نشریه علوم دانشگاه خوارزمی
جلد ۱۲، شماره ۲
تاریخ چاپ بهار ۱۳۹۲

آرایش فضایی بلورها و کانی‌ها در سنگ‌های دیوریت-کوارتزدیوریتی جنوب خاوری بیرجند

*امیر اسکندری؛ دانشگاه خوارزمی، گروه زمین‌شناسی
مسعودی، فریبرز؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین
نسرین فرح خواه؛ دانشگاه خوارزمی، گروه زمین‌شناسی

چکیده

در این پژوهش، نقش فرایندهای فیزیکی مؤثر در تکوین سنگ‌های آذرین از جمله کینتیک تبلور (هسته‌بندی و رشد بلورها)، دینامیک سیستم‌های ماگمایی (مانند اختلاط و جریان‌های همرفتی) و فرایندهای تعادلی مانند درشت‌شدگی بافتی بر اساس آرایش فضایی و اندازهٔ بلورها بررسی شده است. به این منظور، الگوی توزیع فضایی بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز به‌صورت کمّی در مجموعه‌ای از سنگ‌های میکرودیوریت-کوارتزدیوریتی منطقهٔ بررسی شده واقع در ۱۲۰ کیلومتری جنوب خاوری بیرجند اندازه‌گیری شده‌اند. سپس با تلفیق پژوهش‌های سنگ‌نگاری کمّی و کیفی در مورد تأثیر عوامل مختلف در آرایش پلاژیوکلازها و نحوهٔ تشکیل بافت و فرایندهای فیزیکی حاکم بر تشکیل این سنگ‌ها بحث شده است. ویژگی‌های هندسی ۳۰۹۸ بلور در ۸ مقطع میکروسکوپی از این سنگ‌ها از جمله طول، عرض و مکان مرکز بلورها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روش فاصلهٔ نزدیک‌ترین همسایه و با کمک نرم‌افزارهای BigR و ArcGIS، مقادیر R به‌عنوان نمادی کمّی از الگوی توزیع فضایی بلورها، اندازه‌گیری و داده‌ها در نمودار R در برابر درصد زمینه ترسیم شدند. محاسبات و نمودارها نشان می‌دهند که الگوی توزیع فضایی بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز به‌صورت خوشه‌ای است. میزان خوشه‌بندی پلاژیوکلازها در مقاطع متفاوت است و متناسب با تغییرات اندازه و شکل بلورها تغییر می‌کند که حاکی از نقش فرایندهای مختلف از جمله هسته‌بندی ناهمگن، درشت‌شدگی بافتی[۱] و روی‌هم‌رشدی[۲] بلورها است.

مقدمه

خوشه‌بندی بلورها و تشکیل تجمع‌های تک‌کانی در بسیاری از سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌عمیق و نیز سنگ‌های درونی مشاهده و توصیف شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]. برخی از پژوهش‌گران نیز توزیع تصادفی کانی‌ها را در انواعی از سنگ‌های آذرین و دگرگونی گزارش کرده‌اند [۵]، [۶]. آرایش بلورها در سنگ‌های آذرین، حاصل فرایندهای فیزیکی در ماگماست که از مراحل اولیهٔ سرد شدن و هسته‌بندی و رشد

واژه‌های کلیدی: الگوی توزیع فضایی بلورها (SDP)، خوشه‌بندی بلورها، بیرجند، درشت‌شدگی بافتی، دیوریت
دریافت ۹۰/۲/۱۱ پذیرش ۹۱/٤/٦
*نویسنده مسئول amir.eskandary157@yahoo.com

۱. Textural Coarsening ۲. Overgrowth

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

بلورهای اولیه تا مراحل نهایی انجماد رخ می‌دهند که اغلب این فرایندها در بافت نهایی سنگ‌های آذرین ثبت می‌شوند. بنا بر این برای تشخیص نوع آرایش بلورها و نحوهٔ تشکیل آن، باید در درجهٔ اول از مشاهدهٔ کیفی یا میکروسکوپی بافت سنگ‌ها و سپس از روش‌های اندازه‌گیری کمّی بافت‌ها بهره گرفت. یکی از این روش‌ها، اندازه‌گیری آرایش یا الگوی توزیع فضایی بلورها[۱] یا SDP است که گاهی همراه با پژوهش‌ها و بررسی‌های تجربی انجام شده است [۴]-[۹]. سایر روش‌های اندازه‌گیری کمّی بافت‌ها عبارتند از: پراکندگی اندازهٔ بلورها[۲] یا CSD، شکل بلورها[۳] و زوایای بین وجوه[۴] [۷].

به‌کمك روش‌های عددی و محاسباتی می‌توان مشخص کردد که توزیع فضایی بلورها در سنگ آذرین یا دگرگونی، دارای چه نوع الگویی (منظم، تصادفی یا خوشه‌ای) است [۹]. همچنین می‌توان برخی از فرایندهای فیزیکی را که در تشکیل بافت سنگ‌ها مؤثر بوده‌اند، شناسایی کرد و به ارزیابی کینتیك و دینامیك تبلور در سیستم‌های ماگمایی پرداخت [۲]، [۵]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]. به‌علاوه، آرایش فضایی و به‌طورکلی ویژگی‌های هندسی بلورها نقش چشمگیری در تغییر رفتار رئولوژیکی ماگماها دارند [۱۲]. پژوهش‌ها اندکی در زمینهٔ توزیع فضایی کانی‌ها در سنگ‌های آذرین و دگرگونی در داخل کشور انجام شده است [۱۳]، [۱۴]، [۱۵].

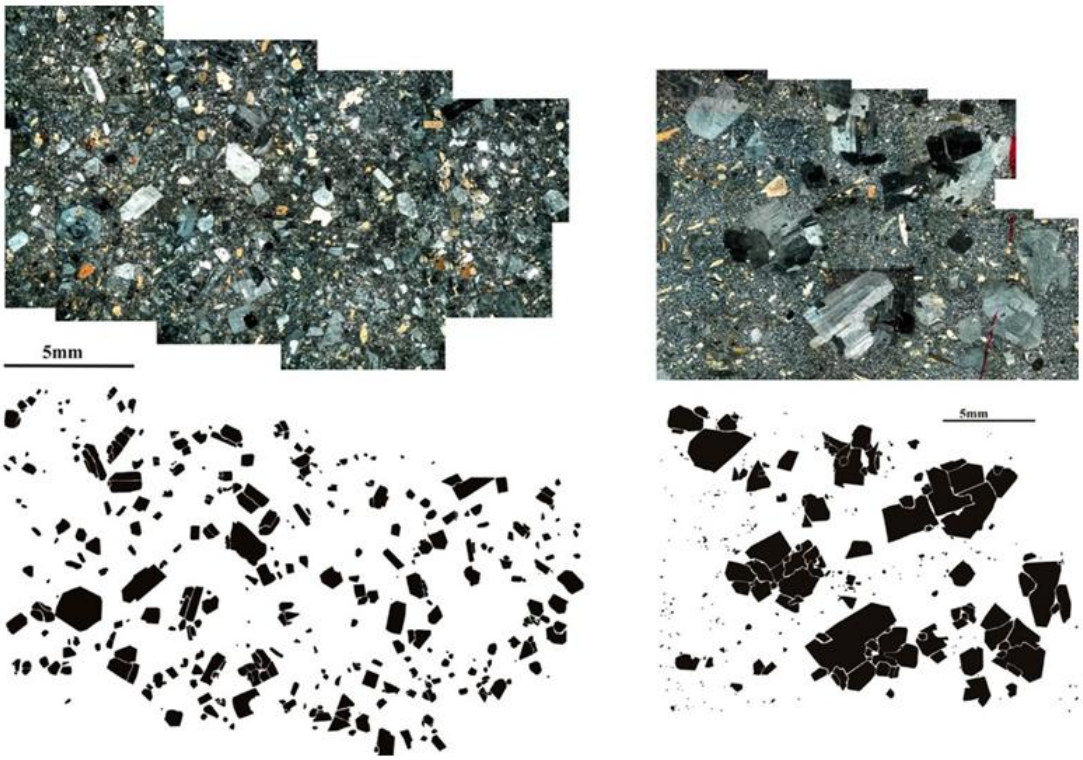
آن‌چه نگارندگان را بر آن داشت تا دست به این پژوهش بزنند، شناخت دلایل تفاوت‌هایی است که در مقاطع میکروسکوپی بررسی شده مانند شکل ۱ دیده می‌شود. این دو مقطع مربوط به یک مجموعهٔ سنگی با کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی به نسبت یکسان هستند (جدول ۱ و شکل ۲). با وجود این شباهت‌ها، چنان‌که در این دو مقطع دیده می‌شود، ویژگی‌های هندسی پلاژیوکلازها از جمله اندازه و آرایش آن‌ها متفاوت است. در مقطع سمت چپ، اندازهٔ بلورها یکنواخت و ریزتر هستند و اغلب بلورها به‌صورت منفرد قرار گرفته‌اند. در مقطع سمت راست، اجتماع درشت بلورها بیش‌تر مشاهده می‌شود. در این پژوهش بر اساس روش SDP این تفاوت‌ها به‌صورت کمّیت‌های قابل اندازه‌گیری بیان شده‌اند و فرایندهای فیزیکی مؤثر در ایجاد این تفاوت‌ها بررسی شده‌اند. در نهایت نیز مدلی برای تشکیل بافت سنگ‌های بررسی شده پیشنهاد گردیده است.

زمین‌شناسی عمومی و سنگ‌نگاری

منطقهٔ پژوهشی در ۱۲۰ کیلومتری جنوب خاوری بیرجند و در مسیر جادهٔ بیرجند-سربیشه- در حوالی روستای کنیف قرار دارد که از نظر زمین‌شناسی بخشی از مجموعه افیولیتی خاور ایران است و در نقشهٔ زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ پرنگ واقع شده است (شکل ۳). در این منطقه، سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق جوان‌تر از مجموعهٔ افیولیتی با ترکیب میکرودیوریت-کوارتزدیوریت بررسی شدند [۱۶].

۱. Distribution Pattern Spatial ۲. Crystal Size Distribution ۳. Crystal Shape
۴. Dihedral Angles

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



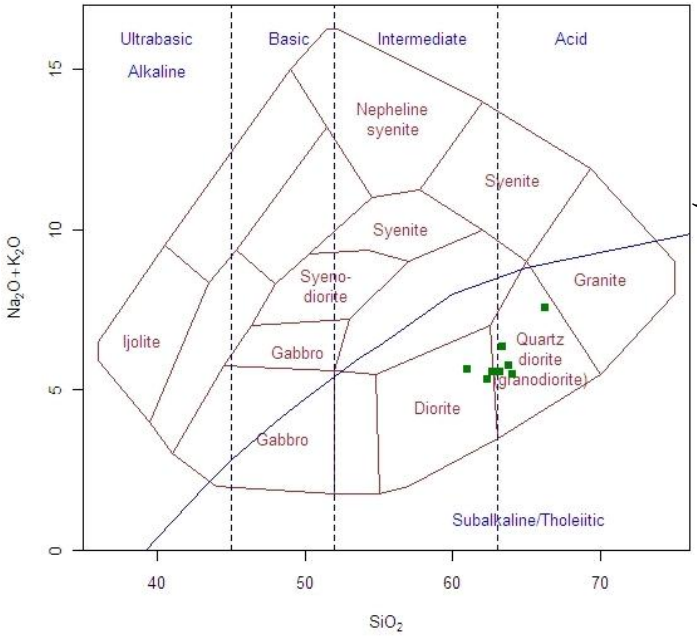
شکل ۱. تصویر سمت راست از مقطع KHT8 همراه با تصویر رقومی شده پلاژیوکلازها در این مقطع (تصویر پایین) و تصویر سمت چپ از مقطع KHD21 همراه با تصویر پلاژیوکلازها (تصویر پایین) گرفته شده است. به تفاوت اندازه و آرایش پلاژیوکلازها در دو مقطع توجه شود (توضیحات بیش‌تر در متن ارائه شده است)

نمونه‌های دیوریتی و کوارتز دیوریتی دارای بافت پرفیری و زمینهٔ دانه‌ریز هستند (شکل‌های ۱ و ۴). بلورهای درشت شامل پلاژیوکلاز (الیگوکلاز- آندزین، ۲۰ تا ۳۰ درصد ترکیب مدال)، هورنبلند و بیوتیت (۱۵ درصد ترکیب مدال) و در کوارتز دیوریت‌ها، کوارتز (۵ درصد ترکیب مدال) هستند. زمینهٔ دانه‌ریز سنگ متشکل از پلاژیوکلاز، آمفیبول، کوارتز است که با شدت بیش‌تری دگرسان شده است. اسفن، آپاتیت و کانی‌های اپاك به‌عنوان کانی‌های فرعی حضور دارند. ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها نیز بر اساس نمودار مجموع آلکالن در برابر سیلیس [۱۷] در محدودهٔ دیوریت-کوارتزدیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۲). از ویژگی‌های بافتی چشمگیر در این سنگ‌ها، وجود خوشه‌های بلوری پلاژیوکلاز است و به تناسب افزایش اندازهٔ بلورها در مقاطع، میزان خوشه‌بندی نیز افزایش می‌یابد که بحث در مورد چگونگی تشکیل این خوشه‌های بلوری موضوع این مقاله را تشکیل می‌دهد. وجود بیگانه سنگ‌ها (از منشا دگرگونی)، برونبوم‌های ریز دانه مافیک (MME) با ترکیب کانی‌شناسی مافیک تر (هورنبلند-پلاژیوکلاز- کلینوپیروکسن) از سنگ میزبان، بیگانه بلورها (پیروکسن با حاشیه واکنشی آمفیبول) و منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلازها از دیگر ویژگی‌های سنگ‌های بررسی شده است [۱۶] .

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

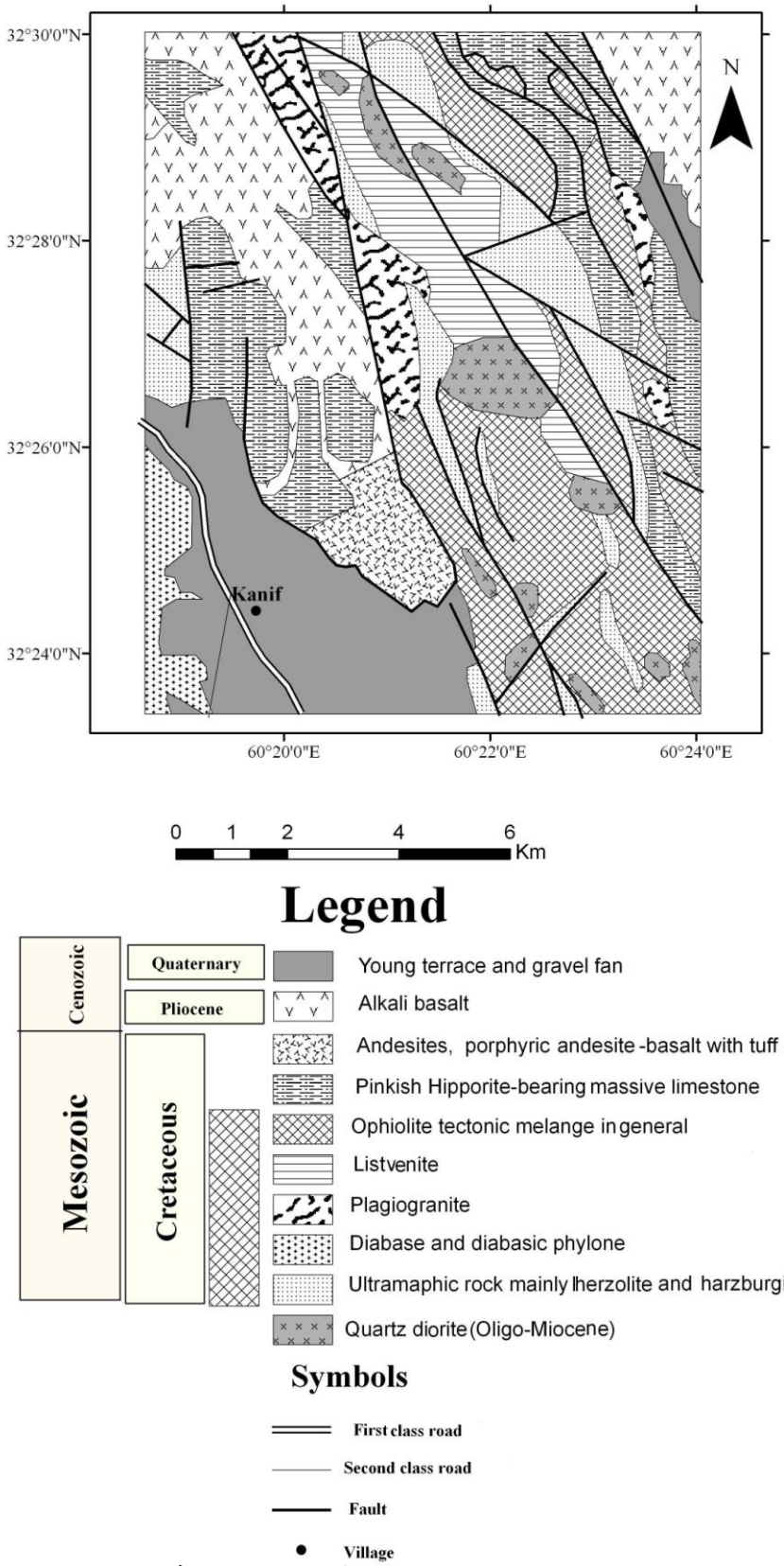
جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های بررسی شده . آنالیزهای شیمیایی به روش XRF و در دانشگاه خوارزمی انجام شده است

	KHD۷	JAJ۲	KHT۶	KHA۶	KHD۳	KHD۲۱	MAD۴	KHT۸
$SiO_۲$	۶۳/۲	۶۴/۰	۶۳/۴	۶۶/۳	۶۳/۷	۶۲/۶	۶۲/۳	۶۱/۰
$TiO_۲$	۰/۴	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۴	۰/۵
$Al_۲O_۳$	۱۵/۸	۱۵/۳	۱۶/۰	۱۶/۵	۱۵/۷	۱۵/۵	۱۶/۲	۱۵/۳
$Fe_۲O_۳$	۳/۱	۴/۰	۳/۷	۲/۲	۳/۹	۳/۹	۳/۲	۳/۷
MnO	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
MgO	۲/۶	۳/۵	۳/۱	۱/۶	۲/۶	۲/۵	۲/۳	۳/۰
CaO	۴/۳	۴/۷	۴/۲	۲/۴	۴/۶	۴/۷	۵/۰	۴/۷
$Na_۲O$	۴/۳	۴/۲	۵/۱	۶/۳	۴/۴	۴/۳	۴/۷	۴/۴
$K_۲O$	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۳	۰/۶	۱/۲
$P_۲O_۵$	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲
Ni	۵۴/۴	۶۹/۹	۶۵/۱	۴۰/۵	۵۱/۸	۶۴/۰	۳۹/۳	۵۴/۳
CO	۵/۲	۱۰/۲	۹/۲	۰/۲	۹/۵	۹/۰	۵/۴	۸/۸
Sc	۹/۹	۱۲/۳	۱۱/۰	۴/۸	۸/۹	۱۰/۴	۱۰/۳	۱۱/۸
V	۳۷/۰	۵۰/۳	۵۳/۳	۲۸/۶	۴۹/۶	۴۸/۶	۳۶/۶	۴۲/۷
Zn	۵۱/۵	۶۱/۷	۷۵/۱	۳۵/۷	۵۵/۳	۸۸/۶	۵۷/۱	۶۱/۸
Rb	۶۵/۵	۶۸/۵	۵۸/۴	۵۶/۷	۷۳/۸	۶۹/۲	۵۳/۵	۶۱/۲
Ba	۱۲۴/۱	۱۰۶/۲	۱۰۶/۲	۱۶۵/۹	۸۸/۴	۱۳۰/۲	۱۸۲/۹	۱۱۹/۰
Sr	۶۱۷/۴	۴۳۰/۰	۵۶۹/۶	۴۳۸/۵	۴۱۷/۸	۴۱۸/۷	۵۲۶/۹	۵۲۵/۱
Nb	۵/۷	۶/۸	۵/۸	۳/۵	۷/۵	۷/۹	۳/۲	۶/۹
Hf	۲/۵	۷/۴	۳/۶	۴/۱	۱/۸	۲/۱	۲/۱	۳/۲
Zr	۱۹۴/۱	۱۸۸/۶	۱۹۶/۲	۲۰۸/۴	۱۸۹/۴	۱۸۷/۶	۱۵۸/۷	۱۸۹/۵
Y	۱۴/۲	۱۴/۴	۱۴/۲	۱۳/۵	۱۴/۷	۱۴/۵	۱۳/۵	۱۴/۱
Th	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۱/۴	۱۰/۳	۱۱/۷	۱۰/۲	۶/۶	۱۰/۸
Cr	۱۲۲/۲	۱۹۶/۵	۱۱۹/۹	۶۷/۹	۱۱۰/۴	۱۱۶/۱	۱۲۳/۳	۱۱۱/۳
Cs	۰/۴	۱۲/۷	۶/۴	۳/۸	۹/۰	۹/۲	۱۳/۸	۲/۹
La	۲۶/۹	۳۷/۶	۴۰/۵	۲۹/۶	۳۱/۷	۳۱/۱	۶/۸	۲۲/۵
Ce	۱۶/۱	۲۳/۴	۲۱/۵	۱۳/۲	۲۶/۰	۲۳/۰	۳/۰	۲۱/۰
Nd	۱/۰	۱/۶	۳/۳	۱/۵	۳/۳	۵/۵	۱۱/۲	۹/۸
Sm	۳/۶	۲/۹	۵/۱	۳/۷	۵/۹	۱/۹	۲/۲	۲/۱
Eu	۱/۹	۱/۷	۱/۸	۲/۲	۱/۵	۱/۷	۱/۸	۱/۸
Tb	۰/۹	۱/۲	۱/۱	۰/۶	۱/۱	۱/۲	۰/۹	۱/۲



شکل ۲. موقعیت نمونه‌های بررسی شده در نمودار مجموع آلکالن (TAS) در برابر SiO_2 [۱۷]. اغلب سنگ‌ها در محدودهٔ ترکیبی کوچکی بین دیوریت و کوارتز دیوریت قرار گرفته‌اند

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۳. نقشهٔ ساده شدهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده و موقعیت توده‌های نفوذی نیمه عمیق کوارتزدیوریتی (نقشهٔ اصلی از [۳۵])

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

روش پژوهش

اندازه‌گیری آرایش فضایی بلورها به‌روش‌های مختلفی قابل انجام است [۲]، [۷]، [۹]. در تمام روش‌ها در گام نخست باید مکان کانی یا بلور به‌صورت شاخصی کمّی اندازه‌گیری شود. مکان یك کانی یا بلور را می‌توان با چند روش به‌دست آورد [۷]. به‌طور معمول مرکز بلور که در فضای سه‌بعدی دارای سه کمیت x، y، z است، به‌عنوان شاخص مکانی قابل اندازه‌گیری برای آن دانه در نظر گرفته می‌شود. ولی در بیش‌تر موارد، نمی‌توان مکان واقعی و سه‌بعدی بلورهای موجود در سنگ‌ها را تعیین کرد، به‌ویژه اگر بلورها در تماس با یک‌دیگر باشند [۷]. بنا بر این باید از روش‌های غیرمستقیم از جمله با استفاده از مقاطع دوبعدی اقدام به تعیین مکان بلورها کرد. اما در یك مقطع دوبعدی، مرکز یك کانی نمی‌تواند مرکز واقعی آن کانی باشد؛ در واقع این مرکز، مرکز صفحه‌ای است که آن کانی را قطع کرده است. جرام و همکاران [۹]، روشی را برای اندازه‌گیری کمّی الگوی توزیع فضایی (SDP) بلورها در مقاطع نازك، تبیین کردند که نتایج آن را می‌توان به فضای سه‌بعدی تعمیم داد.

در این پژوهش، در گام نخست تصاویر مقاطع نازك و بلورهای پلاژیوکلاز (در تمام مقاطع) و درشت بلورهای آمفیبول و کوارتز (در یک مقطع) به روش هیگینز [۱۸]، [۱۹] با استفاده از نرم‌افزار کورل دراو[۱] پردازش شدند (شکل‌های ۱ و ۴) و مرز بلورها ترسیم شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر[۲]، طول وعرض و مکان مرکز بلورها (مختصات x و y برای هر بلور) تعیین و محاسبه شد. در این نرم‌افزار، مکان مرکز بیضوی که به دور بلور کشیده می‌شود و بیش‌ترین تطابق را با محیط بلور دارد، معرف مرکز بلور و محور بلند بیضی به‌عنوان طول بلور خواهد بود. درصد حجمی بلورها و زمینه نیز به کمك این نرم‌افزار محاسبه می‌شود. سپس فواصل بین مرکز هر بلور با مراکز سایر بلورها محاسبه شد تا کم‌ترین فاصله یا نزدیك‌ترین همسایه برای هر بلور به‌دست آید.

برای اندازه‌گیری SDP بلورها در مقاطع نازك از روش فاصلهٔ نزدیك‌ترین همسایه (NND)[۳] استفاده می‌شود [۹]. میانگین فاصله نزدیك‌ترین همسایه در نمونه بررسی شده بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$rA = \frac{\sum r}{N} \qquad (۱)$$

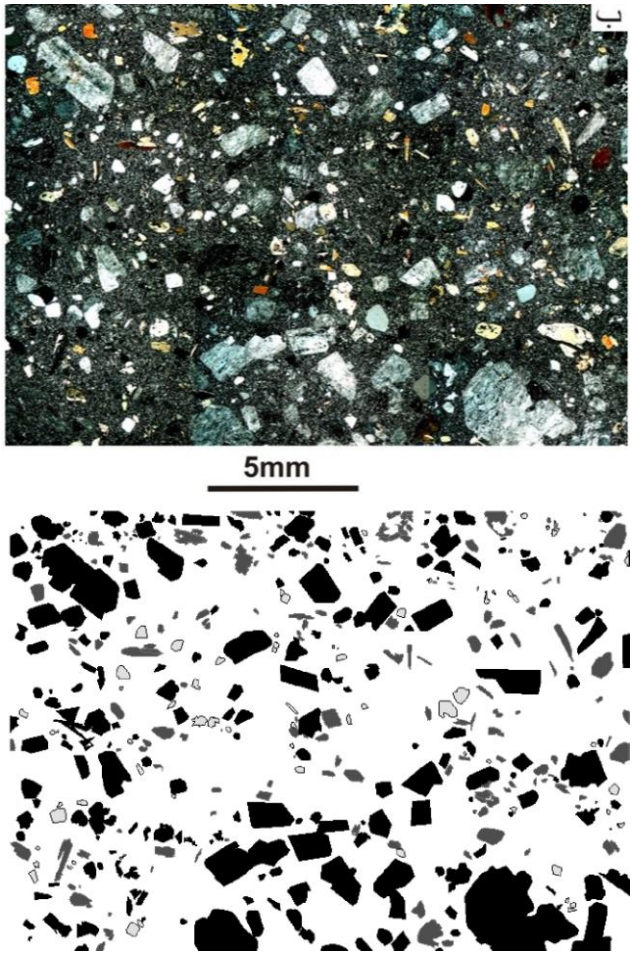
که r برابر با فاصلهٔ نزدیك‌ترین همسایه (NND) برای هر بلور و N تعداد مرکز بلورهای اندازه‌گیری شده است. مقدار دیگری که دانستن آن لازم است، میانگین فاصلهٔ نزدیك‌ترین همسایه برای توزیع تصادفی با چگالی جمعیتی مشابه با نمونهٔ اصلی است که از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$rE = \frac{1}{2\times\sqrt{\rho}} \qquad (۲)$$

که ρ چگالی توزیع مشاهده شده است و از تقسیم N بر مساحت نمونه به‌دست می‌آید.

۱. CorelDRAW ۲. ImageJ ۳. Nearest Neighbour Distance

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۴. تصویر مقطع KHD7 به‌همراه تصویر بلورهای پردازش شده پلاژیوکلاز (مشکی)، آمفیبول (خاکستری تیره) و کوارتز (خاکستری روشن)

نسبت میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه برای نمونه بررسی شده به میانگین فاصلهٔ نزدیک‌ترین همسایه در نمونهٔ فرضی را می‌توان برای توصیف پراکندگی فضایی جمعیت بررسی شده به‌کار برد. این نسبت بدین‌صورت محاسبه می‌شود:

$$R=\frac{2\sqrt{\rho}}{N}\sum r$$

یا

$$R=\frac{rA}{rE}$$

که مقدار R نمودی کمّی از الگوی توزیع فضایی (SDP) است. این محاسبات به‌کمک برنامهٔ رایانه‌ای BigR [۷] و بستهٔ نرم‌افزاری ArcGIS انجام شد و مقدار R برای پلاژیوکلازها در ۸ نمونه میکرودیوریتی و کوارتزدیوریتی محاسبه گردید (جدول ۲). کمیت دیگری که محاسبهٔ آن برای تحلیل‌های بعدی لازم است و با عناوین مختلفی مانند تخلخل، درصد مذاب و درصد زمینه بیان شده است [۳]، [۹] عبارت است از درصد حجمی همهٔ فازهای موجود در سنگ منهای درصد حجمی فاز اندازه‌گیری شده. در این بخش و برای استفاده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در نمودارهای SDP، بر اساس نتایج تعیین سهم حجمی بلورهای پلاژیوکلاز که به‌کمک نرم‌افزار آنالیز تصویر محاسبه شده درصد حجمی بلورها و در نتیجه درصد زمینه به‌دست آمده و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به توانایی‌های نرم‌افزار ArcGIS در مدیریت و نمایش لایه‌های اطلاعاتی و داده‌های مکان محور، از آن در تجزیه و تحلیل‌های بافت سنگ‌ها در مقاطع نازک و پردازش خودکار مقاطع نازک حاوی تک‌کانی نیز استفاده شده است [۲۰]، [۲۱]. در این پژوهش از ابزار میانگین نزدیکترین همسایه[۱] در جعبه ابزار[۲] برای محاسبهٔ شاخص R مربوط به کانی‌های آمفیبول و کوارتز استفاده شد (جدول ۲).

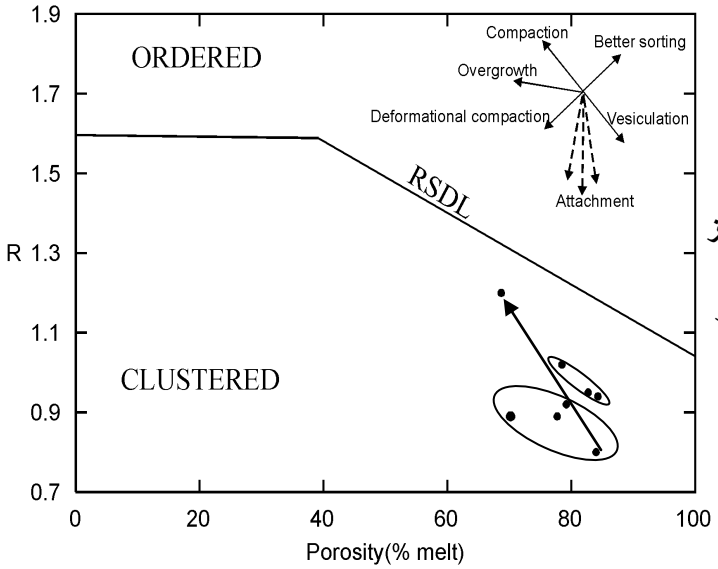
جدول ۲. مقدار R و درصد زمینه برای نمونه‌های بررسی شده

گروه	نام نمونه	نام سنگ	نوع کانی	تعداد بلورهای	مقدار R	درصد زمینه	طول بیشینه
۱	KHD7	کوارتز دیوریت	پلاژیوکلاز	۲۶۹	۱/۰۲	۷۸/۵	۳/۶
	KHD21	میکرو دیوریت کوارتزدار	پلاژیوکلاز	۳۹۵	۰/۹۵	۸۲/۷۱	۲/۹
	KHA6	کوارتز دیوریت	پلاژیوکلاز	۲۶۸	۰/۹۴	۸۴/۳	۲/۷
۲	KHT6	میکرودیوریت کوارتزدار	پلاژیوکلاز	۳۶۶	۰/۹۲	۷۹/۲	۵/۷
	JAJ2	کوارتز دیوریت	پلاژیوکلاز	۲۹۲	۰/۸	۸۴/۰۵	۵/۲
	KHD3	کوارتز دیوریت	پلاژیوکلاز	۳۶۲	۰/۸۹	۷۷/۷۳	۴
	KHT8	میکرو دیوریت	پلاژیوکلاز	۳۴۳	۰/۸۹	۷۰/۲	۷/۵
	MAD4	کوارتزدیوریت	پلاژیوکلاز	۵۴۶	۱/۲	۶۸/۸۷	۵/۹
	KHD7	کوارتز دیوریت	آمفیبول	۱۸۰	۰/۸۷	۹۵	۲
	KHD7	کوارتز دیوریت	کوارتز	۷۷	۰/۷۴	۹۸/۵	۱/۸
	KHD7	کوارتز دیوریت	کل درشت بلورها	۵۲۶	۱/۰۲	۷۲	-

روش جرام و همکاران [۹] برای اندازه‌گیری SDP در محیط دوبعدی یا همان محیط مقطع نمونهٔ بررسی شده است که می‌توان آن را به فضای سه‌بعدی نیز تعمیم داد. برای این کار، داده‌های SDP حاصل از اندازه‌گیری بافت سنگ‌ها در محیط دوبعدی را با داده‌های SDP حاصل از بافت‌های مرجعی که توزیع فضایی آن‌ها در محیط سه‌بعدی مشخص است، مقایسه کردند [۳]. برای مقایسهٔ بین SDP (مقادیرR اندازه‌گیری به‌دست آمده) با بافت‌های مرجع، از نمودار مقادیر R در برابر درصد زمینه استفاده می‌شود. خطی روی نمودار با عنوان RSDL[۳]، خط توزیع تصادفی کره است که SDP حاصل از کره‌هایی با فراوانی‌های مدال مختلف است که به‌صورت تصادفی آرایش یافته‌اند. این خط با استفاده از تلفیق مدل‌های رایانه‌ای و طبیعی (نمونه سنگی) برای کره‌هایی با آرایش تصادفی محاسبه شده است [۹]. اگر نقاط نمونه در زیر این خط قرار بگیرند به این معنی است که آرایش خوشه‌ای دارند و اگر در بالای این خط قرار بگیرند یعنی بلورها در آن نمونه آرایش منظم دارند و قرارگیری نقاط بر روی این خط یا نزدیکی آن به معنی آرایش تصادفی بلورهاست [۹]. با توجه به این‌که مقدار R در همهٔ نمونه‌ها در محدودهٔ پایین خط مذکور قرار دارد (شکل ۵)، آرایش بلورها به‌صورت خوشه‌ای است.

۱. Average Nearest Neighbor ۲. Spatial Statistics Tools ۳. Random Sphere Distribution Line

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۵. نمودار مقدار R در برابر درصد زمینه و موقعیت نمونه‌های بررسی شده (نمودار اقتباس از [۹] که رسم مجدد شده است). بردار دگرشکلی حاصل از فشردگی[۱] از [۱۰] بردار فرایند تشکیل حفرات[۲] از [۲۳] و بردارهای فرایند اتصال[۳] بلورها از [۱۵] اقتباس شده است. بیضی کوچک، محل نمونه‌های گروه ۱ را مشخص کرده و بیضی بزرگ مربوط به نمونه‌های گروه ۲ است. پیکانی که ترسیم شده بر اساس خط برازش (رگرسیون) بین نقاط داده‌هاست

بحث

نمودار مقدار R در برابر درصد زمینه برای نمونه‌های بررسی شده ترسیم گردید (شکل ۵). بر اساس این نمودار، همهٔ نمونه‌ها در محدودهٔ خوشه‌ای قرار گرفته‌اند که گویای این مطلب است که در همگی نمونه‌ها آرایش فضایی بلورهای پلاژیوکلاز، خوشه‌ای است. این موضوع با بررسی‌های میکروسکوپی مقاطع نازك نیز تا حد زیادی سازگار است. آرایش درشت بلورهای آمفیبول و کوارتز در مقطع KHD7 نیز خوشه‌ای است، چون مقدار R در آن‌ها کمتر از ۱ است. با توجه به خوشه‌ای بودن تمام بلورها به‌نظر می‌رسد که فرایندهای مؤثر در خوشه‌بندی پلاژیوکلازها برای سایر بلورها نیز قابل تعمیم باشد.

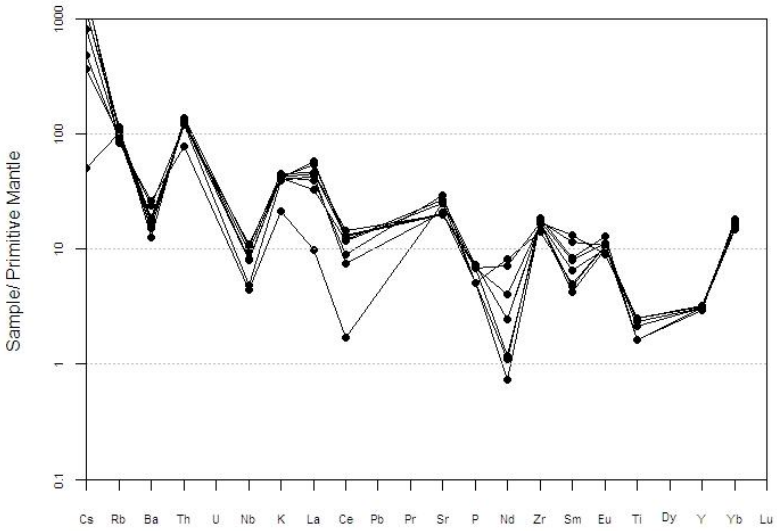
میزان خوشه‌ای بودن پلاژیوکلازها در نمونه‌های دیوریتی- کوارتز دیوریتی متفاوت است. بر این اساس و نیز پراکندگی اندازه و طول بیشینه (Lmax) پلاژیوکلازها می‌توان مقاطع را به دو گروه تقسیم کرد (جدول ۲). در گروه ۱ طول بیشینه نسبت به گروه ۲ کمتر و مقدار R بیش‌تر است. به‌عبارت دیگر میزان خوشه‌بندی پلاژیوکلازها در گروه ۲ بیش‌تر است در حالی که Lmax در آن‌ها بزرگ‌تر است. در این بین، آرایش پلاژیوکلازها در نمونه MAD4 تا حدی متفاوت از سایر نمونه‌هاست و مقدار R هم در این نمونه بیش‌تر از همهٔ نمونه‌هاست که در بخش‌های بعد دلیل این تفاوت بررسی می‌شود. بنا بر این، احتمال این‌که فرایندهای مؤثر در توزیع و نحوهٔ استقرار بلورها در کنار یک‌دیگر در یک گروه سنگی و حتی بین کانی‌های مشابه در نمونه‌های مختلف یک گروه سنگی متفاوت باشد وجود دارد [۵].

با مدل‌سازی تغییرات مقدار R در برابر درصد زمینه، برخی از فرایندهای تشکیل‌دهندهٔ بافت‌های آذرین، بازسازی شده‌اند [۹]. این تغییرات می‌تواند ناشی از فرایندهایی مانند فشردگی[۴]، روی‌هم‌رشدی[۵] و یا تغییرات اندازهٔ دانه‌ها (افزایش یا کاهش جورشدگی[۶] دانه‌ها) باشد. هر کدام از این فرایندها در نمودار شکل ۵ با بردار خاصی تعریف شده است.

۱. Deformational compaction ۲. Vesiculation ۳. Attachment ۴. Compaction
۵. Overgrowth ۶. Sorting

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

با وجود پراکندگی نمونه‌های گروه میکرودیوریت- کوارتزدیوریت در نمودار، نمونه‌ها همبستگی منفی دارند؛ یعنی با افزایش مقدار R درصد زمینهٔ آن‌ها کاهش می‌یابد. شیب خط رگرسیون که از بین نقاط داده‌ها به‌کمک نرم‌افزار اکسل ترسیم شده با شیب روندهای مدل‌سازی شده برای فرایندهای فشردگی تا حدی مشابه است. اما به‌طور معمول، فشردگی مکانیکی، فرایندی است که در سنگ‌های نفوذی الترامافیك عمیق که ته‌نشست ثقلی بلورها رخ می‌دهد و نیز در سنگ‌های آتشفشانی الترامافیك مانند کوماتی‌ایت‌ها گزارش شده است [۳]. ته نشست ثقلی بلورهای پلاژیوکلاز منجر به تغییرات شیمیایی مانند ناهنجاری منفی Sr و یا Eu نیز خواهد شد [۷]، در حالی که در این مجموعهٔ سنگی، مقادیر بالا و ناهنجاری مثبت این عناصر مشاهده شده است (شکل ۶). در ضمن، این فرایند در صورت افزایش چشمگیر درصد فازهای مورد نظر (در این‌جا پلاژیوکلاز) رخ می‌دهد. بنا بر این، احتمال وقوع فرایند فشردگی بر اساس روندها و سایر اطلاعات وجود ندارد.



شکل ۶. نمودار چند عنصری به‌هنجار شده نسبت به گوشتهٔ اولیه [۲۲]، ناهنجاری مثبت عناصر Sr و Eu را می‌توان به عدم جدایش و ته نشست ثقلی پلاژیوکلازها نسبت داد. در ضمن الگوهای به نسبت یک‌نواخت نمونه‌ها نشان می دهد که تفاوت‌های ژئوشیمیایی کمی بین سنگ‌های بررسی شده وجود دارد

فرایند دیگری که قابلیت تغییر مقادیر R را دارد روی‌هم‌رشدی یا درهم‌رشدی دانه‌ها یا بلورهاست. هرگونه تغییر ریختی در شکل یك بلور، به‌عنوان مثال بر اثر رشد غیرمتقارن در بلورهایی که مجاور هم هستند، مکان مرکز دانه‌ها را که در مقطع نازك تعیین شده تغییر می‌دهد [۹]. بنا بر این روی‌هم‌رشدی دانه‌ها موجب افزایش مقدار R می‌شود، چون با این عمل فاصلهٔ نزدیك‌ترین همسایه افزایش می‌یابد و در عین حال فواصل دورترین همسایه‌ها کاهش خواهد یافت [۹]. شیب روند داده‌ها در نمونه‌های گروه میکرودیوریت-کوارتزدیوریت از شیب روند مدل‌سازی شده برای فرایند روی هم رشدی بیش‌تر است. اما آن‌چه در مقاطع نازك برخی نمونه‌ها (به‌ویژه نمونه‌های گروه ۲ و نمونه MAD4) مشاهده می‌شود تجمع درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و تشکیل خوشه‌های بلوری است. در این تجمعات گاهی روی هم رشدی پلاژیوکلازهایی با ابعاد متفاوت و مرزهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

نامنظم دیده می‌شود. بنا بر این بر اساس مقایسهٔ روندها و مشاهدهٔ مقاطع نازك می‌توان نتیجه گرفت که فرایند روی‌هم‌رشدی بلورها پس از تشکیل خوشه‌های بلوری می‌تواند یکی از فرایندهای تشکیل‌دهندهٔ بافت‌ها باشد که این حالت در برخی از پژوهش‌های دیگر نیز دیده شده است [۴]. ولی بررسی‌های تجربی نشان داده که این فرایند در کسرهای بالای بلور و در مراحل نهایی تحولات بافتی که امکان تصادم بلورها بیش‌تر است، رخ می‌دهد [۸]. از طرفی، شیب بردار فرایند روی هم رشدی بلورها در نمودار R در برابر درصد زمینه بر حسب آرایش اولیهٔ بلورها و به‌طور کلی بافت اولیهٔ سنگ کمی تغییر می‌کند [۹] و شیب بردار این فرایند که در نمودار شکل ۵ به نمایش درآمده حالت حد واسط این تغییرات است. بنا بر این تغییرات آرایش بلورهای پلاژیوکلاز در گروه میکرودیوریت- کوارتزدیوریت به فرایندهای دیگری غیر از روی هم‌رشدی نیز بستگی دارد که به ویژه در مراحل اولیه تا میانی تحولات ماگمایی با درصد کم‌تر فازهای جامد مؤثر بوده‌اند.

به‌طور کلی، عواملی که از زمان سردشدن اولیه و هسته‌بندی بلورها تا مراحل نهایی انجماد و تحکیم بافت‌ها موجب تغییر در آرایش بلورها و شکل‌گیری نهایی بافت می‌گردند، بیش از سه فرایند مذکور هستند. مثلاً بردار نماینده دگرشکلی حاصل از فشردگی[۱] و بردار فرایند تشکیل حفرات[۲] نیز به این نمودار افزوده شده‌اند [۱۰]، [۲۳] (شکل ۵). به‌علاوه، بردارهای فرایند اتصال[۳] بلورها نیز پیشنهاد شده‌اند [۱۵]. سایر پژوهش‌های نظری و نتایج تجربی هم نشان داده که عوامل خوشه‌بندی بلورها می‌تواند بیش از فرایندهایی باشد که در نمودار اولیه R در برابر درصد زمینه پیش‌بینی شده است [۴]، [۷]، [۸]، ولی این فرایندها بر روی نمودار مذکور بازسازی نشده‌اند.

از جمع‌بندی پژوهش‌های پژوهش‌گران، چنین ارزیابی می‌شود که برخی عوامل اثرگذار بر آرایش فضایی بلورها و کانی‌ها در سنگ‌های آذرین بر دو دستهٔ کلی هستند: ۱. عوامل درونی مانند هسته‌بندی (همگن یا ناهمگن)، رشد (عادی یا غیرعادی، متقارن یا نامتقارن)، روی‌هم‌رشدی، به‌هم‌پیوستگی یا ادغام[۴]، سینوس[۵] و درشت‌شدگی بلورها ۲. عوامل بیرونی مانند اختلاط ماگمایی یا اختلاط جمعیت‌های بلوری، تفریق یا ته‌نشست بلورها، تحرک مجدد بلورها یا خوشه‌های بلوری بر اثر جریان‌های همرفتی، فشردگی مکانیکی و نیز جابه‌جایی مکانیکی و صعود ماگما. در ادامهٔ برخی از این فرایندها که به‌نظر می‌رسد در تشکیل بافت سنگ‌های بررسی شده مؤثر بوده‌اند، مورد بحث قرار می‌گیرند:

هسته‌بندی همگن یا ناهمگن؟

ظهور بلورهای جدید در خلال سردشدن مذاب بر اثر هسته‌بندی همگن یا ناهمگن رخ می‌دهد [۷]، [۲۴]. اگر اندازهٔ هستهٔ بلور به حدی بحرانی (با عنوان شعاع یا اندازهٔ بحرانی) برسد تا بتواند بر انرژی سطحی بالای

۱. Deformational compaction ۲. Vesiculation ۳. Attachment ۴. Coalescence
۵. Synneusis

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

آن غلبه کند، هسته‌بندی به‌صورت همگن انجام می‌شود [۷]. برای وقوع چنین حالتی باید درجهٔ سردشدگی یا درجهٔ فوق اشباعی به حد کافی افزایش یابند [۷]. در این حالت به‌طور معمول آرایش هسته‌های بلوری به‌صورت تصادفی یا منظم خواهد بود [۷] که این نظر بر اساس نتایج تجربی نیز حمایت می‌شود [۲۵]. اگر هسته‌بندی بر روی سطوح بلوری موجود در ماگماها، ناخالصی‌های گازی یا در محل دیواره‌های مجرا و یا آشیانه ماگمایی رخ دهد، هسته‌ها به‌صورت ناهمگن تشکیل خواهند شد [۷]، [۲۴].

بر اساس پژوهش‌های نظری و بررسی‌های تجربی بر روی مذاب‌های بازالتی تا داسیتی، ماگماهای در حال تبلور تمایل بیش‌تری به هسته‌بندی ناهمگن در برابر هسته‌بندی همگن دارند [۲۴]، [۲۶]، [۲۷]؛ زیرا ماگماها حتی در مراحل اولیهٔ تحول خود دارای فازهای بلورین هستند [۳]، [۲۲] و در این حالت اندازه یا شعاع بحرانی مورد نیاز هسته و بالطبع سد انرژی سطحی کاهش یافته و هسته‌بندی ناهمگن با درجات کم‌تری از سردشدگی نیز رخ می‌دهد [۷] گرچه به‌نظر می‌رسد که طیف پیوسته‌ای بین هسته‌بندی همگن و ناهمگن در طبیعت وجود دارد [۷]. اگر هسته‌بندی ناهمگن باشد، به‌طور معمول خوشه‌بندی بلورها رخ می‌دهد و مکان بلورها وابسته به محل فازهای پیشین است [۳]، [۷]. با توجه به مواردی که گفته شد و وجود برخی نشانه‌ها مانند بیگانه‌سنگ‌ها و بیگانه‌بلورها در سنگ‌های بررسی شده [۱۶]، به احتمال زیاد، هسته‌بندی ناهمگن در این سنگ‌ها نقش مهمی در تشکیل خوشه‌های نخستین بلوری داشته است. در ضمن، نرخ و چگالی هسته‌بندی پلاژیوکلازها که بر اساس نمودارهای پراکندگی اندازه بلورها (CSD) قابل اندازه‌گیری و محاسبه هستند، در مقاطع بررسی شده، متفاوت بوده است [۱۶] که این موضوع نیز باعث تفاوت‌های جزئی بین آرایش بلورها شده است. خوشه‌بندی بلورهای کوارتز را نیز می‌توان با هسته‌بندی ناهمگن توجیه کرد، زیرا این کانی در مراحل پایانی تبلور شکل می‌گیرد و به‌طور قطع مکان تشکیل آن وابسته به محل فازهای متبلور شدهٔ پیشین است.

درشت‌شدگی بافتی[۱]

به‌طور خلاصه درشت‌شدگی یا بلوغ بافتی یا تکامل استوالد[۲] عبارت است از: انحلال بلورهای کوچک و رشد بلورهای درشت‌تر به خرج بلورهای ریزتر برای به حداقل رساندن انرژی آزاد سطحی در یک سیستم باز یا بسته [۲۸]. این فرایند، زمانی رخ می‌دهد که بلورهای یك فاز برای مدتی نزدیك به لیکیدوس آن فاز نگه داشته شوند [۲۸]، [۲۹]. در این شرایط، تغییرات درجهٔ سردشدگی در محدودهٔ کوچکی باقی می‌ماند، به‌همین دلیل سرعت هسته‌بندی صفر است، ولی سرعت رشد برای بلورهای بزرگ‌تر از اندازه یا شعاع بحرانی بالاست [۲۸]، [۲۹]. این شرایط در سیستم‌های ماگمایی می‌تواند ناشی از تزریق ماگمای با ترکیب مافیك‌تر به درون مخزن [۳۰]، اختلاط در داخل مخزن به‌دلیل جریان‌های همرفتی و تغییر در فوگاسیتهٔ مواد فرار [۳۱] باشد. ویژگی‌های بافتی سنگ‌های دیوریتی- کوارتز دیوریتی منطقه، نشانه‌هایی از اختلاط ماگمایی به‌صورت تزریق ماگمای مافیك‌تر و داغ‌تر ولی با ترکیب مشابه نسبت به ماگمای درون مخزن ماگمایی را دارند.

۱. Textural Coarsening ۲. Ostwald Ripening

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

از جمله این ویژگی‌ها، وجود برونبوم‌های ریزدانه مافیك (MME)، منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی در پلاژیوکلازها، وجود بیگانه‌بلورهای پیروکسن و آمفیبول با حاشیهٔ واکنشی از آمفیبول و بیوتیت و کوارتزهای با حاشیه‌های گرد شده و خلیجی هستند [۱۶]. مدل‌سازی زمین‌شیمیایی بر اساس عناصر اصلی و کمیاب نیز شواهد اختلاط ماگمایی را تأیید کرده است [۱۶]. بنا بر این در مورد سنگ‌های میکرودیوریت-کوارتزدیوریتی این پژوهش، با توجه به شواهد سنگ‌نگاری و مدل‌سازی زمین‌شیمیایی، اختلاط ماگمایی بیش‌ترین نقش را در تأمین دمای مورد نیاز برای انجام فرایند درشت‌شدگی بافتی داشته است .

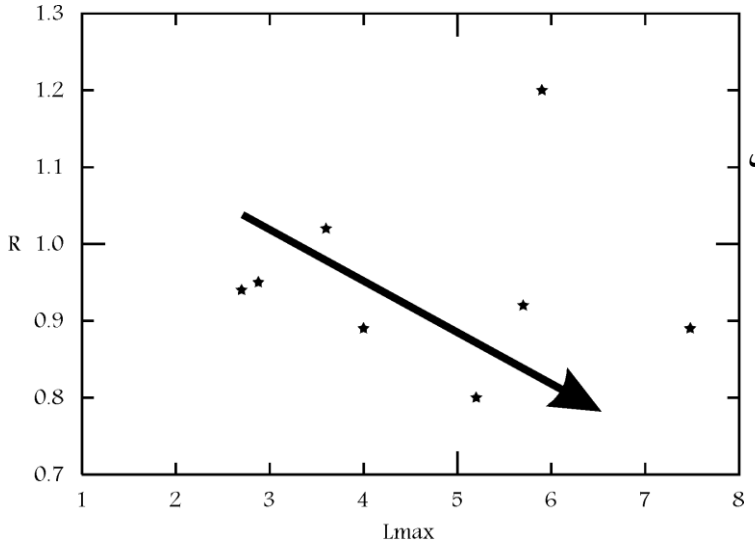
تأثیر این فرایند بر اندازه و شکل بلورها در پژوهش‌های موردی مختلف و بررسی‌های تجربی روشن شده است [۱۶]، [۲۴]، [۲۸]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲] ولی تاکنون بررسی دقیقی دربارهٔ ارتباط این فرایند با تغییر آرایش فضایی بلورها انجام نشده است. با این حال واضح است که در صورت درشت‌شدن برخی بلورها و حذف برخی بلورهای ریز، مکان مرکز بلورها و میانگین فواصل نزدیک‌ترین همسایه‌ها تغییر می‌یابد و امکان کاهش یا افزایش مقدار R وجود دارد. وقوع فرایند درشت‌شدگی بافتی در سنگ‌های میکرودیوریت-کوارتزدیوریتی به‌کمك بررسی کمی اندازه و شکل بلورها شناسایی شده است و به‌ویژه تأثیر آن در سنگ‌هایی که مقدار R کم‌تری دارند بیش‌تر است، یعنی با افزایش خوشه‌بندی بلورها، اندازهٔ بلورها نیز درشت‌تر شده که این تغییرات تا اندازه‌ای در نمودار مقدار R در برابر طول بیشینهٔ بلورها (شکل ۷) و نیز شکل ۱ منعکس شده است، ولی نمونهٔ MAD4 از این قاعده پیروی نمی‌کند و با وجود بزرگی طول بیشینهٔ بلورها، مقدار R بالایی دارد (R= ۱/۲).

فرایند درشت‌شدگی بافتی موجب تغییر شکل بلورهای پلاژیوکلاز از حالات تخته‌ای به حالات هم‌بعدتر می‌شود [۳۳] (شکل ۸). بنا بر این باید رابطه‌ای بین نسبت منظر بلورها که به‌صورت S:I:L یا طول:عرض:ارتفاع بیان می‌شود با مقدار R برقرار باشد تا بتوان این فرایند را از آرایش بلورها نیز استنتاج نمود. برای این منظور نمودار R در برابر نسبت S/I ترسیم شد (شکل ۹). در نمونه‌های بررسی شده I≈L بوده است [۳۳] پس هر رابطه‌ای در نمودار شکل ۹ را می‌توان به نمودار R در برابر I/L نیز تعمیم داد. آن‌چه از شکل ۹ برداشت می‌گردد، کاهش مقدار R (یعنی افزایش خوشه‌بندی بلورها) متناسب با افزایش نسبت S/I (یعنی تحول شکل پلاژیوکلازها از تخته‌ای به هم‌بعد) است که باز هم باید نمونهٔ MAD4 را جدا کرد.

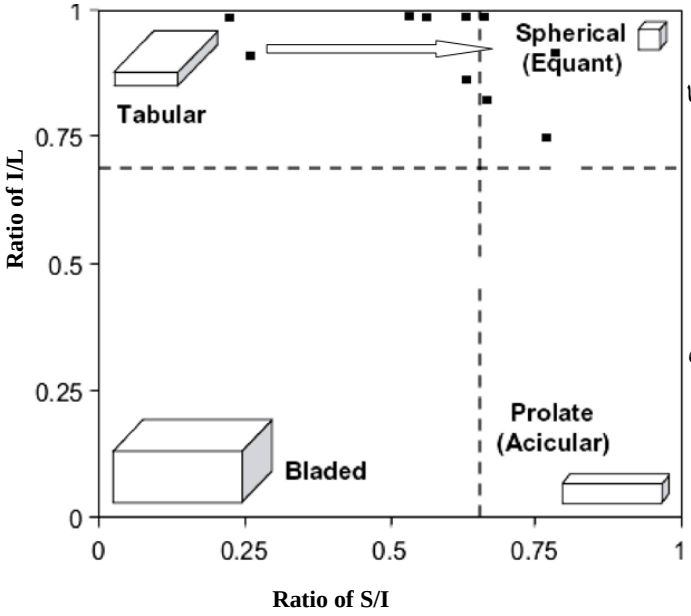
دو حالت برای عدم هم‌بستگی نمونهٔ MAD4 با سایر نمونه‌ها محتمل است: حالت اول این‌که پلاژیوکلازها در این نمونه متحمل فرایند درشت‌شدگی بافتی نشده‌اند که این حالت با توجه به میانگین اندازه و طول بیشینهٔ بلورها و سایر شواهد [۱۶] مردود است. در حالت دوم ممکن است پس از فرایند درشت‌شدگی بافتی، فرایند یا فرایندهای دیگری نیز بر این نمونه اثر گذاشته باشند. یکی از این فرایندها روی‌هم‌رشدی بلورهاست که با توجه به بررسی میکروسکوپی در این مقطع تأثیر بیش‌تری داشته است و روند نشان داده شده در شکل ۵ نیز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

این موضوع را تأیید می‌کند. علاوه بر این، زمان رشد بلورها در این نمونه بیش‌تر از سایر نمونه‌ها بوده است [۱۶]. با توجه به این‌که فرایند درشت‌شدگی بافتی در یک سیستم باز و در مراحل میانی تحولات ماگمایی رخ داده است و مراحل پایانی انجماد ماگما با هسته‌بندی و رشد بلورهای ریز همراه بوده است نمی‌توان به‌صورت کمی و دقیق نقش آن را بر تغییر آرایش بلورها مشخص کرد و پراکندگی نسبی در نمودار R در برابر درصد زمینه نیز به‌همین دلیل است، چون بلورهای ریززمینه در هر نمونه به گونهٔ متفاوتی بر حسب فازهای موجود اطراف آن تشکیل هسته داده (هسته‌بندی ناهمگن) و رشد کرده‌اند. ممکن است درشت‌شدگی بلورهای مجاور هم منجر به روی هم‌رشدی بعدی آن‌ها شده باشد که بر حسب خوشه‌های اولیهٔ بلوری متفاوت بوده است و به‌همین دلیل روند پراکنده‌ای برای سنگ‌های میکرودیوریت-کوارتزدیوریتی ایجاد شده است.



شکل ۷. نمودار مقدار R در برابر طول بیشینهٔ بلورها[۱] (بر حسب میلی‌متر)



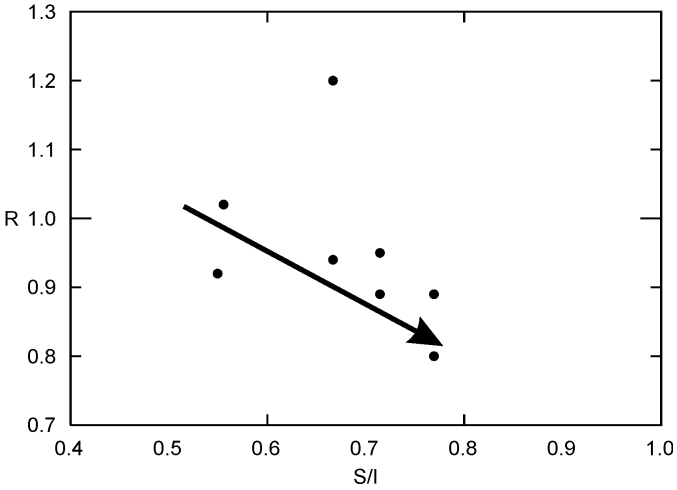
شکل ۸. نمودار زینگ یا نمودار نسبت I/L در برابر S/I که برای تعیین شکل سه بعدی بلورها بر اساس نسبت منظر بلورها (S:I:L) به‌کار می‌رود (اقتباس از [۱۱] با تغییرات). چنان‌که دراین نمودار دیده می‌شود پلاژیوکلازها در نمونه‌های بررسی شده دارای شکل تخته‌ای[۲] تا هم بعد[۳] هستند. این تحول در شکل بلورها از حالت تخته‌ای به هم بعد متناسب با افزایش طول بیشینه بلورها در مقاطع مختلف رخ داده است و به‌عنوان یکی از شواهد وقوع درشت شدگی بافتی مطرح شده است [۳۳]

۱. Lmax ۲. Tabular ۳. Equant

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

رشد بلورها

رشد نامتقارن بلورها منجر به تغییر مکان مرکز بلورها و تغییر در مقادیر R خواهد شد [۹] به‌علاوه اگر بلورها زمان کافی برای رشد در اختیار داشته باشند، رشد نامتقارن می‌تواند عاملی برای روی هم‌رشدی بلورهای مجاور یک‌دیگر باشد. بر اساس نمودارهای توزیع اندازهٔ بلورها (CSD) در میکرودیوریت-کوارتزدیوریت‌ها زمان رشد ریز بلورهای پلاژیوکلاز، ۲۸ تا ۶۶ سال و برای درشت بلورها، از ۷۱ تا ۲۴۵ سال برآورد شده است [۱۶]. بنا بر این درشت بلورهایی که از ابتدا به‌دلیل هسته‌بندی ناهمگن تشکیل خوشه‌های بلوری اولیه را داده‌اند، زمان کافی برای روی‌هم‌رشدی با بلورهای مجاور خود را داشته‌اند. برای نمونه MAD4 زمان رشد ۱۵۸ و ۶۶ سال (به‌ترتیب برای درشت و ریزبلورها) به‌دست آمده است که رشد ریزبلورها در آن بیش از سایر نمونه‌ها است و به‌همین دلیل میانگین اندازهٔ بلورها نیز در این نمونه بیش‌تر است. این امر موجب شده تا تغییرات اندازه، آرایش و شکل بلورها تا حدی متفاوت از سایر نمونه‌ها شود.



شکل ۹. نمودار مقدار R در برابر نسبت S/I (به‌عنوان شاخص شکلی بلورها) توضیحات بیش‌تر در متن ارائه شده است

اختلاط ماگمایی

اختلاط ماگماهایی که دارای محتوای بلوری متفاوت هستند، می‌تواند منجر به تولید ماگمایی با توزیع غیرتصادفی بلورها شود [۷] که این مسئله بر روی برونبوم‌های مافیک ناشی از اختلاط ماگمایی بررسی شده است [۲۳]. شواهد بافتی مانند وجود برونبوم‌های مافیک و نیز مدل‌سازی زمین‌شیمیایی حاکی از تزریق یک ماگمای مافیک به درون مخزن ماگمایی به وجودآورندهٔ سنگ‌های میکرودیوریت-کوارتزدیوریتی است [۱۶]، [۳۴]. اگرچه اختلاط ماگمایی در توزیع و تحرک مجدد بلورها و در نتیجه تغییر مقادیر R و تغییر آرایش بلورها نقش داشته است، ولی میزان تأثیر آن به‌طور کمی مشخص نیست.

برداشت

خوشه‌بندی بلورها فرایندی مهم در تحول بافت‌ها و تاریخچهٔ تبلور سنگ‌های آذرین است و خوشه‌های بلوری به سادگی در ماگماها تشکیل می‌شوند. انواعی از فرایندهای فیزیکی مسبب این پدیده هستند که برخی از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

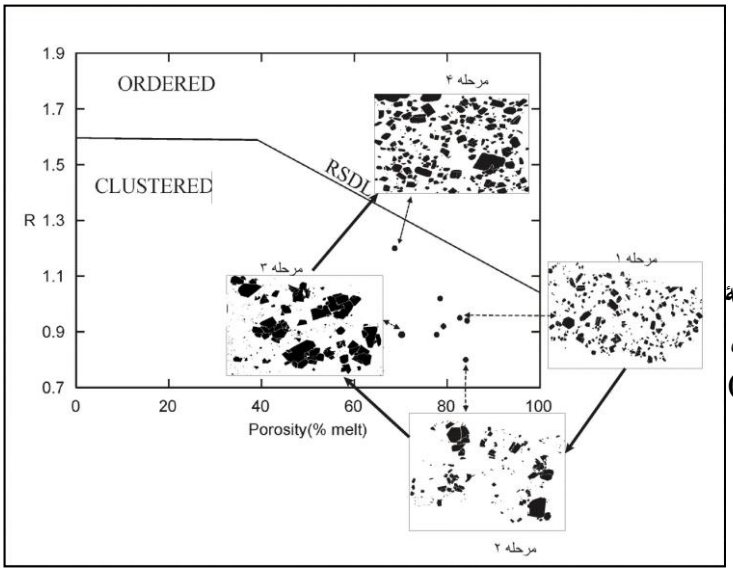
آن‌ها مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده‌اند و برخی از آن‌ها به‌صورت کمّی قابل محاسبه و مدل‌سازی نیستند. اندازه‌گیری کمی آرایش بلورها در میکرودیوریت-کوارتزدیوریت‌های این پژوهش نشان داد که حتی کانی‌های یک‌سان (در اینجا پلاژیوکلاز) در سنگ‌های با ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی به نسبت یک‌سان و متعلق به یک سری ماگمایی نیز ممکن است به‌صورت یک‌نواخت توزیع نشوند. روندی را که این تغییرات آرایش بلورها به‌وجود می‌آورند، می‌توان به فرایند یا فرایندهای فیزیکی ویژه‌ای نسبت داد، در حالی که چنین تفسیرهایی با بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیهٔ شیمیایی مستند نمی‌شوند. الگوی توزیع فضایی بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و کوارتز در سنگ‌های این پژوهش، خوشه‌ای است و با توجه به فاصله‌ای که از خط RSDL دارند (شکل ۵) درجهٔ خوشه‌بندی بلورها بالاست.

رابطهٔ بین تغییرات آرایش بلورها با شکل و اندازهٔ بلورها و تلفیق با نتایج مدل‌سازی زمین‌شیمیایی نشان داد که عوامل مؤثر در تکوین بافت سنگ‌های منطقه بیش از یک فرایند هستند. مدل احتمالی تکوین بافت سنگ‌های بررسی شده بر حسب آرایش فضایی و اندازهٔ بلورها بدین‌صورت است (مراحل تحول آرایش بلورها بر اساس این مدل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است): مدل پیشنهادی از مرحلهٔ جای‌گیری ماگما درون پوسته در عمق‌های بیش از ۵ کیلومتر (عمق پایداری آمفیبول) شروع می‌شود. جای‌گیری ماگما درون سنگ‌های با دمای کم‌تر، موجب سردشدن ماگما و خروج گرما با نرخ ثابتی می‌شود و در این شرایط هسته‌بندی و رشد بلورها به ویژه پلاژیوکلاز و آمفیبول شروع می‌شود. هسته‌بندی بلورها به‌دلیل وجود بیگانه بلورها و بیگانه سنگ‌ها به‌صورت ناهمگن است که باعث تشکیل خوشه‌های بلوری اولیه می‌شود. این چرخه به‌دلیل تزریق ماگمای با ترکیب مافیك‌تر به درون مخزن و اختلاط در داخل مخزن به‌دلیل جریان‌های همرفتی دچار گسیختگی شده است. وجود برونبوم‌های مافیك، بافت‌های غیرتعادلی و نتایج مدل‌سازی زمین‌شیمیایی می‌تواند شاهدی بر این مدعا باشد. این فرایندها همراه با آزاد شدن گرمای تأخیری تبلور بلورهای اولیه می‌توانند باعث کاهش نرخ سردشدگی شوند. با کاهش نرخ سردشدگی و نزدیک شدن دما به لیکیدوس پلاژیوکلاز، بلورهای کوچك‌تر از اندازهٔ بحرانی حل شده و بلورهای بزرگ‌تر به رشد خود ادامه می‌دهند (بر اساس نظریه درشت‌شدگی بافتی[۱]). این فرایند منجر به‌روی هم‌رشدی بلورهای مجاور هم و بزرگ‌تر شدن اندازهٔ بیشینه بلورها می‌شود. هنگامی که سیستم دوباره سرد می‌شود و نرخ سردشدگی افزایش می‌یابد، درشت شدگی‌بافتی متوقف و هسته‌بندی شروع می‌شود. چرخه بار دیگر با تجدید هسته‌بندی و رشد آغاز می‌شود. عمل‌کرد گسل‌های منطقه می‌تواند موجب صعود بخشی از ماگما به قسمت‌های بالاتر شود. در نتیجهٔ این فرایند و جای‌گیری ماگمای تحول یافته در یك مخزن کم عمق‌تر و سرد شدن سریع‌تر ماگما، هسته‌بندی و رشد بلورهای ریززمینه نیز رخ می‌دهد و در نهایت در مرحلهٔ ۱ (شکل ۱۰) سنگ‌هایی مشابه با نمونه‌های KHD7، KHA6 و KHD21 تشکیل می‌شوند که دارای خوشه‌بندی کم‌تری هستند و اندازهٔ بلورهای درشت در

۱. Textural Coarsening

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

آن‌ها کوچک‌تر از سایر نمونه‌هاست و فراوانی درشت بلورها نیز کم‌تراست (سنگ‌های گروه ۱ در جدول ۲). در ماگمای باقی‌مانده در بخش زیرین نیز به‌واسطه عواملی که گفته شد و نیز تغییر در محتوای مواد فرار باز هم امکان تکرار بیش‌تر چرخه درشت‌شدگی بافتی و هسته‌بندی و رشد بلورها وجود دارد. ممکن است که تکرارهای متناوب این چرخه، به‌صورت تصاعدی، آرایش بلورها را به سمت خوشه‌ای‌تر شدن و اندازه بلورها را به سمت درشت‌تر شدن سوق دهد (مرحلهٔ دوم تحول در شکل ۱۰). در ضمن این تناوب می‌تواند توجیهی برای منطقه‌بندی نوسانی درشت بلورهای پلاژیوکلاز باشد. صعود مجدد ماگما از مخزن زیرین با نرخ صعود بالاتر، موجب شده تا بخش باقی‌مانده مذاب نیز با پیشرفت عمل سردشدگی و توقف عوامل تامین کننده گرما با سرعت بیش‌تر هسته‌بندی و رشد کند و بلورهای ریز زمینه به‌وجود آمده‌اند. سنگ‌هایی مشابه با نمونه‌های گروه ۲ در جدول ۲ که بیش‌ترین خوشه‌بندی در بلورها را نشان می‌دهند و دارای درشت‌ترین بلورها و با فراوانی بیش‌تر هستند نتیجهٔ تکرار بیش‌تر این چرخه هستند (مراحل ۲ و ۳ در شکل ۱۰). با سرد شدن آرام ماگمای باقی‌مانده در مخزن زیرین و با زمان رشد طولانی‌تر بلورها، سنگ‌هایی شبیه به نمونه MAD4 به‌وجود آمده‌اند که در چنین شرایطی روی هم‌رشدی بلورها موجب افزایش مقدار R می‌شود.



شکل ۱۰. مراحل تحول آرایش فضایی بلورها در سنگ‌های بررسی شده که بر این اساس و تلفیق با سایر اندازه‌گیری‌های بافتی، فرایندهای فیزیکی مؤثر در مخازن ماگمایی بازسازی شده‌اند. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود، نمونه‌هایی که در مرحلهٔ ۱ تشکیل شده‌اند دارای مقدار R بزرگ‌تری هستند هر چند که در این نمونه‌ها (گروه ۱) نیز به‌دلیل هسته‌بندی ناهمگن، آرایش پلاژیوکلازها خوشه‌ای است. در ضمن اندازهٔ بیشینه بلورها نیز کوچک‌تر از سایر مقاطع است. در مرحلهٔ ۲ به‌دلیل تکرار چرخهٔ درشت‌شدگی بافتی و زمان رشد طولانی‌تر بلورها، میزان خوشه‌بندی بلورها افزایش یافته است. در مرحلهٔ ۳ پدیده روی هم‌رشدی بلورهای مجاور یک‌دیگر، باعث افزایش مختصر مقادیر R شده است. نمونه‌های این دو مرحله مربوط به گروه ۲ در جدول ۲ هستند. مرحله ۴ در مخزن ماگمایی زیرین رخ داده و نمایندهٔ آن، نمونه MAD4 است که با توجه به میانگین زمان رشد طولانی‌تر بلورها و بزرگ‌تر بودن میانگین اندازهٔ بلورها دارای آرایش متفاوت تری نسبت به سایر نمونه‌ها است. با این حال، تأثیر فرایندهای فیزیکی مذکور در این مرحله نیز موجب شده تا پلاژیوکلازها دارای آرایش خوشه‌ای باشند. تصویر پردازش شدهٔ مرحلهٔ ۱ متعلق به مقطع KHD21، و تصاویر مراحل ۲ تا ۴ به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های JAJ2، KHT8 و MAD4 هستند. همچنین موقعیت نمونه‌ها در نمودار با خط چین مشخص شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

منابع

1. A. R. Philpotts, L. D. Dickson, "The formation of plagioclase chains during convective transfer in basaltic magma", Nature 406 (6791) (2000) 59-61.
2. D. A. Jerram, M. J. Cheadle, "On the cluster analysis of rocks", American Mineralogist, 84 (1) (2000) 47-67.
3. D. A. Jerram, M. J. Cheadle, A.R. Philpotts, "Quantifying the building blocks of igneous rocks: are clustered crystal frameworks the foundation?", Journal of Petrology 44 (2003) 2033-2051.
4. S. Ikeda, M. Toriumi, H. Yoshida, I. Shimizu, "Experimental study of the textural development of igneous rocks in the late stage of crystallization: the importance of interfacial energies under non-equilibrium conditions", Contributions to Mineralogy and Petrology V 12, N0 4 (2002) 397-415.
5. A. Mock, D.A. Jerram, C. Breitkreuz, "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 44 (2003) 833-849.
6. R. Kretz, "Shape, size, spatial distribution and composition of garnet crystals in highly deformed gneiss of the Otter Lake area, Que´bec, and a model for garnet crystallization", J. metamorphic Geol. 24(2006) 431-449.
7. M. D. Higgins, "Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology", Cambridge University Press (2006).
8. F. Schiavi, N. Walte, H. Keppler, " First in situ observation of crystallization processes in a basaltic-andesitic melt with the moissanite cell", Geology v. 37 no. 11 (2009) 963-966.
9. D. A. Jerram, M. J. Cheadle, R. H. Hunter, M. T. Elliott, "The spatial distribution of grains and crystals in rocks", Contributions to Mineralogy and Petrology, 125 (1) (1996) 60-74.
10. S. Boorman, A. Boudreau, F. J. Kruger, "The Lower Zone-Critical Zone transition of the Bushveld Complex: a quantitative textural study", Journal of Petrology 45 (2004) 1209-1235.
11. A. Mock, D. A. Jerram, "Crystal size distributions (CSD) in three dimensions: insights from the 3D reconstruction of a highly porphyritic rhyolite", Journal of Petrology 46 (2005) 1525-1541.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

12. S. D. C. Walsh, M. O. Saar, "Numerical models of stiffness and yield stress growth in crystal-melt suspensions", Earth Planet. Sci. Lett. 267 (2008) 32-44.

۱۳. س. زندی‌فر، م. ولی‌زاده، و. توکلی، م. ع. برقی، *روشی نوین در تعیین مقدار کانی‌ها و توزیع شبکهٔ سه بعدی آن‌ها در بررسی‌های سنگ‌شناسی، با استفاده از ریز مدل‌سازی، و بررسی موردی کانی گارنت در اولین زون اسکارن حسین آباد یزد*، مجلهٔ بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال شانزدهم، شمارهٔ ۴، (۱۳۸۷) ۵۳۳-۵۴۵.

۱۴. ص. امینی، م. ح. رضوی، ف. مسعودی، ا. اسکندری، *روشی نوین در اندازه‌گیری آرایش فضائی بلورها و کانی‌ها و کاربرد آن در تعیین فرایندهای تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین جنوب خاوری بیرجند*، هفدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، مرداد ۸۸.

۱۵. ا. اسکندری، ص. امینی، ف. مسعودی، ب. منفردی، *بازسازی فرآیندهای اتصال بلورها و نقش آن در تغییر آرایش فضایی بلورها و کانی‌ها در سنگ‌های آذرین*، هجدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شهریور ۸۹.

۱۶. ا. اسکندری، *پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های ماگمایی ترشیری و لیستونیت‌های جنوب خاوری بیرجند*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، ۲۱۲.

17. K. G, Cox, J. D. Bell, Pankhurst, "The Interpretation of Igneous Rocks. Allen & Unwin", London (1979).

18. M. D. Higgins, "Measurement of crystal size distributions", American Mineralogist 85 (2000) 1105-1116.

19. M. D. Higgins, D. Chandrasekharam, "Nature of Sub- volcanic Magma Chambers, Deccan Province, India: Evidence from QuantitativeTextural Analysis of Plagioclase Megacrysts in the Giant Plagioclase Basalts", Journal of Petrology 48 (2007) 885-900.

20. J. Barraud, "The use of watershed segmentation and GIS software for textural analysis of thin sections", J. Volcanol, Geotherm, Res., 154 (2006) 17-33.

۲۱. ع. حسن پور، ع. کنعانیان، م. ع. برقی، *مرزبندی کانی‌ها در تصویر مقاطع سنگ‌شناسی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال هفدهم، شماره اول، ۱۳۳-۱۴۹ (۱۳۸۸).

22. S. Sun, W.F. McDonough, "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins", Geological Society, London, (1989) 313-345.

23. V. M. Martin, D. M. Pyle, M. B. Holness, "The role of crystal frameworks in the preservation of enclaves during magma mixing", Earth and Planetary Science Letters 248 (2006) 787-799.

24. E. Pupier, S. Duchene, M. J. Toplis, "Experimental quantification of plagioclase crystal

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

size distribution during cooling of a basaltic liquid", Contributions to Mineralogy and Petrology 155 (2008) 555-570.

25. J. Mongrain, J. F. Larsen, "Spatial point pattern analysis applied to bubble nucleation in silicate melts", Computers & Geosciences 35 (2009) 1917-1924.
26. J. E. Hammer, M. J. Rutherford, "An experimental study of the kinetics of decompression-induced crystallization in silicic melt", J. Geophys. Res 197 (2002) 1-23.
27. M. J. Zieg, G. E. Lofgren, "An experimental investigation of texture evolution during continuous cooling", J Volcanol Geotherm Res., 154 (1-2) (2006) 74-88.
28. M. D. Higgins, "Origin of anorthosite by textural coarsening: quantitative measurements of a natural sequence of textural development", Journal of Petrology 39 (1998) 1307-1323.
29. M. D. Higgins, "Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: a crystal size distribution (CSD) study of microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California. In: Castro, A., Fernandez, C., and Vigneresse, J. L. (eds.), Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques", Geological Society, London, Special Publications, 168 (1999) 207-219.
30. M. D. Higgins, J. Roberge, "Crystal size distribution (CSD)of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Monteserrat: evidence for dynamic crystallization/textural coarsening cycles", Journal of Petrology 44 (2003) 1401-1411.
31. M. D. Higgins, "The Cascadia megathrust earthquake of 1700 may have rejuvenated an isolated basalt volcano in western Canada", Age and petrographic evidence, Journal of Volcanology and Geothermal Research 179 (2009) 149-156.
32. H. Cabane, D. Laporte, A. Provost, "An experimental study of Ostwald ripening of olivine and plagioclase in silicate melts: implications for the growth and size of crystals in magmas", Contributions to Mineralogy and Petrology 150, 1 (2005) 37-53.

۳۳. ص. امینی، ا.، اسکندری، *بررسی فرآیندهای فیزیکی تبلور در سنگ‌های آذرین جنوب خاوری بیرجند با استفاده از مدل‌سازی شکل سه بعدی بلورهای پلاژیوکلاز*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال هجدهم، شمارهٔ ۴، ۶۶۹-۶۸۴ (۱۳۸۹).

۳٤. ا. اسکندری، ص. امینی، *مدل‌سازی ژئوشیمیایی تحولات ماگمایی در سنگ‌های آذرین جنوب خاوری بیرجند*، سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین(۱۳۸۸).

۳۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پرنگ، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۶).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]