



کانی‌شناسی و نحوه‌ی تشکیل کانسارهای نسوز میشدوان بافق، ایران مرکزی

امیر حسین کوهساری*، سید حسین مجتهدزاده، مصطفی دهقانی احمدآباد

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله: ۸۸/۷/۲۵، نسخه نهایی: ۸۸/۱۱/۲۰)

چکیده: کانسار میشدوان بافق یکی از مناطق شناخته شده‌ی ایران مرکزی است که دارای پتانسیل معدنی از کانی‌های گروه سیلیمانیت است. سازندهای رخمون شده بیشتر از سنگ‌های دگرگون ناشی از دگرگونی ناحیه‌ای وابسته به دوره ی پرکامبرین هستند. کانی‌های گروه سیلیمانیت در زمینه‌ی انواع شیست‌ها پراکنده هستند. منطقه زمین ساخته بوده و در مراحل بعد از دگرگونی ناحیه‌ای، توده‌های آذرین نفوذی نیز در سنگ‌ها تزریق شده‌اند. منطقه‌ی مورد بررسی دارای گسترشی در حدود ۹۵ کیلومتر مربع است که بر اساس نوع، مقدار و کیفیت کانی‌های گروه سیلیمانیت به چهار بلوک ذخیره، تقسیم‌بندی شده است. در هر یک از بلوک‌ها ترانشه-ها و چاهک‌های اکتشافی حفر شد. نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک از رخمون‌های سطحی، ترانشه‌ها و چاهک‌ها انجام شد. برای شناسایی نوع ماده‌ی معدنی، از میان نمونه‌های گرفته شده، تعدادی نمونه برای بررسی مقاطع نازک و تعدادی نیز برای آنالیزهای XRD و XRF ارسال شدند. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته مشاهده شد که ماده‌ی معدنی از نوع کیانیت و سیلیمانیت بوده و کانی آندالوزیت به‌ندرت دیده می‌شود. با توجه به نوع سنگ‌های اطراف و درجات دگرگونی آن‌ها و بررسی‌های مقاطع نازک و XRD، تغییر فاز آندالوزیت اولیه به سیلیمانیت و کیانیت در اثر دگرگونی در دمای بالای مجاورتی، به‌عنوان عامل مهم این پدیده معرفی می‌شود. همچنین با توجه به نتایج XRD از نمونه‌های برداشت شده که فقط یک نمونه مقدار کمی کیانیت نشان داده است، چنین به نظر می‌رسد که عیار کلی ماده‌ی معدنی کم بوده و از این نظر وضعیت رضایت بخشی را از منطقه نشان نمی‌دهد. از این رو فرآوری این ماده‌ی معدنی با مشکلات زیادی همراه بوده یا احتمالاً فاقد توجیه اقتصادی است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی، آندالوزیت، سیلیمانیت، کیانیت، کانی‌های نسوز، شیست، کانسار میشدوان بافق.

مقدمه

ناحیه‌ای بوده و سیلیمانیت در دما و فشار بالا بیشتر در اثر دگرگونی مجاورتی تشکیل می‌شود [۱]. این کانی‌ها از دیرباز به عنوان ماده‌ی اولیه در تهیه‌ی نسوزهای مولایتی مطرح بوده و به خاطر خواص گرمایی و مکانیکی بسیار بالا همچنان در صنایع جدید نسوز مورد توجه و پژوهش هستند [۲، ۳]. مولایت‌های تولید شده از آندالوزیت علاوه بر کاربرد به عنوان نسوز، به دلیل مقاومت در مقابل دمای بالا و ضریب انبساط

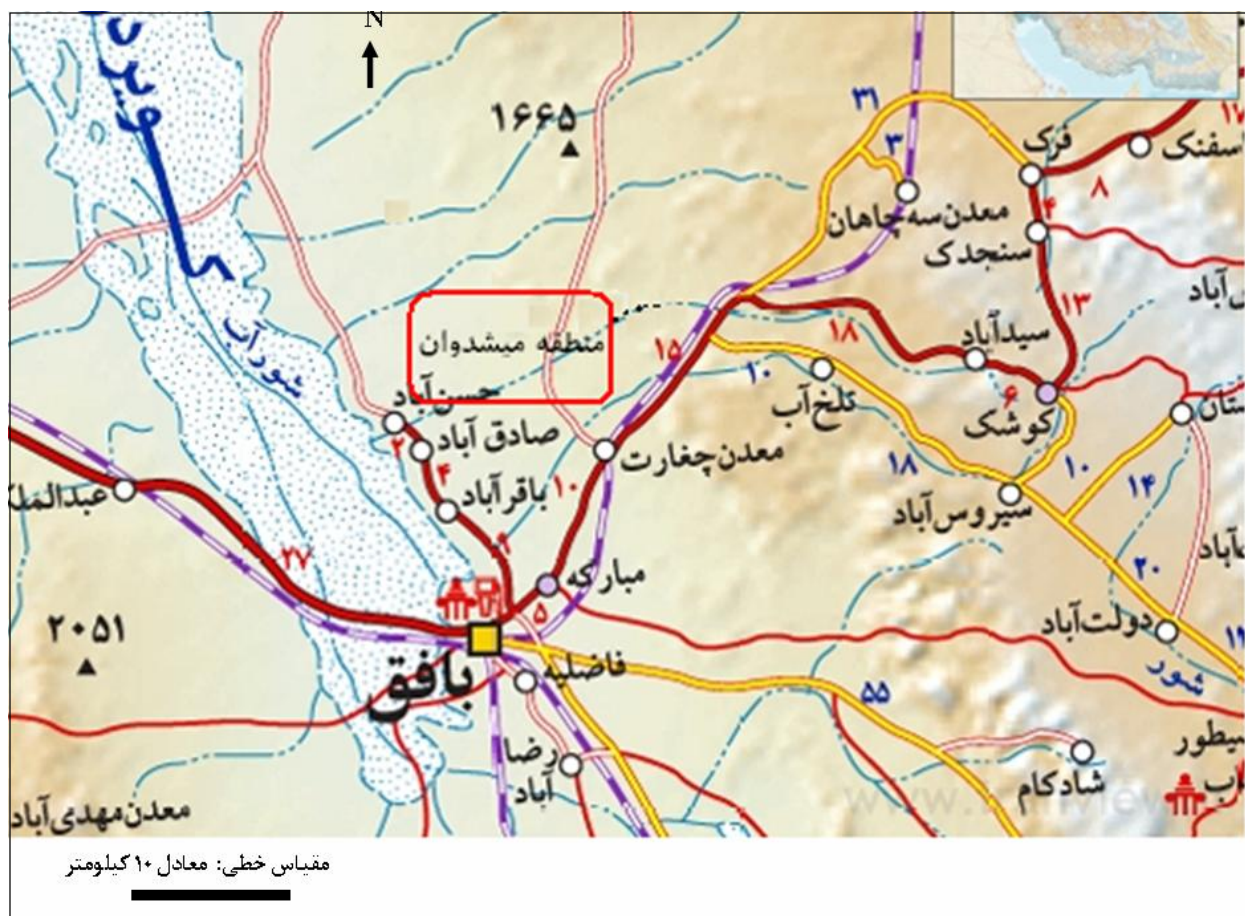
گروه سیلیمانیت شامل سه کانی سیلیمانیت، آندالوزیت و کیانیت (دیستن) هستند که هر سه چندریخت با ترکیب Al_2SiO_5 می‌باشند، این گروه همچنین شامل بعضی کانی‌های دیگر مانند یاقوت و مولایت نیز هست. آندالوزیت در دما و فشار متوسط بیشتر در اثر دگرگونی ناحیه‌ای تشکیل می‌شود. کیانیت نیز محصول دمای متوسط و فشار بالا در دگرگونی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۸۱۲۲۵۲۲ (۰۳۵۱) ۹۸+، نمابر: ۶۲۲۵۷۲۰ (۰۳۵۱) ۹۸+، پست الکترونیکی: Kohsary@yazduni.ac.ir

گرمایی مشابه با فیلم‌های نازک سیلیکونی، به‌عنوان مواد مناسب در کاربرد آن‌ها در صنایع جدید مانند صنعت ساخت سلول‌های خورشیدی [۴] و نیز در نانوکمپوزیت‌ها [۵] بکار گرفته شده‌اند.

برای اولین بار شاخص‌هایی از مواد معدنی دیرگداز (گروه سیلیمانیت) توسط کارشناسان اداره کل معادن و فلزات استان یزد در فاصله‌ی ۱۵۰ کیلومتری یزد در منطقه‌ای به نام میشدوان بافق، در شمال غربی معدن سنگ آهن چغارت گزارش شد. در سال ۱۳۷۷ طرحی از طرف اداره کل معادن و فلزات استان یزد به نام پی‌جویی‌های مقدماتی ذخایر آندالوزیت میشدوان (بافق) مطرح شد، و از سوی شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد ایران (واحد اکتشاف جنوب) مورد اجرا قرار گرفت. در قالب این طرح گستره‌ای به گستردگی حدود ۹۵ کیلومتر مربع مورد بررسی قرار گرفت [۶]. به دنبال آن طرح پی‌جویی نیمه تفصیلی در سال ۱۳۷۹ نیز اجرا شد [۷]. منطقه‌ی مورد

بررسی در ۳۵ کیلومتری شمال بافق، در مسیر جاده‌ی خاکی معدن چغارت به زریگان و در منطقه‌ی میشدوان واقع شده است. این منطقه با مختصات $55^{\circ} 29' 27''$ تا $55^{\circ} 26' 45''$ طول شرقی و $31^{\circ} 49' 22''$ تا $31^{\circ} 49' 33''$ عرض شمالی در جنوب شرقی برگه ی ۵۰۰۰۰: ۱ حسن‌آباد در بخش مرکزی دهستان قرار دارد. در شکل شماره ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی آورده شده است. این منطقه در یک ناحیه‌ی شدیداً گرگون واقع شده است. بیشتر رخنمون‌های سنگی منطقه شامل آهک‌های دگرگون‌شده، میکاشیست، گارنت‌شیست، گارنت‌میکاشیست، سیلیمانیت‌شیست و گنیس است. گزارش‌های ارائه شده از سوی شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد ایران (اکتشاف واحد جنوب) وجود کانی‌های گروه سیلیمانیت، بیشتر به همراه گروه خاصی از شیست‌ها گزارش شده است [۷].



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه‌ی مورد بررسی.

گستره‌ی مورد بررسی در منطقه‌ی میشدوان بافق، بخشی از زون ایران مرکزی با مشخصات و ویژگی‌هایی همانند دیگر مناطق ایران مرکزی است. این بخش و گستره‌ی اطراف آن از سنگ‌های قدیمی دگرگونه‌ی پرکامبرین تشکیل شده است. رخنمون‌های جوان‌تر فقط محدود به رسوب‌های کوارترنر و آبرفت‌های عهد حاضرند. همبری بیشتر واحدها عادی و برخی گسله هستند. منطقه شدیداً زمین ساخته بوده و روند عمومی ساختاری شمال شرقی - جنوب غربی است [۱۰].

توپوگرافی منطقه آرام و فقط رخنمون آهک‌های دگرگون - شده‌ی منطقه از توپوگرافی مرتفع‌تری برخوردار است. اختلاف در مقاومت فیزیکی سنگ‌های همجوار از جمله لایه‌های شیستی و لایه‌های آهک دگرگون‌شده، موجب شده است که لایه‌های شیستی به‌صورت تپه ماهورهای با شیب ملایم بین ارتفاعات متشکل از واحدهای آهکی - دولومیتی دگرگون‌شده‌ی مقاوم قرار گیرند. از این رو آبراهه‌ها بیشتر در محل شیست‌ها واقع شده‌اند. در شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی نمادین منطقه آورده شده است [۶].

چنانکه در نقشه زمین‌شناسی منطقه دیده می‌شود، سن بیشتر سازندهای منطقه پرکامبرین است و از سازندهای جدید جز کوارترنر، رسوب‌های جوانتر دیده نمی‌شود. همچنین در یک نگاه سطحی ملاحظه می‌شود که بیشترین پوشش نقشه زمین - شناسی، مربوط به واحدهای مجموعه بنه شور و حاوی آمفیبولیت، شیست‌ها و گنیس‌ها هستند [۶].

واحدهای مورد شناسایی در منطقه

براساس بررسی‌های انجام گرفته روی نقشه‌های منطقه، عکس - های هوایی و نیز بازدیدهای صحرایی و پیمایش‌های انجام شده، بررسی‌های سنگ‌شناسی چندین واحد سنگی در منطقه مورد شناسایی قرار گرفتند و تفکیک شدند. اکنون می‌پردازیم به شرح مختصر واحدهای سنگی مورد بررسی در منطقه‌ی مورد پی جویی میشدوان .

مجموعه بنه شور

به‌طور کلی می‌توان گفت تمامی بیرون‌زدگی‌های سنگی در گستره‌ی مورد بررسی مربوط به مجموعه دگرگونه‌ی بنه‌شورو است که به‌صورت بیرون‌زدگی‌های بیشتر کم ارتفاع در این

بنابر استانداردهای اعلام شده، وجود حداقل ۵۴٪ Al_2O_3 و حداکثر ۱/۵٪ اکسید آهن و ۲٪ اکسید تیتانیم و یا ۲٪ اکسیدهای قلیایی چون سدیم، پتاسیم و کلسیم برای مواد اولیه آندالوزیتی برای تهیه‌ی نسوزهای مولایتی ضروری است [۹، ۱۰] در حالی که در بیشتر مواد اولیه‌ی معدنی، درصد Al_2O_3 بین ۱۰-۲۰٪ تغییر می‌کند که ضرورت فرآوری با روش‌ها و شرایط مناسب را می‌طلبد. در کشور ما نیز برای تامین مواد اولیه‌ی فرآورده‌های نسوز و دیرگداز، مناطقی همچون نهبندان، ده‌سلم و همدان و نیز میشدوان بافق مورد توجه قرار گرفته‌اند. در همین راستا طرح بررسی‌های کانی‌شناسی ذخایر آندالوزیت میشدوان بافق به منظور بررسی پتانسیل منطقه برای پی‌جویی مواد نسوز به اجرا درآمده است. منطقه‌ی مورد پی جویی بر اساس نوع، مقدار و کیفیت کانی‌های گروه سیلیمانیت و نیز میزان ذخیره‌ی آن‌ها به چهار بلوک ذخیره‌ی I، II، III و IV تقسیم شده است [۷]. در هریک از این بلوک‌ها ترانشه‌ها و چاهک‌های پی‌جویی حفر شدند تا دسترسی به ماده‌ی معدنی امکان‌پذیر باشد. حفاری‌های انجام شده شامل تعداد ۱۲ ترانشه و ۶ چاهک‌اند.

در این مقاله کانی‌شناسی و چگونگی تشکیل کانسار آندالوزیت میشدوان بافق مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله اهداف این بررسی‌ها تعیین نوع کانی‌ها، مقدار نسبی هر یک، شکل قرارگیری، چگونگی ارتباط آن‌ها و به‌طور کلی بافت آن - هاست. از نتایج این کار پژوهشی در بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی، آزمایش‌های فرآوری و بررسی‌های امکان طرح پی - جویی تفصیلی استفاده خواهد شد [۹].

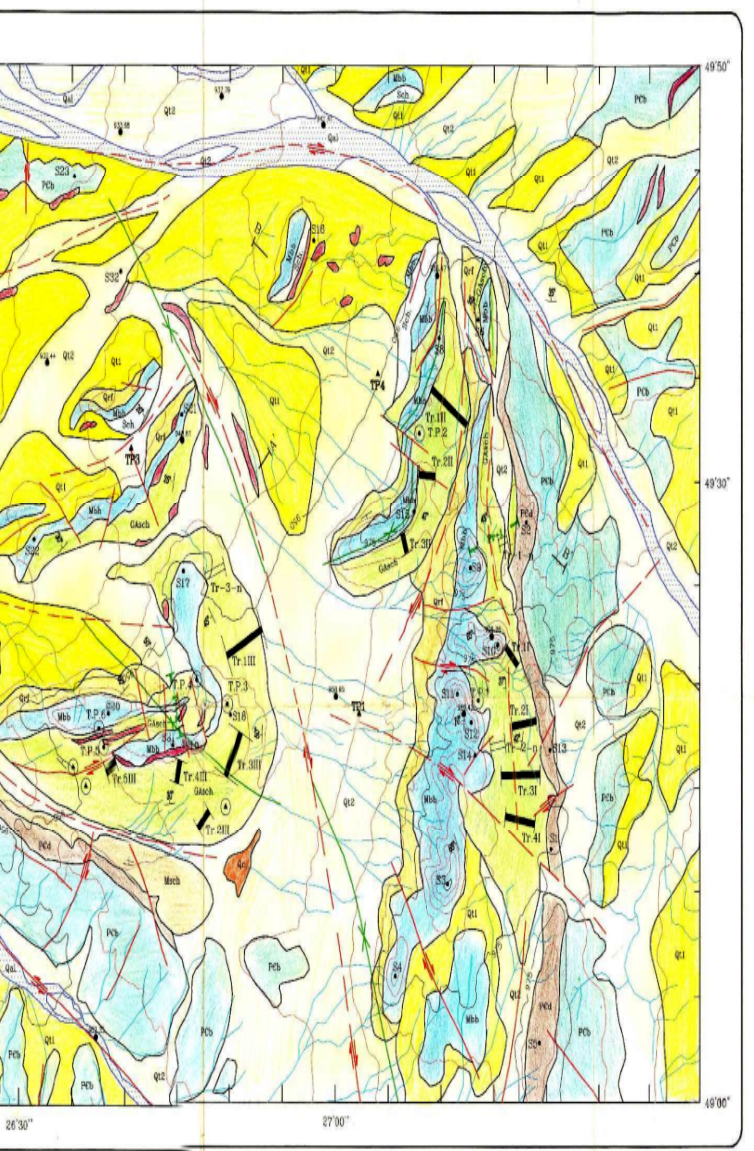
لازم به یاد آوری است که چنانکه خواهیم دید، مهم‌ترین کانی‌های گروه آلومینیویم سیلیکات در این کانسار، باتوجه به بررسی‌های کانی‌شناسی و XRD، عبارتند از کیانیت و سیلیمانیت، ولی نامگذاری کانسار با توجه به وجود کانی با مشخصات ظاهری آندالوزیت در سطح رخنمون‌ها صورت گرفته است. به‌کارگیری نام این کانی‌ها بجای هم در مراجع پژوهشی و پی‌جویی کانسار میشدوان و نیز در این مقاله به همین دلیل است.

زمین‌شناسی منطقه

گنیس، کوارتزیت و مرمر است که کم و بیش به طور متناوب قرار گرفته‌اند، و شامل واحدهای زیر است:

گستره رخنمون دارد. نام این مجموعه، از کوه‌هایی واقع در پیرامون ساغند اقتباس شده است. ضخامت این سری به ۲۰۰۰ متر می‌رسد. این مجموعه دگرگونه شامل شیست، آمفیبولیت،

GEOLOGICAL MAP OF MISHDOVAN AREA



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی آندالوزیت میشدوان بافق [۶].

واحد کوارتزیت (q)

این واحد سخت بیشتر در طبقات بالای ماده‌ی معدنی و در بعضی بخش‌ها بین واحدهای دیگر به صورت عدسی‌های جداگانه و نیز به صورت لایه‌هایی با ضخامت کم دیده می‌شود. بیشترین رخنمون‌های واحد کوارتزیتی به صورت عدسی، در

غرب ذخیره‌ی بلوک II و شمال ذخیره‌ی بلوک III و بیشترین رخنمون‌های واحد کوارتزیتی به صورت لایه‌های هم‌شیب با واحد آهک‌های دگرگونه، در غرب ذخیره‌ی I و در غرب ذخیره‌ی III دیده می‌شود.

واحد گنیس (gn)

یکی دیگر از واحدهای سنگی که در منطقه مورد بررسی به صورت محدود دیده می‌شود، واحد گنیس است که با علامت gn در نقشه نشان داده شد. گنیس یکی از گروه‌های مهم سنگ‌های دگرگونی است که در مجموعه‌های با دگرگونی بالا به فراوانی یافت می‌شود، ولی در گستره‌ی تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی میشدوان، این واحد به صورت رخنمون‌های محدود در بخش غربی ذخیره‌ی بلوک IV دیده می‌شود. به نظر می‌رسد تشکیل واحد گنیس مربوط به نفوذ توده‌های ماگمایی که فاصله‌ای از گستره‌ی مورد بررسی قرار دارند و به یک دگرگونی درجه‌ی بالا وابسته‌اند ولی تأثیرهای آن در منطقه کم است.

واحد آمفیبولیت شیست

در منطقه‌ی مورد بررسی، یک سری از سنگ‌های خرد شده سبز رنگ گسترش داشت که جنس آن‌ها آمفیبولیت شیست است. گسترش آن‌ها زیاد و در اثر عوامل زمین‌ساختی بسیار خرد شده‌اند. این واحد، بدون تورق در منطقه دیده می‌شود و درز شکاف در آن زیاد است، و همین عامل باعث فرسایش شدید آن شده است.

واحد شیست (sch)

شیست‌ها مهم‌ترین سنگ‌های مجموعه بنه شورو را تشکیل می‌دهند. این سنگ‌ها به چند گروه تقسیم می‌شوند و با رنگ‌های متفاوتی در منطقه‌ی مورد بررسی دیده می‌شوند. میکاشیست آندالوزیت‌دار به رنگ خاکستری تا خاکستری روشن و در بعضی جاها به رنگ نقره‌ای، گارنت‌آندالوزیت‌شیست به رنگ صورتی و خاکستری، شیست سخت به رنگ سیاه تیره تا خاکستری، شیست نرم کانه‌دار به رنگ سیاه، کاردیوریت شیست و میکاشیست به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند. به‌طور کلی شیست‌ها تقریباً در شرایط متنوعی از شدت دگرگونی تشکیل می‌شوند و معمولاً با افزایش درجه‌ی دگرگونی، نسبت کانی‌های میکا در آن‌ها به علت تبدیل شدن به کانی‌های دیگر کم می‌شود و در نتیجه شیستوزیته سنگ‌ها نیز به تدریج کمتر می‌شود. واحد شیست منطقه‌ی مورد بررسی در اثر دگرگونی ناحیه‌ای به وجود آمده است، ولی کانی‌های گروه سیلیمانیت موجود در این واحد در فاز دگرگونی و احتمالاً دگرگونی مجاورتی در اثر نفوذ توده‌های گرانیتی و

گرانودیوریتی تحت فشار و دمای بالا تشکیل شده‌اند. در اثر نفوذ کرین، بخش‌هایی از آندالوزیت‌های در منطقه کیاستولیتی شده و دارای ماکل صلیبی هستند. بلورهای سیلیمانیت و آندالوزیت در این شیست‌ها بیشتر ابعادی در حدود ۲ تا ۵ سانتیمتر دارند که گاهی طول آنها به ۱۰ سانتیمتر نیز می‌رسد. مقدار آلومینوسیلیکات‌های این شیست‌ها از ۵ تا ۲۰ درصد متغیر است.

واحد آهک‌های دگرگون شده

آهک‌ها و دولومیت‌های دگرگون شده نیز از جمله زیر واحدهای مجموعه بنه شورو را تشکیل می‌دهند. این واحد به صورت دگرشیب روی شیست‌های کانه‌دار قرار گرفته است. گسترش آن‌ها زیاد بوده و ضخامتی در حدود ۴۰۰ متر دارند. براساس زمان‌سنجی‌های انجام شده، سن این واحد را به اینفراکامبرین تا کامبرین نسبت می‌دهند. سنگ‌های یاد شده خاکستری تا سرخ کم‌رنگ و آجری و در بعضی جاها به صورت توده‌ای دیده می‌شوند که در واقع به بخش‌های بالایی سری ریزو و معادل با آهک زیریگان با زمان کامبرین زیرین وابسته‌اند.

سازندهای بین پالتوزوئیک تا کواترنری

این سازندها در گستره مورد نظر رخنمون نداشته است ولی در مناطق اطراف، سازندهای پالتوزوئیک به صورت بیرون زدگی‌های کوچک، کم ارتفاع و پراکنده در بخش شمال و شرق منطقه دیده می‌شود که بیشتر از ماسه‌سنگ و کواترنزیت و گاهی از آهک و دولومیت‌های فرسایش یافته تشکیل شده‌اند و به پالتوزوئیک تحتانی تعلق دارند [۱۰].

رسوبهای کواترنری

رسوب‌های کواترنری که شامل تپه‌های شنی، پادگانه‌ها و دشت‌های آبرفتی قدیم و جدید، نمک‌زار و غیره هستند، مناطق گود حد فاصل ارتفاعات شرقی و غربی را پر کرده‌اند.

زمین‌شناسی ساختاری منطقه‌ی مورد بررسی

مهم‌ترین گسلی که در این منطقه تأثیر زیادی گذارده گسل پشت بادام است. این گسل از با فاز کوهزایی کاتانگایی حاصل شده است. این گسل راست‌گرد بوده و راستای شمال غرب - جنوب شرق (روند کاتانگایی) دارد که در سمت غرب خود با گسل‌های دیگری از جمله گسل چاپدونی موازی است.

دگرگونی منطقه‌ی مورد بررسی

اکثر سنگ‌هایی که در منطقه‌ی مورد بررسی گسترش دارند سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین بوده و بیشتر دارای خاستگاه آواری آتشفشانی، آتشفشانی و آواری پلیتی هستند که در زمان پرکامبرین تحت تأثیر فازهای دگرگونی قرار گرفته‌اند و متاثر از جنبش‌های کوهزایی کاتانگایی چین خورده‌اند. گرمای حاصل از این دگرگونی آنچنان زیاد نبوده است که بتواند کانی‌های دگرگونی گرمایی و فشار بالا را به وجود آورد. در نتیجه در این مرحله از دگرگونی شیبست‌ها تشکیل شده و در درون آن‌ها آندالوزیت‌ها شکل گرفته‌اند. دمای این فاز دگرگونی پایین تا متوسط و فشار آن متوسط تا بالا بوده است.

پس از فاز دگرگونی ناحیه‌ای، توده‌های نفوذی از گونه‌ی اسیدی تا متوسط، منطقه را تحت تأثیر قرار داده و باعث دگرگونی از نوع همبری شده‌اند. در واقع علت دگرگونی، فشار ایستایی ناحیه‌ای با ویژگی دگرنهادی بوده و موجب آلیت‌زایی، تشکیل اسکاپولیت و به دنبال آن شکل گرفتن معادن زیادی در پیرامون منطقه شده است. گرمای این توده‌ها باعث شکل‌گیری کانی‌های آندالوزیت که به دماهای پائین تا متوسط وابسته‌اند به کانی‌های با دما و فشار بالا مانند سیلیمانیت تبدیل شده‌اند.

روش بررسی

روش بررسی در این مقاله شامل مراحل زیر است:

الف- بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۰.۰۰۰.

ب- برداشت چاهک‌ها، ترانشه‌ها و رخنمون‌ها در راستای نیمرخ‌های عمود بر ساختار منطقه.

ج) نمونه برداری از بلوک‌های ذخیره ساز به منظور بررسی‌های کانی‌شناسی.

د- بررسی‌های کانی‌شناسی مقاطع نازک، تجزیه و بررسی به روش XRF و XRD.

ه) تعبیر و تفسیر نتایج با توجه به موارد بالا.

نمونه برداری از کانسار و تهیه‌ی نمونه‌ی معرف

برای دستیابی به یک نمونه‌ی مناسب که حداقل معرف بخشی از کانسار باشد، باید قوادی را رعایت کرد. این قوائد بیشتر تحت تأثیر هدف نمونه برداری‌اند. در این پژوهش، هدف بررسی‌های کانی‌شناسی است و حداقل باید بتوان سه آزمایش

مهم را روی آن‌ها انجام داد که شامل تهیه‌ی مقاطع نازک میکروسکوپی، آنالیز XRF و روش تشخیص با XRD است. از عامل دیگر می‌توان به چگونگی محیط نمونه برداری اشاره کرد. در این کار پژوهشی محیط نمونه برداری بلوک‌های ماده‌ی معدنی هستند که به وسیله‌ی ترانشه‌ها و چاهک‌ها دسترسی پذیرند. با توجه به ملاحظات یاد شده و درجه‌ی همگنی کانی-ساز، از هر محل حدود ۳ کیلوگرم نمونه‌ی معرف تهیه شد.

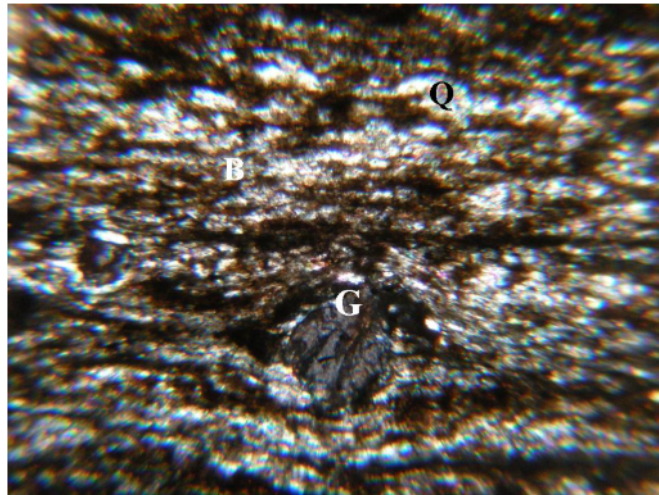
بررسی‌های سنگ‌شناسی با استفاده از مقاطع نازک

از ۱۹ نمونه که برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی از منطقه مورد بررسی (آندالوزیت میشدوان بافق) برداشت شده، تعداد ۱۶ نمونه انتخاب و برای تهیه‌ی مقطع به آزمایشگاه مقاطع نازک دانشگاه یزد ارسال شدند. این مقاطع با میکروسکوپ قطبشی بررسی و عکسبرداری شدند. در این بخش خلاصه‌ی گزارش بررسی‌های انجام شده روی مقاطع نازک همراه با عکس‌های مربوطه ارائه می‌شوند [۱۱].

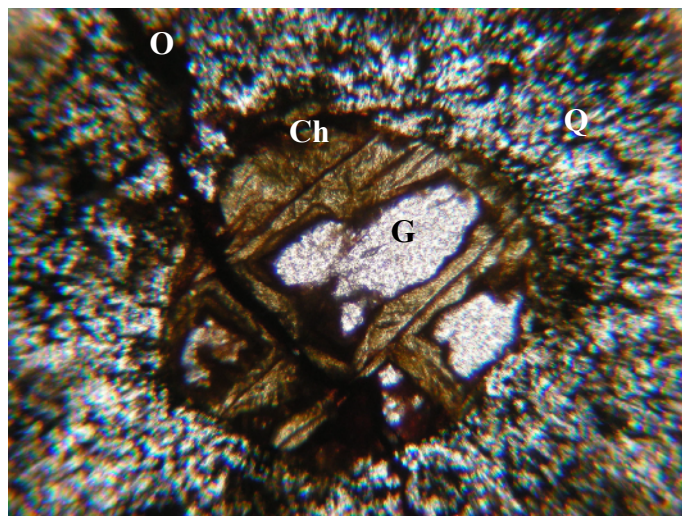
نتایج بررسی‌های مقاطع نازک نشان می‌دهد که کانی‌های تشکیل دهنده شامل: کوارتز، آندالوزیت، سیلیمانیت، میکا (بیوتیت و مسکویت)، گارنت، کیانیت و کانی‌های کدر هستند. بخش عمده‌ی سنگ را کوارتز تشکیل می‌دهد که همراه کانی‌های برگه‌ای مسکویت و بیوتیت تحت تأثیر فشار جهت‌دار قرار گرفته و باعث پیدایش بافت لپیدوبلاستیک و ساخت شیبستی در سنگ شده است (شکل ۳). گارنت نیز به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار به صورت پراکنده دیده می‌شوند که در بسیاری موارد در شرایط دگرسانی قرار گرفته و در حال تبدیل شدن به کلریت هستند (شکل ۴).

آندالوزیت‌های منطقه نیز در اثر پیشرفت دگرگونی در حال تبدیل شدن به سیلیمانیت هستند، به طوری که می‌توان گفت روند دگرگونی به این شکل بوده است که نخست در اثر دگرگونی ناحیه‌ای آندالوزیت تشکیل شده، سپس در نتیجه‌ی بالا رفتن دما که ناشی از نفوذ یک توده‌ی ماگمایی در منطقه است کانی‌های آندالوزیت به سیلیمانیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵). البته با توجه به نتایج XRD می‌توان به این نتیجه رسید که در بعضی از نقاط آندالوزیت‌ها در اثر فشار بالا به کیانیت تبدیل شده‌اند. در مقاطع نازک نیز کم و بیش کیانیت مشاهده می‌شود. همچنین بیشتر آندالوزیت‌ها حاوی انکلازیمون‌هایی از

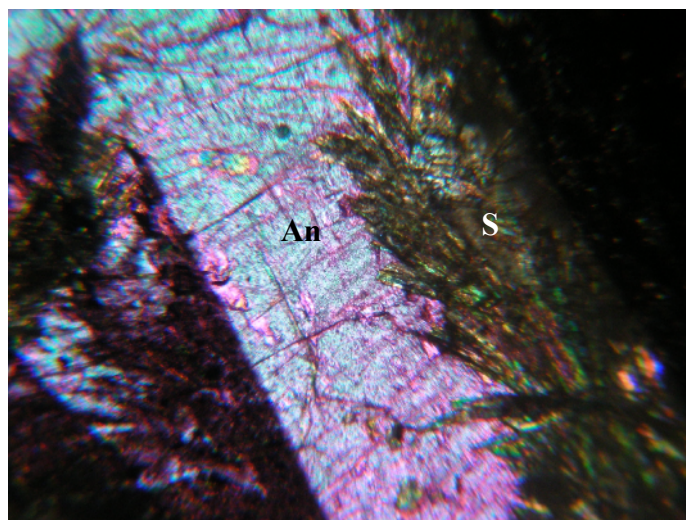
مواد آلی به صورت اذخال‌های منظمی به شکل صلیب هستند که کیاستولیت را به وجود آورده‌اند (شکل ۶). به منظور مشاهده‌ی نمایی کلی از کانی‌های بررسی شده در مقاطع، مهم-ترین آنها به تفکیک بلوک ذخیره در جدول شماره ۱ آورده شده‌اند.



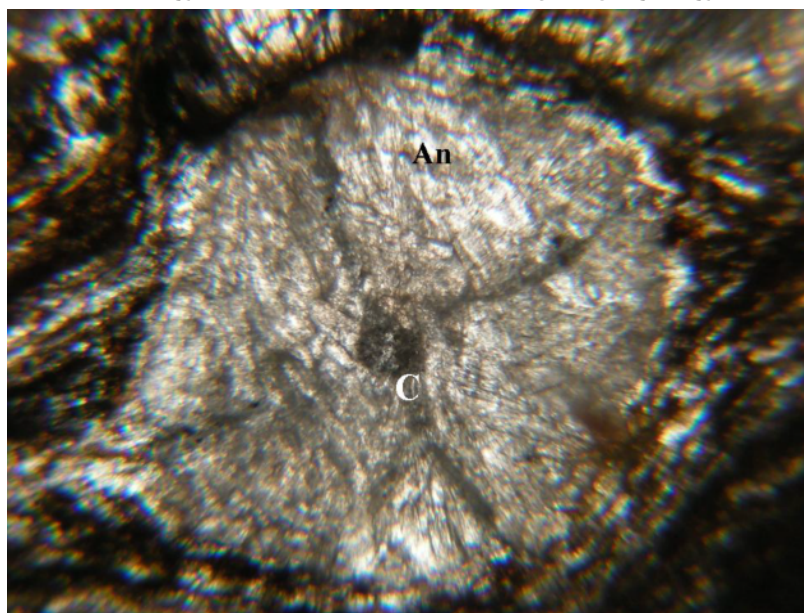
شکل ۳ جهت یافتگی کانی‌های برگه‌ای میکا (xpl, $\times 100$): Q: کوارتز - B: بیوتیت - G: گارنت.



شکل ۴ گارنت در حال تجزیه به کلریت (ppl, $\times 100$): Q: کوارتز - Ch: کلریت - G: گارنت - O: کانی‌های کدر.



شکل ۵ آندالوزیت در حال تبدیل به سیلیمانیت (An (xpl, $\times 100$): آندالوزیت - S: سیلیمانیت.



شکل ۶ تشکیل کیاستولیت در اثر تجمع کربن در مرکز بلور آندالوزیت به صورت صلیب (An (ppl, $\times 100$): آندالوزیت - C: کربن.

جدول ۱ کانی‌های مهم مشاهده شده در مقاطع نازک میکروسکوپی [۹].

شماره بلوک	تعداد نمونه‌های مورد مطالعه	مهم‌ترین کانی‌های مشاهده شده در مقاطع نازک
I	۷	کوارتز، مسکویت، بیوتیت، آندالوزیت، گارنت، کیاستولیت، سیلیمانیت، گارنت و اکسیدهای آهن
II	۱	کوارتز، مسکویت، بیوتیت، سیلیمانیت و گارنت

III	۷	کوارتز، مسکویت، بیوتیت و آل بیت، آندالوزیت، کیاستولیت، سیلیمانیت، کلریت و کانی‌های کدر
-----	---	--

بررسی عناصر اصلی با XRF

پس از نمونه برداری از منطقه‌ی مورد بررسی، نمونه‌های برداشت شده طی مراحل لازم آماده‌سازی و برای تعیین مقدار عناصر اصلی، برای تجزیه‌ی شیمیایی XRF به آزمایشگاه ارسال شدند که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول یادشده مشاهده می‌شود که مقدار Al_2O_3 و SiO_2 بیش از ۸۰ درصد نمونه‌ها را تشکیل داده است. مقدار اکسید آهن بیش از ۵ درصد نیز مقدار عناصر قلیایی نیز بیش از ۲ درصد بوده است. از لحاظ کاربردی با توجه به استاندارد ماده‌ی معدنی یاد شده در بخش‌های قبل، برای مواد اولیه آندالوزیتی برای تهیه‌ی نسوزهای مولایتی، فرآوری کانه ضروری به نظر می‌رسد.

بررسی‌های XRD

در ادامه بررسی‌ها برای شناسایی دقیق کانی‌های موجود در ماده‌ی معدنی، تعداد ۱۷ نمونه از واحدهای سنگی منطقه (که قبلاً برای بررسی XRF استفاده شدند) به آزمایشگاه فرستاده شدند. نتایج این نمونه‌ها در جدول شماره ۳ آمده‌اند.

چنانکه ملاحظه می‌شود کوارتز، مسکویت و کائولینیت تشکیل دهنده‌ی اصلی ماده‌ی معدنی است و کانی‌های آل بیت (و آنورتیت)، گارنت، استارولیت، پیروفیلیت، فلوگوپیت، پاراگونیت و کلینوکلر به‌عنوان کانی‌های فرعی هستند. کلسیت، ژیپس و هالیت نیز احتمالاً محصولات هوازده در محیط بیابانی به حساب می‌آیند. علی‌رغم انتظار، فقط در یک نمونه‌ی ماده‌ی

معدنی (نمونه‌های شماره‌ی ۱۹) کانی‌های گروه سیلیمانیت (کیانیت) شناسایی شد. به نظر می‌رسد که مقدار کانی‌های این گروه، که در نمونه‌ی دستی قابل مشاهده است، کمتر از ۵ درصد ماده‌ی معدنی را تشکیل می‌دهد (حد تشخیص تقریبی XRD) و می‌توان به این نتیجه رسید که در برآورد عیارکانی-های گروه سیلیمانیت در پی جویی‌های مقدماتی دقت کافی به عمل نیامده است. برای شناسایی دقیق کانی‌های گروه سیلیمانیت، بلورهای درشت (که ظاهراً آندالوزیت هستند) پراکنده در منطقه جمع‌آوری و مورد آنالیز XRD قرار گرفتند. نمودار مربوط به نمونه بلور به تفکیک قله‌های مربوط به کانی-های مختلف در شکل ۷ دیده می‌شود. چنانکه ملاحظه می‌شود، در نمونه‌ی بلور نیز از کانی‌های گروه سیلیمانیت فقط کانی کیانیت تشخیص داده شد که با توجه به شباهت مشخصات XRD با کانی سیلیمانیت که در مقاطع نازک شناسایی شده، دور از انتظار نیست. به‌نظر می‌رسد که کانی آندالوزیت پس از تشکیل در مرحله‌ی اول با حفظ شکل ظاهری اولیه در اثر پیشرفت دگرگونی به کانی کیانیت (و گاهی سیلیمانیت) تبدیل شده است. کانی‌های دیگر که در شکل ۷ مشخص شدند به ناخالصی‌های همراه بلورها وابسته‌اند.

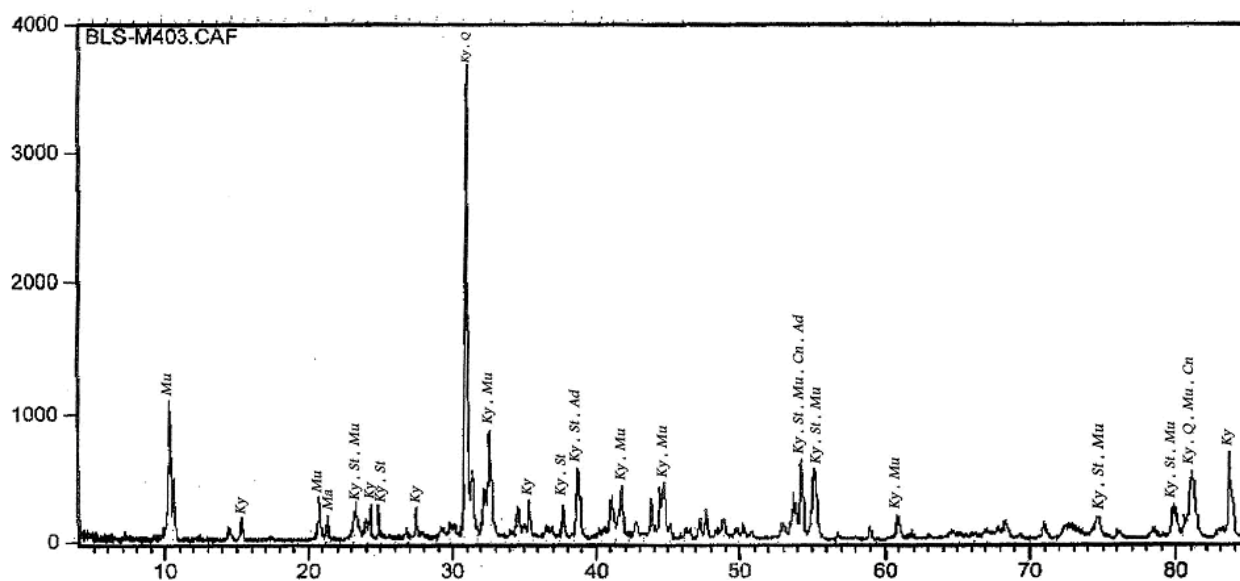
جدول ۲ نتایج آنالیز XRF ده اکسیدی برای نمونه‌های بلوک‌های I، II و III [۹].

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	CaO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
۱	۶۳٫۹۹	۲۰٫۱۳	۰٫۹۸	۱٫۳۳	۴٫۵۲	۰٫۷۴	۰٫۰۳	۰٫۶۱	۰٫۰۶	۴٫۰۲	۰٫۰۰	۳٫۴۸
۲	۶۲٫۶۸	۱۶٫۶۳	۱٫۰۸	۱٫۵۹	۴٫۳۵	۰٫۸۸	۰٫۰۳	۰٫۶۲	۰٫۰۷	۵٫۱۰	۰٫۰۰	۳٫۸۲
۳	۷۴٫۹۱	۱۰٫۶۱	۱٫۶۳	۱٫۳۵	۱٫۹۲	۰٫۴۰	۰٫۰۵	۱٫۹۴	۰٫۰۸	۳٫۷۲	۰٫۰۳	۳٫۲۷
۴	۵۵٫۲۹	۲۰٫۲۹	۰٫۹۴	۱٫۳۷	۲٫۵۲	۰٫۸۶	۰٫۰۸	۴٫۷۲	۰٫۱۲	۷٫۰۸	۰٫۰۰	۶٫۵۹
۵	۶۱٫۹۰	۱۸٫۲۹	۱٫۲۴	۱٫۳۶	۳٫۳۲	۰٫۹۳	۰٫۰۶	۰٫۹۶	۰٫۱۳	۶٫۶۲	۰٫۰۲	۴٫۸۴

۶	۶۱٫۲۴	۱۹٫۹۲	۱٫۶۵	۲٫۳۲	۲٫۳۳	۰٫۸۶	۰٫۱۱	۰٫۹۱	۰٫۱۶	۶٫۸۱	۰٫۰۲	۳٫۴۹
۷	۶۵٫۷۶	۱۶٫۹۱	۱٫۰۶	۱٫۷۸	۳٫۲۱	۰٫۹۳	۰٫۰۸	۰٫۳۱	۰٫۱۲	۶٫۳۰	۰٫۰۰	۳٫۴۴
۸	۶۳٫۴۶	۱۸٫۰۷	۱٫۶۴	۱٫۹۵	۲٫۴۶	۰٫۷۹	۰٫۱۲	۰٫۸۲	۰٫۱۵	۶٫۶۷	۰٫۰۴	۳٫۵۵
۹	۶۱٫۸۶	۱۹٫۵۷	۱٫۱۰	۱٫۹۰	۳٫۰۷	۰٫۹۲	۰٫۱۱	۰٫۹۳	۰٫۱۷	۶٫۹۶	۰٫۰۰	۳٫۲۸
۱۰	۶۶٫۱۳	۱۳٫۳۶	۱٫۴۱	۲٫۴۹	۳٫۵۰	۰٫۹۰	۰٫۱۵	۰٫۶۵	۰٫۲۰	۷٫۹۹	۰٫۰۰	۳٫۰۹
۱۳	۶۳٫۴۴	۱۹٫۷۶	۰٫۷۷	۱٫۱۰	۲٫۶۶	۰٫۹۱	۰٫۱۰	۰٫۳۳	۰٫۰۹	۷٫۰۴	۰٫۰۱	۴٫۶۱
۱۴	۶۲٫۹۹	۱۷٫۵۵	۱٫۴۹	۲٫۳۲	۳٫۰۰	۰٫۸۲	۰٫۱۵	۰٫۹۸	۰٫۲۱	۷٫۵۶	۰٫۰۴	۲٫۷۲
۱۵	۶۱٫۵۹	۱۸٫۷۸	۰٫۹۲	۱٫۸۱	۴٫۰۰	۰٫۸۹	۰٫۱۲	۰٫۸۱	۰٫۳۲	۷٫۶۲	۰٫۰۱	۲٫۹۵
۱۶	۶۴٫۷۷	۱۷٫۴۵	۰٫۶۶	۱٫۶۸	۳٫۰۶	۰٫۷۵	۰٫۱۱	۰٫۶۵	۰٫۲۴	۶٫۸۶	۰٫۰۳	۳٫۶۲
۱۷	۵۴٫۷۴	۱۲٫۲۳	۰٫۷۷	۱٫۴۳	۲٫۵۶	۰٫۷۲	۰٫۱۴	۵٫۷۹	۰٫۲۱	۶٫۵۰	۴٫۵۶	۱۰٫۰۴
۱۸	۵۳٫۷۶	۲۰٫۴۵	۱٫۶۴	۱٫۵۵	۴٫۲۳	۰٫۸۳	۰٫۱۳	۲٫۲۰	۰٫۱۷	۷٫۲۷	۰٫۸۴	۶٫۲۹
۱۹	۴۶٫۶۰	۳۷٫۰۳	۱٫۳۶	۱٫۲۴	۲٫۶۴	۰٫۲۷	۰٫۰۴	۰٫۸۷	۰٫۰۹	۶٫۴۵	۰٫۵۲	۲٫۴۲

جدول ۳ کانی‌های تشخیص داده شده در ۱۷ بررسی با XRD وابسته به بلوک‌های مختلف [۹].

نتایج XRD	
Quartz, Muscovite, Kaolinite	کانی‌های اصلی (مشترک در تمام نمونه‌ها)
Albite, Staurolite, Clinocllore, Anorthite, Andradite, Pyrophyllite, Grossular, Phlogopite, Augite, Paragonite, Calcite, Gypsum, Halite Kyanite (فقط در یک نمونه)	کانی‌های فرعی (مشاهده شده در نمونه-های مختلف)



شکل ۷ نمودار XRD مربوط به نمونه‌ی بلور به تفکیک قله‌های وابسته به کانی‌های مختلف: Q: کوارتز - Ky: کیانیت - St: استارولیت - Cn: کروندم - Ad: آندرادیت - Mu: مسکویت - Ma: منیتیت.

تبدیل فاز در کانی‌های گروه آلومینیوم سیلیکات

در شرایط دما و فشار بالا، آندالوزیت ناپایدار بوده و به چند ریختی‌های سیلیمانیت و کیانیت تبدیل می‌شود. سیلیمانیت چند ریخت با دمای بالای Al_2SiO_5 است. سیلیمانیت از تغییر شکل کیانیت نیز تولید می‌شود، هر چند که این تغییر شکل معمولاً به کندی صورت می‌گیرد. به‌همین دلیل در منطقه‌ی مورد بررسی بلورهای کیانیت نیز دیده می‌شود که نشانی از ناپایداری آن نسبت به تغییر شکل است. در مناطقی که هم دگرگونی ناحیه‌ای و هم دگرگونی مجاورتی در اثر نفوذ توده‌های آذرین صورت گرفته باشد (همانند منطقه‌ی مورد بررسی میشدوان بافق) سیلیمانیت و آندالوزیت به‌صورت تداخلی دیده می‌شوند. در این صورت محور C بلورشناسی دو کانی بر هم منطبق است (شکل ۵).

سنگ‌زایی

با بررسی‌های انجام گرفته در مورد سنگ‌زایی و تشکیل کانی‌ها در محیط دگرگون و از جمله تشکیل کانی‌های گروه سیلیمانیت، می‌توان مراحل بلورش کانی‌ها در گستره‌ی مورد بررسی را به شرح زیر توصیف کرد [۹]:

- مسکویت: در چهار مرحله متبلور می‌شود:
- مرحله‌ی اول: همراه با کلریت در زمان شکل‌گیری شیسستوزیته اولیه
- مرحله‌ی دوم: در ضمن تشکیل بلور کردیریت و ناپایداری بیوتیت
- مرحله‌ی سوم: هنگامی که سیلیکات‌های آلومینیوم متبلور می‌شوند.

مرحله‌ی چهارم: در اثر آزاد شدن گازها

- کلریت: در دو مرحله بلوری می‌شود:
- مرحله‌ی اول: همراه با مسکویت حین تشکیل شیسستوزیته
- مرحله‌ی دوم: در زمان به وجود آمدن شیسستوزیته ثانویه و ناپایدار شدن کانی‌های فرومنیزیم

- کوارتز: در تمام مراحل، تبلور آن صورت می‌گیرد.

- بیوتیت در دو مرحله متبلور می‌شود.

مرحله‌ی اول: در زمان تشکیل شیسستوزیته و پس از مسکویت و کلریت متبلور می‌شود.

مرحله‌ی دوم: پس از ناپایداری بلور کردیریت و سیلیکات آلومیناست که گارنت را ناپایدار می‌سازد.

- گارنت: در مرحله‌ی میکاشیست تشکیل می‌شود و با بیوتیت ناپایدار شده و کردیریت به وجود می‌آید.

جمع بندی و تفسیر نتایج

نتایج این بررسی‌ها تأییدی بر تأثیر حداقل دو مرحله‌ی دگرگونی در منطقه است. بدین صورت که وجود کانی‌های دگرگون ناحیه‌ای در شیسست‌ها همچون کوارتز، مسکویت، بیوتیت، گارنت و تا حدودی آندالوزیت که معرف محیط‌هایی نسبتاً با فشار بالا و دمای پائین تا متوسط هستند دلیلی بر این نوع دگرگونی است. همچنین تشکیل کانی کیانیت و سیلیمانیت از آندالوزیت تحت تأثیر دمای بالا و حضور کانی‌های پردمای آل بیت، آنورتیت و استارولیت دلیلی بر دگرگونی مجاورتی تحت تأثیر توده‌های نفوذی بالا آمده در مراحل بعدی است. وجود کانی کائولینیت تأثیر دگرسانی یا هوازگی را در مراحل نهایی نشان می‌دهد. این کانی می‌تواند از تجزیه سیلیمانیت و دیگر سیلیکات‌ها به وجود آید. کلریت‌ها نیز می‌توانند در اثر دگرسانی و تجزیه بیوتیت و گارنت بوجود آمده باشند [۹، ۱۲، ۱۳].

بحث کاربردی

با توجه به اینکه عیار حد و ترکیب کانی‌شناسی مواد اولیه برای تولید نسوزهای مولایتی برای صنایع متالورژی از اهمیت خاصی برخوردار است، یکی از هدف‌های این پژوهش تعیین کانی‌های تشکیل دهنده و نیز تعیین خاستگاه و مقدار Al_2O_3 موجود بوده است. به منظور بررسی کیفیت این مواد در منطقه مورد پی‌جویی، بررسی‌های کانی‌شناسی، آزمایش‌های XRD و XRF

[5] Kulkarni T., Wang H.Z., Basu S.N., Sarin V.K., "Phase transformations in mullite-based nanocomposites", Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 465–471.

[۶] شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد ایران، "اکتشاف مقدماتی ذخایر آندالوزیت میشدوان بافق"، ۱۳۷۷.

[۷] مهندسان مشاور معدنکاو، "گزارش نهایی اکتشاف نیمه تفصیلی آندالوزیت میشدوان بافق"، سازمان صنایع و معادن استان یزد، (۱۳۷۹).

[8] Ildefonse J. P., "Mullitization of andalusite in refractory bricks, Key engineering materials", Vols. B2-136, pp. 1798-1801, (1997).

[۹] کوهساری ا. ح.، دهقانی م.، "مطالعات زمین شناسی و کانی شناسی و پتانسیل یابی ذخایر دیرگداز شمال بافق"، طرح پژوهشی، دانشگاه یزد، (۱۳۸۷).

[۱۰] سازمان زمین شناسی کشور، "نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش یزد"، (۱۳۵۴).

[۱۱] نمایران ا.، مجتهدزاده س. ح.، کلانتر م.، دهقانی ع.، "شناسایی کانی های مختلف کانسار آندالوزیت میشدوان بافق با روش مطالعه مقاطع نازک، XRD و XRF"، مجموعه مقالات پانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، (۱۳۸۶).

[۱۲] کریم پور م. ح.، "کانی ها و سنگ های صنعتی"، انتشارات جاوید مشهد، (۱۳۸۴).

[۱۳] کریم پور م. ح.، "زمین شناسی اقتصادی کاربردی"، انتشارات جاوید مشهد، (۱۳۸۵).

روی نمونه های معرف منطقه نشان دادند که بخش مهمی از آلومین همراه کانی های مسکویت، بیوتیت و کلریت در زمینه ی سنگ وجود دارند و بخش نسبتاً ناچیزی از آن به کانی های گروه سیلیمانیت وابسته است. در نهایت، با توجه به کم بودن عیار کلی کانی های گروه سیلیمانیت، می توان گفت که فرآوری اقتصادی شاخص های مورد بررسی در منطقه ی میشدوان بافق با فناوری امروزی امکان پذیر نبوده یا با مشکلات فراوانی همراه است.

تقدیر

بدینوسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه یزد بخاطر فراهم آوردن منابع مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می شود. همچنین از داوران محترم مجله ی بلورشناسی و کانی شناسی ایران به خاطر راهنمایی های بارزش و موثرشان سپاسگذاری می شود.

مراجع

- [1] Bates R.L., Jackson J. A., "Glossary of geology", American Geological Institute, (1980).
- [2] Ghassemi Kakroudi M., Huger M., Gault C., Chotard T., "Anisotropic behaviour of andalusite particles used as aggregates on refractory castables", Journal of the European Ceramic Society 29 (2009) 571–579.
- [3] Schneider H., Schreuer J., Hildmann B., "Structure and properties of mullite- A review", Journal of the European Ceramic Society 28 (2008) 329–344.
- [4] Mazel F., Gonon M., Fantozzi G., "Manufacture of mullite substrates from andalusite for the development of thin film solar cells", Journal of the European Ceramic Society 22 (2002) 453–461.