

مطالعه کلاینوپیروکسن موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان (ایران مرکزی، استان اصفهان)

زهرا گلی^{۱*} و قدرت ترابی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان

نویسنده مسئول: Zahragoli67@gmail.com*

دریافت: ۹۳/۲/۱۰ پذیرش: ۹۳/۸/۱۸

چکیده

سنگ‌های آتشفشانی جنوب غرب چوپانان که بخشی از بلوک یزد را در زون ساختاری ایران مرکزی تشکیل می‌دهند، عمدتاً شامل گدازه‌ها و آذرآواری‌ها می‌باشند. این مجموعه‌ی سنگی به سن ائوسن بوده و اغلب ترکیب آندزیت را دارا می‌باشند که با روند شمال شرق - جنوب غرب در امتداد گسل‌های منطقه دیده می‌شوند. مهم‌ترین کانی مافیک موجود در سنگ‌های منطقه، پیروکسن است که به صورت فنوکریست قابل مشاهده می‌باشد و در برخی موارد متحمل دگرسانی شده است. پیروکسن‌های موجود در این سنگ‌ها از لحاظ ترکیب شیمیایی از نوع دیوپسید و اوژیت هستند. ترکیب پیروکسن و تلفیق نتایج آن‌ها با بررسی‌های صحرایی مشخص می‌سازد ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان کالک‌آلکان بوده و از لحاظ جایگاه تکتونوماگمایی در قلمرو قوس آتشفشانی قرار دارد. توزیع Al در موقعیت‌های تتراندری و اکتاندری نشان می‌دهد که این کانی در فشارهای کم و از یک ماگمای آبدار متبلور شده است. محتوی آهن فریک پیروکسن نیز معرف بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در محیط تبلور ماگمای میزبان است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌های آتشفشانی، ائوسن، کلاینوپیروکسن، چوپانان، ایران مرکزی.

مقدمه

شمارش ۴۰ ثانیه مورد آنالیز قرار گرفتند. رسم نمودارها با به کارگیری نرم‌افزارهای MinPet 2.02 و Corel Presentation 10 انجام شده است. جهت محاسبه‌ی فرمول ساختاری کانی‌ها و تفکیک Fe^{+2} و Fe^{+3} از روش استوکیومتری استفاده شده است [۱۴]. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی کانی کلاینوپیروکسن در جدول ۲ آورده شده است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در شمال شرق انارک و جنوب غرب چوپانان (بخش‌های شمال شرقی استان اصفهان) بین طول‌های جغرافیایی 54° الی $54^{\circ}30'$ شمالی و عرض‌های جغرافیایی 33° الی $33^{\circ}23'$ شرقی دارای رخنمون خوبی هستند. در تقسیمات زون‌های زمین‌شناسی ایران، این منطقه در زون ساختاری ایران مرکزی قرار دارد [۵ و ۲۶]. علوی [۸] در پهنه‌بندی دقیق ایران مرکزی منطقه مذکور را بخشی از بلوک یزد می‌داند و زمین‌شناسان روسی در پروژه تکنواکسپورت [۲۹] در مطالعات ناحیه‌ای خود این منطقه را جزئی از ماسیف انارک - خور محسوب کرده‌اند.

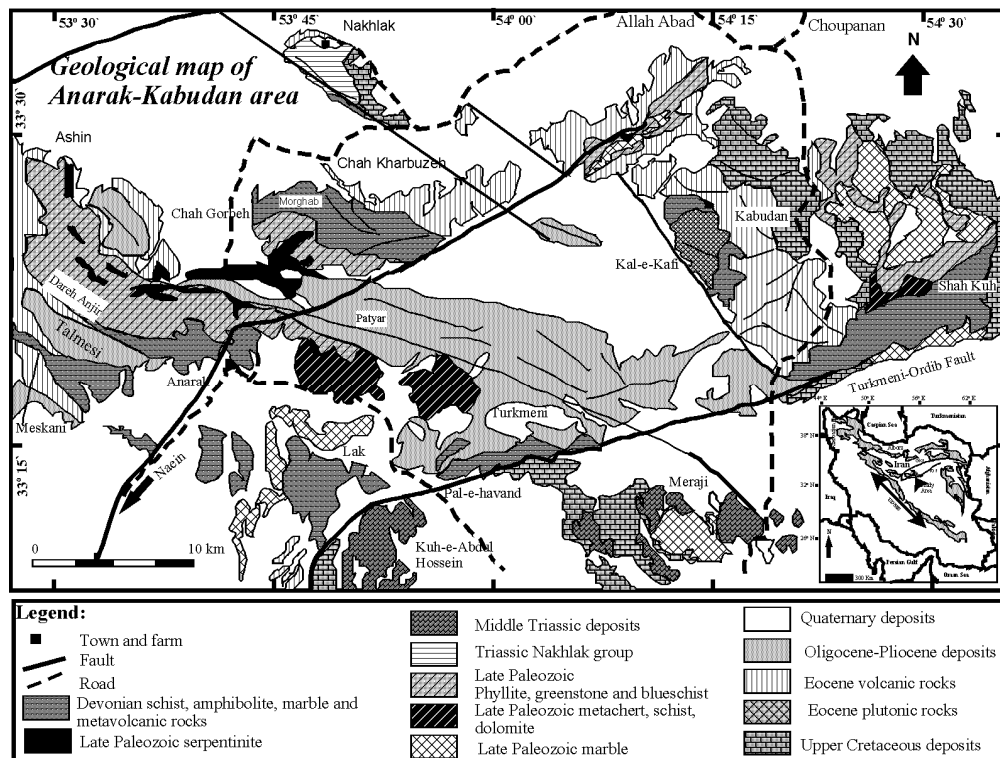
دوران سنوزوئیک در ایران دوران فعالیت گسترده ماگماتیسم به ویژه ولکانیسم بوده است که نتیجه این فعالیت‌ها ایجاد سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری فراوان در بخش‌های مختلف ایران می‌باشد [۴] (شکل ۱). کلاینوپیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی از نظر سنگ‌شناختی بسیار اهمیت دارند؛ زیرا ترکیب آن‌ها بر اساس شیمی گدازه‌های میزبان آن‌ها تغییر می‌کند. با توجه به ماهیت کانی کلاینوپیروکسن می‌توان از ترکیب این کانی برای بررسی سرشت ماگمای اولیه استفاده نمود.

روش مطالعه

به منظور دسترسی به اهداف این پژوهش، پس از بررسی صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای مختلف سنگ‌شناسی، ۳۹ مقطع نازک تهیه شد و مطالعات پتروگرافی صورت گرفت. در مرحله‌ی بعد با استفاده از دستگاه مایکروپروب Jeol مدل JXA-8800 در دانشگاه کاناوا، ۷ نقطه از ۳ کانی کلاینوپیروکسن سالم در دو سنگ متفاوت در شرایط ولتاژ شتاب دهنده 15KV، شدت جریان 15nA و زمان

کالکافی، شمال انارک و خونی با روند شمال شرق-جنوب غرب اشاره نمود [۱]. رخنمون سنگ‌های آتشفشانی منطقه عمدتاً از روند این گسل‌ها تبعیت می‌کند. موقعیت این منطقه بر روی نقشه‌ی ایران و موقعیت گسل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

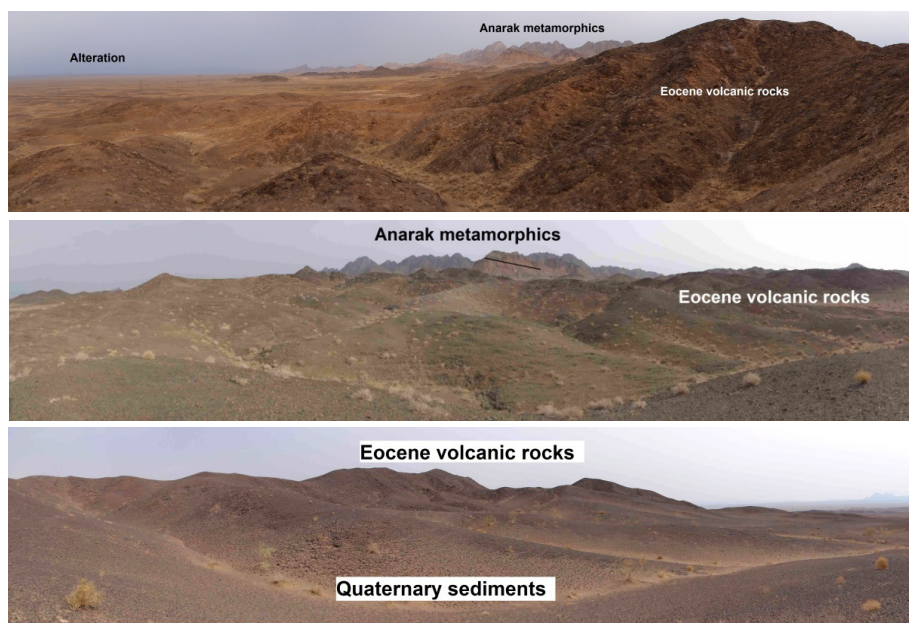
منطقه مورد بررسی از نظر ساختاری در بین دو گسل امتداد لغز بزرگ، گسل کویر بزرگ (گسل درونه) در شمال و گسل ترکمنی - اوردیب (گسل بیابانک) در جنوب قرار دارد. گسل چوپانان که از گسل‌های اصلی و بسیار مهم ایران مرکزی است از منطقه‌ی مورد بررسی عبور می‌کند. از گسل‌های فرعی مهم در منطقه می‌توان به گسل‌های



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ی انارک تا کبودان و موقعیت سنگ‌های آتشفشانی ائوسن منطقه جنوب غرب چوپانان (بر اساس نقشه‌ی ۱/۲۵۰۰۰۰ خور و انارک)

زمین‌شناسی منطقه انارک تا جندق توسط افراد مختلفی مطالعه گردیده است. احمدیان و همکاران [۶] مجموعه سنگ‌های پلوتونیک کالکافی واقع در شمال شرق انارک را یکی از پدیده‌های ماگمایی وابسته به کوهزایی پیرنه در زون ساختاری ایران مرکزی دانسته و زمان رخداد این پلوتونیسیم را به ائوسن میانی نسبت می‌دهند. همچنین بهادران [۲] موقعیت زمین‌شناسی سنگ‌های ولکانیک ائوسن منطقه عروسان کبودان در ایران مرکزی را نسبت به کمان ماگمایی ارومیه- دختر در یک محیط پشت قوس در نظر گرفته است. سیاری [۳] علت رخداد ولکانیسم ائوسن شمال انارک را به فرورانش نفوتتیس و ادامه برخورد قاره‌ای در زمان ائوسن نسبت داده است.

تعیین سن سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه با روش K-Ar عدد ۵۳ میلیون سال (ائوسن زیرین - میانی) را به دست داده است [۷]. این سنگ‌های ولکانیک ائوسن در شمال غرب توده‌ی نفوذی کالکافی و کوه خونی قرار دارند. مجموعه‌ی نفوذی کالکافی نیز از شمال غرب به مجموعه‌ی دگرگونی انارک محدود می‌شود که توسط زمین‌شناسان روسی و ریر و محافظ [۲۴] (براساس تعیین سن شایست‌ها با روش Rb-Sr (۸۴۵ میلیون سال) به پرکامبرین نسبت داده شده‌اند. سنگ‌های افیولیتی انارک که توسط مجموعه‌ی دگرگونه‌های انارک پوشانده شده‌اند، قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه محسوب می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن بر روی سازندهای کرتاسه و در مواردی دگرگونی‌های انارک قرار دارند (شکل ۲).



شکل ۲. تصاویر صحرایی منطقه‌ی جنوب غرب چوپانان (سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در کنار مجموعه‌ی دگرگونی‌های انارک و نمایی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن به همراه رسوبات کواترنری)

پیروکسن‌ها در تمام واحدهای سنگی به صورت فنوکریست دیده می‌شوند و اساساً از نوع کلینوپروکسن می‌باشند. این فنوکریست‌ها به صورت بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار هستند (شکل ۳). در بررسی سنگ‌شناسی، شواهد بافتی به خوبی نشان می‌دهد که کلینوپروکسن‌ها اولین کانی‌های متبلور در این سنگ‌ها می‌باشند.

کلینوپروکسن‌ها بر اثر دگرسانی و هجوم محلول‌های آبدار به داخل شبکه‌ی آن در اغلب موارد کربناته شده و تنها بخش‌هایی از آن‌ها قابل رؤیت است؛ در پاره‌ای موارد نیز به طور کامل دگرسان شده و قالبی از آن بر جا مانده است (شکل ۳).

شیمی پیروکسن‌های سنگ‌های ائوسن جنوب غرب چوپانان

کلینوپروکسن‌های موجود در سنگ‌های ولکانیک ائوسن منطقه جنوب غرب چوپانان در نمودار Q-J در قلمرو پیروکسن‌های کلسیم - آهن - منیزیم (Quad) قرار گرفته‌اند [۲۰] (شکل ۴ الف). در این نمودار شاخص Q و J به صورت زیر تعریف می‌شود. مجموع کاتیون‌های $Ca+Mg+Fe^{2+}$ در آن‌ها نزدیک به ۲ می‌باشد.

$$Q=Ca+Mg+Fe^{2+}$$

$$J=2Na$$

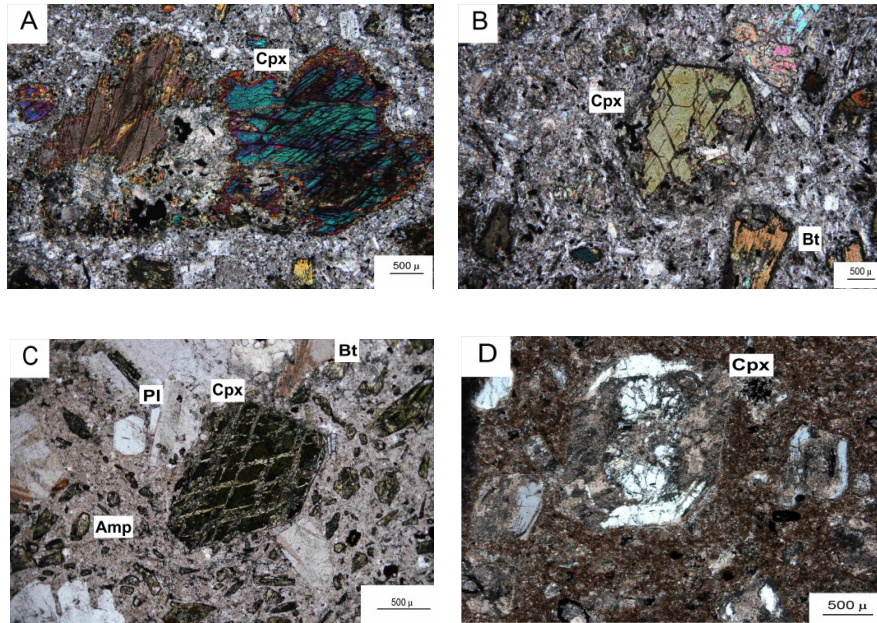
پetroگرافی سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان

سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب غرب چوپانان که طی چند فاز فوران کرده‌اند به صورت گدازه‌ها و سنگ‌های آذر آواری بروز دارند. بر اساس مطالعات پتروگرافی، این سنگ‌های آتشفشانی از نظر ترکیب شیمیایی در طیف نسبتاً اسیدی تا حد واسط قرار می‌گیرند. سنگ‌های آتشفشانی تا نیمه آتشفشانی منطقه شامل آندزیت، تراکی آندزیت و داسیت بوده که برخی حاوی زنولیت‌هایی از جنس سنگ میزبان و توف می‌باشند. آندزیت‌ها بیش‌ترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. سنگ‌های آذر آواری منطقه نیز شامل توف سنگی، توفیت و برش توفی متمایل به قرمز می‌باشند. بافت‌هایی نظیر پورفیری، پوئی‌کیلیتیک، گلومروپورفیری، غربالی و جریانی در سنگ‌های این منطقه رایج است.

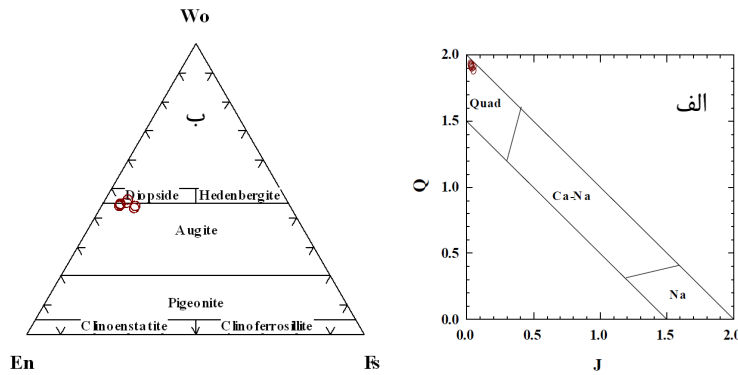
از نظر کانی‌شناسی، سنگ‌های منطقه شامل کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک همچون بیوتیت، پیروکسن و آمفیبول می‌باشند. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل زیرکن، آپاتیت، اسفن و مگنتیت است. در عین حال مقادیر ناچیزی از کلریت، کلسیت، کوارتز و در مواردی پرهینیت به عنوان کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها به چشم می‌خورد.

ملاحظه می‌شود ترکیب این کانی عمدتاً در محدوده‌ی دیوپسید تا اوژیت می‌باشند. عدد منیزیمی در این از ۰/۸۴ تا ۰/۹۳ در نوسان است.

با توجه به قرار گرفتن نمونه‌ها در محدوده‌ی Quad می‌توان برای تعیین ترکیب شیمیایی پیروکسن از نمودار Wo-En-Fs استفاده نمود [۲۰]. همانگونه که در شکل ۴ ب



شکل ۳. تصاویری از فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان در نور پلاریزه A. کلینوپیروکسن در مقطع عرضی با خلیج خوردگی در اطراف B و C. فنوکریست کلینوپیروکسن سنگ‌های آتشفشانی منطقه D. دگرسانی کلینوپیروکسن به کلسیت



شکل ۴. الف) نمایش ترکیب پیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان در نمودار Q-J (Q = $Ca+Mg+Fe^{2+}$ و $J = 2Na$) و ب) نمودار مثلثی Wo-En-Fs و موقعیت کلینوپیروکسن‌های جنوب غرب چوپانان [۲۰]

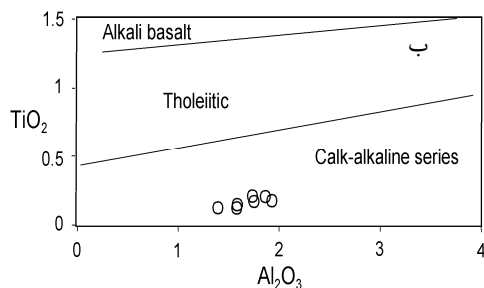
تعیین سری ماگمایی با استفاده از شیمی کلینوپیروکسن

پژوهشگران بسیاری مانند [۲۰، ۱۷، ۲۲، ۱۸، ۱۰] بر وابستگی ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها بر ترکیب ماگمای میزبان تأیید کرده‌اند و این امر باعث اهمیت کلینوپیروکسن در تعیین سری ماگمایی و موقعیت تکتونیکی سنگ میزبان شده است.

بحث و بررسی

در استفاده از ترکیب کانی‌های مختلف موجود در سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان، برای بررسی ماهیت ماگمای اولیه و سنگ خاستگاه، کلینوپیروکسن بهترین انتخاب بوده زیرا این کانی شاخص سنگ زایشی می‌باشد. بررسی ترکیب کلینوپیروکسن در سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان نشان می‌دهد که:

هم‌چنین بر اساس مقادیر Al_2O_3 در مقابل TiO_2 نمودار دیگری برای تفکیک سری‌های ماگمایی آلکان، تولییتی و کالک‌آلکان توسط [۱۷] ارائه شده است که با استفاده از آن و ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن نمونه‌های مورد بررسی در محدوده‌ی سری کالک‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۵ ب).



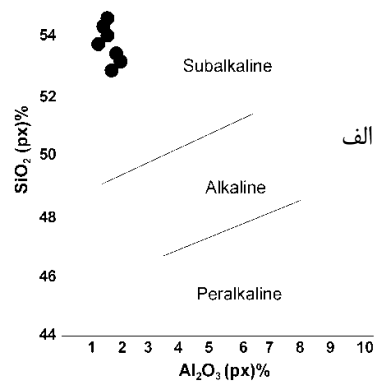
شکل ۵. تعیین نوع سری ماگمایی سنگ‌های جنوب‌غرب چوپانان با استفاده از ترکیب کلینوپیروکسن‌ها [۱۷]

برای تعیین موقعیت تکتونیکی، از نمودار Ca در مقابل Ti [۲۷] استفاده شده است. در این نمودار نمونه‌های با میزان بالای Ti در محدوده‌ی غیر کوهزایی و مربوط به محیط‌های گسترش قرار می‌گیرند. در صورتی که نمونه‌های با میزان بالای Ca در قسمت مربوط به کوهزایی واقع می‌شوند. بر اساس موقعیت نمونه‌های مورد بررسی در این نمودار منشأ سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب‌غرب چوپانان محیط‌های کوهزایی می‌باشند (شکل ۶ ب).

با استفاده از میزان Al^{IV} در برابر Ti نیز می‌توان به محیط تکتونیکی سنگ‌های مورد بررسی پی برد [۱۰]. پایین بودن میزان Ti در فرمول ساختمانی پیروکسن سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب‌غرب چوپانان مشخص می‌کند که سنگ‌های منطقه متعلق به کمان‌های آتشفشانی می‌باشد (شکل ۶ الف).

مطابق شکل ۶ د در نمودار ارائه شده از [۱۸] با استفاده از شیمی کلینوپیروکسن‌ها می‌توان بازالت‌های آلکان، تولییتی‌ها و بازالت‌های جزایر قوسی را متمایز نمود. همانطور که در نمودار Ca در برابر Ti+Cr دیده می‌شود کلینوپیروکسن سنگ‌های آتشفشانی مذکور در قلمرو بازالت‌های کالک‌آلکان قوس‌های آتشفشانی واقع شده‌اند (شکل ۶ د).

با استفاده از نمودار Al_2O_3 در برابر SiO_2 [۱۷] می‌توان نوع سری ماگمایی را تعیین کرد. موقعیت قرارگیری نمونه‌ها در این نمودار نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی منطقه‌ی جنوب‌غرب چوپانان در قلمرو ساب‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۵ الف).

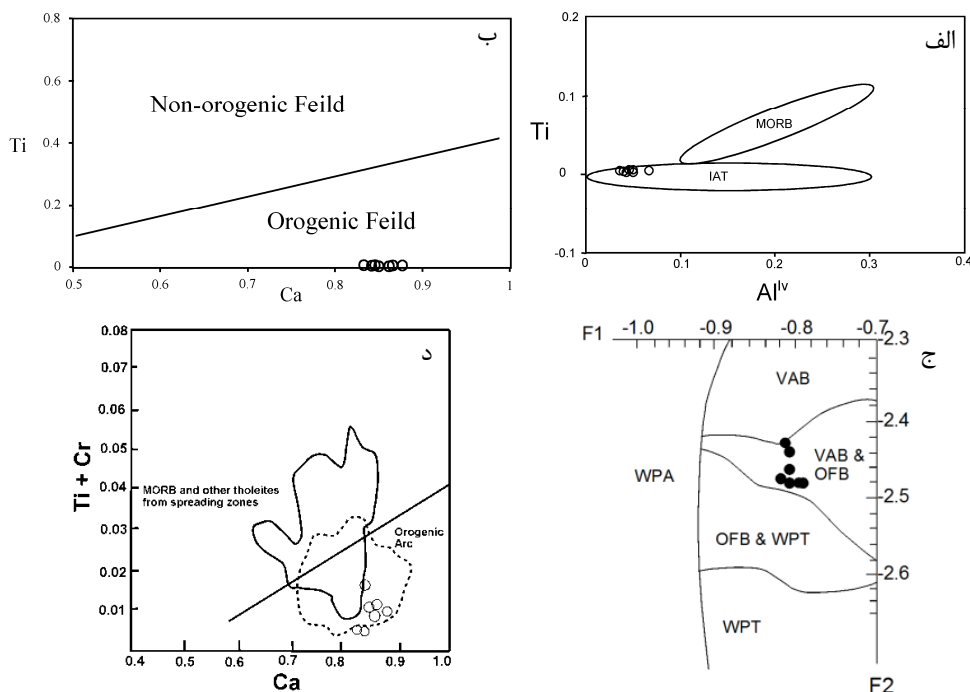


تعیین موقعیت تکتونیکی سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب‌غرب چوپانان

ترکیب کلینوپیروکسن متأثر از شیمی گدازه‌ی میزبان آن‌ها است. این ویژگی سبب می‌شود که بتوان از ترکیب شیمیایی این کانی مخصوصاً انواع فنوکریست آن برای تعیین نوع ماگما و موقعیت تکتونیکی گدازه‌ی میزبان استفاده کرد. بررسی نمونه‌ها در نمودار F1 و F2 بر مبنای داده‌های حاصل از کلینوپیروکسن برای تعیین دقیق‌تر موقعیت تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب‌غرب چوپانان در زمان تشکیل حاکی از آن است که اغلب نمونه‌ها در قلمرو مشترک قوس‌های آتشفشانی و فوران کف اقیانوسی واقع شده‌اند که فرض قوس ماگمایی با بررسی‌های صحرائی و هم‌چنین میزان بالای پتاسیم در سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب‌غرب چوپانان انطباق دارد (شکل ۶ ج). در تعیین دو فاکتور F1, F2 از روابط زیر استفاده شده است [۲۲].

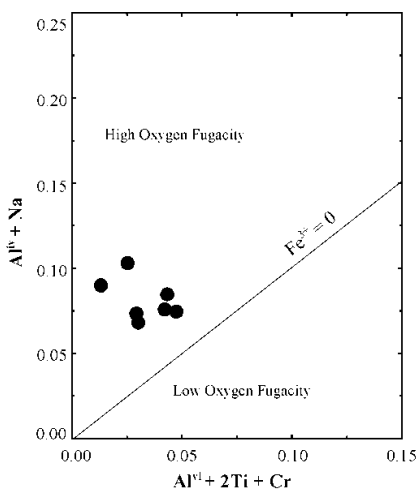
$$F1 = - (0.012 \times SiO_2) - (0.0807 \times TiO_2) + (0.0026 \times Al_2O_3) - (0.0012 \times FeO) - (0.0026 \times MnO) + (0.0087 \times MgO) - (0.0128 \times CaO) - (0.0419 \times Na_2O)$$

$$F2 = - (0.0469 \times SiO_2) - (0.0818 \times TiO_2) + (0.0212 \times Al_2O_3) - (0.0041 \times FeO) - (0.1435 \times MnO) + (0.0029 \times MgO) - (0.0085 \times CaO) - (0.016 \times Na_2O)$$



شکل ۶. استفاده از ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن موجود در سنگ‌های ولکانیک جنوب غرب چوپانان جهت تعیین جایگاه تکتونیکی آن الف. ب. [۱۰] ج. [۲۷] د. [۲۲] [۱۸]

[۱۳] استفاده از این نمودار نشان می‌دهد که پیروکسن‌های مورد بررسی در بالای خط $Fe^{3+}=0$ قرار گرفته است و این امر بیانگر بالا بودن میزان فوگاسیتهی اکسیژن در محیط تشکیل سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۷. تخمین فوگاسیته اکسیژن ماگما با استفاده از پیروکسن‌های سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان [۲۵]

تخمین فوگاسیتهی اکسیژن در ماگمای سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان

فوگاسیتهی اکسیژن تأثیر ویژه‌ای در تغییر دمای لیکویدوس و ترکیب مذاب بلور دارد [۱۵] و عامل مؤثری در کنترل فرآیندهای ماگمایی است [۲۳، ۱۹، ۱۲]. برای بررسی وضعیت میزان فوگاسیتهی اکسیژن در ماگمای اولیه با استفاده از شیمی کلینوپیروکسن از نمودار مجموع $Al^{IV} + 2Ti + Cr$ در برابر $Na + Al^{IV}$ کمک گرفته می‌شود [۲۵]. بر این اساس Fe^{3+} در موقعیت اکتاهداری جانشین عناصر سه طرفیتی همچون Cr, Ti, Al^{IV} در ترکیب پیروکسن می‌شود به این ترتیب فراوانی Fe^{3+} در پیروکسن‌ها به مقدار Al^{IV} بستگی دارد. در نتیجه هرچه آلومینیوم بیشتری وارد موقعیت تتراهدری شود امکان ورود عناصر سه طرفیتی دیگر به جز آلومینیوم مانند Fe^{3+} به موقعیت اکتاهداری بیشتر می‌شود بنابراین در نمودار مورد نظر اگر نمونه‌ها بالای خط $Fe^{3+}=0$ قرار گرفته باشند، پیروکسن‌ها در فوگاسیتهی بالای اکسیژن متبلور شده‌اند و اگر در پایین خط واقع شده باشند نشان‌دهندهی فوگاسیتهی پایین اکسیژن می‌باشد. در ضمن هر چه فاصله‌ی نمونه‌ها از این خط بیشتر باشد فوگاسیتهی اکسیژن در محیط تشکیل پیروکسن بیشتر بوده است

علت کمبود TiO_2 کلینوپیروکسن مربوط به فراوانی بیش‌تر کانی‌های تیتانیوم‌دار نظیر تیتانومگنتیت است. به عبارت دیگر تبلور تیتانومگنتیت باعث خروج تیتانیوم از ماگما و فقر این عنصر در پیروکسن‌های همزیست با آن شده است. تبلور هر چند کم کرومیت در کنار پیروکسن باعث شده که باقی مانده‌ی کروم ماگما وارد شبکه‌ی کرومیت همزیست با پیروکسن شود و به این ترتیب پیروکسن از Cr_2O_3 فقیر شود.

کاهش Al_2O_3 نیز مربوط به وفور کانی‌های آلومینیوم‌دار نظیر پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها است؛ زیرا با تبلور پلاژیوکلاز، آلومینیوم موجود در ماگما وارد شبکه‌ی این کانی شده و لذا پیروکسن‌های همزیست با پلاژیوکلاز از Al_2O_3 فقیر شده‌اند. فقر نسبی پیروکسن از آلومینیوم نشان می‌دهد که این پیروکسن‌ها در فشارهای کمتر و به بیان دیگر در اعماق کمتر متبلور شده‌اند.

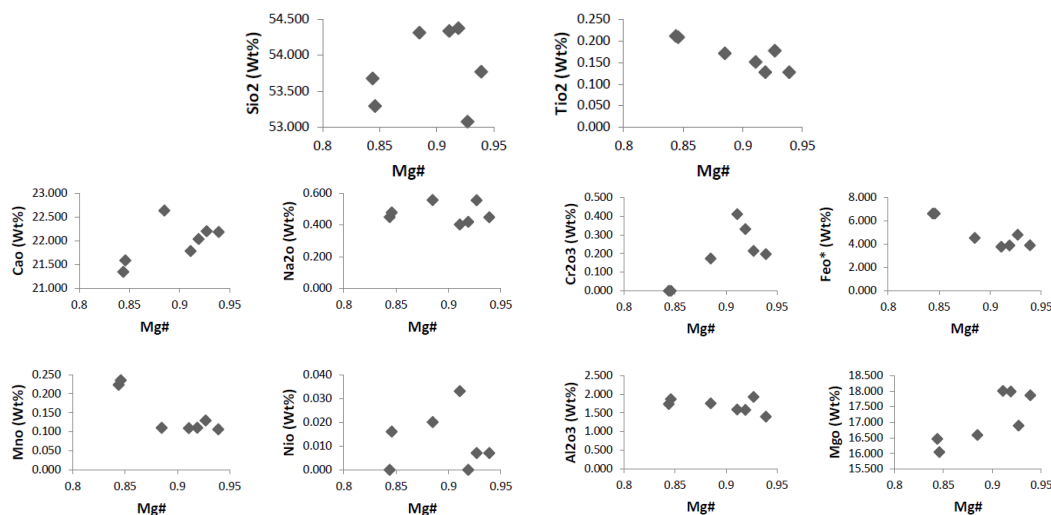
کمتر بودن CaO نیز مربوط به تبلور همزمان پیروکسن با پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار است چرا که این حادثه باعث ورود کلسیم به شبکه پلاژیوکلاز و در عوض تهی شدن پیروکسن‌های همزیست با آن‌ها از کلسیم می‌شود.

کاهش مقدار Na_2O پیروکسن‌ها نیز مربوط به حضور پلاژیوکلاز است این موضوع باعث شده پیروکسن‌های همزیست با پلاژیوکلاز از سدیم فقیر می‌شود.

تغییرات ترکیب کلینوپیروکسن در برابر عدد منیزی

در نمودارهای تغییرات فراوانی عناصر در مقابل $Mg\#$ (شکل ۸) به عنوان عاملی که بیانگر پیشرفت تفریق ماگمایی است، فراوانی عناصر نیز همخوان با روند پیشرفت تفریق ماگمایی خواهد بود و نشان از تبلور کلینوپیروکسن‌ها پیش از آلیش و اختلاط ماگمایی دارد. شواهد آلیش و اختلاط ماگمایی در بررسی‌های صحرائی ژئوشیمیایی و سنگ‌شناسی قابل مشاهده است. احتمالاً به تبعیت از افزایش درجه تفریق ماگمای سازنده برخی از این سنگ‌ها، فراوانی عناصر اصلی کلینوپیروکسن‌ها دستخوش تغییرات منظم و تدریجی می‌شود. با افزایش عدد منیزیم ($Mg\#$) که خود معرف کاهش درجه‌ی تفریق ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه می‌باشد، اکسیدهای TiO_2 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , FeO , MnO , NiO کاهش و اکسیدهای SiO_2 , MgO افزایش می‌یابند.

افزایش SiO_2 در کلینوپیروکسن‌ها احتمالاً مربوط به کاهش درجه تفریق ماگما بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد که این پدیده باعث شده که در زمان تبلور کلینوپیروکسن‌ها به دلیل افزایش SiO_2 در ماگمای سازنده‌ی این سنگ‌ها، کلینوپیروکسن‌ها از SiO_2 غنی شود.



شکل ۸. نمودارهای تغییرات ترکیب کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان در برابر $Mg\#$

نمودارها در برخی موارد دارای کارایی لازم نیست. هم‌چنین محاسبه‌ی $Mg \#$ در کانی‌های پیروکسن موجود در این سنگ‌ها حاکی از آن است که مقدار این فاکتور ۸۵ تا ۹۵ درصد می‌باشد. به همین سبب می‌توان این پیروکسن را جزء پیروکسن‌های اولیه محسوب نمود. تحقیقات انجام گرفته توسط [۲۸] نشان می‌دهد که توزیع آلومینیوم در موقعیت اکتاهداری و تتراهداری کلینوپیروکسن‌ها به فشار و میزان آب موجود در محیط تبلور بستگی دارد. به این صورت که هر چه میزان Al^{VI} موجود در کلینوپیروکسن‌ها بیشتر باشد این کانی در فشار بالاتری تشکیل شده است. این مسأله اساس دیاگرام ارائه شده توسط [۹] می‌باشد. این نمودار بر اساس مقدار Al^{IV} در برابر Al^{VI} تنظیم شده است و نشان می‌دهد که کلینوپیروکسن‌های آنالیز شده در طیف گسترده‌ای از فشار متوسط تا کم تبلور شده‌اند که احتمالاً بیانگر تبلور آن‌ها در هنگام توقف و هم‌چنین در هنگام صعود است (شکل ۱۰ ب).

در ترمومتری کلینوپیروکسن‌ها از فرمول ارائه شده توسط [۲۱] استفاده گردید که به صورت زیر می‌باشد:

$$T(^{\circ}K) = 23166 + 39.28 P(kbar)/(13.25 + 15.35 Ti + 4.50 Fe - 1.55 (Al + Cr - Na - K) + (\ln a^{Cpx} en)^2)$$

$$a^{Cpx} en = (1 - Ca - Na - K) (1 - 1/2(Al + Cr + Na + K))$$

نتایج حرارت‌سنجی بر اساس این معادله در جدول ۳ آورده شده است.

محاسبات دما - فشارسنجی درشت بلورهای کلینوپیروکسن با استفاده از روش [۲۱] میانگین دما را ۸۶۸ تا ۱۰۲۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین فشار را ۵ تا ۱۳ کیلوبار نشان می‌دهد.

تعیین مقدار آب ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب غرب چوپانان

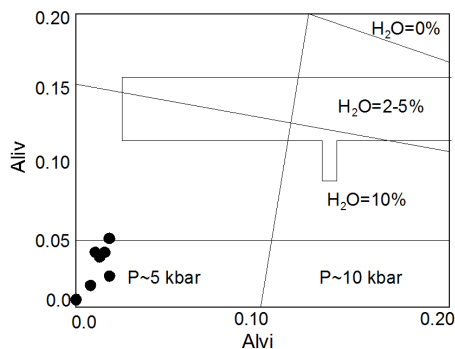
توزیع آلومینیوم در موقعیت‌های تترانداری و اکتانداری کلینوپیروکسن‌ها معیار مناسبی برای تخمین میزان فشار حاکم بر محیط تشکیل سنگ‌های آذرین است [۱۶]. علاوه بر فشار می‌توان از این نمودار به منظور تعیین مقدار آب ماگما نیز استفاده نمود.

همانطور که در نمودار (شکل ۹) ملاحظه می‌گردد مقدار Al^{VI} در تمامی نمونه‌های آنالیز شده سنگ‌های ناحیه کمتر از ۰/۱ است که نشانه‌ی تبلور این کانی‌ها در فشار کمتر از ۵ کیلوبار می‌باشد. محتوای آب موجود در ماگما نیز کمتر از ۱۰٪ است [۱۶].

علاوه بر نمودار ترسیمی، وفور کانی‌های آبداری از قبیل آمفیبول، فلوگوپیت و بیوتیت بیان‌کننده‌ی آبدار بودن ماگما در منطقه جنوب غرب چوپانان می‌باشد

ژئوترموبارومتري با استفاده از شیمی کلینوپیروکسن‌ها

تعیین شرایط ترمودینامیکی انجماد ماگما در پترولوژی سنگ‌های آذرین مسأله‌ای مهم به شمار می‌رود. با استفاده از تعیین دما و فشار تبلور کانی‌ها می‌توان عمق مخزن ماگمایی را تعیین نمود. لازم است قبل از استفاده از پیروکسن در تعیین دما و فشار و فوگاسیته ابتدا سرشت آن‌ها تعیین گردد. با ترسیم نمودار دوتایی Al در برابر $Ti + Cr + Na$ می‌توان موفق به تفکیک کلینوپیروکسن‌های آذرین و دگرگونی گشت [۱۱]. بر همین اساس با توجه به نمودار (شکل ۱۰ الف) اکثر پیروکسن‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی ماگمایی قرار می‌گیرند. بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که این کلینوپیروکسن‌ها نیز مانند بقیه‌ی آن‌ها آذرین هستند و این مسأله نشان می‌دهد که این



شکل ۹. توزیع Al در موقعیت‌های تتراهداری و اکتاهداری در کلینوپیروکسن‌ها به تناسب فشار و مقدار درصد آب ماگما [۱۶].

جدول ۱. طول و عرض جغرافیایی محل‌های نمونه‌برداری سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان به منظور آنالیز مایکروپروب

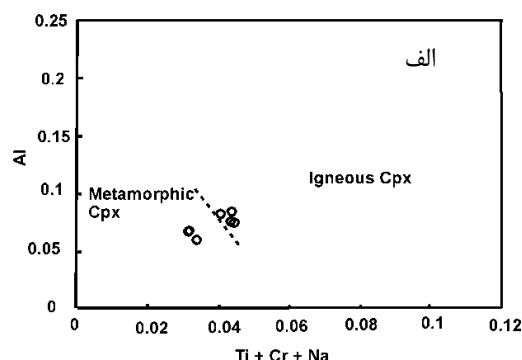
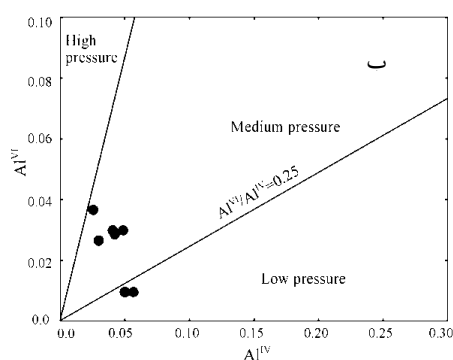
Sample	B300	B303	B306	B312
X	N 33° 27' 11.7"	N 33° 27' 11.7"	N 33° 27' 59.5"	N 33° 30' 38.9"
Y	E 053° 57' 31.8"	E 053° 57' 31.8"	E 053° 57' 56.5"	E 054° 05' 78.3"

جدول ۲. نتایج آنالیز مایکروپروب فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان

Sample	B300	B300	B303	B303	B303	B303	B303
Analysis	68	69	36	37	48	49	51
SiO ₂	53.677	53.294	54.373	54.336	53.077	54.310	53.770
TiO ₂	0.211	0.208	0.127	0.151	0.177	0.171	0.127
Al ₂ O ₃	1.732	1.863	1.579	1.586	1.926	1.753	1.395
Cr ₂ O ₃	0.000	0.000	0.330	0.410	0.213	0.172	0.196
FeO*	6.611	6.603	3.870	3.768	4.795	4.524	3.894
MnO	0.223	0.235	0.110	0.109	0.129	0.110	0.106
MgO	16.458	16.038	17.984	18.003	16.889	16.586	17.865
CaO	21.343	21.583	22.034	21.781	22.200	22.632	22.180
Na ₂ O	0.449	0.477	0.418	0.401	0.554	0.556	0.447
K ₂ O	0.005	0.000	0.000	0.004	0.002	0.000	0.006
NiO	0.000	0.016	0.000	0.033	0.007	0.020	0.007
Total	100.710	100.320	100.830	100.580	99.970	100.830	99.990
Structural formula based on the 6 Oxygens							
Si	1.954	1.950	1.957	1.960	1.933	1.964	1.950
Ti	0.006	0.006	0.003	0.004	0.005	0.005	0.003
Al ^{IV}	0.046	0.050	0.043	0.040	0.067	0.036	0.050
Al ^{VI}	0.028	0.030	0.024	0.028	0.016	0.039	0.010
Cr	0.0000	0.0000	0.0090	0.0120	0.0060	0.0050	0.0060
Fe ³⁺	0.038	0.042	0.032	0.020	0.074	0.021	0.059
Fe ²⁺	0.164	0.159	0.084	0.094	0.072	0.116	0.059
Mn	0.007	0.007	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003
Mg	0.893	0.875	0.965	0.969	0.917	0.894	0.922
Ca	0.833	0.846	0.850	0.842	0.866	0.877	0.862
Na	0.032	0.034	0.029	0.028	0.039	0.039	0.031
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
K	0	0	0	0	0	0	0
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
WO	43.048	43.834	43.924	43.687	44.809	45.881	44.218
EN	46.188	45.321	49.881	50.242	47.431	46.784	49.555
FS	10.764	10.845	6.195	6.072	7.760	7.335	6.227
WEF	96.765	96.539	97.024	97.142	95.962	96.039	96.781
JD	1.393	1.433	1.263	1.661	0.720	2.582	0.458
AE	1.842	2.028	1.712	1.197	3.318	1.379	2.761
Mg#	0.844	0.846	0.919	0.911	0.927	0.885	0.939
Type	Augite	Augite	Augite	Augite	Diopside	Diopside	Augite

جدول ۳. نتایج حاصل از ترمومتری کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان

Sample	B300	B300	B303	B303	B303	B303	B303
Analysis P (Kb)	68	69	36	37	48	49	51
1.000Kb	987.413	953.292	985.674	1006.522	901.194	868.847	948.820
2.000Kb	989.547	955.367	987.804	1008.688	903.181	870.780	950.888
3.000Kb	991.680	957.443	989.935	1010.854	905.169	872.713	952.956
4.000Kb	993.814	959.519	992.066	1013.020	907.156	874.646	955.025
5.000Kb	995.947	961.595	994.196	1015.185	909.144	876.579	957.093
6.000Kb	998.081	963.670	996.327	1017.351	911.131	878.511	959.161
7.000Kb	1000.214	965.746	998.457	1019.517	913.119	880.444	961.229
8.000Kb	1002.348	967.822	1000.588	1021.683	915.107	882.377	963.297
9.000Kb	1004.481	969.898	1002.719	1023.849	917.094	884.310	965.366
10.000Kb	1006.615	971.973	1004.849	1026.015	919.082	886.243	967.434
Type	Augite	Augite	Augite	Augite	Diopside	Diopside	Augite



شکل ۱۰. الف) تعیین سرشت پیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان [۱۶] ب) برآورد کلی فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های ولکانیک ائوسن جنوب غرب چوپانان [۲۸]

نتیجه‌گیری

ترکیب کلینوپیروکسن موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان از روند پیشرفت تفریق ماگمایی تبعیت می‌کند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، سرشت ماگمایی این سنگ‌های آتشفشانی، کالک‌آلکان می‌باشد.

موقعیت تکتونوماگمایی در تشکیل سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان احتمالاً یک قوس ماگمایی مرتبط با فرورانش است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه اصفهان تشکر می‌نمایند.

بر اساس بررسی‌های صحرایی، مطالعه‌ی سنگ‌شناسی و آنالیزهای میکروپروب روی کانی‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جنوب غرب چوپانان نتایج زیر حاصل گردید:

تمام پیروکسن موجود در سنگ‌های منطقه از نوع کلینوپیروکسن هستند و ترکیب آن‌ها از دیوپسید تا اوژیت در نوسان است. هم‌چنین هم‌وزن بودن ترکیب کلینوپیروکسن و عدم وجود منطقه‌بندی نشان می‌دهد که این بلورها از یک ماگمای واحد متبلور شده‌اند و تفریق چندانی در ماگمای اولیه صورت نگرفته است.

میزان فوگاسیته در محیط تشکیل سنگ‌ها بالا بوده است که نشان دهنده‌ی محیطی اکسیدان در هنگام شکل‌گیری این سنگ‌ها است.

- [13] Cameron, M., & Papike, J. J (1981) Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist*, 66(1-2), 1-50.
- [14] Droop, G.T.R (1987) A general equation for estimating of Fe³⁺ concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria, *Mineralogical Magazine*, 51, 431-435.
- [15] France, L., Ildefonse, B., Koepke, J., & Bech, F (2010) A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3), 340-346.
- [16] Helz, R.T (1973) Phase relations of basalts in their melting ranges at p_{H2O} = 5 kb as a function of oxygen fugacity, Part I. Mafic Phases, *Journal of Petrology*, 14, 249-302.
- [17] Le Bas, M.J., LeMaitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram, *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- [18] Le Terrier J., Maury R. C., Thonon P., Girard, D Marchal M (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series, *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 139-54.
- [19] Moretti, R (2005) Polymerisation, basicity, oxidation state and their role in ionic modelling of silicate melts. *Annals of Geophysics.geology*, Edition techniq, Paris, 58 P.
- [20] Morimoto N., Fabrise J., Ferguson A., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Akoi K., Gottardi, G (1989) Nomenclature of pyroxenes, *Mineralogical Magazine*, 52, 535 – 55.
- [21] Nimis, P., Taylor, W. R (2000) 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, 541-554.
- [22] Nisbet, E. G. Pearce, J. A (1977) Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic setting, *Ibid*, 63, 149-60.
- [23] Ottonello, G., Moretti, R., Marini, L., & Vetuschi Zuccolini, M (2001) Oxidation state of iron in silicate glasses and melts: a thermochemical model. *Chemical geology*, 174(1), 157-179.
- [24] Reyer, D., Mohafez, S (1972) The first contribution of the Nioc-Erap agreements to knowledge of Iranian
- [25] Schweitzer E. L., Papike J, J., Bence A. E. (1979) Statistical analysis of clinopyroxenes
- منابع**
- [۱] آقائباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- [۲] بهادران، ن (۱۳۸۵) پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های ولکانیک منطقه‌ی عروسان کبودان (شمال شرق اصفهان)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد پترولوژی گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان، ۱۳۰ صفحه.
- [۳] سیاری، م (۱۳۸۵) پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در شمال منطقه انارک (شمال شرق استان اصفهان)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد پترولوژی، دانشگاه اصفهان، ۱۲۰ صفحه.
- [۴] عطاپور، ح، " زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی و ژئوشیمی سنگ‌های شوشونیتی ایران زمین "، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش داخلی (۱۳۷۳) ص ۱۴۱.
- [۵] نبوی، م. ح (۱۳۵۵) دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی، ۱۰۹ صفحه.
- [6] Ahmadian, J., Haschke, M., McDonald, I., Regelous, M., Ghorbani, M., Emami, M. H., Murata, M (2009) High magmatic flux during Alpine-Himalayan collision: Constraints from the Kal-e-Kafi complex, Central Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 121(5-6), 857-868.
- [7] Aistov L., Melnikov B., Krivyakin B., Morozov L (1984) *Geology of the Khur area (Central Iran)*, Explanatory text of the Khur quadrangle, map 1:250,000.
- [8] Alavi M (1991) Sedimentary and structural characteristics of the paleo – Tethys remnants in northeastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 103, 983 – 992.
- [9] Aoki, K., I. Shiba (1973) Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan, *Lithos*, 6, 41-51
- [10] Beccaluva, L., Macciotta, G., Piccardo, G. B., & Zeda, O (1989) Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator. *Chemical Geology*, 77(3), 165-182.
- [11] Berger, J., O. Femenias, J. C. C. Mercier, Demaiffe, D (2005) Ocean-floor hydrothermal metamorphism in the Limousin ophiolite (Western French Massif Central), Evidence of a rare preserved Variscan oceanic marker, *Journal of Metamorphic Geology*, 23, 795-812.
- [12] Botcharnikov, R. E., Koepke, J., Holtz, F., McCammon, C., & Wilke, M (2005) The effect of water activity on the oxidation and structural state of Fe in a ferro-basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(21), 5071-5085.

- from deep-sea basalts, American Mineralogist, 64, 501-13.
- [26] Shtöcklin, J (1968) Structural history and tectonics of Iran, a review, American Association Petroleum Geologists Bulletin, 52, 7.
- [27] Sun, S. S., McDonough, W.F (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. Eds., Magmatism in Ocean Basins, Geological Society London Special Publication, London, 313-345.
- [28] Thompson, R. N (1974) Some high-pressure pyroxenes. Mineral. Mag, 39, 768-787.
- [29] Yakovenko, V., Chinakov, I., Kokorin, Yu., Krivyakin, B (1981) Report on detailed geological prospecting in Anarak Area (Kale Kafi-Khoni Locality), V/O <<Technoexport>>, Rep. No.13, Moscow, 293 P.