

کانه‌نگاری و شیمی سولفیدهای درون‌زاد در کانسار ماهور، غرب نهبندان، شرق ایران

محمد بومری^{(۱)*}، حبیب بیابانگرد^۱، کازو ناکاشیما^۲ و مرتضی اسفرم^۳

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲. استاد بخش علوم محیط و زمین، دانشکده علوم، دانشگاه یاماگاتا، شهر یاماگاتا، ژاپن

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوشیمی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۱/۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۸

چکیده

کانسار معدنی ماهور در ۱۳۰ کیلومتری غرب نهبندان در حاشیه شرقی بلوک لوت واقع شده است. سولفیدهای درون‌زاد مس و روی در این منطقه عمدتاً در زیر یک زون اکسیدان و در مناطق عمیق حفظ شده‌اند. داسیت‌های دگرسان شده، مهم‌ترین سنگ‌های میزبان این سولفیدها می‌باشند. عمده‌ترین واحدهای سنگی در منطقه روانه‌های آندزیت، آندزی بازالت، داسیت و نهشته‌های آذرآواری (توف و لیتیک توف) با سن ائوسن است. این سنگ‌ها کالک - آلکالن و متعلق به جایگاه تکتونیکی حاشیه قاره می‌باشند. پیریت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و یک کانی غنی از نقره از محلول‌های گرمابی در شکستگی‌ها و فضاهای خالی به صورت رگه‌ای تشکیل شده‌اند. شیمی این کانی‌ها و توزیع نقره، روی و سرب در آن‌ها وسیله یک ابرگمانه زن (EPMA) مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی این کانی‌ها متنوع و بعضی از آنها دارای نقره می‌باشند. این نوع کانی‌زایی در ماهور دارای مشخصات حدواسط بین کانسارهای رگه‌ای فلزات پایه و اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ده سلم، کانسار ماهور، کانی‌زایی درون‌زاد، محلول‌های گرمابی، نقره.

مقدمه

هیرد (Eshraghi et al., 2010) کانی‌زایی پلی‌متال قله چاه - شوراب (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۰) است. کانسار ماهور در ۱۳۰ کیلومتری غرب نهبندان و حاشیه شرقی بلوک لوت واقع شده است. این ناحیه از خشک‌ترین مناطق ایران است و بخشی از محدوده مورد مطالعه به وسیله ماسه بادی پوشیده شده است. با توجه به شدت و گسترش کلاهک آهنی و فراوانی کربنات‌های مس، سرب و روی در این منطقه، تلاش‌های اکتشافی جهت دستیابی به ذخایر ارزشمند عمق در حال انجام است. مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی اندکی در این منطقه انجام شده است که می‌توان به مطالعات مقدماتی توسط شرکت کاوشگران و مطالعات ژئوفیزیکی توسط شرکت زمین‌سنجش رایان اشاره کرد (به نقل از اسفرم، ۱۳۹۰). ژئوشیمی و توالی پاراژنزی کانی‌های موجود در این کانسار نیز توسط اسفرم (۱۳۹۰)، میرزایی و همکاران (۱۳۹۱)

ایران یکی از کشورهایی است که دارای منابع قابل توجهی از مس، سرب و روی است. منابع عمده سرب و روی در ایران غالباً از نوع دره می‌سی‌سی‌بی (MVT) و سولفید توده‌ای (VMS) و منابع مس نیز عمدتاً از نوع پورفیری می‌باشند (قربانی، ۱۳۸۶). یکی از ویژگی‌های بارز زمین‌شناسی کشور ایران ولکانیسم و پلوتونیزم گسترده سنوزوئیک است که در بخش‌های متعددی از ایران مرکزی به چشم می‌خورد (Berberian and King, 1981). این نوع ماگماتیسم در امتداد کمان ماگمایی آذربایجان - بلوچستان (ارومیه - دختر) میزبان کانسارهای مس پورفیری مثل سرچشمه، میدوک و سونگون (Boomeri et al., 2009, 2010) و در بلوک لوت میزبان کانسارهایی مثل کانسار رگه‌ای مس قلعه زری (Hassan-Nezhad and Moore, 2006)، کانی‌زایی طلا در

و اسفرم و همکاران (۱۳۹۱) بررسی شده است. هدف از این مقاله بررسی، کانی‌شناسی، تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌های سولفیدی درون‌زاد و نهایتاً توالی و نوع کانی‌زایی در کانسارماهور می‌باشد.

جایگاه زمین‌شناسی

گستره مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در بلوک لوت که در شرق و جنوب شرق ایران واقع شده از شرق با گسل نهبندان از زون فلیش شرق ایران و از غرب توسط گسل ناینبد از بلوک طبس جدا می‌شود. مرز شمالی آن گسل درونه و مرز جنوبی آن فرو افتادگی جازموریان است (شکل ۱). بلوک لوت دارای روند شمالی - جنوبی به درازای حدود ۹۰۰ کیلومتر و عرض حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر است (Stocklin 1968). زمین‌شناسی بلوک لوت دارای پنج ویژگی مهم به شرح زیر است (آقانباتی، ۱۳۸۳).
۱- سنگ‌های قدیمی‌تر از تریاس میانی تحت تاثیر فاز کوهزایی

کیمیرین پیشین واقع شده‌اند.

۲- فعالیت آتشفشانی و پلوتونسیم به نسبت شدید از ژوراسیک میانی (سیمیرین میانی) به ویژه در نواحی دهسلم و چهار فرسخ شروع شده است.

۳- سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری در ائوسن به اوج خود رسیده است، به طوری که ضخامت واحدهای آتشفشانی ترشیاری در بلوک لوت حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر تخمین زده شده است و بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشاند.

۴- نهشته‌های دریاچه‌ای تقریباً افقی پلیوسن - پلیستوسن به نام سازند لوت که نشانگر عملکرد ضعیف فاز پسین رخداد

چین‌خوردگی در این بلوک است.

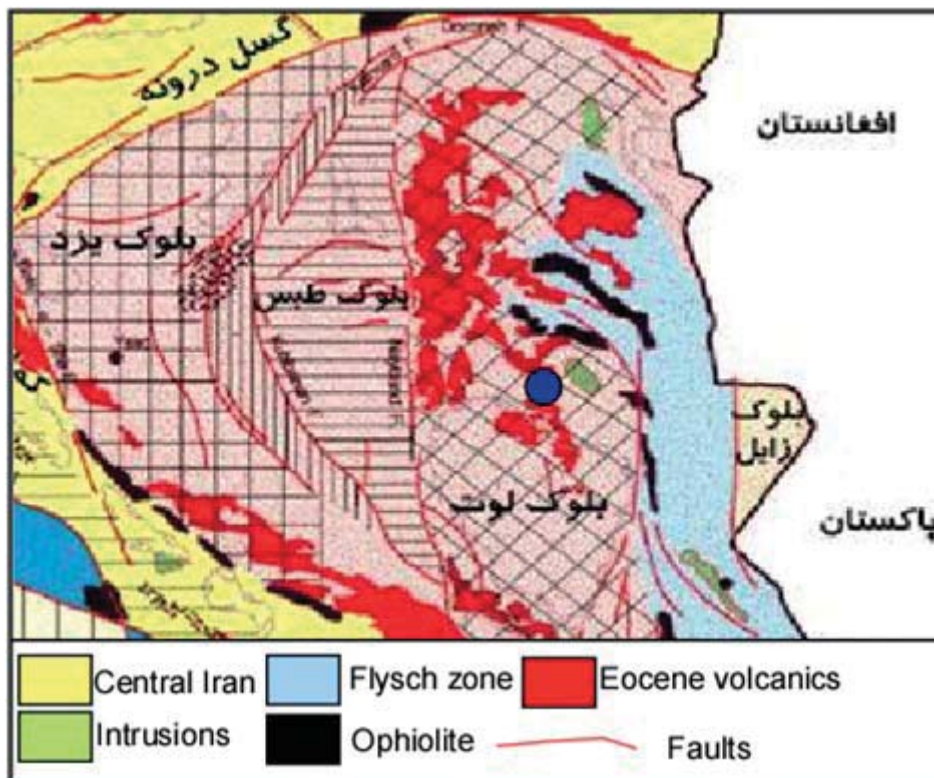
۵- در بلوک لوت و مناطق مجاور آن گسل‌های شمالی - جنوبی طولی وجود دارند که به سمت غرب خمیدگی دارند و از نوع امتدادلغز راستگردند. گسل نهبندان در مرز شرقی و گسل ناینبد در مرز غربی بلوک لوت جزء این گسل‌ها هستند (شکل ۱). امامی (۱۳۷۹) سنگ‌های آتشفشانی بلوک لوت را به دو بخش

قدیم و جوان به شرح زیر تفکیک نموده است:

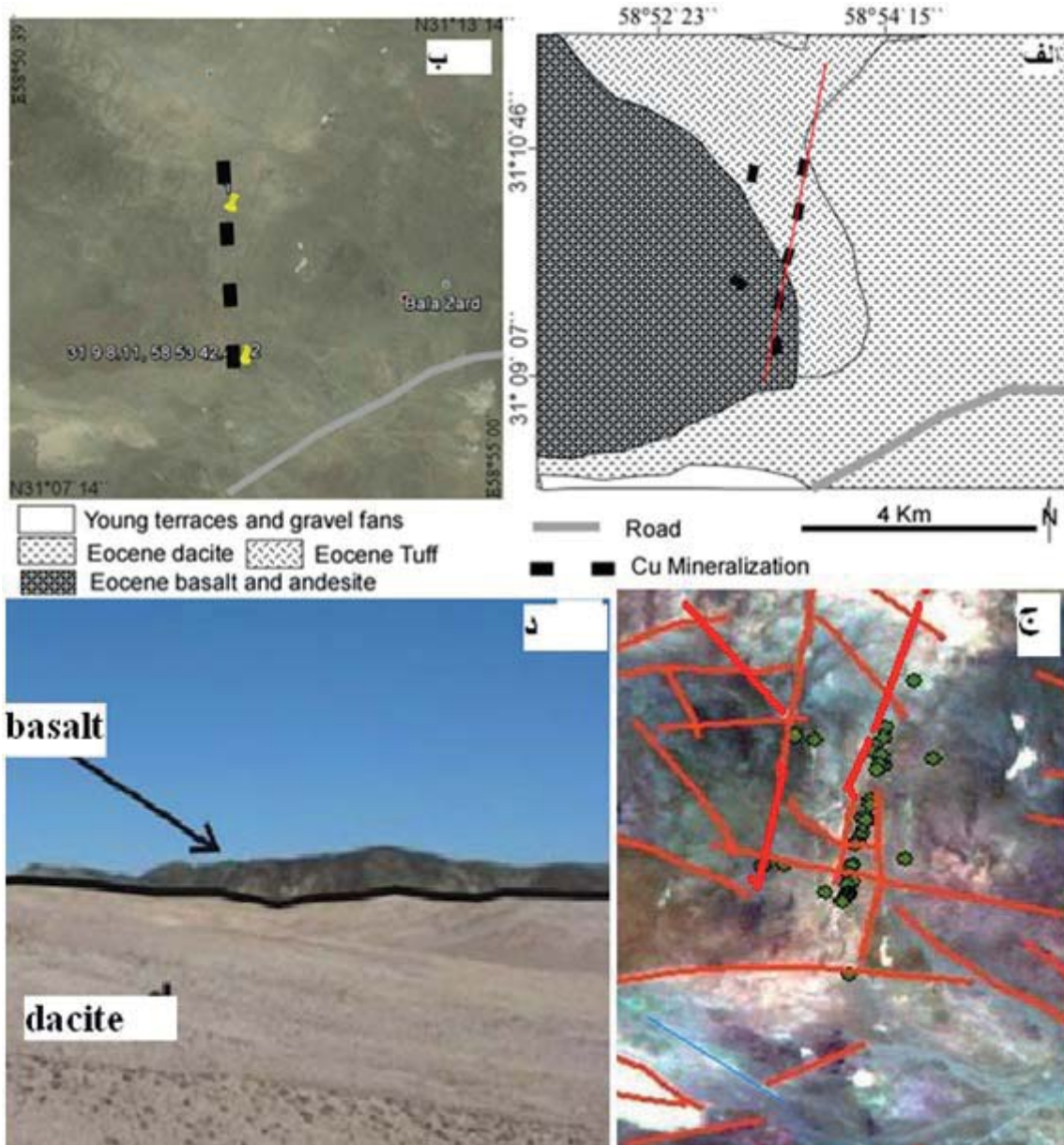
الف- سنگ‌های آتشفشانی پالئوژن و ائوسن که بیشتر اسیدی و حدواسط بوده و اغلب شامل سنگ‌های ریولیتی تا آندزیتی می‌باشند؛ ب- سنگ‌های آتشفشانی نوژن و کوآترنر که کم و بیش بازیک و عمدتاً از نوع بازالتی هستند و غالباً محدود به گسل‌ها و شکستگی‌های محدود کننده بلوک لوت می‌باشد.

زمین‌شناسی منطقه ماهور و اطراف آن در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ دهسلم مفصلاً توصیف شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۷۱).

بخش ساده شده‌ای از این نقشه که میزبان کانسارماهور است در شکل ۲-الف نشان داده شده که در میان سنگ‌های آتشفشانی ترشیاری واقع شده است. شکل ۲-ب و ج به ترتیب تصاویر Google earth و نمایش گسل‌ها را روی تصویر ماهواره‌ای منطقه هستند. داسیت‌ها و ریوداسیت‌ها قسمت اعظم شرق، جنوب و جنوب شرق محدود را تشکیل می‌دهند در حالی که آندزیت بازالت‌ها در غرب آن گسترش دارند (شکل ۲-د). توف‌ها (لیتیک توف) اکثراً با ترکیب اسیدی تا متوسط به رنگ سبز و خاکستری در شمال و مرکز محدوده مشاهده می‌شوند. رسوبات کوآترنری و نهشته‌های آبرفتی جوان شامل ماسه، سیلت و رس در جنوب



شکل ۱. موقعیت بلوک لوت نسبت به مناطق مجاور. محل تقریبی کانسارماهور با دایره آبی پرنگ مشخص شده است (آقانباتی، ۱۳۸۳؛ Stocklin 1968).



شکل ۲. الف) نقشه زمین‌شناسی ساده شده ماهور بر مبنای نقشه حسینی و همکاران (۱۳۷۱) که رگه معدنی با خطوط منقطع مشخص است. ب) عکس از Google earth که شماره‌های ۱ و ۲ نقاط حفاری است. ج) عکس ماهواره‌ای که بر روی آن بعضی گسل‌ها مشخص شده. دایره‌های کوچک محل گمانه‌های حفاری است (اسفرم، ۱۳۹۰). آبراهه‌ها در این تصویر قابل شناسایی است. د) تصویری از مرز سنگ‌های بازالتی (سیاه) با سنگ‌های داسیتی (سفید). خطوط قرمز محل گسل است.

ماهور، از سطح زمین تا اعماق ۱۵۰ متری برداشت شده است. پس از مطالعات ماکروسکوپی از این نمونه‌ها مقاطع نازک و صیقلی تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان عبوری- منعکسه بررسی شدند. تعدادی از نمونه‌ها نیز با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) در آزمایشگاه شرکت بینالود در مشهد مورد آزمایش واقع شدند. ترکیب شیمیایی سولفیدهای درون‌زاد موجود در کانسار معدنی ماهور با روش WDS به وسیله یک سوپرالکترون پروب میکروآنالیزور (EPMA) خودکار مدل JEOL.JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن با ولتاژ ۲۰ کیلو وات و جریان 2×10^{-8} آمپر تعیین شده است. قطر پرتوی الکترونی ۵ میکرون

غربی منطقه، پهنه‌های وسیعی از زمین‌های کم ارتفاع را پوشانده است.

سنگ میزبان کانسار مس ماهور از سنگ‌های داسیتی تشکیل شده است. سنگ‌های ولکانیکی در محدوده مورد مطالعه از ماگمای کالک آلکالن حاصل شده و مشخصات ژئوشیمیایی آنها مشابه با سنگ‌های تشکیل شده در کمان ولکانیکی حاشیه قاره‌ای است (اسفرم، ۱۳۹۰).

روش بررسی

بیش از ۵۰ نمونه از سنگ‌های در برگیرنده و از کانسنگ‌های

رگچه‌هایی از مالاکیت مشاهده می‌شود. در یکی از گمانه‌ها به مختصات "۵۸° ۱۰' ۳۱" شمالی و "۵۸° ۵۳' ۳۱" شرقی تا عمق ۵۰ متری آثار هیدرواکسیدهای آهن دیده می‌شود در یکی دیگر از گمانه‌ها به مختصات "۸,۱۱' ۹" شمالی و "۴۲,۴' ۵۳° ۵۸" شرقی تا ۱۰۰ متری عمدتاً داسیت‌های غنی از پیریت دیده می‌شود و به طرف اعماق بیشتر کالکوپیریت، کزولیت، گالن و اسفالریت نیز ظاهر می‌شوند. بنابراین بر اساس درجه اکسیداسیون، کانی‌زایی در ماهور را می‌توان از سطح به عمق به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- زون برون‌زاد اکسیدی که در سطح رخنمون داشته و عمدتاً از همتیت، گوتیت، لیمونیت، ژاروسیت، مالاکیت، آزوریت، کربنات‌ها و سولفات‌های سرب و روی تشکیل شده است. همان‌طور که ذکر شد پیریت در سنگ‌های در برگیرنده در سطح زمین مشاهده می‌شود و حتی تا فاصله ۱۰۰ متری از رگه معدنی وجود دارد. البته گالن نیز از سولفیدهایی است که در این زون حضور دارد.

۲- زون برون‌زاد اکسیدی-سولفیدی، تفاوت این زون با زون اول حضور کانی‌های سولفیدی چون کالکوسیت است که نشان دهنده حضور زون احیایی است. البته کانی‌های زون اکسیدی درصد بالایی از این زون را نیز به خود اختصاص داده‌اند.

۳- زون برون‌زاد سولفیدی، این زون عمدتاً از کالکوسیت، دیژنیت و کولیت تشکیل شده است.

۴- زون تدریجی یا انتقالی برون‌زاد به درون‌زاد، که در آن سولفیدهای درون‌زادی چون کالکوپیریت، گالن و اسفالریت با سولفیدهای ثانویه‌ای چون کولیت و کالکوسیت مشاهده می‌شود.

۵- زون درون‌زاد، این زون عمدتاً از سولفیدهای درون‌زادی چون کالکوپیریت، گالن، اسفالریت و سولفیدهای نقره‌دار تشکیل شده است. کانی‌زایی در این عمق به صورت پراکنده و رگچه‌هایی از اسفالریت، کالکوپیریت و گالن در سنگ‌های آذرین سرسیستی و برشی شده است.

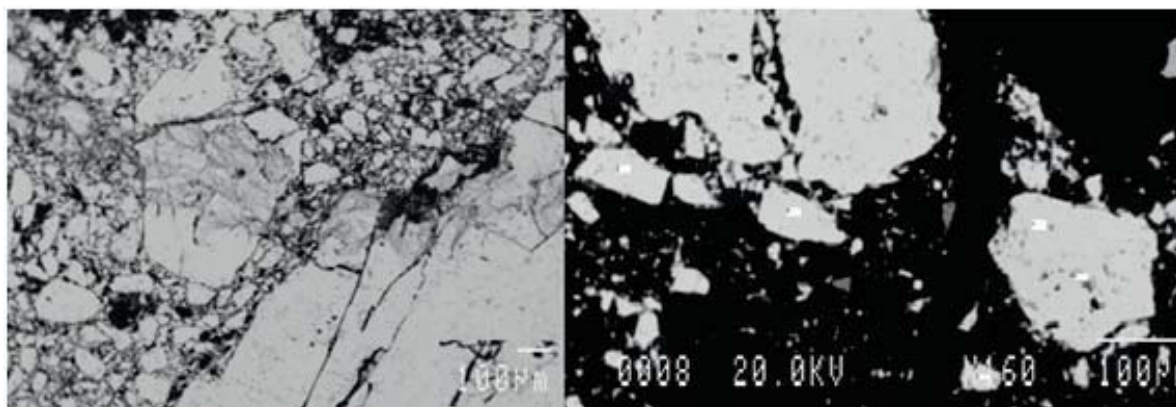
لازم به ذکر است که پیریت در تمام زون‌های یکی از سولفیدهای فراوان است و رگچه‌هایی از کانی‌های محیط اکسیدان همچون مالاکیت و آزوریت تا اعماق زیاد مشاهده می‌شوند.

و غلظت داده‌ها بر اساس برنامه کامپیوتری ZAF محاسبه شده است. عناصری چون Te, Se, Au, Bi, Cd, Hg, Pb, Zn, Sb, Ag, As, Mn, Fe, Cu به طور کمی اندازه‌گیری شدند.

کانی‌زایی

کانی‌زایی به صورت رخنمون‌های ناپیوسته از هیدرواکسیدهای آهن، مس، سرب و روی در محدوده مورد مطالعه دیده شده است که تقریباً امتداد آن‌ها شمالی - جنوبی می‌باشد. بر اساس برداشت ژئوفیزیکی، کانی‌زایی در این امتداد تا بیش از ۳ کیلومتر نیز وجود دارد (عبدالرزاق نژاد، ۱۳۸۷). این مطالعات نشان می‌دهد که کانسار به شکل رگه‌ای است که در گسلی با شیب ۸۵ درجه تشکیل شده است (اسفرم، ۱۳۹۰). در بعضی از نقاط، کانی‌زایی در دو رگه موازی تقریباً عمودی رخ داده است. با حفر ترانشه شکل رگه‌ای کانسار قابل تشخیص است. ضخامت بخش پر عیار رگه‌ها از یک متر تا دو متر متغیر است. در اطراف این رگه هاله دگرسانی تقریباً وسیعی که حاوی پیریت و کانی‌زایی ضعیفی است به ضخامت حدود ۱۰۰ متر مشاهده می‌شود. یکی از ویژگی‌های رگه معدنی ماهور برشی شدن رگه و سنگ‌های میزبان سیلیسی است که هم در نمونه دستی و هم زیر میکروسکوپ قابل تشخیص است. برشی شدن در بخش مرکزی و در اعماق زیادتر گسترش بیشتری دارد؛ چون در بخش‌های کم‌عمق اکسیداسیون و فرآیندهای برون‌زاد باعث از بین رفتن ساخت و بافت برشی شده است. قطعات برشی، انحلال و خوردگی‌های زیادی نشان می‌دهند و به نظر می‌رسد عامل این برشی شدن سیالات گرمابی می‌باشند (شکل ۳). رخنمون‌های غنی از هیدروکسید آهن یا کلاهدک آهنی که بر روی رگه معدنی ماهور دیده می‌شوند، گسترش عمقی قابل توجهی دارند به طوری که آثار آن تا اعماق بیش از ۵۰ متر نیز دیده شده است. این کلاهدک آهنی دارای رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای، زرد و سفید است و کانی‌های مس‌دار به رنگ سبز و آبی در آن به فراوانی مشاهده می‌شود.

تنها کانی سولفیدی که در سطح مشاهده می‌شود، پیریت است ولی با افزایش عمق نسبت سولفیدها افزایش می‌یابد به طوری که در اعماق بیش از ۱۰۰ متر هیدروکسیدهای آهن کمیاب و فقط



شکل ۳. تصاویر Back scattered از خوردگی انحلالی اسفالریت (خاکستری) در نمونه‌های عمیق ماهور (۱۵۰ متری).

آنها به شرح زیر می‌باشد.

دگرسانی

دگرسانی‌های گرمابی در اطراف رگه‌های معدنی در ماهور گسترش زیادی دارند. انواع دگرسانی از مرکز رگه به اطراف شامل آرژیلیک، سریسیتی و پروپیلیتی است. دگرسانی سیلیسی و کربناتی نیز در همه این دگرسانی‌ها دیده می‌شود. دگرسانی سریسیتی مهمترین و اصلی‌ترین دگرسانی درون‌زاد در منطقه ماهور است که از سریسیت، کوارتز و پیریت تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی که ماهیت درون‌زاد آنها چندان مشخص نیست لیکن با دارا بودن کوارتز شبیه سنگ‌های داسیتی به نظر می‌رسند دچار دگرسانی سریسیتی شده‌اند و کانی‌های درون‌زاد مثل پلاژیوکلاز به زحمت قابل تشخیص هستند. پیریت در این زون دگرسانی عمدتاً به صورت دانه‌های پراکنده شکل‌دار دیده می‌شود. رنگ این زون در رخنمون زرد آجری می‌باشد که به دلیل اکسیداسیون پیریت است.

دگرسانی پروپیلیتی در فاصله دورتری از رگه معدنی ماهور و در سنگ‌های آندزیتی و بازالتی اتفاق افتاده است. در این زون کانی‌های درون‌زادی همچون پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و پیروکسن عمدتاً به کلریت و تا حدی نیز به اپیدوت و کلسیت دگرسان شده‌اند. رگچه‌های کلسیتی و سیلیسی نیز در این زون مشاهده می‌شوند.

بارزترین و گسترده‌ترین دگرسانی در کانسار ماهور دگرسانی سیلیسی است که به اشکال مختلف در همه زون‌های دگرسانی اتفاق افتاده است. به طوری که در زمینه سنگ‌ها به صورت جانثینی، رگچه‌ای و در فضاهای خالی گسترش دارد. کوارتز در رگچه‌ها از حاشیه به مرکز، دانه درشت‌تر شده است.

کانی‌شناسی

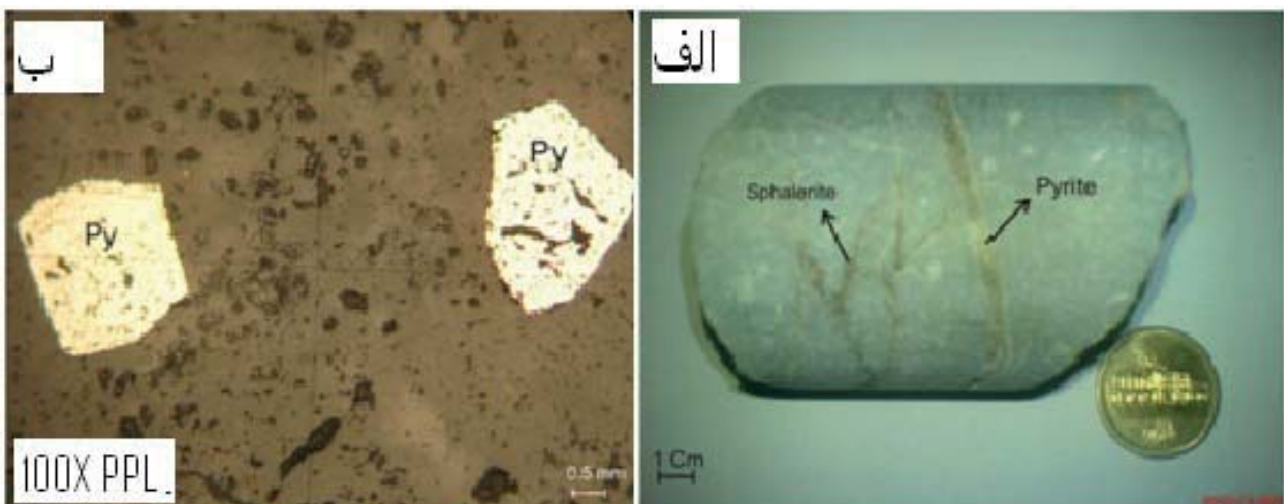
همان‌گونه که ذکر شد هدف این مقاله توصیف و مطالعه کانی‌های درون‌زاد در کانسار ماهور است که مشخصات بعضی از

مگنتیت

این کانی در کانسار ماهور کمیاب است و بیشتر در هاله‌های دگرسانی همراه با پیریت دیده می‌شود. این کانی در گمانه‌ای به مختصات $31^{\circ} 9' 7.8''$ شمالی و $58^{\circ} 53' 42.1''$ شرقی در عمق ۵۱ متری نیز تشکیل شده است. وجود این کانی در زیر میکروسکوپ و با پراش اشعه ایکس (XRD) نیز مشخص شده است (اسفرم، ۱۳۹۰). این کانی در خود رگه تحت تاثیر عوامل اکسیداسیون به مارتیت تبدیل شده است. مقدار این کانی در مقطع مورد مطالعه حدود ۲ درصد است.

پیریت

فراوان‌ترین سولفید موجود در کانسار ماهور می‌باشد این کانی در رگه‌های پر عیار و همچنین در هاله‌های دگرسانی از سطح تا اعماق مشاهده می‌شود. پیریت غالباً به صورت پراکنده در هاله‌های دگرسانی تشکیل شده است و عموماً دارای بافت افشان بوده و به صورت رگچه‌ای تا فاصله‌ای بیش از ۱۰۰ متر دیده می‌شود. این کانی را می‌توان فراوان‌ترین سولفید هاله دگرسانی به همراه مقدار کم اسفالریت به شمار آورد (شکل ۴-الف). مقدار پیریت در بعضی از مقاطع به ۲۰ درصد نیز می‌رسد. پیریت‌های ماهور از نظر شکل متنوع بود و از انواع کاملاً شکل‌دار (شکل ۴-ب) تا بی‌شکل تغییر می‌کنند از نظر اندازه نیز متغیرند. پیریت‌های به قطر نیم سانتی‌متر نیز در ماهور گزارش شده است (اسفرم، ۱۳۹۰). پیریت‌ها در سطح زمین معمولاً به هیدرواکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. پیریت‌های موجود در کانسار عمدتاً به صورت پراکنده در قطعات برشی تشکیل شدند و میزان آن در رگچه‌های قطع‌کننده این برش‌ها که حاوی سولفیدهای مس، سرب و روی هستند کم است.



شکل ۴. نمونه‌های حاوی پیریت از کانسار ماهور. الف) مغزه‌ای که رگچه‌های پیریت و اسفالریت در آن مشاهده می‌شود. ب) پیریت‌های شکل‌دار و پراکنده در یک سنگ سریسیتی شده.

کالکوپیریت

رخ قابل تشخیص است (شکل ۶-الف). گالن نسبت به دیگر سولفیدها مخصوصاً نسبت به اسفالریت در زون اکسیدان مقاوم‌تر است چون کانی‌های حاصل از تجزیه آن در سطح زمین اطراف آن را فرا می‌گیرند (شکل ۶-ب) و به صورت یک قشر غیرقابل نفوذ عمل می‌کنند و مانع از تماس آب با گالن می‌شود (Guilbert and Park, 1986). بنابراین همراه گالن در کانسار ماهور کانی‌های ثانویه سرب دار حضور دارند. کانی‌های مس دار مثل مالاکیت، آزوریت و کالکوسیت در سطح و اعماق کم معمولاً با گالن همراه هستند ولی با افزایش عمق ذرات کالکوپیریت و اسفالریت و حتی نقره افزایش پیدا می‌کنند. به نظر می‌رسد کانی‌های اخیر در مناطق سطحی نسبت به گالن زودتر تجزیه شده‌اند. از نظر بافتی گالن در صورت رگه‌های توده‌ای و در عمق بیشتر به صورت رگچه‌ای دیده می‌شود، در حالی که به صورت پراکنده در قطعات برشی نیز حضور دارد. مقدار گالن در بعضی مقاطع به بیش از ۹۵ درصد می‌رسد در حالی که در بعضی مقاطع اثری از آن دیده نمی‌شود.

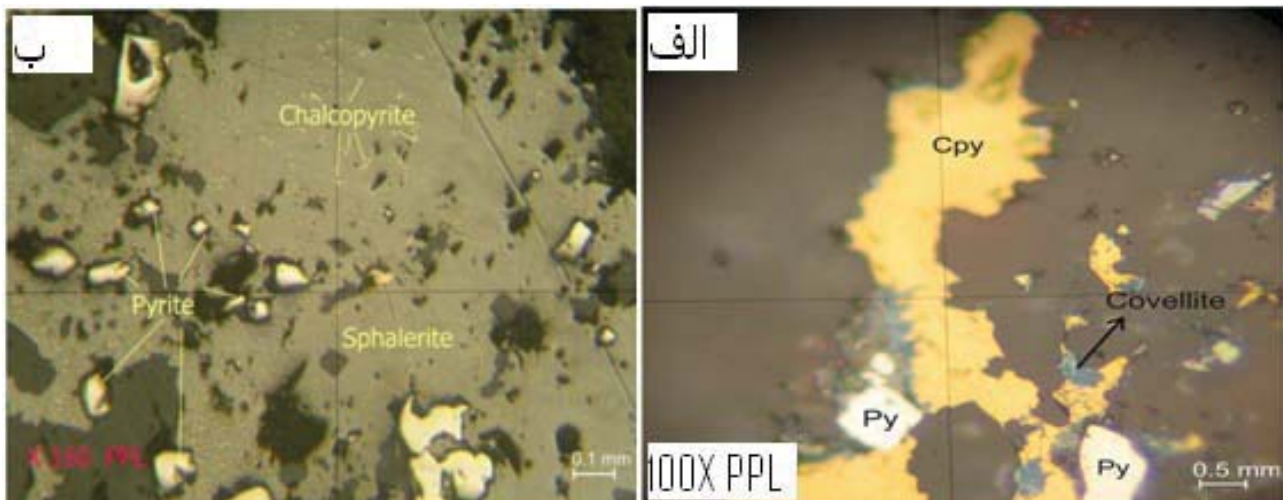
اسفالریت

در کانسار ماهور، اسفالریت در مناطق سطحی بسیار ناچیز است ولی با افزایش عمق مقدار آن زیاد می‌شود. این کانی غالباً به صورت رگچه‌ای و پراکنده تشکیل شده است. در بعضی نمونه‌ها اسفالریت دارای فراوانی حدود ۵ الی ۶ درصد است و به صورت پراکنده مشاهده می‌شوند و در بعضی نمونه‌ها اسفالریت دارای فراوانی ۲۰ درصد و به صورت رگچه‌ای با طول حدود ۶ و عرض یک سانتیمتر مشاهده می‌شود. اسفالریت در زیر میکروسکوپ خاکستری و بی‌شکل است و در بعضی از نمونه‌های آن ذرات زیادی از کالکوپیریت مشاهده می‌شود (شکل ۷-الف). اسفالریت‌ها در عمق عمدتاً در رگچه‌ها تشکیل شده است (شکل ۷-ب).

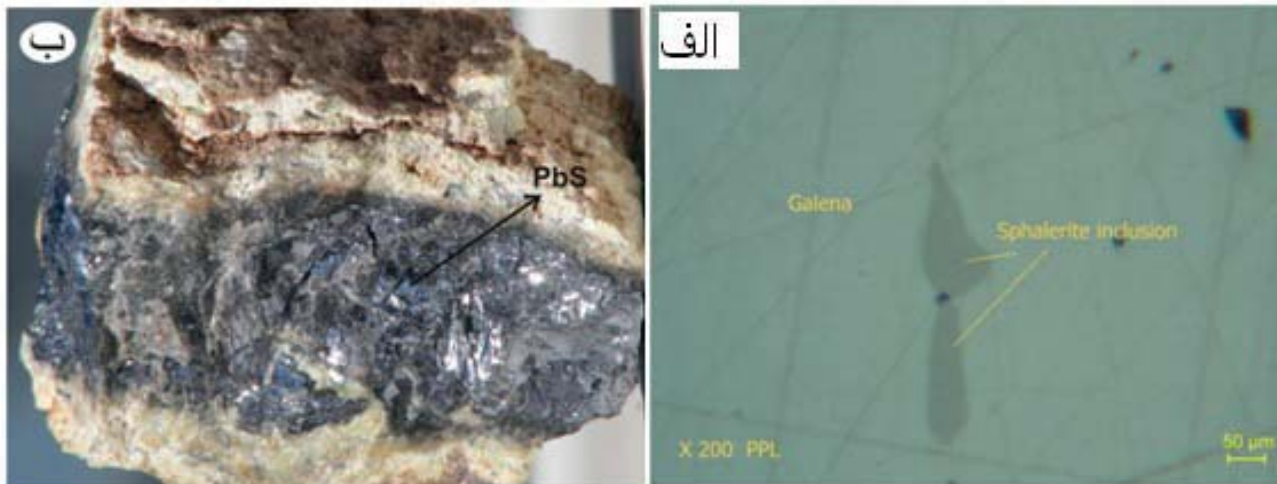
کالکوپیریت یکی از کانه‌های درون‌زاد مهم در کانسار ماهور با فراوانی کمتر از ۲ درصد است. این کانی به صورت دانه‌های بی‌شکل، ریز پراکنده، رگچه‌ای یا هم رشد با اسفالریت تشکیل شده است و مقدار آن در عمق بیشتر است (شکل ۵-الف). کالکوپیریت ندرتاً شکل دار یا نیمه شکل دار بوده و اندازه دانه‌های آن از ۰/۲ میلی‌متر کمتر است. در بخش‌های سطحی کانی‌های ثانویه مس دار مثل کوولیت و لیناریت غالباً با آن همراه است ولی در مناطق عمیق عمدتاً با اسفالریت همراه است (شکل ۵-ب). کانسنگ حاوی کالکوپیریت شدیداً برشی شده است و شامل دو نوع کانی‌زایی پراکنده و رگچه‌ای است. رگچه‌هایی از سولفیدهای مس، روی، سرب و نقره کانسنگ برشی را قطع کرده‌اند. هر چند کالکوپیریت در رگچه‌ها به فراوانی یافت می‌شود ولی به صورت پراکنده در قطعات برشی کمیاب است و احتمالاً به کوولیت و لیناریت تبدیل شده است، کالکوپیریت‌های موجود در رگچه‌ها هنوز سالم هستند. کالکوپیریت به وسیله اسفالریت جانشین شده و باعث بافت معروف ناخوشی کالکوپیریت شده و بقایای کالکوپیریت به صورت ذرات ریزی مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب). این بافت شبیه بافت اکسولوشن است.

گالن

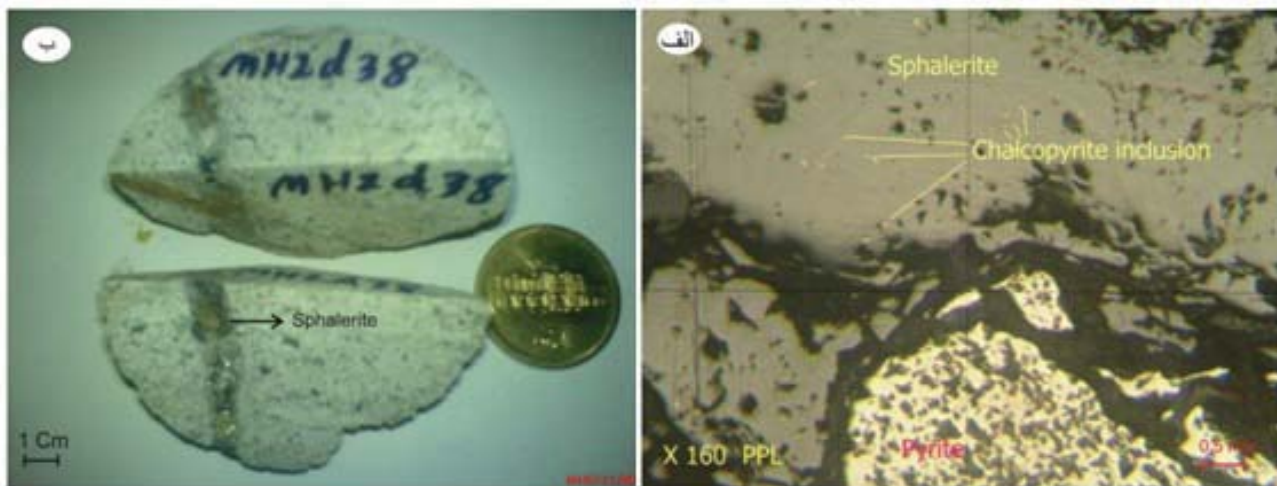
توزیع گالن در کانسار ماهور یکنواخت نیست به طوری که گالن عمدتاً در قسمت‌های جنوب و شمال رگه‌های معدنی تشکیل شده است و عبار سرب آن در این قسمت‌ها به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد (اسفرم، ۱۳۹۰). در قسمت مرکزی کانسار ماهور نیز می‌توان وجود گالن را در کنار مالاکیت مشاهده کرد. گالن در رخنمون‌ها و در مناطق سطحی و همراه با بخش اکسیدان نیز دیده می‌شود. گالن در زیر میکروسکوپ با رنگ سفید، خش فراوان و نوع



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از سولفیدها در ماهور. الف) کالکوپیریت بی‌شکل با رنگ زرد پر رنگ در فضای خالی به همراه کوولیت و پیریت. ب) ذرات کالکوپیریت در اسفالریت به همراه دانه‌های پراکنده پیریت.



شکل ۶. تصاویر گالن از کانسار ماهور. الف) تصویر میکروسکوپی گالن که ادخال اسفالریت در وسط آن دیده می‌شود (ب) تصویر ماکروسکوپی گالن با رنگ خاکستری که محصولات ثانویه سرب با رنگ سفید در اطراف آن قرار دارند.



شکل ۷. تصاویری از اسفالریت در کانسار ماهور. الف) تصویر میکروسکوپی اسفالریت با رنگ خاکستری که حاوی ذرات کالکوپیریت بوده و در کنار آن پیریت‌های درشت نیز دیده می‌شود. ب) اسفالریت همراه گالن و کالکوپیریت به صورت رگچه که سنگ سربستی شده را قطع کرده است.

بافت برشی هستند حرکت محلول‌های گرمایی با فشار و شکستن سنگ‌های مسیر همراه بوده است. وجود کالکوپیریت، اسفالریت و گالن در این قطعات برشی نشان دهنده تشکیل این کانی‌ها در همین مرحله است هرچند شروع تشکیل پیریت کمی زودتر بوده است. رگه‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت کمی بعدتر تشکیل شده‌اند و نهایتاً رگچه‌های متعددی به خصوص از اسفالریت و گالن سنگ‌های برشی شده را قطع می‌کنند. نقره و کانی‌های حاوی آن نسبت به سولفیدهای درون‌زاد دیرتر تشکیل شدند. این توالی پاراژنزی در جدول ۱ آورده شده است.

شیمی کانی‌ها

پیریت

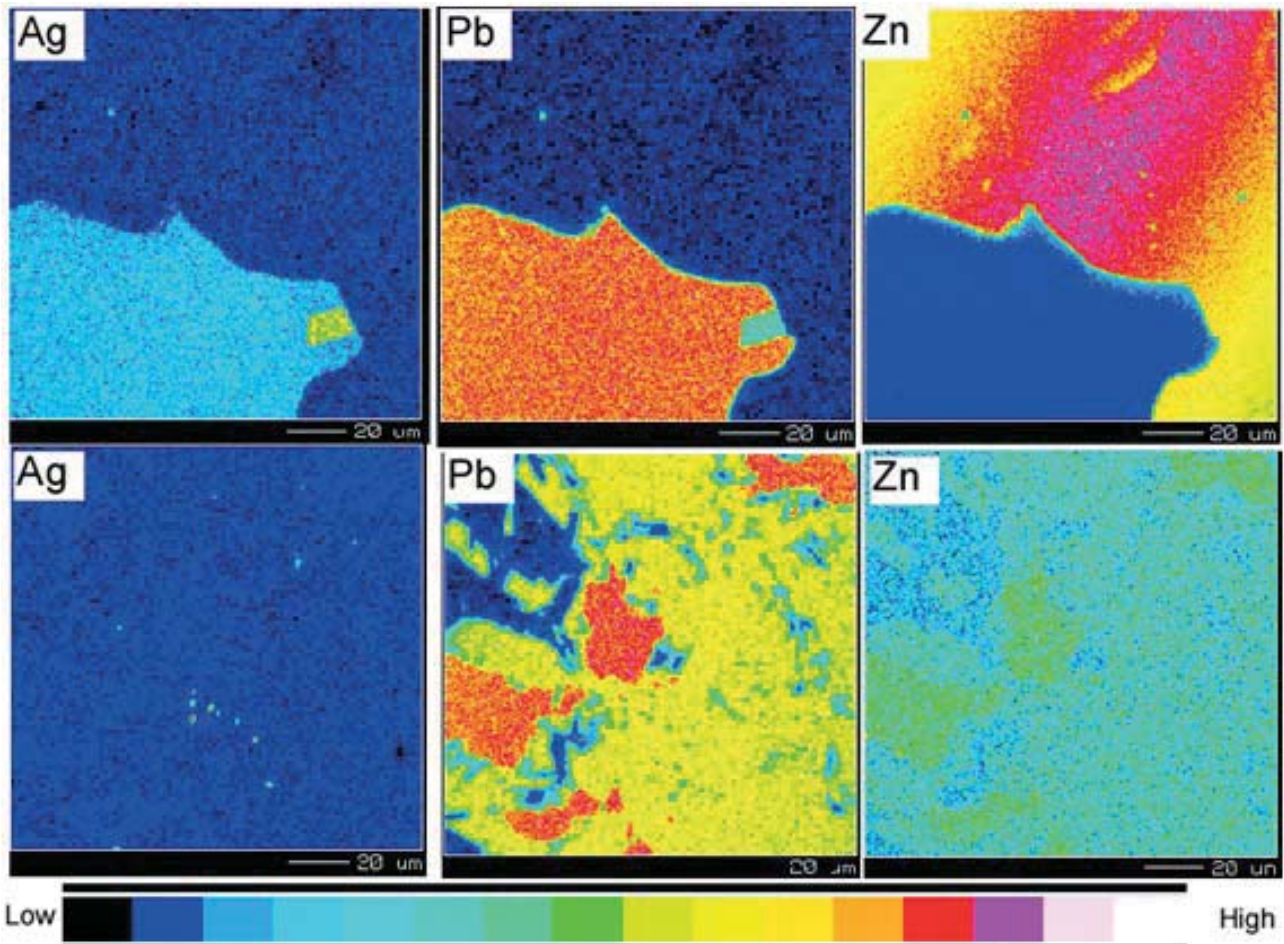
پیریت با فرمول FeS_2 ، از کانی‌های سولفیدی آهن محسوب می‌شود و حاوی ۴۶٪ آهن و ۵۳٪ گوگرد است و ممکن است مقداری نیکل یا کبالت نیز جانشین آهن در ترکیب آن شود.

کانی‌های نقره‌دار

این کانی‌ها در زیر میکروسکوپ قابل تشخیص نبودند ولی وجود آن‌ها با ترسیم نقشه‌های نقره با EPMA ثابت شد (شکل ۸). کانی‌های نقره‌دار معمولاً به صورت دانه‌های ریز (۲۰ میکرون) و مستقل با گالن همراه است. نمونه‌های که از عمق بیشتری برداشت شده‌اند دارای کانی‌های نقره‌دار بیشتری هستند به نظر می‌رسد که مقدار نقره در کانسار ماهور قابل توجه باشد.

پاراژنز

همان‌طور که ذکر شد کانی‌زایی در کانسار ماهور شامل دو مرحله مشخص درون‌زاد و برون‌زاد است. در مرحله درون‌زاد فازهای تشکیل شده عمدتاً سولفیدی هستند. به نظر می‌رسد که شروع کانی‌زایی اولیه با تشکیل دگرسانی سربستی همراه بوده و باعث کانی‌زایی پراکنده و تشکیل پیریت در منطقه وسیعی شده است. با توجه به اینکه سنگ‌های دگرسان شده عمدتاً دارای



شکل ۸ نقشه‌های تهیه شده با EPMA برای عناصر نقره، سرب و روی. راهنمای غلظت عناصر در پایین شکل آورده شده که از رنگ سیاه به سمت رنگ‌های قرمز و سفید نشان‌دهنده افزایش غلظت است. در نقشه بالایی نقره، یک کانی غنی از نقره در گوشه‌ای از گالن مشاهده می‌شود در پایینی نیز نقاط متعدد از کانی‌های خیلی ریز نقره‌دار مشاهده می‌شود. در نقشه سرب جایی که گالن حضور دارد با رنگ نارنجی نمایان است و در مقایسه با نقشه‌های نقره مشخص می‌شود که نقره در ترکیب گالن ناچیز است. در نقشه سرب (پایین) نقاط زرد سرب کمتری از گالن دارند و مربوط به حضور آنگلیت و سروزیت است. روی فقط در نقشه بالایی به مقدار فراوان و اطراف گالن وجود دارد و می‌توان از مرکز به حاشیه منطقه‌بندی را تشخیص داد که در مرکز اسفالریت وجود دارد و در حاشیه ترکیبات دیگر روی هستند.

جدول ۱. پاراژنز تعدادی از کانی‌های تشکیل شده در کانسار ماهور.

minerals	hypogene stage	
	early	late
Pyrite	██	
Magnetite	████████	
Chalcopyrite		████████████████████
Galena		████████████████████████████████
Sphalerite		████████████████████████████████
Ag-bearing mineral		████████

۳۰/۴ درصد آهن و ۳۵ درصد گوگرد باشد. فقط دو نقطه از این کانی در کانسار ماهور تجزیه شده است که مربوط به نمونه گرفته شده از عمق ۱۵۰ متری است (جدول ۳). همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار عناصر اصلی کالکوپیریت کمی با فرمول اصلی متفاوت است ولی در حد استیکیومتری آن است. مقدار Zn در کالکوپیریت‌های کانسار ماهور نسبتا بالا است که ممکن است به دلیل درهم رشدی زیر میکروسکوپی اسفالریت با آن باشد. مقدار بقیه عناصر در کالکوپیریت قابل توجه نیست.

کانی‌های نقره‌دار

همانطور که نقشه‌های تهیه شده با EPMA نشان داد (شکل ۷) همراه با گالن کانی‌های نقره‌داری وجود دارند. یک نمونه از آنالیزها نیز دارای درصد بالایی از نقره است به طوری که مقدار نقره در آن حدود ۴۰ درصد است (جدول ۴). با توجه به اینکه درصد مجموع عناصر در این آنالیز حدود ۵۲ درصد است این فاز یا دارای عنصر فرار بوده یا ممکن است حاوی عنصری باشد که جزء پانزده عنصر اندازه‌گیری شده نیستند. لازم به ذکر است فازهای نقره‌دار مشخص شده در شکل ۷ با EPMA آنالیز

پیریت‌هایی که مورد آنالیز قرار گرفتند عمدتا مربوط به نسل اول هستند که به صورت شکل‌دار و پراکنده در سنگ‌های آذرین سرسیتی شده یافت می‌شوند. یک نقطه نیز از پیریت‌هایی که به صورت رگچه‌ای تشکیل شده‌اند، تجزیه شده است (جدول ۲). مقدار آرسنیک در پیریت‌های نسل اول بیشتر و از ۰/۱۵ تا ۰/۸۹ درصد وزنی متغیر است. مقدار Zn در پیریت نسل دوم بیشتر است. مقدار Pb, Hg و Bi در پیریت‌های اول نوسان دارد و باعث منطقه‌بندی در این پیریت‌ها شده‌اند. مقدار As در پیریت کانسار ماهور نسبت به مقدار آن در پیریت کانسارهای چاه مسی، چهل کوره و سونگون بیشتر است ولی از ماکزیمم مقدار آن در پیریت کانسار کوشک کمتر است (اسفرم، ۱۳۹۰). میزان آرسنیک در پیریت کانسار ماهور نسبت به مقدار آن در پیریت‌هایی از کانسار طلای الدورادو در شیلی کمتر است (اسفرم، ۱۳۹۰). مقدار مس، سرب و روی در بعضی از دانه‌های پیریت در کانسار ماهور قابل توجه است.

کالکوپیریت

کالکوپیریت با فرمول $CuFeS_2$ باید حاوی ۳۴/۶ درصد مس،

جدول ۲. شیمی پیریت برحسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	42	67	68	69	70	71	72	73	74	75
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.03	0.40	0.00	0.00	0.00
Fe	48.66	44.64	46.47	46.38	46.28	46.48	46.20	46.13	46.21	45.97
Mn	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00
As	0.00	0.65	0.54	0.55	0.89	0.86	0.24	0.49	0.15	0.26
Ag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01
Sb	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
Zn	0.10	0.04	0.02	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02
Pb	0.10	0.09	0.13	0.17	0.20	0.13	0.39	0.15	0.02	0.28
Hg	0.00	0.10	0.22	0.09	0.16	0.04	0.11	0.21	0.18	0.11
Cd	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.02
Bi	0.00	0.18	0.00	0.00	0.03	0.00	0.27	0.15	0.21	0.00
Au	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.04	0.03	0.00
Se	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00
Te	0.01	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01
S	52.17	54.98	54.90	55.24	54.68	55.01	54.60	55.20	55.40	55.15
total	101.072	100.793	102.336	102.530	102.385	102.685	102.399	102.428	102.266	101.822
مقدار عناصر برحسب اتم در فرمول										
Cu	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Fe	0.871	0.799	0.832	0.830	0.829	0.832	0.827	0.826	0.827	0.823
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.009	0.007	0.007	0.012	0.011	0.003	0.007	0.002	0.003
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001
Hg	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	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
Bi	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	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
Se	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
S	1.627	1.714	1.712	1.722	1.705	1.715	1.703	1.721	1.728	1.720

جدول ۳. شیمی کالکوپیریت برحسب درصد وزنی در کانسار ماهور

sample	Cu	Fe	Mn	As	Ag	Sb	Zn	Pb	Hg	Cd	Bi	Au	Se	Te	S
21	37.00	29.24	0.00	0.02	0.00	0.00	0.41	0.00	0.06	0.01	0.19	0.00	0.00	0.00	32.31
45	34.67	30.02	0.01	0.00	0.00	0.03	2.72	0.12	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.38
تعداد اتم در فرمول															
21	0.582	0.524	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	1.007
45	0.546	0.537	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.072

جدول ۴. شیمی نمونه ای که دارای ۳۹/۷۰ درصد وزنی نقره است.

Cu	Fe	Mn	As	Ag	Sb	Zn	Pb	Hg	Cd	Bi	Au	Se	Te	S	total
0.13	0.00	0.06	0.35	39.70	0.00	0.00	1.59	0.16	0.00	0.09	0.13	0.00	0.27	9.27	51.76
اتم در فرمول															
0.002	0.000	0.001	0.005	0.368	0.000	0.000	0.008	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.289	

مقدار بقیه عناصر در این اسفالریت ناچیز و در حد خطای دستگاه است. مقدار آهن اسفالریت‌های کانسار ماهور نسبت به مقدار آهن اسفالریت‌های کانسار اسکارن پورفیری سونگون (داده‌ها از محمدیان، ۱۳۸۷) کمتر است در حالی که میزان آن یکسان یا بیشتر از کانسار ماسیو سولفید کوشک (داده‌ها از یوسف پور، ۱۳۸۹) است.

بحث

کانی‌زایی درون‌زاد در ماهور با توجه به شکل رگه‌ای و بافت رگچه‌ای آن، اپی ژنتیک بوده و بر اثر چرخش محلول‌های گرمایی در امتداد یک سیستم گسل تقریباً شمالی - جنوبی تشکیل شده است. در نمونه‌های کانسار ماهور (در کوارتز و اسفالریت) ادخال‌های سیالی کوچکی وجود دارد که دارای دو فاز مایع و گاز است که مشخصات پتروگرافی آن‌ها حاکی از دما و درجه شوری نسبتاً پایین سیالات است. دمای تشکیل سولفیدها به وسیله میرزایی و همکاران (۱۳۹۱) حدود ۲۸۰ درجه پیشنهاد شده است. به هر حال سیالات گرمایی و عناصر موجود در آن یا در ارتباط با ماگماتیسم کالک آلکالن منطقه بوده یا در ارتباط با سیستم زمین گرمایی مرتبط با این ماگماتیسم است که باعث گرم شدن و حرکت بخش زیادی از انواع آب‌ها بخصوص آب‌های جوی شده و عناصر را از منابع مختلف به درون گسل‌ها رانده و باعث کانی‌زایی در ماهور شده‌اند. همان‌طور که ذکر شد پیریت‌های شکل‌دار در کانسار ماهور گستردگی بیشتری دارند و به طور پراکنده در سنگ‌های آذرین دگرسان شده تشکیل شده‌اند. با توجه به اینکه با این نسل پیریت دیگر سولفیدها همراه نیستند محلول‌های مرحله اول باید از عناصر پایه مثل مس، سرب و روی رقیق باشند ولی رگچه‌ها غنی از اسفالریت، کالکوپیریت و گالن که سنگ‌های دگرسان شده غنی از پیریت را قطع می‌کنند در شرایطی تشکیل شده‌اند که کاتیون‌های فلزات پایه فعالیت و غلظت لازم برای تشکیل کانه‌ها در ماهور را داشتند. با استفاده

نشده‌اند. بعضی از این فازهای نقره‌دار ممکن است نقره طبیعی یا آرژانتیت یا آکانتیت باشند.

گالن

فرمول شیمیایی گالن PbS است و در ترکیب گالن در حدود ۸۷ درصد سرب وجود دارد. ترکیب شیمیایی گالن در کانسار ماهور در جدول ۵ آورده شده است. تعیین سرب با EPMA مشکل است و به همین خاطر گاهی جمع کل عناصر با ۱۰۰ درصد اختلاف قابل توجهی دارد. در تعدادی از آنالیزهای نشان داده شده در جدول ۵ مقدار نقره در گالن بالا و در یک مورد نیز ۱/۴۲ درصد است.

ولی در اکثر نمونه‌ها مقدار نقره نزدیک به صفر است و احتمالاً مقدار نقره در شبکه گالن کم است. گالنی که مقدار نقره آن بالا است احتمالاً در نقطه آنالیز شده فاز نقره‌دار دیگری به صورت درهم رشد با گالن حضور داشته است. مقدار کادمیوم، جیوه و بیسموت در گالن‌های مناطق عمقی بیشتر و متغیر است. Te و Sb نیز در بعضی دانه‌ها بیشتر از حد خطای دستگاه است. ترکیب بیشتر گالن‌ها در کانسار ماهور از نظر استکیومتری درست به نظر می‌رسد.

اسفالریت

در ترکیب اسفالریت با فرمول ZnS، ۶۷ درصد وزنی روی وجود دارد ولی معمولاً مقداری آهن، منگنز و کادمیوم جانشین روی در اسفالریت می‌شوند. مقدار آهن در اسفالریت‌های کانسار ماهور کم و از ۱/۴۲ تا ۵/۱۶ درصد وزنی متغیر است (جدول ۶). مقدار منگنز نیز حداکثر به ۰/۳۲ درصد وزنی می‌رسد. از دیگر عناصر قابل توجه در اسفالریت‌ها، کادمیوم است که معمولاً مقدار آن در شبکه اسفالریت نسبتاً بالا است. بعضی از اسفالریت‌های کانسار ماهور دارای مقدار کمی سرب و بیسموت بوده که مقدار آن‌ها به ترتیب حداکثر به ۰/۱۷ و ۰/۳۵ درصد وزنی می‌رسد.

جدول ۵. شیمی گالن برحسب درصد وزنی در کانسار ماهور

samples	33	39	10	11	12	21	25	40	44	46	51	56	57	58	59	60	62	63	64
Cu	0.00	0.00	0.02	0.08	0.02	0.00	0.03	0.06	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.02	0.08	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.05	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
As	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.00	1.42	0.01	0.04	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	0.00	0.00
Sb	0.00	0.00	0.10	0.06	0.11	0.15	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.11	0.06
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
Pb	86.20	81.41	89.33	88.13	88.21	87.33	88.40	88.97	89.53	89.04	88.52	88.10	89.29	86.63	87.74	88.79	88.00	86.82	88.41
Hg	0.00	0.00	0.00	0.21	0.25	0.02	0.11	0.12	0.22	0.28	0.09	0.05	0.26	0.09	0.05	0.22	0.38	0.17	0.31
Cd	0.04	0.10	0.15	0.10	0.20	0.16	0.14	0.15	0.12	0.15	0.08	0.14	0.15	0.12	0.16	0.23	0.22	0.12	0.13
Bi	0.00	1.43	0.09	0.03	0.00	0.37	0.07	0.24	0.00	0.47	0.40	0.00	0.38	0.10	0.17	0.12	0.00	0.42	0.07
Au	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.12	0.04	0.00
Se	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Te	0.03	0.11	0.02	0.16	0.03	0.00	0.15	0.02	0.03	0.11	0.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.17	0.00	0.06	0.04
S	13.00	13.47	13.67	13.80	13.57	13.48	13.42	13.57	13.62	13.80	13.47	13.56	13.77	13.51	13.50	13.51	13.63	13.32	13.62
total	99.3	98.0	103.4	102.7	102.5	101.6	102.5	103.2	103.6	103.9	102.8	102.1	103.9	100.7	101.6	103.1	102.4	101.1	102.7
تعداد اتم در فرمول																			
Cu	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	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	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.000	0.013	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	0.000	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
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	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Pb	0.416	0.393	0.431	0.425	0.426	0.421	0.427	0.429	0.432	0.430	0.427	0.425	0.431	0.418	0.423	0.429	0.425	0.419	0.427
Hg	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.002
Cd	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001
Bi	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	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	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Se	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	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	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
S	0.405	0.420	0.426	0.430	0.423	0.420	0.419	0.423	0.425	0.430	0.420	0.423	0.429	0.421	0.421	0.421	0.425	0.415	0.425

اسفالریت (شکل ۹) دمای تشکیل اسفالریت و کانی‌های همراه در ماهور طبق رابطه بالا ۲۳۴ تا ۲۷۱ درجه متغیر می‌باشد. با توجه به اینکه کالکوپیریت زودتر از اسفالریت تشکیل شده بنابراین دمای آن بیشتر و فازهای نقره‌دار درون‌زاد در دمای کمتری تشکیل شده‌اند. با در نظر گرفتن این محدوده دمایی و عمق کم (به دلیل رگه‌ای بودن آن) کانی‌زایی چند فلزی در ماهور از نوع اپی ترمال به نظر می‌رسد. لگاریتم فوگاسیته اکسیژن کانی‌زایی چند فلزی در ماهور با توجه به ترکیب اسفالریت و استفاده از دیاگرام pH-LogfO₂ معرفی شده توسط Barton and Skinner (1979) و نمودار ارائه شده در شکل ۱۰ حدود ۳۷- تا ۳۹/۵- می‌باشد. با توجه به دما، فوگاسیته اکسیژن و فعالیت گوگرد و استفاده از نمودار Houston and Large (1989) کانسار ماهور از نوع اپی ترمال فلزات پایه یا نوع سولفیداسیون حدواسط است. محدوده مشخص شده برای ماهور در شکل ۹ که کانسارهای اپی ترمال سولفیداسیون بالا (HS)، سولفیداسیون متوسط (MS)، سولفیداسیون پایین (LS)،

از ترکیب اسفالریت و مقدار آهن آن می‌توان تا حدودی شرایط تشکیل کانی‌زایی در ماهور را حدس زد. مقدار FeS در اسفالریت متعادل با پیریت با استفاده از رابطه، زیر جهت ارزیابی فعالیت گوگرد و دما به کار می‌رود (Barton and Skinner, 1979):
 رابطه ۱

$$\text{Log (FeS)} = 7.16 - (7730/T) - 0.5 \text{Log } a_{\text{S}_2}$$
 دگرسانی سریسیتی در ماهور میزبان کانی‌زایی چند فلزی است این دگرسانی در سیستم‌های رگه‌ای غالباً در دمای کمتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد چون دمای تشکیل این دگرسانی حتی در سیستم‌های مس پورفیری که در دماهای بالاتری تحول می‌یابند معمولاً کمتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد است (Sawkins, 1990). بنابراین با توجه به مجموعه کانی‌ها و نوع دگرسانی حد بالای دما در ماهور کمتر از ۳۵۰ درجه است. به دلیل اینکه پیرویت در کانسار ماهور تشکیل نشده لگاریتم فعالیت گوگرد نمی‌تواند بیشتر از ۷- در دماهای کمتر از ۳۵۰ درجه شود. با فرض لگاریتم فعالیت گوگرد برابر ۱۲- و در نظر گرفتن مقدار آهن در

جدول ۶. شیمی اسفالریت برحسب درصد وزنی در کانسار ماهور.

samples	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	13	38	43	44	46
Cu	0.08	0.09	0.35	0.20	0.08	0.08	0.00	0.07	0.03	0.01	0.07	0.00	0.30	0.45	0.15
Fe	4.66	4.43	5.16	0.54	3.76	4.50	4.51	4.31	2.90	2.61	3.44	1.42	1.81	2.01	1.98
Mn	0.30	0.27	0.31	0.00	0.24	0.23	0.23	0.32	0.13	0.15	0.11	0.18	0.07	0.11	0.12
As	0.00	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ag	0.04	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
Sb	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
Zn	63.89	63.78	62.99	67.02	64.74	63.75	63.29	63.90	65.73	66.65	65.13	64.60	67.14	67.47	67.07
Pb	0.16	0.12	0.06	0.07	0.02	0.08	0.15	0.17	0.11	0.13	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07
Hg	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	0.00	0.00
Cd	0.40	0.42	0.45	0.28	0.30	0.29	0.30	0.26	0.19	0.24	0.18	0.22	0.16	0.22	0.21
Bi	0.00	0.05	0.02	0.35	0.00	0.26	0.11	0.00	0.12	0.00	0.17	0.00	0.00	0.20	0.00
Au	0.00	0.06	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Te	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
S	32.76	32.54	32.55	32.54	32.99	33.03	33.53	33.34	33.36	33.05	32.85	32.80	32.55	32.62	32.09
total	102.3	101.8	102.0	101.1	102.2	102.3	102.1	102.4	102.8	102.8	102.1	99.3	102.2	103.2	101.7
تعداد اتم در فرمول															
Cu	0.001	0.001	0.006	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.005	0.007	0.002
Fe	0.083	0.079	0.092	0.010	0.067	0.081	0.081	0.077	0.052	0.047	0.062	0.025	0.032	0.036	0.035
Mn	0.005	0.005	0.006	0.000	0.004	0.004	0.004	0.006	0.002	0.003	0.002	0.003	0.001	0.002	0.002
As	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	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	0.000
Sb	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	0.000
Zn	0.977	0.975	0.963	1.025	0.990	0.975	0.968	0.977	1.005	1.019	0.996	0.988	1.027	1.032	1.026
Pb	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Hg	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	0.000
Cd	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
Bi	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	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	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	0.000	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	0.000	0.000	0.000	0.000
S	1.021	1.015	1.015	1.015	1.029	1.030	1.046	1.040	1.040	1.031	1.024	1.023	1.015	1.017	1.001
S	1.021	1.015	1.015	1.015	1.029	1.030	1.046	1.040	1.040	1.031	1.024	1.023	1.015	1.017	1.001
FeS	0.079	0.075	0.087	0.009	0.063	0.076	0.076	0.073	0.049	0.044	0.058	0.025	0.031	0.034	0.033
T (°C)	268.8	267.9	270.4	235.8	265.2	268.2	268.3	267.5	261	259.2	263.8	250.5	253.6	255	254.9

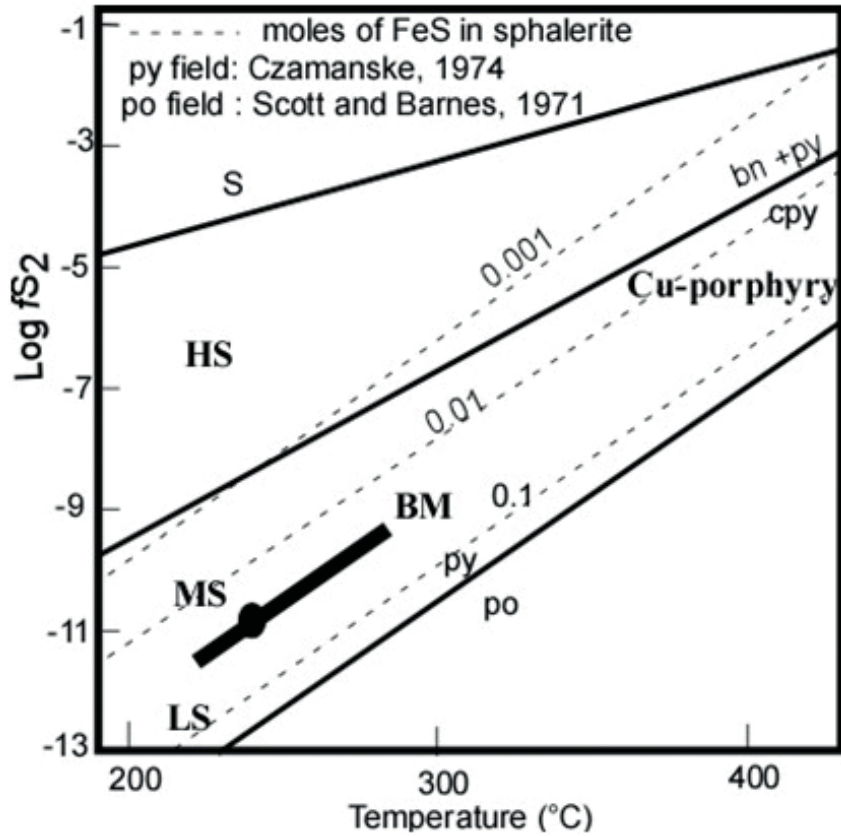
نقره‌دار با کاهش دما و دیگر تغییرات فیزیکی و شیمیای رسوب می‌کنند.

نتیجه‌گیری

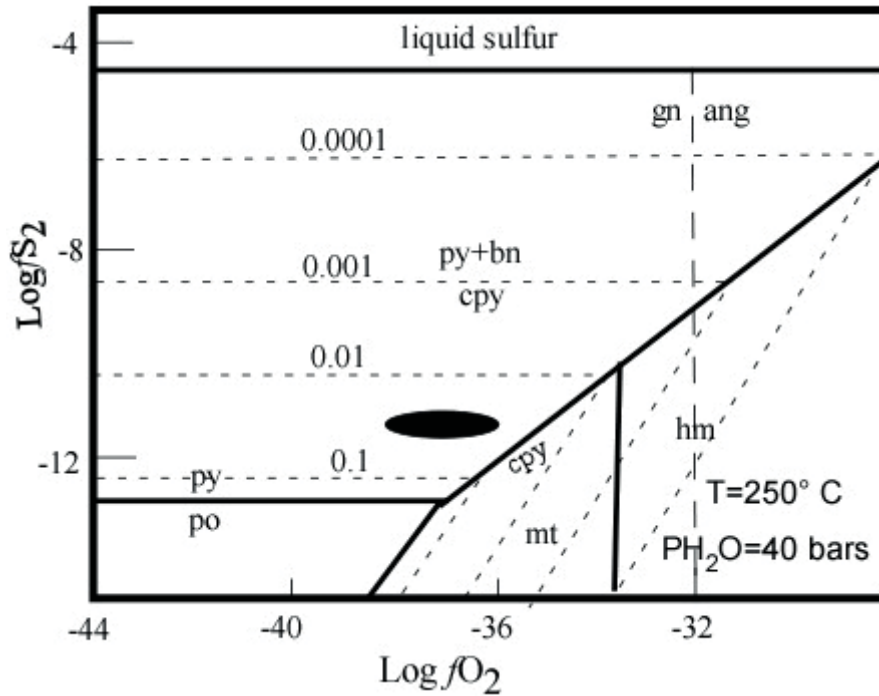
نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که کانسار ماهور دارای مشخصات زیر می‌باشد.

- ۱- کانی‌زایی درون‌زاد مس، روی، سرب و نقره در ماهور به وسیله عواملی ساختاری کنترل شده است.
- ۲- سنگ‌های میزبان به سریسیت دگرسان شده و شدیداً برشی شده هستند.
- ۳- کانی‌زایی درون‌زاد به صورت دانه‌های پراکنده در فضای برش‌ها و به صورت رگچه‌ای اتفاق افتاده است.
- ۴- نقره جزء ترکیب گالن نیست بلکه به صورت فاز نقره‌دار دیگری تشکیل شده است.
- ۵- مقدار آهن موجود در اسفالریت دمای تشکیل حدود ۲۵۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد.

فلزات پایه و کانسارهای مس پورفیری پنج حالت سولفیداسیون را نشان می‌دهد، حدواسط بین رگه‌های فلزات پایه و اپی ترمال سولفیداسیون پایین قرار می‌گیرد و ظاهراً و حتی ممکن است در ارتباط با یک سیستم مس پورفیری در منطقه باشد چون بعضی از مشخصات کانسارهای اپی ترمال مثل حضور کالسدونی و یا ساخت پوسته پوسته و شانه‌ای و بافت‌های کلوفرمی درون‌زاد در کانسار ماهور کمیاب است. برای انتقال عناصر در دماهای پایین و سیالات رقیق معمولاً نقش کمپلکس‌های سولفیدی مهم دانسته می‌شود (Seward and Barnes, 1997). ولی با توجه به تشکیل فلزات پایه مثل مس، روی و سرب و همچنین نقره نباید از نقش کمپلکس‌های کلریدی غافل شد. در سیستم‌های اپی ترمال، نقره در محلول‌های گرمابی معمولاً به وسیله کمپلکس‌های کلریدی مثل $AgCl_2$ انتقال داده می‌شود به شرط اینکه نسبت نقره به طلا بیشتر از یک و دما نیز بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد باشد (Pirajno, 2009). در چنین شرایطی طلا به ندرت تشکیل می‌شود در حالی که سولفیدهای فلزات پایه، سولفوسالت‌ها و کانی‌های



شکل ۹. نمودار T-Log fS_2 که در آن محدوده پایداری گوگرد و سولفیدی آهن و آهن-مس مشخص شده است. خط چین ها مقدار آهن را در (Zn, Fe)S نشان می‌دهد. با توجه به مقدار آهن در اسفالریت‌های ماهور و فازهای همراه آن محدوده پر رنگ شده با شرایط تشکیل آن نزدیک است.



شکل ۱۰. نمودار $\text{Log } fO_2$ - $\text{Log } fS_2$ که در آن محدوده پایداری گوگرد و بعضی از سولفیدها و اکسیدها و کربنات روی مشخص شده است. خط چین‌ها مقدار آهن را در (Zn, Fe)S نشان می‌دهد. بیضی سیاه رنگ با شرایط تشکیل اسفالریت در ماهور نزدیک است.

ography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences, 18, 210-265.

- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: a geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. Journal of Geochemical Exploration. 103, 17-29.

- Boomeri, M., Nakashima, K. and Lentz, D.R., 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: A mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematic related to Cu mineralization processes. Ore Geology reviews 38, 367-381.

- Czamanske, G.K. 1974. The FeS content of Sphalerite along the Chalcopyrite, Pyrite Bornite sulfur fugacity buffer. Economic Geology, 69, 1328-1334.

- Eshraghi, H. Rastad, E. and Motevali, K., 2010. Auriferous sulfides from Hired gold mineralization, south Birjand, Lut block, Iran. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 105, 167-174.

- Guilbert, J.M. and Park, Jr, C.F., 1986. The Geology of Ore Deposits. W.H. Freeman and Company, 985.

- Hassan-Nezhad, A.A. and Moore, F. 2006, A stable isotope and fluid inclusion study of the Qaleh-Zari Cu-Au-Ag deposit, Khorasan Province, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 27, 805-818.

- Huston, D.I. and Large, R.R., 1989. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulfide deposits. Ore Geology Reviews 4, 171-200.

- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, Geological Survey of Western Australia, Perth, WA, Australia, 1250.

- Sawkins, F.J., 1990. Metal Deposits in Relation to Plate tectonics, second edition. Springer-Verlag. 461.

- Scott, S.D., and Barnes, H.L., 1971. Sphalerite geothermometry and geobarometry. Economic Geology, 66, 653-669.

- Seward, T.M. and Barnes, H.L., 1997. Metal transport by hydrothermal ore fluids, in geochemistry of hydrothermal ore deposits, third edition, H.L. Barnes(ed), 435-486.

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

۶- کانی‌زایی به وسیله محلول‌های گرمایی در ارتباط با ماگماتیسیم کالک - آلکان منطقه روی داده است.

۷- کانی‌زایی مشابه با رگه‌های فلزات پایه‌ای است که نزدیک به سیستم‌های اپی ترمال و مس پورفیری تشکیل می‌شوند و دارای مشخصاتی حدواسط بین کانسارهای رگه‌ای فلزات پایه و اپی ترمال سولفیداسیون پایین را دارند.

منابع

- آقائاتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

- اسفرم، م.، ۱۳۹۰. ژئوشیمی و توالی پاراژنزی کانی‌های موجود در کانسار پلی متال ماهور، غرب نهبندان (شرق ایران). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۲۳۵.

- اسفرم، م.، بیابانگرد، ح.، م.، بومری. م.، زرین کوب، م.، مهران، ح. و ابراهیمی، م. ۱۳۹۱. ژئوشیمی و پتروولوژی سنگ‌های آتشفشانی کانسار مس ماهور (شمال غرب نهبندان)، شرق ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲، ۲۴۱-۲۵۲.

- امامی، م.، ۱۳۷۹. ماگماتیسیم در ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور.

- حسینی، ض.، افشاریان م. و چایچی، ز.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم.

- عبدالرزاق‌نژاد، ع.، ۱۳۸۷. گزارش ژئوفیزیک به روش IP و RS به منظور تعیین رگه‌های مس‌دار در منطقه ده‌سلم خراسان جنوبی، ۳۹.

- قربانی، م.، ۱۳۸۶. زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی ایران. انتشارات آراین زمین، ۴۹۲.

- محمدیان، م.، ۱۳۸۷، شیمی کانی‌های کانسار مس پورفیری سونگون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۲۳۴.

- مهرابی، ب.، طالع فاضل، ا. و نخبه‌القهایی، ع.، ۱۳۹۰. کانه‌زایی پلی متال سرب - روی مس و آنتیموان نوع انتشاری رگچه‌ای و رگه‌ای در محدوده معدنی گله چاه - شوراب مجموعه ماگمایی شرق ایران. نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، ۱، ۷۸-۶۱.

- میرزایی، ر.، احمدی، ع. و میرنژاد، ح.، ۱۳۹۱. بررسی‌های کانی‌شناسی و شماره‌های درگیر در کانسار چند فلزی ماهور، شرق بلوک لوت، ایران مرکزی. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲، ۳۰۷-۳۱۹.

- یوسف‌پور، ع.، ۱۳۸۹. کانی‌سازی در زون هیپوژن و سوپرژن کانسار سرب و روی کوشک، ناحیه بافق، ایران مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۲۳۵.

- Barton, P.B. and Skinner, B.J., 1979. Sulfide mineral stability in geochemistry of hydrothermal ore deposits. second edition, H.I. Barnes(ed.), 278-403.

- Berberian M. and King, J., 1981. Towards a paleoge-