

طیف‌سنجی رامان و کاربرد آن در شناسایی دگرسانی‌های موجود در کانسارهای مس عباس‌آباد، شمال شرق شاهرود

لیلا صالحی^{۱*}، ایرج رساء^۲، سعید علیرضایی^۳، فاطمه مطرودی^۴، سید حسن توسلی^۴

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۴- دانشجوی دکتری فتونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

۵- دانشیار پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۸/۱۶

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۱/۱۹

چکیده

طیف‌سنجی رامان، روشی برای مطالعه مولکولی جامدات، مایعات و گازها است. اساس آن، بر پایه پراکندگی ناکشسان نور تک رنگ (لیزر) است. مولکول‌هایی که در معرض پرتو لیزر قرار می‌گیرند برانگیخته شده و سه رفتار رایلی، استوکس و آنتی‌استوکس را نشان می‌دهند. رفتارهای نوع دوم و سوم در آزمایش‌های رامان کاربرد دارد. به کمک این روش می‌توان بلورها، کانی‌ها، رسوبات و فازهای مختلف سیالات درگیر موجود در کانی‌ها را شناسایی نمود. هدف از این پژوهش، شناسایی مجموعه کانی‌های دگرسانی کانسارهای مس منطقه عباس‌آباد با بهره‌گیری از مشاهدات صحرائی، روش‌های میکروسکوپی، XRD، EPMA و طیف‌سنجی رامان است. ناحیه معدنی عباس‌آباد در شمال شرق شاهرود در کمربندی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن قرار دارد و میزبان هشت منطقه کانی‌سازی مس است. سنگ‌های آتشفشانی این ناحیه، شامل تراکی‌اندزیت، تراکی-اندزی‌بازالت و تراکی‌بازالت است. کانی‌سازی مس به صورت افشان، رگچه‌ای و داربستی و به طور عمده محدود به تراز بالایی واحدهای آتشفشانی است. کانی‌سازی درون‌زاد در این بخش، ساده و شامل کانی‌های گروه کالکوسیت، بورنیت، دیژنیت، کوولیت و مس طبیعی است که معمولاً با پیریت، کلسیت، کوارتز و هماتیت همراهی می‌شوند. دگرسانی پروپلیتیک شاخص دگرسانی ناحیه‌ای و دگرسانی‌های کربناتی، سیلیسی و کلریتی شاخص دگرسانی محلی و مرتبط با کانه‌زایی مس است. این دگرسانی‌ها، منطقه‌بندی مشخصی را ایجاد نمی‌کند. کانی‌های پرهنیت، کلسیت و کوارتز در طیف‌سنجی رامان دارای طیف‌های آشکار بوده و در بیشتر نمونه‌ها شناسایی شدند که نشانگر فراوانی این کانی‌ها و عملکرد وسیع‌تر دگرسانی کربناتی و سیلیسی به عنوان دگرسانی محلی و مرتبط با کانه‌زایی مس است.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی رامان، دگرسانی، مس، سنگ‌های آتشفشانی، عباس‌آباد.

مقدمه

روش طیف‌سنجی رامان یکی از فن‌آوری‌های نوین محسوب می‌شود که در رشته‌های مختلف علوم کاربرد فراوانی دارد. با وجود کاربرد گسترده آن در علوم زمین در دو دهه گذشته، متأسفانه، این روش در کشور ما کمتر شناخته شده است. هدف از این پژوهش، معرفی روش طیف‌سنجی رامان و بکارگیری آن برای شناسایی دگرسانی‌های موجود در کانسارهای مس ناحیه عباس‌آباد در شمال شرق شاهرود است.

روش طیف سنجی رامان و کاربرد آن در زمین‌شناسی

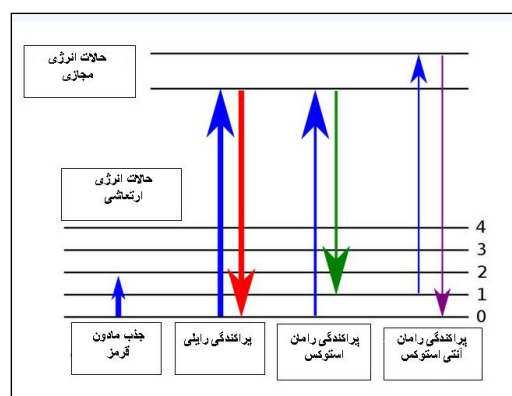
طیف‌سنجی رامان، تکنیک استفاده از پراکندگی نور است و برای مطالعه خواص ارتعاشی مولکول‌های جامدات، مایعات و گازها کاربرد دارد (مک-میلان، ۱۹۸۹). اساس این روش بر پایه‌ی پراکندگی ناکشسان نور تک‌رنگ است که عموماً از یک منبع لیزر تأمین می‌شود. مولکول‌هایی از

ماده که در معرض پرتو لیزر با فرکانس ν قرار دارند برانگیخته شده و سه رفتار مختلف از خود بروز می‌دهند (شکل ۱):

الف- مولکول‌ها برانگیخته شده و به حالت ارتعاشی خود بازمی‌گردند و پرتویی با همان فرکانس اولیه، بازتابش می‌کنند. پراکندگی حاصل که نوعی پراکندگی کشسان است، پراکندگی رایلی نام دارد.

ب - مولکول‌ها قسمتی از انرژی فوتون‌های اولیه را جذب نموده و با فرکانس ν ارتعاش می‌کنند. بنابراین نور پراکنده با فرکانسی به اندازه‌ی ν کمتر از فرکانس اولیه بازتابش می‌شود. این نوع پراکندگی ناکشسان بوده و پراکندگی استوکس نام دارد.

ج - در این حالت با بازگشت مولکول به حالت پایه، نور با فرکانسی به اندازه‌ی ν بیشتر از فرکانس پرتو اولیه پراکنده خواهد شد. این پراکندگی نیز ناکشسان است و پراکندگی آنتی- استوکس نامیده می‌شود.



شکل ۱: رفتار متفاوت مولکول‌ها به هنگام قرارگیری در معرض پرتو لیزر.

فراهم کردن اطلاعات کمی و کیفی مواد مولکولی مختلف، امکان استفاده برای محلول‌های آبی بدون نیاز به امکانات اضافه، عدم نیاز به آماده سازی نمونه در اکثر موارد و غیر مخرب بودن آزمایش بر روی نمونه‌ها، امکان استفاده برای نمونه‌هایی با

بنابراین، اثر رامان شامل رفتارهای نوع دوم و سوم مولکول‌ها است و چنین مولکول‌هایی، دارای حالت فعال رامان هستند (لانگ، ۲۰۰۲). از مهم‌ترین مزایای این روش، می‌توان به کاربری برای هر سه حالت ماده، کاربری برای محلول‌ها و مخلوط‌ها،

روش، گروه سمپلایت در مناطق خشک و کانی-های شبه مالاکیت شناسایی شده‌اند (فراست و همکاران، ۲۰۰۷). این روش برای مطالعه و تشخیص ساختار آراگونیت و کلسیت همچنین شناسایی ریز ساختارهای کربنات در رسوب شناسی ابزار ارزشمندی است، حتی از طریق آن می‌توان مروارید طبیعی را از مروارید پرورشی تشخیص داد (اورماس و همکاران، ۱۹۹۱). با توسعه روش رامان، دستگاه‌های میکروپروب رامان ابداع شد. این دستگاه‌ها با تجزیه‌های غیرمخرب و درجا^۲ در ابعاد چند میکرومکعب در زمان کوتاهی، موفقیت چشمگیری در ارائه اطلاعات مربوط به پارامترهایی نظیر فوگاسیته از جمله تشخیص CO از CO₂ در مخلوط گازی، pH از جمله تشخیص سولفات از بی سولفات در محلول مایع، فشار از جمله بازشناسی پلی‌مورف‌هایی مثل کلسیت و آراگونیت کسب کرده‌اند. کاربرد دیگر این روش، تجزیه میکرورامان سیالات درگیر است. تعیین فازهای مختلف درون میانبار، مقدار آن و تصویربرداری اجزاء آن به دلیل وضوح بسیار بالای این سیستم، به راحتی امکان‌پذیر است (ادر و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین از آن‌جا که آب در طیف‌سنجی رامان ایجاد مزاحمت نمی‌کند و این روش دارای قابلیت تجزیه درجا است، از آن در مطالعات کف اقیانوس به‌خصوص در مجاری گرمایی و مطالعه کانی‌ها حین تشکیل در اقیانوس می‌توان بهره جست (وایت، ۲۰۰۸). با توجه به اینکه، مجموعه کانی‌های دگرسانی در کانسارهای مختلف، به عنوان کلید اکتشافی این کانسارها و تعیین نوع کانسارسازی پراهمیت است، روش‌های مختلفی برای شناسایی آن‌ها در زمین‌شناسی وجود دارد که طیف‌سنجی رامان جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش موجود در طی سال‌های اخیر

فواصل زیاد از دستگاه به کمک فیبر نوری، داشتن طیف‌های واضح با مقدار هم‌پوشانی کمتر نسبت به روش مادون قرمز، امکان استفاده در دما و فشار بالا، اشاره کرد. در کنار ویژگی‌های مثبت و مزایای این روش، محدودیت‌ها و معایب این روش نیز عبارتند از:

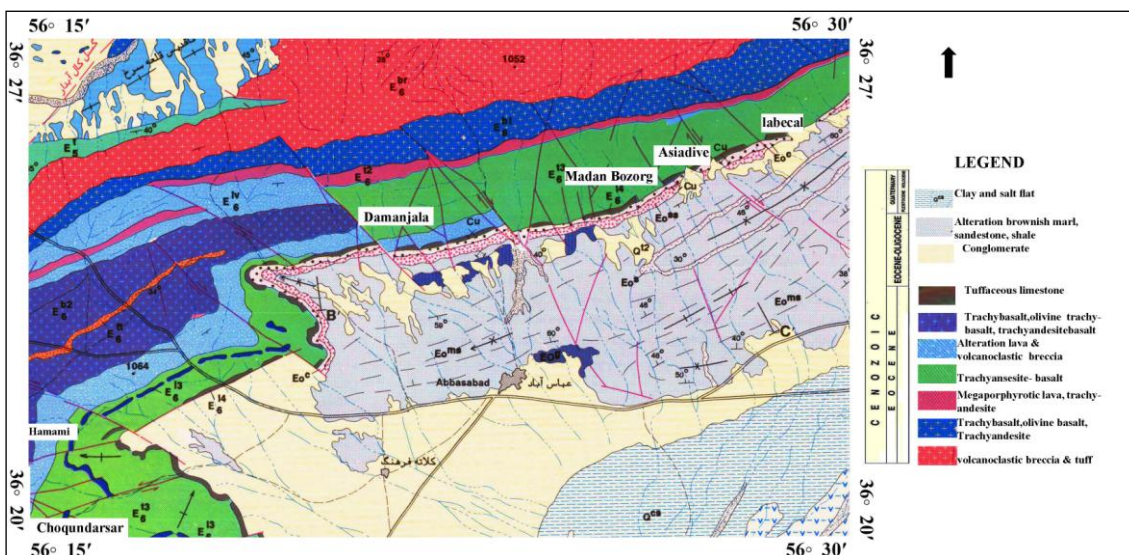
حساسیت ذاتی کم این روش زیرا از هر یک میلیون فوتون، تنها یکی از آن‌ها دستخوش پراکندگی رامان می‌شود؛ عدم تشخیص عناصر زیرا این روش تنها به ارتعاشات مولکولی حساس است؛ پرتوهای حاصل از اثر فلوتورسانس مواد می‌تواند در تشخیص پیک‌های رامان مشکل‌ساز باشد؛ این روش نیاز به منابع لیزر و فیلترهای گران-قیمت دارد؛ احتمال مخرب بودن این روش بر روی نمونه وجود دارد. اگرچه این فن‌آوری، غیر-مخرب قلمداد می‌شود ولی در صورت تمرکز بیش از حد پرتو در یک نقطه از نمونه، یا قدرت بالای لیزر به کار رفته، تخریب به صورت افزایش گرمای محلی و اکسیداسیون در نمونه حادث می‌شود (وایت، ۲۰۰۸).

طیف‌سنجی رامان به طور گسترده در بسیاری از شاخه‌های علوم به‌خصوص زمین‌شناسی کاربرد دارد (اشمیت و پوپ، ۲۰۰۵). از این روش در سنگ‌شناسی به‌خصوص در شناخت شیشه‌های سیلیکاتی و ساختار مذاب در دما و فشار بالا، یافتن مکانیسم حل بخاراتی مانند CO₂، H₂ و H₂O در مذاب سیلیکاتی (مک‌میلان، ۱۹۸۹) و مطالعه شخانه‌ها (اشمیت و پاپ، ۲۰۰۵) استفاده شده است. بررسی کانی‌ها و شناسایی فازهای اصلی کانیایی با این روش، رده‌بندی سنگ‌ها و شرح فرایندهای پترولوژیکی را آسان‌تر کرده است (اشمیت و پاپ، ۲۰۰۵). شناسایی کانی‌های غیرسیلیکاتی و کانی‌های فلزی نیز در این روش امکان‌پذیر است. به عنوان مثال با استفاده از این

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی: ناحیه معدنی عباس‌آباد در ۱۳۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان شاهرود در مسیر جاده شاهرود به سبزوار، بین طول‌های جغرافیایی ۵۶° ۱۵' تا ۵۶° ۲۵' و عرض‌های جغرافیایی ۳۶° ۱۸' تا ۳۶° ۲۵' قرار دارد و در تقسیم بندی ساختاری ایران (آقنابتی، ۱۳۸۳) قسمتی از کمان آتشفشانی شمال ایران مرکزی محسوب می‌شود. به‌طور کلی سنگ‌های آتشفشانی این ناحیه جزئی از کمر بند ماگمایی سنوزوئیک ایران مرکزی است (سامانی، ۱۳۸۶). این کمر بند دارای راستای شمال شرق - جنوب غرب است و در بردارنده گدازه‌های آندزیتی - بازالتی، توف، برش همراه با میان لایه‌هایی از شیل توفی، ماسه‌سنگ توفی، شیل، سیلتستون، ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ آهک نومولیت‌دار با سن ائوسن است (شکل ۲). حد شمالی این کمر بند، به افیولیت‌های سبزوار و حد جنوبی آن به دشت کویر می‌رسد.

است. بررسی طیف‌های کائولینیت (میکایلین و همکاران، ۱۹۹۸)، تفکیک آلبیت هوازده از آلبیت سالم (فراگنر و همکاران، ۱۹۹۸)، ویژگی‌های کانی‌های فسفات‌ه ردینگیت در دگرسانی‌های گرمابی (فراست و همکاران، ۲۰۱۲)، کانی‌های ثانویه دگرسانی همی‌مورفیت، هیدروزینکیت، آنگلزیت، انیدریت در معادن سرب و روی (جوئیناگا و همکاران، ۲۰۱۱)، ویژگی‌های گروه آلونیت سوپرژن و تأثیر یون‌های سولفات، فسفات و یون‌های فلزی مختلف در ساختار آن (مائوبک و همکاران، ۲۰۱۲)، مثال‌هایی از به‌کارگیری این روش در شناسایی کانی‌های دگرسانی است. در این پژوهش، سعی بر آن است علاوه بر به‌کارگیری روش‌های مرسوم در شناسایی مجموعه کانی‌های دگرسانی، از روش نوین طیف‌سنجی رامان نیز استفاده شده و طیف‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.



شکل ۲: قسمتی از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ عباس‌آباد (خلعت بری و جعفری، ۱۳۸۰) و کانسارهای مس این محدوده.

چغندر سر شمالی و جنوبی، حمامی، گریک و گورخون (شکل ۲) را شامل می‌شود. وجود سنگ میزبان مشابه مانند سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب

این محدوده، پهنه‌ای به وسعت تقریبی ۱۳۰ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد و کانسارهایی چون آسیادیو، دامن جلا، معدن بزرگ، لب کال،

بالایی قرار دارد و توسط سنگ‌های رسوبی ائوسن-لیگوسن و نهشته‌های کواترنری پوشیده شده‌اند. این ذخایر مربوط به بخش بالایی توالی‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن هستند و ویژگی‌های عمومی یکسانی دارند اگر چه در جزئیات با هم متفاوت‌اند. توده‌های کانسنگ از لحاظ ساختاری به وسیله افق‌های نفوذپذیر کنترل می‌شوند. شاهد این امر گسل خوردگی‌های اصلی و فرعی فراوان با روند تقریبی شمال شرق-جنوب غرب و شکستگی‌های متعدد است. کانه‌زایی در این منطقه، درون‌زاد و ساده است و شامل کانی‌های گروه کالکوسیت، بونیت، دیژنیت، کوولیت و مس طبیعی است. کانی‌های باطله معمول در این نوع کانسارها، عموماً پیریت، هماتیت، کلسیت، کلریت، کوارتز و کلسدونی است. کانی‌های گروه کالکوسیت به عنوان کانه‌های اصلی، ساخت و بافت داربستی، رگه-رگچه‌ای، پراکنده و افشان نشان می‌دهند. ستبرای این رگه-رگچه‌ها بسیار کم است و به ندرت از چند سانتیمتر تجاوز می‌کند. کانی‌های گروه کالکوسیت در حفرات بادامکی سنگ درونگیر آتشفشانی نیز وجود دارند. در اغلب موارد حفرات بادامکی از خارج به داخل دارای منطقه‌بندی کانی‌های گروه کالکوسیت+هماتیت، کوارتز+کلسدونی، پرهنیت ± کلسیت است.

همراهی کوارتز و کلسیت با رگچه‌های کالکوسیتی کم است و معمولاً این همراهی در حفرات بادامکی سنگ میزبان بیشتر است. در این کانسارها غنی‌سازی برونزاد مرتبط با هوازدگی سطحی، عامل مهمی در کانه‌زایی به شمار نمی‌آید و تنها در بخش اکسیداسیون، کانی‌های کربناته مس همچون مالاکیت و آزوریت تشکیل شده‌اند. عموماً زون کانه‌زا در بالاترین تراز گدازه‌های آتشفشانی و آتشفشان-رسوبی قرار می‌گیرد و

آندزیت-تراکی آندزیت تا بازالتی و خصوصیات کانی‌سازی مشترک بین کانسارها، مانند ماهیت رگه‌ای کانسنگ و وجود کالکوسیت به عنوان کانه اصلی و ارتباط زمانی و مکانی این کانسارها، فرایندهای کانه‌زایی یکسانی را برای این محدوده پیشنهاد می‌کند. برای شناسایی این فرایندها، لازم است مجموعه‌های دگرسانی، گسترش آنها و همین‌طور ارتباط آنها با کانه‌زایی به دقت مورد بررسی قرار گیرند.

روش کار: جهت مطالعات کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و شناسایی مجموعه‌های دگرسانی، تعداد ۱۲۰ مقطع نازک شامل ۵۰ نمونه از مغزه‌های اکتشافی و ۷۰ نمونه سطحی، جهت مطالعات کانه‌نگاری و تعیین شیمی کانی‌ها، ۱۰ مقطع نازک-صیقلی از سنگ‌های آتشفشانی همراه با کانه‌زایی و سنگ‌های آتشفشانی بدون کانه‌زایی انتخاب شدند. برای شناسایی کانی‌ها، از فن‌آوری‌های XRD و EPMA در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران و طیف‌سنجی رامان در پژوهشکده لیزر دانشگاه شهید بهشتی بهره گرفته شد. در آزمایش رامان، از منبع لیزر پالسی - Nd YAG در فرکانس ۵۳۲nm استفاده شد. محدوده کار رامان در این آزمایش‌ها در حدود ۸۵۰ nm و شامل نواحی استوکس و آنتی‌استوکس است. به دلیل انرژی بالای لیزر پالسی، نیازی به استفاده از عدسی و متمرکز کردن باریکه بر روی نمونه نیست. قطر باریکه لیزر در محل نمونه حدود یک سانتیمتر است. بنابراین از نمونه‌های دستی و برش‌های سنگ به ابعاد (۳×۲cm) استفاده شد.

ویژگی‌های عمومی کانسارهای مس عباس-آباد

کانسارهای مس عباس‌آباد در کمربندی از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن میانی-

پرکننده فضای خالی، داربستی و رگچه‌ای بسیار نازک در سنگ‌های میزبان اتفاق می‌افتد. از لحاظ سنگ‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی ناحیه عباس-آباد اغلب در رده تراکی‌آندزیت و تراکی‌آندزی-بازالت قرار می‌گیرند (جدول ۱).

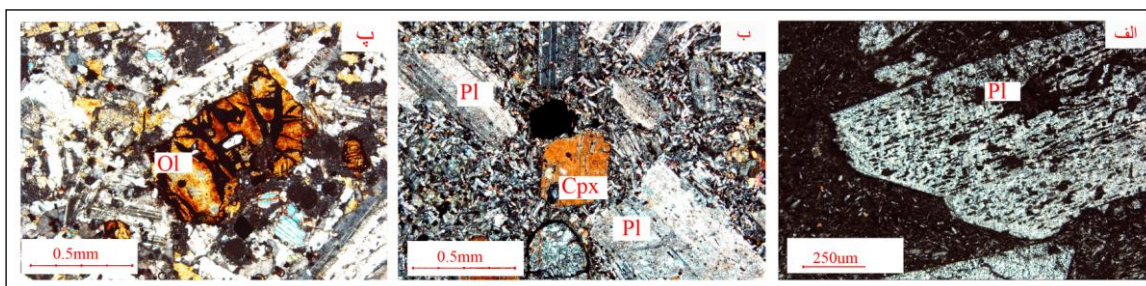
ماده معدنی به صورت چینه‌کران است. چنین ویژگی در کانسارهای شمال شیلی (رامیرز و همکاران، ۲۰۰۶) نیز دیده می‌شود. علاوه بر زون کانه‌ساز بالایی، کانه‌زایی در بخش‌های عمیق‌تر نیز صورت گرفته که ضخامت آن نسبت به این واحد بسیار کمتر است. کانه‌زایی به صورت پراکنده،

جدول ۱: سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی ناحیه معدنی عباس‌آباد.

نوع سنگ	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی	کانی‌های ثانوی	بافت
تراکی‌بازالت	پلاژیوکلاز، پیروکسن، اولیوین	آپاتیت، کدر	ایدنگزیت، کلسیت، کلریت، سربیسیت، ترمولیت-اکتینولیت	اینترگرانولار، پورفیریک، گلومروپورفیریک
تراکی‌آندزی‌بازالت	پلاژیوکلاز، پیروکسن	آپاتیت، کدر، اولیوین	کلسیت، کوارتز، زئولیت، آنالسیم، سربیسیت، اپیدوت	پورفیریک با خمیره میکروولیتی
تراکی‌آندزیت	پلاژیوکلاز، پیروکسن	آپاتیت، کدر، بیوتیت	کلسیت، کوارتز، زئولیت، آنالسیم، سربیسیت، اسکاپولیت، پرهنیت، اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت، کلینوزوئیزیت، کلریت	پورفیریک، گلومروپورفیریک، اسفرولیتی

فنوکریست و مگافنوکریست در سنگ پراکنده هستند. فراوانی قابل توجه این بلورها نشان از تشکیل بلورهای پلاژیوکلاز از یک ماگمای کم آب است چرا که آب مانع پایداری آن‌ها می‌شود (رایتر و همکاران، ۲۰۰۱). شدت دگرسانی در پلاژیوکلازها بالاست و کانی‌های ثانوی کلریت، اپیدوت، کربنات، سربیسیت را ایجاد می‌کنند (شکل ۳- الف).

این سنگ‌ها، در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن تا قهوه‌ای و دارای ساخت پورفیری و بادامکی هستند. فنوکریست‌ها شامل پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن است. بر اساس نتایج EPMA، ترکیب پلاژیوکلازها، اغلب اولیگوکلاز تا بیتونیت و ترکیب کلینوپیروکسن‌ها، تیتانواوزیت است. قسمت اعظم حجم سنگ را بلورهای پلاژیوکلاز به خود اختصاص می‌دهند که به صورت میکروولیت،



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی کانی‌ها در مقاطع نازک (الف) مگاپورفیر پلاژیوکلاز با بافت غربالی و حواشی خورده شده در خمیره میکروولیتی. این بلورها به سربیسیت، کلریت، اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند (XPL)، (ب) مگاپورفیرهای پلاژیوکلاز به همراه بلورهای خوش‌وجه پیروکسن در خمیره میکروولیتی (پ) درشت بلور خودشکل اولیوین و پدیده ایدنگستی شدن (XPL) Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Ol: اولیوین.

ایلمینیت و آپاتیت به صورت ادخال در آن وجود دارد که حاکی از تشکیل این کانی‌ها قبل از

بلورهای وجه‌دار تا نیمه وجه‌دار پیروکسن در اغلب موارد در حال دگرسانی هستند. تیتانومگنتیت،

در پی کلسیک (کربناتی شدن، اپیدوتی شدن، اورالیتی شدن) و دگرسانی سیلیسی، سریسیتی، کلریتی و هماتیتی مشخص می‌شود. شدت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانه‌زایی بالا است و با فاصله گرفتن از زون کانه‌دار از شدت دگرسانی کاسته می‌شود. دگرسانی‌های ذکر شده، از شکستگی‌ها، درزه‌ها و سیستم‌های گسلی موجود تبعیت می‌کنند.

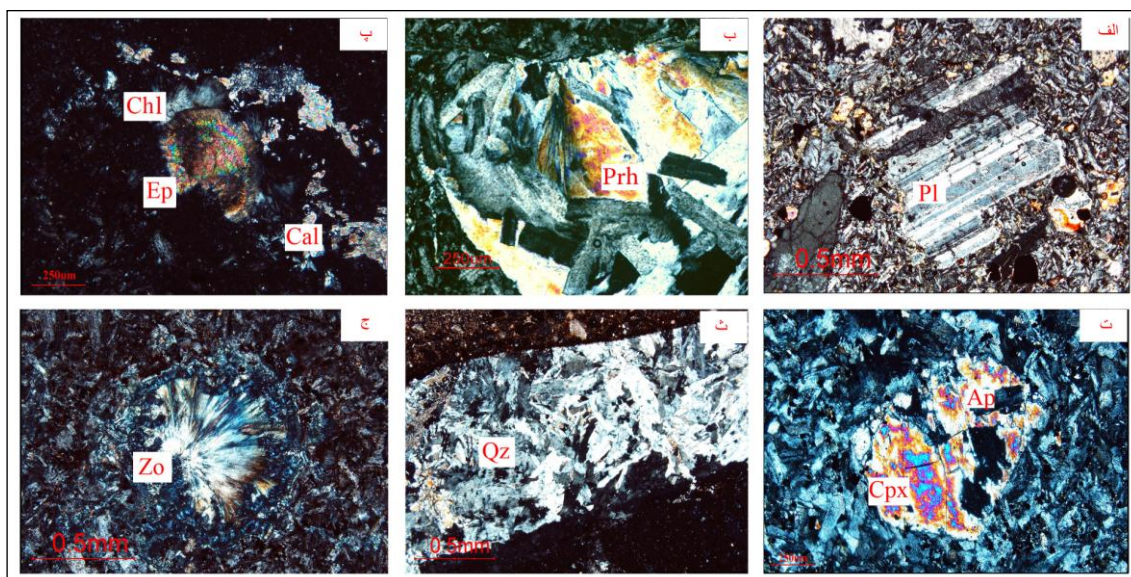
در این نوع کانه‌زایی، منطقه‌بندی دگرسانی، سیمای مشخصی را چنانچه در کانسارهای مس پورفیری شاهد هستیم، ایجاد نمی‌کند. کانی‌های دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی به صورت جانشینی، پرکننده حفرات، رگچه‌ای و رگه‌ای دیده می‌شوند. در نتیجه دگرسانی‌های ناحیه‌ای و محلی، کانی‌های اولیه سنگ تحت تأثیر قرار گرفته و انواعی از کانی‌های ثانویه را تشکیل می‌دهند از جمله: کلسیت، اپیدوت، زئولیت و کلینوزوئیزیت، کوارتز، کلسدون، زئولیت، پرهنیت، اسکاپولیت و اکتینولیت (شکل ۴). اکثر این کانی‌ها در اثر پدیده‌های زیر تشکیل شده‌اند:

پیروکسن است. پیروکسن‌ها در مقایسه با پلاژیوکلازها از دگرسانی کمتری برخوردار هستند (شکل ۳-ب). کانی‌های فرعی این سنگ‌ها، آپاتیت، آمفیبول، اولیوین (شکل ۳-پ)، بیوتیت، مگنتیت و هماتیت است.

دگرسانی‌ها

در محدوده معدنی عباس‌آباد، دو نوع دگرسانی متاسوماتیک با وسعت ناحیه‌ای و محلی رخ داده است که دگرسانی دوم مرتبط با کانه‌زایی مس است. دگرسانی پروپلیتیک شاخص دگرسانی ناحیه‌ای است و در تمام سنگ‌های آتشفشانی اعم از کانه‌زایی شده و بدون کانه‌زایی دیده می‌شود. مجموعه کانیایی اپیدوت، کلریت، کلسیت، کوارتز و آلبیت این دگرسانی را تشکیل می‌دهد. کانی‌های دگرسانی اغلب به صورت جانشینی در کانی‌های اصلی سنگ‌های آتشفشانی و یا پرکننده حفرات و به میزان کمتر به صورت رگچه‌ای دیده می‌شوند.

سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانه‌زایی، دگرسانی گرمایی را تحمل کرده‌اند که عموماً با دگرسانی پی



شکل ۴: انواع دگرسانی‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی ناحیه عباس‌آباد: الف- سریسیتی شدن در بلور درشت پلاژیوکلاز (XPL). ب- تشکیل پرهنیت در اثر دگرسانی پلاژیوکلاز. پ- رشد اپیدوت شعاعی همراه با کلسیت و

کلریت در فضای خالی گدازه آندزیتی. ت- پدیده اورالیتی شدن بلور درشت کلینوپیروکسن و تشکیل ترمولیت- اکتینولیت. ث- رگه سیلیسی از نسل دوم کوارتز که به وفور مشاهده می‌شود. ج- زوئیزیت و کلینوزوئیزیت به همراه حاشیه‌ای از کلریت در حفره بادامکی شکل سنگ آتشفشانی. Ep: اپیدوت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Zo: زوئیزیت و کلینو زوئیزیت، Prh: پرهنیت، Pl: پلاژیوکلاز، Chl: کلریت.

پدیده سوسوریتی شدن

در طی دگرسانی گرمابی و اضافه شدن آب به پلاژیوکلاز کلسیم‌دار، این کانی به اپیدوت، کربنات، سریسیت و پرهنیت (شکل ۴- الف، ب، پ) تبدیل شده و مجموعه سوسوریت را تشکیل می‌دهد (گوپتا، ۲۰۰۷).

پدیده اورالیتی شدن

کلینوپیروکسن در طی دگرسانی گرمابی به آمفیبول تبدیل می‌شود. در سنگ‌های مورد بررسی، به دلیل عملکرد دگرسانی کلسیکی بر روی بلورهای کلینوپیروکسن، آمفیبول‌های گروه ترمولیت- اکتینولیت ایجاد شده است (شکل ۴- ت).

پدیده سیلیسی شدن

یکی دیگر از پدیده‌های رایج در سنگ‌های میزبان کانه‌زایی، پدیده سیلیسی شدن است. این پدیده به صورت بافت و ساخت اسفرولیتی، پرکننده فضای خالی، بادامکی و رگه‌ای-رگچه‌ای (شکل ۴- ث) در سنگ دیده می‌شود.

از آنجا که مطالعه سیالات درگیر موجود در کانی- های شفاف مانند کوارتز و کلسیت و کانه‌های همراه در تشخیص فرایندهای کانه‌ساز نقش به- سزایی دارند، دو نسل کوارتز در این کانسارها شناسایی شد: الف- کوارتزهای نسل اول همراه با کانی‌های گروه کالکوسیت و در حفرات بادامکی سنگ قرار دارند (شکل ۵- الف). همزمانی کوارتزهای این نسل با کالکوسیت از طریق مطالعات میکروسکوپی مشخص شده است. از جمله خصوصیات بارز این نسل، ریز بودن بلورها به سمت رگه کالکوسیتی است به طوری که با

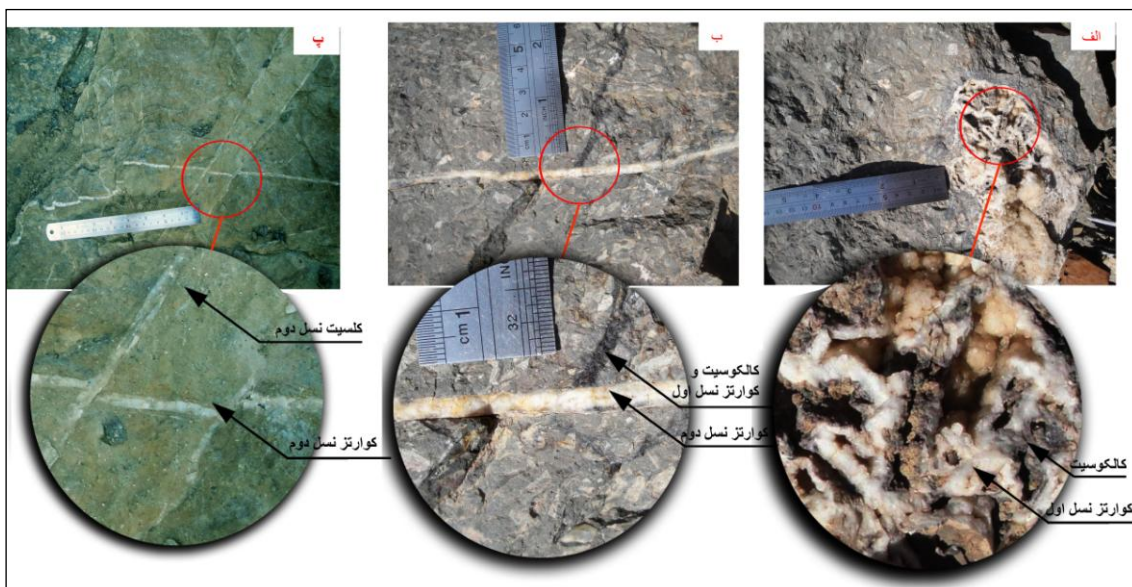
فاصله گرفتن از رگه بر اندازه آن‌ها اضافه می‌شود. همچنین کوارتزهای این گروه شکل شعاعی و کشیده دارند. این نسل از کوارتز همراه با رگچه- های کالکوسیت نیز دیده می‌شود ولی در مقایسه با کوارتزهای موجود در حفرات بادامکی، ریزتر و دارای فراوانی کمتری هستند. ب- کوارتزهای نسل دوم به صورت رگچه‌ای تا رگه‌ای ممتد در کل سنگ میزبان تزریق شده و از تکتونیک منطقه تبعیت می‌کنند. این گروه از کوارتز، رگچه‌های کالکوسیتی و حتی حفرات بادامکی حاوی کوارتز نسل اول و کالکوسیت همراه آن را قطع می‌کنند. رشد این کوارتزها از اطراف و حواشی رگه، به سمت داخل است و نشانگر بازشدگی درزه در ابتدا و سپس پرشدگی آن به وسیله محلول گرمابی حاوی سیلیس است (شکل ۵- ب).

پدیده کلسیتی شدن

علاوه بر کوارتز، کانی شفاف کلسیت نیز همراه با کانه‌ها دیده می‌شود و مانند کوارتز دارای دو نسل است. نسل اول کلسیت همراه با کانه‌ها و به صورت پرکننده حفرات بادامکی سنگ و رگچه‌ای همراه با کانه‌ها دیده می‌شود. این گروه از کلسیت، ریز بلور بوده و رخ و ماکل مشخصی ندارد. نسل دوم کلسیت به صورت رگه و در جهت دسته درزه‌های حاصل از عملکرد تکتونیک در منطقه ایجاد شده‌اند. این گروه، رگه‌های کوارتزی نسل اول و دوم را قطع کرده و منجر به جابجایی آنها در حد چند سانتیمتر شده است (شکل ۵- پ). از ویژگی‌های این گروه داشتن رخ و ماکل مشخص کلسیتی، بافت موزایکی و درشت بلور بودن است. پدیده هماتیتی شدن

اکسیداسیون، پدیده مارتیتی شدن در آن بروز می‌کند. هماتیت به صورت دانه‌های ریز و درشت در زمینه سنگ و یا به صورت رگه-رگچه‌ای به همراه رگه‌های کوارتز و کلسیت در سنگ دیده می‌شود.

یکی از دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی، پدیده هماتیتی شدن است. در نتیجه این دگرسانی کانی‌های آهن‌دار اکسید شده و هماتیت در سطح وسیع به شکل می‌گیرد. به عنوان مثال تیتانومگنتیت اولیه موجود در سنگ در اثر این پدیده، تبدیل به هماتیت شده و با افزایش

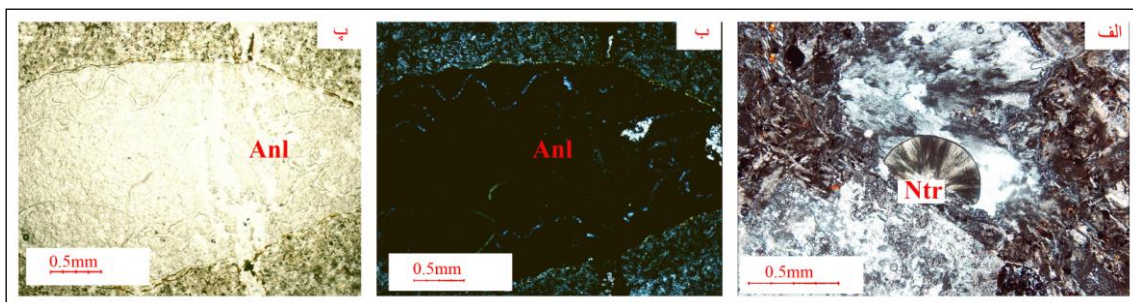


شکل ۵: الف- حفره بادامکی در گدازه آندزیتی پورفیری که توسط کوارتز نسل اول و کالکوسیت همراه با آن پر شده است. ب- کوارتز نسل دوم که رگه کالکوسیتی دودی را قطع و در حد چند سانتیمتر جابجا کرده است. پ- کلسیت نسل دوم که نسل دوم کوارتز را قطع کرده است.

حفرات زیاد است، ولی برداشت آن‌ها، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. به منظور تأیید مطالعات میکروسکوپی و تعیین دقیق کانی‌های خانواده گروه زئولیت، از روش تجزیه‌ای XRD استفاده شد. نتایج حاصل برای نمونه‌های این گروه، شامل کانی‌های ناترولیت و مزولیت از خانواده گروه زئولیت و کانی آنالسیم است (جدول ۲).

پدیده کلریتی شدن

پدیده کلریتی شدن با نزدیک شدن به زون کانه-دار به شدت افزایش یافته است بر اساس نتایج EPMA، کلریت‌های موجود از نوع آهن‌دار بوده و تا ۲۵ درصد وزنی FeO دارند. علاوه بر پدیده‌های ذکر شده، پدیده زئولیتی شدن نیز در حفرات بادامکی سنگ اتفاق افتاده است (شکل ۶). زئولیت‌ها دارای بافت و ساخت اسفرولیتی، شعاعی و متراکم هستند. اگر چه مقدار این کانی‌ها در



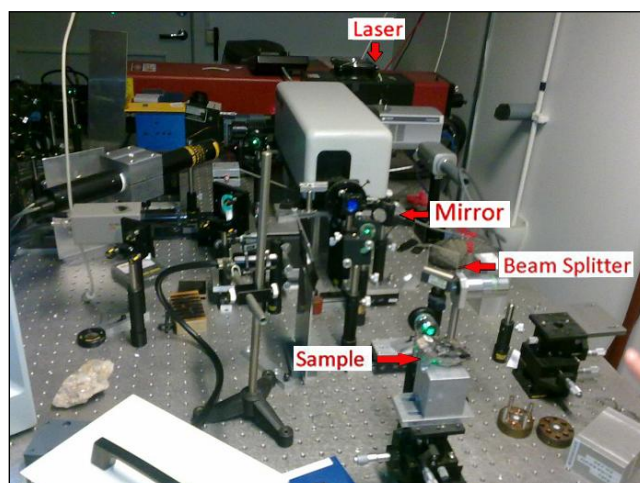
شکل ۶: الف- ناترولیت از گروه زئولیت با بافت شعاعی. ب و پ آنالسیم در نور PPL و XPL.

شکل ۷ چیدمان دستگاه طیف‌سنج رامان مورد استفاده برای آزمایش‌های کانی‌شناسی را نشان می‌دهد. در این روش کانی‌هایی با اشکال بلورین و خالص، طیف‌های بسیار واضحی را ارائه می‌دهند.

علاوه بر روش‌های گفته شده، روش طیف‌سنجی رامان برای تعیین کانی‌های مجموعه دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی و مقایسه نتایج آن با سایر روش‌های بکار برده شده، مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲: نتایج تجزیه نمونه‌های مختلف با استفاده از روش XRD.

Sample no.	Analysis method	Results
MB10	XRD	Quartz, Calcite, Hematite, Chalcocite
MB24	XRD	Natrolite, Mesolite, Analcime
MB35	XRD	Natrolite, Mesolite, Calcite
MB61	XRD	Calcite, Malachite, Quartz
MB63	XRD	Prehnite, Quartz, Hematite, Calcite



شکل ۷: چیدمان دستگاه طیف‌سنج رامان استفاده شده برای آزمایش‌های کانی‌شناسی و اجزاء آن.

موارد دارای شکل بلورین هستند. در طیف‌سنجی رامان، داده‌های حاصل شامل طیف‌های از مولکول‌های تشکیل دهنده ماده مورد آزمایش است.

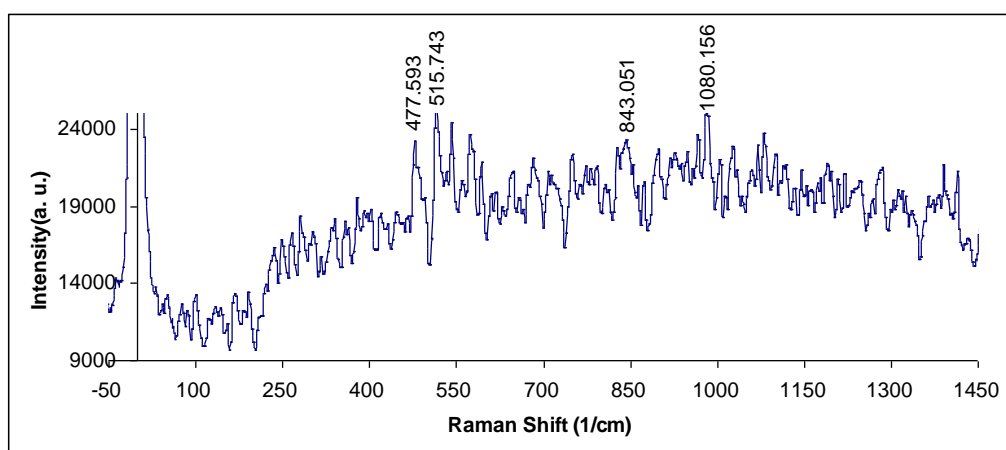
بدین منظور در این سری آزمایش‌ها، از کانی‌های موجود در حفرات بادمکی سنگ‌های آتشفشانی استفاده شد. این حفرات، توسط کانی‌های ثانویه و کانی‌های مجموعه دگرسانی پر شده‌اند و در غالب

هیدروکسیل تعلق دارد (دتریه، ۲۰۰۸). در طیف رامان پرهنیت (شکل ۸)، دو پیک اصلی cm^{-1} 477 و 515 به عنوان اثر انگشت منحصر به فرد این کانی تلقی می‌شود. این پیک‌ها مربوط به ارتعاشات مولکولی بوده و بیانگر حالت‌های خمشی و کششی هشت وجهی Al-O هستند و پیک‌های بالاتر از 1000 مربوط به حالت‌های خمشی و کششی چهاروجهی SiO_4 می‌باشد. در ارتعاشات مولکولی با دریافت انرژی، پیوندهای مولکولی تغییر کرده و حالت‌های گوناگونی را نشان می‌دهند از جمله حالت خمشی که مربوط به تغییر زاویه دو پیوند است یا حالت کششی که مربوط به تغییر در طول پیوند است (ناکاموتو، ۱۹۹۷).

در هر طیف رامان، محور افقی نشانگر جابجایی رامان است که به صورت $1/\lambda - 1/\lambda_0$ و بر حسب cm^{-1} بیان می‌شود. λ_0 طول موج لیزر القایی و λ طول موج فوتون پراکنده شده است. این جابجایی متناظر با ترازهای ارتعاشی ماده مورد بررسی است. محور عمودی نشاندهنده شدت و متناسب با مقدار فوتون‌های آشکار شده برای دستگاه است. طیف‌های بدست آمده در این روش عبارتند از:

طیف رامان پرهنیت

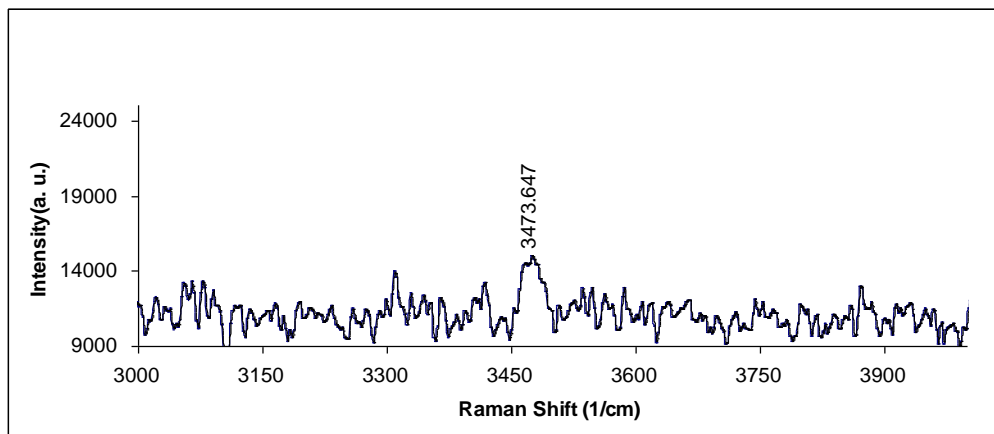
کانی پرهنیت با فرمول $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Si}_3 \text{O}_{10})(\text{OH})_2$ دارای ساختار لایه‌ای و شبکه‌ای چهار وجهی-هشت وجهی شامل صفحات مزدوج چهاروجهی $(\text{Al}, \text{Si})\text{O}_4$ و SiO_4 و صفحات منفرد هشت وجهی $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$ است. این کانی به گروه



شکل ۸: طیف رامان کانی پرهنیت. پیک‌های cm^{-1} $477/593$ و cm^{-1} $515/743$ مربوط به حالت‌های خمشی و کششی چهار وجهی Al-O است و پیک‌های بالاتر از 1000 مربوط به حالت‌های خمشی و کششی چهاروجهی SiO_4 است.

در جابجایی بالا ($3000-4000$) دیده می‌شود در حالی که پیک‌های ناشی از سایر مولکول‌ها در جابجایی کمتر از 3000cm^{-1} حضور دارند. این امر باعث عدم دخالت بیشتر پیک‌های آب در شناسایی پیک‌های مولکول‌های دیگر می‌شود.

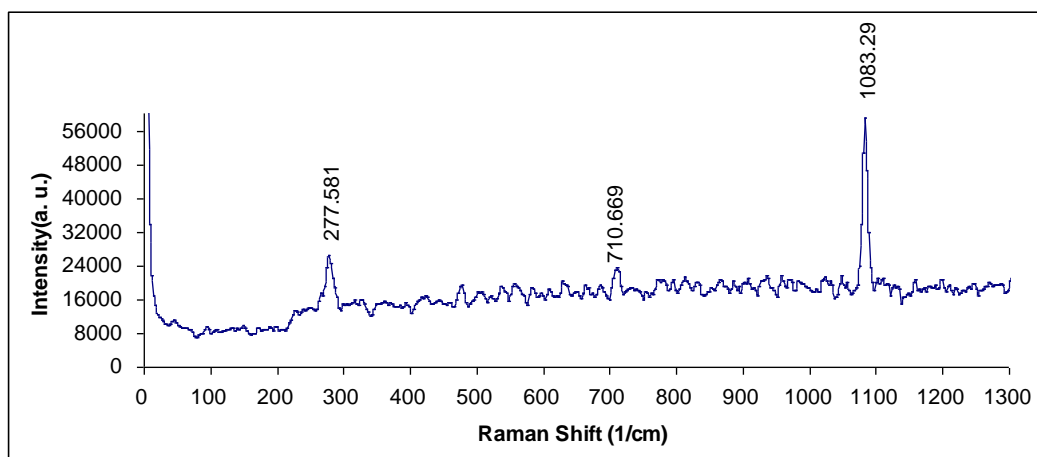
شکل ۹ طیف رامان پرهنیت را در بازه cm^{-1} $3000-4000$ نشان می‌دهد. در این بازه، حالت ارتعاشی مولکول آب قابل آشکارسازی است. پیک تقریباً پهن cm^{-1} $3473/647$ حالت کششی OH آب است و نشاندهنده حضور آب در ساختار کریستالی پرهنیت است. توجه شود که پیک آب



شکل ۹: طیف رامان پرهنیت در بازه $3000-4000 \text{ cm}^{-1}$. در این بازه حالت ارتعاشی مولکول آب قابل آشکارسازی است.

مربوط به حالت خمشی متقارن گروه CO_3 و پیک $1083/292 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به حالت کششی متقارن گروه CO_3 است.

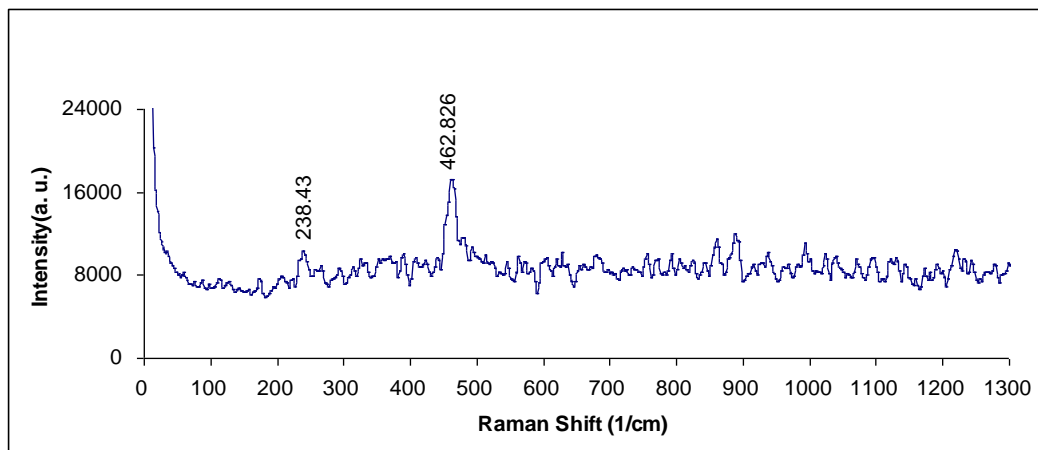
طیف رامان کلسیت
کلسیت (CaCO_3) دارای سه پیک اصلی در cm^{-1} $1083/292$ ، $710/669$ و $277/581$ است (شکل ۱۰). پیک $277/581 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات درون شبکه‌ای یون‌های کربنات، پیک $710/669 \text{ cm}^{-1}$



شکل ۱۰: طیف رامان کلسیت با سه پیک اصلی در $277/581$ ، $710/669$ ، $1083/292 \text{ cm}^{-1}$ و $277/581$

پیک $238/43 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش درون شبکه‌ای کوارتز است (شکل ۱۱).

طیف رامان کوارتز
در طیف رامان بدست آمده، دو پیک اصلی کوارتز در $462/826 \text{ cm}^{-1}$ و $238/43$ دیده می‌شود. پیک $462/826 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به حالت کششی Si-O و



شکل ۱۱: طیف رامان کوارتز با دو پیک اصلی در 238.43 و 462.826 cm^{-1} .

آندزیت تا تراکی بازالت قرار دارند. کانه‌زایی در این منطقه، درون‌زاد و ساده است و شامل کانی‌های کالکوسیت، بورنیت، دیژنیت، کولیت و مس طبیعی است. غنی‌سازی برون‌زاد در این کانسارها عامل مهمی در کانه‌زایی به شمار نمی‌آید. کانی‌های باطله معمول در این نوع کانسارها، عموماً پیریت، هماتیت، کلسیت، کلریت، کوارتز و کلسدونی است. دو نوع دگرسانی در مقیاس ناحیه‌ای و محلی در این ناحیه قابل تشخیص است. دگرسانی پروپلیتیک، شاخص دگرسانی ناحیه‌ای است و با کانی‌های آلبیت، اپیدوت، کلریت، کلسیت و کوارتز مشخص می‌شود. دگرسانی محلی، مرتبط با کانه‌زایی مس است و تنها در بخش‌های کانه‌زایی شده دیده می‌شود. در این کانسارها، منطقه‌بندی دگرسانی، سیمای مشخصی را ایجاد نمی‌کند. دگرسانی‌های کربناتی، سیلیسی و کلریتی شاخص دگرسانی محلی و مرتبط با کانه‌زایی است. در آزمایش طیف سنجی رامان، طیف‌های بسیار واضح و قوی از کانی‌های پرنیت، کلسیت و کوارتز در تمام نمونه‌های مورد بررسی، بدست آمد که این امر تأییدی بر وجود دگرسانی‌های گسترده کربناتی و سیلیسی نسبت به دیگر دگرسانی‌هاست.

در آزمایش‌های طیف‌سنجی رامان کانی‌هایی که دارای فراوانی و شدت بیشتری هستند، طیف‌های قوی ایجاد کرده و به سهولت توسط دستگاه قابل آشکارسازی هستند. کانی‌های پرنیت، کلسیت و کوارتز در آزمایش‌های طیف‌سنجی رامان مربوط به دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی دارای طیف‌های قوی بوده و در تمام نمونه‌های آزمایش شده، قابل آشکارسازی هستند. این امر نشانگر فراوانی این کانی‌ها و عملکرد وسیع‌تر دگرسانی کربناتی و سیلیسی در سنگ‌های میزبان کانه‌زایی است.

نتیجه‌گیری

۱- روش طیف سنجی رامان یکی از جدیدترین روش‌های تجزیه مولکولی است که به دلیل مزایایی چون عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه در اکثر موارد، غیر مخرب بودن آزمایش بر روی نمونه‌ها، کاربری در سه حالت ماده، عدم دخالت آب در تجزیه، در شاخه‌های مختلف علوم زمین کاربرد دارد. با استفاده از این روش کانی‌های مجموعه دگرسانی قابل شناسایی است.

۲- کانسارهای مس عباس‌آباد به صورت چینه‌کران در کمربندی از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن با ترکیب آندزیت، تراکی

- سامانی، ب.، ۱۳۸۶. گزارش زمین‌شناسی معدنی - اقتصادی منابع کانسنگ مس در میدان معدنی عباس‌آباد (شهرستان شاهرود)، شرکت زمین‌شناسی و اکتشاف نازیل شرق، ۲۰۶ صفحه.

- Adar, F., Naudin, C., Whitley, A., and Bodnar R., 2004. Use of a microscope objective corrected for a cover glass to improve confocal spatial resolution inside a sample with a finite index of refraction, *Applied Spectroscopy*, v. 58, p. 1136-1137.
- Detrie, Th.A., 2008. Perhnite at the atomic scale: Al/Si ordering, hydrogen environment, and high pressure behavior, thesis in geosciences, State University, Virginia, 75p.
- Frogner, P., Broman, C., and Lindblom, S., 1998. Weathering detected by Raman spectroscopy using Al-ordering in albite, *Chemical Geology*, v. 151, p. 161-168.
- Frost, R. L., Weier, M. L., Williams, P. A., Leverett, P., and Klopogge, J. T., 2007. Raman spectroscopy of the sampleite group of minerals, *Journal of Raman Spectroscopy*, v. 38, p. 547-583.
- Frost, R. L., Xi, Y., Scholz, R., Belotti, F. M., and Lagoeiro, L. E., 2012. Chemistry, Raman and infrared spectroscopic characterization of the phosphate mineral reddingite: $(\text{MnFe})_3(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O}, \text{OH})_3$, a mineral found in lithium-bearing pegmatite, *Physic and Chemistry of Minerals*, v. 39, p. 803-810.
- Goienaga, N., Arrieta, N., Carrero, J. A., Olivares, M., Sarmiento, A., Martinez-Arkarazo, I., Fernández, L. A., and Madariaga, J. M., 2011. Micro-Raman spectroscopic identification of natural mineral phases and their weathering products inside an abandoned zinc/lead mine, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 80, p. 66-74.

منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- خلعت‌بری، م.، و جعفری، ع.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی عباس‌آباد به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- Gupta, A. K., 2007. *Petrology and Genesis of Igneous Rocks*, Narosa, India, 479 p.
- Long, D. A., 2002. *The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules*, Chapter 3: Classical Theory of Rayleigh and Raman Scattering, John Wiley & Sons Ltd, England, p. 31-48.
- Maubec, N., Lahfid, A., Lerouge, C., Wille, G., and Michel, K., 2012. Characterization of alunite supergroup minerals by Raman spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 98, p. 925-939.
- McMillan, F., 1989. Raman Spectroscopy in Mineralogy and Geochemistry, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Arizona University, p. 255-283.
- Michaelian, K. H., Zhang, S. L., Yariv, S., and Lapides, I., 1998. Low-frequency Raman spectra of kaolinite / alkali halide complexes, *Applied Clay Science*, v. 13, p. 233-243.
- Nakamoto, K., 1997. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*, 5th. edition, Part A, Wiley.
- Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A.N., Fernandez-Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M., and Lehmann, B., 2006. The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. *Mineral Deposita*, v. 41, p. 246 - 258.
- Richter, K., and Rosas - Elguera, J., 2001. Alkaline lava in the volcanic front of western Mexican volcanic belt: Geology and petrology of Ayulta and Tapalpa

volcanic fields, *Journal of Petrology*, v. 42, p. 2333 – 2361.

- Schmitt, M., Popp, J., 2005. Raman spectroscopy at the beginning of the twenty- first century, *Journal of Raman Spectroscopy*, v. 37 p. 20-28.

- Urmos, J., Sharma, S. K., and Mackenzie, F. T., 1991. Characterization of some

biogenic carbonates with Raman spectroscopy, *American Mineralogist*, v. 76, p. 641-646.

- White, Sh. N., 2008. Laser Raman spectroscopy as a technique for identification of seafloor hydrothermal and cold seep minerals, *Chemical Geology*, v. 256, p. 240- 252.