

چگونگی فرایندهای برونزاد با تفسیری از کلاهِک شسته‌شده و منطقه غنی‌شده اکسیدی در کانسار چندفلزی ماهور، باختر ده‌سلم

سیمین‌دخت یونسی^۱، محمدرضا حسین‌زاده^{۲*} و محسن مؤید^۲

^۱دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

چکیده

کانی‌شناسی منطقه اکسیدان به عنوان اثری از اقلیم گذشته، نشانگر رخداد فرایندهای غنی‌شدگی برونزاد در کانی‌سازی Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهور در لوت مرکزی، طی دو مرحله اصلی است: در مرحله اول که فرایندهای برونزاد در اثر آب‌های جوی طی اقلیم خشک الیگوسن تا میوسن بالایی رخ داده، کلاهِک شسته‌شده شامل ژاروسیت، ناتروژاروسیت و گوتیت زیاد با نسبت‌های متغیر و مقدار کمی هماتیت و گوگرد به همراه دگرسانی آرژیلی برونزاد با کانی‌های کوارتز، آلونیت، کائولینیت، مونت‌موریلونیت و ژپیس تشکیل شده است. در پاسخ به خشی شدن محلول‌های برونزاد در آن اقلیم، اسمیت‌زونیت و مالاکیت فراوان در همراهی با نئوتوسیت، گرینوکیست و یا هاولیت و کمی آزوریت، کانی‌های سیلیکاتی، فسفاتی و آرسناتی در منطقه غنی‌شده اکسیدی نهشته شده‌اند و بنابراین، غنی‌شدگی سولفیدی نابالغ با نسبت بالای کولیت به کالکوسیت ایجاد شده است. در مرحله دوم، نهشت آتاکامیت، پاراتا کامیت و کریزوکولا از واکنش شوراها و اکسیدهای مس پیشین پس از آغاز اقلیم بسیار خشک در پلیوسن، صورت گرفته و از آن زمان تا به حال حفظ شده است. ویژگی‌های کانی‌شناسی کلاهِک شسته‌شده در ماهور رهیافتی بر نوع کانه‌ها و دگرسانی درونزاد فراهم می‌کند و نشان می‌دهد اسید کافی برای شستشوی مؤثر مس از منطقه اکسیدان تأمین نشده است و بنابراین، غنی‌شدگی کالکوسیتی گسترده را در زیر سطح ایستایی پیشنهاد نمی‌کند. تفسیری که کانی‌شناسی منطقه اکسیدان نیز گویای آن است و نتایج حاصل از گمانه‌های اکتشافی نیز آن را تأیید می‌کنند. بنابراین، با توجه به نوع کانی‌سازی ماهور و رخداد کانی‌سازی‌های مشابه در منطقه، بررسی جامع منطقه اکسیدان و نقشه‌کردن کلاهِک‌های شسته‌شده در مقیاس کانسار و ناحیه‌ای می‌تواند به عنوان ابزار اکتشافی مناسبی برای کانی‌سازی‌های پنهان به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: کلاهِک شسته‌شده، غنی‌شدگی اکسیدی و سولفیدی برونزاد، اسمیت‌زونیت، آتاکامیت، چندفلزی ماهور، بلوک لوت.

E-mail: mr-Hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

*نویسنده مسئول: محمدرضا حسین‌زاده

۱- پیش‌نوشتار

رخداد فرایندهای برونزاد و کانی‌شناسی محصولات آن در کانی‌سازی ماهور بحث نموده و تفسیری از کلاهِک شسته شده و منطقه غنی‌شده اکسیدی در رابطه با مقدار و نوع سولفیدهای درونزاد و غنی‌شدگی سولفیدی ارائه می‌دهند که می‌تواند به عنوان رهیافتی مفید برای اکتشاف و تعیین شواهد شاخصی از تاریخ آب‌وهوای گذشته در منطقه به کار برده شود.

۲- روش تحقیق

در راستای انجام این مطالعه، همزمان با نمونه‌برداری سطحی و عمقی واحدهای سنگی و بخش‌های کانه‌دار و دگرسان، نمونه‌های ترکیبی از توده‌های لیمونیتی و دگرسانی آرژیلی برونزاد به ویژه از ترانشه‌های واقع در نیمه شمالی محدوده معدنی - اکتشافی ماهور برداشت شد. این نمونه‌ها در شرکت کانساران بینالود به روش XRD آنالیز کیفی شدند. دو نمونه هماتیت برداشت شده از مرکز محدوده نیز در آزمایشگاه Actlabs کانادا جهت سنجش مقدار طلا به روش FA-INAA آنالیز شد. لاگینگ و بررسی ۲۴ گمانه حفاری به متر اژ حدود ۷۰۰۰ متر مغزه حفاری انجام شده توسط شرکت تحقیق و توسعه صنایع معدنی پارس کانی (۱۳۹۱) مورد بازنگری قرار گرفت. طی مطالعه جامع سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری مقاطع میکروسکوپی و آنالیز الکترون مایکروپروب (EPMA)، تعدادی از کانی‌های برونزاد نیز مورد آنالیز EPMA قرار گرفتند. EPMA در مرکز تحقیقات و فناوری مواد معدنی ایران (ایمیدرو) با استفاده از دستگاه مدل Cameca SX100 به روش WDS و کالیبره شده با استانداردهای مربوط صورت گرفت و تصاویر BSE نیز با همین دستگاه تهیه شد.

۳- زمین‌شناسی و کانی‌سازی در محدوده ماهور

محدوده معدنی - اکتشافی ماهور در مرکز بلوک لوت (خاوری‌ترین بخش خردقاره ایران مرکزی؛ آق‌آبانی، ۱۳۸۳)، به تقریب در جنوبی‌ترین بخش کمربند

با رخنمون یافتن یا نزدیک سطح زمین قرار گرفتن توده‌های معدنی اولیه، اکسایش، انحلال و تمرکز دوباره فلزات سبب تشکیل کانسارهای فلزی برونزاد می‌شود که نه تنها به علت عیارهای افزایش یافته فلزات و قابلیت دسترسی برای استخراج جالب توجه هستند، بلکه تنوع کانی‌شناسی و آنچه در مورد تاریخ سطحی نشان می‌دهند از نظر علمی جذاب است و شواهدی از آب‌وهوای گذشته و فرصت بی‌نظیری برای اکتشاف فراهم می‌کنند (Reich and Vasconcelos, 2015). به باور Anderson (1982) کانی‌شناسی لیمونیت‌ها (مجموعه‌ای از گوتیت، لپیدوکروسیت، هماتیت و ژاروسیت به همراه کوارتز؛ Sillitoe, 2005) و اکسیدهای مس در بخش کلاهِک معرف‌های حساس کانی‌شناسی و محتوای سولفیدی هستند و نوع چیره کانی لیمونیت شامل گوتیت (رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز)، ژاروسیت (رنگ طلایی خردلی) و هماتیت (رنگ قرمز) در کلاهِک‌ها به عنوان برآوردی از مقدار کانی‌سازی درونزاد و چگونگی غنی‌شدگی برونزاد در کانسارهای پورفیری می‌تواند به کار برده شود. لوده‌های کردیلرن نیز همچون کانسارهای پورفیری می‌توانند در اثر محلول‌های پایین‌رو متحمل دگرسانی و غنی‌شدگی برونزاد شوند (Guilbert and Park, 1986). کانی‌سازی لود چندفلزی کردیلرن در محدوده ماهور (یونسی و همکاران، ۱۳۹۶) در ۳۵ کیلومتری باختر روستای ده‌سلم و در شمال کویر لوت واقع شده است. تاکنون فرایندهای برونزاد و تفسیر کلاهِک شسته شده (کلاهِک آهنی و دگرسانی آرژیلی برونزاد) و مناطق غنی‌شده اکسیدی و سولفیدی در این محدوده بررسی و بحث نشده است. مطالعات پیشین (شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، ۱۳۹۱؛ میرزایی‌راینی و همکاران، ۱۳۹۱ و بومری و همکاران، ۱۳۹۲) شامل گزارش حضور برخی از کانی‌های برونزاد و گاه اشاره به ترکیب و شرایط عمومی تشکیل برخی از این کانی‌ها بوده است. یونسی و همکاران (۱۳۹۶) نیز لیست به نسبت کاملی از حضور کانی‌های برونزاد گزارش کرده‌اند. نگارندگان در این مقاله در مورد چگونگی

و بخش‌های بالاتر گمانه‌ها چیره‌تر بوده و به‌طور رایج در این بخش‌ها گالن و یا سولفوسالت بیسموت آن را همراهی کرده است (شکل ۲- c). این کانی در مواردی از حاشیه به گیریت (یکی از کانی‌های حدواسط کولیت و کالکوسیت برونزاد که اسفالریت را جانشین می‌کند؛ Barnes, 1997) و یا کولیت تبدیل شده است (شکل ۲- d). کانه‌زایی مس در بخش‌های عمیق گمانه‌ها و همچنین بیشتر در بخش باختری و شمالی کانسار دیده می‌شود و بیشتر شامل کالکوپریت است که مقدار قابل توجهی سولفوسالت‌های مس، سولفوسالت‌های بیسموت، اسفالریت فقیر از آهن و در بخش‌هایی گالن، گرینوکیت درونزاد و به مقدار کم آرسنوپریت و دیژنیت نیز افزون بر حضور اسفالریت آهن‌دار آن را همراهی کرده‌اند و همراه دیژنیت کمی بورنیت نیز دیده می‌شود (شکل‌های ۲- e, f, g, h, i, j و k). اسفالریت‌های فقیر از آهن درونزاد توسط میرزایی‌رایی و همکاران (۱۳۹۱) به بورنیت برونزاد و در گزارش لاگینگ مغزه‌های حفاری و مطالعه میکروسکوپی شرکت تحقیق و توسعه صنایع معدنی پارس کانی (۱۳۹۱) به ترتیب به بورنیت و هیدروکسید آهن نسبت داده شده‌اند. نقره به مقدار قابل توجه در شبکه برخی کانی‌ها (روتیل داخل بیوتیت سریستی شده، انواع سولفوسالت‌های بیسموت به جز گروه مشتقات بیسموتینیت، گالن، تراهدریت و کولیت) حضور دارد و مقدار قابل اغماضی کانی‌های تنگستن طلا‌دار به‌طور محلی رخ داده‌اند. در بخش‌های تحت اثر فرایند برونزاد، کالکوپریت از حاشیه و درز و شکستگی‌ها به‌صورت بخشی و گاه کامل توسط کولیت تیغه‌ای (شکل‌های ۲- e, h, m) و دیژنیت (شکل ۲- l) جانشین شده و اسفالریت فقیر از آهن نیز کولیتی شده است (شکل‌های ۲- i, h, m, n). جانشینی سولفوسالت‌ها توسط دیژنیت (شکل ۲- g) و کولیت برونزاد (شکل ۲- n) به مقدار کم دیده می‌شود و ویژگی‌ها در حاشیه و شکستگی‌های برخی از سولفوسالت‌های بیسموت رخ داده است (شکل‌های ۲- n و o). گالن توسط آنگلیزیت، سروزیت و گاه لیناریت جانشین شده است (شکل ۲- p). اسفالریت‌های حفظ شده از فرایند برونزاد شامل ۰/۲ تا ۰/۴۵ درصد وزنی کادمیم هستند.

در محدوده ماهور، دگرسانی سریستی تورمالین‌دار پیش از کانی‌سازی رخ داده است. دگرسانی سریستی (شامل مؤلفه سیلیسی) هاله دگرسانی درونزاد رگه-رگچه‌های کوارتز-پیریت و کانی‌سازی غنی از مس بوده که به‌سمت خارج به دگرسانی‌های آرزیلی متوسط و پرویلیتی منطقه‌بندی شده است و در منطقه غنی از مس شامل کانی‌های سولفیداسیون بالا به‌صورت محلی شواهدی از هاله دگرسانی آرزیلی پیشرفته در آن دیده می‌شود. رگه-رگچه‌های اسفالریت آهن‌دار با هاله دگرسانی سریستی، آرزیلی متوسط و در مواردی کوارتز-آدولاریا تشکیل شده‌اند (یونسی و همکاران، ۱۳۹۶).

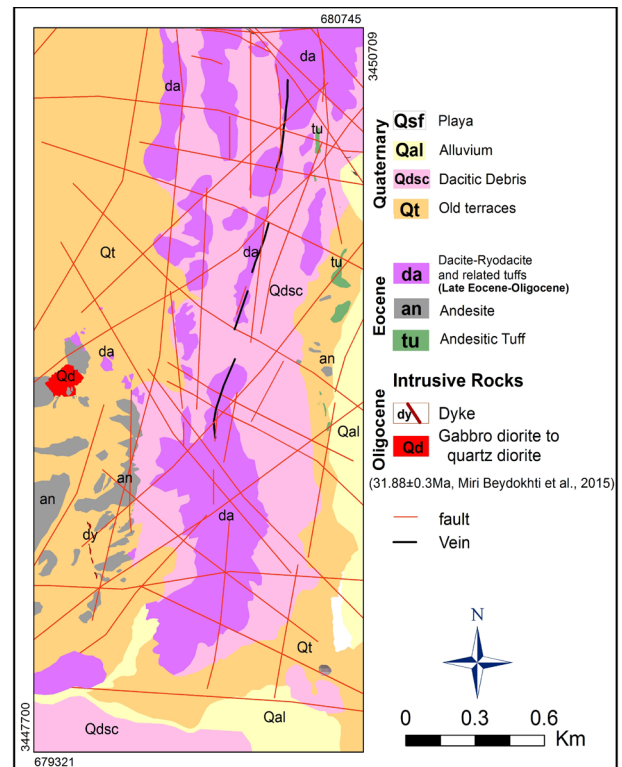
۴- فرایندهای برونزاد در کانی‌سازی چندفلزی ماهور

پس از پایان فعالیت گرمایی در ماهور، محلول‌های پایین‌رو و شورابه‌ها سبب گسترش محصولات فرایندهای برونزاد به شرح زیر شده‌اند:

۴-۱. کلاهیک شسته شده

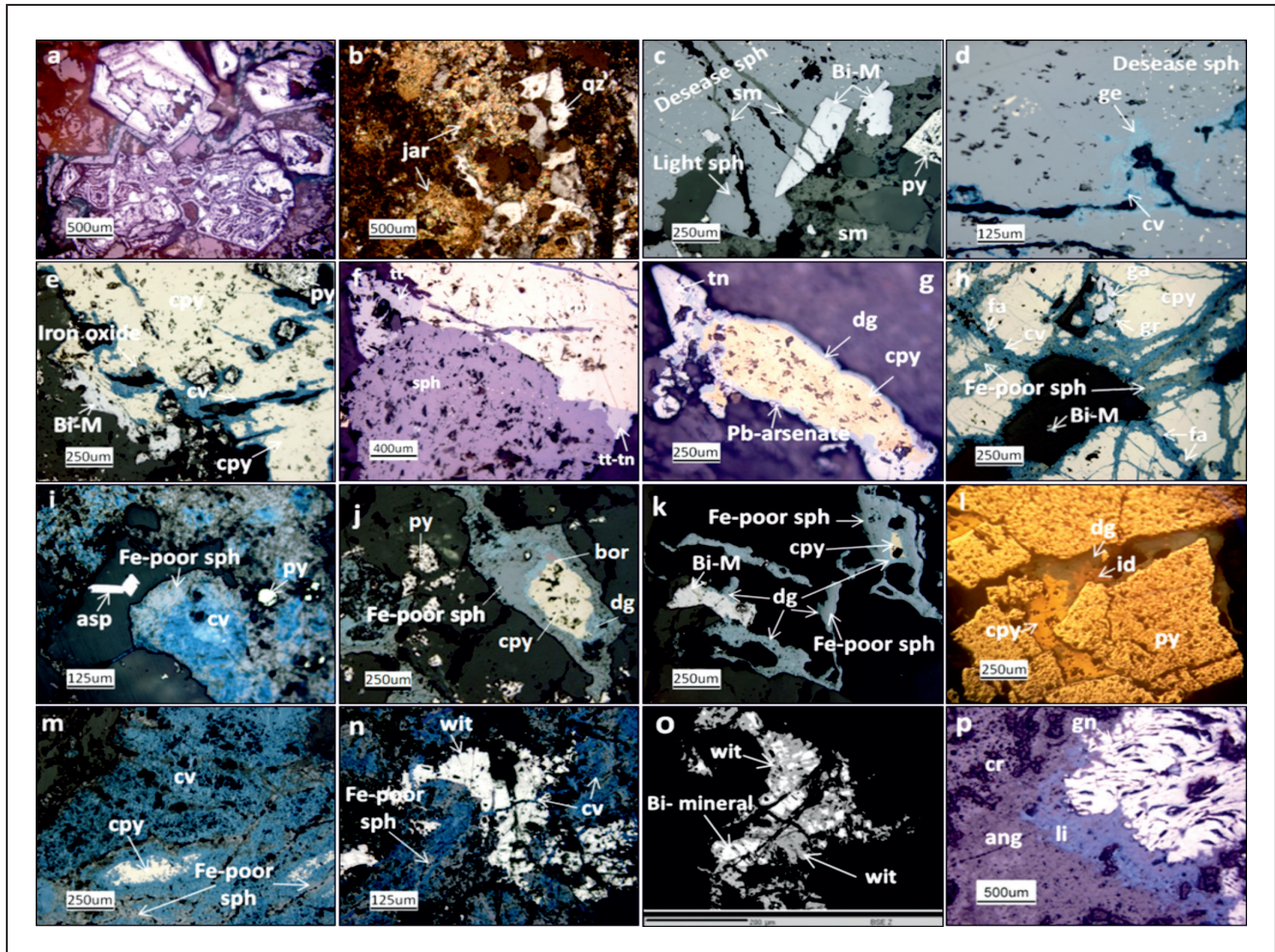
بر پایه مشاهدات صحرایی و بررسی ترانسه‌ها و گمانه‌ها، در بالای بیشتر بخش‌های کانی‌سازی چندفلزی ماهور تا ژرفای ۵۰ تا ۷۰ متر زیر سطح حاضر، کلاهیک شسته‌شده به‌صورت مجموعه‌های لیمونیتی ناپیوسته و به رنگ‌های زرد، قهوه‌ای مایل به قرمز و گاه قرمز همراه با اکسیدهای منگنز و دگرسانی آرزیلی برونزاد دیده می‌شود که بیشترین گسترش را به‌ویژه در نیمه شمالی و باختر کانی‌سازی دارد و نیز شامل کانی‌های منطقه غنی‌شده اکسیدی است. کلاهیک آهنی با توجه به رنگ و نتایج حاصل از XRD بیشتر شامل ژاروسیت و گوتیت با نسبت‌های متغیر و به مقدار کمتر قطعات هماتیتهی پراکنده به‌ویژه در مرکز محدوده است. آنالیز FA-INAA مقادیر ۳۹ و ۳۴۸ ppb در هماتیت نشان داده است. رنگ قهوه‌ای قابل مشاهده در هماتیت (شکل ۳- c) نشان می‌دهد که بیشتر هماتیت، خورشیدی و حاصل آب‌زدایی کانی‌های لیمونیتی آبدار قرار گرفته در معرض حرارت خورشید (Anderson, 1982) است.

آتشفشانی- نفوذی آن واقع شده است. مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین به سن پالئوژن شامل واحدهای آتشفشانی (آندزیت بازالتی، آندزیت، تراکی آندزیت) و آتشفشانی- نیمه آتشفشانی (داسیت و ریوداسیت) به سن ائوسن میانی تا بالایی و توف‌های وابسته به همراه استوک کوچک میکرودیوریتی با ترکیب گابرودیوریت تا کوارتزدیوریت به سن الیگوسن زیرین (Miri Beydokhti et al., 2015; 31.88 ± 0/3 Ma) و دایک‌هایی از جنس آن، بخش زیادی از محدوده ماهور را تشکیل داده است. واحدهای مختلف کواترنری نیز بخش‌های دیگر محدوده مورد بررسی و واحدهای قدیمی‌تر را می‌پوشانند (شکل ۱). سنگ‌های آذرین بیشتر ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی نشان می‌دهند و در موقعیت زمین‌ساختی پس از برخورد تشکیل شده‌اند و همچنین، سامانه‌های گسلی به خوبی در محدوده گسترش یافته‌اند (یونسی و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده معدنی-اکتشافی ماهور (تهیه شده توسط شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، ۱۳۹۱؛ بازنگری از یونسی و همکاران، ۱۳۹۵) که موقعیت رگه چندفلزی روی آن نشان داده شده است.

بر پایه مطالعات انجام شده توسط یونسی و همکاران (۱۳۹۶)، کانه‌زایی چندفلزی ماهور و رگه‌هایی از مس، منگنز و سرب در پیرامون آن به میزبانی واحدهای داسیت-ریوداسیتی، آندزیتی و توف‌های مربوطه تشکیل شده‌اند. کانی‌سازی چندفلزی غنی از سولفید است و صرف نظر از پیریت‌های افشان، به‌صورت پرکننده فضاهای باز (رگه‌ای، رگچه‌ای و به‌ویژه برشی) رخ داده است. این کانی‌سازی در گسل اصلی ماهور با شیب نزدیک به قائم با روند NNE-SSW و خردشدگی‌ها و شکستگی‌های واقع در خاور آن و به‌صورت منقطع تا ژرفای بیشینه ۳۸۰ متر زیر سطح حاضر صورت گرفته است. کانه‌زایی‌هایی با تیپ و روند مشابه همچون محدوده گلرو نیز در سنگ‌های آندزیتی و داسیتی در پیرامون محدوده ماهور وجود دارند. کانی‌شناسی و دگرسانی درونزاد چندفلزی ماهور به‌طور خلاصه به این شرح است: پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی است که در مناطق تحت تأثیر فرایندهای برونزاد، به‌طور کامل از حاشیه و یا در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت، ژاروسیت، گاه لپیدوکروسیت و در مواردی هماتیت تبدیل شده و در موارد کمی نیز شامل پوشش کالکوسیتی است (شکل‌های ۲- a و b). پس از پیریت، کانه‌زایی اسفالریت آهن‌دار با چیرگی بافت بیماری کالکوپریت فراوان‌ترین فاز سولفیدی است. کانه‌زایی اسفالریت آهن‌دار با وجود رخداد گسترده در تمام بخش‌های کانه‌سازی شده، در بخش خاوری کانسار



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی و BSE از کانی شناسی کانسار چندفازی ماهوز: (a و b) شکل‌های دروغین پیریت به علت جانشینی کامل پیریت توسط گوتیت و ژاروسیت؛ (c) اسفالریت‌های آهن دار و سولفوسالت بیسموت که توسط رگچه‌های اسمیت‌زونیت بریده شده‌اند؛ (d) تبدیل اسفالریت آهن دار از حاشیه به گیریت و یا کولیت؛ (e) کالکوپیریت و سولفوسالت بیسموت با حاشیه باریکی از کولیت پروزاد؛ (f و g) سولفوسالت‌های مس در حال جانشین شدن به جای اسفالریت و کالکوپیریت و در مواردی خود توسط دیژنیت و آرسنات سرب جانشین شده‌اند؛ (h) همراهی گالن، گرینوکیست، فاماتینیت، اسفالریت فقیر از آهن و کالکوپیریت که از حاشیه در حال جانشین شدن توسط کولیت تیغه‌ای هستند؛ (i) آرسنوپیریت و کولیتی شدن اسفالریت فقیر از آهن؛ (j و k) دیژنیت حاوی کمی پورنیت در حال جانشین شدن به جای کالکوپیریت، اسفالریت فقیر از آهن و سولفوسالت بیسموت در بخش کانه‌زایی غنی از مس؛ (l) دیژنیت حاوی آیدایت (پورنیت آنرمال پروزاد) در حال جانشین شدن به جای کالکوپیریت؛ (m) کولیتی شدن کامل و بخشی کالکوپیریت و بافت باقیمانده؛ (n و o) سولفوسالت بیسموت که از حاشیه و درز و شکستگی‌ها و ویتچینیت و کمی نیز کولیتی شده است و تصویر BSE آن؛ (p) تبدیل گالن به آنگلیزیت، سروزیت و لیناریت. py: پیریت؛ jar: ژاروسیت؛ qz: کوارتز؛ sph: اسفالریت؛ sm: اسمیت‌زونیت؛ ge: گیریت؛ cpy: کالکوپیریت؛ tt: تتراندیریت؛ tn: تنانیت؛ fa: فاماتینیت؛ asp: آرسنوپیریت؛ gr: گرینوکیست؛ dg: دیژنیت؛ cv: کولیت؛ id: آیدایت؛ bor: پورنیت؛ wit: ویتچینیت؛ gn: گالن؛ ang: آنگلیزیت؛ cr: سروزیت؛ li: لیناریت.

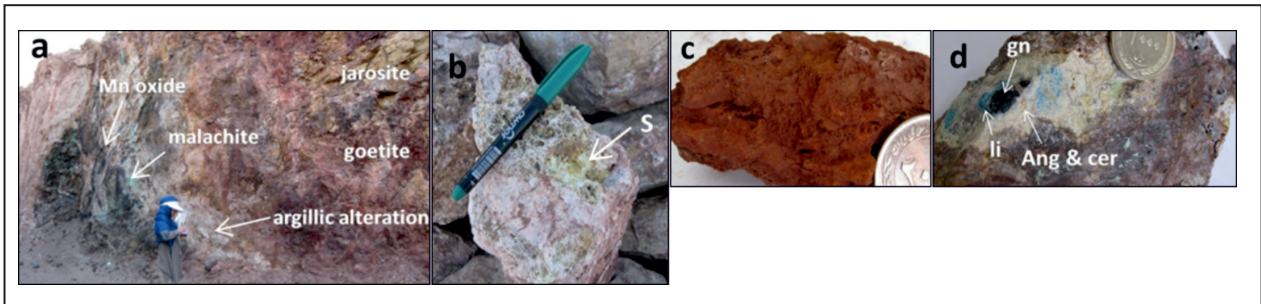
۴-۲. منطقه غنی‌شدگی اکسیدی پروزاد (منطقه اکسیدان)

این منطقه در ترانسه‌ها دیده می‌شود و بر پایه نتایج حاصل از حفاری، در ۱۰ تا ۷۵ متر زیر سطح حاضر به خوبی گسترش یافته است ولی آثار آن در برخی گمانه‌ها تا بیش از ۲۰۰ متر زیر سطح حاضر نیز وجود دارد.

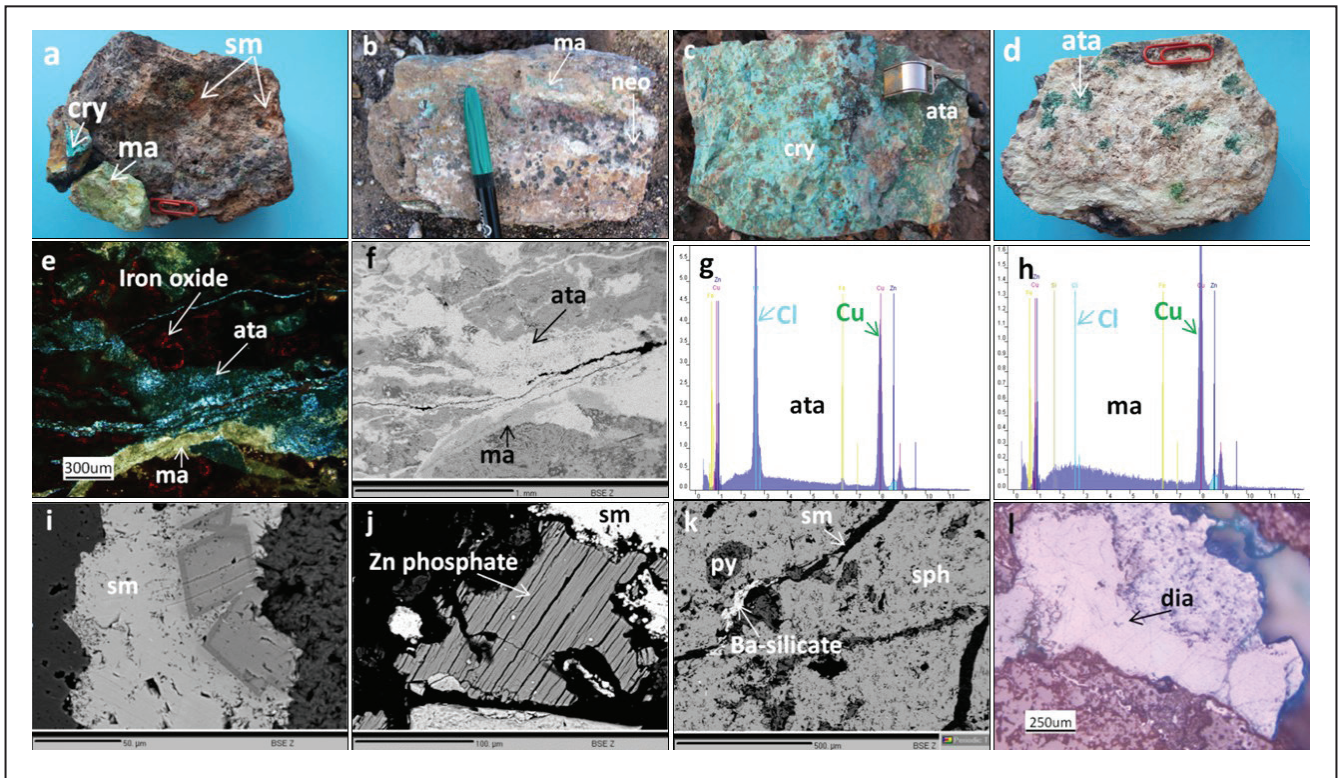
بر پایه مشاهدات صحرائی، آنالیز XRD و EPMA مقدار فراوانی انواع کانی‌های کربناته، کلریدی و سیلیکاتی شامل اسمیت‌زونیت، مالاکیت، آتاکامیت و پلی‌مورف‌اش پاراتا کامیت، کریزوکولا و نتوتوسیت، مقداری سروزیت، دیابولیت، کلرید سرب و مقادیر کمی لیناریت، آزوریت، فسفات روی، آرسنات سرب مس دار و سیلیکات باریم و باریت در منطقه اکسیدان تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴، ۲- g و p و ۳- d). بر پایه مطالعات آزمایشگاهی آتاکامیت جانشین مالاکیت شده است (شکل‌های ۴- f، e و g و h) و اسمیت‌زونیت شامل مقدار بالایی آهن و کمی منگنز و در مواردی همراه سیلیکات باریم است.

مقدار کمی گوگرد طبیعی نیز طی پیمایش صحرائی دیده شد (شکل ۳- b). گالن با پوشش آنگلیزیتی و سروزیتی (شکل ۳- d) و نیز پیریت و اسفالریت در منطقه اکسیدان حضور دارند. در بخش بالایی گمانه‌های حاوی نسبت زیاد سولفید به پیریت، گوتیت (شکل ۲- a) و در گمانه‌های با چیرگی پیریت، ژاروسیت (شکل ۲- b) تشکیل شده است.

دگرسانی آرژیلی پروزاد که با گستردگی زیاد و هم‌روند با کانه‌زایی چندفاز، سنگ‌های میزبان کانه‌زایی را تحت تأثیر قرار داده است، بر پایه آنالیز XRD شامل مجموعه کانی‌های کوارتز، آلونیت، ناتروآلونیت، کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ارتوز، ژیس، اندیریت، هالیت و کمی کریزوتیل بوده و همراهی آن با ژاروسیت، ناتروژاروسیت و بخش اکسیدان، نشانگر تشکیل آن طی فرایند هوازدگی است. هر چند به علت وجود هاله‌های دگرسانی آرژیلی متوسط و پیشرفته درون‌زاد در ماهوز و همچنین منشأ گرمایی ناتروآلونیت (به‌عنوان مثال Arribas et al., 1995) تمامی دگرسانی آرژیلی موجود در سطح رانمی توان به فرایندهای پروزاد نسبت داد (یونسی و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۳- تصویرهایی از کلاهک شسته شده: (a) نمایی از کلاهک آهنی و دگرسانی آرژیلی برونزاد در ترانشه؛ (b) گوگرد طبیعی؛ (c) هماتیت خورشیدی؛ (d) گالن با پوشش آنکزیتی و سروزیتی در اکسیدهای آهن. S: گوگرد طبیعی؛ gn: گالن؛ ang: آنکزیت؛ cr: سروزیت؛ li: لیناریت.



شکل ۴- تصویرهایی از کانی‌های منطقه غنی‌شدگی اکسیدی در محدوده ماهور: (a, b و c) نمایی از اسمیت‌زونیت، مالاکیت، اشکال کروی نئوتوسیت، آتاکامیت و کریزوکولا در منطقه اکسیدان؛ (d) پاراتا کامیت همراه نمک؛ (e و f) جانشینی مالاکیت توسط آتاکامیت در نور عبوری و تصویر BSE آن؛ (g و h) تصاویر آنالیز EDS از آتاکامیت و مالاکیت؛ (i, j و k) تصاویر BSE از اسمیت‌زونیت، فسفات روی و سیلیکات باریم؛ (l) کانی دیابولیت در نور انعکاسی. Sm: اسمیت‌زونیت؛ ma: مالاکیت؛ neo: نئوتوسیت؛ cry: کریزوکولا؛ ata: آتاکامیت؛ dia: دیابولیت.

۳-۴. منطقه غنی‌شده سولفیدی برونزاد

کولیت جانشین شده است. ترکیب این کالکوسیت‌ها به‌جز گبریت در حاشیه اسفالریت، بیشتر دیژنیتی با مقدار درصد وزنی $S = 22 - 23/48$ ، $Fe = 0.05 - 1/96$ ، $Ag = 0 - 0.3$ و $Zn = 0 - 0.07$ ، $Cu = 72/8 - 77/12$ (شکل ۲-۱) آیداییت (بورنیت برونزاد) (شکل ۲-۲) با درصد وزنی $Cu = 58/61 - 62/7$ ، $Fe = 6/92 - 12/2$ و $S = 27/46 - 29/2$ در آنها دیده می‌شود. مقادیر بالای آهن بیشتر در دیژنیتی‌های حاشیه کالکوپیریت رخ داده است. به هر حال، شواهد بافتی و کانی‌شناسی از جمله در مواردی وجود کمی بورنیت با مقدار درصد وزنی (شکل ۲-۲) حاکی از رخداد مقداری دیژنیت درونزاد در ماهور است (یونسو و همکاران، ۱۳۹۶)؛ هر چند در مناطق تحت اثر فرایند برونزاد تشخیص سهم غنی‌شدگی درونزاد از برونزاد بسیار مشکل است (Rojas et al., 1999).

کولیت برونزاد که در مواردی آثار آن تا ژرفای بیش از ۲۰۰ متر دیده

بررسی گمانه‌های حفاری در کانی‌سازی چندفازی ماهور و همچنین مطالعه مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد غنی‌شدگی سولفیدی برونزاد به مقدار کم و از منطقه اکسیدی تا بالای منطقه درونزاد و در هم آمیخته با آن تشکیل شده است و در بخش باختری و شمالی کانسار، به ویژه در گمانه BH15 و همچنین در رگچه‌های استوک‌ورکی بیشتر گسترش یافته است. به‌طور کلی، کانی‌شناسی این منطقه شامل کالکوسیت و کولیت برونزاد به مقدار کم ولی با نسبت بسیار بالای کولیت به کالکوسیت است که گاه کمی اسفالریت برونزاد پودری و حاوی عناصر Cu و Cd در آن وجود دارد. سیال مس‌دار سبب تشکیل حاشیه‌های ویتجینیت و مس‌دار شدن اسفالریت فقیر از آهن نیز شده است.

کالکوسیت در حاشیه و درز و شکستگی‌های اسفالریت، کالکوپیریت، سولفوسالت‌ها و همچنین به‌صورت پوشش‌های پودری و نرم (دوده‌ای) در پیرامون پیریت تشکیل شده (شکل‌های ۲-۲، d، g، j، k و l) و در مواردی توسط

(Guilbert and Park, 1986; Leverett et al., 2005; Reichert and Borg, 2008) آنتیموان و بیسموت نیز نامحلول هستند و طی فرایند هوازدگی جذب اکسیدهای آهن، آلونیت و ژاروسیت می‌شوند (Rose et al., 1979; Guilbert and Park, 2001; Scott et al., 1986). عناصر عنوان شده ($W, Ag, Cu, Pb, Cd, Zn, As$) و (Au) و Mo در مقدار جذب به کانی‌های کلاهدک شسته شده طی هوازدگی رفتار متفاوتی نشان می‌دهند که بیشتر وابسته به حضور آنها در فازهای کانایی متفاوت با استعداد هوازدگی متفاوت و اسیدیته محلول‌های برونزاد است (Rose et al., 1979; Scott et al., 2001).

۵-۲. کلاهدک شسته شده

آهن فرو (Fe^{2+}) آزاد شده از اکسایش پیریت و دیگر سولفیدهای آهن‌دار (به ویژه کالکوپیریت و اسفالریت آهن‌دار) به صورت کانی‌های لیمونیت با نسبت‌های مختلف در بخش‌های فوقانی کانی‌سازی چندفازی ماهور نهشته شده است (بخش ۴-۲ را ببینید) و اسید حاصل از این اکسایش نیز که pH بین ۴ تا ۱ و حتی پایین‌تر دارد (Seal et al., 2002)، عامل دگرسانی آرژیلی برونزاد در این بخش‌ها بوده است.

بر پایه Anderson (1982) و Sillitoe (2005)، کلاهدک گوتیتی به‌طور معمول از اکسایش کالکوپیریت و به مقدار کمتر از اکسایش پیریت حاصل می‌شود و نشانگر نسبت کم پیریت به کالکوپیریت، مقدار اسیدیته و سولفید کل پایین است و با شستشوی کم و حضور کانی‌های اکسید مس مشخص می‌شود. کلاهدک ژاروسیتی که بیشتر حاصل اکسایش پیریت در شرایط کاملاً اکسیدی و pH کمتر از ۳ است، پیریت زیاد به همراه کالکوپیریت با نسبت پیریت < کالکوپیریت و مقدار درصد بالای سولفید کل را نشان می‌دهد که اکسایش سولفیدی کامل در آنها صورت نگرفته است. کلاهدک هماتیته حاصل چرخه دوم شستشوی اسیدی و در معرض فرسایش قرار گرفتن لایه کالکوسیتی تشکیل شده پیشین است و در بالای منطقه غنی شده بالغ تشکیل می‌شود و نشانگر درصد سولفید کل و مقدار کالکوسیت بالا در همراهی با دیگر سولفیدها است. رابطه گوتیت و ژاروسیت با نسبت پیریت به سولفید کل در ماهور (بخش ۴-۱ را ببینید) شاهد مناسبی از رابطه نسبت پیریت به کانی‌های درونزاد با نوع کلاهدک آهنی است. از این رو، کانی‌شناسی کلاهدک آهنی در ماهور شامل مقدار بالای گوتیت و ژاروسیت با نسبت‌های متغیر در همراهی با کمی هماتیت و حضور اکسیدها و کربنات‌های مس، نشانگر سولفید کل بالا با نسبت‌های متغیری از پیریت به کانی‌های درونزاد و نبود تولید اسید بسیار زیاد و در نتیجه اکسایش نا کامل سولفیدی است که غنی‌شدگی نابالغ سولفیدی را پیشنهاد می‌کند.

کانی‌شناسی دگرسانی آرژیلی برونزاد نیز مطابق با مقدار پیریت در مناطق شسته شده و یا اکسیدان است (Anderson, 1982; Sillitoe, 2005). کائولینیتی شدن برونزاد که با تولید مقادیر ناچیزی کوارتز یا کلسدون همراه است (Guilbert and Park, 1986; Sillitoe, 2005)، در کل کلاهدک شسته شده بالای انواع دگرسانی درونزاد حضور دارد و در جایی چیره است که به عنوان نتیجه‌ای از شرایط اسیدی حاصل از تخریب مناسب پیریت، اکسایش سولفیدی توسط غنی شدن کالکوسیت چرخه اول اکسایش همراه شود؛ ولی به علت خنثی شدن محلول‌های پایین‌رو توسط سنگ میزبان، به سمت پایین به اسمکتیت (عضوی از زیرگروه مونت‌موریلونیت) تبدیل می‌شود (حسین‌زاده، ۱۳۸۷).

آلونیت برونزاد نشانگر شرایط به شدت اسیدی و فعالیت بالای یون سولفات است (Hemley et al., 1969; Sillitoe, 2005) و به‌طور گسترده جایی تشکیل می‌شود که محتوای پیریت بالاست و سنگ‌های میزبان مقداری ظرفیت خنثی‌سازی اسید را حفظ کرده‌اند (Sillitoe, 2005). با توجه به الگوی توزیع دگرسانی‌ها و فرایندهای برونزاد در کانسارهای مس پورفیری، دگرسانی آرژیلی برونزاد در مناطق با دگرسانی سریستی و کانی‌سازی سولفیدی دارای پیریت بیشتر از کالکوپیریت، افزون بر کائولینیت، شامل تشکیل کوارتز-آلونیت در همراهی با ژاروسیت و منطقه کالکوسیتی در زیر سطح سفره در چرخه اول اکسایش است که در صورت افت سطح آب یا بالادگی منطقه و چرخه دوم اکسایش، کلاهدک هماتیته نیز در

می‌شود، بیشتر به صورت تیغه‌ای و جانشین‌کننده سولفیدهای اولیه به ویژه اسفالریت و کالکوپیریت و به مقدار بسیار کمتر سولفوسالت‌ها رخ داده است (شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲) و ترکیب آن از خالص تا بسیار متغیر، وابسته به کانی میزبان جانشینی، شامل $Zn = 0.67 - 0.17$, $Ag = 0 - 0.62$, $Fe = 0.01 - 0.786$, $Cd = 0 - 0.267$ و $Bi = 0 - 0.083$ درصد وزنی تغییر می‌کند. مقدار آهن بالا در حاشیه‌های نازک کوولیت در پیرامون کالکوپیریت رخ داده است (شکل ۲-۱). در جاهایی که کوولیت در حال جانشین کردن اسفالریت فقیر از آهن است (شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲)، در مواردی مقدار روی در کوولیت ۱۴/۶ تا ۱۷/۶۷ درصد وزنی است که با آنالوگ روی آیدایت ($Zn = 16.7 \pm 2$, $S = 35 \pm 4$; Sillitoe and Clark, 1969; $Cu_3ZnS_4 \cdot Cu = 5.0 \pm 3$) همخوانی دارد. مقدار مس در این اسفالریت‌ها تا ترکیب S (Cu, Zn) افزایش یافته است که با فاصله از کوولیت مقدار Cu/Zn در اسفالریت کاهش می‌یابد. بیشترین مقادیر کادمیم، بیسموت و تا حدودی نقره در کوولیت نیز در نمونه‌های شامل این کانی‌ها رخ داده است.

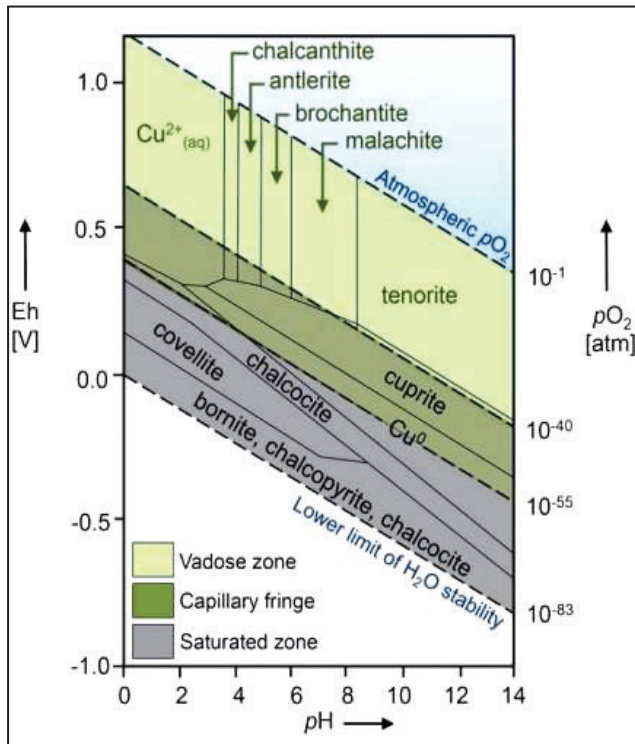
کوولیت برونزاد در مرحله میانی تبدیل کالکوپیریت به کالکوسیت تشکیل می‌شود. پوشش‌های کالکوسیت روی پیریت نیز نشانگر مراحل میانی جانشینی است و نشان می‌دهد غنی‌سازی چندان پیش نرفته است (Guilbert and Park, 1986; Sillitoe, 2005).

۵-۱. شرایط تشکیل کانی‌ها در مناطق اکسیدی حاصل از فرایند برونزاد و تفسیر آن

۵-۱-۱. اکسایش سولفیدها

پیش از آغاز فرایند اکسایش، بالا آمدگی پوسته‌ای سنگ میزبان کانه‌زایی برای دسترسی به اکسیژن در محیط نزدیک سطح، به عنوان پارامتر اصلی اکسایش پیریت و دیگر سولفیدها ضروری است. گسل‌ها و شکستگی‌ها و در مواردی بافت استوک‌ورکی در کانی‌سازی ماهور نیز، تراوایی لازم برای نفوذ محلول‌های برونزاد را فراهم کرده‌اند. با نفوذ این محلول‌ها در کانی‌سازی، فرایندهای برونزاد با اکسایش پیریت (شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲) آغاز شده است. بر پایه واکنش‌های اکسایش پیریت در محیط‌های با مقدار متفاوت O_2 (Guilbert and Park, 1986; Sillitoe, 2005)، مقدار پایین هماتیت، حضور گوگرد و همچنین حضور گسترده کوارتز-آلونیت در کلاهدک شسته شده در ماهور (بخش ۵-۲ را ببینید)، پیریت بیشتر در محیط غنی از اکسیژن با تبدیل به سولفات فریک و اسیدسولفوریک اکسید شده و به‌طور مستقیم به هماتیت تبدیل نشده است. Fe^{3+} تولید شده طی اکسایش پیریت عامل اکسیدکننده بسیار مهمی برای سولفیدها در شرایط اسیدی است که بسیار مؤثرتر از O_2 عمل می‌کند (Nordstrom and Alpers, 1999; Reichert and Borg, 2008). بنابراین، هر چند در این محیط مقداری اکسایش مستقیم کالکوپیریت، گالن و دیگر کانی‌ها نیز صورت می‌گیرد (Guilbert and Park, 1986)، ولی سولفات فریک حاصل از اکسایش پیریت عامل اصلی اکسایش و انحلال کانی‌های درونزاد شامل سولفیدها، سولفوسالت‌ها و سیلیکات‌ها (کانی‌های سنگ‌ساز و دگرسانی) و فسفات‌ها (مانند آپاتیت) بوده که حضور گوگرد طبیعی در کلاهدک شسته شده (شکل ۳-۱) نیز شواهدی از این فرایند است (Guilbert and Park, 1986). به این ترتیب یون Cu^{2+} و یون‌های دیگر فلزات مانند روی، کادمیم و نقره به صورت سولفات و همچنین آتیون‌های سیلیکات، آرسنات و فسفات، صرف نظر از آنکه مانند طلا و تنگستن مقداری جذب اکسیدهای آهن، اکسیدهای منگنز و کانی‌های آلونیت و ژاروسیت می‌شوند (Rose et al., 1979; Scott et al., 2001)، وارد محلول برونزاد شده‌اند. ولی بر پایه Reichert and Borg (2008) فعالیت بالای یون‌های سولفات و pH پایین طی مرحله اکسایش سبب نهشت آنگلیزیت نامحلول و جذب Pb به کلاهدک آهنی (HFO) و بنابراین غلظت پایین Pb^{2+} در محلول می‌شود. پوشش نامحلول این کانی روی گالن، سبب حفظ آن از تماس مستقیم با اکسیدکننده‌ها می‌شود (اثر 'armouring' Reichert and Borg, 2008) که باقی ماندن آشکار توده‌های اکسید نشده گالن در منطقه اکسیدان (شکل ۴-۱) را توضیح می‌دهد

(Foster et al., 2017)، نمایانگر آب‌های جوی غنی از CO₂ در آن زمان و (۴) آغاز اقلیم قاره‌ای بسیار خشک از پلیوسن در بلوک لوت (آق‌آبانی، ۱۳۸۳)، تشکیل مالاکیت و فرایندهای برونزاد حاصل از آب‌های جوی را در زمان گذشته (از الیگوسن زیرین تا میوسن بالایی) نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار Eh و pO₂ در مقابل pH نشانگر گونه‌های مس محلول و کانی‌های مس در محیط برونزاد (Reith and Vasconcelos, 2015، تغییر یافته از Sillitoe, 2005).

نئوتوسیت نشانگر مقدار کالکوپیریت بسیار بیشتر از پیریت و شاهدهی بر مقدار سولفید بالاست (Anderson, 1982; Sillitoe, 2005). کریزوکولا نشانگر تمرکز بالای SiO₂ (ناشی از تخریب کامل سیلیکات‌ها) در محلول‌های خنثی تا قلیایی نزدیک سطح است و به‌طور معمول به‌صورت مستقیم‌ترین آتاکامیت و پلی‌مورف‌های آن یا مالاکیت می‌شود (Sillitoe, 2005). کریزوکولا و آتاکامیت انعکاسی از فعالیت سولفات کمتر و pH بالاتر ناشی از اکسایش ناکامل پیریت هستند (Sillitoe, 2005) و در فعالیت بالای کلرید نسبت به سولفات قابل دسترس تشکیل می‌شوند (Chávez, 2000). بر پایه Sillitoe (2005)، چون تبخیری‌های مزوزوییک همیشه در زیر وجود ندارند، این نظریه که ممکن است محلول‌های غلیظ بالارو مشتق از تبخیری‌ها در اقلیم خشک‌تر نسبت به ایالت‌های مس‌دار بیابانی امریکای شمالی و ایران در گسترش تمرکز سطحی این کانی‌ها نقش بازی کنند (به‌طور مثال، Jarrell, 1944; Chávez, 2000 و منابع در آن) رد شده است. آتاکامیت برای تشکیل نیاز به آب شور دارد و در تماس با آب جوی تازه به سرعت حل می‌شود و یا تحت تغییر فاز قرار می‌گیرد (Hannington, 1993; Cameron et al., 2007). بنابراین، آب‌وهوای بسیار خشک برای حفظ شدن آن در پهنه برونزاد ضروری است. از آنجا که کانی‌های برونزاد پهنه اکسیدان نتیجه نفوذ آب جوی هستند و همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در لوت، اقلیم قاره‌ای و بسیار خشک از پلیوسن آغاز شده است، شرایط تشکیل آتاکامیت و پاراتاکامیت و جانشینی این کانی‌ها به جای مالاکیت در ماهور (شکل‌های ۴-f, e, d)، مانند پهنه‌های اکسیدان شامل متشکله مهم آتاکامیت و پلی‌مورف‌هایش در انواع کانسارهای مس در بخش‌های بسیار خشک شمال شیلی، صحرای آتاکامی، (Cameron et al., 2007) گویای رخداد دو دوره فرایند غنی‌شدگی برونزاد در ماهور است. مطالعات ژئوشیمی و ایزوتوپی نشان داده که غنی‌شدگی برونزاد کانسارهای مس در صحرای آتاکامی طی دو مرحله

همراهی با آنها گسترش یافته و منطقه غنی‌شدگی شدید مس در زیر سطح ایستابی جدید تشکیل می‌شود (حسین‌زاده، ۱۳۸۷). بنابراین، گسترده‌گی کوارتز و آلونیت در دگرسانی آرزلی برونزاد واقع در بخش باختری و شمالی ماهور حاکی از رخداد این دگرسانی در مناطق با دگرسانی سریستی و کانی‌سازی سولفیدی با محتوا و نسبت بالای پیریت است که با ویژگی‌های کانی‌سازی و هاله‌های دگرسانی برونزاد بخش غنی از مس کانی‌سازی چندفازی ماهور همخوانی دارد و همچون کلاک‌های آهنی منطقه کالکوسیتی نابالغ در زیر سطح ایستابی را پیشنهاد می‌کند. ناتروآلونیت که منشأ برونزاد برای آن پیشنهاد شده است (به‌طور مثال، Arribas et al., 1995)، برای تشکیل نیاز به محلول‌هایی با نسبت بالای Na به K دارد (Parker, 1962). چنین محلول‌هایی طی هوازدگی سنگ‌های سریستی نامحتمل است؛ ولی ژاروسیت می‌تواند حاصل جانشینی پیریت و یا آلونیت باشد که در صورت جانشین کردن آلونیت نسبت Na/K آلونیت منشأ را حفظ خواهد کرد (Scott, 1990).

رگه-رگه‌های ژئوس برونزاد که جوان‌تر هستند، پایان تأثیر فرایند برونزاد را نشان می‌دهند، چون از محلول‌های سولفات کلسیم‌دار تحت شرایط خنثی تا قلیایی تشکیل می‌شوند (Anderson, 1982). بنابراین، مجموعه کانی‌های دگرسانی آرزلی برونزاد در ماهور نشانگر رخداد این دگرسانی متأثر از سیالی با فعالیت بالای یون‌های H⁺ و سولفات بوده که در واکنش با سنگ‌های میزبان خنثی تا قلیایی شده است.

۵-۳. منطقه کانه‌های اکسیدی غنی‌شده برونزاد

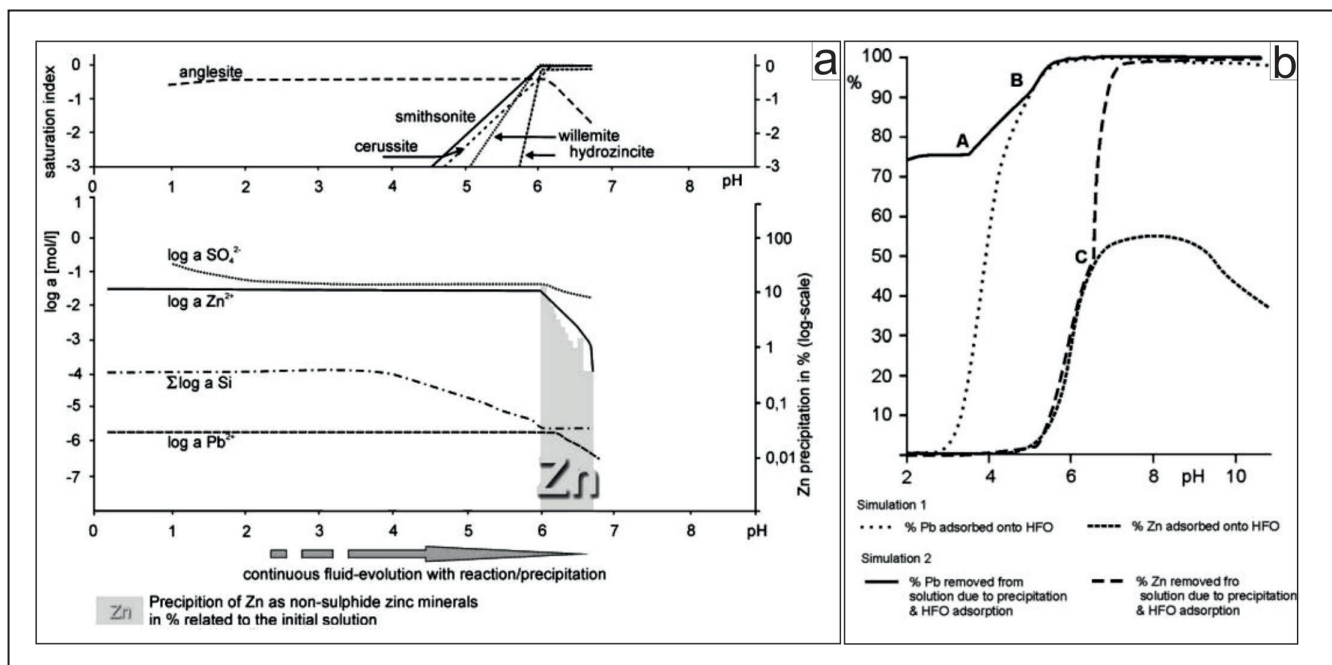
همچون کلاک‌های شسته‌شده، نوع کانی‌های اکسیدی و سولفیدی ثانویه نیز وابسته به مقدار سولفیدهای برونزاد موجود در سنگ میزبان و اسیدیته ایجاد شده در آب‌های زیرزمینی در اثر اکسایش آنهاست (Chávez, 2000). کانی‌شناسی منطقه غنی‌شدگی اکسیدی در ماهور نشان می‌دهد که تشکیل کانه‌های برونزاد به شدت با تغییرات محلی و جهانی در اتمسفر و هیدروسفر در هم تنیده است (به‌طور مثال، Alpers and Brimhall, 1988) و یون‌های محلول حاصل از واکنش کانی‌های برونزاد با سولفات فریک، تحت شرایط pH خنثی تا قلیایی، وجود آیون‌های مناسب و شرایط اقلیمی خاص در منطقه اکسیدان ترسب شده‌اند. وقتی مقدار پیریت برای تأمین اسیدیته لازم برای شستشوی مس (pH < 5) کافی نباشد تا یون‌های مس به زیر سفره انتقال یابند، کانی‌های اکسیدی مس پایدار در pH نزدیک به خنثی یا کمی اسیدی، در زیر کلاک شسته شده تشکیل می‌شوند (Anderson, 1982; Chávez, 2000; Sillitoe, 2005) و پایداری آنها شامل هیدروکسی کلریدها، هیدروکسی سولفات‌ها و هیدروکسی کربنات‌ها، انعکاس مستقیمی از شیمی محلول است (Woods and Garrels, 1986; Sillitoe, 2005).

تشکیل مالاکیت فراوان و کمی آزریت در ماهور، نشانگر فشار بالای CO₂ در محلول‌های برونزاد در محدوده شرایط تشکیل مالاکیت (۱۰^{-۷/۵} تا ۱۰^{-۷/۵} اتمسفر، فشار CO₂ رایج در آب‌های زیرزمینی؛ Rose, 1989) و واکنش یون‌های مس با یون کربنات در منطقه اکسیدان است؛ چون تشکیل فراوان آزریت نسبت به مالاکیت مستلزم شرایط فشار بالاتر CO₂ است. از آنجا که فشار CO₂ در آب‌های جوی متعادل با اتمسفر حاضر کمتر از ۱۰^{-۷/۴} است (Rose, 1989)، تشکیل مالاکیت در زمان حاضر منوط به تأمین CO₂ لازم از منبع دیگری مانند سنگ میزبان کربناتی و یا آب‌های زیرزمینی است. با توجه به سنگ میزبان سیلیکاتی کانه‌زایی در ماهور و غلظت کم فلزات در محلول‌های آبگین در کانسنگ تحت شرایط اشباع از نظر هیدرولیکی (Saaltink et al., 2002)، این کانی در زمان حاضر تشکیل نشده است. اقلیم بسیار خشک لوت در زمان حاضر نیز گویای این تفسیر است، چون فرایندهای برونزاد حاصل از آب‌های جوی در این اقلیم متوقف می‌شوند (Sillitoe, 2005). مجموعه شواهدی از قبیل: (۱) رخداد کانسار ماهور در محدوده سنی انوسن بالایی تا الیگوسن زیرین بر پایه سن سنگ میزبان و فعالیت ماگمایی منطقه، نشانگر احتمال آغاز فرایندهای برونزاد از الیگوسن زیرین، (۲) تشکیل مالاکیت پیش از آتاکامیت و پاراتاکامیت حاکی از تغییر شرایط اقلیمی منطقه به نفع آتاکامیت (شرایط تشکیل این کانی‌ها را در ادامه ببینید)، (۳) فشار بالای CO₂ در اتمسفر ترشیر زیرین و میانی

مستلزم فشار بالای گاز دی‌اکسید کربن (حداقل $\log \text{PCO}_{2(\text{g})} = 0.4 \text{ kPa}$) است و به‌طور معمول در مراحل اولیه تشکیل کانه‌زایی غیرسولفیدی و همزمان با اکسایش کانسنگ سولفیدی تشکیل می‌شود (Brugger et al., 2003; Reichert and Borg, 2008). با توجه به نبود مواد آلی و سنگ میزبان کربناته در محیط، CO_2 لازم از فرایندهای زیستی و یا به قدر کافی از فرایندهای خنثی شدن اسید توسط کربنات (Ritchie, 1994; Palmer and Plamer, 2000; Lapakko, 2002; Reichert and Borg, 2008) تأمین نشده است. کانسارهای غیرسولفیدی روی به‌طور چیره به میزبانی کربنات تشکیل می‌شوند و شمار کمیابی از آنها (برای مثال، کانسار Skorpion در نامیبیا) در سنگ میزبان غیرکربناته وجود دارند که خنثی شدن اسید در آنها توسط فلدسپار و میکا صورت گرفته است (Reichert and Borg, 2008) و منابع موجود در آن). بنابراین، در اقلیم خشک الیگوسن تا میوسن بالایی لوت و همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، فشار بالای CO_2 اتمسفر آن زمان، با خنثی شدن محلول‌های برونزاد توسط سنگ میزبان سیلیکاته پتاسیم بالا در ماهور، شرایط لازم برای تشکیل اسمیت‌زونیت فراهم بوده است. مطالعات Reichert and Borg (2008) نشان داده است در شرایط فشار بالای $\log \text{PCO}_{2(\text{g})} = 0.5 \text{ kPa}$ ، روی در محلول باقی می‌ماند تا اسمیت‌زونیت در $\text{pH} = 6$ به نقطه اشباع برسد و در $\text{pH} = 6-6.7$ نهشته شود. در این شرایط مقداری از روی نیز جذب HFO می‌شود (شکل‌های a و b). نهشت کل (bulk) اسمیت‌زونیت بین $\text{pH} = 6.4$ تا $\text{pH} = 6$ رخ می‌دهد که ۸۵ درصد آن در $\text{pH} = 6-6.2$ ترسیب می‌شود. این شرایط تنها می‌تواند با نهشت کمی سیلیکات روی (ویلیمیت) به علت فعالیت پایین $\text{H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ همراهی شود؛ ولی با اینکه هیدروژینکسیت تا نزدیک به اشباع می‌رسد، نهشته نمی‌شود (شکل ۶-a)؛ چون تشکیل آن مستلزم فشار کم CO_2 در اتمسفر حاضر است.

رخ داده است: مرحله اول توسط آب‌های جوی در موقعیت نیمه‌خشک تا خشک ترشیر میانی (ائوسن میانی تا حداکثر میوسن بالایی) صورت گرفته است که طی آن، مجموعه‌های دارای آتاکامیت به علت نبود شرایط مناسب تشکیل نشده‌اند؛ در مرحله دوم غنی‌شدگی برونزاد طی آغاز اقلیم بسیار خشک تا حداقل پلیستوسن (همزمان با آب و هوای بسیار خشک جدید) - که پیش‌تر باور شده بود با آغاز این اقلیم غنی‌شدگی برونزاد پایان یافته است - آتاکامیت و پلی‌مورف‌هایش به عنوان محصول جریان رو به بالای آب‌های سازندی شور از میان پهنه‌های اکسیدان پیشین تشکیل شده‌اند؛ کانی‌های اکسیدی مس برونزاد پیشین را جانشین کرده‌اند و به علت آب‌وهوای بسیار خشک از آن زمان تا به حال نیز حفظ شده‌اند (Cameron et al., 2007; Leybourne and Cameron, 2008; Reich et al., 2008 and 2009). ترکیب این آب‌های سازندی در محدوده پایداری آتاکامیت و بروشانیت قرار دارد (Cameron et al., 2007). دیابولیت و کلرید سرب در ماهور نیز طی این مرحله تشکیل شده‌اند. با توجه به رفتار ژئوشیمی نقره، نبود کانی کلرید نقره در منطقه اکسیدان شاهد اضافی بر عدم تشکیل کانی‌های کلریدی در مرحله اول فرایند غنی‌شدگی است.

تشکیل زیاد اسمیت‌زونیت در منطقه اکسیدان ماهور، افزون بر pH خنثی تا قلیایی و حضور یون کربنات، نشانگر حضور کانی‌سازی برونزاد روی و اقلیم خشک در زمان تشکیل منطقه اکسیدان است. چون اسفالریت در محلول‌های برونزاد بسیار محلول است و به‌طور رایج یون‌های روی در آب زیرزمینی پراکنده می‌شوند. بنابراین، فقط اکسایش تحت شرایط خشک برای فرایند اکسایش مؤثر سولفید و تشکیل محصولات ثانویه روی در منطقه اکسیدان شامل اسمیت‌زونیت، هیدروژینکسیت و همی‌مورفیت (کانسنگ غیر سولفیدی روی) مناسب است (Guilbert and Park, 1986; Reichert and Borg, 2008).



شکل ۶-a فعالیت‌ها و شاخص‌های اشباع شدن پیوسته، تکامل سیال با کنترل‌کننده pH برای محلول در تعادل با CO_2 ($\log \text{PCO}_{2(\text{g})} = 0.5 \text{ kPa}$) simulation 1 جذب سطحی Zn^{2+} و Pb^{2+} به HFO کنترل شده توسط pH و simulation 2 که واقعی‌تر است، حذف عناصر از محلول برای نهشت کانی‌های غیرسولفیدی و جذب به HFO را نشان می‌دهند. در نقطه A ۷۵٪ سرب به‌صورت آنگلزیت ترسیب می‌شود و به علت جذب سطحی، مقدار سرب به نقطه B می‌رسد. در نقطه C نهشت هیدروژینکسیت آغاز و بیشتر آن از محلول حذف می‌شود (Reichert and Borg, 2008).

و نسبت متغیر پیریت به سولفید کل در بخش‌های تحت فرایند برونزاد، تنها علت کافی نبودن اسیدیت محلول‌های برونزاد برای شستشوی عناصر از منطقه اکسیدان نبوده است. ویژگی‌های دیگری مانند چیرگی کانی‌سازی روی در سطوح کم‌زرفا و کانی‌سازی منقطع با هاله‌های دگرسانی دارای ظرفیت خنثی‌سازی اسید در سنگ‌های میزبان با ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی نیز در این امر مؤثر بوده‌اند. این ویژگی‌ها با خنثی کردن اسیدیت محلول‌های پایین‌رو، مانع از حمل مس به زیر سطح ایستابی و یا پراکندگی روی در آب زیرزمینی شده و مس و روی را پیش از رسیدن به زیر سفره نهشته کرده است. رخداد بیشترین مقدار غنی‌شدگی سولفیدی مس در گمانه حاوی کانی‌سازی غنی از مس همراه با کانی‌های سولفیداسیون بالا با هاله دگرسانی سرسیتی شدید تا به‌طور محلی آرزلی پیشرفته درونزاد در ماهور، شاهد مناسبی از تأثیر نوع هاله‌های دگرسانی درونزاد بر مقدار گستردگی غنی‌شدگی برونزاد در منطقه است. حضور کانی‌های سولفیدی برونزاد در منطقه غنی‌شده اکسیدی شاهدهی است که بافر شدن محلول‌های برونزاد توسط ترکیب شیمیایی سنگ میزبان در کنار توپوگرافی به نسبت پست و شرایط تکنونیک کشتی در منطقه که نشانگر نبود بالاآمدگی تکنونیک و در نتیجه بالاآمدن سطح سفره است، در توقف فرایند برونزاد در مرحله اول غنی‌شدگی برونزاد نقش داشته‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

بر پایه یافته‌های حاصل از این بررسی، رخداد فرایندهای برونزاد در کانی‌سازی لود Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) نوع کردیلر ماهور سبب گسترش قابل توجه کلاهدک شسته شده و غنی‌شدگی اکسیدی شده که با مقدار کمی غنی‌شدگی سولفیدی همراه بوده است. کانی‌شناسی منطقه غنی‌شده اکسیدی نشان می‌دهد که تشکیل کانه‌های برونزاد به شدت با تغییرات محلی و جهانی در اتمسفر و هیدروسفر در هم تنیده و فرایندهای برونزاد در ماهور طی دو مرحله اصلی فرایند غنی‌شدگی رخ داده است: طی مرحله اول، محلول‌های جوی کانه‌زایی درونزاد و سنگ‌های میزبان آن را در اقلیم خشک الیگوسن تا میوسن بالایی تحت تأثیر قرار داده‌اند و اکسایش و انحلال کانی‌های درونزاد سولفیدی، سولفوسالتی، فسفاتی و سیلیکاتی بیشتر در واکنش با سولفات فریک حاصل از اکسایش پیریت صورت گرفته که تشکیل کمی گوگرد در کلاهدک آهنی و همچنین آنگلیزیتی شدن زیاد گالن شاهدهی بر آن است. آهن فرو حاصل از فرایند اکسایش، کلاهدک آهنی شامل مقدار زیادی ژاروسیت، ناتروژاروسیت و گویت با نسبت‌های متغیر و کمی هماتیت را تشکیل داده و اسیدسولفوریک حاصل از اکسایش نیز، سبب گسترش دگرسانی آرزلی برونزاد با کانی‌های کوارتز و آلونیت به همراه کائولینیت، مونت‌موریلونیت و ژیس شده است. در پاسخ به خنثی شدن محلول‌های اسیدی برونزاد تحت اثر عوامل متعدد پیش از رسیدن به سطح ایستابی در این اقلیم، یون‌های عناصر در منطقه اکسیدان به‌صورت کانی‌های اسمیت‌زونیت ناخالص و مالاکیت فراوان، سروزیت، کمی آزوریت و به احتمال کریزوکولا و کانی‌های فسفاتی و آرسناتی و دیگر نمک‌های پیچیده و نیز گرینوکیت برونزاد و یا هاولیت نهشته شده‌اند. عناصری مانند Bi و Sb و تا حدودی W، Ag، Cu، Pb، Cd، Zn، As، Au در اکسیدهای آهن، اکسیدهای منگنز و کانی‌های آلونیت-ژاروسیت جذب شده‌اند. بنابراین، در نتیجه حمل مقدار کمی از یون‌ها به زیر سطح سفره به ویژه در بخش شمالی کانسار، بخش زیادی از اسفالریت فقیر از آهن مس‌دار شده است و حاشیه‌های ویچینیت و کمی کالکوسیت با ترکیب بیشتر دژینیتی (و گاه گریت) و کولیت با ترکیب بسیار متغیر با نسبت بسیار بالای کولیت به کالکوسیت و همچنین اسفالریت برونزاد، تشکیل شده‌اند که گویای نبود غنی‌شدگی سولفیدی برونزاد بالغ در ماهور است. این مرحله با آغاز شرایط اقلیم بسیار خشک در منطقه (پلیوسن) پایان یافته است. نوع و مقدار سولفیدها و سولفوسالت‌ها با نسبت متغیر پیریت، کانی‌سازی منقطع و چیرگی کانی‌سازی روی در سطوح بالایی، نوع و گسترش دگرسانی درونزاد و سنگ میزبان تحت تأثیر

به هر حال با تغییر فشار CO₂ به شرایط عادی حاضر که در تعادل با اتمسفر امروزی است، اسمیت‌زونیت در اقلیم خشک با پوشش کم خاک و مقادیر پایین آب جوی ناپایدار و هیدروژینکسیت پایدار می‌شود و مقداری روی از HFO نیز جریان می‌یابد. بنابراین، در ماهور می‌توان انتظار حضور این کانی‌ها را به‌ویژه در سطوح بالایی داشت؛ به این صورت که در مرحله پس از اکسایش، هیدروژینکسیت جانشین اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت جانشین ویلمیت شده باشد. حضور سیلیکات باریم و آهن در ماهور حاکی از وجود یون سیلیکات در محلول‌های برونزاد است که می‌تواند شاهدهی از تشکیل ویلمیت باشد. وجود Fe و Mn در ترکیب اسمیت‌زونیت‌های ماهور بیانگر هوازگی اسفالریت آهن‌دار است. چون مکانیسم‌های جدایش فلزی و تشکیل نوع کانه غیرسولفیدی روی (کانه قرمز و کانه سفید) طی فرایندهای برونزاد به شدت به ترکیب کانی‌شناسی کانه سولفیدی درونزاد (محتوای پیریت و مقدار آهن اسفالریت) وابسته است (Reichert and Borg, 2008). مطالعات فرآوری نشان از وجود کادمیم بالا در منطقه اکسیدان به ویژه در شمال کانسار دارد که افزون بر آنکه حضور کانی‌سازی روی را در عمق نشان می‌دهد (Scott et al., 2001)، حضور گرینوکیت برونزاد و یا هاولیت را به علت آزاد شدن کادمیم طی هوازگی اسفالریت و یا گرینوکیت درونزاد نشان می‌دهد. جانیشینی سروزیت به‌جای آنگلیزیت (شکل ۲-p) نشان می‌دهد پس از اکسایش کانه سولفیدی، با کاهش فعالیت یون سولفات و خنثی تا قلیایی شدن محلول، شرایطی که سروزیت پایدار است (pH=2/6، شکل ۶-a)، یون کربنات با آنگلیزیت واکنش داده و به سروزیت اکسیده شده است (Sangameshwar and Barnes, 1983; Guilbert and Park, 1986; Leverett et al., 2005; Reichert and Borg, 2008). حضور فسفات روی و آرسنات سرب در منطقه اکسیدان ماهور نیز نشانگر اقلیم خشک طی مرحله اول غنی‌شدگی است و می‌تواند شاهدهی از وجود فسفات‌ها و آرسنات‌های مس و دیگر عناصر در این منطقه و همچنین وجود کانی‌های سولفوسالتی درونزاد باشد. مقدار زیاد انواع کانی‌های سولفوسالتی پیچیده در کانی‌سازی ماهور نیز بر پایه Guilbert and Park (1986) تشکیل مقدار قابل توجهی کانی‌های اکسیدی برونزاد مرکب را پیشنهاد می‌کند و همچنین، گویای آن است که عناصر بیسموت و آنتیموان نیز باید به کلاهدک شسته شده جذب شده باشند. بر پایه ویژگی‌های کانی‌شناسی منطقه غنی‌شده اکسیدی در رابطه با غنی‌شدگی سولفیدی برونزاد (Sillitoe, 2005)، کانسنگ اکسیدی شامل کانی‌های کریزوکولا، آتاکامیت و مالاکیت (که هر کدام می‌توانند غالب باشند) به همراه لیمونیت مس‌دار، نتوتوسیت، رس‌های مس‌دار و مقادیر کمی تنوریت، پاراملاکونیت، و ود مس و در جاهایی مقدار فرعی فسفات‌ها و آرسنات‌های مس (که همخوانی زیادی با ویژگی کانی‌شناسی منطقه اکسیدی ماهور دارد)، تحت شرایط نزدیک به خنثی تا قلیایی (نسبت پایین پیریت) که غنی‌شدگی خوبی زیر منطقه اکسید تشکیل نشده است، رخ می‌دهد که همچون تفسیر کلاهدک شسته شده حاکی از شستشوی کم مس از منطقه اکسیدان ماهور است. توصیف کانی‌شناسی منطقه غنی‌شدگی سولفیدی برونزاد این تفسیر را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد مس کافی برای جانیشینی تبادل کاتیونی با سولفیدهای درونزاد و تبدیل کولیت به کالکوسیت در محلول‌های برونزاد در دسترس نبوده و بنابراین غنی‌سازی سولفیدی برونزاد نابالغ در ماهور رخ داده است. حضور زیاد اسمیت‌زونیت و مقدار کمی اسفالریت برونزاد نشان می‌دهد که یون‌های روی افزون بر نهشت در منطقه اکسیدان به علت اقلیم خشک، توانسته‌اند به زیر سطح ایستابی انتقال یابند که حاکی از مقادیر بسیار زیاد کانی‌سازی اسفالریت درونزاد در ماهور است.

۵-۴. عوامل کنترل کننده غنی‌شدگی در ماهور

بر پایه عوامل کنترل‌کننده فرایندهای برونزاد در کانسارهای مس (Guilbert and Park, 1986; Sillitoe, 2005) و کانسارهای روی غیر سولفیدی (Reichert and Borg, 2008; Reich and Vasconcelos, 2015)، مقدار سولفید بالا

یون‌ها به زیر بخش اکسیدان تولید نشده است که جذب عناصر به کلاهیک شسته شده و ترسیب کانی‌های اکسیدی برونزاد با غنی‌شدگی سولفیدی نابالغ را پیشنهاد می‌کند. این تفسیر با کانی‌شناسی منطقه غنی‌شده اکسیدی همخوانی دارد و نبود غنی‌شدگی سولفیدی برونزاد گسترده در ماهور نیز آن را تأیید می‌کند. بنابراین، با توجه به به مواردی مانند: (۱) نوع کانی‌سازی چندفلزی ماهور و منطقه‌بندی فلزی و دگرسانی در آن به ویژه همراهی بیشتر سولفوسالت‌های بیسموت، عضو غنی از تنانیت فاهلور، فاماتینیت، اسفالریت فقیر از آهن و گرینوکیست در بخش غنی از مس با هاله دگرسانی بیشتر سریستی تا گاه آرژیلی پیشرفته، (۲) عوامل کنترل‌کننده گسترش فرایندهای برونزاد در این کانسار، (۳) ویژگی سولفیداسیون بالای بخش مرکزی کانسارهای کردیلرن خوب منطقه‌بندی شده و نیز (۴) رفتار متفاوت عناصر عنوان شده و Mo در مقدار جذب به کانی‌های کلاهیک شسته شده طی هوازگی که بیشتر وابسته به حضور آنها در فازهای کانایی متفاوت با استعداد هوازگی متفاوت و اسیدینه محلول‌های برونزاد است، بررسی جامع کانی‌شناسی منطقه اکسیدان و آنالیز عنصری کلاهیک شسته‌شده (کلاهیک آهنی و دگرسانی) و تفسیر و نقشه کردن آن در مقیاس کانسار و ناحیه‌ای می‌تواند راهنمای مفیدی در اکتشاف کانسارهای سولفیدی پنهان فراهم کند.

فرایند برونزاد و همچنین شرایط اقلیمی و تکتونیکی و زمان از عوامل کنترل‌کننده نوع و مقدار محصولات برونزاد در این مرحله بوده‌اند. در مرحله دوم آتاکامیت و پاراتا کامیت فراوان و کریزوکولا به‌صورت جانیشینی کانی‌های اکسید مس قبلی، در شرایط بسیار خشکی که از پلیوسن آغاز شده است، تحت شرایط اقلیمی مشابه با صحرای آتاکامای شیلی، از شورابه‌ها (به احتمال زیاد شورابه‌های سازندی) تشکیل و در اقلیم بسیار خشک حاضر در لوت نیز حفظ شده است. مقداری کلرید سرب و دیابولیت نیز در این مرحله رخ داده‌اند. بنابراین، بررسی ژئوشیمی و ایزوتوپی روی این مجموعه‌های برونزاد که در جاهای دیگر کمیاب است، می‌تواند شواهد شاخصی برای منشأ شورابه و تعیین دقیق آغاز شرایط آب‌وهوایی بسیار خشک و مدل‌سازی تاریخ اقلیم گذشته در منطقه ماهور و لوت مرکزی فراهم کند.

تفسیر کانی‌شناسی کلاهیک شسته‌شده در ماهور نشان می‌دهد کانی‌سازی درونزاد تحت فرایند برونزاد شامل مقدار سولفید بالا ولی با نسبت متغیری از پیریت به کالکوپریت و اسفالریت بوده و فرایند برونزاد بیشتر در هاله دگرسانی سریستی گسترش یافته که در آن کاتیون‌های لازم برای تشکیل کانی‌های ژاروسیت و آلونیت فراهم بوده است (کلاهیک شسته‌شده نابالغ). بنابراین، اکسایش سولفیدی کامل صورت نگرفته و اسید کافی برای شستشوی کامل کاتیون‌های بازی و بنابراین حمل

کتابنگاری

- آقاباتی، س. ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- بومری، م.، بیابانگرد، ح.، ناکاشیما، ک. و اسفرم، م.، ۱۳۹۲- پیدایش و شیمی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی برونزاد در کانسار چندفلزی ماهور، غرب نهندان، پتروژئی، سال چهاردهم، ص. ۱۷ تا ۳۰.
- حسین‌زاده، ق.، ۱۳۸۷- مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمی، سیالات درگیر، کانی‌سازی، دگرسانی و ژنز کانسار مس پورفیری سوناجیل - شرق هریس (استان آذربایجان شرقی). رساله دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، ۲۱۸ ص.
- شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، ۱۳۹۱- گزارش نهایی اکتشاف در ناحیه امیدبخش ماهور، استان خراسان جنوبی.
- میرزایی‌رانی، ر.، احمدی، ع. و میرزاد، ح.، ۱۳۹۱- تعیین منشأ سیالات کانه‌ساز با استفاده از مطالعه ریز کاوش الکترونی و ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانسار چندفلزی ماهور (شرق بلوک لوت، ایران مرکزی)، مجله پتروژئی، سال سوم، شماره دهم، ص. ۱ تا ۱۲.
- یونسی، س.، حسین‌زاده، ر. و مؤید، م.، ۱۳۹۶- کانی‌شناسی کانسار (Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهور، باختر دهسلم: رهیافتی بر ژنز و نوع کانه‌زایی، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و هفتم، شماره ۱۰۵، سازمان زمین‌شناسی کشور، ص. ۲۹۵ تا ۳۰۸.
- یونسی، س.، حسین‌زاده، م. ر.، مؤید، م. و مقصودی، ع.، ۱۳۹۵- بررسی زمین‌شناسی، پتروژئی و پتروژنز سنگ‌های آذرین محدوده معدنی - اکتشافی ماهور، باختر دهسلم، با نگرشی بر جایگاه تکتونوماگمایی لوت، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور، ص. ۱۷۹ تا ۱۹۸.

References

- Alpers, C. N. and Brimhall, G. H., 1988- Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geological Society of America Bulletin*, 100: 1640- 1656. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1640:mmccit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1640:mmccit>2.3.co;2)
- Anderson, J. A., 1982- Characteristics of leached capping and techniques of appraisal. In: Titely, S. R., eds., *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*. Tuscon, University of Arizona Press: 275- 295.
- Arribas, A. Jr., Cunningham, O., Rytuba, J., Rye, O., Kelly, W., Podwysocki, W., McKee, E. and Tosdal, R., 1995- Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of Rodalquilar Au alunite deposit, Spain. *Economic Geology*, 90: 795- 822. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.4.795>
- Barnes, H. L., 1997- *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, third edition, New York, John Wiley and Sons, 797p.
- Bloom, H., 1966- Geochemical exploration as applied to copper molybdenum deposits, in Titely, S.R., Hicks, C.L., eds. *Geology of the porphyry copper deposits, Southwestern North America*: Tuscon, University of Arizona Press, 111- 119.
- Brugger, J., McPhail, D. C., Wallace, M. and Waters, J., 2003- Formation of willemite in hydrothermal environments. *Economic Geology*, 98: 819- 835. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.819>
- Cameron, E. M., Leybourne, M. I. and Palacios, C., 2007- Atacamite in the oxide zone of copper deposits in northern Chile: involvement of deep formation waters? *Mineralium Deposita*, 42: 205- 218. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0108-0>
- Chávez, W. X., 2000- Supergene oxidation of copper deposits: Zoning and distribution of copper oxide minerals. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 41: 10- 21. <https://pdfs.semanticscholar.org/8aa0/81d4e9f27d4ceef30e75c66e1158e7ec0e1a.pdf>
- Foster, G. L., Royer, D. L. and Lunt, D. J., 2017- Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years, *Nat Commun.*, 8: 14845. <http://doi.org/10.1038/ncomms14845>.

- Guilbert, J. M. and Park, Jr. C. F., 1986- The geology of ore deposits, W. H. Freeman and Company, New York, 985p.
- Hannington, M., 1993- The formation of atacamite during weathering of sulfides on the modern seafloor. *Canadian Mineralogist*, 31:945- 956. <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/issue/31/4>
- Hemley, J. J., Hostetler, P. B., Gude, A. J. and Mountjoy, W. T., 1969- Some stability relations of alunite. *Economic Geology*, 64: 599- 612. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.64.6.599>
- Jarrell, O. W., 1944- Oxidation at Chuquicamata, Chile: *Economic Geology*, 39: 251- 286.
- Lapakko, K., 2002- Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview. IIED, WBCSD, Great Britan, 30 pp. <https://pubs.iied.org/pdfs/G00559.pdf>
- 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.
- Leybourne, M. I. and Cameron, E. M., 2008- Source, transport, and fate of rhenium, selenium, molybdenum, arsenic, and copper in groundwater associated with porphyry Cu deposits, Atacama Desert, Chile. *Chem Geol*, 247: 208- 228. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.017>.
- Miri Beydokhti, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F. and Klotzli, U., 2015- U-Pb zircon geochronology, Sr – Nd geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Mahoor granitoid rocks (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 192- 205.
- Nordstrom, D. K. and Alpers, C. N., 1999- Geochemistry of mine waters: Reviews in *Economic Geology*, 6A: 133- 160.
- Palmer, A. N. and Palmer, M. V., 2000- Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico and West Texas. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62: 91- 108. <https://caves.org/pub/journal/PDF/V62/v62n2-Palmer.pdf>
- Parker, R. L. 1962- Isomorphous substitution in natural and synthetic alunite. *American Mineralogist*, 47: 127- 136. http://www.minsocam.org/ammin/AM47/AM47_127.pdf
- Reich, M. and Vasconcelos, P. M., 2015- Geological and Economic Significance of Supergene Metal Deposits. *Elements*, 11: 305- 310. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.5.305>.
- Reich, M., Palacios, C., Parada, M. A., Fehn, U., Cameron, E. M., Leybourne, M. I. and Zúñiga, A., 2008- Atacamite formation by deep saline waters in copper deposits from the atacama desert, chile: evidence from fluid inclusions, groundwater geochemistry, TEM, and 36Cl data. *Mineralium Deposita*, 43: 663- 675. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0184-4>
- Reich, M., Palacios, C., Vargas, G., Luo, S., Cameron, E. M., Leybourne, M. I., Parada, M. A., Zúñiga, A. and You, C. F., 2009- Supergene enrichment of copper deposits since the onset of modern hyperaridity in the Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita*, 44: 497- 504. <https://doi.org/10.1007/s00126-00-022-3>
- Reichert, J. and Borg, G., 2008- Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits. *Ore Geology Reviews*, 33: 134- 151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.02.006>
- Ritchie, A. I. M., 1994- The Waste-rock Environment, in: *Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*, Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook (J.L. Jambor and D.W. Blowes, eds.), v. 22, p. 133-161.
- Rojas, N., Drobe, J., Lane, R. and Bonafede, D., 1999- El pórfido cuprífero de Taca Taca Bajo, Salta, in Zappettini, E.O., ed., *Recursos minerales de la República Argentina: Buenos Aires, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR Anales*, 35: 1321- 1331.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Web, J. S., 1979- *Geochemistry in mineral exploration*. Academic Press, 657 p. <https://doi.org/10.1017/S0016756800029046>.
- 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.) Geological Association of Canada, Special paper, 36: 97- 110.
- Saaltink, M. W., Domènech, C., Ayora, C. and Carrera, J., 2002- Modelling the oxidation of sulphides in an unsaturated soil. In: Younger, P., Robins, N.S. (Eds.), *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*. Geological Society, London, Special Publication, 198: 187- 204.
- Sangameshwar, S. R. and Barnes, H. L., 1983- Supergene processes in zinc–lead–silver sulfides ores in carbonates. *Economic Geology*, 78: 1379- 1397. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.7.1379>.
- Scott, K. M., 1990- Origin of alunite- and jarosite-group minerals in the Mt. Leyshon epithermal gold deposit northeast Queensland, Australia. *American Mineralogist*, 75: 1176- 1181.
- Scott, K. M., Ashley, P. M. and Lawie, D. C., 2001- The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn-Pb-Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 72: 169- 191. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00159-5)
- Seal, R. R., Foley, N. K., Wanty, R. B., 2002- Introduction to geoenvironmental models of mineral deposits. In: Seal II, R.R., Foley, N.K. (Eds.), *Progress on Geoenvironmental Models for Selected Mineral Deposit Types*. USGS Open File Report 02-195: 1- 7.
- Sillitoe, R. H. and Clark, A. H., 1969- Copper- and copper-iron sulfides as the initial products of supergene oxidation, Copiapó mining district, northern Chile. *American Mineralogist*, 54:1684- 1710.
- Sillitoe, R. H., 2005- Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology 100th Anniversary*: 723- 768.
- Woods, T. L. and Garrels, R. M., 1986- Phase relations in some cupric hydroxy minerals. *Economic Geologist*, 81: 1989- 2007. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.8.1989>.

Procedure of supergene processes with an interpretation from leached capping and oxide enrichment zone in Mahour polymetal deposit, west of Dehsalm

S. Younesi¹, M. R. Hosseinzadeh^{2*} and M. Moayyed²

¹Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2018 June 01

Accepted: 2018 September 09

Abstract

Mineralogy of oxide zone as clue about past climate reveals occurrence of supergene enrichment processes in Mahour Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) mineralization, in central Lut, during two main stages: In first stage that supergene processes have occurred from meteoric waters in an arid climate during Oligocene to Upper Miocene, leached capping contains larg jarosite, natrojarosite and goetite in various ratios and less hematite and sulfur has formed associated with supergene argillic alteration with quartz, alunite, kaolinite, montmorillonite, and gypsum minerals. In response to neutralization of supergene solutions in that climate, an abundance of smithsonite and malachite with neotocite and greenokite and/or hawleite and minor azurite and silicate, phosphate and arsenate minerals precipitated in oxide enrichment zone and consequence immature sulfide enrichment generated. In second stage, the precipitation of atacamite, paratacamite and chrysocolla have been formed through the interaction of saline waters and preexisting copper oxides after the onset of hyperaridity at Pliocene, and have been preserved since that time. Mineralogy features of leached capping provide insights into hypogene ore mineral and alteration types and indicate sufficient acid has not been produced for effective leaching of Cu from oxidised zone and hence, they do not suggest extensive chalcocite enrichment under water table. An interpretation that mineralogy of oxide zone is also illustrative of it and results from exploration drill holes confirm it. With respect to style of Mahour polymetal mineralization and similar mineralizations in district, detail investigation of oxide zone and mapping leached caps in ore deposit and district scale can be used as suitable exploration tool in the search for conceal ore deposits.

Keywords: Leached capping, Supergene oxide and sulfide enrichment, Smithsonite, Atacamite, Polymetal Mahour, Lut Block.

For Persian Version see pages 291 to 300

*Corresponding author: M. R. Hosseinzadeh; E-mail: mr-Hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir