

فشار و دماسنجی سنگ‌های ماگمایی چلوان با استفاده از کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، پلاژیوکلاز، پیروکسن، شمال شهرکرد، پهنه سنندج - سیرجان

مریم آهنکوب

استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

نویسنده مسئول: * m.ahankoub@pnu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱۱

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۴

چکیده

منطقه مورد مطالعه در ۴۵ کیلومتری شمال شهرکرد و در نزدیکی روستای چلوان در بخش میانی پهنه ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است. ستون چینه‌شناسی منطقه عبارت‌اند از: کربناته‌های کرتاسه، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک، و سنگ‌های ولکانیک. مطالعات پتروگرافی سنگ‌های ولکانیکی دال بر حضور سنگ‌های آذرین تیپ آندزیت، آندزیتیک‌بازالت و بازالت با کانی‌های اصلی الیون، پیروکسن، پلاژیوکلاز و آمفیبول، همراه با بیوتیت و کانی‌های فرعی اسفن، آپاتیت و کدر که دارای بافت غالب میکرولیتیک پورفیری و پورفیری هستند. نتایج آنالیز شیمی فنوکریست‌های پیروکسن شاهدهی بر حضور پیروکسن‌های نوع اوژیت با طیف ترکیب شیمیایی $FS_{12.52-17.38}$ تا $Wo_{36.92-39.67} En_{42.71}$ است که در طیف دمای ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و گستره فشار ۶ تا ۱۰ کیلو بار تشکیل شده‌اند. آمفیبول‌ها چلوان از نوع منیزوپه‌ورنیلندهای هستند که در فشار ۲/۷ تا ۵ کیلو بار و دمای ۷۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تبلور یافته‌اند میکاهای این منطقه از نوع منیزو بیوتیت‌های اولیه ماگمایی هستند که در دمایی ۵۸۰ تا ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. ترکیب پلاژیوکلازها از اولیوکلز تا لابرادوریت در نوسان بوده و شاهدهی بر دمای تبلور ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند. تلفیق داده‌های آنالیز شیمی کانی‌ها سنگ‌های آذرین چلوان به موقعیت تکتونیکی ماگمای کالکوالکان اشاره دارد که در یک زون در حال فرو رانش تشکیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بیوتیت، پیروکسن، آمفیبول، پلاژیوکلاز، چلوان، پهنه سنندج- سیرجان

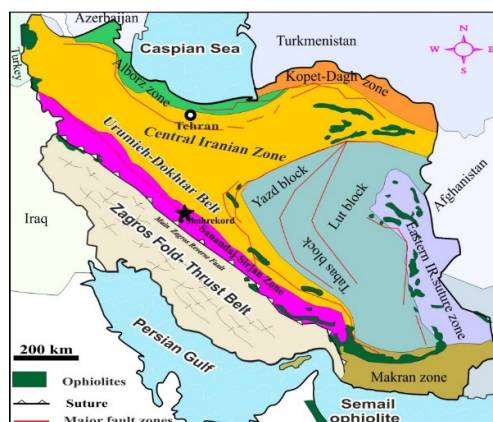
۱- پیشگفتار

منطقه چلوان در بخش میانی پهنه زمین‌ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در حاشیه رودخانه زاینده‌رود و در ۴۵ کیلومتری شمال شهرکرد، در نزدیکی روستای چلوان و در موقعیت طول‌های جغرافیایی $50^{\circ}55'21''/8$ تا $50^{\circ}55'22''/7$ و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ}29'12''/1$ تا $32^{\circ}29'10''/67$ واقع شده است (زاهدی و رحمتی ایلخچی، ۱۳۷۲) (شکل ۲). در برخی گزارشات به حضور سنگ‌های آتشفشانی، سنگ‌های دگرگونی درجه پایین تیپ شیبست و آثاری از فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی سنگ‌های دیابازی و آگلومرا، با ساخت بالشی در شمال شهرکرد اشاره شده است (سودر، ۱۹۵۴). همچنین مطالبی در خصوص پتانسیل‌ها و ناهنجاری‌هایی از طلا، سرب و مس در اطراف و نزدیکی توده‌های آتشفشانی شمال شهرکرد گزارش شده است (آهنکوب و همکاران، ۲۰۲۲؛ کوثری، ۱۹۹۰). همچنین رخنمون‌های از واحدهای پرمین در شمال شهرکرد مشاهده شده است (زاهدی و رحمتی

ایلخچی، ۱۳۷۲). به نظر می‌رسد توالی‌های ژوراسیک شمال شهرکرد دارای مجموعه‌ای از واحدهای شیل و ماسه‌سنگ با میان لایه‌های آهک و ولکانیک می‌باشند (زاهدی و رحمتی ایلخچی، ۱۳۷۲). حضور فعالیت‌های ولکانیکی در این منطقه منجر به رخداد درجات پایین دگرگونی ناحیه‌ای (رخساره پرهینت- آکتینولیت) شده است (داودیان، ۱۳۷۲). این ولکانیک به روش $^{40}Ar/^{39}Ar$ تعیین سن شده و سنی معادل ۱۴۵ تا ۱۶۹ میلیون سال برای آن‌ها تعیین شده است (امامی، ۱۳۸۷). کانی‌های مافیک بیوتیت، پیروکسن و آمفیبول اغلب از انتخاب‌های مهم در مطالعات شیمی کانی‌های سنگ‌های آذرین به شمار می‌روند. عناصر موجود در این کانی‌ها از یک طرف و حساسیت این عناصر به حرارت و فشار از طرف دیگر منجر شده تا از این کانی‌ها بتوان برای تخمین تغییر تحولات ماگمایی و همچنین تخمین دما و فشار تبلور این کانی‌ها استفاده کرد (جیانگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ لالوند و استون، ۲۰۰۰؛ لی‌باس، ۱۹۶۲؛ لثیر و همکاران، ۱۹۸۲؛ بکولوا و همکاران، ۱۹۸۹؛ پاتریک و همکاران، ۲۰۰۵).

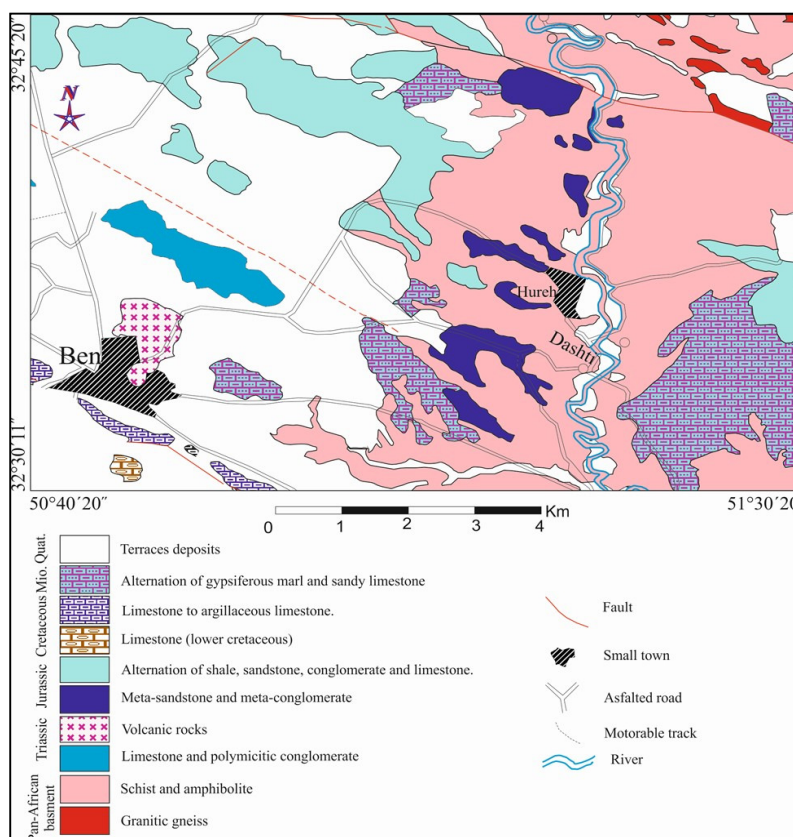
قابل مشاهده می‌باشد. از آنجاییکه تاکنون مطالعات دقیق و جامعی بر روی شیمی کانی‌های این سنگ‌ها صورت نگرفته است در این نوشتار به بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و پلاژیوکلاز پرداخته شده است تا بتوان دما، فشار و موقعیت تکتونیکی سنگ‌های ماگمایی چلوان تعیین گردد.

همچنین نتایج آنالیز شیمی پلاژیوکلازها نیز در تعیین فرایندهای سازوکار رشد بلوری، تکامل ماگمایی و فرایندهای مرتبط با اتاق ماگمایی، می‌تواند اطلاعات با ارزشی در اختیار محققان قرار دهد (موریموتو، ۱۹۸۸؛ اوکی و شیبا، ۱۹۷۳؛ سوسوف ۱۹۹۷؛ برتراند و مرسیرف ۱۹۸۵؛ نیمیس و تیلور، ۲۰۰۰). رخنمون‌های از سنگ‌های ماگمایی ولکانیک در نزدیکی روستای چلوان



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ساختاری ایران (شبابیان و همکاران، ۲۰۱۸).

Fig. 1. location of the study area in Iran structural map (shabnian et al., 2018)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (داوودی و همکاران، ۲۰۱۵).

Fig. 2. Geology map of study area (Davoodi et al, 2015)

۲- روش تحقیق

پس از مطالعات صحرایی و برداشت نمونه‌های سالم واحدهای آتشفشانی، بیش از ۴۸ نمونه از منطقه جمع‌آوری و مقطع نازک تهیه و بررسی شد. بدنبال مطالعات سنگ‌نگاری، جهت مطالعه شیمیایی کانی‌های موجود، ۴ نمونه سنگ انتخاب و ۴۵ نقطه شامل ۱۰ نقطه پلاژیوکلاز، ۱۵ نقطه آمفیبول، ۱۰ نقطه بیوتیت و ۱۰ نقطه پیروکسن تحت آنالیز الکترومیکروپروب قرار گرفتند. تجزیه نقطه‌ای کانی‌های مورد نظر در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، با استفاده از دستگاه EPMA، مدل SX100 ساخت شرکت Cameca کشور فرانسه با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ KV و شدت جریان ۲۰ nA انجام شده است. در این مقاله تفکیک Fe^{2+} و Fe^{3+} کانی‌های آمفیبول بر اساس روش (دراپ، ۱۹۸۷) صورت گرفته است. همچنین فرمول ساختاری بیوتیت‌ها بر اساس ۲۲ اکسیژن ساختاری محاسبه شده و تفکیک آهن دوظرفیتی و سه‌ظرفیتی بر اساس روش (دیمک، ۱۹۸۳) انجام گرفته است. فرمول ساختاری پلاژیوکلازها و پیروکسن‌ها به ترتیب بر اساس ۸ و ۶ اتم اکسیژن محاسبه و در بررسی داده‌ها از نرم‌افزارهای اسپریت‌شیت استفاده شد. در نهایت با استفاده از نمودارهای تجربی و با کمک نرم‌افزارهای پترولوژیکی (Iqpet, GCDKit, Exel)، داده‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۳- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در بخش میانی کمربند کوهزایی زاگرس، در پهنه زمین‌ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است (اشتوکلین، ۱۹۶۸). تصور می‌شود که این پهنه در مرز بین صفحات ایران و عربی می‌باشد، که در حقیقت بخشی از زنجیره کوهستانی آلپ- هیمالیا، با طول حدود ۲۰۰ کیلومتر NW- SE بوده که از شرق ترکیه (گسل آناتولی شرقی) آغاز و به خط عمان در جنوب ایران پایان می‌یابد. دانشمندان معتقدند، این کمربند محصول پیچیده جدایش صفحه قاره‌ای ایران در موزوئیک آغازین از باقی‌مانده ابرقاره گندوانا باشد که به واسطه فرورانش با شیب شمال شرقی پوسته اقیانوس جدیدالتشکیل نووتیس به زیر قاره ایران و تصادم متعاقب آن بین صفحات ایران و عربی همراه بوده، مشخص می‌شود

(کرافورد، ۱۹۷۲؛ علوی، ۱۹۸۰؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). در منطقه چلوان، واحدهای سنگی پرمین شامل لایه‌های ضخیم تا توده‌ای با ستبرای متجاوز از چند ده سانتی‌متر سنگ‌آهک‌هایی به رنگ خاکستری روشن تا سفید، و همچنین سنگ‌های آهکی خاکستری تیره به ضخامت ۳۰-۵ سانتی‌متر می‌باشند. واحدهای ژوراسیک شامل شیل‌های سیاه و ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های آهک کمی دگرگون‌شده هستند. واحدهای کرتاسه با رخساره سنگ‌شناسی کربناته به رنگ خاکستری روشن تا کرم، و واحدهای تخریبی-کربناته، واحد آهکی، سنگ‌آهک‌رس‌دار و سنگ‌آهک‌ماسه‌ای ضخیم لایه تا توده‌ای رخمون‌دارند. کنگلومرایی ائوسن به طور دگرشیب بر روی سنگ‌آهک‌های کرتاسه قرار گرفته‌اند. واحدهای میوسن با ضخامت متغیر ۱۰ تا ۲۰ متر با فسیل خارپوست اسکوئلا به صورت تناوبی از مارن‌های سبز متمایل به خاکستری سنگ‌آهک‌های ماسه‌ای خاکستری تا کرم‌ژپیس‌دار با شیبی در حدود ۵-۱۰ درجه و با دگرشیبی زاویه‌دار بر روی واحدهای قدیمی‌تر و زیر رسوبات سخت‌نشده‌ی کواترنری قرار می‌گیرد. نهشته‌های کواترنری شامل پهنه‌های رسی، سیلتی، واریزه‌های دامنه‌ای، تراس‌های رودخانه‌ای جوان و تراس‌های رودخانه‌ای قدیمی می‌باشند (زاهدی و ایلخچی، ۱۳۷۲). علاوه بر سنگ‌های رسوبی-تخریبی و دگرگونی، سنگ‌های ماگمایی توده‌ای و دایکی در منطقه چلوان قابل مشاهده هستند. این سنگ‌ها اغلب با رنگ‌های سبز تیره تا خاکستری و سیاه با رخمون برجسته و مرز شارپ با واحدهای رسوبی میزبان، دیده می‌شوند (شکل ۳). آندزیت‌ها در نمونه‌های ماکروسکوپی دارای ساخت متراکم و با رنگ خاکستری تیره تا سبز مشاهده می‌شوند.

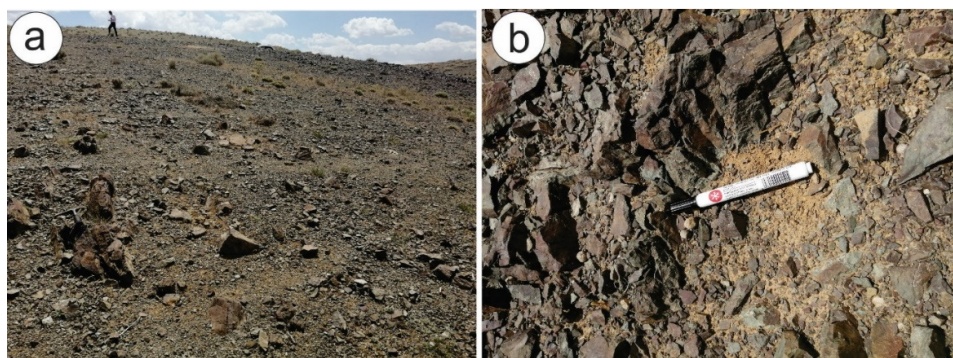
۴- سنگ‌نگاری

ولکانیک‌های منطقه با رنگ‌های خاکستری تیره تا سبز با بافت پورفیری تا هیالوپورفیری در برخی قسمت‌ها میکرولیتیک دیده می‌شوند. پتروگرافی این سنگ‌ها شاهدهی بر حضور سنگ‌های با ماهیت بازالت، آندزیتیک بازالت و آندزیت در منطقه می‌باشد. در ذیل مختصری از ویژگی‌های آن‌ها آورده شده است.

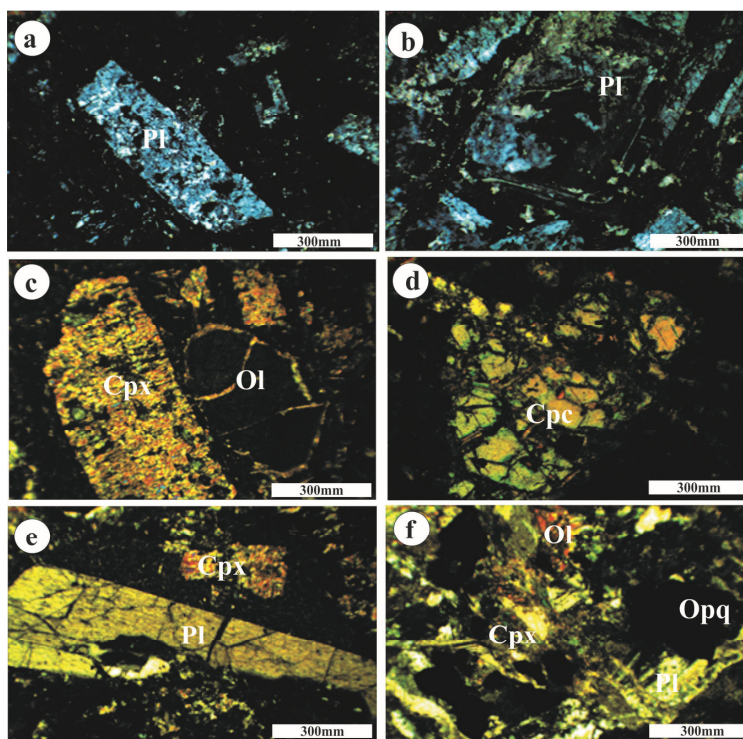
۴-۱- آندزیت‌ها: این سنگ‌ها با بافت پورفیری و میکرولیتی حاوی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (تا ۶۰

می‌شود. در برخی قسمت‌ها در نتیجه سوسوریتی شدن، کانی‌های مانند کلسیت، کلریت، اپیدوت، پره‌نیت، آلبیت و کانی‌های رسی، یا در درون پلاژیوکلازها باقیمانده و یا در فضای بین بلورهای اولیه تجمع پیدا کرده‌اند. آندزیت‌ها اغلب دارای مجموعه کانی‌های ثانویه شامل کانی‌های روشن کلسیت، کوارتز و کانی‌های تیره بیوتیت، کلریت و کانی‌های کدر می‌باشد. در این نمونه‌ها پلاژیوکلازها دارای ماکل پلی‌سنتیک می‌باشد (شکل ۴a,b).

درصد) و پیروکسن (تا ۳ درصد) در زمینه دانه‌ریز و میکرولیتی از بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و اپاک دیده می‌شوند. در این نمونه‌ها آمفیبول (تا ۱۸ درصد)، بیوتیت (تا ۵ درصد)، تیتانیت و کانی‌های ثانویه حاصل دگرسانی حضور دارد. پلاژیوکلاز عمده کانی تشکیل‌دهنده آندزیت‌های مورد مطالعه می‌باشد. این کانی اکثراً به صورت فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و همچنین به صورت میکرولیت مشاهده می‌شوند. سوسوریتی شدن در پلاژیوکلازهای کم و بیش رویت



شکل ۳. تصاویر از واحدهای آذرین چلوان
Fig. 3. View of Chelvan magmatic rocks



شکل ۴. (a, b) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در نمونه آندزیتی و آندزیتیک بازالت، (c, d) بلورهای پیروکسن و الیون در آندزیتیک بازالت، e, f: پلاژیوکلاز، الیون و پیروکسن در بازالت‌های مورد مطالعه.

Fig. 4. a, b) Plagioclase phenocrysts in andesite and basaltic andesite samples, c, d) Pyroxene and olivine crystals in basaltic andesite, e, f: Plagioclase, olivine and pyroxene in the studied basalts

منشورهای کوتاه، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار، به رنگ کرم مایل به زرد تا آبی و بنفش و بدون زونینگ در سنگ ظاهر شده‌اند. بعضی الیوین‌ها ایدنگزیتی شده‌اند. ایدنگزیت محصول متداول و گسترده در دگرسانی ماگمای دمای بالا می‌باشد (شلی، ۱۹۹۳). ایدنگزیتی‌شدن به طور متداول در الیوین‌هایی با غنی‌شدگی از آهن (فایالیت) رخ می‌دهد (دیر و همکاران، ۱۹۹۱). در این نمونه‌ها اورالیتی‌شدن پیروکسن‌ها و سوسوریتی‌شدن پلاژیوکلازها همراه با کانی‌های کدر به وفور قابل رویت می‌باشد (شکل ۴e,f).

۵- مینرال شیمی

نتایج آنالیز شیمی کانی‌های پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و پلاژیوکلازها نمونه‌های آندزیتیک بازالت چلوان به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۴ آورده شده است.

۴-۲- آندزیتیک- بازالتی: حاوی تا ۶۰ درصد فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، ۲۰٪ حجمی آمفیبول و تا ۵٪ حجمی پیروکسن به عنوان کانی‌های اصلی هستند که در متن ریز تا متوسط بلوری از همین کانی‌ها دیده می‌شوند. بافت این سنگ‌ها غالباً بافت پورفیری تا گلوپورپورفیری می‌باشد. اگرچه بافت میکروولیتی نیز قابل مشاهده است. کانی‌های کدر همراه با کانی‌های ثانویه سریسیت، اپیدوت، کلسیت، کلریت و کوارتز ناشی از دگرسانی پلاژیوکلاز و اورالیتی‌شدن پیروکسن‌ها به وفور قابل مشاهده هستند (شکل ۴c,d).

۴-۳- بازالت: حاوی بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز (تا حدود ۶۰٪ حجمی)، هم به صورت فنوکریست و هم میکروولیت، پیروکسن (تا حدود ۱۰ درصد) و الیوین (تا حدود ۱۰٪ حجمی) می‌باشد. فنوکریست‌های پیروکسن در اغلب مقاطع به صورت

جدول ۱. نتایج آنالیز الکترومیکروپروب پیروکسن‌های سنگ‌های آذرین چلوان

Table 1. EMPA result of the Pyroxens of the Chelvan magmatic rocks

analysis No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	49.38	49.21	48.28	48.91	49.52	52.88	53.09	53.04	53.28	52.9
TiO ₂	0.69	0.68	0.62	0.71	0.69	0.63	0.6	0.66	0.52	0.53
Al ₂ O ₃	0.98	0.84	0.86	0.89	0.91	1.88	1.89	1.68	1.99	1.78
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.12	0.01	0.06	0.22
FeO	10.58	10.62	10.72	10.78	10.91	10.51	9.87	9.68	9.24	8.25
MnO	0.21	0.28	0.23	0.24	0.21	0.22	0.26	0.24	0.2	0.16
MgO	15.23	15.68	15.91	15.62	15.38	15.32	15.58	15.77	15.54	15.91
CaO	18.91	18.93	18.84	18.24	18.45	18.09	18.66	18.45	17.94	18.74
Na ₂ O	0.28	0.31	0.34	0.29	0.28	0.4	0.35	0.32	0.34	0.32
K ₂ O	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0	0
NiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	0.01	0.01	0.09	0.09	0.02
Total	99.98	99.97	99.78	99.89	99.81	99.97	100.44	99.94	99.2	98.83
Structure formula on the basis of 4 oxygen atoms										
Si	1.84	1.82	1.82	1.80	1.80	1.96	1.96	1.97	1.98	1.97
Al ^{vi}	0.042	0.041	0.039	0.038	0.047	0.045	0.041	0.039	0.066	0.048
Al ^{iv}	0.037	0.041	0.035	0.022	0.032	0.037	0.041	0.035	0.021	0.037
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Ti	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Fe ⁺²	0.31	0.3	0.3	0.3	0.28	0.33	0.3	0.3	0.3	0.25
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.89	0.94	0.92	0.95	0.94	0.83	0.85	0.84	0.85	0.89
Ca	0.81	0.82	0.79	0.81	0.82	0.72	0.75	0.73	0.73	0.73
Na	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4	4	4	4	4	4	4	3.99	3.97	3.98
Wo	37.82	38.10	38.2	38.9	37.85	37.87	38.16	38.3	37.69	39
En	46.01	46.02	46.01	45.98	45.99	44.65	44.34	45.63	45.43	46.08
Fs	17.48	17.45	16.89	16.98	16.97	17.48	16.2	16.07	15.58	13.72
Alz	1.86	1.60	1.70	1.13	1.57	1.87	1.59	1.71	1.13	1.55
Barometer (and thermometer) based on Cpx compositions only Putrika (2008) RiMG										
P	6.90	6.50	7.84	7.78	7.24	7.94	6.94	6.58	8.12	6.48
T	1188	1190	1190	1191	1189	1192	1184	1179	1194	1192

محاسبه پیروکسن‌ها بر اساس ۶ اتم اکسیژن محاسبه شده است (پاتریکا، ۲۰۰۸).

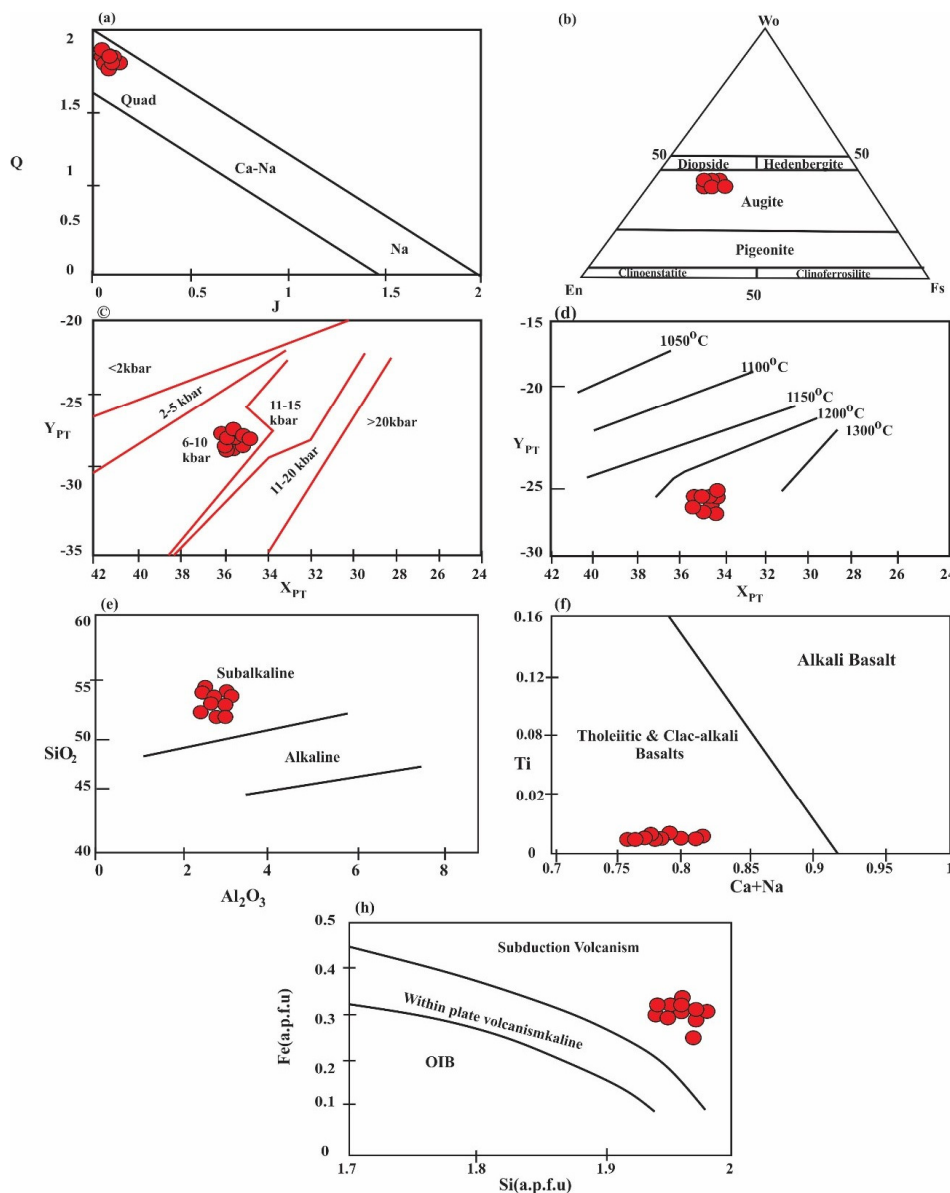
۵-۱- پیروکسن‌ها

این کانی‌ها در نمودار Wo-En-Fs در محدوده اوژیت قرار می‌گیرند. J و Q در این نمودار به ترتیب شامل $Ca+Mg+Fe^{+2}$ و $2Na\pm R^{+}$ (R: Al, Fe^{+3} , Cr^{+3} , Sc^{+3}) می‌باشد (شکل ۵b). بر اساس فرمول ساختاری پیروکسن،

نتایج شیمی پیروکسن‌های چلوان در جدول ۱ ارائه شده است. پلات این داده‌ها در نمودار Q-J شاهدی بر کلسیم-منیزیم-آهن‌دار بودن پیروکسن‌ها می‌باشد (شکل ۵a).

(شکل ۵c). در طی محاسبات انجام شده در خصوص تعیین دما توسط داده‌های شیمی کانی‌های پیروکسن چلووان بر اساس روش (سوسو، ۱۹۹۷) می‌توان اذعان داشت که تبلور فنوکریست‌های پیروکسن در دمای تبلور ۱۲۰۰-۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است (شکل ۵d).

پیروکسن‌های چلووان دارای ترکیب $\text{Fs}_{12.52-17.38} \text{En}_{42.71-44.33} \text{Wo}_{36.92-39.67}$ و عدد منیزیم $\text{Mg\#}100$ (برابر با ۷۵-۷۰ می‌باشد). داده‌های شیمی کانی پیروکسن‌های مورد مطالعه در نمودار (سوسو، ۱۹۹۷) در محدوده فشار ۶-۱۰ کیلو بار قرار می‌گیرند



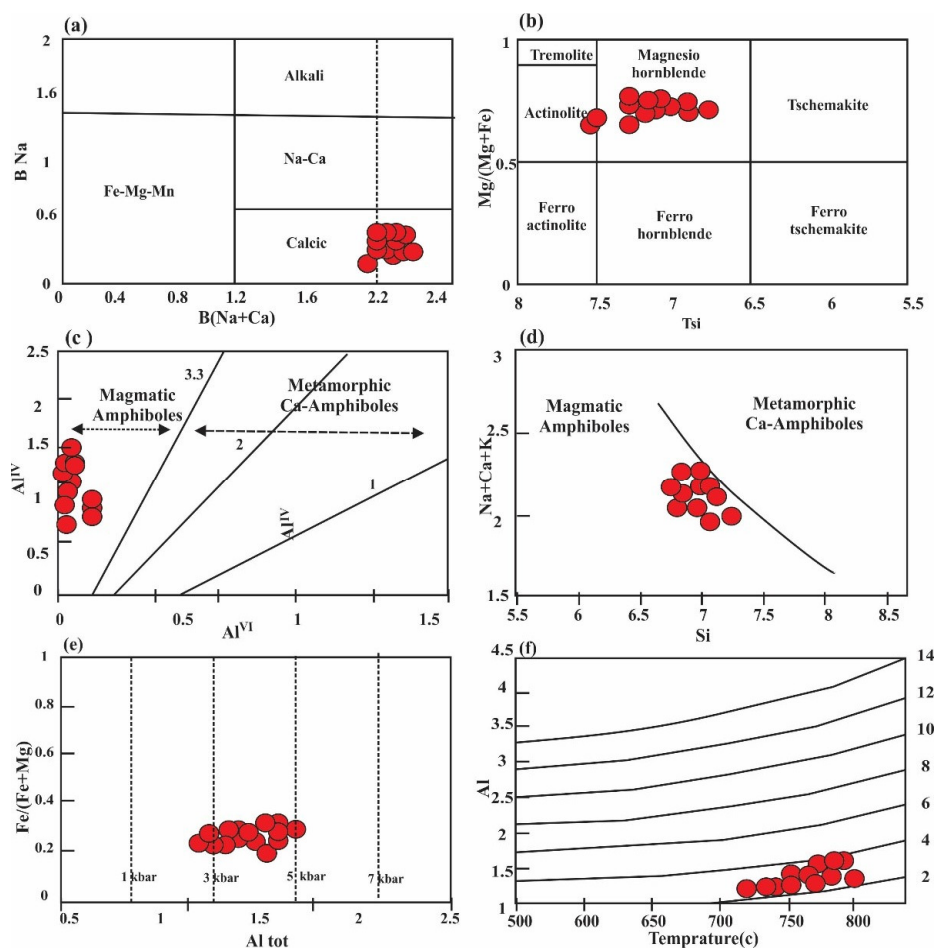
شکل ۵. (a) پیروکسن‌های سنگ‌های آذرین چلووان در محدوده پیروکسن‌های (Quad) Mg-Fe-Ca قرار می‌گیرند، $J=2\text{Na}$ ، $Q=\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Fe}+2$ ، (b): ترکیب کانی‌های پیروکسن در نمودار رده‌بندی (موریموتو، ۱۹۸۸) Fs-En-Wo ، (c) تعیین فشار پیروکسن‌ها با استفاده از نمودار (سوسو، ۱۹۹۷)، (d) تعیین دماسنجی به روش (سوسو، ۱۹۹۷)، (e) ماهیت ماگما منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج آنالیز شیمی پیروکسن‌ها در نمودار SiO_2 v.s Al_2O_3 (لی باس، ۱۹۶۲)، (f) دیاگرام Ti در مقابل $\text{Ca}+\text{Na}$ (لتریر و همکاران، ۱۹۸۲)، (g) تعیین محیط تکتونیکی در نمودار Si در مقابل Fe (آپریکو، ۲۰۱۰).

Fig. 5. a) Pyroxenes of the Azrin-Chelovan rocks are in the Mg-Fe-Ca (Quad) pyroxene range, $J=2\text{Na}$, $Q=\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Fe}+2$, (b): Composition of pyroxene minerals in the Fs-En-Wo classification diagram (Morimoto, 1988), c) Pressure determination (Soesoo, 1997), d) Thermometric determination by the method (Soesoo, 1997), e) Nature of magma on the basis of the chemical analysis of pyroxenes in SiO_2 v.s Al_2O_3 diagram (Le Ba, 1962), f) diagram Ti v.s $\text{Ca}+\text{Na}$ (Leterrier et al., 1982), g) Determination of tectonic setting in Si v.s Fe diagram (Aprico, 2010).

۵-۲- آمفیبول

نتایج آنالیز میکروپروب آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آذرین چلوان در جدول ۲ ارائه شده است. محاسبه فرمول ساختاری این کانی‌ها از روش ۱۳ کاتیونی و ۲۳ اتم اکسیژن استفاده شده است (لیک و همکاران، ۱۹۹۷). آمفیبول‌های چلوان در نمودار (لیک و همکاران، ۲۰۰۴)، همگی دارای ترکیب شیمیایی کلسیک هستند (شکل ۶a). و در نمودار (لیک و همکاران، ۲۰۰۴)، ماهیت اکتینولیت-هورنبلند و منیزیهورنبلند نشان می‌دهند (شکل ۶b).

از آنجایی که شیمی کانی پیروکسن به شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور، ترکیب شیمیایی ماگمای میزبان مرتبط است (لتریر و همکاران، ۱۹۸۲). بنابراین ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها می‌تواند اطلاعات مهمی در خصوص خاستگاه ماگمای سازنده، شرایط فیزیکوشیمیایی، ماهیت سری ماگمایی و پهنه زمین‌ساختی ارائه دهد (لریر و همکاران، ۱۹۸۲؛ مولر و همکاران، ۱۹۹۲؛ آپاریکو، ۲۰۱۰). داده‌های آنالیز شیمی پیروکسن‌های چلوان شواهدی بر ماهیت ساب‌آلکالن و کالک‌آلکالن می‌باشد (شکل ۵c, f) که در موقعیت زمین‌ساختاری فرورانش تشکیل شده‌اند (شکل ۵h).



شکل ۶. ترسیم نتایج آنالیز شیمی آمفیبول‌های چلوان در نمودار، (a) دو تایی BNa در مقابل B(Na+Ca) (لیک و همکاران، ۲۰۰۴)، (b) در نمودار دوتایی Mg/(Mg+Fe) در مقابل TSi، (لیک و همکاران، ۲۰۰۴)، (c) ترسیم نمونه‌های آمفیبول چلوان در نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} (آندرسون و اسمیت، ۱۹۹۵)، (d) نمودار Si در مقابل Na+Ca+K (فلیت و بارنت، ۱۹۷۸)، (e) نمودار Al_{Tot} در برابر Fe/(Fe+Mg) (اشمیت، ۱۹۹۲)، (f) نمودار تعیین درجه حرارت آمفیبول‌های مورد مطالعه (آندرسون و اسمیت، ۱۹۹۵).

Fig. 6. Plot the results of chemical analysis of Chelvan amphiboles in the diagram, a) Diagram of the BNa v.s B (Na+Ca) (Leake and et al., 2004), b) diagram of the Mg/(Mg+Fe) v.s TSi (Leake and et al., 2004), c) Plot of chelvan amphibole samples in the Al^{IV} v.s Al^{VI} diagram (Anderson and Smith, 1995), d) diagram Al_{Tot} v.s Fe/(Fe+Mg) (Schmidt, 1992), f) Diagram Al v.s Temperature (Anderson and Smite, 1995)

Fe+ Mg موقعیت اکتاهدرال M2 خواهد شد (اشمیت، ۱۹۹۲؛ استین و دیتال، ۲۰۰۱). به این ترتیب با افزایش فشار و دما، مقدار Al این دو موقعیت افزایش می‌یابد (ارنست و لیو، ۱۹۹۸). علاوه بر این افزایش دما، منجر به جانشینی Ti در جایگاه M2 آمفیبول می‌شود (راس، ۱۹۷۴). بر اساس محاسبات زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی (آندرسون و اسمیت، ۱۹۹۵) آمفیبول‌های چلوان در فشار ۲/۷ تا ۵ کیلو بار و دمای ۷۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند (شکل e, ۶f).

برای تعیین ماهیت نوع آمفیبول منطقه از نظر منشأ ماگمایی و دگرگونی، از نمودار Na+ K+ Ca نسبت به Si (سیال و همکاران، ۱۹۹۸) و نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} (فلیت و بارت، ۱۹۷۸) استفاده شد. در این نمودارها آمفیبول‌های مورد مطالعه ماهیت ماگمایی نشان می‌دهند (شکل ۶c,d). توزیع کاتیون‌ها در آمفیبول‌ها، در ژئوترمومتری و ژئوبارومتري اهمیت بسزایی دارد (هولاند و بلوندی، ۱۹۹۴؛ آندرسون و اسمیت، ۱۹۹۵). بنابراین با افزایش فشار میزان جانشینی Al به جای Si در آمفیبول‌های کلسیم‌دار افزایش پیدا خواهد کرد. در حالی که افزایش دما منجر به جانشینی Al در موقعیت‌های

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمی کانی‌های آمفیبول سنگ‌های آذرین چلوان
Table 2. EMPA result of Amphibol of the Chelvan magmatic rocks

Sample	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch15
SiO ₂	49.43	48.15	49.31	48.28	47.12	46.33	47.21	49.64	48.11	49.51	48.48	46.91	46.47	47.78	49.68
TiO ₂	0.32	0.28	0.26	0.55	1.22	0.31	1.15	0.75	0.27	0.38	0.54	1.13	0.37	1.11	0.74
Al ₂ O ₃	5.51	6.5	5.43	5.28	5.87	6.26	6.59	4.68	6.51	4.51	5.11	5.98	6.29	6.53	4.63
FeO	13.33	13.61	13.41	16.09	16.88	16.33	13.64	16.11	15.18	16.43	16.23	18.88	18.43	18.19	16.12
MnO	0.49	0.44	0.47	0.82	0.92	0.87	0.76	0.72	0.45	0.47	1.03	0.91	0.76	1.01	0.71
MgO	16.44	14.69	14.8	14.37	14.16	14.78	14.34	13.28	14.69	14.7	14.67	12.85	12.78	12.36	13.22
CaO	11.41	11.57	11.78	10.88	11.31	11.54	11.78	11.83	10.97	11.68	11.68	11.01	11.41	10.77	11.25
Na ₂ O	1.4	1.55	1.42	1.33	1.21	0.92	1.1	1.39	1.55	1.31	1.33	1.21	0.98	1.08	1.42
K ₂ O	0.51	0.77	0.63	0.41	0.46	0.49	0.47	0.51	0.77	0.38	0.39	0.46	0.49	0.47	0.49
Total	98.84	97.56	97.51	98.01	99.15	97.83	97.04	98.91	98.5	99.37	99.46	99.336	97.98	99.3	98.26
Cations Based on 23 Oxygen															
Si	7.11	6.99	7.18	7.25	6.84	6.82	6.83	7.21	6.99	7.12	7.08	6.84	6.78	6.93	7.13
Al ^{IV}	0.89	1.01	0.82	0.88	1	1.08	1.1	0.79	1.01	0.82	0.89	1	1.09	1.1	0.81
Al ^{VI}	0.03	0.11	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	0.12	0.11	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^T	0.93	1.12	0.94	0.88	1	1.08	1.1	0.8	1.12	0.94	0.89	1	1.08	1.1	0.79
Ti	0.02	0	0	0.06	0.13	0.04	0.12	0.08	0.02	0.02	0.06	0.13	0.04	0.12	0.08
Fe ⁺³	0.88	0.73	0.55	1.33	1.2	1.24	1.3	0.64	0.73	1.15	1.29	1.2	1.22	1.28	0.57
Fe ⁺²	1.13	0.93	1.07	0.89	1.1	1.14	0.89	1.32	0.93	1.17	1.19	1.1	1.15	0.88	1.31
Mn	0.06	0.06	0.06	0.14	0.11	0.1	0.12	0.09	0.06	0.06	0.14	0.11	0.1	0.12	0.09
Mg	3.32	3.18	3.2	2.61	2.61	2.67	2.64	2.86	3.18	2.26	2.64	2.61	2.76	2.67	2.87
Ca	1.75	1.8	1.82	1.52	1.71	1.8	1.65	1.75	1.8	1.72	1.52	1.71	1.82	1.67	1.71
Na	0.4	0.44	0.4	0.38	0.34	0.26	0.31	0.39	0.44	0.37	0.38	0.34	0.26	0.28	0.33
K	0.1	0.14	0.12	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.14	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
SUM	16.62	16.51	16.28	16.03	16.14	16.33	16.16	16.03	16.53	15.83	16.27	16.14	16.4	16.25	15.79
(Na+Ca)B	2	2	2	1.89	2	2	1.96	2	2	2	1.89	2	2	1.96	2
Na B	0.25	0.2	0.18	0.38	0.29	0.2	0.31	0.25	0.2	0.18	0.38	0.29	0.2	0.31	0.25
(Na+K) A	0.25	0.38	0.33	0.08	0.14	0.15	0.09	0.23	0.38	0.33	0.08	0.14	0.15	0.09	0.23
Mg/(Mg+Fe ⁺²)	0.75	0.77	0.75	0.75	0.70	0.70	0.75	0.68	0.77	0.66	0.69	0.70	0.71	0.75	0.69
Fe ⁺³ /(Fe ⁺³ +Al ^{VI})	0.97	0.87	0.82	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.87	0.91	0.92	0.99	0.99	0.99	0.98

۵-۳- بیوتیت

محاسبه فرمول ساختاری بر پایه روش ۲۴ اکسیژن در جدول ۳ آمده است.

نتایج آنالیز الکترومیکروپروب بیوتیت‌های چلوان پس از تفکیک مقادیر Fe^{+2} و Fe^{+3} طبق روش (دروپ، ۱۹۸۷) و

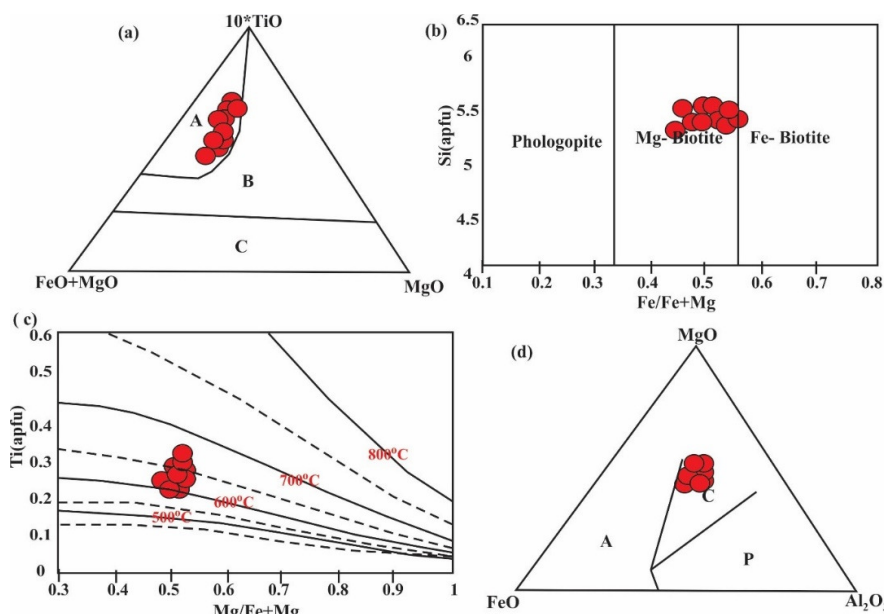
جدول ۳. نتایج آنالیز شیمی کانی‌های بیوتیت منطقه مورد مطالعه

Table 3. EMPA result of Biotite of the study area

Sample. N	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10
SiO ₂	38.11	37.85	38.41	38.77	37.75	37.11	37.43	37.87	37.82	36.48
TiO ₂	4.16	3.79	4.24	3.71	4.25	3.81	4.42	3.82	5.23	4.91
Al ₂ O ₃	13.42	13.39	13.28	13.28	13.85	14.57	13.27	14.26	13.61	13.71
FeO	17.14	17.23	17.26	16.61	19.63	21.12	18.72	20.81	17.82	19.41
MnO	0.21	0.23	0.21	0.22	0.28	0.25	0.21	0.21	0.10	0.24
MgO	14.27	14.12	14.15	14.18	12.35	12.78	12.23	12.46	12.26	12.34
CaO	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00
Na ₂ O	0.12	0.11	0.11	0.13	0.11	0.09	0.08	0.17	0.15	0.12
K ₂ O	10.18	10.28	10.54	10.42	11.41	9.72	11.53	9.21	12.04	11.43
Total	97.62	97.03	98.23	97.33	99.64	99.49	97.92	98.83	99.03	98.64
Cations Based on 22 Oxygen										
Si	5.75	5.81	5.78	5.76	5.42	5.25	5.35	5.14	5.45	5.28
Al ^{IV}	2.77	2.28	2.22	2.23	2.45	2.64	2.44	2.54	2.39	2.44
Al ^{VI}	0.17	0.11	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
Al ^T	2.94	2.85	2.91	2.30	2.45	2.64	2.44	2.54	2.39	2.44
Ti	0.53	0.37	0.36	0.36	0.51	0.39	0.51	0.43	0.58	0.51
Fe	2.42	2.24	2.13	2.08	2.47	2.73	2.39	2.60	2.23	2.45
Mn	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03
Mg	2.81	2.95	3.42	3.18	2.76	2.97	2.73	2.84	2.75	2.76
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04
K	1.98	2.01	1.99	1.99	2.18	1.92	2.24	1.76	2.29	2.21
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUM	22.69	22.09	22.02	22.03	22.35	22.64	22.32	22.61	22.24	22.35
Y _{Total}	8.68	8.02	8.03	8.01	8.21	8.77	8.10	8.90	7.96	8.19
X _{Total}	2.02	2.08	2.03	2.03	2.22	1.96	2.27	1.81	2.33	2.24
Al ^{Total}	2.92	2.65	2.29	2.30	2.45	2.64	2.44	2.54	2.39	2.44
Fe/Fe+Mg	0.48	0.46	0.41	0.40	0.47	0.48	0.47	0.48	0.45	0.47
Mn/Mn+Fe	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg#	0.62	0.59	0.61	0.60	0.53	0.52	0.53	0.52	0.55	0.53

در مقابل $Mg/Fe+Mg$ می‌توان به عنوان ژئوترموتر Ti در بیوتیت استفاده نمود. استفاده از این نمودار در خصوص بیوتیت‌های چلوان، دمای تشکیل بیوتیت‌ها ۵۸۰ تا ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است (شکل ۷c). بیوتیت‌های چلوان در نمودار سه‌تایی Al_2O_3 , MgO و FeO^T از (عبدلرحمان، ۱۹۹۴) موقعیت تکتونیکی سری ماگمایی کالک‌آلکالن (C) را نشان می‌دهد (شکل ۷d). با توجه به پایین بودن عدد منیزیم ($Mg\# < 0.66$) می‌توان اذعان داشت که بیوتیت‌های منطقه مورد مطالعه به یک ماگمای کالک‌آلکالن تحول یافته تعلق دارند (یاوز، ۲۰۰۳).

ترکیب بیوتیت‌های چلوان در نمودار سه‌تایی $FeO-MgO-Al_2O_3$ (عبدلرحمان، ۱۹۹۴) به ماهیت ماگمایی این کانی‌ها اشاره دارد (شکل ۷a) و در نمودار (فورستر و تیشندورف، ۱۹۸۹) شاهدهی بر حضور بیوتیت‌های منیزیم‌دار در منطقه می‌باشد (شکل ۷b). ژئوترموتری Ti در بیوتیت‌های سنگ‌های آذرین چلوان نشان می‌دهد بیشترین تأثیر در کنترل تیتانیوم‌های موجود در بیوتیت به دما بستگی دارد و افزایش دما منجر به افزایش مقدار تیتانیوم و افزایش فشار، منجر به کاهش آن خواهد شد. بررسی مقادیر Ti در بیوتیت چلوان (جدول ۳) نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش مقدار Fe مقادیر Ti افزایش می‌یابد (هنری و همکاران، ۲۰۰۵). از نمودار Ti



شکل ۷. (a) ترسیم بیوتیت‌های چلوان در نمودار سه‌تایی $10 \cdot \text{TiO}_2 - \text{MnO} + \text{FeO} - \text{MgO}$ (ناجیت و همکاران، ۲۰۰۵؛ b) نمودار دوتایی Si در مقابل Fe/Fe+Mg (فورستر و تیشندورف، ۱۹۸۹؛ c) تعیین دمای بیوتیت‌های چلوان با استفاده از ژئومتری Ti (هنری و همکاران، ۲۰۰۵؛ d) تعیین سری ماگمایی چلوان با استفاده از ترکیب بیوتیت‌ها (عبدلرحمان، ۱۹۹۴).

Fig. 7. a) Plot of Chelvan biotites in the ternary diagram of $\text{TiO}_2 \cdot 10 - \text{MnO} + \text{FeO} - \text{MgO}$ (Nachit et al, 2005), b) Plot of the biotites in the diagram of Si v.s Fe/Fe+Mg (Forster and Tischendorf, 1989), c) Determination of the temperature of Chelvan biotites using Ti geometry (Henry et al, 2005), d) Determination of the Chelvan magmatic series using the composition of biotites (Abdel-Rahman, 1994).

۵-۴- فلدسپار

پلاژیوکلاز کانی اصلی تشکیل‌دهنده سنگ‌های آذرین چلوان به شمار می‌رود. تعداد ۱۰ نقطه از پلاژیوکلازهای سنگ‌های ماگمایی مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت. ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها بر پایه ۸ اتم اکسیژن (دیر و همکاران، ۱۹۹۱) در جدول ۴ آورده شده است. نتایج آنالیز شیمی پلاژیوکلازها در نمودار سه‌تایی Or- Ab- An (دیر و همکاران، ۱۹۹۱) نمایانگر ترکیب الیگوکلاز تا لابرادوریت An_{24-56} می‌باشد (شکل ۸). این کانی‌ها دارای مقادیر CaO برابر ۸/۷۵ تا ۱۱/۹۵ درصد وزنی، Na_2O برابر با ۴/۷۸ تا ۶/۸۹ درصد وزنی، Al_2O_3 برابر با ۲۴/۰۶ تا ۲۶/۵۱ درصد وزنی و K_2O برابر با ۰/۱۳ تا ۰/۵۹ درصد وزنی هستند. در نمودار (الکینز و گرو، ۱۹۹۰) دمای تشکیل فلدسپارها ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شده است (شکل ۸).

۶- نتیجه‌گیری

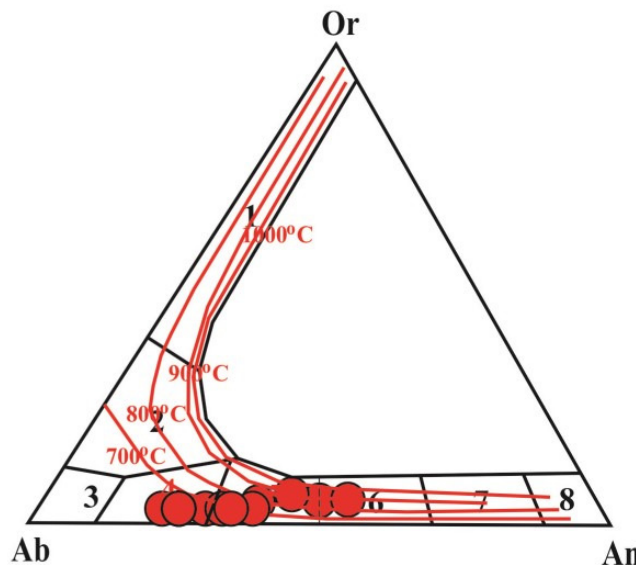
ولکانیک‌های مورد مطالعه، در نزدیکی روستای چلوان در شمال شهرکرد و در بخش میانی پهنه ساختاری سندج-سیرجان واقع شده است. این سنگ‌ها دارای طیفی از

بازالت، آندزیتیک بازالت و آندزیت با بافت پورفیری، میکرولیتیک پورفیری و هیالوپورفیری می‌باشند. کانی‌های عمده تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، الیون و پیروکسن به همراه بیوتیت، آمفیبول، کانی‌های اپاک و کانی‌های فرعی هستند. پیروکسن‌ها اغلب دارای ترکیب کلسیم-منیزیم-آهن‌دار از نوع اوژیت هستند که در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶ تا ۱۰ کیلو بار متبلور شده‌اند. همچنین آنالیز شیمی کانی‌های آمفیبول، شاهدهی بر حضور آمفیبول‌های کلسیک منیزیوهورنبلند تا اکتینولیت در منطقه می‌باشد که در دمای ۷۲۰ تا ۸۰۰ سانتی‌گراد و فشار ۲/۷ تا ۵ کیلو بار متبلور شده‌اند. آنالیز نقطه‌ای بیوتیت‌ها به بیوتیت‌های منیزیم‌دار اولیه دلالت می‌کند که در دمای ۵۸۰ تا ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد متبلور شده‌اند. پلاژیوکلازهای چلوان با ماهیت الیگوکلاز تا لابرادوریت در دمای ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد متبلور شده‌اند. بنابر داده‌های فوق، سنگ‌های ولکانیک چلوان دارای ماهیت ساب‌آلکان تیب کالک‌آلکان بوده که در موقعیت زمین‌ساختاری فرورانش تشکیل شده‌اند.

جدول ۴. نتایج تجزیه نقطه‌ای و محاسبه فرمول ساختاری پلاژیوکلازها (بر حسب ۸ اتم اکسیژن)

Table 4. EMPA result of Plagioclase

Point N.	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10
SiO ₂	55.81	59.12	56.7	55.87	57.43	57.13	57.86	59.27	58.61	56.82
TiO ₂	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.02
Al ₂ O ₃	25.98	24.11	26.37	26.31	26.51	26.39	25.85	24.09	24.06	26.33
FeO	0.54	0.47	0.37	0.57	0.28	0.22	0.34	0.46	0.38	0.35
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.05	0.01	0.01	0.04	0.05	0.01	0.09	0.05	0.05	0.01
CaO	11.95	8.75	9.84	11.84	9.38	9.48	9.22	9.08	9.13	10.1
Na ₂ O	4.93	6.23	5.97	4.78	5.82	5.61	5.63	6.24	6.89	4.79
K ₂ O	0.14	0.26	0.24	0.13	0.23	0.28	0.13	0.37	0.59	0.23
Total	99.44	99.01	99.53	99.59	99.74	99.15	99.16	99.62	99.77	98.66
Si	2.64	2.51	2.38	2.57	2.41	2.48	2.61	2.86	2.94	2.34
Al	1.53	1.24	1.38	1.51	1.28	1.31	1.26	1.19	1.25	1.42
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0
Ca	0.68	0.41	0.53	0.65	0.46	0.48	0.41	0.38	0.36	0.59
Na	0.56	0.49	0.59	0.58	0.55	0.58	0.51	0.53	0.58	0.42
K	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01



شکل ۸. ترکیب پلاژیوکلازهای چلوان در نمودار سه‌تایی (آلبیت-آنورتیت-ارتوز) (الکینز و گرو، ۱۹۹۰).

Fig. 7. Plagioclase component of the Chelvan in triplot diagram Ab-An-Or (Elkins and Grove, 1990).

References

- Abdel-Rahman, A (1994) Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas. *Journal of Petrology*, 35: 525–541.
- Ahankoub, M., Shabanian, N., Davoudian, A., Bagheri, H., Nasiri, M (2022) Geochemical and fluid inclusion studies of Au and Cu bearing veins in the Hureh area, West Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 19: 285–301. <https://doi.org/10.1127/njma/2022/0290>.
- Alavi, M (1980) Tectonostratigraphic evolution of Zagrosides of Iran. *Geology*, 8: 144–149.
- Anderson, J. L., Smith, D. R (1995) The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *American Mineralogist*, 8: 549–559.
- Aoki, K. I., Shiba, I (1973) Pyroxenes from Lherzolite Inclusions of Itinome-Gata, Japan. *Lithos*, 6: 41–51. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(73\)90078-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(73)90078-9).

- Aparicio, A (2010) Relationship between clinopyroxene composition and the formation environment of volcanic host rocks. *IUP Journal of Earth Sciences*, 4: 1-11.
- Beccaluva, L., Macciotta, G., Piccardo, G. B., Zeda, O (1989) Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator. *Chemical Geology*, 77: 165-182. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90073-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90073-9).
- Berberian, M., King, G. C. P (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science*, 18: 210-265.
- Bertrand, P., Mercier, J. C (1985) The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for natural system. *Earth and Planetary Science Letters*, 76: 109-122.
- Davdian Dehkordi, A (1993) Petrology of metamorphic rocks of northern Shahrekord, Master's thesis, University of Isfahan, 193 p.
- Davoodi, E., Shabanian, N., Davoudian, A (2015) Sedimentology of the of Zayandeh-Rood River alluvial Terraces and the sediment source identification. *Environmental Erosion Research Journal*, 5: 68-85.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J (1991) An introduction to the rock forming minerals, Longman Scientific & Technical, 528 p.
- Droop, G. T. R (1987) A general equation Fe^{3+} concentration in ferromagnesian silicates and oxygen from microprobe analysis using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431-435.
- Dymek, R. F (1983) Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses West Greenland. *American Mineralogist*, 68: 880-889.
- Elkins, L. T., Grove, T. L (1990) Ternary feldspar experiments and thermodynamic models. *American Mineralogist*, 75: 544-559.
- Emami, N (2008) Petrological investigation with emphasis on alteration zones and their evaluation in the volcanic land of northern Shahkurd, PhD thesis, Isfahan University. 311p.
- Ernst, W. G., Liu, J (1998) Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti- Contents of calcic amphibole in MORB-A semi-quantitative thermobarometer. *American Mineralogist*, 83: 952-969.
- Forster, H. J., Tischendorf, G (1989) Reconstruction of the volatile characteristics of granitoidic magmas and hydrothermal solutions on the basis of dark micas: the Hercynian Postkinematic granites and associated high-temperature mineralization of the Erzgebirge (G.D.R). *Chemie der Erde (Geochemistry)*, 49: 7-20.
- Haynes, S. J., Mcquillan, H (1974) Evolution of the zagros structure zone, southern Iran. *Geological Society of American Bulletin*, 85: 739 – 744.
- Henry, D. J., Guidotti, C. V., Thomason, J. A (2005) The Ti-substitution surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implications for geothermometry and Ti- substitution mechanisms. *American Mineralogist*, 90: 316-328.
- Holland, T. J. B., Blundy, J (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433-447.
- Kowsari, S (1980) Report on geochemical explorations in northern Hoor (Shahr-e Kord), Ministry of Mines & Metals, 45 p.
- Le Bas, M. J (1962) The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American journal of science*, 260: 267-288.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W., Youzhi, G (1997) Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, 9: 623–651.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Birch, W. D., Burke, E. A. J., Ferraris, G., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Schumacher, J. C., Stephenson, N. C. N., Whittaker, E. J. W (2004) Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *American Mineralogist*, 89: 883–887.
- Leterrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 139-154.
- Morimoto, N (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39: 55-76. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01226262>.
- Nachit, H., Ibhi, A., Abia, E. H., Ohoud, M. B (2005) Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neofomed Biotites. *Geomaterials (Mineralogy)*, Geoscience, 337: 1415- 1420.
- Nimis, P., Taylore W. R (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites; Part I: Calibration and testing of a Crin- Cpx barometer and an Enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and*

- Petrology, 139: 544-554.
<http://dx.doi.org/10.1007/s004100000156>.
- Raase, P (1974) Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 45: 231-236
- Schmidt, M (1992) Amphibole composition in tonalities as a function of pressure: an experimental calibration of the Al in hornblende barometre. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304-310.
- Shabanian, N., Davoudian, A. R., Dong, Y., Liu, X (2018) U-Pb zircon dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic ratios from Azna-Dorud Cadomian metagranites, Sanandaj-Sirjan zone of western Iran. *Precambrian Research*, 306: 41-60.
- Sial, A. N., Ferreira, V. P., Fallick, A. E., Jeronimo, M., Cruz, M (1998) Amphibole- rich clots in calc-alkalic granitoids in the Borborema province northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Science*, 11: 457-480.
- Soesoo, A (1997) A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation P-estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)*, 119: 55-60.
<https://doi.org/10.1080/11035899709546454>.
- Stein, E., Dietl, E (2001) Hornblende Thermobarometry of Granitoids of Central Odenwald (Germany) and Their Implication for the Geotectonic Development of the Odenwald. *Mineralogy and Petrology*, 72: 185-207.
- Stocklin, J (1973) Northern Iran: Alborz Mountains. Mesozoic – Cenozoic orogenic Belt, data for orogenic studies, *Geology Society of London*, 213-234p.
- Yavuz, F (2003) Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: Part II—Applications using the computer program Mica. *Computers & geosciences*, 29: 1215-1228.
- Zahedi, M. Rahmati Ilikhchi, M (1993) Geology map of the Shahrekord 1:250000, No. E8, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian with English abstract).

Thermobarometry Chelvan igneous rocks using amphibole, biotite, plagioclase, pyroxene minerals, north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan zone

M. Ahankoub

Assist. Prof., Dept., of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

* m.ahankoub@pnu.ac.ir

Received: 2025.5.14 Accepted: 2025.8.2

Abstract

The area is in 45 kilometers north of Shahrekord and near the city of Chelvan in the middle part of the Sanandaj-Sirjan structural zone. The stratigraphic column of the area consists of: Cretaceous carbonates, Jurassic shales and sandstones, and volcanic rocks. The petrographic observation of volcanic rocks indicate the presence of igneous rocks of the andesite, andesite-basalt and basalt types with the main minerals olivine, pyroxene, plagioclase and amphibole, along with biotite and minor and opaque minerals that have a dominant microlitic porphyry and porphyry texture. The results of the chemical analysis of pyroxene phenocrysts indicate the presence of augite-type pyroxenes with a chemical composition spectrum of Fs 12.52-17.38 En 42.71-Wo 36.92-39.67, which were formed in the temperature range of 1200 to 1300 degrees Celsius and a pressure range of 6 to 10 kilobars. The amphiboles are magnesian-hornblende type that crystallized at a pressure of 2.7 to 5 kilobars and a temperature of 720 to 800 degrees Celsius. The micas of this area are primary magmatic magnesian biotites that were formed at a temperature of 580 to 680 degrees Celsius, and the composition of plagioclases fluctuates from oligoclase to labradorite, indicating the crystallization temperature 700-800 degrees Celsius. The combination of mineral chemical analysis data of the Chelvan igneous rocks indicates the tectonic setting of calc-alkaline magmas that formed in a subduction zone.

Keywords: Biotite, Pyroxene, Amphibole, Plagioclase, Chelvan, Sanandaj-Sirjan Zone

Introduction

The Chelvan region is located in the middle part of the Sanandaj-Sirjan geotectonic zone. This region is located on the edge of Zayandeh-Rud and 45 kilometers north of Shahrekord, near the village of Chelvan and at the geographical longitudes of 21.8°55'50" to 22.7°55'50" and the geographical latitudes of 1.12°29'32" to 10.67°29'32". Some reports have mentioned the presence of volcanic rocks, schists, and traces of submarine volcanic activities of diabase and agglomerate rocks, with pillow formation in the north of Shahrekord. Also, some information has been reported about the potentials and anomalies of lead and copper around the volcanic masses in the north of Shahrekord. Also, outcrops of Permian units have been observed in the north of Shahrekord. It seems that the Jurassic sequences in the north of Shahrekord have a set of shale and sandstone units with limestone and volcanic interlayers. The presence of volcanic activities in this area has led to the occurrence of low degrees of metamorphism (Perthite-actinolite facies). This volcanic has been dated by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method and is estimated to be 145 to 169 million years old. Outcrops of volcanic magmatic rocks can be seen near the village of Chelvan. Since no detailed and comprehensive studies have been

conducted on the mineral chemistry of these rocks, this article examines the mineral chemistry of amphibole, plagioclase, pyroxene, and biotite. The mafic minerals biotite, pyroxene, and amphibole are often important choices in mineral chemistry studies of igneous rocks. The elements present in these minerals on the one hand and the sensitivity of these elements to temperature and pressure on the other hand have led to the fact that these minerals can be used to estimate changes in magmatic evolution and also to estimate the temperature and pressure of crystallization of these minerals. Also, the results of the chemical analysis of plagioclases can provide valuable information to researchers in determining the processes of crystal growth mechanism, magmatic evolution and processes related to the magma chamber.

Material and Method

After field studies and collection of intact samples of volcanic units, more than 48 samples from the collection area and thin sections were prepared and examined. After petrographic studies, in order to study the chemistry of the existing minerals, 4 selected rock samples and 30 points including 10 points of plagioclase, 20 points of amphibole, 10 points of biotite and 10

points of pyroxene were subjected to electron microprobe analysis. Point analysis of the target minerals was carried out in the mineralogical laboratory of the Iranian Mineral Processing Research Center, using an EPMA device, model SX100, manufactured by Cameca, France, with an accelerating voltage of 15KV and a current intensity of 20nA. In this paper, the separation of +Fe2 and +Fe3 of amphibole minerals was carried out based on the method. Also, the structural formula of biotites was calculated based on 22 structural oxygens and the separation of divalent and trivalent iron was carried out based on the method of Dymek (1983). The structural formula of plagioclases and pyroxenes was calculated based on 8 and 6 oxygen atoms, respectively, and the Minpet software was used to examine the data. Finally, the obtained data were analyzed using experimental diagrams and with the help of petrological software (Iqpet, GCDKit, Excel).

Discussion and Result

The volcanics of the region are seen with dark gray to green colors and fine-grained, porphyry to hyaloporphyry textures. The petrography of these rocks indicates the presence of rocks of basalt, basaltic andesite and andesite nature in the region. The chemical results of the Chelwan pyroxenes are presented in Table 1. The plot of these data in the Q-J diagram indicates Calcium-magnesium-iron content of pyroxenes and their augite nature. The structural formula of Chelwan pyroxene has the composition Fs 12.52-17.38 En 42.71-44.33 Wo 36.92 – 39.67. The studied pyroxene minerals are located in the pressure range of 10-6 kilobar and crystallized at a crystallization temperature of 1300-1200 degrees Celsius. Based on the chemical analysis data of Chelwan pyroxenes, it indicates the nature of subalkaline and calc-alkaline, which were formed in the subduction tectonic setting.

The results of microprobe analysis of amphiboles in Chelvan igneous rocks show that they all have a calcic chemical composition with the nature of actinolite-hornblende and magnesiohornblende. To determine the nature of the amphibole type in the region in terms of magmatic origin and metamorphism, the Na+K+Ca versus Si diagram (Sial and et al., 1998) and the AlIV versus AlVI diagram (Fleet and Barnett, 1978) were used. In these diagrams, the studied amphiboles show a magmatic nature, and also, based on geothermometric and geobarometric calculations (Anderson and Smith, 1995), the Chelwan

amphiboles were formed at a pressure of 2.7 to 5 kbar and a temperature of 720 to 790 °C. The results of microprobe analysis of Chelvan biotites after separation of Fe2+ and Fe3+ values according to the method (Droop, 1987) and calculation of the structural formula based on the 24-oxygen method indicate the magmatic nature of these minerals. (Abdel-Rahman, 1994) which are of the type of magnesium-bearing biotites. These biotites were formed at a temperature of 580 to 680 °C and in the tectonic setting of the calc-alkaline magmatic series.

Also, the plagioclases of Chelvan have a composition of oligoclase to labradorite An 24-56, which were formed at a temperature of 700 to 800 °C according to the diagram.

Conclusion

The Chelvan volcanics are located near the Chelvan village in the north of Shahrekord and in the middle part of the Sanandaj-Sirjan structural zone. The magmatic rocks of the Chelvan region have a range of compositions of basalt, basaltic andesite, andesite with porphyry and microlithic porphyry and hyaloporphyry textures. The main minerals forming the samples include Phenocrysts of plagioclase, olivine and pyroxene are accompanied by biotite, amphibole, opaque minerals and accessory minerals. The presence of minerals such as chlorite and epidote indicates the influence of aqueous and hydrothermal solutions on these rocks. Most of the phenocrysts of plagioclase and pyroxene are visible in the fine-grained to medium-grained background of plagioclase. Pyroxenes often have a calcium-magnesium-iron composition of the augite type, which crystallized at a temperature of 1200 to 1300 degrees Celsius and a pressure of 6 to 10 kilobars. Also, chemical analysis of amphibole minerals indicates the presence of calcic magnesian hornblende to actinolite amphiboles, which crystallized at a temperature of 720 to 790 degrees Celsius and a pressure of 2.7 to 5. Kilobars have crystallized. Point analysis of biotites indicates primary magnesium-bearing biotite that crystallized at temperatures of 650 to 730 degrees Celsius. Plagioclase crystals with oligoclase to labradorite nature have crystallized at temperatures of 700 to 800 degrees Celsius. According to the above data, the Chelwan volcanic rocks have a subalkaline nature of calc-alkaline type, which belongs to the subduction geotectonic situation associated with an active continental margin.