

Study of clinopyroxenes in shoshonitic rocks of the Qaleh-Khargooshi area (west of the Yazd province) by EPMA and LA-ICP-MS

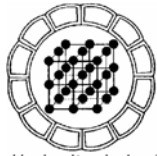
Ghodrat Torabi

*Geology Department, Isfahan University, Isfahan, Iran
E-mail: Torabighodrat@yahoo.com*

(Received 25/4/2006.; received in revised form: 2/11/2006)

Abstract: Upper Eocene shoshonitic rocks have very good exposures in the Qaleh-Khargooshi area. These rocks have a wide range of SiO₂ content (absarokite to toscanite) and belong to fifth phase of Eocene volcanism in this area. Clinopyroxene is present in all members of shoshonitic group as phenocryst, but they have altered in toscanites. The study of clinopyroxenes composition shows that this mineral has been crystallized before occurrence of contamination and magma mixing. These minerals are enriched in REE, specially in LREE, and show negative anomaly of Eu. Primary magma of these shoshonitic rocks was formed by low degree melting of an enriched upper mantle source, and experienced the contamination and magma mixing during ascending through the thick continental crust.

Keywords: *Shoshonite, Upper Eocene, Clinopyroxene, Qaleh-Khargooshi*



مطالعه کالینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی (غرب استان یزد) با استفاده از EPMA و LA-ICP-MS

قدرت ترابی

عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی دانشگاه اصفهان
پست الکترونیکی: Torabighodrat@yahoo.com

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۲/۵، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۵/۹/۵)

چکیده: سنگ‌های شوشونیتی ائوسن بالایی در منطقه قلعه خرگوشی رخنمون بسیار خوبی دارند. این سنگ‌ها دارای طیف گسترده‌ای از SiO_2 (آبساروکیت تا توسکانیت) بوده و به فاز پنجم آتشفشانی ائوسن وابسته‌اند. در تمام اعضای این سری سنگی کانی کلینوپیروکسن را می‌توان به صورت فنوکریست مشاهده کرد. کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های کوارتزدار (توسکانیت‌ها) دگرسان شده‌اند. مطالعه ترکیب کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که این کانی پیش از آرایش و اختلاط ماگمایی متبلور شده است. این کانی‌ها از نظر عناصر نادر خاکی به ویژه عناصر نادر خاکی سبک، بسیار غنی بوده و دارای بی‌هنجاری منفی Eu هستند. ماگمای مادر سنگ‌های شوشونیتی از ذوب بخشی با درجه پایین یک خاستگاه گوشته بالایی غنی شده به وجود آمده و در طول گذار از پوسته قاره‌ای ضخیم دستخوش آرایش و اختلاط ماگمایی شده است.

واژه‌های کلیدی: شوشونیت، ائوسن بالایی، کلینوپیروکسن، قلعه خرگوشی.

مقدمه

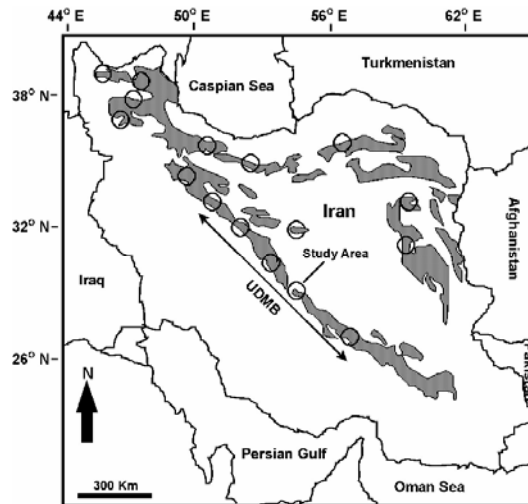
سنگ‌های غنی از پتاسیم از نظر فراوانی محدود بوده ولی از نظر جغرافیایی گسترش بسیاری دارند. این سنگ‌ها به صورت پیکره‌های آتشفشانی، نیمه عمیق و نفوذی در محیط‌های زمین-ساختی چندی همچون کراتون‌های قاره‌ای، مناطق بعد از فرورانش، نوارهای کوهزایی فعال، و در مواردی در درون صفحه اقیانوسی دیده می‌شوند. سنگ‌های سری شوشونیتی با برخی از کمان‌های قاره‌ای و اقیانوسی در ارتباطند [۱]. چگونگی تشکیل و ماهیت این سنگ‌ها در نوشته‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۲ تا ۶]. سنگ‌های سری شوشونیتی در بخش‌های مختلفی از ایران نیز رخنمون خوبی دارند [۷ تا ۱۰].

کالینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی از نظر سنگ‌شناختی بسیار اهمیت دارند، چرا که ترکیب آنها براساس شیمی گدازه میزبان آنها تغییر می‌کند [۱۱]. این موضوع به ویژه در مورد فنوکریست‌های کالینوپیروکسن صادق است و ترکیب آنها تفاوت‌های شیمیایی موجود بین انواع مختلف ماگماهای بازالتی را به صورتی خیلی دقیق‌تر از ترکیب زمینه بازتاب می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. این ویژگی به عنوان یک سرشتی برای بازالت‌های جایگاه‌های مختلف زمین‌ساختی به کار رفته است [۱۳ و ۱۴]. توجه به ماهیت کانی کالینوپیروکسن که در بسیاری از نوشته‌ها به عنوان یک کانی سنگ‌زا نام برده شده است، می‌توان از ترکیب این کانی برای بررسی سرشت و دگرگونی‌های اولیه ماگماهای شوشونیتی استفاده کرد.

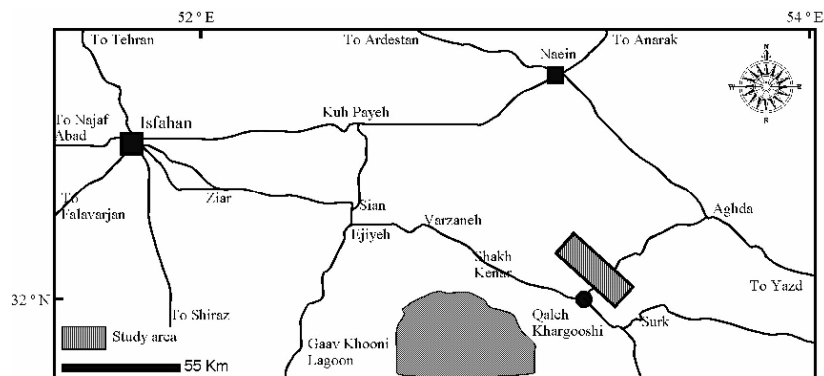
منطقه مورد مطالعه جزئی از نوار ماگمایی ارومیه-دختر بود که در راستای شمال غرب-جنوب شرق شرق قرار گرفته است. موقعیت منطقه قلعه خرگوشی، راه‌های دسترسی و نقشه زمین‌شناسی آن در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده‌اند. قلعه خرگوشی نام یک قلعه متروکه قدیمی است که در شمال شرق تالاب گاوخونی قرار دارد. مجموعه شوشونیتی قلعه خرگوشی در طول یک فعالیت آتشفشانی گسترده در زمان ائوسن تشکیل شده است. این مجموعه شوشونیتی دارای تنوع ترکیبی گسترده‌ای از سنگ‌های بازیک تا سنگ‌های اسیدی است. اعضای سنگی سری شوشونیتی از بازیک به سمت اسیدی عبارتند از: آبساروکیت، شوشونیت، باناکیت (لاتیت)، و توسکانیت [۱۵]. مجموعه شوشونیتی مورد بررسی به صورت ۳ رشته کوه شمال غرب-جنوب شرقی بوده و نزدیک به گسل نائین-سورک و با فاصله بسیار کمی در غرب افیولیت سورک و گنبد آتشفشانی آن واقع شده است. ناحیه مورد بررسی دارای طولی در حدود ۲۵ و عرض تقریبی ۴ کیلومتر است.

مطالعات انجام شده قبلی [۸] نشان می‌دهد که در ناحیه نطنز تا سورک در زمان ائوسن ۶ فاز آتشفشانی رخ داده است که فازهای اول تا چهارم و فاز ششم سرشتی کالک آلکالن داشته و فاز پنجم آن دارای ماهیت شوشونیتی با سن ائوسن بالایی است (جدول ۱). در منطقه قلعه

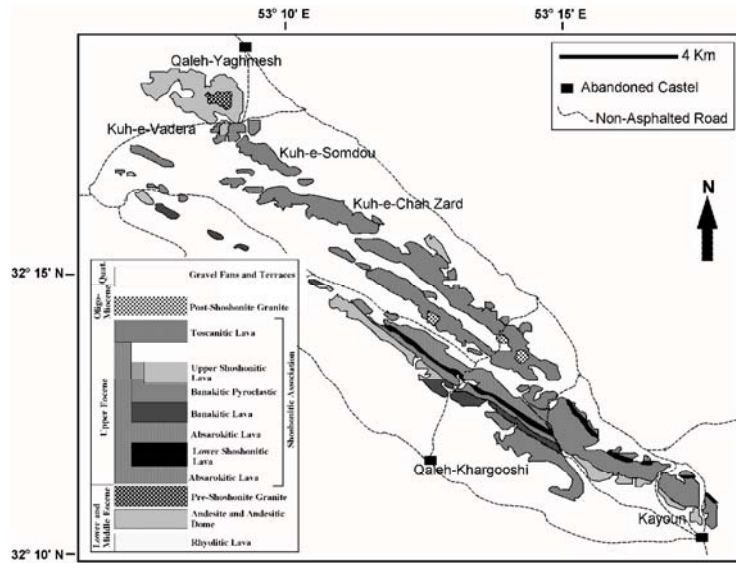
خرگوشی و مناطق مجاور تنها فازهای سوم، چهارم، و پنجم را می‌توان مشاهده کرد. در زمان الیگوسن یک تودهٔ گرانیته به درون مجموعهٔ شوشونیتی قلعه خرگوشی نفوذ کرده است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که فرایند آتشفشانی مورد مطالعه از نوع شکافی و در محیط خشکی صورت گرفته است. نوع فوران نیز استرومبولی تا ساب پلینی است. تصاویر صحرایی رخنمون‌های رشتهٔ شوشونیتی مورد مطالعه در شکل ۴ آورده شده است.



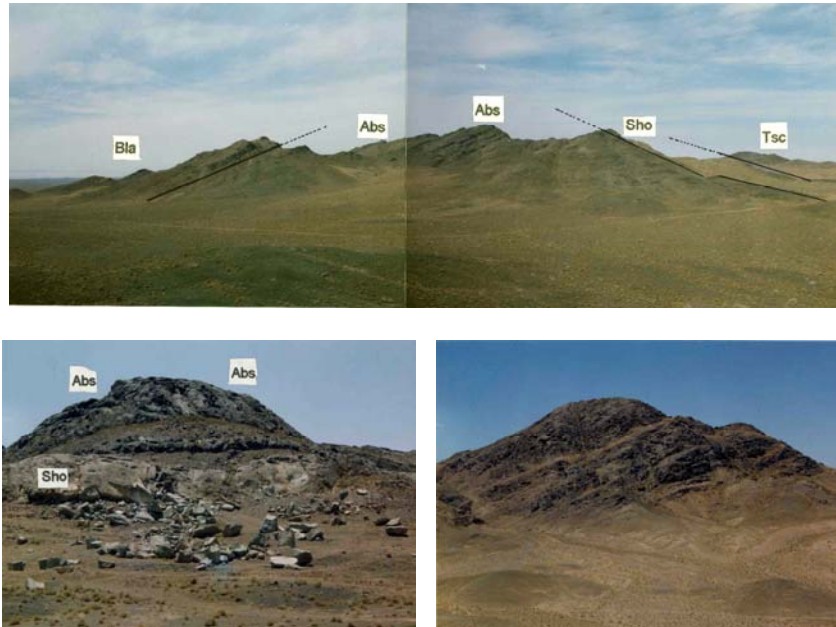
شکل ۱ رخنمون سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در ایران. رخنمون‌های سنگ‌های شوشونیتی نیز به صورت دایره مشخص شده‌اند. منطقهٔ مورد بررسی در بخش میانی نوار ماگمایی ارومیه-دختر (UDMB) قرار دارد.



شکل ۲ نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد بررسی.



شکل ۳ نقشه زمین شناسی منطقه قلعه خرگوشی.



شکل ۴ تصاویر صحرایی مجموعه شوشونیتی قلعه خرگوشی. آبساروکیت‌ها، شوشونیت‌ها، باناکیت یا لاتیت‌ها، و توسکانیت‌ها به ترتیب با علائم Abs، Sho، Bla، و Tsc نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ دنباله سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در منطقه سورک تا نطنز [۸]. فاز پنجم آتشفشانی ائوسن دارای ماهیت شوشونیتی است.

۶	آندزیت بالایی: ریولیت + آندزیت + داسیت	فازهای آتشفشانی ائوسن در ناحیه نطنز - سورک
۵	مجموعه شوشونیتی از آبساروکیت تا توسکانیت	
۴	آندزیت میانی: آندزیت + ریولیت + ریوداسیت	
۳	ریوداسیت	
۲	آندزیت پایینی: آندزیت + آندزیت پتاسیم دار + داسیت	
۱	ریولیت + توف و ایگنمبریت	

بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمی کلی سنگ [۱۰] نشان می‌دهد که ماگمای مادر سنگ‌های شوشونیتی در اثر ذوب بخشی با درجه پایین پریدوتیت‌های غنی شده گوشته بالایی که بالای صفحه فرو رنده قرار دارند، به وجود آمده‌اند. هنگام صعود و گذار از درون پوسته ضخیم قاره‌ای، ماگمای اولیه که دارای ترکیب آکالی بازالت است، باعث ذوب بخش‌هایی از پوسته قاره‌ای و تشکیل ماگمای آناتکسی گرانیته می‌شود. بسته به سهم ماگمای گرانیته هنگام اختلاط ماگمایی و آلیش، ماگماهایی با ترکیب آبساروکیتی، شوشونیتی، باناکیتی یا لاتیتی و توسکانیتی به وجود می‌آیند. شواهد آلیش و اختلاط ماگمایی صورت گرفته در بررسی‌های صحرایی، مطالعات سنگ‌شناختی و ژئوشیمیایی به خوبی مشخص است. تبدیل لوسیت به آنالسیم، برخی از آنالسیم‌ها به آلبیت، برخی از سانیدین‌ها به آلبیت و آنورتوکلاز، و بالاخره کلینوپیروکسن به آلبیت با همان قالب، وجود بافت آنتی راپاکیوی، حاشیه غبار آلود سانیدین‌ها، حاشیه مژرس کوارتزهای توسکانیت‌ها، تغییرات ریخت‌شناسی پلاژیوکلازها از حالت صفحه‌ای به دندریتی، اسفرولیتی و اسفنجی، تغییرات فراوانی عناصر با افزایش مقدار SiO_2 سنگ‌ها و ... مهمترین شواهد افزوده شدن SiO_2 , Na_2O و H_2O به ماگمای اولیه شوشونیتی در روند گذار از پوسته قاره‌ای هستند. این سنگ‌ها از نظر REE بسیار غنی و جزء شوشونیت‌های مرتبط با فرورانش هستند.

کلینوپیروکسن یک کانی شاخص سنگ‌زایشی است و از آنجاکه تنها کانی مافیک و سالم موجود در سنگ‌های شوشونیتی مورد بررسی است، و در بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که در مراحل اولیه تبلور به وجود آمده است، بررسی آن داده‌های بسیار مفیدی را در مورد ماهیت ماگمای شوشونیتی مورد بررسی، و زمان آلیش و اختلاط ماگمایی که در مرجع [۱۰] بیان شده است، در اختیار می‌گذارد. در این نوشته به بررسی ترکیب کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از روش‌های EPMA و LA-ICP-MS پرداخته خواهد شد. با استفاده از این دو روش آنالیز نقطه‌ای می‌توان به ترتیب مقدار عناصر اصلی و کمیاب کانی مورد آنالیز را با دقت مناسب تعیین کرد.

روش کار

کلینوپیروکسن‌ها کانی‌هایی هستند که در سنگ‌های مورد مطالعهٔ آبساروکیت، شوشونیت، و لاتیت‌ها سالم دیده می‌شوند. کلینوپیروکسن‌های موجود در توسکانیت‌ها کاملاً دگرسان شده‌اند. در این کار از تمام واحدهای سنگی دارای کلینوپیروکسن، مقطع نازک صیقلی تهیه شد و برای آنالیز نقطه‌ای در تعیین عناصر اصلی با روش EPMA، مقاطع نازک صیقلی به وسیله کربن پوشش داده شده‌اند. پس از آنالیزهای EPMA به منظور به دست آوردن مقدار عناصر کمیاب، پوشش کربن مقاطع نازک برداشته شد و همان نقاطی که به وسیله EPMA آنالیز شده بودند مورد آنالیز با روش LA-ICP-MS قرار گرفتند. پس از انجام آنالیز، نقاطی که مقدار عناصر کمیاب آنها به دست آمده است به صورت حفره‌هایی در مقطع نازک مشخص هستند زیرا آن بخش از مقطع نازک به وسیله لیزر برداشته شد.

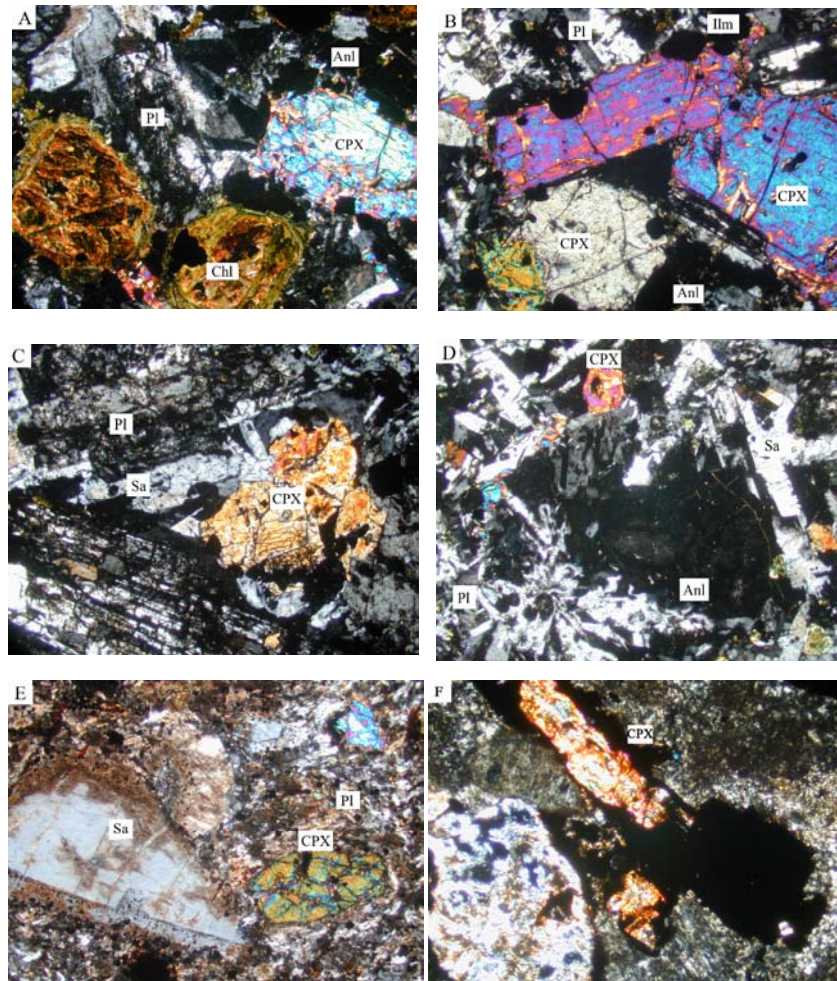
آنالیزهای نقطه‌ای کانی‌ها برای تعیین عناصر اصلی، با یک دستگاه الکترون میکروپروب JEOL EPMA مدل JXA-8800 (WDS) با ولتاژ شتاب دهندهٔ 20 kV و جریان 12 nA، در دانشگاه کانازاوا ژاپن انجام گرفت. به منظور تعیین مقدار عناصر کمیاب نیز از دستگاه LA-ICP-MS استفاده شد. قطر نقاط آنالیز به روش LA-ICP-MS ۵۰ میکرون بوده است. مدل دستگاه سایش لیزری (Laser Ablation) مورد استفاده Microlas GeoLas Q-plus: 193 nm ArF excimer بوده و برای طیف سنجی از طیف سنج جرمی پلاسمای القایی مزدوج (ICP-MS) مدل Agilent 7500S استفاده شد. مشخصات و چگونگی آنالیز کانی‌ها با این دستگاه در مرجع [۱۶] آورده شده است. در این روش، بخش کوچکی از کانی مورد بررسی در اثر تابش لیزر به گاز تبدیل و سپس با دستگاه ICP-MS آنالیز شد. در تعیین مقدار Fe^{3+} برای محاسبهٔ فرمول ساختاری از روش عنصرسنجی کانی‌ها استفاده شد [۱۷ و ۱۸].

سنگ‌شناسی و شیمی کانی

تمام واحدهای سنگی مورد بررسی از آبساروکیت‌ها تا لاتیت‌ها دارای بافت پورفیری بوده و کلینوپیروکسن‌ها به صورت فنوکریست دیده می‌شوند. در بررسی سنگ‌شناسی آبساروکیت‌ها و شوشونیت‌ها، شواهد بافتی به خوبی نشان می‌دهند که زمان تبلور کلینوپیروکسن پس از الیوین بوده است. در لاتیت‌ها نیز کلینوپیروکسن، اولین کانی تبلور یافته است. این کانی‌ها در آبساروکیت‌ها دارای بیشترین فراوانی و در توسکانیت‌ها دارای کمترین مقدار هستند. چنانکه قبلاً اشاره شد کلینوپیروکسن‌های موجود در توسکانیت‌ها دگرسان شده‌اند. تصاویر میکروسکوپی سنگ‌ها و کانی‌های مورد بررسی در شکل ۵ آورده شده‌اند.

از کانی‌هایی که در همراهی کلینوپیروکسن‌ها دیده می‌شوند می‌توان به پلاژیوکلاز، سانیدین، آنالسیم، الیوین دگرسان، کوارتز، ایلمنیت، مگنتیت و آپاتیت اشاره کرد. الیوین

دگرسان و آنالسیم فقط در آبساروکیت‌ها و شوشونیت‌ها دیده می‌شوند. کوارتز نیز در سنگ‌های توسکانیتی قابل مشاهده است.



500 μ

شکل ۵ تصاویر سنگ‌شناسی سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی. (A, B) آبساروکیت‌های منطقه مورد بررسی با کانی‌های الیوین دگرسان (کلریت) (Chl)، کلینوپیروکسن (CPX)، پلاژیوکلاز (Pl)، آنالسیم (Anl) و ایلمنیت (Ilm). (C, D) شوشونیت‌ها با کانی‌های کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز، آنالسیم، سانیدین (Sa). (E) باناکیت یا لاتیت‌ها که کانی‌های کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و سانیدین در آنها دیده می‌شوند. (F) توسکانیت‌ها که کلینوپیروکسن‌های درون آنها دگرسان شده و به کلریت تبدیل شده‌اند.

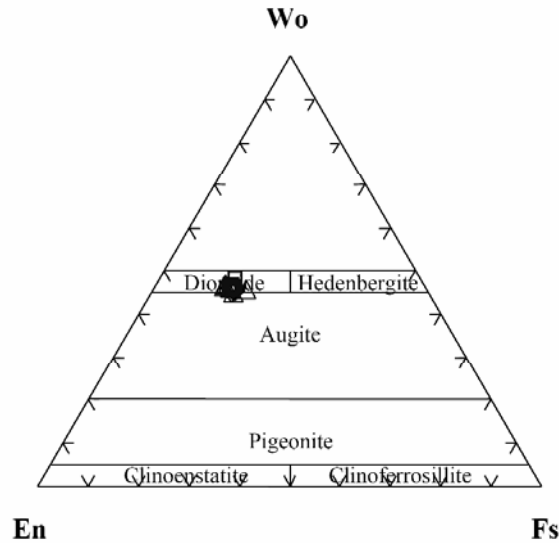
به منظور بررسی ترکیب کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی، ۵ نمونه از سنگ‌ها برای آنالیز نقطه‌ای انتخاب شدند و ۱۸ نمونه کانی کلینوپیروکسن مورد آنالیز قرار گرفتند که نتایج آنالیزهای عناصر اصلی و فرمول ساختاری محاسبه شده براساس مقدار درصد عناصر اصلی کلینوپیروکسن‌ها در جدول ۲ و مقدار عناصر کمیاب و نادر حاکی آنها نیز به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند. محاسبه فرمول ساختاری، تعیین درصد هر کدام از اعضای پایانی محلول جامد کلینوپیروکسن‌ها و رسم آنها در مثلث پیروکسن‌ها نشان می‌دهد که تمامی کلینوپیروکسن‌ها از نوع دیوپسیدند (شکل ۶).

جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی (wt%) کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی (استان یزد) و فرمول ساختاری محاسبه شده آنها.

Sample	Rock	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	NiO	Total
۸	Absarokite	۵۰.۴۱	۰.۹۹	۳.۷۴	۹.۹۷	۰.۳۲	۱۲.۹۳	۲۱.۳۳	۰.۶۲	۰.۰۱	۰.۱۸	۰.۰۰	۱۰۰.۵۴
۸		۵۰.۹۸	۰.۸۷	۳.۶۶	۹.۶۶	۰.۲۸	۱۳.۱۸	۲۱.۵۲	۰.۵۵	۰.۰۲	۰.۲۶	۰.۰۰	۱۰۱.۰۳
۸		۲۵	۰.۸۳	۴.۱۷	۹.۹۸	۰.۳۰	۱۳.۹۴	۲۱.۶۳	۰.۵۶	۰.۰۲	۰.۲۰	۰.۰۱	۱۰۰.۸۷
۸		۵۱.۰۰	۰.۷۹	۳.۸۸	۹.۵۶	۰.۲۹	۱۳.۳۷	۲۱.۵۵	۰.۵۴	۰.۰۳	۰.۲۲	۰.۰۱	۱۰۱.۲۴
۸		۴۹.۶۱	۱.۰۹	۴.۸۳	۹.۸۶	۰.۳۱	۱۲.۴۷	۲۱.۴۵	۰.۵۴	۰.۰۲	۰.۲۱	۰.۰۰	۱۰۰.۳۹
۹	Absarokite	۵۰.۴۹	۰.۹۰	۴.۳۶	۹.۹۵	۰.۳۰	۱۳.۷۹	۲۱.۳۳	۰.۵۴	۰.۰۱	۰.۲۶	۰.۰۰	۱۰۰.۹۴
۹		۵۰.۷۱	۰.۸۹	۴.۱۸	۹.۴۵	۰.۲۹	۱۳.۰۷	۲۱.۸۹	۰.۵۵	۰.۰۱	۰.۲۷	۰.۰۱	۱۰۱.۳۳
۹		۵۰.۰۲	۰.۹۵	۴.۶۱	۹.۴۸	۰.۲۸	۱۲.۸۴	۲۲.۰۱	۰.۴۶	۰.۰۴	۰.۲۰	۰.۰۱	۱۰۰.۹۰
۹		۵۰.۰۵	۱.۰۱	۴.۰۲	۹.۳۰	۰.۳۰	۱۳.۹۸	۲۱.۷۷	۰.۴۳	۰.۰۱	۰.۲۲	۰.۰۰	۱۰۰.۰۷
۱۱	Shoshonite	۴۹.۰۵	۱.۰۶	۵.۹۰	۹.۳۴	۰.۲۸	۱۲.۷۰	۲۱.۵۸	۰.۵۶	۰.۰۱	۰.۲۶	۰.۰۲	۱۰۰.۷۶
۱۱		۴۹.۲۹	۱.۰۷	۵.۶۷	۹.۴۸	۰.۲۸	۱۲.۶۶	۲۱.۴۱	۰.۶۵	۰.۰۲	۰.۲۶	۰.۰۱	۱۰۰.۸۱
۷	Shoshonite	۵۱.۴۲	۰.۷۰	۳.۰۰	۹.۴۰	۰.۳۳	۱۳.۱۸	۲۱.۲۵	۰.۵۴	۰.۰۲	۰.۲۵	۰.۰۰	۱۰۰.۰۹
۷		۵۰.۶۹	۰.۶۶	۳.۱۲	۹.۴۴	۰.۴۰	۱۳.۲۴	۲۱.۹۲	۰.۵۸	۰.۰۳	۰.۲۸	۰.۰۰	۱۰۰.۳۵
۳	Banakite	۵۱.۹۸	۰.۴۵	۲.۱۱	۸.۹۸	۰.۴۹	۱۳.۴۰	۲۲.۲۵	۰.۵۲	۰.۰۱	۰.۲۰	۰.۰۰	۱۰۰.۳۹
۳		۵۱.۴۲	۰.۵۲	۳.۰۸	۸.۰۶	۰.۴۱	۱۳.۸۱	۲۲.۵۵	۰.۴۷	۰.۰۱	۰.۲۴	۰.۰۰	۱۰۰.۵۷
۳		۵۱.۴۲	۰.۶۰	۳.۰۹	۸.۰۹	۰.۳۹	۱۳.۶۷	۲۲.۳۲	۰.۵۲	۰.۰۲	۰.۲۰	۰.۰۰	۱۰۰.۳۳
۳		۵۱.۸۹	۰.۳۸	۱.۷۷	۱۰.۷۶	۰.۷۰	۱۳.۴۸	۲۲.۱۴	۰.۵۲	۰.۰۳	۰.۲۵	۰.۰۰	۱۰۰.۹۲
۳		۵۱.۴۳	۰.۵۶	۳.۱۲	۸.۰۶	۰.۳۸	۱۳.۶۷	۲۲.۸۰	۰.۴۸	۰.۰۲	۰.۲۰	۰.۰۰	۱۰۰.۸۴

Structural formula base on the 6 Oxygen

Sample	Rock	Si	Ti	Al	Fe2+	Fe3+	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	Ni	Total
۸	Absarokite	۱.۸۸	۰.۰۳	۰.۱۶	۰.۲۴	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷۲	۰.۸۵	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۸		۱.۸۹	۰.۰۲	۰.۱۶	۰.۲۴	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۷۳	۰.۸۵	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۸		۱.۸۶	۰.۰۲	۰.۱۸	۰.۲۲	۰.۰۹	۰.۰۱	۰.۷۲	۰.۸۶	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۸		۱.۸۸	۰.۰۲	۰.۱۷	۰.۲۳	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷۴	۰.۸۵	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۸		۱.۸۵	۰.۰۳	۰.۲۱	۰.۲۴	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۶۹	۰.۸۶	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۹	Absarokite	۱.۸۷	۰.۰۳	۰.۱۹	۰.۲۶	۰.۰۵	۰.۰۱	۰.۷۱	۰.۸۵	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۹		۱.۸۷	۰.۰۳	۰.۱۸	۰.۲۲	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷۲	۰.۸۷	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۹		۱.۸۵	۰.۰۳	۰.۲۰	۰.۲۲	۰.۰۸	۰.۰۱	۰.۷۱	۰.۸۷	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۹		۱.۸۷	۰.۰۳	۰.۱۸	۰.۲۳	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۷۲	۰.۸۷	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۱۱	Shoshonite	۱.۸۲	۰.۰۳	۰.۲۶	۰.۲۰	۰.۰۹	۰.۰۱	۰.۷۰	۰.۸۶	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۱۱		۱.۸۳	۰.۰۳	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۰۹	۰.۰۱	۰.۷۰	۰.۸۵	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۷	Shoshonite	۱.۹۲	۰.۰۲	۰.۱۳	۰.۲۷	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۷۳	۰.۸۵	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۷		۱.۸۹	۰.۰۲	۰.۱۴	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۰۱	۰.۷۴	۰.۸۷	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۳	Banakite	۱.۹۳	۰.۰۱	۰.۰۹	۰.۲۳	۰.۰۵	۰.۰۲	۰.۷۴	۰.۸۹	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۳		۱.۹۰	۰.۰۱	۰.۱۳	۰.۱۸	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷۶	۰.۸۹	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۳		۱.۹۱	۰.۰۲	۰.۱۳	۰.۱۹	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۷۶	۰.۸۹	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۳		۱.۹۴	۰.۰۱	۰.۰۸	۰.۲۷	۰.۰۷	۰.۰۲	۰.۷۰	۰.۸۹	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰
۳		۱.۹۰	۰.۰۲	۰.۱۴	۰.۱۸	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۷۵	۰.۹۰	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۴.۰۰



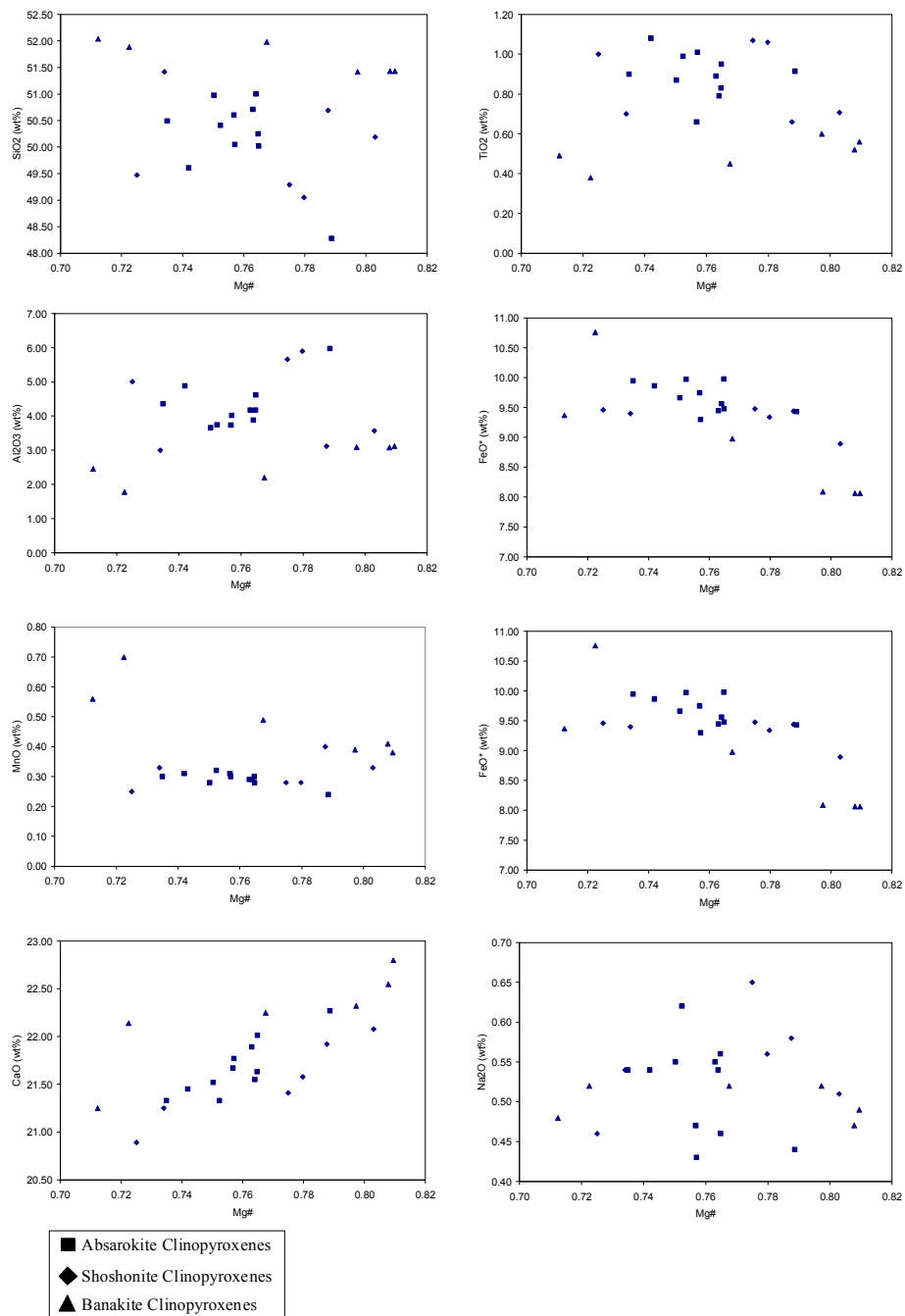
شکل ۶ موقعیت کلاینوپيروكسن‌های موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی در مثلث ولاستونیت، انستاتیت، فروسیلیت، آبساروکیت‌ها با علامت مربع، شوشونیت‌ها با علامت لوزی و باناکیت‌ها با علامت مثلث نشان داده شده‌اند. تمامی کلاینوپيروكسن‌ها در گستره دیوپسید قرار گرفته‌اند.

بحث

در استفاده از ترکیب کانی‌های مختلف موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی، برای بررسی ماهیت ماگمای اولیه و سنگ خاستگاه، کلاینوپيروكسن‌ها بهترین انتخاب‌اند همه الیومین‌ها دگرسان شده و نیز فلدسپات‌ها از خود بافت‌هایی با شواهد اختلاط و آرایش ماگمایی نشان می‌دهند. بررسی ترکیب کلاینوپيروكسن‌ها نشان می‌دهد که:

۱- در نمودارهای تغییرات فراوانی عناصر در مقابل $Mg\#$ به عنوان عاملی که بیانگر پیشرفت تفریق ماگمایی است (شکل ۷)، فراوانی عناصر نیز همخوان با روند پیشرفت تفریق ماگمایی خواهد بود. اما کلاینوپيروكسن‌هایی با ترکیب مختلف را در یک واحد سنگی می‌توان مشاهده کرد. محاسبه عدد منیزیم به صورت $Mg\# = Mg / (Mg + Fe^{2+})$ بوده است.

۲- درصد عناصر و فاکتورهایی که بیانگر پیشرفت تفریق ماگمایی هنگام تبلور کلاینوپيروكسن‌ها هستند (SiO_2 , MgO , FeO^* , $Mg\#$, ...) با نوع سنگ ارتباطی ندارند. به عبارت دیگر کلاینوپيروكسن‌های موجود در آبساروکیت‌ها بیشترین $Mg\#$ و کلاینوپيروكسن‌های موجود در توسکانیت‌ها کمترین $Mg\#$ را ندارند.



شکل ۷ نمودارهای تغییرات ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در برابر Mg#.

۳- کلاینوپيروكسن‌های موجود در شوشونیت‌ها کمترین و کلاینوپيروكسن‌های توسکانیت‌ها بیشترین مقدار REE را دارند (شکل ۸). برخلاف روند مورد انتظار، فراوانی REE‌ها در کلاینوپيروكسن‌ها از پیشرفت تفریق ماگمایی تبعیت نمی‌کند و آساروکیت‌ها کمترین REE را ندارند.

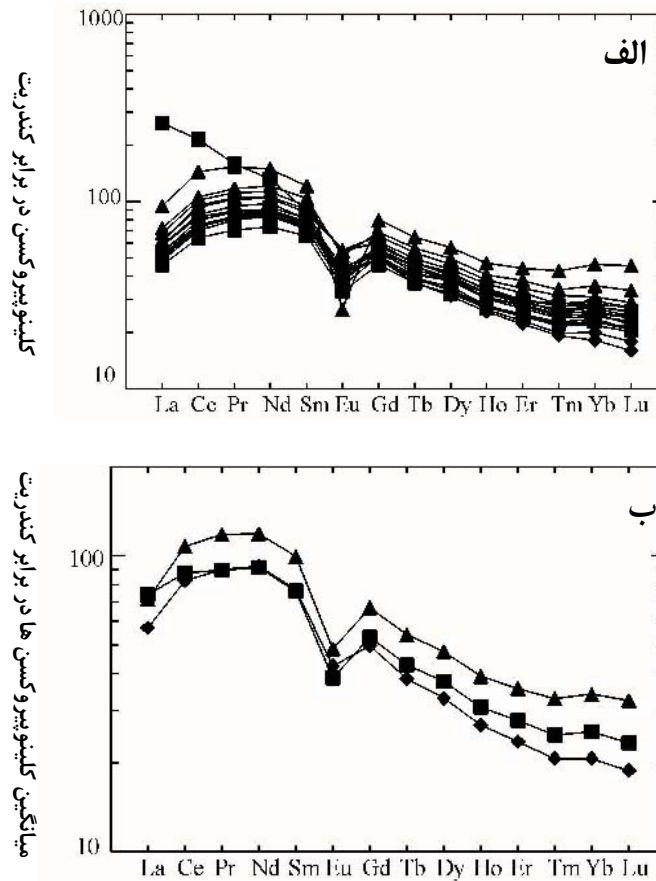
شواهد بالا و اینکه کلاینوپيروكسن‌ها در تمامی سنگ‌های سری شوشونیتی مورد بررسی از آساروکیت‌های غنی از الیوین، تا توسکانیت‌های غنی از کوارتز دیده می‌شوند، بیانگر رخداد اختلاط ماگمایی پس از تبلور کلاینوپيروكسن‌هاست. به یقین اگر تبلور کلاینوپيروكسن‌ها پس از اختلاط ماگمایی صورت گرفته بود، الگوی تغییرات فراوانی عناصر در آنها از چنین نظمی (به خصوص در مورد فراوانی عناصر نادر خاکی) تبعیت نمی‌کرد.

با نگاهی به جدول نتایج آنالیز و مقدار عناصر نادر خاکی موجود در کلاینوپيروكسن‌ها (شکل ۸) می‌توان پی‌برد که مقدار عناصر نادرخاکی سبک در آنها بسیار بیشتر از عناصر نادر خاکی سنگین است. بررسی نمودارهای عنکبوتی بهنجارسازی ترکیب کلاینوپيروكسن‌ها در برابر کندریت نیز نشان می‌دهد که این کانی‌ها از نظر فراوانی عناصر نادرخاکی (به خصوص عناصر نادر خاکی سبک) بسیار غنی بوده و عنصر Eu نیز از خود آنومالی [بی‌هنجاری] منفی نشان می‌دهد. غنی بودن این کانی‌ها از نظر عناصر نادرخاکی (به خصوص در مورد LREEها) بیانگر درجه ذوب بخشی پایین سنگ خاستگاه و نیز غنی بودن آن است. از آنجا که کلاینوپيروكسن‌های مورد بررسی در مراحل اولیه تفریق ماگمایی متبلور شده‌اند و غنی از REE هستند، لذا غنی بودن آنها از نظر عناصر نادر خاکی را می‌توان به غنی بودن ماگمای اولیه و به دست آمدن آن از ذوب بخشی درجه کم نسبت داد.

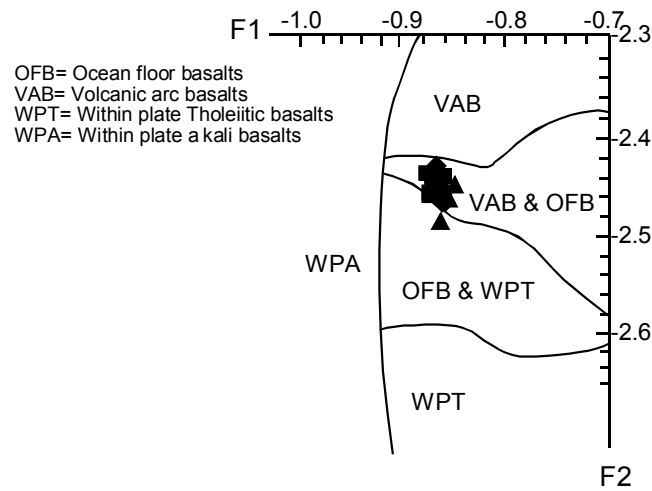
به منظور استفاده از ترکیب کلاینوپيروكسن‌های موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی منطقه قلعه خرگوشی در دسترسی به جایگاه زمین‌ساختی و ماهیت ماگمای سازنده آنها، از مطالب و نمودارهای ارائه شده در مراجع [۱۱ تا ۱۳] استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده‌اند. براساس شکل ۹ این کلاینوپيروكسن‌ها به بازالت‌های قوس‌های آتشفشانی و یا بازالت‌های کف اقیانوس تعلق دارند. ولی موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی تعلق آنها به سنگ‌های قوس‌های آتشفشانی را نشان می‌دهد (زون ماگمایی ارومیه - دختر). شکل ۱۰ نیز بیانگر تعلق آنها به بازالت‌های کوهزایی است.

در مورد استفاده از ترکیب پيروكسن‌ها در بررسی‌های زمین‌گرماسنجی یعنی برآورد دما و فشار تشکیل آنها، نوشته‌های چندی وجود دارند که سعی بر استفاده از آنها شده است [۱۹،

۲۰، ۲۱]. استفاده از این درجه‌بندی‌ها، دمای ۷۷۰ تا ۸۸۲ درجه سانتی‌گراد را برای گستره فشار تا ۱۵ کیلوپا به دست دادند. در مورد فشارسنجی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی نیز باید گفت از آنجاکه این فشارسنج براساس مقدار Cr موجود در ساختار کلینوپیروکسن‌هاست درباره این کلینوپیروکسن‌ها فاقد کارآرایی است. چرا که مقدار Cr در ساختار این پیروکسن‌ها بسیار کم است و قابل مقایسه با پیروکسن‌های موجود در سنگ‌هایی همچون پریدوتیت‌ها نیست.



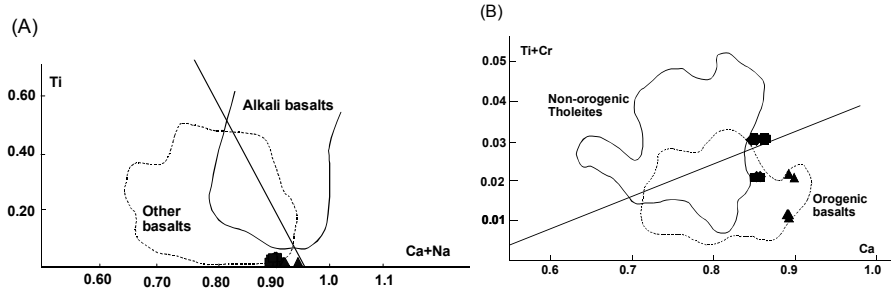
شکل ۸ نمودارهای عنکبوتی بهنجارسازی عناصر نادر خاکی کلینوپیروکسن‌ها در برابر کندریت. کلینوپیروکسن‌ها از نظر LREE نسبت به HREE غنی‌ترند. تصویر (ب) میانگین ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در سنگ‌های آبساروکیت (مربع)، شوشونیت (لوزی)، و باناکیت (مثلث) را نشان می‌دهد.



شکل ۹ نمودار F1-F2 برای تفکیک محیط‌های زمین‌ساختی‌های جهانی مختلف براساس استفاده از ترکیب کِلینوپیروکسن‌ها [۱۳].

$$F1 = - (0.012 \times \text{SiO}_2) - (0.0807 \times \text{TiO}_2) + (0.0026 \times \text{Al}_2\text{O}_3) - (0.0012 \times \text{FeO}^*) - (0.0026 \times \text{MnO}) + (0.0087 \times \text{MgO}) - (0.0128 \times \text{CaO}) - (0.0419 \times \text{Na}_2\text{O})$$

$$F2 = - (0.0469 \times \text{SiO}_2) - (0.0818 \times \text{TiO}_2) - (0.0212 \times \text{Al}_2\text{O}_3) - (0.0041 \times \text{FeO}^*) - (0.0435 \times \text{MnO}) - (0.0029 \times \text{MgO}) + (0.0085 \times \text{CaO}) + (0.016 \times \text{Na}_2\text{O})$$



شکل ۱۰ نمودارهای تفکیک انواع بازالت‌ها براساس استفاده از ترکیب کِلینوپیروکسن‌ها [۱۲]. در نمودار A، آلكالی بازالت‌ها از بازالت‌های دیگر تفکیک شده و در نمودار B، نمونه‌هایی که در نمودار A در گستره بازالت‌های دیگر قرار می‌گیرند از هم تفکیک می‌گردند.

برداشت

ترکیب کلینوپيروكسن‌های موجود در سنگ‌های سری شوشونیتی از روند پیشرفت تفریق ماگمایی می‌کند ولی از آنجایی که کلینوپيروكسن‌هایی با ترکیب متفاوت را در یک واحد سنگی می‌توان مشاهده کرد که نشان از تبلور کلینوپيروكسن‌ها پیش از آلیس و اختلاط ماگمایی (که در مرجع [۱۰] گزارش شده است)، دارد. به عبارت دیگر ترکیب نوع کلینوپيروكسن‌های موجود در یک واحد سنگی و فراوانی REE‌ها در آن، ربطی به اسیدی یا بازی بودن آن ندارد. توجه به ماهیت کانی کلینوپيروكسن و بررسی سایر کانی‌های موجود در سری شوشونیتی قلعه خرگوشی نشان می‌دهد که کلینوپيروكسن‌ها بهترین انتخاب برای بررسی ماهیت سنگ خاستگاه، مشخصات ماگمای اولیه و سرشت ذوب بخشی هستند. سنگ خاستگاه ماگمای شوشونیت‌های مورد مطالعه، یک پریدوتیت غنی شده است که از ذوب بخشی درجه پایین آن ماگمایی غنی از عناصر نادر خاکی به وجود آمده است. زیرا در اثر ذوب بخشی درجه پایین، ماگمای حاصل از آن، غنی از عناصر ناسازگار خواهد بود. ماگمای اولیه شوشونیتی که یک آلکالی بازال است، پس از تبلور کلینوپيروكسن، در هنگام گذار از پوسته قاره‌ای ضخیم، دستخوش آلیس و اختلاط ماگمایی شده است. شواهد این آلیس و اختلاط ماگمایی که در بررسی‌های صحرایی، ژئوشیمیایی و سنگ‌شناسی قابل مشاهده است در مقدمه آورده شده است.

مراجع

- [1] Peccerillo A., "Potassic and ultrapotassic rocks: Compositional characteristics, petrogenesis, and geologic significance", *Episodes*, 15, No. 4 (1992) 243-251.
- [2] Conceição R.V., Green D.H., "Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompression melting of phlogopite+pargasite lherzolite", *Lithos*, 72, Issues 3-4 (2004) 209-229.
- [3] Eklund O., Shebanov A., "Prolonged postcollisional shoshonitic magmatism in the southern Svecofennian domain – a case study of the Åva granite–lamprophyre ring complex", *Lithos*, 80, Issues 1-4 (2005) 229-247.
- [4] Foley S., "Petrological characterization of the source components of potassic magmas, Geochemical and experimental constraints", *Lithos* 28 (1992) 187-204.

- [5] Foley S.F., Peccerillo A., *"Potassic and ultrapotassic magmas and their origin"*, Lithos 28 (1992) 181-185.
- [6] Muller D., Groves D. I., *"Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization"*, Lecture Notes in Earth Sciences No.56 (1997) 238 p.
- [7] Aftabi A., Atapour H., *"Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran"*, Episodes, 23, No. 2 (2000) 119-125.
- [8] Amidi S.M., *"Etude géologique de la région de Natanz-Surk (Iran, Central)"*, Thèse Ph.D., Univ. Grénoble, France (1977) 316 p.
- [9] Mehdizadeh H., Liotard J.M., Dautria J.M., *"Geochemical characteristics of an intracontinental shoshonitic association: the example of the Damavand volcano, Iran"*, Comptes Rendus Geosciences 334, Issue 2 (2002) 111-117.
- [۱۰] ترابی ق.، "زمین شناسی و پترولوژی مجموعه شوشونیتی قلعه خرگوشی (سرو بالا، غرب استان یزد)"، پایان نامه کارشناسی ارشد پترولوژی، گروه زمین شناسی دانشگاه اصفهان (۱۳۷۵) ۱۸۱ صفحه.
- [11] Rollinson H.R., *"Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation"*, Longman Scientific and Technical, UK (1993) 352 p.
- [12] Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M., *"Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series"*, Earth and Planetary Science Letters 59(1) (1982) 139-154.
- [13] Nisbet E.G., Pearce J.A., *"Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 149-160.
- [14] Le Bas M.J., *"The role of aluminum in igneous. clinopyroxenes with relation to their parentage"*, American Journal of Science 260 (1962) 267-288.
- [15] Mackenzie D.E., Chappell B.W., *"Shoshonite and calc-alkaline lavas from the highlands of Papua New Guinea"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 35 (1972) 50-62.
- [16] Ishida Y., Morishita T., Arai S., Shirasaka M., *"Simultaneous in-situ multi-element analysis of minerals on thin section using LA-ICP-MS"*, Sci. Rep. Kanazawa University 48 (2003) 31-42.

- [17] Droop G.T.R., "A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", Mineralogical Magazine 51 (1987) 431-435.
- [18] Spear F. S., "Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths", Mineralogical Society of America (1995) 799 p.
- [19] Mercier J. C. C., "Single-pyroxene geothermometry and geobarometry", American Mineralogist 61 (1976) 603-615.
- [20] Mercier J. C. C., "Single-pyroxene thermobarometry", Tectonophysics 70 (1980) 1-37.
- [21] Nimis P., Taylor W. R., "Single pyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and evaluation of the Cr-in-pyroxene barometer and enstatite solvus thermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 139 (2000) 541-554.