

پیدایش و شیمی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی برون‌زاد در کانسار پلی‌متال ماهور غرب نهبندان

محمد بومری^۱ *، حبیب بیابانگرد^۱، کازو ناکاشیما^۲ و مرتضی اسفرم^۱
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲ علوم زمین و محیط‌زیست، دانشکده علوم، دانشگاه یاماگاتا، یاماگاتا، ژاپن

چکیده

کانسار پلی‌متال ماهور در ۱۳۰ کیلومتری غرب نهبندان در حاشیه شرقی بلوک لوت واقع شده است. کانه‌زایی برون‌زاد در امتداد شمالی-جنوبی در سنگ‌های آتشفشانی ترشیری دگرسان شده دیده می‌شود. کانی‌های برون‌زاد بیشتر به صورت هیدروکسید آهن، کربنات مس، سولفات‌های مس و سرب و سولفیدهای مس تشکیل شده است. گوتیت، مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت، لیناریت و آتاکامیت کانی‌های رایج در کانسار ماهور هستند که بر اثر اکسایش سولفیدهای درون‌زاد به وسیله فرآیندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. تعدادی از این کانی‌ها به وسیله ریزپر دازشگر الکترونی تجزیه شدند. مقدار نقره در بیشتر این کانی‌ها در خور توجه است. کوولیت در کانسار ماهور دارای سرب، روی و نقره بالایی است. شیمی کانی‌های برون‌زاد و نحوه زایش آنها در این پژوهش بحث می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اکسایش، کانه‌زایی برون‌زاد مس، ماهور، بلوک لوت

مقدمه

کانسار پلی‌متال ماهور در ۱۳۰ کیلومتری غرب نهبندان در حاشیه شرقی بلوک لوت واقع شده است. نفوذ آب‌های سطحی در رگه‌های معدنی باعث انحلال و اکسایش سولفیدها و ایجاد بخش‌های غنی‌شده‌ای از ترکیبات مس، سرب و روی می‌شوند (Hitzman *et al.*, 2003؛ Sillitoe, 2005). آب‌های غنی از اکسیژن و گاز کربنیک ضمن انحلال سولفیدها، آب اسیدی قوی ایجاد می‌کند که باعث

شستشوی و انحلال عناصر فراوانی می‌شود. به ویژه سولفیدهایی مثل: کالکوپیریت، اسفالریت و پیریت حل می‌شوند و به جای آنها هیدروکسیدهای آهن مانند: لیمونیت و سولفوریک اسید تولید می‌شود (Evans, 1993؛ Guilbert and Park, 1986) معمولاً، شستشوی عناصر، تا بالای سطح آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد و بسیاری از عناصر محلول از منطقه بالای سطح آب زیرزمینی به مرور زمان خارج می‌شوند. در این منطقه که به منطقه اکسایش یا

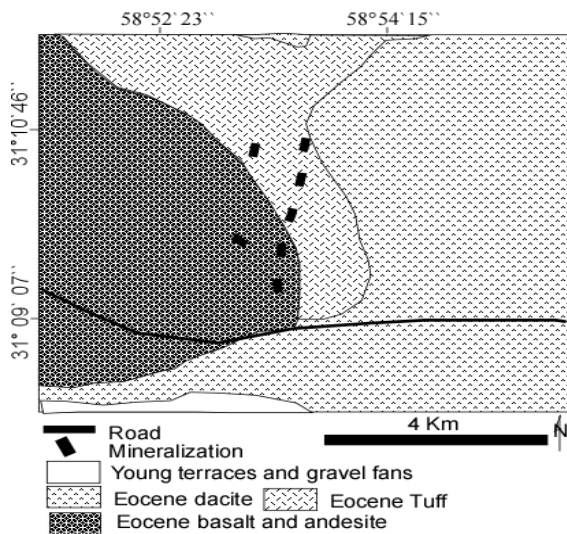
آن ادامه پهنه ماگمایی ایران مرکزی است (شکل ۱) که با گرانیتوئیدهای بزمان مشخص می‌شود (Pourhosseini, 1981). بلوک لوت دارای روند شمالی-جنوبی به طول حدود ۹۰۰ کیلومتر و عرض حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر است (Stocklin, 1968). از ویژگی‌های بلوک لوت می‌توان وجود انواع سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی را ذکر کرد. در این بلوک، سنگ‌های قدیمی‌تر از تریاس میانی تحت تأثیر فاز کوهزایی کیمیرین پیشین واقع شده‌اند. اگرچه فعالیت آتشفشانی و پلوتونیسم از ژوراسیک میانی (سیمیرین میانی) به ویژه در نواحی دهسلم و چهارفرسخ وجود داشته (Aghanabati, 2004) ولی بخش زیادی از بلوک لوت به وسیله سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری که اوج آن در ائوسن بوده است (با ضخامت ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر) اشغال شده (Berberian and King, 1981). سنگ‌های آذرین یاد شده کالک‌آلکالن هستند. سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و کواترنر که کم‌وبیش بازیک و بیشتر از نوع بازالتی‌اند، محدود به گسل‌ها و شکستگی‌های محدود کننده بلوک لوت هستند. در منتهی‌الیه جنوبی گسل نایبند و سایر گسل‌های شمالی-جنوبی، فوران‌های آلکالن از میوسن تا کواترنری صورت گرفته است که بیشتر از نوع هاوائیت و موگاریت و مقدار اندکی بازائیت، آندزیت بازالتی و تقریباً است (Emami, 2000؛ Pang et al., 2012). نهشته‌های دریاچه‌ای تقریباً افقی پلیوسن-پلیستوسن، به نام سازند لوت که نشانگر یک رخداد چین‌خوردگی جوان است، یکی دیگر از ویژگی‌های بلوک لوت به شمار می‌رود (Aghanabati, 2004). کانسار مورد بررسی در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ دهسلم قرار می‌گیرد (Hossini et al., 1992). شکل ۲ که گسترش پهنه معدنی روی آن مشخص شده بخشی از این نقشه است.

اکسیدان معروف است، هیدروکسیدهای آهن مثل گوتیت و لیمونیت به مقدار زیادی باقی می‌مانند و تشکیل یک کلاهدک آهنی یا گوسان را می‌دهند و کانی‌های مالاکیت و آزوریت، کربنات‌ها و سولفات‌های روی و سرب معمولاً در زیر این کلاهدک آهنی در بخش زیرین پهنه اکسیدان و در بالای سطح آب زیرزمینی تشکیل می‌شوند (Evans, 1993) و مادامی که آب‌ها و ترکیب آنها هنوز کربناته، سولفات و دارای ویژگی‌های اکسایند هستند، کربنات‌ها و سولفات‌های مس، روی و سرب تشکیل می‌شوند. یادآوری می‌شود در چنین محیط‌هایی فلزات محلول در آب‌های اسیدی تا زمانی که به سطح آب زیرزمینی که معمولاً در زیر آن شرایط کاهنده برقرار است، نرسیده‌اند، پایدار باقی می‌مانند. برخورد محلول‌های فلزدار با سطح آب در محیط‌های احیایی، واکنش‌های گوناگونی را به دنبال دارد که به رسوب فازهای حل شده و جایگزینی سولفیدهای درون‌زاد به وسیله سولفیدهای برون‌زاد منجر می‌شود (Putter et al., 2010).

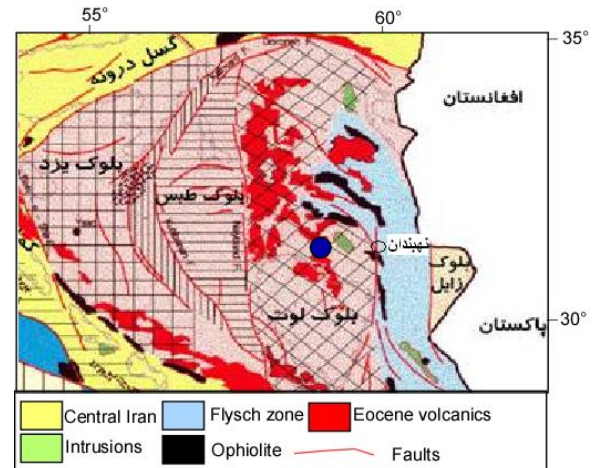
با توجه به شدت و گسترش کلاهدک آهنی و فراوانی کربنات‌ها و سولفات‌های مس، سرب و روی در این منطقه، عملیات اکتشافی برای رسیدن به ذخایر ارزشمند در عمق توسط بخش خصوصی در حال انجام است. ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی و توالی پاراژنزی کانی‌های موجود در این منطقه توسط Esform (۲۰۱۱) بررسی شده است. هدف از این پژوهش، بررسی شیمی کانی‌ها و نحوه کانه‌زایی برون‌زاد در کانسار ماهور است.

زمین‌شناسی منطقه

گستره مورد بررسی از نظر زمین‌شناسی در بلوک لوت واقع شده است. این بلوک از شرق با گسل نهبندان، از پهنه فلیش شرق ایران و از غرب، توسط گسل نایبند از بلوک طبس جدا می‌شود و مرز شمالی آن گسل درونه و مرز جنوبی



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده کانسار ماهور که گسترش رگه ماده معدنی با خط منقطع ضخیم مشخص است.



شکل ۱- موقعیت بلوک لوت و محل کانسار ماهور که با ● مشخص شده است (Aghanabati, 2004; Stocklin, 1968).

ژئوفیزیکی و مغزه‌گیری در نقاط مختلف معدن تا اعماق ۱۵۰ متری صورت گرفته است.

روش انجام پژوهش

بیش از ۵۰ نمونه از سنگ‌های دربرگیرنده و از رگه و پهنه‌های کانه‌دار و دگرسان شده کانسار ماهور برداشت شده است. نمونه‌ها نه تنها از سطح زمین بلکه تا اعماق ۱۵۰ متری برداشت و به طور ماکروسکوپی بررسی و سپس از آنها مقاطع نازک و صیقلی تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان عبوری-انعکاسی بررسی شدند. تعدادی از نمونه‌ها نیز با پراش پرتو ایکس (XRD) آزمایش شدند. ترکیب شیمیایی کانی‌های برون‌زاد موجود در اندیس معدنی ماهور با روش WDS به وسیله یک ریزپردازشگر الکترونی (EMPA) خودکار مدل JEOL.JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن با ولتاژ ۲۰ کیلو وات و جریان 2×10^{-8} آمپر تعیین شده است. قطر پرتوی الکترونی ۵ میکرون و غلظت داده‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری ZAF محاسبه شده است. عناصری چون: Au, As, Ag, Zn, Te, Sb, S, Pb, Mn, Hg, Fe, Cu, Cd, Bi

کانسار ماهور در میان سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری از قبیل داسیت‌ها، آندزیت‌ها، ایگنمبریت‌ها و توف‌های وابسته، واقع شده است. داسیت و ریوداسیت قسمت اعظم شرق، جنوب و جنوب‌شرق محدوده را تشکیل می‌دهند در حالی که آندزیت بازالت، در غرب آن گسترش دارد. توف‌ها (لیتیک توف) اکثراً با ترکیب متوسط تا اسید به رنگ سبز و خاکستری، در شمال و مرکز محدوده مشاهده می‌شوند. رسوبات کواترنری شامل ماسه، سیلت و رس در جنوب‌غربی منطقه پهنه‌های وسیعی از زمین‌های با ارتفاع کم را پوشانده است. سنگ میزبان معدن مس ماهور، بیشتر سنگ‌های داسیتی‌اند. سنگ‌های آتشفشانی در محدوده مورد بررسی از ماگمای کالک‌آلکان حاصل و ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه با سنگ‌های کمان آتشفشانی حاشیه قاره‌ای دارند (Esform, 2011). معدن ماهور در حال حاضر فعال و تعدادی ترانشه در آن ایجاد شده که بیشتر در پهنه اکسیدان است و حجم قابل ملاحظه‌ای از کربنات‌های مس و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن این پهنه را ذخیره کرده‌اند. همچنین، کارهای

به طور کمی اندازه‌گیری شدند.

کانه‌زایی

کانه‌زایی به صورت رخنمون‌های تپه مانند و ناپیوسته از هیدروکسیدهای آهن، مس، سرب و روی در محدوده بررسی شده دیده می‌شود که تقریباً امتداد آنها شمال شرق-جنوب شرق است. بر اساس برداشت‌های ژئوفیزیکی، کانه‌زایی در این امتداد تا بیش از ۴ کیلومتر نیز وجود دارد (Esform, 2011). در بعضی از نقاط، کانه‌زایی در دو رگه موازی تقریباً عمودی رخ داده است. ضخامت بخش پُر عیار رگه‌ها، به بیش از یک متر نیز می‌رسد ولی ضخامت پهنه شدیداً دگرسان شده و برشی شده حاوی پیریت حدود ۱۰۰ متر است. تپه‌های غنی از هیدروکسید آهن یا کلاhek آهنی گسترش عمقی در خور توجهی دارند به طوری که آثار آن تا اعماق بیش از ۵۰ متر نیز دیده می‌شود. این کلاhek آهنی دارای رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای، زرد و سفید است و کانی‌های مس‌دار به رنگ سبز و آبی نیز در آن به فراوانی وجود دارد. پیریت تنها کانی سولفیدی است که در سطح مشاهده می‌شود، ولی با افزایش عمق نسبت سولفیدها افزایش می‌یابد. به طوری که در اعماق بیش از ۱۰۰ متر هیدروکسیدهای آهن کمیاب و فقط رگچه‌هایی از مالاکیت مشاهده می‌شود. کانه‌زایی در کانسار ماهور را می‌توان به دو نوع درون‌زاد یا هیپوژن و برون‌زاد یا سوپرژن تقسیم‌بندی کرد. بر اساس درجه اکسایش، کانه‌زایی در کانسار ماهور را می‌توان از سطح به عمق به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- پهنه برون‌زاد اکسیدی که در سطح رخنمون داشته و بیشتر از هماتیت، گوتیت، لیمونیت، ژاروسیت، مالاکیت، آزوریت، کربنات‌ها و سولفات‌های سرب و روی تشکیل شده است (شکل ۳). پیریت و گالن از سولفیدهایی است که

در این پهنه حضور دارند.

۲- پهنه برون‌زاد اکسیدی-سولفیدی، تفاوت این پهنه با پهنه برون‌زاد اکسیدی، حضور کانی‌های سولفیدی چون کالکوسیت است.

۳- پهنه برون‌زاد سولفیدی، این پهنه بیشتر از کالکوسیت، دیزینیت و کوولیت تشکیل شده است.

۴- پهنه تدریجی یا انتقالی برون‌زاد به درون‌زاد که سولفیدهای اولیه‌ای مانند کالکوپیریت، گالن و اسفالریت با سولفیدهای ثانویه چون: کوولیت و کالکوسیت مشاهده می‌شود.

۵- پهنه درون‌زاد، این پهنه بیشتر از سولفیدهای اولیه چون: کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و سولفیدهای نقره‌دار تشکیل شده است.

پیریت در تمام پهنه‌های مذکور یکی از کانی‌های فراوان است و رگچه‌های مالاکیت و آزوریت تا اعماق بیش از ۱۰۰ متر از سطح زمین مشاهده می‌شوند.



شکل ۳- تصاویری از کانه‌زایی برون‌زاد در کانسار ماهور. الف) تشکیل رگچه‌های گالن در یک پهنه اکسیدان، ب) رگه حاوی گالن در زیر ماسه‌ها، ج) کانی‌زایی آهن و مس، د) کانه‌زایی آهن و مس

دگرسانی

دگرسانی‌های گرمابی در اطراف رگه‌های معدنی در کانسار ماهور گسترش زیادی دارند.

به صورت جانشینی، رگچه‌ای و در فضاهای خالی گسترش دارد.

کانی‌شناسی

حجم اصلی کانی‌سازی در رخنمون‌های کانسار ماهور بر اثر فرآیندهای برون‌زاد تشکیل شده است. کانی‌هایی که بر اثر این فرآیند تشکیل شده‌اند متعدد و شناسایی آنها نیاز به بررسی جامع و گسترده‌ای دارد. بر اساس بررسی‌های پتروگرافی، پراش پرتو ایکس و ریزپردازش الکترونی تعدادی از این کانی‌ها شناسایی شده‌اند که می‌توان به انواع اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، کربنات‌های مس، سرب و روی، سولفات‌های سرب و روی و غیره اشاره کرد که بعضی از آنها در این پژوهش توصیف می‌شوند.

هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن

هیدروکسیدهای آهن، تمام رخنمون‌ها را در محدوده کانه‌زایی شده به شدت آغشته کرده‌اند (شکل ۴-الف و ب). هماتیت و مارتیت از اکسایش سولفیدهای اولیه و مگنتیت حاصل شده‌اند. گوتیت در زیر میکروسکوپ انعکاسی، دارای رنگ سفید و دارای بیرفلکتانس و انیزوتروپی است و بافت‌های ثانویه مختلفی را از خود نشان می‌دهد که بیشتر به صورت جانشینی، رگچه‌ای، کلوفرمی و دانه‌های پراکنده است. گوتیت با رنگ خاکستری و انعکاس داخلی قرمز رنگ، قابل تشخیص و کاملاً جانشین پیریت‌های شکل‌دار شده و دارای شکل کاذب (پسودو مورف) است (شکل ۴-ج). بافت‌های کلوفرمی، لایه‌لایه و جعبه‌مانند و اشکال متنوعی که نشانه بافت‌های ثانویه و حرکت محلول‌های کم‌دما در محیط‌های سطحی است (Guilbert and Park, 1986) از ویژگی‌های آن در کانسار ماهور است. رنگ‌های متنوعی که در نور منعکسه دیده

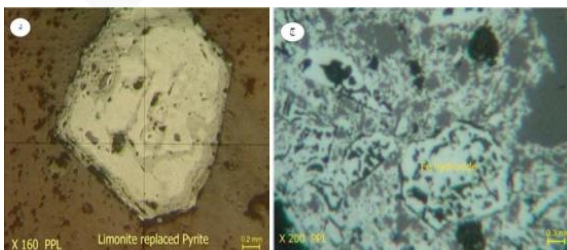
انواع دگرسانی از مرکز رگه به اطراف شامل آرژیلیک، سربسیلیک و پروپیلیتیک است. دگرسانی سیلیسی و کربناتی نیز در همه این دگرسانی‌ها دیده می‌شود. رگه معدنی بیشتر دچار دگرسانی شدید شده که گسترش کلاهدک آهنی نتیجه آن است و شاید دگرسانی آرژیلیک در این مرحله تشکیل شده است. بر اساس بررسی‌های پتروگرافی و با پراش پرتو ایکس (XRD) کانی‌هایی چون: کوارتز، فلدسپارها، کائولینیت، سربسیت، آلونیت، ناتروآلونیت، بیدلیت، هالیت، کلسیت، کلریت و اپیدوت در مناطق دگرسان شده شناسایی شدند (Esform, 2011). دگرسانی آرژیلیک بیشتر محدود به رگه معدنی است و به صورت مناطق سفید رنگ دیده می‌شود. بخشی از دگرسانی آرژیلیک بر اثر فرآیندهای سطحی تشکیل شده است. دگرسانی سربسیلیک پس از دگرسانی سیلیسی، مهم‌ترین و اصلی‌ترین دگرسانی اولیه در منطقه ماهور است که از سربسیت، کوارتز و پیریت تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی که ماهیت اولیه آنها به داسیت نسبت داده شده (Esform, 2011) دچار دگرسانی سربسیلیک شده‌اند و کانی‌های اولیه مثل پلاژیوکلاز در آنها به سختی قابل تشخیص هستند. پیریت در این پهنه، دگرسانی بیشتر به صورت دانه‌های پراکنده شکل‌دار دیده می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک، در فاصله دورتری از رگه معدنی ماهور و در سنگ‌های آندزیتی و بازالتی اتفاق افتاده است. در این پهنه، کانی‌های اولیه همچون: پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و پیروکسن بیشتر به کلریت و تا حدی نیز به اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند. رگچه‌های کلسیتی و سیلیسی نیز در این پهنه مشاهده می‌شود. دگرسانی سیلیسی در کانسار ماهور به شکل‌های مختلف تشکیل است شده به طوری که در زمینه سنگ‌ها

کالکوسیت

کالکوسیت مشاهده شده در کانسار ماهور در زیر میکروسکوپ دارای رنگ خاکستری، بیرفلکتانس و انیزوتروپی است (شکل ۷). این کانی دارای بافت جانیشینی و شکل کاذب است که از تجزیه کالکوپیریت حاصل شده است. در قسمت‌های سطحی بقایای کالکوپیریت دیده نمی‌شود ولی به دلیل وجود کالکوپیریت در اعماق و نبود کالکوسیت یا کاهش درصد آن در نمونه‌های گرفته شده از عمق، می‌توان نتیجه گرفت که کالکوسیت از تجزیه کالکوپیریت حاصل شده است. دیژنیت نیز معمولاً همراه کالکوسیت وجود دارد.

کولیت

رنگ کولیت در زیر میکروسکوپ آبی و دارای بیرفلکتانس، چند رنگی و انیزوتروپی شدیدی است (شکل ۸). این کانی نه تنها در مناطق سطحی، بلکه در عمق نیز مشاهده می‌شود و به ویژه در مناطق برشی شده گسترش بیشتری دارد. این کانی نیز جانشین کالکوپیریت شده است و حالت برشی دانه‌های آن ارثی است. تعداد زیادی کانی با رنگ و ویژگی‌های کولیت در کانسار ماهور هستند که ترکیباتی از مس، روی و سرب دارند. تفکیک آنها در میکروسکوپ مشکل است.



شکل ۴- نمونه‌هایی از بخش کلاهک آهنی در کانسار ماهور، الف) لکه‌های لیمونیت در فضاهای خالی و ساخت کلوفرمی که در درون فضاها دیده می‌شود، ب) لکه‌های قرمز از هیدروکسید آهن و حضور مالاکیت همراه آنها، ج) گوتیت در زیر میکروسکوپ که کاملاً جانشین پیریت شده است، د) لیمونیت نیز به جای پیریت قرار گرفته است.

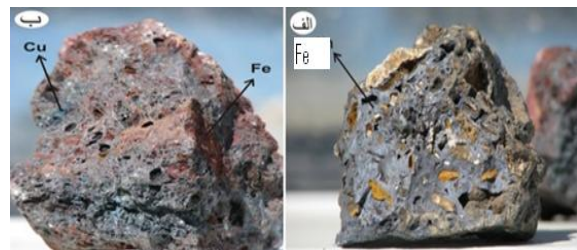
می‌شود و دارای انعکاس پایینی هستند بیانگر همراهی دیگر کانی‌های این گروه به ویژه لیمونیت و ژاروسیت است (شکل ۴-د).

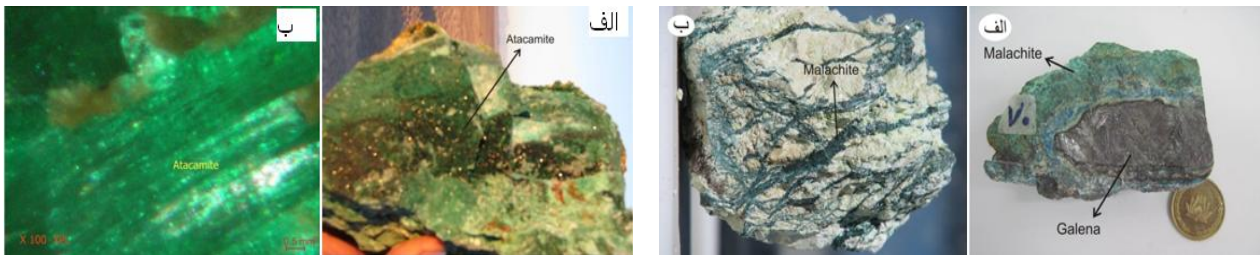
مالاکیت

مالاکیت از فراوان‌ترین کانی‌ها در بخش‌های سطحی است و در امتداد شکستگی‌ها تا مناطق عمیق مشاهده می‌شود. این کانی بیشتر به صورت رگچه‌ای تشکیل شده است (شکل ۵-الف و ب). مالاکیت در زیر میکروسکوپ همانند نمونه‌های ماکروسکوپی، رنگ سبز تیره دارد. هرچند مالاکیت بیشتر دارای بافت کلوفرمی است اما نمونه‌های کانسار ماهور بیشتر دارای بافت توده‌ای و رگچه‌ای هستند. آزوریت، یکی دیگر از کربنات‌های مس است که معمولاً با مالاکیت مشاهده می‌شود. مقدار آزوریت در کانسار ماهور کمتر از مالاکیت است.

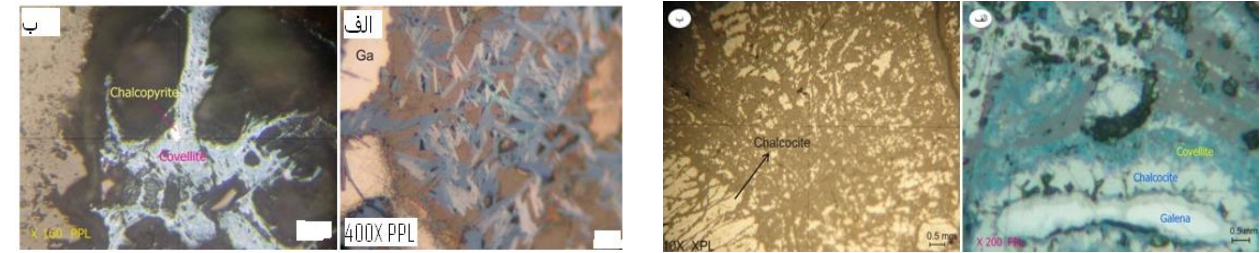
آتاکامیت

آتاکامیت در کانسار ماهور سبز روشن تا تیره و شبیه مالاکیت است و تفاوت آنها حالت دانه دانه بودن آتاکامیت است. تشخیص این کانی در نمونه دستی و زیر میکروسکوپ از مالاکیت مشکل است. بررسی‌های XRD وجود این کانی را در کانسار ماهور مشخص نمود (شکل ۶).





شکل ۵- اطراف گالن را مالاکیت و لیناریت فرا گرفته‌اند. (الف) رگچه‌های مالاکیت، سنگ دگرسان شده را قطع کرده‌اند. (ب) در زیر میکروسکوپ



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی، الف) کالکوسیت در بزرگ‌نمایی بالا همراه با گالن و کوولیت، ب) کالکوسیت با شکستگی‌های فراوان و رنگ نسبتاً سفید

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی کوولیت، الف) بلورهای تیغه‌ای و سوزنی کوولیت که دارای چند رنگی است. Ga = گالن، ب) کوولیت جانشین کالکوپیریت شده است.

منعکسه مشکل است. سروسیت بیشتر بی‌شکل و ترکیب شیمیایی آن در ادامه توصیف می‌شود. سیدریت نیز از کربنات‌های تشکیل شده در پهنه اکسیدی است که به صورت رشد درهم با دیگر کربنات‌ها دیده می‌شود. این کانی به صورت رگچه‌ای و بی‌شکل و گاهی دانه‌ای تشکیل شده است.

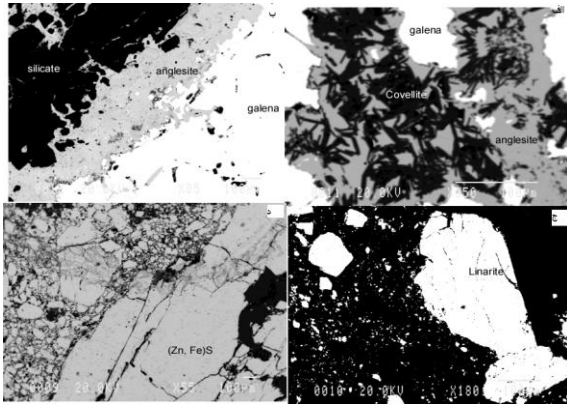
پاراژنز

کانه‌زایی در کانسار ماهور شامل دو مرحله مشخص درون‌زاد (اولیه) و برون‌زاد (ثانویه) است. در مرحله درون‌زاد فازهای تشکیل شده بیشتر سولفیدهای اولیه‌ای چون کالکوپیریت، اسفالریت و گالن هستند. در مرحله برون‌زاد، این سولفیدهای اولیه تجزیه شده و به جای آنها همتایت، هیدروکسیدهای آهن و انواع کانی‌های ثانویه مس، سرب و روی تشکیل شده است (جدول ۱). دگرسانی آرژلیک و انواع رگچه‌های کربناته نیز در مرحله برون‌زاد تشکیل شده‌اند.

لیناریت

لیناریت در زیر میکروسکوپ مشابه کوولیت است ولی معمولاً در اطراف گالن دیده می‌شود و شاید از تجزیه گالن در محیط‌های مس‌دار حاصل می‌شود. بلورهای آن معمولاً شکل مشخصی ندارد. دیگر سولفات‌ها و کربنات‌های سرب و روی نیز به وفور در کانسار ماهور وجود دارد که تفکیک آنها در مقاطع انعکاسی مشکل است. این کانی‌ها که از اکسایش سولفیدها حاصل شده‌اند، اطراف رگچه‌ها و دانه‌های سولفیدها را فراگرفته و دارای رنگ‌های متنوعی نیز هستند. آنگلزیت و سروسیت، از جمله این کانی‌ها هستند که شکل مشخصی ندارند و ترکیب شیمیایی آنها در ادامه توصیف می‌شود. سولفات روی نیز در این منطقه تشکیل شده است که یا دارای بلورهای سوزنی و تیغه مانند تقریباً کوچک و یا دارای شکل کاذب هستند که بیانگر جانشینی آن در سولفیدهای اولیه است. سروسیت همراه و کنار گالن وجود دارد ولی شناسایی آن در زیر میکروسکوپ

کانی‌ها، بر حسب اتم در فرمول، در بخش پایین جدول‌ها ذکر شده است.



شکل ۹- تصاویر BSI از نمونه‌های گرفته شده از کانسار ماهور. (الف) تبدیل گالن به کانی‌های ثانویه سرب و مس، (ب) سولفات سرب از حاشیه جانشین گالن شده است، (ج) خردشدگی کانه‌هایی مثل لیناریت یا کوولیت که دارای شکل کاذب هستند، (د) بخشی از اسفالریت به شدت خرد و برشی شده است.

کوولیت

اگرچه در فرمول نظری کوولیت ۶۶ درصد مس وجود دارد ولی شیمی این کانی در کانسار ماهور تنوع زیادی را از خود نشان می‌دهد و عناصری چون: روی، سرب و نقره به مقدار در خور توجهی در شبکه آن وارد شده‌اند (جدول ۲). به نظر می‌رسد که کوولیت با نقره، اسفالریت و گالن در کانسار ماهور، سری محلول جامدی را تشکیل داده باشند. کوولیت‌هایی که دارای سرب هستند، از نظر مقدار نقره نیز غنی‌اند. رابطه بین سرب و نقره کاملاً مثبت نیست و در کوولیتی که ۴/۳۵ درصد نقره دارد، مقدار سرب فقط ۰/۳ درصد است در حالی که کوولیتی با ۰/۱۱ درصد نقره، حدود ۸ درصد سرب دارد. در کوولیت‌هایی که مقدار در خور توجهی روی وارد شده‌اند مقدار نقره کم است. فرمول‌های محاسبه شده در بخش پایین جدول ۲ بیشتر با فرمول نظری کوولیت مطابقت زیادی دارند.

در جدول ۳ ترکیباتی وجود دارند که فرمول آنها با کوولیت واقعی متفاوت هست. به طوری که به جای مس در شبکه کوولیت، مقدار قابل توجهی

جدول ۱- نمودار پارائنز تعدادی از کانی‌های موجود در کانسار ماهور

minerals	supergene stage
hematite	██████████
Iron hydroxide	██████████
Cu-carbonate	██████████
chalcocite	██████████
digenite	██████████
covellite	██████████
Pb-Cu sulfide	██████████
Zn-Cu sulfide	██████████
Cu-Ag sulfide	██████████
linarite	██████████
cerussite	██████████
anglesite	██████████
siderite	██████████
clays	██████████
calcite	██████████

شیمی کانی‌ها

شیمی بعضی سولفیدها، کربنات‌ها و سولفات‌های ثانویه در کانسار ماهور که جمع کل عناصر تشکیل‌دهنده آنها بیش از ۲ درصد وزنی از ۱۰۰ فاصله دارد از نظر استوکیومتری ایده‌آل به نظر نمی‌رسد که ممکن است به چند علت باشد: (۱) خیلی از این فازها در ترکیب خود حاوی عناصر فرار مانند دی‌اکسید کربن، اکسیژن و آب هستند که یا تجزیه آنها با EMPA مشکل است، یا ممکن است آن عنصر جزو عناصر انتخاب شده برای تجزیه نباشد. (۲) این کانی‌ها جانشین کانی‌های اولیه شده‌اند و ممکن است ذرات ریز زیر میکروسکوپی و شکستگی‌های مخفی باعث خطا شده باشد. هرچند، همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، سطح تجزیه هم بزرگ و هم کاملاً صاف است و کانی‌های تجزیه شده ظاهراً از یک فاز تشکیل شده‌اند. فرمول‌های به دست آمده برای کانی‌هایی که جمع عناصر آنها از ۹۸ تا ۱۰۲ درصد وزنی هست، واقعی و از نظر استوکیومتری صحیح است. فرمول‌های به دست آمده برای تمام

فرمول آنها را می‌توان به صورت (Cu, Fe, Zn) S معرفی کرد. سایر نمونه‌های این جدول نشان‌دهنده یک سولفید مس و روی با فرمول S (Cu, Zn) هستند.

جدول ۳- شیمی کولیت حاوی روی و آهن بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	4	14	15	16	17	19	22
Cu	28.91	22.39	57.43	57.15	26.38	56.42	42.93
Fe	25.34	0.05	0.01	0.01	18.17	0.10	0.27
Mn	0.06	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.02
As	0.03	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00
Ag	0.00	0.05	0.07	0.10	0.00	0.00	0.05
Sb	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00
Zn	12.43	36.44	10.20	10.09	21.51	11.01	24.42
Pb	0.15	0.06	0.08	0.06	0.11	0.15	0.10
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00
Cd	0.10	0.10	0.07	0.02	0.24	0.02	0.14
Bi	0.00	0.14	0.08	0.00	0.28	0.01	0.00
Au	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.04	0.07
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Te	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	34.34	29.80	30.74	29.90	31.23	32.08	30.67
total	101.4	89.06	98.74	97.48	98.03	99.92	98.67
تعداد اتم در فرمول							
Cu	0.455	0.352	0.904	0.899	0.415	0.888	0.676
Fe	0.454	0.001	0.000	0.000	0.325	0.002	0.005
Mn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Ag	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.190	0.557	0.156	0.154	0.329	0.168	0.374
Pb	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cd	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001
Bi	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	1.071	0.929	0.958	0.932	0.974	1.000	0.956

می‌رسد (جدول ۴). در بعضی از نمونه‌ها جیوه نیز وجود دارد و حداکثر مقدار آن به حدود ۰/۲۲ درصد وزنی می‌رسد. مقدار طلا در یک نمونه به ۰/۱۲ درصد وزنی یا ۱۲۰۰ ppm رسیده که رقم بالایی است.

لیناریت

فرمول لیناریت $CuPb(OH)_2SO_4$ است. شیمی لیناریت در کانسار ماهور تنوع زیادی دارد (جدول ۵). که شاید به علت درهم‌رشدی با گالن این وضعیت حاصل شده است. مقدار مس و سرب شدیداً در نمونه‌ها متغیرند. این کانی نیز حاوی نقره بالا و حداکثر مقدار نقره در نمونه‌های انجام

روی جانشین و در بعضی از نمونه‌ها علاوه بر روی، آهن نیز جانشین مس شده است. مثلاً ترکیب نمونه شماره‌های ۴ و ۱۷ بیشتر مشابه با کولیتی است که دارای مقدار زیادی آهن و روی است و

جدول ۲- شیمی کولیت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	18	20	26	28	29	41	42	43	52	53	54
Cu	65.36	67.63	67.63	63.91	67.91	52.87	56.82	52.87	53.84	59.48	59.17
Fe	0.05	0.46	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.02
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.03	0.05	0.23	1.23	0.30	4.35	2.95	1.09	0.11	0.08	0.69
Sb	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00
Zn	1.26	0.90	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.06	0.04	0.45	3.54	0.44	0.30	2.07	2.90	8.06	0.68	1.81
Hg	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.06	0.36	0.17	0.32	0.20	0.14
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Bi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16	0.10	0.17	0.09
Au	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.07
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Te	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
S	29.60	30.68	33.45	31.90	33.32	31.32	34.40	33.58	31.70	34.07	32.97
total	96.47	99.90	101.80	100.67	102.00	88.94	96.80	90.84	94.28	94.74	94.98
تعداد اتم در فرمول											
Cu	1.028	1.064	1.064	1.006	1.069	0.832	0.894	0.832	0.847	0.936	0.931
Fe	0.001	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.000	0.000	0.002	0.011	0.003	0.040	0.027	0.010	0.001	0.001	0.006
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.019	0.014	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.002	0.017	0.002	0.001	0.010	0.014	0.039	0.003	0.009
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.923	0.957	1.043	0.995	1.039	0.977	1.073	1.047	0.988	1.062	1.028

کالکوسیت

کالکوسیت با فرمول Cu_2S دارای ۷۹/۸ درصد مس و ۲۰/۲ درصد گوگرد است. ترکیب شیمیایی کالکوسیت در کانسار ماهور تغییرات زیادی نشان می‌دهد (جدول ۴).

گروه کالکوسیت متشکل از چندین کانی است که از کالکوسیت شروع شده تا کولیت ادامه دارند و معمولاً با هم تشکیل می‌شوند. با توجه به اینکه ویژگی‌های نوری اکثر این گروه مشابه است، تشخیص آنها از یکدیگر مشکل هست. معمولاً دیژنیت و کالکوسیت با هم تشکیل می‌شوند. در ترکیب این کانی‌ها نیز مقدار نقره، قابل ملاحظه و در یک نمونه مقدار آن به ۷/۸۳ درصد وزنی

حدود ۷۷/۵ درصد وزنی آن را سرب تشکیل می‌دهد. سروسیت نیز در کانسار ماهور خالص نیست و فقط یک نمونه به ترکیب ایده آل سروسیت نزدیک است (جدول ۷). وجود مقدار بالای مس و گوگرد در بیشتر نمونه‌ها ممکن است بیانگر درهم‌رشدی کانی‌های سولفیدی یا سولفات‌های مس‌دار باشد. مقدار نقره در بعضی از نمونه‌های این کانی نیز بالا است. جیوه و کادمیوم نیز در شبکه این کانی وارد شده‌اند. کانی‌های دیگری که در کانسار ماهور با ترکیب شیمیایی شناسایی شدند شامل سیدریت و آرسنوپیریت هستند.

نکته‌ای که از این نمونه‌ها می‌توان دریافت: ۱- حضور فراوان این عنصر در بخش اکسیدان کانسار ماهور و ۲- مقدار بالای نقره، بیسموت، جیوه و مس در بعضی از نمونه‌های این کانی است.

شده بر روی این کانی، به ۱/۶ درصد وزنی می‌رسد. مقدار Sb و Bi نیز در بعضی از نمونه‌های این کانی نسبتاً بالاست.

آنگلزیته

آنگلزیته با فرمول $PbSO_4$ شناخته شده و در ترکیب این کانی ۷۴ درصد سرب، ۸/۵ درصد گوگرد و ۱۷/۵ درصد اکسیژن وجود دارد. البته در بعضی مراجع مقدار گوگرد، سرب و اکسیژن آن به ترتیب ۱۰/۵۷، ۶۸/۳۲ و ۲۱/۱۰ درصد وزنی ذکر شده است. ترکیبی که در جدول ۶ آمده، نزدیک به ترکیب آنگلزیته، ولی با فرمول ایده‌آل این کانی اندکی فاصله دارد.

سروسیت

سروسیت با فرمول $PbCO_3$ شناخته می‌شود که

جدول ۴- شیمی کالکوسیت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور
جدول ۵- شیمی لیناریت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	27	30	13	14	15	17	22	23	26	61
Cu	19.09	30.89	40.15	18.80	48.74	24.01	17.19	26.07	35.81	10.75
Fe	0.00	0.03	0.03	0.02	0.08	0.07	0.09	0.00	0.10	0.00
Mn	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
As	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Ag	0.09	0.10	0.65	0.13	0.51	0.82	1.60	0.25	0.18	0.13
Sb	0.00	0.00	0.15	0.00	0.02	0.07	0.27	0.62	0.00	0.02
Zn	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	49.13	38.27	20.51	47.40	9.83	33.22	31.60	32.64	12.11	51.75
Hg	0.00	0.00	0.12	0.07	0.03	0.35	0.14	0.34	0.19	0.26
Cd	0.00	0.00	0.06	0.09	0.03	0.07	0.00	0.07	0.00	0.10
Bi	0.00	0.00	0.00	0.22	0.14	0.03	0.19	0.00	0.33	0.08
Au	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09	0.00	0.00	0.00	0.01
Se	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.00	0.00
Te	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00
S	15.67	19.23	23.17	14.79	23.65	19.59	17.11	20.80	20.86	13.14
total	84.08	88.56	84.87	81.54	83.09	78.35	68.20	80.91	69.62	76.26
تعداد اتم در فرمول										
Cu	0.300	0.486	0.632	0.296	0.767	0.378	0.271	0.410	0.564	0.169
Fe	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.001	0.001	0.006	0.001	0.005	0.008	0.015	0.002	0.002	0.001
Sb	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.000	0.000
Zn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.237	0.185	0.099	0.229	0.047	0.160	0.153	0.158	0.058	0.250
Hg	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Cd	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
Bi	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.488	0.600	0.722	0.461	0.738	0.611	0.534	0.649	0.650	0.410

sample	1	2	3	4	5	6	7	9
Cu	72.88	64.86	60.88	73.04	73.04	72.55	72.87	63.31
Fe	0.10	2.35	0.47	0.10	0.11	0.31	0.24	0.09
Mn	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03
As	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.13	3.22	7.83	0.38	0.34	0.50	0.47	0.06
Sb	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.14	0.99	2.83	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04
Hg	0.15	0.00	0.11	0.00	0.14	0.05	0.22	0.14
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Bi	0.00	0.00	0.16	0.15	0.15	0.37	0.00	0.31
Au	0.00	0.12	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.02
Se	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
Te	0.05	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	21.43	16.01	16.27	22.20	22.18	21.51	21.54	21.42
total	94.91	87.67	88.60	95.94	96.14	95.32	95.34	85.45
تعداد اتم در فرمول								
Cu	1.147	1.021	0.958	1.149	1.149	1.142	1.147	0.996
Fe	0.002	0.042	0.008	0.002	0.002	0.006	0.004	0.002
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.001	0.030	0.073	0.004	0.003	0.005	0.004	0.001
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.001	0.005	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hg	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bi	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001
Au	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.668	0.499	0.507	0.692	0.692	0.671	0.672	0.668

جدول ۶- شیمی آنکلیزیت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	24	25	32	34	35	16	18	19	20	24	36	38	39	55
Cu	1.35	0.11	0.00	3.32	0.00	0.04	0.27	1.26	1.02	0.72	0.43	0.00	0.00	0.00
Fe	0.01	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Mn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
As	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.00	0.00	0.00	0.21	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.79	0.00	0.00	0.00
Sb	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.08	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
Pb	64.67	64.88	60.61	60.97	65.03	66.71	63.69	63.31	64.38	66.08	55.02	58.30	60.20	65.34
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.36	0.29	0.03	0.10	0.25	0.14	0.22	0.12
Cd	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08	0.14	0.13	0.15	0.11	0.06	0.00	0.19	0.04	0.11
Bi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.12	0.00	0.00	0.00	2.30	0.11	0.36	0.39
Au	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02
Te	0.05	0.00	0.03	0.00	0.04	0.06	0.00	0.03	0.00	0.03	0.04	0.02	0.01	0.03
S	9.22	10.33	10.26	11.17	10.36	10.55	9.91	9.95	9.73	10.59	9.84	10.19	10.03	10.40
total	75.31	75.35	70.92	75.70	75.62	77.95	74.79	75.11	75.29	77.66	75.70	69.05	70.86	76.46
تعداد اتم در فرمول														
Cu	0.021	0.002	0.000	0.052	0.000	0.001	0.004	0.020	0.016	0.011	0.007	0.000	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.312	0.313	0.293	0.294	0.314	0.322	0.307	0.306	0.311	0.319	0.266	0.281	0.291	0.315
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001
Bi	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.011	0.001	0.002	0.002
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.288	0.322	0.320	0.348	0.323	0.329	0.309	0.310	0.304	0.330	0.307	0.318	0.313	0.324

جدول ۷- شیمی سروسیت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	27	28	29	30	32	33	34	65	66
Cu	6.29	1.74	8.11	3.48	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.05	0.16	0.04	0.08	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06
Sb	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.04	0.00
Pb	63.23	67.55	58.99	63.66	63.27	69.40	73.21	77.88	69.50
Hg	0.25	0.05	0.26	0.33	0.39	0.13	0.00	0.15	0.07
Cd	0.09	0.14	0.15	0.13	0.15	0.12	0.16	0.13	0.11
Bi	0.15	0.25	0.18	0.00	0.00	0.00	0.25	0.09	0.21
Au	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Te	0.01	0.00	0.07	0.07	0.00	0.09	0.09	0.07	0.00
S	3.34	0.94	3.65	2.39	0.06	0.03	0.00	0.00	5.21
total	73.63	70.83	71.50	70.15	63.97	69.86	73.77	78.41	76.17
تعداد اتم در فرمول									
Cu	0.099	0.027	0.128	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Pb	0.305	0.326	0.285	0.307	0.305	0.335	0.353	0.376	0.335
Hg	0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000
Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Bi	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Au	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Te	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
S	0.104	0.029	0.114	0.075	0.002	0.001	0.000	0.000	0.162

بحث

کانه‌زایی اولیه در کانسار ماهور، سولفیدی و کانی‌هایی نظیر: پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و کانی‌های نقره‌دار در امتداد یک سیستم گسله شمالی-جنوبی به وسیله محلول‌های گرمابی در سنگ‌های آذرین سریسیتی و برشی تشکیل شده‌اند. بحث در مورد کانه‌زایی اولیه از اهداف این پژوهش نیست، بلکه تمرکز اصلی، روی کانه‌زایی برون‌زاد است. زیرا در کانسار ماهور نقش فرآیندهای سطحی در ایجاد کانی‌های پهنه اکسیدان و حتی سولفیدهای ثانویه مثل کالکوسیت و کوولیت نمود بیشتری دارد. شرایط تشکیل کانی‌های برون‌زاد در صورت وجود یون‌ها و کاتیون‌های لازم بیشتر تحت تأثیر Eh و pH است (شکل ۱۲). فرآیندهای برون‌زاد با اکسایش پیریت و دیگر سولفیدها شروع شده و در منطقه سطحی، گوتیت، لیمونیت یا هماتیت به جای

می‌گذارد و سولفوریک اسید تولید می‌شود. کالکوپیریت و دیگر سولفیدهای مس نیز طی این رویداد به اکسید آهن و سولفات مس‌دار تجزیه می‌شوند. در صورت وجود سنگ آهک و کانی‌های کربناته و آب‌های غنی از CO₂، محلول‌های حاوی مس، سرب و روی باعث تشکیل کربنات‌هایی از این عناصر می‌شوند. کربنات‌های آبدار مس مثل: مالاکیت و آزوریت و کربنات سرب مثل: سروسیت در چنین شرایطی تشکیل می‌شوند. سرب در گالن می‌تواند در شرایط اکسیدان مستقیماً به آنکلیزیت تبدیل شود. بررسی‌های تجربی نشان داده است که در چنین محیط‌هایی، ابتدا آنکلیزیت از اکسایش گالن تشکیل و با کاهش واکنش‌پذیری گالن، آنکلیزیت ناپایدار و بر اثر افزایش pH به سروسیت تبدیل می‌شود (Leverett et al., 2005) (شکل ۱۲). زیرا اسفالریت در محیط‌های برون‌زاد بسیار محلول است.

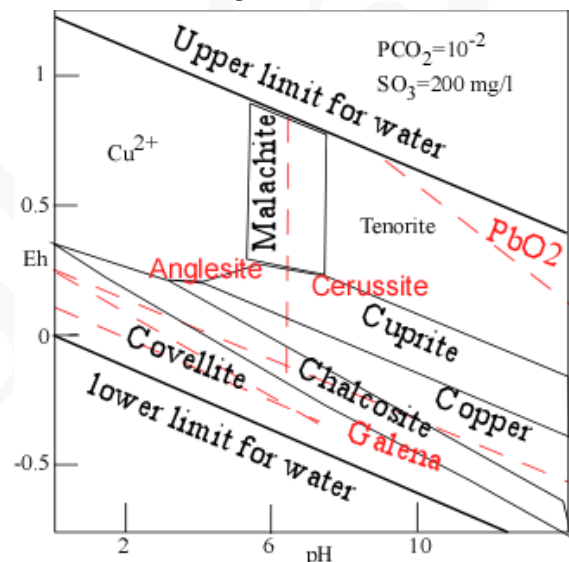
مالاکیت به آزریت تبدیل می‌شود. بنابراین، مقدار فعالیت CO_2 بیشتر در حد شرایط مالاکیت بوده است. برای تشکیل کانی‌های ثانویه در محیط‌های برون‌زاد علاوه بر Eh و pH، نفوذپذیری، حضور کاتیون‌های متحرک و دسترسی به CO_2 و S یا به شکل گاز اتمسفری یا محلول در سیالات مشتق شده از سنگ‌ها لازم است.

با توجه به اینکه کانه‌زایی در کانسار ماهور در یک گسل اتفاق افتاده و محدود به یک رگه معدنی برشی شده، محیط تشکیل دارای نفوذپذیری کافی بوده است. از طرفی، کاتیون‌های لازم از اکسایش سولفیدهای اولیه در هنگام برخورد با آب‌های زیرزمینی حاصل شده‌اند. کاتیون‌های مس، روی و سرب یا به وسیله آب‌های زیرزمینی یا آب‌های جوی از سطح زمین تا جایی که در رگه امکان نفوذ داشته، چرخش کرده است. رگه‌ها معمولاً مناطق نفوذپذیری هستند و شاید جریان آب در آنها تا اعماق زیاد ادامه پیدا کرده است. این آب‌ها شرایط اکسیدان را تا عمق زیادی حفظ می‌کنند. در مناطق خشک، معمولاً سطح آب زیرزمینی نیز پایین و وجود کالکوسیت به همراه هیدرواکسیدها و مالاکیت، حاکی از تغییرات شرایط اکسایش و بالا و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در عمق رگه است. یکی از نکات جالب توجه تأمین CO_2 و SO_4 است. با توجه به حضور سنگ‌های آندزیتی و بازالتی غنی از پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار، رگه‌های متعددی از کلسیت‌های بلوری تشکیل شده است. گسترده‌گی کلسیت‌های ثانویه در منطقه واقعاً زیاد و این حاکی از منابع کافی CO_2 در منطقه است. گوگرد نیز از سولفیدهای اولیه تأمین شده است.

نتیجه‌گیری

در کانسار پلی‌متال ماهور، اثرات اکسایش تا

محصولات ثانویه روی، در شرایط اکسیدان، فقط در صورتی تشکیل می‌شوند که اقلیم منطقه خشک یا نیمه‌خشک باشد (Guilbert and Park, 1986). نقره نیز در چنین محیط‌هایی رفتاری شبیه به مس و سرب و روی دارد. یکی از کانی‌های فراوان در کانسار ماهور مالاکیت است که در دمایی پایین و در شرایط اندکی اسیدی و در فشار CO_2 $10^{-1.5}$ تا $10^{-2.5}$ اتمسفر پایدار است (چنین شرایطی از فشار CO_2 آب‌های زیرزمینی معمول است) در حالی که فشار CO_2 در آب‌های جوی متعادل با اتمسفر فعلی، کمتر از $10^{-3.4}$ است (Rose, 1989) (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمودار pH-Eh نشان‌دهنده محدوده پایداری فازهای مس‌دار (خطوط ممتد) و سرب‌دار (خطوط منقطع) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار یک اتمسفر (Putter, et al., 2010)

بنابراین، مالاکیت یا در محیط‌های اشباع از آب‌های زیرزمینی یا در شرایط گذشته که مقدار فشار CO_2 بالاتر بوده، تشکیل شده است (Putter et al., 2010). آتاکامیت نیز در محدوده مالاکیت تشکیل می‌شود به شرط اینکه عناصر تشکیل‌دهنده آن، غلظت کافی را در سیال داشته باشند. با افزایش فعالیت CO_2 ، دامنه پایداری

فعالیت CO_2 متناسب با محدوده پایداری این کانی است. در این کانسار، کانی‌هایی وجود دارند که مشابه با کولیت هستند و می‌توان از کانی‌های جدید با فرمول $\text{S}(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn})$ و $\text{S}(\text{Cu}, \text{Zn})$ نام برد. علت حضور بعضی از عناصر در کانی‌های تجزیه شده که جمع عناصر آنها بیش از ۲ درصد وزنی با ۱۰۰ اختلاف دارند، ممکن است به علت ناخالصی‌های زیر میکروسکوپی باشد. حضور و فراوانی نقره در اکثر کانی‌های برون‌زاد بیانگر پتانسیل بالای این عنصر در منطقه است.

بیش از ۱۰۰ متر از سطح زمین دیده می‌شود. وجود کالکوسیت و کولیت از سطح تا عمق ۱۵۰ متری نشان‌دهنده تغییر مکرر شرایط تشکیل است که شاید به علت تغییر سطح آب زیرزمینی و شرایط اکسایش-کاهش بوده است. وجود کانی‌هایی مانند آنگلیزیت و سروسیت نشانه اسیدی بودن محیط و بیانگر pH حداقل حدود ۶ است. وجود آزوریت، سیدریت و حتی سروسیت، بیانگر فعالیت بالای CO_2 است. اگرچه با توجه به فراوانی زیاد مالاکیت در کانسار ماهور

منابع

- Aghanabati, A. (2004) Iran geology. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Berberian, M. and King, G. C. (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18: 210-265.
- Emami, M. H. (2000) Magmatism in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Esform, M. (2011) Geology and paragenetic sequence of minerals in Mahoor polymetallic deposit, west of Nehbandan (east of Iran). MSc thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (in Persian).
- Evans, A. M. (1993) Ore geology and industrial minerals-an introduction. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Guilbert, J. M. and Park, C. F. (1986) The geology of ore deposits. Freeman, San Francisco Leverett Pulplication, McKinnon.
- Hitzman, M. W., Reynolds, N., Sangster, D. F., Allen, C. R. and Carman, C. (2003) Classification, genesis and exploration guides for non-sulfide zinc deposits. Economic Geology 98: 685-714.
- Hosseini, Z. (1992) Dehsalm geological quadrangle map 1:250000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Leverett, P., McKinnon, A. R. and Williams, P. A. (2005) Supergene geochemistry of the Endeavor ore body, Cobar, NSW, and relationships to other deposits in the Cobar basin. In: regolith 2005: ten years of CRC LEME (Ed. Roach, I. C.) 191-194. Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration (CRC LEME), Canberra.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Yang, H. M., Chu, C. H., Lee, H. Y. and Lo, C. H., (2012) Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. Chemical Geology 306-307: 40-53.
- Pourhosseini, F. (1981) An investigation on genesis of Iran igneous bodies, investigation of Natans and Bazman intrusive. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Putter, T. D., Mees, F., Decrée, S. and Dewaele, S. (2010) Malachite, an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment (Katanga, Democratic Republic of Congo). Ore Geology Reviews 38: 90-100.
- Rose, R. (1989) Mobility of copper and other heavy metals in sedimentary environments. In: Sediment-Hosted stratiform copper deposits (Eds. Boyle, R. W., Brown, A. C., Jefferson, C. W., Jowett, E. C.

and Kirkham, R. V.) Special paper 36: 97-110 Geological Association of Canada.

Sillitoe, R. H. (2005) Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology* 100: 723-768.

Stocklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran, a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52(7): 1229-1258.

Petrology

Occurrence and chemistry of supergene sulfide and oxide minerals in Mahour polymetal ore deposit west of Nehbandan

Mohammad Boomeri ^{1*}, Habib Biabangard ¹, Kazuo Nakashima ² and Morteza Esform ¹

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Earth and Environmental Sciences, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-Machi, Yamagata, Japan

Abstract

Mahour polymetal ore deposit is located in the eastern margin of Lut block, 130 Km west of Nehbandan. The supergene mineralization mainly occurs as a north-south trend in the Tertiary altered volcanic rocks. The supergene minerals mainly occur as iron hydroxide, Cu-carbonates, Cu and Pb sulfates and Cu sulfides. Goethite, malachite, azurite, chalcocite, covellite, linarite and atacamite are common supergene minerals in the Mahour ore deposit that were formed by oxidation of the hypogene sulfides. Some of these minerals were analyzed by electron probe microanalyses (EPMA). Ag content is considerable in most of these minerals. Covellite from the Mahour has high Pb, Zn and Ag contents. The chemistry of the supergene minerals and the way of their formation will be discussed in this paper.

Key words: Oxidation, Hypogene Cu mineralization, Mahour, Lut block