

دما-فشارسنجی، زمین‌شیمی و جایگاه زمین ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژن (شمال غرب سربیشه، شرق ایران)

سید سعید محمدی^{۱*}، سون لین چانگ^۳،^۴، مریم عرب دوحصاران^۱، ملیحه نخعی^۵

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه پژوهشی علوم زمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- انستیتو علوم زمین، آکادمیا سینیکا، تایپه، تایوان

۴- گروه علوم زمین، دانشگاه ملی تایوان، تایپه، تایوان

۵- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران، شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۲/۲۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۴/۶)

چکیده: پیرامون روستای بیژن، در ۲۵ کیلومتری شمال غرب سربیشه، سنگ‌های آتشفشانی وابسته به ترشیری با ترکیب آندزیت، تراکی داسیت و داسیت همراه سنگ‌های آذرآواری شامل توف و برش رخنمون دارند. کانی‌های تشکیل دهنده آندزیت شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و در داسیت‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، آمفیبول و بیوتیت هستند. بر اساس نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی، گستره ترکیبی پلاژیوکلازها در آندزیت بین Ab_{31} ، Ab_{69} تا Ab_{49} ، An_{51} متغیر است و از نوع لابرادوریت هستند. کلینوپیروکسن‌ها ترکیب اوژیت مایل به دیوپسید و ارتوپیروکسن‌ها ترکیب انستاتیت دارند. دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی، به ترتیب حدود ۱۲۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار زمان تبلور آن‌ها، به ترتیب ۲ تا ۵ کیلو بار و کمتر از ۲ کیلو بار تعیین گردید. این سنگ‌ها دارای ماهیت آهکی قلیایی پتاسیم بالا هستند و غنی‌شدگی از عناصر سنگ دوست درشت یون (LILE)، ناهنجاری منفی P ، Ti ، Nb و ناهنجاری منفی ضعیف Eu نشان می‌دهند که از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی قلیایی وابسته به فرورانش است. با بهره‌گیری از نمودارهای تفکیک محیط زمین‌ساختی بر اساس عناصر کمیاب، مشخص گردید که سنگ‌های بررسی شده، وابسته به حاشیه قاره‌ای فعال هستند. بر پایه نسبت Dy/Yb برای سنگ‌های آندزیتی منطقه بیژن (۶۲/۹۱-۱/۱)، خاستگاه گوشته‌ای آن‌ها، در قلمرو بین اسپینل و گارنت پریدوتیت با درجه ذوب بخشی حدود ۷ تا ۱۰ درصد قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: آندزیت؛ دما-فشارسنجی؛ اسپینل/رزولیت؛ بیژن؛ حاشیه فعال قاره‌ای؛ لوت.

مقدمه

بیرجند-مهدی آباد-اسفزار-بشگر-بیژن و یا بیرجند-مود-حسین آباد گواهی-بشگر-بیژن است. از دیدگاه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران، این منطقه در بخش شمال شرقی قطعه لوت و در مجاورت زمین درز سیستان [۲] قرار می‌گیرد. فعالیت ماگمایی در قطعه لوت از ژوراسیک میانی (۱۶۲-۱۶۵ میلیون سال پیش) با نفوذ توده‌های سرخ‌کوه و شاه‌کوه شروع

منطقه مورد بررسی در ۲۵ کیلومتری شمال غرب سربیشه در استان خراسان جنوبی بین طول‌های جغرافیایی $42^{\circ} 59'$ تا $48^{\circ} 59'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $45^{\circ} 32'$ تا $49^{\circ} 32'$ شمالی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه [۱] قرار دارد. راه دسترسی به منطقه مورد بررسی از جاده آسفالت

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۱۰۲۶۶۸۸، پست الکترونیکی: ssmohammadi@birjand.ac.ir

شده و در ترشیری به ویژه در ائوسن میانی به اوج خود رسیده است [۳]. این قطعه شامل پی‌سنگ ژوراسیک پیشین، سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و چند نسل سنگ‌های نفوذی-آتشفشانی مزوزوئیک و سنوزوئیک است [۲، ۴، ۵]. بخش عمده رخنمون‌های سنگی قطعه لوت را سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی تشکیل می‌دهند [۵]. پهنه جوش خورده سیستان بقایایی از یک سنگ‌کره اقیانوسی هستند که بین قطعه افغان و پهنه لوت وجود داشته است. این باریکه اقیانوسی به عنوان یکی از سرشاخه‌های نئوتتیس مطرح بوده که در ۸۶ میلیون سال پیش در اثر نظام زمین‌ساختی فشارشی شروع به بسته شدن نموده است و از ۵۶ میلیون سال پیش این نظام زمین‌ساختی فشارشی به نظام کششی تغییر یافته که سرانجام منجر به فعالیت آتشفشانی عظیم در شرق ایران شده است [۲]. سن فعالیت ماگمایی شرق ایران که بیشتر به صورت گدازه و سنگ‌های آذرآواری رخنمون دارند، ائوسن تا الیگوسن تعیین شده است [۶]. در شرق بیرجند، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی وابسته به ترشیری با ترکیب آندزیت بازالتی، آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت به همراه سنگ‌های آذرآواری شامل توف، برش و آگلومرا رخنمون دارند. تاکنون، پژوهش‌هایی پیرامون فعالیت ماگمایی ترشیری مناطق شمال و شمال غرب سربیشه انجام شده‌اند [۷-۱۰]. بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده، گدازه‌های حدفصل بیرجند-سربیشه دارای ماهیت آهکی قلیایی هستند و از نظر جایگاه زمین-ساختی وابسته به محیط فرورانش و حاشیه فعال قاره معرفی شده‌اند. دما-فشارسنجی آذرین می‌تواند برای اثبات حقایق مهمی درباره چگونگی انتقال ماگما استفاده شود، زیرا مدل‌های انتقال، اطلاعات جامعی درمورد عمق تشکیل اتاق ماگمایی ارائه می‌نماید. دو کانی پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن اغلب برای دما-فشارسنجی استفاده می‌شوند، بطوری که روش‌های محاسبه دما و فشار بر پایه این کانی‌ها، به مرور گسترش یافته و با موفقیت برای بررسی اتاق ماگمایی در محیط‌های زمین‌ساختی مختلف، بکار رفته‌اند [۱۱-۱۶]. پیروکسن از کانی‌های سنگ‌ساز است که ترکیب شیمیایی آن در سنگ‌های آتشفشانی، ماهیت گدازه میزبان را نشان داده و با بررسی شیمی این کانی، می‌توان سری

ماگمایی، محیط زمین‌ساختی و خاستگاه توده آذرین را تعیین نمود. افزون بر این، با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، می‌توان دما و فشار تشکیل سنگ را بررسی کرد [۱۷-۲۰]. در این پژوهش، از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها برای شناسایی شرایط دما و فشار تبلور گدازه‌های آندزیتی و همچنین از ترکیب شیمیایی سنگ کل برای بررسی ویژگی‌های زمین شیمیایی، خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیراثم استفاده شد. نتایج این پژوهش می‌تواند برای شناسایی فعالیت‌های ماگمایی قطعه لوت مفید باشد.

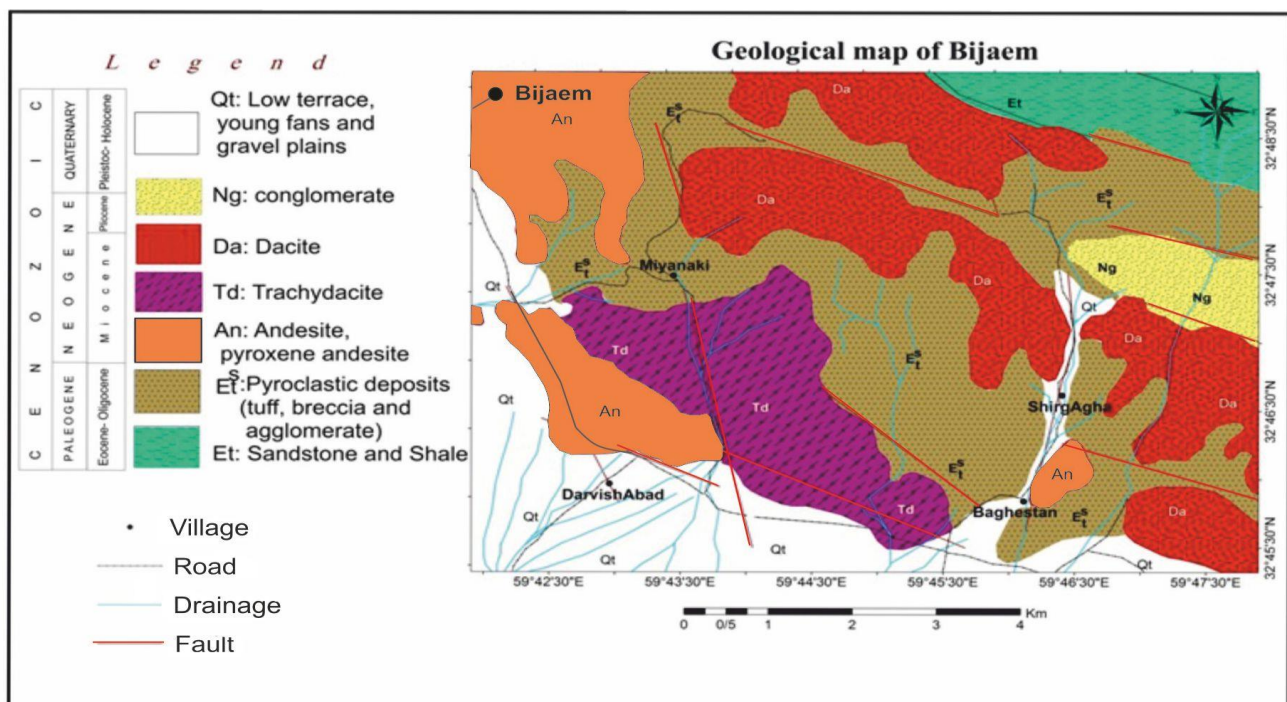
روش پژوهش

برای انجام این پژوهش، پس از پیمایش‌های صحرایی و نمونه-برداری، تعداد ۷۵ مقطع نازک از نمونه‌های برداشت شده تهیه و بررسی سنگ‌نگاری شدند. به منظور بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز در گدازه‌های آندزیتی، مقاطع نازک صیقلی تهیه و پس از انجام مراحل آماده‌سازی، در انسیتو علوم زمین آکادمیا سینیکا در شهر تایپه کشور تایوان تجزیه شدند. شناسایی فازهای کانی‌ها با طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی x (edx) مدل Oxford INCA-350 مجهز به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شرایط پرتو ۱۵ کیلوولت و ۰/۲ نانوامپر انجام شد. تجزیه ریزپردازشی الکترونی کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن با دستگاه مدل JEOL EPMA JXA-8900R مجهز به چهار طیف‌سنج با طول موج انتشاری، با شتاب دهنده‌ای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و جریان پرتوی ۱۲ نانوامپر انجام شد. پس از آن، نمودارهای لازم با نرم افزارهای Minpet و Corel Draw رسم گردید. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری، تعداد ۱۴ نمونه یا کمترین دگرسانی برای تجزیه شیمیایی انتخاب و در آزمایشگاه Acme کانادا به روش طیف-سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-ES) برای عناصر اصلی و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای عناصر کمیاب و خاکی نادر تجزیه شدند. داده‌های تجزیه‌ها به منظور بررسی‌های زمین شیمیایی و تعیین جایگاه زمین‌ساختی واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی با نرم افزار GCDKit پردازش شدند.

زمین‌شناسی منطقه

بیشترین حجم سنگ‌های منطقه را سنگ‌های آتشفشانی حدواسط و اسیدی مربوط به ائوسن- الیگوسن تا پلیوسن تشکیل می‌دهند (شکل ۱). گدازه‌های حدواسط شامل پیروکسن آندزیت تا آندزیت دارای گسترش قابل توجهی در منطقه هستند. این سنگ‌ها در نمونه دستی اغلب به رنگ خاکستری هستند (شکل ۲ الف) اما گاهی بدلیل رخداد هوازدگی و دگرسانی، به رنگ‌های قرمز و صورتی نیز دیده می‌شوند (شکل ۲ ب) و دارای بافت پورفیری و گاهی حفره‌ای هستند. در برخی نقاط، ساخت منشوری در این واحد دیده می‌شود. تفکیک بخش‌های آندزیتی و پیروکسن آندزیت در صحرای به سادگی ممکن نیست، اما بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، مشخص گردید که بیشترین گسترش آندزیت در بخش‌های جنوب غربی منطقه است. گدازه‌های اسیدی شامل داسیت و تراکی داسیت هستند که به صورت گنبدی‌های به نسبت مرتفع با گسترش بسیار برونزد دارند (شکل ۱). این سنگ‌ها در نمونه دستی دارای رنگ روشن (شکل ۲ پ) و گاهی صورتی (شکل ۲ ت) هستند. نهشته‌های آذرآواری همراه گدازه‌ها شامل توف‌های

اسیدی و حدواسط، برش (شکل ۲ ث) و آگلومرا هستند. توف‌ها نسبت به بقیه آذرآواری‌ها گسترش بیشتری دارند و بر اثر دگرسانی به کانی‌های رسی از جمله بنتونیت تبدیل شده‌اند (شکل ۲ ج). در بخش‌هایی از منطقه مورد بررسی، و پیرامون آن از جمله در مسیر جاده حسین آباد گواهی-اسفزار، اسفزار-بیژانم و شمال شیرگ آقا، می‌توان توف‌های بنتونیتی شده را به رنگ‌های سفید و سبز مایل به زرد دید. منطقه مورد بررسی از دیدگاه ساختاری در معرض عملکرد پهنه گسلی سربیشه و سرشاخه‌های آن قرار دارد. گسل شوشک از سرشاخه‌های پهنه گسلی سربیشه بوده که در بخش شرقی منطقه مورد بررسی دارای روند شمالی-جنوبی و سازوکار راستالغز راستگرد است. افزون بر این، گسل دسته قیچ از دیگر سرشاخه‌های پهنه گسلی سربیشه است که با روند کلی شمال غربی-جنوب شرقی، بر منطقه مورد بررسی اثر داشته است. وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان، باعث تسریع فرآیندهای هوازدگی و دگرسانی سنگ‌های منطقه مورد بررسی از جمله تبدیل توف‌ها به بنتونیت شده است.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه بیژانم بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه، برگرفته از مرجع [۱]، با اصلاحات.



شکل ۲ تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه بیژائم؛ الف و ب) نمایی از توده‌های آندزیتی با رنگ‌های خاکستری و صورتی (دید به شمال)، ب و پ) نمایی از توده‌های داسیتی (دید به شمال غرب)، ث) برش آتشفشانی و ج) توف‌های بنتونیتی‌شده (به رنگ سفید) در زیر گدازه‌ها (دید به شمال شرق).

سنگ‌نگاری

پلاژیوکلاز به مقدار ۱۵ تا ۲۵ درصد، دارای منطقه‌بندی (شکل ۳ ب)، بافت غربالی و در برخی نمونه‌ها لبه‌های واژبی هستند که از نشانه‌های عدم تعادل است. کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم درشت بلورها را شامل می‌شوند. بیوتیت و هورنبلند (گاهی اکسید شده)، کمتر از ۱۰ درصد حجم درشت بلورها را تشکیل داده‌اند. سریسیت، کانی‌های رسی، اپیدوت و کلریت، کانی‌های ثانویه و کانی کدر و آپاتیت از جمله سازهای فرعی آندزیت‌ها هستند. داسیت در ظاهر تفاوت چندانی با گدازه‌های آندزیتی ندارد. بافت اصلی آن پورفیری با زمینه ریزدانه (شکل ۳ ث) و

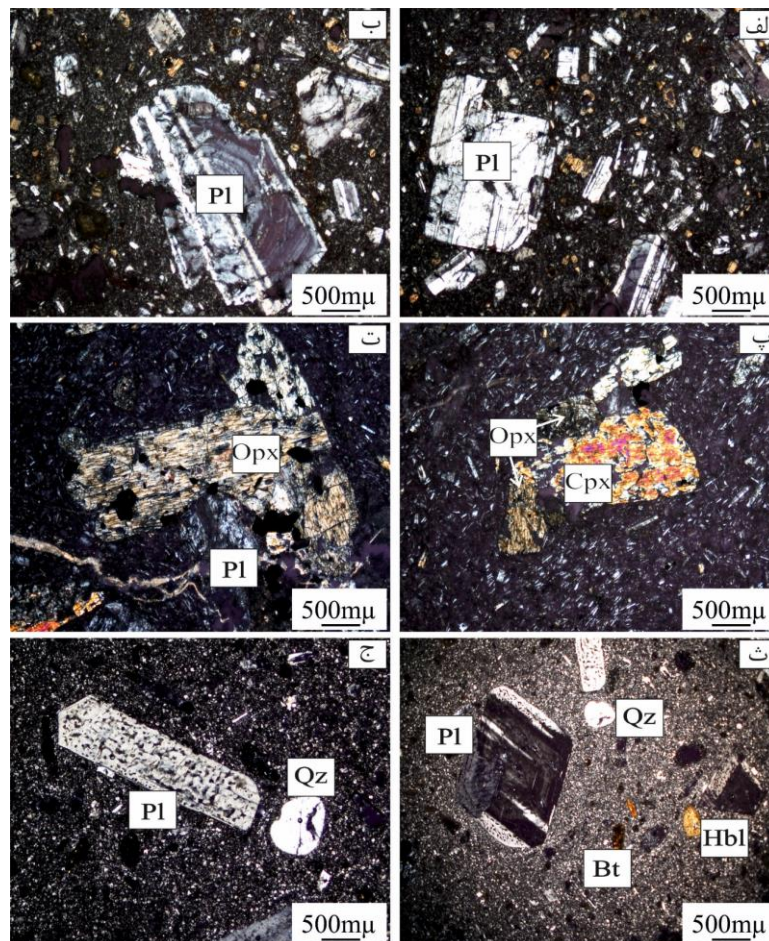
واحدهای گدازه‌ای منطقه بیژائم شامل آندزیت (پیروکسن آندزیت-آندزیت) و داسیت هستند. بافت آندزیت‌ها پورفیری با زمینه ریزسنگی (شکل‌های ۳ الف تا ت) و گاهی گلومروپورفیری می‌باشد. کانی‌های سازنده آندزیت‌ها شامل پلاژیوکلاز (شکل ۲ الف و ب)، کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن (شکل ۳ پ و ت) و به مقدار کمتر بیوتیت و آمفیبول (هورنبلند) هستند که به صورت درشت بلور و همچنین بلورهای ریز در زمینه سنگ حضور دارند. درشت بلورها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده‌اند. درشت بلورهای

کوارتز و فلدسپار، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد حجم سنگ را اشغال نموده است. وجود بلورهای ریز فلدسپار قلیایی در زمینه برخی نمونه‌ها سبب تمایل ترکیب آن‌ها به تراکی داسیت شده است.

شیمی کانی‌ها

پلاژیوکلاز بر پایه بررسی‌های سنگ‌نگاری، پلاژیوکلاز فراوان-ترین کانی تشکیل دهنده آندزیت‌های منطقه بیژانم است. نتایج تجزیه ریزپردازشی انجام شده برای ۱۱ نقطه از کانی پلاژیوکلاز، به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. گستره ترکیبی کانی پلاژیوکلاز بین Ab_{31} تا An_{69} است. An_{51} تغییر می‌کند و از نوع لابرادوریت هستند (شکل ۴).

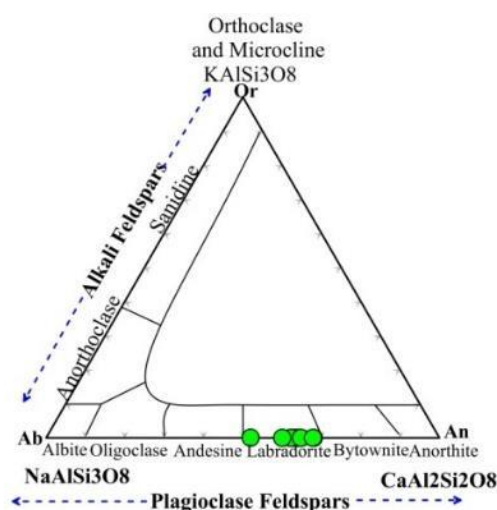
فراوانترین کانی آن پلاژیوکلاز است. حضور درشت بلورهای کوارتز (شکل ۳ ج) موجب تمایز داسیت از آندزیت شده است. کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و آمفیبول به عنوان کانی‌های اصلی حضور دارند. درشت بلورها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجم سنگ را تشکیل داده‌اند. درشت بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی (شکل ۳ ث) و گاهی بافت غربالی (شکل ۳ ج)، حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم درشت بلورها را تشکیل داده‌اند و باتوجه به زاویه خاموشی، از نوع آلبیت تا الیگوکلاز هستند. کوارتز حدود ۵ درصد حجم درشت بلورها را شامل می‌شود و دارای لبه گرد شده و خلیجی (شکل ۲ ج) است. آمفیبول و بیوتیت در مجموع حدود ۵ تا ۱۰ درصد حجم درشت بلورها را شامل می‌شوند. زمینه ریزدانه سنگ متشکل از



شکل ۳ ویژگی‌های میکروسکوپی گدازه‌های آندزیتی و داسیتی منطقه بیژانم: بافت پورفیری با زمینه ریزسنگی در آندزیت (الف تا ت)، حضور درشت بلورهای پلاژیوکلاز (الف و ب) گاهی دارای منطقه‌بندی (ب) در آندزیت، حضور کلینوپیروکسن (پ) و ارتوپیروکسن (ت) در آندزیت؛ بافت پورفیری با زمینه ریزدانه در داسیت (ث) و درشت بلور پلاژیوکلاز دارای بافت غربالی و کوارتز با لبه گرد شده و خلیجی در داسیت (ج). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۲۱] هستند.

جدول ۱ نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی پلاژیوکلازها در گدازه‌های آندزیتی بیژائم به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر پایه ۸ اتم اکسیژن.

نمونه	A1-32	A1-44	A1-64	A1-65	A1-66	A1-67	A1-68	A1-69	A1-70	A1-71	A1-72
SiO ₂	۵۱/۷۲	۵۴/۹۳	۵۲/۵۰	۵۲/۸۶	۵۲/۶۰	۵۲/۱۱	۵۲/۴۵	۵۲/۸۳	۵۱/۶۲	۵۱/۳۰	۵۱/۰۵
TiO ₂	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۶
Al ₂ O ₃	۳۰/۰۰	۲۷/۰۷	۲۹/۵۲	۲۹/۱۵	۲۹/۱۴	۲۹/۴۷	۲۹/۴۳	۲۸/۸۷	۲۹/۶۰	۳۰/۰۰	۳۰/۰۱
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
FeO	۰/۵۶	۱/۱۱	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۵۹	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۷۰	۱/۰۰
MnO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
MgO	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۰
CaO	۱۲/۹۱	۱۰/۰۸	۱۲/۶۸	۱۱/۷۳	۱۲/۳۲	۱۲/۶۰	۱۲/۳۵	۱۱/۹۶	۱۳/۱۷	۱۳/۷۱	۱۳/۵۴
Na ₂ O	۴/۱۷	۵/۱۵	۴/۱۳	۴/۳۲	۴/۱۵	۳/۸۸	۴/۱۴	۴/۴۰	۳/۹۵	۳/۵۶	۳/۵۴
K ₂ O	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۲۸
مجموع	۹۹/۷۱	۹۹/۰۲	۹۹/۶۸	۹۹/۰۹	۹۹/۳۰	۹۹/۳۶	۹۹/۴۴	۹۹/۰۰	۹۹/۱۴	۹۹/۶۹	۹۹/۵۷
فرمول	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)	۸(O)
Si	۲/۳۶	۲/۵۱	۲/۳۹	۲/۴۲	۲/۴۱	۲/۳۸	۲/۴۰	۲/۴۲	۲/۳۷	۲/۳۵	۲/۳۴
Ti	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Al	۱/۶۱	۱/۴۶	۱/۵۹	۱/۵۷	۱/۵۷	۱/۵۹	۱/۵۸	۱/۵۶	۱/۶۰	۱/۶۲	۱/۶۲
Cr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Fe ⁺⁺	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴
Mn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Mg	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱
Ca	۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۷
Na	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۲
K	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
مجموع	۵/۰۲	۵/۰۰	۵/۰۰	۴/۹۹	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۱	۵/۰۱	۵/۰۱
Na/(Na+K+Ca)	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۳۲
K/(Na+K+Ca)	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
Ca/(Na+K+Ca)	۰/۶۲	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۶۴	۰/۶۷	۰/۶۷



شکل ۴ ترکیب پلاژیوکلازهای بررسی شده در آندزیت بیژائم در نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها [۲۲].

شیمی پیروکسن ترکیب شیمیایی پیروکسن در ارتباط با نوع ماگمای در برگیرنده آن‌هاست و بررسی شیمی این کانی اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با خاستگاه ماگمای سازنده گدازه‌های میزبان در اختیار قرار می‌دهد [۱۴، ۲۳-۲۷]. پیروکسن‌ها بر اساس نمودار Q-J به چهار گروه پیروکسن‌های سدیمی، پیروکسن‌های سدیمی- کلسیمی، پیروکسن‌های کلسیم - منیزیم- آهن‌دار (Quad) و سایر پیروکسن‌ها تقسیم می‌شوند [۲۸]. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی نقاط برگزیده از کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ و تصویر

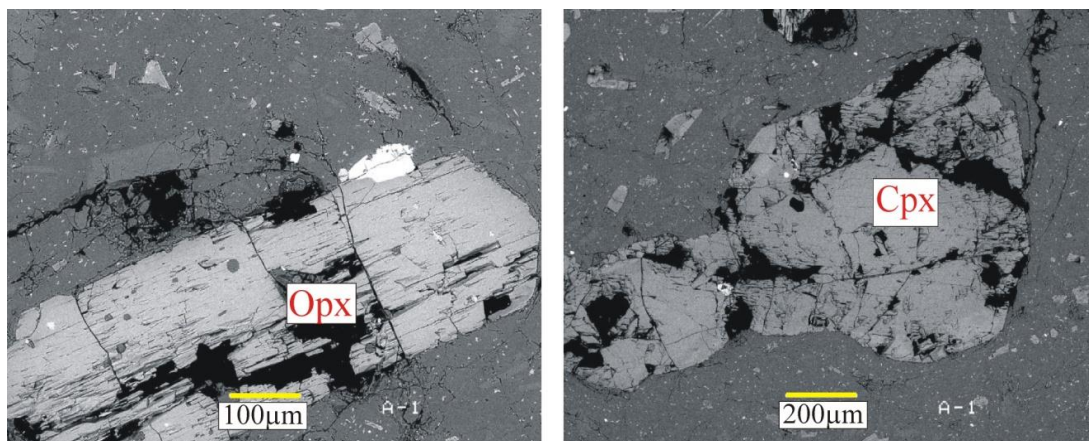
میکروسکپ الکترونی بلورهای نام برده در شکل ۵ آورده شده است. ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های مورد بررسی بر پایه نمودار رده‌بندی پیروکسن‌ها، در گستره پیروکسن‌های کلسیم- منیزیم- آهن‌دار قرار می‌گیرند (شکل‌های ۶ الف و ب). برای نامگذاری پیروکسن‌ها، از نمودار مثلثی Wo-En-Fs [۲۸] استفاده شد. در این نمودار، کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی به ترتیب دارای ترکیب اوژیت غنی از منیزیم مایل به دیوپسید آهن‌دار و انستاتیت هستند (شکل‌های ۶ پ و ت).

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی نقاط برگزیده از کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن.

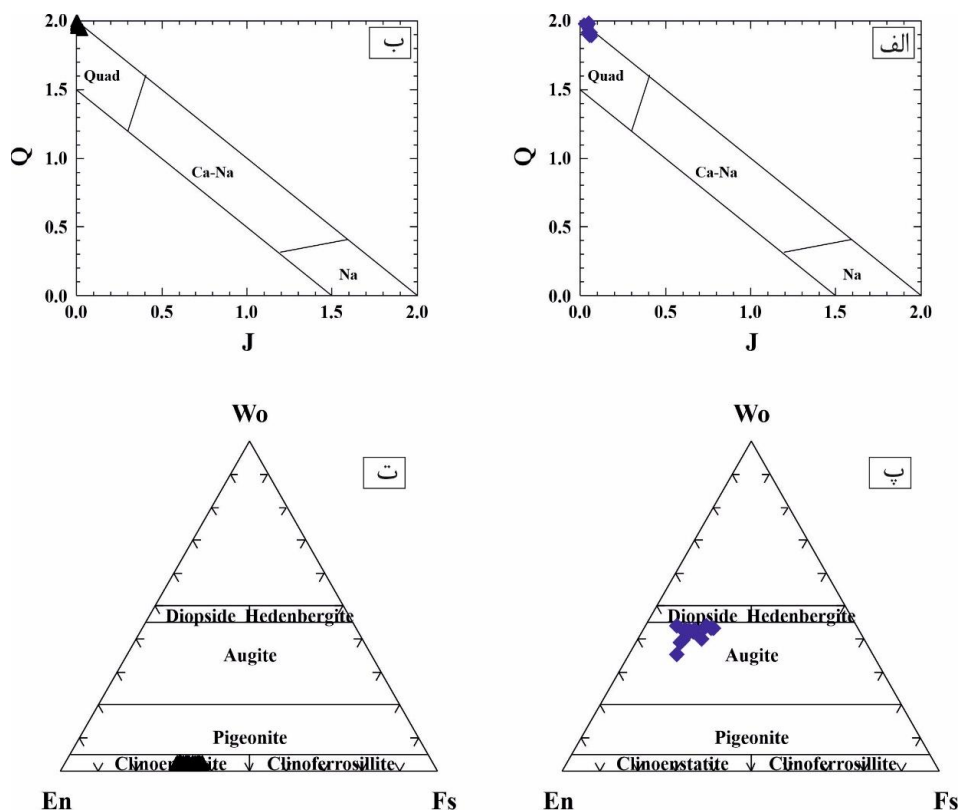
نمونه	A1-17	A1-27	A1-28	A1-30	A1-31	A1-34	A1-35	A1-39	A1-40	A1-47-C
SiO ₂	۵۱٫۹۷	۴۹٫۸۵	۵۰٫۱۶	۵۱٫۲۶	۴۹٫۴۷	۵۲٫۴۷	۵۲٫۰۶	۵۱٫۹۶	۵۱٫۴۵	۵۱٫۳۶
TiO ₂	۰٫۲۹	۰٫۹۰	۰٫۹۱	۰٫۷۵	۰٫۹۸	۰٫۳۵	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۶۳
Al ₂ O ₃	۰٫۹۸	۴٫۵۳	۴٫۶۸	۳٫۷۱	۴٫۱۲	۱٫۴۸	۰٫۸۴	۰٫۸۴	۰٫۸۵	۳٫۷۲
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۶	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۲۵
FeO	۹٫۸۲	۷٫۳۹	۷٫۰۱	۷٫۱۵	۷٫۵۳	۷٫۹۴	۱۰٫۰۹	۱۱٫۳۲	۱۱٫۰۴	۵٫۲۱
MnO	۰٫۲۹	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۲۶	۰٫۱۱	۰٫۲۲	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۳۰	۰٫۱۲
MgO	۱۴٫۳۲	۱۶٫۶۸	۱۶٫۰۲	۱۷٫۲۳	۱۶٫۱۲	۱۸٫۷۷	۱۴٫۱۲	۱۳٫۶۰	۱۳٫۹۰	۱۶٫۵۷
CaO	۲۱٫۶۸	۱۹٫۱۷	۲۰٫۴۹	۱۹٫۱۱	۲۰٫۸۱	۱۷٫۸۸	۲۱٫۸۲	۲۱٫۳۳	۲۱٫۴۷	۲۱٫۴۰
Na ₂ O	۰٫۳۳	۰٫۳۲	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۳۰	۰٫۱۷	۰٫۳۸	۰٫۳۴	۰٫۳۳	۰٫۳۳
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۹۹٫۷۴	۹۹٫۱۱	۹۹٫۷۹	۹۹٫۸۱	۹۹٫۴۶	۹۹٫۳۰	۹۹٫۸۲	۹۹٫۸۷	۹۹٫۴۹	۹۹٫۶۰
فرمول	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)
Si	۱٫۹۵	۱٫۸۵	۱٫۸۶	۱٫۸۹	۱٫۸۵	۱٫۹۴	۱٫۹۶	۱٫۹۶	۱٫۹۵	۱٫۸۹
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲
Al	۰٫۰۴	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۱۶
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ³⁺	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ²⁺	۰٫۳۱	۰٫۲۳	۰٫۲۲	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۲۵	۰٫۳۲	۰٫۳۶	۰٫۳۵	۰٫۱۶
Mn	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۴
Mg	۰٫۸۰	۰٫۹۲	۰٫۸۸	۰٫۹۵	۰٫۹۰	۱٫۰۳	۰٫۷۹	۰٫۷۷	۰٫۸۰	۰٫۹۱
Ca	۰٫۸۷	۰٫۷۶	۰٫۸۱	۰٫۷۵	۰٫۸۳	۰٫۷۱	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۸۷	۰٫۸۴
Na	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۴٫۰۲	۴٫۰۵	۴٫۰۲	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۴٫۰۴	۴٫۰۲
Mg(Mg+Fe ²⁺)	۰٫۷۲	۰٫۸۰	۰٫۸۰	۰٫۸۱	۰٫۷۹	۰٫۸۱	۰٫۷۱	۰٫۶۸	۰٫۶۹	۰٫۸۵
En	۰٫۴۰	۰٫۴۸	۰٫۴۶	۰٫۴۹	۰٫۴۵	۰٫۵۲	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۰٫۳۹	۰٫۴۸
Fs	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۰۸
Wo	۰٫۴۴	۰٫۴۰	۰٫۴۲	۰٫۳۹	۰٫۴۲	۰٫۳۶	۰٫۴۴	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۴
Jd	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Ac	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Aug	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸
X _{PT}	۳۹٫۸۴	۳۶٫۳۹	۳۶٫۷۰	۳۷٫۴۱	۳۷٫۰۰	۳۹٫۰۴	۳۹٫۹۹	۴۰٫۰۱	۳۹٫۸۴	۳۷٫۵۲
Y _{PT}	-۲۷٫۱۶	-۲۸٫۷۸	-۲۸٫۹۵	-۲۹٫۴۴	-۲۸٫۴۱	-۲۹٫۷۳	-۲۷٫۰۳	-۲۶٫۲۴	-۲۶٫۳۵	-۳۰٫۲۵
F1	-۰٫۸۲	-۰٫۷۸	-۰٫۸۱	-۰٫۷۸	-۰٫۸۱	-۰٫۷۴	-۰٫۸۲	-۰٫۸۲	-۰٫۸۱	-۰٫۸۱
F2	-۲٫۴۲	-۲٫۴۴	-۲٫۴۴	-۲٫۴۹	-۲٫۴۰	-۲٫۴۸	-۲٫۴۱	-۲٫۴۱	-۲٫۳۸	-۲٫۴۴

ادامه جدول ۲

نمونه	A1-49-C	A1-50	A1-51	A1-52	A1-53	A1-54	A1-55	A1-56	A1-57	A1-58
SiO ₂	۴۹٫۶۴	۴۸٫۹۷	۴۹٫۸۸	۴۹٫۶۸	۴۹٫۹۵	۴۹٫۴۴	۵۱٫۹۱	۵۱٫۷۰	۵۱٫۵۷	۵۴٫۴۱
TiO ₂	۱٫۴۲	۱٫۵۰	۱٫۲۲	۱٫۲۹	۱٫۵۱	۱٫۴۰	۰٫۵۶	۰٫۵۲	۰٫۵۴	۰٫۶۲
Al ₂ O ₃	۴٫۵۲	۴٫۶۲	۴٫۶۰	۴٫۶۶	۴٫۵۴	۴٫۰۴	۱٫۷۳	۱٫۷۲	۱٫۷۶	۵٫۲۹
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۲۴
FeO	۷٫۶۶	۶٫۸۵	۶٫۸۸	۷٫۳۲	۶٫۵۲	۷٫۶۹	۸٫۵۵	۸٫۳۰	۸٫۵۷	۸٫۵۷
MnO	۰٫۲۰	۰٫۱۲	۰٫۲۲	۰٫۱۸	۰٫۲۱	۰٫۲۰	۰٫۲۶	۰٫۲۸	۰٫۱۷	۰٫۱۶
MgO	۱۵٫۶۰	۱۶٫۱۶	۱۵٫۸۲	۱۵٫۵۷	۱۵٫۸۰	۱۵٫۵۵	۱۵٫۷۲	۱۵٫۷۳	۱۵٫۴۱	۱۲٫۳۷
CaO	۲۰٫۳۴	۲۰٫۶۰	۲۰٫۵۷	۲۰٫۳۸	۲۰٫۵۹	۲۰٫۵۴	۲۰٫۹۰	۲۰٫۹۸	۲۱٫۲۰	۱۶٫۰۸
Na ₂ O	۰٫۴۵	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۴۷	۰٫۳۸	۰٫۴۵	۰٫۳۲	۰٫۲۸	۰٫۳۰	۱٫۰۳
K ₂ O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۹۴
مجموع	۹۹٫۸۲	۹۹٫۲۵	۹۹٫۷۲	۹۹٫۶۱	۹۹٫۵۱	۹۹٫۳۰	۹۹٫۹۶	۹۹٫۵۲	۹۹٫۵۶	۹۹٫۷۱
فرمول	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)
Si	۱٫۸۴	۱٫۸۳	۱٫۸۵	۱٫۸۵	۱٫۸۵	۱٫۸۵	۱٫۹۳	۱٫۹۳	۱٫۹۳	۱٫۹۹
Ti	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Al	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۱۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۲۳
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱
Fe ³⁺	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe ²⁺	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۲۳	۰٫۲۰	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۲۶
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۸۶	۰٫۹۰	۰٫۸۷	۰٫۸۶	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۶۷
Ca	۰٫۸۱	۰٫۸۲	۰٫۸۲	۰٫۸۱	۰٫۸۲	۰٫۸۲	۰٫۸۳	۰٫۸۴	۰٫۸۵	۰٫۶۳
Na	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۷
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴
مجموع	۴٫۰۳	۴٫۰۴	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۴٫۰۲	۴٫۰۴	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۴٫۰۳	۳٫۹۳
Mg(Mg+Fe ²⁺)	۰٫۷۸	۰٫۸۱	۰٫۸۰	۰٫۷۹	۰٫۸۱	۰٫۷۸	۰٫۷۷	۰٫۷۷	۰٫۷۶	۰٫۷۲
En	۰٫۴۵	۰٫۴۶	۰٫۴۶	۰٫۴۵	۰٫۴۶	۰٫۴۵	۰٫۴۴	۰٫۴۴	۰٫۴۳	۰٫۴۳
Fs	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۷
Wo	۰٫۴۲	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۰
Jd	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۷
Ac	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Aug	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۳
X_{PT}	۳۶٫۶۱	۳۶٫۲۹	۳۶٫۵۴	۳۶٫۴۲	۳۶٫۵۶	۳۶٫۷۹	۳۹٫۲۳	۳۹٫۱۰	۳۹٫۱۱	۳۵٫۵۰
Y_{PT}	-۲۷٫۹۸	-۲۸٫۳۴	-۲۸٫۰۶	-۲۸٫۲۲	-۲۸٫۵۶	-۲۷٫۷۷	-۲۸٫۲۳	-۲۸٫۲۶	-۲۸٫۰۳	-۲۷٫۸۴
F1	-۰٫۸۵	-۰٫۸۵	-۰٫۸۴	-۰٫۸۴	-۰٫۸۶	-۰٫۸۵	-۰٫۸۲	-۰٫۸۱	-۰٫۸۲	-۰٫۸۴
F2	-۲٫۴۷	-۲٫۴۳	-۲٫۴۶	-۲٫۴۵	-۲٫۴۸	-۲٫۴۴	-۲٫۴۵	-۲٫۴۴	-۲٫۴۲	-۲٫۶۶



شکل ۵ تصاویر میکروسکپ الکترونی از بلورهای کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن تجزیه شده در آندزیت.



شکل ۶ الف و ب) موقعیت کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های بررسی شده در نمودار Q-J [۲۸]؛ پ و ت) موقعیت کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌ها در نمودار رده‌بندی پیروکسن‌ها [۲۸].

دما-فشارسنجی

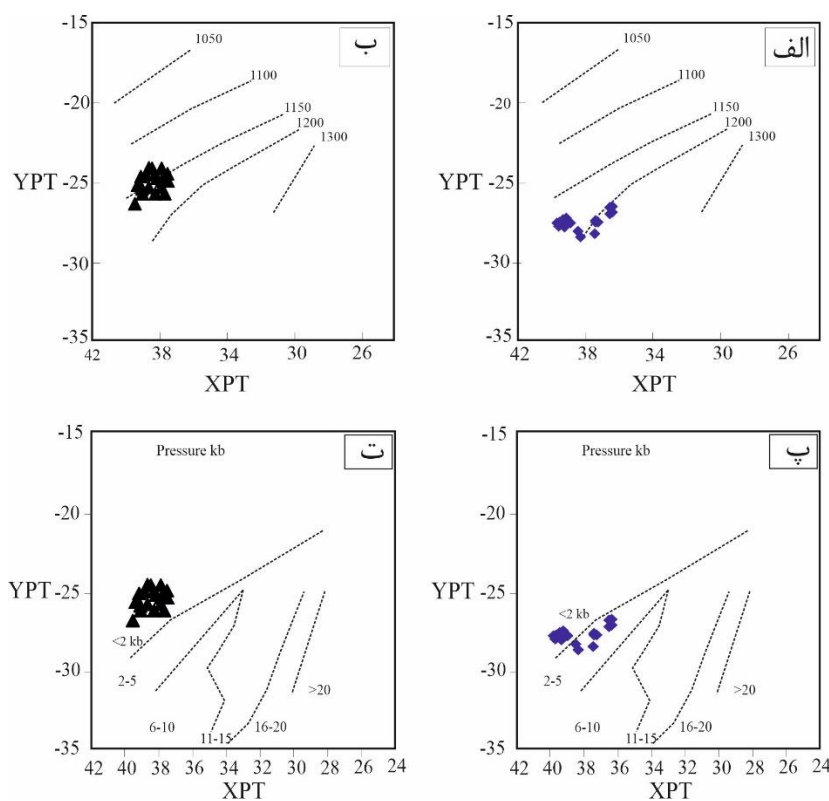
حدود ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید (شکل‌های ۷ الف و ب). دماسنجی با نرم‌افزار دما-فشارسنجی تک کلینوپیروکسن با نام SCG [۲۹]، بر اساس دماسنج‌های مراجع [۲۷، ۳۰] دمای حدود ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را برای تبلور کلینوپیروکسن نشان داد که با دمای محاسبه شده پیشین همخوانی دارد. به منظور تعیین فشار در زمان تشکیل

برای بررسی دمای تشکیل پیروکسن‌ها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در یکی از روش‌ها، دما بر اساس محاسبه دو شاخص YPT و XPT با کمک داده‌های تجزیه نقطه‌ای برآورد می‌شود [۲۵]. بر این اساس، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی، به ترتیب

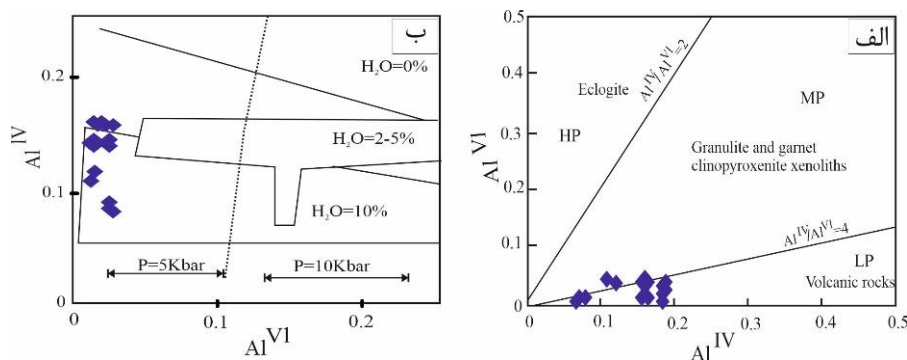
که مقادیر کم Al^{VI} بیانگر فشارهای پایین تبلور است [۳۱]. بر اساس نمودار Al^{VI} نسبت به Al^{IV} [۳۱]، کلاینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گستره فشار پایین قرار دارند (شکل ۸ الف). توزیع آلومینیم در جایگاه‌های چاروچی و هشت‌وچی کلاینوپیروکسن، روشی مناسب برای برآورد درصد تقریبی آب ماگماست [۳۲]. بر پایه نمودار Al^{IV} نسبت به Al^{VI} [۳۲]، کلاینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گستره فشار پایین (کمتر از ۵ کیلو بار) و مقدار آب ماگمایی بین ۲ تا ۵ درصد جای می‌گیرند (شکل ۸ ب).

سنگ‌های آندزیتی منطقه بیژائم، از روش مرجع [۲۵] استفاده گردید. در این روش، فشار با استفاده از دو شاخص XPT و YPT برآورد می‌شود. فشار در زمان تبلور کلاینوپیروکسن و ارتوپیروکسن در نمونه‌های بررسی شده به ترتیب ۲ تا ۵ کیلو بار و کمتر از ۲ کیلو بار تعیین گردید (شکل‌های ۷ پ و ت).

تعیین فشار و درصد تقریبی آب ماگما بر پایه شیمی کلاینوپیروکسن مقدار Al^{VI} در کلاینوپیروکسن‌ها به فشار وابسته است، بطوری



شکل ۷. تعیین دمای تبلور پیروکسن‌ها کلاینوپیروکسن (الف) و ارتوپیروکسن (ب) و فشار تبلور کلاینوپیروکسن (پ) و ارتوپیروکسن (ت)، با استفاده از نمودار YPT نسبت به XPT [۲۵].



شکل ۸. موقعیت کلاینوپیروکسن‌ها در نمودارهای توزیع مقدار آلومینیم در موقعیت‌های چاروچی و هشت‌وچی؛ (الف) برای برآورد فشار [۳۱] و (ب) تعیین درصد آب ماگما [۳۲].

زمین شیمی

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های منطقه بیژان در جدول ۴ آورده شده است. مقدار سیلیس در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژان در گستره ۵۹/۸۰ تا ۶۷/۰۰ درصد وزنی متغیر است. مقدار مواد فرار (LOI) در بیشتر سنگ‌های گدازه‌ای بیژان کمتر از ۲ درصد است که بیانگر رخداد دگرسانی با شدت پایین در آن‌هاست. برای تأیید رخ ندادن دگرسانی قابل توجه در نمونه‌ها از نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ نسبت به $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ [۳۳] استفاده شد که بر اساس آن، نمونه‌های منطقه بیژان در گستره غیر دگرسان قرار دارند (شکل ۹ الف). سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی در پایه نمودار مجموع قلیایی‌ها نسبت به سیلیس [۳۴]، در گستره آندزیت و داسیت قرار می‌گیرند (شکل ۹ ب).

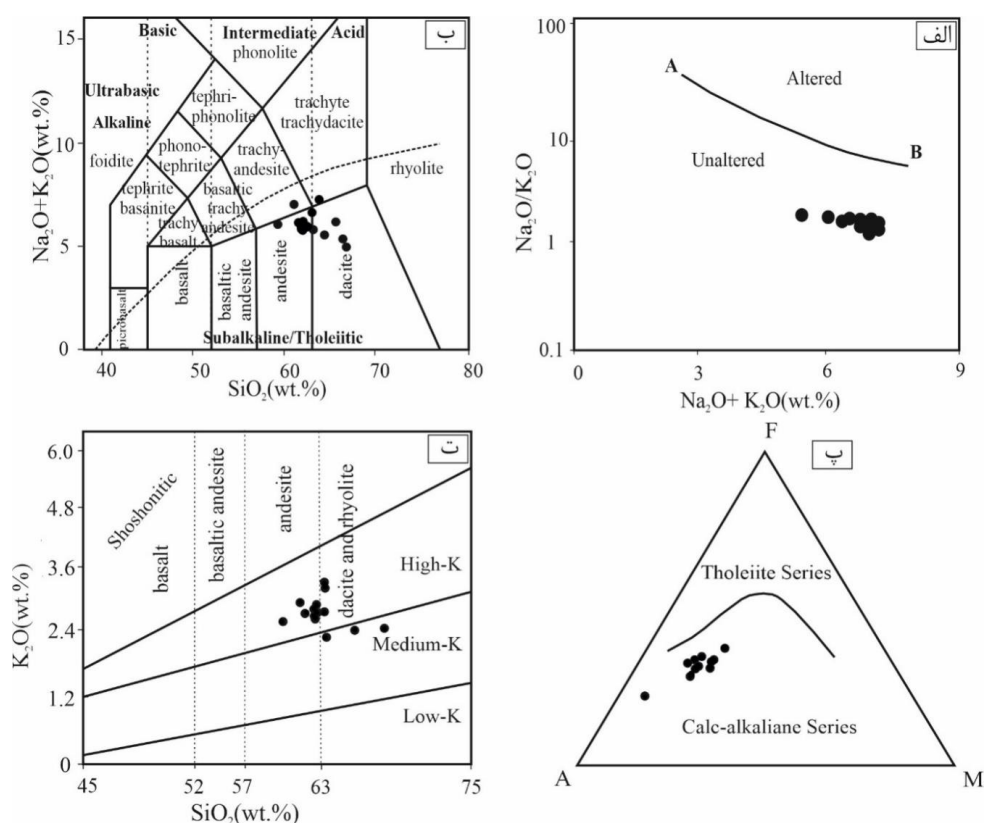
در این نمودار، نمونه‌ها در قلمرو ساب‌آلکان واقع شده‌اند. نمونه‌های نیمه‌قلیایی، بر پایه نمودار AFM [۳۵] در سری آهکی قلیایی قرار دارند (شکل ۹ پ). همچنین براساس نمودار K_2O نسبت به SiO_2 [۳۶] نیز نمونه‌های نیمه قلیایی، در گستره آندزیت تا داسیت قرار دارند و از نوع پتاسیم متوسط تا بالا تعیین شدند (شکل ۹ ت). از شاخص‌های مفیدی که برای شناسایی خاستگاه پوسته‌ای یا گوشته‌ای گدازه‌ها استفاده می‌شود، $\text{Mg\#}$ است، بطوری که آندزیت با $\text{Mg\#}$ بیش از ۴۵ اثر ذوب‌بخشی گوشته دگر نهاده یا فرایندهای آمیختگی و هضم در مناطق فروانش بوجود می‌آید [۳۷]. مقدار $\text{Mg\#}$ در سنگ‌های بررسی شده از ۴۲/۸۴ تا ۵۴/۴۱ متغیر است که بیانگر نقش اجزای گوشته‌ای در تشکیل آن‌هاست.

جدول ۴ نتایج تجزیه زمین شیمیایی عناصر اصلی (درصد وزنی) و کمیاب (ppm) سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژان

شماره نمونه	H5	D7	C1	B1	F2	E7	N4
نوع سنگ	آندزیت	تراکی داسیت	تراکی داسیت	آندزیت	داسیت	آندزیت	آندزیت
طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی	۵۹°۴۳'۵۳"	۵۹°۴۳'۲۶"	۵۹°۴۳'۵۴"	۵۹°۴۳'۱۶"	۵۹°۴۷'۰۷"	۵۹°۴۵'۵۷"	۵۹°۴۶'۳۴"
SiO_2	۵۹.۸	۶۴.۱	۶۴	۶۳.۸۹	۶۴.۱	۶۲.۹۷	۶۲.۸۵
TiO_2	۱.۰۱	۰.۸۲	۰.۷۴	۰.۷	۰.۵۷	۰.۶۳	۰.۵۷
Al_2O_3	۱۶.۲۱	۱۵.۸۵	۱۵.۵۷	۱۶.۲۴	۱۵.۵۸	۱۶.۲۹	۱۶.۱۰
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$	۵.۵۹	۴.۷۱	۴.۵۲	۴.۶۳	۴.۳۱	۴.۵۱	۳.۶۴
MnO	۰.۱۲	۰.۰۷	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۹	۰.۰۷	۰.۰۸
MgO	۲.۹۱	۱.۸۸	۱.۷۱	۲.۰۴	۲.۳۸	۲.۷۱	۱.۸۳
CaO	۶.۱۱	۴.۲۱	۳.۷۱	۴.۶	۴.۳۶	۴.۵۵	۴.۷۹
Na_2O	۳.۳۹	۳.۴۷	۳.۷۰	۳.۷۲	۳.۵۸	۳.۶۱	۳.۵
K_2O	۲.۷۰	۳.۵۲	۳.۶۰	۲.۷۹	۲.۳۲	۳.۰۸	۲.۹۲
P_2O_5	۰.۲۲	۰.۲۱	۰.۲۰	۰.۱۸	۰.۲۰	۰.۱۵	۰.۲۲
LOI	۱.۷	۲.۸	۱.۶	۲	۲.۳۰	۱.۲۰	۳.۶۰
مجموع	۹۹.۸۳	۹۹.۸۵	۹۹.۸۶	۹۹.۸۴	۹۹.۸۷	۹۹.۸۷	۹۹.۸۷
Cr	۱۶	۱۴	۱۱	۱۱	۱۳	۱۴	۱۳
Ni	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۲	۲۹	۳۰
Sc	۱۴	۱۰	۹	۱۰	۸	۱۰	۸
Ba	۵۲۰	۳۸۳	۳۹۵	۳۳۶	۵۰۳	۳۹۹	۵۱۳
Co	۱۴.۴	۱۰.۳	۸.۵	۹.۷	۱۱.۵	۱۱.۸	۷.۹
Cs	۶.۸	۱۰	۱۰	۸.۴	۴.۱	۹.۶	۴.۶
Ga	۱۵.۶	۱۶.۳	۱۷.۲	۱۵.۲	۱۳.۹	۱۴.۲	۱۴.۱
Hf	۶	۸.۵	۸.۳	۵.۲	۴.۶	۵.۳	۴.۸
Nb	۱۲.۶	۱۴.۶	۱۳.۸	۱۱.۵	۱۰.۱	۱۱.۱	۱۱.۵
Rb	۱۱۱.۵	۱۴۱	۱۳۷.۹	۱۰۷.۲	۱۳۳.۲	۱۱۷.۳	۱۶۵.۸
Sn	۴	۴	۴	۳	۱	۳	۱
Sr	۴۰.۵۵	۳۱.۶۸	۲۸.۵۱	۳۵.۸۳	۳۵.۵۶	۳۲۷.۷	۳۱۸.۴
Ta	۱	۱.۱	۱.۱	۱	۰.۷	۰.۹	۰.۸
Th	۱۳.۲	۱۸.۱	۱۹.۵	۱۸.۳	۱۲	۱۹	۱۲.۵
U	۲.۷	۳.۶	۳.۹	۳.۳	۲.۴	۳.۸	۲.۵
V	۹.۵	۶.۷	۶.۶	۷.۳	۶.۹	۷.۲	۷.۳
W	۱.۴	۱.۸	۱.۵	۱.۶	۱.۱	۱.۶	۰.۸
Zr	۲۵۱.۱	۳۴۷.۴	۳۳۷.۸	۲۱۱.۹	۱۹۳.۵	۲۰۴.۴	۱۹۵.۱
Y	۲۶.۱	۲۹.۵	۲۷.۷	۲۱.۴	۱۹.۲	۲۰.۱	۱۸.۳
La	۳۱.۳	۳۷.۱	۳۵.۷	۳۱.۶	۲۹.۶	۳۱.۱	۳۰.۷
Ce	۶۱.۷	۷۲	۷۱.۳	۵۸.۶	۵۳	۵۸	۵۳.۷
Pr	۶.۹	۷.۸۱	۷.۷۶	۶.۳۷	۵.۵	۶.۱	۵.۵۵
Nd	۲۶.۲	۲۸.۹	۲۷.۳	۲۲	۱۹.۳	۲۱.۵	۲۰
Sm	۴.۹۵	۵.۴۷	۴.۸۹	۳.۹۹	۳.۴۶	۳.۹۲	۳.۶۳
Eu	۱.۲۲	۱.۱۶	۱.۱	۱	۰.۹۲	۰.۸۸	۰.۹۸
Gd	۵.۱۲	۵.۴۵	۵.۱۷	۴.۱۳	۳.۴۴	۳.۸۶	۳.۵۷
Tb	۰.۷۳	۰.۷۹	۰.۷۳	۰.۵۹	۰.۴۹	۰.۵۶	۰.۴۸
Dy	۴.۶۶	۵.۱۶	۴.۹۷	۳.۸۱	۳.۲۵	۳.۶۴	۲.۹۹
Ho	۰.۹۲	۱	۰.۹۵	۰.۶۷	۰.۶۱	۰.۷	۰.۶۱
Er	۲.۷	۲.۹۲	۲.۷۴	۲.۰۲	۱.۹۰	۲.۰۷	۱.۸۲
Tm	۰.۲۸	۰.۴۳	۰.۴۲	۰.۳۱	۰.۲۷	۰.۳۲	۰.۲۶
Yb	۲.۵۹	۲.۹۱	۲.۷۸	۲.۰۱	۱.۷۷	۲	۱.۸۵
Lu	۰.۴۰	۰.۴۵	۰.۴۲	۰.۳۱	۰.۳۰	۰.۳۳	۰.۲۹

ادامه جدول ۴

شماره نمونه	N1	B4	A2	E2	A1	C12	D12
نوع سنگ	داسیت	آندزیت	آندزیت	داسیت	آندزیت	داسیت	آندزیت
طول جغرافیایی	۱۸°۴۶'۵۹"	۰۵°۴۳'۵۹"	۳۱°۴۲'۵۹"	۳۴°۴۲'۵۹"	۳۳°۴۲'۵۹"	۵۹°۴۳'۵۹"	۵۸°۴۲'۵۹"
عرض جغرافیایی	۲۰°۴۸'۳۲"	۰۸°۴۸'۳۲"	۴۹°۴۸'۳۲"	۳۵°۴۷'۳۲"	۳۹°۴۸'۳۲"	۵۷°۴۶'۳۲"	۲۱°۴۷'۳۲"
SiO ₂	۶۴٫۰۰	۶۲٫۷۰	۶۲٫۸۰	۶۷٫۰۰	۶۲٫۲۹	۶۶٫۹۸	۶۱٫۵۹
TiO ₂	۰٫۶۲	۰٫۶۷	۰٫۶۸	۰٫۴۱	۰٫۷۱	۰٫۵۱	۰٫۸۴
Al ₂ O ₃	۱۵٫۴۸	۱۶٫۲۵	۱۶٫۲۷	۱۵٫۲۲	۱۶٫۰۹	۱۷٫۳۳	۱۶٫۶۳
Fe ₂ O ₃ T	۴٫۱۹	۴٫۶۴	۴٫۵۹	۳٫۲۲	۴٫۳۵	۲٫۵۱	۴٫۵۸
MnO	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۰۸
MgO	۲٫۵	۲٫۶۱	۲٫۵۱	۱٫۶۶	۲٫۶۲	۰٫۴۸	۲٫۲۴
CaO	۴٫۲۲	۴٫۶۱	۴٫۶۶	۴٫۰۵	۴٫۶۰	۴٫۰۴	۴٫۴۸
Na ₂ O	۳٫۵۰	۳٫۶۰	۳٫۵۱	۳٫۵۱	۳٫۶۹	۴٫۱۸	۴٫۱۸
K ₂ O	۲٫۹۱	۲٫۸۴	۳٫۰۰	۲٫۵۱	۲٫۹۱	۲٫۵۲	۳٫۱۶
P ₂ O ₅	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۱۹	۰٫۱۳	۰٫۲۰	۰٫۱۶	۰٫۲۴
LOI	۱٫۸	۱٫۹	۱٫۸	۲٫۰۰	۲٫۲۰	۱٫۳۰	۱٫۴
Sum	۹۹٫۸۶	۹۹٫۸۵	۹۹٫۸۶	۹۹٫۸۹	۹۹٫۷۵	۹۹٫۹۹	۹۹٫۴۶
Cr	۱۹	۱۳	۱۳	۱	۸۸	۹۱	۷۲
Ni	۳۸	۲۸	۳۲	۳۷	۳۹	۴۸	۳۶
Sc	۹	۱۰	۱۰	۷	۲۲	۲۳	۲۴
Ba	۴۳۲	۳۹۷	۳۹۵	۵۱۷	۵۱۲	۵۴۹	۴۰۴
Co	۱۱٫۷	۱۱٫۷	۱۱٫۶	۷٫۹	۱۱	۱۰	۱۲
Cs	۷٫۶	۸٫۹	۸٫۷	۵٫۳	۹٫۰	۴٫۱	۹٫۲
Ga	۱۴٫۷	۱۶٫۱	۱۶٫۵	۱۴	۱۷	۱۶	۱۹
Hf	۵٫۲	۵٫۵	۵٫۴	۴٫۵	۵٫۰	۴٫۱	۷٫۲
Nb	۱۰٫۶	۱۱٫۵	۱۰٫۷	۷٫۷	۱۲٫۱	۹٫۳	۱۵٫۲
Rb	۱۰۹٫۶	۱۲۲٫۲	۱۱۷٫۵	۱۰٫۶	۱۱۸	۹۰٫۹	۱۳۲
Sn	۳	۳	۳	۱			
Sr	۳۰٫۹	۳۴۵	۳۴۶٫۳	۳۰۲٫۷	۳۵۹	۳۷۱	۳۵۷
Ta	۱	۱	۱	۰٫۷	۰٫۹۵	۰٫۷۷	۱٫۱۴
Th	۱۷٫۵	۱۸٫۲	۱۷٫۹	۱۴٫۵	۱۶٫۵۶	۱۳٫۶۵	۱۵٫۷۵
U	۳٫۴	۳٫۷	۳٫۸	۳٫۱	۳٫۴۶	۲٫۱۰	۳٫۵۰
V	۶۵	۸۲	۷۹	۵۵	۷۸	۵۴	۷۵
W	۱٫۴	۱٫۵	۱٫۷	۱٫۳	۱٫۴۰	۰٫۹۶	۱٫۳۸
Zr	۲۰۹٫۷	۲۱۳٫۲	۲۱۷٫۲	۱۷۲٫۶	۲۱۵	۱۷۲	۳۱۹
Y	۲۱٫۱	۲۲٫۷	۲۲٫۲	۱۷٫۱	۲۴	۱۶	۳۰
La	۳۰٫۹	۳۳٫۵	۳۱٫۹	۲۷	۳۱٫۷	۲۸٫۴	۳۵٫۹
Ce	۵۶٫۵	۶۰	۶۱٫۵	۴۸٫۳	۵۹٫۳	۴۷٫۳	۶۹٫۸
Pr	۶٫۱۲	۶٫۳۶	۶٫۴۲	۴٫۸۱	۶٫۴	۵٫۱	۷٫۷
Nd	۲۱٫۸	۲۳	۲۳٫۱	۱۶٫۶	۲۲٫۷	۱۸٫۱	۲۷٫۷
Sm	۳٫۹۹	۳٫۹۷	۴٫۰۶	۳٫۱۴	۴٫۳	۳٫۳	۵٫۴
Eu	۰٫۹	۰٫۹۶	۰٫۹۷	۰٫۷۹	۱٫۰۵	۰٫۹۱	۱٫۲۷
Gd	۳٫۹۵	۴٫۱۱	۴٫۱۲	۳٫۲۱	۴٫۰۷	۲٫۹۹	۵٫۱۰
Tb	۰٫۵۹	۰٫۵۸	۰٫۶۱	۰٫۴۴	۰٫۶۴	۰٫۴۶	۰٫۸۲
Dy	۳٫۶۷	۳٫۹۱	۳٫۸۵	۳٫۰۹	۳٫۹۵	۲٫۶۸	۴٫۹۷
Ho	۰٫۶۹	۰٫۷۶	۰٫۷۴	۰٫۵۳	۰٫۷۹	۰٫۵۲	۱٫۰۲
Er	۲٫۰۷	۲٫۳۲	۲٫۲۸	۱٫۶	۲٫۳۳	۱٫۴۹	۲٫۹۶
Tm	۰٫۳۲	۰٫۳۴	۰٫۳۵	۰٫۲۵	۰٫۳۶	۰٫۲۲	۰٫۴۵
Yb	۲٫۱۷	۲٫۲۸	۲٫۲۷	۱٫۶۵	۲٫۳۱	۱٫۴۰	۲٫۹۹
Lu	۰٫۳۳	۰٫۳۵	۰٫۳۶	۰٫۲۹	۰٫۳۵	۰٫۲۲	۰٫۴۴



شکل ۹ الف) نمودار $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ نسبت به $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ [۳۳] برای تأیید دگرسان نشدن نمونه‌ها؛ ب) نمودار مجموع قلیایی‌ها نسبت به سیلیس [۳۴] برای رده‌بندی سنگ‌ها و تفکیک سری قلیایی و نیمه قلیایی؛ پ) نمودار سه تایی $\text{FeO}-\text{MgO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ [۳۵] برای تفکیک سری آهکی قلیایی از سری تولیتی؛ ت) نمودار K_2O نسبت به SiO_2 [۳۶] و محل نمونه‌های آتشفشانی بیژان.

اقیانوسی‌دگرسان شده به منبع ذوب‌شدگی [۴۴]، درجه‌های مختلف آلودگی پوسته‌ای یا تشکیل ماگما از یک خاستگاه گوشته‌ای دگرنهاده غیر یکنواخت [۴۵] باشد. ناهنجاری منفی Ba بیانگر جدایش فلدسپارها و یا نقش پوسته قاره‌ای بالایی در فرایندهای ماگمایی است [۴۶]. نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده به کندریت [۳۹] دارای الگوی یکنواخت در عناصر خاکی نادر (REE)، نسبت بالای عناصر خاکی نادر سبک به سنگین (LREE/HREE) و بی‌هنجاری منفی Eu است. یکنواختی روند الگوی پراکندگی عناصر خاکی نادر در گدازه-های حدواسط و اسیدی، نشان دهنده خاستگاه یکسان آن-هاست [۴۷]. غنی‌شدگی از LREE‌ها نسبت به HREE‌ها در این سنگ‌ها، می‌تواند ناشی از باقی‌ماندن گارنت در خاستگاه [۴۸]، آلیش ماگما با مواد پوسته‌ای [۴۹]، دگرنهادهی سیال-های برآمده از آزدایی پوسته اقیانوسی فرورانده [۵۰] و درجه-های کم ذوب‌بخشی منبع گوشته‌ای غنی‌شده (کمتر از ۱۵ درصد) [۵۱] باشد. ناهنجاری منفی ضعیف Eu که در این

نمودارهای عناصر کمیاب بهنجار شده به گوشته اولیه [۳۸] و عناصر خاکی نادر بهنجار شده به کندریت [۳۹] برای نمونه-های بررسی شده به ترتیب در شکل‌های ۱۰ الف و ب نشان داده شده‌است. غنی‌شدگی از عناصر سنگ دوست درشت یون (LILE)، ناهنجاری منفی Nb، Ti، P و Sr از ویژگی‌های بارز سنگ‌های اسیدی و حدواسط منطقه بیژان است. ناهنجاری منفی Nb، Ti و P به همراه غنی‌شدگی LILE‌ها (به جز Ba) در این سنگ‌ها از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی قلیایی وابسته به فرورانش است [۴۰-۴۲]. ماگماهای کمان از عناصر سنگ دوست بزرگ یون متحرک در سیال، غنی بوده و دارای نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بالاتر و $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ پایین‌تر نسبت به بازالت‌های پشته میان اقیانوسی هستند که بیانگر مشارکت متغیر گوشته تهی‌شده، پوسته اقیانوسی دگرسان شده و رسوب‌ها در فرایندهای ماگمایی است [۴۳]. غنی‌شدگی از عنصر Th در نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، می‌تواند نشانگر اضافه شدن رسوب‌های گودابه‌ای و یا پوسته

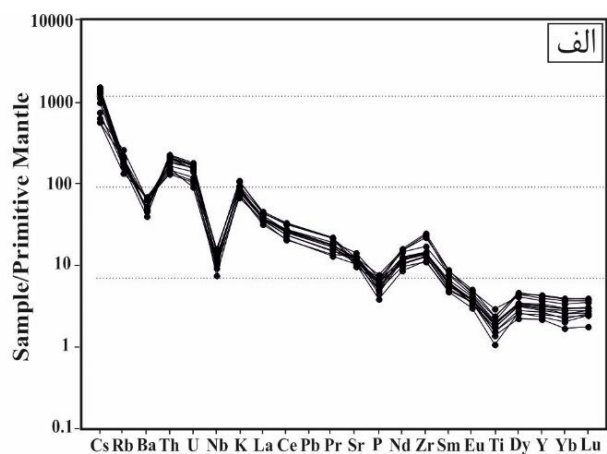
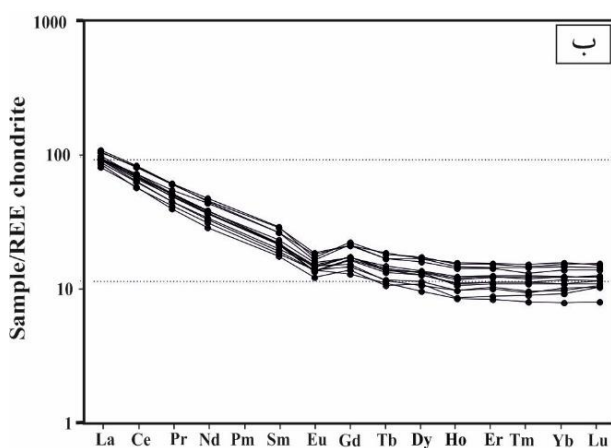
ماگمایی نه تنها در کمان‌ها بلکه در پشت کمان و در راستای گسل‌های انتقالی در کناره درازگودال‌ها نیز رخ می‌دهند [۱۴، ۵۶]. در محیط فرورانش، اجزای مختلفی چون سیال‌های آبیکی فرورانده شده و مذاب‌های آب‌دار برآمده از پوسته اقیانوسی دگرسان شده، انتقال آب، سرپانتینیت‌های پوسته اقیانوسی فرورونده و ذوب‌بخشی دیابیرهای مخلوط، در فرآیندهای ماگمایی نقش دارند [۵۷]. آندزیت‌های آهکی قلیایی یکی از مجموعه سنگ‌ها در بسیاری از محیط‌های زمین‌ساختی چون قوس جزیره و کمان قاره‌ای هستند و ترکیب زمین‌شیمی آن شبیه ترکیب میانگین پوسته قاره‌ای است. از این رو سنگ‌زایی آندزیت‌های آهکی قلیایی از موضوع‌های اساسی در سنگ‌شناسی است. فرضیه‌های مختلفی برای چگونگی تشکیل آندزیت آهکی قلیایی پیشنهاد شده است که برخی از آن‌ها عبارتند از (۱) جدایش بلورین از ماگمای بازالتی اولیه شکل گرفته از گوشته، (۲) تولید ماگما در گوشته بالایی در شرایط ویژه از قبیل ذوب‌بخشی پریدوتیت گوشته در شرایط فشار پایین یا تمرکز بالای آب، (۳) واکنش سیال شکل گرفته از پوسته فرورونده (برای مثال، مذاب آداکیتی) با پریدوتیت گوشته، (۴) ذوب‌بخشی سنگ‌های مافیک در پوسته زیرین تا میانی و (۵) آمیختگی ماگما بین ماگماهای مافیک و فلسیک. در بین این فرآیندها، آمیختگی ماگمایی یکی از فرآیندهای اصلی برای تشکیل ماگماهای آندزیتی آهکی قلیایی است زیرا سنگ‌های آهکی قلیایی اغلب شواهد سنگ‌شناسی و زمین‌شیمیایی از آمیختگی ماگمایی را نشان می‌دهند [۵۸].

سنگ‌ها ($Eu/Eu^* = 0.65-0.89$) بیانگر جدایش پلاژیوکلاز و از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی قلیایی وابسته به فرورانش است [۵۳، ۵۲].

بحث

جایگاه زمین‌ساختی و خاستگاه

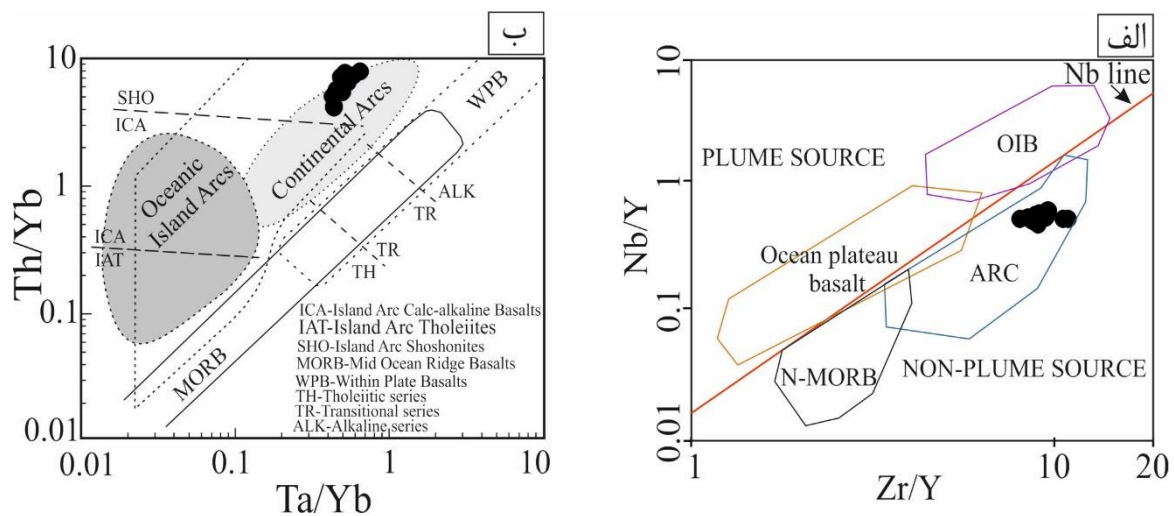
سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی-داسیتی در جایگاه‌های زمین‌ساختی متنوعی در نقاط مختلف جهان وجود دارند و از سازه‌های مهم پوسته قاره‌ای هستند. این سنگ‌های آتشفشانی اطلاعات مهمی درباره رشد پوسته و انتقال جرم و گرما در سراسر ناپیوستگی موهو ارائه نموده و به عنوان ابزاری برای درک چگونگی تکامل زمین‌ساختی هر منطقه در یک زمان زمین‌شناسی معین استفاده می‌شوند [۵۴]. بررسی‌های انجام شده بر آندزیت‌ها نشان می‌دهد که این سنگ‌ها به طور گسترده در جایگاه‌های مختلف گسترش یافته‌اند. با این حال، آندزیت‌ها به سه دلیل به ندرت به عنوان شاخصی برای شناسایی محیط‌های زمین‌ساختی مختلف در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از (۱) آندزیت‌هایی که در سایر محیط‌ها به جز مرزصفحه‌های همگرا وجود دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ (۲) آندزیت‌ها بر خلاف بازالت‌ها و گرانیت‌ها، سنگ‌زایی پیچیده‌تر و خاستگاه ماگمای متنوع‌تری دارند؛ (۳) بیشتر بررسی‌های بر آندزیت‌های مربوط به فرورانش متمرکز بوده است [۵۵]. مناطق فرورانش به عنوان یکی از مهمترین نواحی فعالیت آتشفشانی روی زمین، جایگاه مهمی برای تبادل جرم و انرژی بین پوسته و گوشته هستند و در این محیط‌ها، فعالیت



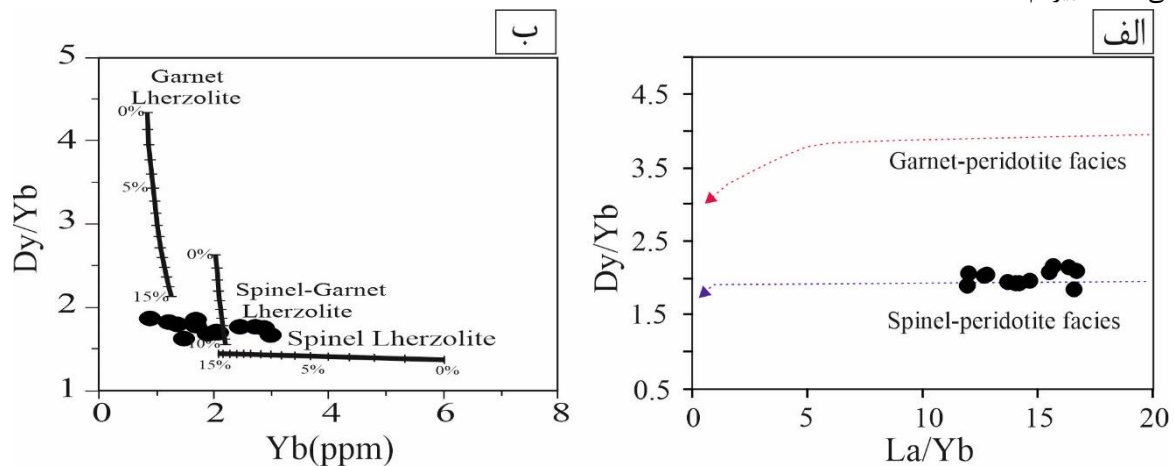
شکل ۱۰ الف) نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه [۳۸] و ب) نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت [۳۹] برای گدازه‌های حدواسط و اسیدی بی‌زائم.

از آنجا که سنگ‌های آهکی قلیایی در کمان‌های قاره‌ای و قوس جزیره بالغ همراه پوسته به نسبت ضخیم یافت می‌شوند، جایگاه زمین‌ساختی و ضخیم‌شدگی پوسته‌ای به عنوان مهمترین عوامل کنترل کننده تشکیل ماگماهای آهکی قلیایی مورد توجه هستند. پوسته قاره‌ای از نظر زمین شیمیایی، شبیه سنگ‌های آندزیتی وابسته به فروورانش است که نشان می‌دهد که تکامل پوسته قاره‌ای تا حد زیادی به فرآیند فروورانش وابسته است [۵۹، ۶۰]. مناطق فروورانش از جایگاه‌های مناسب برای تشکیل و جدایش پوسته قاره‌ای هستند، بطوری که پوسته قاره‌ای جدید طی فعالیت ماگمایی کمان تشکیل می‌شود. ماگماهای کمان دارای ترکیب متنوع هستند که نشانگر پیچیدگی خاستگاه آن‌ها شامل رسوب‌های اقیانوسی، پوسته اقیانوسی دگرسان شده و گوه گوشته‌ای بالایی است. ماگماهای آندزیتی که بالای مناطق فروورانش در مرز صفحه‌های همگرا فوران می‌نمایند، نقش مهمی در تکامل پوسته قاره‌ای دارند. از این رو، خاستگاه این ماگماهای آندزیتی و فرآیندهایی که منجر به فوران آن‌ها می‌شود، از موضوع‌های مهم مورد بحث است [۶۰، ۶۱]. با این وجود، در دهه گذشته، آندزیت‌هایی گزارش شده‌اند که در جایگاه‌های زمین‌ساختی غیر از محیط‌های همگرا تشکیل شده‌اند [۶۲]. از آنجا که نسبت‌های عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) در اثر دگرسانی تغییر نمی‌کنند، برای پی‌بردن به جایگاه زمین‌ساختی و شناسایی ویژگی‌های خاستگاه مناسب هستند [۴۵]. برای تشخیص محیط زمین‌ساختی تشکیل گدازه‌های کوهزایی بر پایه داده‌های زمین شیمیایی، نمودارهای تفکیک مختلف پیشنهاد شده است [۶۲]. در نمودار Zr/Y نسبت به Nb/Y [۶۳]، سنگ‌های بررسی شده، در گستره کمان آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۱۱ الف). ماگماهای حاشیه فعال قاره‌ای دارای نسبت بالای $LILE/HFSE$ و $LREE/HREE$ هستند [۶۴]. از نمودار Th/Yb نسبت به Ta/Yb [۶۵، ۶۶] برای تشخیص جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بی‌زائم استفاده شد که بر این اساس، گدازه‌های بررسی شده به حاشیه قاره‌ای فعال وابسته هستند (شکل ۱۱ ب). دگرنهادهای در ارتباط با فروورانش باعث غنی‌شدگی گوه گوشته‌ای از $LILE$ ها و $LREE$ ها و صعود ماگما در پوسته قاره‌ای ضخیم‌شده سبب رخداد آلودگی و در نتیجه افزایش K و Th می‌شود [۶۷]. نسبت بالای Th/Yb می‌تواند از ویژگی‌های خاستگاه دگرنهاده شده طی فروورانش و یا در ارتباط با آلاینش پوسته یا هر دو فرآیند باشد [۶۳]. تغییرات نسبت‌های Ta/Yb و Th/Yb بیانگر تغییرات در

خاستگاه هستند و ماگمای مادر آن‌ها بر اثر ذوب بخشی گوه گوشته‌ای وابسته به فروورانش به علت اضافه شدن اجزای دگرنهاده آزاد شده از سنگ کره اقیانوسی فروورنده به وجود می‌آید [۶۸، ۶۹]. پژوهش‌های مختلف پیشنهاد نموده‌اند که $HREE$ ها به ویژه Yb با گارنت سازگار است و ضریب جدایش گارنت/مذاب بالا دارد، در صورتی که La از ($LREE$ ها)، Sm و Gd از ($MREE$ ها) ناسازگار هستند و ضریب جدایش گارنت/مذاب پایین دارند [۷۰]. افزون بر این، وقتی که ذوب در گستره پایداری گارنت رخ می‌دهد، Dy/Yb ، Sm/Yb ، La/Yb و Gd/Yb به شدت جدایش یافته هستند، در صورتی که طی ذوب در گستره اسپینل پریدوتیت، La/Yb جدایش ضعیف یافته و Sm/Yb جدایش نیافته است [۷۱]. نسبت بالای Dy/Yb (بیشتر از ۲/۵) به ذوب بخشی در گستره پایداری گارنت نسبت داده می‌شود، در حالی که Dy/Yb کمتر از ۱/۵ بیانگر ذوب در گستره پایداری اسپینل است [۷۲، ۷۳]. براساس نسبت Dy/Yb برای سنگ‌های آندزیتی منطقه بی‌زائم (۱۹۱-۱۶۲)، خاستگاه گوشته‌ای آن‌ها در گستره بین اسپینل پریدوتیت و گارنت پریدوتیت قرار دارد (شکل ۱۲ الف). مذاب اسپینل-گارنت لرزولیت در مقایسه با مذاب گارنت لرزولیت دارای Yb کمی بالا (حدود ۲ ppm) و نسبت Dy/Yb کمتر (۱/۵ تا ۲/۵) است [۷۴]. در نمودار Dy/Yb نسبت به Yb [۷۴] که در آن منحنی‌های ذوب اسپینل لرزولیت، گارنت لرزولیت و اسپینل-گارنت لرزولیت نشان داده شده است، نمونه‌های منطقه بی‌زائم در گستره اسپینل-گارنت لرزولیت هستند و درجه ذوب بخشی حدود ۷ تا ۱۰ درصد است (شکل ۱۲ ب). Nb ، Th و Ta شاخص‌های زمین شیمیایی مناسبی برای درک ماهیت اجزای پوسته‌ای (هضم و آلودگی) طی صعود ماگما در مناطق فروورانش هستند [۴۵]. نسبت Nb/Th در سنگ‌های آتشفشانی بی‌زائم ۰/۹۷-۰/۵۳ بوده که کمتر از مقدار این نسبت در گوشته اولیه (۸) است. افزون بر این، نسبت La/Nb (۲/۳-۳۶/۵۱) نیز بیانگر آلودگی پوسته‌ای ماگمای سازنده این سنگ‌ها طی صعود است [۷۵]. نسبت‌های بالای Zr/Nb (۴۱/۴۸-۱۸/۲۴) و Th/Nb (۰/۴۸۸-۱/۱) می‌تواند رخداد آلودگی پوسته‌ای در ماگمای سازنده این سنگ‌ها را توجیه نماید [۷۳]. افزون بر این، نسبت‌های Th/Ta (۲۱-۱۱) نیز Nb/Ta (۱۱/۴۳-۱۴) و Ta/La (۰/۲۰۳-۰/۰۰۰) نیز احتمال درجه‌های مختلف آلودگی-هضم پوسته‌ای ماگما طی صعود به سطح زمین را تأیید می‌نماید [۷۳].



شکل ۱۱ الف) نمودار Nb/Y نسبت به Zr/Y [۶۳] و ب) نمودار Th/Yb نسبت به Ta/Yb [۶۵، ۶۶] برای تعیین جایگاه زمین ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژانم.



شکل ۱۲ الف) نمودار Dy/Yb نسبت به La/Yb [۷۲]؛ ب) نمودار Dy/Yb نسبت به Yb [۷۴] برای گدازه‌های آندزیتی بیژانم که نشان دهنده ذوب در گستره اسپینل-گارنت لرزولیت هستند.

برداشت

ترکیب لابرادوریت برای این کانی است. پیروکسن‌ها شامل کلینوپيروکسن و ارتوپيروکسن، از مهم‌ترین کانی‌های سازنده آندزیت هستند و در رده پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن-دار قرار دارند. بر پایه نمودار Al^{IV} نسبت به Al^{VI} ، کلینوپيروکسن‌های مورد بررسی در گستره فشار پایین (کمتر از ۵ کیلو بار) و مقدار آب ماگمایی بین ۲ تا ۵ درصد جای دارند. سنگ‌های بررسی شده از نظر ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، دارای ماهیت آهکی قلیایی پتاسیم بالا هستند. مقدار $Mg\#$ در این سنگ‌ها، بین ۴۲/۸۴ تا ۵۴/۴۱ متغیر بوده که بیانگر نقش اجزای گوشته‌ای در تشکیل آن‌هاست. نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده به کندریت دارای الگوی یکنواخت در REE‌ها،

سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد بررسی دارای طیف ترکیبی حدواسط تا اسیدی شامل آندزیت، تراکی‌داسیت و داسیت هستند. نهشته‌های آذرآواری وابسته به گدازه‌ها شامل توف‌های اسیدی و حدواسط، برش و آگلومرا هستند. توف‌ها گسترش زیادی دارند و بر اثر دگرسانی به کانی‌های رسی از جمله بنتونیت تبدیل شده‌اند. بافت‌های رایج در سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده پورفیری، گلومروپورفیری و پوئیکلیتیک هستند. شواهد عدم تعادل چون منطقه‌بندی، بافت غربالی و حاشیه واجبی در برخی درشت بلورهای پلاژیوکلاز دیده می‌شود. نتایج تجزیه ریزکالوالکترونی کانی پلاژیوکلاز در آندزیت‌ها بیانگر

- H. Y., Lo, C. H., "Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications", *Lithos* 87-88(2013) 231-245. 10.1016/j.lithos.2013.05.009.
- [7] Arab Dohesaran M., "Petrology of volcanic rocks in Bijaem area (northwest of Sarbisheh), Southern Khorasan with respect to their economic importance". M.Sc. thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, (2017)113p.
- [8] Baharvandi A., Mohammadi S.S., Nakhaei M., " Petrography, geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in the Boshgaz area (northwest of Sarbisheh, Southern Khorasan) ", *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 27(106)(2018) 117-128. [10.22071/gsj.2018.58324](https://doi.org/10.22071/gsj.2018.58324).
- [9] Kouchi M., Mohammadi S.S., Nakhaei M., "Geochemistry, tectonic environment and origin of Oligo-Miocene lavas in Zoolesk area, northeast of Sarbisheh (Southern Khorasan) ", *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 28(110)(2019) 255-266. [10.22071/gsj.2018.94302.1214](https://doi.org/10.22071/gsj.2018.94302.1214).
- [10] Mohammadi S.S., Chung S.L., Nakhaei M., Zarrinkoub M.H., "Thermobarometry and origin of andesitic lavas in Zoolesk area based on mineral chemistry (northeast of Sarbisheh, east Iran)", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 29(2) (2021) 479-494.
- [11] Gevorgyan H., Repstock A., Schulz B., Meliksetian K., Breitzkreuz C., Israyelyan A., "Decoding a post-collisional multistage magma system: the quaternary ignimbrites of aragats stratovolcano, western Armenia – sciencedirect", *Lithos* 318-319(2018) 267–282. 10.1016/j.lithos.2018.07.024.
- [12] Kamacı O., Altunkaynak Ş., "Magma chamber processes and dynamics beneath northwestern Anatolia: Insights from mineral chemistry and crystal size distributions (CSDs) of the Kepsut volcanic complex (NW Turkey)", *Journal of Asian Earth Sciences* 181 (2019) 103889. [10.1016/j.jseaes.2019.103889](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103889).
- [13] Laurent O., Björnsen J., Wotzlaw J., Bretscher S., Silva M.P., Moyen J., Ulmer P., Bachmann O., "Earth's earliest granitoids are crystal-rich magma reservoirs tapped by silicic eruptions", *Nature Geoscience* 13(2020)163–169. 10.1038/s41561-019-0520-6.
- [14] Guo K., Wang X., Chen Sh., Shang L., Liu B., Zhang X., Lai Zh., "The delamination of lower

نسبت بالای LREE/HREE و بی‌هنجاری منفی Eu است. غنی‌شدگی LREE ها نسبت به HREE ها در این سنگ‌ها می‌تواند ناشی از باقی‌ماندن گارنت در خاستگاه، آرایش ماگما با مواد پوسته‌ای و یا دگرنهادی سیال‌های برآمده از آبدایی پوسته اقیانوسی فرورانده باشد. ناهنجاری منفی ضعیف Eu ($Eu/Eu^* = 0.65-0.89$) که در این سنگ‌ها دیده می‌شود، بیانگر جدایش پلاژیوکلاز و از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی قلیایی وابسته به فرورانش است. یکنواختی روند الگوی پراکندگی عناصر خاکی نادر در گدازه‌های حدواسط و اسیدی نشان دهنده خاستگاه یکسان آن‌هاست. با توجه به ویژگی‌های زمین شیمیایی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیژائم مربوط به مناطق فرورانش و محیط حاشیه فعال قاره‌ای هستند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری آقای دکتر مجتبی رستمی حضوری برای همکاری در انجام تجزیه‌های ریزکاو الکترونی، سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Nazari H., Salamati R., "Geological map of Sarbisheh, sheet 7955 (Sarbisheh), scale 1:100,000", Geological Survey of Iran (1999) Tehran.
- [2] Tirrul R., Bell L.R., Griffist R.J., Camp V.E., "The Sistan suture zone of eastern Iran", *G. S.A. Bulletin* 84(1983)134-140. [10.1130/0016-7606\(1983\)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2).
- [3] Jung D., Keller, j., Khorasani, R., Marcks, C., Baumann, A., Horn P., "petrology of the Tertiary magmatic activity in the northern Lut area, east of Iran", Geological survey of Iran, Tehran, Geodynamic project (Geotraverse) in Iran 51:285-336.
- [4] Camp V. E., Griffis R. J., "Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", *Lithos* 15(1982) 221-239. 10.1016/0024-4937(82)90014-7.
- [5] Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer L., Saadat S., Malekzadeh A., "A review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, Eastern Iran", *Journal of Geopersia* 19(2011) 36.10.22059/JGEOPE.2011.22162.
- [6] Pang K. W., Chung S. L., Zarrinkoub M. H., Khatib M. M., Mohammadi S. S., Chu C. H., Lee

- [23] Nisbet E. G., Pearce J. A., "Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings", *Contributions to mineralogy and petrology* 63.2 (1977) 149-160.
- [24] Beccaluva L., Macciotta G., Piccardo G. B., Zeda O., "Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator", *Chemical Geology* 77(3-4) (1989) 165-182. [10.1016/0009-2541\(89\)90073-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90073-9).
- [25] Soesoo A., "A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: Empirical coordinates for the crystallisation PT-estimations", *GFF* 119(1) (1997) 55-60. [10.1080/11035899709546454](https://doi.org/10.1080/11035899709546454)
- [26] Nimis P., Ulmer P., "Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 133(1) (1998) 122-135.
- [27] Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Walker D., "Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 123(1996) 92-108.
- [28] Morimoto N., "Die nomenklatur von Pyroxenen", *Mineralogy and Petrology* 39 (1988) 55-76.
- [29] Sayari M., Sharifi M., "SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry", *Italian Journal of Geosciences* 133(2)(2014) 315-322. [10.3301/IJG.2014.01](https://doi.org/10.3301/IJG.2014.01).
- [30] Nimis P., Taylor W.R., "Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139(2000) 541-554.
- [31] Aoki K., Ikuko Sh., "Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan", *Lithos* 6 (1973) 41-51. [10.1016/0024-4937\(73\)90078-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(73)90078-9).
- [32] Helz R.T., "Phase relations of basalts in their melting ranges at $pH_2O=5$ kb as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases", *Journal of Petrology* 14(2) (1973) 249-302.
- [33] Takanashi K., Shuto K., Sato M., "Origin of Late Paleogene to Neogene basalts and associated coeval felsic volcanicrocks in Southwest Hokkaido, crust in continental back-arc basin: Evidence from Sr isotope and elemental compositions of plagioclase and clinopyroxene in andesites from Kueishantao, north of Taiwan, China", *LITHOS* 416-417 (2022) 106653. [10.1016/j.lithos.2022.106653](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106653).
- [15] Shane P., Costa F., Cronin S., Stirling C., Reid M., "Priming and eruption of andesite magmas at Taranaki volcano recorded in plagioclase phenocrysts", *Bulletin of Volcanology* 85(2023) 47. [10.1007/s00445-023-01661-0](https://doi.org/10.1007/s00445-023-01661-0).
- [16] Nchouwet Z., Ntieche B., Fouateu R.Y., Ntounbe M., Mounjouhou M.A., Atsalang C.G.S., Olomo M.N.A., Amidou M., "Petrogenesis and tectonic setting of the mafic rocks from the Mfengou-Manki area, Central Cameroon Shear Zone: constraints from petrology and bulk-rock geochemistry", *Discover Applied Sciences* 6.3 (2024) 100. [10.1007/s42452-024-05635-5](https://doi.org/10.1007/s42452-024-05635-5).
- [17] Putirka K.D., "Thermometers and barometers for volcanic systems", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69(2008) 61-120.
- [18] Neave D.A., Putirka K.D., "A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic riftzones", *American Mineralogist* 102.4 (2017) 777-794. [10.2138/am-2017-5968](https://doi.org/10.2138/am-2017-5968).
- [19] Cheng Z., Guo Z., Dingwell D.B., Li X., Zhang M., Liu J., Zhao W., Lei M., "Geochemistry and petrogenesis of the post-collisional high-K calc-alkaline magmatic rocks in Tengchong, SE Tibet", *Journal of Asian Earth Sciences* 193(2020):104309. [10.1016/j.jseaes.2020.104309](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104309).
- [20] Namnabat E., Ghorbani M., Nakashima K., Tabatabaei S.H., Tavakoli N., "Mineral chemistry and Petrology of the Andarian volcanic rocks: insight to the Ahar-Arasbaran magmatic zone, Northwestern Iran", *Arabian Journal of Geosciences* 14.18 (2021) 1922.
- [21] Whitney Donna L., Bernard W. Evans., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American mineralogist* 95.1 (2010) 185-187.
- [22] Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., "An introduction to the rock forming minerals", Longman Scientific and Technical, (1991) 528 P.

- Planetary Science Letters, 479(2017) 298–309. 10.1016/j.epsl.2017.09.018.
- [44] Vural A., "An evaluation of elemental enrichment in rocks: In the case of Kısacık and its neighborhood (Ayvacık, Çanakkale, Türkiye)", Journal of Geography and Cartography 6(1) (2023)1850. 10.24294/jgc.v6i1.1850.
- [45] Pearce J.A., "Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust", Lithos 100(1-4) (2008) 14–48. 10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- [46] Arslan M., Aslan Z., "Mineralogy, Petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey", Journal of Asian Earth Sciences 27(2) (2006)177-193.10.1016/j.jseaes.2005.03.002.
- [47] Kharbish S., "Geochemistry and magmatic setting of wadi El- Markh Island are gabbro-diorite central- eastern Desert, Egypt", Chemie der Erde 70(3) (2010)257-266. 10.1016/j.chemer.2009.12.007.
- [48] MacDonald R., Hawakesworth C.J., Heath J., "The lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism", Earth Science Review 49(1-4) (2000) 1-76.10.1016/S0012-8252(99)00069-0.
- [49] Sirvastava R.K., Singh R.K., "Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the Central Indian craton: evidence for mantle metasomatism", Journal of Asian Earth Sciences 23(3) (2004) 373-389.10.1016/S1367-9120(03)00150-0.
- [50] Winter J.D., "An introduction to Igneous and metamorphic petrology", Prentice Hall, New Jersey(2001)796pp.
- [51] Hirschman M., "Origin of the transgressive granophyres in the layered series of the Skaergaard intrusion, East Greenland", Journal of Volcanology and Geothermal Research 52(1) (1998) 185-207. 10.1016/0377-0273(92)90140-9.
- [52] Zhao X., Tian L., Sun J., Huang P., Li Y., Gao Y., "Petrogenesis of volcanic rocks from Eastern Manus Basin: indications in mineralogy and geochemistry. Journal of Oceanology and Limnology", 39(1)(2021) 89-109. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-9308-1>.
- [53] Cai P.R., Wang T., Wang Z.Q., Li L.M., Jia J.L., Wang M.Q., "Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks from eastern Inner Mongolia, NE China: Implications northern NE Japan arc: Constraints from Sr and Nd isotopes and major and trace-element chemistry", Lithos 125(1-2) (2011) 368–392.10.1016/j.lithos.2011.02.020.
- [34] Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram", Journal of Petrology 27(3) (1986) 745-750.
- [35] Irvine T. N., Baragar W. R. A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", Canadian Journal of Earth Sciences 8 (1971) 523-548.
- [36] Le Maitre R.W., "Igneous rocks: a classification and glossary of terms", Cambridge University Press, New York (1989) 236 pp.
- [37] Christoph B., Karsten M.H, Philipp A.B., Stefan H.K., "Primitive andesites from the Taupo Volcanic Zone formed by magma mixing", Contributions to Mineralogy and Petrology 172(2017) 33. [10.1007/s00410-017-1354-0].
- [38] Sun S.S., McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and process", In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), Magmatism in the ocean basins, Geological Society, London (1989) pp. 313–345.
- [39] Boynton W.V., "Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies", In: P. Henderson (Editor), Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, Amsterdam (1984) pp. 63–114.
- [40] Zanetti A., Mazzucchelli M., Rivalenti, G., Vannucci R., "The Finerophlogopite-peridiorite massif an example of subduction-related metasomatism", Contributions to Mineralogy and Petrology 134(1999) 107-122.
- [41] Yang W., Li S., "Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton", Lithos 102(1-3) (2008) 88–117.10.1016/j.lithos.2007.09.018.
- [42] Kuscu G.G., Geneli F., "Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepeköy volcanic complex", International Journal of Earth Sciences 99(3) (2010) 593-621.
- [43] Ribeiro J.M., Lee C.A., "An imbalance in the deep water cycle at subduction zones: the potential importance of the fore-arc mantle", Earth and

- [61] Rocchi S., Di Vincenzo G., Dini A., Petrelli M., Vezzoni S., "Time-space focused intrusion of genetically unrelated arc magmas in the early Paleozoic ross-delamerian orogen (morozumi range, antarctica)", *Lithos* 232 (2015) 84–99. 10.1016/j.lithos.2015.06.006.
- [62] Verma S. P., Verma S. K., "First 15 probability-based multidimensional tectonic discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against post emplacement compositional changes and petrogenetic processes", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22(6) (2013) 931–995. 10.3906/yer-1204-6.
- [63] Condie K.C., "TTG and adakites: are they both slab melts?", *Lithos* 80(1-4) (2005) 33–44. 10.1016/j.lithos.2003.11.001.
- [64] Castillo P. R., "An overview of adakite petrogenesis", *Chinese Science Bulletin* 51(2006) 257-268.
- [65] Siddiqui R. H., Asif Khan M., Qasim-Jan, M., "Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits", *Journal of Himalayan Earth Sciences* 40(2007) 1–23.
- [66] Helvacı C., Ersöy E.Y., Sozbulir H., Erkul F., Sumer O, Uzel B., "Geochemistry and Ar⁴⁰/Ar³⁹ Geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implication for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 185(2009) 181-202.
- [67] Esperanca S., Crisci G. M., de Rosa R., Mazzuoli R., "The role of the crust in the magmatic evolution of the island Lipari (Aeolian Islands, Italy)", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 112(1992) 450-462.
- [68] Harangi S., Downes H., Thirlwall M., Gmelin K., "Geochemistry, petrogenesis and geodynamic relationships of Miocene calcalkaline volcanic rocks in the Western Carpathian arc, eastern Central Europe", *Journal of Petrology* 48(2007) 2261-2287. 10.1093/petrology/egm059.
- [69] Hoang N., Itoh J., Miyagi I., "Subduction components in Pleistocene to recent Kurile arc magmas in NE Hokkaido, Japan", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 200(2011) 255-266. 10.1016/j.jvolgeores.2011.01.002.
- [70] Kelemen P., "Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic liquid I. Phase for igneous petrogenesis, tectonic setting, and geodynamic evolution of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt", *Lithos* 362–363(2020) 105480. 10.1016/j.lithos.2020.105480.
- [54] Sun S., Song Z., Han Z., Ren X., Wei P., "Petrogenesis of Early Cretaceous volcanic rocks in the southeastern margin of the Songliao Basin, NE China: implications for the geodynamic evolution of Paleo-Pacific Ocean", *International Journal of Earth Sciences* 113(2024) 687–712. 10.1007/s00531-024-02400-2.
- [55] Liu X., Zhang Q., Zhang Ch., "Identification of the Original Tectonic Setting for Oceanic Andesite Using Discrimination Diagrams: An Approach Based on Global Geochemical Data Synthesis", *Journal of Earth Science* 33(3) (2022) 696-705. 10.1007/s12583-021-1507-y.
- [56] Magni V., "The effects of back-arc spreading on arc magmatism", *Earth and Planetary Science Letters* 519(2019) 141–151. 10.1016/j.epsl.2019.05.009.
- [57] Chen Z., Chen J., Zeng Z., Soh Tamehe L., Zhang T., Zhang Y., Yin X., Wang X., Chen S., Shuai W., "Zinc isotopes of the Mariana and Ryukyu Arc-related lavas reveal recycling of forearc serpentinites into the subarc mantle", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 126.11 (2021): e2021JB022261.[10.1029/2021JB022261].
- [58] Taniuchi H., Kuritani Y., Nakagawa M., "Generation of calc-alkaline andesite magma through crustal melting induced by emplacement of mantle-derived water-rich primary magma: Evidence from Rishiri Volcano, southern Kuril Arc", *Lithos* 354–355 (2020) 105362. 10.1016/j.lithos.2019.105362.
- [59] Zheng Y.F., Zhao Z.F., "Introduction to the structures and processes of subduction zones", *Journal of Asian Earth Sciences* 145(2017) 1–15. 10.1016/j.jseaes.2017.06.034.
- Aoki K., Shiba I., "Pyroxene from ilmenite inclusions of Itinomegata, Japan", *Lithos* 6(1) (1973) 41-51.
- [60] Hu W.L., Wang Q., Yang J.H., Hao L.L., Wang J., Qi Y., Zong-Yong Yang Z.Y., Sun P., "Growth of the continental crust induced by slab rollback in subduction zones: Evidence from Middle Jurassic arc andesites in central Tibet", *Gondwana Research* 117 (2023) 8–22. 10.1016/j.gr.2023.01.001.

- investigations of Simlipal volcanics from Eoarchean Singhbhum Craton (Eastern India): geodynamic implications of pervasive plume–lithosphere interaction*", *International Journal of Earth Sciences* 111(2022)1149–1184. [10.1007/s00531-022-02170-9].
- [74] An A.R., Choi S.C., Yu Y., Le D.C., "petrogenesis of Late Cenozoic basaltic rocks from southern Vietnam", *Lithos* 272–273(2017)192–204. 10.1016/j.lithos.2016.12.008.
- [75] Song X.Y., Zhou M.F., Hou Z.Q., Cao Z.M., Wang Y.L., Li Y., "Geochemical constraints on the Mantle source of the Upper Permian Emeishan Continental Flood Basalts, Southwestern China". *International Geology Review* 43(3) (2001) 213–225. 10.1080/00206810109465009.
- relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite*", *Journal of Petrology* 31(1) (1990) 51–98. 10.1093/petrology/31.1.51.
- [71] Davidson J., Turner S., Plank T., "Dy/Dy*: Variations arising from mantle sources and petrogenetic processes", *Journal of Petrology* 54(3) (2013) 525–537. 10.1093/petrology/egs076.
- [72] Yang Q.Y., Santosh M., Shen J.F., Li S.R., "Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiadong Peninsula", *Gondwana Research*, 25(4) (2014) 1445–1468. 10.1016/j.gr.2013.06.003.
- [73] Dwivedi S.K., Jafri S.H., Srinivasa Sarma D., Tripathi P., Parthasarathy G., Pandey O.P., "Mineral chemistry, geochemistry and geophysical