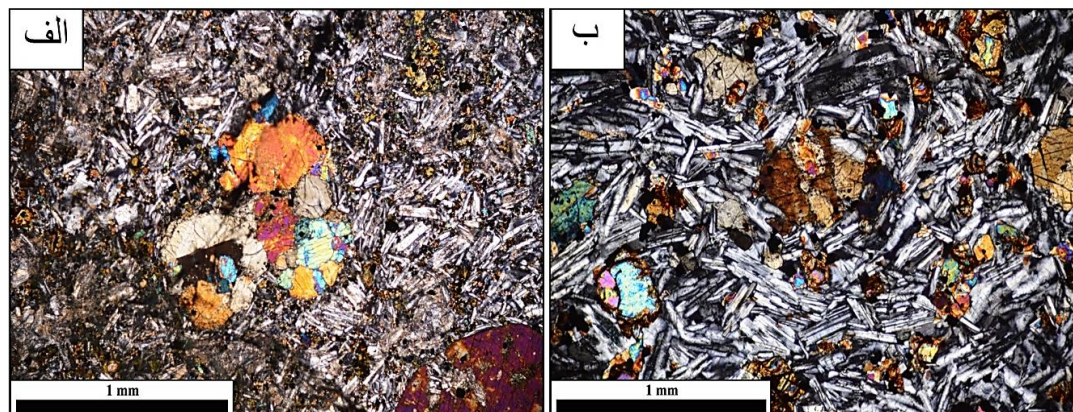
با توجه به نحوه ارتباط سنگ‌های مورد مطالعه با واحدهای آتشفشانی- رسوبی ائوسن موجود در منطقه مشخص می‌شود این سنگ‌ها باید جوان‌تر از ائوسن و احتمالاً مربوط به نئوژن- کواترنری باشد. سنگ‌های الیوین بازالتی نئوژن- کواترنری دهج- جوزم اغلب به دلیل روان بودن گدازه به صورت تپه‌ماهورهای کم‌ارتفاع و پست هستند (شکل ۲ الف). در برخی مناطق سنگ‌های مورد مطالعه روی کنگلومرای منطقه فوران کرده‌اند و محل تماس آن‌ها در صحرا به طور کامل مشخص است (شکل ۲ ب). به نظر می‌رسد خروج این گدازه‌ها در ارتباط با گسل‌های عمیق موجود در منطقه بوده باشد. با توجه به جوان بودن این ماگماتیسم، عملکرد فرایندهای دگرسانی و هوازدگی روی این سنگ‌ها قابل اغماض است. از

ویژگی‌های عمومی الیوین بازالت‌های منطقه دهج- جوزم می‌توان به حضور کانی‌های کلسیت در شکستگی‌ها و حفرات درون سنگ اشاره کرد که می‌تواند بیانگر فعالیت محلول گرمابی در منطقه باشد.



شکل ۲. تصاویر صحرایی از گدازه‌های الیوین بازالتی نئوژن- کواترنری در منطقه دهج- جوزم: الف) نمای کلی گدازه‌ها که به صورت تپه‌ماهوری تیره‌رنگ با توپوگرافی نسبتاً پست هستند؛ ب) تماس بین کنگلومرا و الیوین بازالت‌ها

بر اساس مطالعات میکروسکوپی الیوین بازالت‌های منطقه دهج- جوزم دارای ترکیب سنگ‌شناختی بازالت و الیوین بازالت هستند. بافت غالب در این سنگ‌های آتشفشانی پورفیری با زمینه میکروولیتی است که نمایانگر دو مرحله تبلور ماگماست (جکسون^۱ ۱۹۷۰)، علاوه بر آن، بافت‌های گلومروپورفیری و جریان‌ی نیز حضور دارند (شکل ۳ الف و ب). حضور گلومروکریست‌ها (درشت‌بلورهای هتروژن) نشان می‌دهد هسته‌بندی به شکل ناهمگن بوده است و تبلور طی چندین مرحله از عمق تا نزدیک سطح زمین صورت گرفته است (نگونگ و همکاران ۲۰۱۳). درشت‌بلورهای آن‌ها اغلب از نوع الیوین و کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز است. درشت‌بلورهای الیوین نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل هستند و به‌ندرت به صورت خودشکل مشاهده می‌شوند. شکستگی‌های فراوان در این کانی‌ها باعث تبدیل بخشی آن‌ها به ایدینگزیت شده است. درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن غالباً شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند که در بسیاری از موارد ماکل دوتایی و مکرر و منطقه‌بندی بخشی دارند که به طور خاص در تیتانواوزیت پدید می‌آید. بلورهای پلاژیوکلاز به صورت فنوکریست در مقایسه با سایر کانی‌های موجود در سنگ فراوانی کمی را به خود اختصاص داده‌اند؛ در سنگ‌های مورد مطالعه بخش قابل توجهی از زمینه را میکروولیت‌های پلاژیوکلاز شامل می‌شوند. میکروولیت‌های پلاژیوکلاز در زمینه اغلب بافت جریان‌ی را نشان می‌دهند که مبین چسبندگی کم ماگما هنگام تشکیل این سنگ‌ها بوده است. وجود دربرداریهایی از جنس زمینه در بعضی پلاژیوکلازها، که منجر به ایجاد بافت غربالی شده است، می‌تواند شواهدی بر شرایط عدم تعادل شیمیایی بین ماگما و بلور هنگام تبلور باشد (نلسون^۲ و مونتانا ۱۹۹۲).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی بافت‌های گلوپوروفیری (الف) و جریان‌ی (ب) در گدازه‌های الیوین بازالتی نئوژن- کواترنری در منطقه دهج- جوزم (شرایط نور قطبی متقاطع)

مطالعات ژئوشیمیایی

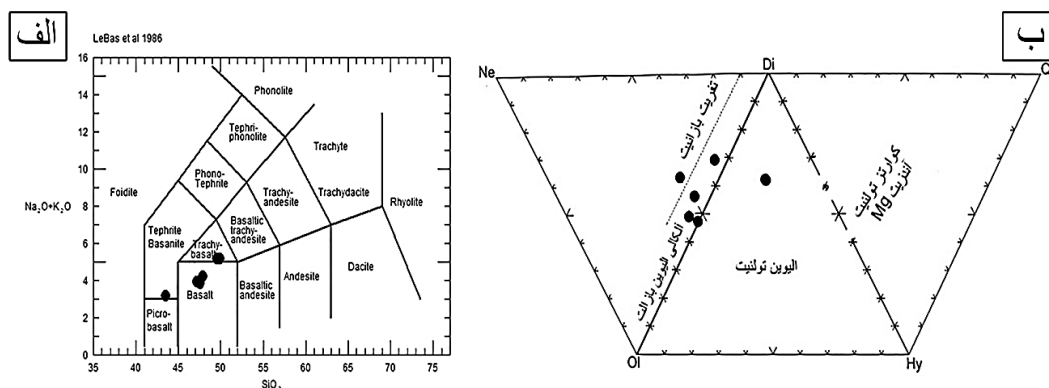
هر گونه هوازدگی یا دگرسانی یا دگرگونی در سنگ باعث تحرک و جابه‌جایی در اکسیدهای آلکان می‌شود و می‌تواند نتایج مطالعات را در تقسیم‌بندی شیمیایی تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین سعی بر این بوده است که سنگ‌های مورد مطالعه برای مطالعات ژئوشیمیایی از کمترین میزان دگرسانی برخوردار باشند (جدول ۱). در طبقه‌بندی ژئوشیمیایی سنگ‌ها در نمودار مجموع آلکان در برابر سیلیس (له باس^۱ ۱۹۸۶)، سنگ‌های الیوین بازالتی مناطق دهج- جوزم دارای تنوع ترکیبی بازالت، تراکی بازالت، و تفریت/ بازانیت هستند که این وضعیت حاکی از طبیعت آلکان نمونه‌هاست (شکل ۴ الف). با توجه به نمودار طبقه‌بندی نرماتیو تامپسون^۲ (۱۹۸۴) که بر اساس نسبت‌های نرماتیو کانی‌های نفلین (و سایر فلدسپاتوئیدها)، الیوین، دیوپسید، هیپرستن، کوارتز و در واقع بخشی از نمودار چهاروجهی ارائه شده توسط یودر^۳ تا یلی (۱۹۶۲) است گدازه‌های بازالتی دهج- جوزم، که عمدتاً در محدوده آلکالی الیوین بازالت تا ندرتاً تفریت بازانیت یا الیوین تولئیت قرار می‌گیرند، دارای ماهیت تحت اشباع و به طور غالب آلکان متوسط‌اند (شکل ۴ ب).

جدول ۱. درصد وزنی اکسیدهای اصلی سنگ‌های آتشفشانی نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم

SAMPLE	DJ-4	DJ-6	DJ-7	DJ-9	DJ-10	DJ-11
SiO ₂	49.9	43.5	47.2	49.6	47.6	47.9
Al ₂ O ₃	16.45	12.9	16.1	15.3	15.25	15.85
Fe ₂ O ₃	8.78	10.5	10.5	9.19	11	9.95
CaO	9.54	11.9	10.5	8.66	10.05	11.05
MgO	5.35	13.3	8.52	9.05	10.7	6.55
Na ₂ O	2.96	2.66	3.07	2.91	2.78	3.13
K ₂ O	2.22	0.52	0.86	2.25	1.06	1.09
Cr ₂ O ₃	0.01	0.08	0.04	0.05	0.05	0.03

1. Le Bas
2. Thompson
3. Yoder

SAMPLE	DJ-4	DJ-6	DJ-7	DJ-9	DJ-10	DJ-11
TiO ₂	1.05	0.82	1.03	0.91	1.02	1.02
MnO	0.16	0.17	0.18	0.16	0.19	0.15
P ₂ O ₅	0.29	0.28	0.27	0.35	0.23	0.27
LOI	2.6	2.98	2.27	2.29	1.44	3.6



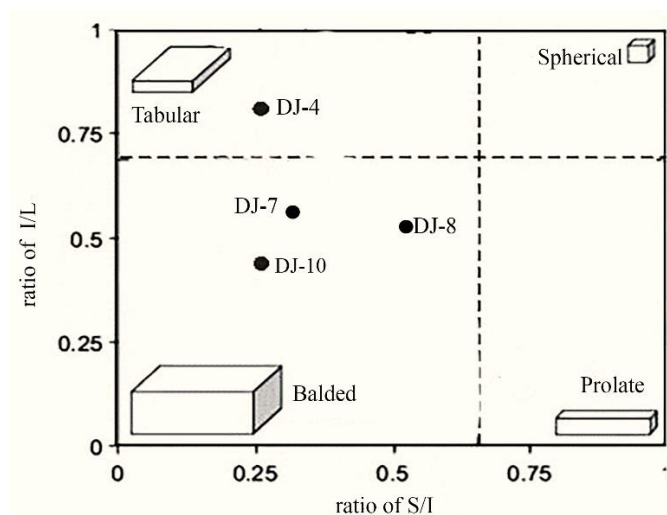
شکل ۴. الف) نام‌گذاری گدازه‌های الیوین بازالتی منطقه دهج- جوزم با استفاده از نمودار (Le Bas et al. 1986); ب) تقسیم‌بندی نرماتیو گدازه‌های الیوین منطقه دهج- جوزم با استفاده از نمودار نورماتیو (Tompson 1984)

شکل و پراکندگی اندازه بلور

در روش پراکندگی اندازه بلورها ویژگی‌های مختلفی از بلور، مانند شکل و اندازه و فراوانی اندازه‌های مختلف بلور، بررسی و با تفسیر آن‌ها شرایط حاکم بر محیط تبلور مشخص می‌شود. شکل ۶ الف و ۶ ب تصاویر پردازش شده در محیط نرم‌افزار آدوب فتوشاپ نسخه ۱۳ مربوط به بلورهای پلاژیوکلاز بازالت‌های نئوژن- کواترنری دهج- جوزم را نشان می‌دهد. اندازه بلور و تعداد آن در مقاطع نازک تنها در دو بعد اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که CSD بلورها یک نوع اندازه‌گیری سه‌بعدی است. برای تبدیل داده‌های دوبعدی به داده‌های حجمی از برنامه صفحه گسترده 5 CSD Slice، ارائه شده توسط مورگان و جرام (۲۰۰۶) استفاده شد (شکل ۶ ج) و بر این اساس نسبت منظر بلور به صورت نسبت محورهای کوتاه و متوسط و بلند (S:I:L) محاسبه شد (جدول ۲). بعد از محاسبات استرئولوژی، شکل بلورها در نمودار زینگ- که در آن بلورها بر اساس نسبت‌های قطرهای بلند و متوسط و کوتاه به چهار رده تخته‌ای، تیغه‌ای، میله‌ای، هم‌بعد تقسیم شده‌اند- تعیین شد (ماک^۱ و جرام ۲۰۰۵؛ مورگان و جرام ۲۰۰۶) (شکل ۵). بر اساس آنچه در شکل ۵ مشهود است مشخص می‌شود بلورهای پلاژیوکلاز منطقه مورد مطالعه دارای ابعاد یکسان (هم‌بعد) نیستند و عمدتاً دارای فرم‌های تیغه‌ای و در یک مورد دارای فرم تخته‌ای هستند. شکل بلورها بیانگر کاهش فشار و تسریع عمل سردشدگی در سیستم ماگمایی است که این با شرایط حاکم بر سیستم‌های آتشفشانی سازگار است. بلورهای تیغه‌ای از سرعت سردشدگی بالا و سرعت انتشار و رشد کم بلور ضمن حرکت نسبت به بلورهای پلاژیوکلاز با فرم تخته‌ای برخوردارند. بررسی‌های پتروگرافی و بافتی نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

جدول ۲. ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز با برنامه CSD Slice 5 در سنگ‌های آتشفشانی نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم

	تعداد بلور	X	Y	Z	S/I	I/L
DJ-4	669	1.00	3.60	4.50	0.27	0.8
DJ-7	465	1.00	3.20	5.00	0.31	0.64
DJ-8	569	1.00	2.20	3.60	0.54	0.61
DJ-10	292	1.00	4.00	9.00	0.25	0.44



شکل ۵. نمودار زینگ برای تعیین شکل بلورها (برگرفته از مک و جرام ۲۰۰۵) همراه با موقعیت نمونه‌های منتخب الیوین بازالت‌های نئوژن- کواترنری دهج- جوزم

سپس داده‌ها به نرم‌افزار CSD Correction 1.40 منتقل شد و با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از فراوانی و اندازه بلورهای پلاژیوکلاز نمودار نیمه‌لگاریتم طبیعی چگالی تجمعی نسبت به اندازه بلور بر اساس روش ارائه‌شده توسط مارش (۱۹۸۸) برای هر نمونه به طور جداگانه رسم شد (شکل ۶ د). واحد اندازه‌گیری شده برای بلورها بر حسب mm و چگالی تجمعی بر حسب mm^{-4} است. در این نرم‌افزار فاکتور گردشگی (۰ = بیضی، ۱ = مکعب) در نظر گرفته می‌شود (هیگینز ۲۰۰۲). گفتنی است در همه محاسبات فاکتور گردشگی ۰/۱ در نظر گرفته شد. زمان رشد برای بلورهای پلاژیوکلاز با فرض دوره زمانی سرد شدن سیصدساله (در یک مخزن ماگمایی کم‌عمق) و سرعت رشد 10^{-10}mms^{-1} و دوره سرد شدن سه‌ساله (دوره زمانی سرد شدن در اغلب گدازه‌های بازالتی) و سرعت رشد 10^{-9}mms^{-1} محاسبه شده است (کاشمن ۱۹۹۳). در نمودارهای CSD اندازه بلورها تابعی از میزان رشد (G) و زمان اقامت (T) است که این موارد رابطه عکس با چگالی تجمعی^۱ دارند. گفتنی است میزان رشد برای یک دوره زمانی سرد شدن گدازه‌های بازالتی 10^{-9}mms^{-1} محاسبه شده است (کاشمن ۱۹۹۳). از آنجا که محل برخورد نمودار CSD با محور چگالی تجمعی برابر با مقدار ثابت چگالی هسته‌بندی اولیه (π_0) است می‌توان به کمک رابطه $J = \pi_0 * G$ سرعت هسته‌بندی هنگام توقف بلور را محاسبه کرد و به کمک رابطه $T = (-$

^۱. LnPopulatin

تحلیل پراکندگی اندازه بلور پلاژیوکلاز در جریانات...
 $1/G \cdot m / 31536000$ زمان رشد بلورها محاسبه می‌شود. در این رابطه T زمان اقامت بلور به سال، G آهنگ رشد بلور بر حسب میلی‌متر بر ثانیه، m شیب نمودار، و 31536000 برای تبدیل واحد ثانیه به سال است (کاشمن و مارش ۱۹۸۸). بر اساس محاسبات انجام شده بر بازالت‌های نئوژن-کواترنری منطقه دهج- جوزم سرعت هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی از $9/65 \times 10^{-9}$ تا $12/46 \times 10^{-9}$ و زمان رشد بلورها $1/00 - 2/33$ سال به دست آمد (جدول ۳).

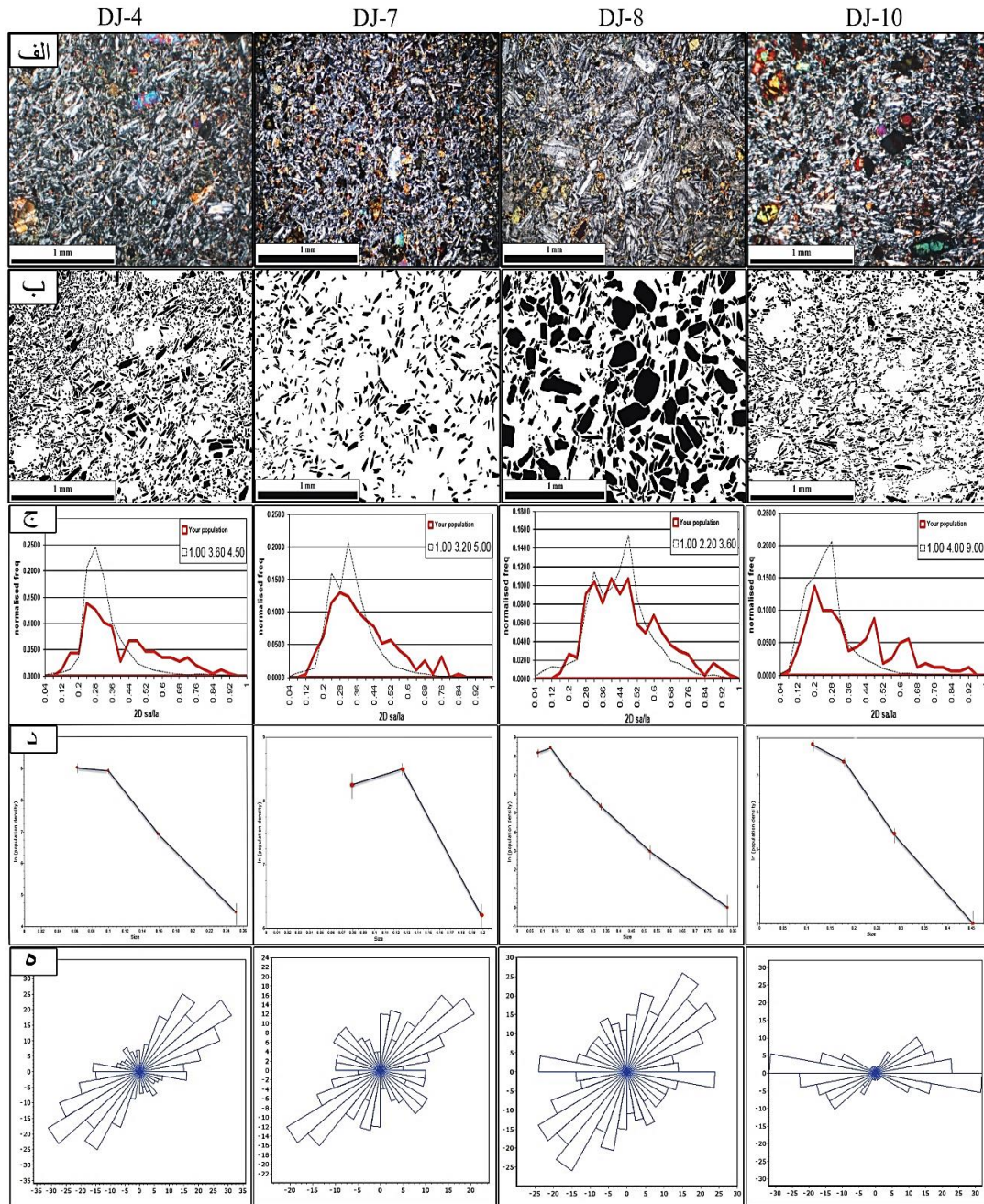
به طور کلی شکل یک بلور جدید با سرعت سه فرایند هسته‌بندی و انتشار و رشد در ارتباط است. سرعت پیشرفت فرایندهای یادشده متناسب با ترکیب ماگما و شرایط حاکم بر محیط است. بلورهای پلاژیوکلاز نیز از این قاعده مستثنی نیستند و با پیشرفت عمل سردشدگی شکل بلور از حالت تخته‌ای به اسکلتی و دندریتی و در نهایت به حالت اسفرولیتی تغییر می‌کند. جابه‌جایی مکانیکی لایه مرزی، درحالی‌که همه شاخص‌های شیمیایی ثابت باشند، نیز می‌تواند بر ایجاد اشکال متنوعی از بلور مؤثر باشد. سطوحی که با سرعت بیشتری رشد می‌کنند نسبت به این تأثیر حساس‌ترند. بنابراین بلورهایی که تبلور آن‌ها با جابه‌جایی مکانیکی ماگما همراه است نسبت به بلورهایی که در محیط ساکن تبلور می‌شوند از طول‌شدگی و نازک‌شدگی برخوردارند (کوچی^۱ و همکاران ۱۹۸۶). بدین ترتیب به نظر می‌رسد جابه‌جایی مکانیکی باید تأثیر زیادی در شکل‌گیری پلاژیوکلاز در منطقه دهج- جوزم، که زمان رشد آن‌ها از $1/00 - 2/33$ سال متغیر است، داشته باشد. با توجه به کوتاه بودن زمان سرد شدن به نظر می‌رسد رشد حین صعود ماگما به سطح زمین در مجرای ماگمایی رخ داده باشد.

بررسی‌های متنوعی در ارتباط با نقش انتشار و فرارفت در تشکیل بلورها صورت گرفته است. گرانیوی ماگما از جمله پارامترهایی است که بر میزان انتشار و فرارفت اجزای تشکیل‌دهنده بلور مؤثر است. در ماگماهای با گرانیوی بالا، نظیر ماگماهای فلسیک، انتشار در انتقال یون‌های مورد نیاز برای رشد بلورها نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد (ماک و جرام ۲۰۰۵). اما در ماگماهای مافیک که دارای گرانیوی پایین‌اند عامل انتشار می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد (ماک و جرام ۲۰۰۵). اما در ماگماهای مافیک که دارای گرانیوی پایین‌اند عامل انتشار می‌تواند بر انتقال یون‌های مورد نیاز برای شکل‌گیری و رشد بلورها مؤثر باشد. در محیط‌های ماگمایی، که از انتشار و حرکت‌های هم‌رفتی بالا برخوردارند، بلورهای پلاژیوکلاز تخته‌ای تشکیل می‌شوند (هیگینز و چاندراسخرام ۲۰۰۷). بنابراین در بازالت‌های نئوژن-کواترنری منطقه دهج- جوزم، به دلیل گرانیوی پایین ماگما و حضور بلورهای تخته‌ای و تیغه‌ای، عامل انتشار نقش چشمگیری در انتقال مواد داشته است.

کاشمن و مارش (۱۹۸۸) اعلام کردند در صورتی که در نمودار $\ln(n)$ در مقابل طول بلور یک خط مستقیم با شیب برابر $1/Gt$ به دست آید، این رابطه مستقیم لگاریتمی مربوط به تبلور پیوسته و یکنواخت است که توسط رشد کم و بیش ثابت مشخص می‌شود و اندازه بلور نیز تأثیری در آن ندارد. این بدان معناست که به‌رغم وجود دوگانگی ظاهری در اندازه بلورها هیچ‌گونه حد واضحی بین اندازه فنوکریست‌ها و ذرات زمینه وجود ندارد. در شرایط تعادلی ثابت و تبلور یکنواخت از رشد بلورها نمودار CSD روند سرد شدن و تبلور ماگما و درشت‌شدگی را نشان می‌دهد؛ طوری که فراوانی بلورهای کوچک‌تر بیشتر از بلورهای بزرگ‌تر است (هیگینز ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶). نمودارهای CSD در طبیعت به دلیل شرایط متغیر محیط تبلور عمدتاً به صورت غیرخطی و با شیب متغیرند؛ نظیر آنچه در پلاژیوکلازهای الیوین بازالت‌های دهج- جوزم دیده می‌شود. به نظر می‌رسد علت وجود چنین روندهایی را باید در وقایع رخ داده هنگام تبلور کانی‌ها جست‌وجو کرد. واقعیت این است که سنگ‌های آذرین حاوی مجموعه کانی‌هایی هستند که هسته‌بندی آن‌ها در آشیانه‌های ماگمایی واقع در اعماق زمین طی صعود یا در سطح

زمین رخ داده است. بنابراین هسته‌بندی‌های متعدد به احتمال زیاد در ارتباط با تغییرات سریع فشار و دمای حاکم بر محیط تبلور ماگما (بورگر و هامر ۲۰۱۰؛ نی^۱ و همکاران ۲۰۱۴) و فرایند چندمرحله‌ای تبلور ماگما در زمان صعود (مارش ۱۹۸۸) و درشت‌شدگی بافتی (هیگینز ۲۰۱۱؛ ژنگ و همکاران ۲۰۱۹) است. وجود شکستگی در نمودار CSD مربوط به یک سیستم آتشفشانی باز می‌تواند بیانگر اختلاط ماگمایی ضمن صعود ماگما و تغییر در سرعت سرد شدن ماگما در اثر تغییر محیط باشد (ماک و همکاران ۲۰۰۳؛ ماک و جرام ۲۰۰۵). سرد شدن و خروج گازها و مواد فرار در سطح یا نزدیک سطح زمین (شلی^۲ ۱۹۹۳) و هسته‌بندی ناهمگون (سپیلار^۳ و دولجس ۲۰۱۵) نیز می‌تواند بر CSD تأثیرگذار باشد (هیگینز ۱۹۹۶). بنابراین روش پراکندگی اندازه بلور تعیین تاریخچه ماگمایی و حرارتی فرایندهای سیستم ماگمایی را امکان‌پذیر می‌کند (بل^۴ و همکاران ۲۰۱۹). نمودارهای CSD رسم‌شده بلورهای پلاژیوکلاز الیوین بازالت‌های نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم به صورت یک رشد خطی نیستند و شکستگی و تقعر رو پایین دارند (شکل ۶د) که این موضوع می‌تواند بر اثر فرایندهایی مانند فرایند درشت‌شدگی بافتی حادث شده باشد. طی این فرایند انحلال کانی‌های کوچک‌تر برای توسعه کانی‌های متوسط یا بزرگ‌تر صورت می‌گیرد و منجر به منحنی‌های CSD می‌شود که در اندازه‌های کوچک دارای تقعر به سمت پایین و در اندازه‌های بزرگ‌تر خطی هستند (ژنگ و همکاران ۲۰۱۹). هر نمودار دارای دو شیب و در نتیجه دو سرعت هسته‌بندی و زمان رشد است که حاکی از مراحل رشد با سرعت‌های متفاوت برای این بلورهاست (جدول ۳). در مراحل ابتدایی تبلور، پلاژیوکلازها به صورت درشت‌بلور با تعداد نطفه‌های کم دارای شیب ملایم‌اند. اما در مرحله بعد پلاژیوکلازها به شکل میکروولیت در زمینه به صورت یک فاز تأخیری با میزان نطفه‌بندی زیاد و شیب تندتر توسعه یافته‌اند. شیب بیشتر جمعیت میکروفونوکریست در مقایسه با جمعیت فنوکریست نشان می‌دهد جمعیت میکروفونوکریست تحت فروچاهیدگی بیشتری قرار گرفته است (هورت^۵ ۱۹۹۸) که ممکن است در سطوح پوسته‌ای کم‌عمق‌تر و همچنین مدت زمان کوتاه‌تری رخ دهد (نوگروهو^۶ و همکاران ۲۰۱۹). بدین ترتیب در بازالت‌های نئوژن- کواترنری دهج- جوزم، با توجه به نبود شواهد قوی دال بر فرایند اختلاط ماگمایی، به نظر می‌رسد نقش این فرایند منتفی است و تغییر سرعت سرد شدن در سنگ‌های مناطق مورد مطالعه را می‌توان به فرایندهایی نظیر تبلور مرحله‌ای ماگما در زمان صعود، درشت‌شدگی بافتی، کاهش تبلور هسته‌ها در مراحل پایانی تبلور ماگمایی، کاهش فشار ضمن تبلور، و تغییر در نحوه تبلور ماگما به علت تغییر محیط ربط داد. ضمناً گفتنی است، بر اساس شکل (۵۶)، نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً دارای جهت‌یابی هستند که می‌توان آن را در قالب بافت جریان‌ی توسعه‌یافته در اثر گرانیروی پایین ماگما توجیه کرد. نکته جالب آنکه به نظر می‌رسد بافت جریان‌ی در نمونه DJ-8 که از لحاظ بافتی درشت‌بلورتر از بقیه نمونه‌هاست چندان محرز نیست و ضعیف‌تر توسعه یافته است؛ اما در مقاطعی که ریزبلورتر بوده‌اند بافت جریان‌ی بهتر توسعه یافته است. با توجه به اینکه نمونه‌های درشت‌بلورتر مبین تفریق‌یافتگی بیشتر قبل از خروج گدازه هستند این موضوع می‌توانسته باعث افزایش گرانیروی ماگما و ضعیف‌تر شدن بافت جریان‌ی شود.

1. Ni
2. Shelley
3. Spillar
4. Bell
5. Hort
6. Nugroho



شکل ۶. الف) تصاویر میکروسکوپی در نور قطبی صفحه‌ای؛ ب) تصاویر پردازش شده توسط نرم‌افزار ادوب فتوشاپ؛ ج) نمودارهای فراوانی نسبت به توزیع نسبت‌های S/I با برنامه CSD Slice 5؛ د) نمودار پراکندگی اندازه بلور پلازیوکلازهای اندازه‌گیری شده در بلورهای پلازیوکلاز؛ ه) نمودار گل‌سرخ میبین جهت‌یافتگی بافتی در نمونه‌های منتخب بازالت‌های نئوزن-کواترنری ناحیه دهج- جوزم

جدول ۳. نتایج به دست آمده از مطالعات پراکندگی اندازه بلور در سنگ‌های آتشفشانی نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم

Sample Number	Regression-volume (%)	Regression-interception	Slope	T (yr)	J ($\text{mm}^{-3}\text{s}^{-1}$)	G (mms^4)
DJ-4	17.75	12	31,1	1,01	$12^* 10^{-9}$	10^{-9}
	19.53	10.96	23,4	1,35	$10.96^* 10^{-9}$	10^{-9}
DJ-7	18.84	12.46	31.6	1.00	$12.46^* 10^{-9}$	10^{-9}
	19.21	10.72	20.4	1,55	$10.72^* 10^{-9}$	10^{-9}
DJ-8	59.56	10.31	14,9	2,12	$10.31^* 10^{-9}$	10^{-9}
	13.6	10.01	13,6	2,33	$10.01^* 10^{-9}$	10^{-9}
DJ-10	11.03	10.34	16,8	1,88	$10.34^* 10^{-9}$	10^{-9}
	11.3	9.65	14,0	2,26	$9.65^* 10^{-9}$	10^{-9}

نتیجه

بر اساس مطالعات انجام شده روی بلورهای پلاژیوکلاز موجود در الیوین بازالت‌های نئوژن- کواترنری منطقه دهج- جوزم مشخص شد بلورهای پلاژیوکلاز روی نمودار CSD دارای روند غیرخطی همراه با شکستگی و شیب متغیرند که بیانگر مراحل رشد با سرعت‌های هسته‌بندی و زمان سرد شدن متعدد برای این بلورهاست. سرعت هسته‌بندی برای بلورهای پلاژیوکلاز از $9/65 \times 10^{-9}$ تا $12/46 \times 10^{-9}$ و مدت زمان سرد شدن $2/33 - 1/00$ سال تعیین شد که نشان‌دهنده مدت زمان اقامت کوتاه بلورهای پلاژیوکلاز در اتاقک ماگمایی و سریع سرد شدن و سرعت سرد شدن زیاد بیشتر پلاژیوکلازها در یک سیستم ماگمایی آتشفشانی است. بلورهای پلاژیوکلاز عمدتاً دارای فرم تیغه‌ای‌اند که بیانگر سرعت بالای سردشدگی همراه با فشار پایین سیستم و سرعت هسته‌بندی بالا و انتشار و رشد کم بلور ضمن حرکت است که با شرایط آتشفشانی قابل توجیه است. رشد بلورها ضمن حرکت ماگما بلورهای کشیده‌تر به وجود می‌آورد. زیرا جابه‌جایی ماگما در این محیط ناآرام بیشتر است. بلورها از حالت هم‌بعد دور شده و شکل‌های طولی‌تر و نازک‌تر ایجاد کرده‌اند. در بازالت‌های مورد بررسی، پس از یک دوره فرایند هسته‌بندی و رشد بلورها، توقف هسته‌بندی رخ داده است که طی آن بلورهای کوچک‌تر موجود در محیط، که از سطح انرژی بالاتری نسبت به بلورهای متوسط یا بزرگ‌تر برخوردارند، به جهت رسیدن به شرایط تعادلی، در اثر فرایند درشت‌شدگی بافتی (بازپخت)، انحلال یافته‌اند و به منحنی‌های CSD که در اندازه‌های

کوچک دارای تقعر به سمت پایین و در اندازه‌های بزرگ‌تر خطی هستند منجر شده‌اند. بافت گلومروپورفیری موجود در سنگ‌های مورد مطالعه به صورت گلومروکریست‌های با ابعاد متفاوت دیده می‌شود که این موضوع بیانگر هسته‌بندی ناهمگن است (جرام^۱ و همکاران ۲۰۰۳) و نشان می‌دهد تبلور طی چندین مرحله از عمق تا نزدیک سطح زمین صورت گرفته است. دو یا چند مرحله از رشد، که به دو یا چند جمعیت متمایز کریستالی منجر می‌شود، را می‌توان به تحلیل فضایی کریستال، کاهش تبلور هسته‌ها در مراحل پایانی تبلور ماگمایی، ذوب به دنبال فروچاهیدگی (فروتافت) سریع، درشت‌شدگی بافتی، کاهش فشار در ضمن تبلور، و تغییر در نحوه تبلور ماگما به علت تغییر محیط ربط داد. نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً جهت‌یابی دارند و این موضوع با ماهیت الیوین بازالتی نمونه‌ها مطابقت دارد؛ درحالی‌که نمونه‌های درشت‌بلورتر به دلیل تفریق‌یافتگی بیشتر قبل از خروج گدازه و افزایش گرانشی ماگما از بافت جریانی ضعیف‌تری در قیاس با سایر نمونه‌ها برخوردارند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شده است. از این رو، نگارندگان نهایت سپاس خود را به همه مسئولان مربوطه اعلام می‌کنند.

منابع

- Armienti P., Pareschi M.T., Innocenti F., Pompilio M., 1994, Effects of magma storage and ascent on the kinetics of crystal growth, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 115, PP. 402-414.
- Azpiroz M.D., Fernández C., 2003, Characterization of tectono-metamorphic events using crystal size distribution (CSD) diagrams, A case study from the Acebuches metabasites (SW Spain), *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, PP. 935-947.
- Bell S. K., Hartley M. E., Joy K. H., Pernet-Fisher J. F., 2019, Crystal Size Distribution Analysis of Apollo15 Mare Basalts: New Methods and Some Recommendations, 50th Lunar and Planetary Science Conference, LPI Contrib., No. 2132.
- Brugger C.R., Hammer J.E., 2010, Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 300 (3-4), PP. 246-254.
- Cashman K.V., 1992, Groundmass crystallization of Mount St Helens dacite 1980-1986: a tool for interpreting shallow magmatic processes, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 109, PP.431-49.
- Cashman K.V., 1993, Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 113, PP. 126-142.
- Cashman K.V., Ferry J.M., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization III, *Metamorphic crystallization*, *Contributions to Mineralogy*

- and Petrology, Vol. 99, PP. 401–415.
- Cashman K.V., Kauahikaua J.P., Thornber C., 1999, Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of pahoehoe lava to a'a, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 61, PP. 306–323.
- Cashman K.V., Marsh B.D., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 99, PP. 292–305.
- Dimitrijevic M.D., 1973, Geology of Kerman region, Geological Survey of Iran, Report, Vol. 52-334.
- Foranacai A., Perinelli C., Armietti P., Favalli M., 2015, Crystal size distributions of plagioclase in lavas from the July-August 2001 MOUNT Etna eruption, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 77, PP. 70.
- Galwey A.K., Jonse K.A., 2003, An attempt to determine the mechanism of a natural mineral forming interpretations. Ph.D. thesis, University of Liverpool, England.
- Hammer J.E., Cashman K.V., Hoblitt R.P., Newman S., 1999, Degassing and microlite crystallization during pre-climactic events of the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 60, PP. 355–80.
- Higgins M.D., 1991, The origin of laminated and massive anorthosite, Sept Iles intrusion, Quebec, Canada, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 106, PP. 340-54.
- Higgins M.D., 1996, Crystal size distributions and other quantitative textural measurements in lavas and tuff from Mt Taranaki (Egmont volcano), New Zealand, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 58, PP. 194–204.
- Higgins M.D., 1998, Origin of anorthosite by textural coarsening: quantitative measurements of a natural sequence of textural development, *Journal of Petrology*, Vol. 39, PP. 1307–1325.
- Higgins M.D., 2000, Measurement of crystal size distributions, *American Mineralogist*, Vol. 85 (9), PP. 1105–1116.
- Higgins M.D., 2002, A crystal size-distribution study of the Kiglapait layered mafic intrusion, Labrador, Canada: evidence for textural coarsening, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 144, PP. 314–330.
- Higgins M.D., 2006, *Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology*, Cambridge University Press, Cambridge 265 p.
- Higgins M.D., 2011, Textural coarsening in igneous rocks, *International. Geology Review*, Vol. 53, PP. 354–376.
- Higgins M.D., Chandrasekharam D., 2007, Nature of Sub-volcanic Magma chambers, Deccan Province, India: Evidence from Quantitative Textural Analysis of Plagioclase Megacrysts in the Giant Plagioclase Basalts, *Journal of Petrology*, Vol. 48, PP. 885-900.
- Hort M., 1998, Abrupt Change in Magma Liquidus Temperature because of Volatile Loss or Magma Mixing: Effects on Nucleation, Crystal Growth and Thermal History of the Magma J.Petrol, Vol. 39, PP. 1063–76
- Jackson K.C., 1970, Text book of lithology, McGraw Hill book Company, 552 p.
- Jerram D.A., Chedale M.J., Philpotts A.R., 2003, Quantifying the building blocks of igneous rocks; are clustered crystal frameworks the foundation?, *Journal of Petrology*, Vol. 44, PP. 2033–2051.

- Kouchi A., Tsuchiyama, A., Sunagawa I., 1986, Effects of stirring on crystallization of basalt: texture and element partitioning, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 93, PP. 429-438.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Strekeisen A., Zanettin B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali – silica diagram, *Journal of Petrology*, Vol. 27, PP.745-750.
- Mangan M., 1990, Crystal size distribution systematics and the determination of magma storage times: The 1959 eruption of Kilauea volcano, Hawaii, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 44, PP. 295–302.
- Marsh B.D., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. Theory, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 99, PP. 277–291.
- Marsh B.D., 1998, On the interpretation of crystal size distributions in magmatic systems, *Journal of Petrology*, Vol. 39, PP. 553–600.
- Mislanakar P.G., Iyer S.D., 2001, Petrographical indicators of petrogenesis: Examples from Central Indian Ocean Basin Basalts, *Indian Journal of Marine Sciences*, Vol. 30, PP. 1-8.
- 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*, Vol. 46, PP. 1525–1541.
- Mock A., Jerram D.A., Breikreuz C., 2003, Using quantitative textural analysis to understand the emplacement of shallow level rhyolitic laccoliths: a case study from the Halle volcanic complex, Germany, *Journal of Petrology*, Vol. 44, PP. 833–849.
- Mohajjel M., Fergusson C.L., Sahandi M.R., 2003, Cretaceous- Tertiary convergence and continental collision Sanandaj-Sirjan zone Western Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 21, PP. 397-412.
- Morgan D.J., Jerram D.A., 2006, On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 154, PP. 1-7.
- Mujin M., Nakamura M., Miyake A., 2017, Eruption style and crystal size distributions: crystallization of groundmass nanolites in the 2011 shinmoedake eruption, *American Mineralogist*, Vol. 102, PP. 2367–2380.
- Nelson T.S., Montana A., 1992, Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression, *American Mineralogy*, Vol. 77, PP. 1242-1249.
- Ngonge E.D., Archanjo C.J., Hollanda M.H.B.M., 2013, Plagioclase crystal size distribution in some tholeiitic mafic dykes in Cabo Frio–Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 255, PP. 26–42.
- Ni H., Keppler H., Walte N., Schiavi F., Chen Y., Masotta M., Li Z., 2014, In situ observation of crystal growth in a basalt melt and the development of crystal size distribution in igneous rocks, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 167, PP. 1003.
- Nugroho R P., Disando T., Kurniawan I A., Abdurrachman M., 2019, Crystal size distribution (CSD) of plagioclase phenocryst/microphenocryst and the calculation of crystal resident times in the continuous central eruption sequences of Mount Lasem, Central Java, Indonesia, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1363, PP. 012041.
- Randolph A.D., Larson M.A., 1971, *Theory of Particulate processes*, New York, Academic Press, 251 p.

- Salisbury M. j., Bohrsen W. A., Clynne M. A., Ramos F. C., Hoskin P., 2008, Multiple plagioclase crystal populations identified by crystal size distribution and in situ chemical data: Implications for timescale of magma chamber processes associated with the 1915 eruption of Lassen Peak, CA, *Journal of Petrology*, Vol. 49, PP. 1755-1780.
- Shelley D., 1993, *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*, Chapman and Hall, London, 630 p.
- Silva M.M.D., Holtz F., Namur O., 2017, Crystallization experiments in rhyolitic systems: the effect of temperature cycling and starting material on crystal size distribution, *American Mineralogist*, Vol. 102, PP. 2284–2294.
- Spillar V; Dolejes D., 2015, Heterogeneous nucleation as the predominant mode of crystallization in natural magmas. Numerical model and implications for crystal-melt interaction. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, Vol. 169, PP. 4.
- Thompson R.N., 1984, Dispatches from the basalt front. 1. Experiments. *Proc. Geol. Ass.*, Vol. 95, PP. 249-262.
- Vinet N., Higgins M. D., 2010, Magma solidification processes beneath Kilauea volcano, Hawaii: a quantitative textural and geochemical study of the 1969-1974 Mauna Ulu Lavas, *Journal of Petrology*, Vol. 51, PP. 1297-1332.
- Wilhelm S., Worner G., 1996, Crystal size distribution in Jurassic Ferrar flows and sills (Victoria Land, Antarctica): evidence for processes of cooling, nucleation, and crystallization, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 125, PP. 1–15.
- Yoder H.S., Tilley C.E., 1962, Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems, *Journal of Petrology*, Vol. 3, PP.342-532.
- Zhang Bo., Hu X., Asimow P. D., Zhang X., Xu J., Fan D., Zhou W., 2019, Crystal size distribution of amphibole grown from hydrous basaltic melt at 0.6–2.6 GPa and 860–970 °C, *American Mineralogist*, Volume, Vol. 104, PP.525–535.
- Zingg Th., 1935, *Beitrag zur Schotteranalyse*, Unpubl, PhD Thesis, Universität Zürich, Switzerland, PP. 1—140.