مجله زمین‌شناسی اقتصادی
جلد 7، شماره 2 (سال 1394)
صفحات 179 تا 202

Journal of Economic Geology
Vol. 7, No. 2 (2015-2016)
ISSN 2008-7306

مطالعات کانی‌سازی، ژئوشیمی، سیالات درگیر و ایزوتوپ پایدار گوگرد کانسار Cu-Zn-As باقرق با سنگ میزبان کربناته (شمال‌شرق انارک)

محمدعلی جزی، محمدحسن کریم‌پور* و آزاده ملکزاده شفارودی

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: 1394/2/1، پذیرش: 1394/7/11

چکیده

کانسار Cu-Zn-As باقرق در شمال شرق شهر انارک و در استان اصفهان قرار دارد. کانی‌سازی به‌صورت دیرزاد، ماهیت چینه‌کران و بافت و ساخت پرکننده فضای خالی در سنگ میزبان کربناتی رخداده است. کانی‌شناسی بخش درون‌زاد شامل کالکوسیت، کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت، گالن، انارژیت، باریت و کلسیت و کانیهای بخش برون‌زاد شامل مالاکیت، آزوریت، کوولیت، کریزوکولا، کالکوسیت، سروزیت، اسمیت‌زونیت، مس طبیعی، هماتیت، گوتیت و لیمونیت می‌باشد. سنگ میزبان کربناتی در اطراف زون‌های کانه‌دار متحمل دگرسانیهای دولومیتی‌شدن و کلسیتی‌شدن شده است. مس به‌عنوان عنصر اصلی ذخیره (با میانگین 20/28 درصد وزنی) و پس از آن عناصر روی (با میانگین تقریبی 1 درصد وزنی) و آرسنیک (با میانگین تقریبی 1 درصد وزنی) می‌باشند. مطالعات سیالات‌درگیر روی کانی باریت نشان می‌دهد سیال کانه‌دار سولفیدی دارای محدوده دمای همگن شدن بین 259 تا 354 درجه سانتی‌گراد و میزان شوری بین 8 تا 13 درصد وزنی معادل NaCl می‌باشد. سیال کانه‌دار در مراحل پایانی کانی‌سازی با آبهای جوی دچار اختلاط شده و فاز تأخیری غیر سولفیدی کلسیتی با محدوده دمای نسبتاً پایین (78 تا 112 درجه سانتی‌گراد) و درجه شوری پایین (بین 3 تا 6 درصد وزنی معادل NaCl) را تشکیل داده است. محدوده مقادیر $\delta^{34}S$ کانی باریت کانسار باقرق بین 13+ تا 14+ در هزار بوده در حالی‌که محاسبه مقدار $\delta^{34}S$ مربوط به سیال کانه‌دار پس از تصحیح دمایی بین 7- تا 8- در هزار به‌دست آمد. منشأ گوگرد باقرق با توجه به شباهت ایزوتوپ باریت با سولفات‌های دریایی کرتاسه، احتمالاً از لایه‌های تبخیری این دوره زمانی تأمین شده است. این سولفات‌ها توسط فرآیندهای ترموشیمیایی به‌صورت بخشی به گوگرد احیایی با مقدار ایزوتوپی سبک‌تر (حدود 21 در هزار) تبدیل و جهت ته‌نشست سولفیدها مورد استفاده قرار گرفته است. کانسار باقرق با توجه به خصوصیاتی همچون سنگ میزبان کربناته، غیاب فعالیت آذرین، بافت پرکننده فضای خالی، دگرسانی دولومیتی،کانی‌شناسی، ژئوشیمی ماده‌معدنی (وجود As و Sb بالا و عدم حضور Bi)، داده‌های دماسنجی و مقادیر ایزوتوپ گوگرد، شباهت زیادی با کانسارهای مس با سنگ میزبان کربناته در افریقا و به‌ویژه نوع سومب (Tsumeb) در نامیبیا نشان می‌دهد. کانسار باقرق احتمالاً مرتبط با سیالات دگرگونی آزاد شده در حین فازهای کوه‌زایی مرتبط با بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: *مس، سنگ میزبان کربناته، سیال درگیر، ایزوتوپ پایدار گوگرد، باقرق.*

مقدمه

کانسار مس باقرق در فاصله 58 کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک، در حاشیه جنوبی کویر بزرگ و در محاصره تلماسه‌ها قرار گرفته است. محدوده مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی "30´48°53 طول شرقی و "30´35°33 عرض شمالی قرار گرفته است. راه دسترسی به این کانسار از طریق جاده انارک- معدن نخلک- معدن باقرق امکان‌پذیر بوده که در حال حاضر به‌صورت معدن متروکه رها شده است. استخراج از این کانسار از سال 1313 شمسی به‌مدت یک دهه و به‌صورت زیرزمینی در قالب سیستم چاه و تونل در افقهای 12-، 17-، 20-، 40-

* مسؤول مکاتبات: karimpur@um.ac.ir

و 60- متری به‌روش مکانیکی و توسط کارشناسان شرکتی آلمانی صورت گرفته است. استخراج سالانه از کانسار 1000 تن با عیار میانگین 2% در سال بوده که بعد از سنگ‌جوری دستی به عیار 5-12 % می‌رسیده است. ارزیابی از میزان ذخیره موجود نبوده اما با توجه به استخراج نیمی از ذخیره کانسار (8 زون کانه‌دار از مجموع 15 زون) و مقدار استخراج سالانه می‌توان کانسار باقرق را کانساری کوچک با ذخیره قطعی حدود 20 هزار تن با عیار میانگین 2% در نظر گرفت. سازند باقرق از گروه نخلک با سن تریاس نام خود را از این محدوده اقتباس کرده است. در گزارشهای قدیمی (از جمله Ladame, 1945; Bariand, 1963; Bazin and Hubner, 1969; Mir-Mohammadi, 1977) اشاره‌های مختصری به کانی‌سازی در این محدوده شده و گزارش تکنواکسپورت شرح مختصری از زمین‌شناسی، کانی‌سازی و ذخیره این کانسار ارائه کرده است (Cherepovsky et al., 1982). هدف از انجام این مطالعه بررسی نحوه رخداد کانی‌سازی، ژئومتری و ژئوشیمی ماده‌معدنی، دست‌یابی به شرایط دمایی و ایزوتوپی گوگرد در کانسار باقرق است. با توجه به نوع ذخیره، سنگ میزبان کربناته و پتانسیل بالای معدنی در پهنه فلززایی انارک به نظر می‌رسد بررسی دقیق این ذخیره علاوه بر جنبه علمی-پژوهشی می‌تواند الگوی اکتشافی مناسبی برای ذخایر دیگر در این پهنه فلززایی و در ایران فراهم نماید.

روش مطالعه

پس از بررسیهای صحرایی سطحی و تونل‌های زیرزمینی قابل ورود در مجموع حدود 50 نمونه از سنگ میزبان و ماده معدنی برداشت شد. به‌منظور بررسیهای سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانی‌شناسی و توالی پاراژنتیک تعداد 22 مقطع نازک، 10 مقطع صیقلی و 4 مقطع نازک- صیقلی مورد آماده‌سازی قرار گرفت. تعداد 10 نمونه از رگه و رگه‌چه‌ها انتخاب گردید که توسط محلول‌سازی تیزاب سلطانی (HNO_3^{+3} HCl) به روش ICP-OES در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما مورد تجزیه قرار گرفته که حد تشخیص برای عناصر برای بیشتر عناصر ماده معدنی در حد 1 قسمت در میلیون می‌باشد. به‌دلیل بالاتر بودن مقدار مس از حد بالایی تشخیص در آنالیز ICP-OES و نیز عدم اندازه‌گیری بیسموت و طلا، میزان این سه عنصر به روش جذب اتمی (AAS) و با محلول‌سازی توسط تیزاب سلطانی و حد تشخیص 2 قسمت در میلیون در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. پس از تعیین توالی پاراژنتیک ذخیره، تعداد 7 نمونه کانی باطله مرتبط با کانی‌سازی (باریت و کلسیت) برای تهیه مقطع دوبر صیقل (ضخامت حدود 100 میکرون) انتخاب گردید. مطالعات پتروگرافی توسط میکروسکپ پلاریزان و با عدسی 50 انجام گرفت و دماسنجی سیالات درگیر به‌وسیله دستگاه سردکننده و گرم‌کننده لینکام مدل THMSG 600 در دانشگاه فردوسی مشهد بر روی 4 نمونه مناسب صورت گرفت. گستره دمایی دستگاه بین 120- تا 600+ درجه سانتی‌گراد و با دقت $\pm 1^{\circ}$ C می‌باشد. مقدار شوری در سیستم H_2O-NaCl (Bodnar, 1993) و مقدار چگالی سیالات درگیر با استفاده از نرم‌افزار FLINCOR (Brown and Lamb, 1989) محاسبه شده است. به‌منظور انجام آزمایش ایزوتوپ گوگرد به‌دلیل هوازدگی و نامناسب بودن سولفیدها به ناچار از نمونه‌های باریت که مطالعات سیالات درگیر روی آن انجام گرفته بود، کمک گرفته شد. در این راستا تعداد 5 نمونه انتخاب شد و به روش EA-IRMS در آزمایشگاه ایزو آنالیتیکال[1] انگلستان مورد تجزیه قرار گرفت. مبنای استاندارد مورد استفاده برای تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}S$) در تمامی نمونه‌های ایزوتوپی فاز سولفیدی، ترویلیت شهاب سنگ آهنی کانیون دیابلو آریزونا (CDT) است.

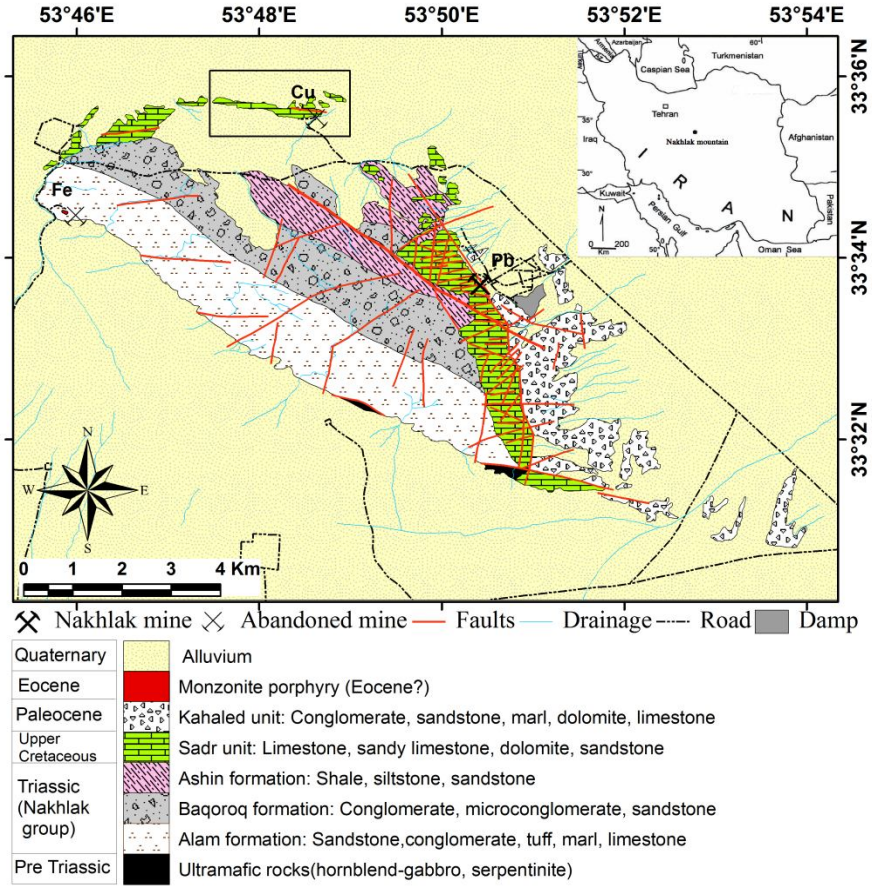
زمین‌شناسی

کانسار باقرق در حاشیه شمالی رشته کوه منفرد نخلک قرار گرفته و به لحاظ تقسیم‌بندیهای زمین‌شناسی ایران (Aghanabati, 2004) در خرد قاره ایران مرکزی و بلوک یزد قرار گرفته است. چینه‌شناسی کوه نخلک شامل سنگهای الترامافیک قبل از تریاس، واحدهای سنگی تریاس (گروه نخلک)، واحد سنگی کربناته کرتاسه بالایی (واحد صدر)، واحد تخریبی- کربناتی پالئوسن (واحد خالد) و دایک و استوک مونزونیت پورفیری (ائوسن؟) هستند (شکل 1). واحد سنگی تریاس و یا گروه نخلک شامل سازندهای علم، باقرق و عشین می‌باشد. در کوه نخلک سنگهای کرتاسه بالایی (واحد صدر) با ضخامت 258 متر شامل کنگلومرا، آهک و دولومیت ماسه‌ای، ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای-رسی و آهک ریفی رخنمون دارد که در یک محیط حاشیه قاره‌ای کم‌عمق تا

1- Iso-Analytical Ltd

عمیق دریا نهشته شده‌اند (Vaziri et al., 2012). سنگهای کرتاسه بالایی، میزبان ماده‌معدنی کانسار باقرق را تشکیل داده است. رخنمون سنگی در محدوده کانسار باقرق با وسعتی حدود 2 کیلومتر مربع و شیبی برابر 20 تا40 درجه به سوی غرب شامل رخساره‌های کربناتی، کربناتی- تخریبی و تخریبی هستند. سنگهای کرتاسه بالایی کوه نخلک به سه بخش تقسیم شده که از پایین به بالا شامل: 1) بخش آهک- ماسه سنگ؛ 2) بخش ماسه سنگ- کنگلومرا و 3) بخش آهک رودیست‌دار می‌باشد (Cherepovsky et al., 1982). بر اساس این تقسیم‌بندی، سنگ میزبان کانسار باقرق شامل قسمت بالایی بخش آهک- ماسه سنگ و قسمت پایینی بخش ماسه سنگ- کنگلومرا می‌باشد. همچنین در تقسیم‌بندی دیگری سنگهای کرتاسه بالایی کوه نخلک به 10 زیر بخش تقسیم شده است (Vaziri et al., 2005). ماده‌معدنی کانسار باقرق درون زیر بخشهای 4 و 5 قرارگرفته که زیر بخش 4 (واحد K_L در شکل 2) شامل تناوبی از لایه‌های نازک‌لایه تا متوسطلایه خاکستری روشن از ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای و دولومیت ماسه‌ای بوده و زیر بخش 5 (واحد K_S در شکل 2) شامل تناوبی از لایه‌های نازک لایه تا متوسط لایه خاکستری روشن تا سفید از ماسه‌سنگ آهکی وکنگلومرای قهوه‌ای رنگ است (شکل 2). کنگلومرا از نوع ریزدانه ارتوکنگلومرا تا پاراکنگلومرا و جنس دانه‌ها متاکوارتزیت، کوارتز و با رنگ روشن هستند.

با توجه به قرارگیری کربنات‌های کرتاسه بالایی در کنار سازند باقرق، احتمالاً واحد زیرین کربنات‌ها سنگهای تخریبی سازند باقرق بوده که توسط رسوبات بادی کواترنری پوشیده شده است.

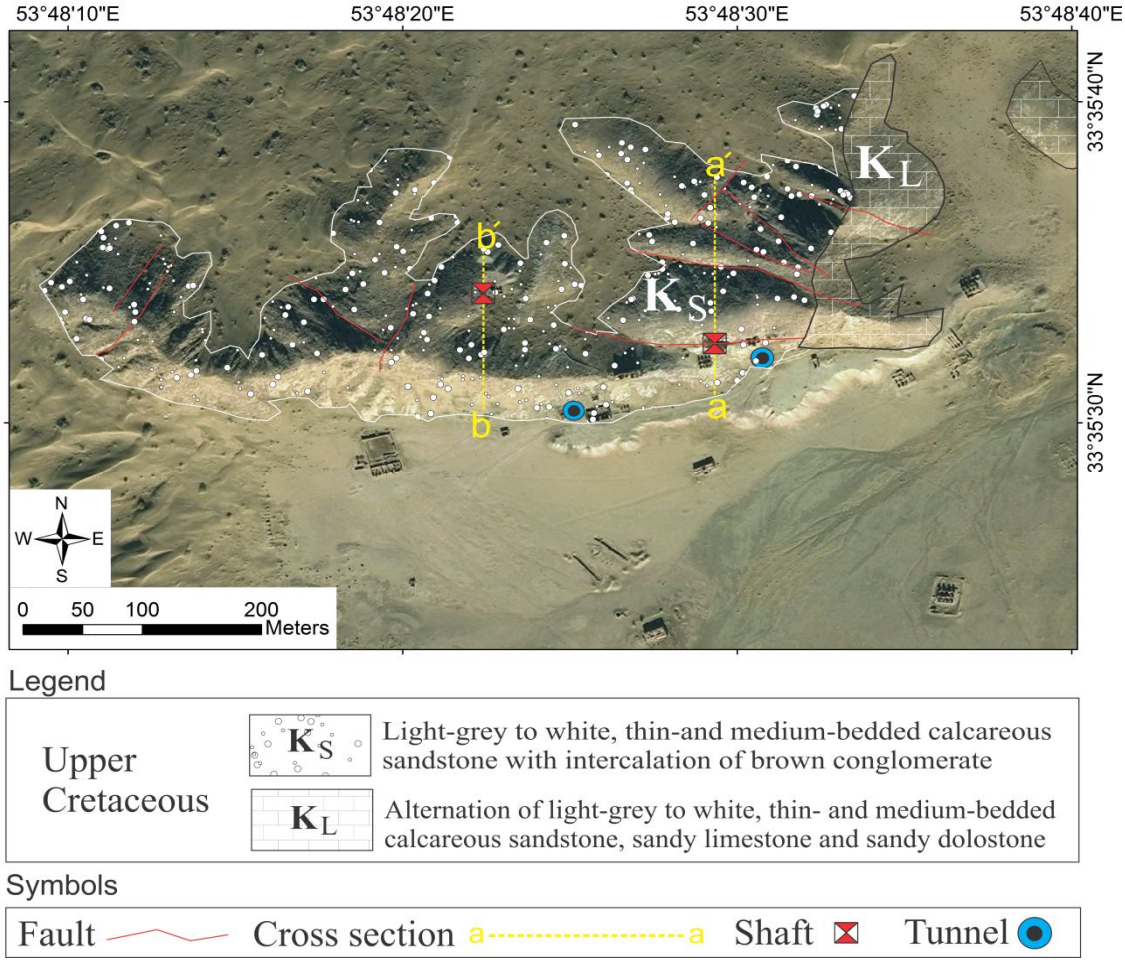


شکل 1. نقشه زمین‌شناسی کوه نخلک (با تغییرات از Alavi et al., 1997). کادر مستطیلی درون نقشه محدوده کانسار باقرق را نشان می‌دهد (Pb: کانسار سرب نخلک، Cu: کانسار مس باقرق، Fe : کانسار آهن بوته-علم)

Fig. 1. Geologic map of Nakhlak Mountain (modified after Alavi et al., 1997). The quadrangle in the map shows the Baqoroq deposit area. (Pb: Nakhlak lead deposit; Cu: Baqoroq copper deposit; Fe: Buteh-Alam iron deposit)

کانی‌سازی

کانی‌سازی با ماهیت دیـرزاد[1] و چینـه‌کران[2] در میزبـان واحـد کربناتی کرتاسه بالایی رخ داده اسـت. مـاده‌معـدنی بـه شـکل زون‌های کانه‌دار و درون شکستگیهای سنگهای کرتاسه بـالایی حضور دارد. سنگ میزبان نقش اساسی و مهمی در ته‌نشست و تمرکز موضعی ماده‌معـدنی بـه‌ویـژه در کانسـارهای دیـرزاد را داراست. در ناحیه کوه نخلک، کربنات‌هـای کرتاسـه بـالایی بـا توجه به خصوصیات چینه‌شناسـی، سنگ‌شناسـی و سـاختاری به‌عنوان افق مناسـب کانی‌سـازی در نظـر گرفتـه شـده اسـت (Jazi et al., 2015).



شکل 2. عکس هوایی از محدوده کانسار باقرق که عوارض زمین‌شناسی و معدنی بر روی آن مشخص شده است.

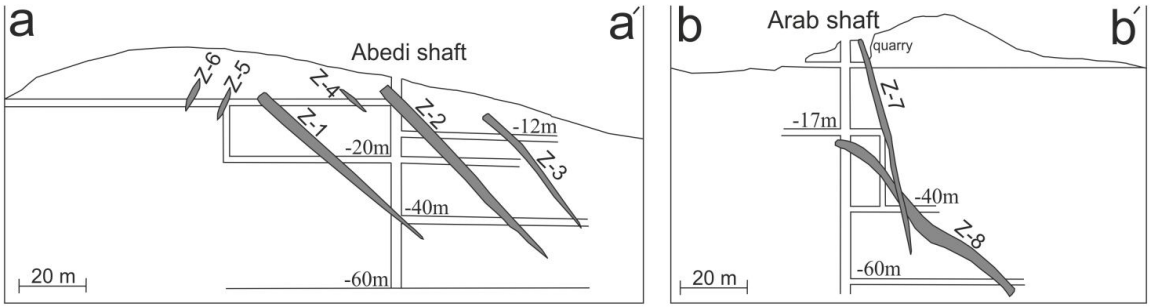
Fig. 2. Aerial photograph of Baqoroq deposit area with geology and mining effects.

ژئومتری ماده معدنی: ماده‌معدنی به‌صـورت زون‌هـای کانـه‌دار کشیده و در امتداد شکستگی و گسلها مشـاهده مـی‌شـود. در مجموع 15 زون کانه‌دار کوچک و بـزرگ شناسـایی شـده کـه طول آنها در راستای امتداد بین 10 تا 100 متـر و در راسـتای شیب بین 10 تا 85 متر متغیر است.

ضخامت این زون‌ها نیز متفاوت بوده و بـین 0/5 تـا 4 متـر در تغییر است (شکل 3). زون‌های کانه‌دار با امتداد غالـب NW و EW و شیب 40 تا 85 درجه به سمت شمال و جنوب توسـط عوامل ساختاری کنترل می‌شود. زون‌های کانـه‌دار بـه صـورت مناطقی با تراکم شکستگی و خردشدگی بالا هستند که فضای خالی لازم جهت ته‌نشست ماده‌معـدنی را ایجـاد نمـوده اسـت. کنترل‌کننده‌های ساختاری می‌تواند به‌عنـوان عامـل اصـلی در قابلیت نقل و انتقال سیالات چه در مقیاس ناحیـه‌ای و چـه در مقیاس معدنی عمل نماید. این کنترل‌کننده‌ها باعـث تمرکـز و

1- Epigenetic
2- Stratabound

تجمع جریان سیال کانه‌دار شده تا فرصتی برای رخداد فرآیندهای ته‌نشست ایجاد شود (Leach et al., 2005).



شکل 3. نیمرخهای شمالی- جنوبی a-a′ و b-b′ کانسار باقرق و زون‌های کانه‌دار در آن (موقعیت این نیمرخها در شکل 2 نشان داده شده است).

Fig. 3. North-south profiles a-a′ and b-b′ of Baqoroq deposit and mineralized zones (the position of the profiles is shown in Figure 2).

ساخت و بافت ماده معدنی: در هر زون کانه‌دار ماده معدنی به‌صورت مجموعه‌ای از رگه، رگه‌چه و پراکنده حاوی باطله وکانیهای مس حضور دارند. در حالت پرکننده فضای خالی رگه و رگه‌چه‌های چند سانتی‌متری با طول متغیر بین 1 تا 15 متر حضور دارد. در حالت جانشینی نیز در مجاورت زون‌های معدنی، در سنگ دیواره و بلافصل آن کانی‌سازی مس به‌صورت افشانه‌های پراکنده شکل گرفته‌اند.

بافتهای مشاهده شده در کانسار باقرق اغلب از نوع پرکننده فضای خالی و کمتر بافتهای جانشینی است. شرح برخی از این بافتها عبارت است از:

بافت برشی[1]: عمده‌ترین شکل حضور ماده‌معدنی بوده که در اثر فعالیتهای تکتونیکی سنگ میزبان دچار شکستگی شده و زون‌های خرد شده دارای قطعات چند سانتی‌متری ایجاد کرده که توسط ماده‌معدنی سیمان شده‌اند. میزان جدایش، چرخش، فاصله بین قطعات و ساییدگی قطعات برش در زون‌های کانه‌دار نسبتاً ضعیف بوده و بر اساس تقسیم‌بندی لازنیکا (Laznicka, 1989) اغلب شامل برش‌های خردشده[2]، برش موزاییکی و رابل[3] هستند (شکل 4- A). عدم چرخش و ساییدگی شدید در قطعات برش احتمالاً به سبب پایین بودن قدرت جریان سیال کانه‌دار برای جابه‌جایی و حرکت قطعات برش بوده است.

بافت قشری[4]: درون فضاهای خالی و شکستگیهای فاقد برش این نوع بافت مشاهده می‌گردد. این بافت در تعیین توالی پاراژنتیک اهمیت بالایی داشته و در کانسار باقرق معمولاً نسل اول ته‌نشست با ماده معدنی فلزی بوده که در ادامه با ته‌نشست باطله همراه شده است (شکل 4- B). تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی محیط باعث ته‌نشست کانیهای متفاوت می‌شود که این شرایط می‌تواند تغییرات در شیمی سیال و یا تغییرات فوگاسیته اکسیژن باشد. این بافت اغلب در کانسارهای دمای پایین دیده می‌شود (Ineson, 1989)؛ همچنین در کانسارهای رگه‌ای که کانی‌سازی سولفیدی و اکسیدی در کنار هم تشکیل شده‌اند، عامل اصلی کانی‌سازی تغییرات نسبی فوگاسیته اکسیژن و گوگرد در محیط است (Cooke and Simmons, 2000).

تجمعات برشی[5]: در ضمن ته‌نشست ماده‌معدنی در اثر حرکات تکتونیکی و یا فشار سیال کانه‌دار، ماده‌معدنی ته‌نشست شده خرد شده و به‌صورت قطعات برش درآمده و توسط سیال کانه‌دار مجدداً سیمانی می‌شود. در برخی از زون‌های کانه‌دار رگه‌هایی از ماده‌معدنی به صورت خرد شده و مجدداً سیمان شده توسط ماده‌معدنی مشاهده می‌شود. حضور این بافت نشان از فعالیتهای تکتونیکی احتمالی و یا شکستگی در اثر فشار سیال بوده که با توجه به عدم چرخش و ساییدگی شدید در قطعات برش احتمال فعالیتهای تکتونیکی در حین کانی‌سازی بیشتر است.

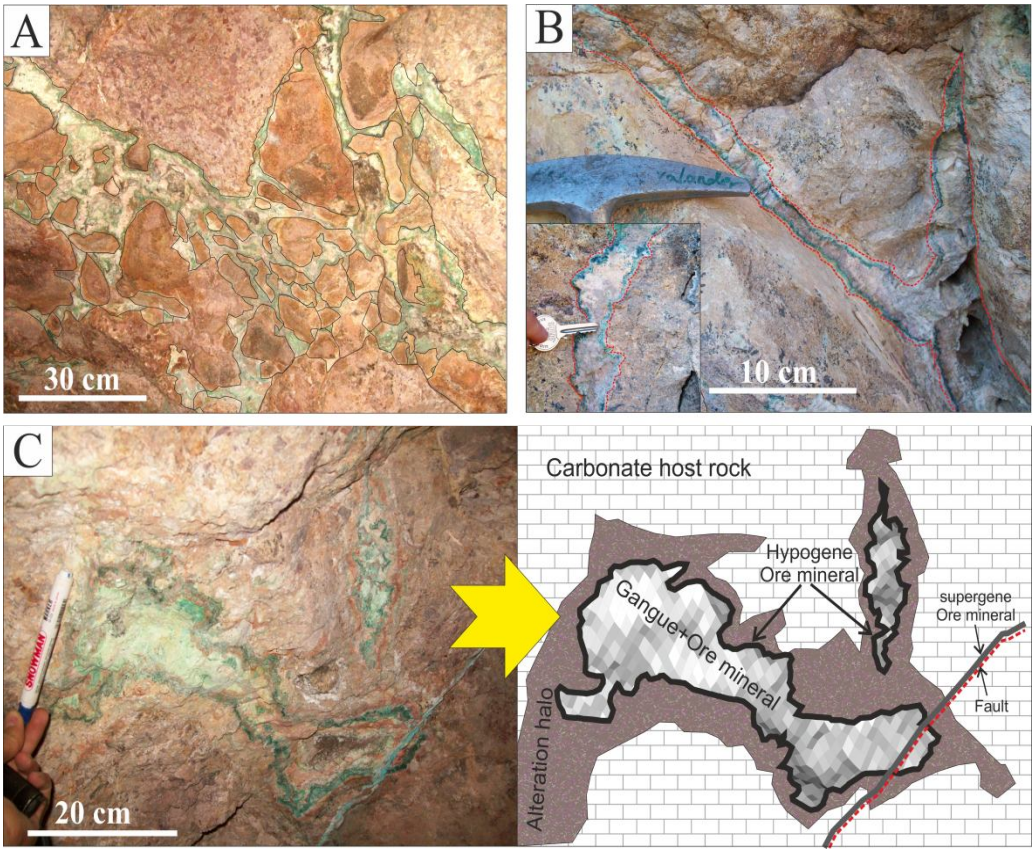
بافت خوشه انگوری[6] : بافت خوشه انگوری از دسته بافتهای کلوئیدی است و در این کانسار در کانی باریت و کلسیت دیده می‌شود و از رشد این کانیها بر روی سطح فضای خالی حاصل می‌شود که می‌تواند حالت هم مرکزی در قشرهای آن دیده شود.

1- Breccia texture
2- Crackle breccia
3- Rubble breccia
4- Crustification bounding
5- Breccia aggregate
6- Botryoidal texture

بافت کوکاد[1]: رشد ماده معدنی و باطله بر روی سطح خارجی قطعات برش حاصل شده که نسل اول کانی‌سازی مس و سپس رشد کانیهای باطله بوده است.

بافت انتشاری[2]: در نزدیکی رگه‌ها و درون سنگ میزبان، این بافت دیده می‌شود که در واقع حاصل نفوذ سیالات گرمابی به‌داخل سنگ میزبان است. در مواردی نیز این بافت به‌صورت پرکننده فضای بین بلوری در سنگ میزبان دولستون دیده می‌شود. جانشینی سنگ میزبان توسط ماده‌معدنی به مقدار بسیار کمی در حاشیه قطعات برش و در بافت انتشاری و در رگه‌چه‌های قطع کننده سنگ میزبان دیده می‌شود. از جمله دیگر بافتهای حفره‌ای بوده که در آن حفرات توسط ماده‌معدنی به‌صورت منطقه‌بندی پرشده است. حاشیه حفره توسط ماده معدنی و مرکز آن توسط کانیهای باطله باریت-کلسیت پر شده است (شکل4- C).

کانی‌شناسی: به‌سبب تنوع کانیایی در کانسار باقرق، کانی‌شناسی آن به دو صورت درون‌زاد و برون‌زاد شرح داده خواهد شد: در بخش درون‌زاد کانیهای سولفیدی کالکوسیت، کالکوپیریت، پیریت، اسفالریت، گالن، انارژیت (Cu_3AsS_4)، تتراهدریت ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$)-تنانتیت ($Cu_{12}As_4S_{13}$) حضور دارند که به شکلهای انتشاری، توده‌ای و ادخال قابل مشاهده هستند (شکل 5). کانیهای باطله اصلی در این بخش شامل باریت و کلسیت بوده که حجم قابل توجهی از ماده‌معدنی را تشکیل می‌دهند. دولومین به‌عنوان کانی باطله فرعی به‌صورت کانی دگرسانی و باطله در ماده معدنی حضور دارد.



شکل 4. تصاویر صحرایی از بافتهای اصلی در کانسار باقرق. A: بافت برشی موزاییکی (قطعات سنگ میزبان دگرسان‌شده با سیمان ماده معدنی)، B: بافت قشری درون فضای خالی که در طی آن کانی‌سازی فلزی (کالکوپیریت و کالکوسیت در حال تبدیل بـه مالاکیـت) در مرحلـه اول و باطلـه در مرحله دوم شکل گرفته است، C: پرشدگی حفره به‌صورت ژئود و شکل شماتیک آن.

Fig. 4. Field pictures of textures in Baqoroq deposit. A: Breccia texture (altered host rock fragments cemented by ore), B: Crustification bounding texture in open space, which ore mineral (Chalcopyrite and chalcocite Converting to malachite) in the first stage and gangue mineral in second stage were formed, C: Cavity filling as geode associated with schematic figure.

1- Cockade texture
2- Disseminated texture

ماده‌معدنی درون‌زاد به‌سبب عملکرد فرآیندهای برون‌زاد به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته به‌طوری‌که کانیهای برون‌زاد بر کانیهای درون‌زاد غلبه دارد. مهمترین کانی برون‌زاد مالاکیت است که با دیگر کانیهای برون‌زاد از قبیل آزوریت، کوولیت، کریزوکولا، کالکوسیت، سروزیت، اسمیت‌زونیت، کوپریت (؟)، مس طبیعی و کانیهای اکسیدی- هیدروکسیدی آهن (گوتیت و هماتیت) همراه است (شکل 5). کالکوپیریت به‌سبب بالا بودن شدت جانشینی برون‌زاد اغلب توسط کانیهایی نظیر کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت جانشین شده است. علاوه بر این، به‌صورت بلورهای پراکنده کوچکتر از 1 میلی‌متر نیز مشاهده می‌شود. همچنین مخلوط کانیهای مالاکیت وگوتیت می‌تواند از حضور کانی کالکوپیریت اولیه ناشی شده باشد (شکل 5- A).

کالکوسیت به دو صورت درون‌زاد و برون‌زاد به‌صورت انتشاری و توده‌ای فراوان‌ترین کانی سولفیدی کانسار بوده و اغلب در حال تبدیل به مالاکیت است. در حالت برون‌زاد این کانی از جانشینی برون‌زاد کالکوپیریت تشکیل شده که شاهد آن وجود باقی‌مانده‌هایی از کالکوپیریت درون کالکوسیت است (شکل 5-A). اسفالریت (شکل 5- B) نیز مانند دیگر کانیهای سولفیدی درون‌زاد تحت تأثیر فرآیندهای برون‌زاد به کانی اسمیت‌زونیت تبدیل شده است. پیریت با ابعاد زیر 1 میلی‌متر همراه با ماده‌معدنی درون‌زاد حضور داشته که در اثر عملکرد فرآیندهای برون‌زاد تنها قالبهایی از اکسیدهای آهن نشان از حضور پیریت می‌باشد. گالن به‌صورت پراکنده و بی‌شکل با اندازه چند میکرون تا چند میلی‌متر و زیر 1 درصد از نظر فراوانی درون ماده‌معدنی پراکنده شده است (شکل 5- C).

در نمونه های با جانشینی برون‌زاد نسبتاً شدید نیز این کانی به‌صورت سالم حضور دارد. با شروع فرآیند جانشینی برون‌زاد پوششی از کانی انگلزیت و در ادامه سروزیت به روی سطح گالن ایجاد شده و مانع از اکسیداسیون بیشتر گالن می‌شود که این ویژگی گالن به سپر گالن[1] معروف است (Szczerba and Sawlowicz, 2009). کانیهای سولفوسالتی تترائدریت- تنانتیت (فاهلور) به‌صورت ادخال درون کانیها از جمله گالن به رنگ خاکستری روشن و ابعاد چند میکرونی مشاهده شد. این سری کانیها با نام گروه فاهلور[2] نیز معرفی شده‌اند که دارای فرمول شیمیایی نسبتاً پیچیده‌ای هستند (Ramdohr, 1970). کانیهای سولفوبیسموتینید خاص تیپ کانسارهای دما بالا و سولفوآنتیموانید خاص کانسارهای تیپ دما پایین در نظر گرفته شده است (Malakhov, 1968). انارژیت (Cu_3AsS_4) با رنگ خاکستری و ته‌رنگ بنفش به‌صورت کمیاب و با ابعاد چند میکرون، به‌صورت هم‌رشدی همراه با گالن حضور دارد (شکل 5- D). این کانی می‌تواند مقادیر فرعی از عناصر آنتیموان، نقره و آهن را در خود جای دهد (Conner and Anderson, 2013). مالاکیت به‌عنوان فراوان‌ترین کانی فلزی به‌صورت پرکننده فضالی خالی و جانشینی کربنات‌ها و به شکلهای انتشاری تا توده‌ای ظاهر شده که بافت خوشه انگوری، بلورهای ریز سوزنی شکل و پوشش نهان‌بلور از آن جمله است (شکل 5- E). جانشینی انتخابی زون‌های کم‌آهن دولومیت‌ها توسط محلولهای برون‌زاد حاوی مس باعث تشکیل مالاکیت شده است. کوولیت در نمونه‌های با شدت جانشینی برون‌زاد کم حضور داشته و با افزایش شدت جانشینی برون‌زاد به کالکوسیت و در نهایت کربنات‌های مس تبدیل می‌شود. در اثر افزایش pH و Eh محیط کانی کوولیت به کالکوسیت ثانویه تبدیل شده که این فرآیند با خروج سولفات همراه خواهد بود (Sikka et al, 1991). در حاشیه برخی از کانیهای گالن آثاری از کانی کوولیت وجود داشته که از حضور ادخال‌های تتراهدریت- تنانتیت درون گالن حکایت دارد. مس خارج شده از ساختار سولفیدهای مس با سولفات موجود در محیط ترکیب شده و به‌صورت زیر تشکیل کوولیت می‌دهد (Guilbert and Park,1997):

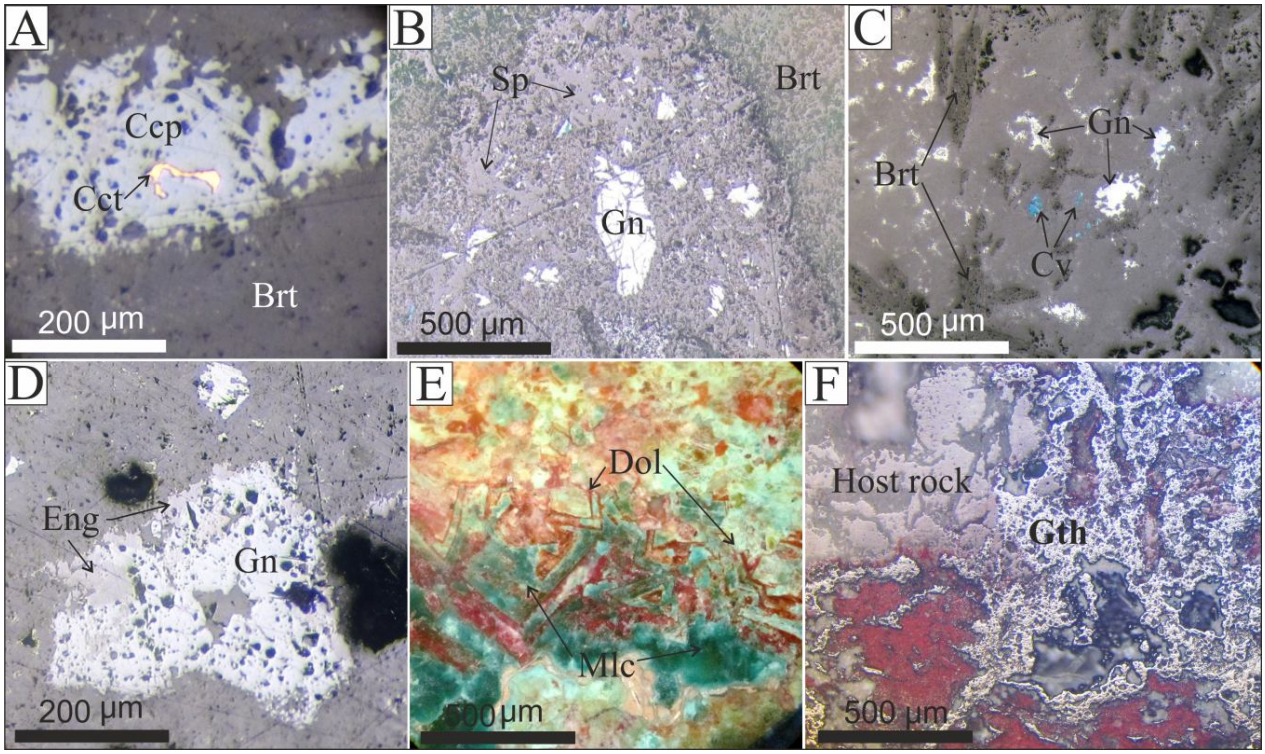
نحوه تشکیل کانی کوولیت

$$PbS+CuSO_4 \longrightarrow CuS+PbSO_4$$

گوتیت اکسید آهن اصلی ناشی از جانشینی برون‌زاد پیریت و کالکوپیریت به‌صورت رگه‌چه‌ای و پراکنده و بافت تیغه‌ای، شبکه‌ای و کلوفرم قابل مشاهده است (شکل 5- F). باریت و کلسیت به‌عنوان کانیهای باطله اصلی در مقیاس ماکروسکپی به‌صورت توده‌ای، انتشاری و در مقیاس میکروسکپی با بافتهای تیغه‌ای و خوشه انگوری مشاهده می‌شود (شکل 6- A). در توالی پاراژنتیک بعد از ته‌نشست کانی‌سازی فلزی اولیه بوده و در بافتهای قشری مرکز فضاهای خالی را پر نموده است. در زیر میکروسکوپ در برخی از نمونه‌ها ته‌نشست باریت و کلسیت با اندکی فاصله زمانی با هم رخ داده است؛ به‌طوری‌که تیغه‌ها و بلورهای باریت تشکیل شده توسط بلورهای اسپاری کلسیت سیمان شده است (شکل 6- B). به نظر می‌رسد

1- Galena armoring
2- Fahlore group

فوگاسیته گازهای CO_2 و SO_4 در محیط اکسیدان باعث ته‌نشست همزمان این دو کانی شده است. کانی باریت در مقیاس میکروسکپی رشد شبه موازی و شعاعی[1]، طرح پر مانند[2]، بافت دم چلچله‌ای و دم جارویی نشان می‌دهد؛ همچنین ماکل‌های ساعت شنی و پلی سنتتیک نیز در این کانیها معمول است.



شکل 5. تصاویر برخی از کانیهای موجود در ماده معدنی کانسار باقرق. A: باقی‌مانده‌هایی از کالکوپیریت درون کالکوسیت برون‌زاد ، B: همراهی گالن و اسفالریت، C: گالن به‌صورت انتشاری در زمینه باریت در حال جانشینی توسط کوولیت، D: کانی انارژیت به‌صورت هم‌رشدی با گالن، E: جانشینی زون‌های کم‌آهن دولومیت توسط مالاکیت در زون برون‌زاد، F: گوتیت با بافت شبکه‌ای حاصل از جانشینی سولفیدهای آهن‌دار (Brt: باریت، Ccp : کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت،Cv : کوولیت، Dol : دولومیت، Eng: انارژیت، Gn : گالن، Gth: گوتیت، Mlc: مالاکیت، Sp: اسفالریت (Whitney and Evans, 2010)).

Fig. 5. Some images of minerals in the Baqoroq ore deposit. A: Residues of chalcopyrite within supergene chalcocite, B: Accompany of galena and sphalerite, C: Disseminated galena in barite substituted by covellite, D: Intergrowth of enargite and galena, E: Replacing of low iron dolomite zones by malachite in supergene zone, F: Goethite with a network texture produced by iron bearing sulfide oxidation (Brt: Barite, Ccp: Chalcopyrite, Cct: Chalcocite, Cv: Covellite, Dol: Dolomite, Eng: Enargite, Gn: Galena, Gth: Gothite, Mlc: Malachite, Sp: Sphalerite (Whitney. and Evans, 2010)).

مراحل کانی‌سازی و توالی پاراژنتیک: حرکات تکتونیکی و تأثیر آن بر کربنات‌های کرتاسه بالایی باعث ایجاد درز و شکستگیهایی شده که فضای لازم را جهت تجمع و ته‌نشست سیالات کانه‌دار فراهم آورده است. به‌طورکلی در تمامی بافتها، نسل اول ته‌نشست سولفیدی و نسل بعدی ته‌نشست اکسیدی (سولفاتی- کربناتی شامل کانیهای باطله) بوده که نشان‌دهنده دو فاز فیزیکوشیمیایی شامل فاز ابتدایی احیایی و فاز ثانویه اکسیدان است. توالی پاراژنتیک کانسار باقرق در شکل 7 نشان داده شده است.

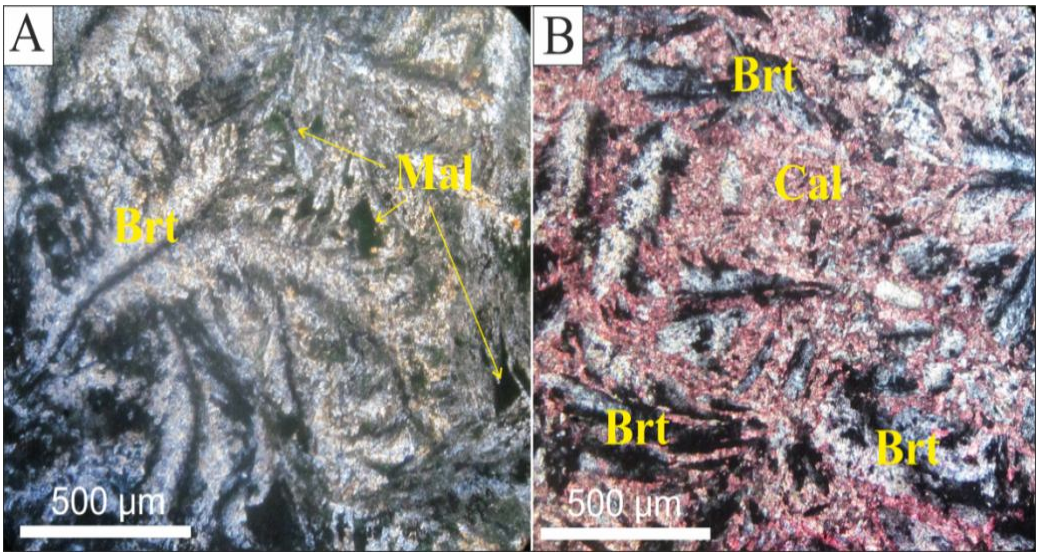
دگرسانی

هجوم سیالات کانه‌دار به درون شکستگیهای سنگ میزبان کربناته کانسار باقرق باعث ایجاد دگرسانیهایی شده که در حاشیه رگه‌های و زون‌های معدنی و تا فاصله چند سانتی‌متر تا چند متر و با شدت متفاوت قابل مشاهده است. دگرسانیها

1- Sub-parallel and radial growths
2- Plumose pattern

اغلب از نوع کربناتی بوده و شامل دولومیتی‌شدن، کلسیتی‌شدن، ایجاد رگه‌چه‌های کلسیتی، انحلال کربنات‌ها و به مقدار کمتر هماتیتی‌شدن است.

دولومیتی شدن: علاوه بر شکستگیهای ساختاری فرآیندهای شیمیایی نیز در ایجاد فضای مناسب کانی‌سازی در ته‌نشست کانسار نقش داشته که از جمله این فرآیندها دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن و تبلور مجدد می‌باشد (Park and MacDiarmid,1970). به‌عبارت دیگر دولومیتی‌شدن گرمابی با افزایش نفوذپذیری همانند شکستگیها در ایجاد محیطی کم فشار مؤثر بوده که می‌تواند به‌عنوان محلی جهت تجمع سیالات کانه‌دار و ته‌نشست ماده معدنی عمل کند. در محدوده کانسار باقرق این دگرسانی در فاصله نزدیک به کانی‌سازی نسبتاً شدید بوده که با فاصله گرفتن از ماده‌معدنی به تدریج از شدت آن کاسته می‌شود (شکل 8-A).



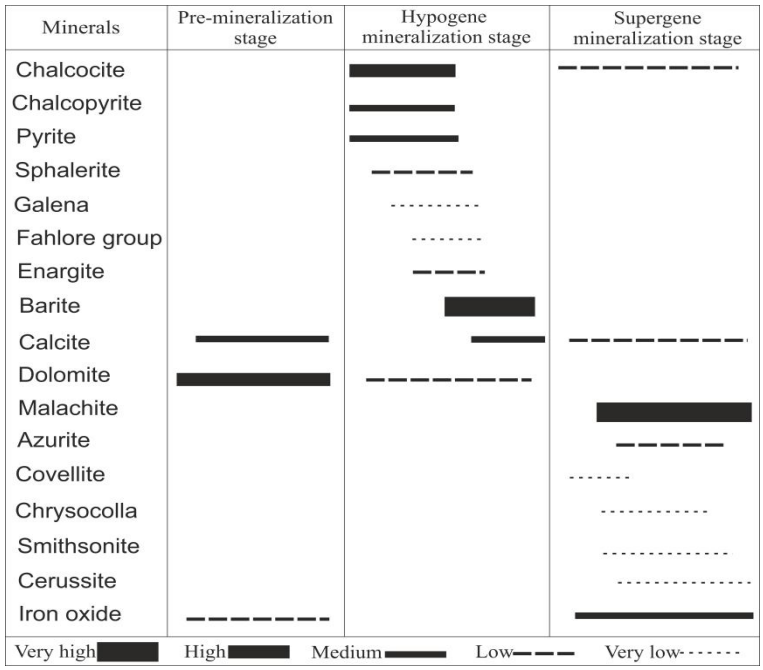
شکل 6. کانیهای باطله در **کانسار** باقرق. A: کانیهای باریت با بافت پرمانند و پرشدگی حفرات توسط مالاکیت، B: بلورهای پراکنده باریت درون کلسیت رنگ شده توسط محلول آلیزارین قرمز و فروسیانید پتاسیم به روش دیکسون (Dickson, 1966 .) (Brt: باریت؛ Mlc: مالاکیت؛ Cal: کلسیت (Whitney. and Evans, 2010))

Fig. 6. Gangue minerals in Baqoroq deposit. A: Feather-like barite and space filling with malachite, B: Dessiminated barite crystals within staining calcite by red Alizarin and ferricyanide potassium according to Dickson method (Dickson, 1996). (Brt: Barite, Mlc: Malachite, Cal: Calcite (Whitney and Evans, 2010))

ابعاد بلورهای دولومیت از چند ده میکرون تا 500 میکرون متغیر است. دولومیت‌ها به‌صورت بی‌شکل تا خودشکل و اغلب دارای منطقه‌بندی هستند که بخشهای تیره آن در مرکز و یا حاشیه آن دیده می‌شود. دولومیت‌های زین اسبی[1] از جمله مهمترین انواع دولومیت مشاهده شده در منطقه بوده که به‌صورت درشت‌بلور و با خاموشی موجی و حواشی منحنی شکل همراه با ماده‌معدنی حضور دارد (شکل 8- B). دولومیت‌ها به‌صورت پرکننده فضای خالی و یا جانشین کننده کربنات‌های اولیه حضور دارند که به نظر می‌رسد در ته‌نشست ماده معدنی نقش مهمی ایفا کرده‌اند (شکل 6- D). کانی دولومیت یکی از اساسی‌ترین کانیهای تشکیل‌دهنده سنگهای کرتاسه بالایی کوه نخلک بوده که به شکلهای مختلفی همچون جانشینی کربنات‌های اولیه، پرکننده فضای خالی، سیمان سنگ میزبان و حتی همراه با ماده‌معدنی در ته‌نشست عناصر کانه‌ساز مؤثر بوده است.

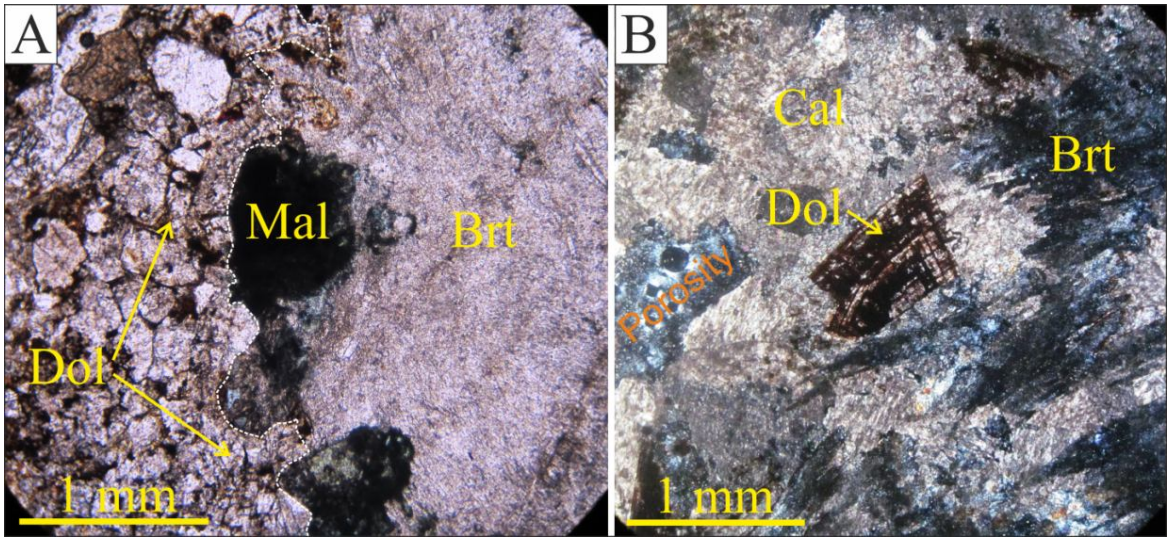
کلسیتی‌شدن: اغلب به‌صورت رخداد رگه‌چه‌های کلسیتی و یا جانشینی و تبلور مجدد سنگ آهک با بلورهای اسپاری کلسیت مشاهده می‌شود. انحلال بخشهایی از سنگ میزبان در مقیاس میکروسکپی در اثر فعل و انفعالات بین سیال کانه‌دار و سنگ میزبان نیز مشاهده شده که احتمالاً انحلال ناشی از واکنش سنگ میزبان کربناته با اسید حاصل از فرآیند اختلاط سیال کانه‌دار می‌باشد (Corbella et al.,2004).

1- Saddle dolomite



شکل 7. توالی پاراژنتیک کانسار باقرق.

Fig. 7. Paragenetic sequence of Baqoroq deposit.



شکل 8. تصاویر میکروسکپی از دگرسانی دولومیتی در کانسار باقرق شامل: A: دولومیتی شدن در حاشیه رگه معدنی حاوی مس، B: قسمتی از دولومیت زین اسبی همراه با باریت و کلسیت (Brt: باریت، Cal: کلسیت، Dol: دولومیت (Whitney. and Evans, 2010)).

Fig. 8. Microscopic images of dolomite alteration in Baqoroq deposit contains: A: Dolomitization in rim of copper vein, B: Saddle dolomite associated with barite and calcite (Brt: Barite, Cal: Calcite, Dol: Dolomite (Whitney. and Evans, 2010))

ژئوشیمی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی انجام شده در رگه‌های معدنی کانه‌ساز منطقه علاوه بر مس گویای حضور عناصر ارزشمند دیگری نظیر روی، نقره و آنتیموان نیز می‌باشد. نتایج تجزیه شیمیایی برخی از عناصر معرف کانه‌ساز که با استفاده از روش دستگاهی (ICP-OES و AAS) مورد تجزیه قرار گرفته‌اند در

جدول 1 آورده شده است؛ همچنین همبستگی میان عناصر نیز به روش پیرسون محاسبه شده و نتایج آن در جدول 2 ذکر شده است.

مس: به‌عنوان عنصر اصلی کانه‌ساز در منطقه، محتوای آن در برخی از نمونه‌ها بالا بوده (متوسط 20/28 درصد وزنی) که شواهد کانی‌شناسی نیز آن را تأیید می‌کند. مس با اغلب عناصر همبستگی مثبت نشان می‌دهد که از جمله مهمترین آنها نقره است. همبستگی نقره با مس می‌تواند ناشی از جانشینی نقره در ساختار کالکوپیریت نیز باشد (Amcoff,1984). همچنین همبستگی مثبت متوسط بین مس و آنتیموان می‌تواند به حضور این دو عنصر در میزبان کانی تتراهدریت ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$) نسبت داده شود.

روی: دومین عنصر بعد از مس با میانگین حدود 1 درصد وزنی بوده که به‌صورت کانی اسفالریت در ماده‌معدنی درون‌زاد حضور دارد. عنصر روی همبستگی بالایی با کادمیوم و عدم همبستگی با آهن نشان داده و از آن‌جایی که این دو عنصر معمولاً در اسفالریت جانشین می‌شوند می‌توان نتیجه گرفت که اسفالریت‌های کانسار باقرق از نوع کادمیوم‌دار هستند. اسفالریت‌های کادمیوم‌دار به نسبت اسفالریت‌های آهن‌دار در دمای پایین‌تری تشکیل می‌شوند (Qian, 1987).

جدول 1. ترکیب عنصری در نمونه‌های کانسار باقرق و مقدار میانگین آنها (تمامی مقادیر بر اساس ppm به جز عنصر Cu)

Table 1. Elemental composition of Baqoroq samples and mean value (All values are in ppm except for Cu)

Sample No	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9	B 10	Mean
Ag	155.8	17.1	1.2	303.8	16	212.2	93.8	114.5	30.2	33.2	97.78
As	>10000	>10000	>10000	5731	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000
Sb	6473.1	5553.9	783.2	137.7	3081.6	5574.1	6528.2	4758.4	9932.4	8900.3	5172.29
Au	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Zn	13181	6111	3768	3005	5596	17919	13311	16386	8854	11949	10008
Cd	582.9	285.7	234.9	42.4	150	340.4	317	314	181.1	289.5	273.79
Pb	478	813	880	43	188	342	546	744	417	668	511.9
Cu (%)	33.8	26.9	7.0	20.5	7.6	15.0	25.3	20.0	24.3	22.4	20.28
Bi	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Mo	9.1	7	7.8	1.14	1.89	5	6.1	8.5	4.4	5.6	5.653
Co	127	63	12	42	68	169	66	82	34	57	72
Cr	13	19	6	14	3	13	10	18	10	9	11.5
Ni	35	25	6	19	19	24	22	30	23	21	22.4
V	846	1051	90	51	24	36	178	17	85	185	256.3
Ca	71576	36877	37409	>10%	>10%	>10%	49625	42154	26791	44438	-
Mg	863	1290	587	1449	900	1276	3010	1743	4247	3652	1901.7
Fe	6687	11809	2967	1012	6246	2735	4043	4180	3055	4999	4773.3
Mn	28	22	18	703	633	314	57	74	28	53	193

به‌طور کلی روی با اغلب عناصر کالکوفیل (نظیر Ag, Cd, Co, Ni, Sb) روابط همبستگی مثبت ضعیف تا بالا نشان می‌دهد که احتمالاً باید بخشی از غلظت این عناصر توسط اسفالریت باشد. در اسفالریت‌های ایالت کانساری جنوب شرق میسوری عناصر فرعی بالایی حضور دارد (Heyl, 1983) که با توجه به دمای تشکیل پایین این کانسارها، منشأ این عناصر به سنگهای مولد سیال و در مسیر حرکت سیال که غنی از فلزات بوده نسبت داده شده‌اند (Viets et al., 1992).

جدول 2. مقادیر ضریب همبستگی مربوط به هر جفت عنصر درکانسار باقرق. (+ + + همبستگی مثبت بالا، + + همبستگی مثبت متوسط، + همبستگی مثبت ضعیف، - همبستگی منفی ضعیف، - - همبستگی منفی متوسط، - - - همبستگی منفی بالا و n.c: عدم همبستگی).

Table 2. Correlation coefficient values for each pair of element in Baqoroq deposit. (+ + + High positive correlation, + + Medium positive correlation, + Low positive correlation, - - - High negative correlation, - - Medium negative correlation, - Low negative correlation, n.c: Not correlation).

	Ag	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	V	Zn
Ag	1	n.c	+ +	+	+	- -	-	+ +	- -	+	- -	- -	n.c	+
Cd	-.027	1	+ +	+	+ +	+	n.c	- -	+ + +	+ +	+ +	+ +	+ +	+ +
Co	.453	.623	1	+	+	n.c	-	n.c	n.c	+ +	-	+	n.c	+ + +
Cr	.395	.257	.302	1	+ +	+	n.c	-	+	+ +	+	n.c	+ +	+
Cu	.208	.538	.229	.591	1	+	+	- -	+	+ + +	n.c	+ +	+ +	+
Fe	-.487	.366	.097	.297	.343	1	n.c	-	+	+	+ +	+	+ + +	n.c
Mg	-.214	-.146	-.266	-.054	.353	-.197	1	-	n.c	n.c	n.c	+ + +	-	+
Mn	.512	-.611	.052	-.238	-.435	-.321	-.330	1	- - -	n.c	- - -	- -	- -	-
Mo	-.284	.799	.193	.363	.366	.351	-.132	-.852	1	+	+ + +	+	+ +	+ +
Ni	.298	.624	.639	.600	.754	.346	.093	-.189	.329	1	n.c	+ +	+ +	+ +
Pb	-.615	.395	-.217	.223	.078	.416	.020	-.845	.817	-.096	1	n.c	+	n.c
Sb	-.326	.417	.216	.096	.568	.236	.762	-.583	.255	.501	.194	1	+	+ +
V	-.148	.547	.174	.473	.650	.834	-.232	-.405	.472	.454	.343	.203	1	n.c
Zn	.203	.649	.752	.317	.317	-.071	.219	-.364	.446	.628	.138	.541	-.067	1

آرسنیک: میزان آرسنیک ماده معدنی نسبتاً بالا بوده (بالای 1 درصد وزنی) که کانیهایی همچون تنانتیت و احتمالاً انارژیت و به مقدار کمتر جانشینی با سرب می‌تواند از عوامل احتمالی حضور آرسنیک در ماده معدنی باقرق در نظر گرفته شود. از دیدگاه دمای رخداد کانی‌سازی سولفیدهای حاوی Bi در محدوده کانسارهای دمای بالای گرمابی، سولفیدهای حاوی Sb در محدوده دمای متوسط و کانسارهای حاوی As در محدوده کانسارهای دما پایین متبلور می‌شوند (Karup-Moller, 1977; Malakhov,1968).

نقره: در ماده‌معدنی باقرق نقره به‌صورت محلول جامد درون گالن و اسفالریت و یا حضور در کانیهای سولفوسالت تتراهدریت-تنانتیت می‌تواند حضور داشته باشد. جانشینی نقره در ساختمان گالن به جای سرب با توجه به شعاع یونی مشابه سرب و نقره (Pb^{2+} =1.20 A , Ag^{+} =1.26 A) امکان‌پذیر است؛ اما مقدار این جانشینی متفاوت بوده و به حضور عناصر واسطه‌ای همچون آنتیموان و بیسموت بستگی دارد. این جانشینی به شکل واکنش زیر قابل انجام است: $Ag^{+} + (Sb, Bi)^{3+} = 2Pb^{2+}$. بالا بودن محتوای آنتیموان و آرسنیک، احتمال حضور نقره در تتراهدریت- تنانتیت را

محتمل می‌کند. بالا بودن آنتیموان، آرسنیک و نقره، حضور تتراهدریت- تنانتیت و کم بودن آنتیموان و بالا بودن نقره می‌تواند حضور آکانتیت را در ماده معدنی نشان دهد (Lueth et al., 2000).

آنتیموان: مقدار آنتیموان در کانسار باقرق نسبتاً بالا بوده (متوسط=5172 ppm) که حضور کانیهای سولفوآنتیمونید همچون تتراهدریت را می‌توان از شکلهای مهم حضور آنتیموان در ماده معدنی در نظر گرفت. به میزان بسیار کمتر جانشینی آنتیموان در شبکه بلوری دیگر کانیها مانند گالن نیز می‌تواند از اشکال فرعی حضور آنتیموان در کانسار باقرق در نظر گرفته شود. آنتیموان به مقدار بالا معمولا در کانسارهای با دمای تشکیل پایین تمرکز می‌یابد (Marshall and Joensuu, 1961). همبستگی مثبت متوسط آنتیموان با روی نشان از حضور بخشی از این عنصر در کانی اسفالریت است.

وانادیم: این عنصر با فراوانی متوسط 256 ppm با آهن همبستگی مثبت بالایی دارد که احتمالاً به‌صورت جانشینی به جای آهن در سولفیدهای آهن‌دار مانند کالکوپیریت حضور دارد؛ همچنین وانادیوم به سبب وجود خصوصیات لیتوفیلی و کالکوفیلی در جدول همبستگی با این دو گروه از عناصر (نظیر Cd, Cr,Cu,Fe, Mo,Ni) همبستگی مثبت نشان می‌دهد. شواهدی از حضور وانادیوم در کانسارهای مس با سنگ میزبان کربناته در کمربند اتاوی افریقا گزارش شده است (Pirajno, 2009).

سرب: کانیهای فرعی و پراکنده گالن درون ماده معدنی منشأ اصلی سرب در ماده معدنی بوده که همبستگی بالایی با مولیبدن نشان می‌دهد. حضور مولیبدن درون ساختار گالن مورد تردید بوده و احتمالا این عنصر به‌صورت ادخال‌های ریز مولیبدنیت درون کانی گالن حضور دارد (Goldschmidt, 1954).

آهن: از عوامل حضور آهن در کانسار باقرق وجود کانیهای سولفیدی پیریت و کالکوپیریت و اکسیدی هماتیت و گوتیت است. آهن در با عناصر سیدرفیل (نظیر Cr و V) همبستگی مثبت نشان می‌دهد (جدول 2) که از جانشینی این‌گونه عناصر به جای آهن حکایت دارد.

سیالات درگیر

بر اساس ساخت و بافتهای ماده معدنی و نیز توالی پاراژنتیک تعداد 7 نمونه کانی باریت برای تهیه مقطع دوبر صیقل انتخاب شد که پس از انجام مطالعات پتروگرافی تعداد 4 مقطع مناسب از نظر اندازه و فراوانی سیالات درگیر انتخاب شد که تعداد 3 نمونه مرتبط با کانی‌سازی سولفیدی اصلی (باریت+کالکوسیت+کالکوپیریت+گالن) و 1 نمونه مربوط به رگه‌های کلسیتی تأخیری فاقد کانی‌سازی می‌باشد (جدول 3). در مطالعات پتروگرافی بر اساس تقسیم‌بندی‌ها در دمای اتاق انواع سیالات درگیر شامل اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب شناسایی شد (Roedder, 1984; Shepherd et al., 1985). سیالات درگیر اولیه از لحاظ ظاهری اغلب دارای اشکال نامنظم، بیضوی، کروی و میله‌ای با اندازه 2 تا 7 میکرون بوده که بیش از 90 درصد آنها اندازه زیر 5 میکرون دارند و به دلیل نامناسب بودن از مطالعه میکروترمومتری آنها اجتناب شد. سیالات درگیر ثانویه و ثانویه کاذب در نمونه‌ها کمیاب بوده و دارای اندازه بسیار ریز (1 تا 2 میکرون) در یک راستا قابل مشاهده هستند. مطالعات میکروترمومتری تنها بر روی سیالات درگیر اولیه و با اندازه بزرگتر از 5 میکرون صورت گرفت. با توجه به تفاوت در نوع کانی‌سازی سیالات‌درگیر در دو زیر گروه کانی‌سازی سولفیدی و کانی‌سازی تأخیری کلسیت به اختصار شرح داده خواهد شد:

کانی‌سازی سولفیدی: سیالات درگیر اولیه (فراوانی بیش از 90%) از نوع دو فازی (LV) غنی از مایع با درجه پرشدگی بیش از 70 درصد و به مقدار فرعی سیالات درگیر تک فازی مایع (L) مشاهده شد. سهم سیالات درگیر ثانویه و ثانویه کاذب در نمونه‌های این فاز کانی‌سازی اغلب کمتر از 10% است (شکل 9- A). در سیالات مورد بررسی فاز نوزاد جامد[1] مشاهده نشد که می‌تواند به دلیل شوری پایین سیال کانه‌ساز باشد. به‌طورکلی در فاز اصلی کانی‌سازی دامنه دمای همگن‌شدن بین 259 تا 354 درجه سانتی‌گراد (متوسط 306 درجه سانتی‌گراد) بوده (شکل10-A) و در تمامی نمونه‌ها همگن‌شدن به فاز مایع صورت گرفته است. همگن شدن به فاز مایع نشان می‌دهد سیالی که ادخال‌ها از آن به دام افتاده‌اند احتمالاً به‌صورت مایع بوده است (Kinsland, 1977). مقادیر T_{fm} و به عبارت دیگر نقطه یوتکتیک سیالات‌درگیر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های دو فازی اولیه از 20/8- درجه سانتی‌گراد (دمای یوتکتیک در سیستم H_2O-NaCl) پایین‌تر بوده و در نتیجه سیستم این سیالات درگیر یک سیستم خالص H_2O-NaCl نبوده و احتمالاً کاتیون‌های دیگری هم

1- Daughter phase

در این سیستم حضور دارند. دمای ذوب اولیه یخ (T_{fm}) در فاز کانی‌سازی سولفیدی بین 54/2- تا 58/1- درجه سانتی‌گراد بوده که نشان می‌دهد سیال مسؤول کانی‌سازی در کانسار باقرق احتمالاً دارای ترکیب H_2O-NaCl-$CaCl_2$ بوده است، چرا که دمای یوتکتیک در این سیستم برابر با 55- درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Shepherd et al., 1985). در مواردی که T_{fm} اندازه‌گیری شده از دمای یوتکتیک سیستم H_2O-NaCl-$CaCl_2$ (55- درجه سانتی‌گراد) پایین‌تر بوده است، احتمالاً به‌سبب حضور نمکهای دیگری از قبیل نمکهای Mg و K در سیستم است (Valenza et al. 2000). دگرسانی دولومیتی سنگ میزبان کانسار باقرق می‌تواند شاهدی برای حضور Mg در سیال کانه‌دار تلقی شود. دمای نهایی ذوب (T_m) بین 5/4- تا 9/3- درجه سانتی‌گراد (متوسط 7/33- درجه سانتی‌گراد) متغیر است. بر اساس سیستم H_2O-NaCl (Bodnar, 1993) مقدار شوری بین 8/37 تا 13/18 (متوسط 10/8 درصد وزنی معادل NaCl) بوده (شکل 10- B) و چگالی میانگین آن 0/856 (گرم بر سانتی‌متر مکعب) به‌دست آمد.

جدول 3. اطلاعات ریزدماسنجی سیالات درگیر اولیه کانسار باقرق.

Table 3. Microthermometric data of primary fluid inclusions in Baqoroq deposit.

Sample No.	Mineralization stage	Host mineral	Fluid inclusion type	Number of heating	Number of freezing	T_h range (ºC)	T_m ice (ºC)	Salinity range (wt.% NaCl)	Density (g/cm^3)
B 61	Main sulfide mineralization	Barite	LV	14	-	305-354	-	-	-
B 61A	Main sulfide mineralization	Barite	LV	14	14	259-330	-5.4 to -7.4	8.37 -10.97	0.803-0.836
B 139	Main sulfide mineralization	Barite	LV	12	14	215-316	-7.4 to -9.3	10.97-13.18	0.856-0.911
B 135	Late stage non sulfide mineralization	Calcite	LV	18	9	78-112	-2.1 to -3.8	3.59-6.07	0.987-1.004

کانی‌سازی تأخیری کلسیت: سهم سیالات درگیر ثانویه و ثانویه کاذب (حدود 30 تا 40 درصد) و نیز سیالات تک فازی مایع (20 تا 30 درصد) در نمونه‌های این بخش نسبت به کانی‌سازی سولفیدی بیشتر است (شکل 9- B). همگن شدن در این مرحله به فاز مایع بوده و با دمای نسبتاً پایین بین 78 تا 112 (متوسط 95 درجه سانتی‌گراد) می‌باشد (شکل 10 - A). دمای یوتکتیک در این فاز نیز از سیستم خالص H_2O-NaCl پایین‌تر بوده و بین 54/2- تا 58/3- درجه سانتی‌گراد بوده و احتمالاً سیستم دارای ترکیب H_2O-NaCl-$CaCl_2$ می‌باشد.

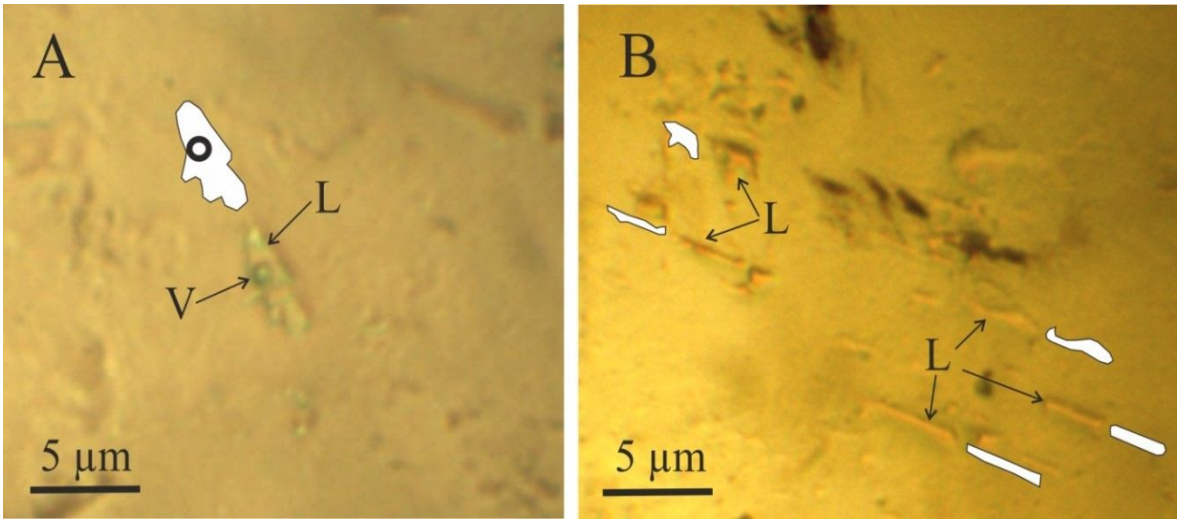
دمای نهایی ذوب (T_m) بین 2/1- تا 3/8- درجه سانتی‌گراد (متوسط 2/9- درجه سانتی‌گراد) متغیر است. درجه شوری در فاز تأخیری بین 3/59 تا 6/07 (متوسط 4/72 درصد وزنی معادل NaCl) (شکل 10- B) و چگالی میانگین آن 0/995 گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

مطالعات ایزوتوپی

با استفاده از ایزوتوپ‌های گوگرد می‌توان منشأ گوگرد مورد نیاز برای تشکیل کانسار را تعیین نمود؛ همچنین تعیین دمای سیال کانه‌دار، تعیین نسبت مؤثر آب به سنگ در طی کانی‌سازی، تعیین درجه تعادل موجود در سیستم و نهایتاً تعیین سازوکار تشکیل و ته‌نشست ماده‌معدنی از دیگر کاربردهای ایزوتوپ‌های گوگرد است (Hoefs, 2004). به طورکلی تغییرات مشاهده شده در مقادیر $\delta^{34}S$ در کانیها می‌تواند بر اساس تغییرات دمایی، شرایط احیایی، تغییرات pH و نیز مقدار ایزوتوپ خاستگاه اولیه حاصل شود (Ohmoto, 1972).

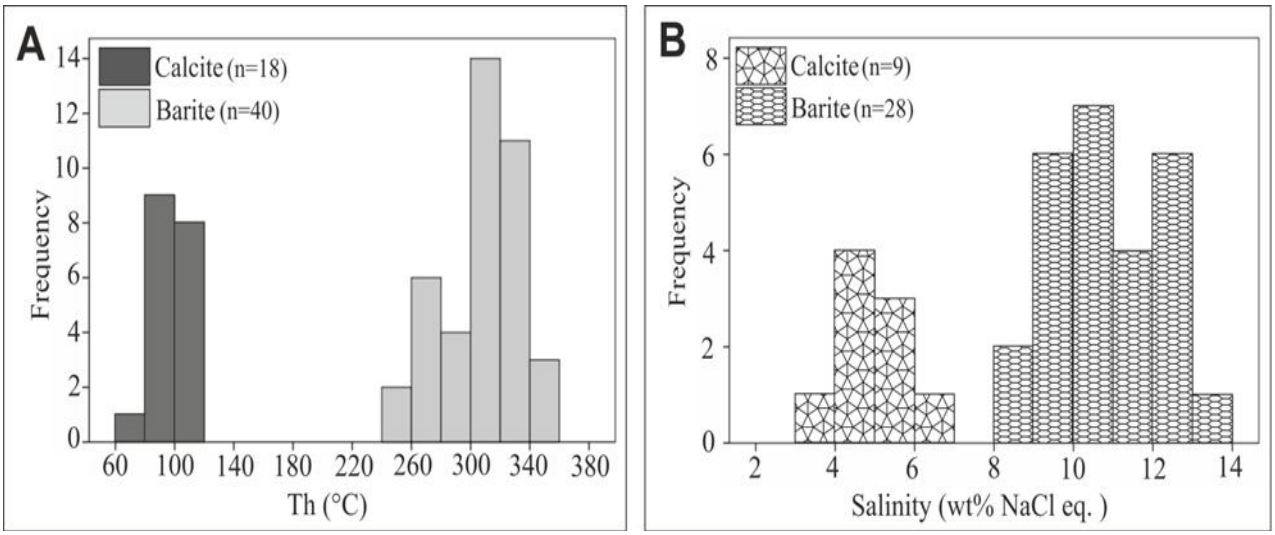
در کانسار باقرق به سبب بالا بودن جانشینی برون‌زاد، کانیهای سولفیدی ریز و غیر قابل جدایش بوده و لذا کانی باریت برای آزمایشهایی ایزوتوپ گوگرد انتخاب گردید (جدول 4). ترکیب ایزوتوپی گوگرد یا به عبارتی مقادیر $\delta^{34}S$ کانیهای باریت کانسار باقرق بین 13/1+ تا 14/37+ در هزار (متوسط 13/75+

در هزار) (تعداد 5 نمونه) بوده که تفاوت قابل توجهی بین نمونه‌ها وجود ندارد. در شرایط فیزیکی و شیمیایی در نظر گرفته شده برای مرحله اصلی سیال (T<300ºC, low pH and Eh) سهم اصلی گوگرد به‌صورت H_2S می‌باشد (Ohmoto and Rye, 1979). در این دماها، مقادیر $\delta^{34}S$ درون سولفیدها مشابه با مقدار $\delta^{34}S_{H2S}$ سیال خواهد بود (Ohmoto and Rye, 1979). مقادیر $\delta^{34}S_{CDT}$ برای H_2S در تعادل با باریت محاسبه شده که در دامنه 7/23- تا 8/57- در هزار و با میانگین 7/66- در هزار قرار می‌گیرد. در این محاسبه مقادیر $\delta^{34}S$ کانی باریت و میانگین دمای حاصل از مطالعات سیال درگیر برای هر نمونه باریت استفاده و از معادله اوهموتو و ری (Ohmoto and Rye, 1979) کمک گرفته شده است. مقادیر ایزوتوپ گوگرد در کانی باریت کانسار باقرق از دو جنبه قابل توجه است: 1) گستره محدود در مقدار $\delta^{34}S$ و 2) مقدار مثبت نسبتاً بالا.



شکل 9. A: سیال درگیر دو فازی مایع و گاز (LV) در میزبان باریت، B: سیالات میله‌ای شکل تک‌فازی مایع (L) درمیزبان کلسیت.

Fig. 9. A: Two-phase (L+V) fluid inclusion in barite, B: Rod-shaped single phases (L) in calcite.



شکل 10. A: هیستوگرام دمای همگن شدن سیالات درگیر کانسار باقرق؛ B: هیستوگرام مقدار شوری سیالات درگیر کانسار باقرق.

Fig. 10. A: Homogenization temperature histogram of Baqoroq fluid inclusions, B: Salinity value histogram of Baqoroq fluid inclusions.

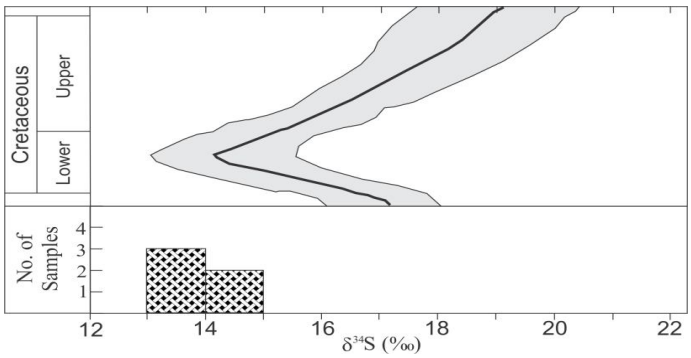
جدول 4. مقادیر ایزوتوپ گوگرد برای کانی باریت کانسار باقرق.

Table 4. Sulfur isotope values for barite in Baqoroq deposit.

Sample No	Mineral	Sulfur Content (‰)	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ (‰)	Th (ºC) (fluid calculeted)	1000 ln α (Ohmoto and Rye, 1979)	$\delta^{34}S_{H2S}$ (‰)
B11	Barite	11.09	+13.23	304	21.8	-8.57
B12	Barite	11.03	+13.10	329.7	20.5	-7.4
B13	Barite	11.71	+14.21	306.9	21.6	-7.39
B14	Barite	12.25	+13.87	306.9	21.6	-7.73
B15	Barite	9.37	+14.37	306.9	21.6	-7.23

گستره محدود مشاهده شده در مقدار $\delta^{34}S$ کانیهای گوگرددار پیشنهاد می‌دارد که هم ترکیب ایزوتوپی منبع و هم فرآیندهای تفکیکی بین اجزای گوگرد در سیال کانه‌دار در طول کانی‌سازی یکسان بوده است. گوگرد در محیط طبیعی نهایتاً دارای دو منبع اولیه اصلی است: 1) منبع ماگمایی و 2) منبع آب دریا (Ohmoto and Rye, 1979). مقدار $\delta^{34}S$ سولفیدی گرمابی با منشأ ماگمایی بین 3- تا 1+ متغیر است (Hoefs, 2004). معمول‌ترین و مشخص‌ترین منبع با گوگرد همسان سولفات‌های دریایی می‌باشد (Ghazban et al., 1994). با توجه به شواهد زمین‌شناسی عدم ارتباط کانی‌سازی با ماگماتیسم در کانسار باقرق محرز بوده و مقدار $\delta^{34}S$ باریت کانسار باقرق با سولفات‌های دریایی کرتاسه شباهت دارد (شکل 11).

با فرض اینکه سولفات‌های دریایی منبع گوگرد باشد، تغییرات در مقدار $\delta^{34}S$ می‌تواند مربوط به فرآیند احیا SO_4 به H_2S باشد که به‌وسیله فرآیندهای باکتریایی و یا شیمیایی (احیای سولفات ترموشیمیایی) صورت گرفته است (Machel, 2001). به چند دلیل فعالیت باکتریایی در فراهم کردن گوگرد احیایی در کانسار باقرق قابل قبول نیست: 1) فعالیت باکتریایی باعث تهی‌شدگی ^{34}S در سولفید و غنی‌شدن در سولفات می‌شود. سولفیدهای با منشأ گوگرد باکتریایی نسبت به منبع اولیه معمولاً تهی از ^{34}S بوده و مقدار $\delta^{34}S$ دارای محدوده وسیعی هستند (Seal, 2006). با توجه به در نظر گرفتن گوگرد موجود در سولفات‌های کرتاسه بالایی به عنوان منبع اصلی گوگرد، در صورت فعالیت باکتریایی مقادیر $\delta^{34}S$ نسبت به منبع اولیه در سولفیدها به سمت منفی و در سولفات‌ها به سمت مقادیر مثبت بزرگ گرایش پیدا کرده که در کانسار باقرق مقدار $\delta^{34}S$ باریت نسبت به سولفات‌های کرتاسه چندان تغییری نشان نمی‌دهد. ؛ 2) احیای باکتریایی سولفات در دمای زیر 110 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Southam and Saunderes, 2005)؛ بنابراین شرایط فعالیت باکتریایی با توجه به دمای کانی‌سازی باقرق (توسط سیالات درگیر و حضور دولومیت‌های زین اسبی) مناسب نبوده و بنابراین گوگرد باکتری‌زاد در تشکیل کانیهای کانسار نقشی نداشته است.



شکل 11. نمودار ستونی مقدار $\delta^{34}S$ در کانیهای باریت کانسار باقرق قابل مقایسه با مقادیر $\delta^{34}S$ سولفات‌های با سن کرتاسه. محدوده سایه‌دار دقت تخمینی نمودار است (با تغییرات از Claypool et al, 1980).

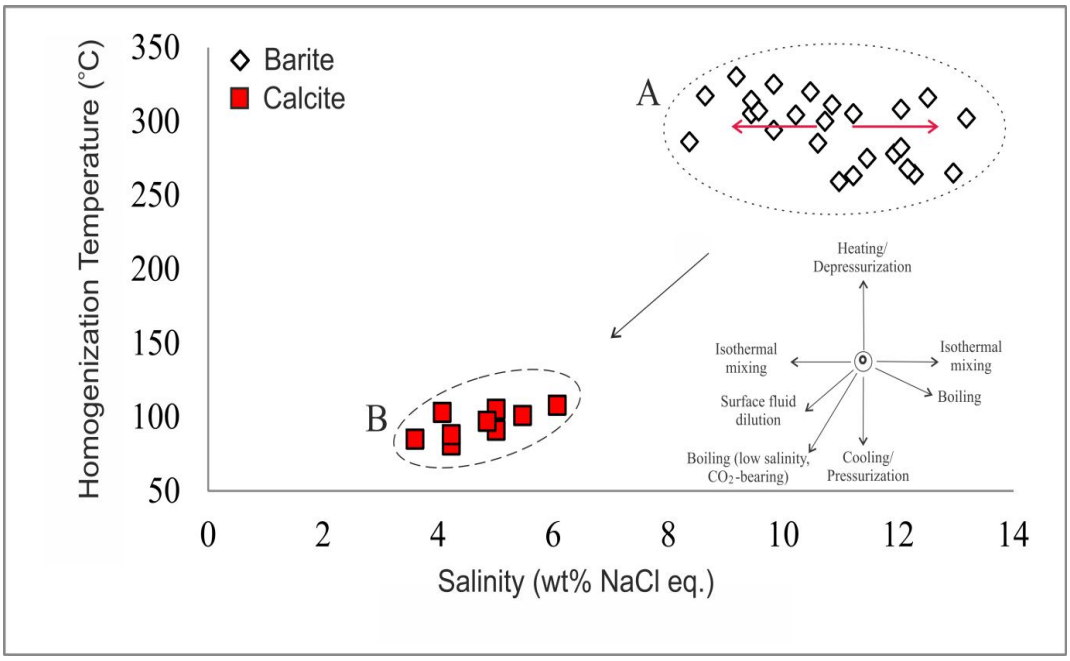
Fig. 11. Frequency Histogram of $\delta^{34}S$ values in Baqoroq barite minerals compared with $\delta^{34}S$ values of marine sulfate of Cretaceous age (inset). Shaded area is the estimated precision of the curve (modified from Claypool et al., 1980).

بحث و نتیجه‌گیری

تکامل سیال کانه‌دار: کانی‌سازی سولفیدی دارای محدوده دمای همگن شده بین 259 تا 354 (با میانگین 306) درجه سانتی‌گراد بوده و درجه شوری بین8/37 تا 13/18 و میانگین 10/8 درصد وزنی معادل NaCl است. فاز تأخیری غیر سولفیدی کلسیتی با محدوده دمای نسبتاً پایین‌تر بین 78 تا 112 و با میانگین 95 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. درجه شوری این فاز نیز پایین و بین 3/59 تا 6/07 و با میانگین 4/72 درصد وزنی معادل NaCl می‌باشد. اندازه‌گیری دمای ایوتکتیک نشان‌دهنده حضور کاتیونهای Na^{+}، Ca^{2+} و احتمالاً Mg^{2+} در فاز مایع سیالات درگیر است. حضور عناصر Ca و Mg در محلول با ایجاد آلتراسیون‌های دولومیتی و کلسیتی قابل تأیید است.

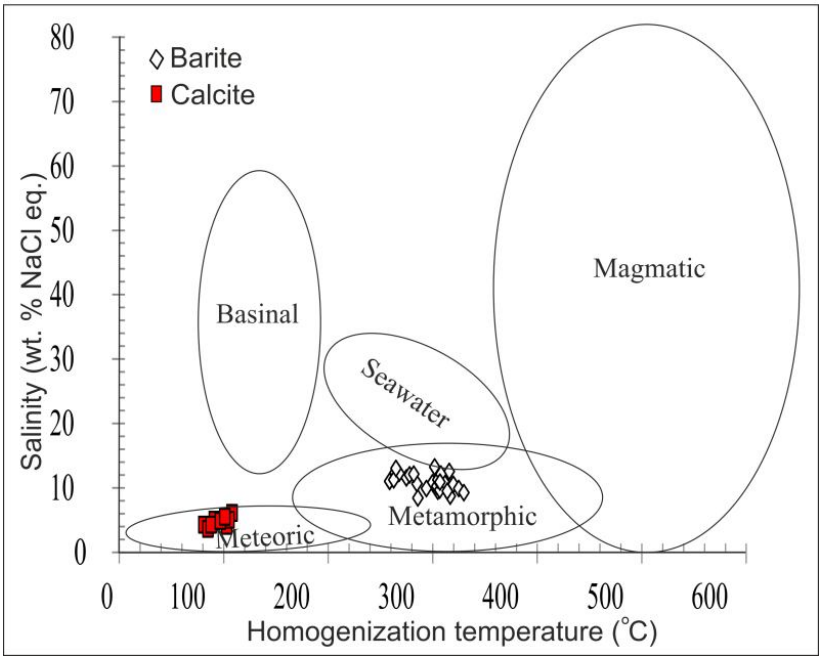
در نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن (Wilkinson, 2001) دو فاز سیال از یکدیگر تفکیک شده است (شکل 12). سیالات درگیر مربوط به کانی‌سازی در محدوده A روند اختلاط هم دما نشان می‌دهد که احتمالاً عامل ته‌نشست نیز همین اختلاط بوده است. در ادامه آبهای جوی با سیال کانه‌دار اختلاط کرده و سیالی با مشخصات محدوده B ایجاد نموده است. از نظر منشأ سیال، در نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری (Kesler, 2005) سیالات‌درگیر مربوط به کانی‌سازی سولفیدی در محدوده آبهای دگرگونی و سیالات فاز کلسیتی غیر سولفیدی عمدتا در محدوده آب جوی قرار می‌گیرد (شکل 13).

منشأ گوگرد: محدوده مقادیر $\delta^{34}S$ کانی باریت باقرق بین 13/1+ تا 14/37+ در هزار بوده در حالی‌که محاسبه مقدار $\delta^{34}S$ مربوط به سیال کانه‌دار پس از تصحیح دمایی بین 7/23- تا 8/57- در هزار است. مقادیر $\delta^{34}S$ درون سولفیدها تقریباً مشابه با مقدار $\delta^{34}S_{H2S}$ درون سیال بوده و در صورت اندازه‌گیری مقدار $\delta^{34}S$ در کانیهای سولفیدی کانسار باقرق احتمالاً مقادیر مشابه با $\delta^{34}S_{H2S}$ ارائه می‌نمود. با توجه به باریک بوده محدوده تغییرات مقدار $\delta^{34}S$ باریت باقرق، سولفات‌ها از منبع دریایی تأمین شده و باتوجه به تشابه آن با سولفات دریایی کرتاسه، احتمالاً از سولفات‌های با این سن منشأ گرفته است.



شکل 12. نمودار شوری در برابر دمای همگن شدن که نشان دهنده اختلاط هم دما برای سیال کانه‌دار و سپس رقیق سازی سیال کانه‌دار با آبهای جوی است (Wilkinson, 2001).

Fig. 12. Salinity vs. Homogenization temperature diagram has shown isothermal mixing for ore-bearing fluid and then surface fluid dilution with ore-bearing fluids (Wilkinson, 2001).



شکل 13. نمودار دمای همگن‌شدن در برابر شوری برای سیالات درگیر کانسار باقرق (با تغییرات از Kesler, 2005)

Fig. 13. Homogenization temperature vs. salinity diagram for Baqoroq fluid inclusions (modified after Kesler, 2005)

تغییرات در مقدار $\delta^{34}S$ می‌تواند مربوط به فرآیند احیا SO_4 به H_2S بوده که به‌وسیله فرآیندهای باکتریایی و یا شیمیایی (احیای سولفات ترموشیمیایی) صورت می‌گیرد. با توجه عدم تفکیک قابل توجه و نیز دمای نامناسب جهت فعالیت باکتریایی، فرآیند احیای ترموشیمیایی برای تأمین گوگرد احیایی کانسار باقرق مناسب می‌باشد. در فرآیند کاهیدگی ترموشیمیایی سولفات حل شده می‌تواند در برخورد با مواد هیدرکربنی (گاز، نفت، بیتومین) کاهیده و اشکال احیایی گوگرد همچون H_2S تولید کند. احیای سولفات در فرآیند ترموشیمیایی، سولفیدها با مقدار $\delta^{34}S$ حدود 15 در هزار سبک تر از سولفات واکنش دهنده ایجاد می‌شود (Orr, 1977). اگر سولفیدها در ادامه احیای سولفات ته‌نشین شوند، اختلاف بین $\delta^{34}S_{SO4}$ و مقدار $\delta_{34}S_{H2S}$ حدود 14 تا 24 در هزار می‌باشد (Krouse et al., 1988). مقدار $\delta^{34}S$ در کانیهای سولفیدی تقریباً در حدود مقدار $\delta^{34}S_{H2S}$ بوده و بنابراین سولفیدها حدود 21 در هزار نسبت به باریت به مقدار قابل توجهی سبک‌ترند که در اثر احیا گوگرد در فرآیند ترموشیمیایی احیا سولفات دریایی کرتاسه حاصل شده است. درون کوه نخلک وجود مواد آلی درون سازند باقرق به شکل گرافیت قابل توجه بوده، به‌طوری‌که در گذشته مورد استخراج نیز قرار گرفته‌اند (Charepovsky et al., 1982). این منبع مواد آلی می‌تواند جهت احیای بخشی ترموشیمیایی سیال سولفات‌دار در نظر گرفته شود که گوگرد احیایی لازم جهت ته‌نشست سولفیدها را تامین نموده است. ته‌نشست باریت می‌تواند به دو طریق صورت پذیرد: 1) اکسید شدن سیال دارای باریم و گوگرد احیایی؛ 2) اختلاط سیال باریم‌دار با سیال دیگر سولفات دار. در حالت اول اگر گوگرد در فرم احیایی بوده و سولفات در طی اکسیداسیون حاصل شود، مقدار $\delta^{34}S$ بدون تغییر باقی مانده و باریت تشکیل شده از نظر ایزوتوپی با سولفیدها تفاوت چندانی نداشته اما در حالت دوم باریت و سولفیدها دارای اختلاف می‌باشند (Ghazban et al,1994).

مقایسه با کانسارهای مشابه: مهمترین کانسارهای دیرزاد مس و با شهرت جهانی در افریقا قرار داشته و تحت عنوان کانسارهای مس با سنگ میزبان کربناته[1] و یا کانسارهای نوع کیپوشی یا سومب[2] معرفی شده‌اند. در تقسیم‌بندی بر اساس مقادیر فلزات سرب، روی و مس و نوع سنگ میزبان جایگاه این نوع کانسارها مشخص می‌باشد (جدول 5). برای درک بهتر کانی‌سازی در باقرق، این کانسار با کانسار نخلک و نیز مدل‌های جهانی مقایسه شده که در ادامه شرح داده خواهد

1- Carbonate Hosted Cu±Pb±Zn
2- Tsumeb or Kipushi type

شد. کانسار نخلک با مدل ژنتیکی نوع دره می‌سی‌سی‌پی (Jazi and Shahabpour, 2010) در نزدیکی کانسار باقرق (فاصله 4 کیلومتری جنوب شرق) قرار گرفته که ویژگیهای این دو کانسار با یکدیگر مقایسه شده است (جدول 6). شباهتهای زیادی بین دو کانسار نخلک و باقرق در سنگ میزبان، ساخت و بافت، دگرسانی و تغییرات ایزوتوپ گوگرد وجود دارد. تفاوتهای مشاهده شده بین دو کانسار عمدتاً مربوط به فراوانی متفاوت در نوع فلزات و دمای تشکیل دو کانسار است.

جدول 5. تقسیم بندی کانسارهای منتخب درون توالی سنگی حاوی کربنات و ذرات آواری سیلیسی (با تغییرات از فولی (Foley, 2002))

Table 5. Classification of selected deposits hosted by siliciclastic and carbonate-bearing rock sequences (modified after Foley, 2002)

Metal suite	Clastic sedimentary ≥ Carbonate	Carbonate > Clastic sedimentary
Pb-Zn-Cu-(Ag)	Irish type Silvermines, Ireland Navan, Ireland Lion Hill, USA	MVT Type Southeast Missouri, USA Upper Mississippi Valley, USA
Cu-Pb-Zn	Sediment-hosted Cu type Kupferschiefer, Germany White Pine, USA Kamoto, Zaire	Kipushi type Brushy mine, USA Ruby creek, USA Apex, USA Kipushi, Zaire Tsumeb and combat, Namibia
Zn-rich Pb-poor	Balmat-Edwards, USA	Appalachian type Austinville, USA Copper ridge, USA
Pb-rich	Laisvall type Laisvall, Sweden Largentierre, France	MVType Viburnum trend, USA Old lead belt, USA

جدول 6. مقایسه ویژگیهای کانسار باقرق و کانسار نخلک.

Table 6. Comparison of Baqoroq features and Nakhlak deposit.

Main features		Baqoroq	Nakhlak
Host rocks		Upper cretaceous carbonates	Upper cretaceous carbonates
Ore structure		Epigenetic vein, ore zone	Epigenetic vein, ore zone
Ore texture		Open space filling (Breccia, Crustification) >> replacement	Open space filling (Breccia, Crustification) >> replacement
Alteration		Dolomitization, Calcification	Dolomitization, Calcification
Ore Paragenesis		Chalcocite, Chalcopyrite>>Sphalerite, Pyrite, Fahlore, Enargite, Galena	Galena>> Sphalerite, Chalcopyrite, Pyrite, Fahlore
Gangue mineral		Barite> calcite>> dolomite	Barite >> dolomite>calcite
Ore chemistry		Cu >>Zn>As>Sb>Pb>Ag	Pb>>Ag>Cu>Sb>Zn>As
Fluid inclusion (sulfide Stage)	T_h range (ºC)	259 to 354	86-188
	Salinity range (wt.% NaCl eq.)	8.37 to 13.18	10.97 to 16.45
Barite $\delta^{34}S$		+13.1 to +14.37	+10.95 to +13.71
Igneous activity		Absence	Absence
Reference		This paper	Jazi and Shahabpour, 2010 Jazi et al., 2015

بیشترین شباهت کانسار باقرق به کانسارهای مس با سنگ میزبان کربناته بوده که در سطح جهان پراکنده هستند. این کانسارها در برخی ویژگیها مانند چینه‌کران بودن، ماهیت دیرزاد، رخداد درون کربنات‌های دریایی حاشیه قاره و عدم ارتباط با ماگماتیسم اشتراک دارند (Frimmel et al., 1996). کانسارهای نوع کیپوشی دارای فراوانی فلزات Zn>Cu>Pb و کانسارهای نوع سومب دارای ماهیت فلزی Cu>Pb>Zn می‌باشند. کانسار باقرق با دو کانسار مهم با سنگ میزبان کربناته مقایسه شده که این کانسار تشابهات بیشتری با کانسار سومب نشان می‌دهد (جدول 7).

کانسار سومب در کوههای اتاوی لند[1] در کشور نامیبیا قرار دارد. در این کوهها بیش از 600 کانی‌سازیCu-Pb-Zn-V شناخته شده که به دو تیپ کلی تقسیم شده اند: کانسارهای Zn-Pb (Berg-Aukas type) با خصوصیات کانی‌سازی تیپ می‌سی‌سی‌پی ناشی از آب‌زدایی رسوبات حوضه‌ای و کانسارهای Cu-Pb-Zn-Ag (Tsumeb type) که دمای بالاتر و شوری کمتری داشته و احتمالاً با منشأ دگرگونی تشکیل شده‌اند (Pirajno and Joubert, 1993). این دو تیپ در دو دوره زمانی با تقدم کانی سازی Pb-Zn و در ادامه کانی‌سازی Cu-Pb-Zn-Ag و در موقعیت تکتونیکی کوه‌زایی ایجاد شده‌اند.

جدول 7. مقایسه ویژگیهای کانسار باقرق با کانسارهای سومب و کیپوشی.

Table 7. Comparison of Baqoroq features with Tsumeb and Kipushi deposits.

Deposit	Baqoroq	Tsumeb	Kipushi
Host rocks	Calcareous sandstone, sandy limestone, sandy dolostone, calcareous conglomerate	Dolostone, limestone, conglomerate	Dolostone, sandstone, limestone
Carbonates type	Shallow marine platform carbonates	Shallow marine platform carbonates	Shallow marine platform carbonates
Ore bodies	Vein + fracture zone + berccia	Discordant pipe + breccia and sandstone	Discordant pipes in Nguba carbonates and breccia + stratiform in hangingwall
Sulfide minerals	Chalcocite, chalcopyrite, sphalerite, pyrite, fahlore, enargite, galena	Tennantite, galena, sphalerite, pyrite, bornite, chalcopyrite	Sphalerite, chalcopyrite, bornite, chalcocite, pyrite, arsenopyrite, tennantite, galena
Gangue mineral	Barite- calcite- dolomite		
Ore chemistry	Cu, Zn, As, Sb, Pb, Ag	Pb, Cu, Zn, As, Ag, Cd, Ge, Ga, W	Zn, Cu, Pb, Fe , Cd, Co, Ge, Ag, Re
Alteration	Dolomitization, calcification	Dolomitization, calcification, silicification	Dolomitization, silicification, chloritization, kaolinization
Homogenization temperature (ºC)	259 - 354	212-275	221-339
Salinity (wt % NaCl eq.)	8.37 - 13.18	22±3	30-43
$\delta^{34}S$ (‰)	+13.1 to +14.37 (Barite)	+13.1 to +26.6	-2.6 to +19.2 (Massive ore)
Source of sulfure	Evaporites	Evaporites	Evaporites
Igneous activity	Absence	Absence	Absence
Tectonic setting	Foreland basin	Foreland fold-thrust belt	Foreland fold-thrust belt
Reference	This paper	Chetty and Frimmel, 2000 Kampunzu et al., 2009	Chetty and Frimmel, 2000 Kampunzu et al., 2009

1- Otavi mountain land

براساس سن‌سنجی کانی‌سازی در سومب این کانسار منطبق بر فاز کوه‌زایی همراه با دگرگونی و دگرشکلی بوده است. واکنشهای آب‌زدایی در طول دگرگونی سیال لازم را تولید نموده که در طول ساختارهای ناحیه‌ای بالا آمده و در تله‌های ساختاری درون کربنات‌ها به دام افتاده است (Pirajno, 2009). کانسار سومب نسبت به کانسارهای MVT در مقدار بالای Cu و As و تنوع فلزات و نیز دمای بالاتر سیال تفاوت دارد (Melcher et al., 2006).

با توجه به عدم ارتباط با ماگماتیسم در این کانسارها لایه‌های تبخیری در آماده کردن سیال به حد کافی شور که بتواند مقدار کافی از فلزات پایه را حمل کند، نقش حیاتی بازی کرده است (Chetty and Frimmel, 2000). مقدار $\delta^{34}S$ مثبت در کانسار سومب نشان می‌دهد کانیهای تبخیری در کانی‌سازی نقش مهمی ایفا نموده‌اند (Kamona et al., 1999).

کانسار سومب در طول دگرگونی و یا دگرشکلی ناحیه‌ای و از سیال داغ (350-450 درجه سانتی‌گراد) منشأ گرفته که در طول ساختارهای ناحیه‌ای حرکت و در تله‌های موجود در سنگهای کربناته به دام افتاده است (Melcher et al., 2006). یکی از موقعیتهای تکتونیکی کانی‌سازی نوع دره می‌سی‌سی‌پی موقعیت تکتونیکی انقباضی (همگرایی) و در حضور کربنات‌های حاشیه قاره‌ای می‌باشد (Leach, 2001). این ویژگی منطبق بر موقعیت تکتونیکی کانسار نوع سومب است (Frimmel et al., 1996).

مدل زایشی ذخیره: در رژیم همگرا و در طی کوه‌زایی برخوردی، آب محبوس بین ذرات رسوبی در اثر فشار و دمای حاصل از دگرگونی ناحیه‌ای از سنگها خارج شده و به‌سمت مناطق کم فشار حرکت می‌کند. در حین حرکت، این آبها می‌تواند عناصر را از سنگهای مسیر شست‌وشو داده و در مکان مناسب ته‌نشین نماید. در طی برخورد ناشی از بسته‌شدن حوضه نائین-بافت و سبزوار (از شاخه‌های اقیانوس نئوتتیس) در طول ماستریشتین- پالئوسن (Rajabi et al., 2012) سیالات دگرگونی آزاد شده و مستعد کانی‌سازی به سمت مناطق کم‌فشار همچون کوه نخلک حرکت نموده و در فضای خالی درون سنگهای کربناتی به دام افتاده و ته‌نشین شده است. به‌طور کلی بر اساس توالی پاراژنتیک و داده‌های ایزوتوپی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در تشکیل کانسار باقرق دو سیال نقش داشته است: 1) سیال دارای فلز و احتمالاً مواد آلی و 2) سیال گوگرددار سولفاتی. فلزات داغ حامل مواد آلی از طریق گسلهای عمیق به داخل کربنات‌های کرتاسه بالایی وارد شده و با سیال غنی از سولفات مواجه و نهایتا ته‌نشین شده است. همراهی باریت و سولفید در کانسار مدل احتمالی اختلاط سیال غنی از فلز با سیال غنی از سولفات و ته‌نشست را پیشنهاد می‌کند. از آن‌جایی‌که باریت کانی انحلال ناپذیری در سیستم اکسیدی است، ته‌نشست آن محدود به زون اختلاط سیال احیایی Ba دار با سیال سولفات‌دار اکسیدی است. رخداد سولفیدها به‌صورت درشت‌بلور و ریزبلور در طول تناوب ته‌نشست و انحلال می‌تواند به سرعت متغیر اختلاط دو سیال اکسیدی- احیایی نسبت داده شود. بنابراین در سیستم گرمابی مورد انتظار این‌جا، سولفات با منشأ دریایی کرتاسه به‌وسیله مواد آلی موجود در محدوده کانسار و یا مواد هیدروکربنی احیا شده و تغییرات مشاهده شده در مقدار $\delta^{34}S$ سولفیدها وباریت گواه این رویداد است. در زمان احیایی و شرایط فوگاسیته اکسیژن پایین کانیهای سولفیدی و در شرایط فوگاسیته اکسیژن بالا کانی باریت ته‌نشست نموده که حاصل آن بافتهای تناوبی مانند بافت قشری، کوکاد از کانیهای سولفیدی و باریت شده است.

Reference

Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 582 pp (in persian).

Alavi, M., Vaziri, S.H., Seyed-Emami, K., and Lasemi, V., 1997. The Triassic and associated rocks of the Nakhlak and Aghdarband areas in Central and Northeastern Iran as remnants of the Southern Turanian continental margin. Geological Society of America Bulletin, 109(12): 1563-1575.

Amcoff, O., 1984. Distribution of silver in massive sulfide ores. Mineralium Deposita, 19(1): 63-69.

Bariand, P., 1963. Contribution a la mineralogie de l'lran (Contribution to the mineralogy of Iran).

Society Francaise Mineralogie et Cristallographie Bulletin, 86(1): 17-64.

Bazin, D. and Hubner, H., 1969. Copper deposit in Iran. Geological survey of Iran, Tehran. Report 13, 232 pp.

Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(3): 683-684.

Brown, P.E. and Lamb, W.M., 1989. P-V-T properties of fluids in the system H_2O-CO_2-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(6): 1209-1221.

Cherepovsky, N., Plyaskin, V., Zhitinev, N., Kokorin, Y., Susov, M., Melnikov, B. and Aistov, L., 1982. Report on detailed geological prospecting in Anarak area (Central Iran) Nakhlak locality. Geological Survey of Iran and Technoexport Company, Tehran. Report 14, 196 pp.

Chetty, D. and Frimmel, H.E., 2000. The role of evaporites in the genesis of base metal sulphide mineralisation in the Northern Platform of the Pan-African Damara Belt, Namibia: Geochemical and fluid inclusion evidence from carbonate wall rock alteration. Mineralium Deposita, 35(4): 364-376.

Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, LB., Sakai, H., and Zak, I., 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. Chemical Geology, 28 (3-4): 199-260.

Conner, K. and Anderson, C., 2013. Enargite treatments and pressure oxidation of concentrates. Journal of Metallurgical Engineering, 2(4): 115-123.

Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology, 13(1): 221-244.

Corbella, M., Ayora, C., and Cardellach, E., 2004. Hydrothermal mixing, carbonate dissolution and sulfide precipitation in Mississippi Valley-type deposits. Mineralium Deposita, 39(3): 344-357.

Dickson, J.A.D., 1966. Carbonate Identification and Genesis as Revealed by Staining. Journal of Sedimentary Petrology, 36(2): 491-505.

Foley, N.K., 2002. Environmental geochemistry of platform carbonate-hosted sulphide deposits. In: II.R.R. Seal, N.K. Foley (Editors), Progress on geoenvironmental models for selected mineral deposite type. USA geological survey, Denver, Report 02, pp. 87-100.

Frimmel, H.E., Deane, J.G. and Chadwick, P.J., 1996. Pan-African tectonism and the genesis of base metal sulfide deposits in the northern foreland of the Damara Orogen, Namibia. In: D.F. Sangster (Editor), Carbonate-hosted Lead-Zinc Deposits. Society of Economic Geologists, Special Publition 4, pp. 204-217.

Ghazban, F., Mcnutt, R.h., and Schwarcz, H.P., 1994. Genesis of sediment- hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan Area, West- Central Iran. Economic Geology, 89(6): 1262-1278.

Goldschmidt, V.M, 1954. Geochemistry. Oxford University Press, London, 730 pp.

Guilbert, J.M. and Park, Jr.C.F., 1997. The geology of ore deposits. Freeman and Company, New York, 985 pp.

Heyl, A.V, 1983. Geologic characteristics of three major Mississippi Valley districts. In: G. Kisvarsanyi, S.K. Grant, W.P. Pratt and J.W. Koing (Editors), International conference on Mississippi Valley type lead-zinc deposits. University of Missouri-Rolla Press, Rolla, pp. 27-60.

Hoefs, J., 2004. Stable isotope geochemistry. Springer Verlag, Berlin, 244 pp.

Ineson, P.R., 1989. Introduction to Practical Ore Microscopy. Longman publishers, England, 181 pp.

Jazi, M.A., Karimpour, M.H., Malekzadeh, A. and Rahimi, B., 2015. Stratigraphic, lithological and structural controls in placement of Nakhlak deposit (northeast of Esfahan). Advanced Applied Geology, 15(1): 59-75. (in Persian with English abstract)

Jazi, M.A. and Shahabpour, J., 2010. Mineralogical, Textural, Structural and Geochemical aspects of the of Nakhlak Lead mine, Isfahan. Journal of Econmic Geology, 3(2): 131-151. (in Persian with English abstract)

Kamona, A.F., Leveque, J., Friedrich, G. and Haack, U., 1999. Lead isotopes of the carbonatehosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb– Zn– Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran– Lu filian fold belt of Central Africa. Mineralium Deposita, 34(3): 273-283.

Kampunzu, A.B., Cailteux, J.L.H., Kamona, A.F., Intiomale, M.M. and Melcher, F., 2009. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copper belt. Ore Geology Reviews, 35(3-4): 263-297.

Karup-Møller, S., 1977. Mineralogy of some Ag-(Cu)-Pb-Bi sulphide associations. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 26: 41-68.

Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. Elements, 1(1): 13-18.

Kinsland, G.L., 1977. Formation temperature of fluorite in the Lockport dolomite in Upper New York State as indicated by fluid inclusion studies with a discussion of heat sources. Economic Geology, 72(5): 849-854.

Krouse, R.H., Viau, C.A., Eluik, L.S., Ueda, A., and Halas, S., 1988. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulfate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs. Nature, 333(6172): 415-419.

Ladame, G., 1945. Les resource metaliferes de Iran. Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology, 25(1): 165-298.

Laznicka, P., 1989. Breccias and ores. Part 1: History, organization and petrography of breccias. Ore Geology Review, 4(4): 314-344.

Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J., and Walters, S.S., 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A Global Perspective. Economic Geology, 100th Anniversary volume: 561-607.

Lueth, V.W., Megaw, P.K.M., Pinatore, N.E., and Goodell, P.C., 2000. Systematic variation in galena solid solution at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico. Economic Geology, 95(8): 1673-1687.

Machel, H.G., 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic setting. Sedimentary Geology, 140(1-2): 143-175.

Malakhov, A.A., 1968. Bismuth and antimony in galena as indicators of some conditions of ore formation. Geochemistry International, 7(11): 1055-1068.

Marshall, R.R. and Joensuu, O., 1961. Crystal habit and trace element content of some galena. Economic Geology, 56(4): 758-771.

Melcher, F., Oberthur, T. and Rammlmair, D., 2006. Geochemical and mineralogical distribution of germanium in the Khusib Springs Cu– Zn –Pb –Ag sulfide deposit Otavi Mountain Land, Namibia. Ore Geology Review, 28(1): 32- 56.

Mir-Mohammadi, A., 1977. Die mineralian der Erzgruben in west lichen zentralen Iran. Clausthal Geological, Clausthal-Zellerfeld, Report 27, pp. 11-44 (in German).

Ohmoto, H. and Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulphur and carbon. In: H.L. Barnes (Editor), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Wiley-Interscience, New York, pp. 509-567.

Ohmoto, H., 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67(5):551-579.

Orr, W.L., 1977. Geologic and geochemical controls on the distribution of hydrogen sulfide in natural gas. In: R. Campos and J. Goni (Editors) Advances in organic geochemistry. Enadisma, Madrid, pp. 572-597.

Park, F.C. and MacDiarmid, R.A., 1970. Ore Deposits. Freeman and Company, San Francisco, 529 pp.

Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer Science and Business Media, Netherlands, 1250 pp.

Pirajno, F. and Joubert, B. D., 1993. An overview of carbonate-hosted mineral deposits in the Otavi Mountain Land, Namibia: implications for ore genesis. Journal of African Earth Sciences, 16(3): 265-272.

Qian, Z., 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significant in distinguishing the genetic type of Pb-Zn ore deposits. Geochemistry, 6(2): 177-190.

Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of cretaceous carbonate hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. Internatinal Geology Review, 54(14):1649-1672.

Ramdohr, P., 1970. The ore minerals and their intergrowth. Pergamon Press, University of Michigan, Michigan, 1174 pp.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Mineralogical Society of America, Review in mineralogy 12: 644 pp.

Seal, R.R., 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 61(1): 633-677.

Shepherd, T.J., Ranbin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie, Glasgow, 239 pp.

Sikka, D.B., Petruk, W., Nehru, C.E. and Zhang, Z., 1991. Geochemistry of secondary copper minerals from Proterozoic porphyry copper

deposit, Malanjkhand, India. Ore Geology Reviews, 6(2-3): 257-290.

Southam, G. and Saunders, J.A., 2005. The geomicrobiology of ore deposits. Economic Geology, 100 (6):1067-1084.

Szczerba, M. and Sawlowicz, Z., 2009. Remarks on the origin of cerussite in the Upper Silesian Zn-Pb deposits, Poland. Mineralogia, 40(1-4): 54-64.

Valenza, K., Moritz, R., Mouttaqi, A., Fontignie, D. and Sharp, Z., 2000. Vein and karst barite deposits in the Western Jebilet of Morocco: fluid inclusion and isotope (S, O, Sr) evidence for regional fluid mixing related to central Atlantic Rifting. Economic Geology, 95(3): 587-606.

Vaziri, S.H., Fursich, F.T. and Kohansal-ghadimvand, N., 2012. Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 29(2): 384-397.

Viets, J.G., Hopkins, R.T. and Miller, B.M., 1992. Variations in minor and trace elements in sphalerite from Mississippi Valley Type deposits of the Ozark region: genetic implications. Economic Geology, 87(7): 1897-1905.

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185-187.

Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55(1-4): 229-272.