



استفاده از ترکیب شیمیایی کلینوپروکسن در تحلیل شرایط فیزیکی صعود ماگما، بررسی موردی سنگهای آتشفشانی ائوسن در منطقه قهرود (شمال اصفهان)

محمد سیاری* و مرتضی شریفی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: 1393/6/7، پذیرش: 1393/12/25

چکیده

در منطقه قهرود (شمال اصفهان)، سنگهای آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا بازالت به صورت توده‌هایی با ابعاد مختلف پراکنده‌اند. از نظر کانی‌شناسی، سنگهای آتشفشانی بازالتی مورد بررسی از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به همراه بلورهای کوچکتر کلینوپروکسن در زمینه‌ای از میکروولیت، شیشه و کانیهای کدر تشکیل شده‌اند. پلاژیوکلازها ترکیب لابرادوریت - بیتونیت ($An_{85-58}Ab_{15-41}$) دارند و کلینوپروکسن‌ها از نوع اوژیت ($En_{41-49}Di_{29-38}Fs_{17-26}$) هستند. ترکیب کلینوپروکسن‌ها نشان می‌دهد، ماگمای مادر سنگها دارای ماهیت تولئیتی است. بر اساس محاسبات نظام‌مند زمین‌دما- فشارسنجی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی SCG، کلینوپروکسن‌ها در محدوده دمایی حدود 1170-1120 درجه سانتی‌گراد و محدوده فشار حدود 2-6 کیلوبار متبلور شده‌اند. پردازشهای آماری نشان می‌دهد، همگام با صعود ماگما و تبلور هم‌زمان پیروکسن‌ها، در قبال هر درجه سانتی‌گراد کاهش دما، به میزان 84/6 بار از فشار وارد بر ماگما کاسته شده که معادل با 320 متر کاهش عمق در پوسته قاره‌ای است.

واژه‌های کلیدی: کلینوپروکسن، دما- فشارسنجی، سنگهای آتشفشانی، قهرود

مقدمه

داده‌های تولیدشده، به راحتی می‌توانند مورد تحلیل‌های آماری و ریاضی قرار گیرند و شرایط فیزیکی تبلور کلینوپروکسن‌ها و در نتیجه، شرایط فیزیکی حاکم در زمان توقف یا صعود ماگما به صورت کمی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

سنگهای آتشفشانی با بافت پورفیریتیک، دو مرحله تبلور را پشت سر گذاشته‌اند. مرحله اول، در عمق است که با تبلور بلورهای درشت مشخص می‌شود (مرحله تبلور عمقی). مرحله دیگر در خارج و یا نزدیک سطح زمین است که با تبلور ریزبلورهای زمینه، میکروولیت و شیشه مشخص می‌شود (Barker, 1983; Best, 2003). با استفاده از ترکیب درشت بلورهای متبلور شده مربوط به مرحله تبلور عمقی، می‌توان اطلاعات با ارزشی در مورد شرایط فیزیکی حاکم بر ماگما در زمان تبلور درشت بلورها به دست آورد.

منطقه قهرود در بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. سنگهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب بازالتی در منطقه قهرود متشکل از کلینوپروکسن و پلاژیوکلاز

کلینوپروکسن به عنوان یک کانی ردیاب، در ارزیابی شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما شناخته می‌شود؛ ترکیب آن نه تنها منعکس کننده شرایط شیمیایی و سری ماگمایی است (Le Bas, 1962; Leterrier et al., 1982; Berger et al., 2005; Diah et al., 2009)، بلکه نشان‌دهنده شرایط فیزیکی (دما و فشار) ماگما در زمان تبلور آن است (Nimis, 1995; Putirka et al., 1996; Nimis and Ulmer, 1998; Nimis and Taylor, 2000; Putirka et al., 2003; Putirka, 2008). از گذشته نمودارهای تحلیلی و روابط ریاضی زیادی برای دما- فشارسنجی کلینوپروکسن مطرح شده است. متأسفانه فراوانی، پیچیدگی و محدودیت استفاده از روابط، سبب سردرگمی در انتخاب روشی مناسب شده است. خوشبختانه با ارائه نرم‌افزار SCG¹ (Sayari and Sharifi, 2014)، که نرم‌افزار تخصصی‌یافته برای دما- فشارسنجی کلینوپروکسن است، مشکل انتخاب رابطه بهینه و محاسبه دقیق و سریع برطرف شده است. در مرحله بعد،

*مسئول مکاتبات: m.sayari@gmail.com

موقعیت و زمین‌شناسی عمومی محدوده مورد بررسی

کمان آتشفشانی ارومیه - دختر بخشی از یک ایالت ماگمایی وسیع است که حاصل هم‌گرایی بین ورقه‌های افریقا-عربی و اوراسیاست (Jackson and McKenzie, 1984; Dewey et al., 1986; McClusky et al., 2000; McClusky et al., 2003; Allen et al., 2004; Dilek and Sandvol, 2009; Dilek et al., 2010; Agard et al., 2011). سنگهای آتشفشانی این ایالت ماگمایی، به‌طور گسترده‌ای در قسمت شمال و شمال غربی زمین‌درز زاگرس - بیتلیس برون‌زد دارند (شکل 1). در شکل 1 پراکندگی سنگهای آتشفشانی سنوزوئیک، در این ایالت ماگمایی و زون‌های ساختاری ایران نشان داده شده است. پژوهشهای زیادی درباره نوار آتشفشانی ارومیه - دختر صورت گرفته است (Emami, 1981; Amidi et al., 1984; Hassanzadeh, 1993; Aftabi and Atapour, 2000) که بیانگر وجود سری ماگمایی غالب کالک-آلکان و در برخی مناطق شوشونیتی (Aftabi and Atapour, 2000) و آداکیتی (Jahangiri, 2007; Ghadami et al., 2008; Omrani et al., 2008; Khodami, 2009; Sayari, 2015) است.

منطقه مورد بررسی در 100 کیلومتری شمال اصفهان، 25 کیلومتری شمال شرق میمه در غرب روستای قهرود و شرق روستای کامو، بین طولهای جغرافیایی $51^{\circ} 20'$ و $51^{\circ} 24'$ شرقی و عرضهای جغرافیایی $33^{\circ} 35'$ و $33^{\circ} 38'$ شمالی واقع شده است. در شکل 2 نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده مورد بررسی، بر اساس نقشه زمین‌شناسی چهارگوش کاشان (Zahedi et al., 1981) و موقعیت رخنمونهای مورد بررسی نشان داده شده است. سنگهای آتشفشانی به سن ائوسن، به‌صورت پراکنده با رخنمونهایی به ابعاد چند متر تا ده‌ها متر در منطقه دیده می‌شوند. این سنگها عمدتاً، ترکیب بازالتی، بازالت آندزیتی و آندزیتی دارند، که سنگهای آتشفشانی بازالتی مورد مطالعه قرار گرفته اند.

قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی منطقه، دولومیت‌های سازند شتری به سن تریاس است که در شرق منطقه رخنمون دارد. واحدهای رسوبی تریاس بالایی شامل شیل، ماسه‌سنگ و سنگهای آهکی، چینه‌شناسی قابل توجهی از شرق منطقه را به خود اختصاص می‌دهند. سازند شمشک به سن ژوراسیک زیرین با لیتولوژی تشکیل شده از تناوب شیل و ماسه‌سنگ تا کنگلومرا، به‌صورت محدود در بخشهای جنوب شرقی منطقه

هستند. بررسیهای مفصل سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی روی این نمونه‌ها صورت نگرفته است.

تاکنون اغلب بررسیهای زمین - دماسنجی که در مناطق مختلف صورت گرفته است، تنها بخش کوچکی از پژوهشهای سنگ‌شناسی و بلورشمی بوده‌اند؛ که به‌علت نبود نرم‌افزار جامع و پیچیدگی روشها، صرفاً بر اساس روشهای محدود و ساده انجام شده‌اند و نتایج آن نیز به صرف ارائه طیفی از دما و فشار برای هر بلور کلینوپیروکسن ختم شده است. ارائه طیف دما و فشار ارزیابی شده از روابط زمین - دماسنجی برای یک بلور منفرد، نه تنها نادرست، بلکه سردرگم کننده است؛ زیرا روابط زمین - دماسنجی، معادلات ریاضی (با عدم قطعیت و انحراف معیاری مشخص) هستند که پس از حل، باید یک جواب منفرد از آن برداشت کرد (Sayari, 2012). این مشکل با استفاده توأم مدل‌های دماسنجی و فشارسنجی و کاربرد روشهای ترسیمی یا محاسباتی قابل حل است (Sayari, 2012; Sayari and Sharifi, 2014).

شناخت شرایط فیزیکی تبلور کلینوپیروکسن‌ها می‌تواند، در گام بعدی، به‌عنوان ابزاری در ارزیابی شرایط فیزیکی صعود ماگما، مانند نرخ افت دما در قبال صعود و کاهش فشار همه جانبه، استفاده شود؛ که این موضوع نیز کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از نرم‌افزار تخصص‌یافته SCG، دما و فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگهای آتشفشانی (بازالتی) ائوسن در منطقه قهرود محاسبه شود، سپس بر اساس داده‌های تولید شده، شرایط فیزیکی صعود ماگما، مورد تحلیل کمی قرار گیرد.

روش مطالعه

پس از بررسیهای مقدماتی و صحرایی و همچنین نمونه‌برداری از رخنمونهای مورد نظر، 30 نمونه مناسب برای تهیه مقاطع نازک و نازک - صیقلی انتخاب شد. بررسیهای پتروگرافی با استفاده از میکروسکپ پلاریزان با نور عبوری مدل BH2 انجام شد. آنالیزهای نقطه‌ای انجام شده از 5 مقطع نازک - صیقلی مناسب با استفاده از دستگاه آنالیز الکترون میکروپروپ و Cameca -X100 در دانشگاه اشتوتگارت آلمان تحت شرایط ولتاژ شتاب‌دهنده 15 کیلو ولت و شدت جریان 15 نانو آمپر صورت گرفته است. تعداد 37 آنالیز نقطه‌ای مناسب، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

می‌پوشانند و شامل رسوبهای رودخانه‌ای و تراستی جوانی هستند که از پای ارتفاعات تا دره‌ها را پوشانده‌اند.

بحث و بررسی

الف) پتروگرافی و شیمی‌کانیها در سنگهای آتشفشانی بازالتی ائوسن در منطقه قهرود

در این منطقه رخنمون سنگهای آتشفشانی به سن ائوسن (فاز اول ولکانیسم سنوزوئیک) به فراوانی دیده می‌شود. این سنگها در جاهایی توسط سنگهای آتشفشانی منسوب به الیگوسن - میوسن (فاز دوم ولکانیسم سنوزوئیک) و پلیوسن (فاز سوم ولکانیسم سنوزوئیک) پوشیده شده‌اند (Sayari et al., 2014a; Sayari et al., 2014b). این سنگها عمدتاً ترکیب حدواسط تا بازیک دارند.

نمونه‌های مورد بررسی از نظر پتروگرافی، از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از ریزبلورهای پیروکسن، میکرولیت، کانیه‌های کدر و شیشه تشکیل شده است و بافت میکرولیتی پورفیری و جریان‌ی را نشان می‌دهد. در شکل 3- A و B، نمای میکروسکوپی سنگهای آتشفشانی بازالتی مورد بررسی نشان داده شده است.

نتایج آنالیز نقطه‌ای فلدسپارهای سنگهای آتشفشانی بازالتی ائوسن در منطقه قهرود به همراه محاسبات فرمول ساختاری، بر اساس 8 اتم اکسیژن در جدول 1 آورده شده است. در شکل 4، نمودار سه‌تایی Ab-An-Or (Deer et al., 2013) برای فلدسپارهای مورد آنالیز نشان می‌دهد، فلدسپارهای مورد آنالیز همگی از نوع پلاژیوکلاز بوده و ترکیب لابرادوریت - بیتونیت (An₈₅₋₅₈Ab₁₅₋₄₁) دارند.

فرمول ساختاری پیروکسن‌ها بر اساس 6 اتم اکسیژن و چهار کاتیون محاسبه می‌شود (Vieten and Hamm, 1978).

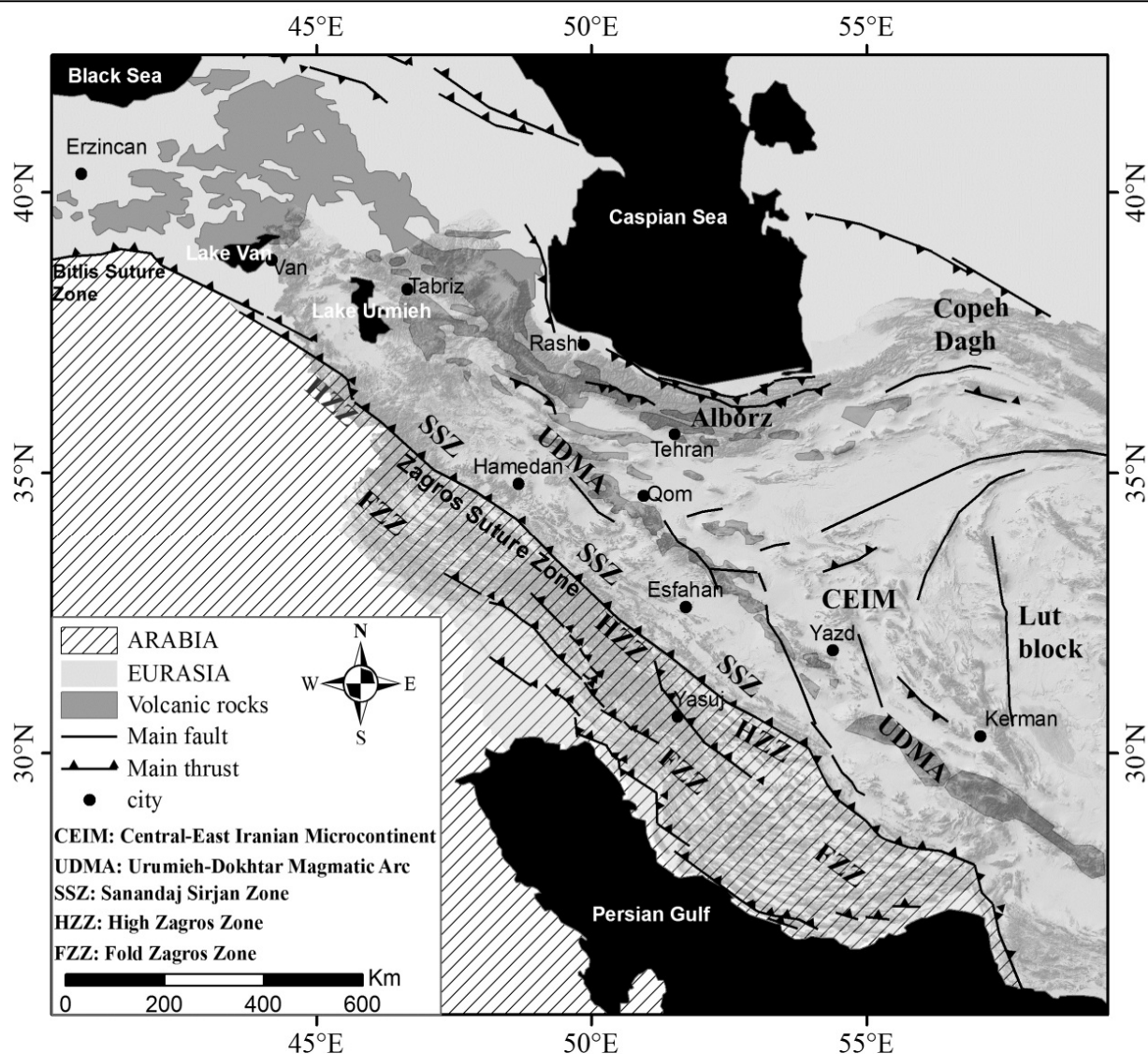
نتایج آنالیز میکروپروب پیروکسن‌های مورد بررسی و محاسبه فرمول ساختاری آنها به همراه ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی سنگ کل در جدول 2 آورده شده است.

در تقسیم‌بندی پیروکسن‌ها که توسط موریموتو (Morimoto, 1989) صورت گرفته، بر اساس کاتیون‌های مکان M2 و همچنین شباهت بلورشیمی، 20 نوع پیروکسن در 6 گروه قرار می‌گیرند.

دیده می‌شود. واحدهای آهکی به همراه ماسه‌سنگ قرمز و کنگلومرا، چینه‌شناسی کرتاسه زیرین را به صورت ارتفاعات خشن در جنوب تا جنوب شرقی منطقه نمایش می‌دهند. واحدهای آهکی، مارن و کنگلومرا کرتاسه بالایی در بخشهای دورتر شرقی منطقه رخنمون دارند. سنگهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن میانی تا بالایی با ترکیب عمده آندزیت، بازالت آندزیتی و بازالت، تکاپوهای ولکانیسم ائوسن را نشان می‌دهند، و غالباً در بخشهای شمالی منطقه دیده می‌شوند. این سنگها، عمدتاً با رنگ تیره در منطقه خودنمایی می‌کنند. سازند قرمز پایینی و سازند قم به سن الیگومیوسن و همچنین سازند قرمز بالایی به سن میوسن - پلیوسن بخش عمده‌ای از لیتولوژی منطقه را تشکیل می‌دهند. سازند قرمز پایینی از واحدهای رسوبی شیل، مارن ژئوپس دار، ماسه‌سنگهای قرمز و سنگهای آذرآواری تشکیل شده است و سازند قم عمدتاً، شامل مارن، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک است. سازند قرمز بالایی، شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن است. سنگهای آتشفشانی به صورت توده‌های پراکنده‌ای سازند قرمز پایینی را در منطقه پوشانده‌اند. این سنگها با سن نسبی بعد از میوسن، ترکیب آداکیتی دارند و منسوب به سومین فاز اصلی ولکانیسم سنوزوئیک ایران هستند (پلیوسن - کواترنر) (Sayari, 2015). توده گرانیتوئیدی قهرود به سن الیگومیوسن (Zahedi et al., 1981) در شمال شرق منطقه رخنمون دارد که دگرگونی حرارتی بر روی سنگهای دربرگیرنده ایجاد کرده است. سنگهای آذرآواری و پیروکلاستیک منسوب به میوسن - پلیوسن (Zahedi et al., 1981) رخنمونهای بخشهای جنوب غربی منطقه را با سیمای ناهموار، خشن و تپه ماهوری تشکیل می‌دهند.

ریوداسیت و داسیت‌های منسوب به میوسن - پلیوسن (Zahedi et al., 1981) که در بخش میانی نقشه شکل 2 دیده می‌شوند، به طور گسترده‌ای در بخشهای دورتر شمالی منطقه برونزد دارند. این سنگها نیز ترکیب آداکیتی نشان می‌دهند (Khodami, 2009) و مربوط به سومین فاز اصلی ولکانیسم سنوزوئیک ایران هستند (Sayari, 2015).

رسوبهای آبرفتی دوره حاضر که جوانترین واحد رسوبی منطقه را تشکیل می‌دهند، به طور ناپیوسته واحدهای یاد شده را



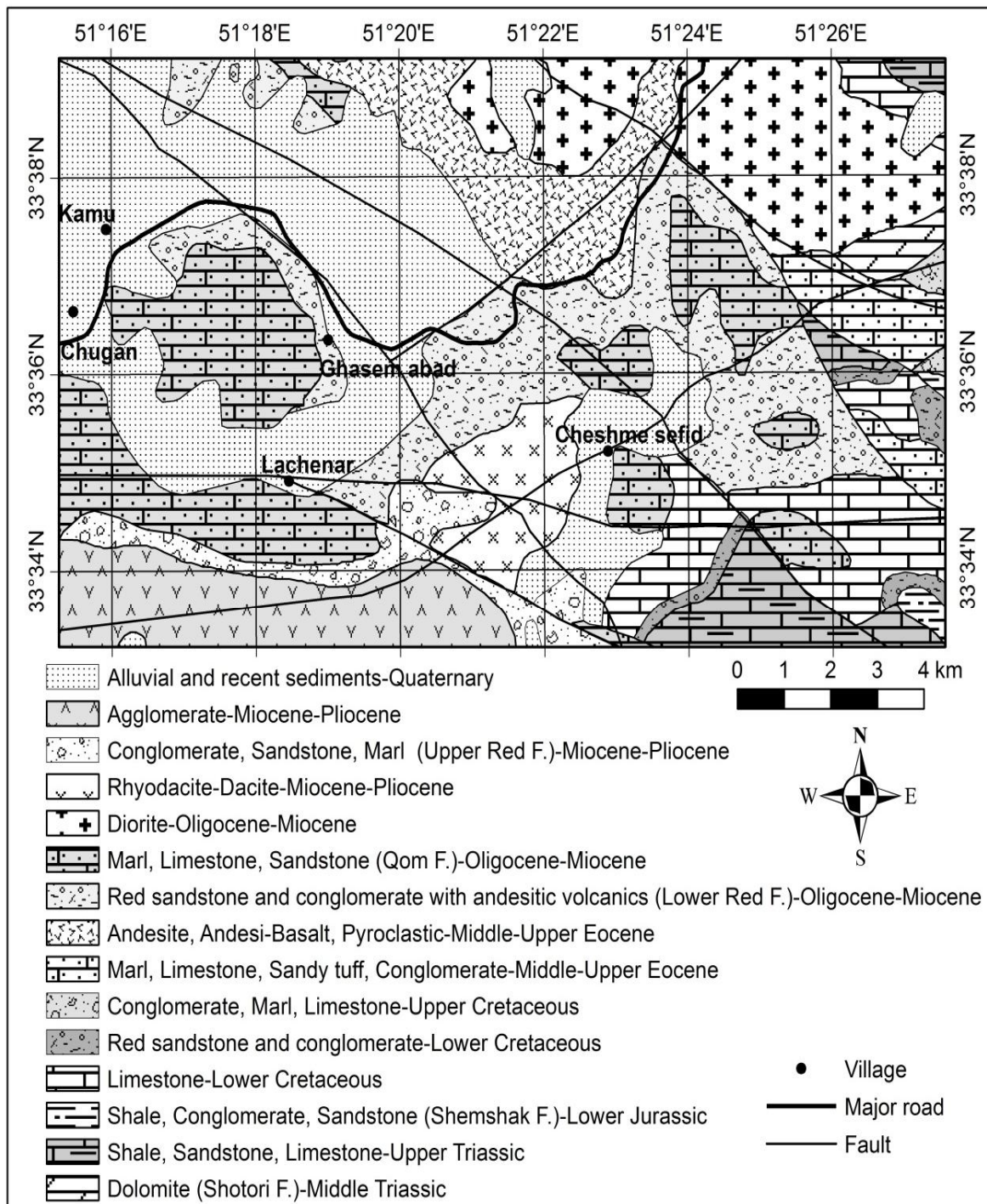
شکل 1. زون‌های ساختاری ایران و پراکندگی سنگهای آتشفشانی سنوزوئیک ایران و ایالت ماگمایی شمال زمین‌درز زاگرس - بیتلیس (Sayari, 2015)

Fig. 1. The main structural units of Iran and distribution of the Cenozoic volcanic rocks in Iran and the igneous province lying in the north of Zagros-Bitlis suture zone (Sayari, 2015)

همان‌طور که در شکل 5-A نشان داده شده است نمونه‌های مورد آنالیز در بخش پیروکسن‌های Quad قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی را که در نمودار Q-J (شکل 5-A) در قسمت Quad قرار می‌گیرند، می‌توان توسط نمودار Wo-En-Fs (شکل 5-B) و بر اساس نسبت‌های اتمی Ca، Mg و Fe (Morimoto, 1989) در این نمودار، پیروکسن‌های مورد آنالیز، همگی ترکیب اوژیت ($En_{41-49}Di_{29-38}Fs_{17-26}$) را نشان می‌دهند.

قبل از تقسیم‌بندی پیروکسن‌ها به 20 گونه، آنها را در چهار گروه قرار می‌دادند که عبارتند از: پیروکسن‌های Ca-Mg-Fe (Quad)، پیروکسن‌های Ca-Na (Ca-Na)، پیروکسن‌های Na (Na) و دیگر پیروکسن‌ها (Morimoto and Kitamura, 1983).

در این تقسیم‌بندی M1 و M2 هر دو، به‌عنوان مکان M، در نظر گرفته می‌شوند. تعداد کاتیون‌های Ca، Mg، Fe و Na در مکان M در نمودار Q-J پلات می‌شوند. این نمودار در شکل 5-A نشان داده شده است.

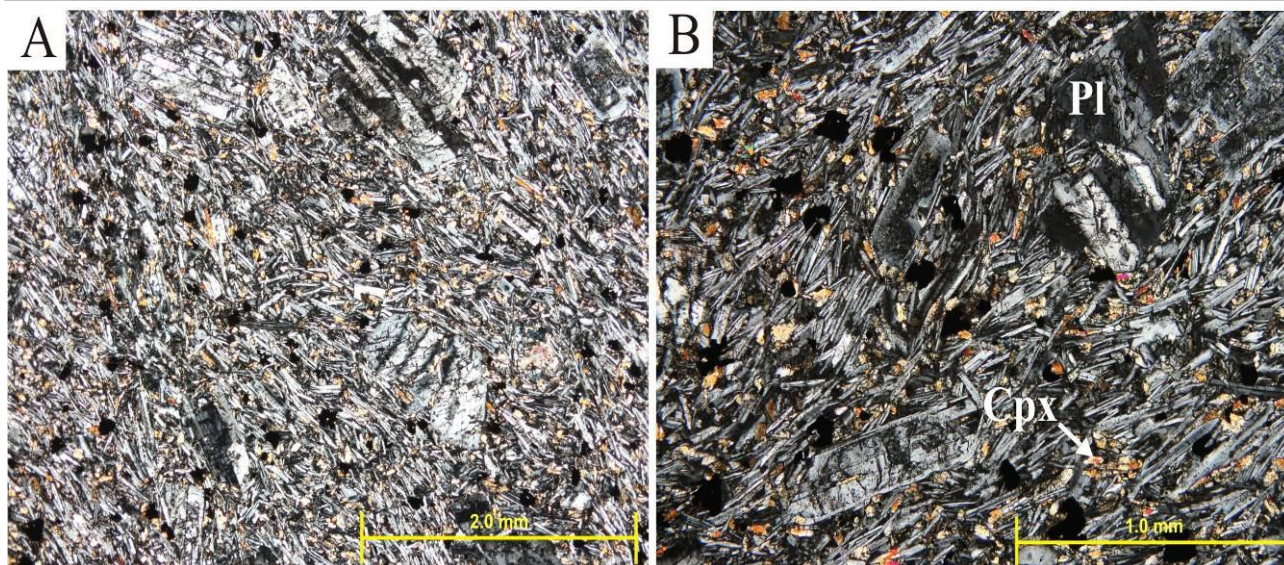


شکل 2. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی (منطقه قهرود)

Fig. 2. Geological map of the studied area (Ghohrud area)

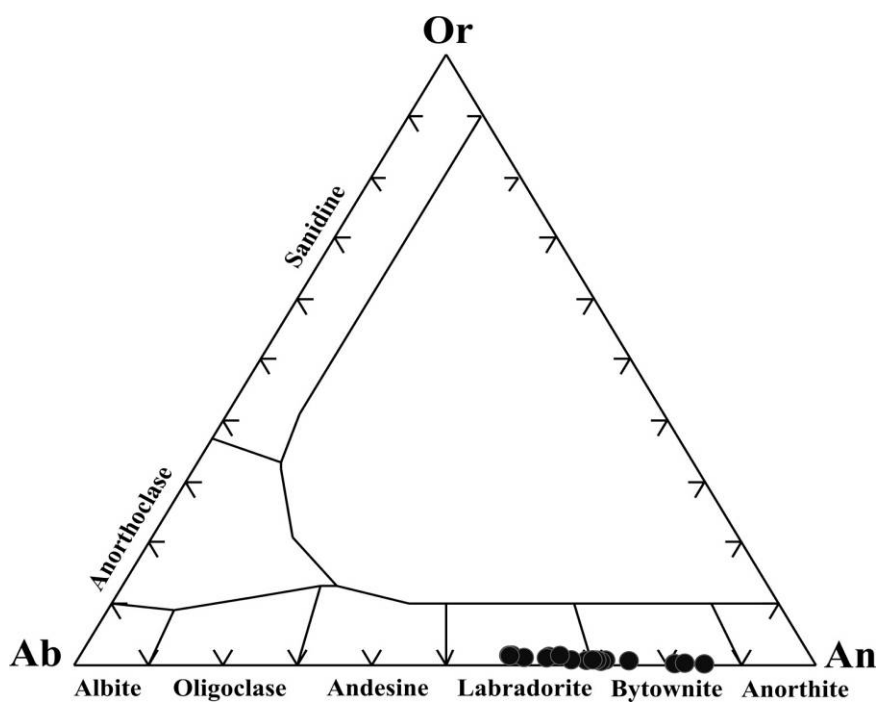
شکل 6-A، سری ماگمایی مذاب مولد کلینوپیروکسن‌ها، ماهیت ساب‌آلکانل دارد. شکل‌های 6-B، C، D و E، ترکیب تولییتی را برای ماگما نشان می‌دهند. همچنین، شکل 6-D، محیط کوه‌زایی را نشان می‌دهد.

همچنین، از ترکیب کلینوپیروکسن، می‌توان به‌منظور بررسی ترکیب شیمیایی و سری ماگمایی ماگمای مولد، استفاده کرد. در شکل 6 نمودارهای تعیین سری ماگمایی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی نشان داده شده‌اند. بر اساس



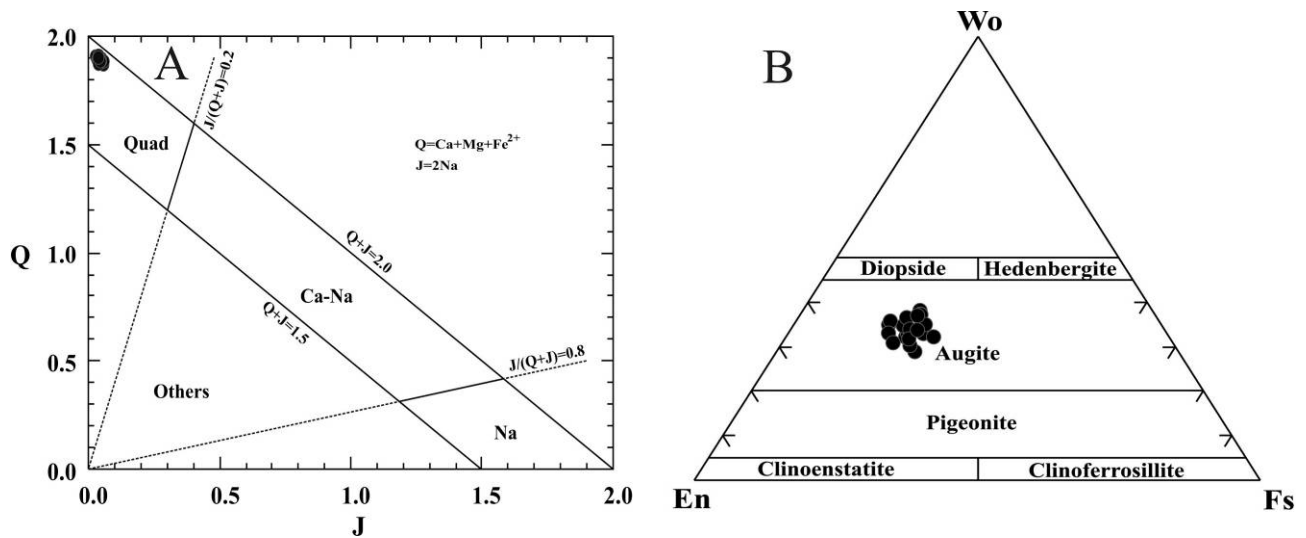
شکل 3. تصاویر میکروسکوپی (نور XPL) از سنگهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب بازالتی در منطقه قهرود. علائم اختصاری کانیها بر اساس کرتز (Kretz, 1983) آورده شده است. Cpx: کلینوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، A: بافت میکرولیتی پورفیری و جریان. B: فنوکریستهای پلاژیوکلاز در کنار بلورهای ریزتر کلینوپیروکسن

Fig. 3. Photomicrographs (XPL light) of the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area. Symbols for minerals derived from Kretz (1983). A: microlitic-porphyritic and flow texture. B: plagioclase phenocrysts next to fine clinopyroxene crystals



شکل 4. ترکیب فلدسپارهای مورد آنالیز در نمودار سه‌تایی An-Ab-Or برای سنگهای بازالتی ائوسن در منطقه قهرود

Fig. 4. The composition of analysed feldspars of the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area in the An-Ab-Or triangular diagram



شکل 5. نمودارهای تقسیم‌بندی پیروکسن‌ها و موقعیت نمونه‌های مورد آنالیز. A: نمودار Q-J (Morimoto and Kitamura, 1983). B: نمودار سه‌تایی ولاستونیت - انستاتیت - فروسیلیت برای تقسیم پیروکسن‌های Ca-Mg-Fe (Morimoto, 1989)

Fig. 5. Pyroxenes-classifying diagrams and the situation of analysed samples. A: Q-J diagram (Morimoto and Kitamura, 1983). B: Wollastonite-Enstatite-Ferrosillite triangular diagram for classifying Ca-Mg-Fe Pyroxenes

جدول 1. نتایج آنالیز میکروپروپ فلدسپارهای سنگهای بازالتی ائوسن در منطقه قهرود به‌همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس 8 اتم اکسیژن

Table 1. Microprobe analyses of feldspars in the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area accompanied with the structural formula based on 8 oxygen atoms

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	51.41	50.84	53.86	53.83	47.21	48.08	49.42	48.05	47.60
Al ₂ O ₃	29.97	30.58	28.39	28.12	33.05	32.62	31.47	32.49	32.56
FeO ^t	0.93	0.92	1.13	1.43	0.66	0.53	0.64	0.59	0.64
CaO	14.25	14.53	12.12	11.93	17.30	16.64	15.52	16.82	17.06
BaO	0.03	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00
Na ₂ O	3.52	3.17	4.64	4.65	1.71	2.18	2.88	2.19	2.03
K ₂ O	0.14	0.15	0.29	0.29	0.04	0.05	0.13	0.05	0.06
Total	100.26	100.22	100.48	100.25	99.97	100.09	100.10	100.22	99.96
Si	2.34	2.32	2.43	2.44	2.17	2.20	2.26	2.20	2.19
Al	1.61	1.64	1.51	1.50	1.79	1.76	1.70	1.76	1.77
Fe ⁺³	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Ca	0.70	0.71	0.59	0.58	0.85	0.82	0.76	0.83	0.84
Na	0.31	0.28	0.41	0.41	0.15	0.19	0.26	0.20	0.18
K	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	5.00	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.01	5.01	5.01
Or	0.82	0.86	1.67	1.66	0.23	0.30	0.77	0.27	0.35
An	68.52	71.07	58.08	57.68	84.66	80.62	74.28	80.69	81.99
Ab	30.66	28.08	40.25	40.66	15.11	19.08	24.96	19.04	17.66

ادامه جدول 1. نتایج آنالیز میکروپروب فلدسپارهای سنگهای بازالتی ائوسن در منطقه قهرود، به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس 8 اتم اکسیژن

Table 1 (Continued). Microprobe analyses of feldspars in the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area accompanied with the structural formula based on 8 oxygen atoms

Sample	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	50.17	52.58	53.17	52.53	50.68	51.57	51.69	53.62	50.88
Al ₂ O ₃	30.71	29.44	28.56	29.57	30.56	29.71	29.51	28.49	30.41
FeO ^t	0.78	0.90	0.95	1.04	0.82	1.11	0.99	1.07	0.90
CaO	14.91	13.25	12.61	12.96	14.60	13.78	13.63	12.23	14.41
BaO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02
Na ₂ O	3.36	4.10	4.52	4.08	3.38	3.74	3.95	4.74	3.42
K ₂ O	0.12	0.26	0.23	0.21	0.15	0.15	0.29	0.28	0.16
Total	100.05	100.55	100.04	100.39	100.20	100.07	100.07	100.44	100.19
Si	2.29	2.38	2.42	2.38	2.31	2.35	2.36	2.43	2.32
Al	1.66	1.57	1.53	1.58	1.64	1.60	1.59	1.52	1.63
Fe ⁺³	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
Ca	0.73	0.64	0.61	0.63	0.71	0.67	0.67	0.59	0.70
Na	0.30	0.36	0.40	0.36	0.30	0.33	0.35	0.42	0.30
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	5.02	5.00	5.01	5.00	5.01	5.00	5.01	5.01	5.00
Or	0.67	1.47	1.29	1.23	0.88	0.89	1.61	1.55	0.90
An	70.54	63.14	59.90	62.96	69.86	66.44	64.58	57.85	69.33
Ab	28.78	35.39	38.82	35.81	29.26	32.67	33.81	40.60	29.77

با ارائه روابط ریاضی ترموبارومتري که دقت بالاتری دارند، روند برآورد دما و فشار، به سمت ارزیابیهای دقیق‌تر، گرایش یافته است.

این روابط، به دو دسته کلی معادلات ژئوترمومتري و معادلات ژئوبارومتري تقسیم می‌شوند. یک ژئوترمومتر (معادله ژئوترمومتري)، روی نمودار P-T دارای مقدار dP/dT پایین است، به عبارتی نسبت به تغییرات دما بسیار حساس بوده؛ در حالی که یک ژئوبارومتر دارای dP/dT بالاست، به تغییرات فشار چندان وابسته نیست. یعنی ضمن حساسیت بالا به تغییرات فشار، کمترین تأثیر را نسبت به تغییرات دما نشان می‌دهد (Sayari, 2012).

ب) دما-فشارسنجی کلینوپیروکسن و نرم‌افزار SCG

در پترولوژی، معادلات زمین‌دما-فشارسنجی به منظور ارزیابی دما و فشار تعادل در زمان تبلور یا تبلور دوباره کانیها استفاده می‌شوند (Spear, 1995; Ottonello, 1997; Nakamura,) در گذشته از نمودارهای الگویی استفاده می‌شد. این نمودارها، که عمدتاً جهت برآورد دما طراحی شده‌اند، نمودارهای دوتایی و یا سه‌تایی از ترکیب کانیها، نظیر کلینوپیروکسن (Lindsley, 1983) هستند که روی آن، منحنیهای هم‌دما (ایزوترم)، برای یک فشار ثابت رسم شده است. استفاده از این نمودارها، از دقت چندان بر خوردار نیست و همچنین قادر نیست، فشار و دما را با هم در نظر گیرد.

جدول 2. نتایج آنالیز میکروپروپ کلاینوپیروکسن‌های مورد بررسی در سنگهای بازالتی ائوسن در منطقه قهرود، به‌همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس 6 اتم اکسیژن و آنالیز سنگ کل. حرف D بیانگر تفکیک آهن به‌روش دروپ (Droop, 1987) و حرف L، بیانگر تفکیک آهن به‌روش لیندسلی (Lindsley, 1983) است.

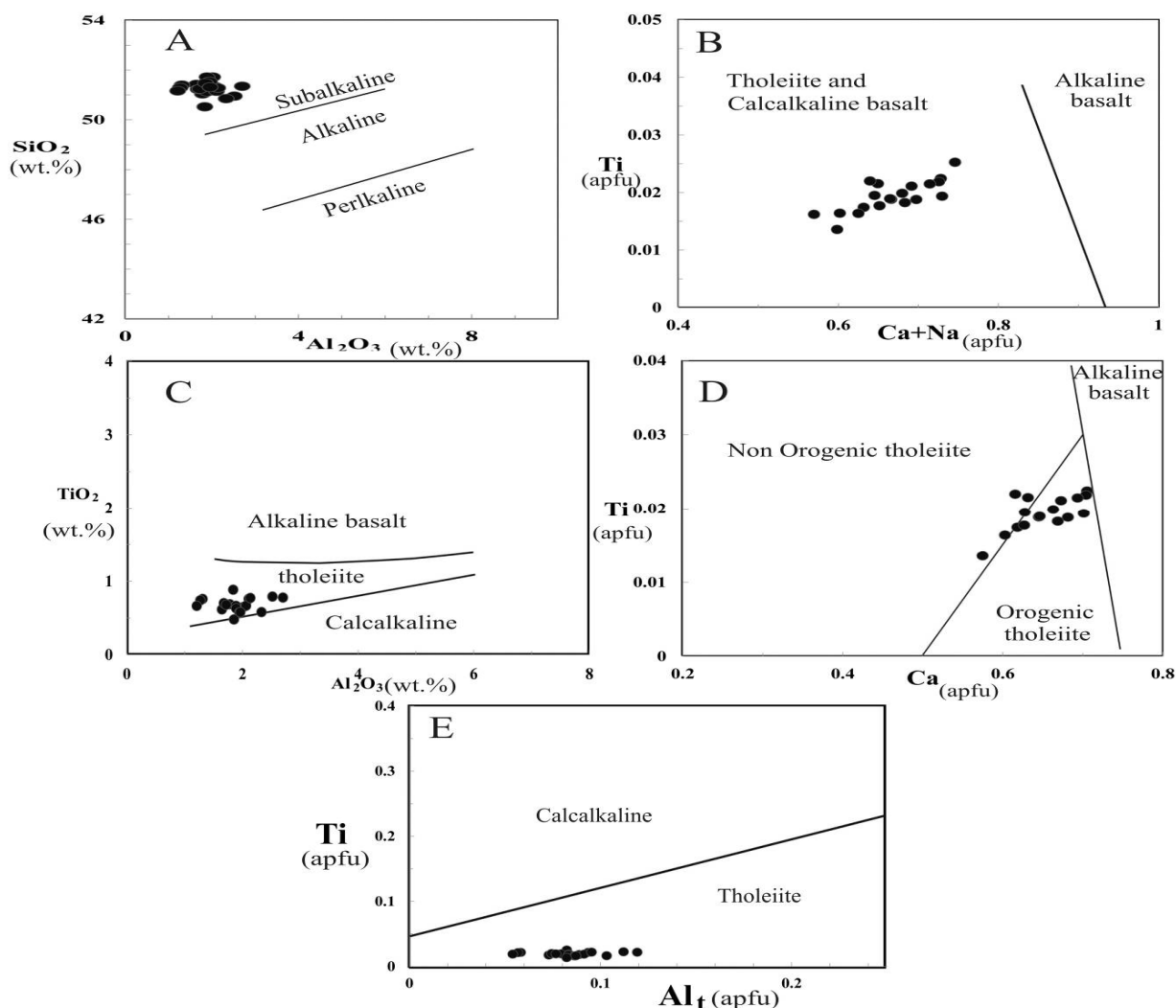
Table 2. Microprobe analyses of clinopyroxenes in the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area accompanied with the structural formula based on 6 oxygen atoms, and whole rock analysis. The letter D indicates that Fe-discrimination is done based on Droop method (Droop, 1987) and the letter L implies that Fe-discrimination is done according to Lindsley approach (Lindsley, 1983).

Sample	cpx1	cpx2	cpx3	cpx4	cpx5	cpx6	cpx7	cpx8	cpx9
SiO ₂	51.72	50.95	51.72	51.24	50.85	50.52	51.35	51.42	51.04
TiO ₂	0.65	0.79	0.63	0.68	0.58	0.88	0.78	0.62	0.69
Al ₂ O ₃	2.02	2.52	1.89	1.72	2.33	1.84	2.70	1.65	1.78
FeOt	11.72	13.76	12.70	14.20	14.52	14.86	13.59	14.51	14.75
MnO	0.35	0.39	0.39	0.36	0.42	0.42	0.38	0.41	0.39
MgO	16.51	13.83	16.65	14.07	16.53	13.56	13.95	15.85	15.42
CaO	16.73	17.45	15.66	17.30	14.47	17.63	17.55	15.33	15.50
Na ₂ O	0.20	0.31	0.34	0.39	0.26	0.38	0.30	0.18	0.24
K ₂ O	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.02
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.90	100.04	99.98	99.96	99.96	100.11	100.63	99.97	99.84
Si	1.93	1.92	1.93	1.94	1.91	1.92	1.92	1.94	1.93
Ti	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Al ^(IV)	0.07	0.08	0.07	0.06	0.09	0.08	0.08	0.06	0.07
Al ^(VI)	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00	0.04	0.01	0.01
Al (total)	0.09	0.11	0.08	0.08	0.10	0.08	0.12	0.07	0.08
Fe ^{2+*}	0.37	0.43	0.40	0.45	0.46	0.47	0.43	0.46	0.47
Fe ²⁺ L	0.34	0.41	0.36	0.41	0.40	0.42	0.41	0.42	0.42
Fe ³⁺ L	0.03	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06	0.01	0.03	0.04
Fe ²⁺ D	0.32	0.40	0.33	0.39	0.37	0.39	0.40	0.41	0.40
Fe ³⁺ D	0.04	0.03	0.06	0.05	0.09	0.08	0.02	0.05	0.06
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.92	0.78	0.93	0.79	0.93	0.77	0.78	0.89	0.87
Ca	0.67	0.71	0.63	0.70	0.58	0.72	0.70	0.62	0.63
Na	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.01	4.01	4.02	4.02	4.03	4.03	4.01	4.02	4.02
Wo (%)	35.05	37.46	33.19	37.12	31.05	38.29	37.35	32.32	33.06
En (%)	48.13	41.31	49.10	42.00	49.34	40.98	41.29	46.50	45.76
Fs (%)	16.82	21.23	17.71	20.88	19.61	20.73	21.35	21.18	21.18

ادامه جدول 2. نتایج آنالیز میکروپروپ کلاینوپروکسن‌های مورد بررسی در سنگهای بازالتی ائوسن در منطقه قهرود، به‌همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس 6 اتم اکسیژن و آنالیز سنگ کل. حرف D بیانگر تفکیک آهن به‌روش دروپ (Droop, 1987) و حرف L، بیانگر تفکیک آهن به‌روش لیندسلی (Lindsley, 1983) است.

Table 2 (Continued). Microprobe analyses of clinopyroxenes in the Eocene basaltic rocks in the Ghohrud area accompanied with the structural formula based on 6 oxygen atoms, and whole rock analysis. The letter D indicates that Fe-discrimination is done based on Droop method (Droop, 1987) and the letter L implies that Fe-discrimination is done according to Lindsley approach (Lindsley, 1983).

Sample	cpx10	cpx11	cpx12	cpx13	cpx14	cpx15	cpx17	cpx18	cpx19	Whole
SiO ₂	51.39	51.23	51.13	51.15	51.34	51.28	51.54	51.48	51.31	52.7
TiO ₂	0.76	0.70	0.66	0.76	0.67	0.77	0.57	0.48	0.58	0.78
Al ₂ O ₃	1.31	1.68	1.89	2.11	2.06	2.14	1.95	1.85	1.96	15.45
FeOt	16.27	14.02	12.62	13.23	14.31	15.75	15.78	15.39	14.98	7
MnO	0.52	0.39	0.30	0.38	0.41	0.37	0.53	0.41	0.43	0.14
MgO	14.59	15.48	16.06	14.87	15.15	14.01	15.78	15.71	15.53	4.34
CaO	15.62	16.44	16.93	17.20	16.02	15.17	13.70	14.23	14.94	10.45
Na ₂ O	0.25	0.23	0.22	0.29	0.29	0.33	0.24	0.32	0.30	3.43
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.76
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13
Total	100.72	100.17	99.83	100.00	100.26	99.82	100.11	99.91	100.06	95.19
Si	1.94	1.93	1.92	1.92	1.93	1.94	1.94	1.94	1.93	
Ti	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	
Al ^(IV)	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	
Al ^(VI)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	
Al (total)	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	
Fe ^{2+*}	0.51	0.44	0.40	0.42	0.45	0.50	0.50	0.49	0.47	
Fe ^{2+L}	0.48	0.39	0.34	0.38	0.42	0.50	0.48	0.45	0.43	
Fe ^{3+L}	0.04	0.05	0.05	0.03	0.03	0.00	0.02	0.03	0.04	
Fe ^{2+D}	0.46	0.37	0.32	0.36	0.40	0.50	0.47	0.43	0.41	
Fe ^{3+D}	0.06	0.07	0.08	0.05	0.05	0.00	0.03	0.05	0.06	
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	
Mg	0.82	0.87	0.90	0.83	0.85	0.79	0.89	0.88	0.87	
Ca	0.63	0.66	0.68	0.69	0.65	0.62	0.55	0.57	0.60	
Na	0.02	0.02	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	0.00	
Total	4.02	4.02	4.03	4.02	4.02	4.00	4.01	4.02	4.02	
Wo (%)	33.09	34.86	35.90	36.67	34.10	32.35	29.03	30.40	31.90	
En (%)	43.01	45.65	47.39	44.13	44.87	41.56	46.53	46.69	46.15	
Fs (%)	23.90	19.48	16.71	19.20	21.03	26.10	24.44	22.91	21.95	



شکل 6. نمودارهای تعیین سری ماگمایی مذاب مولد کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی. A و C: از لیباس (Le Bas, 1962) و B, D و E: از لتریر (Leterrier et al., 1982)

Fig. 6. Indicating-magmatic series diagrams for the studied clinopyroxenes-forming magma. A and C from Le Bas (1962), B, D, and E from Leterrier et al. (1982)

می‌کند. در این برنامه، 10 رابطه بارومتري (روابط 1 تا 10) و 6 رابطه ترمومتري (روابط 11 تا 16)، به راحتی در اختیار کاربر قرار می‌گیرند که از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روابط ارائه شده برای ترموبارومتري کلینوپیروکسن هستند. این روابط بدون هیچ قیدی قابل تلفیق با یکدیگر و ترسیم در نمودار P-T هستند.

در تمام روابط 1 تا 16، X_Z^{Cpx} با تعداد اتم عنصر Z در واحد فرمول ساختاری کلینوپیروکسن برابر است، X_Y^{liq} برابر است با سهم کاتیونی³ عنصر Y در ترکیب مذاب، وقتی که محاسبات به صورت خشک (بدون آب) انجام شده‌اند.

اساساً روابط ترموبارومتري، توابعی از فشار، دما و یا هر دو هستند که در نمودار دما-فشار به صورت یک خط مستقیم و یا منحنی قابل ترسیم هستند. مشکل اصلی در استفاده از این روابط پیچیدگی و دو متغیره بودن آنهاست. از طرفی فراوانی روابط ممکن است، پژوهشگر را سردرگم کند. مسأله‌ای که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته، این است که تمام روابط برای هر نمونه، قابل کاربرد نیست و اشتباه در انتخاب روابط ترمومتري و بارومتري نتایج کاملاً متفاوتی را در بر دارد. سیاری و شریفی (Sayari and Sharifi, 2014) برای ترموبارومتري کلینوپیروکسن نرم‌افزار SCG را ارائه کردند، که هم بر اساس روش ترسیمی¹ و هم روش محاسباتی² عمل

$$Cr\#^{Cpx} = \left(\frac{X_{Cr}^{Cpx}}{X_{Cr}^{Cpx} + X_{Al}^{Cpx}} \right), \quad Mg\#^{liq} = \left(\frac{X_{MgO}^{liq}}{X_{MgO}^{liq} + X_{FeO}^{liq}} \right);$$

$$Fm^{liq} = X_{FeO}^{liq} + X_{MgO}^{liq};$$

$$a_{CaCrTs}^{Cpx} = X_{Cr}^{Cpx} - 0.81 * Cr\#^{Cpx} * (X_{Na}^{Cpx} + X_K^{Cpx});$$

$$a_{en}^{Cpx} = \left(1 - X_{Ca}^{Cpx} - X_{Na}^{Cpx} - X_K^{Cpx} \right) * \left(1 - \frac{1}{2} (X_{Al}^{Cpx} + X_{Cr}^{Cpx} + X_{Na}^{Cpx} + X_K^{Cpx}) \right);$$

$$\text{If } X_{Al(VI)}^{Cpx} > X_{Na}^{Cpx} \text{ then } CaTs = X_{Al(VI)}^{Cpx} - X_{Na}^{Cpx} \text{ else } CaTs = 0;$$

$$\text{If } X_{Al(IV)}^{Cpx} > CaTs \text{ then } CaTi = \left(\frac{X_{Al(IV)}^{Cpx} - CaTs}{2} \right) \text{ else } CaTi = 0;$$

$$X_{DiHd}^{Cpx} = X_{Ca}^{Cpx} - CaTs - CaTi - \left(\frac{X_{Cr}^{Cpx}}{2} \right);$$

$$\text{if } X_{Al(VI)}^{Cpx} > X_{Na}^{Cpx} \text{ then } X_{Jd}^{Cpx} = X_{Na}^{Cpx} \text{ else } X_{Jd}^{Cpx} = X_{Al(VI)}^{Cpx};$$

بیانگر سهم مولی¹ دیوپسید+هدنبرژیت در کلینوپیروکسن است. X_{DiHd}^{Cpx}

بیانگر سهم مولی ژادئیت در کلینوپیروکسن است. X_{Jd}^{Cpx}

رابطه 1 (Nimis, 1995):

$$P(kbar) = 698.443 + 4.985 * X_{Al(IV)}^{Cpx} - 26.826 * X_{Fe(M1)}^{Cpx} - 3.764 * X_{Fe^{3+}}^{Cpx} + 53.989 * X_{Al(VI)}^{Cpx} \\ + 3.948 * X_{Ti}^{Cpx} + 14.651 * X_{Cr}^{Cpx} - 700.431 * X_{Ca}^{Cpx} - 666.629 * X_{Na}^{Cpx} - 682.848 * X_{Mg(M2)}^{Cpx} \\ - 691.138 * X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx} - 688.384 * X_{Mn}^{Cpx} - 6.267 * (X_{Mg(M2)}^{Cpx})^2 - 4.144 * X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx}$$

رابطه 2 (Putirka et al., 1996):

$$P(kbar) = -54.3 + 299 * \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} + 36.4 * \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} \ln \left[\frac{X_{Jd}^{Cpx}}{(X_{SiO_2}^{liq})^2 * X_{NaO}^{liq} * X_{AlO_{1.5}}^{liq}} \right] + 367 * (X_{NaO}^{liq} * X_{AlO_{1.5}}^{liq})$$

رابطه 3 (Nimis and Ulmer., 1998):

$$P(kbar) = 771.48 + 4.956 * X_{Al(IV)}^{Cpx} - 28.756 * X_{Fe^{2+}(M1)}^{Cpx} - 5.345 * X_{Fe^{3+}}^{Cpx} + 56.904 * X_{Al(VI)}^{Cpx} \\ + 1.848 * X_{Ti}^{Cpx} + 14.827 * X_{Cr}^{Cpx} - 773.74 * X_{Ca}^{Cpx} - 736.57 * X_{Na}^{Cpx} - 754.81 * X_{Mg(M2)}^{Cpx} \\ - 763.20 * X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx} - 759.66 * X_{Mn}^{Cpx} - 1.185 * (X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx})^2 - 1.876 * (X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx})^2$$

رابطه 4 (Nimis and Taylorl, 2000):

$$P(kbar) = -\frac{T(^{\circ}K)}{126.9} \ln [a_{CaCrTs}^{Cpx}] + 15.483 \ln \left(\frac{Cr\#^{Cpx}}{T(^{\circ}K)} \right) + \frac{T(^{\circ}K)}{71.38} + 107.8$$

رابطه 5 (Putirka et al., 2003):

$$P(kbar) = -88.3 + 2.82 * 10^{-3} T(^{\circ}K) \ln \left[\frac{X_{Jd}^{Cpx}}{X_{NaO_{0.5}}^{liq} * X_{AlO_{1.5}}^{liq} * (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right]$$

$$+ 2.19 * 10^{-2} T(^{\circ}K) - 25.1 \ln [X_{CaO}^{liq} * X_{SiO_2}^{liq}] + 7.03 [Mg\#^{liq}] + 12.4 \ln [X_{CaO}^{liq}]$$

رابطه 6 (Putirka, 2008):

$$P(Kbar) = -48.7 + 271 \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} + 32 \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} \ln \left[\frac{X_{Jd}^{cpx}}{X_{NaO_{0.5}}^{liq} X_{AlO_{1.5}}^{liq} (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right]$$

$$- 8.2 \ln (X_{FeO}^{liq}) + 4.6 \ln (X_{MgO}^{liq}) - 0.96 \ln (X_{KO_{0.5}}^{liq}) - 2.2 \ln (X_{DiHd}^{cpx})$$

$$- 31 (Mg\#^{liq}) + 56 (X_{NaO_{0.5}}^{liq} + X_{KO_{0.5}}^{liq}) + 0.76 (H_2O^{liq})$$

رابطه 7 (Putirka, 2008):

$$P(kbar) = -40.73 + 358 \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} + 21.69 \frac{T(^{\circ}K)}{10^4} \ln \left[\frac{X_{Jd}^{cpx}}{X_{NaO_{0.5}}^{liq} X_{AlO_{1.5}}^{liq} (X_{SiO_2}^{liq})^2} \right]$$

$$- 105.7 (X_{CaO}^{liq}) - 165.5 (X_{NaO_{0.5}}^{liq} + X_{KO_{0.5}}^{liq})^2 - 50.15 (X_{SiO_2}^{liq}) (X_{FeO}^{liq} + X_{MgO}^{liq})$$

$$- 3.178 \ln (X_{DiHd}^{cpx}) - 2.205 \ln (X_{EnFs}^{cpx}) + 0.864 \ln (X_{Al}^{cpx}) + 0.3962 (H_2O^{liq})$$

رابطه 8 (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 9 (Putirka, 2008):

$$P(kbar) = 1458 + 0.197 T(^{\circ}K) - 24 \ln T(^{\circ}K) + 0.453 (H_2O^{liq}) + 55.5 (X_{Al(VI)}^{cpx})$$

$$+ 8.05 (X_{Fe}^{cpx}) - 277 (X_K^{cpx}) + 18 (X_{Jd}^{cpx}) + 44.1 (X_{DiHd}^{cpx}) + 2.2 \ln (X_{Jd}^{cpx})$$

$$- 17.7 (X_{Al}^{cpx})^2 + 97.3 (X_{Fe(M2)}^{cpx})^2 + 30.7 (X_{Mg(M2)}^{cpx})^2 - 27.6 (X_{DiHd}^{cpx})^2$$

رابطه 10 (Putirka, 2008):

$$P(kbar) = -57.9 + 0.0475 T(^{\circ}K) - 40.6 (X_{FeO}^{liq}) - 47.7 (X_{CaTs}^{cpx})$$

$$+ 0.676 (H_2O^{liq}) - 153 (X_{CaO}^{liq} X_{SiO_2}^{liq}) + 6.89 \left(\frac{X_{Al}^{cpx}}{X_{AlO_{1.5}}^{liq}} \right)$$

رابطه 11 (Putirka et al., 1996):

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}K)} = 6.59 - 0.16 * \ln \left(\frac{X_{Jd}^{Cpx} * X_{CaO}^{liq} * Fm^{liq}}{X_{DiHd}^{Cpx} * X_{NaO_{0.5}}^{liq} * X_{AlO_{1.5}}^{liq}} \right)$$

$$- 0.65 * \ln (Mg\#^{liq}) + 0.23 * \ln (X_{CaO}^{liq}) - 0.02 P(kbar)$$

رابطه 12 (Nimis and Taylorl, 2000):

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

رابطه 13 (Putirka et al., 2003):

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}K)} = 4.60 - 4.37 * 10^{-1} \ln \left(\frac{X_{Jd}^{Cpx} * X_{CaO}^{liq} * Fm^{liq}}{X_{DiHd}^{Cpx} * X_{NaO_{0.5}}^{liq} * X_{AlO_{1.5}}^{liq}} \right) \\ - 6.54 * 10^{-1} \ln(Mg\#^{liq}) - 3.26 * 10^{-1} \ln(X_{NaO_{0.5}}^{liq}) \\ - 6.32 * 10^{-3} [P(kbar)] - 0.92 \ln(X_{SiO_2}^{liq}) + 2.74 * 10^{-1} \ln(X_{Jd}^{Cpx})$$

رابطه 14 (Putirka, 2008):

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

رابطه 15 (Putirka, 2008):

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}K)} = 7.53 - 0.14 \ln \left(\frac{X_{Jd}^{cpx} * X_{CaO}^{liq} * X_{Fm}^{liq}}{X_{DiHd}^{cpx} * X_{Na}^{liq} * X_{Al}^{liq}} \right) + 0.07(H_2O^{liq}) \\ - 14.9(X_{CaO}^{liq} X_{SiO_2}^{liq}) - 0.08 \ln(X_{TiO_2}^{liq}) - 3.62(X_{NaO_{0.5}}^{liq} + X_{KO_{0.5}}^{liq}) \\ - 1.1(Mg\#^{liq}) - 0.18 \ln(X_{EnFs}^{cpx}) - 0.027P(kbar)$$

رابطه 16 (Putirka, 2008):

$$\frac{10^4}{T(^{\circ}K)} = 6.39 + 0.076(H_2O^{liq}) - 5.55(X_{CaO}^{liq} * X_{SiO_2}^{liq}) \\ - 0.386 \ln(X_{MgO}^{liq}) - 0.046P(kbar) + 2.2 * 10^{-4} [P(kbar)]^2$$

سهام کاتیون‌های Fe و Mg در مکانهای M1 و M2 با استفاده از روابط 47-49 (Nimis, 1995) به دست می‌آید.

رابطه 17:

$$\left(\frac{X_{Fe^{2+}(M1)}^{Cpx} X_{Mg(M2)}^{Cpx}}{X_{Fe^{2+}(M2)}^{Cpx} X_{Mg(M1)}^{Cpx}} \right) = \exp(0.238 * R^{3+} + 0.289 * CNM - 2.315)$$

رابطه 18:

$$CNM = X_{Ca}^{Cpx} + X_{Na}^{Cpx} + X_{Mn}^{Cpx}$$

رابطه 19:

$$R^{3+} = X_{Al(VI)}^{Cpx} + X_{Fe^{3+}}^{Cpx} + X_{Ti}^{Cpx} + X_{Cr}^{Cpx}$$

نتیجه‌گیری

از نرم‌افزار SCG برای تعیین شرایط دما و فشار حاکم بر ماگما در زمان تبلور کلینوپیروکسن‌های موجود در سنگهای آتشفشانی ائوسن مورد بررسی در منطقه قهرود استفاده شده است. در جدول 3 نتایج ترموبارومتري 12 نمونه از میان پیروکسن‌های مورد آنالیز بر اساس تلفیق روابط 8 و 14 و

برای استفاده از رابطه‌های 2، 5، 7، 10، 11، 13، 15 و 16 ترکیب شیمیایی مذاب در حال تعادل با کلینوپیروکسن ضروری است. اما به جای آن می‌توان از ترکیب سنگ کل نیز استفاده کرد. ترکیب شیمیایی سنگ کل کلینوپیروکسن‌های مورد آنالیز، همراه با آنالیز کلینوپیروکسن‌ها در ستون آخر جدول 2 ارائه شده است.

شکل 7، رگرسیون¹ خطی آماری (Mendenhall and Sincich, 2011; Montgomery et al., 2012) ترسیم شده است. این رگرسیون، دارای ضریب همبستگی (R) برابر با 0/94 و ضریب تعیین (R²) برابر 0/88 است و نشان می‌دهد کارایی مناسبی در ارزیابی دارد. معادله رگرسیون به صورت رابطه 20 است.

$$P \text{ (kbar)} = 0.0846 T \text{ (}^\circ\text{C)} - 93.128 \quad \text{رابطه 20:}$$

این رابطه نشان می‌دهد که در زمان صعود ماگما و تبلور هم‌زمان پیروکسن‌ها، به ازای هر درجه سانتی‌گراد کاهش دما، به میزان 84/6 بار از فشار کاسته شده است.

همچنین روابط 10 و 15، با بهره‌گیری از نرم‌افزار SCG ارائه شده است.

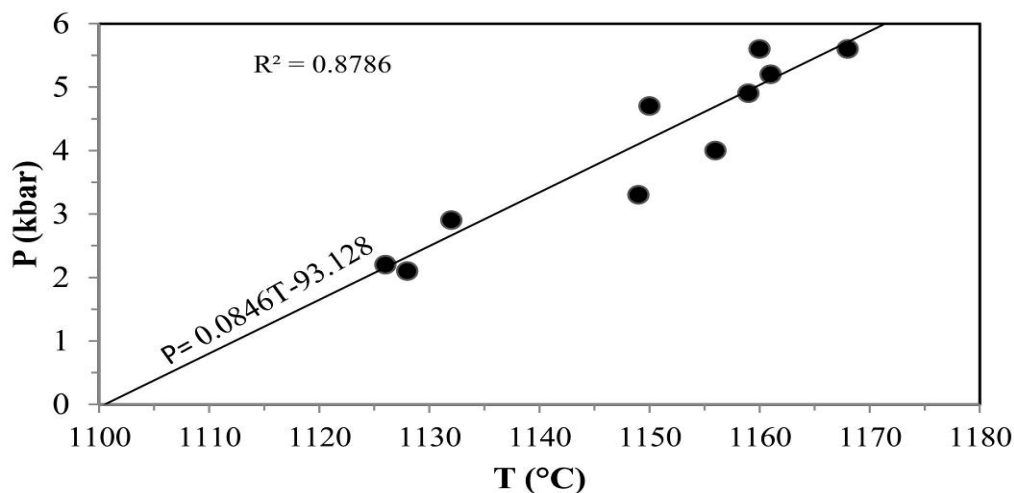
بر اساس جدول 3، کلینوپیروکسن‌های مورد آنالیز در محدوده دمایی حدود 1170-1120 درجه سانتی‌گراد و محدوده فشار حدود 2-6 کیلو بار متبلور شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده (جدول 3) در نمودار P-T (شکل 7) نشان داده شده است. به‌منظور ارزیابی و تحلیل شرایط فیزیکی حاکم در زمان تبلور کلینوپیروکسن‌های مورد آنالیز، می‌توان از روشهای برگشت آماری استفاده کرد. برای بررسی همبستگی تغییرات دمایی و فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های مورد آنالیز در

جدول 3. نتایج ترموبارومتري کلینوپیروکسن بر اساس تلفیق زوج روابط (مدل‌های) 8 و 14 و زوج روابط (مدل‌های) 10 و 15

Table 3. Results of clinopyroxene thermobarometry based on integrating the pair-models of 8 and 14, and the pair-models of 10 and 15

Sample	Models 8 and 14		Models 10 and 15		Average	
	P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)
cpx1	3	1157	3.5	1141	3.3	1149
cpx2	4.9	1149	4.5	1151	4.7	1150
cpx3	4.1	1161	3.9	1150	4.0	1156
cpx4	3.1	1134	2.7	1130	2.9	1132
cpx5	4.4	1153	5.4	1165	4.9	1159
cpx7	5.2	1154	4.2	1146	4.7	1150
cpx8	1.7	1128	2.5	1128	2.1	1128
cpx9	1.8	1125	2.6	1126	2.2	1126
cpx15	6.6	1154.0	4.5	1165.0	5.6	1160
cpx17	5.9	1157.0	4.4	1165.0	5.2	1161
cpx18	6.1	1162.0	5.0	1174.0	5.6	1168
cpx19	5.0	1153.0	4.7	1164.0	4.9	1159



شکل 7. نتایج ترموبارومتري کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در نمودار فشار-دما (P-T) و معادله رگرسیون

Fig. 7. Results of thermobarometry of the studied clinopyroxenes in a P-T diagram, and the equation of regression line.

مجذور ثانیه) فرض گردد، می‌توان به راحتی برآوردی از تغییرات عمق مرتبط با تغییرات فشار به دست آورد. با در نظر گرفتن این فرضیات و شرایط پوسته قاره‌ای، فشار 84/6 بار معادل با 320 متر عمق است. به عبارتی، صعود ماگما به صورت آدیاباتیک و به گونه‌ای صورت گرفته است؛ که به ازای هر 320 متر صعود، تنها یک درجه سانتی‌گراد کاهش دمایی داشته است.

قدردانی

از مدیریت محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و همچنین از همکاری آقای دکتر طباطبائی‌منش به خاطر یاری در انجام آنالیزهای مایکروپروب قدردانی می‌شود.

References

- Aftabi, A. and Atapour, H., 2000. Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran. *Episodes*, 23(2): 119-125.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. In: O. Lacombe, B. Grasemann and G. Simpson (Editors), *Geodynamic Evolution of the Zagros*. Geological Magazine, Cambridge, pp. 692-725.
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2): 1-16.
- Amidi, S.M., Emami, M.H. and Michel, R., 1984. Alkaline character of Eocene volcanism in the middle part of Central Iran and its geodynamic situation. *Geologische Rundschau*, 73(3): 917-932.
- Barker D.S., 1983. *Igneous rocks*. Englewood cliffs, New jersey, 415 pp.
- Berger, J., Femenias, O., Mercier, J.C.C. and Demaiffe, D., 2005. Ocean-floor hydrothermal metamorphism in the Limousin ophiolites (western French Massif Central): evidence of a rare preserved Variscan oceanic marker. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(9): 795-812.
- Best, M.G., 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell science ltd, Oxford UK, 729 pp.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 2013. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Mineralogical Society, London, 498 pp.
- Dewey, J.F., Hempton, M.R., Kidd, W.S.F., Saroglu, F. and Sengo, A.M.C., 1986. Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of Eastern Anatolia - a young collision zone. In: M.P. Coward and A.C. Ries (Editors), *Collision Zone Tectonics*. Geological Society of London Special Publication, London, pp. 3-36.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52(4-6): 536-578.
- Dilek, Y. and Sandvol, E., 2009. Seismic Structure, Crustal Architecture and Tectonic Evolution of the Anatolian-African Plate Boundary and the Cenozoic Orogenic Belts in the Eastern Mediterranean Region. *Geological Society of London Special Publication*, 327: 127-160.
- Dioh, E., Béziat, D., Grégoire, M. and Debat, P., 2009. Origin of rare earth element variations in clinopyroxene from plutonic and associated volcanic rocks from the Foulde basin, Northern

با فرض این که فشار حاکم در زمان تبلور کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی، فشار همه‌جانبه لیتواستاتیک ناشی از وزن سنگهای بالایی بوده است، با استفاده از رابطه $P = \rho \cdot h \cdot g$ می‌توان نسبت تغییرات عمق (h) متناسب با تغییرات فشار را محاسبه کرد. البته فشارهای تکتونیکی نیز تأثیرگذار هستند، اما از آن جا که اهمیت و اثر آنها در مقایسه با فشار لیتواستاتیک ناچیز است، می‌توان از آن صرف نظر کرد (شواهد پتروگرافی نبود استرس‌های جهت‌دار در زمان تبلور را تأیید می‌کند). چگالی (ρ) سنگهای سازنده پوسته قاره‌ای در حدود 2/7 گرم بر سانتی‌متر مکعب است. اگر از افزایش چگالی سنگها نسبت به عمق و همچنین کاهش شتاب گرانی با افزایش عمق، صرف نظر شود و با تقریبی مناسب، چگالی سنگهای پوسته و شتاب گرانی زمین ثابت (9/81 متر بر

- Kedougou inlier, Senegal, West Africa. *European Journal of Mineralogy*, 21(5): 1029-1043.
- Droop, G.T.R., 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51(361): 431-435.
- Emami, M.H., 1981. *Geologie de la région de Qom-Aran (Iran), Contribution à l' étude dynamique et géochimique du volcanisme tertiaire de l'Iran central*. Ph.D. these, Université de Grenoble, France, 489 pp.
- Ghadami, G., Moradian, A. and Mortazavi, M., 2008. Post-collisional Plio-Pleistocene adakitic volcanism in Central Iranian volcanic belt: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 19(3): 223-235.
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of Cenozoic active continental margin of Central Iran (Sharebabak area), Kerman province. Ph.D. thesis, University of California, Los Angeles, USA, 204 pp.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77(1): 185-264.
- Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3-4): 433-447.
- Khodami, M., 2009. Petrology of Plio-Quaternary volcanic rocks in south-east and north-west of Isfahan. PhD Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 174 pp (in Persian with English abstract).
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1-2): 277-279.
- Le Bas M.J., 1962. The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267-288.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 139-154.
- Lindsley, D.H., 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 68(5-6): 477-493.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, G., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Ndariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N. and Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105(B3): 5695-5719.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. and Tealeb, A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International*, 155(1): 126-138.
- Mendenhall, W. and Sincich, T., 2011. *A Second Course in Statistics: Regression Analysis*. Pearson, USA, 816 pp.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G., 2012. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley, New Jersey, 646 pp.
- Morimoto, N. and Kitamura, M., 1983. Q-J diagram for classification of pyroxenes. *Journal of the Japanese Association of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 78: 141.
- Morimoto, N., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *Canadian Mineralogist*, 27(1): 143-156.
- Nakamura, D., 2009. A new formulation of garnet-clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(7): 495-508.
- Nimis, P.A., 1995. A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystal-structure modeling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 121(2): 115-125.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotite. Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541-554.
- Nimis, P. and Ulmer, P., 1998. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. 1. An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic

- systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1-2): 122-135.
- Omrani, J., Agard, P., Witechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3-4): 380-398.
- Otonello, G., 1997. *Principles of geochemistry*. Columbia University Press, New York, 894 pp.
- Putirka, K., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61-120.
- Putirka, K., Johnson, M., Kinzler, R. and Walker, D., 1996. Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(1): 92-108.
- 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.
- Sayari, M., 2012. APG: An efficient software program for Amp-Pl thermobarometry based on graphical method. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 22(4): 345-349.
- Sayari, M., 2015. Petrogenesis and evolution of Oligocene-Pliocene volcanism in the central part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (NE of Isfahan). Ph.D Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 195 pp (in Persian with English abstract).
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2014. SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry. *Italian Journal of Geosciences* 133(2): 315-322.
- Sayari, M., Sharifi, M. and Ahmadian, J., 2014a. Determining magmatic series and oxygen fugacity of volcanic rocks in the east of Kamu (North of Esfahan) based on biotite chemistry. *Journal of Economic Geology*, 6(1): 149-161 (in Persian with English abstract).
- Sayari, M., Sharifi, M. and Tabatabaei Manesh, S.M., 2014b. Thermo-barometry of amphibole-plagioclase phenocrysts in volcanic rocks in the east of Kamu, north of Isfahan province (middle part of the Central Iranian volcanic belt). *Petrology*, 18(5): 93-104 (in Persian with English abstract).
- Spear, F.S., 1995. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Mineralogical Society of America, Washington D.C., 799 pp.
- Vieten, K. and Hamm, H.M., 1978. Additional notes on the calculation of the crystal chemical formula of clinopyroxenes and their contents of Fe³⁺ from microprobe analyses. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 2: 71-83.
- Zahedi, M., Amidi, S.M. and Zohrebakhsh, A.M., 1981. Geological map of Kashan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.



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)

Mohammad Sayari* and Mortaza Sharifi

Department of geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Submitted: Aug. 29, 2014

Accepted: Mar. 16, 2015

Keywords: *Clinopyroxene, Thermobarometry, Volcanic rocks, Ghohrud*

Introduction

Volcanic rocks with a porphyritic texture have experienced two crystallization stages. The first is slow, resulting in phenocrysts, and the second, which took place at, or near the surface, or during intrusion into a cooler body of rock, result in a groundmass of glass, or fine crystals. The pressure and temperature history of a magma during crystallization is recorded in the chemical composition of the phenocrysts during both stages. These phenocrysts provide valuable data about the physicochemical conditions of the parent magma during the process of crystallization. The composition of clinopyroxene (cpx) reflects not only the chemical condition and therefore the magmatic series, but also the physical conditions, i.e., temperature and pressure of a magma at the time when clinopyroxene crystallized.

The Ghohrud area lies in the middle part of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, which is part of a much larger magmatic province extending in a vast region of convergence between Arabia and Eurasia north of the Zagros-Bitlis suture zone (Dilek et al., 2010). In the Ghohrud area, north of Isfahan, exposed Eocene volcanic rocks belong to the first pulse of Cenozoic volcanism of Iran (Sayari, 2015), ranging in composition from andesitic basalt to basalt. The basaltic rocks of the Ghohrud area are composed mainly of plagioclase phenocrysts surrounded by smaller crystals of clinopyroxene in a groundmass of microlites, glass and opaques. In this study, the clinopyroxene and plagioclase of these rocks were analyzed in order to estimate the

physicochemical conditions of the parent magmas.

Results

Clinopyroxene and plagioclase phenocrysts of nineteen samples were analyzed with the electron microprobe. The chemical compositions of the clinopyroxenes were used to estimate both the chemical evolution and temperature and pressure conditions of the magmas during crystallization, using SCG, a specialized software for clinopyroxene thermobarometry (Sayari and Sharifi, 2014). Microprobe analyses show that plagioclases in the Eocene basaltic rocks are labradorite-bytownite ($An_{85-58}Ab_{15-41}$) and clinopyroxenes are augite ($En_{41-49}Di_{29-38}Fs_{17-26}$). The compositions of the clinopyroxenes indicate a tholeiitic affinity for the magma. After plotting the cpx thermobarometry results on a P-T diagram, and applying a linear regression, an equation of P-T describing the physical conditions of the ascending magma was obtained.

Discussion

Several complex thermobarometry equations used to estimate T and P of cpx have been introduced to the Society of Petrology by different researchers (e.g., Sayari, 2012; Sayari and Sharifi, 2014; Putirka et al., 1996; Nimis and Ulmer, 1998; Putirka, 2008). Ten well-known barometric and six thermometric equations developed for clinopyroxene were tested for the analyzed samples with the aid of SCG, and then the equations giving the best match were selected and integrated to estimate contemporaneous P and

*Corresponding authors Email: m.sayari@gmail.com

T. According to the systematic cpx-thermobarometry calculations done with SCG software, it was inferred that the clinopyroxenes crystallized over a range of 1120-1170 °C and a range of pressure of 2-6 kbar.

The results of the cpx-thermobarometry were then plotted on a P-T diagram and a linear regression was used to find a function describing P and T for clinopyroxenes. The equation of the regression line is:

$$P \text{ (kbar)} = 0.0846T \text{ (}^\circ\text{C)} - 93.128$$

The equation has a high coefficient of determination parameter (R^2), making it reliable to determine the rate of T-loss against P-reduction. By assuming that the pressure on the magma was lithostatic due to the weight of overlying rocks, and considering the density of continental crust of about 2.7 gr/cm³, this equation shows that while magma was ascending while the clinopyroxenes were crystalizing, pressure was decreasing at a rate of about 84.6 bar per 1 °C temperature loss. This pressure loss indicates a rise of about 320 m in the continental crust.

Acknowledgements

The authors would like to thank the University of Isfahan, and Dr. Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh for his help for doing microprobe analyses.

References

- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52(4-6): 536-578.
- Nimis, P. and Ulmer, P., 1998. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. 1. An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1-2): 122-135.
- Putirka, K., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61-120.
- Putirka, K., Johnson, M., Kinzler, R. and Walker, D., 1996. Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(1): 92-108.
- Sayari, M., 2012. APG: An efficient software program for Amp-Pl thermobarometry based on graphical method. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 22(4): 345-349.
- Sayari, M., 2015. Petrogenesis and evolution of Oligocene-Pliocene volcanism in the central part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (NE of Isfahan). Ph.D Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 195 pp (in Persian with English abstract).
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2014. SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry. *Italian Journal of Geosciences* 133(2): 315-322.