تشکیل کانی هالوتریشیت در آبرفت‌های فلدسپاردار بیداخوید، جنوب‌غرب شیرکوه یزد

سعیده جدیدی‌اردکانی[۱]، محمدعلی مکی‌زاده*[۲] و فریماه آیتی[۳]

۱ و ۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان
۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

نویسنده مسئول : *mackizadeh44@gmail.com* *

دریافت: ۹۸/۱۲/۲۱ پذیرش: ۹۹/۵/۲۲ نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

محدوده آبرفتی گرانیتی بیداخوید واقع در حاشیه غربی باتولیت شیرکوه یزد و از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در زون ایران مرکزی و بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه دختر واقع شده است. معدن مذکور حاصل تجمع و تجزیه رسوبات آبرفتی کواترنر می‌باشد. واحد اصلی سازنده معدن، رسوبات آبرفتی- آواری نیمه سخت شده توسط سیمان با ترکیب اکسید آهن بوده و کانی‌های غالب این مجموعه شامل کوارتز، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلازهای دگرسان شده و کانی‌های رسی است. از نکات بارز زمین‌شناسی خروج گازهای گوگردی و نهشت گوگرد طبیعی در رخنمون‌های سطحی آبرفت می‌باشد. حضور کانی شوره‌ای هالوتریشیت در منطقه محیط فومرول و خروج گازهای سولفیدی آتشفشانی در ارتباط با ولکانیسم جوان در زون گسلی دهشیر را تداعی می‌کند. کانی‌های شوره‌ای سولفات آهن حاصل اکسیداسیون پیریت و ایجاد محیط اسیدی به شکل محلی در سطح سفره آب زیرزمینی می‌باشند. رخداد این محیط به شدت اسیدی سبب رخداد کانی‌های دگرسانی عمدتا شامل پیریت، سریسیت، رکتوریت، ایلیت و ژاروسیت شده است.

واژه‌های کلیدی: هالوتریشیت، شیرکوه، بیداخوید، یزد، ایران مرکزی

۱- پیشگفتار

معدن فلدسپار بیداخوید در جنوب‌غرب شیرکوه، در ۷۰ کیلومتری شهر یزد و از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در زون ایران مرکزی و در بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه دختر واقع شده است (شکل ۱). این معدن در حاشیه غربی باتولیت گرانیتی شیرکوه یزد و در محدوده جغرافیایی با مختصات ″۵۵٫۸۷ ′۵۵ °۵۳ طول شرقی تا ″۲۹٫۰۳ ′۵۶ °۵۳ عرض شمالی قرار دارد. بر اساس قربانی (۱۳۸۷) معدن فلدسپار بیداخوید یکی از پنجاه کانسار خاک صنعتی استان بوده که با عنوان ماده معدنی فلدسپار شناسایی شده است. فلدسپات در رنگ‌سازی و لاستیک‌سازی به عنوان پرکننده به مصرف می‌رسد و به میزان کمتری نیز به عنوان ساینده و در مواردی تمیز کننده به کار می‌رود (عمیدی، ۱۹۸۳).

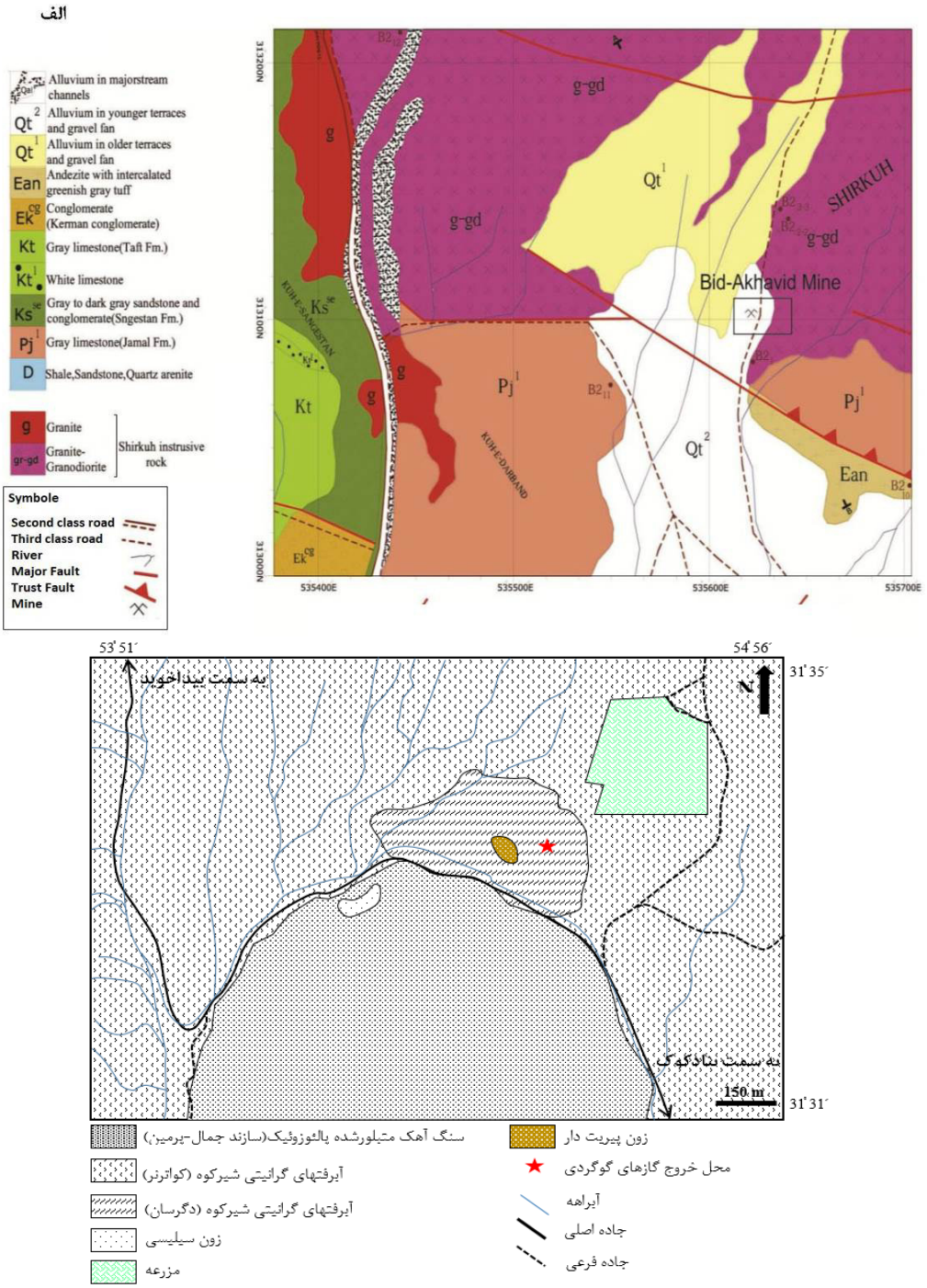
از مطالعات صورت گرفته در منطقه مورد بررسی و اطراف آن می‌توان به تهیه نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰خضر آباد (حاج ملاعلی و علوی نایینی،۱۳۷۱) و یا بررسی چینه‌شناسی کرتاسه زیرین در منطقه توسط خسروتهرانی و وزیری‌مقدم (۱۳۷۲) اشاره نمود. معدن مذکور از نوع خاک صنعتی فلدسپار و تشکیل آن با هوازدگی آبرفت‌های لوکوگرانیتی باتولیت شیرکوه مرتبط می‌باشد (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۶۵). زمین‌شیمی و خاستگاه خاک صنعتی کانسار مذکور توسط تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. کوهساری (۱۳۸۰) به مطالعه کانی‌شناسی مرمرهای بروسیت‌دار حاشیه شرقی باتولیت شیرکوه یزد پرداخته است. جدیدی (۱۳۹۶) به مطالعات کانی‌شناسی مرمر و اسکارن‌ها در حاشیه باتولیت شیرکوه یزد پرداخته است. در این پژوهش سعی بر آن است ضمن معرفی کانی‌شناسی دگرسانی‌ها به نحوه تشکیل آن‌ها به ویژه کانی‌های زیست‌محیطی که در ارتباط با پساب‌های اسیدی معدنکاری[۱] شکل گرفته‌اند، پرداخته شود.

۲- روش مطالعه

در این تحقیق بعد از انجام مطالعات صحرایی و نمونه‌برداری و مطالعه واحدهای سنگی، نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۱۵۰۰۰ تهیه گردید. از مجموع ۵۵

[1] *Acid Mine Drainage*

نمونه صحرایی برداشت شده، تعداد ۳۵ نمونه از توده‌های نفوذی، آبرفت‌ها و سنگ‌های دگرسان شده برای تهیه مقاطع نازک انتخاب گردید. مطالعات پتروگرافی توسط میکروسکوپ پلاریزان مدل *BH2* انجام گرفت. برای تایید بررسی‌های کانی‌شناسی و شناسایی ترکیب شیمیایی فازها از دیفراکتومتری پرتو ایکس (*D4-EXPLORER-BROOKER*) و آنالیز *SEM* (انجام شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان و دانشگاه هامبورگ آلمان) استفاده شد. از داده‌های آنالیز *XRD* ماده معدنی، انجام شده توسط تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) (۸ نمونه در آزمایشگاه زرآزما) نیز کمک گرفته شد.



شکل ۱. الف) نقشه زمین‌شناسی محدوده بیداخوید (اقتباس از حاج ملا علی و علوی نایینی، ۱۳۸۳ با تغییرات، برگرفته از (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲)، ب) نقشه زمین‌شناسی معدن فلدسپار بیداخوید بر پایه برداشت‌های صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای

۳- بحث و بررسی

۳-۱- زمین‌شناسی

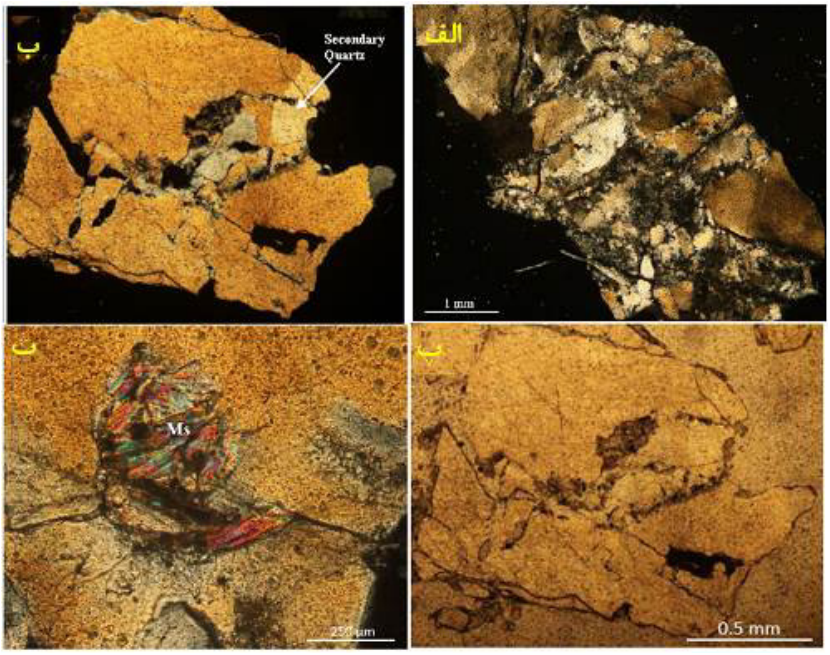
محدوده مورد مطالعه بخشی از کمربند ماگمایی ارومیه- دختر و جزء ایران مرکزی می‌باشد (آقانباتی، ۱۳۸۳). بر اساس نقشه زمین‌شناسی خضرآباد و آباده (عمیدی، ۱۹۸۳، حاج ملاعلی و علوی نایینی، ۱۳۷۱) کهن‌ترین واحد زمین‌شناسی کل منطقه را واحدی تیره‌رنگ با ترادف شیل، ماسه‌سنگ، کوارتزیت و سنگ‌آهک موسوم به سازند نایبند (تریاس) تشکیل می‌دهد. این واحد بعد از ژوراسیک زیرین متأثر از جایگیری باتولیت گرانیت- گرانودیوریتی شیرکوه اندکی دگرگون شده است. نبوی (۱۹۷۲) سن این گرانیت را ژوراسیک در نظر گرفته و نفوذ گرانیت را سبب دگرگونی سنگ‌های رسوبی ژوراسیک زیرین دانسته است. باتولیت شیرکوه بر اساس آقانباتی (۱۳۸۳) دارای محدوده زمانی وسیع پلوتونیسم از ژوراسیک میانی تا بعد از کرتاسه است. فورستر (۱۹۷۸) با استفاده از روش *Rb-Sr* بر روی چهار نمونه گرانیت شیرکوه، سن آن را ۱۰ ± ۱۷۵ میلیون سال تعیین کرده است (تقی‌پور و مکی‌زاده، ۱۳۹۰). باتولیت شیرکوه یزد از سه واحد گرانودیوریتی، مونزوگرانیتی و لوکوگرانیتی تشکیل شده است (شیبی و اسماعیلی، ۱۳۹۱). بعد از سپری شدن یک فاصله زمانی، رسوبات کرتاسه زیرین شامل ماسه‌سنگ و کنگلومراهای ارغوانی رنگ (سازند سنگستان) و سنگ‌آهک به صورت دگرشیب بر روی پی‌سنگ باتولیت شیرکوه و رسوبات دگرگون شده هاله آن قرار می‌گیرند. مشارکت گسترده خرده‌های گرانیت- گرانودیوریت شیرکوه در ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان منجر به شکل‌گیری ماسه‌سنگ‌های آرکوزی خاکستری تا ارغوانی رنگ به صورت میان‌لایه در این سازند شده است. نفوذی‌های لوکوگرانیتی منسوب به ماگماتیسم باتولیت شیرکوه (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۶۵) که در این منطقه دیده می‌شود سازند سنگستان را تحت تأثیر قرار داده است. این تأثیر بیش‌تر با رخداد دگرسانی به طور فراگیر همراه است. در ادامه رسوب‌گذاری دریای کرتاسه، سنگ‌های آهکی خاکستری رنگ حاوی میکروفسیل اربیتولینا (کرتاسه زیرین) تشکیل شده‌اند. این واحد به سازند تفت مشهور است. ائوسن در این منطقه بیش‌تر شامل گدازه‌های عمدتا آندزیتی همراه با توف و برش‌های وابسته است که توسط واحدهای سنگی الیگوسن و کواترنری پوشیده شده است. معدن فلدسپار بیداخوید در جنوب‌غرب شیرکوه، در ۷۰ کیلومتری شهر یزد و در حاشیه غربی باتولیت گرانیتی شیرکوه یزد واقع شده است. در این معدن توالی رسوبات در اندازه گراول و رسوبات سخت شده به چشم می‌خورد. به طور کلی معدن مذکور حاصل تجمع و تجزیه رسوبات آبرفتی گرانیتی در مقیاس وسیع (دشت آبرفتی) است که گاهی به رنگ‌های متنوع از سفید تا کرم دیده می‌شود. اکسید آهن در تنوع رنگ رسوبات نقش مهمی ایفا می‌کند (شکل ۲).

۳-۲- مطالعات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی

در منطقه بیداخوید، دو گروه توده نفوذی مشاهده می‌شود. نوع اول سنگ‌های آذرین قدیمی منطقه می‌باشد که شامل گرانیت بیوتیت‌دار شیرکوه بوده و پی‌سنگ منطقه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳). این گرانیت‌ها به شدت دگرسان بوده و به نظر می‌رسد دگرسانی تا مرحله کلریتی شدن پیش رفته است. نوع دوم، لوکوگرانیت‌های کرتاسه هستند که در ایجاد رسوبات تخریبی- آواری موجود در منطقه نقش اساسی داشته‌اند. توده‌های نفوذی مورد مطالعه با ترکیب گرانیت غالبا لوکوکرات و گرانودیوریت با دگرسانی و شکستگی فراوان در منطقه به چشم می‌خورند. این مجموعه در مشاهدات میکروسکوپی با مجموعه کانیایی کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، بیوتیت، آمفیبول (به میزان کمتر) به همراه مسکویت (سریسیت‌های ثانویه) مشخص است. در بخش‌های مافیک‌تر، کلینوپیروکسن نیز مشاهده می‌گردد. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های اپاک می‌باشد. بافت‌های گرانولر دانه‌ریز، میکروگرافیک، پورفیروئید و برشی در آن عادی است. هم‌چنین وفور آلبیت با ماکل شطرنجی و هم‌رشدی گرانوفیری تا میکروگرافیک کوارتز و آلکالی‌فلدسپار از ویژگی‌های بافتی این سنگ‌ها است. حضور بافت پورفیروئید، طبیعت نیمه‌عمیق توده نفوذی مورد بررسی را نشان می‌دهد. در برخی مقاطع گرانیت‌ها بافت ساروجی (مورتار) نشان می‌دهند که از اختصاصات دگرشکلی دینامیکی سنگ‌ها به شمار می‌آید. بین بلورهای درشت کوارتز، کوارتزهای خرد شده و دانه‌ریزی دیده می‌شود که نشان از میلونیتی شدن این سنگ‌ها می‌باشد (شکل ۴ الف). در برخی موارد کوارتزهای ثانویه نیز درون کوارتزهای اولیه رشد کرده‌اند (شکل۴ ب و پ).

شکل ۲. الف) ترادف رسوبات آبرفتی سفیدرنگ در معدن بیداخوید. ب) تنوع رنگی رسوبات به دلیل آغشتگی محلی رسوبات با اکسید آهن

شکل ۳. رخنمون پی سنگ منطقه بیداخوید (گرانیت بیوتیت دار شیر کوه)



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از آذرین‌های منطقه بیداخوید در نور ***XPL*** و ***PPL*** الف- یک قطعه از گرانیت‌های دارای بافت مورتار که به طور عمده از کوارتز با خاموشی موجی در ابعاد مختلف تشکیل شده است. ب و پ- رشد کوارتزهای ثانویه درون کوارتز اولیه. ت- تشکیل مسکوویت-های ثانویه که جای کانی دیگری (احتمالا بیوتیت) را گرفته‌اند. ***Ms***: مسکویت.

در زمینه کوارتز گاهی مسکوویت‌های ثانویه دیده می‌شوند که احتمالا در اثر دگرسانی بیوتیت جایگزین آن شده‌اند (شکل ۴ ت). توده‌های نفوذی نئوژن در منطقه مورد مطالعه دو سازند عمده منطقه یعنی ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های تریاس- ژوراسیک و کنگلومراها، ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان را قطع نموده‌اند و باعث رخداد دگرسانی‌های گرمابی در این واحدها (بخصوص سازند سنگستان) شده‌اند. دگرسانی‌های مشاهده شده در منطقه عمدتا شامل فیلیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک پیشرفته و سیلیسی می‌باشد.

واحدهای تشکیل‌دهنده زمین‌شناسی موجود در خود منطقه بیداخوید شامل سنگ‌های آهکی، دولومیتی و آهک‌های دولومیتی شده سازند جمال به سن پرمین میانی است. این سازند در غرب منطقه در همبری گسلی با باتولیت شیرکوه قرار گرفته است. همانگونه که ذکر گردید، سنگ‌شناسی منطقه بسیار ساده و عمدتا حاصل تجزیه و تجمع آبرفت‌های باتولیت شیرکوه (بخش لوکوگرانیت) می‌باشد. دانه‌بندی واحدهای دگرسان شده اکثرا در حد شن و ماسه و رس است و فاقد کانی‌های تیره می‌باشند. این آبرفت‌های سفیدرنگ هم اکنون به عنوان ذخیره فلدسپار مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. با توجه به شواهد صحرایی و مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی خاک صنعتی معدن بیداخوید به شکل آبرفت‌های کواترنری در گودال گسلی مربوط به دوره کواترنری با امتداد شمالی- جنوبی (گسل علی‌آباد- بیداخوید) تشکیل شده است. این گودال گسلی ظاهرا از شاخه‌های فرعی گسل بزرگ دهشیر در غرب منطقه است. نمود این زون گسلی هم اکنون با رخداد تراورتن، دگرسانی‌های گرمابی جوان، خروج گازهای گوگردی، رسوبات پیریت‌دار و نهشته گوگرد آزاد در محدوده معدن (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۶۵) مشخص است (شکل ۵). خروج گازهای گوگردی به حدی است که بوی گوگرد به شدت در محدوده معدن استشمام می‌شود. در حوضچه کوچک ناشی از ایجاد ترانشه در کف معدن که سطح آب زیرزمینی به شدت اسیدی در آن نمایان است، حباب‌های حاصل از خروج گاز مشاهده می‌شود (شکل ۶). بر پایه مطالعات تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) احتمالا منشاء گازهای گوگردی یک منبع ماگمایی عمیق است که می‌توان آن را مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی کواترنری در منطقه در نظر گرفت. احتمالا حضور گسل‌های بزرگ مانند گسل دهشیر و شاخه‌های فرعی آن با ایجاد محیط تراوا به حرکت گازها و سیالات کمک می‌نماید.

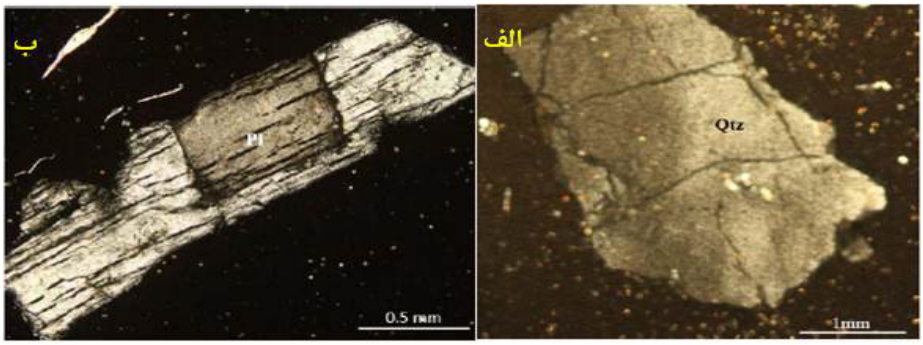
شکل ۵. الف- رخداد گوگرد آزاد در بخش متخلخل رسوبات. ب- بخش غنی از پیریت (رنگ خاکستری) به شکل جانشینی انتخابی در رسوبات

شکل ۶. الف- ترانشه ایجاد شده در معدن ب- حوضچه آب زیرزمینی به شدت اسیدی، خروج گاز از آن و رسوب کانی‌های شوره‌ای

همانگونه که ذکر گردید، واحد اصلی سازنده معدن فلدسپات بیداخوید، رسوبات آبرفتی- آواری سخت نشده کواترنری با مجموعه کانی‌های غالب شامل کوارتز، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلازهای دگرسان شده و کانی‌های رسی می‌باشد. واحدهای سنگی منطقه عمدتا شامل کوارتزآرنایت، آرکوز، ساب‌آرکوز، ساب‌لیت‌آرنایت و لیت‌آرنایت می‌باشد. از دیدگاه رسوب‌شناسی و بر اساس مطالعات بافتی، دانه‌های تشکیل‌دهنده رسوبات، جورشدگی بدی را نشان می‌دهند و از لحاظ گردشدگی نیز زاویه‌دار هستند. این موضوع نشان‌دهنده مسافت حمل کم این رسوبات از سنگ منشأ می‌باشد. در بعضی موارد هم رسوبات توسط سیمان سیلسی بهم جوش خورده و سخت شده‌اند (شکل ۸ الف و ب). در بررسی میکروسکپی مقاطع نازک تهیه شده از دانه‌های سازنده آبرفت‌ها مجموعه کانی‌های کوارتز + آلکالی فلدسپار + مسکوویت قابل تشخیص است. دانه‌های کوارتز با خاموشی موجی و شکستگی، نشان‌دهنده اعمال نیروهای شدید تکتونیکی به گرانیت‌ها و ماسه‌سنگ‌های منطقه می‌باشد. بررسی میکروسکوپی بازمانده فلدسپات‌ها، بازشدگی کلیواژها را نشان می‌دهد که مبین قرارگیری آن‌ها در یک زون برشی می‌باشد (شکل ۹ الف و ب). در امتداد کلیواژهای این فلدسپات‌ها دگرسانی کائولینیتی شدن نیز مشاهده می‌گردد. کائولینیت در شرایط اسیدی و در دمای کمتر از ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد و در اثر دگرسانی سنگ‌های غنی از Al_2O_3 می‌تواند تشکیل شود (ذبیحی و همکاران،۱۳۹۰).

شکل ۷: تشکیل هالوتریشیت به شکل پوسته ای و قارچی بر سطح رسوبات در منطقه بیداخوید.

شکل ۸. الف) لایه‌های رسوبی متشکل از خرده‌های گرانیت (لوکوگرانیت شیرکوه) منطقه معدن بیداخوید. ب) بخش سیلیسی شده آبرفت‌های منطقه



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی دانه‌های تشکیل‌دهنده آبرفت‌ها در نور *XPL* الف) کوارتز با خاموشی موجی ب) بازمانده بلور فلدسپار که بازشدگی کلیواژهارا نشان می‌دهد. *Qtz*: کوارتز، *Pl*: پلاژیوکلاز.

۴- خاستگاه دگرسانی‌ها

محدوده مورد مطالعه یک دشت آبرفتی می‌باشد و طبق مطالعات تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) بر روی رفتار عناصر کمیاب در رسوبات منطقه، الگوی عناصر *REE* در نمودار عنکبوتی گرانیت‌های شیرکوه و رسوبات بیداخوید کاملاً مشابه است. این تشابه هم منشأ بودن این دو واحد سنگی را تأیید می‌کند. در این الگو غنی‌شدگی مثبت در عناصر نادر خاکی سبک مشاهده می‌شود که نشان از هوازدگی در منطقه دارد زیرا *LREE* ها به راحتی در جریان هوازدگی از محیط خارج می‌شوند اما *HREE* ها در طول دگرسانی کمتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند (زیانوو و همکاران، ۲۰۰۲). عامل انحلال‌پذیری *REE* در سامانه‌های گرمابی طبق نظر (بونین و همکاران، ۱۹۹۳) اصولا کمپلکس‌های کربناتی و فلوریدی می‌باشد. علاوه بر آن، کمپلکس‌های سولفاتی نیز می‌توانند عاملی بر حمل *REE* باشند (فلش و هرمن، ۱۹۷۸). در حقیقت تحرک یا عدم تحرک عناصر نادرخاکی در سامانه‌های دگرسانی و هوازدگی به پایداری و فراوانی فازهای *REE* دار مرتبط است. پایداری کانی‌های *REE* دار نیز خود توسط فشار بخشی اکسیژن، غلظت لیگاندهای $OH^-, CO_3^-, F^-, PO_4^{2-}$ و SO_4^{-2} کنترل می‌شود (رولند و همکاران، ۲۰۰۳). از آنجا که سنگ مادر رسوبات تخریبی باتولیت شیرکوه به سن ژوراسیک میانی است که طی فرایندهای برخورد دو قاره ایران مرکزی و صفحه عربی ایجاد شده است (فورتسر، ۱۹۷۸). لذا محیط تحولات رسوبات معدن بیداخوید که به عنوان ماده معدنی فلدسپات استفاده می‌شوند در یک محیط فرورانشی می‌باشد. از طرفی بر مبنای داده‌های ایزوتوپی، این رسوبات در محدوده آب‌های سازندی قرار گرفته است (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲). دگرسانی‌های به وقوع پیوسته در این منطقه در حجم وسیع ولی با درجه ضعیف می‌باشند. با توجه به حجم زیاد ماده معدنی در منطقه می‌توان تشکیل این دگرسانی‌ها را به شرح زیر توصیف نمود: بعد از جاگیری باتولیت گرانیتی شیرکوه، در طی زمان و بر اثر عمل فرسایش و احتمالا وجود جریان‌های سیلابی و فصلی در گودال گسلی، رفته رفته توالی رسوبی شکل گرفته است. به دلیل وجود گسل‌های کوچک در پی سنگ کف منطقه و خروج گاز H_2S و تاثیر اکسیژن جوی بر آن، یک محیط اسیدی شکل گرفته است که شرایط را برای نهشت کانی‌های عمده دگرسانی مهیا کرده است. واکنش‌های زیر (کلپرتسیس، ۱۹۸۹، امسبو و هوفسترا، ۲۰۰۳) برای شرایط مشابه پیشنهاد می‌شود:

$$H_2S + 2O_2(g) \rightarrow HSO_4^- + H^+$$
$$H_2S + 2O_2 \rightarrow 2H+ + SO_4^{2-}$$

باید توجه داشت که دگرسانی‌ها، تنها آخرین فرآیندهای هوازدگی تحمیل شده بر منطقه است. همانگونه که دیده می‌شود دو واکنش اکسیداسیون فوق تنها توسط نفوذ آب‌های اکسیژن دار به آب‌های حاوی H_2S احیاء شده، امکان‌پذیر است (امسبو و هوفسترا، ۲۰۰۳) و H^+ پدید آمده عامل هیدرولیز کانی‌های فلدسپار است.

$$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3SiO_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$$

ارتوکلاز سریسیت

$$2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 3H_2O + 2H^+ \rightarrow 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2k^+$$

کائولینیت سریسیت

این خاستگاه برای حجم زیاد ماده معدنی که دگرسانی ضعیفی را نشان می‌دهد قابل استنباط است. در حاشیه این حوضچه، کانی‌های شوره‌ای همچون هالوتریشیت (شکل ۶ ب و ۷) و بیلینیت رسوب کرده‌اند. هالوتریشیت (یک کانی تبخیری- رسوبی مشهور به آلوم پرمانند) یک سولفات آلومینیوم و آهن فوق العاده هیدراته با فرمول شیمیایی $FeAl_2(SO_4)_4.22H_2O$ می‌باشد و سری‌های محلول جامد گسترده‌ای را با کانی پیکرنژیت ($MgSO_4.Al_2(SO_4)_3.22H_2O$) تشکیل می‌دهد.

هالوتریشیت که معمولا به صورت فیبرهای مونوکلینیک دیده می‌شود به رنگ‌های سفید تا زرد، سبز و خاکستری یا بی‌رنگ دیده می‌شود. این کانی اصولا در نهشته‌های سولفید هوازده و نیز توسط هوازدگی و تخریب پیریت در نزدیک یا در داخل مجراهای آتشفشانی تشکیل می‌شود (برای مثال، پالاش و همکاران، ۱۹۵۱، میهاجلویک و همکاران، ۲۰۰۲) و همچنین می‌تواند در اطراف فومرول‌های آتشفشانی و چشمه‌های آبگرم و همراه با کانی‌هایی همچون ژیپس و اپسومیت تشکیل شود. حضور کانی شوره‌ای در منطقه احتمالا محیط فومرول و خروج گازهای آتشفشانی را در ارتباط با ولکانیسم جوان در زون گسلی دهشیر (جنوب، غرب و شمال غرب منطقه) تداعی می‌کند. برای توجیه گوگرد آزاد در ماده معدنی می‌توان در نظر گرفت که رخداد تصاعد H_2S در هوای آزاد،

اکسیداسیون مستقیم S^{2-} به S_0 را سبب شده است (کلپرتسیس، ۱۹۸۹).

$$H_2S + 1/2O_2 \rightarrow H_2O + 1/2S$$
$$S_2\,(g) = 2S_0$$

با انجام آنالیز *XRD* بر روی نمونه‌های معدنی منطقه بیداخوید در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان، حضور کانی‌های شوره‌ای مانند هالوتریشیت و بیلینیت تایید گردید (شکل ۱۰ الف). در آنالیزهای *SEM* نیز (شکل ۱۰ ب تا د) همانگونه که مشخص است وجود قله‌های *Fe,S,Al* گویای حضور هالوتریشیت می‌باشد. داده‌های *XRD* ماده معدنی معدن بیداخوید برگرفته از تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) نیز وجود مجموعه کانیایی موجود در جدول ۱ را در این مجموعه نشان می‌دهد. همانگونه که از جدول ۱ بر می‌آید، وجود ایلیت، مسکویت، سیلویت، رکتوریت، کائولینیت و کلریت دگرسانی ضعیفی تا مرز تشکیل کانی‌های رسی را نشان می‌دهد. سیلویت از جمله کانی‌های پتاسیم‌دار است که در رسوبات تبخیری یافت می‌شود. وجود هماتیت و ژاروسیت در ارتباط با اکسیداسیون جوی کانی‌های سولفیدی (پیریت) می‌باشد. انجمن‌های زمین‌شناسی آمریکا و مکزیک با استفاده از ایزوتوپ‌های گوگرد و دوتریوم و تعیین میزان پتاسیم و سدیم در این کانی، توانسته اند ژاروسیت‌های اولیه (گرمابی) را از ژاروسیت‌های ثانویه (حاصل اکسایش پیریت) تفکیک کنند. در شکل ۱۱ و ۱۲ دیاگرام *Eh-PH* برای فازهای آهن در محیط‌های معدنی اسیدی (سیستم *Fe-O-S-H*) و دیاگرام $loga_{O2}$-$loga_{H2O}$ که نشان‌دهنده پایداری نسبی سولفیدهای آهن، سولفات‌ها و فازهای اکسی- هیدروکسید می‌باشد نشان داده شده است. همانگونه که در دیاگرام ۱۱ مشخص می‌باشد ژاروسیت در محیط‌های با *Eh* بالا و *Ph* اسیدی پایدار می‌باشد. در دیاگرام ۱۲ که مربوط به سیستم سولفور – آهن می‌باشد، تصور بر این است که هالوتریشیت همان میدان ملانتریت را اشغال می‌کند زیرا هر دو فازهای نسبتا آبدار و حاوی آهن ۲ می‌باشند (جرز و ریمستیت، ۲۰۰۳).

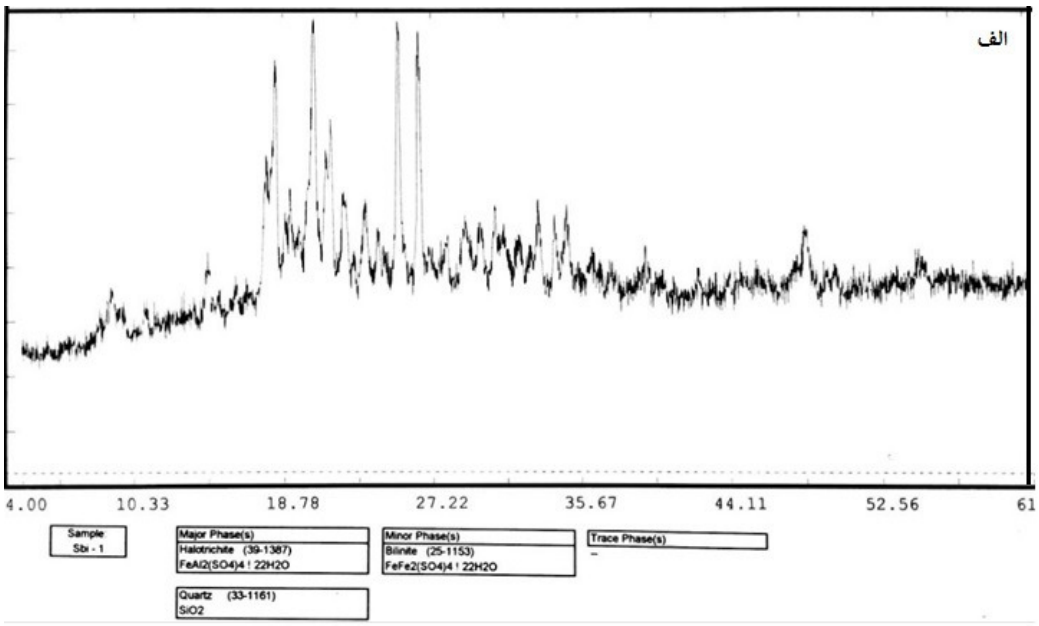
رکتوریت کانی رسی مربوط به شرایط گرمابی دما پایین به همراه کانی‌های میکایی و اسمکتیت است. در این کانی تبادل کاتیون‌ها به آسانی صورت می‌گیرد و ماهیت آبگریزی دارد. این کانی رسی از مجموعه‌ای از لایه‌های قابل انبساط و کشسان و لایه‌های غیرقابل انبساط با نسبت ۱:۱ تشکیل شده است. لایه‌های غیرقابل انبساط آن از میکاهای دی‌اکتاهدرال و لایه‌های قابل انبساط آن از اسمکتیت دی‌اکتاهدرال تشکیل شده است. این کانی با توجه به کاتیون بین لایه‌ای غالب از جزء میکا، به انواع رکتوریت‌های کلسیم، سدیم و پتاسیم‌دار قابل طبقه‌بندی می‌باشد (بیلی و همکاران، ۱۹۸۲). با کاهش فعالیت پتاسیم و کاهش دما رابطه زیر در خصوص پایداری کانی‌های میکا، اسمکتیت و رکتوریت دیده می‌شود: اسمکتیت < رکتوریت< میکا (کاوانو و تومیتا، ۱۹۹۱). کانی‌های ژاروسیت و رکتوریت تحت تاثیر خروج گازهای گوگردی تشکیل شده‌اند. تورمالین که جزو کانی‌های مقاوم در برابر تجزیه می‌باشد و در رسوبات پلاسری به شکل کانی سنگین یافت می‌شود نیز در نتایج آنالیز به چشم می‌خورد. در ارتباط با شکل‌گیری کانی‌های زیست محیطی می‌توان گفت که در اثر اکسیداسیون کانی‌های سولفور یا سولفیدی (پیریت) که در معرض اکسیژن یا آب واقع می‌شوند سولفور می‌تواند توسط واکنش‌های زیر به سولفات‌ها اکسید شود (گنزالس و همکاران، ۲۰۱۱):

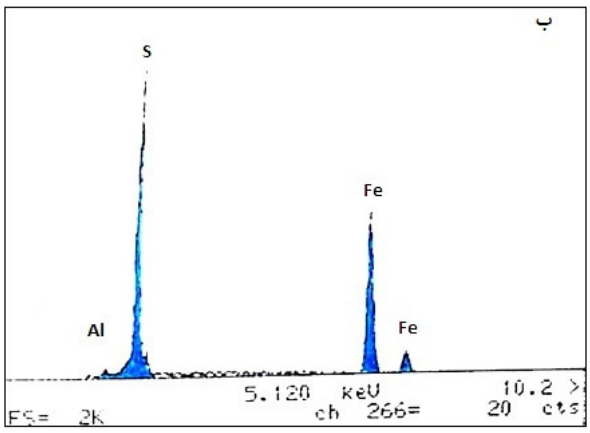
$$2S_{(s)}+3O_{2(g)}+2H_2O \rightarrow 2SO^{2-}{}_{4(aq)}+4H^{+}{}_{(aq)}$$
$$2FeS_{2(s)}+7O_{2(g)}+2H_2O \rightarrow 2F^{2+}{}_{(aq)}+4SO^{2}{}_{4(aq)}+4H^{+}{}_{(aq)}$$

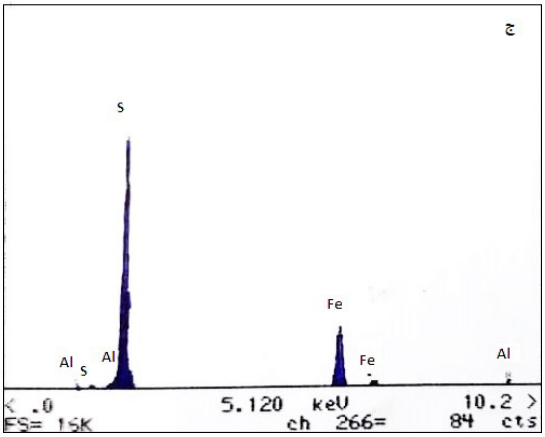
در خصوص ایجاد این کانی‌ها می‌توان گفت یون‌های محلول در آب موجود در حوضچه (سطح آب زیرزمینی) که به شدت اسیدی است، در اثر تبخیر و تغییر *PH* حلالیت خود را از دست داده و به ترتیب درجه انحلال، کانی‌های شوره‌ای و تبخیری را رسوب می‌دهد. از آنجا که یون سولفات درجه حلالیت پایینی نسبت به بقیه یون‌ها دارد، اولین کانی تشکیل شده کانی هالوتریشیت می‌باشد. در مرحله بعد کانی‌هایی چون سیلویت که درجه انحلال بیش‌تری دارند تشکیل می‌شود. از برهم‌کنش یون‌های سولفات، آهن و آلومینیوم در محیط با اسیدیته بالا طبق واکنش زیر، تشکیل هالوتریشیت امکان‌پذیر است. باید توجه داشت که در واکنش زیر Al^{3+} می‌تواند از هیدرولیز فلدسپارها آزاد شود و یا دگرسانی پیشرفته سریسیت‌های ماده معدنی تا کائولینیت و ژیپسیت $(Al(OH)_3)$ می‌تواند آلومینیوم مورد نیاز را تامین کند.

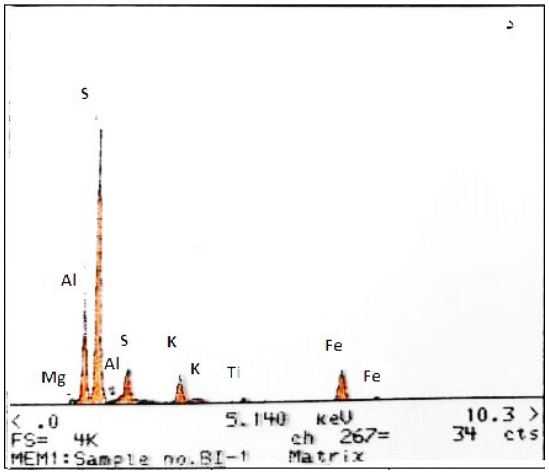
$$Fe^{2+}\,(aq) + 4SO_4{}^{2-}\,(aq) + 2Al^{+3}\,(aq) + 22H_2O \rightarrow FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O\,(s)$$

هالوتریشیت

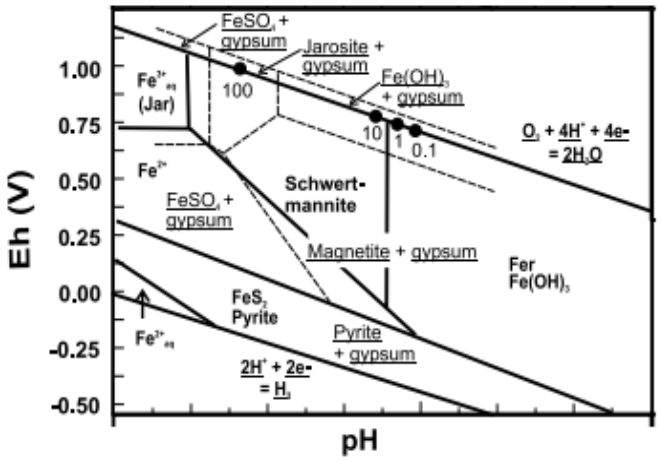




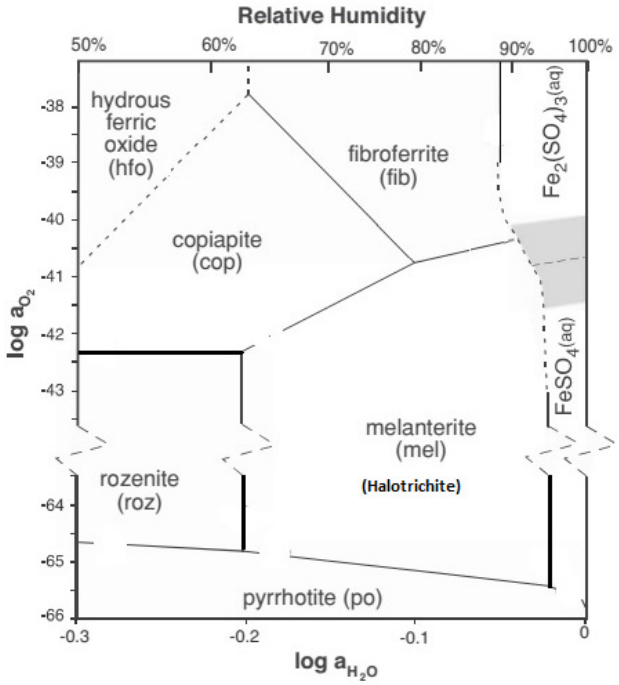




شکل ۱۰. الف) آنالیز *XRD* (الف) و *SEM* (ب تا د) از نمونه کانی‌های شوره‌ای منطقه بیداخوید، د) نمونه ماتریکس یا بستر هالوتریشیت – قله‌های آهن و گوگرد آغشتگی به هالوتریشیت را نشان می‌دهد- بستر احتمالا کانی رسی ایلیت یا سریسیت می‌باشد.



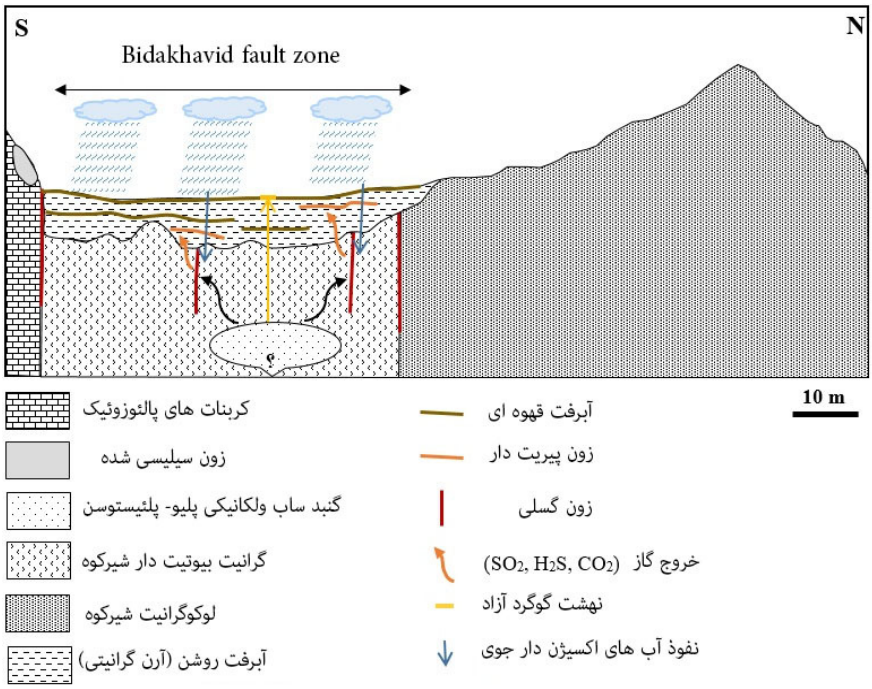
شکل ۱۱. دیاگرام *Eh-PH* برای فازهای آهن در محیط‌های معدنی اسیدی نشان‌دهنده میدان‌های پایداری در سیستم *Fe-O-S-H* (برگرفته از مجزلان و همکاران، ۲۰۰۴)



شکل ۱۲. دیاگرام *$logaO_2$-$logaH_2O$* نشان‌دهنده پایداری نسبی سولفیدهای آهن، سولفات‌ها و فازهای اکسی- هیدروکسید (برگرفته از جرز و ریمستیت، ۲۰۰۳)

جدول ۱. نتایج آنالیز *XRD* نمونه‌های معدنی بیداخوید (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲)

sample	*Mineral assemblage*
BD-1	*Quartz + K-feld + Illite*
BD-2	*K-felds + Biotite+Quartz+ Hematite*
BD-3	*Albite+Silvite+Moscovite+K-felds*
BD-4	*Moscovite+Jarosite+Hematite+Illite*
BD-5	*Biotite+Quartz+Rectorite*
BD-6	*Hematite+Turmaline+Quartz*
BD-7	*Kaolinite+Hematite+Quartz+Chlorite*
BD-8	*Quartz+K-feldspar+Albite+Biotite*



شکل ۱۳. مدل پیشنهادی خاستگاه معدن فلدسپار بیداخوید و نحوه شکل‌گیری دگرسانی‌ها.

۵- نتیجه‌گیری

طبق مطالعات انجام شده بر روی دشت آبرفتی منطقه معدن فلدسپار بیداخوید نتایج زیر به دست آمده است.

۱. در معدن فلدسپار بیداخوید در حاشیه غربی شیرکوه، رسوبات دارای ترکیب عمده کانی‌شناسی کوارتز، فلدسپار و مسکویت می‌باشد. بر اساس مطالعات بافتی، رسوبات از ذراتی با جورشدگی و گردشدگی ضعیف تشکیل شده‌اند که این موضوع نشان از مسافت حمل کم رسوبات از سنگ منشاء می‌باشد. ترکیب شیمیایی رسوبات طبق مطالعات کانی‌شناسی و پترولوژی مشابه با لوکوگرانیت- گرانیت شیرکوه می‌باشد.

۲. آغاز ایجاد این دشت آبرفتی، رخداد گسل علی‌آباد- بیداخوید و ایجاد گودال گسلی در پهنه مورد مطالعه بوده است. وجود جریان‌های سیلابی و رودخانه‌ای فصلی در منطقه، باعث عمل فرسایش و حمل آرن‌های لوکوگرانیت- گرانیت شیرکوه به داخل حوضه رسوبی و رسوب‌گذاری آبرفت‌های گرانیتی شده است.

۳. در محدوده معدن بوی گاز گوگرد استشمام می‌شود و ته‌نشست گوگرد به صورت آزاد نیز مشاهده می‌شود. علاوه بر این در بعضی از رخدادها رسوبات خاکستری رنگ پیریت‌دار نیز در اثر تصاعد گازهای گوگردی تشکیل شده است. فرایندهای هوازدگی و تاثیر اکسیداسیون جوی بر روی رسوبات پیریت‌دار باعث ایجاد یک محیط اسیدی به شکل محلی در بالای سطح سفره آب زیرزمینی شده است.

۴. شکل‌گیری این محیط به شدت اسیدی سبب رخداد کانی‌های دگرسانی عمدتا شامل سریسیت، رکتوریت، ایلیت و ژاروسیت شده است.

۵. کانی‌های شوره‌ای سولفات آهن شامل هالوتریشیت و بیلینیت به طور غیرمستقیم حاصل اکسیداسیون پیریت در این منطقه شکل گرفته‌اند.

۶. مدل پیشنهادی ارائه شده (شکل ۱۳) خاستگاه احتمالی کانی‌سازی در منطقه معدن را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

۶- تشکر و قدردانی

نگارندگان این پژوهش از حمایت‌های مالی گروه زمین‌شناسی تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

آقانباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ۵۸۶ ص.

پارساپور، ا.، خلیلی، م.، نقره‌ئیان، م. و مکی‌زاده، م. ع (۱۳۸۳) مطالعهٔ سنگ‌شناسی و ژئوشیمی ژاروسیت در رنگان (جنوب‌غرب اردستان). مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲، سال دوازدهم، ص ۲۱۴-۲۰۳.

تقی‌پور، ب و مکی‌زاده، م. ع (۱۳۹۰) سنگ زایش اسکارن مرتبط با توده نفوذی مس پورفیری علی‌آباد- دره زرشک، یزد. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۲، ص۱۱۰-۹۷.

تقی‌پور، ب، اعتمادی، ب.، مکی‌زاده، م. ح و مهدوی، ا (۱۳۹۲) زمین‌شیمی و خاستگاه خاک صنعتی کانسار فلدسپار بیداخوید (زون گسلی دهشیر) با استفاده از داده‌های عناصر کمیاب و ایزوتوپ‌های پایدار. مجله ژئوشیمی، شماره ۳، دوره ۱، ص ۲۳۷-۲۲۷.

جدیدی اردکانی، س (۱۳۹۶) مطالعات کانی‌شناسی مرمر، اسکارن و آلتراسیون هیدروترمال در باتولیت شیرکوه، جنوب‌غرب یزد. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۰۶ص.

حاج مولاعلی و علوی‌نایینی (۱۳۷۱) نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضرآباد، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران.

خسروتهرانی، خ. و وزیری‌مقدم، ح (۱۳۷۲) چینه‌شناسی کرتاسه زیرین در نواحی غرب و جنوب‌غربی یزد. فصلنامه علوم‌زمین، شماره ۷، سال دوم، ص ۴۵-۳۶ .

ذبیحی، ر.، ابراهیمی، خ. و زرین‌کوب، م. ح (۱۳۹۰) بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته‌ی کانی خاک رس کائولینیتی شده‌ی شیخ‌آباد (جنوب‌غربی بیرجند) با نگرشی بر کاربردهای صنعتی آن. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شمار ۱، سال نوزدهم، ص ۱۱۲-۱۰۳.

سبزه‌ئی، م.، روشن‌روان، ج.، ناظم‌زاده شعاعی، م. و علائی مهابادی، س (۱۳۶۵) گزارش اکتشافات فلدسپات و کائولن در منطقه یزد. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.

شیبی، م. و اسماعیلی، د (۱۳۹۱) شیمی برخی کانی‌های موجود در باتولیت گرانیتی شیرکوه، جنوب‌غرب یزد. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲۰، سال سوم، ص ۴۱۴-۴۰۳.

قربانی، م (۱۳۸۷) زمین‌شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران. انتشارات آرین زمین، ۶۷۲ ص.

عمیدی، س. م (۱۹۸۳) نقشه زمین‌شناسی آباده، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کریم‌پور، ح. و ابراهیمی، خ (۱۳۷۸) کانی‌شناسی، ترکیب شیمیایی و مصارف صنعتی فلدسپات‌های مشهد و مقایسه آن‌ها با دیگر فلدسپات‌های ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱، سال هفتم، ص ۱۴-۳.

کوهساری، ا. م (۱۳۸۰) کانی‌شناسی مرمرهای بروسیت‌دار حاشیه شرقی باتولیت شیرکوه یزد. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲، سال نهم، ص ۱۲۵-۱۱۷.

نبوی، م. ح (۱۹۷۲) نقشه زمین‌شناسی یزد، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Bailey, S. W., Brindley G. W., Kodama H., Martin R. T (1982) Report of the Clay Minerals Society, Nomenclature Committee, 1980 -1981: Nomenclature for regular interstratification. Clays and Clay Minerals, 30: 76- 78.

Bonin, B., Brandlein, P., Bussy, F., Desmons, J., Eggenberger, U., Finger, F (1993) Late Variscan Magmatic Evolution of the Alpine Basement. In: J.F., Von Raumer, F., Neubauer (Editors), Pre-Mesozoic Geology in the Alps, Springer, Heidelberg, 171-201.

Emsbo, D., Hofstra, A. H (2003) Origin and Significance of Postore Dissolution collapse Breccias Cemented with calcite and barite at the Meikle Gold Deposit, Northern carlin Trend, Nevada. Economic Geology, 98: 1243-1254.

Felsche, J., Herrmann, A. G (1978) Yitrium and lanthanides. In: K. Wedpohl (Editor). Hand book of Geochemistry, Springer, Verlag, New York, 57-71.

Forster, H (1978) Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran. Journal of the Geological society London, 135: 443-445.

Gonzalez, V. Garcia, I.., Del Moral, F., De Haro, S., Sanchez, J. A., Simon, M (2011) Impact of unconfined sulphur- mine waste on a semi-arid environment (Almeria, SE Spain). Journal of Environmental Management, 92: 1509-1519.

Jerz, J. K., Rimstidt, J. D (2003) Efflorescent iron sulfate minerals: Paragenesis, relative stability, and environmental impact, American Mineralogist, 88: 1919–1932

Kawano, M., Tomita, K (1991) Mineralogy and genesis of clays in postmagmatic alteration zones, Makurazaki volcanic area, Kagoshima Prefecture, Japan. Clays and Clay Minerals, 39: 597-608.

Kelepertsis, A. E (1989) Formation of sulfates at the Thiaphes area of Milos Island: Possible precursors of kaolin mineralization. The Canadian Mineralogist, 27: 241-245.

Majzlan, J., Navrotsky, A. Schwertmann, U (2004) Thermodynamics of iron oxides: Part III. Enthalpies of formation and stability of ferrihydrite (Fe $(OH)_3$), schwertmannite (FeO $(OH_{3/4}(SO_4)_{1/8})$ and ε-Fe2O3, Geochimica et Cosmochimica Acta, 68: 1049– 1059.

Mihajlovic, T., Karanovic, L., Dimitrijevic, R (2002) The crystal structure of halotrichite (Fe2+Al2(SO4)4.22H2O) from the mercury mine Šuplja Stena on Mt. Avala, Serbia. Jahrestagung der DGK, Kiel, Germany.

Palache, C., Berman, H., Frondel, C (1951) The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana", 7th edition, John Wiley and Sons, Yale University, New York, 1124p.

Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A. M., Pennacchioni, G., Mancktelow, N (2003) Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). Earth and Planetary Science Letters, 214: 203-219.

Xianwu Bi., Cornell, D. H, Ruizhong, H. U (2002) REE composition of primary and altered feldspar from the mineralized alteration zone of alkaline intrusive rocks, western Yunnan Province, China. Ore Geology Reviews, 19: 69-78.

Occurrence of Halotrichite in Bidakhvaid felspar-bearing alluvium, SW of Shirkuh batholith, Yazd

S. jadidi ardakani[1], M. A. Mackizadeh[*2] and F. Ayati[3]

1, 2- Dept., of Geology, Facualty of Science, Isfahan University, Isfahan
3- Dept., of Geology, Payame Noor University, Iran

** mackizadeh44@gmail.com*

Recieved: 2020/3/11 Accepted: 2020/8/12

Abstract

The Bidakhavid mine is located on the western margin of the Shirkouh Batholith in the Central Iran and as a part of Urumieh-Dokhtar magmatic belt. This mine is the result of alteration of quaternary alluvial deposits. The main unit of the Bidakhavid mine is the iron oxide cement-semi-hardened alluvial-abrasive sediments with main minerals, including quartz, biotite, K- feldspar, altered plagioclase and clay minerals. Significant geological aspects are the emission of sulfur gases and the deposition of natural sulfur in surface of Quaternary alluvial deposits. The presence of efflorsence minerals such as halotrichite, confirm a fumarole region and the release of volcanic sulfid gases associated with young volcanism in the Dehshir fault zone. Iron sulfate efflorsence minerals are produced by pyrite oxidation and the formation of acidic environments on the surface of the groundwater table. The occurrence of this highly acidic environment has led to the occurrence of alteration minerals such as pyrite, sericite, rectorite, illite and jarosite.

Keywords*: Halotrichite, Shirkuh, Bidakhavid, Yazd, central Iran*