

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

\*شیرین تنکار، 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 متاپلیت‌های است که در گستره وسیعی از شرایط زمین‌شناسی یافت می‌شود. بررسی‌های کانی‌شناسی میکروسکوپی، طیف‌سننجی رامان و آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD) برای بیوتیت‌های هورنفلس و میگماتیت‌های هاله دگرگونی توده گرانیتوئیتی بروجرد در پهنه سنتندج 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 میکاها شکل گرفته در دیگر سیستم‌های بلورین را به صورت افزایش شدت و جا به جایی قله‌ها در گستره‌ی  $500 \text{ cm}^{-1}$  تا  $800 \text{ cm}^{-1}$  نشان داد. پارامترهای شبکه برای بلورهای بیوتیت‌های ششگوشی در میگماتیت و هورنفلس‌های بروجرد نیز بر اساس داده‌های پراش پرتوی ایکس تعیین شد. بررسی تبلور میکای مصنوعی، افزایش دما<sup>۷۰۰</sup> درجه سانتی‌گراد علت تغییر ساختار میکا به ششگوشی است. از این‌رو، رخداد دگرگونی دما بالا در منطقه بروجرد تایید می‌شود.

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

مناسب برای کاربردهای علمی، دما و فشارسننجی [۴،۵]، زمین زمان‌سننجی [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 [۱۳-۱۷]. بیوتیت از پژوهش‌ترین 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

### مقدمه

فیلوسیلیکات‌ها از گروه‌های اصلی سیلیکات‌ها هستند که می‌توانند خاستگاه آذرین، دگرگونی یا رسوبی داشته باشند. بیش از ۲۴۰ کانی در پایگاه‌های اطلاعاتی کانی‌شناسی به عنوان فیلوسیلیکات رده‌بندی شده‌اند. در این گروه به ویژه خانواده میکا به طور کلی بسیار پایدار است و کاربردهای فراوانی در علم و فناوری دارد [۱-۳].

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

با ساختار غیر تک میل در این سنگ‌ها و مقایسه طیف‌های رامان و الگوهای پراش پرتوی ایکس بیوپتیت ششگوشی با میکاهای تک میل تفاوت‌هایی را برای شناسایی راحت‌تر میکاری 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 سنتنج سیرجان به کار رود.

#### زمین‌شناسی عمومی

در مرز بین دو شهر اراک و بروجرد در پهنه سنتنج- سیرجان، در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، توده‌های نفوذی با سن ژوراسیک میانی نفوذ کرده‌اند [۳۶، ۲۵]. هاله دگرگونی رسی در منطقه‌ای با مختصات  $38^{\circ} ۳۳' \text{ تا } ۳۴^{\circ}$  عرض شمالی و  $۴۹^{\circ} ۴۹' \text{ تا } ۴۵^{\circ} ۴۸'$  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 پیش‌تر ترکیب گرانودیوریتی دارد و به صورت یک توده‌ی نفوذی کشیده با سن ژوراسیک است [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 کوارتز‌دیوریتی هستند و گاه توده‌های بسیار روشن نیز در آن رخنمون دارند. همچنین در بخش جنوبی، توده‌های نفوذی کوچک به‌شكل مدور با ترکیب موونزوگرانیتی دیده می‌شوند. واحدهای مختلف سنگ‌شناسی توده‌ی گرانیت‌وئیدی مورد بررسی با دایکهای اسیدی، بازی و حد واسطه 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

شده است.

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

بررسی زمین‌شناسی منطقه بروجرد، شرایط عمومی تشکیل کانی‌ها و سنگ‌های دگرگونی و زمین‌ساخت این منطقه در پهنه سنتنج سیرجان برای سال‌ها موضوع پژوهش‌ها بوده است [۲۴-۲۶]. این بررسی‌های نشان دهنده پیچیدگی شکل‌گیری فعالیت ماقمایی 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 (دمافشارسنجی) کانی‌ها ارائه دهد [۲۶-۳۰].

ازفون بر آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD)، طیف سنجی ارتعاشی از قدرتمندترین ابزار شناسایی ساختار مواد بوده و در سال‌های اخیر، بررسی طیفی فیلوسیلیکات را 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 میکاهای و ترکیب‌های بسیار متغیر آن‌ها، طیف رامان برخی از فیلوسیلیکات‌ها با تأکید بر حالت‌های ارتعاشی اساسی شبکه و بررسی حالت‌های به صورت مقاله و یا در پایگاه داده RRUFF موجود است [۳۱-۳۵].

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

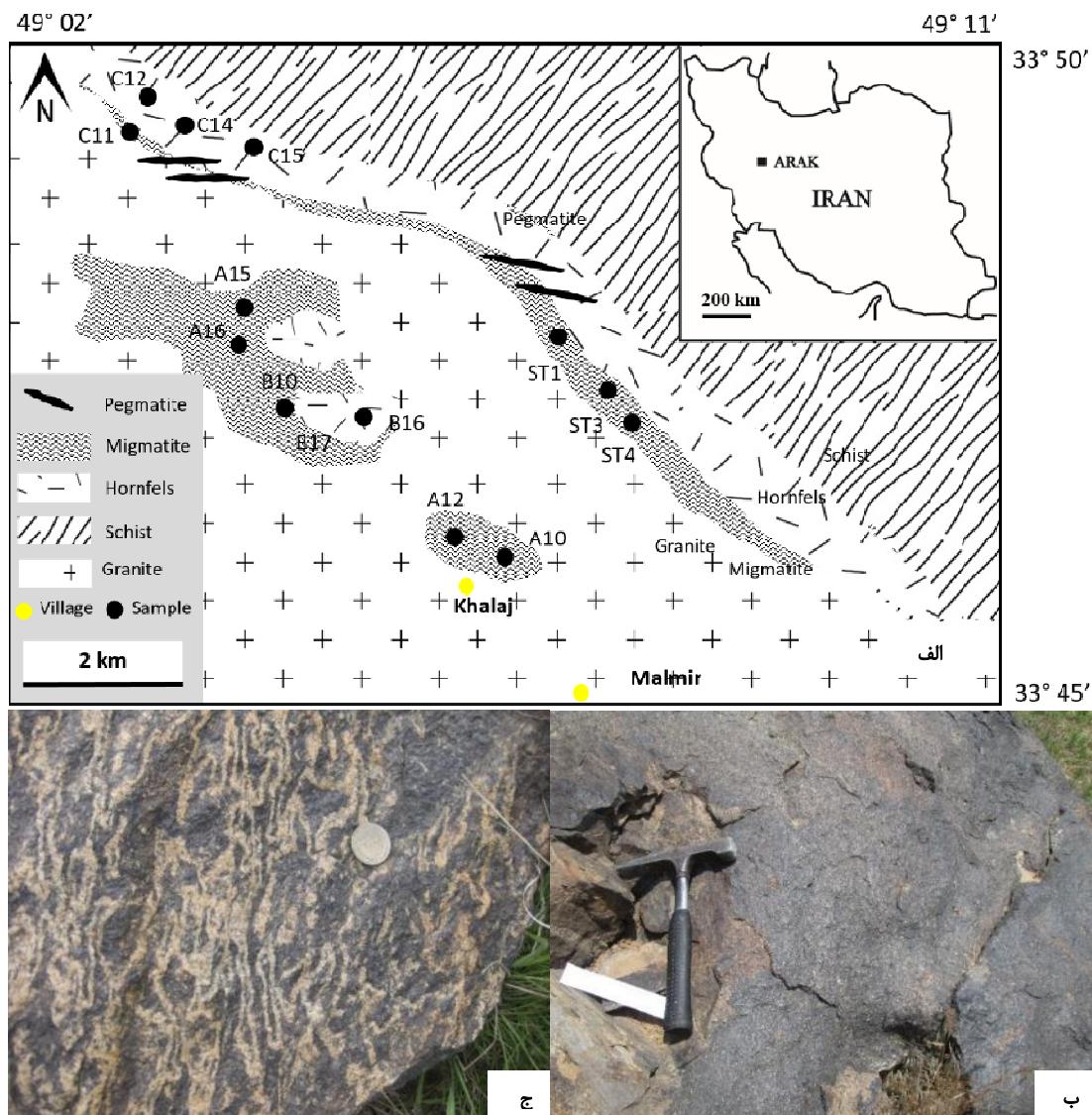
(شکل ۱ ب). در بخش جنوبی توده، دگرگونی مجاورتی کمتر دیده می‌شود. میگماتیت‌ها نیز در بخش‌های شمالی هاله دگرگونی در نزدیکی توده از تکامل هورنفلس‌ها شکل گرفته‌اند (شکل ۱ پ).

بهطور کلی، میگماتیت‌های بروجرد در صحراء 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 ذوب‌بخشی همزمان با فرورانش 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 شیسته‌های 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 گرانیت‌وئیدی بروجرد، میگماتیت‌ها بهصورت رگه‌ای و توده‌ای با رنگ روشن و با راستای کلی شمال غرب همسو با کشیدگی کلی توده نفوذی در هورنفلس‌های توده‌ای - مترکم و تیره رنگ متمایز هستند.



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

فلدسپار قلیایی در بر گرفته شده است. دانه های تورمالین (کوچکتر از  $30\text{ میلیمتر}$ ) اغلب پیرامون یا درون لبه بلورهای سیلیمانیت تشکیل شده است. بیوتیت تا  $20\text{ درصد}$  هر دو نوع سنگ را تشکیل می دهد، دارای یک دسته رخ آشکار است که طول آن تا  $1\text{ میلیمتر}$  نیز می رسد (شکل ۲ پ).

فلدسپار پتاسیم و کوارتز بیشتر در بخش روشن متتمرکز هستند و بلورهایی با قطر تا  $3\text{ میلیمتر}$  نیز دیده شد (شکل ۲ ت). فراوانی آلومینوسیلیکات ها و کانی های جزئی چون تورمالین شکل دار، زیرکن، کرون دوم و آپاتیت در هورنفلس ها بیشتر است.

به طور کلی، میکاهای مورد بررسی ویژگی های میکروسکوپی بیوتیت را نشان می دهند و با رنگ قهوه ای و بلورهای نیمه شکل دار کشیده به آسانی قابل شناسایی هستند (شکل ۲ ث). در آنها، مسکوویت اولیه وجود ندارد. مسکوویت ثانویه نیز از کانی های اصلی است که با اندازه های متنوع ( $1-20\text{ میلیمتر}$ ) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده شد اغلب شکل دار و هم رشد با بیوتیت است (شکل ۲ ج). تورمالین گاهی به صورت دانه های گرد زرد - سیز با اندازه تا  $0.5\text{ میلیمتر}$  پیرامون آندالوزیت یا در لبه آن رشد کرده است. زیرکن نیز مانند تورمالین بیشتر در لبه بلورهای آندالوزیت دیده شد.

سیستم بلوری متداول میکاهای تک میل است که در بررسی های میکروسکوپی به صورت دو محوره ظاهر می شود. بررسی چند بلور میکا در مقاطع میکروسکوپی مناسب نشان می دهد که کانی بیوتیت به صورت تک محوره است و می تواند دارای سیستم بلوری سه گوشی، چارگوشی یا ششگوشی باشد.

#### طیف سنجی رامان

نتایج مقایسه طیف رامان بیوتیت بروجرد با  $5\text{ بیوتیت از بررسی های پیشین در جدول ۱ آورده شده است. قله های دوگانه } 700\text{ و }800\text{ cm}^{-1}\text{ و چندگانه } 3000\text{ cm}^{-1}\text{ از مشخصه های کانی میکا [۱۱] هستند که به علت حضور آهن در ساختار تا کمتر از } 790\text{ cm}^{-1}\text{ کاهش می یابند [۳۱]. مقایسه طیف رامان بیوتیت بروجرد با نمونه های RRUFF [۳۵-۳۲] و گزارش وانگ و همکاران، ۲۰۱۵ [۱] نشان می دهد که قله های شدید در گستره } 650-750\text{ cm}^{-1}\text{ و حدود } 1100\text{ cm}^{-1}\text{ مربوط به پیوند Si-O-Si هستند. نوارهای نزدیک به } 552\text{ و }$

#### روش بررسی

بررسی مقاطع نازک با میکروسکوپ نوری افزون بر شناسایی کانی ها و بررسی ویژگی های بافتی، برای تعیین محور میکاهای  $5\text{ نمونه}$  انجام شد. کانی ها در سیستم های بلوری سه گوشی، چارگوشی و ششگوشی تک محوره و در سیستم های بلوری راستگوشی، تک میل و سه میل دو محوره هستند که می توان این دو گروه از ساختارها را از هم تفکیک کرد [۴۰]. در این بررسی محورهای بلور در مقاطع مناسب بررسی شد.

پس از بررسی های سنگنگاری، چهار نمونه برای پراش سنجی پرتوی  $x$  (XRD) و تعیین ساختار بلور انتخاب شدند. طیف XRD نمونه های پودری با پراش سنج مجهز به لامپ کاتدی مس  $\alpha$  Cu- $K\alpha$  ( $\lambda=1.5406\text{ \AA}$ ) در گستره  $2\theta$  بین  $10-80^\circ$  درجه در دانشگاه شهید بهشتی ثبت گردید. طیف سنجی رامان با دستگاه Takram P50C0R10 در آزمایشگاه گوهرشناسی دانشگاه شهید بهشتی با طول موج  $532\text{ nm}$  و توان لیزر  $0.5\text{ mW}$  با قطر باریکه برابر با  $1\text{ میلیمتر}$  و قدرت تفکیک کمتر از  $1.5\text{ cm}^{-1}$  انجام شد. برنامه origin و تصحیحات تابع گاؤسی همبستگی اولیه استفاده شد.

#### سنگنگاری

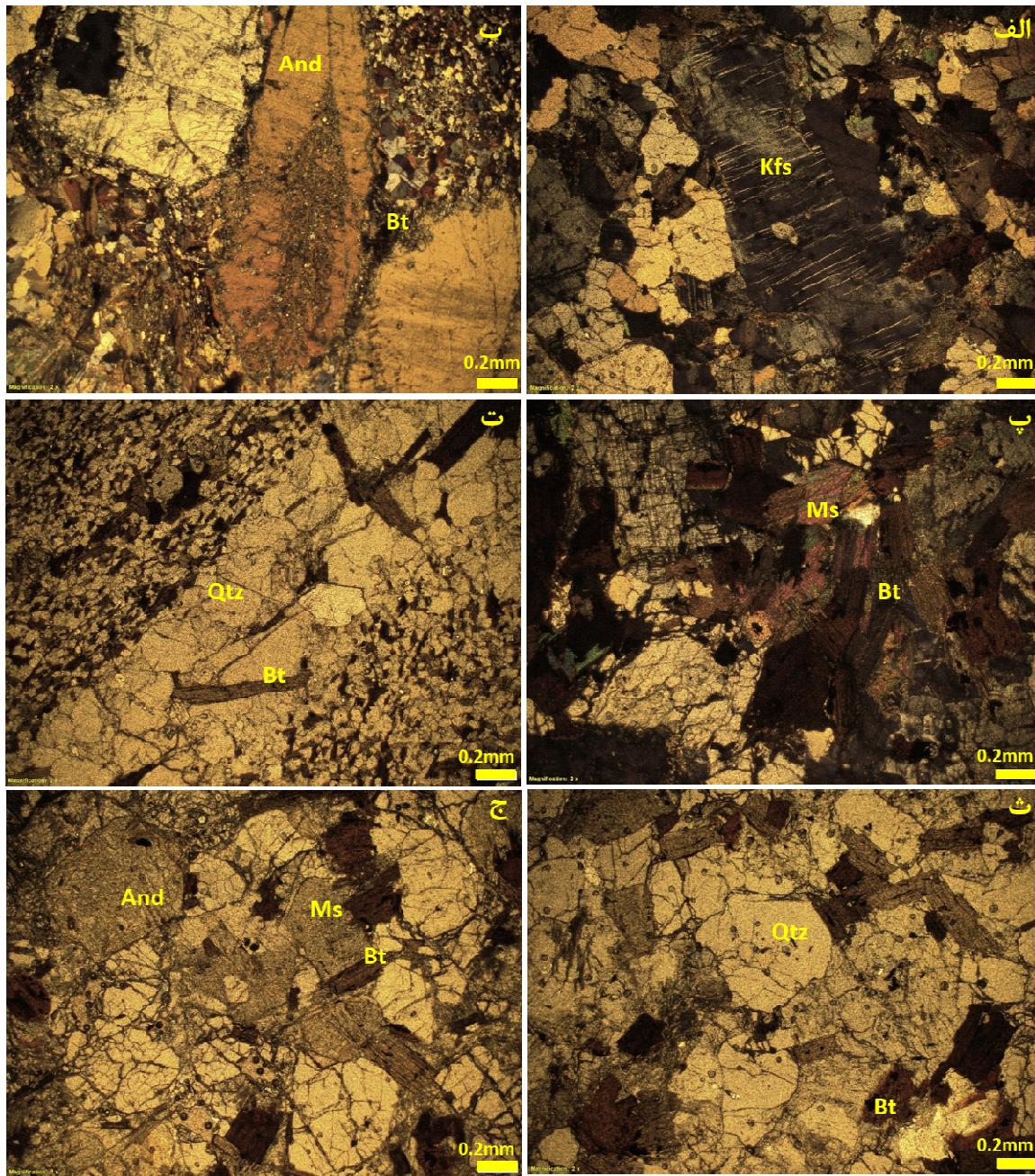
در مقطع نازک، میگماتیت ها کانی شناسی به نسبت یکنواختی دارند. انباشت کوارتز، فلدسپار پتاسیم و کمتر از  $10\text{ درصد}$  مسکوویت و پلازیوکلаз در بخش روشن مشاهده می شود. در محل تماس میگماتیت اثری از شیست وارگی دیده نمی شود و سنگ ها به صورت توده ای هستند.

در هورنفلس، شکfte بلورهای کوارتز، بیوتیت، آندالوزیت، کوردیریت و فلدسپار قلیایی به ترتیب با قطر  $0.5-0.7\text{ mm}$  و  $0.5\text{ میلیمتر}$  و تا  $1/2\text{ میلیمتر}$  کانی های اصلی سنگ را تشکیل می دهند. آنها از نظر کانی شناسی تقریباً شبیه میگماتیت ها هستند.

فلدسپار قلیایی با قطر تا  $3\text{ میلیمتر}$  با بافت میرمکیتی و پرتبیتی 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 شکل دار تا نیمه شکل دار با طول تا  $7\text{ سانتیمتر}$  و هم رشد با کوارتز و گاهی بیوتیت، با بیوتیت و

به طور کلی، تفاوت اصلی بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد با میکاهای غیر ششگوشی افزایش شدت و جابه‌جایی قله‌ها در گستره‌ی  $500\text{ cm}^{-1}$  تا  $800\text{ cm}^{-1}$  است (شکل ۴).

$685\text{ cm}^{-1}$  نیز مربوط به مد خمشی Si-O-Si است. نوارهای مربوط به Fe-O و Mg-O بین  $354\text{ cm}^{-1}$  تا  $355\text{ cm}^{-1}$  قرار دارند. نوار  $145\text{ cm}^{-1}$  مربوط به K-O است. نوارهای  $3550\text{ cm}^{-1}$  نوار  $3650\text{ cm}^{-1}$  مربوط به مد کششی OH هستند (شکل ۳).

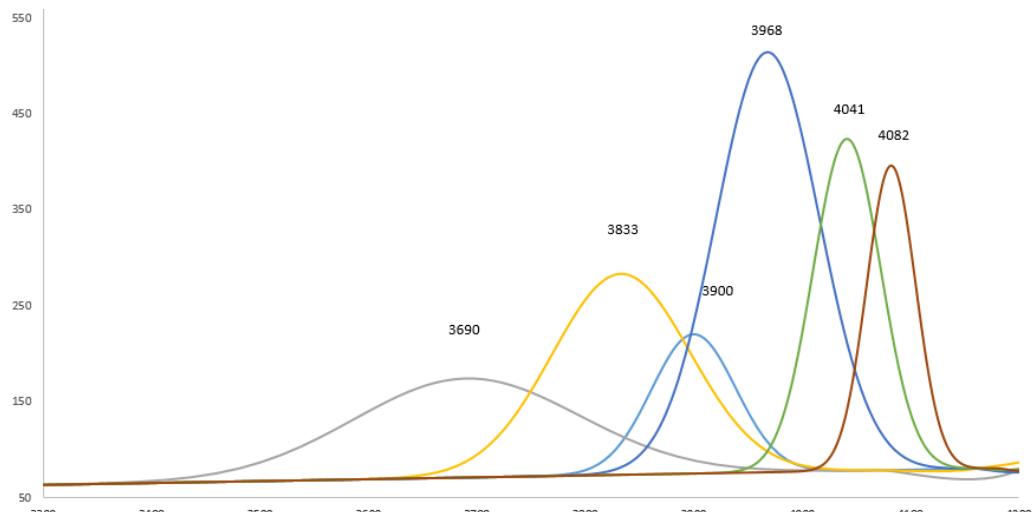


شکل ۲ (الف) بلورهای فلدسپار پتاسیم با طول تا ۲ میلی‌متر در هورنفلس، (ب) بلورهای آندالوزیت با طول حدود ۲ سانتی‌متر در میگماتیت، (پ) بلورهای کوارتز و بیوتیت تک محوره در میگماتیت، (ت) رگه کوارتزی در هورنفلس و بیوتیت با طول تا یک میلی‌متر، (ث) بیوتیت تک محوره در میگماتیت و (ج) مسکوویت ثانویه و بیوتیت هورنفلس.

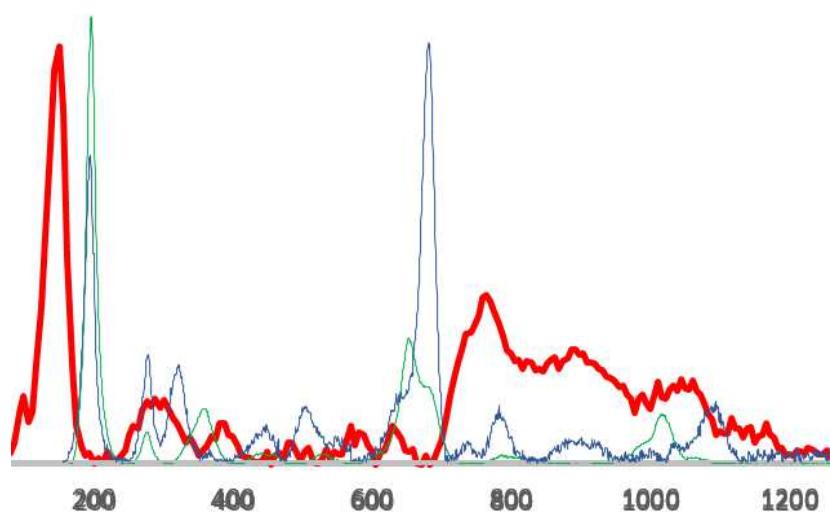
**جدول ۱** مقایسه قله‌های رامان بیوتیت بروجرد با ۵ نمونه میکا (در گستره ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ cm<sup>-1</sup>) و تعیین نوارهای سیلیس، پتاسیم، منزیم و آهن.

(Caniste) [۴۱]	(Pelagon)[۴۱]	[۱۱]	[۳۳]	[۳۴]	بیوتیت بروجرد	
w ۱۰۰۹۶	w ۱۰۹۳	m ۱۱۲۰	w ۱۰۱۸	w ۱۰۹۳	m ۱۰۶۰	v(Si—O—Si)
-	-	m ۷۶۷ ، ۷۱۵	-	w ۷۸۷	s ۷۵۷	
m ۶۶۹	s ۶۷۳	w ۶۸۵	m ۶۵۳	s ۶۷۹	-	$\delta$ (Si—O—Si)
s ۵۸۸	s ۵۸۷	s ۵۵۲	-	w ۵۰۹	w ۵۶۷	$\delta$ (Si—O—Si)
w ۳۷۱	m ۳۵۴	w ۳۵۴	w ۳۶۰	-	w ۳۷۹	T(M—O)a, TM
-	m ۳۰۹	w ۳۱۳	-	m ۳۲۱	-	T(M—O)
w ۲۹۲	-	w ۲۷۳	w ۲۷۷	m ۲۷۷	w ۲۸۶	T(M—O)
s ۱۸۹	s ۱۸۳	s ۱۸۲	s ۱۹۷	s ۱۹۴	m ۱۹۳	T(M—O)
w ۱۴۰	w ۱۴۸	w ۱۴۳	-	-	s ۱۴۵	T(K—O)

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<sup>-1</sup>.



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<sup>-1</sup>.

به دست آمده است. پاپی [۴۲] نیز بیشینه دمای تشکیل میگماتیتها را ۷۴۳ درجه سانتی‌گراد و فشار را ۴ کیلوبار محاسبه کرده است. حیدری منش و همکاران [۴۳] با استفاده از نرم افزار ترموکالک، بیشینه دمای ۶۶۲ درجه سانتی‌گراد در فشار ۳ کیلوبار را برای تشکیل میگماتیتها پیشنهاد کرده‌اند. محمودی و همکاران [۳۹] نیز اوج شرایط دگرگونی را ۷۲۰ 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 ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد را برآورده کرده است. ماله میر چگینی [۴۵] بیشترین دمای تشکیل میگماتیتها در منطقه بروجرد را ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد در فشار حدود ۴/۴۵ تعیین کرده است. زارع شولی و همکاران [۴۶] دما و فشار میگماتیتها بروجرد را با استفاده از کانی کردیریت ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۴ کیلوبار محاسبه نموده‌اند.

براساس بررسی‌های پیشین، گستره دما و فشار در منطقه بروجرد به ترتیب ۶۴۲ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۳ تا ۴/۴۵ کیلوبار است. [۴۷] تبلور میکای مصنوعی با ساختار تقریباً ششگوشی را در فشار ۲ کیلوبار و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده است و برخی نیز افزایش دما به ۷۰۰ 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 ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۴/۴۵ کیلوبار برآورد کرد.

### پراش پرتوی ایکس (XRD)

نظم اتم‌ها و مولکول‌ها در بلور، ۷ 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  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ) یاخته یکه، جدول ۲ سیستم بلوری اصلی بیوتیت از میان ۷ سیستم مکعبی، سه گوشی، چارگوشی، ششگوشی، راستگوشی، تکمیل و سه‌میل تعیین گردید.

بر این اساس، کانی بیوتیت با ساختار ششگوشی و پارامترهای شبکه  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = 120^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$  تشخیص داده شد. پارامترهای بلورشناسی نمونه بیوتیت ST4 در جدول ۳ آورده شده است.

بررسی‌های دقیق‌تر برای نمونه ST4 انجام شد در شکل ۵، دو قله پراشی اصلی بیوتیت ششگوشی بروجرد در ۲۰/۹۶ و ۲۶/۷۵ دیده می‌شوند. همچنین طیف XRD نمونه با الگوهای مرجع بیوتیت و کوارتز در شکل ۶ مقایسه شده است.

طیف XRD نمونه ST4 در گستره  $2\theta = 20^\circ - 30^\circ$  با بیوتیت‌های تک میل کانادا و آمریکا در شکل ۷ مقایسه شده است. در طیف بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد، قله اصلی (۲۰/۹۶) کمی به سمت راست جا به جا شده و قله ۲۶/۷۵ به احتمال بسیار مربوط به کوارتز است.

### بحث و بررسی

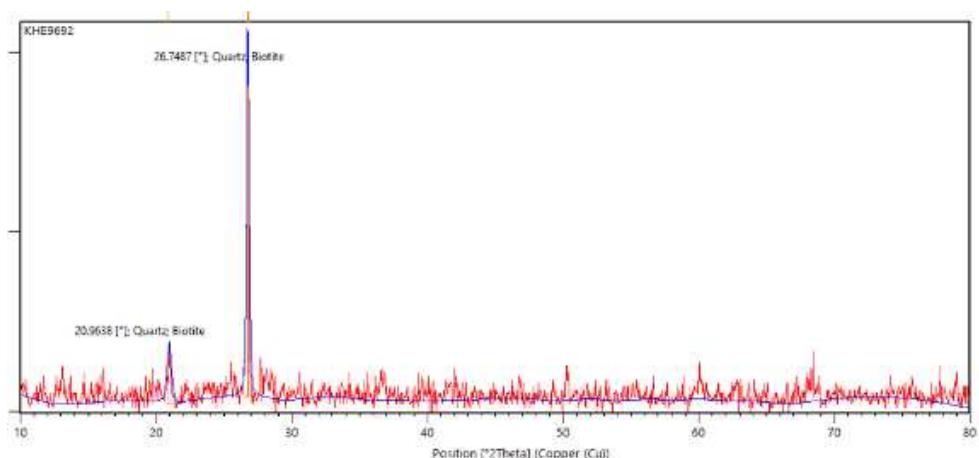
براساس بررسی‌های پیشین در برآورد دما و فشار منطقه بروجرد، [۲۴] پایه تعادل‌های چندگانه، اوج دمای دگرگونی در هاله بروجرد  $642^\circ\text{C}$  است. با دماسنجی کوارتزیت‌ها به روش هورنبلند-پلازیوکلаз [۴۱]، بیشترین دما ۷۳۲ درجه سانتی‌گراد

جدول ۲ ثابت‌های شبکه میکا در ۵ نمونه منتخب.

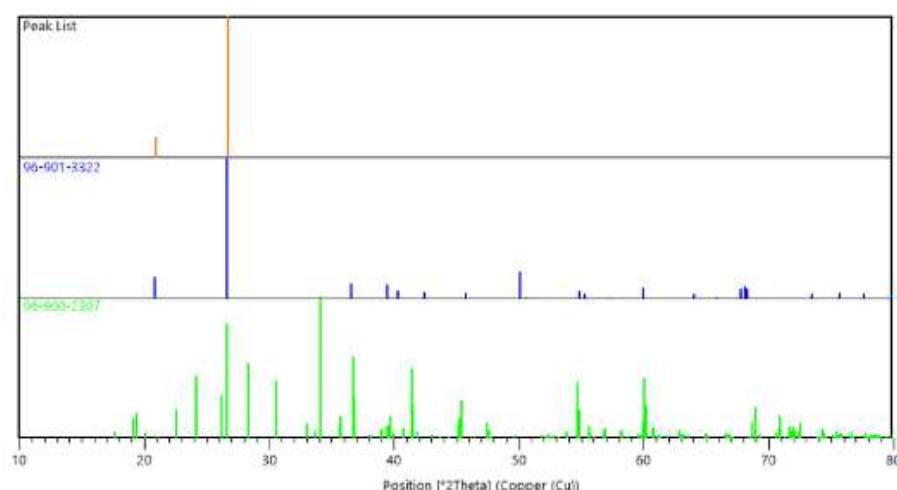
نمونه	سنگ میزان	$a(\text{\AA})$	$b(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$\alpha (^\circ)$	$\beta (^\circ)$	$\gamma (^\circ)$
B20	هورنفلس	۵/۳۱۶۴۳۱	۵/۳۱۶۴۳۱	۱۰/۱۱۸	۹۵/۰۵۵۵۹۵	۹۵/۰۵۵۵۹۵	۱۱۹/۹۹۲۹۲
B18	هورنفلس	۵/۳۳۵۶۵۳	۵/۳۳۵۶۵۳	۲۰/۱۸۱	۹۲/۵۹۷	۹۲/۵۹۷۰۰	۱۲۰/۰۰۸۱۰۲
B17	میگماتیت	۵/۳۲۵۲۴۳	۵/۳۲۵۲۴۳	۱۰/۱۹۷	۹۵/۱۱۲۰۴۵	۹۵/۱۱۲۰۴۵	۱۱۹/۹۶۵۷۵۲
ST3	میگماتیت	۵/۳۴۱۲۱۸	۵/۳۴۱۲۱۸	۱۰/۱۸۶	۹۵/۰۵۷۱۲۱	۹۵/۰۵۷۱۲۱	۱۲۰/۱۰۱۷۶۱
ST4	میگماتیت	۵/۳	۵/۳	۶۰	۹۰	۹۰	۱۲۰

جدول ۳ پارامترهای بلورشناسی نمونه بیوپتیت ST4

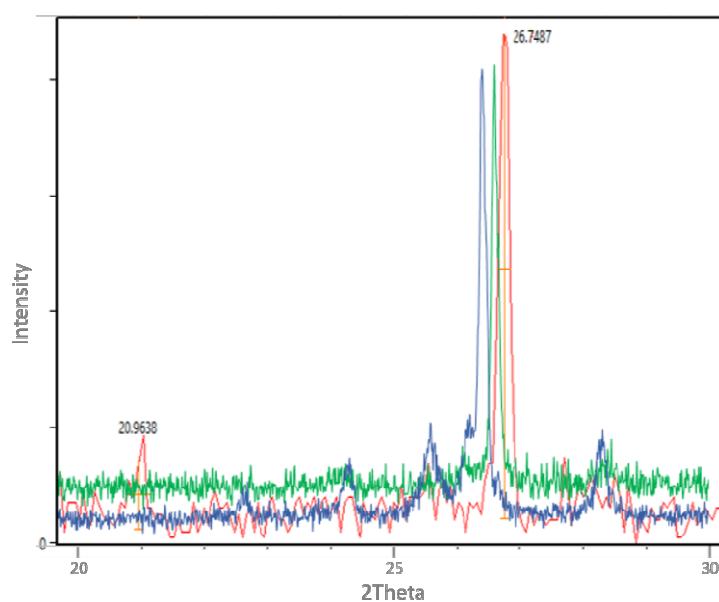
<i>d</i> (Å)	<i>hkl</i>	2θ	<i>d</i> (Å)	<i>hkl</i>	2θ
4,57656	1 · 1	19,7396	1,89 · 2	21 · 8	54,2255
4,53714	1 · 2	19,496	1,878192	21 · 9	54,8703
4,47244	1 · 3	19,8299	1,86657	21 · 10	55,0592
4,389 · 5	1 · 4	20,2161	1,85223	21 · 11	55,05417
4,287 · 3	1 · 5	20,7 · 24	1,87898	21 · 12	56,669
4,1715	1 · 6	21,2823	1,8239	21 · 13	56,6341
4,04631	1 · 7	21,9488	1,86 · 1 · 8	21 · 14	57,2426
3,9147	1 · 8	22,9448	1,87159	21 · 15	57,8915
3,78055	1 · 9	23,513	1,87451	21 · 16	58,58 · 2
3,64555	1 · 10	24,4969	1,85697	21 · 17	59,3 · 78
3,51196	1 · 11	25,14 · 1	1,83889	21 · 18	60, · 735
3,38116	1 · 12	26,32368	1,87948	3 · 1	60,4815
3,26453	1 · 13	27,73819	1,87299	3 · 2	60,5466
3,13229	1 · 14	28,478 · 8	1,87252	3 · 3	60,6549
3,01557	1 · 15	29,5994	1,8722 · 8	3 · 4	60,8 · 65
2,9 · 41	1 · 16	30,764	1,872 · 5	21 · 19	60,876
2,79788	1 · 17	31,9616	1,871769	3 · 5	61, · 001
2,69713	1 · 18	33,1894	1,871238	3 · 6	61,2383
2,64782	1 · 19	33,8711	1,871617	3 · 7	61,518
2,63972	1 · 20	33,9328	1,87181	21 · 20	61,7164
2,62704	1 · 21	34,1016	1,87991	3 · 8	61,8399
2,6 · 959	1 · 22	34,3367	1,879121	3 · 9	62,2 · 34
2,6 · 18	1 · 23	34,4451	1,87825	3 · 10	62,6, · 84
2,58785	1 · 24	34,6769	1,87712	3 · 11	63, · 552
2,56158	1 · 25	35,00 · 8	1,8763 · 2	3 · 12	63,54 · 5
2,53117	1 · 26	35,4266	1,875226	3 · 13	64, · 657
2,51119	1 · 27	35,7266	1,874 · 91	3 · 14	64,6224
2,49826	1 · 28	35,9124	1,8749 · 1	3 · 15	65,2271
2,46258	1 · 29	36,4563	1,871661	3 · 16	65, · 288
2,42449	1 · 30	37, · 56	1,87376	3 · 17	66,5613
2,38359	1 · 31	37,7 · 93	1,879 · 5	3 · 18	67,2799
2,34147	1 · 32	38,4139	1,87819	3 · 19	68, · 354
2,29813	1 · 33	39,1576	1,87896	3 · 20	68,8278
2,29329	2 · 1	39,2526	1,87248	22 · 1	71,1122
2,28828	2 · 2	39,3431	1,872271	22 · 2	71,172
2,28801	2 · 3	39,4918	1,87221	22 · 3	71,2718
2,26827	2 · 4	39,5993	1,871986	22 · 4	71,4113
2,25411	2 · 5	39,9345	1,8717	22 · 5	71,59 · 6
2,25392	2 · 6	39,9827	1,871352	22 · 6	71,8 · 94
2,23682	2 · 7	40, · 287	1,87 · 945	22 · 7	72, · 677
2,21688	2 · 8	40,6653	1,87479	22 · 8	72,3652
2,20917	2 · 9	40,8 · 35	1,87958	22 · 9	72,7 · 18
2,19453	2 · 10	41, · 981	1,879383	22 · 10	73, · 773
2,16999	2 · 11	41,5442	1,87856	22 · 11	73,4914
2,16417	2 · 12	41,7 · 13	1,878 · 79	22 · 12	73,944
2,14352	2 · 13	42,1221	1,877356	22 · 13	74,4247
2,11915	2 · 14	42,8799	1,87773	3 · 1	74,4911
2,11576	2 · 15	42,81 · 1	1,877187	3 · 2	74,5799
2,10575	2 · 16	43,3467	1,87745	3 · 3	74,6479
2,07425	2 · 17	43,5071	1,876846	3 · 4	74,785
2,05494	2 · 18	44, · 303	1,876592	3 · 5	74,981
2,02995	2 · 19	44,5 · 13	1,87588	22 · 14	74,9574
2,02315	2 · 20	44,7527	1,875283	3 · 6	75,1781
1,99 · 8	2 · 21	45,0519	1,875291	3 · 7	75,4299
1,9861	2 · 22	45,0579	1,87579	22 · 15	75,5798
1,95749	2 · 23	46,3467	1,87557	3 · 8	75,7224
1,92399	2 · 24	47,2 · 21	1,87543	3 · 9	76, · 535
1,91 · 28	2 · 25	48, · 66	1,874931	22 · 16	76,1377
1,85469	2 · 26	49, · 287	1,87453	3 · 10	76,423
1,82278	2 · 27	49,9973	1,874 · 7	22 · 17	76,7748
1,73411	2 · 28	50,7745	1,87397	3 · 11	76,83 · 7
1,73194	2 · 29	52,8161	1,87366	3 · 12	77,2784
1,72834	2 · 30	52,9346	1,873129	22 · 18	77,4529
1,72224	2 · 31	53,10 · 1	1,872719	3 · 13	77,76
1,71698	2 · 32	53,2123	1,872181	22 · 19	78,1679
1,71 · 93	2 · 33	53,5761	1,87232	3 · 14	78,2813
1,70 · 05	2 · 34	53,8755	1,8713 · 7	3 · 15	78,84 · 2



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].

- [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 Shahrbabak) (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 Dagi 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 chemistery of Lakhast granitoid (in Persian)", The 22<sup>th</sup> 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.

**برداشت**

- در بررسی های سنگ نگاری با میکروسکوپ نوری، با تعیین محور کانی های دگرگونی هورنفلس و میگماتیت های بروجرد، میکاها با ویژگی ظاهری بیوتیت، تک محوره هستند و ساختاری غیر از راستگوشی، تک میل و سه میل دارند. براساس بررسی های دقیق تر 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 رaman بیوتیت ششگوشی دگرگونی بروجرد دیده شد که بهنظر می رسد که بدلیل تغییر در جایگیری اتمها در اثر تغییر سیستم بلوری از راستگوشی به ششگوشی باشد.

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

- دما- فشار برآورد زده شده برای بیوتیت ششگوشی با نتایج دما فشار سنجی پیشین همخوانی دارد و حضور بیوتیت ششگوشی با اوج دگرگونی در بررسی های پیشین منطقه از  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  تا  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد و فشار  $445\text{ }^{\circ}\text{C}$  تا  $400\text{ kbar}$  منطبق است.

**قدرتانی**

از جناب آقای دکتر خواصی عضو هیات علمی دانشکده شیمی دانشگاه شهید بهشتی برای همکاری در انجام پراش سنجی های XRD تشکر می نماییم. 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.

- 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] Kloprogge 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., Esmaeili 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 22<sup>th</sup> 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 28<sup>th</sup> 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 Borujerd 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 Borujerd 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 Borujerd migmatites using cordierite mineral (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (1) (2019) 135-150.
- [48] Takeda H., Burnham C.W., "Fluor-polylithionite: a lithium mica with nearly hexagonal  $(Si_2O_5)_2$ - 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 Borujerd 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 Borujerd complex (in Persian)", Msc thesis, Kharazmi University, Iran (2015).