پتـــــرولوژی، سال چهارم، شماره چهاردهم، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۷-۳۰
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۱۲

پیدایش و شیمی‌کانی‌های 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 ترشیاری 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 ریزپردازشگر الکترونی تجزیه شدند. مقدار نقره در بیشتر این کانی‌ها در خور توجه است. کوولیت در کانسار ماهور دارای سرب، روی و نقره بالایی است. شیمی‌کانی‌های 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

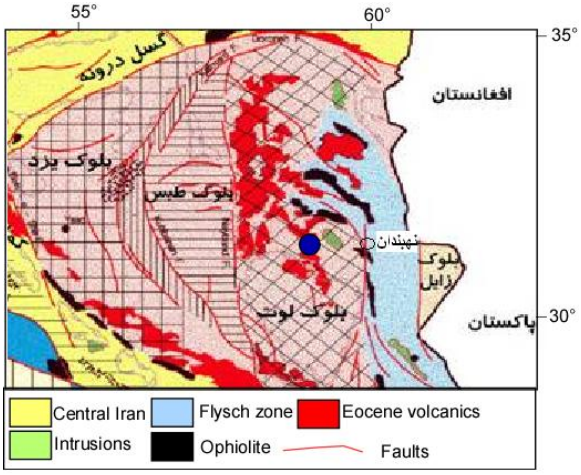
* boomeri@hamoon.usb.ac.ir

اکسیدان معروف است، هیدروکسیدهای آهن مثل گوتیت و لیمونیت به مقدار زیادی باقی می‌مانند و تشکیل یک کلاهک آهنی یا گوسان را می‌دهند و کانی‌های مالاکیت و آزوریت، کربنات‌ها و سولفات‌های روی و سرب معمولاً در زیر این کلاهک 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، سولفاته و دارای ویژگی‌های اکساینده 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).

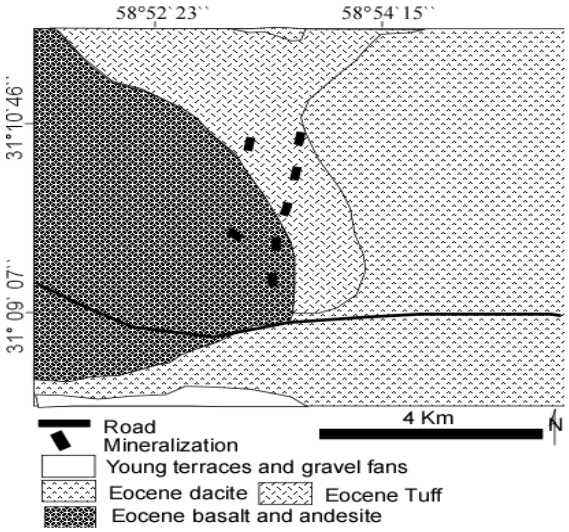
با توجه به شدت و گسترش کلاهک آهنی و فراوانی کربنات‌ها و سولفات‌های مس، سرب و روی در این منطقه، عملیات اکتشافی برای رسیدن به ذخایر ارزشمند در عمق توسط بخش خصوصی در حال انجام است. ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی و توالی پاراژنزی کانی‌های موجود در این منطقه توسط Esform (۲۰۱۱) بررسی شده است. هدف از این پژوهش، بررسی شیمی‌کانی‌ها و نحوه کانه‌زایی برون‌زاد درکانسار 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 می شود و مرز شمالی آن گسل درونه و مرز جنوبی 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 کیمرین پیشین واقع شده‌اند. اگرچه فعالیت آتشفشانی و پلوتونیسم از ژوراسیک میانی (سیمرین 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. سنگ های آتشفشانی نئوژن و کواترنر که کم‌وبیش بازیک و بیشتر از نوع بازالتی‌اند، محدود به گسل‌ها و شکستگی‌های محدود کننده بلوک لوت هستند. در منتهی الیه 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 بازانیت، آندزیت بازالتی و تفریت 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.



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



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

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، درشمال 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 کالک‌آلکالن 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 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 ماکروسکپی 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 ۲×۱۰^{-۸} آمپر تعیین شده است. قطر پرتوی الکترونی ۵ میکرون و غلظت داده‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری ZAF محاسبه شده است. عناصری چون: Ag، As، Au، Bi، Cd، Cu، Fe، Hg، Mn، Pb، S، Sb، Te و Zn

به طور کمّی اندازه‌گیری شدند.

کانه‌زایی

کانـه‌زایـی بـه صـورت رخنمـون‌هـای تپـه ماننـد و ناپیوسـته از هیدروکسـیدهای آهـن، مـس، سـرب و روی در محـدوده بررسـی شـده دیـده مـی‌شـود کـه تقریباً امتداد آنها شـمال‌شـرق-جنـوب‌شـرق اسـت. بـر اسـاس برداشـت‌هـای ژئـوفیزیکی، کانـه‌زایـی در ایـن امتـداد تـا بـیش از ۴ کیلـومتر نیـز وجـود دارد (Esform, 2011). در بعضـی از نقـاط، کانـه‌زایـی در دو رگـه مـوازی تقریبـاً عمـودی رخ داده اسـت. ضخامت بخش پُر عیـار رگـه‌هـا، بـه بـیش از یـک متـر نیـز مـی‌رسـد ولـی ضـخامت پهنـه شـدیداً دگرسـان شـده و برشـی شـده حـاوی پیریـت حـدود ۱۰۰ متـر است. تپه‌هـای غنـی از هیدروکسـید آهـن یـا کلاهـک آهنـی گسـترش عمقـی در خـور تـوجهی دارنـد بـه طـوری کـه آثـار آن تـا اعمـاق بـیش از ۵۰ متـر نیـز دیـده مـی‌شـود. ایـن کلاهـک آهنـی دارای رنـگ‌هـای قرمز، قهوای، زرد و سـفید اسـت و کـانی‌هـای مـس‌دار به رنگ سبز و آبـی نیـز در آن بـه فراوانـی وجـود دارد. پیریـت تنهـا کـانی سـولفیدی اسـت کـه در سـطح مشـاهده مـی‌شـود، ولـی بـا افـزایش عمـق نسـبت سولفیدها افـزایش مـی‌یابـد. بـه طـوری کـه در اعمـاق بـیش از ۱۰۰ متـر هیدروکسـیدهای آهـن کمیـاب و فقـط رگچـه‌هـایی از مالاکیـت مشـاهده مـی‌شـود. کانـه‌زایـی در کانسـار مـاهور را مـی‌تـوان بـه دو نـوع درون‌زاد یـا هیپـوژن و بـرون‌زاد یـا سـوپرژن تقسـیم‌بنـدی کـرد. بـر اسـاس درجـه اکسـایش، کانـه‌زایـی در کانسـار مـاهور را مـی‌تـوان از سـطح بـه عمق به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- پهنـه بـرون‌زاد اکسـیدی کـه در سـطح رخنمـون داشـته و بیشـتر از هماتیـت، گوتیـت، لیمونیـت، ژاروسـیت، مالاکیـت، آزوریـت، کربنـات‌هـا و سـولفات‌هـای سـرب و روی تشـکیل شـده اسـت (شـکل ۳). پیریـت و گـالن از سـولفیدهایی اسـت کـه در این پهنه حضور دارند.

۲- پهنـه بـرون‌زاد اکسـیدی-سـولفیدی، تفـاوت ایـن پهنـه بـا پهنـه بـرون‌زاد اکسـیدی، حضـور کـانی‌هـای سولفیدی چون کالکوسیت است.

۳- پهنـه بـرون‌زاد سـولفیدی، ایـن پهنـه بیشـتر از کالکوسیت، دیژینیت و کوولیت تشکیل شده است.

۴- پهنه تدریجی یـا انتقـالی بـرون‌زاد بـه درون‌زاد کـه سـولفیدهای اولیـه‌ای ماننـد کالکوپیریـت، گـالن و اسـفالریت بـا سـولفیدهای ثانویـه چـون: کوولیـت و کالکوسیت مشاهده می‌شود.

۵- پهنـه درون‌زاد، ایـن پهنـه بیشـتر از سـولفیدهای اولیـه چـون: کالکوپیریـت، گـالن، اسـفالریت و سولفیدهای نقره‌دار تشکیل شده است.

پیریـت در تمـام پهنـه‌هـای مـذکور یکـی از کـانی‌هـای فـراوان اسـت و رگچـه‌هـای مالاکیـت و آزوریـت تـا اعمـاق بـیش از ۱۰۰ متـر از سـطح زمـین مشاهده می‌شوند.

شـکل ۳- تصـاویری از کانـه‌زایـی بـرون‌زاد در کانسـار مـاهور. الـف) تشـکیل رگچـه‌هـای گـالن در یـک پهنـه اکسـیدان، ب) رگـه حـاوی گـالن در زیـر ماسـه‌هـا، ج) کـانی‌زایـی آهـن و مس، د) کانه‌زایی آهن و مس

دگرسانی

دگرسـانی‌هـای گرمـابی در اطـراف رگـه‌هـای معـدنی در کانسـار مـاهور گسـترش زیـادی دارنـد.

انواع دگرسانی از مرکز رگه به اطراف شامل آرژیلیک، سریسیتیک و پروپیلیتیک است. دگرسانی سیلیسی و کربناتی نیز در همه این دگرسانی‌ها دیده می‌شود. رگه معدنی بیشتر دچار دگرسانی شدید شده که گسترش کلاهک 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، سریسیت، 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 سریسیتی پس از دگرسانی سیلیسی، مهم‌ترین و اصلی‌ترین دگرسانی اولیه در منطقه ماهور است که از سریسیت، کوارتز و پیریت تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی که ماهیت اولیه آنها به داسیت نسبت داده شده (Esform, 2011) دچار دگرسانی سریسیتی 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 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 جعبه مانند و اشکال متنوعی که نشانه بافت‌های ثانویه و حرکت محلول‌های کم دما در محیط‌های سطحی است (Guilbert and Park, 1986) از ویژگی‌های آن در کانسار ماهور است. رنگ‌های متنوعی که در نور منعکسه دیده

مـــی‌شـــود و دارای انعکـــاس پـــایینی هســـتند بیـــانگر همراهی دیگر کانی‌هـای ایـن گـروه بـه ویـژه لیمونیـت و ژاروسیت است (شکل ۴-د).

مالاکیت

مالاکیـت از فـراوان‌تـرین کـانی‌هـا در بخـش‌هـای سـطحی اسـت و در امتـداد شکسـتگی‌هـا تـا منـاطق عمیق مشاهده می‌شـود. ایـن کـانی بیشـتر بـه صـورت رگچـه‌ای تشـکیل شـده اسـت (شـکل ۵-الـف و ب). مالاکیـت در زیـر میکروسـکوپ هماننـد نمونـه‌هـای ماکروســـکوپی، رنـــگ ســـبز تیـــره دارد. هرچنـــد مالاکیـت بیشـتر دارای بافـت کلـوفرمی اسـت امـا نمونه‌هـای کانسـار مـاهور بیشـتر دارای بافـت تـوده‌ای و رگچـــه‌ای هســـتند. آزوریـــت، یکـــی دیگـــر از کربنـات‌هـای مـس اسـت کـه معمـولاً بـا مالاکیـت مشـاهده مـی‌شـود. مقـدار آزوریـت در کانسـار مـاهور کمتر از مالاکیت است.

آتاکامیت

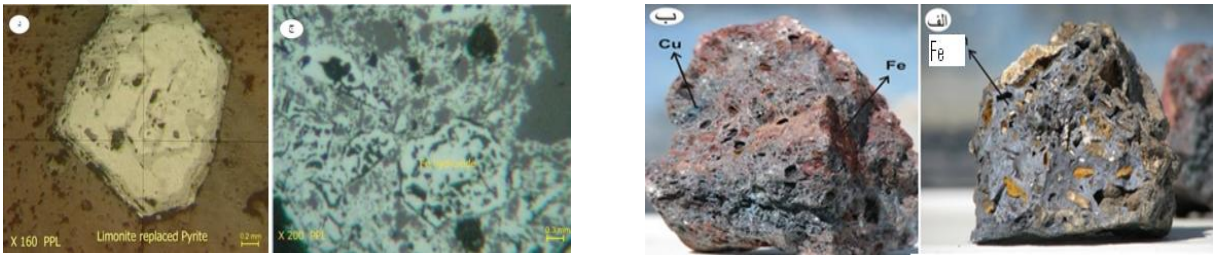
آتاکامیت در کانسـار مـاهور سـبز روشـن تـا تیـره و شبیه مالاکیـت اسـت و تفـاوت آنهـا حالـت دانـه دانـه بودن آتاکامیـت اسـت. تشـخیص ایـن کـانی در نمونـه دستی و زیـر میکروسـکوپ از مالاکیـت مشـکل اسـت. بررسـی‌هـای XRD وجـود ایـن کـانی را در کانسـار ماهور مشخص نمود (شکل ۶).

کالکوسیت

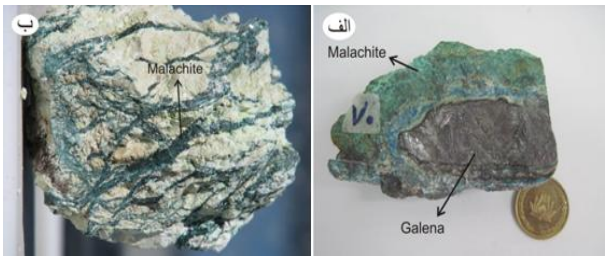
کالکوسـیت مشـاهده شـده در کانسـار مـاهور در زیـــر میکروســـکوپ دارای رنـــگ خاکســـتری، بیرفلکتانس و انیزوتروپـی اسـت (شـکل ۷). ایـن کـانی دارای بافـت جانشـینی و شـکل کـاذب اسـت کـه از تجزیـــه کالکوپیریـــت حاصـــل شـــده اســـت. در قسـمت‌هـای سـطحی بقایـای کالکوپیریـت دیـده نمی‌شود ولـی بـه دلیـل وجـود کالکوپیریـت در اعمـاق و نبـــود کالکوســـیت یـــا کـــاهش درصـــد آن در نمونـه‌هـای گرفتـه شـده از عمـق، مـی‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه کالکوسـیت از تجزیـه کالکوپیریـت حاصـل شـده اسـت. دیژینیـت نیـز معمـولاً همـراه کالکوسـیت وجود دارد.

کوولیت

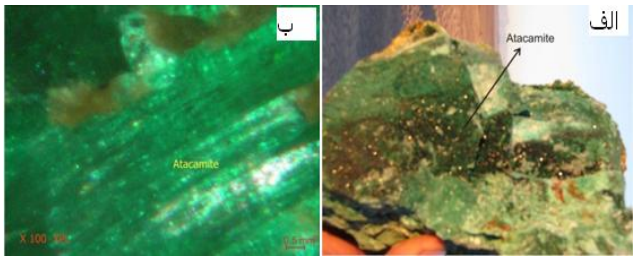
رنـگ کوولیـت در زیـر میکروسـکوپ آبـی و دارای بیرفلکتانس، چنـد رنگـی و انیزوتروپـی شـدیدی اسـت (شـکل ۸). ایـن کـانی نـه تنهـا در منـاطق سـطحی، بلکـه در عمـق نیـز مشـاهده مـی‌شـود و بـه ویـژه در منـاطق برشـی شـده گسـترش بیشـتری دارد. ایـن کـانی نیـز جانشـین کالکوپیریـت شـده اسـت و حالـت برشی دانه‌های آن ارثـی اسـت. تعـداد زیـادی کـانی بـا رنـگ و ویژگـی‌هـای کوولیـت در کانسـار مـاهور هسـتند کـه ترکیبـاتی از مـس، روی و سـرب دارنـد. تفکیک آنها در میکروسکوپ مشکل است.



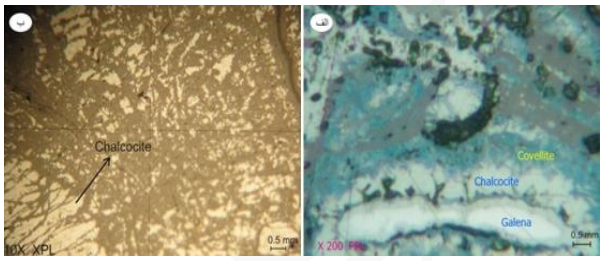
شـکل ۴- نمونـه‌هـایی از بخـش کلاهـک آهنـی در کانسـار مـاهور، الـف) لکـه‌هـای لیمونیـت در فضـاهای خـالی و سـاخت کلـوفرمی کـه در درون فضاها دیده مـی‌شـود. ب) لکـه‌هـای قرمـز از هیدروکسـید آهـن و حضـور مالاکیـت همـراه آنهـا، ج) گوتیـت در زیـر میکروسـکوپ کـه کاملاً جانشین پیریت شده است. د) لیمونیت نیز به جای پیریت قرار گرفته است.



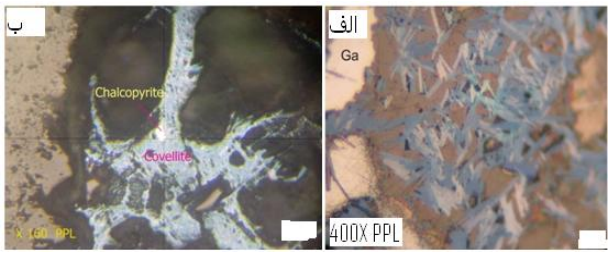
شکل ۵- الف) اطراف گالن را مالاکیت و لیناریت فرا گرفته‌اند. ب) رگچه‌های مالاکیت، سنگ دگرسان شده را قطع کرده‌اند.



شکل ۶- تصاویری از آتاکامیت. الف) در نمونه دستی، 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.

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 منعکسه مشکل است. سروسیت ببیشتر 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

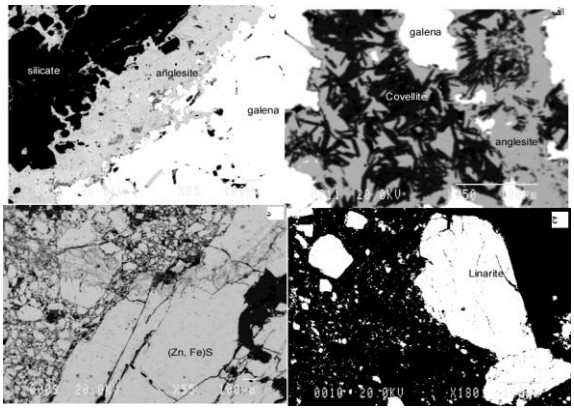
کانه‌زایی در کانسار ماهور شامل دو مرحله مشخص درون‌زاد (اولیه) و برون‌زاد (ثانویه) است. در مرحله درون‌زاد فازهای تشکیل شده بیشتر سولفیدهای اولیه‌ای چون کالکوپیریت، اسفالریت و گالن هستند. در مرحله برون‌زاد، این سولفیدهای اولیه تجزیه شده و به جای آنها هماتیت، هیدروکسیدهای آهن و انواع کانی‌های ثانویه مس،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

جـدول ۱- نمـودار پـاراژنز تعـدادی از کـانی‌هـای موجـود 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

شـــیمی بعضـــی ســـولفیدها، کربنـــات‌هـــا و سولفات‌هـای ثانویـه در کانسـار مـاهور کـه جمـع کـل عناصر تشـکیل‌دهنـده آنهـا بـیش از ۲ درصـد وزنـی از ۱۰۰ فاصـله دارد از نظـر اسـتوکیومتری ایـده‌آل بـه نظر نمی‌رسـد کـه ممکـن اسـت بـه چنـد علـت باشـد: ۱) خیلی از این فازهـا در ترکیـب خـود حـاوی عناصـر فـرار ماننـد دی اکسـید کـربن، اکسـیژن و آب هسـتند که یا تجزیه آنهـا بـا EMPA مشـکل اسـت، یـا ممکـن اسـت آن عنصـر جـزو عناصـر انتخـاب شـده بـرای تجزیـه نباشـد. ۲) ایـن کـانی‌هـا جانشـین کـانی‌هـای اولیـه شـده‌انـد و ممکـن اسـت ذرات ریـز زیـر میکروسـکوپی و شکسـتگی‌هـای مخفـی باعـث خطـا شـده باشـد. هرچنـد، همـانطور کـه در شـکل ۹ مشـاهده مـی‌شـود، سـطح تجزیـه هـم بـزرگ و هـم کاملاً صـاف اسـت و کـانی‌هـای تجزیـه شـده ظـاهراً از یک فاز تشکیل شده‌انـد. فرمـول‌هـای بـه دسـت آمـده برای کـانی‌هـایی کـه جمـع عناصـر آنهـا از ۹۸ تـا ۱۰۲ درصـد وزنـی هسـت، واقعـی و از نظـر اسـتوکیومتری صحیح است. فرمـول‌هـای بـه دسـت آمـده بـرای تمـام کـانی‌هـا، بـر حسـب اتـم در فرمـول، در بخـش پـایین جدول‌ها ذکر شده است.



شکل ۹- تصاویر BSI از نمونـه‌هـای گرفتـه شـده از کانسـار مـاهور. الف) تبدیل گالن به کانی‌های ثانویه سرب و مس، ب) سولفات سرب از حاشیه جانشین گالن شده است، ج) خردشدگی کانـه‌هـایی مثـل لیناریت یا کوولیـت کـه دارای شـکل کـاذب هسـتند، د) بخشـی از اسفالریت به شدت خرد و برشی شده است.

کوولیت

اگرچـه در فرمـول نظـری کوولیـت ۶۶ درصـد مـس وجـود دارد ولـی شـیمی ایـن کـانی در کانسـار مـاهور تنوع زیادی را ازخود نشـان مـی‌دهـد و عناصـری چـون: روی، سـرب و نقـره بـه مقـدار در خـور تـوجهی در شـبکه آن وارد شـده‌انـد (جـدول ۲). بـه نظـر مـی‌رسـد کـه کوولیـت بـا نقـره، اسـفالریت و گـالن در کانسـار مـاهور، سـری محلـول جامـدی را تشـکیل داده باشـند. کوولیـت‌هـایی کـه دارای سـرب هسـتند، از نظـر مقـدار نقره نیز غنی‌اند. رابطه بـین سـرب و نقـره کـاملاً مثبـت نیسـت و در کـوولیتی کـه ۴/۳۵ درصـد نقـره دارد، مقـدار سـرب فقـط ۰/۳ درصـد اسـت در حـالی کـه کوولیتی بـا ۰/۱۱ درصـد نقره، حـدود ۸ درصـد سـرب دارد. در کوولیـت‌هـایی کـه مقـدار در خـور تـوجهی روی وارد شـده‌انـد مقـدار نقـره کـم اسـت. فرمـول‌هـای محاسـبه شـده در بخـش پـایین جـدول ۲ ببیشـتر بـا فرمول نظری کوولیت مطابقت زیادی دارند.

در جـدول ۳ ترکیبـاتی وجـود دارنـد کـه فرمـول آنها با کوولیت واقعـی متفـاوت هسـت. بـه طـوری کـه به جای مس در شـبکه کوولیـت، مقـدار قابـل تـوجهی

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

جدول ۲- شیمی کوولیت 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

جدول ۳- شیمی کوولیت 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

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 کوولیت 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 ۷/۸۳درصد وزنی 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 ppmرسیده 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 درهم رشدی 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

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

آنگلزیت

آنگلزیت با فرمول $PbSO_4$ شناخته شده و در ترکیب این کانی ۷۴ درصد سرب، ۸/۵ درصد گوگرد و ۱۷/۵درصد 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 آنگلزیت، ولی با فرمول ایده‌آل این کانی اندکی فاصله دارد.

سروسیت

سروسیت با فرمول $PbCO_3$ شناخته می‌شود که حدود ۷۷/۵درصد 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 سولفاتی و 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.

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

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 درفرمول								
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 ۵- شیمی لینایت 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	0.00	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

جدول ۶- شیمی آنگلزیت 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	0.06	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	0.000	0.072	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

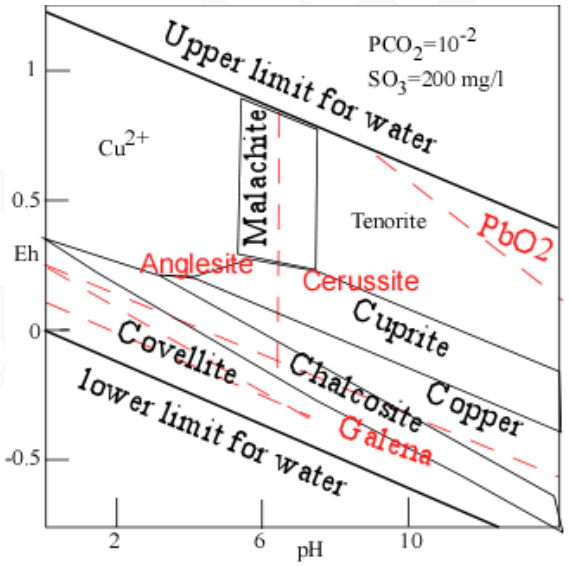
جدول ۷- شیمی سروسیت بر حسب درصد وزنی در کانسار ماهور

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
تعداداتم 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 CO_2، 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 آنگلزیت تبدیل شود. بررسی‌های تجربی نشان داده است که در چنین محیط‌هایی، ابتدا آنگلزیت از اکسایش گالن تشکیل و با کاهش واکنش‌پذیری گالن، آنگلزیت ناپایدار و بر اثر افزایش pH به سروسیت تبدیل می‌شود (Leverett *et al.*, 2005) (شکل ۱۲). زیرا اسفالریت در محیط‌های برون‌زاد بسیار محلول است.

محصـولات ثانویـه روی، در شـرایط اکسـیدان، فقـط در صورتی تشکیل مـی‌شـوند کـه اقلـیم منطقـه خشـک یـا نیمـه‌خشـک باشـد (Guilbert and Park, 1986). نقـره نیـز در چنـین محـیط‌هـایی رفتـاری شـبیه بـه مـس و سـرب و روی دارد. یکـی از کـانی‌هـای فـراوان در کانسـار ماهور مالاکیت اسـت کـه در دمـایی پـایین و در شـرایط انـــدکی اســـیدی و در فشـــار CO_2 $10^{-1.5}$ تـــا $10^{-2.5}$ اتمسـفر پایـدار اسـت (چنـین شـرایطی از فشـار CO_2 در آب‌هـای زیرزمینـی معمـول اسـت) در حـالی کـه فشـار CO_2 در آب‌های جوی متعـادل بـا اتمسـفر فعلـی، کمتـر از $10^{-3.4}$ است (Rose, 1989) (شکل ۱۲).



شـکل ۱۲- نمـودار pH-Eh نشـان‌دهنـده محـدوده پایـداری فازهـای مـس‌دار (خطـوط ممتـد) و سـرب‌دار (خطـوط منقطـع) در دمـای ۲۵ درجـه سـانتیگراد و فشـار یـک اتمسـفر (Putter, *et al.*, 2010)

بنـابراین، مالاکیـت یـا در محـیط‌هـای اشـباع از آب‌هـای زیرزمینـی یـا در شـرایط گذشـته کـه مقـدار فشـار CO_2 بـالاتر بـوده، تشـکیل شـده اسـت (Putter *et al.*, 2010). آتاکامیـت نیـز در محـدوده مالاکیـت تشـــکیل مـــی‌شـــود بـــه شـــرط اینکـــه عناصـــر تشـکیل‌دهنـده آن، غلظـت کـافی را در سـیال داشـته باشـند. بـا افـزایش فعالیـت CO_2، دامنـه پایـداری مالاکیت به آزوریـت تبـدیل مـی‌شـود. بنـابراین، مقـدار فعالیـت CO_2 بیشـتر در حـد شـرایط مالاکیـت بـوده است. بـرای تشـکیل کـانی‌هـای ثانویـه در محـیط‌هـای بـرون‌زاد عـلاوه بـر Eh و pH، نفوذپـذیری، حضـور کاتیون‌هـای متحـرک و دسترسـی بـه CO_2 و S یـا بـه شـکل گـاز اتمسـفری یـا محلـول در سـیالات مشـتق شده از سنگ‌ها لازم است.

بـا توجـه بـه اینکـه کانـه‌زایـی در کانسـار مـاهور در یک گسل اتفـاق افتـاده و محـدود بـه یـک رگـه معـدنی برشـی شـده، محـیط تشـکیل دارای نفوذپـذیری کـافی بـوده اسـت. از طرفـی، کـاتیون‌هـای لازم از اکسـایش سـولفیدهـای اولیـه در هنگـام برخـورد بـا آب‌هـای زیرزمینـی حاصـل شـده‌انـد. کـاتیون‌هـای مـس، روی و سـرب یـا بـه وسـیله آب‌هـای زیرزمینـی یـا آب‌هـای جوی از سطح زمین تـا جـایی کـه در رگـه امکـان نفـوذ داشـته، چـرخش کـرده اسـت. رگـه‌هـا معمـولاً منـاطق نفوذپـذیری هسـتند و شـاید جریـان آب در آنهـا تـا اعماق زیاد ادامـه پیـدا کـرده اسـت. ایـن آب‌هـا شـرایط اکسـیدان را تـا عمـق زیـادی حفـظ مـی‌کننـد. در منـاطق خشـک، معمـولاً سـطح آب زیرزمینـی نیـز پایین و وجـود کالکوسـیت بـه همـراه هیدرواکسـیدها و مالاکیـت، حـاکی از تغییـرات شـرایط اکسـایش و بـالا و پائین رفـتن سـطح آب زیرزمینـی در عمـق رگـه اسـت. یکـی از نکـات جالـب توجـه تـأمین CO_2 و SO_4 اسـت. با توجه به حضـور سـنگ‌هـای آنـدزیتی و بـازالتی غنـی از پلاژیـوکلازهـای کلسـیم‌دار، رگچـه‌هـای متعـددی از کلسـیت‌هـای بلـوری تشـکیل شـده اسـت. گسـتردگی کلسیت‌های ثانویـه در منطقـه واقعـاً زیـاد و ایـن حـاکی از منـابع کـافی CO_2 در منطقـه اسـت. گـوگرد نیـز از سولفیدهای اولیه تأمین شده است.

نتیجه‌گیری

در کانسـار پلـی‌متـال مـاهور، اثـرات اکسـایش تـا

بیش از ۱۰۰ متر از سطح زمین دیده می‌شود. وجود کالکوسیت و کوولیت 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 آنگلزیت 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 فعالیت CO_2 متناسب با محدوده پایداری این کانی است. در این کانسار، کانی‌هایی وجود دارند که مشابه با کوولیت هستند و می‌توان از کانی‌های جدید با فرمول S (Cu, Fe, Zn) و S (Cu, 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.

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 polymetalic 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 Puplication, 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 Sisatna 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, chalcosite, 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

* boomeri@hamoon.usb.ac.ir