



شیمی کانی کلینوپیروکسن: رهنمودی بر زمین دما - فشارسنجی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگهای آتشفشانی نابر، جنوب کاشان

رضوان مهوری¹، موسی نقره‌نیا^{1*}، مرتضی شریفی¹، محمدعلی مکی‌زاده¹، سیدحسن طباطبایی² و قدرت ترابی¹

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

(2) دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: 1394/02/27، پذیرش: 1394/08/04

چکیده

سنگهای آتشفشانی و نیمه عمیق نابر در کمربند آتشفشانی - نفوذی ارومیه - دختر جایگزین شده‌اند. این مجموعه شامل آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت، ریولیت، پیروکسن دیوریت پورفیری و سنگهای آذرآواری (توف) است. بررسی شیمی کانیهای کلینوپیروکسن در سنگهای آندزیت و پیروکسن دیوریت پورفیری نشان می‌دهد که ترکیب کلینوپیروکسن‌ها از نوع اوژیت با ترکیب $Wo_{41/56} - An_{43/42} - Fs_{17/23}$ است. توزیع آلومینیم در ساختار این کانی بیانگر تبلور کانی از یک ماگمای آبدار با فشار بخار آب بیشتر از 10 درصد است. همچنین کلینوپیروکسن‌ها در فشارهای کم تا متوسط تشکیل شده که بیانگر تبلور آنها طی صعود ماگما و در اعماق متفاوت است. میزان آهن فریک در کلینوپیروکسنها نشان‌دهنده فوگاسیته بالای اکسیژن ماگماست. زمین دما - فشار سنجی کلینوپیروکسن‌ها گستره دمایی 950 تا 1200 درجه سانتی‌گراد و فشار 2 تا 5 کیلو بار را نشان می‌دهد. شیمی کانی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که سنگهای آتشفشانی و نیمه عمیق نابر دارای ماهیت کالک‌آلکالن و در ارتباط با محیطهای کوه‌زایی هستند.

واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن، دما - فشارسنجی، تکتونوماگمایی، نابر، ارومیه - دختر

مقدمه

انجام شده است. امامی (Emami, 1993) نتایج پژوهشهای زمین‌شناسی این منطقه را در قالب نقشه زمین‌شناسی 1:100000 کاشان ارائه کرده است. از بررسیهایی که اخیراً در محدوده مورد بررسی صورت گرفته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

عباسی (Abbasi, 2012) سنگهای حدواسط شرق نابر را مورد بررسی قرار داد، توده نفوذی این منطقه را از نوع I و تشکیل آنها را با ماگماتیسیم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی مرتبط دانسته و محیط تشکیل آنها را وابسته به حاشیه قاره‌ای فعال بیان نموده است. جوادی (Javadi, 2012) بررسیهای را بر روی اسکارن‌های شرق نابر متمرکز کرده و اسکارن‌های این منطقه را در رده کلسیمی - منیزیمی معرفی کرده است. ابراهیمی (Ebrahimi, 2013) پژوهشهای خود را در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد

محدوده مورد بررسی در مختصات جغرافیایی $11^{\circ} 51'$ تا $19^{\circ} 51'$ طول شرقی و $33^{\circ} 48'$ تا $33^{\circ} 52'$ عرض شمالی و در 26 کیلومتری جنوب کاشان واقع شده است. محدوده مورد بررسی، قسمتی از کمربند آتشفشانی - نفوذی ارومیه - دختر است. بیشتر نواحی این منطقه دارای مورفولوژی کوهستانی و مرتفع است و ارتفاعات آن دارای روند شمال غرب - جنوب شرق هستند. در محدوده کاشان پیکره اصلی منطقه را واحدهای آذرین - رسوبی تشکیل می‌دهند (شکل 1). سنگهای آذرآواری و گدازه‌های ائوسن همراه بین لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و شیل بر روی آهکهای کرتاسه قرار می‌گیرند. گدازه‌های ائوسن، اغلب در غرب و جنوب غرب کاشان قرار دارند. عملکرد فرآیندهای هیدروترمال در واحدهای آذرآواری و آتشفشانی این منطقه سبب تشکیل پهنه‌های دگرسانی متعدد شده است. بررسیهای متعددی در این منطقه توسط پژوهشگران مختلف

فرورانش صفحه اقیانوسی تئیس جوان و متعاقباً صفحه عربی به زیر ایران تشکیل شده است. واحدهای سنگی منطقه از قدیم به جدید عبارتند از: واحدهای ائوسن میانی تا بالایی که از سنگهای آذرآواری تیره تا خاکستری همراه با گدازه‌های آندزیتی - بازالتی، ریوداسیتی، ریولیتی، و میان لایه‌هایی از آهک نومولیت‌دار، توف، شیل و ماسه تشکیل شده است. گدازه‌های ائوسن دارای درز و شکستگیهای زیادی بوده و به شدت دگرسان شده‌اند. واحدهای سنگی الیگومیوسن در جنوب کاشان که از مارن‌های سبز رنگ، شیل‌های خاکستری و مارن‌های ماسه‌ای تشکیل شده و با عنوان کوه هفت‌کتل در شمال منطقه رخنمون یافته است. توده‌های نفوذی الیگومیوسن از روند اصلی پهنه ارومیه - دختر، شمال غرب - جنوب شرق پیروی می‌کنند و دارای ترکیب بازیک تا اسید و شامل گابرو، گابرو دیوریت، دیوریت، کواتز مونزونیت و تونالیت هستند (Abbasi, 2012). واحدهای آتشفشانی با سن نسبی میوسن زیرین تا بالایی و از سنگهای آذرآواری، گدازه‌های آندزیتی، بازالتی و داسیتی همراه با میان لایه‌های آهکی تشکیل شده است (Emami, 1993). نهشته‌های کواترن به صورت تراورتن و آبرفتهای رودخانه‌ای عهد حاضر در منطقه دیده می‌شوند (شکل 1).

سنگ‌نگاری

بررسیهای میکروسکوپی نشان می‌دهد که سنگهای آتشفشانی منطقه دارای بافتهای جریان، پورفیری، پورفیری با خمیره میکرولیتی، پورفیروئید و آمیگدالوئیدال یا حفره‌ای هستند. همچنین بر اساس بررسیهای میکروسکوپی کانی‌شناسی این سنگها شامل پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، آمفیبول، بیوتیت، سانیدین و کوارتز است. از کانیهای اصلی سنگهای آندزیت و پیروکسن دیوریت پورفیری می‌توان به پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول اشاره کرد. علاوه بر کانی پلاژیوکلاز می‌توان به کانیهای آمفیبول، بیوتیت، سانیدین و کوارتز به‌عنوان کانیهای تشکیل‌دهنده داسیت‌ها اشاره کرد. پلاژیوکلاز، سانیدین (میکرولیت و فنوکریست)، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز از کانیهای تشکیل‌دهنده ریولیت‌ها هستند. کلینوپیروکسن‌ها اغلب به‌صورت فنوکریست و شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در نمونه‌ها دیده می‌شود. همچنین کلینوپیروکسن‌ها گاهی از حاشیه‌ها اورالیتی و بافتهای کرونا یا تاجی شکل را به‌وجود

بر روی واحدهای آتشفشانی ائوسن منطقه انجام داده است. او ترکیب این سنگها را آندزیت بازالتی، آندزیت، داسیت و ریولیت و منشأ این سنگها را یک اسپنل لرزولیت بیان کرده است. در این پژوهش سعی بر آن است که با بررسی دقیق شیمی‌کانی کلینوپیروکسن، علاوه بر ترکیب دقیق این کانی، به نوع ماگمای تشکیل‌دهنده سنگها، موقعیت زمین‌ساختی و شرایط فیزیکیوشیمیایی تبلور سنگهای آتشفشانی ائوسن منطقه نابر پی ببریم.

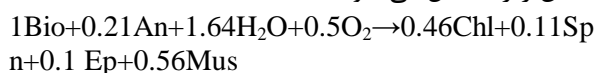
روش مطالعه

در این بررسی برای بررسی این رخنمونها از دیدگاه سنگ‌شناسی، نخست از آنها 84 نمونه برداشت شد و سپس به‌منظور بررسی کانی‌شناسی از 52 نمونه مقاطع نازک تهیه و با میکروسکپ مدل OLYMPUS-BH₂ بررسیهای پتروگرافی انجام شد. برای بررسیهای دقیق ترکیب شیمیایی کانیها و دما- فشارسنجی، تعداد 8 نمونه از مقاطع نازک مربوطه صیقل داده شدند و با استفاده از ریزکاونده الکترونی، مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفتند. تجزیه ریزکاو الکترونی کانیهای دانشگاه کاناواوی ژاپن و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. دستگاه آنالیز ریزکاونده الکترونی مورد استفاده به‌ترتیب از نوع JEOL مدل JXA-8800 با ولتاژ شتاب دهنده 20V و شدت جریان 12nA و Cameca-Sx100 و با شرایط ولتاژ شتاب‌دهنده 15Kv و شدت جریان 15nA است. سپس با استفاده از نمودارهای مربوط به تقسیم‌بندی کلینوپیروکسن‌ها، دما- فشارسنجی و شرایط تشکیل آنها مشخص شد. لازم به ذکر است که جهت پردازش داده‌ها از نرم‌افزارهای Excel و Minpet استفاده شد. همچنین در محاسبه فرمول ساختاری کانی کلینوپیروکسن، بر اساس 6 اکسیژن و رسم نمودارهای مرتبط از صفحات گسترده Mineral Spreadsheet استفاده شد.

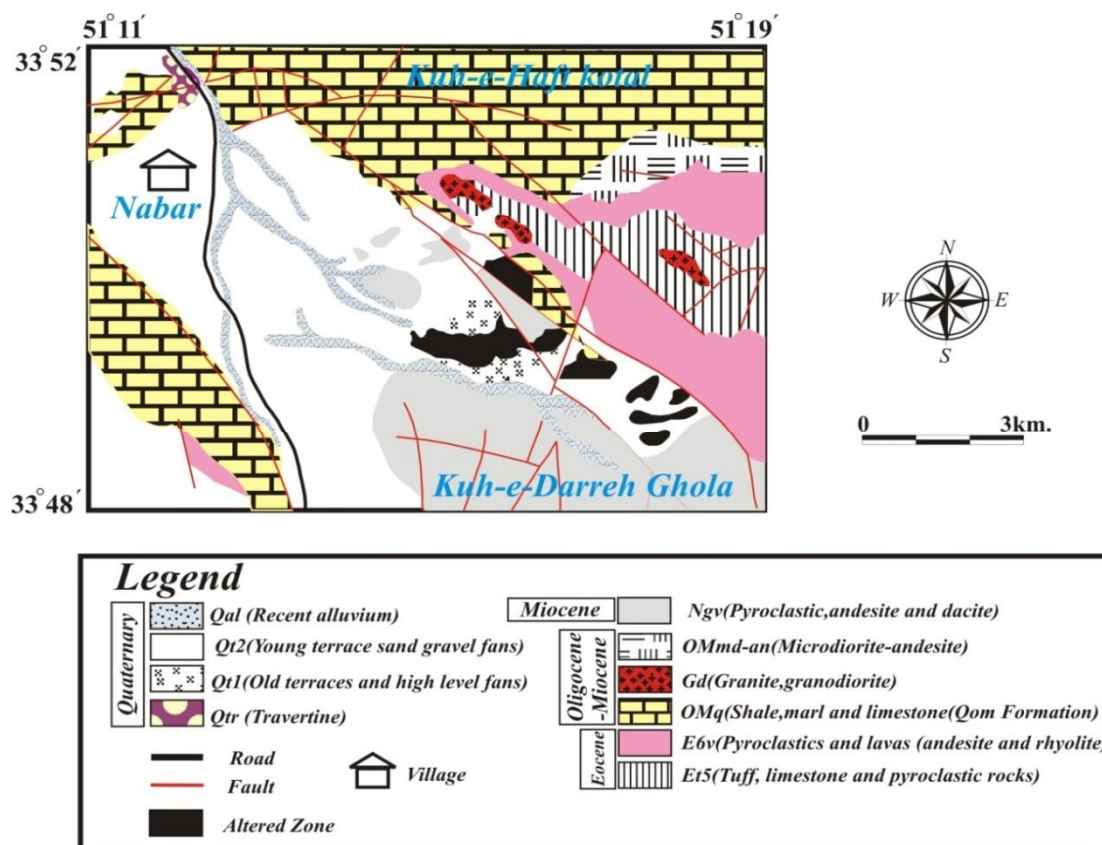
زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی، بخشی از ارتفاعات جنوب کاشان را تشکیل می‌دهد و بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری - رسوبی ایران (Aghanabati, 1994) به بخش غربی پهنه ایران مرکزی یا نوار آتشفشانی ارومیه - دختر متعلق است. این نوار زمین‌ساختی، کمان ماگمایی آندی است که در اثر

فقط قالبی از آنها باقی مانده و بعضاً این کانی توسط کانیهای اپیدوت، کلریت و اسفن جایگزین شده است (شکل 2-C). اسفن در شرایط دگرسانی به صورت بی شکل از پلاژیوکلازها و بیوتیت به دست می آید. تشکیل اسفن در محیطهای دگرسانی بیانگر بالا بودن اکتیویته یونهای H^+ و سولفات محیط جهت دگرسانی سنگ اولیه بوده است (Miekayle et al., 2010). اسفن و اپیدوت در دمای 340 درجه سانتی گراد بر طبق واکنش زیر تشکیل می شوند (Deer et al., 1992).



آورده اند (شکل 2-A). این کانیها به همراه آمفیبول و بیوتیت به کلریت و اپیدوت تجزیه شده و فقط قالبی از آنها باقی مانده است. کانیهای کلینوپیروکسن گاهی به صورت ادخال در فنوکریستهای پلاژیوکلاز دیده می شوند و بیانگر تقدم تبلور آنها نسبت به پلاژیوکلاز است. پلاژیوکلازها در سنگهای منطقه به صورت میکروولیت و فنوکریست، به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار با ماکل پلی سنتتیک و گاهی با ماکل منطقه ای دیده می شود. این کانی به علت تأثیر محلولهای گرمایی به کانیهای رسی، اپیدوت، کلریت و کلسیت تبدیل شده است (شکل 2-B). بیوتیتها نیز گاهی کاملاً توسط کلریت جایگزین شده و



شکل 1. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه نابار، برگرفته از نقشه 1:100000 کاشان (Emami, 1993)

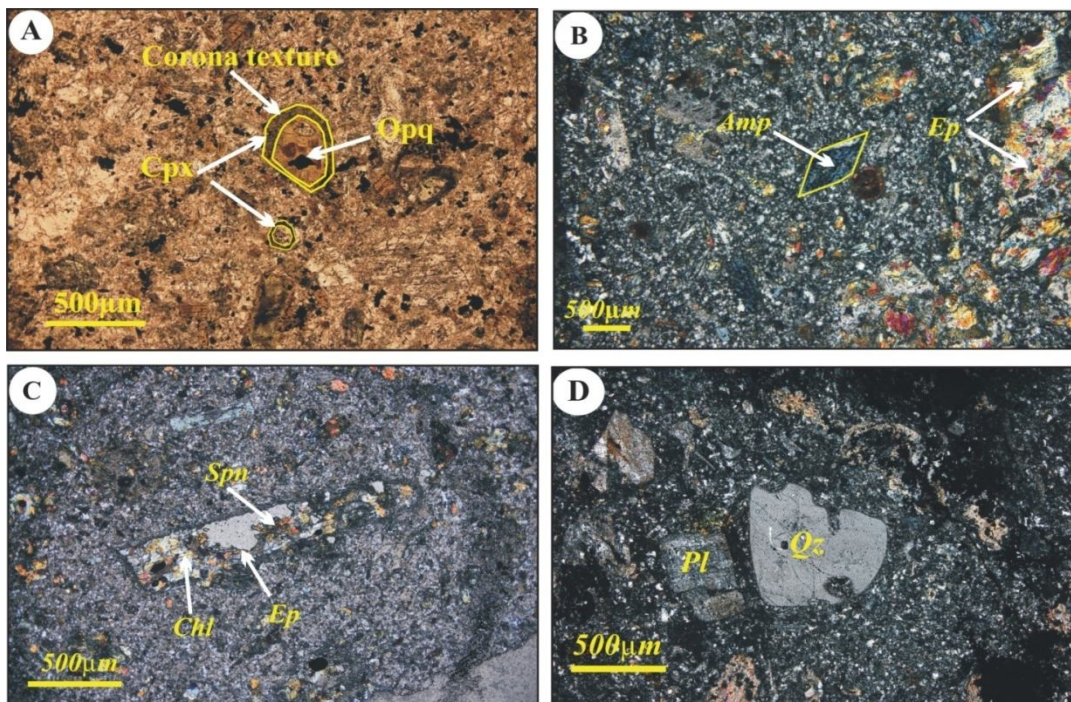
Fig. 1. Simplified Geological map of the Nabar area which is taken from 1:100000 map of Kashan (Emami, 1993)

اکتینولیت هستند. سانیدین با ماکل کارلسباد که بافت جریانیه به سنگ می دهد و تا حدی به سریسیت و کانیهای رسی تبدیل شده است. کوارتز به صورت فنوکریستهایی با حاشیه خلیج خوردگی و گرد شده در داسیتها و ریولیتها مشاهده می شود (شکل 2-D). حالت خلیجی می تواند به دلیل رشد غیر تعادلی و یا تأثیرات انحلالی ناشی از کاهش فشار در حین

کلسیم و تیتانیم لازم برای تشکیل اسفن از دگرسانی پلاژیوکلازها و بیوتیت تأمین می شود. آمفیبولها به صورت شکل دار تا نیمه شکل دار، اولیه و ثانویه در نمونه ها دیده می شوند. آمفیبولهای اولیه معمولاً شکل دار و اغلب به طور کامل توسط کلریت جایگزین شده اند (شکل 2-B). آمفیبولهای ثانویه حاصل دگرسانی کلینوپیروکسنها و از نوع

(اوپک) به دو صورت اولیه و ثانویه در سنگهای منطقه دیده می‌شوند. اوپک‌های اولیه از نوع مگنتیت عمدتاً به صورت شکل‌دار، پراکنده در متن سنگ و گاهی به صورت ادخال در داخل کلینوپیروکسن‌ها و اوپک‌های ثانویه به صورت بی‌شکل و از تجزیه کانیه‌های آهن-منیزیم‌دار (پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت) حاصل شده‌اند. ترکیب گدازه‌ها و واحدهای نیمه عمیق در نابار، آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت، ریولیت و پیروکسن دیوریت پورفیری است.

صعود ماگما به سطح زمین به وجود آید (Shelly, 1993). از کانیه‌های فرعی موجود در این سنگها می‌توان به زیرکن و آپاتیت سوزنی اشاره کرد. زمینه شیشه‌ای سنگها، همچنین آثار تجزیه شدگی به کانیه‌های رسی و کلریت را نشان می‌دهد. کلریت به دو صورت پرکننده حفرات و جایگزین کانیه‌ها در نمونه‌ها مشهود است. همچنین کلریت همراه با تورمالین، اسفن، اپیدوت، کلسیت و اکتینولیت حفرات موجود در سنگ را پر و بافت آمیگدالوئیدال را تشکیل می‌دهند. کانیه‌های کدر



شکل 2. تصاویر میکروسکوپی از سنگهای آتشفشانی نابار A: کلینوپیروکسن با بافت تاجی در پیروکسن دیوریت پورفیری همراه با ادخال کانی کدر، B: دگرسانی آمفیبول به کلریت و پلاژیوکلاز به اپیدوت در آندزیت، C: تشکیل اپیدوت، کلریت و اسفن از دگرسانی بیوتیت در داسیت و D: فنوکریست کوارتز با خوردگی خلیجی در داسیت. (Cpx = کلینوپیروکسن، Amp = آمفیبول، Pl = پلاژیوکلاز، Chl = کلریت، Ep = اپیدوت، Spn = اسفن، Qz = کوارتز، Opq = اوپک) (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 2. Photomicrographs of Nabar volcanic rocks. A: Phenocryst of clinopyroxene with corona texture in porphyric pyroxene diorite together with inclusion of opaque mineral, B: Alteration of amphibole to chlorite and plagioclase to epidote in andesite, C: Alteration of biotite phenocryst to epidote, chlorite and sphene in dacite, and D: Coarse grained embayed quartz in dacite. (Cpx = Clinopyroxene, Amp = Amphibole, Pl = Plagioclase, Chl = chlorite, Ep = Epidote, Spn = Sphene, Qz = Quartz, Opq = Opaque) (mineral name abbreviations of Whitney and Evans, 2010)

در موقعیت M_1 ، در موقعیت M_2 کاتیون‌های Na^+ ، Ca^{+2} ، Li^+ و Mn^{+2} ، Fe^{+2} ، Mg^{+2} و Al^{+3} و Si^{+4} و کاتیون‌های مهم و موقعیت T قرار می‌گیرند. پیروکسن از جمله کانیه‌های مهم و شاخص است که ترکیب شیمیایی آن اطلاعات ارزشمندی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد که به مواردی نظیر

شیمی بلور

نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی پیروکسن‌ها در نمونه‌های آندزیتی و پیروکسن دیوریت پورفیری در (جدول 1) آمده 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}

دسته ماگمایی پراآلکان، آلکان و ساب آلکان را از یکدیگر جدا کرد و بر اساس نمودار Al_2O_3 در مقابل TiO_2 موجود در این کانی سه دسته ماگمایی آلکان، تولییتی و کالک آلکان از یکدیگر قابل تفکیک هستند. لذا با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه‌های پیروکسن در نمودارهای ذکر شده، می‌توان بیان کرد که ترکیب ماگمای سازنده سنگهای منطقه مورد بررسی در قلمرو دسته‌های ساب آلکان - کالک آلکان قرار می‌گیرد (شکل 4-A و B).

تعیین موقعیت زمین‌ساختی

یکی دیگر از کاربردهای کانی کلینوپایروکسن، استفاده از آن در تعیین موقعیت زمین‌ساختی سنگهای میزبان آن است. پژوهشگران از ترکیب کانی کلینوپایروکسن به روشهای مختلف برای این امر استفاده کردند. توسط سان و برتراند (Sun and Bertrand, 1991) نموداری ارائه شد که بر اساس مقادیر Ca و Ti در کلینوپایروکسن است. در این نمودار، نمونه‌های با مقدار بالای Ti در محدوده غیرکوهزایی و در صورتی که نمونه‌ها دارای مقدار بالای Ca باشند در محدوده محیطهای کوهزایی قرار می‌گیرند. لکن با توجه به مقدار پایین Ti نمونه‌ها و در مقابل میزان بالای Ca آنها، محیط زمین‌ساختی سنگهای مورد بررسی از نوع محیطهای کوهزایی است (شکل 5).

تعیین مؤلفه‌های دما - فشار

با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، می‌توان مقدار دما و فشار تشکیل سنگهای در بردارنده آنها را تخمین زد. با توسعه و گسترش استفاده از داده‌های تجزیه‌های نقطه‌ای، این امکان فراهم شده است که با تغییرات فراوانی و مقدار کاتیون‌ها به دما و فشار تبلور کانیها پی برد.

دما سنجی

پژوهشگرانی مثل لیندسلی (lindsley, 1983)، سوئسو (Soesoo, 1997)، نیمیس و تیلور (Nimis and Taylor 2000) و پاتریکا (Putrika, 2008) برای دماسنجی کانی پیروکسن روشهایی را ارائه داده‌اند. روشهای دماسنجی پیروکسن‌ها بعضی بر اساس تک کانی کلینوپایروکسن و بعضی هم بر اساس هم‌زیستی با کلینوپایروکسن و ارتوپایروکسن است.

خاستگاه ماگما، سری ماگمایی و موقعیت زمین‌ساخت آن، فشار، دما و فشاربخشی اکسیژن می‌توان اشاره کرد (Le Bas, 1962; Nisbet and Pearce, 1977; Schweitzer et al., 1979; lindsley, 1983; Beccaluva et al., 1989; Sun and Bertrand, 1991; Soesoo, 1997; Nimis and Taylor 2000; Putrika, 2008). به‌منظور دست‌یابی به شرایط فشار و دمای تشکیل سنگهای آندزیت و پیروکسن دیوریت پورفیری، در ابتدا به طبقه‌بندی پیروکسن‌ها پرداخته و سپس فرمول دقیق آنها تعیین شد. پیروکسن‌ها بر طبق نمودار Q-J به چهار رده الف) پیروکسن‌های سدیک، ب) پیروکسن‌های سدیک - کلسیک، پ) پیروکسن‌های آهن - منیزیم - کلسیک و ت) پیروکسن‌های دیگر تقسیم می‌شوند (Morimoto et al., 1988). ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های منطقه مورد بررسی بر طبق این نمودار در محدوده پیروکسن‌های آهن - منیزیم - کلسیم‌دار قرار می‌گیرند (شکل 3-A). لازم به ذکر است که نمودار Q-J بر اساس دو شاخص $Q = Ca + Mg + Fe^{+2}$ و $J = 2Na$ است. بعد از آن که نمونه‌ها در نمودار بالا در قسمت Quad قرار گرفتند، لازم است که برای تعیین دقیق ترکیب کلینوپایروکسن‌ها و تعیین مقدار عضوهای انتهایی تشکیل‌دهنده آنها از نمودار مثلثی Fs-En-Wo استفاده شود که با توجه به این نمودار پیروکسن‌ها در محدوده اوژیت قرار می‌گیرند (شکل 3-B). بر اساس فرمول ساختاری کلینوپایروکسن‌ها (جدول 1) ترکیب اعضای نهایی کلینوپایروکسن‌های مورد بررسی برابر است با: Wo: 41/56 تا 43/42؛ En: 39/78 تا 48/63؛ Fs: 8/77 تا 16/36؛ و Mg# در گستره 0/73 تا 0/92.

تعیین سری ماگمایی

پژوهشگرانی مثل لوباس (Le Bas, 1962)، نیسبیت و پیرس (Nisbet and Pearce, 1977) و بکالوا و همکاران (Beccaluva et al., 1989) معتقدند که ترکیب شیمیایی کلینوپایروکسن‌ها تابع ترکیب شیمیایی ماگمای میزبان آنهاست و این امر بر اهمیت و ضرورت کاربرد کانی کلینوپایروکسن در تعبیر و تفسیرهای پترولوژیکی می‌افزاید. به عقیده لوباس (Le Bas, 1962)، عناصری نظیر SiO_2 ، Al_2O_3 و TiO_2 نقش تعیین‌کننده‌ای در سرشت و نوع ماگماها دارند زیرا مقادیر Si، Al و Ti درون شبکه ساختاری پیروکسن به درجه آلکالینیته بستگی دارد. لذا بر اساس مقادیر Al_2O_3 در برابر SiO_2 موجود در کلینوپایروکسن‌ها می‌توان سه

جدول 1. نتایج تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابر و فرمول ساختاری آنها بر اساس 6 اتم اکسیژن

Table 1. Microprobeanalyses (wt%) of clinopyroxens in Nabar rocks and their structural formula based on 6 atoms of oxygen

Sample No	Cpx-7	Cpx-8	Cpx-9	Cpx-10	Cpx-11	Cpx-12	Cpx-13	Cpx-14
SiO ₂	52.09	51.86	52.45	52.28	52.72	52.46	52.35	52.66
TiO ₂	0.27	0.37	0.33	0.31	0.20	0.24	0.35	0.31
Al ₂ O ₃	1.16	1.31	1.27	1.06	0.93	1.08	1.28	2.30
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.22
FeO	10.28	10.03	9.66	10.16	9.29	9.46	9.81	5.65
MnO	0.42	0.42	0.43	0.41	0.44	0.42	0.41	0.14
MgO	14.70	14.53	15.15	14.99	15.03	14.65	15.27	17.89
CaO	21.35	21.26	21.38	21.06	21.95	21.85	21.22	21.52
Na ₂ O	0.31	0.29	0.30	0.31	0.27	0.27	0.28	0.16
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	100.61	100.09	100.98	100.59	100.84	100.43	100.97	100.85
Si	1.95	1.94	1.94	1.95	1.96	1.96	1.94	1.92
Al ^{IV}	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.08
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Fe ⁺³	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ⁺²	0.22	0.23	0.21	0.22	0.20	0.22	0.21	0.09
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Mg	0.82	0.81	0.84	0.83	0.83	0.81	0.84	0.97
Ca	0.85	0.85	0.85	0.84	0.87	0.87	0.84	0.84
Na	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.02	4.03	4.03
Fe ⁺² /(Fe ⁺² +Fe ⁺³)	0.69	0.74	0.70	0.71	0.71	0.76	0.69	0.51
Fe ⁺³ /(Fe ⁺³ +Fe ⁺²)	0.31	0.26	0.30	0.29	0.29	0.24	0.31	0.49
Mg _≠	0.79	0.78	0.80	0.79	0.80	0.79	0.80	0.92
Wo	42.15	42.42	42.06	41.56	43.12	43.36	41.69	42.04
En	40.38	40.35	41.48	41.16	41.09	40.45	41.75	48.63
Fs	16.36	16.18	15.39	16.17	14.83	15.22	15.56	8.77

توجه به داده‌های آنالیز نقطه‌ای ضروری است و این دو شاخص به صورت زیر تعیین می‌شوند:

در این پژوهش، از روش تک کانیاپی کلینوپیروکسن استفاده شده است. در روش ارائه شده توسط سوئسو (Soesoo, 1997) برای ارزیابی دما، محاسبه دو شاخص XPT و YPT با

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

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

ادامه جدول 1. نتایج تجزیه نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابار و فرمول ساختاری آنها بر اساس 6 اتم اکسیژن

Table 1 (Continued). Microprobeanalyses (wt%) of clinopyroxens in Nabar rocks and their structural formula based on 6 atoms of oxygen

Sample	Cpx-15	Cpx-16	Cpx-17	Cpx-163	Cpx-164	Cpx-170	Cpx-176	Cpx-177
SiO ₂	52.47	52.53	52.83	52.56	52.72	52.89	52.75	52.74
TiO ₂	0.15	0.17	0.15	0.27	0.29	0.31	0.19	0.30
Al ₂ O ₃	0.91	0.77	0.83	1.03	1.07	1.22	1.44	1.28
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	9.42	9.84	9.82	9.48	9.45	9.27	9.42	9.43
MnO	0.49	0.48	0.50	0.42	0.44	0.46	0.41	0.45
MgO	14.58	14.59	14.38	14.33	14.34	14.45	14.22	14.32
CaO	21.48	21.35	21.71	21.31	21.29	21.29	21.45	20.89
Na ₂ O	0.35	0.27	0.31	0.31	0.29	0.30	0.28	0.29
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.88	100.00	100.53	99.72	99.89	100.19	100.15	99.71
Si	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
Al ^{IV}	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Al ^{VI}	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Fe ⁺³	0.07	0.06	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ⁺²	0.22	0.25	0.25	0.26	0.27	0.27	0.27	0.29
Mn	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Mg	0.81	0.82	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.80
Ca	0.86	0.86	0.87	0.86	0.85	0.85	0.86	0.84
Na	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.02	4.02	4.02	4.01	4.01	4.01	4.01	4.00
Fe ⁺² /(Fe ⁺² +Fe ⁺³)	0.76	0.80	0.81	0.89	0.92	0.93	0.93	0.98
Fe ⁺³ /(Fe ⁺³ +Fe ⁺²)	0.24	0.20	0.19	0.11	0.08	0.07	0.07	0.02
Mg#	0.78	0.77	0.76	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73
Wo	42.87	42.56	43.16	43.03	43.02	42.99	43.42	42.58
En	40.50	40.47	39.78	40.28	40.32	40.59	40.06	40.63
Fs	15.36	15.99	15.95	15.56	15.58	15.33	15.52	15.72

Al^{IV}. tetrahedral Al; Al^{VI}. octahedral Al; Mg# Mg/Mg+Fe⁺²

دماسنجی پیروکسن‌های موجود در سنگهای آتشفشانی شرق نابار بر اساس روش نیمیس و تیلور (Nimis and Taylor, 2000)، طبق رابطه 1، برای فشارهای 1، 5 و 10 کیلوبار محاسبه شده است (جدول 2). بر اساس این روش میانگین دمای تبلور پیروکسن‌ها 950 درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد.

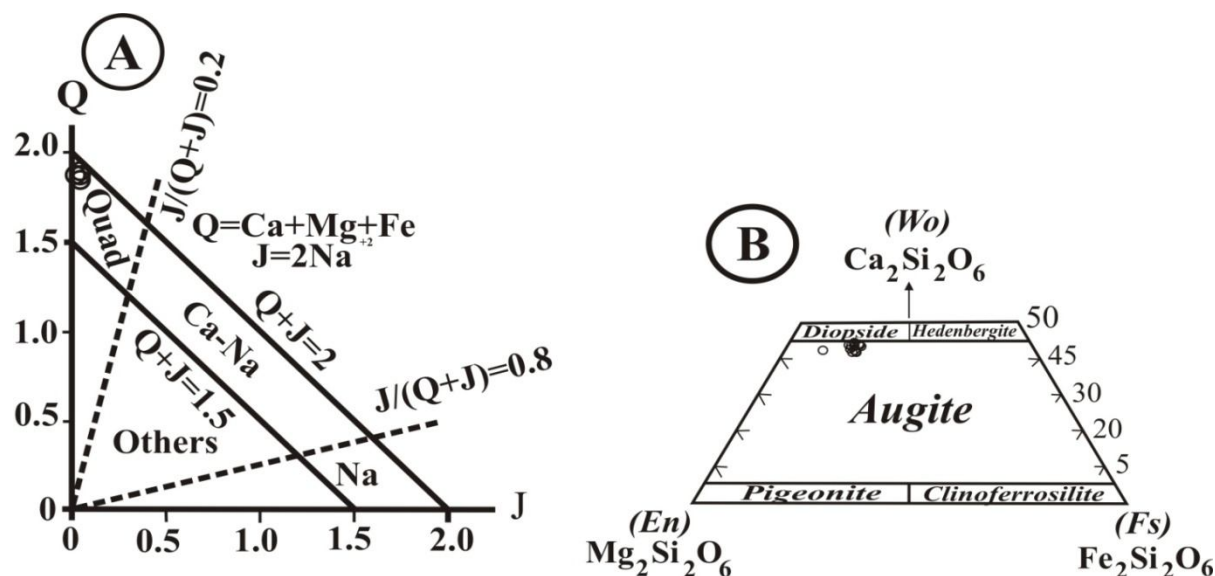
دماسنجی کانی کلینوپیروکسن به روش پاتریکا (Putrika, 2008)، طبق رابطه 2، میانگین دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها را 1100 درجه سانتی‌گراد تعیین کرد.

مقدار XPT برای نمونه‌های مورد بررسی در گستره 39/29 تا 40/35 و مقدار YPT در گستره 27/11 تا 30/99 است (شکل 6). این روش به دلیل مزایایی که دارد، در اولویت استفاده قرار می‌گیرد و از جمله مزیت‌های آن عبارتند از:

- 1) نبود لزوم حضور دو پیروکسن برای دماسنجی؛
- 2) قابلیت استفاده برای انواع پیروکسن‌های Mg-Ca-Fe دار و Fe-Mg دار. بر اساس این روش، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های مورد پژوهش، حدود 1150 تا 1200 درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود. نتایج حاصل از

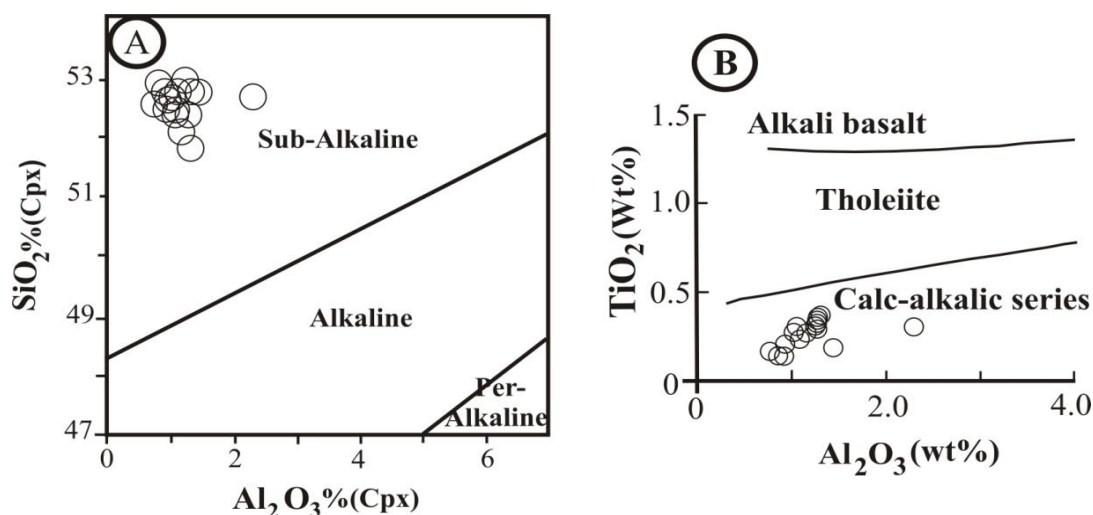
$$T (K) = \frac{23166 + 39.28 \times P (Kbar)}{13.25 + 15.35 \times Ti + 4.5 \times Fe - 1.55 \times (Al + Cr - Na - K) + (\ln a_{en}^{Cpx})^2} \quad \text{رابطه 1:}$$

$$T (K) = \frac{93100 + 544 \times P (Kbar)}{61.1 + 36.6 (X_{Ti}^{Cpx}) + 10.9 (X_{Fe}^{Cpx}) - 0.95 (X_{Al}^{Cpx} + X_{Cr}^{Cpx} - X_{Na}^{Cpx} - X_K^{Cpx}) + 0.395 [\ln (a_{en}^{Cpx})]^2} \quad \text{رابطه 2:}$$



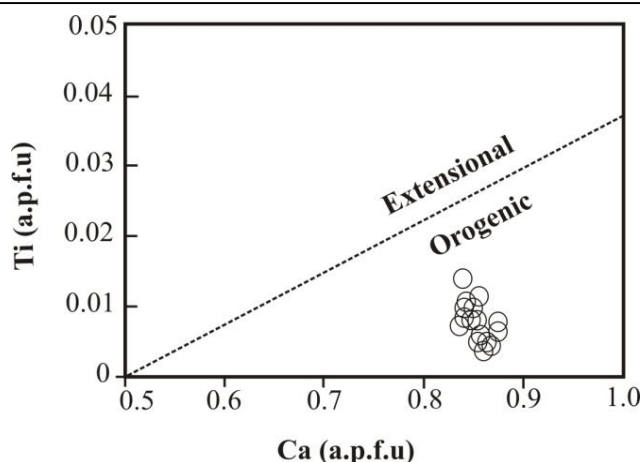
شکل 3. A و B: موقعیت کلینوپیروکسن‌های سنگهای آتشفشانی نابار در نمودارهای طبقه‌بندی (Q-J) و مثلثی (Wo-En-Fs) پیروکسن‌ها (Morimoto et al., 1988)

Fig 3. A and B: Position of clinopyroxenes in Nabar volcanic rocks on the Q-J and Wo-En-Fs classification and triangular diagrams (Morimoto et al., 1988)



شکل 4. A و B: موقعیت کلینوپیروکسن‌ها بر روی نمودارهای Al_2O_3 در مقابل SiO_2 و Al_2O_3 در مقابل TiO_2 برای تعیین دسته ماگمایی سنگهای آتشفشانی نابار (Le Bas, 1962)

Fig 4. A and B: Position of clinopyroxenes on the Al_2O_3 versus SiO_2 and Al_2O_3 versus TiO_2 diagrams for discrimination magmatic series of Nabar volcanic rocks (Le Bas, 1962)



شکل 5. نمودار تعیین موقعیت زمین‌ساختی کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابار (Sun and Bertrand, 1991)

Fig. 5. Tectonic setting discrimination diagram for clinopyroxenes from Nabar rocks (Sun and Bertrand, 1991)

جدول 2. دماهای محاسبه شده در فشارهای 1، 5 و 10 کیلو بار برای کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگهای آتشفشانی نابار

Table 2. Calculated temperatures in pressures 1, 5 and 10 kbar of clinopyroxenes in Nabar area volcanic rocks

Sample	P=1kb	P=5kb	P=10kb
Cpx-7	930.46	938.61	948.80
Cpx-8	933.40	941.57	951.78
Cpx-9	945.50	953.75	964.06
Cpx-10	958.89	967.23	977.66
Cpx-11	909.95	917.96	927.97
Cpx-12	900.77	908.72	918.65
Cpx-13	961.03	969.38	979.83
Cpx-14	1029.13	1037.95	1048.97
Cpx-15	914.89	922.93	932.99
Cpx-16	935.17	943.35	953.57
Cpx-17	908.10	916.09	926.09
Cpx-163	934.55	942.72	952.94
Cpx-164	945.77	954.03	964.34
Cpx-170	948.51	956.78	967.12
Cpx-176	941.84	950.07	960.35
Cpx-177	972.36	980.79	991.33

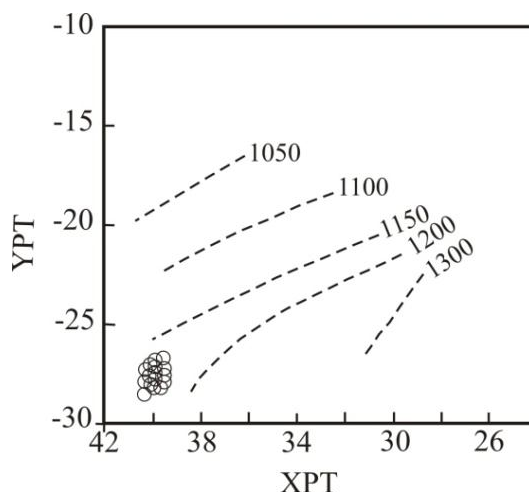
(Taylor 2000 و پاتریکا (Putrika, 2008) نام برد. در روش سوئسو (Soesoo, 1997) که لازمه تخمین فشار با استفاده از تعیین دو شاخص XPY و YPT است، فشار محاسبه شده برای نمونه‌های مورد پژوهش 2 تا 5 کیلو بار است که معادل عمق تقریبی 6 تا 15 کیلومتر در نظر گرفته می شود (شکل

تعیین مقدار آب ماگما و فشار با استفاده از ترکیب کلینوپیروکسن

ارزیابی فشار حاکم بر تشکیل سنگهای دارای کلینوپیروکسن از روشهای متعددی امکان پذیر است که می توان از روشهای سوئسو (Soesoo, 1997)، نیمیس و تیلور (Nimis and

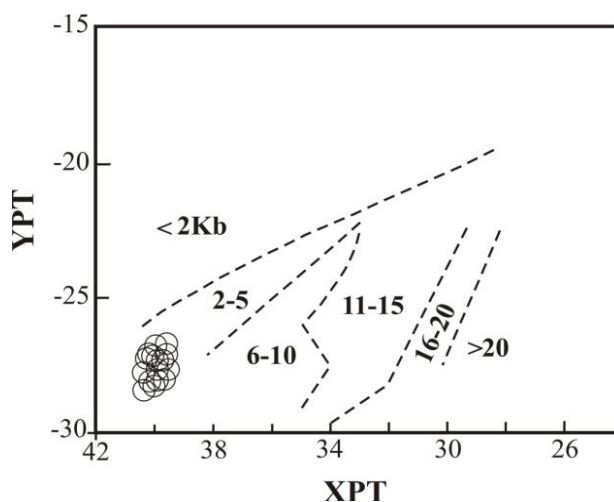
میزان آب بیشتر از 10 درصد قرار می‌گیرند (شکل 8). همچنین بر اساس نمودار ارائه شده توسط آئوکی و شیبا (Aoki and Shiba, 1973)، پیروکسن‌های مورد بررسی در فشارهای کم تا متوسط تشکیل شده‌اند و این بیانگر آن است که تبلور پیروکسن‌ها در هنگام صعود و از اعماق به طرف بالا صورت گرفته است (شکل 9).

7). چگونگی توزیع Al در موقعیتهای اکتاهداری و تتراهدری روشی مناسب برای تخمین میزان آب ماگما و فشار است (Helz, 1973). به عقیده او، هر چه میزان Al^{IV} افزایش یابد مقدار آب در محیط تبلور پیروکسن‌ها کاهش می‌یابد. لکن بر اساس نمودار Al^{VI} در مقابل Al^{IV} ، پیروکسن‌های موجود در سنگهای آتشفشانی نابر در محدوده فشار حدود 5 کیلوبار و



شکل 6. تعیین دمای تبلور کلینوپیروکسن‌های سنگهای آتشفشانی نابر، با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997)

Fig. 6. Appointment temperature crystallization of clinopyroxenes in Nabar volcanic rocks by Soesoo's method (Soesoo,1997)



شکل 7. تعیین فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های سنگهای آتشفشانی نابر با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997)

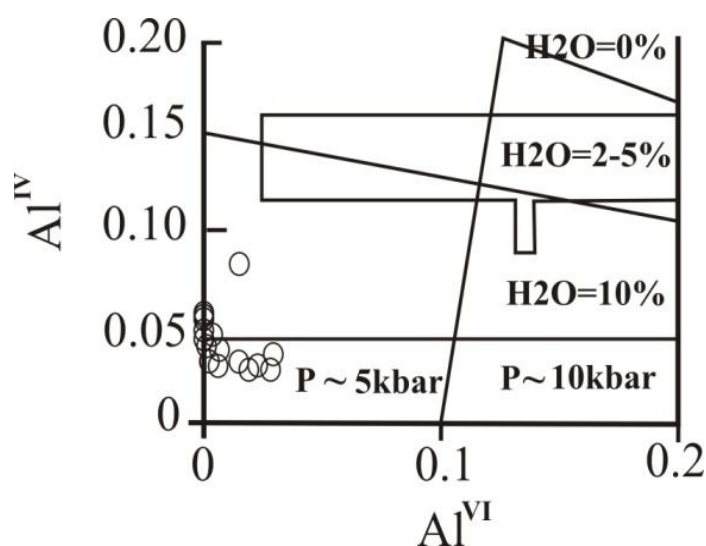
Fig 7. Appointment pressure crystallization of clinopyroxenes in Nabar volcanic rocks by Soesoo's method (Soesoo,1997)

تبلور یافته است؛ چرا که فوگاسیته اکسیژن در تغییر دمای لیکیدوس و ترکیب مذاب و بلور تأثیر بسیاری دارد (France et al., 2010). روشهای گوناگونی برای تخمین فوگاسیته

تعیین فوگاسیته اکسیژن پژوهشگران بسیاری معتقدند که فوگاسیته اکسیژن عاملی مؤثر در کنترل فرایندهای ماگمایی، توالی تبلور و نوع کانیهای

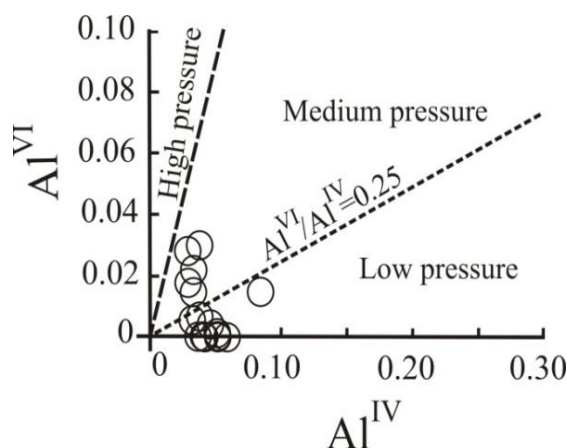
(1979)، استفاده شد. این نمودار بر اساس موازنه Al تتراهدردی و Cr و Al اکتاهدردی تنظیم شده است. آهن در ترکیب پیروکسن‌ها می‌تواند جایگزین عناصری نظیر Al, Cr, Ti در موقعیت اکتاهدردی شود؛ لذا فراوانی آهن در پیروکسن‌ها به میزان Al بستگی دارد و تابع موازنه Al در دو موقعیت تتراهدردی و اکتاهدردی است. بنابراین هر اندازه که Al تتراهدردی افزایش یابد، امکان ورود عناصر سه ظرفیتی دیگر به جز Al مانند Fe به موقعیت اکتاهدردی بیشتر می‌شود؛ لکن پیروکسن‌هایی که در نمودار مربوطه بالای خط $Fe^{+3}=0$ قرار گرفته‌اند در شرایط فشاربخشی بالای اکسیژن متبلور شده‌اند و هر اندازه فاصله قرارگیری نمونه‌ها از این خط بیشتر باشد، بیانگر تبلور نمونه‌ها در فوگاسیته بالاتری از اکسیژن است (Cameron and Papike, 1981). موقعیت قرارگیری پیروکسن‌های مورد بررسی بر این نمودار، بر بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در هنگام تبلور آنها دلالت دارد (شکل 10). با توجه به این که در طی تکامل ماگمایی، مقدار آب ماگما و فوگاسیته اکسیژن افزایش می‌یابد؛ نمونه‌های تبلور یافته در فوگاسیته اکسیژن بالاتر از ماگمای تکامل یافته‌تری نسبت به انواع دیگر تشکیل شده‌اند.

اکسیژن ماگما توسط محققان ارائه شده است که عبارتند از: الف) نسبت Fe^{+3}/Fe^{+2} سنگ کل (Carmichael and Ghiorso, 1986; Blevin, 2004). ب) تعادل کانیها که معمولترین آنها جفت کانی مگنتیت-ایلمنیت، تعادل در پیروکسن‌ها (Andersen et al., 1993; Lepage, 2003) و علاوه بر آن از ترکیب آمفیبول به عنوان یک اکسی بارومتر بر اساس ارتباط تجربی بین فوگاسیته اکسیژن و شاخص منیزیم است (Ridolfi et al., 2010). پ) عناصر نادر خاکی در سنگها و کانیها (Burnham and Berry, 2014) و ت) ترکیب شیمیایی نسبی سنگ کل که در این روش از عناصر کمیاب غیر وابسته به توانایی اکسیداسیون - احیا مثل Sc و Yb استفاده می‌شود (Laubier et al., 2014). به اعتقاد پژوهشگران، مقدار Fe^{+3} محیط تشکیل سنگها به فشار بخشی اکسیژن وابسته است و میزان آن توسط نمودار تغییرات $Al^{IV}+Na$ در مقابل $Al^{VI}+2Ti+Cr$ تعیین می‌شود (Ottonello et al., 2001; Moretti, 2005; Botcharnikov et al., 2005). بنابراین برای تعیین مقدار فوگاسیته اکسیژن ماگمای سازنده سنگهای حاوی کلینوپیروکسن، از نمودار $Al^{VI}+2Ti+Cr$ در مقابل $Na+Al^{IV}$ ارائه شده توسط شوایتزر و همکاران (Schweitzer et al.,



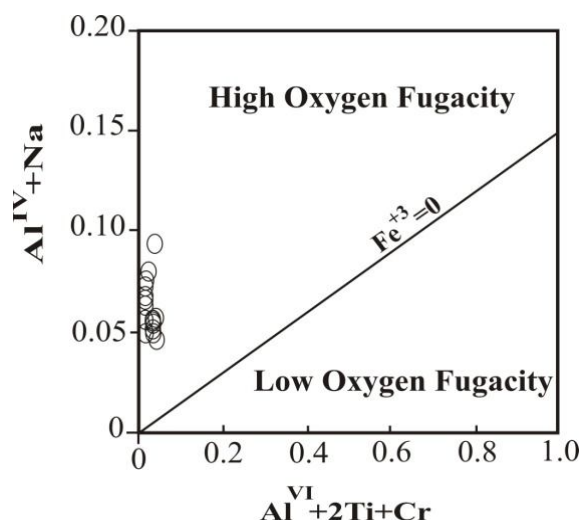
شکل 8. توزیع Al در موقعیت تتراهدردی و اکتاهدردی در ترکیب کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابار، به تناسب مقدار درصد بخار آب ماگما (Helz, 1973)

Fig. 8. Distribution of Al in tetrahedral and octahedral positions in clinopyroxenes of Nabar rocks corresponding to water vapor percent of magma (Helz, 1973)



شکل 9. موقعیت کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابار بر روی نمودار Al^{IV} - Al^{VI} (Aoki and Shiba, 1993)

Fig. 9. Position of clinopyroxenes in Nabar rocks on Al^{IV} content versus Al^{VI} diagram (Aoki and Shiba, 1993)



شکل 10. تخمین فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل کلینوپیروکسن‌های سنگهای نابار، با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن (Schweitzer et al., 1979)

Fig. 10. Estimation of Oxygen fugacity in environment of formation of clinopyroxenes in Nabar rocks by chemical composition of pyroxene (Schweitzer et al., 1979)

تشکیل‌دهنده ریولیت‌ها، پلاژیوکلاز، سانیدین (میکرولیت و فنوکریست)، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز است. کلینوپیروکسن موجود در سنگهای آندزیت و پیروکسن دیوریت پورفیری، از نوع اوژیت است و در گستره کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار قرار می‌گیرد. از نظر موقعیت تکتونوماگمایی، شیمی‌کانی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که سنگهای آتشفشانی نابار دارای ماهیت ساب‌آلکان (کالک‌آلکان) است و در محیط زمین‌ساختی از نوع کوه‌زایی تشکیل شده‌اند. بررسی‌های دماسنجی نشان‌دهنده تشکیل پیروکسن‌ها در گستره دمایی 950 تا 1200 درجه سانتی‌گراد است. طیف

نتیجه‌گیری

سنگهای آتشفشانی نابار طیفی از انواع آذرین حدواسط تا اسیدی را شامل می‌شود که عبارتند از: آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت و ریولیت. همچنین سنگهای آذرآواری و واحدهای نیمه عمیق با ترکیب پیروکسن دیوریت پورفیری نیز این مجموعه را همراهی می‌کنند. از کانیهای اصلی سنگهای آندزیت و پیروکسن دیوریت پورفیری می‌توان به پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول اشاره کرد. علاوه بر کانی پلاژیوکلاز، می‌توان به کانیهای آمفیبول، بیوتیت، سانیدین و کوارتز به‌عنوان کانیهای تشکیل‌دهنده داسیت‌ها اشاره کرد. کانیهای

کلینوپیروکسن بیانگر بالا بودن فوگاسیته اکسیژن محیط تشکیل سنگهای آتشفشانی نابار است. نمونه‌های کلینوپیروکسن تبلور یافته در فوگاسیته اکسیژن بالاتر، از ماگمای تکامل یافته‌تری نسبت به انواع دیگر تشکیل شده‌اند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه اصفهان تشکر و قدردانی می‌نمایند.

دمایی مشاهده شده، بیانگر تغییرات دما در هنگام تشکیل پیروکسن‌هاست. با توجه به نمودار فشارسنجی، فشار به‌دست آمده برای تبلور این کانیه‌ها بین 2 تا 5 کیلو بار تعیین شده است که بیانگر تبلور آنها در طی صعود ماگما و در اعماق مختلف است. تبلور کلینوپیروکسن‌ها در گستره‌ای نسبتاً وسیع از محدوده با فوگاسیته بالای اکسیژن صورت گرفته و بیانگر آن است که طی تکامل ماگمایی و افزایش میزان آب ماگما، فشاربخشی اکسیژن افزایش می‌یابد. همچنین در بررسیهای پتروگرافی، حضور کانی اوپک (مگنتیت) به‌صورت ادخال در

References

- Abbasi, S., 2012. Petrography and petrology of intermediate rocks in the East Nabar area (SW of Kashan). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 177 pp.
- Aghanabati, S.A., 1994. Geology of Iran. Geology Survey of Iran, Tehran, 586 pp.
- Andersen, D.J., Lindsley, D.H. and Davidson, P.M., 1993. QUILF: A Pascal program to assess equilibria among Fe- Mg- Mn- Ti oxides, pyroxenes, olivine and quartz. *Computers and Geosciences*, 19(9): 1333-1350.
- 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.
- Blevin, P.L., 2004. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid matallgeny of Eastern Australia: Implications for gold- rich ore system. *Resource Geology*, 54(3): 241-252.
- Botcharnikov, R.E., Koepke, J., Holtz, F., McCammon, C. and 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.
- 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.
- Carmichael, I.S.E. and Ghiorso, M.S., 1986. Oxidation- reduction relations in basic magma: a case for homogeneous equilibria. *Earth and Planetary Science Letters*, 78 (2-3): 200-210.
- Deer, W., Howie A. and Zussman J., 1992. An introduction to the rock forming minerals. Longman, London, 760 pp.
- Ebrahimi, L., 2013. Petrology and petrography of volcanic rocks in the East of Nabar (SW of Kashan). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 138 pp.
- Emami, M.H., 1993. Geological Map of Kashan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- 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 $p_{H_2O}=5\text{kb}$ as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Journal of Petrology*, 14(2): 249-302.
- Javadi, F., 2012. Petrology and Geochemistry of east Nabar Skarn at the southwest of Kashan (Urumieh- Dokhtar Zone). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 125 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.
- Lepage, L.D., 2003. ILMAT: An excel worksheet for ilmenite- magnetite geothermometry and

- geobarometry. *Computers and Geosciences*, 29(5): 673-678.
- Lindsley, I., 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 68 (5-6): 477-493.
- Miekayle, R., Noghreyan, M., Mackizadeh, M.A., Taghipour, B. and Tahmasebi, Z., 2010. Minerals chemistry and geochemistry of propylitic alteration in Astanehgranitoid (southwest of Arak). *Iranian journal of crystallography and mineralogy*, 18(1): 93-104.
- Moretti, R., 2005. Polymerization, basicity, oxidation state and their role in ionic modeling of silicate melts. *Geophysics*, 48(4-5): 583-608.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxene. *Mineralogical Magazine*, 52(367): 535-555.
- 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.
- Ottonello, G., Moretti, R., Marini, L. and Zuccolini, M.V., 2001. Oxidation state of iron in silicate glasses and melts: A thermochemical model. *Chemical Geology*, 174(1-3): 157-179.
- Putrika, 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.
- Schweitzer, E.L., Papike, J.J. and Bence, A.E., 1979. Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Journal of Sciences*, 64(5-6): 501-513.
- Shelly, D., 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, London, 630 pp.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *Geological Society of Sweden*, 119(1): 55-60.
- 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. *Schweiz Mineralogische Petrologische Mitteilungen*, 71(2): 243-259.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.



Mineral chemistry of clinopyroxene: guidance on geo-thermobarometry and tectonomagmatic setting of Nabar volcanic rocks, South of Kashan

Rezvan Mehvari¹, Moussa Noghreyan^{1*}, Mortaza Sharifi¹, Mohammad Ali Mackizadeh¹, Seyed Hassan Tabatabaei² and Ghodrat Torabi¹

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

2) Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Submitted: May 17, 2015

Accepted: Oct. 26, 2015

Keywords: *Clinopyroxene, Thermobarometry, Tectonomagmatic, Nabar, Urumieh- Dokhtar*

Introduction

The Nabar area that is a part of the Urumieh-Dokhtar volcano- plutonic belt is located in the south of Kashan. Research works such as Emami (Emami, 1993) and Abbasi (Abbasi, 2012) have been done about the geology of this area.

Rock units in the study area contain middle- upper Eocene intermediate to acidic lavas and pyroclastic rocks, green marl, shale and sandy marls of Oligo- Miocene, limestones of Qom formation, intrusive granitoids with Oligo- Miocene age and quaternary travertine and recent alluvium (Emami, 1993). The volcanic and sub volcanic rocks of this area are composed of andesite, trachyandesite, dacite, rhyolite and porphyric pyroxene diorite along with pyroclastic rocks.

Materials and methods

In order to achieve the aims of this work, at first field surveying and sampling were done. Then, thin and polished thin sections were prepared. Some of the samples were selected for microprobe analysis and clinopyroxene minerals were analyzed by using JEOL- JXA-8800 analyzer with a voltage of 20 Kv and a current of 12 nA in the Kanazava University of Japan and Cameca-Sx100 analyzer with a voltage of 15 Kv and a current of 15 nA in the Iranian mineral processing research center, Karaj.

Discussion

On the basis of petrographic investigations, porphyritic, porphyroid, fluidal, amygdaloidal and porphyry with microlitic groundmass are common

textures of these rocks. Also plagioclase, clinopyroxene, amphibole, biotite, sanidine and quartz are essential minerals, opaque, zircon and apatite as accessory minerals are observed in the studied rocks. Clinopyroxenes are observed with corona texture that resulted during the uralitization process. On the basis of minerals' chemistry, pyroxenes are Fe- Mg- Ca type in composition (Morimoto et al., 1988). These clinopyroxenes are augite. Investigations indicate that mineral composition of clinopyroxene can be effectively used to evaluation the P-T conditions during crystallization. Previous research works have proposed several methods such as Soesoo (Soesoo, 1997) and Putrika (Putrika, 2008). Thermobarometric studies of clinopyroxenes reveal that Nabar rocks were formed at temperatures of 900 -1200 °C and the pressure of 2-5 kbar. According to the Aoki and Shiba (Aoki and Shiba, 1973) and Helz (Helz, 1973) approaches, the pyroxenes of the studied rocks are in a range of low to medium pressure that shows crystallization of clinopyroxenes during ascending of magma in different depths. Also according to Helz (Helz, 1973), the water vapor content in the crystallization of clinopyroxenes is more than 10 percent. Using $Al^{IV} + Na$ versus $Al^{IV} + 2Ti + Cr$ diagram which depends on the amount of ferric iron in pyroxenes, we can get oxygen fugacity. Based on this diagram, the pyroxenes which crystallized at high oxygen fugacity, has been situated above the line of Fe^{3+} . Furthermore, Cameron and Papike (Cameron and Papike, 1981) have mentioned to the distances of the samples from the Fe^{3+} line and noted that further distances of the samples from this line are indicating more

*Corresponding authors Email: noghreyan.moussa@sci.ui.ac.ir

oxygen fugacities in their geological setting. On the basis of this diagram samples were located above the line of Fe^{3+} and these rocks are formed in high oxygen fugacities. Pyroxene composition depends on the chemical composition and tectonic setting of the host lava which can be used widely to determine tectonic setting of the rocks. On the basis of approaches of Le Bas (Le Bas, 1962) and Sun and Bertrand (Sun and Bertrand, 1991), the chemical composition of clinopyroxenes shows that the studied rocks are related to calc-alkaline series and orogenic settings.

Results

On the basis of mineral chemistry, pyroxenes are Fe-Mg-Ca type in composition. These clinopyroxenes are augite. Thermometric studies of clinopyroxenes reveal that Nabar rocks are formed at temperatures of 900-1200 °C. According to the distribution of aluminum in clinopyroxenes, these minerals were formed at 2-5 k bar pressure and water vapor content of more than 10 percent. Therefore, pyroxenes of the Nabar rocks are in a range of low to medium pressure that shows crystallization of clinopyroxenes during ascending of magma in different depths. Moreover, the volcanic rocks in Nabar were formed in high oxygen fugacity. The chemical composition of clinopyroxenes reveals that these rocks are related to calc-alkaline series and orogenic settings.

Acknowledgments

The authors wish to thank the University of Isfahan for their financial supports.

References

Abbasi, S., 2012. Petrography and petrology of intermediate rocks in the East Nabar area (SW of Kashan). M.Sc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 177 pp.

- Aoki, K. and Shiba, I., 1973. Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome- Gata, Japan. *Lithos*, 6(1): 41-51.
- Cameron, M. and Papike, J.J., 1981. Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist*, 66(1-2): 1-50.
- Emami, M.H., 1993. Geological Map of Kashan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at p $H_2O=5kb$ as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Journal of Petrology*, 14(2): 249-302.
- 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.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxene. *Mineralogical Magazine*, 52(367): 535-555.
- Putrika, 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.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *Geological Society of Sweden*, 119(1): 55-60.
- 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. *Schweiz Mineralogische Petrologische Mitteilungen*, 71(2): 243-259.