



کاربرد شیمی کانی کلینوپیروکسن در بررسی شرایط فیزیکی صعود ماگما، مطالعه موردی سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد، شمال غرب نایین

رضوان مهوری^{۱*} و مرتضی شریفی^۲

(۱) باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱

چکیده

در منطقه علی‌آباد (شمال غرب نایین) سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت به همراه سنگ‌های آذرآواری (توف) وجود دارند. از لحاظ کانی‌شناسی، این سنگ‌ها از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، سانیدین، بیوتیت، کوارتز و کانی‌های اوپک در زمینه‌ای از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، شیشه و کانی‌های اوپک تشکیل شده‌اند. کلینوپیروکسن این سنگ‌ها از نوع اوژیت با ترکیب (En₄₃₋₄₅, Wo₃₈₋₄₂, Fs₁₄₋₁₈) است. ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که این کانی در فشارهای کم تا متوسط تشکیل شده و بیانگر تبلور آنها در طی صعود ماگما و در عمق‌های مختلف است. توزیع Al و میزان Fe⁺³ در ساختار کلینوپیروکسن بیانگر تبلور آن از یک ماگمای آبدار با فشار بخار آب ۱۰ درصد و با فوگاسیته بالای اکسیژن است. بر اساس محاسبات زمین‌دما-فشارسنجی، کلینوپیروکسن‌ها در محدوده دمایی ۱۰۰۹ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، محدوده فشار حدود ۲/۵ تا ۷ کیلو بار و عمق ۹ تا ۱۸ کیلومتری تبلور شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن، دما-فشارسنجی، ارومیه-دختر، علی‌آباد

مقدمه

در جنوب غرب نایین نام‌برد. بر طبق بررسی‌های وی، سنگ‌های آتشفشانی این منطقه اغلب از نوع پیروکسن آندزیت و داسیت هستند. وی بر اساس بررسی‌های شیمی کانی بیوتیت و بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌کل، گروه ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی گردنه ملا احمد را کالک آلکال بیان کرده است. همچنین پژوهش تمیزی (Tamizi, 2013)، بر روی سنگ‌های آتشفشانی شمال نایین از دیگر پژوهش‌های انجام شده در این محدوده است. وی ماهیت ماگمای مولد این سنگ‌ها را از نوع

محدوده مورد بررسی در مختصات جغرافیایی ۵۲° ۵۲' تا ۵۳° ۰۰' طول جغرافیایی شرقی و ۳۲° ۵۷' تا ۳۳° ۰۰' عرض جغرافیایی شمالی و در ۲۳ کیلومتری شمال غرب نایین واقع شده است. پژوهش‌هایی در محدوده نایین بر روی پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی در سال‌های اخیر انجام شده است که از آن جمله می‌توان از پژوهش مهوری (Mehvari, 2009) بر روی پتروژنی و کانی‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی گردنه ملا احمد

Nisbet and Pearce, 1977; Schweitzer et al., 1979; Lindsley, 1983; Beccaluva et al., 1989; Sun and Bertrand, 1991; Soesoo, 1997; Nimis and Taylor, (2000; Putirka, 2008; Neave and Putirka, 2017

بنابراین از آنجایی که سنگ‌های آذرین منطقه علی‌آباد، از لحاظ دما-فشارسنجی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، لذا در این پژوهش از شیمی کانی کلینوپیروکسن آندزیت‌های منطقه علی‌آباد برای بررسی‌های دما-فشارسنجی با استفاده از روش‌های محاسباتی و محاسباتی-ترسیمی استفاده شده است.

روش مطالعه

در این پژوهش برای بررسی رخنمون‌های ائوسن منطقه از دیدگاه سنگ‌شناسی، نخست از آنها حدود ۶۵ نمونه برداشت و سپس برای بررسی‌های کانی‌شناسی از ۴۵ نمونه مقطع نازک تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان مدل OLYMPUS-BH₂ مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی‌های شیمی کانی از تعدادی از نمونه‌ها، مقاطع نازک صیقلی تهیه شد و با استفاده از ریزکاونده الکترونی مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفتند. تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌ها بر روی ۳ عدد مقطع نازک صیقلی و حدود ۹ عدد کلینوپیروکسن انجام شد و چون سنگ‌های منطقه تحت تأثیر آلتراسیون قرار گرفته بودند، سعی شد از داده‌های مربوط به پیروکسن‌های سالم یا تا حد امکان از بخش‌های سالم کلینوپیروکسن‌ها (حاشیه، مرکز و میانه) آنالیز انجام شود. تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها در مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران انجام شد. دستگاه تجزیه نقطه‌ای مورد استفاده در این مرکز تحقیقاتی از نوع Cameca-SX 100 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ v و شدت جریان ۱۵ nA است.

سپس برای بررسی‌های دما-فشارسنجی از روش‌های مختلف ارائه‌شده توسط پژوهشگران استفاده شد. همچنین برای پردازش داده‌های مربوطه و محاسبه فرمول ساختاری کلینوپیروکسن‌ها بر اساس ۶ اتم اکسیژن از نرم‌افزار Minpet استفاده شد.

زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد بررسی بخشی از ارتفاعات شمال‌غرب ناین را

کالک‌آلکال و محیط زمین‌ساختی آنها را کمان آتشفشانی بیان کرده و از بافت پورفیریتیک به‌عنوان بافت اصلی این سنگ‌ها نام برده است.

از آنجایی که بافت پورفیریتیک از بافت‌های متداول سنگ‌های آتشفشانی است، بنابراین سنگ‌هایی با بافت پورفیریتیک دو مرحله تبلور را تجربه کرده‌اند. درشت‌بلورهای این سنگ‌ها در مرحله اول تبلور شده‌اند که این تبلور در عمق اتفاق می‌افتد. مرحله دوم با تبلور زمینه، میکروولیت و شیشه این سنگ‌ها در خارج یا نزدیک سطح زمین مشخص می‌شود (Best, 2003). لذا ترکیب شیمیایی درشت‌بلورهای متبلور شده در عمق در ارزیابی شرایط فیزیکی حاکم بر ماگما در زمان تبلور آنها ارزشمند است. یکی از درشت‌بلورهای موجود در سنگ‌های آندزیتی منطقه علی‌آباد، کانی کلینوپیروکسن است. فرمول عمومی پیروکسن‌ها به صورت $M_2M_1T_2O_6$ است. کاتیون‌های Ti^{+4} و Mn^{+2} , Fe^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+3} , Al^{+3} , Cr^{+3} در موقعیت M_2 ، در موقعیت کاتیون‌های M_1 ، Na^+ , Ca^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2} ، Li^+ و Mg^{+2} و کاتیون‌های Al^{+3} و Si^{+4} در موقعیت T قرار می‌گیرند. پیروکسن به‌علت مقاومت بالای خود در مقابل محلول‌های دگرسان‌کننده نسبت به سایر کانی‌ها، حضور تعداد زیادی از عناصر در فرمول ساختاری خود و حضورش در طیف وسیعی از سنگ‌های بازیک تا اسیدی، یک کانی شاخص در تعبیر و تفسیرهای پترولوژیکی محسوب می‌شود. به عقیده لیوتارد و همکاران (Liotard et al., 1988)، پیروکسن‌ها چون اغلب در تعادل شیمیایی با ماگمای میزبان خود هستند، حوادث و تحولاتی را که در طی تبلور رخ می‌دهد، در خود ثبت می‌کند. بنابراین پیروکسن از جمله کانی‌های مهم و شاخص است که تغییر ترکیب شیمیایی آن اطلاعات ارزشمندی را در زمینه پتروژنز در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Princivalle et al., 2000; Zhu and Ogasowara, 2004; Falahaty et al., 2016; Mehvari et al., 2016).

از کاربردهای این کانی شاخص پتروژنتیکی می‌توان به مواردی نظیر خاستگاه ماگما، گروه ماگمایی و موقعیت زمین‌ساختی، فشار، دما و فشاربخشی اکسیژن اشاره کرد (Le Bas, 1962;)

تشکیل می‌دهد و بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری - رسوبی ایران (Aghanabati, 1994) در پهنه ولکانوپلوتونیک ارومیه-بزمان واقع شده است.

این پهنه ماگمایی اغلب شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی با سن ائوسن-کواترنری است و حداکثر فعالیت آن به ائوسن مربوط می‌شود (Stöcklin, 1974). آشکارترین واحدهای سنگی منطقه علی‌آباد به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از:

قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه واحدهای هارزبورژیتی کرتاسه بوده و معمولاً سرپانتینی شده‌اند. این واحد سنگی در شمال شرق منطقه رخنمون دارد. واحدهای سنگی ائوسن قسمت عمده ارتفاعات منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. این واحدها در سرتاسر منطقه و از سنگ‌های اغلب آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت، ریولیت و در قسمت‌هایی در همراهی با واحدهای آذرآواری توف و ماسه‌سنگ توفی دیده می‌شوند. این واحدها اکسیده شده‌اند و به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز قابل رؤیت هستند. مرز این واحدها با یکدیگر تدریجی بوده و از یک ماگما منشأ گرفته و با تغییر ترکیب در طی تکوین از هم جدا شده‌اند.

واحد دیگری از ائوسن میانی در منطقه رخنمون یافته و این واحد شامل گدازه‌های آندزیتی تا بازالت پیروکسن دار است. جوان‌ترین واحدهای ائوسن در علی‌آباد که به دو صورت گدازه و گنبد در منطقه دارند، شامل گنبدها و گدازه‌های ریوداسیتی به رنگ صورتی هستند و واحدهای قدیمی تر ائوسن را قطع کرده‌اند. روند ارتفاعات منطقه از روند عمومی پهنه ماگمایی ارومیه-بزمان پیروی می‌کند و منطقه تحت تأثیر گسل‌های فراوان قرار گرفته است.

در این منطقه به نظر می‌رسد، فعالیت ماگمایی اسیدی در امتداد گسل‌ها در اواخر نئوژن شرایط دگرسانی شیشه‌های آتشفشانی و تبدیل شدن به پرلیت را در منطقه فراهم کرده است. از نظر زمین‌ساختی پرلیت‌ها دارای روند شرقی-غربی بوده و شیب آنها نزدیک به قائم است و نفوذ محلول‌های گرمایی سبب تشدید فرایند دگرسانی و تبدیل پرلیت‌های منطقه به بنتونیت شده است. جوان‌ترین واحد سنگی منطقه علی‌آباد مربوط به نهشته‌های

کواترنری می‌شود. این واحدها شامل آبرفت، قلوه‌سنگ، شن و ماسه و به دو شکل بادبزنی آبرفتی (مخروط‌افکنه) و پادگانه‌های آبرفتی دیده می‌شوند (شکل ۱) (Amini and Amini, 2003).

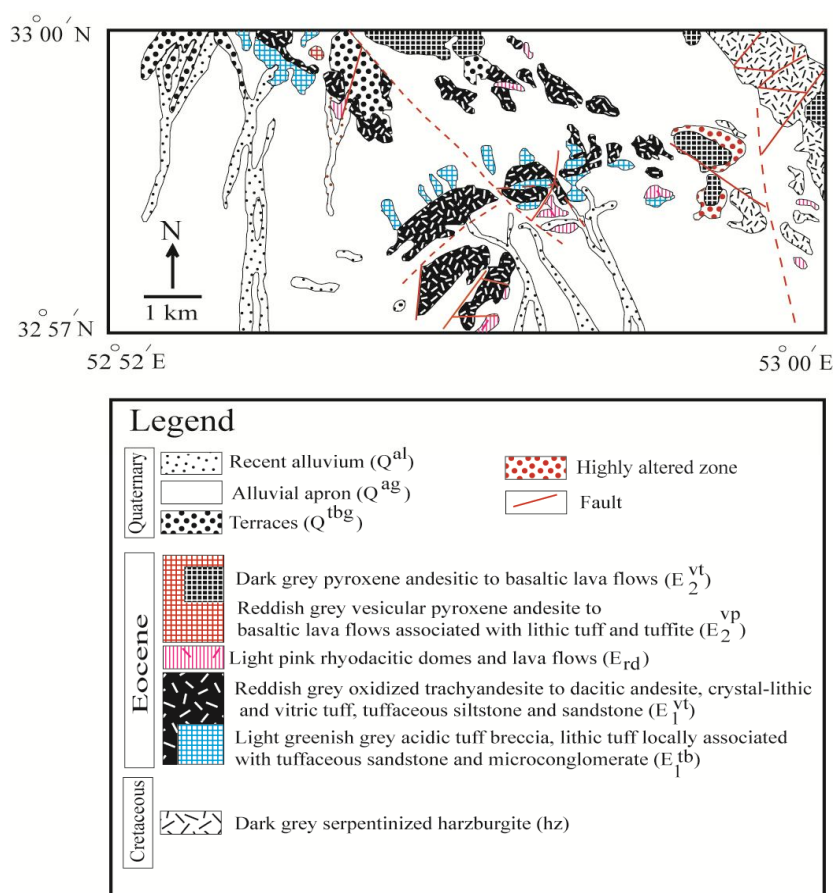
بحث و بررسی

الف) پتروگرافی

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد دارای بافت‌های پورفیری، جریان، بادامکی و پرلیتی هستند. همچنین این سنگ‌ها از لحاظ کانی‌شناسی اغلب شامل پلاژیوکلاز، سانیدین، کلینوپیروکسن، کوارتز و اوپیک می‌شوند. آپاتیت کانی فرعی مشاهده شده در این سنگ‌هاست. از کانی‌های ثانویه موجود در این سنگ‌ها اپیدوت، کلریت، زئولیت، کانی‌های رسی، کلسیت، کوارتز و اسفن هستند. پلاژیوکلاز در سنگ‌های علی‌آباد به دو صورت فنوکریست و میکروولیت دیده می‌شود. فنوکریست‌های این کانی به صورت شکل دار تا نیمه‌شکل دار دارای ماکل پلی‌سنستیک و گاهی منطقه‌بندی، حواشی خورده شده و یا دارای شکستگی هستند. همچنین فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در مواردی به طور بخشی و یا کامل به اپیدوت (شکل ۲-A) و کلسیت دگرسان شده‌اند. از بافت‌های معمولی که فنوکریست‌های پلاژیوکلاز از خود نشان می‌دهند، می‌توان به بافت غربالی اشاره کرد (شکل ۲-B). از بافت‌های دیگری که در این سنگ‌ها دیده می‌شود، بافت بادامکی است که بیانگر پرشدگی حفره‌های این سنگ‌ها توسط کلریت، کلسیت و کوارتز است و این بافت در آندزیت‌ها به وفور مشاهده می‌شود. در سنگ‌های تراکی آندزیتی منطقه، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار و شیشه قرار دارند و این سنگ‌ها دارای بافت جریانی هستند (شکل ۲-C). علاوه بر این، سنگ‌های تراکی آندزیت منطقه از خود بافت‌های هیالوپلیتیک و نواری نیز نشان می‌دهند. در داسیت‌ها، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با حاشیه‌های گردشده، کنده شده و بافت برشی دیده می‌شوند. در

ویژگی سنگ‌های این منطقه است. از دیگر کانی‌های موجود در این سنگ‌ها، کوارتز است که به صورت فنوکریست و اولیه در سنگ‌های اسیدی وجود دارد. همچنین کوارتز به صورت پرکننده حفره‌ها و رگه‌ها در سنگ‌های منطقه رخ داده است که ناشی از تأثیر محلول‌های گرمابی بر واحدهای منطقه است (شکل ۲-۲-E).

ریولیت‌های منطقه علی‌آباد فنوکریست‌های فلدسپار در زمینه اسفرولیتی وجود دارند. سنگ‌های ریولیتی منطقه از نوع پرلیت بوده و دارای مقدار زیادی ترک‌های کروی و مرواریدی هستند. در سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز همراه با پیروکسن در زمینه‌ای از شیشه پرلیتی مشاهده می‌شوند (شکل ۲-۲-D) و شکستگی‌های مرواریدی از



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه علی‌آباد، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کجان (Amini and Amini Chehragh, 2003)

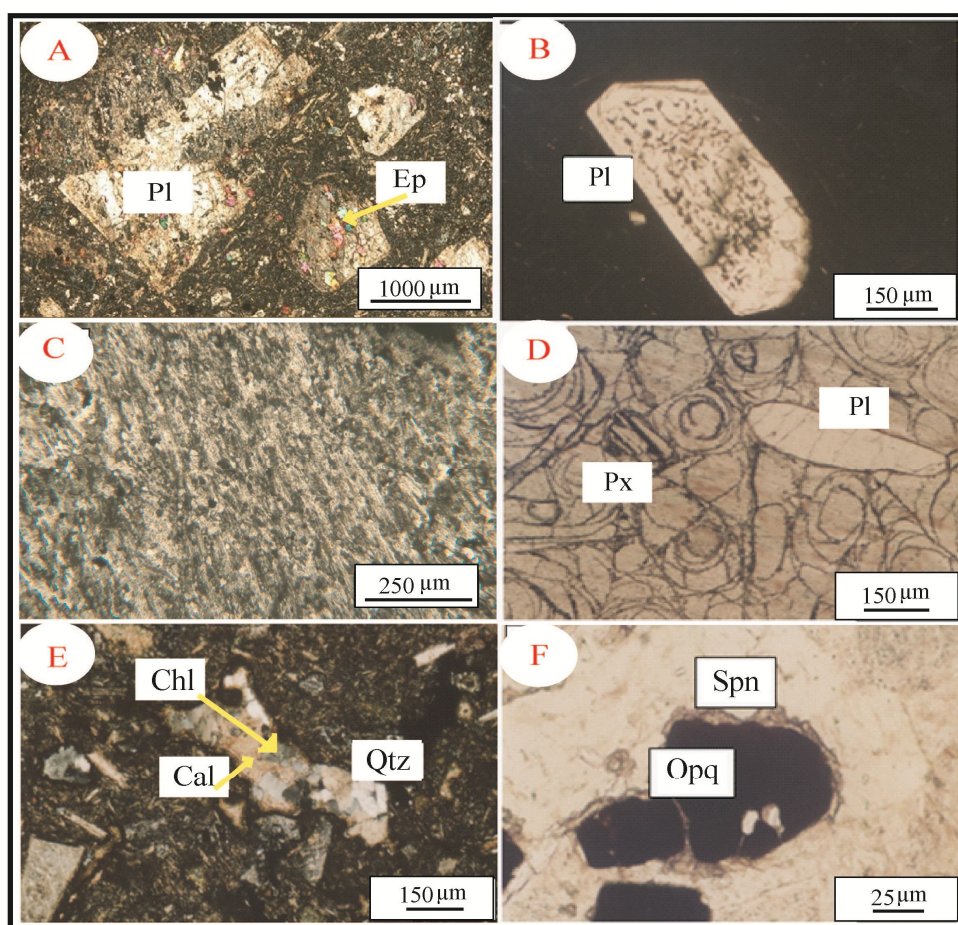
Fig. 1. Simplified geological map of the Aliabad area, part of the geology map of Kajan, scale 1:100000 (after Amini and Amini Chehragh, 2003)

کانی به صورت فنوکریست و میکروفنوکریست در سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد مشاهده می‌شود. کلینوپیکروکسن‌ها اغلب به صورت بی‌شکل با شکستگی‌های فراوان و با حاشیه‌های گردشده در نمونه‌ها مشخص هستند. در پاره‌ای از موارد

از کانی‌های ثانویه موجود در این سنگ‌ها می‌توان به کانی‌های کلریت، کلسیت، زئولیت، اپیدوت، اسفن، کوارتز و کانی‌های رسی اشاره کرد. از جمله کانی‌های فرومینیزین موجود در سنگ‌های این منطقه می‌توان به کلینوپیکروکسن اشاره کرد. این

برشی هستند. توف‌ها اغلب از نوع لیتیک توف هستند و قطعات لیتیک آنها دارای حاشیه‌های زاویه‌دار و گاهی دارای حاشیه گرد شده هستند. از کانی‌های موجود در این سنگ‌ها می‌توان به حضور پلاژیوکلاز، سانیدین و کانی‌های اوپک اشاره کرد. این سنگ‌ها نیز از دگرسانی مصون نمانده و اپیدوتی شدن و سیلیسی شدن را در اثر دگرسانی متحمل شده‌اند.

کانی‌های اوپک همراه و در ارتباط با اسفن (لوکوکسن) دیده می‌شوند و در واقع اسفن به خرج کانی اوپک تشکیل شده است. این اسفن‌های ثانویه (لوکوکسن) در طی فرایند دگرسانی به صورت کرونا در حاشیه کانی‌های اوپک (ایلمنیت؟) تشکیل شده‌اند (Sarabi, 2010) (شکل ۲-F). علاوه بر سنگ‌های آتشفشانی، حضور نمونه‌های پیروکلاستیک نیز در منطقه به چشم می‌خورد. سنگ‌های پیروکلاستیک از نوع توف و دارای بافت



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد A: تشکیل اپیدوت ناشی از دگرسانی فنوکریست پلاژیوکلاز (XPL)، B: نمایی از بافت غربالی فنوکریست پلاژیوکلاز (PPL)، C: بافت جریان‌ی در تراکی‌اندزیت‌های علی‌آباد (XPL)، D: بافت پرلیتی (PPL)، E: تشکیل کوارتز به همراه کلریت و کلسیت در فضای خالی سنگ (XPL) و F: نمایی از کانی اوپک همراه با حاشیه‌ای از کانی اسفن (PPL). علایم اختصاری از کرتز (Kretz, 1983) اقتباس شده است (Px: پیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Ep: اپیدوت، Chl: کلریت، Cal: کلسیت، Qtz: کوارتز، Opq: کوارتز، اپاک، Spn: اسفن).

Fig. 2. Microphotographs of Aliabad volcanic rocks A: Alteration of plagioclase phenocryst to epidote (XPL), B: Appearance of sieve texture in plagioclase phenocryst (PPL), C: Trachytic texture in trachyandesites of Aliabad area (XPL), D: Perlitic texture (PPL), E: Formation of quartz along with chlorite and calcite in open space of rock (XPL), and F: Appearance of opaque mineral with the margin of sphene mineral (PPL). Abbreviations after Kretz (1983) (Px: Pyroxene, Pl: Plagioclase, Ep: Epidote, Chl: Chlorite, Cal: Calcite, Qtz: Quartz, Opq: Opaque, Spn: Sphene).

ب) شیمی کانی کلینوپیروکسن سنگ‌های آتشفشانی منطقه علی‌آباد

در این پژوهش فرمول ساختاری پیروکسن‌ها بر اساس ۶ اتم اکسیژن محاسبه شده و نتایج تجزیه نقطه‌ای این کانی به همراه فرمول ساختاری آن در جدول ۱ آمده است.

در تقسیم‌بندی اولیه پیروکسن‌ها توسط موریموتو (Morimoto, 1989)، کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گروه Quad قرار می‌گیرند (شکل ۳-ا). در این تقسیم‌بندی M_1 و M_2 هر دو

به‌عنوان مکان M در نظر گرفته می‌شوند و کاتیون‌های Ca، Mg، Fe و Na در مکان M در نمودار Q-J قرار می‌گیرند. و کاتیون‌های Ca، Mg، Fe و Na در مکان M در نمودار Q-J قرار می‌گیرند. برای تقسیم‌بندی جزئی‌تر، کلینوپیروکسن‌هایی را که در نمودار Q-J در بخش Quad قرار گرفته‌اند، توسط نمودار سه‌تایی Wo-En-Fs تقسیم‌بندی می‌کنند. بر اساس نمودار مثلثی (Morimoto, 1989)، کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی دارای ترکیب اوژیت هستند (شکل ۳-ب).

جدول ۱. نتایج تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های علی‌آباد و فرمول ساختاری آنها بر اساس ۶ اتم اکسیژن همراه با ترکیب شیمیایی کل سنگ میزبان کلینوپیروکسن‌ها برای استفاده از آن در محاسبات دما-فشارسنجی به‌وسیله نرم‌افزار SCG (C: مرکز، C.R.: مابین مرکز-حاشیه، R.C.: مابین حاشیه-مرکز، R: حاشیه)

Table 1. Microprobe analyses (wt.%) of clinopyroxenes in Aliabad rocks and their structural formula based on 6 atom of oxygen along with hosting rock geochemistry composition of clinopyroxenes for thermobarometric estimations by SCG software (C.: Core, C.R.: Core-Regional, R.C.: Regional-Core, R.: Regional)

Sample	Cpx 1-C.	Cpx 2-C.R.	Cpx 6-R.C.	Cpx 7-R	Cpx 11-C	Cpx 13-R.C.	Whole Rock
SiO ₂	50.65	51.38	50.41	51.07	50.28	51.45	56.8
TiO ₂	1.47	1.43	0.53	1.25	1.47	0.68	0.84
Al ₂ O ₃	3.33	2.70	2.09	2.45	1.96	2.32	16.5
FeO	8.64	8.68	11.22	9.75	9.82	9.10	6.67
MnO	0.17	0.20	0.19	0.00	0.00	0.00	0.13
MgO	14.89	15.12	15.55	15.19	16.19	15.01	2.62
CaO	19.56	19.43	19.27	19.69	19.20	20.14	3.64
Na ₂ O	0.32	0.32	0.34	0.28	0.39	0.34	4.7
Total	99.03	99.26	100.12	99.68	99.31	99.04	
Si	1.897	1.920	1.879	1.903	1.873	1.925	
Ti	0.041	0.040	0.015	0.035	0.041	0.019	
Al ^{IV}	0.10	0.08	0.09	0.10	0.09	0.08	
Al ^{VI}	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.03	
Fe ⁺²	0.270	0.271	0.205	0.268	0.192	0.250	
Fe ⁺³	0.000	0.000	0.145	0.036	0.113	0.034	
Mn	0.005	0.006	0.006	0.000	0.000	0.000	
Mg	0.831	0.842	0.864	0.844	0.899	0.837	
Ca	0.785	0.778	0.770	0.786	0.766	0.807	
Na	0.023	0.023	0.025	0.020	0.028	0.025	
Total	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	
Wo	41.60	41.13	38.80	40.65	38.87	41.85	
En	44.06	44.53	43.57	43.64	45.61	43.39	
Fs	14.34	14.34	17.63	15.71	15.52	14.76	

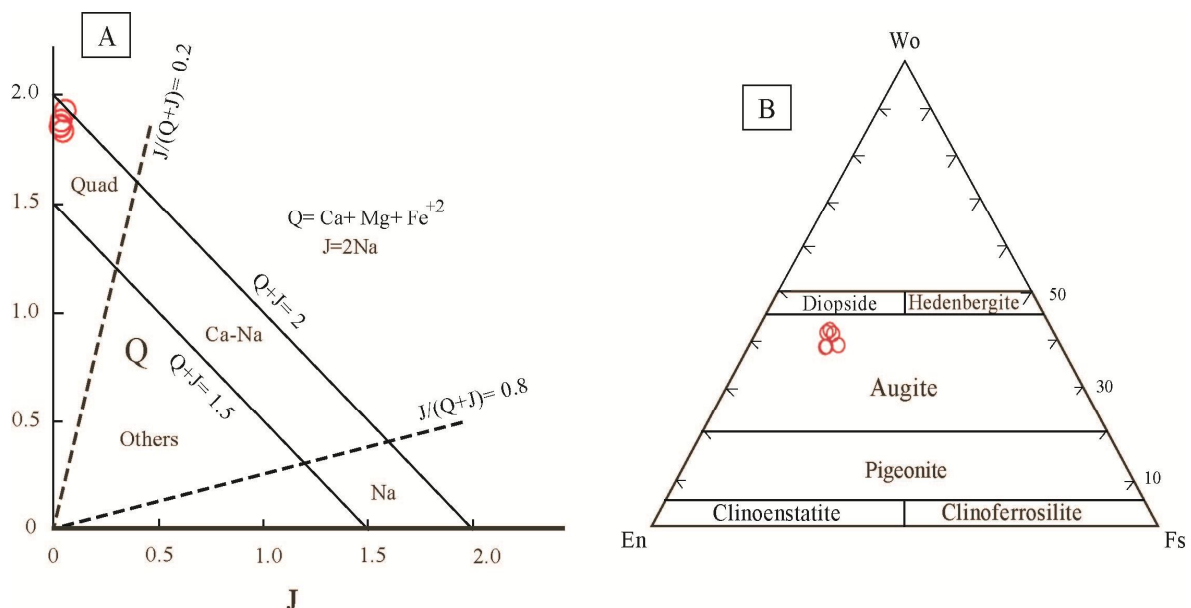
ج) دما-فشارسنجی کلینوپیروکسن

با استفاده از داده‌های تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن این امکان فراهم شده تا با استفاده از تغییرات فراوانی و مقدار کاتیون‌ها در این کانی فرومنیزین، بتوان مؤلفه‌های فشار و دمای تشکیل سنگ‌های دربردارنده آنها را ارزیابی کرد. کاربرد کلینوپیروکسن برای دماسنجی به صورت تک کانیایی و همچنین

همزیستی ارتوپیروکسن و کلینوپیروکسن توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. در روش تک کانیایی کلینوپیروکسن که توسط سوئسو (Soesoo, 1997) پیشنهاد شده، لازم است برای تخمین دما، دو مؤلفه XPT و YPT محاسبه شوند:

$$XPT = \left[\begin{array}{l} (0.446 \times SiO_2) + (0.187 \times TiO_2) - (0.404 \times Al_2O_3) + (0.346 \times FeO^T) \\ - (0.052 \times MnO) + (0.309 \times MgO) + (0.431 \times CaO) - (0.446 \times Na_2O) \end{array} \right]$$

$$YPT = \left[\begin{array}{l} (-0.369 \times SiO_2) + (0.535 \times TiO_2) - (0.317 \times Al_2O_3) + (0.323 \times FeO^T) \\ + (0.235 \times MnO) - (0.516 \times MgO) - (0.167 \times CaO) - (0.153 \times Na_2O) \end{array} \right]$$

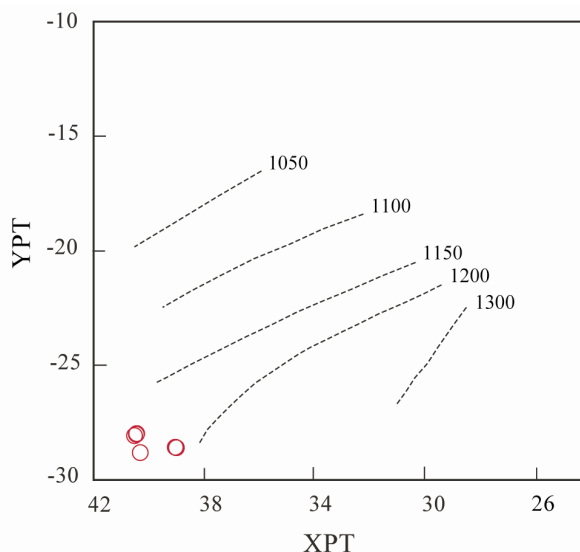


شکل ۳. نمودارهای تقسیم‌بندی پیروکسن‌ها و موقعیت نمونه‌های علی‌آباد. A: نمودار Q-J (Morimoto, 1989) و B: نمودار سه‌تایی ولاستونیت-انستاتیت-فروسیلیت برای تقسیم‌بندی پیروکسن‌های Ca-Mg-Fe (Morimoto, 1989)

Fig. 3. Pyroxenes-classifying diagrams and the situation of Aliabad's samples. A: Q-J diagram (Morimoto, 1989), and B: Wollastonite- Enstatite- Ferrosilite triangular diagram for classifying Ca-Mg-Fe Pyroxenes (Morimoto, 1989)

سانتی گراد است. از دیگر روش‌های پیشنهاد شده برای دما-فشارسنجی تک کانیایی کلینوپیروکسن، روش پوتیرکا (Putirka, 2008)، نیمیس و تیلور (Nimis and Taylor, 2000) و کرتز (Kretz, 1994) هستند.

مقدار XPT برای کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گستره ۳۸/۹۴-۴۰/۴۶ و مقدار YPT در گستره ۲۷/۲۳- تا ۲۸/۷۰- است (شکل ۴). بر اساس روش بالا، دمای تشکیل کلینوپیروکسن سنگ‌های علی‌آباد حدود ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه



شکل ۴. تعیین دمای تبلور کلینوپیکروکسن‌های سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997)

Fig. 4. Determination of crystallization temperature of clinopyroxenes of Aliabad volcanic rocks using the Soesoo (1997) method

۱۱۹۷ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۵ تا ۷ کیلوبار را نشان می‌دهند.

بر اساس روش پوتیرکا (Putirka, 2008) طبق رابطه‌های (A) و (B)، کلینوپیکروکسن‌های منطقه علی‌آباد دمای حدود ۱۱۰۱ تا

رابطه A)

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{13166 + 39028P(\text{kbar})}{13.25 + 15.35 \times \text{Ti} + 4.5 \times \text{Fe} - 1.55 \times (\text{Al} + \text{Cr} - \text{Na} - \text{K}) + (\ln a_{\text{En}}^{\text{Cpx}})^2}$$

رابطه B)

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{93100 + 544P(\text{kbar})}{61.1 + 36.6(X_{\text{Ti}}^{\text{cpx}}) + 10.9(X_{\text{Fe}}^{\text{cpx}}) - 0.95(X_{\text{Al}}^{\text{cpx}} + X_{\text{Cr}}^{\text{cpx}} - X_{\text{Na}}^{\text{cpx}} - X_{\text{K}}^{\text{cpx}}) + 0.395[\ln(a_{\text{En}}^{\text{cpx}})]^2}$$

ارائه شده برای ترموبارومتري کلینوپیکروکسن هستند. این روابط بدون هیچ قیدی قابل تلفیق با هم و ترسیم در نمودار دما-فشار هستند (Sayari and Sharifi, 2016). در این برنامه برای استفاده از برخی از رابطه‌ها، ترکیب شیمیایی مذاب در حال تعادل با کلینوپیکروکسن لازم است؛ ولی به جای آن می‌توان از ترکیب شیمیایی کل سنگ میزبان کلینوپیکروکسن‌ها استفاده کرد.

دمای محاسبه شده برای کلینوپیکروکسن‌ها در فشارهای ۲/۵ تا ۷ کیلوبار طبق روش نیمیس و تیلور (Nimis and Taylor, 2000)، ۱۰۰۹ تا ۱۰۸۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. روش دیگری که برای دما-فشارسنجی کلینوپیکروکسن‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، استفاده از برنامه SCG است. در این برنامه ۱۰ رابطه بارومتري و ۶ رابطه ترمومتري در اختیار کاربر قرار می‌گیرند که از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روابط

دمای تشکیل نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SCG (Sayari and Sharifi, 2014) (روش محاسباتی-ترسیمی) در محدوده دمایی ۱۰۷۴ تا ۱۰۹۴/۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. در واقع در روش ترسیمی، دو رابطه ژئوترموپارومتری سازگار که حداقل دارای یک متغیر مشترک (دما یا فشار) هستند، انتخاب و در یک نمودار فشار-دما ترسیم می‌شوند، سپس نقطه تقاطع آنها که بیانگر دما و فشار موردنظر است، به دست می‌آید (Sayari and Sharifi, 2014). نمودارهای مربوط به تلفیق رابطه‌های ۱ و ۲ و رابطه‌های ۳ و ۴ در شکل ۵ و نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

در این پژوهش، تنها از ۴ رابطه (رابطه‌های ۱ تا ۴) بارومتری و ترمومتری استفاده شد که از رایج‌ترین روابط پیشنهاد شده توسط پژوهشگران مختلف (Putirka et al., 2003; Putirka, 2008) برای ترموبارومتری کلینوپیروکسن هستند. به دلیل اینکه برای استفاده از روابط ۱ و ۲ نیاز به ترکیب شیمیایی مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن‌ها بود؛ بنابراین میانگین ترکیب شیمیایی کل سنگ میزبان کلینوپیروکسن‌ها برای محاسبات دما-فشارسنجی نقاط ۱، ۲، ۷ و ۱۳ موجود در یک نمونه سنگ به شماره A7 در ستون آخر جدول ۱ آورده شده است.

رابطه ۱ (Putirka et al., 2003)

$$P(kbar) = -88.3 + 2.82 * 10^{-3} T(^{\circ}K) \ln \left[\frac{X_{Jd}^{Cpx}}{X_{NaO.5}^{liq} * X_{AlO1.5}^{liq} * (X_{SiO2}^{liq})^2} \right] + 2.19 * 10^{-2} T(^{\circ}K) - 25.11 \ln [X_{CaO}^{liq} * X_{SiO2}^{liq}] + 7.03 [Mg_{\neq}^{liq}] + 12.4 \ln [X_{CaO}^{liq}]$$

رابطه ۲ (Putirka et al., 2003)

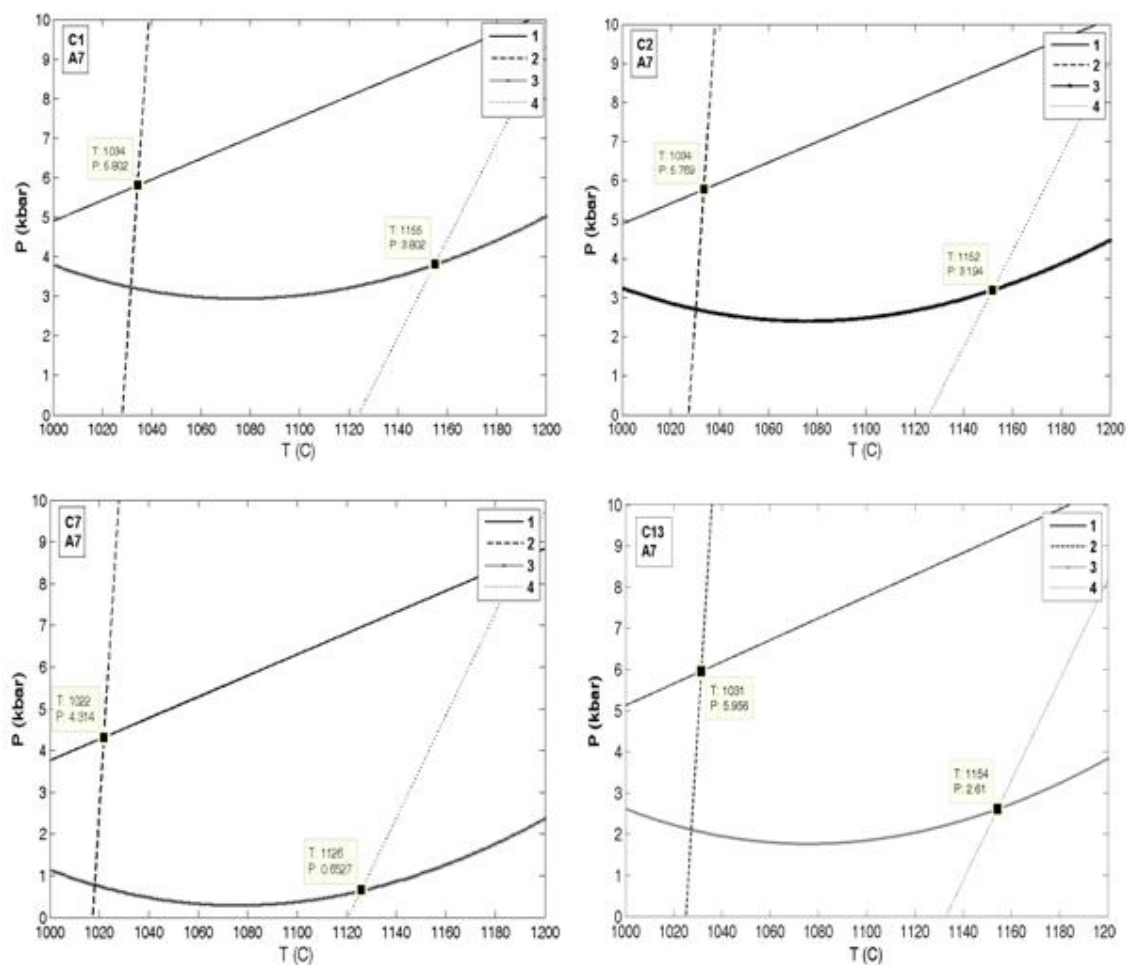
$$\frac{10^4}{T(^{\circ}K)} = 4.60 - 4.37 * 10^{-1} \ln \left(\frac{X_{Jd}^{Cpx} * X_{CaO}^{liq} * F_{M}^{liq}}{X_{DiHd}^{Cpx} * X_{NaO.5}^{liq} * X_{AlO1.5}^{liq}} \right) - 6.54 * 10^{-1} \ln(Mg_{\neq}^{liq}) - 3.26 * 10^{-1} \ln(X_{NaO.5}^{liq}) - 6.32 * 10^{-3} [P(kbar)] - 0.92 \ln(X_{SiO2}^{liq}) + 2.74 * 10^{-1} \ln(X_{Jd}^{Cpx})$$

رابطه ۳ (Putirka, 2008)

$$P(kbar) = 3205 + 0.384 T(^{\circ}K) - 518 \ln T(^{\circ}K) - 5.62 (X_{Mg}^{Cpx}) + 83.2 (X_{Na}^{Cpx}) + 68.2 (X_{DiHd}^{Cpx}) + 2.52 \ln (X_{Al(VI)}^{Cpx}) - 51.1 (X_{DiHd}^{Cpx})^2 + 34.8 (X_{EnFs}^{Cpx})^2$$

رابطه ۴ (Putirka, 2008)

$$T(^{\circ}K) = \frac{93100 + 544P(kbar)}{61.1 + 36.6(X_{Ti}^{Cpx}) + 10.9(X_{Fe}^{Cpx}) - 0.95(X_{Al}^{Cpx} + X_{Cr}^{Cpx} - X_{Na}^{Cpx} - X_{K}^{Cpx}) + 0.395 [\ln(a_{En}^{Cpx})]^2}$$



شکل ۵. نمودارهای ژئوترمو بارومتري کلينوپيروکسن‌های منطقه علی‌آباد (Sayari and Sharifi., 2014)

Fig. 5. Geothermobarometric graphs of clinopyroxenes of Aliabad area (Sayari and Sharifi, 2014)

جدول ۲. نتایج حاصل از محاسبات ترمو بارومتري کلينوپيروکسن‌های منطقه علی‌آباد بر اساس تلفيق رابطه‌های (مدل‌های) ۱ و ۲ و رابطه‌های (مدل‌های) ۳ و ۴

Table 2. The results of thermobarometric calculations of clinopyroxenes of Aliabad area based on the integration of the models 1 and 2 and the models 3 and 4

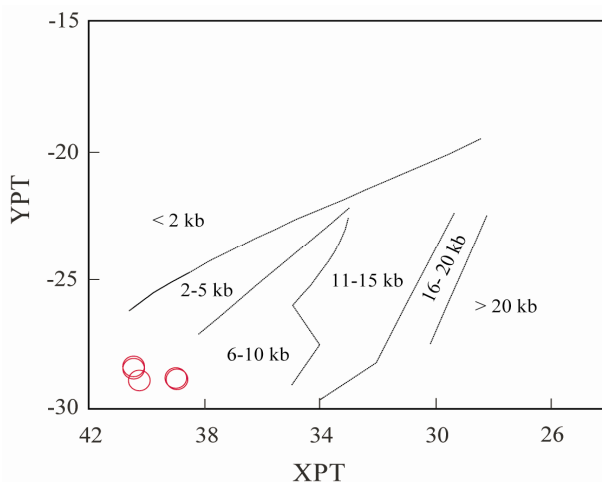
Sample	Models 1 and 2		Models 3 and 4		Average	
	P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)
C1	5.8	1034	3.8	1155	4.80	1094.5
C2	5.77	1034	3.19	1152	4.48	1093
C7	4.31	1022	0.65	1126	2.48	1074
C13	5.96	1031	2.61	1154	4.29	1092.5

د) تعیین مقدار فشار و عمق ماگما

در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای این منظور توسط پژوهشگران (Soesoo, 1997; Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008) ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، روش سوئسو (Soesoo, 1997) است که لازم است برای ارزیابی فشار حاکم بر تشکیل سنگ‌های حاوی کلینوپیروکسن، دو شاخص XPT و YPT محاسبه شوند. مقدار فشار به دست آمده بر اساس محاسبات انجام شده (شکل ۶) نمونه‌های مورد بررسی در محدوده ۳/۵ تا ۶ کیلو بار ترسیم می‌شوند.

روش دیگری که برای بررسی فشار در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، با استفاده از نرم‌افزار SCG است که توسط سیاری و شریفی (Sayari and Sharifi, 2014) ارائه شده است. بر اساس این روش، مقدار فشار به دست آمده برای

کلینوپیروکسن‌های علی‌آباد بیانگر فشار ۲/۴۸ تا ۴/۸ کیلو بار است. بر اساس فشار محاسبه شده، برای تعیین عمق اتاق ماگمایی مولد سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد از رابطه $P = \rho gh$ استفاده شده است. فشارهای زمین‌ساختی نیز بی‌تأثیر نیستند؛ اما از آنجایی که این فشارها در مقایسه با فشار لیتواستاتیک ناچیز هستند، می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. بنابراین اگر چگالی سنگ‌های پوسته قاره‌ای را 2.7 gr/cm^3 ، شتاب گرانی زمین را ثابت و برابر 9.81 m/s^2 در نظر بگیریم و همچنین از افزایش چگالی سنگ‌ها نسبت به عمق و کاهش شتاب گرانی با افزایش عمق صرف‌نظر کنیم، می‌توان بیان کرد که کلینوپیروکسن‌های علی‌آباد در حین صعود در محدوده ۹ تا ۱۸ کیلومتری عمق زمین تبلور شده‌اند.



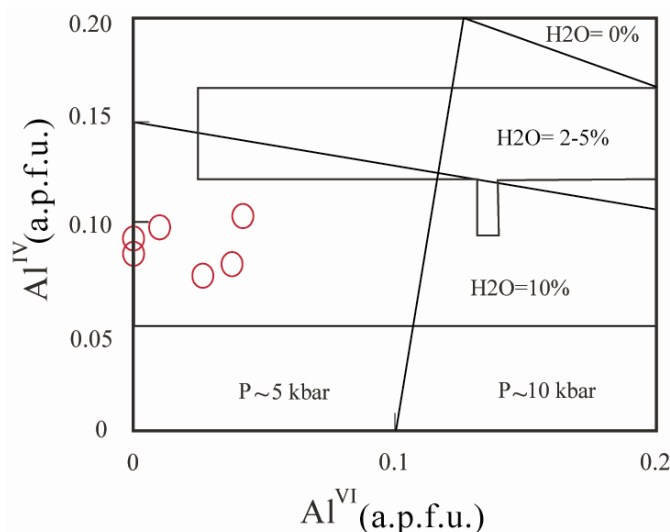
شکل ۶. تعیین فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997)

Fig. 6. Determination of pressure crystallization of clinopyroxenes in Aliabad volcanic rocks using the Soesoo (1997) method

پیروکسن‌های سنگ‌های آتشفشانی علی‌آباد در محدوده فشار ۵ کیلو بار و میزان آب ۱۰ درصد قرار می‌گیرند (شکل ۷). همچنین نمونه‌های مورد بررسی در نمودار ارائه شده توسط آئوکی و شیبا (Aoki and Shiba, 1973)، محدوده فشار کم تا متوسط است که بیانگر تبلور کلینوپیروکسن‌ها در حین صعود و از عمق به طرف سطح است (شکل ۸).

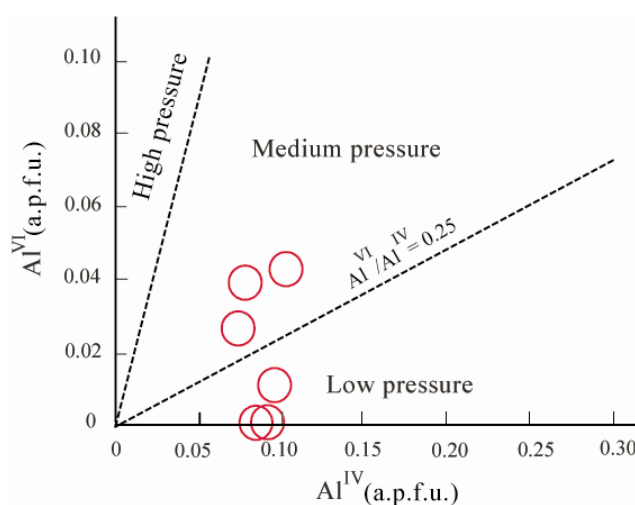
ه) تعیین مقدار آب ماگما و فوگاسیته اکسیژن

به عقیده هلز (Helz, 1973) برای تعیین میزان آب ماگما می‌توان از چگونگی توزیع Al در موقعیت‌های اکتاهداری و تراهدری استفاده کرد. به عقیده این پژوهشگر هر اندازه میزان Al در موقعیت تراهدری افزایش یابد، مقدار آب در محیط تبلور پیروکسن کاهش می‌یابد. لذا بر اساس نمودار مربوطه،



شکل ۷. توزیع Al^{IV} و Al^{VI} در ترکیب کلینوپیکروکسن‌های سنگ‌های علی‌آباد نسبت به مقدار درصد بخار آب ماگما (Helz, 1973)

Fig. 7. Distribution of Al^{IV} and Al^{VI} in combination of Clinopyroxenes of Aliabad rocks, relative to the amount of water vapor of magma (Helz, 1973)



شکل ۸. موقعیت کلینوپیکروکسن‌های سنگ‌های علی‌آباد بر روی نمودار Al^{IV} - Al^{VI} (Aoki and Shiba, 1973)

Fig. 8. The position of clinopyroxenes of Aliabad rocks on the Al^{IV} - Al^{VI} graph (Aoki and Shiba, 1973)

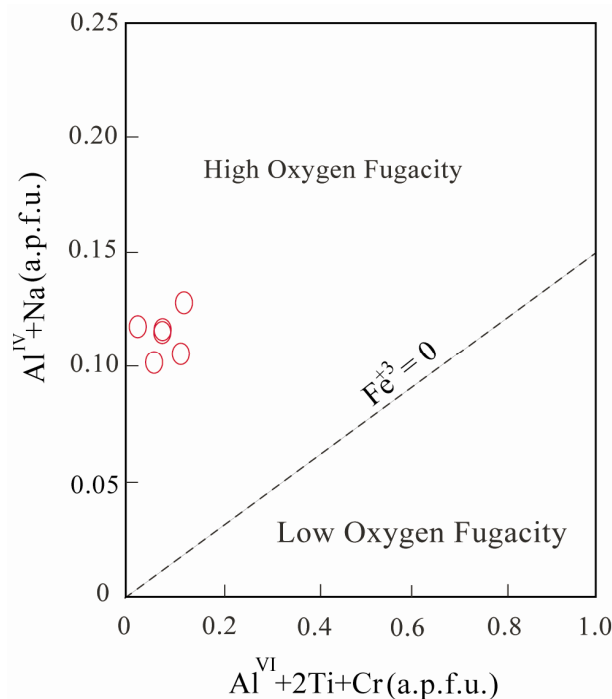
تعیین فوگاسیته اکسیژن

به عقیده فرانس و همکاران (France et al., 2010)، فوگاسیته اکسیژن به دلیل تأثیر در تغییر دمای لیکیدوس و ترکیب مذاب-بلور به عنوان عاملی مؤثر در فرایندهای ماگمایی، توالی تبلور و نوع کانی‌های تبلور یافته همواره مورد توجه پژوهشگران علوم زمین قرار گرفته است و روش‌های گوناگونی برای این

منظور ارائه شده‌اند (Ridolfi, et al., 2010; Laubier, et al., 2014; Burnham and Berry, 2014; Smythe and Brenan, 2016). در واقع میزان آهن فریک محیط تشکیل سنگ‌ها به فشاربخشی اکسیژن وابسته است. برای تعیین میزان فوگاسیته اکسیژن محیط تشکیل سنگ‌های علی‌آباد، از نمودار دومتغیره پیشنهاد شده توسط شوایتزر و همکاران (Schweitzer et al., 1979) استفاده شد. از

می‌شوند، در شرایط فوگاسیته بالای اکسیژن متبلور شده‌اند و هر اندازه نمونه‌ها در فاصله بالاتری از این خط قرار گیرند، بیانگر تبلور آنها در شرایط فشاربخشی بیشتری از اکسیژن است (Cameron and Papike, 1981). با توجه به (شکل ۹) موقعیت پیروکسن‌های منطقه علی‌آباد بیانگر بالابودن فوگاسیته اکسیژن در هنگام تبلور آنهاست.

آنجایی که عنصر Fe در ترکیب پیروکسن‌ها جایگزین تیتانیم، کرم و آلومینیم در موقعیت اکتاهداری می‌شود؛ بنابراین میزان این عنصر در پیروکسن‌ها تابعی از مقدار Al در موقعیت‌های اکتاهداری و تتراهداری است. لذا هر اندازه که میزان Al^{IV} افزایش یابد، امکان ورود عناصر سه ظرفیتی دیگر مانند Fe در موقعیت اکتاهداری افزایش می‌یابد، بنابراین پیروکسن‌هایی که در نمودار شواپتزر و همکاران در بالای خط $Fe^{+3}=0$ ترسیم



شکل ۹. تخمین فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های علی‌آباد، با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن (Schweitzer et al., 1979)

Fig. 9. Estimation of Oxygen fugacity in environment of formation of clinopyroxenes in Aliabad rocks by chemical composition of pyroxene (Schweitzer et al., 1979)

کانی‌های فرومنیزین سنگ‌های آندزیتی منطقه که از دگرسانی مصون مانده است، کلینوپیروکسن‌ها هستند. کلینوپیروکسن موجود در این سنگ‌ها از نوع اوژیت است و در دسته کلینوپیروکسن‌های Ca-Mg-Fe قرار می‌گیرد. یافته‌های دماسنجی بیانگر تبلور کلینوپیروکسن‌ها در بازه دمایی ۱۰۰۹ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین نتایج حاصل از

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آتشفشانی ائوسن علی‌آباد از انواع آذرین حدواسط تا اسیدی هستند و عبارتند از آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت. این واحدهای سنگی توسط سنگ‌های پیروکلاستیک (توف) نیز همراهی می‌شوند. این مجموعه تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته و ذخیره بنتونیت منطقه را تشکیل داده‌اند. از جمله

قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران محترم به دلیل پیشنهادهای ارزشمندشان و همچنین از آقای دکتر سیاری به خاطر یاری در استفاده از نرم‌افزار SCG قدردانی می‌نمایند.

فشارسنجی نشان‌دهنده تبلور آنها در فشار ۲/۵ تا ۷ کیلو بار در طی صعود ماگما و در اعماق مختلف است. بررسی‌ها بر روی کلینوپیروکسن‌های منطقه علی‌آباد نشان می‌دهد که تشکیل نمونه‌ها در شرایط بالایی از فوگاسیته اکسیژن صورت گرفته است.

References

- Aghanabati, S. A., 1994. Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 586 pp.
- Amini, B. and Amini Chehragh, M.R., 2003. Geological map of Kajan, scale 1:100 000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Aoki, K. and Shiba, I., 1973. Pyroxenes from Iherzolite inclusions of Itinome-Gata, Japan. *Lithos*, 6(1): 41–51.
- Beccaluva, L., Macciotta, G., Piccardo, G.B. and Zeda, O., 1989. Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator. *Chemical Geology*, 77(3–4): 165–182.
- Best, M.G., 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell science ltd, Oxford UK, 729 pp.
- Burnham, A.D. and Berry, A.J., 2014. The effect of oxygen fugacity, melt composition, temperature and pressure on the oxidation state of cerium in silicate melts. *Chemical Geology*, 366(1): 52–60.
- Cameron, M. and Papike, J.J., 1981. Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist*, 66(1–2): 1–50.
- Falahaty, S., Noghrean, M., Sharifi, M., Torabi, G., Safaei, H. and Mackizadeh, M.A., 2016. Clinopyroxene application in petrogenesis identification of volcanic rocks associated with salt domes from Shurab (Southeast Qom). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 21–38. (in Persian with English abstract)
- France, L., Ildefonse, B., Koepke, J. and Bech, F., 2010. A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3–4): 340–346.
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at $p_{H_2O}=5$ kbar as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Journal of Petrology*, 14(2): 249–302.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1–2): 277–279.
- Kretz, R., 1994. *Metamorphic Crystallization*. John Wiley and Sons, Berlin, 530 pp.
- Laubier, M., Grove, T.L. and Langmuir, C.H., 2014. Trace element mineral/melt partitioning for basaltic and basaltic andesitic melts: An experimental and laser ICP-MS study with application to the oxidation state of mantle source regions. *Earth and Planetary Science Letters*, 392(2): 265–278.
- Le Bas, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267–288.
- Lindsley, I., 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 68(5–6): 477–493.
- Liotard, J.M., Briot, D. and Boivin, P., 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central 23 xenoliths suite (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(1): 81–90.
- Mehvari, R., 2009. Petrological and mineralogical studies of the hydrothermal alteration (bentonitization and silicification), Molla Ahmad stiphui, East of Isfahan. M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 171 pp. (in Persian with English abstract)
- Mehvari, R., Noghrean, M., Sharifi, M., Mackizadeh, M.A., Tabatabaei, S.H. and Torabi, G., 2016. Mineral chemistry of clinopyroxene: guidance on geothermobarometry and tectonomagmatic setting of Nabar volcanic rocks, South of Kashan. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 493–506.

- (in Persian with English abstract)
- Morimoto, N., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27(1): 143–156.
- Neave, D.A. and Putirka, K., 2017. A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones. *American Mineralogist*, 102(1): 777–794.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(2): 541–554.
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149–160.
- Princivalle, F., Tirone, M. and Comin-Chiaromonte, P., 2000. Clinopyroxenes from spinel-peridotite mantle xenoliths from Nemby (Paraguay): crystal chemistry and petrological implications. *Mineralogy and Petrology*, 70(1): 25–35.
- Putirka, K., Mikaelian, H., Ryerson, F. and Shaw, H., 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist*, 88(10): 1542–1554.
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61–120.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45–66.
- Sarabi, F., 2010. Optical mineralogy. University of Tehran, Tehran, 466 pp.
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2014. SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry. *Italian Journal of Geosciences*, 133(2): 315–322.
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2016. Application of clinopyroxene chemistry to interpret the physical conditions of ascending magma, a case study of Eocene volcanic rocks in the Ghohrud area (North of Isfahan). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 61–78. (in Persian with English abstract)
- Schweitzer, E.L., Papike, J.J. and Bence, A.E., 1979. Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Journal of Science*, 64(5–6): 501–513.
- Smythe, D.J. and Brennan, J.M., 2016. Magmatic oxygen fugacity estimated using zircon-melt partitioning of cerium. *Earth and Planetary Science Letters*, 453(1): 260–266.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *The Geological Society of Sweden*, 119(1): 55–60.
- Stöcklin, J., 1974. Possible ancient continental margin in Iran. In: C.A. Burk and C.L. Drake (Editors), *The Geology of Continental Margin*. Springer, Berlin, pp. 873–887.
- Sun, C. M. and Bertrand, J., 1991. Geochemistry of clinopyroxenes in plutonic and volcanic sequences from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan province, China): Petrogenetic and geotectonic implications. *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 71(2): 243–259.
- Tamizi, N., 2013. Petrography of volcanic rocks in the north of Aliabad mining area with emphasis on recent perlite and bentonite exploration works (NW Nain). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 95 pp. (in Persian with English abstract)
- Zhu, Y.F. and Ogasawara, Y., 2004. Clinopyroxene phenocrysts (with green salite cores) in trachybasalts: implications for two magma chambers under the Kokche NAPV UHP massif, North Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 517–527.



Application of Clinopyroxene Chemistry for Investigation of the physical conditions of ascending magma, a case study of volcanic rocks in the Aliabad area (Northwest of Nain)

Rezvan Mehvari^{1*} and Mortaza Sharifi²

1) Young Researchers and Elite Club, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Submitted: Feb. 22, 2018

Accepted: Dec. 22, 2018

Keywords: *Clinopyroxene, Thermobarometry, Urumieh-Dokhtar, Aliabad*

Introduction

The Aliabad area is located in the northwest of Nain. Volcanic rocks of the Aliabad area have andesitic to rhyolitic composition.

On the basis of petrographic investigations, porphyritic texture is the main texture of these rocks. Thus, they have experienced two crystallization stages. In these rocks, phenocrysts have been crystallized in the first stage, and in the second stage the cooling processes were fast, resulting in a groundmass of glass and fine crystals.

The second stage of crystallization in these rocks took place at (near) the earth surface. The composition of phenocrysts such as amphibole, biotite and pyroxene provide valuable data about magmatic series, pressure, and temperature history of the primary magma during crystallization. In this study, the clinopyroxene of these rocks was analyzed in order to estimate the physicochemical conditions of the parent magma.

Material and Methods

Field work in the Aliabad area was carried out to identify volcanic units and their relationships. About 65 samples were collected. Thin sections were prepared for petrographic studies to select suitable samples of the volcanic rocks for more detailed mineralogical and geochemical studies. The chemical composition of minerals was determined using a wavelength dispersive EPMA (Cameca-SX 100) at Iran Minerals Research and

Processing Center. Analytical conditions for the minerals were accelerating voltage of and a beam current of 15 nA. 15 kV. Also, the Minpet software package was used for processing the relevant data and calculating the structural formula of clinopyroxene minerals based on 6 oxygen atoms.

Results

The chemical compositions of clinopyroxenes were used to estimate the chemical evolution and P-T conditions of the magmas during crystallization. Microprobe analyses show that clinopyroxenes in the andesitic rocks are augite (En₄₃₋₄₅Wo₃₈₋₄₂FS₁₄₋₁₈).

According to the clinopyroxene thermobarometry calculations done by several methods, it was inferred that the clinopyroxenes are crystallized at temperatures of 1009-1200 °C and pressures of 2.5-7 kbar.

By noting the distribution of aluminum in clinopyroxenes, these phenocrysts were formed in a range of low to medium pressure that shows the crystallization of those during the ascending of magma in different depths of 9 to 18 km. According to the Helz diagram (1973), the amount of water is about 10 percent. Clinopyroxene composition along petrographic investigations in the studied rocks confirm that fO_2 is high.

Discussion

The Aliabad area is located in the Urumieh--

*Corresponding authors Email: r.mehvary@gmail.com

Dokhtar volcanoplutonic belt, Northwest of Nain-Iran. In the Aliabad area, the exposed Cenozoic volcanic rocks are compositionally from andesite to rhyolite. These rocks show porphyritic, trachytic, and amygdaloidal textures under the microscope and they consist of plagioclase, clinopyroxene, sanidine, quartz, opaque and apatite.

The andesitic rocks of the Aliabad area are composed mainly of plagioclase and clinopyroxene phenocrysts in a groundmass of plagioclase microlites and fine crystals of pyroxene and opaque minerals along with glass. According to the ternary diagram of Wo-En-Fs (Morimoto, 1989), the studied clinopyroxenes are augite in composition. The physical (pressure and temperature) conditions of a magma during crystallization is recorded in the chemical composition of the clinopyroxene phenocrysts. Therefore, clinopyroxenes are representative of magma composition and usually are used for identifying the chemical condition i.e. magmatic series and physical conditions, temperature and pressure of a magma at the time when clinopyroxene was crystallized.

Several methods that are applied for this purpose are as follows:

1- The Soesoo (1997) method

Based on this approach, the pressure and temperature formation of the Aliabad clinopyroxenes are about 3.5-6 kbar and 1150-1200 °C, respectively.

2- The Sayari and Sharifi (2014) method

According to this method, the pressure and temperature formation of the studied samples are about 2.48-4.8 kbar and 1074-1094 °C, respectively.

3- The Nimis and Taylor (2000) method

Using this method, the temperature formation of clinopyroxenes in the Aliabad area is about 1009-1083 °C.

Acknowledgements

The authors of the manuscript would like to thank the respectable reviewers for valuable suggestions and also Dr. Sayari for his help in using the SCG software.

References

- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at $p_{H_2O}=5$ kbar as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Journal of Petrology*, 14(2): 249–302.
- Morimoto, N., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27(1): 143–156.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(2): 541–554.
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2014. SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry. *Italian Journal of Geosciences*, 133(2): 315–322.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *The Geological Society of Sweden*, 119(1): 55–60.