

نرخ هسته‌بندی و رشد بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های آندزیتی و بازالتی منطقه عباس آباد، شرق شاهرود

لیلا برزگری، حبیب الله قاسمی، مهدی رضائی کهخائی*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت مقاله: ۹۶/۱/۲۲، نسخه نهایی: ۹۶/۳/۱۰)

چکیده: نوار ماگمایی ائوسن کاهک-عباس‌آباد، در کرانه شمال شرقی پهنه ساختاری ایران مرکزی، از داورزن در غرب سبزوار تا میامی در شرق شاهرود امتداد دارد. واحدهای سنگی این نوار شامل تناوبی از سنگ‌های آتشفشانی بازی - حدواسط (الیوین بازالت، بازالت، تراکی‌بازالت، تراکی‌آندزیتی و آنزیت) و سنگ‌های آذرآواری - رسوبی (انواع توف، پرش، آگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا، سنگ آهک نومولیتی و سنگ آهک توفی) به سن ائوسن میانی - پسین و سنگ‌های رسوبی الگیوسن و کواترنری هستند. سنگ‌های آتشفشانی این نوار، یک سری تفریقی پیوسته با خاستگاه مشترک از یک ماگمای والد بازالتی هستند. گدازه‌های بازالتی-آندزیتی منطقه از آنجا که از نوع پیروکسن پورفیری، پلاژیوکلاز پورفیری و پیروکسن-پلاژیوکلاز پورفیری هستند، نمونه‌های مناسبی برای بررسی‌های توزیع اندازه بلور (CSD) به‌شمار می‌روند. براساس نتایج این پژوهش، درشت بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن موجود در سنگ‌های آتشفشانی منطقه، به ترتیب در گستره زمانی ۸۶ تا ۱۱۸ سال و با نرخ هسته‌بندی از $10^{-10} \times 10^{-4} \text{ تا } 10^{-10} \times 10^{-5}$ میلی‌متر بر ثانیه و در گستره زمانی $10^4 \times 10^4 \text{ تا } 10^4 \times 10^4$ تا $10^4 \times 10^4$ میلی‌متر بر ثانیه در آشیانه ماگمایی رشد کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه بلور (CSD)، سنگ‌های بازالتی-آندزیتی، عباس‌آباد، شاهرود.

مقدمه

روش اندازه‌گیری توزیع اندازه بلور در گدازه‌ها پرداختند. آن‌ها در تکمیل بحث CSD دریافتند که میزان هسته‌بندی بلورها، روندی عکس اندازه آنها دارد، یعنی هر چه هسته‌بندی سریع‌تر باشد، بلورهای ایجاد شده اندازه کوچک‌تری خواهند داشت. در سال‌های اخیر، با پیروی از روش مارش [۱]، تحلیل‌های کمی بافت در سنگ‌های آذرین با نتایج بررسی‌های زمین‌شیمی ترکیب شده و برای ارزیابی نقش فرایندهای ماگمایی (همانند تراکم، جدایش، اختلاط و درشت‌شدگی بافتی)، در تبلور سنگ-ها مورد استفاده قرار گرفته است [۶-۵، ۸-۱۳]. به عنوان مثال، آلوس و همکاران [۱۴] به کمک روش CSD و داده‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای بلورهای پلاژیوکلاز، خاستگاه

در بررسی‌های کمی بافت‌های آذرین، اندازه دانه‌ها رایج‌ترین پارامتر مورد مطالعه است. بر این اساس، چگونگی توزیع اندازه دانه‌ها (Crystal Size Distribution=CSD) در سنگ می‌تواند اطلاعات مفیدی برای حل مسائل سنگ‌شناسی مهم نظیر سرعت رشد و مدت زمان تبلورکانی‌ها در اختیار پژوهشگران قرار دهد [۱-۵]. این بررسی‌ها، شرایط فیزیکی تبلور ماگما را مشخص می‌کنند و تکمیل‌کننده بررسی‌های زمین‌شیمیایی و ایزوتوپی هستند [۵، ۶]. موضوع CSD در سال ۱۹۸۸ پس از انتشار مقاله‌های مارش و کاشمن توسعه یافت [۱، ۲]. راندولف و لارسون [۷] از نخستین پژوهشگرانی بودند که به معرفی کاربرد

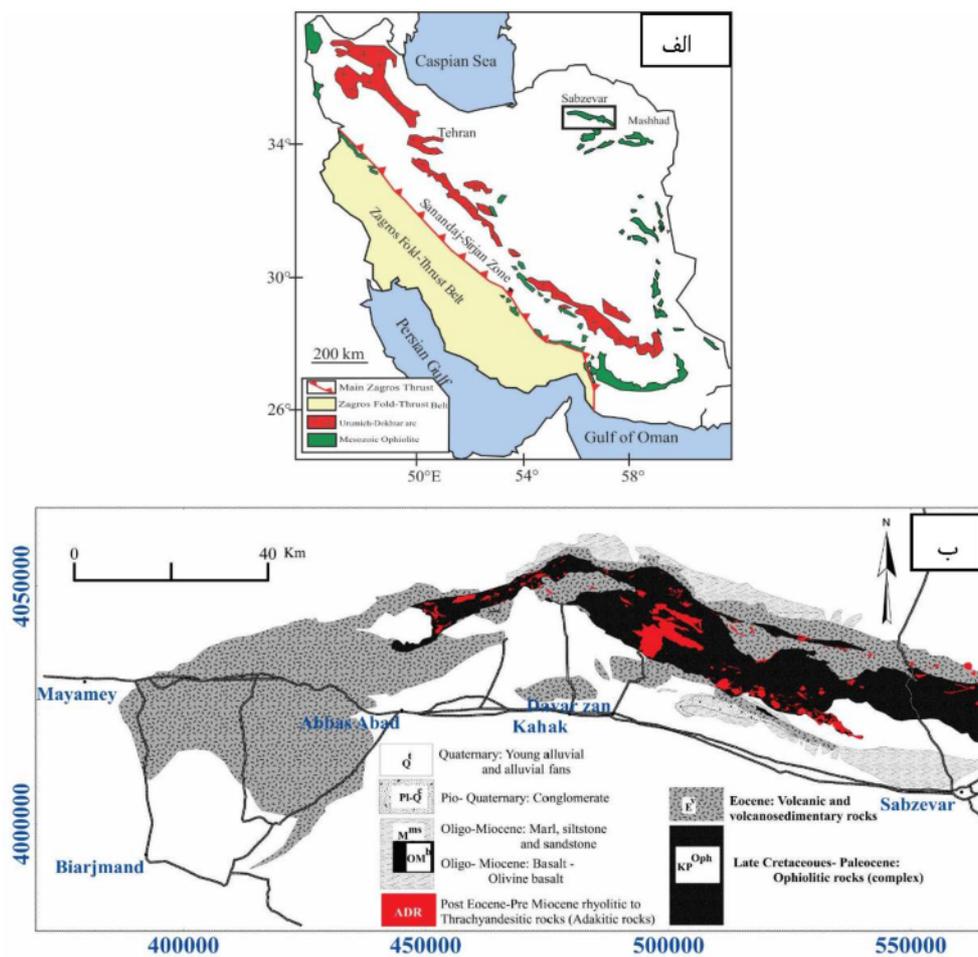
زمان رشد ۲/۵۳ تا ۳/۲۱ سال با نرخ هسته‌بندی از 10^{-9} تا 10^{-17} تا $9/53 \times 10^{-9}$ میلی‌متر بر ثانیه برای ریزبلورهای پلاژیوکلاز در این روانه‌هاست. رحیمی چاکدل و بویل [۲۴]، توزیع اندازه بلور کوارتز را در گارنت شیبست مورله فرانسه با استفاده از تصاویر الکترون برگشتی (BSE) تحلیل کرده‌اند. ایزدی‌کیان و همکاران [۲۵]، زمان‌سنجی رشد پورفیروبلاست‌ها و ارتباط آن با گامه‌های دگرریختی را در سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان بررسی کردند. ترکیان و همکاران [۲۶]، از داده‌های آماری پراکندگی اندازه بلورهای پیروکسن در مطالعه فرایندهای سنگ‌شناسی مراکز آتشفشانی شمال شرق قروه در کردستان استفاده کردند و زمان رشد پیروکسن‌ها را بین ۱۷ تا ۳۶ سال در طی دوره فوران به دست آوردند. پورخورسندی و همکاران [۲۷]، قوانین توزیع شکل و اندازه بلورهای پلاژیوکلاز و زمان‌های اقامت آن‌ها را در توده میکرومونوزوگابرویی قصیرداغ در جنوب شرق کوه آتشفشانی سبلان را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که زمان اقامت ماگما در این توده کم عمق حدود ۴۵۷ تا ۶۸۵ سال بوده است. الیاسی گولونجی و شیخ بگلو [۲۸] به بررسی توزیع اندازه بلورهای پیروکسن در آندزیت‌های علی‌آباد در سقز پرداخته و به این ترتیب زمان تبلور بلورهای پیروکسن را در اتاقک ماگمایی بین ۳ تا ۸ سال برآورد کرده و شواهد اختلاط ماگمایی را بررسی کرده‌اند. مجرد و شیخ بگلو [۲۹] نیز توزیع اندازه بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلاز را در داسیت‌های آداکیتی زنبیل در ارومیه به عنوان شاهدهی بر اختلاط ماگمایی و درشت‌شدگی بافتی بررسی کرده و دریافتند که زمان تبلور و رشد بلورهای دانه‌ریز بین ۱۵ تا ۲۰ و درشت بلورها بین ۳۰ تا ۳۸ سال بوده است. مجرد آلمان آباد [۳۰] توزیع اندازه پورفیروبلاست‌های کیانیت و استارولیت در سنگ‌های پلیتی دگرگون شده حمزه قاسم و خزائی بالا (شاهیندژ) را بررسی کرد.

نوار ماگمایی داورزن-عباس‌آباد (شکل ۱)، دربرگیرنده ضخامت زیادی از گدازه‌های بازالتی-آندزیتی ائوسن پسین است که به دلیل داشتن ساختارها و بافت‌های پورفیری و مگاپورفیری، نمونه‌های مناسبی برای بررسی‌های CSD هستند (شکل‌های ۲ و ۳). در این پژوهش، برای نخستین بار، از بافت و توزیع اندازه بلورها در درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن سنگ‌های منطقه، به‌منظور شناخت فرایندهای حاکم بر تحول ماگما در آشیانه ماگمایی و تعیین خاستگاه فرایندهای فیزیکی حاکم بر تبلور سنگ‌های آتشفشانی منطقه استفاده شده است.

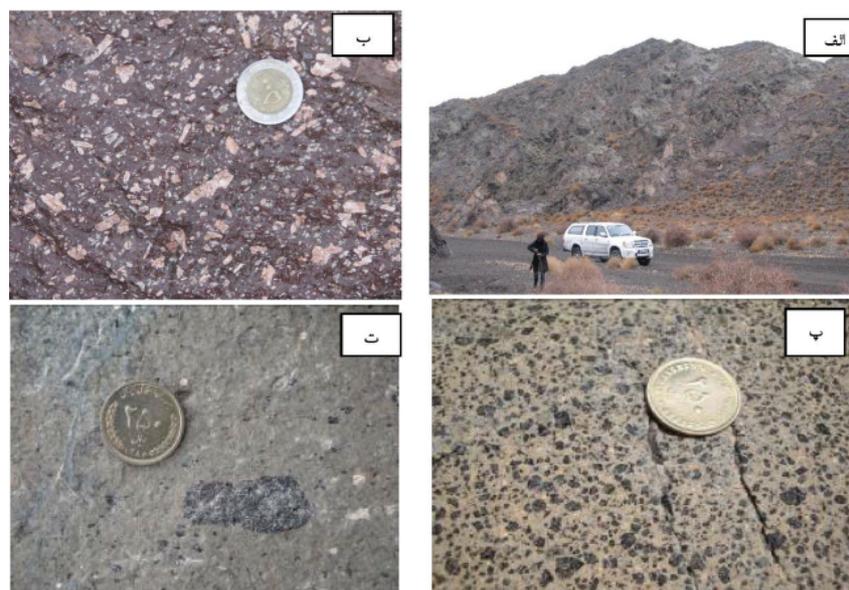
انکلاوهای میکروگرانیتوئیدی روشن موجود در توده گرانیته Salto در برزیل را بررسی کردند. همچنین گاتو و همکاران [۱۵] نیز با استفاده از این روش به بررسی تاریخ تشکیل بازالت‌های شمال غرب آفریقا پرداختند. از دیگر پژوهش‌هایی که اخیراً انجام شده است می‌توان به کارنی و همکاران [۱۶]، زیگ و لافگرن [۱۷] و رانو و کاروف [۱۸] اشاره نمود.

تعیین ارتباط کمی بین بافت سنگ امکان پیش‌بینی تغییرات بافتی در سه بعد را فراهم می‌آورد [۵، ۱۲] و تحلیل تصویر مقاطع نازک در سه بعد می‌تواند تا حد زیادی ویژگی‌ها و فرایندهای مختلف درگیر در ایجاد کانی‌ها را روشن سازد. بافت سنگ‌ها می‌تواند به طور کمی توسط اندازه‌گیری پارامترهایی همچون اندازه، شکل، جهت‌گیری و موقعیت معمول اجزاء سازنده، فضای اشغال شده توسط بلورها و قطعات تعیین شود [۱۲]. اثربخشی این روش، به کیفیت تصویرها و آگاهی از بافت‌سنگ برای تشخیص اجزاء آن، بستگی دارد. در نتیجه، این روش، تکمیل‌کننده تجزیه و تحلیل‌های معمول سنگ‌نگاری محسوب می‌شود. تهیه مقاطع نازک از سنگ‌ها و بررسی پارامترهای سه‌بعدی بافت آن‌ها، روشی مناسب برای این کار است [۹]. برای بررسی اندازه و توزیع سه‌بعدی بلورها به روش کمی، می‌توان از داده‌های به‌دست آمده از دو بعد مقاطع نازک سنگ استفاده کرد [۵-۱۳، ۱۹].

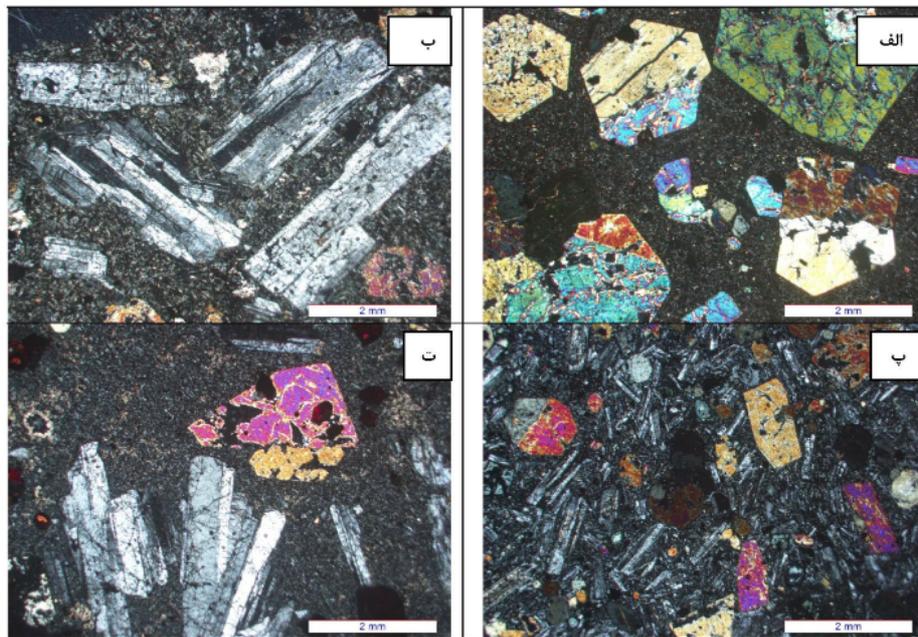
پژوهشگران ایرانی نیز در دو دهه اخیر به بررسی توزیع اندازه بلور در سنگ‌های آذرین و دگرگونی پرداخته‌اند. همام [۲۰]، به بررسی توزیع اندازه بلورهای گارنت، استارولیت، کیانیت و آندالوزیت در سنگ‌های هاله دگرگونی آردارا در اسکاتلند پرداخته است. مسعودی و همکاران [۲۱]، شرایط فیزیکی و تحولات تبلور ماگما در سنگ‌های آتشفشانی شرق قزوین را به روش CSD بر بلورهای پلاژیوکلاز بررسی کرده‌اند. براساس این پژوهش، مدت زمان رشد پلاژیوکلاز در واحدهای سنگی مختلف از ۲۱ تا ۸۰ سال متفاوت بوده است. آیتی و مهدوری [۲۲]، با بررسی توزیع اندازه بلورها در سنگ‌های آذرین، روند تکامل ماگما در اتاقک‌های ماگمایی را مطالعه کرده‌اند. بر پایه‌ی این پژوهش، حضور سه توزیع جمعیتی متفاوت در بلورهای آمفیبول موجود در سنگ‌ها نشانگر شرایط متفاوت تبلور در عمق‌های متفاوت و دست‌کم سه اتاقک ماگمایی است. رئیسی و همکاران [۲۳]، از مدل‌سازی عددی برای برآورد سرعت هسته‌بندی و زمان رشد ریزبلورهای پلاژیوکلاز در روانه‌های بازالت کواترنری گندم بریان در شمال شرقی کرمان استفاده کرده‌اند. یافته‌های این پژوهش نشانگر



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی (الف) و نقشه زمین‌شناسی ساده شده (ب) نوار ماگمایی داورزن-عباس‌آباد. برگرفته شده از مرجع [۳۴].



شکل ۲. الف) نمایی از تناوب سنگ‌های آندزیتی-بازالتی در نزدیکی عباس‌آباد در امتداد جاده عباس‌آباد-میامی. ب) تصویر نمونه دستی از ساخت پلاژیوکلاز پورفیری در سنگ‌های آندزیتی منطقه. پ) تصویر نمونه دستی از ساخت پیروکسن پورفیری در سنگ‌های بازالتی منطقه. ت) تصویر ماکروسکوپی از ساخت پیروکسن-پلاژیوکلاز پورفیری در سنگ‌های منطقه.



شکل ۳ تصویرهایی از انواع بافت‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه عباس‌آباد. (الف) بافت پیروکسن پورفیری. (ب) بافت پلاژیوکلاز پورفیری. پ و ت- بافت پیروکسن - پلاژیوکلاز پورفیری.

زمین شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی، با عنوان نوار ماگمایی داورزن - عباس‌آباد، در بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی در امتداد بزرگراه شاهرود- مشهد و بعد از میامی واقع است (شکل ۱). این منطقه به دلیل تنوع سنگی، داشتن منابع اقتصادی مانند مس و سهولت دسترسی، از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان بوده و بررسی‌های مختلفی بر آن انجام شده است. از جدیدترین بررسی‌ها می‌توان به کار موسوی [۳۱]، الهیاری [۳۲]، قاسمی و همکاران [۳۳] و قاسمی و رضائی کهخائی [۳۴] اشاره کرد. این نوار شامل، توالی ضخیمی از سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری و رسوبی وابسته به ائوسن میانی- پسین و سنگ‌های رسوبی الیگوسن و کواترنری است. سنگ‌های آذرین این نوار، در یک محیط کششی درون کمائی، ناشی از فرورانش لبه شمالی سنگ‌کره اقیانوسی حوضه نئوتتیس سبزوار به زیر لبه جنوبی البرز شرقی، در زمان ائوسن تشکیل شده است. روابط صحرائی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه، بیانگر وجود یک طیف ترکیبی پیوسته از سنگ‌های آتشفشانی (الیوین بازالت، تراکی بازالت، تراکی آندزی بازالت، آندزی بازالت و آندزیت)، و رابطه زایشی آن‌ها از طریق خط نزول مایع (جدایش بلور- مذاب) است [۳۳، ۳۴].

سنگ‌های آتشفشانی منطقه دارای بافت‌های ریزبلوری پورفیری، هیالومیکرولیتی پورفیری، جریانی (تراکیتی)، گلوپورپورفیری و غربالی هستند (شکل ۳). تنوع بافتی، تغییر و تحول پیوسته شامل ظهور و حذف برخی از کانی‌ها و حضور بافت‌های ناتعادلی (غربالی، خوردگی، اسکلتی و کناره‌های تحلیل رفته و جذبی)، بیانگر مسیر پیچیده شکل‌گیری ماگما و بروز فرایندهای مختلف تحول ماگمایی در آشیانه‌های پوسته‌ای است [۳۳].

پیشینه و روش انجام پژوهش

روش توزیع اندازه بلور بیشتر جهت بررسی فرایندهای مرتبط با صعود، جایگزینی و فوران ماگما استفاده می‌شود. این فرایندها شامل برآورد شرایط فیزیکی تبلور ماگما، زمان تبلور و سهم حجمی بلورها، فرایندهای جنبشی رخ داده طی تبلور (رشد و هسته‌بندی)، سرعت سردشدگی طی انجماد ماگما، به‌ویژه ارزیابی نقش نسبی تفریق، تراکم و درشت‌شدگی بافتی (تکامل استوالد)، اختلاط جمعیت‌های بلوری متفاوت در ماگما هستند [۵، ۹-۱۲]. نرخ رشد و هسته‌بندی بلور، انباشت بلوری و تفریق، درشت‌شدگی، اختلاط ماگمایی و چندزادگاهی ماگماها، فرایندهای سنگ‌شناسی نامیده می‌شوند. از میان کاربردهای یاد شده برای بررسی‌های CSD، اختلاط ماگمایی و چندزادگاهی ماگماها، به همراه انباشت بلوری و تفریق، سبب تغییر ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌ها می‌شوند. درشت‌شدگی، تغییرات

استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل‌گر تصویر همانند ایمیج جی. در این پژوهش، از روش سوم برای تعیین حاشیه بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن استفاده شد.

به منظور تحلیل کمی توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن، از بین نمونه‌های سنگی برداشت شده از واحدهای بازالتی- آندزیتی پورفیری مورد بررسی، تعداد ۸ نمونه انتخاب و در کارگاه مقطع‌گیری دانشگاه صنعتی شاهرود، از آن‌ها در سه جهت، مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شد (جدول ۱). نمونه‌های انتخابی، دارای درشت بلورهایی سالم از پلاژیوکلاز و پیروکسن بودند. از مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها، در آزمایشگاه میکروسکوپی دانشگاه صنعتی شاهرود، با میکروسکوپ سنگ‌نگاری مجهز به دوربین تصویربرداری، تصاویر مناسب تهیه شد. برای این منظور، از عدسی با بزرگنمایی ۲/۵ استفاده گردید. سپس، با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ تصاویر هر مقطع، به صورت موزائیک در کنار هم قرار گرفتند، تا تصویر کاملی از کل مقطع سنگ به دست آید. حاشیه‌های هر کدام از بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن، به روش دستی، در نرم‌افزار ایلاستریتور به صورت دورنگی (تصاویر سیاه و سفید) مشخص و بلورهای به هم چسبیده، از هم جدا شدند (شکل‌های ۴ و ۵). در پایان کار، عکس‌ها با فرمت tif ذخیره می‌شوند و برای پردازش آنها از نرم‌افزارهای تخصصی تحلیل‌گر تصاویر همانند ایمیج جی و CSDcorrection استفاده می‌شود. پارامترهایی چون مساحت، محیط، محور بزرگ، محور کوچک، طول و عرض بلورها به کمک نرم افزار ایمیج جی محاسبه شده و برآورد نسبتاً واقعی از شکل بلورها ارائه می‌شود. با استفاده از داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار ایمیج جی و به منظور تبدیل داده‌های دوبعدی مقاطع نازک به مقادیر واقعی سه بعدی، از نرم افزار تخصصی CSD استفاده می‌شود.

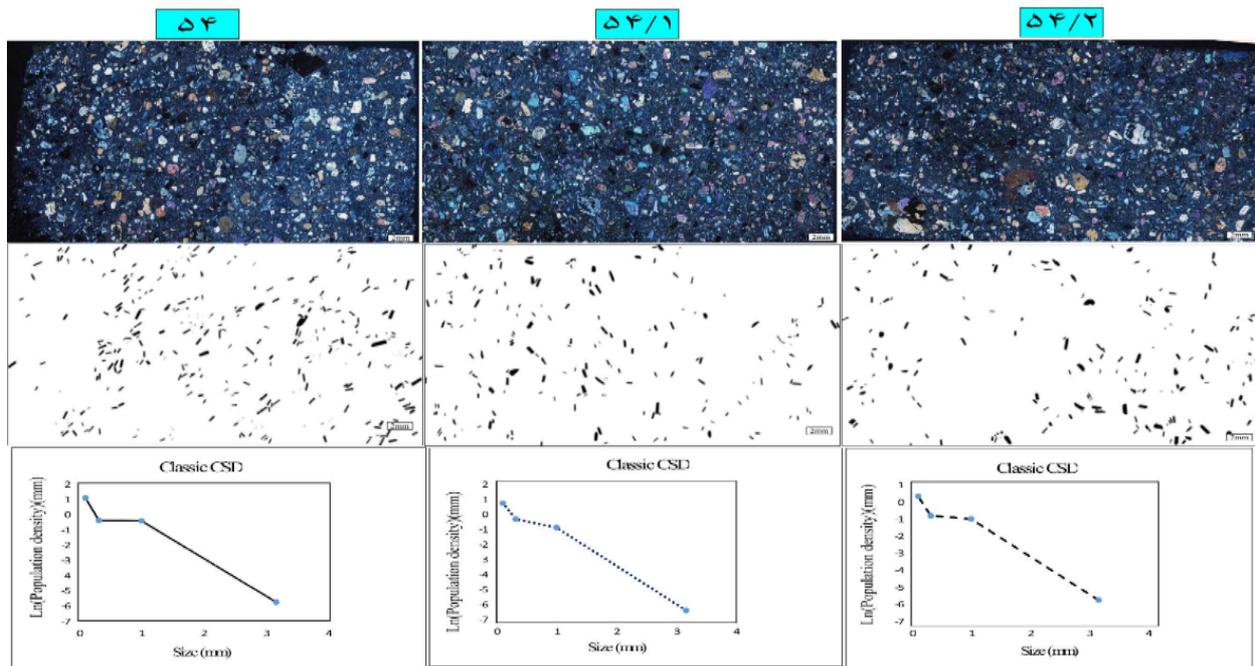
هسته‌بندی و رشد بلورها نیز تنها از طریق بررسی‌های بافتی سنگ‌ها قابل تشخیص هستند [۱۰].

مهمترین پارامترهای قابل اندازه‌گیری در روش توزیع اندازه بلور، اندازه و تراکم دانه‌ها هستند. اندازه دانه شامل فضای اشغال شده توسط دانه (بلور) است. اندازه، یک ویژگی سه بعدی از دانه است که می‌تواند به چندین روش مختلف تعیین شود؛ معمولاً اندازه‌گیری خطی، مناسب‌تر است. تراکم جمعیت بلوری، شامل مقدار عددی بلورهای یک کانی در واحد حجم، در چند گستره‌ی اندازه‌گیری است. هر دوی این پارامترها (اندازه و تراکم)، زیر مجموعه‌ای از یک پارامتر مهمتر با عنوان توزیع اندازه بلور هستند. تعیین اندازه و تراکم بلورها، براساس اندازه‌گیری آماری سطح مقطع بلورها در برش سطح سنگ (اسلب)، در مقیاس‌های ماکروسکوپی یا میکروسکوپی استوار است.

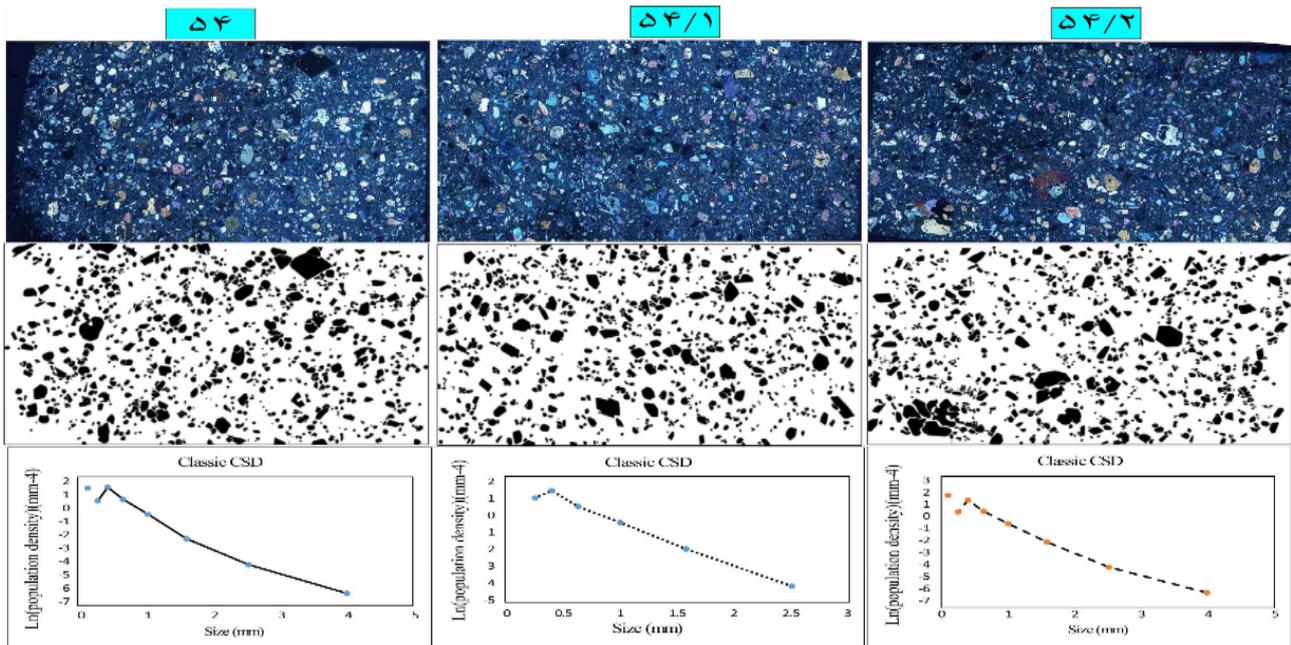
داده‌های توزیع اندازه بلور، روی یک نمودار $\ln(n)$ (تراکم جمعیت) نسبت به اندازه L (بزرگترین بُعد بلور) رسم می‌شوند. واحد اندازه‌گیری اندازه بلورها mm و برای تراکم جمعیت بلورها mm^{-4} است [۱، ۴، ۵، ۹-۱۲، ۳۵-۳۸]. ساده‌ترین روش برای تعیین اندازه بلورها، اندازه‌گیری طول و عرض آن‌ها در مقیاس میکروسکوپیکی است. روش پیچیده‌تر، تصویربرداری از کل یا بخشی از یک مقطع نازک است که به سه روش قابل انجام است: ۱- اندازه‌گیری طول و عرض بلورها با استفاده از خط‌کش به صورت دستی یا با استفاده از نرم‌افزار. ۲- بازترسیم حاشیه بلورها بر یک کاغذ شفاف و سپس تهیه تصویر روبش شده آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل‌گر تصویر. ۳- فراخوانی تصاویر تهیه شده از برش‌های کوچک یا مقاطع میکروسکوپی سنگ‌ها با استفاده از نرم‌افزارهایی چون کورل درا، فوتوشاپ و غیره، تعیین حاشیه بلورها، جداکردن بلورهای به هم چسبیده از یکدیگر و در نهایت، تعیین اندازه بلورها با

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های سنگی و مختصات جغرافیایی محل برداشت آنها بر اساس UTM.

شماره نمونه	موقعیت جغرافیایی		نام سنگ شناسی	محل نمونه گیری	سن نمونه
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
۱۰ AB	۴۴۴۴۴۷.۲۸	۴۰۳۰۵۶۴.۶۸	الیون بازالت	عباس‌آباد	اتوسن پسین
۲۶ AB	۴۷۸۹۹۱.۸۶	۴۰۳۰۲۴۱.۷۶	الیون بازالت	کاهک	
۲۸ AB	۴۷۹۰۲۱.۶۲	۴۰۳۰۱۸۹.۹۲	الیون بازالت	کاهک	
۴۱ AB	۴۰۴۰۵۰.۵۳	۴۰۳۰۱۴۱.۸۰	الیون بازالت	کاهک	
۴۳ AB	۴۰۴۳۸۰.۷۹	۴۰۳۰۱۳۸.۱۵	الیون بازالت	میاندشت	
۴۶ AB	۴۰۴۴۱۴.۰۷	۴۰۲۷۴۰۵.۰۰	الیون بازالت	میاندشت	
۴۹ AB	۴۳۳۴۴۱.۶۸	۴۰۲۷۴۰۵.۰۰	تراکی آندزیت	عباس‌آباد	
۵۴ AB	۴۳۴۵۸۲.۲۱	۴۰۲۶۲۱۴.۹۰	تراکی بازالت	عباس‌آباد	



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از مقاطع سنگ‌های تراکی بازالتی در سه بعد (نمونه‌های شماره ۵۴، ۵۴/۱ و ۵۴/۲) به همراه تصاویر دورنگی و نمودارهای CSD آن‌ها برای بلورهای پلاژیوکلاز. همه تصاویر دارای مقیاس ۲ میلی‌متر بوده و با عدسی ۲/۵ میکروسکوپ تهیه شده‌اند.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از مقاطع تهیه شده از نمونه سنگ تراکی بازالتی در سه بعد (۵۴، ۵۴/۱ و ۵۴/۲) به همراه تصاویر دورنگی و نمودارهای CSD آن‌ها برای بلورهای پیروکسن. همه تصاویر دارای مقیاس ۲ میلی‌متر بوده و با عدسی ۲/۵ میکروسکوپ تهیه شده‌اند.

محاسبه می‌شود [۵، ۸، ۱۰، ۱۱]. در نرم‌افزار CSD، بهترین خطی که از داده‌ها عبور می‌کند، نشان می‌دهد که با توجه به مقدار خطا، داده‌ها تا چه حد با خط مستقیم تطابق دارند. این تطابق با علامت اختصاری Q بیان می‌شود. مقادیر Q بزرگتر از

بهترین بیضی منطبق بر بلور، به عنوان مدل انتخابی در نظر گرفته می‌شود. عدد گردشگی برای بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن از بین اعداد صفر یا یک در نظر گرفته می‌شود. سپس، رگرسیون حجم، تقاطع و شیب، از طریق نرم‌افزار CSD

استفاده از نرم افزار CSDcorrection بین ۱:۳:۳ تا ۵:۵:۵:۱ تعیین شد. با توجه به مشاهدات، برای همه مقاطع تهیه شده از نمونه سنگ های آتشفشانی، گردشگی برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد، که ترکیبی بین مدل‌های بیضی و متوازی الاضلاع است. در این پژوهش، براساس نظر بروگر و هم (۱۱)، نرخ رشد 10^{-11} ، برای درشت بلورهای پلاژیوکلاز و نرخ رشد 10^{-8} برای ریزبلورهای پلاژیوکلاز لحاظ شد. میانگین مدت زمان اقامت بلور و نرخ هسته بندی بلورهای پلاژیوکلاز برای نمودارهای توزیع اندازه بلور با شیب زیاد به ترتیب برابر با ۰/۴۸ - ۱/۰۸ سال و $10^{-8} \times 3.3 - 10^{-8} \times 1.1$ mms⁻¹ و برای CSDهای با شیب کم نیز به ترتیب برابر با ۵۶-۱۱۸ سال و $10^{-8} \times 8.1 - 10^{-10} \times 0.58$ mms⁻¹ (جدول ۴). تراکم جمعیت بلورهای پلاژیوکلاز برای هر یک از مقاطع نمونه سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه توسط نرم‌افزار (CSD) 10^{-4} mm^{-3} - ۵/۱۵ - ۱۰/۸۲ ارزیابی شد. در شکل ۴ تصویرهای تهیه شده از مقاطع مربوط به یک نمونه سنگ تراکی بازالتی در راستاهای مختلف به همراه تصاویر دورنگی و نمودارهای CSD مربوط به هریک از آنها آورده شده است. کیفیت CSDها در اصل به اندازه نمونه (تعداد کل بلورها) بستگی دارد [۱۹]. این مقادیر با یافته‌های موک و جرام [۳۹]، همخوانی دارد که نشان دادند برای اندازه‌گیری دقیق یک CSD سه بعدی از داده‌های دو بعدی، به نمونه‌های با بیش از تقریباً ۲۰۰ بلور نیاز است.

۰/۱ نشان‌دهنده تطابق خوب ولی مقادیر بزرگتر از ۰/۰۱ نیز قابل قبول هستند [۵]. همچنین، گستره‌هایی با کمتر از ۵ بلور، از فهرست داده‌های CSD حذف می‌شوند، زیرا دقت لازم را ندارند (جدول های ۲ و ۳) [۱۰]. حد پائین CSD، کوچک‌ترین بلور قابل اندازه‌گیری است و به معنای کوچک‌ترین بلور موجود در سنگ نیست. اندازه بلورها، باید بزرگ‌تر از ضخامت استاندارد یک مقطع نازک (۰/۰۳ میلی‌متر) باشند. اگر بلورها کوچک‌تر از این حد باشند، اندازه‌گیری نمی‌شوند [۵، ۱۰]. حد بالای اندازه در روش CSD، تعداد دانه‌های بزرگی است که در بزرگ‌ترین گستره اندازه موجود هستند.

بحث

توزیع اندازه، نرخ رشد و مدت زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در آشیانه ماگمایی

پردازش و تحلیل توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در ۷ نمونه و پیروکسن‌ها در ۶ نمونه انجام شد چنانکه گفته شد واحد به کار رفته برای اندازه بلورها mm است.

در مقاطع تهیه شده از سنگ آتشفشانی منطقه عباس‌آباد در سه بعد، بلور پلاژیوکلاز در مساحتی به وسعت ۷۷۵ mm² - ۶۶۵ اندازه‌گیری شدند. علت انتخاب بلورهای پلاژیوکلاز، مقدار فراوانی بالا و سرعت تبلور نسبتاً پایین آن‌هاست که سبب می‌شود تاریخچه فرایندهای پیچیده حاکم بر آشیانه‌های ماگمایی را به خوبی در خود ثبت کنند. ابعاد این بلورهای پلاژیوکلاز با

جدول ۲ تعداد بلورهای پلاژیوکلاز در هر گستره از مساحت اندازه‌گیری شده نمونه سنگ‌های تراکی بازالتی با شماره نمونه ۵۴.

۵۴PL	بازه	۰/۰۳۱۶-۰/۱	۰/۱-۰/۳۱۶	۰/۳۱۶-۱	۱-۳/۱۶	۳/۱۶-۱۰	۱۰-۳۱/۶	۳۱/۶-۱۰۰
	تعداد بلور	۱۱	۴۰	۱۸۹	۹	۰	۰	۱
۵۴-۱PL	بازه	۰/۰۳۱۶-۰/۱	۰/۱۰۰-۰/۳۱۶	۰/۳۱۶-۱	۱-۳/۱۶			
	تعداد بلور	۹	۳۴	۱۲۴	۵			
۵۴-۲PL	بازه	۰/۰۳۱۶-۰/۱	۰/۱۰۰-۰/۳۱۶	۰/۳۱۶-۱/۰۰	۱/۰۰-۳/۱۶			
	تعداد بلور	۶	۲۵	۱۱۸	۱۰			

جدول ۳ تعداد بلورهای پیروکسن در هر گستره از مساحت اندازه‌گیری شده نمونه سنگ‌های تراکی بازالتی با شماره نمونه ۵۴.

۵۴Px	بازه	۰/۰۵۶۲-۰/۱	۰/۱۰۰-۰/۱۷۸	۰/۱۷۸-۰/۳۱۶	۰/۳۱۶-۰/۵۶۲	۰/۵۶۲-۱	۱-۱/۷۸	۱/۷۸-۳/۱۶	۳/۱۶-۵/۶۲	
	تعداد بلور	۸	۰	۱۴۵	۱۹۴	۱۶۳	۵۶	۱۳	۲	
۵۴-۱Px	بازه	۰/۰۶۳۱-۰/۱	۰/۱-۰/۱۵۸	۰/۱۵۸-۰/۲۵۱	۰/۲۵۱-۰/۳۹۸	۰/۳۹۸-۰/۶۳۱	۰/۶۳۱-۱	۱-۱/۵۸	۱/۵۸-۲/۵۱	۲/۵۱-۳/۹۸
	تعداد بلور	۴	۰	۶۸	۱۵۵	۱۴۴	۱۳۰	۶۵	۱۸	۲
۵۴-۲Px	بازه	۰/۰۵۶-۰/۱	۰/۱-۰/۱۷۸	۰/۱۷۸-۰/۳۱۶	۰/۳۱۶-۰/۵۶۲	۰/۵۶۲-۱	۱-۱/۷۸	۱/۷۸-۳/۱۶	۳/۱۶-۵/۶۲	
	تعداد بلور	۱۲	۰	۱۲۹	۱۹۲	۱۵۸	۷۸	۱۲	۲	

جدول ۴ شیب، محل تقاطع و نرخ هسته‌بندی و زمان رشد هر یک از نمودارهای CSD بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه‌های آندزیتی و بازالتی که دارای شکستگی هستند.

نمونه	سهم حجمی بلور	خط دارای شیب زیاد	محل تقاطع CSD برای خط با شیب زیاد	سرعت هسته‌بندی برای خط با شیب زیاد mms^{-1}	زمان رشد (Yr)	خط دارای شیب کم	محل تقاطع CSD برای خط با شیب کم	سرعت هسته‌بندی برای خط با شیب کم mms^{-1}	زمان رشد (Yr)
AB ۲۸	۳/۴۹	-۳۶۱	۱/۶۹	۱.۶۹×10^{-۸}	۰.۸۷	-۲.۹۹	۱/۰۵	۱.۰۵×10^{-۱۰}	۱۰۶/۰۵
AB۲۸-۱	۳/۸۶	-۲۷۴	۰/۶۹	۰.۶۹×10^{-۸}	۱/۱۵	-۲.۷۰	۰/۶۶	۰.۶۶×10^{-۱۰}	۱۱۷/۴۴
AB۲۸-۲	۱/۶۲	-۳۹۶	۰/۹۵	۰.۹۵×10^{-۸}	۰.۸۰	-۳.۷۰	۰/۷۲	۰.۷۲×10^{-۱۰}	۸۵/۷۰
۴۱AB	۲/۶۹	-۶۶۸	۳/۱۶	۳.۱۶×10^{-۸}	۰/۴۷	-۶.۰۹	۲/۷۷	۲.۷۷×10^{-۱۰}	۵۲/۰۶
۴۱-۱AB	۲/۵۰	-۵۸۰	۲/۷۰	۲.۷۰×10^{-۸}	۰/۵۴	-۴.۵۸	۱/۸۶	۱.۸۶×10^{-۱۰}	۶۹/۲۳
۴۱-۲AB	۴/۴۰	-۶۹۹	۴/۱۱	۴.۱۱×10^{-۸}	۰/۴۵	-۶.۴۳	۳/۷۵	۳.۷۵×10^{-۱۰}	۴۹/۳۱
AB ۴۳	۹/۴۸	-۲۷۵	۱/۴۱	۱.۴۱×10^{-۸}	۱/۱۵	-۲.۶۵	۱/۲۹	۱.۲۹×10^{-۱۰}	۱۱۹/۶۵
AB ۴۳-۱	۵/۴۱	-۲۷۹	۰/۷۸	۰.۷۸×10^{-۸}	۱/۱۳	-۲.۷۰	۰/۶۷	۰.۶۷×10^{-۱۰}	۱۱۷/۴۴
۴۳-۲AB	۷/۴۰	-۲۹۹	۱/۵۰	۱.۵۰×10^{-۸}	۱/۰۶	-۲.۸۷	۱/۳۵	۱.۳۵×10^{-۱۰}	۱۱۰/۴۸
۴۶AB	۴/۴۳	-۳۰۵	۱/۲۷	۱.۲۷×10^{-۸}	۱/۰۳	-۳.۰۱	۱/۲۳	۱.۲۳×10^{-۱۰}	۱۰۵/۳۴
AB ۴۶-۱	۶/۲۰	-۲۹۴	۱/۵۳	۱.۵۳×10^{-۸}	۱/۰۷	-۲.۸۷	۱/۴۳	۱.۴۳×10^{-۱۰}	۱۱۰/۴۸
۴۹-۱AB	۸/۵۸	-۲۷۹	۱/۷۳	۱.۷۳×10^{-۸}	۰/۱۱	-۲.۷۸	۱/۷۰	۱.۷۰×10^{-۱۰}	۱۱۴/۰۶
۴۹-۲ AB	۱۸/۴	-۳۰۳	۲/۳۰	۲.۳۰×10^{-۸}	۰/۱۰	-۳.۰۲	۲/۲۶	۲.۲۶×10^{-۱۰}	۱۰۴/۹۹
AB ۵۴	۵/۱۳	-۴	۲/۰۶	۲.۰۶×10^{-۸}	۰/۷۹	-۳.۶۱	۱/۷۴	۱.۷۴×10^{-۱۰}	۸۷/۸۳
۵۴-۱AB	۲/۷۷	-۴/۱۱	۱/۶۷	۱.۶۷×10^{-۸}	۰/۷۷	-۳.۵۶	۱/۲۴	۱.۲۴×10^{-۱۰}	۸۹/۰۷
AB۵۴-۲	۲/۳۲	-۴/۰۳	۱/۶۰	۱.۶۰×10^{-۸}	۰/۷۸	-۳.۸۸	۱/۴۶	۱.۴۶×10^{-۱۰}	۸۱/۷۲
AB ۱۰	۱/۶۲	-۳	۱/۲۴	۱.۲۴×10^{-۸}	۱/۰۵	-۲.۸۹	۰/۹۳	۰.۹۳×10^{-۱۰}	۱۰۹/۷۲
AB۱۰-۱	۱/۵۳	-۲۹۹	۱/۲۱	۱.۲۱×10^{-۸}	۱/۰۶	-۲.۸۴	-۲.۸۴	-۲.۸۴×10^{-۱۰}	۱۱۱/۶۵
AB ۱۰-۲	۳/۵۴	-۲.۸۰	۰.۸۵	۰.۸۵×10^{-۸}	۱/۱۳	-۲.۳۹	۰/۱۵	۰.۱۵×10^{-۱۰}	۱۳۲/۶۷

افزار CSD correction بین ۲:۲ تا ۸:۸:۱ ارزیابی شد. گردشگری بلورهای پیروکسن برای تمامی مقاطع برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد. میانگین مدت اقامت بلور و نرخ هسته‌بندی بلورهای پیروکسن برای نمودارهای توزیع اندازه بلور با شیب زیاد به ترتیب از ۱.۸×10^{-۳} - ۱.۳ سال و ۹×10^{-۶} - ۴ و برای CSDهای با شیب کم نیز به ترتیب برابر با ۱.۶ - ۱.۲×10^{-۳} سال و ۹×10^{-۶} - ۳ برآورد شد (جدول ۵ و ۶). تراکم جمعیت بلورهای پیروکسن برای سنگ آتشفشانی نیز با نرم افزار CSD برابر با $۲۰ \text{ mm}^{-۴}$ - ۱۴ ارزیابی شد.

تحلیل توزیع اندازه بلورهای پیروکسن در ۶ نمونه از ۲۰ نمونه مورد بررسی که بلور پیروکسن به تعداد کافی دارند، صورت گرفت. روند کار مشابه تحلیل توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز است، با این تفاوت که نرخ رشد بلورهای پیروکسن برابر با $۱۰^{-۵}$ در نظر گرفته شد [۱۱]. تصویر مقاطع میکروسکوپیکی یکی از نمونه‌های مورد بررسی که هر یک در سه بعد تهیه شده نیز به همراه تصاویر دورنگی (سیاه و سفید) بلور مورد بررسی (پیروکسن) و نمودارهای CSD رسم شده برای هر یک از آنها توسط نرم‌افزار CSD کارکشن در شکل ۵ آورده شده است. نسبت ابعاد شکل فرضی (بهترین بیضی منطبق با بلور) برای بلورهای پیروکسن موجود در این مقاطع با استفاده از نرم-

جدول ۵ میانگین زمان رشد و سرعت هسته‌بندی هر یک از نمودارهای CSD بلورهای پیروکسن، در نمونه‌های آندزیت-بازالتی که دارای شکستگی هستند.

نمونه	میانگین سنی خط دارای شیب زیاد (Yr)	میانگین سرعت هسته‌بندی برای خط با شیب زیاد (mms^{-1})	میانگین سنی خط دارای شیب کم (Yr)	میانگین سرعت هسته‌بندی برای خط با شیب کم (mms^{-1})
AB ۱۰	۱.۱۸×10^{-۳}	۰.۸۱×10^{-۳}	۱.۲۱×10^{-۳}	۰.۷۸×10^{-۳}
AB ۲۶	۱.۳۳×10^{-۳}	۰.۴۵×10^{-۳}	۱.۳۴×10^{-۳}	۰.۸۹×10^{-۳}
AB ۲۸	۱.۵۶×10^{-۳}	۰.۴۳×10^{-۳}	۱.۶×10^{-۳}	۰.۲۹×10^{-۳}
AB ۴۳	۱.۶۱×10^{-۳}	۰.۵۱×10^{-۳}	۱.۶۷×10^{-۳}	۰.۱۸×10^{-۳}
۴۶AB	۱.۸۲×10^{-۳}	۰.۱۹×10^{-۳}	۲.۰۱×10^{-۳}	۰.۵۵×10^{-۳}
۵۴AB	۹.۷۳×10^{-۴}	۲.۲۳×10^{-۳}	۱.۰۲×10^{-۳}	۲×10^{-۳}

جدول ۶ شیب، محل تقاطع و سرعت هسته‌بندی و رشد هر یک از نمودارهای CSD بلورهای پیروکسن در نمونه‌های آندزیت-بازالتی که دارای شکستگی و خمیدگی هستند.

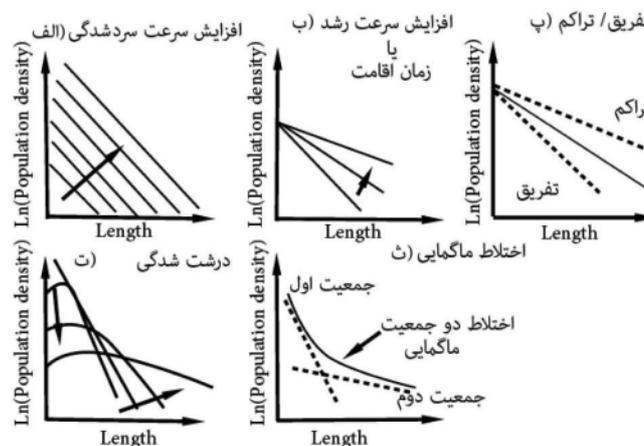
نمونه	سهم حجمی بلور	خط دارای شیب زیاد	تقاطع CSD برای خط با شیب زیاد	سرعت هسته بندی برای خط با شیب زیاد mms^{-1}	زمان رشد (Yr)	خط دارای شیب کم	تقاطع CSD برای خط با شیب کم	سرعت هسته بندی برای خط با شیب کم mms^{-1}	زمان رشد (Yr)
AB ۱۰	۹ / ۲۱	-۲,۹۴	۰,۹۳	$۰,۹۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۰۷ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۹۰	۰,۹۴	$۰,۹۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۰۹ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۱۰-۱	۱۷ / ۹	-۲,۵۲	۱,۰۵	$۱,۰۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۲۵ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۴۴	۱,۰۲	$۱,۰۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۳ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۱۰-۲	۹ / ۱۱	-۲,۵۹	۰,۴۶	$۰,۴۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۲۲ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۵۳	۰,۴۰	$۰,۴۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۲۵ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۶	۹ / ۲۸	-۲,۳۱	۰,۴۲	$۰,۴۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۳۷ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۱۸	۰,۲۵	$۰,۲۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۴۵ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۶-۱	۱۶ / ۱	-۲,۷۴	۰,۷۵	$۰,۷۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۱۵ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۷۲	۱,۰۲	$۱,۰۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۱۶ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۶-۲	۱۶ / ۳	-۲,۲۳	۱,۴۲	$۱,۴۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۴۲ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۱۵	۰,۲۰	$۰,۲۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۴۷ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۸	۲۴ / ۷	-۲,۱۰	۰,۳۳	$۰,۳۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۵۰ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۰۳	۰,۲۰	$۰,۲۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۵۶ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۸-۱	۲۱ / ۶	-۲,۰۲	۰,۴۸	$۰,۴۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۵۶ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۹۹	۰,۳۸	$۰,۳۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۵۹ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۲۸-۲	۲۹ / ۹	-۱,۹۸	۰,۴۲	$۰,۴۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۶۰ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۹۲	۰,۳۱	$۰,۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۶۵ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۴۳	۲۰ / ۶	-۱,۸۱	-۰,۱۳	$-۰,۱۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۷۵ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۷۳	-۰,۲۸	$-۰,۲۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۸۳ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۴۳-۱	۲۱ / ۹	-۱,۹۱	-۰,۱۱	$-۰,۱۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۶۶ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۹۰	-۰,۱۱	$-۰,۱۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۶۶ \times ۱۰^{-۳}$
۴۳-۲AB	۱۵ / ۸	-۲,۲۳	-۰,۲۷	$-۰,۲۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۴۴ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۰۷	-۰,۱۷	$-۰,۱۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۵۳ \times ۱۰^{-۳}$
۴۶AB	۱۹ / ۷	-۱,۷۱	-۰,۱۶	$-۰,۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۸۵ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۵۷	-۰,۷۰	$-۰,۷۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۲,۰۲ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۴۶-۱	۲۸ / ۷	-۱,۶۸	-۰,۱۵	$-۰,۱۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۸۸ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۴۷	-۰,۴۶	$-۰,۴۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۲,۱۵ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۴۶-۲	۱۸ / ۸	-۱,۸۱	-۰,۲۷	$-۰,۲۷ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۷۵ \times ۱۰^{-۳}$	-۱,۶۹	-۰,۴۹	$-۰,۴۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۸۷ \times ۱۰^{-۳}$
۵۴ AB	۲۱ / ۸	-۳,۴۲	۲,۴۲	$۲,۴۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۹,۲۷ \times ۱۰^{-۴}$	-۳,۳۳	۲,۲۱	$۲,۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۹,۵۲ \times ۱۰^{-۴}$
AB ۵۴-۱	۲۲ / ۱	-۳,۲۹	۲,۲۹	$۲,۲۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۹,۶۴ \times ۱۰^{-۴}$	-۳,۱۱	۲,۰۵	$۲,۰۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۰۲ \times ۱۰^{-۳}$
AB ۵۴-۲	۲۰ / ۵	-۳,۰۶	۲	۲×۱۰^{-۵}	$۱,۰۳ \times ۱۰^{-۳}$	-۲,۸۸	۱,۷۴	$۱,۷۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۱۰ \times ۱۰^{-۳}$

داده‌اند. با مقایسه نمودارهای توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در هر یک از سنگ‌های بازالتی- آندزیتی منطقه عباس‌آباد و نمودارهای ارائه شده توسط این پژوهشگران (شکل‌های ۶ تا ۹)، می‌توان تفسیرهای مناسبی ارائه کرد. برای درشت‌شدگی بلور، دو مدل فرض شده است: (۱) مدل LSW (۲) مدل CN. در مدل LSW فرض می‌شود که سیستم رقیق است (همانند ماگماهای بازالتی) و برهم‌کنشی بین بلورها وجود ندارد و در این صورت، همه بلورها فوری با سیال همگن اطراف، ارتباط مستقیم برقرار می‌کنند. در مدل CN، بلورها با هم و با سیال پیرامون ارتباط برقرار می‌کنند [۵] (شکل ۷).

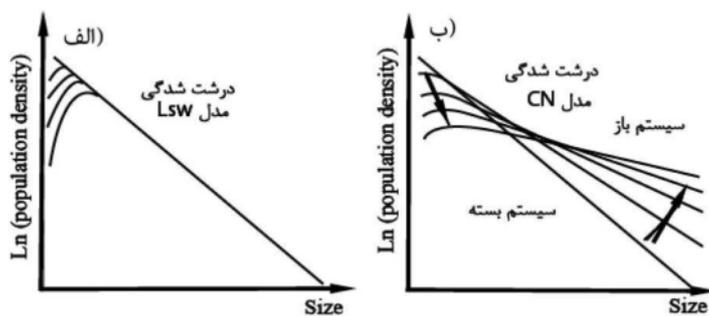
تفسیر منحنی‌های CSD برای بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های بازالتی- آندزیتی عباس‌آباد

در بررسی‌های CSD، تفسیر شکل نمودارها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکست یا خمیدگی در این نمودارها، به فرایندهایی چون انباشت و از بین رفتن بلور، تراکم، اختلاط جمعیت‌های بلوری و هسته‌بندی نهایی بلور در اثر فرایند بازپخت یا تکامل بافتی استوالد (درشت‌شدگی) نسبت داده می‌شود [۵، ۱۲].

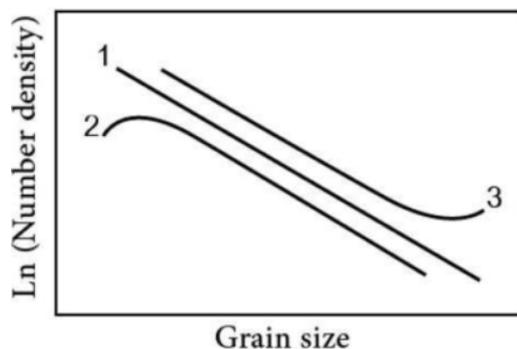
هیگینز و روبرگ [۱۰]، هیگینز [۵]؛ و لنتز و مک سوئین [۴۰] و واندروزان و همکاران [۱۳] نمودارهایی برای تفسیر شکل‌های مختلف توزیع اندازه بلورها در سنگ‌های آذرین ارائه



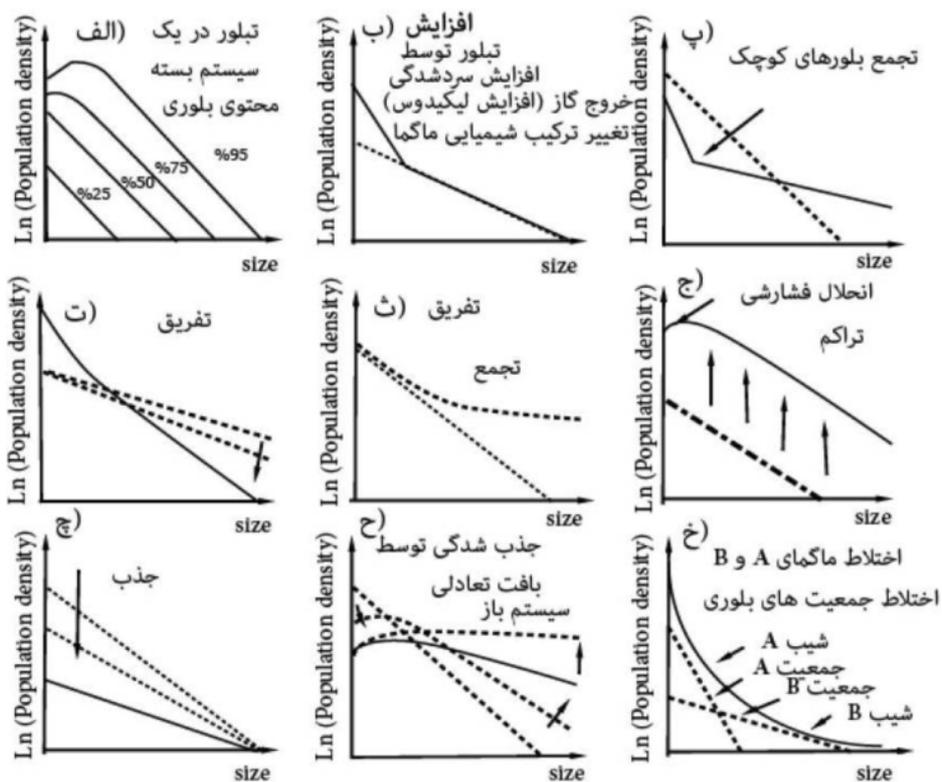
شکل ۶ نمودارهای نشان‌دهنده فرایندهای موثر بر شکل CSD سنگ‌های ماگمایی [۱۰]. الف) افزایش سرعت سردشدگی. ب) افزایش زمان اقامت یا نرخ رشد. پ) انباشت و جدایش بلورها. ت) درشت‌شدگی بلورها. ث) اختلاط ماگمایی.



شکل ۷ نمودارهای نشان دهنده دو نوع مدل درشت‌شدگی بلور: الف) مدل LSW و ب) مدل CN [۵].



شکل ۸ نمودار نشان‌دهنده فرایندهای موثر بر شکل CSD سنگ‌های ماگمایی [۴۰]: ۱- رشد و هسته‌بندی متوالی بلورها، ۲- تهی‌شدگی از بلورهای کوچک شاید به دلیل درشت‌شدگی یا توقف هسته‌بندی همراه با رشدی متوالی، ۳- فراوانی بلورهای بزرگ شاید به دلیل انباشت یا افزایش درشت‌بلورها.



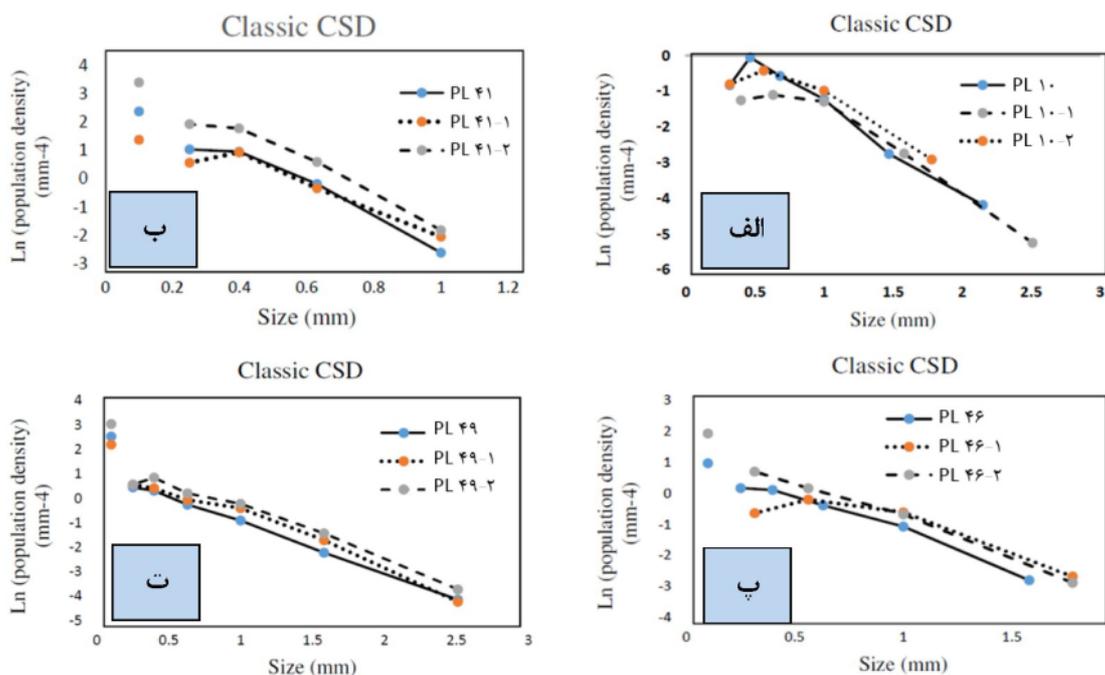
شکل ۹ نمودارهای نشان دهنده فرایندهای موثر بر شکل CSD سنگ‌های ماگمایی [۱۳].

فشاری از فرایندهای مکانیکی محسوب می‌شود، که در آن آرایش دوباره و فشردگی بلورها، سبب خروج سیال‌های موجود در منافذ آن‌ها می‌شود.

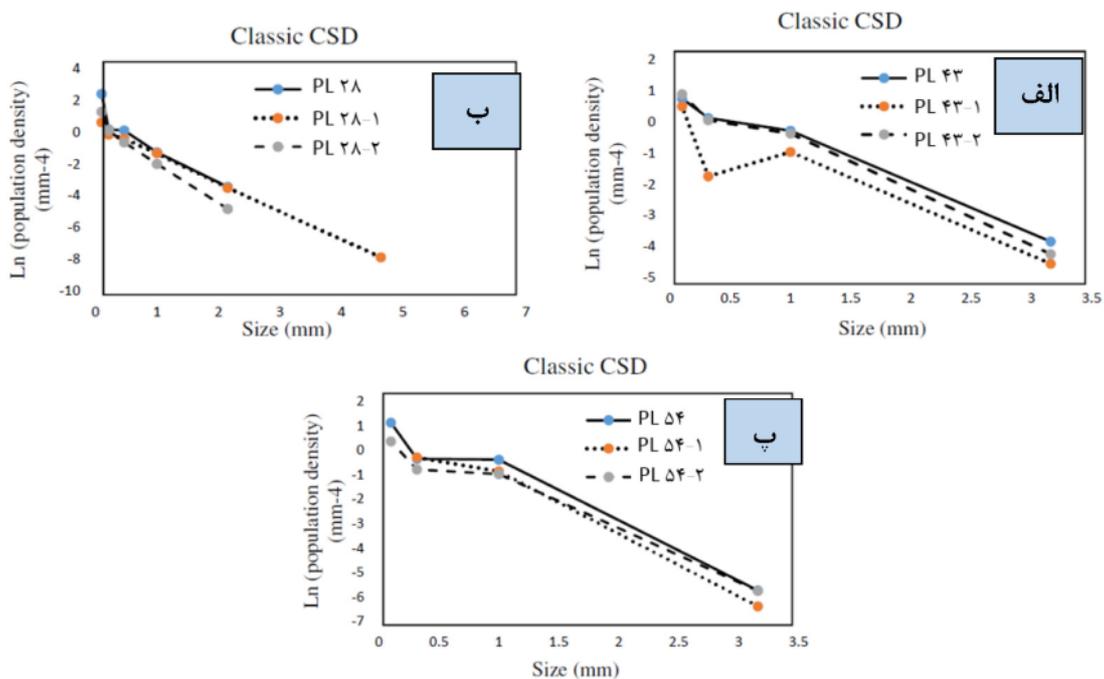
خمش به سمت بالا در سمت چپ نمودارهای CSD نمونه سنگ‌های AB ۲۸، AB ۴۳ و AB ۵۴ (شکل ۱۱) می‌تواند نشان‌دهنده اختلاط جمعیت‌های بلوری، تجمع بلورهای کوچک، افزایش تبلور بلورهای پلاژیوکلاز به دلیل افزایش سرعت سردشدگی، خروج گازها و مواد فرّار و یا تغییر ترکیب شیمیایی ماگما باشد که با نمودار ث در شکل ۶ و نمودارهای ب، پ و خ در شکل ۹، همخوانی دارند.

شکل ۱۲ نمودارهای CSD را برای بلورهای پیروکسن موجود در نمونه سنگ‌های AB ۱۰، AB ۲۸، AB ۴۳، AB ۲۶ و AB ۵۴ از سنگ‌های بازالتی-آندزیتی منطقه عباس آباد نشان می‌دهد. خمش به سمت بالا در سمت راست این نمودارها با نمودار ث در شکل ۶ و نمودارهای ب، پ، ت، ث و خ در شکل ۹، همخوانی دارد. لنتز و مک‌سوئین [۴۰]، معتقدند که چرخش به سمت بالا در جهت بزرگ‌ترین اندازه‌های بازه، ممکن است به دلیل انباشت یا افزایش بلورهای بزرگ یا به عبارتی دیگر به علت تهنشینی یا تفریقی بلورها طی تبلور جدایشی باشد (منحنی ۳ در شکل ۸). به‌علاوه، این امر می‌تواند پیامد اختلاط جمعیت‌های بلوری نیز باشد.

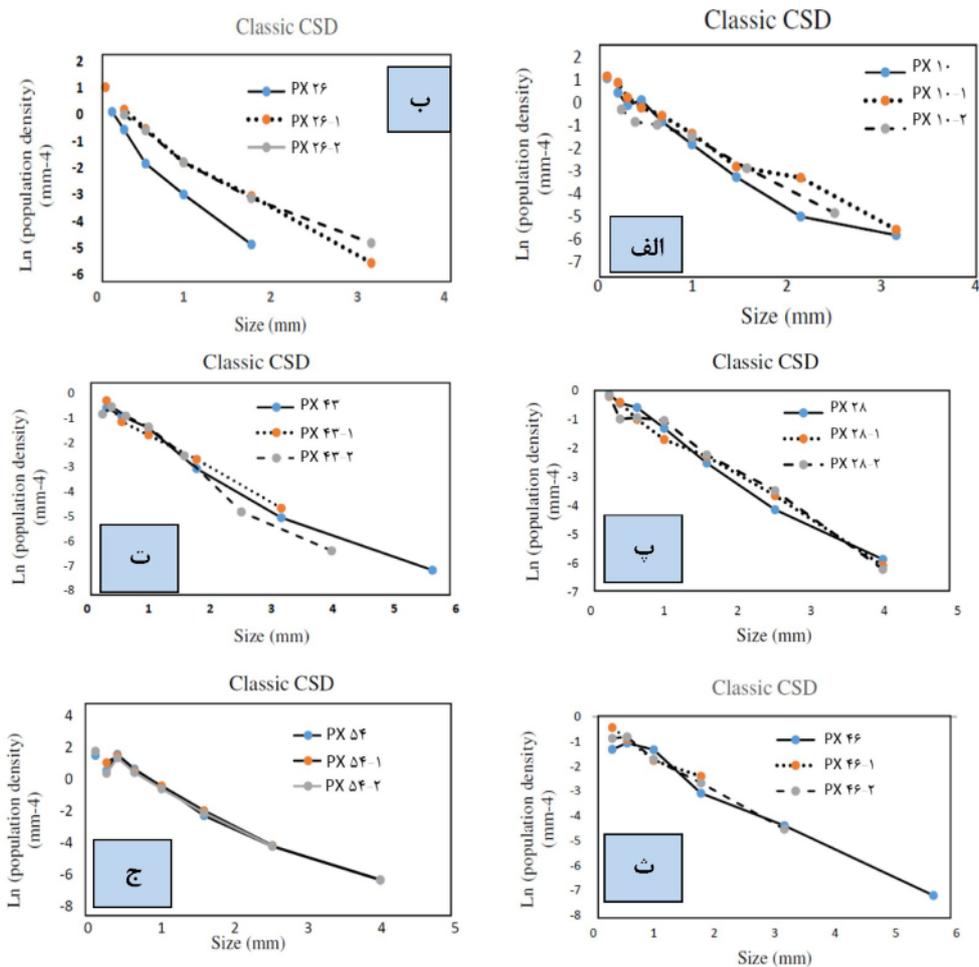
شکل ۱ نمودارهای CSD را برای بلورهای پلاژیوکلاز موجود در سنگ‌های شماره AB ۱۰، AB ۴۱، AB ۴۶ و AB ۴۹ نشان می‌دهد. به اعتقاد لنتز و مک‌سوئین [۴۰] روند خطی در نمودارها، نشانگر رشد و هسته‌بندی پی‌درپی بلورها (درشت‌شدگی) و شرایط یکنواخت محیط تبلور است. درشت‌شدگی می‌تواند ناشی از توقف کامل هسته‌بندی و تداوم رشد باشد که در آن، بلورهای کوچک‌تر به خرج بلورهای بزرگ‌تر، مصرف می‌شوند. با توجه به مدل‌های LSW و CN هیگینز [۵] (شکل ۷)، روند نمودارهای CSD در نمونه سنگ‌های AB ۱۰، AB ۴۱ و AB ۴۶، از مدل درشت‌شدگی CN پیروی می‌کند (شکل‌های ۱۰ الف، ب و پ). در مدل CN، بلورها از طریق فرایند انتشار، با هم و با سیال‌ها (ماگما) تبادل ماده و انرژی دارند و رشد بلور را کنترل می‌کنند. خمیدگی به سمت پایین در نمونه‌های AB ۴۱، AB ۴۶ و AB ۱۰ می‌تواند نشان‌گر انحلال ناشی از فشار نیز باشد (مقایسه شکل‌های ۱۰-الف، ب و پ با نمودار ج در شکل ۹). به اعتقاد هیگینز [۵]، نمودارهای CSD حاصل از انحلال فشاری، مشابه نمودارهای CSD حاصل از درشت‌شدگی هستند. اگرچه این دو فرایند درست مثل هم نیستند، ولی انحلال فشاری نیز همانند درشت‌شدگی تمایل دارد که انرژی کل سیستم را کمینه کند. در این مدل، بلورهای با اندازه‌های مختلف می‌توانند در اثر فشار حل شوند. انحلال



شکل ۱۰ نمودارهای جمعیت بلوری نسبت به اندازه دانه (CSD) برای بلورهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های بازالتی-آندزیتی منطقه عباس آباد.



شکل ۱۱ نمودارهای جمعیت بلوری نسبت به اندازه دانه (CSD) برای بلورهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های بازالتی - آندزیتی منطقه عباس آباد.



شکل ۱۲ نمودارهای جمعیت بلوری در برابر اندازه دانه (CSD) برای بلورهای پیروکسن در سنگ‌های بازالتی - آندزیتی منطقه عباس آباد.

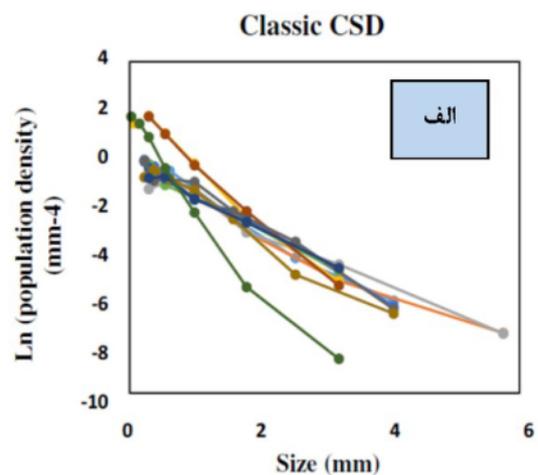
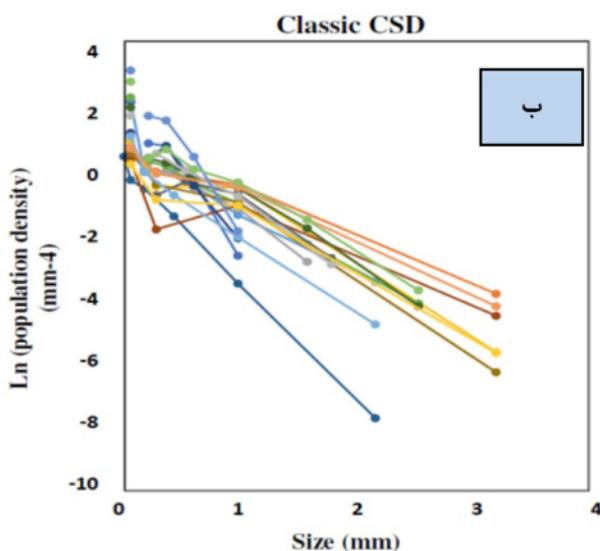
فرایندهای آشیانه ماگمایی پویا (تبلور تفریقی و اختلاط) را تأیید می‌کنند.

برداشت

بررسی کمی بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های بازالتی و آندزیتی منطقه عباس‌آباد نشان می‌دهد که مجموعه‌ای از فرایندهای سنگ‌شناسی آشیانه ماگمایی نظیر انباشت، تفریق، درشت‌شدگی و اختلاط جمعیت‌های بلوری در مخزن یا مخازن تغذیه‌کننده فعالیت ماگمایی بازالتی-آندزیتی منطقه در زمان ائوسن پسین رخ داده است. مجموعه این فرایندها، در کنار حضور بافت‌های گلوپورفیری، پورفیری، میکرولیتی پورفیری و ناتعادلی، نشانگر آن است که تغییر و دگرگونی سیستم ماگمایی فعال در منطقه، در یک سیستم باز و پویا (دینامیک) رخ داده است. در این سیستم، ماگماها در طی فوران و یا اقامت در آشیانه ماگمایی، دوباره مورد هجوم ماگمای جدید قرار می‌گرفته‌اند. وجود شکست و خمیدگی در نمودارهای CSD نشانگر بروز تغییرات ماگمایی به دلیل انجام حرکات همرفتی در آشیانه ماگمایی و یا ورود یک ماگمای جدید به داخل مخزن ماگمایی است که سبب بروز فرایندهای سنگ‌شناسی در آشیانه‌های ماگمایی پویا شده است.

نمودارهای ت و ج در شکل ۱۲ دارای اندکی خمیدگی رو به پایین در سمت چپ هستند که می‌تواند نشان‌دهنده درشت‌شدگی بلوری باشد و با نمودار ت در شکل ۶، منحنی ۲ در شکل ۸ و نمودار ح در شکل ۹ قابل مقایسه است. درشت‌شدگی در این نمودارها از مدل CN [۵] پیروی می‌کند و با نمودار ب در شکل ۷، همخوانی دارد.

شکل ۱۳، همه نمودارهای CSD بلورهای پیروکسن (الف) و پلاژیوکلاز (ب) را در سنگ‌های بازالتی-آندزیتی منطقه عباس‌آباد در یک نمودار نشان می‌دهد. نمودار بلورهای پیروکسن، بیانگر روندهای تفریق، انباشت و اختلاط جمعیت‌های بلوری هستند (مشابه با نمودار ت در شکل ۶، منحنی ۳ در شکل ۸، نمودارهای ت و ث در شکل ۹). نمودار بلورهای پلاژیوکلاز نیز مجموعه‌ای از فرایندهای سنگ‌شناسی انباشت، تفریق، درشت‌شدگی و اختلاط را به تصویر می‌کشند (مشابه با نمودارهای پ، ت، ث در شکل ۶، منحنی‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۸، گزینه ب در شکل ۷ و نمودارهای ب، پ، ح و خ در شکل ۹). نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای توزیع اندازه بلور در این پژوهش، با نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شیمیایی [۳۳، ۳۴] همخوانی دارد و خاستگاه مشترک نمونه‌ها از طریق



شکل ۱۳ همه نمودارهای جمعیت‌های بلوری پیروکسن و پلاژیوکلاز در سنگ‌های بازالتی-آندزیتی منطقه عباس‌آباد. الف- برای بلورهای پیروکسن، که روند تفریق، انباشت و اختلاط جمعیت‌های بلوری را نشان می‌دهند و ب) برای بلورهای پلاژیوکلاز، که مجموعه‌ای از فرایندهای سنگ‌شناسی انباشت، تفریق، درشت‌شدگی و اختلاط را به تصویر می‌کشند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به سبب حمایت‌های مالی و معنوی از انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [10] Higgins M.D., Roberge J., "Three magmatic components in the 1973 eruption of Eldfell volcano, land: Evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 161(2007) 247-260.
- [11] Brugger C. R., Hammer J. E., "Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma", *Earth and Planetary Science Letters* 300 (2010) 246-254.
- [12] Yung Z. F., "Combining Quantitative Textural and Geochemical Studies to understand the Solidification Processes of a Granite Porphyry: Shanggusi, East Qinling, China", *Journal of petrology* 53(9) (2012) 1807- 1835.
- [13] Van der Zwan F.M., Chadwick P.C., Troll V.R., "Textural history of recent basaltic-andesites and plutonic inclusion from merapi volcano", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 166 (2013) 43-63.
- [14] Alves A., Pereira G.S., Janasi V.A., Higgins M., Polo L.A., Juriaans O.S., Ribeiro B.V., "The origin of felsic microgranitoid enclaves: insights from plagioclase crystal size distributions and thermodynamic models", *Lithos* 239 (2015) 33-44.
- [15] Cato M.J., Fagan A.L., Gross J., "Crystal size distribution of low-Ti Lunar basalt Northwest Africa", 47th Lunar and Planetary Science Conference (2016), P. 2751.
- [16] Ni H., Keppler H., Walte N., Schiavi F., Chen Y., Masotta M., Li Z., "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* 167 (2014) 1-13.
- [17] Zieg M.J., Lofgren G.E., "An experimental investigation of texture evolution during continuous cooling", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154 (2006) 74-88.
- [18] Rannou E., Caroff M., "Crystal Size Distribution in Magmatic Rocks: Proposition of a Synthetic Theoretical Model", *Journal Petrology* 51 (2010) 1087-1098.
- [19] Gulda G. A. R., "Crystal size Distribution Derived from 3D Dataset: Sample size
- [1] Marsh B.D., "Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99 (1988) 277-291.
- [2] Cashman K. V., Ferry J. M. "Crystal size distribution (CSD) in rocks and kinetics and dynamics of crystallization", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99 (1988) 401-415.
- [3] Resmini R.G., "Modeling of crystal size distribution (CSDs) in sills", *Journal of volcanology and geothermal research* 161 (2007)118-130.
- [4] Bindeman I.N., "Crystal sizes in evolving silicic magma chambers", *Journal of Geology* 31 (2003) 367-370.
- [5] Higgins M.D., "Quantitative Textural Measurement in Igneous and Metamorphic Petrology", Cambridge university, United state of America (2006).
- [6] Higgins M.D., "Magma dynamics beneath kameni volcano, Thera, Greece, as revealed by Crystal size and shape measurements", *Journal of volcanology and geothermal Reserch* 70 (1996) 37-48.
- [7] Randolph A.D., Larson M.A., "Theory of Particulate Processes" Academic Press, New York (1971).
- [8] Higgins M. D., "A crystal size distribution study of the kiglapit layered mafic intrusion, Labrador, Canada: evidence for textural coarsening", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144 (2002) 314-330.
- [9] Higgins M. D., Roberge J., "Crystal Size Distribution of Plagioclase and Amphibole from Soufriere Hills Volcano, Montserrat: Evidence for Dynamic Crystallization- Textural Coarsening Cycles", *Journal of petrology* 44 (2003) 1401-1411.

- andesite, Sagez-NW IRAN: Calculate of Resident Time Pyroxene in magma chamber and Evidence for magma mixing*", Applied Science Reports 15 (1) (2016) 23-30.
- [29] Modjarrad M., Sheykhbaglou S., "Crystal size distribution of amphibole and plagioclase from Zambil adakitite dacites, Urmia-Iran: Evidence for magma mixing and textural coarsening", Acta Geodyn. Geomater 13 1 (181) (2016) 89-101.
- [30] Modjarrad M., Sheykhbaglou S. "Crystal Size Distribution of kyanite and staurolite from Hamza Qassim and Khazai Bala Metapelites-southeast Shahin-Dezh; confirmation to regional metamorphism conditions at the area" Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 99-108.
- [31] Shah-Hosini E., "Petrology, Geochemistry and Mineralization potential of igneous rock in North-Northeast Semnan" M.Sc. Thesis, Geosciences Department, Shahrood University OF Technology (2007) 148p.
- [32] Allahyari S., "Petrogenesis of upper Eocene igneous rocks of Kahak-Abbas abad magmatic belt" M.Sc. Thesis, Geosciences Department, Shahrood University OF Technology (2010) 152p.
- [33] Taheri A., Allahyari S. Ghasemi H., Sadeghian M., "Stratigraphic Position and Textural Analysis of Volcanic Rocks of Abbas Abad Volcano-Sedimentary Belt, NE Shahrood" Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan 29 (2013) 25-42.
- [34] Ghasemi H., Rezaei-Kahkhaei M., "Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran", Mineralogy and Petrology 109 (2) (2015) 235-252.
- [35] Holden, E.J., Moss, S., Russell, J.K., Denith, M.C., "An image analysis method to determine crystal size distributions of olivine in kimberlite", Computational Geosciences 13 (2009) 255-268.
- [36] Cashman K.V., "Crystallization of Mount St. Helens 1980-1986 dacite: a quantitative textural approach" Bulletin of Volcanology 50 (1988) 194-209.
- [37] Higgins M.D., Chandrasekharam D., "Nature of sub-volcanic magma chamber, Deccan Uncertainties", Journal of petrology 47 (2006) 1245-1254.
- [20] Homam S.M., "Crystal size distribution in metamorphic rocks: an example for the relationship between nucleation and growth rates with overstepping" Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 11 (2003) 65-81.
- [21] Masoudi F., Ghorbani M., Ahimzadh B.R., "Study of physical conditions and magmatic evolution of volcanic rocks" Iranian Journal of Geology, 3 (2009) 67-75.
- [22] Ayati F., Mahdevari S., "Investigation of crystal size distribution in igneous rocks :Guide to the magma evolution in magma chambers" Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 18 (2010) 419-430.
- [23] Raeisi D., Dargahi S., Moeinzadeh H., Arvin M., "Using Numerical Modeling for Estimation of Rate of Nucleation and Growth Time of Plagioclase Microlites from Quaternary Gandom Beriyan Basaltic Flows, NE of Kerman" Geosciences 22: (2013) 199-204.
- [24] Rahimi Chakdel A., Boyle A.P., "Crystal size distribution analysis of quartz in sector-zoned of garnet schist using Back-scatter electron images", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (3) (2012) 49-58.
- [25] Izadi-Kian L., Mohajjel-Kafshdouz M., Alavi S.A., Sepahi-Garoo A.A., Hoseinidust S.J., "Timing of porphyroblasts growth and their relation to deformation stages in metamorphic rocks of the Hamedan area" Petrology 4 (2013) 1-18.
- [26] Torkian A., Salehi N., Kord M., "The use of quantitative data crystal size distributions (CSD) of pyroxenes crystals in study of petrological process of NE-Qorveh volcanic centers (Kurdistan)" Petrology 4 (2013) 33-46.
- [27] Pourkhorsandi H., Mirnejad H., Raiesi D., Hassanzadeh J., "Crystal size and shape distribution systematics of plagioclase and the determination of crystal residence times in the micromonzogabbros of Qisir Dagh, SE of Sabalan volcano (NW Iran)", GEOLOGICA CARPATHICA 66 (4) (2015) 275-268.
- [28] Elyassi Golonji I., Sheykhbaglou S., "Crystal Size Distribution of Pyroxenes from Aliabad

- [39] Mock A., Jerram D.A., “*Crystal Size Distributions (CSD) in Three Dimensions: Insights from the 3D Reconstruction of a Highly porphyritic Rhyolite*”, *Journal of Petrology* 46 (2005) 1524-1541.
- [40] Lentz R.C.F., Mcsween Y.H., “*Crystallization of the basaltic Shergottites: Insights from crystal size distribution (CSD) analysis of pyroxenes*”, *Meteoritics and Planetary science* 35 (2000) 919-927.
- province, India: Evidence from quantitative textural analysis of plagioclase megacrysts in the Giant plagioclase basalts*”, *Journal of petrology* 48 (2007) 885-900.
- [38] Vinet N., Higgins M. D., “*Magma Solidification Processes beneath Kilauea Volcano, Hawaii: a Quantitative Textural and Geochemical study of the 1969-1979 Mauna Ulu Lavas*”, *Journal of petrology* 51 (2010) 1297-1332.