

شیمی کانی و شیمی ایزوتوپی سنگ کل: روزه‌های به پتروژنز سنگ‌های بازالتی - آندزیتی اوسن عباس آباد، خاور شاهرود

حبیب ا. قاسمی^۱، محبوبه عرب‌زاده بنی‌اسدی^۲ و مجتبی رستمی حصوری^۲

استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
دانشجوی دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

چکیده

نوار آتشفشانی - رسوبی اوسن عباس آباد در خاور شاهرود از سنگ‌های بازالتی - آندزیتی و آذرآواری‌های وابسته به همراه میان لایه‌های رسوبی تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی این نوار شامل الیون بازالت، تراکی بازالت، تراکی آندزیتی و آندزیت با بافت‌های متنوع هیالومیکرولیتی پورفیری، میکرولیتی پورفیری، گلوپورفیری، تراکیتی و غربالی است. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل کلینوپروکسن و فلدسپار می‌باشند. ترکیب پیروکسن‌ها از اوژیت تا دیوپسید و ترکیب فلدسپارها شامل ارتوکلاز و الیگوکلاز تا بیوتیت است. نسبت‌های $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Initial) این سنگ‌ها با در نظر گرفتن سن ۴۰ میلیون سال برای آن‌ها بین ۰/۷۰۴۲ تا ۰/۷۰۴۷ و مقادیر $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (Initial) آن‌ها نیز بین ۰/۵۱۲۷ تا ۰/۵۱۳۰ در تغییر است. مقادیر اسیلون Nd امروزین (0) ϵNd و ۴۰ میلیون سال قبل $\epsilon\text{Nd}(t=40 \text{ Ma})$ آن‌ها نیز به ترتیب بین ۲/۶۷ تا ۷/۷۲ و ۸/۰۵ در تغییر است که نشان‌دهنده یک منشأ گوشته‌ای غنی شده برای آن‌هاست. شیمی سنگ کل، ایزوتوپی و کلینوپروکسن همگی بیان‌گر سرشت کمانی کالک‌آلکان - آلکان و ترکیب بازالتی ماگمای مادر برخاسته از یک منبع گوشته‌ای تا حدودی غنی شده نوع OIB در یک جایگاه کششی درون کمانی است. محاسبات دما- فشارسنجی بر روی کانی کلینوپروکسن بیان‌گر محدوده دمایی ۱۱۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای ۲ تا ۱۳ کیلوپا برای تبلور ماگماست.

کلیدواژه‌ها: شیمی کانی، شیمی ایزوتوپی، عباس آباد، شاهرود.

*نویسنده مسئول: حبیب ا. قاسمی

E-mail: h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

نوار آتشفشانی - رسوبی اوسن عباس آباد در خاور شاهرود دربردارنده توالی ضخیمی از سنگ‌های بازالتی - آندزیتی به همراه سنگ‌های رسوبی و آذرآواری وابسته است (شکل ۱) که در لبه شمال خاوری پهنه ایران مرکزی قرار دارد. بهترین راه ارتباطی منطقه، بزرگراه شاهرود - مشهد است که تقریباً از وسط منطقه می‌گذرد. این نوار به دلیل داشتن ذخایر اقتصادی مس از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان بوده و مطالعات زیادی بر روی آن انجام شده است. بررسی‌های سنگ‌شناختی فراوانی بر روی این سنگ‌ها انجام شده است (صادق زاده، ۱۳۷۷؛ بادامه، ۱۳۸۲؛ موسوی، ۱۳۸۸؛ الهیاری، ۱۳۸۹؛ برزگری، ۱۳۹۴؛ برزگری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 2015). آخرین پژوهش شامل شیمی کانی و تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور در سنگ‌های آتشفشانی منطقه عباس آباد (عرب‌زاده بنی‌اسدی، ۱۳۹۶) بوده است. پیشنهاد ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا و انتقالی ماگمای والد و ذوب بخشی ۱۴ تا ۱۶ درصدی یک محل منشأ گوشته‌ای غنی شده در اعماق ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتری در یک محیط کششی درون کمانی از نتایج این بررسی‌ها بوده است (Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 2015). در هیچکدام از بررسی‌های گذشته، شیمی ایزوتوپی، شیمی کانی‌ها و شرایط فیزیکی تبلور با استفاده از روش‌های مختلف دما- فشارسنجی مورد مطالعه قرار نگرفته بود که در آخرین مطالعه به این موارد پرداخته شده است. در این پژوهش برای اولین بار شیمی ایزوتوپی و شیمی کانی‌های اصلی سازنده این سنگ‌ها برای بررسی خاستگاه ماگما و شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تبلور آن مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- روش پژوهش

پس از مطالعات صحرایی و پتروگرافی دقیق، به منظور بررسی شیمی کانی سنگ‌های بازالتی - آندزیتی اوسن عباس آباد، ۱۹ مقطع نازک - صیقلی از آنها تهیه شد و کانی‌های اصلی فلدسپار و پیروکسن موجود در ۱۴ عدد از آنها در آزمایشگاه میکروپروپ مؤسسه علوم زمین آکادمی سینیکا در کشور تایوان

مورد آنالیز قرار گرفت. این آنالیزها شامل ۴۳۰ نقطه از بلورهای پیروکسن و ۴۴۷ نقطه از بلورهای فلدسپار بوده است که به وسیله دستگاه ریزپردازنده الکترونی مدل JEOL SEM JSM-6360LV تجزیه شده‌اند. شرایط دستگاه در زمان آنالیز شامل ولتاژ ۲۰kV و جریان nA12 بوده است. همچنین، سه نمونه از این بازالت‌ها نیز در مؤسسه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین در پکن برای عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوپی Sr-Nd مورد آنالیز قرار گرفته است. ایزوتوپ‌های Sr و Nd توسط یک اسپکترومتر جرمی یونیزاسیون گرمایی Thermofisher Triton Plus multi-collector اندازه‌گیری شده‌اند. پودر نمونه‌ها با ردیاب‌های ایزوتوپی شاخص، مخلوط شده و در کپسول‌های تفلونی با اسیدهای $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ مخلوط شده‌اند و توسط روش کروماتوگرافی تبادل یونی دو مرحله‌ای جداسازی شده‌اند. جزئیات روش و شرایط آزمایشگاهی براساس روش (Li et al., 2015) بوده است. به دلیل موجود بودن آنالیزهای شیمیایی سنگ کل عناصر اصلی و کمیاب به مقدار کافی در مطالعات پژوهشگران پیشین و به ویژه مطالعه (Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 2015)، نیازی به انجام دوباره این آنالیزها نبوده است و در موارد مورد نیاز با ذکر منبع از نتایج آنها استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱. زمین‌شناسی

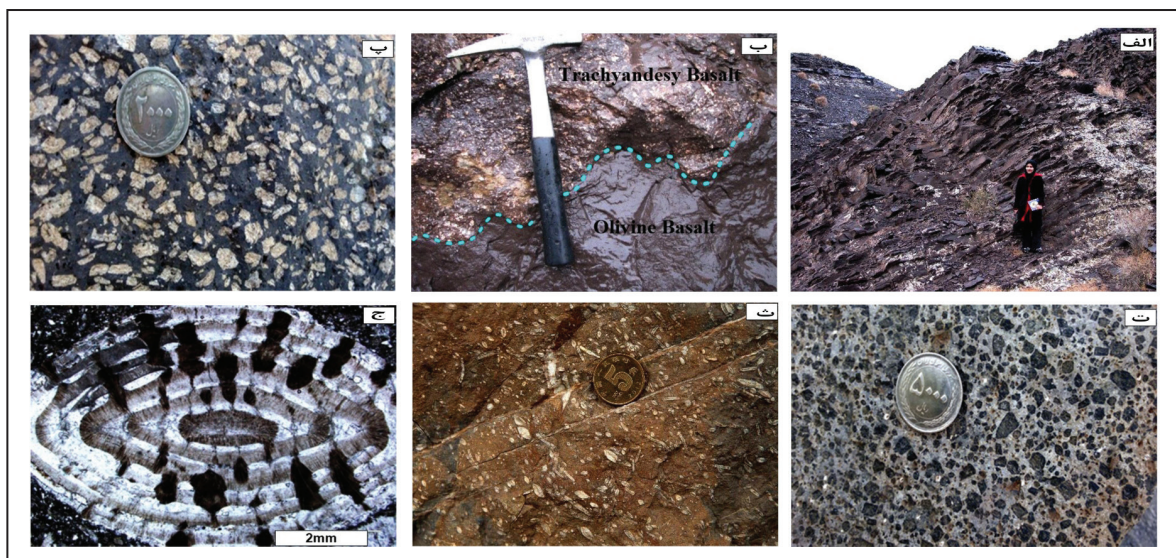
به دلیل بیان دقیق و کامل زمین‌شناسی و روابط واحدهای سنگی منطقه در مطالعات پیشین به ویژه (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲)، در این نوشتار تنها به بیان کلی این مسأله می‌پردازیم. در یک دید کلی، توالی سنگی اوسن منطقه با میکروکنگلومرا، ماسه سنگ، سیلتستون و شیل متعلق به محیط‌های رودخانه‌ای - ساحلی و دریایی کم‌عمق اوسن میانی آغاز (شکل ۲- الف) و با سنگ‌های آتشفشانی بازی - حدواسط شامل الیون بازالت، بازالت، آندزیتی بازالت، تراکی آندزیتی بازالتی، تراکی آندزیت، آندزیت (شکل ۲- ب، پ، ت) و سنگ‌های آذرآواری وابسته ۱۳۵

و آذرآواری هوایی و زیرآبی همراه است (الهیاری، ۱۳۸۹؛ برزگری، ۱۳۹۴؛ Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 2015) (شکل ۱). نظر به توصیف کامل ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه در مطالعات قبلی و به ویژه مطالعات (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei, 2015). از ذکر جزئیات بیشتر خودداری می‌شود.

شامل آگلومرا، برش و انواع توف متعلق به محیط‌های خشکی- زیرآبی، به همراه میان لایه‌های رسوبی و به ویژه آهک‌های نومولیت‌دار (شکل ۲- ۲، ۳، ج) محیط‌های کم‌عمق سکوی قاره ائوسن میانی - بالایی ادامه می‌یابد و در نهایت با توالی شیلی- ماسه سنگی ائوسن بالایی- الیگوسن خاتمه می‌یابد (شکل ۳). این توالی سنگی همانند سایر مناطق ایران مرکزی با هر دو نوع نهشته‌های آتشفشانی

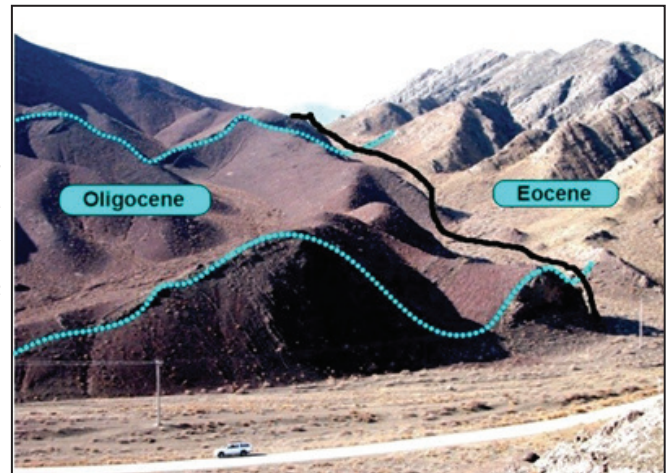
Era	System	Series	Lithology	Description
CENOZOIC	PALEOGENE	QUATERNARY		تراسهای ابرفتی
		Oligocene	مارنهای گچ دار	
			شیل و ماسه سنگ	
			کنگلومرا	
		Middle-Upper Eocene	آهک توفی	
			تتاب برش و گدازه	
			تراکی آندزیت	
			تراکی آندزی بازالت	
			آهک نومولیتی	
			تراکی بازالت با میان لایه اولیوین بازالت	
			نهشته‌های آذرآواری	
			شیل و ماسه سنگ	

شکل ۱- ستون چینه‌شناسی واحدهای سنگی منطقه عباس آباد (مقیاس لحاظ نشده است) (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۲- الف) نمای کلی از توالی شیل و ماسه سنگ زیرین به سن ائوسن میانی در عباس آباد. دید به سمت شمال باختر؛ ب) نمایی نزدیک از سطح تماس الیوین بازالت و تراکی آندزی بازالت؛ پ) تصویر صحرایی از تحلیل رفتگی و گردشگی در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در سنگ‌های تراکی بازالتی پلاژیوکلاز پورفیری ائوسن عباس آباد؛ ت) تصویر صحرایی از تحلیل رفتگی و گردشگی در فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در سنگ‌های تراکی بازالتی پیروکسن پورفیری ائوسن عباس آباد؛ ث) تصویری از میکروفسیل‌های موجود در میان لایه آهک نومولیتی موجود در توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن میانی عباس آباد؛ ج) تصویر میکروسکوپی از میکروفسیل Nummulites موجود در واحد آهکی واقع در توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن میانی عباس آباد در نور (XPL).

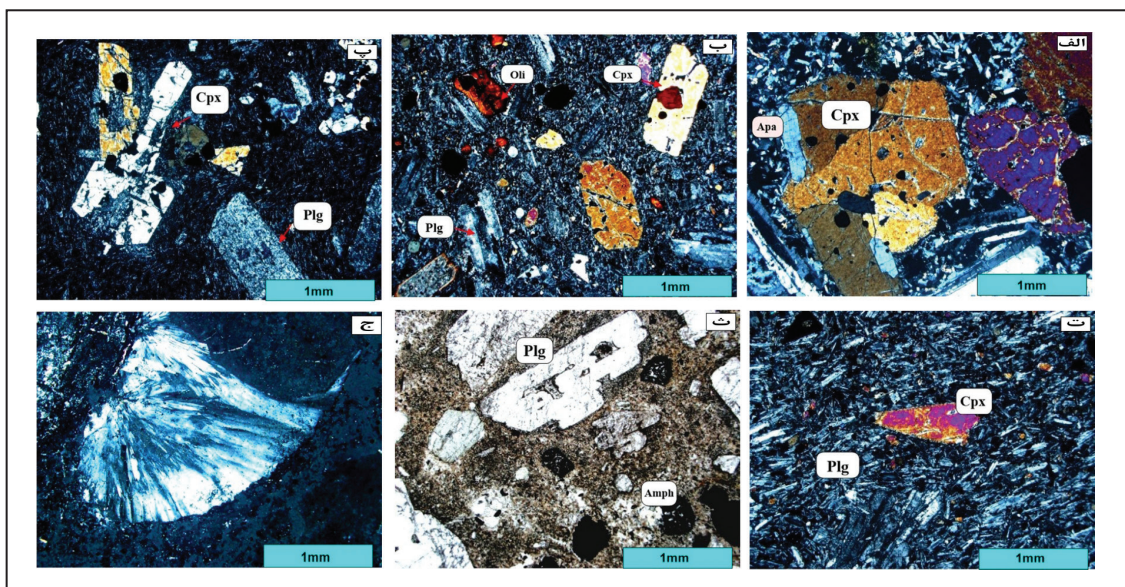
شکل ۳- نمای کلی از توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن عباس‌آباد و شیل و ماسه‌سنگ رویی به سن ائوسن بالایی- الیگوسن (مرز با خط مشکی) به همراه دو دایک تراکی آندزیتی تقریباً موازی پسا‌ائوسن که با خط چین آبی مشخص شده‌اند. دید به سمت باختر.



۲-۳. سنگ‌نگاری

کانی‌های فرعی آنها شامل آپاتیت و اپک و کانی‌های ثانویه نیز شامل زئولیت (شکل ۴- ج)، سربیسیت، ایدنگزیت، کلسیت و کوارتز می‌باشند. بافت‌های غالب این سنگ‌ها شامل هیالومیکروولیتی پورفیری، میکروولیتی پورفیری، گلومروپورفیری، تراکییتی و غربالی هستند (شکل ۴- الف، ب، پ، ت، ث). منطقه‌بندی، بافت غربالی، خوردگی و گردشگی بلورهای الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز از ویژگی‌های بافتی شاخص این سنگ‌ها است (الهیاری، ۱۳۸۹؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۹۲؛ برزگری، ۱۳۹۴؛ ۲۰۱۵؛ Ghasemi and Rezaei-Kahkhaei).

سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد عمدتاً به شکل سنگ‌های پلاژیوکلاز پورفیری (شکل ۲- ب)، پیروکسن پورفیری (شکل ۲- ت) و پیروکسن- پلاژیوکلاز پورفیری با انواع ساخت‌های مگاپورفیری و بادامکی دیده می‌شوند. پتروگرافی این مجموعه بازالتی- آندزیتی نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آنها شامل پیروکسن و پلاژیوکلاز است (شکل ۴- الف، ب، پ، ت، ث) و در برخی نمونه‌های الیوین بازالتی، درشت‌بلورهای اولیوین ایدنگزیتی شده (شکل ۴- ب) و گاهی سالم نیز مشاهده می‌شود.



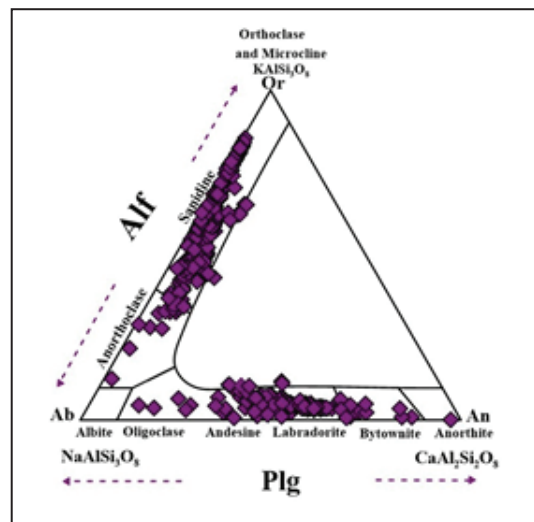
شکل ۴- الف) بافت گلومروپورفیری با فنوکریست‌های کلینوپیروکسن با بافت غربالی حاوی ادخال‌های آپاتیت و اپک در سنگ‌های تراکی‌بازالتی ائوسن عباس‌آباد در نور XPL؛ ب) بافت هیالومیکروولیتی پورفیری با فنوکریست‌های کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و الیوین ایدنگزیتی شده در سنگ‌های تراکی‌بازالتی ائوسن عباس‌آباد در نور XPL؛ پ) بافت گلومروپورفیری با فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن اسکلتی حاوی ادخال اپک در سنگ‌های تراکی‌بازالتی بازالتی ائوسن عباس‌آباد در نور XPL؛ ت) بافت پورفیری جریان‌ی با فنوکریست کلینوپیروکسن در سنگ‌های تراکی‌بازالتی ائوسن عباس‌آباد در نور XPL؛ ث) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز دارای خلیج خوردگی و آمفیبول‌های آپاسیتی شده در سنگ‌های آندزیتی ائوسن عباس‌آباد در نور PPL؛ ج) زئولیت نوع ناترولیت در سنگ‌های تراکی‌بازالتی ائوسن عباس‌آباد در نور XPL.

۳-۳. شیمی کانی‌ها

به منظور پی بردن به طبیعت شیمیایی ماگما، شرایط تبلور کانی‌ها، نحوه تکوین و تکامل ماگمای تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین و تعیین محیط زمین‌ساختی تشکیل آن، شیمی کانی‌ها همواره تعیین کننده است؛ زیرا شیمی کانی‌ها بازتابی از شیمی ماگمای در حال تبلور است و کانی‌های مقاوم در برابر دگرسانی و هوازدگی نظیر کلینوپیروکسن، نقش مهم تری نسبت به دیگر کانی‌ها دارند. پیروکسن و فلدسپار به عنوان کانی‌های اصلی سازنده سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس‌آباد، بازتاب دهنده ترکیب ماگمای والد، شرایط فیزیکی شیمیایی حاکم بر تبلور در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی و همچنین محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگمای والد هستند. برای آگاهی از نتایج آنالیز شیمی کانی‌ها به عرب‌زاده بنی اسدی (۱۳۹۶) مراجعه نمایید.

۳-۴. شیمی فلدسپار

به منظور بررسی ترکیب دقیق فلدسپارهای سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس‌آباد، ۴۴۷ آنالیز نقطه‌ای روی ۱۴ مقطع نازک- صیقلی آنها صورت گرفت. نتایج تجزیه نقطه‌ای برخی از فلدسپارهای درشت بلور و دارای منطقه‌بندی و مقادیر کاتیون‌های آنها بر اساس فرمول ساختاری ۸ اکسیژن محاسبه شده است. ترکیب فلدسپارها در نمودار مثلثی Ab-An-Or (Deer et al., 1992)، در محدوده سائیدین، آنورتوکلاز، آندزین، لابرادوریت و بیتونیت واقع می‌شوند. طبق محاسبات فرمول ساختاری، میانگین درصد آنورتیت فلدسپارهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های بازالتی - آندزیتی منطقه عباس‌آباد ۴۲/۷۲ درصد می‌باشد. به‌طور کلی ترکیب فلدسپارهای پلاژیوکلاز سنگ‌های بازالتی - آندزیتی عباس‌آباد در گستره بین An84.33-An28.14 قرار می‌گیرند. جزء مولکولی ارتوکلاز نیز در این نمونه‌های سنگی بین ۰/۵۲ تا ۹۷/۲۷ در تغییر است. فلدسپارهای آلکالن عمدتاً به شکل میکروولیت و درشت بلور در سنگ‌های تراکی بازالتی، تراکی آندزیتی بازالتی و تراکی آندزیتی حضور دارند. روندهای تغییرات اکسیدهای سدیم و کلسیم نشان‌گر تغییرات منظم و جدایشی ساده از مرکز پلاژیوکلازها به سمت حاشیه آنهاست و بیانگر منطقه‌بندی عادی در آنها می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- موقعیت ترکیبی فلدسپارهای سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس‌آباد در نمودار Ab-An-Or (Deer et al., 1992).

۳-۵. شیمی کلینوپیروکسن

کلینوپیروکسن، یک کانی مهم برای تعبیر و تفسیر سنگ‌شناسی محسوب می‌شود. این کانی، اصلی ترین کانی مافییک سنگ‌های آذرین بازی است و ترکیب آن به ترکیب سنگ بازالتی دربرگیرنده بسیار شبیه است. لذا مهمترین کانی سنگ‌های بازالتی بوده و انعکاس دهنده ترکیب مذاب بازالتی والد است. به منظور بررسی ترکیب کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس‌آباد، ۴۳۰ آنالیز نقطه‌ای از آنها در ۱۴ مقطع نازک- صیقلی صورت گرفت. در نمودار Q در برابر J

به طور معمول کانی کلینوپیروکسن غنی از کلسیم و منیزیم و فقیر از آهن است. مقدار عدد منیزیم ($Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+})$) به عنوان یک شاخص مهم در بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده $Mg\#$ همه کلینوپیروکسن‌ها بین ۰/۶۹ تا ۰/۹۴ قرار می‌گیرد. درصد اکسیدهای عناصر اصلی در کلینوپیروکسن‌های مورد پژوهش شامل SiO_2 (46.73-52.78 Wt%)، Al_2O_3 (1.04-6.61 Wt%)، $FeO(t)$ (5.70-11.58 Wt%)، MgO (11.03-16.31 Wt%)، Na_2O و CaO (14.17-23.36 Wt%)، TiO_2 (0.32-1.8 Wt%)، MnO (0.1-0.6 Wt%) (0.49-0.18 Wt) است. همانند تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی در ترکیب سنگ کل (الهیاری، ۱۳۸۹؛ Ghasemi and Rezaei-Kakhkhaei, 2015)، تغییرات مقادیر این اکسیدها در کلینوپیروکسن نیز می‌تواند بیانگر تأثیر فرآیند تفریق در تحول سنگ‌های آذرین منطقه از الیون بازالت به آندزیت باشد. برای بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن در سنگ‌های مورد پژوهش از نمودارهای تغییرات $Mg\#$ در برابر مقادیر کاتیونی دیگر عناصر استفاده شده است. با افزایش مقدار $Mg\#$ در کلینوپیروکسن‌ها مقادیر Mn ، Si و Fe^{2+} و به مقدار کمتر Na با شیب منفی کاهش و مقادیر Al ، Fe^{3+} ، Ti و Ca با شیب مثبت افزایش می‌یابد. در نمودار $Mg\#$ در برابر $Ca\# = Ca/(Ca+Mg)$ نیز کلینوپیروکسن‌ها عدد $Ca\#$ بالایی را نشان می‌دهند (شکل ۷).

۳-۶. دما- فشارسنجی کلینوپیروکسن

با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها می‌توان شرایط فیزیکی تبلور آنها را محاسبه کرد. برای بررسی دمای تبلور پیروکسن‌ها روش‌های دماسنجی مختلفی پیشنهاد شده که در این پژوهش از دو روش مناسب استفاده شده است. در روش Soesoo (1997)، تخمین دما بر اساس محاسبه شاخص‌های XPT و YPT به شرح

زیر انجام می‌شود:

$$XPT = 0.446SiO_2 + 0.187TiO_2 - 0.404Al_2O_3 + 0.346 FeO(\text{total}) - 0.052MnO + 0.309MgO + 0.431CaO - 0.446Na_2O$$

$$YPT = -0.369SiO_2 + 0.535TiO_2 - 0.317Al_2O_3 + 0.323FeO(\text{total}) + 0.235MnO - 0.516MgO - 0.167CaO - 0.153Na_2O$$

ویژگی مهم این روش دماسنجی، استوار بودن آن بر ترکیب یک پیروکسن به تنهایی است و برای انواع پیروکسن‌ها (کلسیم- منیزیم- آهن دار و منیزیم- آهن دار) قابل استفاده است. براساس این روش، کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس‌آباد در بازه دمایی حدود ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۸- الف) و فشار حدود ۶ کیلو بار (شکل ۸- ب) متبلور شده‌اند. یکی دیگر از روش‌های دماسنجی تک پیروکسن، روش Putirka (2008) است که با استفاده از معادلات ذیل صورت می‌گیرد:

$$10^4/T = 6.59 - 0.16 * \ln[Jd^{px} * Cali^q * Fm^{liq} / DiHb^{px} * Na^{liq} * Al^{liq}] - 0.65 * \ln[Mg^{liq} / (Mg^{liq} + Fe^{liq})] + 0.23 * \ln[Ca^{liq}] - 0.02p$$

نشانه‌های اختصاری در این معادله به شرح ذیل است:

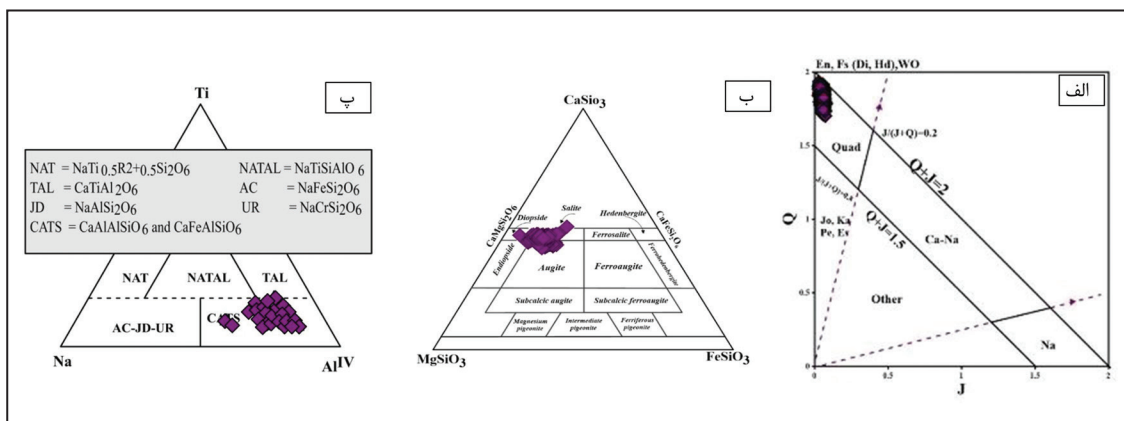
$$FeO + MgO = Fm$$

$$Diopside + Hedenbergite = DiHd$$

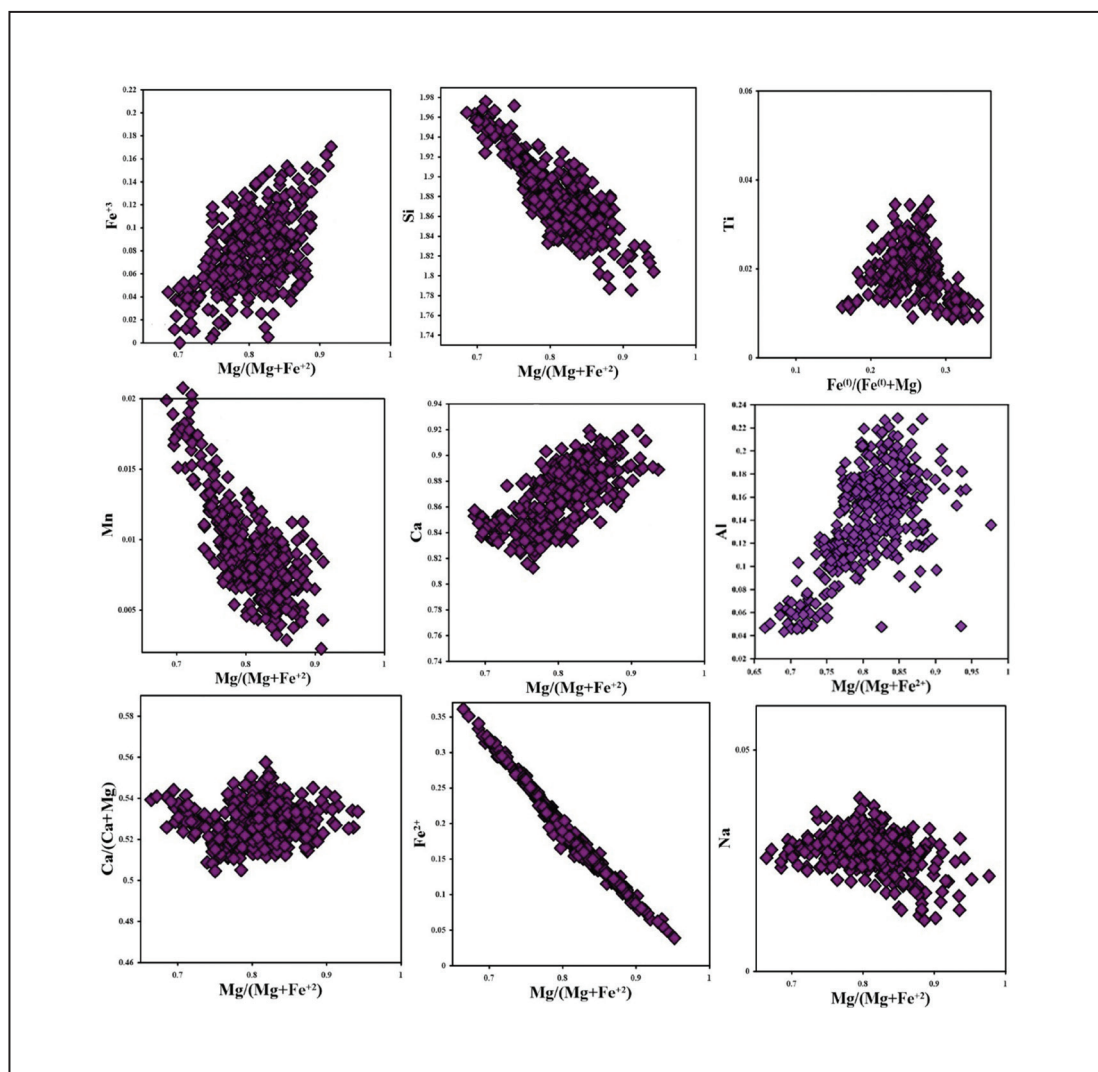
$$Liquid = Liq$$

$$pyroxene = px$$

$$P = -54.3299 + *T/10^4 + 36.4 + *T/10^4 * \ln[Jd^{px} / [Si^{liq}]^2 * Naliq * Al^{liq}] + 367 * [Na^{liq} * Al^{liq}]$$



شکل ۶- الف) موقعیت ترکیبی کلینوپروکسن‌های سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس آباد در الف) نمودار Q-J؛ ب) نمودار En-Wo-Fs (Morimoto et al., 1988)؛ پ) نمودار Ti-Na-AlIV (Papike et al., 1974).



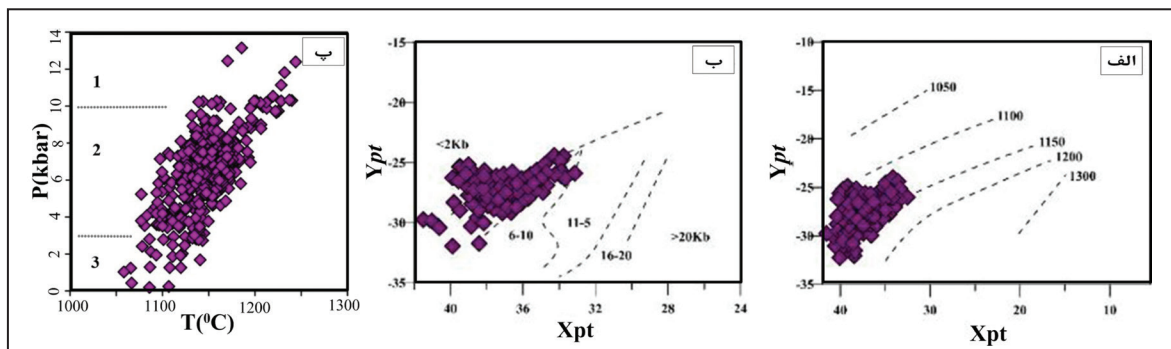
شکل ۷- تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپروکسن‌های سنگ‌های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس آباد در نمودارهای Mg# در برابر مقادیر کاتیونی عناصر Fe³⁺, Mn, Mg, Ca, Si, Fe²⁺, Al, Ti و Na در برابر Mg#.

گرفتن از اعماق بیشتر، ماگماهای بازالتی غالباً به سطح زمین می‌رسند و روانه‌های بازالتی را تشکیل می‌دهند و کمتر به صورت توده‌های گابرویی ظاهر می‌شوند. براساس پردازش برآوردهای دما- فشارسنجی این پژوهش (شکل ۸- پ)، ماگمای بازالتی مادر سازنده سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد، پس از تولید در گوشته، بالا آمده و در عمق بیش از ۳۰ کیلومتری، در پوسته زیرین انباشته شده و شروع به تبلور الیوین، آپاتیت، مگنتیت، پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن کرده است. سپس با باز شدن مجرا برای صعود، ماگمای بازالتی به اعماق ۱۰ تا ۳۰ کیلومتری (پوسته میانی) رسیده و در آشیانه ماگمایی این عمق مرحله اصلی و مهم تبلور را طی کرده است (تبلور پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن). سپس، با بالا آمدن ماگما در اعماق کمتر از ۱۰ کیلومتری (پوسته بالایی)، مرحله نهایی تبلور عمقی ماگما انجام شده و در نهایت، باقیمانده ماگما به همراه بلورهای شناور در آن از طریق شکاف‌ها و شکستگی‌ها بالا آمده و در سطح زمین جاری و منجمد شده است (شکل ۹).

با استفاده از این روش، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد بین ۱۰۵۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین فشار بین ۲ تا ۱۳ کیلوبار برآورد شده است (شکل ۸- پ) که در مجموع با محدوده دمایی تبلور ماگماهای بازالتی- آندزیتی سازگار است.

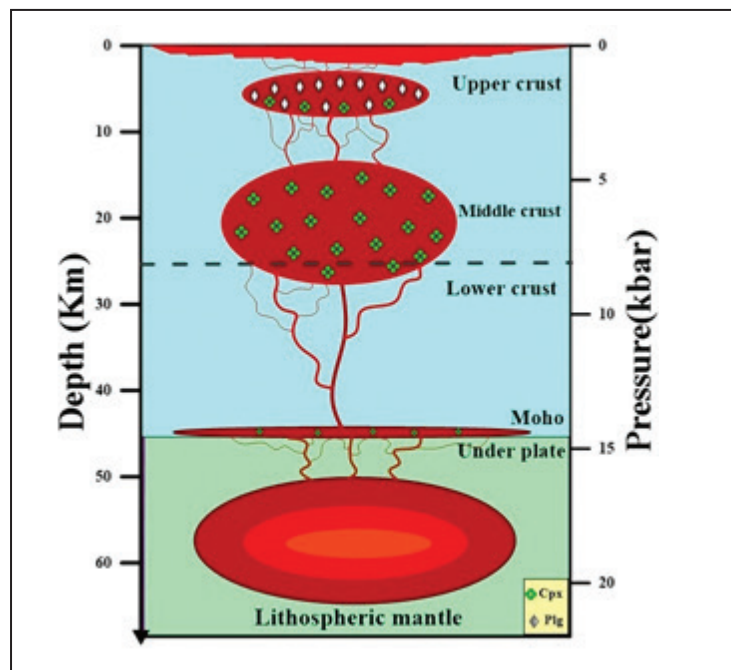
۳-۷. مدل تکامل تبلور کلینوپیروکسن

ماگمای بازالتی، به دلیل گرانشی پایین و دمای بالا، از تحرک بسیار بالایی برخوردار است و درست بعد از تولید در گوشته، شروع به بالا آمدن می‌کند و به علت چگالی پایین و گرانشی بسیار بالای پوسته قاره‌ای و نقش فیلتری آن در عبور دادن ماگما، در زیر پوسته زیرین در مرز موهو انباشته (Under Plating) و شروع به تبلور می‌کند. در صورت باز شدن مسیر مناسب، ماگما از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در پهنه‌های کششی، بالا می‌آید و در عمق یا اعماق مناسب در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی متحمل تبلور می‌شود. البته به دلیل گرانشی پایین، دمای بالا و سرچشمه



شکل ۸- برآوردهای دما و فشار تبلور کلینوپیروکسن در سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد (الف) و ب) برآورد دما و فشار به روش (Soesoo, 1997)؛ ب) برآورد دما و فشار به روش تک پیروکسن (Putirka, 2008).

شکل ۹- مدل تکامل تبلور کلینوپیروکسن در سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد در آشیانه‌های ماگمایی طبق محاسبات دما-فشارسنجی.



۳-۸. تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی براساس ترکیب کلینوپیروکسن

نمودار، کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس‌آباد در محدوده ساب‌آلکانل و آلکانل (شکل ۱۰- الف)، در نمودار Ti در مقابل Na+Ca (Le Terrier et al., 1982)، در محدوده آلکانل (شکل ۱۰- ب) و در نمودار (Le Bas, 1962) نیز در محدوده کالک آلکانل قرار می‌گیرند (شکل ۱۰- پ).

نمودار F1 - F2 نیز توسط Nisbet and Pearce (1977) برای جداسازی محیط‌های زمین‌ساختی سنگ‌های بازالتی حاوی کلینوپیروکسن ارائه شده است. این نمودار

از بین کانی‌های موجود در سنگ‌ها، کانی کلینوپیروکسن می‌تواند اغلب عناصر موجود در ماگما را در خود جای دهد و در نتیجه، نشان‌گر خوبی برای نوع ماگمایی باشد که از آن متبلور شده است. به باور Le Bas (1962) میزان Al و Ti موجود در شبکه ساختاری پیروکسن به درجه قلیایی بودن ماگما بستگی داشته و با استفاده از نمودار میزان SiO₂ در برابر Al₂O₃ موجود در ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، می‌توان گروه‌های ماگمایی پزالکانل، آلکانل و ساب‌آلکانل را از هم متمایز کرد. در این

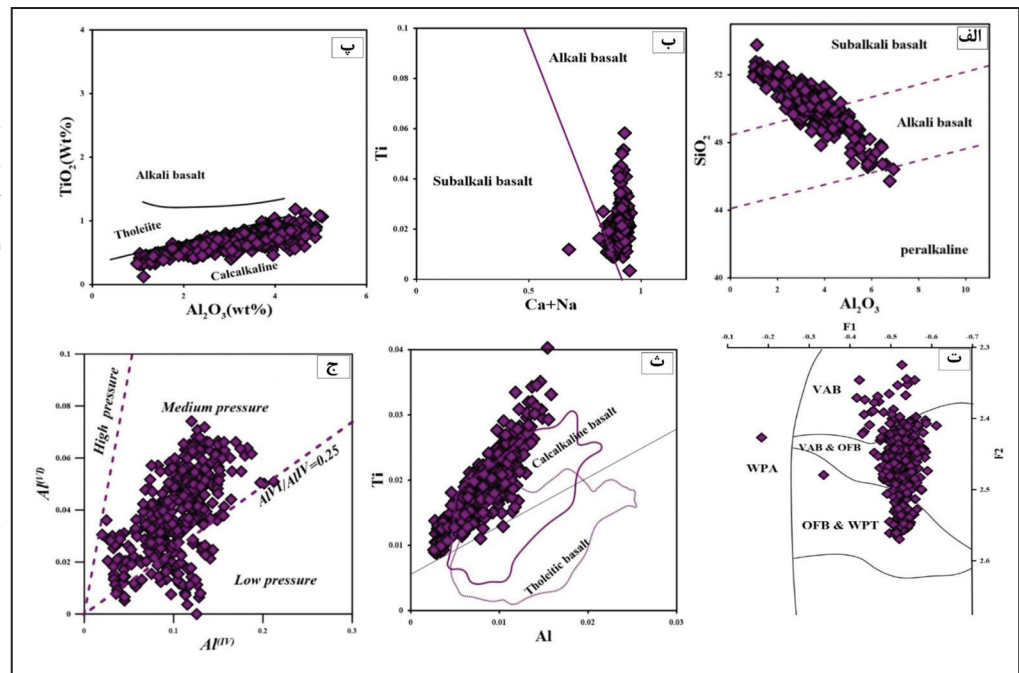
$$(0.1435 * MnO) + (0.0029 * MgO) - (0.0085 * CaO) - (0.016 * Na_2O)$$

در نمودار Ti-Al نیز می توان بازالت های کوهزایی (تولیت و کالک آلکالن) را از یکدیگر تفکیک کرد (Le Terrier et al., 1982). بر اساس این نمودار، اغلب کلینوپروکسن های سنگ های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس آباد در محدوده بازالت های کالک آلکالن قرار می گیرند (شکل ۱۰-ت).
بر اساس نموداری که توسط Aoki and Shiba (1973) ارائه شده است، پروکسن های سنگ های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس آباد اغلب در فشارهای کم تا متوسط تشکیل شده اند. این امر بیانگر آن است که تبلور اساسی پروکسن ها در هنگام صعود از اعماق به سمت بالا در یک محیط متغیر از فشار متوسط حاکم بر پوسته میانی تا فشار پایین حاکم بر پوسته بالایی صورت گرفته است (شکل ۱۰-ج).

کلینوپروکسن های بازالت های آلکالن درون ورقه ای (WPA) را از انواع دیگر ماگماها جدا می کند. جدایش ماگماهای تولیتی درون ورقه ای (WPT) از ماگماهای بازالتی کمان آتشفشانی (VAB) نیز به خوبی صورت می گیرد، اما همپوشانی زیادی بین تولیت های درون ورقه ای و بازالت های پهنه های اقیانوسی (WPT-OFB) و بازالت های کمان آتشفشانی با بازالت های پهنه های اقیانوسی (VAB-OFB) دیده می شود. نتایج حاصل از بررسی نمونه ها در این نمودار (شکل ۱۰-ت) نشانگر این است که اکثر نمونه ها در گستره بازالت های کمان آتشفشانی واقع شده اند. فرمول های محاسبه F1-F2 بر اساس آنالیز نقطه ای کانی های کلینوپروکسن به صورت زیر است:
$$F1 = -(0.012 * SiO_2) - (0.0807 * TiO_2) + (0.0026 * Al_2O_3) - (0.0012 * FeOt) - (0.0026 * MnO) + (0.0087 * MgO) - (0.0128 * CaO) - (0.0419 * Na_2O)$$

$$F2 = -(0.0469 * SiO_2) - (0.0818 * TiO_2) + (0.012 * Al_2O_3) - (0.0041 * FeOt) -$$

شکل ۱۰- موقعیت ترکیبی کلینوپروکسن های سنگ های بازالتی - آندزیتی ائوسن عباس آباد در نمودارهای تعیین سری ماگمایی (الف) نمودار در مقابل SiO_2 از Al_2O_3 از (Le Bas (1962)؛ ب) نمودار Ca+Na از (Le Terrier et al. (1982)؛ پ) نمودار TiO_2 در مقابل Al_2O_3 از (Le Bas (1962)؛ ت) نمودار F1-F2 از (Nisbet and Pearce (1977)؛ ث) نمودار Ti در مقابل Al از (Le Terrier et al. (1982)؛ ج) نمودار AIVI در برابر AIIIV از (Aoki and Shiba (1973).



۳-۹. زمین شیمی عناصر کمیاب و ایزوتوپی

پوسته ای نظیر تبلور تفریقی (Fractional Crystallization) الیون، کلینوپروکسن و پلاژیوکلاز و هضم و آلیایش (Assimilation and Contamination) در تشکیل این سنگ ها است که از آنها تحت عنوان Assimilation-Fractional Crystallization نام برده می شود. مقادیر عناصر کمیاب و نسبت های آنها به همراه نسبت های ایزوتوپی (شکل ۱۱- پ، ت، ج) نیز دخالت این فرایندها و همچنین نقش سازندگان پهنه فرورانش و به ویژه سیال های آزاد شده از ورقه فرورانه شده را نشان می دهند. دیگر شواهد AFC شامل منطقه بندی، بافت غربالی و خوردگی در بلورهای الیون، کلینوپروکسن و پلاژیوکلاز است (شکل ۴). این بافت ها به همراه تغییرات در عناصر ناسازگار نظیر Ba و K, Rb بیانگر آلودگی ماگمای بازالتی داغ گوشته ای با پوسته قاره ای در جریان صعود، جایگزینی و توقف در آشیانه های ماگمایی مسیر عبور است.

محاسبه نسبت های اولیه $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ انجام شده است (Faure and Mensing, 2005; Allegre, 2008). برای بدست آوردن نسبت های اولیه (initial ratios)، نیاز به داشتن زمان (t) تشکیل نمونه ها است که بر اساس مجموعه فسیل های نومولیتی موجود در بین لایه های آهکی درون توالی آتشفشانی، سن ۴۰ میلیون سال (ائوسن میانی - بالایی) در این روابط منظور شده است. بنابراین، محاسبه $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ در یک مخزن کندریتی در ۴۰ میلیون سال پیش، با استفاده از روابط ۳ و ۴ مورد محاسبه قرار گرفته اند

به دلیل انجام پژوهش های متعدد بر روی زمین شیمی عناصر اصلی و کمیاب توسط پژوهشگران پیشین و به ویژه (Ghasemi and Rezaei-Kakhkhaei, 2015)، در این مطالعه تنها سه نمونه از بازالت های عباس آباد برای تعیین پرتوزن آنها با استفاده از ترکیبات ایزوتوپی، در آزمایشگاه ایزوتوپی مؤسسه زمین شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین در شهر پکن برای عناصر کمیاب، خاکی کمیاب و نسبت های ایزوتوپی Sr-Nd مورد آنالیز قرار گرفت (جدول ۱ و ۲). نظام های زمین شیمیایی و ایزوتوپی Sr-Nd این سنگ ها را می توان برای تعیین ویژگی های محل منشأ و فرایندهای آشیانه ماگمایی کم عمق پوسته ای مورد استفاده قرار داد. بکارگیری این نظام ها بیانگر حضور یک گوشته متاسوماتیسم شده با نسبت اورانیم به سرب بالا (HIMU) است (شکل ۱۱- الف) که ناشی از دخالت سازندگان پهنه فرورانش و به ویژه سیال های آزاد شده از ورقه فرورونده روی پهنه فرورانش است (شکل ۱۱- ب، پ، ت). این سنگ ها دارای نسبت های پایین Sm/Nd در طیف بین ۰/۱۷۳ تا ۰/۱۹۶ بوده (جدول ۱) که نشانگر درجه های پایین ذوب بخشی در حضور گارنت است؛ زیرا Sm در گارنت و Nd در مذاب سازگار است (Temizel et al., 2012).

یافته های پژوهشگران پیشین (الهیاری، ۱۳۸۹؛ برزگری، ۱۳۹۴؛ برزگری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Ghasemi and Rezaei-Kakhkhaei, 2015) و این پژوهش (شکل ۱۱- ج، ح) بیانگر نقش فرایندهای آشیانه ماگمایی کم عمق

(Faure and Mensing, 2005; Allegre, 2008)

رابطه ۱: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i + ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} (e^{\lambda t} - 1)$

رابطه ۲: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i + ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} (e^{\lambda t} - 1)$

رابطه ۳: $[^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}]_{\text{CHURi}} = [^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}]_{\text{CHUR}}$ امروز

$(e^{\lambda t} - 1) \times [^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}]_{\text{CHUR}}$ امروز

رابطه ۴:

$[^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}]_{\text{CHUR40Ma}} = [^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}]_{\text{CHUR}}$ امروز -

$[^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}]_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)$

از طرف دیگر، نسبت‌های ایزوتوپی ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) نمونه‌های زمینی برحسب تابع اِپسیلون (ϵ) که مقدار آن توسط مقایسه با CHUR تعیین شده، بیان می‌شوند. مقادیر مثبت اِپسیلون بیان‌گر تولید Nd از منابع تهی شده‌تر با نسبت Sm/Nd بالاتر از CHUR است. مقادیر منفی این پارامتر نیز نشان می‌دهند که سنگ‌ها از منابع غنی شده‌تری سرچشمه گرفته‌اند که دارای نسبت Sm/Nd کمتری نسبت به CHUR بوده‌اند. بنابراین مقدار اِپسیلون نئودیمیم برای زمان تشکیل نمونه‌های منطقه ($t=40$ Ma) نسبت به مخزن کندریتی براساس رابطه ۵ محاسبه شده است (Faure and Mensing, 2005; Allegre, 2008)

رابطه ۵:

$\epsilon\text{Nd}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{سنگ}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR40Ma}} - 1] \times 10^4$

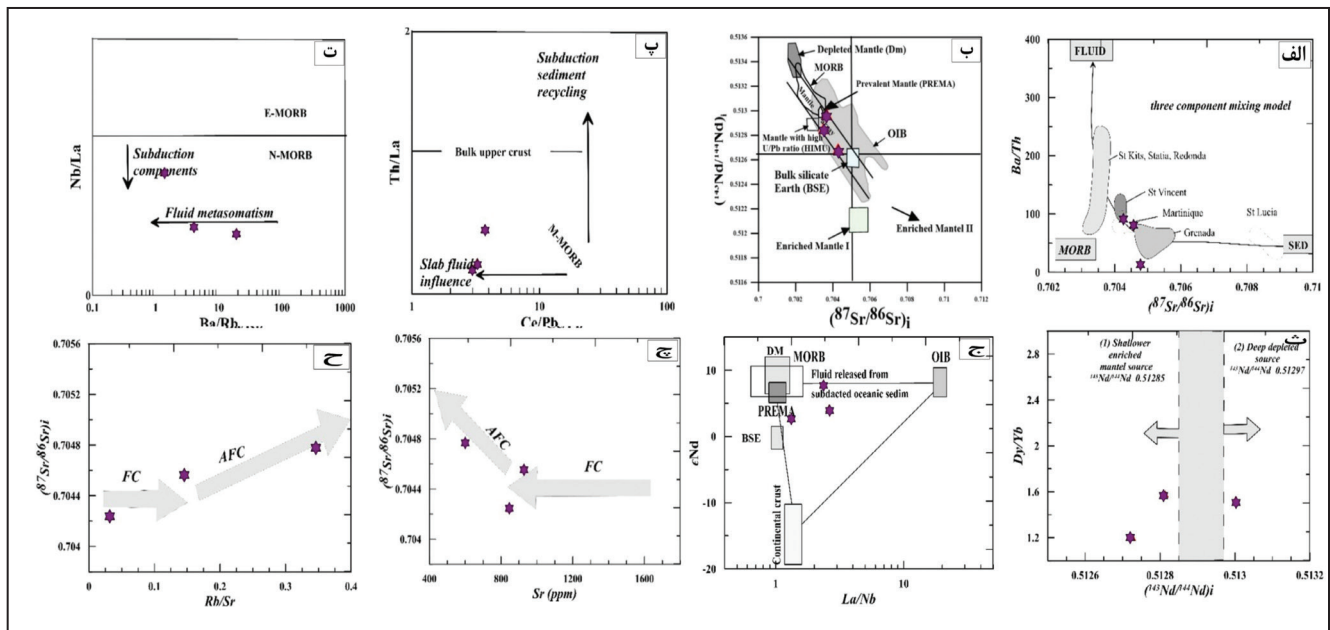
نسبت $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ در این سنگ‌ها در طیفی از ۰/۰۹۳۶ تا ۱/۰۰۲ متغیر است (جدول ۱). نسبت‌های $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ امروزی و آغازین این سنگ‌ها با در نظر گرفتن سن ۴۰ میلیون سال برای آنها به ترتیب بین ۰/۷۰۴۲۸۵ تا ۰/۷۰۵۳۰۲ و بین ۰/۷۰۴۲۳۵ تا ۰/۷۰۴۷۷۰ تغییر می‌کند که بسیار همگن هستند و تغییرات بسیار ناچیزی دارند (جدول ۲). این نسبت‌های آغازین نشان‌دهنده یک منشأ گوشته لیتوسفری غنی شده است که با مشارکت سیالات آزاد شده از ورقه فرورانده، متاسوماتیزه و غنی شده است. مقادیر $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ امروزی و آغازین این سنگ‌ها نیز به ترتیب بین ۰/۵۱۲۷۷۵ تا ۰/۵۱۳۰۳۴ و ۰/۵۱۲۷۴۵ تا ۰/۵۱۳۰۰۲ در تغییر است. مقادیر اِپسیلون Nd امروزی ($\epsilon\text{Nd}(0)$) و ۴۰ میلیون سال قبل $\epsilon\text{Nd}(t)$ آنها نیز به ترتیب بین ۲/۶۷ تا ۷/۷۲ تا ۳ تا ۸/۰۵ در تغییر است (جدول ۱). این نسبت‌های آغازین و مقادیر اِپسیلون نشان‌دهنده یک منشأ گوشته‌ای تا حدودی غنی شده توسط متاسوماتیسم است. این سنگ‌ها در نمودار Nd در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در قلمرو گوشته‌های غنی شده با ویژگی‌های محل منشأ نوع OIB قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲-الف، ب) و بسیار مشابه با سنگ‌های آتشفشانی ترشیری پونتید و آتاتولی (شکل ۱۲-پ) در ترکیه (Temizel et al., 2012) هستند.

جدول ۱- نتایج تجزیه عناصر کمیاب Rb-Sr و Sm-Nd و نسبت‌های ایزوتوپی آن‌ها در سه نمونه از بازالت‌های ائوسن عباس‌آباد.

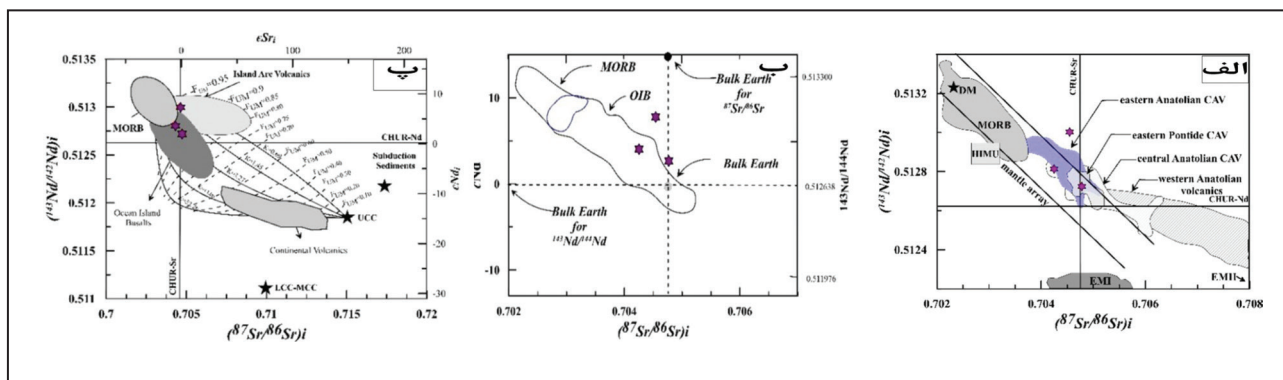
Sample	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd}(t)$
MA2	27.3	844	0.0936	0.7043	0.7042	5.16	24	0.1298	0.512846	0.512809	4.56
MA4	134	925	0.4188	0.7048	0.7045	5.15	24	0.1298	0.513034	0.512960	7.72
MA9	208	601	1.002	0.7053	0.7047	5.38	27.2	0.1197	0.512775	0.512707	2.67

جدول ۲- نتایج تجزیه عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در سه نمونه از بازالت‌های ائوسن عباس‌آباد.

Sample	Sc	V	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Cs	Ba	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf
MA2	24.4	324	85.8	26.7	16	27.5	800	1.51	525	5.79	1.94	9.92	0.54	151	3.22
MA4	19.9	248	109	23.5	9.82	131	867	1.94	526	6.41	2.1	10	0.607	181	4.32
MA9	7.98	119	196	8.94	6.4	191	553	1.65	259	17.6	4.67	25.6	1.41	450	10.3
Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
MA2	25.8	51.4	6.34	25.9	5.08	1.46	4.57	0.809	4.04	0.815	2.26	0.417	2.57	0.411	25.6
MA4	23.4	49.8	5.87	24.2	4.74	1.25	4.5	0.801	4.14	0.797	2.45	0.464	2.72	0.424	25.5
MA9	33.7	59.6	7.44	26.5	4.6	0.878	4.37	0.774	4.39	0.926	2.88	0.554	3.67	0.574	28.2



شکل ۱۱- موقعیت ترکیبی سنگ‌های بازالتی ائوسن عباس آباد در نمودارهای مختلف از Temizel et al. (2012).



شکل ۱۲- موقعیت ترکیبی بازالت‌های ائوسن عباس آباد در نمودارهای نسبت‌های ایزوتوپی مختلف از Temizel et al. (2012).

۴- نتیجه گیری

فشارهای ۲ تا ۱۳ کیلوبار در سه آشیانه ماگمایی عمقی در پوسته زیرین (عمق بیش از ۳۰ کیلومتری)، پوسته میانی- بالایی (عمق ۳۰ تا ۱۰ کیلومتری) و پوسته بالایی (عمق کمتر از ۱۰ کیلومتری) است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود بابت حمایت از انجام این پژوهش ابراز می‌دارند.

بررسی شیمی کانی ها به همراه شیمی سنگ کل عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوپی سنگ‌های بازالتی- آندزیتی ائوسن عباس آباد نشانگر ماهیت کالکوآلکانل- آلکانل و گوشته محل منبع با ویژگی‌های مشابه با نوع OIB در یک محیط زمین‌ساختی نوع کمان آتشفشانی حاشیه قاره برای آنهاست که با نتایج مطالعات شیمی سنگ کل عناصر اصلی و کمیاب پژوهشگران پیشین سازگاری بسیار خوبی دارد. بکارگیری روش‌های مختلف دما- فشارسنجی براساس شیمی کانی کلینوپیروکسن نیز بیانگر تبلور ماگما در محدوده دمایی ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و

کتابنگاری

- الهیاری، س.، ۱۳۸۹- پتروژنز سنگ‌های آذرین ائوسن فوقانی نوار ماگمایی کاهک-عباس‌آباد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۵۱ صفحه.
- بادامه، ع.، ۱۳۸۲- پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی منطقه میاندشت (شرق شاهرود)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، ۱۳۱ صفحه.
- برزگری، ل.، ۱۳۹۴- تعیین نرخ رشد و هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های آندزیتی و بازالتی منطقه عباس‌آباد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۰۷ صفحه.
- برزگری، ل.، قاسمی، ح.، رضایی، کهنخایی، م.، ۱۳۹۷- نرخ هسته‌بندی و رشد بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن در سنگ‌های آندزیتی و بازالتی منطقه عباس‌آباد، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و ششم، شماره اول، ص ۶۳ تا ۷۸.
- صادق‌زاده، ش.، ۱۳۷۷- پتروژنی سنگ‌های آتشفشانی منطقه شمال شرق میاندشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۱۴ صفحه.
- عرب‌زاده بنی‌اسدی، م.، ۱۳۹۶- شیمی کانی و تعیین شرایط فیزیکی‌شیمیایی تبلور در سنگ‌های آتشفشانی منطقه عباس‌آباد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۸۶ صفحه.
- قاسمی، ح.، الهیاری، س.، طاهری، ع. و صادقیان، م.، ۱۳۹۲- موقعیت چینه‌شناختی و تحلیل یافتگی سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی عباس‌آباد، شمال شرق شاهرود، پژوهش‌های چینه‌شناسی و رسوب‌شناسی، سال بیست و نهم، شماره پیاپی ۵۰، شماره اول، ص ۲۵ تا ۴۲.
- موسوی، ا.، ۱۳۸۸- پتروژنی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی منطقه چغندرسر (جنوب غرب عباس‌آباد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، ۱۴۸ صفحه.

References

- Allegre, C. J., 2008- Isotope Geology. Cambridge University Press. 534p.
- Aoki, K. and Shiba, I. 1973- Pyroxene from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan. *Lithos* 6: 41-51. Doi:10.1016/0024-4937(73)90078-9.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1992- An introduction to the rock forming minerals. Longmans, 2th Editions, London, 696p.
- Faure, G. and Mensing, T.M., 2005- Isotopes: Principles and Applications. 3rd edition. John Wiley and Sons, USA. 897p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010064579>.
- Ghasemi, H. and Rezaei-Kahkhaei M., 2015- Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Mineralogy and Petrology* 109(2): 235-252. DOI: 10.1007/s00710-014-0353-3.
- Le Bas, M. J., 1962- The Role of Aluminium in Igneous Clinopyroxenes with Relation to Their Parentage. *American Journal of Science* 260: 267-288. Doi: 10.2475/ajs.260.4.267.
- Le Terrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982- Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters* 59: 139-154. Doi:10.1016/0012-821X(82)90122-4.
- Li, C. F., Chu, Z. Y., Guo, J. H., Li, Y. L., Yang, Y. H. and Li, X. H., 2015- A rapid single column separation scheme for high precision Sr-Nd-Pb isotopic analysis in geological samples using thermal ionization mass spectrometry. *Analytical Methods* 7: 4793-4802. Doi: 10.1039/c4ay02896a.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988- Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist* 173: 1123-1133. DOI: 10.1180/minmag.1988.052.36.
- Nisbet, E. G., and Pearce, J. A., 1977- Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63: 149-160. Doi:10.1007/BF00398776.
- Papike, J. J., Cameron, K. L., Baldwin, K., 1974- Amphiboles and pyroxenes: characterization of other than quadrilateral components and estimates of ferric iron from microprobe data. In *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 6: 1053-1054.
- Putirka, K. D., 2008- Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69: 61-120. DOI: 10.2138/rmg.2008.69.3.
- Soesoo, A., 1997- A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation P-T estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)* 119: 55-60. Doi:10.1080/11035899709546454.
- Temizel, I., Arsalan, M., Ruffet, G. and Peucat, J. J., 2012- Petrochemistry, geochronology and Sr-Nd isotopic systematics of the Tertiary collisional and post-collisional volcanic rocks from the Ulubey (Ordu) area, eastern Pontide, NE Turkey: implications for extension-related origin and mantle source characteristics. *Lithos* 128:126-147. Doi 10.1016/J.lithos.2011.10.006.

Mineral Chemistry and Whole Rock Isotope Chemistry: an aperture to petrogenesis of the Abbasabad basaltic- andesitic rocks, east of Shahrood

H. Ghasemi^{1*}, M. Arabzadeh Baniasadi² and M. Rostami²

¹Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Ph. D. Student, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2020 January 15

Accepted: 2020 May 18

Abstract

The Abbasabad Eocene volcano-sedimentary belt in the east of Shahrood includes of basaltic-andesitic rocks and related pyroclastics along with interlayers of sedimentary rocks. The volcanic rocks include olivine basalt, trachybasalt, trachy andesybasalt, trachyandesite and andesite with various textures such as hyalomicrolitic porphyry, microlitic porphyry, glomeroporphyry, trachytic and sieve textures. The main minerals of the rocks are clinopyroxene and feldspar. Pyroxene composition ranges from diopside to augite and feldspar composition is in the ranges of orthoclase and oligoclase to bytownite. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{Initial})$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\text{Initial})$ ratios of these rocks, taking into account the age of 40 Ma for them, range from 0.7042 to 0.7047 and 0.5127 to 0.5130 respectively. Also, the values of $\epsilon\text{Nd}(0)$ and $\epsilon\text{Nd}(t=40\text{Ma})$ of them range between 2.67 to 7.72 and 3.8 to 8.8, respectively, indicate an enriched mantle source for them. Whole rock, isotopic and clinopyroxene chemistry indicate arc-related calc-alkaline-alkaline nature and basaltic composition of the parental magma originated from partial melting of an enriched OIB source in an extensional intra-arc setting. Geothermobarometry calculations on clinopyroxene indicate a temperature range of 1100-1150 C° and pressures of 2-13 kb for crystallization of the magma.

Keywords: Mineral chemistry, Isotope chemistry, Abbasabad, Shahrood.

For Persian Version see pages 135 to 144

*Corresponding author: H. Ghasemi; E-mail: h-ghasemi@shahroodut.ac.ir