

Combination of geochemical- statistical- petrological and crystal size distribution (CSD) as a new confidence in determination of magmatic processes in Kodegan Area (South Khorasan)

Zahra Hamzehei ¹, Mina Boveiri Konari ² and Ali Solgi ^{3*}

¹ Department of Geology, Faculty of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

² Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Department of Geology, Faculty of Earth Science, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Abstract

Eocene volcanic and plutonic rocks exposed in the 90 km south of Khusf, south Khorasan Province. The texture of these rocks is porphyritic, glomeroporphyritic, seriate and poikilitic. Plagioclase, Alkali feldspar, quartz, pyroxene and hornblende are abundant mineral in these rocks. Plagioclase crystals show sieve texture and zoning. These rocks are calc-alkaline to tholeiitic. They characterized by enrichment of LREE and LILE, depletion of HREE and HFSE. Negative anomalies of Ti, Nb, P, Zr, and positive anomalies of Pb, K, U reflect emplacement of volcanic rocks in an active continental margin. In order to investigation of magma crystallization, crystal size distribution (CSD) technique also used for 10 andesite and basalt rock samples. Increasing of plagioclase crystal size in a semi-logarithmic plot which demonstrate population density versus size, represents fractional crystallization. Concavity of the CSD diagrams resulting from combination of two populations of crystals, that one of them formed during slow cooling and the other formed during a period of pressure reduction and rapid cooling. Additionally, chemical features such as variation trends of Nb/Y vs. Nb and MgO vs. Fe₂O₃ and two different trends of volcanic and plutonic samples in Harker and dendrogram diagram, regarded as an indicator of magma mixing processes.

Key words: Kodegan, magma mixing, crystal size distribution (csd), active continental margin

* a.solgi@srbiau.ac.ir

تلفیق بررسی‌های زمین‌شیمیایی - آماری - سنگ‌شناسی و CSD به‌عنوان رهیافتی نوین در شناخت فرایندهای ماگمایی در محدوده کودگان (خراسان جنوبی)

زهرا حمزه‌ای^۱، مینا بوبری‌کناری^۲ و علی سلگی^{۳*}

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

چکیده

در ۹۰ کیلومتری جنوب خوسف در استان خراسان جنوبی، سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی به سن ائوسن برونزد دارند. این گروه‌های سنگی بیشتر بافت پورفیری، گلوپورپورفیری، تدریجی و پویی‌کلیتیک نشان می‌دهند. پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، کوارتز، پیروکسن و هورنبلند از کانی‌های فراوان سازنده این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند. در این سنگ‌ها، بلورهای پلاژیوکلاز بافت غربالی و زونینگ دارند. این سنگ‌ها روند کالک‌آلکان تا توله‌ایتی نشان می‌دهند. ویژگی‌هایی مانند غنی‌شدگی از LREE و LILE، تهی‌شدگی از HREE و HFSE، وجود ناهنجاری‌های منفی عنصرهای P، Nb، Ti، Zr و ناهنجاری مثبت K، Pb، U در نمونه‌ها نشان‌دهنده پیدایش این توده در مرز فعال قاره‌ای هستند. برای بررسی شرایط تبلور ماگما، بلورهای پلاژیوکلاز در ۱۰ نمونه آذرین بیرونی با ترکیب آندزیتی و بازالتی، به روش توزیع اندازه بلور (CSD) بررسی شدند. روند افزایشی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز روی نمودارهای نیمه‌لگاریتمی تغییرات اندازه در برابر چگالی جمعیتی کانی‌ها در نمونه‌های آذرین بیرونی، نشان‌دهنده رفتار تبلور و جدایش بلورین است. تقعر رو به بالای نمودارهای CSD پیامد ترکیب دو جمعیت بلوری است که یکی از آنها هنگام سرد شدن آرام و دیگری در دوره کاهش فشار و سرد شدن روی داده است. روند تغییرات Nb/Y در برابر Nb و MgO در برابر Fe₂O₃ و همچنین، جایگیری نمونه‌های آذرین بیرونی و درونی در دو گروه جدا برپایه بررسی نمودارهای هارکر و نمودار به‌دست‌آمده از آنالیز خوش‌های همگی نشان‌دهنده رویداد فرایند آمیختگی ماگمایی در هنگام پیدایش واحدهای سنگی محدوده کودگان است.

واژه‌های کلیدی: کودگان، آمیختگی ماگمایی، توزیع اندازه بلورها، مرز فعال قاره‌ای

* a.solgi@srbiau.ac.ir

Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

DOI: <https://doi.org/10.22108/ijp.2020.121410.1160>

مقدمه

یکی از روش‌های کاربردی که اطلاعات مهمی درباره تاریخچه تبلور و سردشدن سنگ‌های ماگمایی ارائه می‌دهد، بررسی کمی اندازه‌کانی‌های سنگ‌ساز سنگ‌های آذرین و به‌ویژه در سنگ‌های آذرین بیرونی است. این روش به نام توزیع اندازه بلورها یا CSD (Crystal Size Distribution) خوانده می‌شود (Marsh, 1988). روش CSD بیشتر متأثر از هسته‌بندی، متوسط سرعت و زمان رشد بلورها و به دنبال آن، زمان توقف ماگما در آشیانه ماگمایی است.

از آنجایی که تبلور سنگ‌های آذرین در شرایط پیچیده هسته‌بندی و رشد انجام می‌شود، سردشدگی سریع در سنگ‌های آتشفشانی یا نیمه‌ژرف یا سردشدن آرام در سنگ‌های آذرین درونی تغییرات آشکار و قابل دیدنی در بافت آنها پدید می‌آورد. عامل کلیدی در درک چگونگی پیدایش سنگ‌های آذرین و فرایندهای مؤثر در پیش، همزمان و پس از پیدایش آنها، نیازمند تفسیر ترکیب شیمیایی و بافت آنهاست (Renzulli and Santi, 1997; Jerram and Cheadle, 2000; Kuscü and Floyd, 2001). تجزیه کیفی بافت‌ها پایه فهم ویژگی‌های فیزیکی تبلور ماگما به‌شمار می‌رود (Marsh, 1988; Higgins, 2006a; Jerram and Higgins, 2007).

روش CSD برپایه بررسی تعادل میان شمار بلورها در یک طیف اندازه مشخص در حجم مشخصی از ماگماست که به نام چگالی تجمعی از آن یاد می‌شود. پلاژیوکلاز از فراوان‌ترین کانی‌های سازنده سنگ‌های آذرین است و در بیشتر شرایط گوناگون ماگمایی حالت پایدار دارد و نوسان‌های فیزیکو-شیمیایی آشیانه ماگمایی را در خود ثبت کند (Gagnevin *et al.*, 2007; Ruprecht and Wörner, 2014). از این‌رو، در بیشتر بررسی‌های CSD انجام‌شده در سنگ‌های آذرین، بیشترین تأکید روی اندازه‌گیری پارامترها

درباره بلورهای پلاژیوکلاز بوده است.

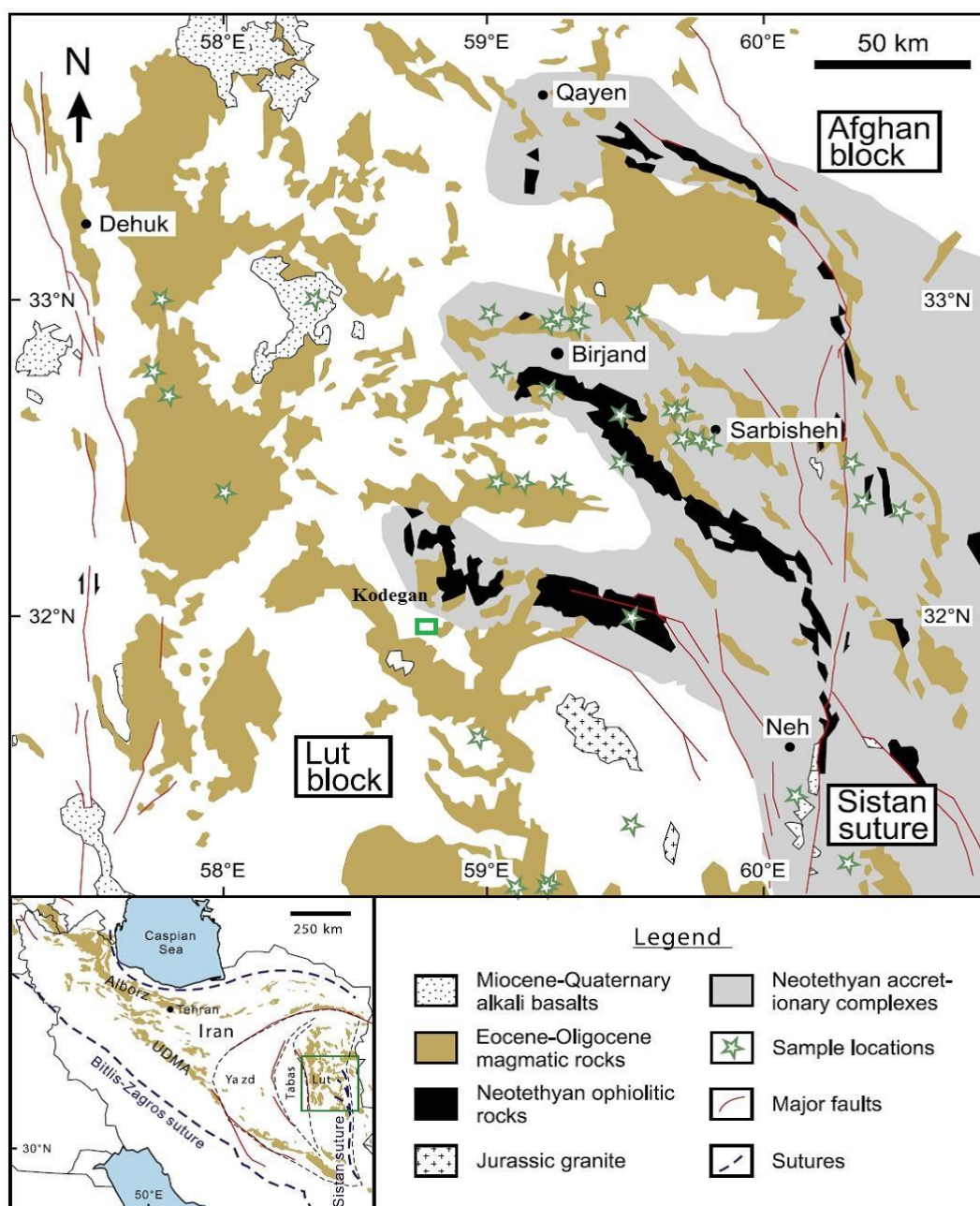
Randolph و Larson (۱۹۷۱) از نخستین پژوهشگرانی هستند که به معرفی کاربرد روش توزیع اندازه بلورها در اندازه‌ها پرداختند. سپس Marsh (۱۹۸۸) این روش را به صورت کاملاً علمی توسعه داد. برپایه بررسی‌های وی، Higgins (۲۰۰۰) نرم‌افزار CSD Correction را طراحی کرد.

با تکمیل تئوری CSD روشن شد سرعت رشد بلورها به اندازه آنها وابسته نیست؛ اما میزان هسته‌بندی بلورها در برابر اندازه آنها روندی وارونه نشان می‌دهد؛ یعنی هرچه میزان هسته‌بندی سریع‌تر باشد، بلورهای پدیدآمده اندازه کوچک‌تری خواهند داشت. اندازه و آرایش فضایی بلورها در سیستم‌های ماگمایی نشان‌دهنده شرایط بالآمدن ماگماست، بدین گونه که میزان میکرولیت‌ها و میکروفنوکریست‌ها در سنگ‌های آذرین بیرونی نشان‌دهنده رشد بلورها در مجاری و جمعیت فنوکریست‌ها نشان‌دهنده توقف ماگما در آشیانه ماگمایی است.

در این پژوهش، برپایه بررسی توزیع اندازه بلورهای (CSD) پلاژیوکلاز در ۱۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی محدوده کودگان و تلفیق این اطلاعات با داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌ها، شرایط تبلور ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه را بازسازی و فرایندهای دخیل در تحولات ماگمایی آنها را بررسی می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی

مجموعه کودگان در ۹۰ کیلومتری جنوب خوسف، در استان خراسان جنوبی و خاور پهنه ساختاری لوت در پهنه ایران مرکزی جای دارد (شکل ۱). بلوک لوت روند شمالی-جنوبی دارد و با گسل‌های نهبندان در خاور، درونه در شمال، نایبند در باختر و جازموریان در جنوب فراگرفته شده است (Berberian and King, 1981).



شکل ۱- جایگاه محدوده کودگان (دایره سبز رنگ) روی نقشه پهنه‌های ساختاری ایران، برگرفته از Nowroozi (۱۹۷۶)، Aghanabati (۲۰۰۴) و Hessami و همکاران (۲۰۰۶)

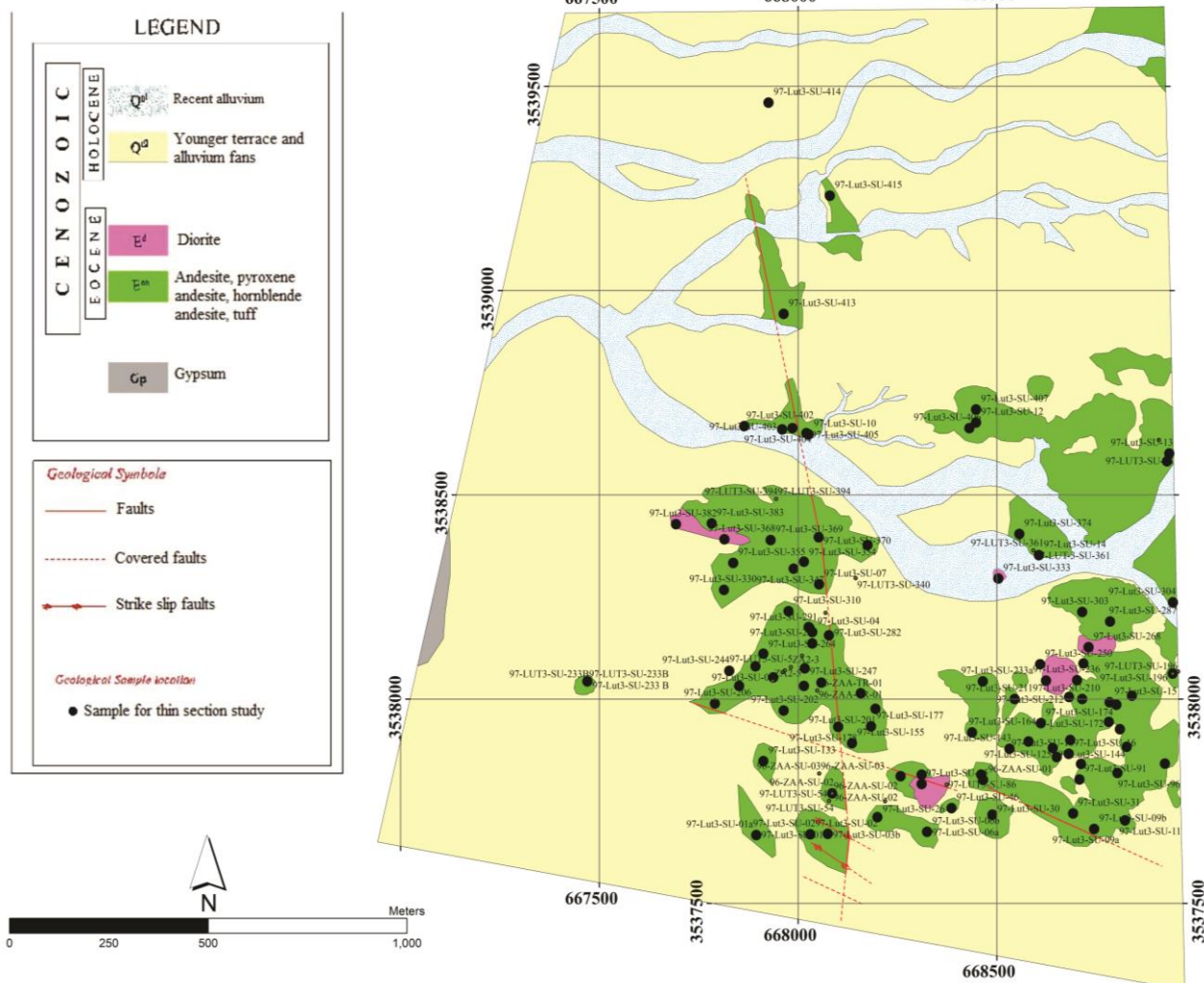
زمانی و مکانی ولکانیسم و پلوتونیسم در بلوک لوت، فرورانش پوسته اقیانوسی به‌سوی باختر و به زیر بلوک لوت را پیشنهاد کرده‌اند (Eftekharneshad, 1981). بررسی‌های زمین‌شناسی و ایزوتوپی جدید روی برخی توده‌های آذرین درونی بلوک لوت، فرورانش

برخی پژوهش‌های انجام‌شده روی توالی افیولیتی در مرز خاوری پهنه لوت با بلوک افغان و فعالیت‌های ماگماتیسم دیده‌شده در بلوک افغان، فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر بلوک افغان را پیشنهاد کرده‌اند (Saccani *et al.*, 2010); اما برخی پژوهش‌های دیگر بر پایه حجم و پراکندگی

گروه‌های سنگی در نقشهٔ کودگان بیشتر از نوع آذرین هستند و سن آنها پالئوسن تا ائوسن (Bolourian, 2010) است. این سنگ‌ها در بردارندهٔ توده‌های آذرین درونی ژرف و نیمه‌ژرف گوناگون، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری هستند. کهن‌ترین گروه‌های سنگی که گستردگی کمابیش بسیاری در جنوب منطقه دارند، واحدهای آگلومرایبی و توف هستند. بیشتر سطح محدوده را واحدهای آندزیت (پیروکسن آندزیت) و دیوریت فراگرفته‌اند. نمونه‌های سنگی بررسی‌شده در این پژوهش، ترکیب آندزیت، پیروکسن آندزیت و بازالت دارند (شکل ۲).

دوسویه و نامتقارن پوستهٔ اقیانوسی به زیر بلوک لوت و بلوک افغان با سرعت‌های گوناگون را نشان می‌دهند (Arjmandzadeh *et al.*, 2011).

فعالیت ماگماتیسم گستردهٔ بلوک لوت از زمان ژوراسیک آغاز و تا ترشیاری ادامه داشته و در این زمان به اوج خود رسیده است (Pang *et al.*, 2013). سن‌سنجی بازالت‌های آلکالن میوسن تا کواترنری منطقه لوت-سیستان نشان‌دهندهٔ برخورد بلوک لوت با بلوک افغان در زمان کرتاسه پسین است (Pang *et al.*, 2013). محدودهٔ کودگان در بخش شمالی نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ کودگان جای دارد.



شکل ۲- نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ کودگان

بسیار کم هستند؛ به‌گونه‌ای که برپایه شمار کم آنها واحد جدایی تفکیک نشده است. در این نمونه‌ها نیز مانند آندزیت‌ها، بافت‌های پورفیری، پویی‌کلیتیک و کمتر تراکیتی دیده می‌شوند. بیشتر بلورهای الیوین دیده شده در این نمونه‌ها به سیلیس دگرسان شده و ایدنگزیتی شده‌اند. در این نمونه‌ها، نشانه‌هایی از دگرسانی سیلیسی و کربناته با درجه ضعیف تا متوسط دیده شده‌اند. وجود بافت‌های غیرتعادلی مانند منطقه‌بندی ترکیبی، بافت غربالی و پلاژیوکلاز دو نسلی معمولاً به متغیرهای مستقل (فشار، دما و ترکیب شیمیایی) وابسته است که حالت تعادل پیشین سیستم را برهم می‌زند. این بافت‌ها در پی تغییرات حرارتی و شیمیایی مذابی پدید می‌آیند که در تماس با بلور است و چه‌بسا پیامد انتقال بلور به بخش دیگری از ماگما، جریان مذاب میان بلورهایی که زودتر پدید آمده‌اند، و جدایش پیش‌رونده مذاب باشد. درباره چگونگی پیدایش بافت غربالی باور بر اینست که ناپایداری کم بخشی از بلور در مذاب، باعث ذوب و تبلور درجا (و دوباره) بخش‌های ذوب‌شده می‌شود (Stamatelopoulos *et al.*, 1990; Tsuchiyama, 1985). این بافت‌ها نشان‌دهنده نبود تعادل در آشیانه ماگمایی است که چه‌بسا پیامد ورود یا حضور دو یا چند ماگما در آشیانه ماگمایی باشد (شکل ۳-C). پیروکسن و هورنبلند فراوان‌ترین کانی‌های مافیک دیده‌شده در واحدهای سنگی آذرین بیرونی این محدوده هستند. بیشتر این بلورها شکل‌دار هستند و در آنها دگرسانی‌های سریسیتی، کربناتی و اپیدوتی با درجه ضعیف تا متوسط دیده می‌شوند. بیشتر بلورهای هورنبلند در نمونه، دگرسان شده‌اند و حاشیه‌ی اپاسیتی دارند (شکل‌های ۳-A، ۳-C، ۳-F و ۳-E).

بیشتر گسل‌های محدوده کودگان روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و خاوری-باختری نشان می‌دهند. این گسل‌ها در واحد آندزیتی دیده می‌شوند و شواهد رفتار گسل‌های نرمال و چپگرد در آنها دیده می‌شود.

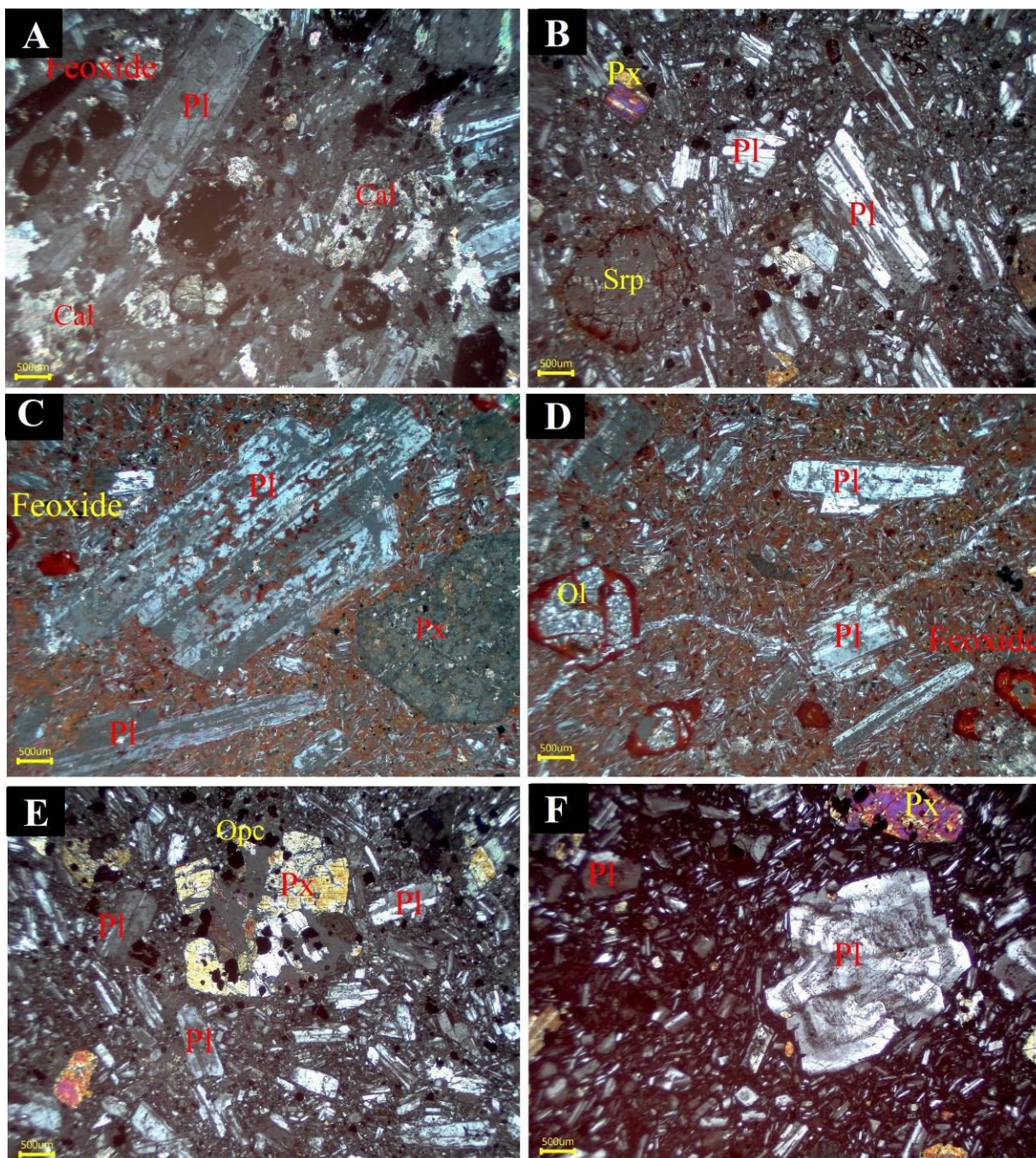
سنگ‌نگاری

الف- آندزیت

آندزیت فراوان‌ترین ترکیب سنگ‌شناسی دیده‌شده در این محدوده است. بیشتر نمونه‌های برداشت‌شده از این واحد ترکیب آندزیت، پیروکسن آندزیت و هورنبلند آندزیت دارند. در این نمونه‌ها، بافت‌های پورفیری، گلوپورپورفیری، پویی‌کلیتیک و غربالی از بافت‌های غالب به‌شمار می‌روند. پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی این نمونه‌هاست و پس از آن هورنبلند، پیروکسن و الیوین که بیشتر به‌صورت شکل‌دار در نمونه‌ها دیده می‌شوند. نشانه‌های دگرسانی سریسیتی، اپیدوتی، کربناتی، بیوتیتی و اکسیداسیون آهن با درجات ضعیف تا کمی متوسط نیز دیده می‌شوند. بلورهای پلاژیوکلاز به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند و در اندازه‌های متوسط تا درشت دیده می‌شوند. در این بلورها، نشانه‌های ماکل پلی‌سینتتیک، زونینگ، بافت غربالی و پلاژیوکلاز دونسلی دیده می‌شوند. منطقه‌بندی ترکیبی در این بلورها نشان‌دهنده تغییر ترکیب ماگما، در پی تزریق مداوم ماگما به آشیانه ماگمایی و تغییر شرایط پیرامون بلورهای پلاژیوکلاز است (Holton *et al.*, 2000) (شکل‌های ۳-A تا ۳-F و ۳-D).

ب- بازالت

نمونه‌های بازالت دیده‌شده در این محدوده



شکل ۳- A) فنوکریست پلاژیوکلاز با نشانه‌های ضعیف زونینگ و کربناتی شدن فنوکریست‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز (پیروکسن‌اندزیت)؛ B) بلورهای شکل‌دار پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سینتتیک و الیوین سرپانتینیته شده در زمینه ریزبلور و شیشه‌ای (اندزیت)؛ C) پلاژیوکلاز با بافت غربالی در کنار فنوکریست دگرسان شده پیروکسن (پیروکسن‌اندزیت)؛ D) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با بافت غربالی، الیوین سیلیسی شده و ایدینگزیتی شده در زمینه‌ای از بافت میکرولیتی (بازالت)؛ E) بافت گلومروپورفیری با تجمع بلورهای شکل‌دار پیروکسن (پیروکسن‌اندزیت)؛ F) زونینگ در فنوکریست پلاژیوکلاز در زمینه میکرولیتی (اندزیت)

به‌دست‌آمده از روش توزیع اندازه بلورها و بررسی تحولات زمین‌شیمیایی مؤثر در پیدایش سنگ‌های این

زمین‌شیمی در این بخش، برای بررسی و تکمیل نتایج

شده‌اند) (شکل ۴). همچنین، در نمودارهای شناسایی سری‌های ماگمایی (شکل ۵) نمونه‌های آذرین درونی سرشت توله‌ایتی دارند؛ اما نمونه‌های آذرین بیرونی روند کالک‌آلکان نشان می‌دهند. ماگماهای کالک‌آلکان ویژه پهنه‌های فرورانشی هستند؛ اما سری‌های توله‌ایتی (که دربردارنده سنگ‌های حد واسط و اسیدی نیز هستند) گاه در پهنه‌های فرورانشی دیده شده‌اند. هر دو گروه، نمونه‌های آذرین بیرونی و درونی در جایگاه کمان آتشفشانی مرز قاره پدید آمده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷).

محدوده، از داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه به روش XRF و ICP-MS (برای ۸ نمونه آذرین بیرونی و ۷ نمونه آذرین درونی برداشت‌شده از محدوده کودگان) بهره گرفته شده است (جدول‌های ۱ و ۲).
برپایه جانمایی نمونه‌ها در نمودارهای پیشنهادی Cox و همکاران (۱۹۷۹) و Middlemost (۱۹۹۴)، نمونه‌های آذرین بیرونی کودگان ترکیب آندزیت و بازالت دارند؛ اما نمونه‌های آذرین درونی در گستره ترکیبی گرانیت، گرانودیوریت و کوارتزولیت جای می‌گیرند (زیرا دچار دگرسانی بالای سیلیسی

جدول ۱- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌های کودگان به روش XRF برپایه درصدوزنی

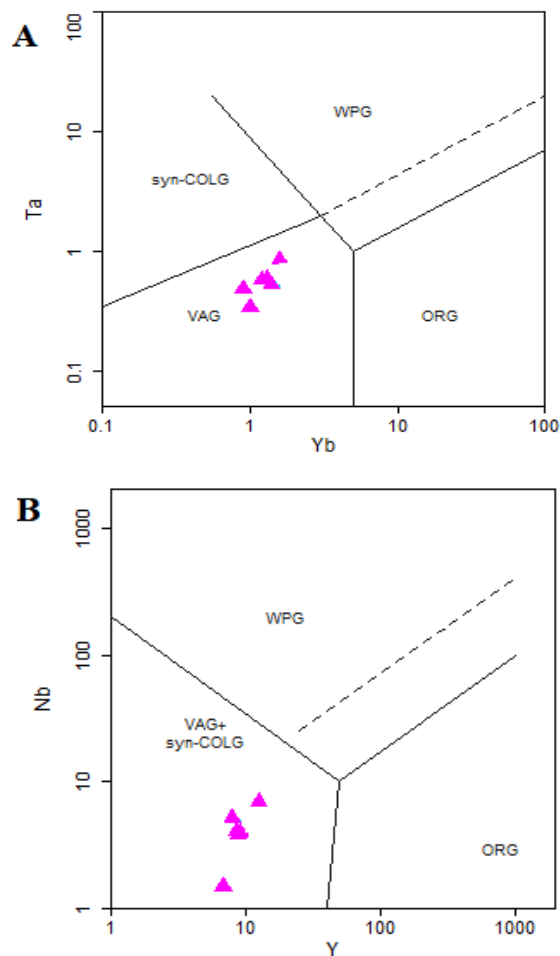
Sample No.	97-KOD-85	97-KOD-54	97-KOD-340	97-KOD-56	97-KOD-5	97-KOD-11	97-KOD-309	
<i>Intrusive Rocks</i>								
SiO ₂	73.62	74.04	75.59	76.87	78.57	80.60	86.11	
TiO ₂	0.47	0.47	0.64	0.41	0.45	0.68	0.43	
Al ₂ O ₃	11.94	14.76	4.75	11.07	10.64	13.06	5.05	
Fe ₂ O ₃	3.56	2.55	2.27	2.91	4.40	2.36	2.20	
MnO	<	0.08	<	0.09	<	0.05	<	
MgO	2.05	0.32	0.98	2.24	1.61	0.19	0.43	
CaO	4.91	5.27	10.69	5.10	3.32	1.63	5.02	
Na ₂ O	0.22	0.37	0.23	0.37	0.46	0.21	0.20	
K ₂ O	0.11	0.43	0.10	0.11	0.16	0.19	0.12	
P ₂ O ₅	0.20	0.16	0.07	0.13	0.19	0.26	0.07	
SO ₃	2.93	1.56	4.52	0.68	0.14	0.75	0.31	
Sample No.	97-KOD-86	97-KOD-233B	97-KOD-147	97-KOD-361	97-KOD-401	97-KOD-13	97-KOD-394	97-KOD-196
<i>Volcanic Rocks</i>								
SiO ₂	54.79	54.79	55.57	55.92	56.95	56.36	56.13	56.28
TiO ₂	0.75	0.76	0.67	0.72	0.76	0.71	0.76	0.66
Al ₂ O ₃	17.33	17.62	16.58	16.88	18.27	17.69	16.51	15.94
Fe ₂ O ₃	9.60	8.22	8.28	8.37	7.50	8.10	8.25	7.79
MnO	0.15	0.08	0.11	0.09	0.06	0.13	0.16	0.15
MgO	3.79	3.86	3.82	3.36	2.89	3.60	2.99	4.44
CaO	8.43	9.01	8.99	8.49	8.17	7.96	7.93	8.71
Na ₂ O	2.27	2.67	2.49	2.50	2.73	2.77	3.11	2.33
K ₂ O	2.50	2.55	3.01	3.17	2.37	2.31	3.50	3.20
P ₂ O ₅	0.24	0.33	0.36	0.36	0.24	0.24	0.42	0.31
SO ₃	0.08	0.06	0.06	0.06	<	0.05	0.14	0.12

جدول ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌های کودگان به روش ICP-MS (برپایه ppm)

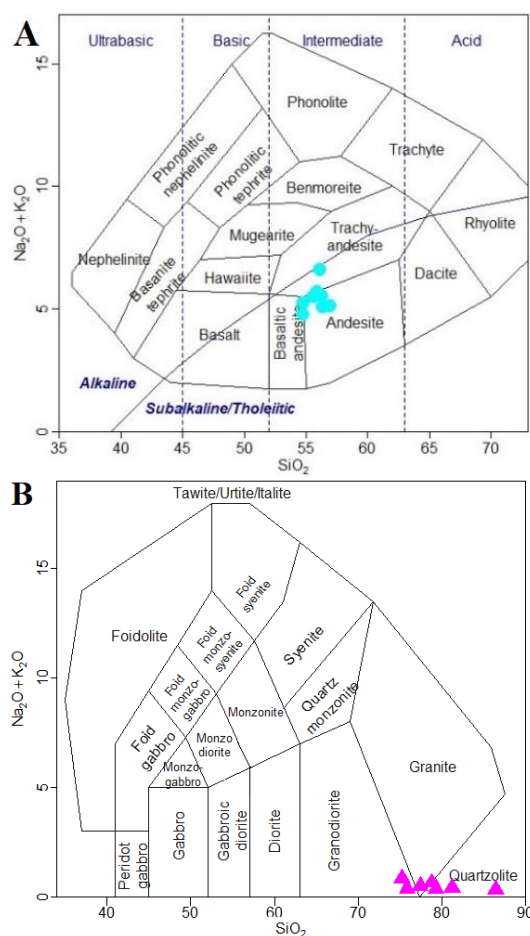
Sample No.	97-KOD-5	97-KOD-11	97-KOD-13	97-KOD-54	97-KOD-56	97-KOD-85	97-KOD-86	97-KOD-147
Li	46	41	13	33	36	31	10	8
Be	0.9	0.6	1	1	0.9	0.9	1.1	1.3
Na	1776	611	19130	1642	1918	988	15882	16618
Mg	8273	1110	17510	1807	10786	10042	17787	18294
Al	46455	55857	79697	60952	46451	48266	76527	73320
P	499	802	783	453	384	602	805	1134
S	661	2698	57	5964	2332	12027	220	138
K	946	1171	16493	2818	659	630	17719	20352
Ca	18223	8836	44131	28762	27562	25886	46847	49440
Sc	9.6	14.7	20.9	7.9	7	9.4	27	23.4
V	72	184	171	64	66	108	202	187
Cr	27	102	24	10	20	32	16	48
Mn	155	271	762	409	523	118	901	708
Fe	25574	14964	47361	15486	16902	20719	54061	48384
Co	11	20	21	6	8	15	22	26
Ni	7	29	10	4	7	24	5	19
Cu	1	52	30	<1	4	16	<1	21
Zn	46	27	87	43	39	42	84	80
As	6.8	>100	0.8	9.5	5.3	12.1	5.5	0.4
Se	2.1	1.8	2.3	2.1	3.9	3.6	1.6	1.3
Rb	<1	<1	41	<1	<1	<1	49	64
Sr	619	667	407	330	441	988	428	595
Y	8.5	8.8	13.1	12.5	9.1	8	12.5	11.7
Zr	80	88	76	55	105	90	69	75
Nb	4.1	3.9	5.1	6.9	4	5.2	4.8	2.6
Mo	0.1	0.4	0.1	0.6	0.4	0.4	<0.1	0.1
Ag	0.1	0.4	0.3	<0.1	0.7	0.2	0.2	<0.1
Cd	<0.1	1.5	<0.1	0.1	<0.1	0.1	0.1	<0.1
In	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	1.3	1	1.1	0.6	1.3	1.2	1.1	1.2
Sb	0.5	32.5	0.5	2.4	0.8	0.9	<0.5	<0.5
Te	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
Cs	0.9	0.9	1.7	0.9	0.7	0.7	3.8	1.5
Ba	384	98	435	233	220	354	423	550
Tl	<0.1	0.2	0.1	<0.1	<0.1	0.4	0.3	0.2
Pb	14	17	18	8	9	15	16	17
Bi	0.3	0.2	0.2	<0.1	0.2	0.3	0.1	0.1
Ti	2276	3592	3767	2206	1954	2322	3928	3558
La	14	17	14	21	15	16	15	18
Ce	26	30	25	36	31	29	26	31
Pr	3.2	3.9	3.3	4.6	3.1	3.6	3.5	4.3
Nd	13	16.3	14.3	16.6	12.7	12.9	14.8	18.9
Sm	2.5	3.1	3.2	3.2	2	2.4	3.3	3.8
Eu	0.7	1	1.1	0.8	0.6	0.7	1.3	1.4
Gd	2.1	2.5	3	2.6	1.8	2.1	2.9	3.4
Tb	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6
Dy	2.6	2.9	4	3.5	2.8	2.6	4	3.8
Er	1.8	1.6	2.5	2.3	1.8	1.6	2.4	2.3
Tm	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4
Yb	1.2	1.4	2.3	1.6	1.3	1.2	2.3	2.1
Lu	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3
Hf	2.4	2.5	2.3	1.8	2.6	2.4	2.2	2.4
Ta	0.6	0.5	0.6	0.9	0.6	0.6	0.6	0.5
W	<1	5.8	37.7	61.3	1.2	6.8	<1	8.1
Th	4.5	6.8	3.3	11	5	5.3	3.3	4.4
U	1.1	3.6	1.1	2.2	9	14.4	1.1	1.3

جدول ۲- ادامه

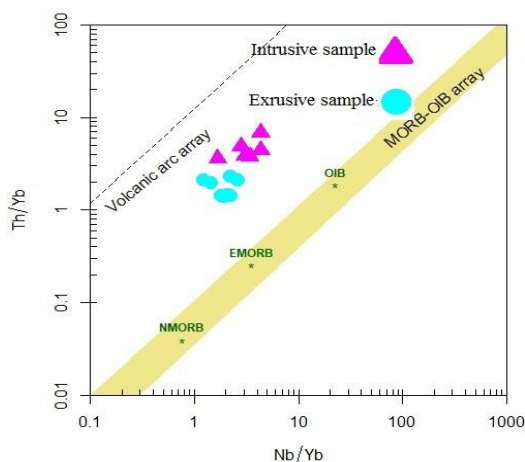
Sample No.	97-KOD-196	97-KOD-233B	97-KOD-309	97-KOD-340	97-KOD-361	97-KOD-394	97-KOD-401
Li	11	7	35	31	8	7	10
Be	1.2	1.1	0.9	0.7	1.4	1.5	1.1
Na	15731	18079	846	1098	17231	20628	19104
Mg	19938	18016	2446	5007	15954	13600	13845
Al	70003	75655	22706	21053	76630	69050	81855
P	1028	1072	327	217	1218	1352	799
S	606	104	2022	17037	216	646	88
K	22427	17373	732	618	22379	22641	16800
Ca	47490	48205	27402	55866	48418	40486	45529
Sc	23.1	18.5	5.2	5.4	24.4	17.3	21.3
V	164	165	64	57	190	79	176
Cr	75	94	23	15	50	26	19
Mn	812	507	245	217	550	923	369
Fe	43564	46089	13430	13395	48015	43381	41979
Co	21	19	9	7	22	18	20
Ni	19	17	4	6	16	11	9
Cu	19	12	<1	<1	28	7	<1
Zn	82	67	36	35	97	83	79
As	0.5	<0.1	35.8	3.3	2.9	3.2	<0.1
Se	1.9	2.4	2.3	3.4	2.9	2.1	2
Rb	64	40	<1	<1	70	64	40
Sr	566	493	284	475	660	603	448
Y	10.7	12.7	7.2	6.8	11.7	11.1	12.4
Zr	73	69	32	66	79	65	75
Nb	5	4	<1	1.5	4.7	2.3	4.3
Mo	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	<0.1
Ag	0.2	0.1	<0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
Cd	<0.1	0.1	0.3	<0.1	0.1	<0.1	0.1
In	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	1.2	1	0.7	1.1	1.1	1.3	1.1
Sb	<0.5	<0.5	4.6	2.4	1	<0.5	<0.5
Te	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2
Cs	1.5	1.2	0.8	0.8	2	1.7	2
Ba	479	455	449	1084	540	560	438
Tl	0.3	0.2	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.2
Pb	16	13	6	4	18	17	15
Bi	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
Ti	3373	3924	2149	3133	3717	3654	3872
La	17	16	7	11	19	16	14
Ce	29	28	10	19	34	30	25
Pr	4.1	3.9	1.2	2.5	5	4.6	3.3
Nd	17.3	17.6	5.3	8.3	21	19.6	14.4
Sm	3.6	3.7	0.9	1.6	4.7	4.1	3.1
Eu	1.2	1.4	0.4	0.5	1.5	1.5	1.2
Gd	3.2	3.5	0.8	0.5	3.9	3.7	3.4
Tb	0.5	0.7	0.4	0.3	0.6	0.6	0.6
Dy	3.2	4	2.3	2.3	4	3.6	3.7
Er	2.1	2.5	1.5	1.5	2.2	2.1	2.5
Tm	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4
Yb	1.9	2.2	1	0.9	2.1	1.6	2.2
Lu	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3
Hf	2.3	2.1	0.8	1.9	2.6	2.2	2.5
Ta	0.7	0.6	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6
W	<1	<1	<1	<1	65.5	3.3	3.1
Th	3.9	3.1	1	3.3	4.9	3.1	3.1
U	1.3	1.2	0.6	0.5	1.4	1	1.1



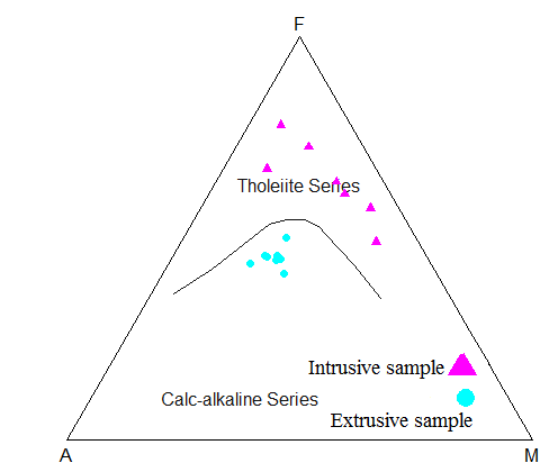
شکل ۶- ترکیب نمونه‌های آذرین محدوده کودگان (●: سنگ‌های آذرین بیرونی؛ ▲: سنگ‌های آذرین درونی) در: (A) نمودار Yb در برابر Ta (Pearce *et al.*, 1984)؛ (B) نمودار Y در برابر Nb (Pearce *et al.*, 1984)



شکل ۴- ترکیب نمونه‌های آذرین محدوده کودگان (●: سنگ‌های آذرین بیرونی؛ ▲: سنگ‌های آذرین درونی) در: (A) نمودار Cox و همکاران (۱۹۷۹)؛ (B) نمودار Middlemost (۱۹۹۴)



شکل ۷- ترکیب نمونه‌های آذرین محدوده کودگان در نمودار (Hollocher *et al.*, 2012) Th/Yb در برابر Nb/Yb



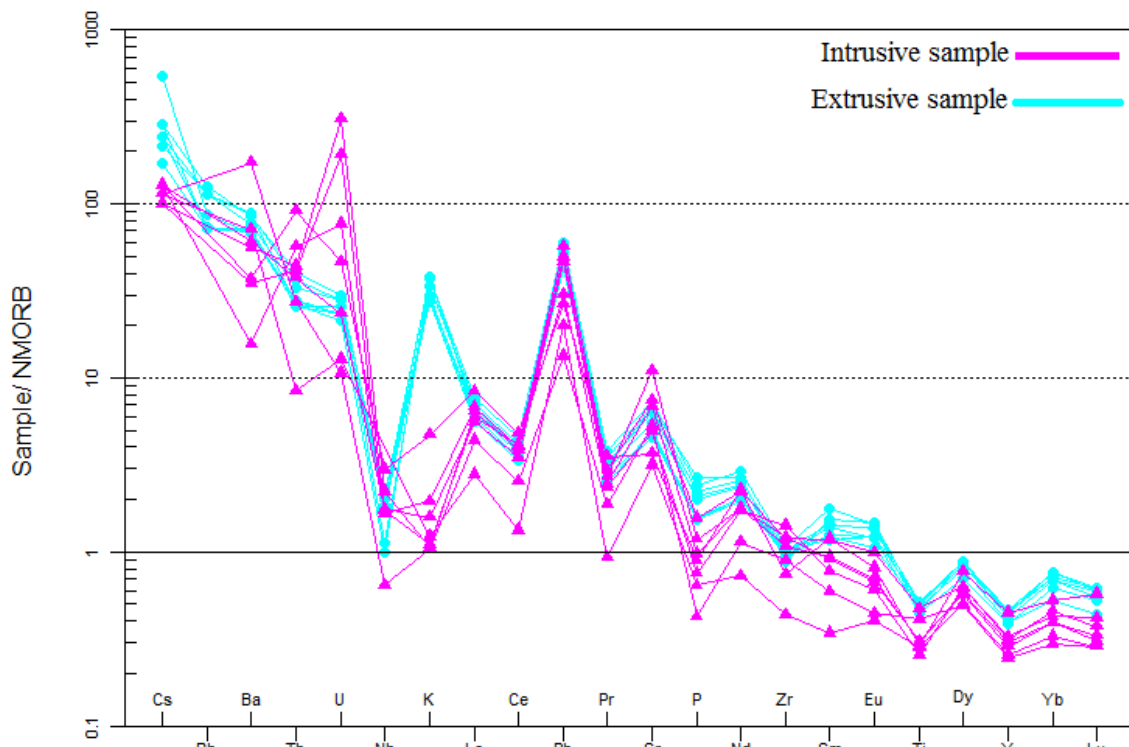
شکل ۵- ترکیب نمونه‌های آذرین محدوده کودگان در نمودار سه‌تایی (Irvine and Baragar, 1971)

پوسته در فرایندهای ماگمایی (Nagudi *et al.*, 2003) و آلودگی پوسته یا ذوب دوباره آن (Swain and Kirby, 2008) است.

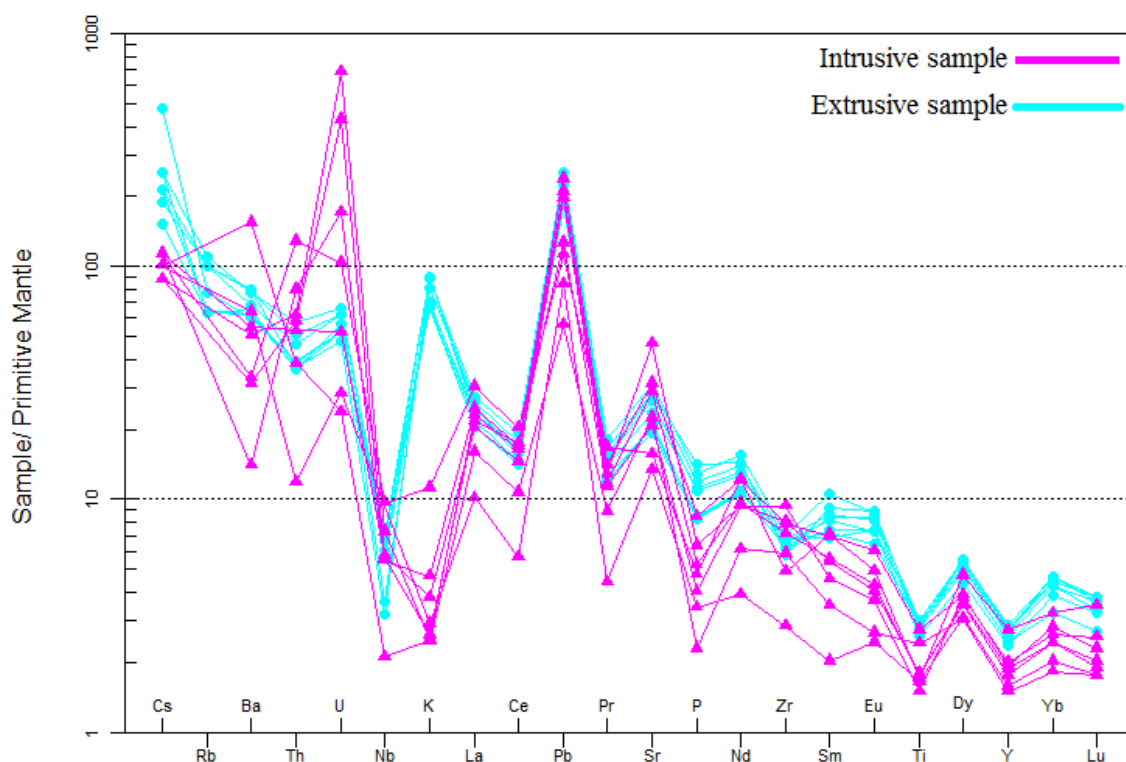
آنومالی مثبت Pb گویای متاسوماتیسم گوه گشته‌ای با سیال‌های پدیدآمده از سنگ‌کره اقیانوسی فرورو و یا آرایش ماگما با سنگ‌کره قاره‌ای است (Atherton and Ghani, 2002). در پهنه‌های فرورانش، به‌دنبال تأثیر سیال‌های پدیدآمده از تخته فرورو، نسبت LILE به HFSE افزایش می‌یابد. در حقیقت، این ناهنجاری در سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان در پی افزوده‌شدن عنصرهای LILE از تخته فرورو به درون گوه گشته‌ای بالای آن روی می‌دهد. آنومالی منفی P نشان‌دهنده رفتار سازگار سفر هنگام روند جدایش بلورین کانی‌هاست؛ زیرا این عنصر وارد کانی آپاتیت می‌شود.

عنصرهای اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های بررسی‌شده در برابر ترکیب گوشتۀ طبیعی (شکل ۸) و گوشتۀ اولیه (شکل ۹) و برپایۀ ترکیب‌های پیشنهادی Sun و McDonough (۱۹۸۹)، بهنجارسازی شده‌اند. غنی‌شدگی از LILE در کنار آنومالی منفی P، Ti، Ba و Nb چه‌بسا پیامد ذوب‌بخشی سنگ‌های پوستۀ قاره‌ای در کمان ماگمایی مرتبط با فرورانش (Kolb *et al.*, 2013) و یا ذوب گوه گشته‌ای غنی‌شده با سیال‌های متاسوماتیسم‌کننده است (Girardi *et al.*, 2012).

حضور ناهنجاری منفی Nb از ویژگی‌های پهنه‌های فرورانش و مرزهای فعال قاره‌ای و همچنین، از نشانه‌های شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی است (Wilson, 1989). آنومالی منفی Nb و Ti نشان‌دهنده ویژگی ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش (Rudnick and Gao, 2003)، مشارکت



شکل ۸- نمودار بهنجارسازی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در برابر ترکیب گوشتۀ طبیعی (Sun and McDonough, 1989) برای نمونه‌های محدوده کودگان



شکل ۹- بهنجارسازی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and Mc Donough, 1989) نمونه‌های سنگی محدوده کودگان

شدند. برپایه سرشت متفاوت آنها، پارامترهای آماری برای هر گروه از واحدهای سنگی جداگانه به دست آورده شدند.

در نمونه‌های آذرین بیرونی برداشت شده از این محدوده، ۱۲ اکسید عنصر اصلی زیر تجزیه و پردازش شدند:

SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , BaO , SO_3

میانگین، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی، و کمترین و بیشترین مقدار داده‌ها از پارامترهای آماری داده‌های خام اکسیدهای عنصرهای گوناگونی است که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. گفتنی است این مقادیر و بازه‌های عددی مرتبط با هر عنصر، با نرم‌افزار برگزیده و به دست آورده می‌شوند و سپس در نمودارهای هیستوگرام رسم و نشان داده می‌شوند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام عنصرهای اصلی آورده شده‌اند.

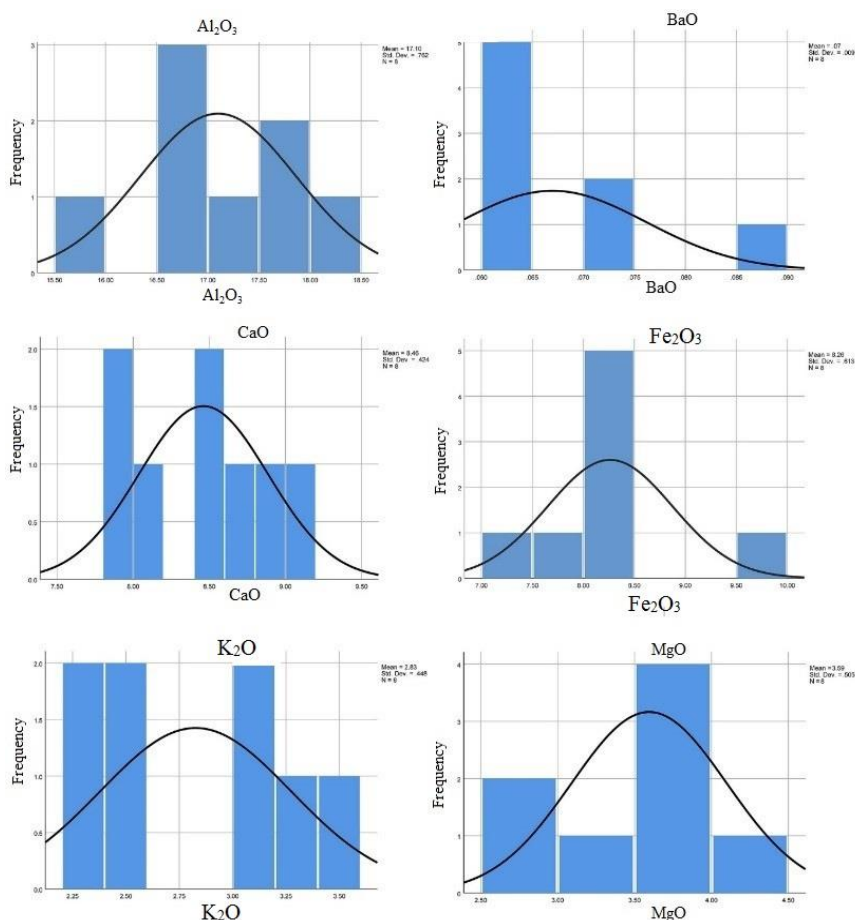
به دست آوردن پارامترهای آماری و رسم نمودارهای توزیع داده‌ها

دستیابی به پارامترهای آماری، نخستین گزینه‌ای است که به عنوان مهم‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات آماری در پیش روی داده‌پردازان است. این اطلاعات، چگونگی پراکندگی داده‌ها حول میانگین و تمایل به میانگین، میزان چولگی و کشیدگی جامعه عیار نمونه‌ها و تشابه یا تمایز آن با یک توزیع نرمال را به نمایش می‌گذارند. همه داده‌های خام به دست آمده از تجزیه اکسید عنصرهای اصلی در واحدهای سنگی آذرین درونی و بیرونی محدوده کودگان، پس از گروه‌بندی مناسب با نرم‌افزار SPSS25 بررسی آماری شدند. برای این کار، داده‌های به دست آمده از تجزیه ۸ نمونه برداشت شده از سنگ‌های آذرین بیرونی و ۷ نمونه برداشت شده از سنگ‌های آذرین درونی به کار برده

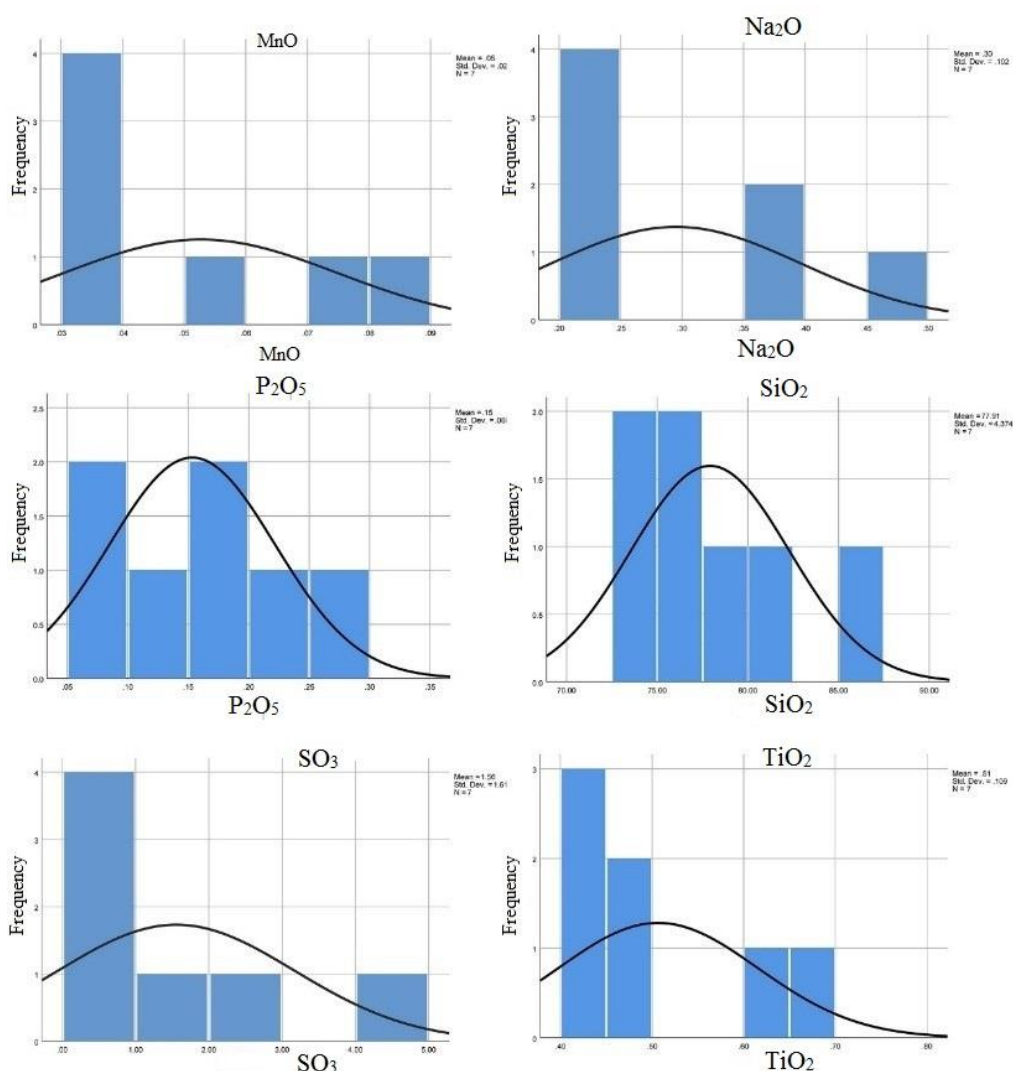
جدول ۳- پارامترهای آماری داده‌های خام اکسیدهای عنصرهای گوناگون در نمونه‌های آذرین بیرونی محدوده کودگان

Statistics		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO
N	Valid	8	8	8	8	8	
	Missing	0	0	0	0	0	
Mean		77.9147	0.5066	10.1828	2.8941	0.0527	1.1169
Std. Deviation		4.37373	0.10900	3.85648	0.81311	0.02225	0.85197
Skewness		1.168	1.154	-0.689	1.271	1.073	0.271
Kurtosis		1.178	-0.579	-1.001	0.756	-0.644	-2.063
Minimum		73.62	0.41	4.75	2.20	0.04	0.19
Maximum		86.11	0.68	14.76	4.40	0.09	2.24

Statistics		CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO
N	Valid	8	8	8		8	8
	Missing	0	0	0		0	0
Mean		5.1337	0.2950	0.1755	0.1533	1.5552	0.0617
Std. Deviation		2.78372	0.10168	0.11801	0.06847	1.61258	0.04706
Skewness		1.321	0.719	2.231	0.064	1.256	2.372
Kurtosis		3.249	-1.266	5.201	-0.796	0.653	5.816
Minimum		1.63	0.20	0.10	0.07	0.14	0.04
Maximum		10.69	0.46	0.43	0.26	4.52	0.17



شکل ۱۰- نمودارهای هیستوگرام برای داده‌های خام درصدوزنی اکسیدهای Al₂O₃, BaO, CaO, Fe₂O₃ و K₂O در نمونه‌های آذرین بیرونی محدوده کودگان



شکل ۱۱- نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام درصدوزنی اکسیدهای MnO، Na₂O، P₂O₅، SiO₂ و TiO₂ در نمونه‌های آذرین بیرونی محدوده کودگان

۴ نشان داده شده‌اند. نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام اکسیدهای عنصرهای اصلی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند.

نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام اکسیدهای عنصرها برای نمونه‌های آذرین درونی نشان می‌دهند این متغیرها در سنگ‌های آذرین درونی پراکندگی نرمال دارند و تنها در مقدار Fe_2O_3 به اندازه بسیار کم چولگی مثبت دیده می‌شود و از این‌رو، از نرمال‌سازی مقدار این اکسید در نمونه‌ها چشم‌پوشی شد.

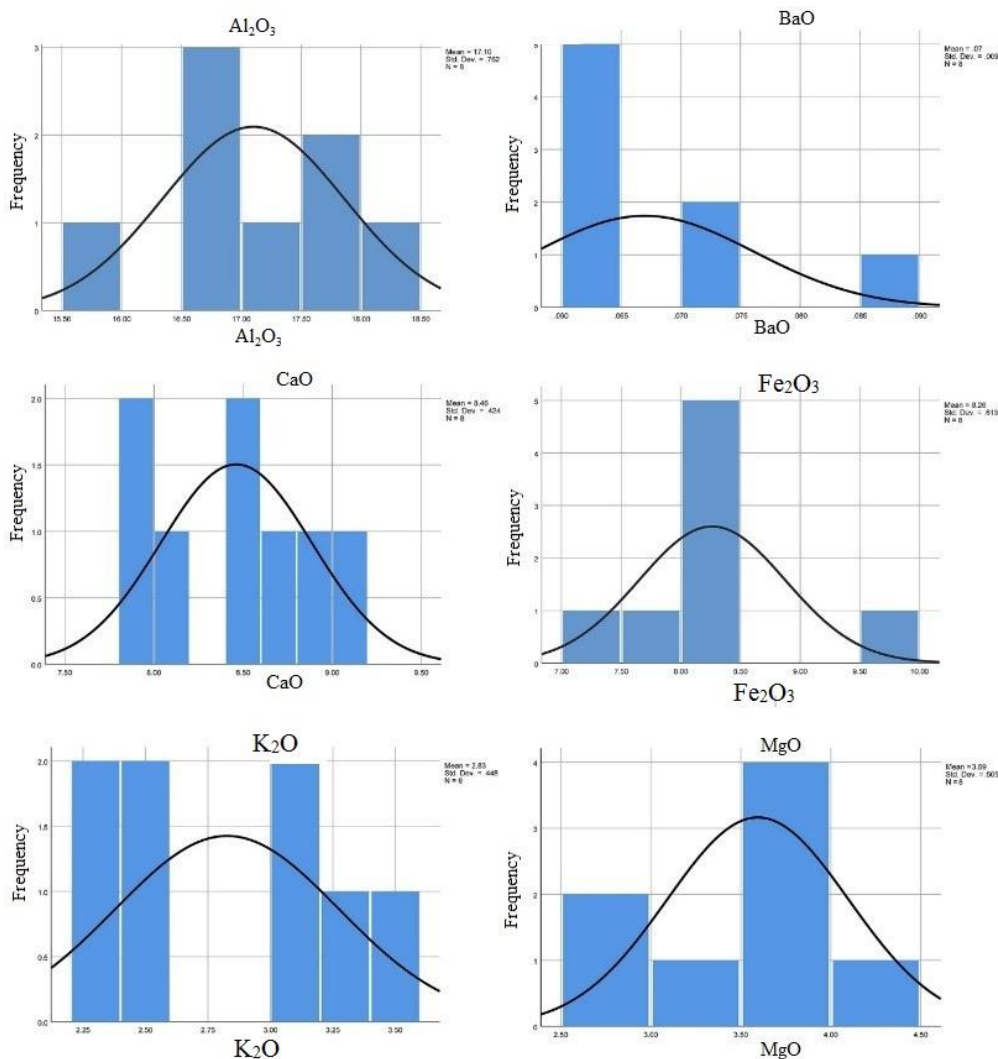
با نگاهی به نمودار هیستوگرام داده‌های خام عنصرها، دیده می‌شود اکسیدهای عنصرهای اصلی در واحدهای سنگی آذرین بیرونی پراکندگی نرمال دارند. تنها در ۲ نمونه، اکسیدهای BaO و K₂O به اندازه بسیار کم چولگی مثبت نشان می‌دهند؛ از این‌رو، از نرمال‌سازی این اکسیدها چشم‌پوشی می‌شود.

از ۸ نمونه برداشت‌شده از سنگ‌های آذرین درونی نیز مقدار اکسید عنصرهای اصلی (همانند سنگ‌های آذرین بیرونی) در ۷ نمونه تجزیه شده است و پارامترهای آماری داده‌های خام این متغیرها در جدول

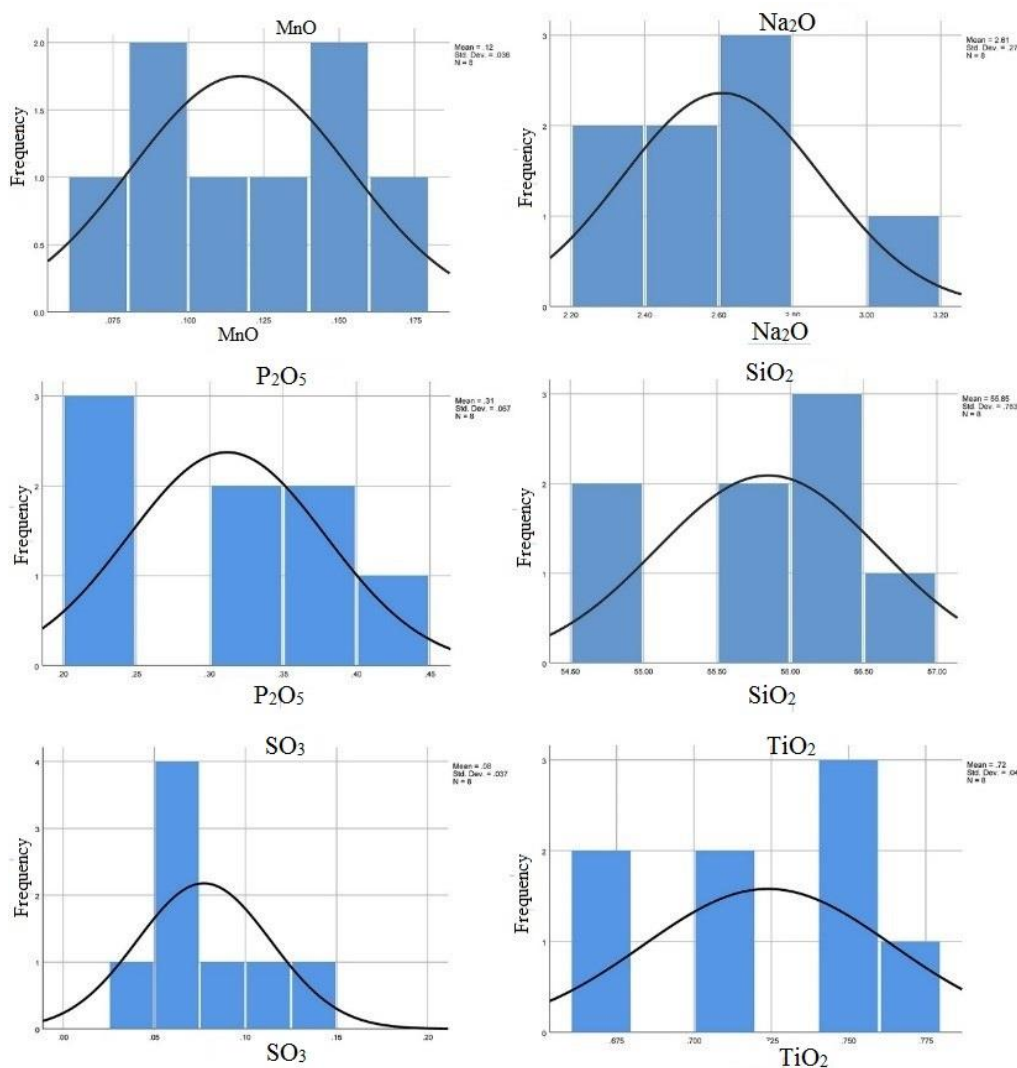
جدول ۴- پارامترهای آماری داده‌های خام اکسیدهای عنصرهای گوناگون در نمونه‌های آذرین درونی محدوده کودگان

Statistics		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO
N	Valid	7	7	7	7	7	
	Missing	0	0	0	0	0	
Mean		55.8508	0.7239	17.1018	8.2623	0.1173	3.5947
Skewness		-0.359	-0.606	0.010	1.499	-0.301	0.087
Kurtosis		-0.731	-1.385	-0.728	3.737	-1.404	-0.164
Minimum		54.79	0.66	15.94	7.50	0.06	2.89
Maximum		56.95	0.76	18.27	9.60	0.16	4.44

Statistics		CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO
N	Valid	7	7	7		7	7
	Missing	0	0	0		0	0
Mean		8.4618	2.6093	2.8267	0.3120	0.0772	0.0670
Skewness		0.075	0.667	0.255	0.285	1.039	1.700
Kurtosis		-1.496	0.456	-1.725	-0.939	-0.188	2.711
Minimum		7.93	2.27	2.31	0.24	0.04	0.06
Maximum		9.01	3.11	3.50	0.42	0.14	0.09



شکل ۱۲- نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام درصدوزنی اکسیدهای Al₂O₃, BaO, CaO, Fe₂O₃ و K₂O در نمونه‌های درونی محدوده کودگان



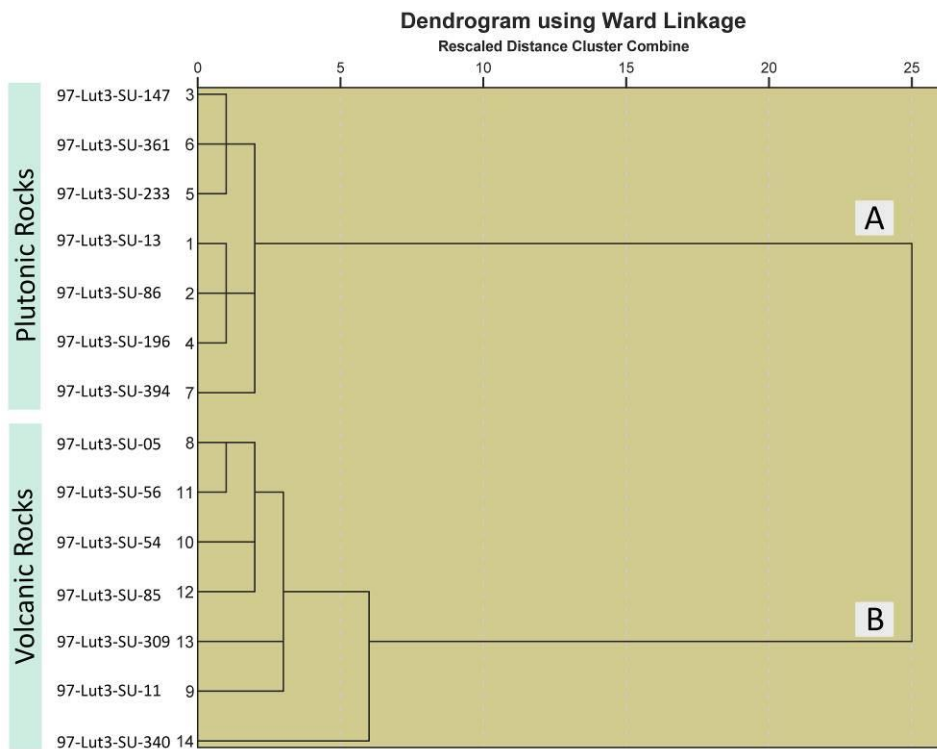
شکل ۱۳- نمودارهای هیستوگرام داده‌های خام درصدوزنی اکسیدهای MnO, Na₂O, P₂O₅, SiO₂ و TiO₂ در نمونه‌های آذرین درونی محدوده کودگان

آنالیز خوشه‌ای

آنالیز خوشه‌ای ابزاری قدرتمند برای شناخت و برگزیدن گروه‌های همگن از داده‌های خام است. این روش، برپایه‌ی شماری از الگوریتم‌های گوناگون، داده‌های خام را به ترتیب میزان ارتباط آنها با یکدیگر رده‌بندی می‌کند. نتیجه این آنالیز، نموداری است که نمودار درختی خوانده می‌شود.

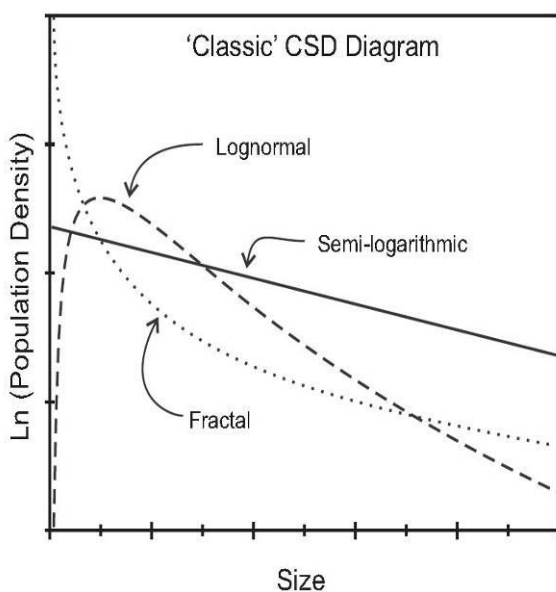
نمودار درختی به دست آمده از آنالیز نمونه‌های آذرین درونی و بیرونی محدوده

کودگان در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، نمونه‌های بررسی شده در دو دسته جداگانه A و B جای می‌گیرند. خوشه A دربردارنده نمونه‌های آذرین درونی و خوشه B دربرگیرنده نمونه‌های آذرین بیرونی است. از این رو، از یکدیگر جدا هستند. این پدیده شاید پیامد تفاوت رفتار اکسید عنصرهای اصلی در این دو گروه از واحدهای سنگی باشد که جایگیری آنها در دو گروه متفاوت را به دنبال داشته است.



شکل ۱۴- نمودار درختی عنصرهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی سیستماتیک محدوده کودگان

انواع نمودارهای CSD عبارتند از: (۱) نیمه‌لگاریتمی یا کلاسیک (۲) لگاریتم طبیعی؛ (۳) فرکتال (مستقل از مقیاس) یا ترکیبی از آنها (Higgins, 2006b) (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- انواع نمودارهای CSD (Higgins, 2006b)

روش کار (انجام آنالیز توزیع اندازه بلور)

پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری از سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه کودگان، بررسی‌های سنگ‌نگاری روی ۱۰۷ مقطع نازک انجام شد. برای شناسایی تاریخچه تبلور، میزان رشد، زمان توقف ماگمای سازنده و تحولات ماگمایی توده آذرین درونی، ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز در ۱۰ نمونه با سنگ میزبان آندزیت و بازالت اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده که دربردارنده درازا، پهنا و مساحت بلورهای پلاژیوکلاز هستند به نرم‌افزار 1.3 CSD correction انتقال یافتند. با به‌کارگیری این نرم‌افزار نمودارهای سه‌بعدی لازم برای تعبیر و تفسیر داده‌های CSD تهیه شدند. برای تبدیل داده‌های دوجانبی به سه‌بعدی از نسبت ابعاد بلور، بعد کوتاه (S)، بعد متوسط (L)، بعد بلند (I) و فاکتور گردشگری (بیضی = ۱، مکعبی = ۰) بهره گرفته می‌شود.

برای بررسی توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز از سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی کودکان به روش XRF و ICP-MS برای شناخت فرایندهای مؤثر در پیدایش این سنگ‌ها به کار برده شدند.

توزیع اندازه بلورها (CSD)
 نتیجه آنالیز توزیع اندازه بلورها (CSD) به صورت نمودارهایی نمایش داده می‌شود که در آنها شمار بلورها در یک واحد حجمی (n)، به عنوان تابعی از اندازه بلور (L) هستند. برای به دست آوردن شیب و محل برخورد از روند خطی تابع ریشه دوم $\ln(n)$ در برابر L (طول) بهره گرفته می‌شود. برای به دست آوردن سهم اشغال شده توسط کانی‌ها، فرمول سوم به کار برده می‌شود:

داده‌های به دست آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌های آذرین بیرونی و درونی کودکان به روش XRF و ICP-MS برای شناخت فرایندهای مؤثر در پیدایش این سنگ‌ها به کار برده شدند.

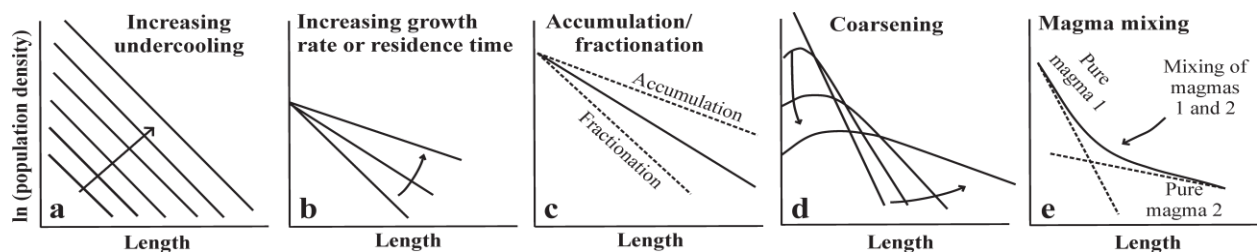
توزیع اندازه بلورها (CSD)

نتیجه آنالیز توزیع اندازه بلورها (CSD) به صورت نمودارهایی نمایش داده می‌شود که در آنها شمار بلورها در یک واحد حجمی (n)، به عنوان تابعی از اندازه بلور (L) هستند. برای به دست آوردن شیب و محل برخورد از روند خطی تابع ریشه دوم $\ln(n)$ در برابر L (طول) بهره گرفته می‌شود. برای به دست آوردن سهم اشغال شده توسط کانی‌ها، فرمول سوم به کار برده می‌شود:

$$SLOP = -1/Gt$$

$$Intercept = I/G$$

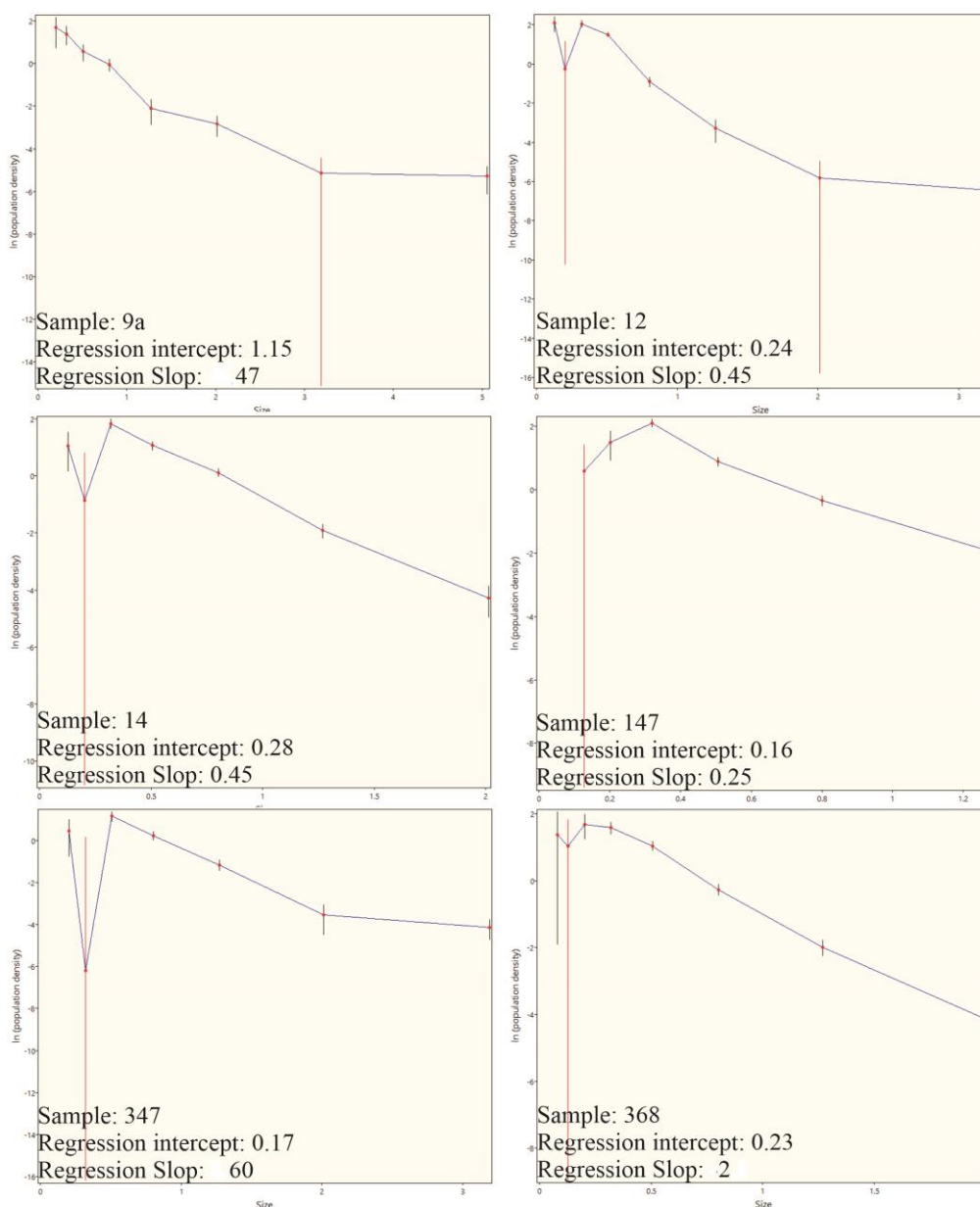
$$V_1 = 6\sigma n^0_1 C_1^4$$



شکل ۱۶- فرایندهای مؤثر در شکل نمودارهای CSD برگرفته از Higgins (۲۰۰۶b) و تغییراتی از Vient و Higgins (۲۰۱۰)

فرایند درشت‌شدگی بافتی و تراکم پدیدآمده در پی تبلور دوباره باشد (Higgins, 2002b) (شکل ۱۷).
 درشت‌شدگی بافتی فرایندی است که بلورهای کوچک حل می‌شوند و همزمان بلورهای درشت‌تر رشد می‌کنند؛ از این رو، انرژی سطح کاهش می‌یابد (Voorhees, 1992).
 بر پایه ویژگی‌های سنگ‌نگاری، زمین‌شیمیایی و توزیع اندازه بلور در نمونه‌های بررسی شده، فرایند ورود و حضور چندین ماگمای مختلف در آشیانه ماگمایی و آمیختگی، شکستگی و خمیدگی در نمودارهای CSD را به دنبال دارند.

درباره نمونه‌های بررسی شده، همه نمودارهای کلاسیک تغییرات اندازه بلورها در برابر چگالی تجمعی شکستگی و تقعر به سوی بالا نشان می‌دهند (شکل ۱۶).
 پیچیدگی یا خمیدگی در نمودارهای CSD شاید پیامد فرایندهایی مانند انباشتگی یا کاهش شمار بلورها (Marsh, 1998)، تراکم (Boorman et al., 2004)، آمیختگی دو سری جمعیت بلوری یا چندین ماگمای مختلف (Higgins, 1996; Jerram et al., 2003)، درشت‌شدگی بافتی (Higgins and Roberge, 2003) و یا همزمانی



شکل ۱۷- نمودارهای لگاریتم طبیعی اندازه‌گیری شده برای بلورهای پلاژیوکلاز در محدوده کودگان

برپایه اندازه‌های متفاوت در هر نسل بلوری مشخص می‌شود هر نسل دچار فشارهای متفاوت بوده و از این‌رو، در ژرفای متفاوتی پدید آمده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۷ دیده می‌شود، CSD در کوچک‌ترین اندازه بلورها، بیشترین مقدار را دارد و میزان آن با افزایش اندازه بلورها کاهش می‌یابد. در سیستم‌های باز که با ورود مکرر ماگمای جدید به درون مخزن تایید شده است، شیب نمودارها منفی است

به باور Higgins (۲۰۰۲a)، افزوده شدن دو نوع CSD صاف و مستقیم با شیب و عرض از مبدأهای متفاوت، یک CSD با شیب تند برای بلورهای با اندازه کوچک و با شیب آرام برای بلورهای بزرگ‌تر پدید می‌آورد. از آنجایی که ترکیب این دو CSD خطی لگاریتمی است، محور قائم یک CSD خمیده با دو بخش خطی پدید می‌آورد. حضور متعدد ماگما در آشیانه‌های ماگمایی، خمیدگی CSD را به دنبال دارد.

جدول ۵- نتایج محاسبه‌های انجام شده برای بلورهای پلاژیوکلاز

Sample number	Slop	Intercept	Time	G mms- 1
9A	0.47	1.15	1489	10^{-10}
12	0.45	0.24	1425	10^{-10}
14	0.45	0.28	1425	10^{-10}
147	0.25	0.16	792	10^{-10}
347	0.6	0.17	1901	10^{-10}
368	0.2	0.23	633	10^{-10}

خاستگاه

هم‌روند بودن نمونه‌های یک مجموعه روی نمودار، احتمال وابستگی خویشاوندی میان ماگماها و روند تحولی ماگما را نشان می‌دهد. پیوستگی این روند نشان می‌دهد نمونه‌های یادشده از یک ماگمای مشترک جدایش یافته‌اند و یا پیامد ذوب بخشی خاستگاهی یکسان هستند. از سوی دیگر، نبود پیوستگی نقاط و قطع شدگی روندها روی نمودار، چه بسا نشانه نبود وابستگی خویشاوندی میان ماگماها در یک مجموعه است.

نمودارهای تغییرات اکسیدهای عنصرهای اصلی و کمیاب در برابر SiO_2 که برای نمونه‌های آذرین بیرونی و درونی محدوده کودگان (شکل ۱۸) رسم شده‌اند، نبود پیوستگی در نمونه‌های یاد شده را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که آنها را در دو دسته کاملاً جدا جای می‌دهند. نبود پیوستگی و روندهای متفاوت در نمودارهای هارکر نشان‌دهنده وجود دو خاستگاه متفاوت برای سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی این منطقه هستند.

برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری، زمین‌شیمیایی و توزیع اندازه بلور، این نمونه‌ها از خاستگاه گوشته‌ای و پوسته آغشته شده به گوشته بالایی پدید آمده باشند.

برپایه یافته‌های Yousefzadeh و همکاران (۲۰۱۹)، کانسارهای در محدوده کودگان از نوع کانسارهای IOCG ذخایر سولفیدی با خاستگاه گرمابی هستند و کانی‌سازی‌های گوناگون برشی، رگه و رگچه‌ای، افشان و

(Marsh, 1998). رویداد شیب منفی نشانه افزایش رشد همراه با کاهش هسته‌بندی است و افزایش اندازه و کاهش چگالی تجمعی بلورها منجر را به دنبال دارد. از آنجایی که پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی دیده شده در این نمونه‌هاست، برای به دست آوردن سهم اشغال شده با بلورهای پلاژیوکلاز در مقطع‌ها، فرمول $V_1=6\sigma n^0_1 C_1^4$ به کار برده می‌شود. در این فرمول، V سهم حجمی، n میزان هسته‌بندی و C میانگین درازای بلورها هستند (Marsh, 1988). از این رو، در نمونه‌های گوناگون، سهم حجمی بلورهای پلاژیوکلاز از $5/40$ تا $65/02$ متغیر است. زمان رشد و سرعت هسته‌بندی رابطه مستقیمی با درصد حجمی هر بلور دارد. هرچه سرعت هسته‌بندی و زمان رشد بلور افزایش یابد، بلورها درصد بیشتری از حجم سنگ را فرا می‌گیرند.

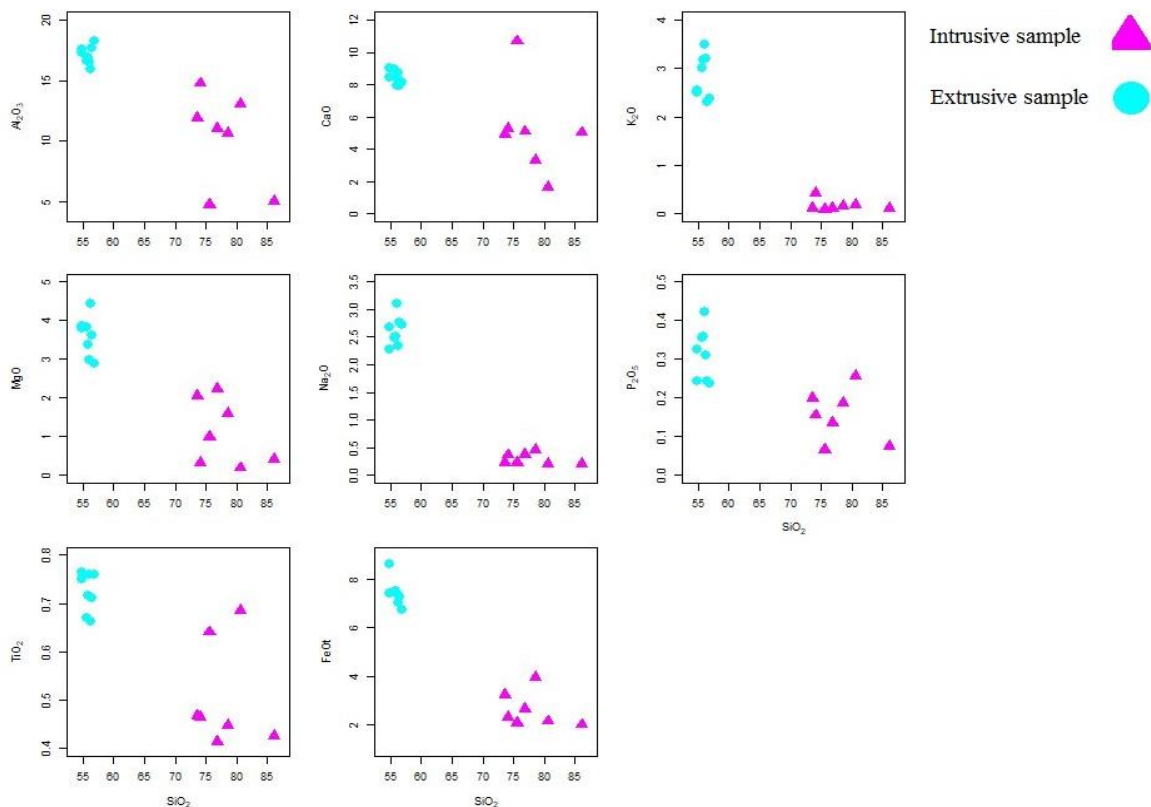
به پیشنهاد Marsh (۱۹۸۸) برای به دست آوردن متوسط زمان رشد بلورها، معادله زیر به کار برده می‌شود:

$$Tr = (-1/G * m) / 31536000$$

در این معادله Tr زمان توقف (سال)، G میزان رشد بلور، m شیب منحنی CSD (لگاریتم خطی) و 31536000 ضریب تبدیل ثانیه به سال است. انتخاب میزان رشد مناسب، فاکتور مهمی در به دست آوردن زمان توقف است. به پیشنهاد Cashman (۱۹۹۳)، این میزان برابر با 10^{-9} mm/s و 10^{-10} mm/s دانسته می‌شود. در بررسی CSD محدوده کودگان از میزان رشد 10^{-10} mm/s برای انجام محاسبه‌ها بهره گرفته شد. اگر میزان هسته‌بندی و رشد برابر باشند، CSD افقی و بدون شیب است و هرچه اختلاف این دو بیشتر باشد، میزان شیب نیز بیشتر خواهد شد. برپایه محاسبه‌های انجام شده روی نمونه‌های محدوده کودگان، زمان توقف ماگما در آشیانه ماگمایی و تبلور بلورهای پلاژیوکلاز، برپایه شیب به دست آمده از نمودارها، برابر با ۷۹ تا ۱۱۴۱ سال به دست آمده است (جدول ۵).

برپایه پژوهش Niroumand و Omaraei (۲۰۱۴)، سنگ‌های محدوده کودگان از نوع کلسیمی قلیایی و متآلومینوس است و از دیدگاه پهنه زمین‌ساختی، الگوی ماگماتیسم در ارتباط با کمان مرز قاره‌ای را نشان می‌دهند.

توده‌ای در آنها دیده می‌شوند. به باور Karimpour و همکاران (۲۰۱۱)، این کانسارها از دیدگاه زمین‌ساختی در حوضه‌های کششی پشت کمر بند پهنه فرورانش مرز قاره‌ای، ریفت‌های درون قاره، نقاط داغ درون قاره و حوضه‌های کششی پس‌برخوردی پدید می‌آیند.



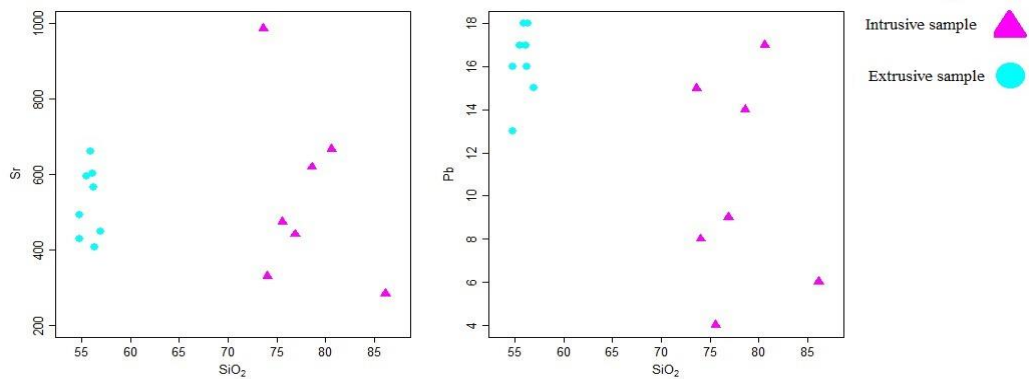
شکل ۱۸- نمودار تغییرات درصدوزنی SiO_2 در برابر اکسیدهای اصلی

سازنده است (Jung *et al.*, 2005). این نسبت‌ها در نمونه‌های محدوده کودگان به ترتیب برابر با $۱/۳ - ۴/۷۵$ ، $۰/۱ - ۰/۳۶$ و $۱۴/۱ - ۳۴/۵$ هستند. همه این نسبت‌ها چه‌بسا نشان‌دهنده درگیر بودن پوسته و گوشته در پیدایش ماگمای مادر واحدهای آذرین بیرونی و درونی پدیدآمده در محدوده کودگان باشد.

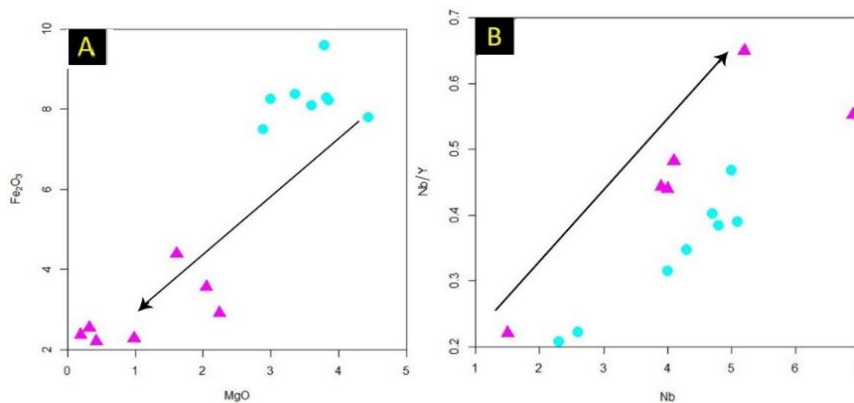
در نمودار MgO در برابر Fe_2O_3 و نیز نمودار Nb در برابر Nb/Y ، روند نمونه‌های بررسی‌شده در محدوده کودگان (شکل ۲۰)، با رویداد فرایند آمیختگی ماگمایی همخوانی دارد.

روند کاهش MgO و MnO در برابر SiO_2 و کاهش Co و Cr با افزایش SiO_2 روند عادی جدایش بلورین ماگمایی، و نیز نشان‌دهنده آرایش یا آمیختگی ماگمایی است (Kumar and Rino, 2006)، همبستگی ضعیف Rb و Sr با SiO_2 و پراکندگی بالای آنها چه‌بسا پیامد واکنش با ترکیب‌های پوسته‌ای است (Kumar and Rino, 2006) (شکل ۱۹).

نسبت‌های کم Ce/Pb (کمتر از ۵) و Nb/La (کمتر از ۷) و همچنین، نسبت بالای Sr/Ce (بیشتر از ۵) نشانه درگیر بودن پوسته و گوشته در پیدایش ماگمای



شکل ۱۹- روند تغییرات درصدوزنی SiO_2 در برابر Rb و Sr (برپایه ppm) برای نمونه‌های آذرین بیرونی و درونی کودگان



شکل ۲۰- نمودار درصدوزنی MgO در برابر Fe_2O_3 (Zhou et al., 1994)؛ (B) نمودار Nb در برابر (ppm) Nb/Y (Treuil and Joron, 1975)

برداشت

محدوده کودگان دربردارنده سنگ‌های آذرین بیرونی، نیمه ژرف با ترکیب آندزیت، دیوریت و بازالت و واحدهای سنگی آذرین درونی با ترکیب گرانیت تا گرانودیوریت به سن ائوسن است.

واحد آندزیتی که فراوان‌ترین ترکیب در این محدوده را دارد، بازه ترکیبی پیروکسن آندزیت و هورنبلند آندزیت نشان می‌دهد. همچنین، ویژگی‌های مهمی مانند بافت غربالی، زونینگ و پلاژیوکلاز دونسلی، شکستگی و خمیدگی در نمودارهای CSD و روند تغییرات Nb در برابر Nb/Y در بیشتر نمونه‌های بررسی شده دیده شده‌اند.

در نمونه‌های بازالتی برداشت‌شده از این محدوده که فراوانی کمی نیز داشته‌اند، پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی دیده شده است. همانند نمونه‌های آندزیتی، در بازالت‌ها نیز

بافت غربالی و پلاژیوکلاز دونسلی دیده می‌شود. همچنین، در نمودارهای CSD برای نمونه‌های بازالت نیز شکستگی و خمیدگی در پی تفاوت اندازه بلورها دیده می‌شوند.

ویژگی‌های سنگ‌نگاری مانند بافت غربالی، زونینگ و پلاژیوکلاز دونسلی، نشانه‌ای از رویداد شرایط نامتعادل در آشیانه ماگمایی و نشان‌دهنده رخداد فرایند آمیختگی ماگمایی در نمونه‌ها هستند. حضور بلورهای کوچک پلاژیوکلاز در درون پلاژیوکلازهای بزرگ‌تر چه بسا نشانه آشفستگی در آشیانه ماگمایی و حضور دو نسل گوناگون پلاژیوکلاز در آشیانه ماگمایی است که از دو ماگما در فاصله زمانی متفاوت متبلور شده‌اند.

نبود پیوستگی در روند تغییرات اکسیدهای عنصرهای اصلی و عنصرهای کمیاب در برابر SiO_2 و نمودار خوشه‌ای در نمونه‌های آذرین بیرونی و

در نمونه‌هاست.

زمان توقف ماگما و تبلور بلورهای پلاژیوکلاز بیشتر، نزدیک به ۱۰۰۰ سال بوده است که نشان‌دهنده ژرفای کم جایگیری این توده در محدوده اکتشافی کودگان بوده است.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی مادی و معنوی شرکت طرح و توسعه لاله‌گستر نیایش به انجام رسیده است. از این‌رو، از مدیریت گرامی شرکت طرح و توسعه لاله‌گستر نیایش برای فراهم‌آوردن تسهیلات و امکانات لازم در راستای انجام این پژوهش و همچنین، در اختیار گذاشتن اطلاعات سپاس‌گزاری می‌شود.

درونی این محدوده، نشان‌دهنده پیدایش نمونه‌ها از دو خاستگاه متفاوت است.

روندهای دیده‌شده در نمودارهای Nb در برابر Nb/Y و MgO در برابر Fe₂O₃ نیز درستی یافته‌های به‌دست‌آمده از بخش سنگ‌نگاری و توزیع اندازه بلور را نشان می‌دهند و نشانه حضور دو یا چند ماگما در آشیانه ماگمایی و رویداد فرایند آمیختگی ماگمایی در هنگام پیدایش ماگما هستند.

بررسی توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه‌ها و وجود شکستگی و خمیدگی در نمودارهای نیمه‌لگاریتمی نیز نشان‌دهنده ورود ماگمای جدید به آشیانه ماگمایی، برهم‌خوردن تعادل دمایی آشیانه ماگمایی، تبلور بلورهای جدید با اندازه‌های متفاوت و یا نشانه دیگری از رویداد فرایند آمیختگی ماگمایی

منابع

- Aghanabati, A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M. (2011) Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology* 1(3): 1-14.
- Atherton, M. P. and Ghani, A. A. (2002) Slab breakoff: a model for Caledonian, Late Granite syn-collisional magmatism in the morphotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland. *Lithos* 62: 65-85.
- Berberian, M. and King, G. (1981) Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18: 210-265.
- Bolourian, G. (2010) Descriptions of the geological map of 1: 100000 Koodakan. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran.
- Boorman, S., Boudreaux, A. and Kruger, F. J. (2004) The Lower Zone-Critical Zone Transition of the Bushveld Complex: A Quantitative Textural Study. *Journal of Petrology* 45(6): 1209-1235.
- Cashman, K. V. (1993) Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113: 126-142.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen and Unwin, London, UK.
- Eftekharneshad, J. (1981) Tectonic division of Iran with respect to sedimentary basins. *Journal of Iranian Petroleum Society* 82: 19-28 (in Persian).
- Gagnevin, D., Waight T. E., Daly, J. S., Poli, G. and Conticelli, S. (2007) Insights into magmatic evolution and recharge history in Capraia Volcano (Italy) from chemical and isotopic zoning in plagioclase phenocrysts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 168(1-4): 28-54.
- Girardi, V. A. V., Correa da Costa, P. C. and Teixeira, W. (2012) Petrology and SrNd characteristics of

- the Nova Lacerda dike swarm, SW Amazonian Craton: new insights regarding its subcontinental mantle source and Mesoproterozoic geodynamics. *International Geology Review* 54: 165–182.
- Hessami, K., Nilforoushan, F. and Talbot, C. J. (2006) Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements. *Journal of Geological Society* 163: 143–148.
- Higgins, M. D. (1996) Crystal size distributions and other quantitative textural measurements in lavas and tuff from Egmont volcano (Mt. Taranaki), New Zealand. *Bulletin of Volcanology* 58(2-3): 194-204.
- Higgins, M. D. (2000) Measurement of crystal size distributions. *American Mineralogist* 85(9): 1105-1116.
- Higgins, M. D. (2002a) Closure in crystal size distributions (CSD), verification of CSD calculations, and the significance of CSD fans. *American Mineralogist* 87(1): 171-175.
- Higgins, M. D. (2002b) A crystal size-distribution study of the Ki-glapait layered mafic intrusion, Labrador, Canada: evidence for textural coarsening. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 314-330.
- Higgins, M. D. (2006a) Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Higgins, M. D. (2006b). Use of appropriate diagrams to determine if crystal size distributions (CSD) are dominantly semi-logarithmic, lognormal or fractal (scale invariant). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154: 8-16.
- Higgins, M. D. and Roberge, J. (2003) Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Montserrat: evidence for dynamic crystallization/textural coarsening cycles. *Journal of Petrology* 44: 1401-1411.
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E. and Roberts, D. (2012) Geochemistry of amphibolite facies volcanics of the Storen Nappe in extensions southwest and west from the Trondheim region, western Gneiss Region, Norway: A key to correlations and paleotectonic settings. *American Journal of Science* 312: 357-416.
- Holton, T., Jamtveit, B. and Meakin, P. (2000) Noise and oscillatory zoning of minerals. *Geochimica Acta* 64: 1893-1904.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian J Earth Science* 8: 523-548.
- Jerram, D. A. and Higgins, M. D. (2007) 3D analysis of rock textures: quantifying igneous microstructures. *Elements* 3(4): 239-245.
- Jerram, D. A. and Cheadle, M. J. (2000) On the cluster analysis of grains and crystals in rocks. *American Mineralogist* 85(1): 47-67.
- Jerram, D. A., Cheadle, M. C. and Philpotts, A. R. (2003) Quantifying the building blocks of igneous rocks: are clustered crystal frameworks the foundation? *Journal of Petrology* 44: 2033-2051.
- Jung, S., Pfander, J. A., Brugmann, G. and Stracke, A. (2005) Sources of primitive alkaline volcanic rocks from the Central European Volcanic Province (Rhön, Germany) inferred from Hf, Os and Pb isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150: 546-559.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekzadeh, A. (2011) Review of age Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia* 1(1): 19–54.
- Kolb, M., Von Quadt, A., Peytcheva, I., Heinrich, C. A., Fowler, S. J. and Cvetković, V. (2013) Adakite-like and normal arc magmas: distinct fractionation paths in the East Serbian Segment of the Balkan–Carpathian Arc. *Journal of Petrology* 54: 421-451.
- Kumar, S. and Rino, V. (2006) Mineralogy and geochemistry of microgranular enclaves in Palaeoproterozoic Malanjhand granitoids, central India: Evidence of magma mixing, mingling, and

- chemical equilibration. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 152(5): 591-609.
- Kuşcu, G. G. and Floyd, P. A. (2001) Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcanics. *Lithos* 56(2-3): 207-230.
- Marsh, B. D. (1988) Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization theory. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99: 277-291.
- Marsh, B. D. (1998) On the interpretation of crystal size distributions in magmatic systems. *Journal of Petrology* 39(4): 553-599.
- Middlemost, E. A. K. (1994) Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth Science- Reviews* 37: 215-224.
- Nagudi, N., Koberl, C. and Kurat, G. (2003) Petrography and Geochemistry of the sigo granite, Uganda and implications for origin. *Journal of African earth Sciences* 36(1): 1-14.
- Nowroozi, A. A. (1976) Seismotectonic provinces of Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America* 66: 1249-1276.
- Omaraei, S. and Niroumand, S. (2014) Geochemistry, mineralogy, alteration and fluid inclusion studies in copper gold vein system Koodakan prospecting area, South Khorasan province. *Journal of Advanced Applied Geology* 19(6): 34-47 (in Persian with English abstract).
- Pang, H., Chen, J., Pang, X., Liu, L., Liu, K. and Xiang, C. (2013) Key factors controlling hydrocarbon accumulations in Ordovician carbonate reservoirs in the Tazhong area, Tarim basin, western China. *Marine and Petroleum Geology* 43: 88-101.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Randolph, A. D. and Larson, M. A. (1971) *Theory of Particulate Processes*. New York, Academic Press, US.
- Renzulli, A. and Santi, P. (1997) Sub-volcanic crystallization at Stromboli (Aeolian Islands, southern Italy) preceding the Sciara del Fuoco sector collapse: evidence from monzonite lithic suite. *Bulletin of Volcanology* 59(1): 10-20.
- Rudnick, R. and Gao, S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treatise Geochem* 3. Elsevier 3: 1-64.
- Ruprecht, P. and Wörner, G. (2014) Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andahua monogenetic cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 165(3-4): 142-162.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. A. (2010) Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos* 117: 209-228
- Stamatelopoulou-Seymour, K., Vlassopoulos, D., Pearce, T. H. and Rice, C. (1990) The record of magma chamber processes in plagioclase phenocrysts at Thera Volcano, Aegean Volcanic Arc, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104: 73-84.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) 42: 313-345. Geological Society of London, London, UK.
- Swain, C. J. and Kirby, J. F. (2008) An accuracy assessment of the fan wavelet coherence method for elastic thickness estimation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(3): Q03022.
- Treuil, M. and Joron, J. L. (1975) Utilisation des elements hygromag- matophiles pour la simplification de la modelisation quantitative des processus magmatiques. Exemples de l' Afar et de la Dorsale Medioatlantique *Rend. Society Italy Mineralogy and Petrology* 31: 125-174.
- Tsuchiyama, A. 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt system diopside-albite-anorthite, and

- origin of dusty plagioclase in an- desites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 89: 1-16.
- Voorhees, P. W. (1992) Ostwald ripening of two-phase mixture. *Annual Review Materials Science* 22: 197-215.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman, London, UK.
- Yousefzadeh, M., Rahmani, A. and Mohammad, S. S. (2019) Petrology and tectonomagmatic setting of volcanic and subvolcanic rocks in the east of Khouf (Southwest of Birjand). *Iranian Journal of Petrology* 37: 1-22 (in Persian).
- Zhou, M. F., Robinson, P. T. and Bai, W. J. (1994) Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle. *Mineralium Deposita* 29: 98-101.