

ویژگی‌های کانی‌شناسی، طیف‌سنجی رامان و محاسبه پارامترهای بلورشناسی بیوتیت با ساختار هگزاگونال در میگماتیت و هورنفلس‌های بروجرد

شیرین تندکار، فریبرز مسعودی*

گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۳۱، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۶/۱۴)

چکیده: بیوتیت در انواع بسیار متنوعی از سنگ‌ها وجود دارد و ساختار آن می‌تواند عناصر مختلفی را در خود جای دهد. از اینرو، ترکیب بیوتیت طبیعی یک منبع ارزشمند اطلاعات در مورد شرایط تشکیل این کانی است. بیوتیت از فازهای اصلی در متاپلیت‌هاست که در گستره وسیعی از شرایط زمین‌شناسی یافت می‌شود. بررسی‌های کانی‌شناسی میکروسکوپی، طیف‌سنجی رامان و آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD) برای بیوتیت‌های هورنفلس و میگماتیت‌های هاله دگرگونی توده گرانیتوئیدی بروجرد در پهنه سندج سیرجان انجام شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که میکاها با ویژگی‌های عمومی بیوتیت، پدیده دو محوری ویژه سیستم تک میل را نشان نمی‌دهند و تک محوری هستند. الگوی XRD سیستم ششگوشی را برای این کانی نشان داد. طیف‌های رامان نیز تفاوت بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد با میکاهای شکل گرفته در دیگر سیستم‌های بلورین را به صورت افزایش شدت و جا به جایی قله‌ها در گستره 500 تا 800 cm^{-1} نشان داد. پارامترهای شبکه برای بلورهای بیوتیت‌های ششگوشی در میگماتیت و هورنفلس‌های بروجرد نیز بر اساس داده‌های پراش پرتوی ایکس تعیین شد. براساس بررسی‌های پیشین، گستره دما در سنگ‌های مورد مطالعه منطقه بروجرد 642 تا 750 درجه سانتی‌گراد است. یا بررسی تبلور میکای مصنوعی، افزایش دمای 700 درجه سانتی‌گراد علت تغییر ساختار میکا به ششگوشی است. از این رو، رخداد دگرگونی دما بالا در منطقه بروجرد تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیوتیت ششگوشی؛ پارامترهای شبکه؛ هورنفلس و میگماتیت؛ بروجرد؛ سندج سیرجان.

مقدمه

فیلسیلیکات‌ها از گروه‌های اصلی سیلیکات‌ها هستند می‌توانند خاستگاه آذرین، دگرگونی یا رسوبی داشته باشند. بیش از 240 کانی در پایگاه‌های اطلاعاتی کانی‌شناسی به‌عنوان فیلسیلیکات رده‌بندی شده‌اند. در این گروه به ویژه خانواده میکا به‌طور کلی بسیار پایدار است و کاربردهای فراوانی در علم و فناوری دارد [۱-۳].

میکا دارای یک ساختار بلوری لایه‌ای است و به‌راحتی به ورقه‌های بسیار نازک و مسطح تقسیم می‌شود. فیلسیلیکات‌های میکا به دلیل ویژگی‌های بی‌مانند، چون انعطاف‌پذیری بالا و پایداری خوب فیزیکی و شیمیایی، ماده‌ای

مناسب برای کاربردهای علمی، دما و فشارسنجی [۴،۵]، زمین‌زمان‌سنجی [۶]، ارتباط ترکیب بیوتیت با محیط‌های زمین‌ساختی [۷،۸]، تشخیص نوع کانه‌زایی [۹،۱۰] و کاربردهای صنعتی [۱۱،۱۲] هستند.

پژوهش‌های بسیاری نیز در مورد ساختار بلوری چند گون‌های خانواده میکا در سال‌های گذشته انجام شده است [۱۲-۱۷]. بیوتیت از پربحث‌ترین و قابل دسترس‌ترین کانی‌های خانواده میکاست [۱۱]. بررسی‌های پرتوی ایکس روی نمونه‌های میکا از مکان‌های مختلف زمین‌شناسی نشان می‌دهد که افزون بر تنوع در ترکیب شیمیایی، بیوتیت می‌تواند با ساختارهای مختلف متبلور شود که این موضوع کمتر بررسی

شده است.

بیوتیت در انواع بسیار متنوعی از سنگ‌ها وجود دارد و ساختار آن می‌تواند بیشتر عناصر را در خود جای دهد. طیف گسترده ترکیب بیوتیت طبیعی، آن را به یک منبع ارزشمند اطلاعات در مورد شرایط تعادل تبدیل می‌کند. تغییرات ساختاری میکاها به دلیل جایگزینی کاتیون‌ها [۱۹، ۱۸]، در دما و فشار بالا [۲۱، ۲۰] نیز بررسی شده‌اند. ساختار میکا می‌تواند تک میل، راستگوشی و یا سه گوشی و ششگوشی باشد [۲۲]. بیوتیت اغلب در شبکه بلوری تک میل با یاخته یک $a \neq b \neq c$ ، $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ، $\beta \neq 90^\circ$ متبلور می‌شود، اما مقالات بسیاری در مورد تغییرات ساختار بیوتیت ناشی از جایگزینی کاتیون‌ها و افزایش دما منتشر شده است [۲۳، ۲۱، ۲۰، ۱۵].

بررسی زمین‌شناسی منطقه بروجرد، شرایط عمومی تشکیل کانی‌ها و سنگ‌های دگرگونی و زمین‌ساخت این منطقه در پهنه سنج سیرجان برای سال‌ها موضوع پژوهش‌ها بوده است [۲۶-۲۴]. این بررسی‌های نشان دهنده پیچیدگی شکل‌گیری فعالیت ماگمایی و دگرگونی منطقه هستند. از آنجا که ویژگی‌های ساختاری کانی‌ها وابسته به شرایط فیزیکی و شیمیایی تشکیل آن‌هاست، بررسی بلورشناسی کانی‌های دگرگونی، به عنوان فازهای تشکیل دهنده سنگ‌های دگرگونی، می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از مراحل دگرگونی و شرایط تشکیل (دما فشارسنجی) کانی‌ها ارائه دهد [۲۶-۳۰].

افزون بر آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD)، طیف سنجی ارتعاشی از قدرتمندترین ابزار شناسایی ساختار مواد بوده و در سال‌های اخیر، بررسی طیفی فیلوسیلیکات رو به افزایش است [۱۱]. طیف‌سنجی رامان یک روش طیف‌سنجی ارتعاشی کارآمد است که برای توصیف ویژگی‌های مولکولی کانی‌ها به کار می‌رود. با وجود پیچیدگی ساختار میکاها و ترکیب‌های بسیار متغیر آن‌ها، طیف رامان برخی از فیلوسیلیکات‌ها با تأکید بر حالت‌های ارتعاشی اساسی شبکه و بررسی حالت‌های H_2O/OH به صورت مقاله و یا در پایگاه داده RRUFF موجود است [۳۵-۳۱].

در این پژوهش برای بیوتیت‌های هورنفلس و میگماتیت‌های هاله دگرگونی توده نفوذی بروجرد در پهنه سنج سیرجان بررسی کانی‌شناسی میکروسکوپی، طیف‌سنجی رامان و آزمون پراش پرتوی ایکس انجام شد. تشخیص بیوتیت

با ساختار غیر تک میل در این سنگ‌ها و مقایسه طیف‌های رامان و الگوهای پراش پرتوی ایکس بیوتیت ششگوشی با میکاهای تک میل تفاوت‌هایی را برای شناسایی راحت‌تر میکای غیر تک میل نشان می‌دهد. تعیین نوع میکا، به عنوان یکی از کانی‌های اصلی هورنفلس‌ها و میگماتیت‌های منطقه، می‌تواند برای بازسازی دقیق‌تر رخدادهای دگرگونی این بخش از پهنه دگرگونی سنج سیرجان به کار رود.

زمین‌شناسی عمومی

در مرز بین دو شهر اراک و بروجرد در پهنه سنج-سیرجان، در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک میانی نفوذ کرده‌اند [۳۶، ۲۵]. هاله دگرگونی رسی در منطقه‌ای با مختصات $38^\circ 33'$ تا $33^\circ 34'$ عرض شمالی و $49^\circ 30'$ تا $48^\circ 45'$ طول شرقی پیرامون توده گرانیتوئید بروجرد تشکیل شده است. دسترسی به منطقه از راه شازند، آستانه و هندودر ممکن است.

هاله دگرگونی در بخش شمالی توده نفوذی بروجرد بیشتر گسترش یافته است. در این منطقه، پگماتیت‌ها و میگماتیت‌ها نیز تشکیل شده‌اند. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، پس از بررسی شواهد صحرایی، از رخنمون‌های مناسب هاله دگرگونی در بخش‌های شمالی و میانی توده، از هورنفلس‌های متراکم تیره رنگ و میگماتیت‌ها نمونه‌برداری شد (شکل ۱ الف). توده‌ی گرانیتوئیدی بروجرد بیش‌تر ترکیب گرانودیوریتی دارد و به صورت یک توده‌ی نفوذی کشیده با سن ژوراسیک است (۱۷۰-۱۶۵ میلیون سال [۲۵]، ۱۷۲-۱۶۹ میلیون سال [۳۶]). این توده هموار و دارای برونزد کمی نمایان بوده و اغلب با مناطق آبرفتی و کشاورزی پوشیده شده است. درون این توده‌ی عظیم، توده‌های نفوذی کوچکی ظاهر می‌شوند که بیشتر دارای ترکیب کوارتزیدیوریتی هستند و گاه توده‌های بسیار روشن نیز در آن رخنمون دارند. همچنین در بخش جنوبی، توده‌های نفوذی کوچک به شکل مدور با ترکیب موونزوگرنیتی دیده می‌شوند. واحدهای مختلف سنگ‌شناسی توده‌ی گرانیتوئیدی مورد بررسی با دایک‌های اسیدی، بازی و حد واسط متعددی قطع شده‌اند [۳۶].

به تازگی قاسمی سیانی و همکاران [۳۷] پگماتیت‌های ملایر-بروجرد-شازند را از نظر سنی به سه گروه تفکیک کردند. گروه نخست پگماتیت‌های برآمده از ذوب بخشی و جایگیری در بخش‌های بالایی پوسته، گروه دوم پگماتیت‌های

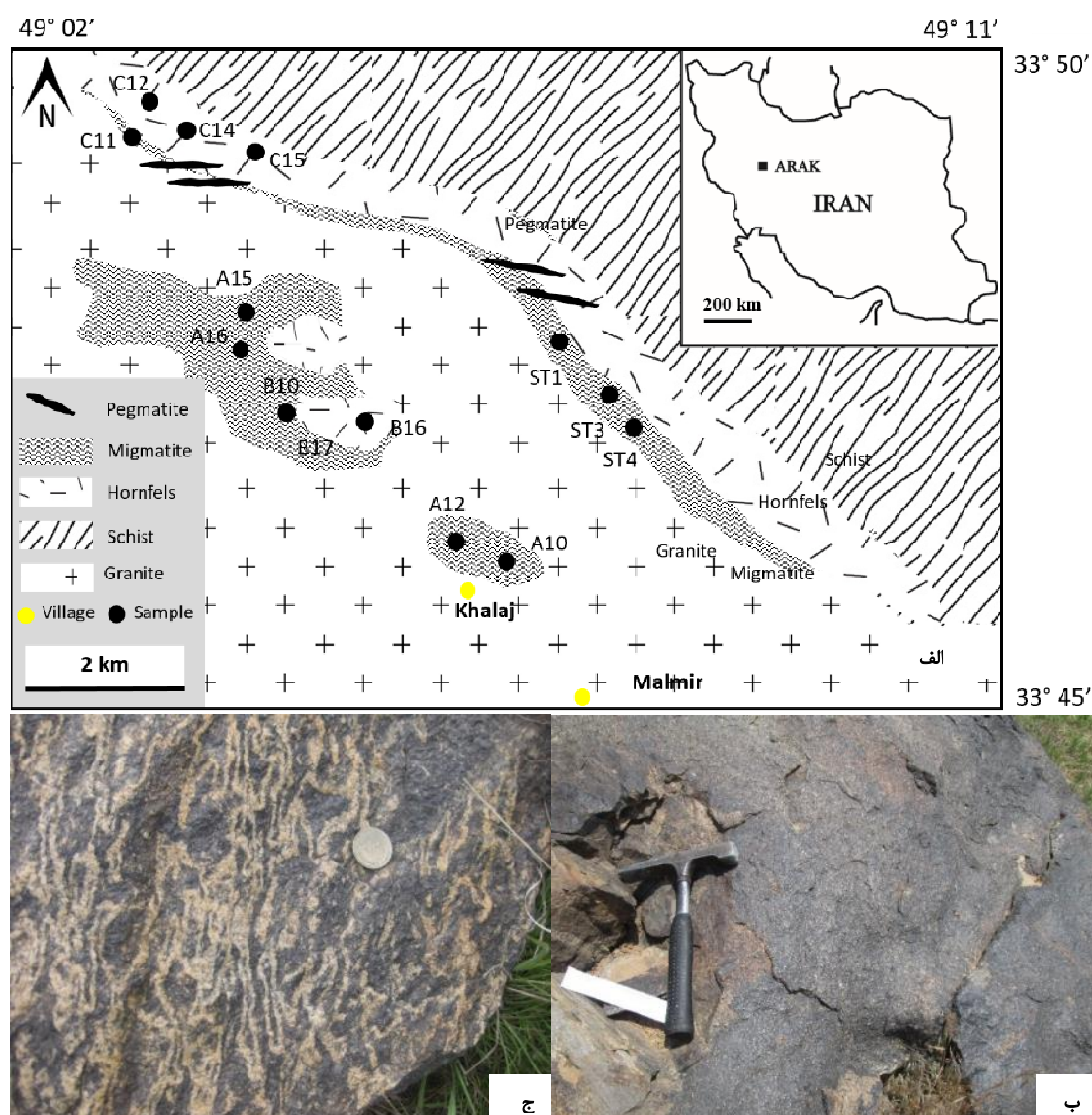
(شکل ۱ ب). در بخش جنوبی توده، دگرگونی مجاورتی کمتر دیده می‌شود. میگماتیت‌ها نیز در بخش‌های شمالی هاله دگرگونی در نزدیکی توده از تکامل هورنفلس‌ها شکل گرفته‌اند (شکل ۱ پ).

به‌طور کلی، میگماتیت‌های بروجرد در صحرا به رنگ تیره و بندرت صخره ساز دیده می‌شوند، می‌توان آن‌ها را از نوع متاتکسیت در نظر گرفت که اغلب روشن و به‌صورت لخته‌ای، رگه‌ای تا نمدی هستند میگماتیت‌های با درصد مذاب بالاتر را می‌توان از میگماتیت‌های نبولیتی دانست که در اثر فرآیند ذوب بخشی متاپلیت‌ها (هورنفلس‌ها) تشکیل شده‌اند [۳۹، ۳۸]. بخش روشن با ضخامت تا ۵ سانتی‌متر قابل تشخیص است.

شازند ناشی از ذوب بخشی همزمان با فروانش اوایل کرتاسه و گروه سوم پگماتیت‌های ملایر وابسته به محیط زمین‌ساختی برخورد یا پس از برخورد هستند.

سنگ‌های دگرگونی در بروجرد شامل دو سری درجه پایین و درجه بالا هستند. سری اول سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شامل اسلیت، فیلیت و شیست‌های لکه‌دار است. سری دوم شامل هورنفلس و میگماتیت است که سنگ‌های مورد بررسی در این پژوهش را شامل می‌شوند.

در بخش‌های شمالی هاله دگرگونی توده گرانیته‌ای بروجرد، میگماتیت‌ها به‌صورت رگه‌ای و توده‌ای با رنگ روشن و با راستای کلی شمال غرب همسو با کشیدگی کلی توده نفوذی در هورنفلس‌های توده‌ای - متراکم و تیره رنگ متمایز هستند



شکل ۱ الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی اراک، ایران، ۲۵ کیلومتری بروجرد در منطقه بین غره‌دش و غره‌تپه، ب) رخنمون هورنفلس و پ) رخنمون میگماتیت‌ها.

روش بررسی

بررسی مقاطع نازک با میکروسکوپ نوری افزون بر شناسایی کانی‌ها و بررسی ویژگی‌های بافتی، برای تعیین محور میکاهای ۵ نمونه انجام شد. کانی‌ها در سیستم‌های بلوری سه گوشه، چارگوشی و ششگوشی تک محوره و در سیستم‌های بلوری راستگوشی، تک میل و سه میل دو محوره هستند که می‌توان این دو گروه از ساختارها را از هم تفکیک کرد [۴۰]. در این بررسی محورهای بلور در مقاطع مناسب بررسی شد.

پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری، چهار نمونه برای پراش‌سنجی پرتوی x (XRD) و تعیین ساختار بلور انتخاب شدند. طیف XRD نمونه‌های پودری با پراش‌سنج مجهز به لامپ کاتدی مس $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) در گستره 2θ بین ۱۰ تا ۸۰ درجه در دانشگاه شهید بهشتی ثبت گردید. طیف‌سنجی رامان با دستگاه Takram P50C0R10 در آزمایشگاه گوهرشناسی دانشگاه شهید بهشتی با طول موج ۵۳۲ nm و توان لیزر ۰.۵ تا ۷۰ mW قطر باریکه برابر با ۱ میلی‌متر و قدرت تفکیک کمتر از 1.5 cm^{-1} انجام شد. برنامه origin و تصحیحات تابع گاوسی همبستگی اولیه استفاده شد.

سنگ‌نگاری

در مقطع نازک، میگماتیت‌ها کانی‌شناسی به نسبت یکنواختی دارند. انباشت کوارتز، فلدسپار پتاسیم و کمتر از ۱۰ درصد مسکوویت و پلاژیوکلاز در بخش روشن مشاهده می‌شود. در محل تماس میگماتیت اثری از شست وارگی دیده نمی‌شود و سنگ‌ها به صورت توده‌ای هستند.

در هورنفلس، شکفته بلورهای کوارتز، بیوتیت، آندالوزیت، کوردیریت و فلدسپار قلیایی به ترتیب با قطر ۰/۵، ۱/۲، ۰/۷، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر و تا ۱/۲ میلی‌متر کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. آنها از نظر کانی‌شناسی تقریباً شبیه میگماتیت‌ها هستند.

فلدسپار قلیایی با قطر تا ۳ میلی‌متر با بافت میرمیکیتی و پرتیتی دیده شد (شکل ۲ الف). در آن، آندالوزیت کیاستولیتی قابل تشخیص است (شکل ۲ ب). سیلیمانیت در دماهای بالاتر نزدیک توده جایگزین آندالوزیت شده است. سیلیمانیت منشوری با برجستگی بالا و شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با طول تا ۷ سانتی‌متر و هم‌رشد با کوارتز و گاهی بیوتیت، با بیوتیت و

فلدسپار قلیایی در بر گرفته شده‌است. دانه‌های تورمالین (کوچک‌تر از ۰/۳ میلی‌متر) اغلب پیرامون یا درون لبه بلورهای سیلیمانیت تشکیل شده است. بیوتیت تا ۲۰ درصد هر دو نوع سنگ را تشکیل می‌دهد، دارای یک دسته رخ آشکار است که طول آن تا ۱ میلی‌متر نیز می‌رسد (شکل ۲ پ).

فلدسپار پتاسیم و کوارتز بیشتر در بخش روشن متمرکز هستند و بلورهایی با قطر تا ۳ میلی‌متر نیز دیده شد (شکل ۲ ت). فراوانی آلومینوسیلیکات‌ها و کانی‌های جزئی چون تورمالین شکل‌دار، زیرکن، کروندوم و آپاتیت در هورنفلس‌ها بیش‌تر است.

به‌طور کلی، میکاهای مورد بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی بیوتیت را نشان می‌دهند و با رنگ قهوه‌ای و بلورهای نیمه شکل‌دار کشیده به‌آسانی قابل شناسایی هستند (شکل ۲ ث). در آنها، موسکویت اولیه وجود ندارد. مسکوویت ثانویه نیز از کانی‌های اصلی است که با اندازه‌های متنوع (۱ - ۰/۲ میلی‌متر) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده شد اغلب شکل‌دار و هم‌رشد با بیوتیت است (شکل ۲ ج). تورمالین گاهی به‌صورت دانه‌های گرد زرد-سبز با اندازه تا ۰/۵ میلی‌متر پیرامون آندالوزیت یا در لبه آن رشد کرده است. زیرکن نیز مانند تورمالین بیشتر در لبه بلورهای آندالوزیت دیده شد.

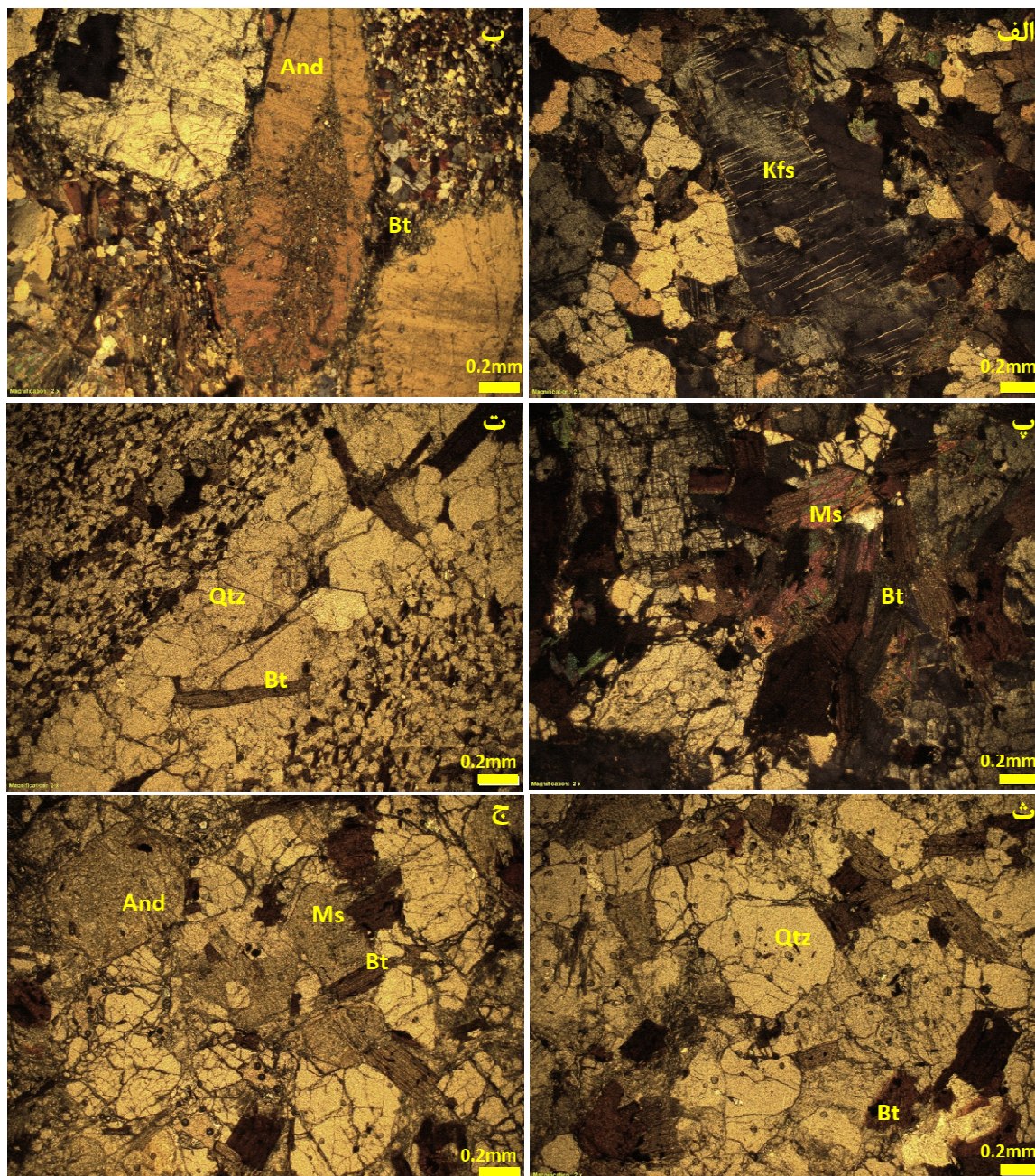
سیستم بلوری متداول میکاها تک میل است که در بررسی های میکروسکوپی به‌صورت دو محوره ظاهر می‌شود. بررسی چند بلور میکا در مقاطع میکروسکوپی مناسب نشان می‌دهد که کانی بیوتیت به صورت تک محوره است و می‌تواند دارای سیستم بلوری سه گوشه، چارگوشی یا ششگوشی باشد.

طیف سنجی رامان

نتایج مقایسه طیف رامان بیوتیت بروجد با ۵ بیوتیت از بررسی‌های پیشین در جدول ۱ آورده شده است. قله‌های دوگانه ۷۰۰ و 800 cm^{-1} و چندگانه 3000 cm^{-1} از مشخصه‌های کانی میکا [۱۱] هستند که به‌علت حضور آهن در ساختار تا کمتر از 790 cm^{-1} کاهش می‌یابند [۳۱]. مقایسه طیف رامان بیوتیت بروجد با نمونه‌های RRUFF [۳۲-۳۵] و گزارش وانگ و همکاران، ۲۰۱۵ [۱] نشان می‌دهد که قله‌های شدید در گستره $650-750 \text{ cm}^{-1}$ و حدود 1100 cm^{-1} مربوط به پیوند Si-O-Si هستند. نوارهای نزدیک به ۵۵۲ و

به طور کلی، تفاوت اصلی بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد با میکاهای غیر ششگوشی افزایش شدت و جابه‌جایی قله‌ها در گستره‌ی ۵۰۰ تا ۸۰۰ cm^{-1} است (شکل ۴).

685 cm^{-1} نیز مربوط به مد خمشی Si-O-Si است. نوارهای مربوط به Fe-O و Mg-O بین ۳۵۴ تا ۱۸۲ cm^{-1} قرار دارند. نوار 145 cm^{-1} مربوط به K-O است. نوارهای ۳۵۵۰ تا ۳۶۵۰ cm^{-1} مربوط به مد کششی OH هستند (شکل ۳).

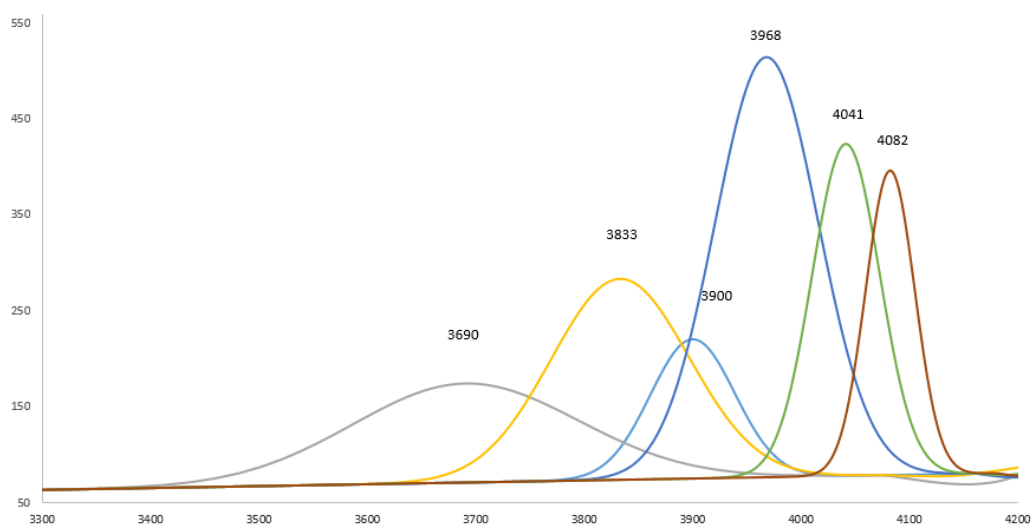


شکل ۲ الف) بلورهای فلدسپار پتاسیم با طول ۲ میلی‌متر در هورنفلس، ب) بلورهای آندالوزیت با طول حدود ۲ سانتی‌متر در میگماتیت، پ) بلورهای کوارتز و بیوتیت تک محوره در میگماتیت، ت) رگه کوارتزی در هورنفلس و بیوتیت با طول تا یک میلی‌متر، ث) بیوتیت تک محوره در میگماتیت و ج) مسکوویت ثانویه و بیوتیت هورنفلس.

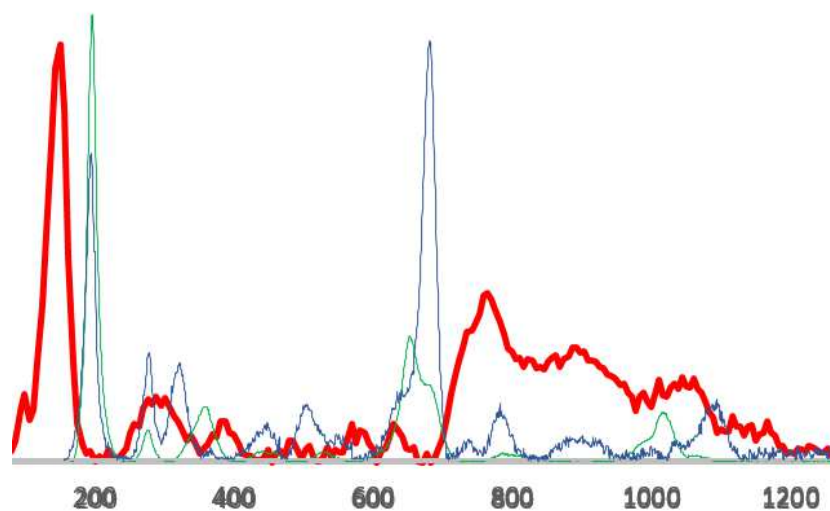
جدول ۱ مقایسه قله‌های رامان بیوتیت بروجرد با ۵ نمونه میکا (در گستره ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ cm⁻¹) و تعیین نوارهای سیلیس، پتاسیم، منیزیم و آهن.

بیوتیت بروجرد	[۳۴]	[۳۳]	[۱۱]	(Pelagon)[۴۱]	(Caniste)[۴۱]
v(Si-O-Si)	m ۱۰۶۰	w ۱۰۹۳	w ۱۰۱۸	m ۱۱۳۰	w ۱۰۰۹۶
	s ۷۵۷	w ۷۸۷	-	m ۷۶۷, ۷۱۵	-
δ(Si-O-Si)	-	s ۶۷۹	m ۶۵۳	w ۶۸۵	m ۶۶۹
δ(Si-O-Si)	w ۵۶۷	w ۵۰۹	-	s ۵۵۲	s ۵۸۸
T(M-O)a, TM	w ۳۷۹	-	w ۳۶۰	w ۳۵۴	w ۳۷۱
T(M-O)	-	m ۳۲۱	-	m ۳۰۹	-
T(M-O)	w ۲۸۶	m ۲۷۷	w ۲۷۷	w ۲۷۳	w ۲۹۲
T(M-O)	m ۱۹۳	s ۱۹۴	s ۱۹۷	s ۱۸۳	s ۱۸۹
T(K-O)	s ۱۴۵	-	-	w ۱۴۸	w ۱۴۰

Excitation with the 532 nm; s Strong; w Weak; m Medium
v Very; a M = Mg or Fe; TM Translational mode



شکل ۳ طیف رامان بیوتیت ششگوشی بروجرد در گستره ۳۳۰۰ تا ۴۲۰۰ cm⁻¹.



شکل ۴ مقایسه طیف رامان بیوتیت ششگوشی بروجرد (نمودار قرمز) با بیوتیت تک میل پنسیلوانیا (نمودار سبز) [۲۳] و جورجیا (نمودار آبی) [۳۴] در گستره ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ cm⁻¹.

پراش پرتوی ایکس (XRD)

نظم اتم‌ها و مولکول‌ها در بلور، γ ساختار بلورین را ایجاد می‌کند که تعیین کننده ویژگی‌های مواد هستند. پراش پرتو ایکس در بلور، صفحه‌های منظم اتمی را نشان می‌دهد. در این پژوهش، شبکه بلوری بر پایه پراش پرتو ایکس ۵ نمونه بررسی شد. با محاسبه ۶ ثابت شبکه (پارامترهای طولی a , b , c و زاویه‌ای سلول اولیه α , β , γ) یاخته یک، جدول ۲ سیستم بلوری اصلی بیوتیت از میان ۷ سیستم مکعبی، سه گوشه، چارگوشی، ششگوشی، راستگوشی، تک‌میل و سه‌میل تعیین گردید.

بر این اساس، کانی بیوتیت با ساختار ششگوشی و پارامترهای شبکه $a = b \neq c$, $\alpha = \beta$, $\gamma = 120^\circ$ تشخیص داده شد. پارامترهای بلورشناسی نمونه بیوتیت ST4 در جدول ۳ آورده شده است.

بررسی‌های دقیق تر برای نمونه ST4 انجام شد در شکل ۵، دو قله پراشی اصلی بیوتیت ششگوشی بروجرد در 20.96° و 26.75° دیده می‌شوند. همچنین طیف XRD نمونه با الگوهای مرجع بیوتیت و کوارتز در شکل ۶ مقایسه شده است.

طیف XRD نمونه‌ی ST4 در گستره $20-30^\circ$ با 2θ بیوتیت‌های تک میل کانادا و آمریکا در شکل ۷ مقایسه شده است. در طیف بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد، قله اصلی (20.96°) کمی به سمت راست جا به جا شده و قله 26.75° به احتمال بسیار مربوط به کوارتز است.

بحث و بررسی

براساس بررسی‌های پیشین در برآورد دما و فشار منطقه بروجرد، [۲۴] پایه تعادل‌های چندگانه، اوج دمای دگرگونی در هاله بروجرد 642°C است. با دماسنجی کوارتزیت‌ها به‌روش هورنبلند-پلاژیوکلاز [۴۱]، بیشترین دما 732°C درجه سانتی‌گراد

به‌دست آمده است. پاپی [۴۲] نیز بیشینه دمای تشکیل میگماتیت‌ها را 743°C درجه سانتی‌گراد و فشار را ۴ کیلوبار محاسبه کرده است. حیدری منش و همکاران [۴۳] با استفاده از نرم افزار ترموکالک، بیشینه دمای 662°C درجه سانتی‌گراد در فشار ۳ کیلوبار را برای تشکیل میگماتیت‌ها پیشنهاد کرده‌اند. محمودی و همکاران [۳۹] نیز اوج شرایط دگرگونی را 720°C درجه سانتی‌گراد در فشار بیشینه ۴ کیلوبار برای دگرگونی فشار پایین- دمای بالا رخساره گرانولیت در متاپلیت‌های دگرگونی گزارش کردند. تندکار [۴۴] برای سنگ‌های دگرگونی نزدیک و در محل تماس با توده آذرین، بیشینه فشار ۳ کیلوبار و دمای 680°C درجه سانتی‌گراد را برآورده کرده است. ماله میر چگینی [۴۵] بیشترین دمای تشکیل میگماتیت‌ها در منطقه بروجرد را 740°C درجه سانتی‌گراد در فشار حدود 4.45 تعیین کرده است. زارع شولی و همکاران [۴۶] دما و فشار میگماتیت‌های بروجرد را با استفاده از کانی کریدریت 750°C درجه سانتی‌گراد و ۴ کیلوبار محاسبه نموده‌اند.

براساس بررسی‌های پیشین، گستره دما و فشار در منطقه بروجرد به ترتیب 642°C تا 750°C درجه سانتی‌گراد و ۳ تا 4.45 کیلوبار است. [۴۷] تبلور میکای مصنوعی با ساختار تقریباً ششگوشی را در فشار ۲ کیلوبار و دمای 800°C درجه سانتی‌گراد گزارش کرده است و برخی نیز افزایش دما به 700°C درجه سانتی‌گراد را علت تغییر ساختار میکا به ششگوشی بیان می‌کنند [۲۰].

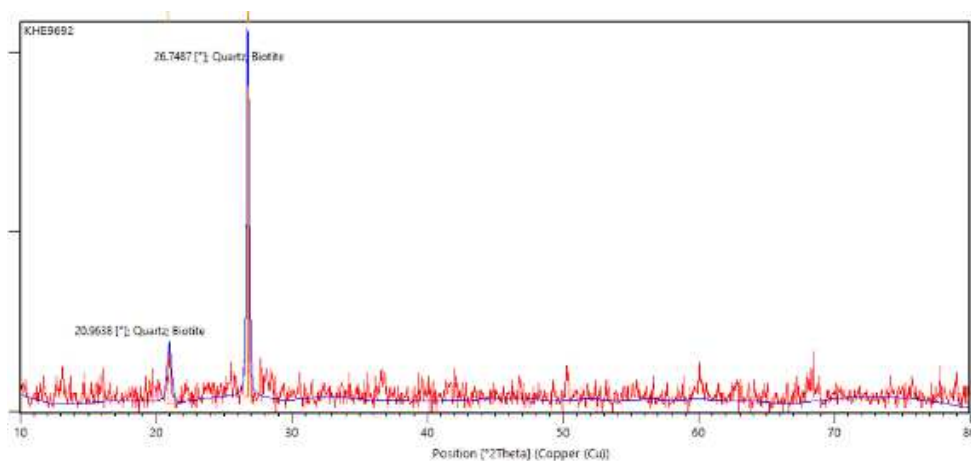
با توجه به شرایط دما و فشار در اوج دگرگونی بروجرد، رخساره گرانولیت در متاپلیت‌های دگرگونی معرفی می‌شود. از طرفی با توجه به دما و فشار گزارش شده برای بیوتیت ششگوشی، می‌توان شرایط اوج دگرگونی منطقه بروجرد را 750°C درجه سانتی‌گراد و 4.45 کیلوبار برآورد کرد.

جدول ۲ ثابت‌های شبکه میکا در ۵ نمونه منتخب.

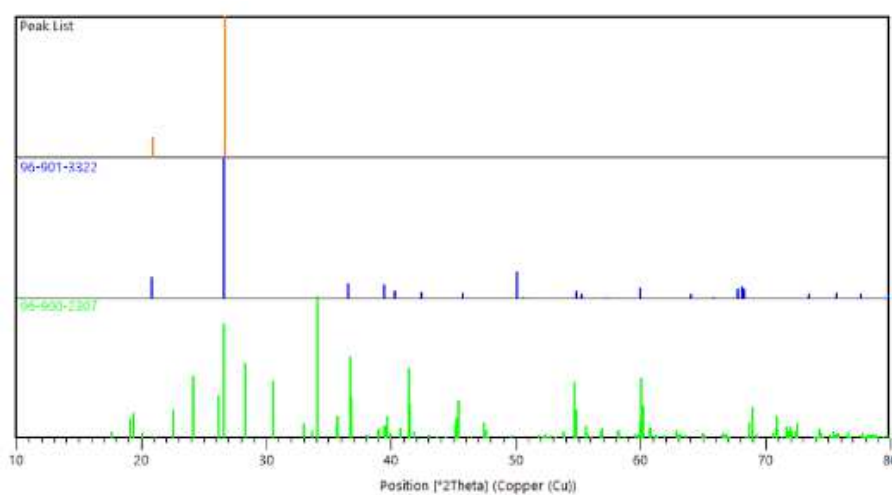
نمونه	سنگ میزبان	a(Å)	b(Å)	c(Å)	α (°)	β (°)	γ (°)
B20	هورنفلس	۵/۳۱۶۴۳۱	۵/۳۱۶۴۳۱	۱۰/۱۱۸	۹۵/۰۵۵۵۹۵	۹۵/۰۵۵۵۹۵	۱۱۹/۹۹۲۹۲
B18	هورنفلس	۵/۳۳۵۶۵۳	۵/۳۳۵۶۵۳	۲۰/۱۸۱	۹۲/۵۹۷	۹۲/۵۹۷۰۰	۱۲۰/۰۸۱۰۲
B17	میگماتیت	۵/۳۲۵۲۴۳	۵/۳۲۵۲۴۳	۱۰/۱۹۷	۹۵/۱۱۲۰۴۵	۹۵/۱۱۲۰۴۵	۱۱۹/۹۶۵۷۵۲
ST3	میگماتیت	۵/۳۴۱۲۱۸	۵/۳۴۱۲۱۸	۱۰/۱۸۶	۹۵/۰۵۷۱۲۱	۹۵/۰۵۷۱۲۱	۱۲۰/۰۱۷۶۱
ST4	میگماتیت	۵/۳	۵/۳	۶۰	۹۰	۹۰	۱۲۰

جدول ۳ پارامترهای بلورشناسی نمونه بیوتیت ST4.

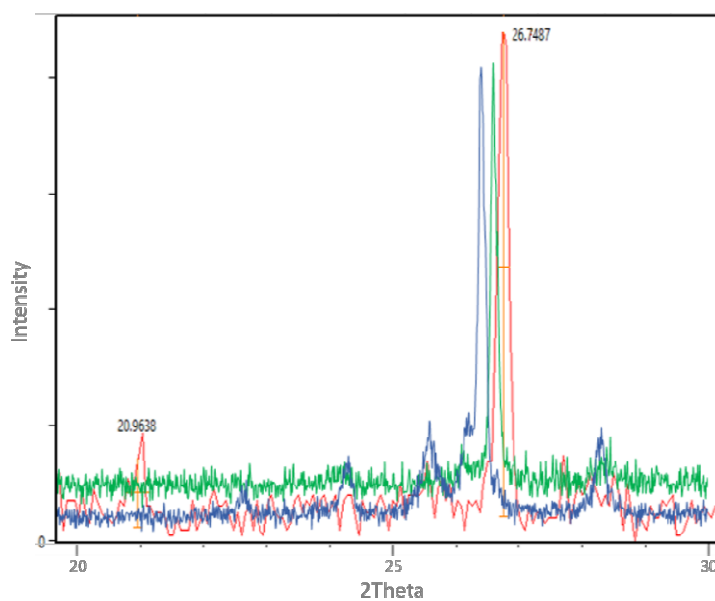
$d (\text{\AA})$	hkl	2θ	$d (\text{\AA})$	hkl	2θ
۴,۵۷۶۵۶	۱۰۱	۱۹,۳۷۹۶	۱,۶۹۰۲	۲۱۸	۵۴,۲۲۵۵
۴,۵۳۷۱۴	۱۰۲	۱۹,۵۴۹۶	۱,۶۷۸۹۲	۲۱۹	۵۴,۶۲۰۳
۴,۴۷۳۶۴	۱۰۳	۱۹,۸۲۹۹	۱,۶۶۶۵۷	۲۱۱۰	۵۵,۰۵۹۲
۴,۳۸۹۰۵	۱۰۴	۲۰,۲۱۶۱	۱,۶۵۳۲۳	۲۱۱۱	۵۵,۵۴۱۷
۴,۲۸۷۰۳	۱۰۵	۲۰,۷۰۲۴	۱,۶۳۸۹۸	۲۱۱۲	۵۶,۰۶۶۹
۴,۱۷۱۵	۱۰۶	۲۱,۲۸۲۳	۱,۶۲۳۹	۲۱۱۳	۵۶,۶۳۴۱
۴,۰۴۶۳۱	۱۰۷	۲۱,۹۴۸۸	۱,۶۰۸۰۸	۲۱۱۴	۵۷,۲۴۴۶
۳,۹۱۴۹۷	۱۰۸	۲۲,۶۹۴۸	۱,۵۹۱۵۹	۲۱۱۵	۵۷,۸۹۱۵
۳,۷۸۰۵۵	۱۰۹	۲۳,۵۱۳	۱,۵۷۴۵۱	۲۱۱۶	۵۸,۵۸۰۲
۳,۶۴۵۵۵	۱۰۱۰	۲۴,۳۹۶۹	۱,۵۵۶۹۲	۲۱۱۷	۵۹,۳۰۷۸
۳,۵۱۱۹۶	۱۰۱۱	۲۵,۳۴۰۱	۱,۵۳۸۸۹	۲۱۱۸	۶۰,۰۷۳۵
۳,۳۸۱۲۶	۱۰۱۲	۲۶,۳۳۶۸	۱,۵۲۹۴۸	۳۰۱	۶۰,۴۸۱۵
۳,۲۶۴۵۳	۱۰۱۳	۲۷,۳۸۱۹	۱,۵۲۷۹۹	۳۰۲	۶۰,۵۴۶۶
۳,۱۳۲۴۹	۱۰۱۴	۲۸,۴۷۰۸	۱,۵۲۵۵۲	۳۰۳	۶۰,۶۵۴۹
۳,۰۱۵۵۷	۱۰۱۵	۲۹,۵۹۹۴	۱,۵۲۰۸	۳۰۴	۶۰,۸۰۶۵
۲,۹۰۴۰۱	۱۰۱۶	۳۰,۷۶۴	۱,۵۲۰۵	۳۱۱۹	۶۰,۸۷۶۶
۲,۷۹۷۸۸	۱۰۱۷	۳۱,۹۶۱۶	۱,۵۱۷۶۹	۳۰۵	۶۱,۰۰۱
۲,۶۹۷۱۳	۱۰۱۸	۳۳,۱۸۹۴	۱,۵۱۲۳۸	۳۰۶	۶۱,۲۳۸۳
۲,۶۴۷۴۲	۱۱۱	۳۳,۸۳۱۱	۱,۵۰۶۱۷	۳۰۷	۶۱,۵۱۸
۲,۶۳۹۷۲	۱۱۲	۳۳,۹۳۲۸	۱,۵۰۱۸۱	۳۱۲۰	۶۱,۷۱۶۴
۲,۶۲۷۰۴	۱۱۳	۳۴,۱۰۱۶	۱,۴۹۹۱	۳۰۸	۶۱,۸۳۹۹
۲,۶۰۹۵۹	۱۱۴	۳۴,۳۳۶۷	۱,۴۹۱۲۱	۳۰۹	۶۲,۲۰۳۴
۲,۶۰۱۶۳	۱۰۱۹	۳۴,۴۴۵۱	۱,۴۸۲۵۴	۳۰۱۰	۶۲,۶۰۸۴
۲,۵۸۷۶۵	۱۱۵	۳۴,۶۳۶۹	۱,۴۷۳۱۲	۳۰۱۱	۶۳,۰۵۴۲
۲,۵۶۱۵۸	۱۱۶	۳۵,۰۰۰۸	۱,۴۶۳۰۲	۳۰۱۲	۶۳,۵۴۰۵
۲,۵۳۱۷۶	۱۱۷	۳۵,۴۲۶۶	۱,۴۵۲۲۶	۳۰۱۳	۶۴,۰۶۶۷
۲,۵۱۱۱۹	۱۰۲۰	۳۵,۷۲۶۶	۱,۴۴۰۹۱	۳۰۱۴	۶۴,۶۳۲۴
۲,۴۹۸۲۶	۱۱۸	۳۵,۹۱۲۴	۱,۴۲۹۰۱	۳۰۱۵	۶۵,۲۳۷۱
۲,۴۶۲۵۸	۱۱۹	۳۶,۴۵۶۳	۱,۴۱۶۶۱	۳۰۱۶	۶۵,۰۲۸۸
۲,۴۲۴۰۹	۱۱۱۰	۳۷,۰۵۶	۱,۴۰۳۷۶	۳۰۱۷	۶۶,۵۶۱۳
۲,۳۸۳۵۹	۱۱۱۱	۳۷,۷۰۹۳	۱,۳۹۰۵	۳۰۱۸	۶۷,۲۷۹۹
۲,۳۴۱۴۷	۱۱۱۲	۳۸,۴۱۳۹	۱,۳۷۶۸۹	۳۰۱۹	۶۸,۰۳۵۴
۲,۲۹۸۱۳	۱۱۱۳	۳۹,۱۶۷۶	۱,۳۶۲۹۶	۳۰۲۰	۶۸,۸۲۷۵
۲,۲۹۳۳۹	۲۰۱	۳۹,۲۵۳۶	۱,۳۴۴۶۸	۲۲۱	۷۱,۱۱۲۲
۲,۱۸۸۲۸	۲۰۲	۳۹,۳۴۳۱	۱,۳۲۳۷۱	۲۲۲	۷۱,۱۷۲
۲,۲۸۰۰۱	۲۰۳	۳۹,۴۹۱۸	۱,۳۲۲۱	۲۲۳	۷۱,۲۷۱۸
۲,۱۶۸۵۷	۲۰۴	۳۹,۶۹۹۳	۱,۳۱۹۸۶	۲۲۴	۷۱,۴۱۱۳
۲,۱۵۴۱۱	۲۰۵	۳۹,۹۶۴۶	۱,۳۱۷	۲۲۵	۷۱,۵۹۰۶
۲,۱۵۳۹۲	۴۱۱۴	۳۹,۹۶۸۲	۱,۳۱۳۵۲	۲۲۶	۷۱,۸۰۹۴
۲,۱۲۳۶۸۲	۲۰۶	۴۰,۲۸۷	۱,۳۰۹۶۵	۲۲۷	۷۲,۰۶۷۷
۲,۱۱۶۸۸	۲۰۷	۴۰,۶۵۵۳	۱,۳۰۴۷۹	۲۲۸	۷۲,۳۶۵۲
۲,۲۰۹۱۷	۱۱۱۵	۴۰,۸۰۳۵	۱,۲۹۹۵۸	۲۲۹	۷۲,۷۰۱۸
۲,۱۹۴۵۳	۲۰۸	۴۱,۰۹۸۱	۱,۲۹۳۸۳	۲۲۱۰	۷۳,۰۷۷۳
۲,۱۶۹۹۹	۲۰۹	۴۱,۵۸۴۲	۱,۲۸۷۵۶	۲۲۱۱	۷۳,۴۹۱۴
۲,۱۶۴۱۷	۱۱۱۶	۴۱,۷۰۱۳	۱,۲۸۰۷۹	۲۲۱۲	۷۳,۹۴۴
۲,۱۴۳۵۲	۲۰۱۰	۴۲,۱۲۲۱	۱,۲۷۳۵۶	۲۲۱۳	۷۴,۴۳۴۷
۲,۱۱۹۱۵	۱۱۱۷	۴۲,۶۲۹۹	۱,۲۷۲۷۳	۳۱۱	۷۴,۴۹۱۱
۲,۱۱۵۳۶	۲۰۱۱	۴۲,۷۱۰۱	۱,۲۷۱۸۷	۳۱۲	۷۴,۵۴۹۹
۲,۰۸۵۷۵	۲۰۱۲	۴۳,۳۴۶۷	۱,۲۷۰۴۵	۳۱۳	۷۴,۶۴۷۹
۲,۰۷۴۳۵	۱۱۱۸	۴۳,۵۹۷۱	۱,۲۶۸۴۶	۳۱۴	۷۴,۷۸۵
۲,۰۵۴۹۴	۲۰۱۳	۴۴,۰۳۰۳	۱,۲۶۵۹۲	۳۱۵	۷۴,۹۶۱
۲,۰۲۹۹۵	۱۱۱۹	۴۴,۶۰۱۳	۱,۲۶۵۸۸	۳۲۱۶	۷۴,۹۶۳۴
۲,۰۲۳۱۵	۲۰۱۴	۴۴,۷۵۹۲	۱,۲۶۲۸۳	۳۱۶	۷۵,۱۷۶۱
۱,۹۹۰۰۶	۲۰۱۵	۴۵,۵۳۱۹	۱,۲۵۲۹۱	۳۱۷	۷۵,۴۲۹۹
۱,۹۸۶۱	۱۱۲۰	۴۵,۶۴۰۹	۱,۲۵۷۷۹	۲۲۱۵	۷۵,۵۲۹۸
۱,۹۵۷۴۹	۲۰۱۶	۴۶,۳۴۶۷	۱,۲۵۵۰۷	۳۱۸	۷۵,۷۲۲۴
۱,۹۲۳۹۹	۲۰۱۷	۴۷,۲۰۲۱	۱,۲۵۰۴۳	۳۱۹	۷۶,۰۵۳۵
۱,۹۸۰۲۸	۲۰۱۸	۴۸,۰۹۶۶	۱,۲۴۹۳۱	۲۲۱۶	۷۶,۱۳۳۷
۱,۸۵۴۶۹	۲۰۱۹	۴۹,۰۲۸۷	۱,۲۴۵۳	۳۱۱۰	۷۶,۴۲۳
۱,۸۲۲۷۸	۲۰۲۰	۴۹,۹۹۷۳	۱,۲۴۰۴۷	۲۲۱۷	۷۶,۷۷۴۸
۱,۷۳۴۱۱	۲۱۱	۵۲,۷۴۵	۱,۲۳۹۷	۳۱۱۱	۷۶,۸۳۰۷
۱,۷۳۱۹۴	۲۱۲	۵۲,۸۱۶۱	۱,۲۳۳۶۶	۳۱۱۲	۷۷,۲۷۶۴
۱,۷۲۸۳۴	۲۱۳	۵۲,۹۳۴۶	۱,۲۳۱۲۹	۲۲۱۸	۷۷,۴۵۲۹
۱,۷۲۳۳۴	۲۱۴	۵۳,۱۰۰۱	۱,۲۲۷۱۹	۳۱۱۳	۷۷,۷۶
۱,۷۱۶۹۸	۲۱۵	۵۳,۳۱۲۳	۱,۲۲۱۸۱	۲۲۱۹	۷۸,۱۶۷۹
۱,۷۰۰۹۳	۲۱۶	۵۳,۵۷۱	۱,۲۲۰۳۲	۳۱۱۴	۷۸,۲۸۱۳
۱,۷۰۰۳۵	۲۱۷	۵۳,۸۷۵۵	۱,۲۱۳۰۷	۳۱۱۵	۷۸,۸۴۰۲



شکل ۵. دو قله اصلی در طیف XRD بیوتیت ششگوشی بروجرد.



شکل ۶. مقایسه طیف XRD نمونه ST4 (قرمز) با الگوهای مرجع بیوتیت (سبز) و کوارتز (آبی).



شکل ۷. مقایسه طیف XRD بیوتیت ششگوشی بروجرد (قرمز) با بیوتیت تک میل کانادا (سبز) [۳۵] و آمریکا (آبی) [۳۲].

برداشت

- در بررسی‌های سنگ نگاری با میکروسکوپ نوری، با تعیین محور کانی‌های دگرگونی هورنفلس و میگماتیت‌های بروجرد، میکاها با ویژگی ظاهری بیوتیت، تک محوره هستند و ساختاری غیر از راستگوشی، تک میل و سه میل دارند. براساس بررسی‌های دقیق‌تر بلورشناسی با پرتوی ایکس بر ۵ نمونه، میکا دارای شبکه بلورین ششگوشی است که محاسبه پارامترهای بلورشناسی نیز این سیستم بلوری را تایید کرد.

- تغییراتی در طیف رامان بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد دیده شد که به نظر می‌رسد که بدلیل تغییر در جایگیری اتم‌ها در اثر تغییر سیستم بلوری از راستگوشی به ششگوشی باشد.

- طیف رامان بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد، قله‌های شدید در گستره $750 - 650 \text{ cm}^{-1}$ و حدود 1100 cm^{-1} مربوط به پیوند Si-O-Si و نوارهای نزدیک به 552 و 685 cm^{-1} مربوط به خمش Si-O-Si را ثبت نموده است. نوار 145 cm^{-1} مربوط به K-O است. به علت حضور آهن در ساختار کانی، قله‌ها تا 757 cm^{-1} کاهش می‌یابند و نوارهای Mg-O و Fe-O در گستره 354 تا 182 cm^{-1} قرار دارند.

- دما- فشار برآورد زده شده برای بیوتیت ششگوشی با نتایج دما فشارسنجی پیشین همخوانی دارد و حضور بیوتیت ششگوشی با اوج دگرگونی در بررسی‌های پیشین منطقه از 700 تا 750 درجه سانتی گراد و فشار 3 تا 4.45 کیلو بار منطبق است.

قدردانی

از جناب آقای دکتر خواصی عضو هیات علمی دانشکده شیمی دانشگاه شهید بهشتی برای همکاری در انجام پراش سنجی‌های XRD تشکر می‌نماییم. این پژوهش با حمایت قطب و مرکز گوهرشناسی دانشگاه شهید بهشتی انجام شده است.

مراجع

- [1] Wang A., Freeman J.J., Jolliff B.L., "Understanding the Raman spectral features of phyllosilicates", Journal of Raman Spectroscopy (2015).
- [2] Sheykhi M., Rezaei-Kahkhaei M., Ghasemi H.A., "Biotite and feldspar chemistry: An approach to the petrogenesis of the Gapdan pluton (NW of Zahedan) (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (3) (2019) 635-648.
- [3] Turkian A., "A study of geochemical behavior of whole-rock and mineral chemistry of Biotite and Feldspar in Shear zone, E-Qorveh (Kurdistan) (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 21 (3) (2013) 581-594.
- [4] Barahmand L., Rasouli J., Ghorbani M., "Biotite chemistry and thermobarometry of barren and productive intrusive bodies in Dehaj-Meiduk area (North Shahrababak) (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (4) (2017) 799-812.
- [5] Moazzen M., Torabi Asl S., Omrani H., "Study of pressure and temperature of metamorphism, phase stability and garnet and biotite chemical zoning in the Jandaq metamorphic rocks using pseudosection method (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (4) (2016) 651-660.
- [6] Sadati S.N., "Geochronology investigation of the Bahlul Daghi volcanic dome, north of Tabriz, by application of $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dating on biotite (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2) (2019) 375-384.
- [7] Ali Mousavi Z., Rezae Kahkhani M., "Biotite chemistry of Lakhasht granitoid (in Persian)", The 22th Symposium of Geological society of Iran, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2014).
- [8] Jamshidi Badr M., Khademi Parsa M., Masoudi F., "Determination of tectonic setting, mineralization and crystallization conditions of biotite in quartzdiorite from northeast of Delijan using biotite chemistry (in Persian)", Researches in Earth Sciences 12 (45) 86-100.
- [9] Rasouli J., Ghorbani M., Ahadnejad V., "Mineral chemistry of Al in biotite for determination of temperature and pressure of copper mineralization in the Jebale Barez plutonic complex (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (1) (2016) 71-82.
- [10] Kashtkar E., Ghorbani M., Omrani J., "Investigation on the mineral chemistry and the role of biotite total aluminum in detecting the type of mineralization in the intrusive bodies of Karaj-Taleghan axis (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (1) (2017) 13-24.
- [11] Singha M., Singh L., "Vibrational spectroscopic study of muscovite and biotite layered phyllosilicates", Indian Journal of Pure & Applied Physics 54 (2016) 116-122.

- Iran", Ph. D. theses, Leeds University, UK. Dept. of earth sciences (1997) 127p.
- [25] Mahmoudi S., Corfu F., Masoudi F., Mehrabi B., Mohajjel M., "U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran", Journal of Asian Earth Sciences 41 (2011) 238-249.
- [26] Baharifar A.A., Pang K.N.A., Chung S.L., 2017. "Garnet-Amphibolites Mineralogy and thermobarometry in Aliabad-Damagh (south of Hamedan, Sanandaj-Sirjan Zone)", Petrology 8 (31) (2017).
- [27] Takeuchi Y., Sadanaga R., "The crystal structure of xanthophyllite", Acta Crystallographica, 12 (1959) 945-946.
- [28] Radoslovich E.W., Norrish K., "The cell dimensions and symmetry of layer silicates. I. Some structural considerations", American Mineralogist 47 (1962) 599-616.
- [29] Redfern S.A.T., Salje E., Maresch W., Schreyer W., "X-ray powder-diffraction and infrared study of the hexagonal to orthorhombic phase transition in K-bearing cordierite", American Mineralogist 74 (1989) 1293-1299.
- [30] Finkelstein G., Dera P.K., Duffy T.S., "High-pressure phases of cordierite from single-crystal X-ray diffraction to 15 GPa", American Mineralogist 100 (2015) 1821-1833.
- [31] Klopprogge T., Gaast S.V., Fredericks P.M., Frost R.L., *Proceedings of the 12th International Clay Conference Bahai-Blanca*, Argentina (2001).
- [32] RRUFF, R040144, Powder Xray. Brinton's Quarry, Chester County, Pennsylvania, USA.
- [33] RRUFF, R040144, Raman 532. Brinton's Quarry, Chester County, Pennsylvania, USA.
- [34] RRUFF, R050068, Raman 532. S.W. Jasper County, Georgia, USA.
- [35] RRUFF, R060204, Powder Xray. Mont Saint-Hilaire, Rouville County, Quebec, Canada.
- [36] Ahmadi Khalaji A., Valizadeh M.V., Esmaili D., "Petrology and geochemistry of the granitoid massif of Boroujerd (in Persian)", Journal of science (University of Tehran) 33 (1) (2007) 1-14.
- [37] Ghasemi Siani M., Mehrabi B., Bayat S., Neubauer F., Cao Sh., "Geochronology, geochemistry and mineral chemistry of Malayer-Boroujerd-Shazand pegmatite dikes, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran", International Journal of Earth Sciences (2021).
- [38] Zare Shooli M., Tahmasbi Z., Saki A., Ahmadi Khalaji A., "The study of changing Rare Earth and Trace Elements to determine the origin
- [12] Hendricks S.B., Jefferson M.E., "Polymorphism of the micas with optical measurements", American Mineralogist (1939).
- [13] Smith J.V., Yoder H.S., "Experimental and theoretical studies of the mica polymorphs". Mineralogical Magazine 31 (1956) 209-235.
- [14] Ross M., Takeda H., Wones D.R., "Mica polytypes: Systematic description and identification", Science 151 (1966) 191-193.
- [15] Takeda H., Ross M., "Mica polytypism: Dissimilarities in the crystal structures of coexisting 1M and 2M1 biotite", American Mineralogist 60 (1975) 1030-1040.
- [16] Soleimani Rad Z., Tondkar Sh., Mousavi Pak N., Masoudi F., "Introducing 2M1 hexagonal muscovite in the turquoise gemstone from Meydok, Kerman (in Persian)", The 22th Symposium of Geological society of Iran, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2019).
- [17] Tondkar Sh., Masoudi F., "Unite Cell Lattice Parameters for Hexagonal Mica from Borujerd Hornfels and Migmatites (in Persian)", the 28th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Mashhad, Iran (2021).
- [18] Donnay G., Donnay J.D.H., Takeda H., "Trioctahedral one-layer micas. II. Prediction of the structure from composition and cell dimensions", Acta Cryst 17 (1964) 1374-1381.
- [19] Bohlen S.R., Peacor D.R., Essene E.J., "Crystal chemistry of a metamorphic biotite and its significance in water barometry", American Mineralogist 65 (1980) 55-62.
- [20] Takeda H., Morosin B., "Comparison of observed and predicted structural parameters of mica at high temperature", Acta Crystallographica B31 (1975) 2444-2452.
- [21] Chon C.M., Kim S.A., Moon H.S., "Crystal structures of biotite at high temperatures and of heat-treated biotites using neutron powder diffraction", Clays and Clay Minerals 51 (5) (2003) 519-528.
- [22] Nespolo M., Ferraris G., Takeda H., "Identification of two allotwins of mica polytypes in reciprocal space through the minimal rhombus unit", Acta Cryst B56 (2000) 639-647.
- [23] Ohta T., Takeda H., Takeuchi H., "Mica polytypism: similarities in the crystal structures of coexisting 7M and 2M1 oxYbiotite", American Mineralogist 67 (1982) 298-310.
- [24] Masoudi F., "Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW, of Arak,

- [44] Heydarianmanesh A., Tahmasbi Z., Ahmadi Khalaji A., "Mineral chemistry and thermobarometry of migmatitic rocks of Boroujerd area (north of Sanandaj-Sirjan zone) (in Persian)", Petrology 8 (25) (2016) 117-139.
- [45] Tondkar Sh., "Construction of metamorphic reactions in Borujerd granitoid metamorphic aureole based on algebraic analysis (in Persian)", Msc thesis, Shahid Beheshti University, Iran (2017).
- [46] Malehmir Chegini S., "Phase equilibria in spinel and curundum bearing metamorphic rocks of Broujerd area (in Persian)", Msc thesis, Kharazmi University, Iran (2019).
- [47] Zare Shooli M., Tahmasbi Z., Saki A., Ahmadi Khalaji A., "Mineral chemistry, pressure-temperature determination and fluids activities in Boroujerd migmatites using cordierite mineral (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (1) (2019) 135-150.
- [48] Takeda H., Burnham C.W., "Fluoropolyolithionite: a lithium mica with nearly hexagonal (Si₂O₅)₂- ring", Mineral. J. 6 (1969) 102-109.
- of Borujerd migmatites (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (4) (2019) 941-958.
- [39] Mahmoudi Sh., Papi N., Baharifar A.A., "High-temperature metamorphism event in the East and North East Borujerd granite body from (in Persian)", Researches in earth sciences 9 (3) No. 35 (2018) 81-93.
- [40] Vosoughi Abedini M., "Fundemental of theoretical and practical optical crystallography (in Persian)", Pars Geological Research Center (Arian Zamin) (2014) 308p.
- [41] Sontevska V., Jovanovski G., Makreski P., Raskovska A., Soptrajanov B., Acta ChimSlov, 55 (2008) 757.
- [42] Tahmasbi Z., Ahmadi Khalaji A., "Using of mineral chemistry to determine the formation conditions of Boroujerd granitoid complex and its metamorphic aureole (in Persian)", Petrology 6 (2) (2010) 77-95.
- [43] Papi N., "Petrogenesis of granulite facies rocks in the contact aureole of Boroujerd complex (in Persian)", Msc thesis, Kharazmi University, Iran (2015).