



سنگ‌شناسی و خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی پلیوکواترنر جنوب شرق نیر، جنوب استان یزد

شهزاد شرافت*، محمدرضا اسدالهی نژاد اناری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۶/۲، نسخه نهایی: ۹۹/۸/۵)

چکیده: در جنوب شرق نیر و جنوب استان یزد، رخنمون‌های بسیاری از آتشفشان‌های اسیدی برونزد دارند که جوانترین تظاهرات آتشفشانی منطقه با ترکیب داسیتی-ریوداسیتی را تشکیل داده‌اند. این سنگ‌ها از کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت و کوارتز تشکیل شده‌اند و بافت‌های جریان‌ی و شیشه‌ای ریز سنگی پورفیری دارند. بر پایه داده‌های زمین‌شیمیایی، سرشت ماگمایی سنگ‌ها آهکی قلیایی و غنی از عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) و تهی از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) است. این ویژگی به همراه الگوی جدایش یافته عناصر خاکی نادر و ناهنجاری منفی عنصرهای با شدت میدان بالا (P و Ti, Nb) بیانگر شکل‌گیری ماگما در موقعیت‌های وابسته به کرانه فعال قاره‌ای است. مقادیر بالای Sr ، Sr/Y ، La/Yb و به همراه مقادیر پائین Yb ، MgO و Y ، سرشت آداکیتی پرسیلیس این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که تشکیل ماگمای سازنده سنگ‌ها پیامد ذوب بخشی خاستگاه گارنت آمفیبولیتی یا اکلوزیتی ناشی از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورو نتوتیس در پهنه برخوردی ایران مرکزی-عربستان در دوره نئوژن باشد.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌های آتشفشانی پلیوکواترنر؛ آهکی قلیایی؛ آداکیت؛ کمان ماگمایی ارومیه دختر؛ یزد.

مقدمه

تاکنون پژوهش‌های بسیاری پیرامون آتشفشان‌های جوان ایران به‌ویژه در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر انجام شده [۵-۹] که منجر به شناسایی و گزارش برخی از آنها به نام سنگ‌های آداکیتی وابسته به فرورانش شده است. آداکیت‌ها واحدهای سنگی حدواسط-اسیدی سرشار از سیلیس (۵۶ درصد وزنی)، آلومین (بیش از ۱۵ درصد وزنی) و سدیم (بیش از ۳/۵ درصد وزنی) با کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت هستند [۱۰] که نسبت به دیگر سنگ‌های رخنمون یافته در مرزهای فعال قاره‌ای، نسبت‌های Sr/Y و La/Yb بالا و مقادیر Y و Yb کمی دارند [۱۱]. بررسی‌های انجام شده بر مجموعه آتشفشانی پلیوکواترنری حسن آباد دره زرشک در جنوب غرب شهرستان یزد نشانگر سرشت آداکیتی پرسیلیس و تشکیل آن

گنبد‌های آتشفشانی جوان جنوب نیر در استان یزد، بخشی از فعالیت ماگمایی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر در کرانه غربی پهنه ساختاری ایران مرکزی و پهنه برخوردی ایران مرکزی-عربستان را تشکیل داده‌اند. پهنه ماگمایی ارومیه-دختر جایگاه فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک و ناشی از فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی نتوتیس به زیر ورقه قاره‌ای ایران مرکزی است [۱]. فعالیت ماگمایی این پهنه در ائوسن با فعالیت شدید آتشفشانی شروع شده [۲] و پس از برخورد صفحه عربی و ایران مرکزی، فرایند فرورانش تا نئوژن [۳] و فعالیت ماگمایی پس از برخورد تا کواترنر ادامه یافته‌است [۴]. فعالیت‌های آتشفشانی جوان ایران ادامه فعالیت‌های ترشیری بوده است و اغلب آتشفشان‌های جوان، فعالیت خود را از میوسن شروع کرده و تا

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۱۶۵۱۱۰، نمابر: ۰۳۱۴۵۲۰۰۸۱۵، پست الکترونیکی: sh_sherafat@yahoo.com

از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورانده است [۹]. سنگ‌های آداکیتی رابر- لاله‌زار در جنوب شرق کرمان از ذوب بخشی پوسته زیرین مافیک (آمفیبولیت گارنت‌دار) در عمق بیش از ۵۰ کیلومتر بوجود آمده‌اند [۸]. تاکنون پژوهش مستقلی پیرامون سنگ‌زایی و خاستگاه گنبد‌های آتشفشانی جنوب نیر صورت نگرفته و تنها بررسی‌های انجام شده بر بخشی از گنبد‌های آتشفشانی غرب منطقه متمرکز بوده است [۱۲]. در این پژوهش، برای نخستین بار ویژگی‌های سنگ‌نگاری، زمین‌شیمیایی، محیط دینامیکی، خاستگاه و سنگ‌زایی گنبد‌های آتشفشانی آداکیتی منطقه بررسی شده است. نتایج این پژوهش کمک شایانی به درک چگونگی شکل‌گیری سنگ‌های آتشفشانی پلیوکواترنر پهنه ارومیه- دختر، سرنوشت صفحه فرورو و مباحث مربوط به فرورانش در پهنه برخوردی ایران و عربستان می‌نماید.

روش بررسی

در این پژوهش، براساس تصاویر ماهواره‌ای، مسیرهای دستیابی به بروندهای سنگی تعیین گردیده و بازدیدهای میدانی و نمونه‌برداری انجام شد. در مرحله بعد، ۸۰ مقطع نازک میکروسکوپی از گنبد‌های آتشفشانی منطقه تهیه و از نظر سنگ‌نگاری به دقت بررسی شدند. پس از بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها، ۱۰ نمونه با کمترین دگرسانی و با روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی^۱ (ICP-MS) در آزمایشگاه ACME کانادا تجزیه شدند. حد آشکارسازی برای عناصر اصلی ۰/۰۱ درصد و برای عناصر کمیاب ۵ppm-۰/۵ است. برای نتیجه‌گیری بهتر، از یافته‌های پیشین [۱۳] نیز استفاده شد. در مرحله آخر، داده‌های برآمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی با هم ترکیب و تحلیل شدند.

بحث و بررسی

گنبد‌های آتشفشانی جوان جنوب شرق نیر میان فروافتادگی کرانه‌ی جنوبی کوهستان شیرکوه و دشت گسترده بهادران یزد، به فاصله تقریبی ۱۰۰ کیلومتری جنوب یزد واقع بوده و بخشی از چارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی نیر بین عرض‌های شمالی ۳۱° ۱۰' تا ۳۱° ۲۰' و طول‌های شرقی ۵۴° ۰۵' تا ۵۴° ۳۰' ۱۰'

هستند. بر پایه تقسیم‌بندی ساختاری ایران، منطقه مورد پژوهش در بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه دختر و کرانه غربی پهنه ایران مرکزی قرار دارد [۱۴]. در این منطقه، سازندهای پالئوزوئیک تا کواترنر دیده می‌شوند. ارتفاع‌های شمال و شمال شرقی منطقه از سازندهای دوران اول و دوم تشکیل شده‌اند. ارتفاع‌های جنوب شرقی را سنگ‌های آتشفشانی و ارتفاع‌های جنوب غربی را نهشته‌های تخریبی ترشیری به وجود آورده‌اند. گنبد‌های اسیدی جوان در بخش میانی نقشه در تل‌کفتری، تل‌گذارباغ، تل‌شکارگاه، چاه‌زرد، ارنان و دامنه‌های جنوبی آن با دو ریختار ناهمسان، یکی با سطح خشن و ستیغ ساز و دیگری با سطحی تپه ماهوری، دیده می‌شوند و مرتفع‌ترین آنها ارنان با ارتفاع ۲۸۹۹ متر است [۱۵]. بیشتر این گنبد‌ها منفرد و مستقل هستند و درون ته‌نشست‌های رسوبی نئوژن جایگزین شده‌اند (شکل ۱).

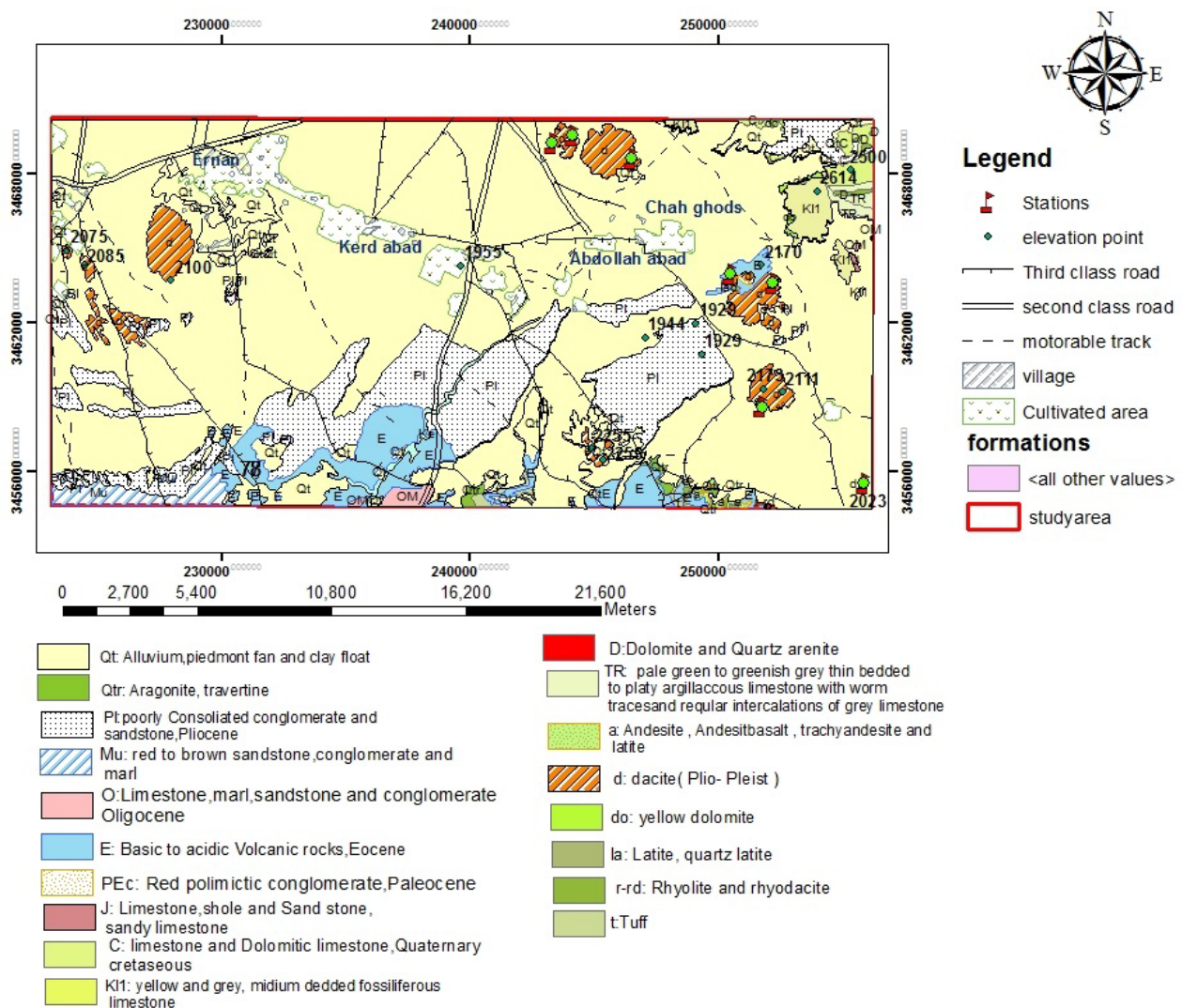
کهن‌ترین رخنمون سنگی ارتفاع‌های شمال شرقی منطقه، واحدهای سنگ‌چینه‌ای پالئوزوئیک- مزوزوئیک هستند که با آهک‌های خاکستری کربونیفر پسن- پرمین پیشین شروع شده و با سنگ‌های کربناتی و ماسه‌سنگ وابسته به پرمین پوشانده می‌شوند. آهک‌ها و دولومیت‌های تریاس با یک همبری گسله در کنار واحدهای کرتاسه پیشین قرار دارند. واحدهای کرتاسه با نهشته‌های کربناتی- تخریبی به نام سازند تفت شروع شده و با سازندهای کنگلومرای و آهکی کرتاسه بالایی پایان می‌یابند. نهشته‌های سنوزوئیک منطقه با کنگلومرای چندزادی پالئوسن (هم‌ارز کنگلومرای کرمان) شروع شده و با مارن‌های سنگ گچ، آهک، شیل و توف ماسه‌ای پالئوسن ادامه یافته‌است. حجم گسترده‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن شامل تراکیت، داسیت، ریوداسیت، بازالت، آندزیت، توف و آهک‌های بازتبلور یافته، ارتفاع‌های تپه‌ماهوری بخش جنوبی منطقه را تشکیل داده‌اند.

نهشته‌های نئوژن در بخش غربی منطقه با ماسه‌سنگ قرمز، کنگلومرا و مارن میوسن شروع شده و با کنگلومرای چندزادی پلیو- پلیستوسن ادامه می‌یابند. بروندهای متعدد گنبد‌های آذرین جوان (پلیو- پلیوستوسن) با ریختار به نسبت خشن و مرتفع، کنگلومرای کرتاسه، نهشته‌های ائوسن و گاهی رسوب‌های جوانتر را قطع کرده‌اند. جدیدترین نهشته‌های منطقه را

خمیری و یا حرکت‌های نامنظم درونی مذاب و ساخت نواری جریانی، از نمودهای ساختاری جالب در سنگ‌های منطقه هستند (شکل‌های ۲ و ۳ ج). ریخت و عمق جایگزینی توده ماگمایی و دگرشکلی لایه‌های دربرگیرنده توسط تفاوت گرانیوی ماگمای بالارو با سنگ‌های دربرگیرنده کنترل می‌شود [۱۶]. تفاوت ناچیز گرانیوی منجر به شکل‌گیری نهان‌گنبدها یا گنبدهای خروجی و تفاوت بسیار آن موجب گدازه، مواد آذرآواری یا مخلوطی از هر دو (آتشفشان چینه‌ای) می‌شود که در منطقه مورد پژوهش، هر دو ساختار گنبدی و مخروط آتشفشانی دیده می‌شود.

پادگانه‌های آبرفتی و انباشته‌های آواری سخت‌نشده تشکیل داده که بخش اعظم منطقه را پوشانده‌اند.

توده‌های اسیدی جوان (پلیو- پلیوستوسن) به شکل گنبد و یا مخروط آتشفشانی مرکب برونزد یافته‌اند (شکل ۲ الف). گنبدها بدون فعالیت‌های انفجاری هستند و تنها گاهی برش-های ریزشی پیرامون آنها وجود دارد (شکل ۲ ب). مخروط‌های آتشفشانی از انواع مواد آذرآواری و جریان گدازه (شکل ۲ پ) تشکیل شده‌اند. شکل ۲ ت نهشته‌های ریزشی با ذرات جور نشده خاکستر و لاپیلی در پای تل شکارگاه را نشان می‌دهد. درزه‌های انحدار ناشی از کشش طی سرد شدن در محیط



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه، برگرفته از مرجع [۱۵] با تغییرات.



شکل ۲ الف) رخنمون گنبدی شکل تل گذارباغ، دید به سمت غرب؛ ب) برش ریزشی پای گنبد تل گذارباغ؛ پ) مخروط آتشفشانی مرکب تل شکارگاه، دید به سمت جنوب غرب؛ ت) نهشته‌های ریزشی جور نشده خاکستر و لاپیلی؛ ث) درزه‌های انحنادار ناشی از کشش طی سرد شدن؛ ج) ساخت نواری جریان‌ی در تل کفتری.

سنگ‌نگاری

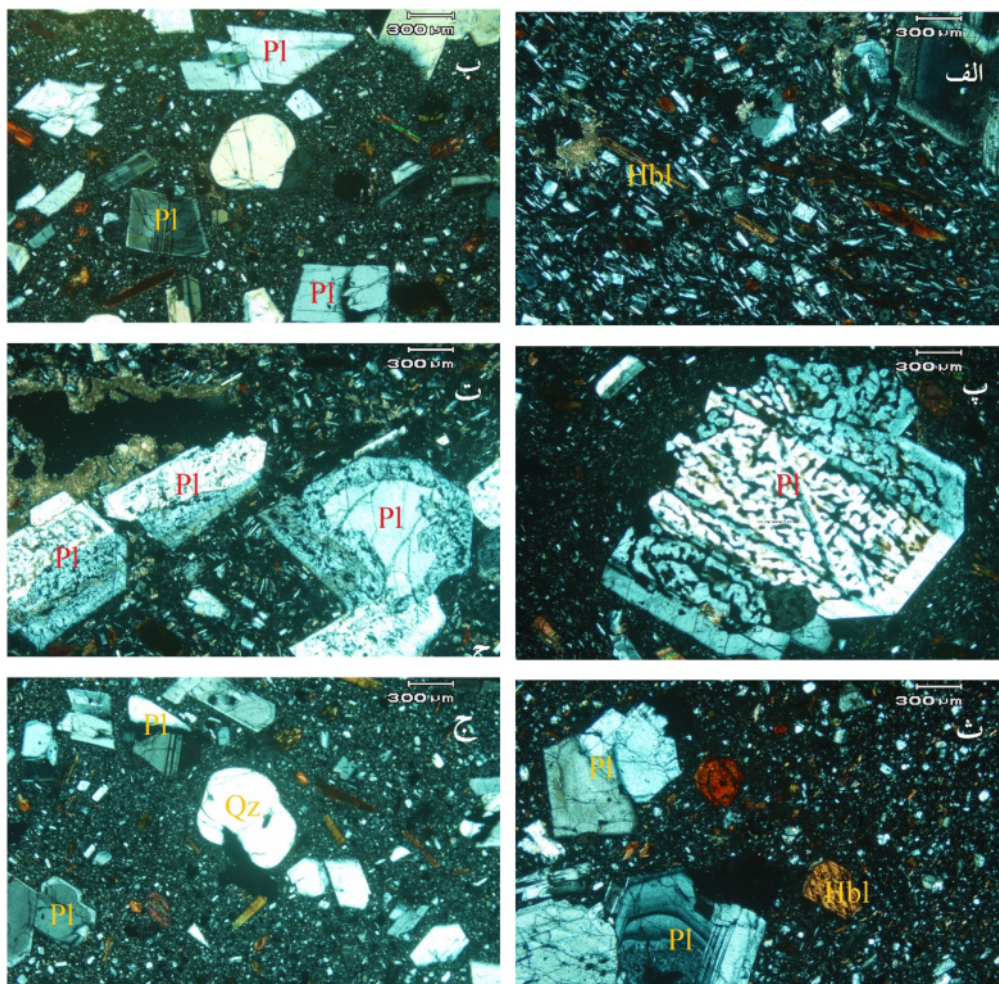
سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر رنگ خاکستری روشن و بافت پیدابلور دارند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، ترکیب سنگ‌های مورد بررسی در گستره داسیت و ریوداسیت قرار دارد و کانی‌های آن شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز، بیوتیت، فلدسپار قلیایی و اکسیدهای آهن-تیتانیوم است که در زمینه-ای شامل شیشه و بلورهای ریز فلدسپات و کوارتز قرار دارند و بافت‌های شیشه‌ای پورفیری و شیشه‌ای ریز سنگی پورفیری و گاهی جریان‌ی را به نمایش می‌گذارند (شکل‌های ۳ الف و ب). پلاژیوکلاز و هورنبلند فراوان‌ترین درشت بلورهای سنگ را تشکیل داده‌اند. پلاژیوکلازهای تخته‌ای خودشکل تا نیمه‌شکل-دار با طول تقریبی ۰/۵ تا ۳ میلیمتر، دارای ماکل تکراری و

ساختار منطقه‌ای هستند و حدود ۶۵ درصد درشت بلورهای سنگ را تشکیل داده‌اند. در برخی نمونه‌ها، درشت بلورهای پلاژیوکلاز بافت اسکلتی و غربالی، منطقه‌بندی و لبه غبارآلود دارند (شکل‌های ۳ پ و ت) که شرایط نامتعادل در فرایند تبلور ماگما را نشان می‌دهد. بافت غربالی پلاژیوکلاز نشانگر عدم تعادل و تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی ماگمای در حال تبلور است که در پی کاهش فشار ناشی از صعود و گاززدایی ماگما، ورود سیال به درون آشیانه ماگمایی، افزایش دمای ناشی از ورود یک ماگمای داغ جدید و آلایش ماگمایی [۱۷-۱۹] رخ می‌دهد. در پلاژیوکلازهای مورد بررسی، این بافت به سبب کاهش فشار ماگمای در حال صعود و گاززدایی ماگما بوجود آمده است.

بررسی‌های کانی‌شناسی تاریخیچه تبلور سنگ را مشخص می‌نماید. خودشکل بودن بیشتر درشت‌بلورهای موجود در سنگ، بیانگر تشکیل آنها در آغاز تبلور ماگماست. وجود درشت‌بلورهای فراوان در سنگ توقف به نسبت طولانی ماگما در اتاقک‌های زیرسطحی را نشان می‌دهد. همراهی آمفیبول و بیوتیت در سنگ نشانگر بالا بودن فشار مواد فرار در ماگمای مادر است. با صعود ماگما و افزایش فشار مواد فرار، بافت‌های غربالی، لبه‌های غبارآلود و خوردگی خلیجی در کانی‌های سنگ ایجاد شده و در مرحله آخر با بیرون‌ریزی سریع ماگما، لبه‌های کدر شده کانی‌های فرومنیزین و خمیره شیشه‌ای سنگ شکل گرفته است.

درشت‌بلورهای خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار هورنبلند با فراوانی تا ۱۵ درصد اغلب دارای منطقه‌بندی و لبه سوخته هستند (شکل ۳ ث). کدر شدن لبه هورنبلند پیامد بالا بودن گریزندگی اکسیژن و تسریع فرایند اکسایش در سطح کانی به واسطه افزایش تصاعدی مواد فرار طی بیرون‌ریزی ماگماست [۲۰].

بیوتیت‌های خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار (با فراوانی تا ۱۰٪) فراوانی بسیار کمتری نسبت به آمفیبول دارند. درشت‌بلورهای نیمه‌شکل‌دار کوارتز با فراوانی ۵ تا ۱۵ درصد خوردگی خلیجی و گاهی لبه گردشده دارند (شکل ۳ ج) که می‌تواند ناشی از انحلال یا ذوب کانی در نتیجه کاهش فشار و مواد فرار طی صعود ماگما به سطح زمین باشد [۲۱].



شکل ۳ تصویرهای میکروسکوپی از بافت‌ها و کانی‌های سنگ‌های آتشفشانی پلیوکواترنر جنوب شرق نیز: الف) بافت جریان‌ی شکل گرفته از موازی قرار گرفتن ریز سنگ‌ها و بلورهای پلاژیوکلاز، ب) بافت شیشه‌ای پورفیری با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند، پ) بافت غربالی در بلور پلاژیوکلاز، ت) بلورهای پلاژیوکلاز با لبه‌های غبارآلود، ث) بلورهای هورنبلند شکل دار با لبه کدر شده و ج) درشت‌بلور کوارتز با خوردگی خلیجی (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها، Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Qz: کوارتز، از مرجع [۲۲] هستند).

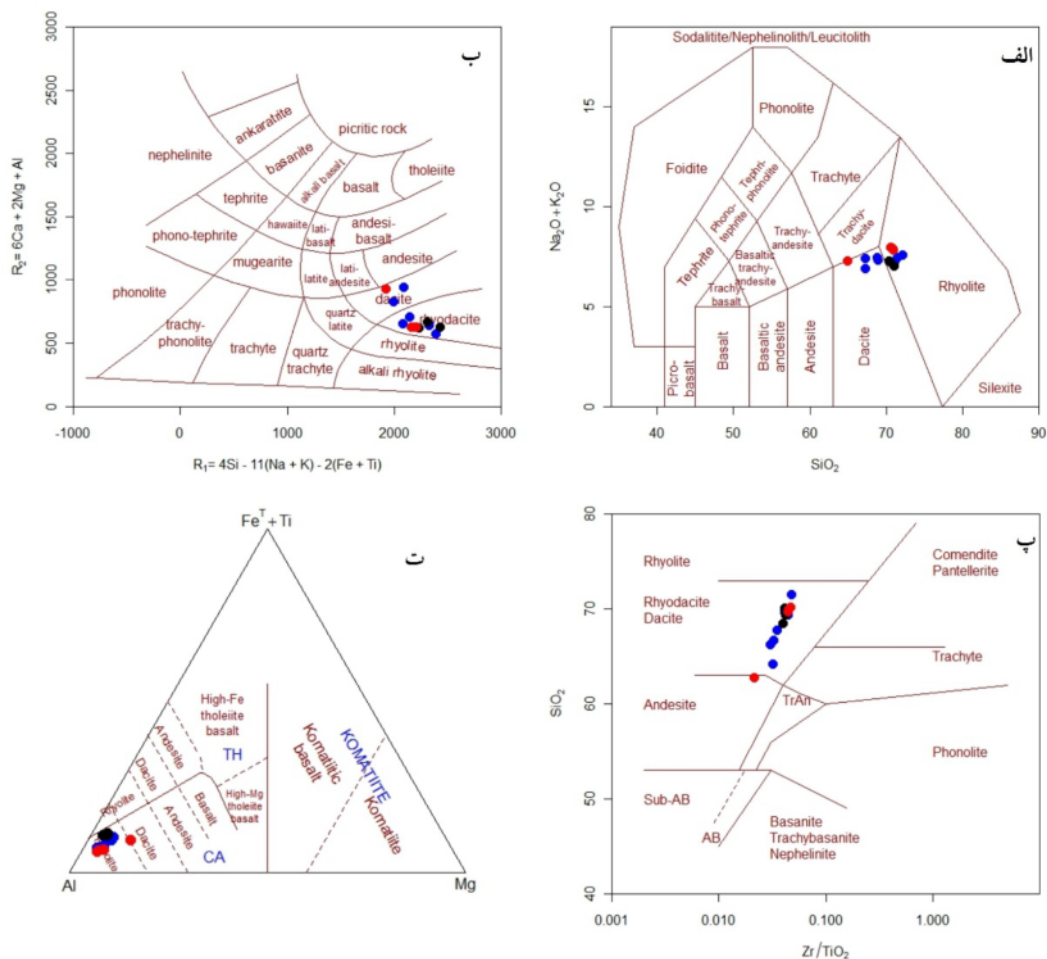
زمین شیمی

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب نمونه- های جنوب شرق نیر را نشان می‌دهد. گستره تغییرات مقدار SiO_2 در سنگ‌ها ۶۲/۸۰ تا ۷۱/۵۲ درصد، Na_2O ۵/۰۵-۴/۳۹ و K_2O ۲/۹۹-۱/۷۸ درصد وزنی است. بر این اساس، سنگ‌ها از نوع داسیت و ریوداسیت هستند. از آنجا که زمینه سنگ‌های مورد بررسی از شیشه و بلورهای ریز فلدسپات و

کوارتز ساخته شده است، برای نامگذاری سنگ‌ها از رده‌بندی شیمیایی استفاده شد. بر پایه نمودارهای رده‌بندی $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ نسبت به SiO_2 [۲۳] و R1-R2 [۲۴]، نمونه‌ها در گستره ترکیبی داسیت و ریوداسیت قرار دارند (شکل‌های ۴ الف و ب). ترکیب سنگ‌شناسی توده‌ها با نمودار تغییرات SiO_2 نسبت به Zr/TiO_2 [۲۵] و نمودار کاتیونی [۲۶] نیز تأیید می‌شود (شکل‌های ۴ پ و ت).

جدول ۱ داده‌های تجزیه شیمیایی اکسید عنصرهای اصلی (بر حسب wt%)، کمیاب و خاکی نادر (بر حسب ppm) در سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر (نمونه‌هایی که با حرف K در شروع نام آنها برگرفته از مرجع [۱۳] هستند)

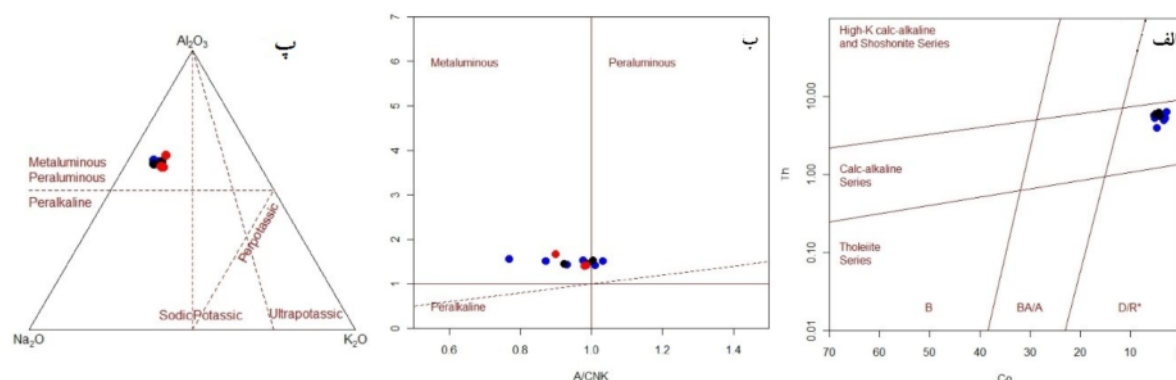
	T3-2	T1-1	TS5-1	TS7-2	TS6-3	TS3-1	T4-3	SE-4	ER-4	ER-7	KSE1	KSE2	KSE3	KSE6
SiO_2	۷۱.۵۲	۶۹.۳۶	۶۶.۷۱	۶۴.۲۲	۶۷.۷۵	۶۶.۲۴	۶۹.۶۱	۶۸.۵۳	۷۰.۰۸	۶۹.۳۶	۶۱.۶۳	۶۸.۸۰	۶۹.۲۷	۶۹.۰۳
TiO_2	۰.۲۳	۰.۲۸	۰.۴	۰.۳۳	۰.۳۷	۰.۴۱	۰.۲۴	۰.۳۰	۰.۳۴	۰.۳۲	۰.۵۴	۰.۳۸	۰.۳۵	۰.۳۳
Al_2O_3	۱۵.۲۳	۱۵.۲۹	۱۶.۰۵	۱۵.۲۵	۱۶.۱۹	۱۶.۲۷	۱۴.۹۷	۱۵.۲۱	۱۵.۲۴	۱۴.۹۷	۱۶.۵۶	۱۵.۵۳	۱۵.۶۳	۱۵.۶۶
Fe_2O_3	۰.۸۰	۰.۸۹	۱.۲۷	۱.۱۳	۱.۱۷	۱.۳	۰.۷۸	۱.۲۸	۱.۲۶	۱.۳۶	۲.۵۴	۱.۴۸	۱.۳۷	۱.۳۱
FeO	۰.۸۰	۰.۸۹	۱.۲۷	۳	۱.۱۷	۱.۳	۰.۷۸	۱.۲۹	۱.۲۶	۱.۳۶	۳.۵۷	۲.۱۵	۱.۹۸	۱.۹۰
MnO	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۱۰	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۶
MgO	۰.۴۶	۰.۶۹	۰.۹۳	۰.۸۶	۰.۸۳	۰.۸۵	۰.۵۳	۰.۶۱	۰.۴۵	۰.۵۷	۱.۷۹	۰.۷۵	۰.۶۱	۰.۵۸
CaO	۲.۳۷	۲.۸۵	۲.۷۲	۵.۵۸	۳.۲۶	۴.۳۶	۳.۰۶	۲.۷۱	۲.۸۴	۳.۲۴	۴.۶۸	۲.۶۰	۲.۶۳	۲.۶۵
Na_2O	۴.۷۲	۴.۷۶	۴.۹۱	۴.۸۰	۵.۰۵	۵.۲۰	۴.۶۹	۵.۰۳	۴.۴۸	۴.۵۶	۴.۳۱	۴.۸۲	۴.۹۳	۴.۹۱
K_2O	۲.۷۸	۲.۳۶	۲.۳۲	۱.۷۸	۲.۱۷	۲.۱۰	۲.۵۷	۲.۰۱	۲.۴۴	۲.۶۱	۲.۶۰	۲.۹۵	۲.۸۱	۲.۷۷
L.O.I	۰.۷۰	۲.۲۰	۱.۹۰	۴.۴	۱.۵	۱.۳	۲.۴	۲.۷	۱.۱	۱.۷	۱.۷	۰.۴۷	۰.۳۷	۰.۸۲
مجموع	۱۰۰.۶۳	۹۹.۲۷	۹۹.۲۹	۹۹.۵۹	۱۰۰.۴۶	۱۰۰.۹	۹۸.۹۲	۹۹.۹۴	۹۹.۸۰	۹۹.۷۶	۱۰۰.۰۰	۹۹.۹۹	۱۰۰.۱	۱۰۰.۰۲
P_2O_5	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۱۶	۰.۱۰	۰.۱۴	۰.۱۸	۰.۰۷	۰.۱۰	۰.۱۴	۰.۱۲	۰.۲۳	۰.۱۴	۰.۱۲	۰.۱۱
Ba	۷۳۲	۶۵۲	۶۸۴	۴۹۰	۶۸۷	۶۶۷	۶۶۴	۷۲۰.۵	۶۸۴.۶	۷۱۱	۶۸۳	۴۷۷	۴۳۹	۴۳۵
Rb	۵۳.۷	۴۶	۳۸.۷	۳۱.۲	۴۰.۲	۳۵.۸	۴۲.۸	۴۲.۴	۴۴.۲	۴۷.۴	۵۴	۶۶	۵۷	۵۵
Sr	۵۱۱.۶	۵۴۰.۳	۸۰۴.۸	۸۹۵.۸	۷۶۷.۴	۸۷۲.۳	۵۴۳.۶	۷۵۵.۹	۵۶۵.۷	۵۷۵.۳	۸۲۳	۵۲۷	۵۴۲	۵۷۹
Zr	۱۱۰.۲	۱۲۳.۳	۱۳۰.۳	۱۰۴.۵	۱۲۸.۲	۱۲۳.۸	۹۹.۵	۱۱۹.۳	۱۳۹.۵	۱۳۳.۳	۱۱۷	۱۷۴	۱۵۸	۱۵۸
Nb	۲.۳	۲.۸	۴	۲.۸	۳.۶	۳.۷	۲.۳	۴.۲	۳.۹	۴	۴	۲	۱	۱
Ni	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۷	۵.۴	۶.۴	۸	۱	۰	۸
La	۲۲.۷	۲۱.۴	۲۸.۷	۱۶.۶	۲۷.۳	۲۸.۷	۱۸.۷	۲۳.۱	۲۲.۸	۲۳.۵	۲۴	۲۲	۱۸	۱۲
Ce	۳۷.۷	۳۶.۸	۵۰.۵	۳۰.۱	۴۹.۶	۵۰	۳۵	۴۲	۴۱.۷	۴۳.۵	*	*	*	*
Pr	۳.۸۵	۳.۷۶	۵.۳۳	۳.۲۵	۵.۱۹	۵.۴۴	۳.۳۵	۴.۶۷	۴.۵۷	۴.۶۲	*	*	*	*
Nd	۱۳.۳	۱۳	۱۸.۷	۱۲.۱	۱۸	۱۹.۸	۱۲.۱	۱۶.۸	۱۵.۱	۱۶.۲	*	*	*	*
Sm	۲.۲۴	۲.۱۳	۳.۱۵	۱.۹۷	۲.۹۴	۳.۰۹	۱.۹۸	۲.۸۰	۲.۶	۲.۷۰	*	*	*	*
Eu	۰.۶۱۰	۰.۶۲	۰.۸۲	۰.۶۲	۰.۸۲	۰.۹۴	۰.۵۸	۰.۷۴	۰.۷۳	۰.۷۱	*	*	*	*
Gd	۱.۵۷	۱.۵۴	۲.۲۶	۱.۶۷	۲.۰۷	۲.۲۸	۱.۴۳	۱.۷۵	۱.۷۵	۱.۹۳	*	*	*	*
Tb	۰.۲۰	۰.۱۹	۰.۲۶	۰.۲۲	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۱۸	۰.۴۲	۰.۲۵	۰.۳۱	*	*	*	*
Dy	۰.۹۵	۰.۹۵	۱.۱۳	۱.۱۶	۱.۱۵	۱.۲۷	۰.۸۳	۰.۱۶	۱.۲۵	۱.۴۳	*	*	*	*
Ho	۰.۱۴	۰.۱۴	۰.۱۸	۰.۲۰	۰.۱۸	۰.۲۱	۰.۱۲	۰.۱۷	۰.۲۲	۰.۳۱	*	*	*	*
Er	۰.۳۹	۰.۴۲	۰.۵۵	۰.۴۴	۰.۴۹	۰.۵۳	۰.۳۳	۰.۴۹	۰.۰۶۲	۰.۶۶	*	*	*	*
Tm	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۰۷	۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۰۶	۰.۴۰	۰.۹۰	۰.۰۹	۰.۱۰	*	*	*	*
Yb	۰.۳۸	۰.۳۳	۰.۴۴	۰.۵۲	۰.۴۸	۰.۵۰	۰.۳۶	۰.۴۲	۰.۶۱	۰.۷۸	*	*	*	*
Lu	۰.۰۵	۰.۰۴	۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۹	۰.۰۹	۰.۱۰	*	*	*	*
Y	۵	۴	۵.۷	۵.۶	۵.۳	۵.۷	۳.۹	۵.۹	۷.۸	۸	*	*	*	*
Cs	۱.۳	۱	۰.۹	۰.۷	۱.۲	۰.۵	۱.۱	۱.۵	۱	۱	*	*	*	*
Ta	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰.۳	۰.۳	۰.۴	*	*	*	*
Hf	۳	۳.۱	۳.۴	۲.۶	۳.۴	۳.۴	۲.۷	۳.۶	۳.۸	۳.۷	۴	۵	۵	۵
Th	۶.۴	۵	۵.۷	۴	۶	۵.۳	۵.۳	۵.۶	۵.۹	۶.۲	*	*	*	*
U	۲.۴	۱.۸	۲.۳	۲	۲.۳	۱.۹	۲.۲	۲.۲	۱.۹	۲.۱	*	*	*	*
V	۲.۶	۳.۴	۴.۷	۴.۱	۴.۲	۲.۸	۲.۷	۳.۱	۳.۱	۳.۳	*	*	*	*
Lol	۰.۷	۲.۲	۱.۹	۴.۴	۱.۵	۱.۳	۲.۴	۲.۷	۱.۱	۱.۱	*	*	*	*
Ga	۱۸.۶	۱۶.۸	۱۸	۱۵.۶	۱۸.۴	۱۸.۵	۱۶.۴	۲۰.۴	۲۰	۲۰.۲	*	*	*	*
Sc	۲	۳	۳	۳	۳	۴	۲	۳	۳	۳	*	*	*	*
$\text{La}_{\text{N}}\text{Yb}_{\text{N}}$	۳۹.۸۲	۴۳.۲۳	۴۳.۴۸	۲۱.۲۸	۳۷.۹۲	۳۸.۲۷	۳۴.۶۳	۳۶.۶۷	۲۴.۹۲	۲۰.۰۹	*	*	*	*
YbN	۱.۷۳	۱.۵۰	۲.۰۰	۲.۳۶	۲.۱۸	۲.۲۷	۱.۶۴	۱.۹۱	۲.۷۷	۳.۵۵	*	*	*	*



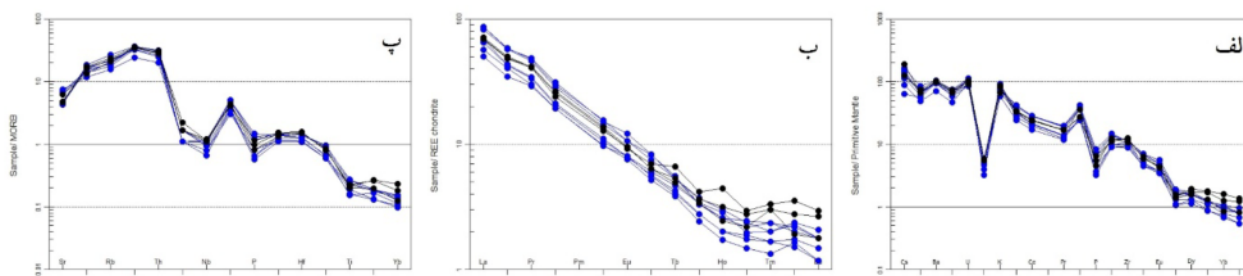
شکل ۴ الف) نمودار $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ نسبت به SiO_2 [۲۳] برای تقسیم بندی زمین شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی؛ ب) نمودار R1-R2 [۲۴] که بر اساس آن، نمونه‌ها در گستره داسیت-ریوداسیت قرار دارند؛ پ) موقعیت سنگ‌های منطقه در نمودار کاتیونی [۲۵]؛ ت) ترکیب سنگ‌ها در نمودار Zr/TiO_2 نسبت به SiO_2 [۲۶].

جدایش زودرس فازهای بلورین تیتانومگنتیت و آمفیبول در سنگ [۱۱] و از ویژگی‌های شاخص ماگماهای شکل گرفته در پهنه فرورانش است [۳۲]. با توجه به شرکت عناصر HFSE در ساختار فازهایی مانند روتیل و ایلمینیت، تهی‌شدگی آنها را می‌توان به ماندگاری فازهای یاد شده در خاستگاه (به احتمال بسیار ورقه اقیانوسی فروروی رخساره اکلوزیت) نسبت داد [۳۳]. با افزایش فشار (در رخساره آمفیبولیت و اکلوزیت در پهنه‌های فرورانش)، حلالیت فازهای کانایی در سیال‌های آبدار کاهش یافته و کانی‌های حامل بصورت فاز دیرگداز در سنگ مادر آمفیبولیتی و اکلوزیتی ناشی از دگرگونی سنگ کره اقیانوسی فرورو باقی مانده و موجب ناهنجاری منفی در مذاب بخشی تولید شده می‌شوند [۳۴].

به منظور تعیین سری ماگمایی از نمودار Th نسبت به Co [۲۷] استفاده شد که بر این اساس، نمونه‌ها در گستره آهکی-قلیایی واقع هستند (شکل ۵ الف). از دیدگاه شاخص اشباع شدگی [۲۸]، سنگ‌های مورد پژوهش بیشتر در گستره متالومین تا کمی پرآلومین واقع هستند (شکل‌های ۵ ب و پ). نمودار بهنجار شده به گوشته اولیه [۲۹] سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر غنی‌شدگی واضح عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE؛ Th, Ba, Sr, Rb) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) و عناصر خاکی نادر بزرگ یون نسبت به عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) را نشان می‌دهد (شکل ۶ الف). وجود بی‌هنجاری منفی HFSEها به‌ویژه Ta و Ti، بیانگر ماندگاری فازهای دیرگداز در بردارنده این عناصر چون روتیل، ایلمینیت، آمفیبول، اسفن و آپاتیت در تفاله [۳۰، ۳۱] یا



شکل ۵ الف) نمودار زمین شیمیایی Th نسبت به Co [۲۷] برای تعیین سری ماگمایی؛ ب و پ) طبیعت متالومین تا پراآلومین سنگ‌ها در نمودار A/NK نسبت به A/CNK [۲۸] و نمودار مولی Na₂O-Al₂O₃-K₂O



شکل ۶ نمودارهای عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی منطقه که بهنجار شده نسبت به الف) گوشته اولیه [۲۹]، ب) کندریت [۳۵] و پ) موربر [۳۷]

های مورد بررسی نسبت به سنگ‌های آهکی قلیایی معمولی تفاوت‌های قابل توجهی از جمله بالا بودن مقادیر Sr، SiO₂، La/Yb، Sr/Y، پائین بودن مقادیر MgO، Yb و Y و تهی شدگی از HREE و HFSE همراه با شیب تند الگوی جدایش یافته عناصر خاکی نادر دارند (جدول ۲). بالا بودن مقدار Al₂O₃ بیش از ۱۵ درصد، پائین بودن مقدار MgO کمتر از ۳wt%، نسبت Na₂O/K₂O بین ۱/۷-۲/۷، مقادیر بالای Sr (بیش از ۴۰۰ppm) و مقادیر پایین Y (کمتر از ۱۸ppm) و Yb (کمتر از ۱.۹ppm) در این سنگ‌ها شباهت بسیاری به ویژگی‌های ماگماهای آداکیتی دارد [۴۱، ۴۲].

بر پایه نمودارهای Sr/Y نسبت به Y و La/Yb نسبت به Yb (بهنجار شده نسبت به کندریت) که برای جدایش سنگ‌های آداکیتی از ماگماهای برجسته پهنه‌های فروران (ناشی از ذوب گوشته) ارائه شده‌اند، نمونه‌های مورد پژوهش در گستره آداکیتی قرار دارند (شکل ۸). بالا بودن مقدار Sr در آداکیت‌ها در پی ناپایداری پلاژیوکلاز در عمق بسیار و آزاد شدن Sr ساختار آن ایجاد می‌شود [۴۱، ۴۳]. ماندگاری گارنت در خاستگاه نیز کاهش Y و افزایش نسبت Sr/Y را در پی دارد.

الگوی تغییرات عناصر نادر سنگ‌های منطقه مورد پژوهش بهنجار شده با کندریت [۳۵] (شکل ۶ ب)، روندی شیب‌دار با غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به HREE نشان می‌دهد که به پایداری گارنت در خاستگاه نسبت داده شده است [۳۶]. در نمودار بهنجار شده نسبت به **موربر** [۳۷]، عناصر Y و Yb کاهش ۱۰ برابری را نشان می‌دهند (شکل ۶ پ). با توجه به سازگاری این عناصر با شبکه گارنت، تهی‌شدگی این دو عنصر می‌تواند بیانگر حضور گارنت در خاستگاه باشد [۳۸].

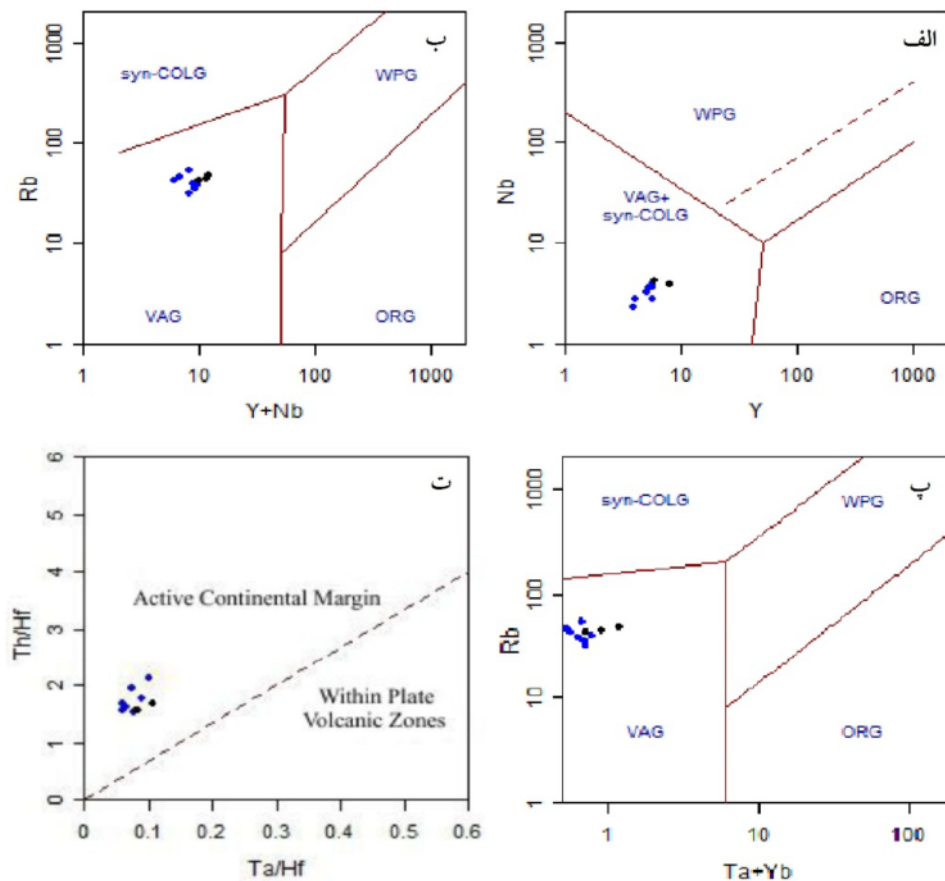
به منظور تحلیل جایگاه زمین ساختی سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر، از نمودارهای زمین ساختی ماگمایی مختلفی استفاده شده‌است. در نمودارهای طراحی شده به این منظور [۳۹]، سنگ‌های مورد پژوهش در جایگاه کمان ماگمایی قرار دارند (شکل ۷ الف تا پ). نمودار Th/Hf نسبت به Ta/Hf [۴۰] نیز جایگاه کمان ماگمایی را برای سنگ‌های مورد بررسی نشان می‌دهد (شکل ۷ ت).

بحث

با دقت در داده‌های زمین شیمیایی، می‌توان دریافت که سنگ

پوسته پائینی ضخیم شده، تبلور بخشی ماگمای بازالتی و مذاب پریدوتیتی اولیه دگرنهاده توسط ذوب ورقه از مهمترین عوامل پیشنهادی در تشکیل آداکیت‌ها هستند [۴۵].

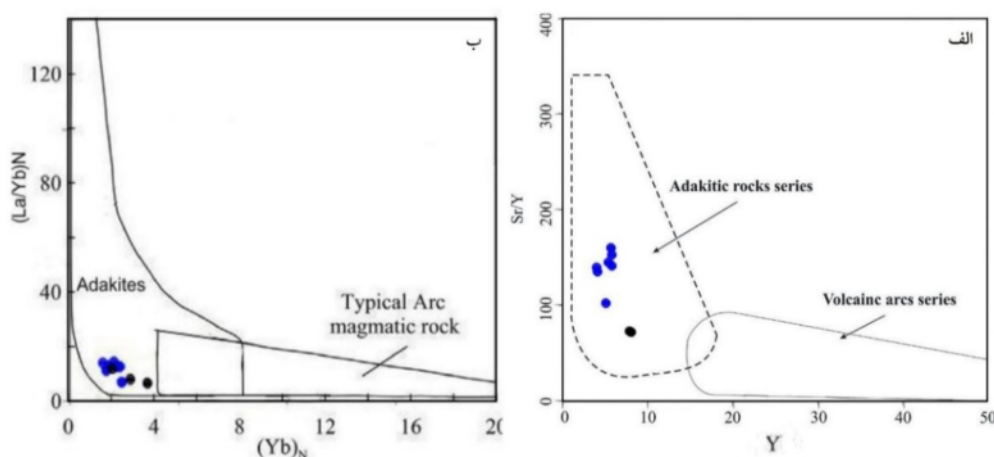
آداکیت‌ها به ۴ گروه کم‌سیلیس (LAS)، پرسیلیس (HAS)، قاره‌ای و آرکن تقسیم شده [۴۴] و از منابع متعددی شکل می‌گیرند. ذوب بخشی ورقه اقیانوسی داغ و فرورو، ذوب بخشی



شکل ۷ الف، ب و پ) موقعیت زمین ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه در نمودارهای مرجع شده [۳۹]؛ ت) موقعیت نمونه‌ها در نمودار Th/Hf نسبت به Ta/Hf [۴۰].

جدول ۲ مقایسه ویژگی‌های زمین شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد پژوهش با معیارهای شناختی آداکیت‌ها.

ویژگی آداکیت‌ها	مقادیر میانگین محاسبه شده برای سنگ‌های آتشفشانی جنوب شرق نیر
$\text{SiO}_2 \geq 56 \text{ wt\%}$	$\text{SiO}_2 = 62/8 - 71/52 \text{ wt\%}$
$\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15 \text{ wt\%}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 14/97 - 16/88 \text{ wt\%}$
$\text{MgO} < 3 \text{ wt\%}$	$\text{MgO} = 0/45 - 1/79 \text{ wt\%}$
$\text{Sr} > 300 \text{ ppm}$	$\text{Sr} = 117 - 895/8 \text{ ppm}$
$\text{Y} < 15 \text{ ppm}$	$\text{Y} = 4 - 8 \text{ ppm}$
$\text{Sr/Y} > 20$	$\text{Sr/Y} = 71/91 - 159/96$
$\text{Yb} < 1/9 \text{ ppm}$	$\text{Yb} = 0/33 - 0/78$
$\text{La/Yb} > 20$	$\text{La/Yb} = 30/13 - 56/87$
بدون ناهنجاری منفی Eu	بدون ناهنجاری منفی Eu
مقدار بسیار کم HFSE به ویژه Ta و Nb	مقدار کم HFSE‌ها به ویژه Ta و Nb
غنی شدگی LREE نسبت به HREE	تمرکز بالای LREE نسبت به HREE‌ها



شکل ۸ نمودارهای برجسته جدایش سنگ‌های آداکیتی از ماگماهای نوعی کمان ماگمایی [۳۸].

Yb شده است. ویژگی‌های یاد شده به خوبی با خاستگاه بازالتی دگرگون شده در گستره پایداری گارنت، همخوانی دارد. به منظور تعیین نوع آداکیت در سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر، از نمودارهای جدایش آداکیت‌ها استفاده شد. برپایه نمودارهای تغییرات MgO نسبت به SiO_2 و Sr نسبت به $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ [۴۲]، نمونه‌های مورد پژوهش در گستره آداکیت‌های پرسیلیس قرار دارند (شکل ۹).

از آنجا که ذوب بخشی بازالت‌ها در فشارهای پایین، مذابی با نسبت‌های پایین Sr/Y و La/Yb و تمرکز بالای Y و Yb به وجود می‌آورد [۴۷]، ماگماهای آداکیتی باید از ذوب بخشی بازالت در رخساره اکلوزیت-آمفیبولیت تولید شده باشند [۴۱، ۴۸]. ترکیبات بازالتی دگرگونه در بخش زیرین پوسته ضخیم شده و پوسته اقیانوسی فرورو دیده می‌شود [۴۹]. گزینه اصلی مستعد ذوب در مناطق فرورانشی قطعه فرورو اقیانوسی است افزون بر این، مهمترین ویژگی زمین شیمیایی آداکیت های برآمده از ذوب ورقه اقیانوسی مقادیر Sr/Y بیش از ۴۰ و $(\text{La/Yb})_N$ بیش از ۱۲ است. نمودارهای مرجع [۵۰] به خوبی این امر را به نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۰ الف و ب). چنانچه ذوب در فشارهای بسیار بالا رخ دهد، تفاله باقیمانده دارای ترکیب اکلوزیتی (شامل گارنت، کلینوپیروکسن و روتیل) است و وجود روتیل منجر به نسبت‌های بالاتری از Nb/Ta می‌شود [۵۱، ۵۲]، در حالی که ذوب در فشارهای کمتر، تفاله گارنت آمفیبولیتی برجا می‌گذارد. با توجه به پایین بودن نسبت Nb/Ta در آداکیت‌های جنوب نیر (۰/۴ - ۰/۲)، ترکیب تفاله برجامانده بیشتر با ترکیب گارنت آمفیبولیتی همخوانی دارد.

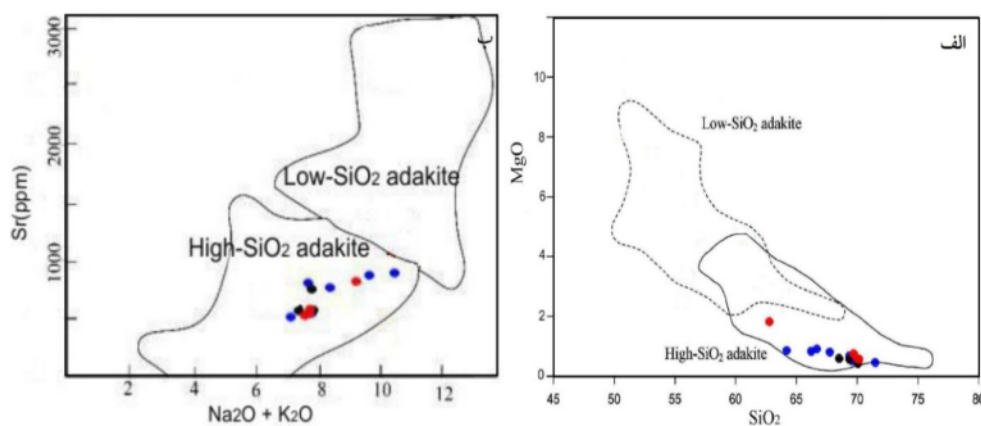
آداکیت‌های پرسیلیس و کم‌سیلیس دارای ویژگی‌های زمین‌شیمیایی بی‌مانندی هستند. جدای از تفاوت در مقدار سیلیس، تفاوت‌هایی در نسبت‌های Sr/Y و La/Yb و الگوی عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت در انواع HSA و LSA دیده می‌شود. بالا بودن مقادیر SiO_2 (بیش از ۵۶wt% Sr (بیش از ۴۰۰ppm) و نسبت La_N/Yb_N (بیش از ۱۰) به همراه پایین بودن Y (کمتر از ۱۸ppm) و (کمتر از ۱.۹ppm) و وجود الگوی مقعر HREE ها، مهمترین ویژگی‌های آداکیت‌های پرسیلیس هستند.

آداکیت‌های قاره‌ای دارای مقادیر کم Y و Yb، نسبت پایین Sr/Y (۱۵-۱۵۰) و نسبت‌های بالای $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (نزدیک به ۱) هستند. بالا بودن K_2O در آداکیت‌های قاره‌ای به دگرسانی، آلاینش پوسته‌ای و تبلور نسبت داده شده است [۴۶]. آداکیت‌های آرکتن تنها در نوارهای سنگ سبز یافت می‌شوند.

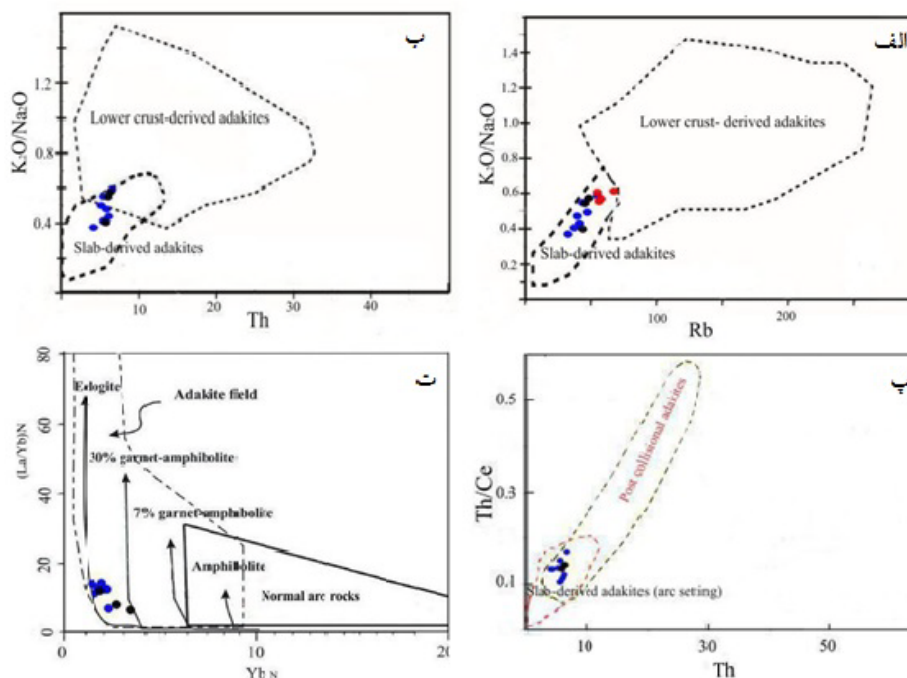
شواهد زمین شیمیایی بیانگر شباهت غیرقابل انکار سنگ‌های مورد بررسی به آداکیت‌های پرسیلیس است. نمونه‌های مورد پژوهش دارای سیلیس بیش از ۵۶ درصد و الگوی REE مقعر هستند. افزون بر این، نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ در آنها (۰/۶۱-۰/۳۹) اختلاف بسیاری با آداکیت‌های قاره‌ای دارد. بالا بودن مقدار Sr و تهی‌شدگی عناصر P، Ti، Ta و Nb با ماندگاری فازهای دیرگداز دربردارنده این عناصر (روتیل، ایلمنیت، آمفیبول، اسفن و آپاتیت) در خاستگاه قابل تفسیر است. وجود گارنت (و به احتمال بسیار آمفیبول) در خاستگاه و مشارکت نداشتن در مذاب تولید شده، سبب جدایش شدید عناصر خاکی نادر سبک و سنگین و تهی‌شدگی ماگما از HREE به‌ویژه

سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر پوسته اقیانوسی فرورو نفوتتیس است که در رخساره گارنت آمفیبولیت (تا اکلوزیت) دگرگون شده است. تنش‌های برشی و فشارشی ناشی از برخورد مایل ورقه عربی با ورقه ایران مرکزی در نئوژن [۵۶] در ادامه فرورانش سبب ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورو و فعالیت ماگمایی آداکیتی پس از برخورد در جنوب نیر شده است. این ساز و کار توسط برخی پژوهشگران برای فعالیت ماگمایی آداکیتی جوان در سایر بخش‌های پهنه ارومیه- دختر پیشنهاد شده است [۵۷-۶۰].

نمودارهای طراحی شده برای تعیین خاستگاه آداکیت‌ها [۵۳، ۵۴] گستره آداکیت‌های وابسته به کمان ماگمایی با خاستگاه صفحه فرورونده گارنت آمفیبولیتی تا گارنت اکلوزیتی (با ۱۰ تا ۲۵ درصد گارنت) را نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۰ پ و ت). ذوب بخشی ورقه اقیانوسی فرورونده با ترکیب گارنت آمفیبولیتی در فشار معادل با گستره پایداری گارنت، با نتایج به دست آمده از مدل‌های ذوب بخشی پوسته بازالتی فرورو و مدل‌های دوبعدی دمایی مناطق فرورانش همخوانی دارد [۵۵]. بر اساس به داده‌های زمین شیمیایی، خاستگاه اصلی



شکل ۹ نمودارهای جدا کننده سنگ‌های آداکیتی پرسیلیس از کم سیلیس [۳۹].



شکل ۱۰ الف) نمودار K_2O/Na_2O نسبت به Rb برای تعیین خاستگاه آداکیت [۴۷] که نشان‌دهنده آداکیت‌های برآمده از صفحه فرورو است؛ ب) نمودار K_2O/Na_2O نسبت به Th و جایگاه نمونه‌ها، در بخش برآمده از ورقه فرورو [۴۷]؛ پ) خاستگاه نمونه‌ها در نمودار Th/Ce نسبت به Th [۵۰]؛ ت) نمودار $(La/Yb)_N$ نسبت به Yb [۵۱] که براساس آن، سنگ‌های آتشفشانی جنوب نیر از ذوب بخشی خاستگاه گارنت آمفیبولیت تا گارنت اکلوزیتی به وجود آمده‌اند.

برداشت

سنگ‌های آتشفشانی جوان جنوب شرق نیر واقع در جنوب استان یزد بصورت مخروط آتشفشانی و گنبد رخنمون داشته و از دیدگاه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری، در پهنه ماگمایی ارومیه- دختر قرار دارند. سنگ‌های مورد بررسی بیشتر ترکیب داسیتی تا ریوداسیتی و سرشت آهکی- قلیایی دارند. نمودارهای زمین‌ساختی ماگمایی و شواهد زمین شیمیایی چون غنی‌شدگی از LILE و LREE و تهی‌شدگی از HFSE و HREE، نشانگر فعالیت ماگمایی در کرانه قاره دلالت هستند. مقادیر بالای Sr/Y و La/Yb و تهی‌شدگی این سنگ‌ها از عنصرهای با شدت میدان بالا Y، HFS و Yb به ویژگی‌های مذاب‌های آداکیتی پرسیلیس شباهت دارد و بیانگر پیدایش آنها در فشار بالا با ماندگاری عنصرهای یاد شده در فازهای برجامانده دیرگداز (چون روتیل و گارنت) است. همه این شواهد نشانگر پیدایش ماگمای سازنده سنگ‌های آداکیتی از ذوب بخشی خاستگاه گارنت آمفیبولیتی یا اکلوزیتی برآمده از دگرگونی سنگ‌کره اقیانوسی فرورو نئوتتیس در زمان نئوژن است. این فرایند برای فعالیت ماگمایی آداکیتی در سایر نقاط ایران نیز در نظر گرفته شده است.

مراجع

- [6] Mirnejad H., Raeisiand D., Heidari F., *Geochemistry and petrogenesis of tonalite from Iju area, northwest of Shahr-e Babak (Kerman province), with emphasis on adakitic magmatism* (in Persian), *Petrology* 24 (2015) 197-210.
- [7] Ghadami G.H.R., Poosti M., Babai F., *Petrogenesis of Mio-Pliocene dacite- andesite volcanism in SE of Urumieh- Dokhtar magmatic belt (NE Shahr-e-Babak)* (in Persian), *Geosciences* 25(97) (2015) 37-48.
- [8] Chekani Moghadam M., Tahmasbi Z., Ahmadi-Khalaji A., *Mineralogy, geochemistry and origin of Baft northeast volcanic rocks (south Kerman): Evidence for volcanic arc magmatism in Uromieh-Dokhtar magmatic belt* (in Persian), *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 24 (4) (2017) 743-760.
- [9] Mahmoudi Sh., Khajeie A., *Petrogenesis and tectonic setting of adakitic volcanic rocks in Hassan-Abad Darreh-Zereshk* (in Persian), *Quaternary of Iran* 5(1) (2019) 125-142.
- [10] Defant M. J., Kepezhinskis P., *Evidence suggests slab melting in arc magmas*, *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 82(6) (2001) 62-70.
- [11] Martin H., *Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids*, *Lithos* 46(3) (1999) 411-429.
- [12] Sherafat Sh., *Petrology and geochemistry of Plio-Quaternary volcanic rocks in west and southwest of Yazd Province* (in Persian), Ph.D. Thesis, Isfahan University, Isfahan, Iran (2009).
- [13] Kuhsari A.H., Mackizadeh M.A., *Petrography and geochemistry of Igneous rocks and their alteration in Dehshir fault zone* (in Persian), Yazd university (1996).
- [14] Aghanabati A., *Geology of Iran* (in Persian), Geological survey of Iran (2004).
- [15] Sahandi M., *Geological map of Nir, Sheet No. 6852*, Geological survey of Iran (2008).
- [16] Ramberg H., *Model Studies of Gravity controlled Tectonics by the Centrifuge Technic* In: De Jong K, A., Scholten R. (eds), *Gravity and Tectonics*, John Wiley, New York, (1973) 49-66.
- [1] Mohajjel M., Fergusson C. L., Sahandi M.R., *Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran*, *Journal of Asian Earth Sciences* 21(2003) 397-412.
- [2] Alavi M., *Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution*, *American journal of Science* 304 (2004) 1-20.
- [3] Agard P., Omrani J., Jolivet L., Whitechurch H., Vrielynck B., Spakman W., Monie P., Meyer B., Wortel R., *Zagros orogeny: a subduction-dominated process*, *Geological Magazines* 148(5-6) (2011) 692-725.
- [4] Ghasemi A., Talbot C.J., *A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)*, *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (2006) 683-69.
- [5] Arzhangnezhad F., Moradian A., Keshtkar Z., *The study of petrography, geochemistry and petrogenesis of subvolcanic masses of Madvar and Shah khairollah in north and southeast of Shahr-e Babak city (Kerman province)* (in Persian), *Petrology* 24(2015) 151-170.

- A.D. and Norry, M.J.). Geological Society of London Special Publication (1989) London,
- [30] Tatsumi, Y., Hamilton, D.L., Nestutt, R.W., "Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc lavas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 29 (1986) 293-309.
- [31] Keppler, H., "Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids", *Nature* 380 (1996) 237-240.
- [32] Wilson, M., "Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach". Chapman and Hall, London (1989) 446 pp.
- [33] Ryerson, F.J., Watson, E.B., "Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts", *Earth and Planetary Science Letters*, 86(2-4) (1987) 225-239.
- [34] Gaetani, G. A., "The influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 147(5) (2004) 511-527.
- [35] Nakamura, N., "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38 (1974) 757-775.
- [36] MacDonald, R., Hawakesworth, C.J., Heath, E., "The lesser Antilles volcanic chain: a study of arc magmatism", *Earth Science Reviews* 49(4) (2000) 17-26.
- [37] Pearce, J.A., "Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins", In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* (Eds. C.J. Hawkesworth and Norry, M.J.) Shiva, Nantwich (1983) 230-249.
- [38] Kampunzu, A.B., Tombale, A.R., Zhai, M., Bagai, Z., Majaule, T., Modisi, M.P., "Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: evidence for a Neoarchaeon continental active margin in the Zimbabwe craton". *Lithos* 71(2003) 431-460.
- [39] Pearce, J. A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks", *Journal of Petrology* 25(4) (1984) 956-983.
- [40] Schandl, E.S., Gorton, M.P., "Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments", *Economic Geology* 97 (2002) 629-642.
- [41] Defant, M.J., Drummond, M.S., "Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere", *Nature* 374 (1990) 662-665.
- [17] Tsuchiyama A., "Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside - albite-anorthite and origin of dusty plagioclase in andesite", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 89 (1985) 1-16.
- [18] Stewart M.L., Pearce T.H., "Sieve-textured plagioclase in dacitic magma: Interference imaging results", *American Mineralogist*, 89(2-3) (2004) 348-351.
- [19] Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Stephen R., Sparks J., "Magma Evolution and Open-System Processes at Shiveluch Volcano: Insights from Phenocryst Zoning", *Journal of Petrology* 47(12)(2006) 2303-2334.
- [20] Rutherford M.J., Hill P.M., "Magma ascent rates from amphibole breakdown: An experimental study applied to the 1980-1986 Mount St. Helens eruptions", *Journal of Geophysical Research* 98 (B11) (1993) 19667-19685.
- [21] Shelly D., "Igneous and metamorphic rocks under the microscope", Chapman and Hall (1993) 445 pp.
- [22] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rocks-forming minerals", *American mineralogist* 95 (2010) 185-187.
- [23] Middlemost Middlemost, E.A.K., "Naming materials in the magma/igneous rock system". *Earth Sciences Reviews* 37(3-4) (1994) 215-224.
- [24] De La Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M., "A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2 -diagram and major element analyses- Its relationships with current nomenclature", *Chemical Geology* 29 (1980) 183-210.
- [25] Jensen L.S., "A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks", *Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper* 66 (1976).
- [26] Winchester J.A., Floyd P.A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chemical Geology* 20(4) (1977) 325-343.
- [27] Hastie A.R., Kerr A.C., Pearce J.A., Mitchell S.F., "Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th- Co discrimination diagram", *Journal of Petrology* 48 (2007) 2341-2357.
- [28] Shand S.J., "Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite", Thomas Murby, London (1943) 488 pp.
- [29] Sun S.S., McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes". In: *Magmatism in the Ocean Basins* (Eds. Saunders,

- Earth and Planetary Science Letters 226 (2004) 415-432.
- [53] Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., Bao, Z. W., Zhao, Z. H., Li, C. F., Xiong, X. L., Ma, J. L., "Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization", *Journal of Petrology* 47 (2006) 119-144.
- [54] Defant, M.J., Drummond, M.S., "Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc", *Geology* 21(1993) 547-550.
- [55] Peacock, S. M., Rushmer, T., Thompson, A. B., "Partial melting of subducting oceanic crust", *Earth and Planetary Science Letters* 121 (1994) 227—244.
- [56] McCluske, S., Balassanain, S., Baraka, A., Dmir, C., Ergintav, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Nadariya, M., Ouzounis, A., Toksoz, M. N., Veis, G., "Global positioning system constrains on plate Kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus", *Journal of Geophysical Research* 105 (2003) 5695-5719.
- [57] Yadollahi, R., Kananin, A., Maanijou, M, Sarjoughian, F. and Hassanpour, Sh. "Genesis of Adakitic Magmatism in Masjed Daghi Region in Julfa, Eastern Azarbaijan (in Persian)". *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 19 (2) (2011) 297-310.
- [58] Mahoudiniya, H., Jahangiri, A., "Petrographic and petrogenetic studies of adakitic magmatism of Gavdel (Shivar Dagh) in Garehdagh-South Arminian Zone (Northwest of Iran) (Irankuh Pb-Zn deposit, Southwest of Isfahan) (in Persian)", *Petrology* 29 (2017) 21-36.
- [59] Noghreyan, M., Khodami, M., Davoudian Dehkordi, A., Shabanian Brogeni, N., "Petrogenesis of Pliocene-Quaternary Volcanic Rocks in Isfahan Province: Insight on Adakite Magmatism (in Persian)". *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 19 (3) (2011) 451-462.
- [60] Fardfeshani, Z., Ghorbani, M.R., Arvine, M., "Origin and Evolution of Eocene Felsic and Neogene Adakitic Volcanism in Kajan (west Nain)(in Persian) ". *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 22 (1) (2014) 115-124.
- [42] Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyaen, J. F., Champion, D., "An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: re-lationships and some implications for crustal evolution", *Lithos* 79 (2005) 1–24.
- [43] Rosu, E., Seghedi, I., Downes, H., Alderton, D. H. M., Szakacs, A., Panaiotu, C. E., Nedelcu, L., "Extension-related Miocene calcalkaline magmatism in the Apuseni Mountains, Romania: Origin of magmas. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*", 84 (2004) 153-172.
- [44] Moyaen, J. F., "High Sr/Y and La/Yb ratios: the meaning of the "adakitic signature" ", *Lithos* 54 (2009) 365-372.
- [45] Tsuchiya, N., Kimura, J.I., Kagami, H., "Petrogenesis of Early Cretaceous adakitic granites from the Kitakami Mountains, Japan", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 167(1) (2007) 134-159.
- [46] Zhao, J. H., Zhou, M. F., "Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusion in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle", *Precambrian Research* 152(2007) 27-47.
- [47] Rapp, R.P., Watson, E.B., Miller, C.F., "Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities", *Precambrian Research* 51(1991) 1–25.
- [48] Castillo, R. P., "An overview of adakite petrogenesis", *Chinese Science Bulletin* 51(2006) 257-268.
- [49] Sen, C., Dunn, T., "Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 Gpa: implications for the origin of adakites", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 117 (1994) 394-409.
- [50] Delavari, M., Amini, S., Schmitt, A.K., McKeegan, K.D., Mark Harrison, T., "U–Pb geochronology and geochemistry of Bibi-Maryam pluton, eastern Iran: Implication for the late stage of the tectonic evolution of the Sistan Ocean". *Lithos* 200–201 (2014) 197-211.
- [51] Foley, S.F., Barth, M.G., Jenner, G.A., "Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of subduction zone magmas", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2000) 933-938.
- [52] Schmidt, M. W., Dardon, A., Chazot, G., Vannucci, R., "The dependence of Nb and Ta rutile/melt partitioning on melt composition and Nb/Ta fractionation during subduction processes".