

کانی‌شناسی کانسار (Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهور، باختر ده‌سلم: رهیافتی بر ژنز و نوع کانه‌زایی

سیمیندخت یونسی^۱، محمدرضا حسین‌زاده^۲ و محسن مؤید^۳

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

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

^۳استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

چکیده

کانسار Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهور در مرکز بلوک لوت، در پهنه به شدت خردشده گسلی، بیشتر در واحد آتشفشانی - نیمه آتشفشانی داسیت - ریوداسیت به سن انوسن بالایی - الیگوسن، تشکیل شده است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و برشی سولفید توده‌ای و یا همراه رگه - رگچه‌های کوارتز، کوارتز - کربنات و یا کوارتز - مسکوویت (سرسیت) - کربنات رخ داده است و به جز مقدار ناچیزی اسفالریت تیره، تنها پیریت ریزدانه به صورت فاز افشان در متن سنگ میزبان دیده می‌شود. کانی‌سازی درون‌زاد پیچیده و شامل کانی‌های اصلی پیریت، اسفالریت آهن‌دار و کالکوپیریت در همراهی با گالن، انواع سولفوسالت‌های مس، انواع سولفوسالت‌های بیسموت، اسفالریت فقیر از آهن و مقدار کمی گرینوکیست، آرسنوپیریت، دیژنیت و به احتمال کولیت است که نقره به مقدار قابل توجه در شبکه برخی کانی‌های سولفوسالتی و سولفیدی حضور دارد و کمی کانی‌های تنگستن طلا‌دار نیز به طور محلی رخ داده‌اند. کانه‌زایی به طور چیره با دگرسانی سریستی، آرژیلی متوسط، پروپیلیتی و گاه آرژیلی پیشرفته و کوارتز - آدولاریا همراه بوده و طی سه مرحله اصلی شامل ۱- مرحله کوارتز - پیریت، ۲- مرحله اسفالریت آهن‌دار و ۳- مرحله کالکوپیریت همراه شده با سولفوسالت‌ها و کمی کانی‌های سولفیداسیون بالا تشکیل شده است. کانه‌زایی پس از مرحله سیلیسی شدن و پیریت‌زایی افشان تورمالین‌دار (دگرسانی سریستی پیش از کانه‌زایی) رخ داده و فرایند هوازگی آن را تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به مقدار بسیار پایین Cu در سامانه تعادلی Cu-Zn-S، محتوای بالای اذخال‌های کالکوپیریت در اسفالریت‌های آهن‌دار تیره ماهور نشانگر منشأ جانشینی بافت بیماری کالکوپیریت است. این بافت در همراهی با کانی‌شناسی (کانه و دگرسانی) کانسار نشانگر تشکیل کانی‌سازی پلی‌متال ماهور به تقریب در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و از سیالی با حالت سولفیداسیون متوسط و درجه اسیدی کم است که سیال یاد شده به علت واکنش با سنگ دیواره خنثی تا قلیایی شده؛ ولی شواهد کمی از تکامل سیال به حالت سولفیداسیون بالا، شرایط اسیدی‌تر و اکسیدان‌تر در بخش غنی از مس آن ثبت شده است. ویژگی‌های کانی‌شناسی کانسار ماهور منشأ بیشتر ماگمایی سیال گرمایی کانه‌زا را نشان می‌دهند و در تلفیق با ساختار کانه‌زایی، همراهی با سنگ‌های آذرین کالک‌آلکان تا شوشونیتی و موقعیت زمین‌ساختی سنگ‌های میزبان، بیشترین شباهت را با کانسارهای لود پلی‌متال نوع کردیلرن دارد.

کلیدواژه‌ها: کانی‌شناسی، مایکروپروب، بیماری کالکوپیریت، سولفوسالت، سولفیداسیون متوسط تا بالا، لود پلی‌متال کردیلرن، ماهور، بلوک لوت.

E-mail: Sim_Younesi@Yahoo.com

*نویسنده مسئول: سیمیندخت یونسی

۱- پیش‌نوشتار

کانی‌شناسی درون‌زاد ماهور را شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت تیره با اکسلوشن کالکوپیریت، گالن، آرسنوپیریت، تتراهدريت، جیمسونیت، استینیت و کوبانیت و بر پایه آنالیز با حضور کانه‌زایی نقره تعیین کرده که در سنگ میزبان داسیت پورفیری رخ داده است. میری بیدختی (۱۳۹۴) با تعیین کانی‌شناسی مشابه با شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، آن را پورفیری دانسته که در سنگ میزبان مونزونیتی در محیط حاشیه فعال قاره‌ای رخ داده است. شیمی شماری از کانی‌های برونزاد نیز توسط بومری و همکاران (۱۳۹۲) بررسی شده که حضور نقره در بیشتر آنها، شواهدی از پتانسیل بالای این عنصر در کانسار عنوان شده است. بررسی یونسی و همکاران (۱۳۹۵) کانه‌زایی پلی‌متال ماهور را در پهنه خردشده گسلی و بیشتر در واحد داسیت - ریوداسیت انوسن بالایی - الیگوسن تعیین کرده که در محیط زمین‌ساختی پس از برخورد تشکیل شده است. هدف از این مقاله، تعیین کانی‌شناسی جامع (پاراژنرها و شیمی کانی‌ها) و بنابراین ویژگی‌هایی از سیال کانه‌زا در کانسار ماهور است که افزون بر شناسایی کانی‌هایی همچون انواعی از سولفوسالت‌های بیسموت، اسفالریت فقیر از آهن، تنانیت و مجموعه تتراهدريت - تنانیت، فامانیت، دیژنیت، کولیت به احتمال اولیه، کانی‌های تنگستن طلا‌دار و کانی‌های حمل‌کننده نقره برای نخستین بار در کانسار ماهور و همچنین شناسایی انواعی از دگرسانی و تعیین منشأ جانشینی برای بافت بیماری کالکوپیریت، در ترکیب با اطلاعاتی از ساختار کانه‌زایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی می‌تواند معیار شاخصی در تعیین نوع کانی‌سازی ماهور باشد.

برخی کانی‌های سولفیدی، سولفوسالتی و اکسیدی در محدوده دمایی ویژه‌ای پایدارند و می‌توانند شواهدی از شرایط نهشت را حفظ کنند. بنابراین، ژئوشیمی، ژنز و فهم کانسارهای گرمایی باید با توصیف ویژگی‌های کانه‌ها و شرایط تشکیل هر یک از آنها شروع شود (Vaughan and Craig, 1997). بیشتر کانی‌های تشکیل شده طی دگرسانی گرمایی نیز به تغییرات دما و pH حساس هستند (White and Hedenquist, 1995) و اطلاعات مفیدی درباره ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال گرمایی مسئول ارائه می‌کنند (Warren et al., 2007). بنابراین، بررسی جامع کانی‌شناسی یک کانسار می‌تواند در تعیین ژنز آن نقش مهمی داشته باشد.

محدوده معدنی - اکتشافی ماهور، در ۱۲۵ کیلومتری جنوب باختر شهر نهنبدان و ۳۵ کیلومتری باختر روستای ده‌سلم قرار دارد (شکل ۱- A). تاکنون مطالعه جامعی بر روی کانی‌شناسی، شیمی کانی‌ها و نوع کانه‌زایی این محدوده انجام نشده است. مطالعات اسفرم (۱۳۹۰) با تعیین سنگ میزبان داسیتی و موقعیت کمان آتشفشانی حاشیه فعال قاره‌ای، تشکیل مگنتیت، پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت را کانی‌های درون‌زاد کانسار ماهور معرفی کرده و آن را اپی‌ترمال دانسته است. بر پایه میرزایی راینی و همکاران (۱۳۹۱) کانسار ماهور در رده کانسارهای اپی‌ترمال رگه‌ای تا مزوترمال قرار دارد و کانی‌شناسی درون‌زاد آن شامل مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت آهن‌دار و گالن است که در شرایط اپی‌ترمال در دایک گرانیت فلدسپار قلیایی با بافت آپلیتی - گرانوفیری تشکیل شده است. شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی (۱۳۹۱)

۲- زمین‌شناسی

۲-۱. زمین‌شناسی ناحیه‌ای

محدوده ماهور در مرکز بلوک لوت (خاوری ترین بخش خردقاره ایران مرکزی؛ آقناباتی، ۱۳۸۳) و در جنوبی ترین بخش کمربند آتشفشانی- نفوذی این بلوک جای دارد (شکل ۱- B) و بخشی از کمربند فلززایی ائوسن- الیگوسن لوت است. این بلوک به‌طور چیره از سنگ‌های آتشفشانی ترشیر (به ویژه ائوسن) با ترکیب آندزیتی و داسیتی و توف‌های وابسته و نهشته‌های قاره‌ای نئوژن پوشیده شده است که روی ردیف ناقصی از رسوبات دوران دوم و اول قرار گرفته و نفوذی‌های کمی به سن دوران دوم و سوم نیز در آنها نفوذ کرده‌اند (Stöcklin et al., 1972; Berberian and King, 1981). فعالیت‌های ماگمایی لوت از زمان ژوراسیک میانی با نفوذ گرانیته شاه‌کوه آغاز شده (آقناباتی، ۱۳۸۳) و تا کرتاسه پایانی- پالئوسن زیرین در بخش مرکزی آن ادامه یافته است (Berberian, 1977). فعالیت ماگمایی ترشیر در لوت از پالئوسن تا ۴۸ میلیون سال پیش به مدت ۲۰ Ma به مقدار کم و با منشأ پوسته‌ای و از ائوسن میانی (۴۶ Ma) تا الیگوسن پایانی (۲۵ Ma) به شدت و با منشأ گوشته‌ای رخ داده است (Pang et al., 2013)؛ به‌صورتی که سنگ‌های آذرین ائوسن میانی در پیرامون بیرجند، آمیزه‌های رنگین را قطع کرده‌اند (یوسف‌زاده، ۱۳۸۸؛ Pang et al., 2013). فعالیت ماگمایی بازالت‌های آلکالن مشتق از گوشته به سن نئوژن نیز در لوت رخنمون دارند (امامی، ۱۳۷۹). سنگ‌های آذرین لوت به‌طور چیره کالک آلکالن هستند و ماهیت مشابهی با فعالیت ماگمایی ارومیه- دختر و البرز- آذربایجان دارند (Berberian and King, 1981) و به ویژه از ائوسن میانی در موقعیت زمین‌ساختی پس از برخورد تشکیل شده‌اند (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; Pang et al., 2013؛ مؤید، ۱۳۸۰؛ یونسی و همکاران، ۱۳۹۵).

۲-۲. زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

بر پایه یونسی و همکاران (۱۳۹۵)، فعالیت ماگمایی پالئوژن به‌صورت مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین بیشتر حدواسط تا اسیدی بخش‌های زیادی از محدوده ماهور را می‌پوشاند که شامل واحدهای آتشفشانی (آندزیت بازالتی، آندزیت، تراکی آندزیت) به سن ائوسن میانی و آتشفشانی- نیمه‌آتشفشانی (داسیت و ریوداسیت) به سن ائوسن بالایی- الیگوسن و توف‌های وابسته است که استوک میکرودیوریتی با ترکیب گابرویدیوریت تا کوارتزیدیوریت به سن الیگوسن زیرین (۳۱/۹±۰/۲ Ma)؛ میری بیدختی، ۱۳۹۴) و دایک‌هایی از آن (در باختر و جنوب باختر محدوده) در آنها نفوذ کرده‌اند (واحد 'g' (شکل ۱- C). واحدهای مختلف کوارتزتری نیز بخش‌های دیگر محدوده مورد بررسی و واحدهای کهن تر را می‌پوشاند. انواع مختلف سنگ‌های آذرین ماهور، ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابهی دارند و بیشتر کالک آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی هستند و در موقعیت زمین‌ساختی فرونشست کشتی پس از برخورد تشکیل شده‌اند (یونسی و همکاران، ۱۳۹۵). واحد داسیت- ریوداسیت با بافت پورفیریتی و حالت بیشتر توفی و خرد شده برشی و گسلیده که گاه آندزیت نیز در میان آنها دیده می‌شود، با روند مشخص شمال، شمال خاور- جنوب، جنوب باختر آشکارا واحدهای کهن تر را قطع کرده است (به احتمال شبیه کمپلکس دیاترم- دم Baumgartner et al., 2008) و کلاهک‌های شسته شده در بخش‌های بالایی آن حضور دارند. این واحد با دگرسانی‌های آرزیلی متوسط و پیشرفته، سریستی و پروپیلیتی، میزبان اصلی کانه‌زایی پلی متال ماهور است. در پیرامون کانه‌زایی اصلی، رگه‌هایی از مس، منگنز و سرب در واحدهای دگرسان شده داسیتی، آندزیتی و توف‌های مربوط دیده می‌شود؛ ولی در واحد میکرودیوریتی که در مواردی دچار دگرسانی پروپیلیتی شده؛ به جز پیریت کانه‌زایی سولفیدی صورت نگرفته است.

سامانه‌های گسلی به خوبی در محدوده گسترش یافته‌اند و بیشتر شامل گسل‌های نرمال و امتدادلغز راست گرد با روند شمال، شمال خاور- جنوب، جنوب باختر و گسل‌های با روند شمال باختر- جنوب خاور هستند (یونسی و همکاران، ۱۳۹۵).

۳- روش پژوهش

در راستای این پژوهش، طی دو مرحله انجام عملیات صحرایی و با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ ماهور (شکل ۱- A)، از بخش‌های کانه‌دار و دگرسان به‌صورت سطحی و از گمانه‌ها نمونه‌برداری به‌صورت سیستماتیک و تصادفی انجام شد. سپس ۷۵ عدد مقطع نازک- صیقلی تهیه و همراه با ۳۲ عدد مقطع صیقلی تهیه شده توسط شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، مورد مطالعه کانه‌نگاری و سنگ‌نگاری قرار گرفت. برای تعیین دگرسانی، ۱۵ نمونه در شرکت کانساران بینالود به روش XRD تجزیه شد. برای مطالعات الکترون میکروپروب که به منظور تکمیل مشاهدات بافتی، شناسایی و شیمی کانی‌ها و به‌ویژه مقادیر عناصر اصلی و کمیاب شاخص انواع مختلف اسفالریت و سولفوسالت‌ها صورت گرفت؛ نمونه‌ها بر پایه بررسی دقیق کانه‌نگاری و سنگ‌نگاری انتخاب شدند. تجزیه‌های میکروپروب در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با استفاده از دستگاه مدل Cameca SX100 به روش WDS انجام و تصاویر BSE نیز با همین دستگاه تهیه شد.

۴- ساختار کانه‌زایی

کانه‌زایی در محدوده ماهور به‌صورت پرکننده فضاهای باز (رگه‌ای، رگچه‌ای و برشی) در پهنه به شدت خرد شده گسلی تشکیل شده است و گسل‌های با روند شمال باختر- جنوب خاور آن را جابه‌جا کرده‌اند. در نیمه باختری کانسار، کانه‌زایی در گسل نرمال با شیب نزدیک به قائم با روند N, NE-S, SW (گسل ماهور) تشکیل شده است و بیش از ۲ کیلومتر طول و ۰/۵ تا ۲ متر عرض دارد (شکل ۱- C). کانه‌زایی در نیمه خاوری کانسار بیشتر در شکستگی‌ها و خردشدگی‌های خاور گسل ماهور رخ داده است. پیریت به‌صورت افشان و پرکننده فضاهای باز (به ۳ صورت پیریت توده‌ای، کوارتز- پیریت و پیریت همراه با کانه‌زایی) تشکیل شده است (شکل‌های ۲- A, B, D, E, F, G). کانی‌سازی روی بیشتر شامل اسفالریت تیره و گاه اسفالریت زرد عسلی (در نزدیک سطح) است که به‌صورت رگه- رگچه سولفیدی با بافت توده‌ای، سیمان برشی و یا همراه رگه- رگچه‌های کوارتز، کوارتز- کربنات و یا کربنات - کوارتز- مسکویت (سریست) رخ داده است (شکل‌های ۲- E, C, D, F) و با وجود رخداد گسترده در همه بخش‌های کانه‌سازی شده، در بخش خاوری رگه و بخش‌های بالاتر گمانه‌ها چیره تر است. کانه‌زایی مس که بیشتر کالکوپیریت و شامل مجموعه‌های غنی از مس، اسفالریت فقیر از آهن و همچنین بیشتر انواع سولفوسالت‌های بیسموت و گالن است؛ در همراهی با رگه- رگچه‌های کوارتزتری و مقداری به‌صورت رگچه‌ها و یا استوک‌ورک‌های سولفیدی است (شکل‌های ۲- D, E, F) و بیشتر در بخش باختری کانسار و همچنین در بخش‌های ژرف گمانه‌ها دیده می‌شود. بر پایه بررسی مغزه‌های حفاری، استوک‌ورک‌های پیریت- کالکوپیریت (که کالکوپیریت به کولیت تبدیل شده) در ژرفای بیشتری نسبت به رگچه‌های تنانیت دار جای گرفته‌اند و در زیر آنها پیریت توده‌ای قرار دارد. رگچه‌های اسفالریت تیره، رگچه‌های پیریت اولیه موجود در کانسنگ برشی را بریده و رگچه‌های کوارتزتری دارای کانه‌زایی مس نیز، اسفالریت توده‌ای را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۲- G و H). رگه- رگچه‌های کوارتزتری نابارور و ژپس در مقیاس‌های مختلف کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. کوارتز در رگه- رگچه‌های کانه‌دار و نابارور به‌صورت بلورهای تقریباً درشت خودشکل تا نیمه‌شکل دار رخ داده است (شکل ۲- I). در پایان مرحله فعالیت گرمایی، سنگ‌ها و کانه‌ها تحت تأثیر دگرسانی برونزاد قرار گرفته‌اند (شکل ۲- J). بر پایه حفاری‌های انجام شده، کانه‌زایی تا ژرفای بیشینه ۳۸۰ متر زیر سطح حاضر به‌صورت منقطع صورت گرفته است و ستبرای بخش‌های کانی‌سازی شده به‌طور معمول ۰/۵ تا ۴ متر است که گاه به ۱۰ متر نیز می‌رسد. بر پایه داده‌های اکتشافی موجود تا این مرحله از اکتشاف، مقدار ذخیره و عیار برآورد شده از کانسار ماهور توسط شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی (۱۳۹۱)، در رگه واقع در باختر کانسار، تقریباً ۲۰۰۰۰۰ تن با عیار میانگین ۲/۵ درصد مس و ۰/۵ درصد روی و در بخش خاوری کانسار

می‌شود (شکل‌های ۳-E و F). در سری الکتروموتیو شرم، مس موقعیت بالاتری نسبت به روی دارد (Sillitoe, 2005) و تحت هیچ شرایطی در محیط برونزاد، عنصر Zn نمی‌تواند عنصر Cu را در ساختار سولفیدی جانشین کند. بنابراین، اسفالریت فقیر از آهن باید طی فرایند پیچیده‌ای پس از نهشت کالکوپیریت و در مرحله اصلی کانی‌سازی پلی‌متال ماهر تشکیل شده باشد. اسفالریت برونزاد در موارد کمی در کانی‌سازی ماهر به‌صورت پودری دیده می‌شود.

کانه‌زایی درونزاد مس در ماهر شامل کانی‌های کالکوپیریت، سولفسالت‌های مس و کمی دیژنیت و به احتمال کولیت است.

- کالکوپیریت با محتوای $Fe=28/88-30/97\%wt$ بیشتر به سه صورت (۱) دانه‌های درشت بی‌شکل و قابل مشاهده در مقیاس میکروسکوپی درون رگچه‌های کوارتزی (شکل ۲-E)، دانه‌های ریز و درشت بی‌شکل در حاشیه اسفالریت‌های آهن‌دار (بافت جانشینی ساده) و (۳) تاول‌ها و تیغه‌های ریز و متوسط در اسفالریت تیره آهن‌دار (بافت بیماری کالکوپیریت) دیده می‌شود (شکل ۳-D). در نمونه برداشت شده از ژرفای ۳۶۴ متری، ادخال‌های بلورهای اسکلتی و X شکل اسفالریت در کالکوپیریت مشهور به اسفالریت ستاره‌ای (star sphalerite; Augustithis, 1995) دیده می‌شود (شکل ۳-G). در ژرفای تحت اثر فرایندهای برونزاد، کالکوپیریت به‌صورت بخشی و گاه کامل توسط کولیت تیغه‌ای جانشین شده است (شکل ۳-H). این کولیت‌ها بر پایه تجزیه میکروپروب خالص و در مواردی دارای نقره هستند.

- دیژنیت اولیه به مقدار کم در بخش مس‌دار در ژرفای بیش از ۱۵۰ متری رخ داده است. این کانی در همراهی با اسفالریت فقیر از آهن در فضاهای خالی و بیشتر میان کالکوپیریت و اسفالریت فقیر از آهن و یا تنانیت دیده می‌شود و هر سه کانی یاد شده را جانشین کرده است (شکل‌های ۳-F و ۴-B و C). گاه مقدار ناچیزی بورنیت در دیژنیت دیده می‌شود. اسفالریت‌های آهن‌دار و سولفسالت‌های بیسموت موجود در این نمونه‌ها نیز دیژنیتی شده‌اند (شکل ۲-D). نتایج تجزیه میکروپروب برای این کانی منطبق با ترکیب دیژنیت و با مقدار بالایی از آهن ($Fe=1/61-0/2\%wt$) و گاه مقادیری نقره، بیسموت و تلور است و در یک نقطه تجزیه با ترکیب کالکوسیت منطبق است (به احتمال ادخال کالکوسیت در دیژنیت).

- کولیت‌های به احتمال اولیه به مقدار کم در مرز اسفالریت فقیر از آهن با کالکوپیریت یا گاه تنانیت، هر سه کانی را جانشین کرده و در مواردی رگچه‌هایی از آن نیز اسفالریت آهن‌دار را در جایی قطع کرده است که در سطوح کم‌ژرفاتر این بخش‌ها اسفالریت‌های آهن‌دار و پیریت موجود هوازده نیستند (شکل‌های ۳-E، I و J) که می‌تواند نشانگر نبود سیال‌های برونزاد در این بخش‌ها باشد. این کولیت‌ها با محتوای $Fe=62/53-62/79\%wt$ تا $63/53$ مس، مقدار درصد وزنی بالایی از آهن (۰/۶ تا ۳/۷) و همچنین مقادیری بیسموت، نقره، سرب و گاه تلور نشان می‌دهند.

- سولفسالت‌های مس شامل تنانیت، تراهدریت و مجموعه تراهدریت-تنانیت $(Cu_3(Sb,As)S_4)$ و فاماتینیت $(Cu_4[Cu_4(Fe,Zn)_2](As,Sb)_4S_{13})$ به مقدار قابل توجه در کانسار ماهر تشکیل شده‌اند. بر پایه مطالعه میکروسکوپی، مجموعه تراهدریت-تنانیت به‌صورت جانشینی ساده در حاشیه کالکوپیریت، اسفالریت آهن‌دار و گالن تشکیل شده است (شکل ۴-A). کانی تنانیت کاملاً شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شود و به‌صورت بخشی و یا کامل جانشین کالکوپیریت، پیریت و در جاهایی سولفسالت‌های بیسموت شده (شکل‌های ۴-B، C، D) و خود در مواردی از حاشیه و در شکستگی‌ها توسط اسفالریت فقیر از آهن، کولیت و یا دیژنیت جانشین شده است (شکل‌های ۳-E و ۴-C)؛ که نشانگر تشکیل تنانیت از پس از کانی کالکوپیریت تا پس از سولفسالت‌های بیسموت است. تجزیه میکروپروب و تصاویر BSE وجود هر دو کانی تراهدریت و تنانیت را افزون بر مجموعه تراهدریت-تنانیت تأیید کرده است و همچنین بر جانشینی $Fe=0/11-6/57\%wt$ و $Zn=2/66-6/71\%wt$ به جای Cu در این کانها دلالت می‌کند و همچنین نشان‌دهنده $Ag=0-0/44\%wt$ در بخش تراهدریت است.

بر پایه محاسبه دوبرابری حجم (به دلیل در نظر گرفتن آن به عنوان پهنه پورفیری)، ۲۰ میلیون تن با عیار میانگین ۰/۲۷ درصد مس و ۲/۷ درصد روی است. گفتنی است، عیار روی در بخش خاوری تا ۳۰ درصد می‌رسد؛ ولی تعیین عیار بر پایه مس به عنوان کانها اصلی بوده است. واحد داسیت-ریوداسیت با دگرسانی سرسیتی تورمالین‌دار و به‌صورت برشی شده و همچنین واحدهای آندزیتی و توفی ائوسن، میزبان کانی‌سازی سرب و منگنز در جنوب محدوده شده‌اند (شکل‌های ۲-K و L). بر پایه مشاهدات صحرائی، کان‌زایی‌هایی با کانی‌شناسی، نوع و روند مشابه (N, NE-S, SW) در پیرامون محدوده ماهر در واحدهای آندزیتی و داسیتی و توف‌های مربوطه دیده می‌شوند (برای نمونه محدوده گلرو و آبشور که به تازگی کارهای اکتشافی محدودی در این نواحی انجام شده است) که نشانگر پیروی کان‌زایی در منطقه از ساختارهای زمین‌ساختی است.

۵- کان‌شناسی (شیمی کانی‌ها و روابط پاراژنزی)

بر پایه مطالعات صحرائی، میکروسکوپی و تجزیه میکروپروب، کانی‌شناسی درونزاد کانسار ماهر گوناگون است و شواهد بافتی و روابط تقاطع (cross-cutting) در مقیاس‌های مختلف، روابط پاراژنزی پیچیده‌ای میان آنها نشان می‌دهد (جدول ۱). در ادامه به شرح انواع کان‌های تشکیل شده، بافت‌های شاخص و ارتباط آنها با یکدیگر پرداخته می‌شود:

- پیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در محدوده ماهر است. پیریت‌های افشان که حاصل فرایندهای گرمایی هستند، به‌صورت ریزبلور و خودشکل تا بی‌شکل با گسترش زیاد در انواع سنگ‌های آذرین و بیشتر در همراهی با دگرسانی سرسیتی تشکیل شده و در موارد بسیار کمی اسفالریت‌های تیره افشان نیز آنها را همراهی کرده‌اند. رخداد پیریت‌های پرکننده فضای باز به‌صورت درشت، خودشکل تا بی‌شکل است. روابط تقاطع (شکل‌های ۲-B، D، G)، جانشینی اسفالریت تیره به جای پیریت موجود در رگه-رگچه‌ها (شکل ۳-A) و حضور مقدار کمی از ادخال‌های کوچک کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، سولفسالت بیسموت و آرسنوپیریت در برخی از پیریت‌های همراه با کان‌زایی، نشانگر تشکیل پیریت اولیه و در همه مراحل کان‌زایی است. نتایج تجزیه میکروپروب تغییر ترکیب مشخصی در مقدار درصد وزنی عناصر در پیریت‌های رگچه‌ای همراه کان‌زایی را مشخص می‌کند: Zn و نسبت Cu/Fe و Zn/Fe نشان می‌دهند. بیشتر پیریت‌ها در ژرفای متأثر از فرایندهای برونزاد، به‌طور کامل و یا از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها به گوتیت، زاروسیت، گاه لپیدوکروسیت و در مواردی هماتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۳-B).

- آرسنوپیریت به‌صورت خودشکل و به مقدار بسیار کم درون رگه-رگچه‌های سیلیسی و به‌صورت ادخال در برخی از پیریت‌ها و اسفالریت‌های آهن‌دار دیده می‌شود (شکل ۳-C) و به‌طور میانگین دارای $As=41/52\%wt$ است.

- اسفالریت به‌صورت دو نسل، اسفالریت‌های آهن‌دار (تیره و روشن) و اسفالریت‌های فقیر از آهن در کانسار ماهر قابل شناسایی است. پس از پیریت، کان‌زایی اسفالریت تیره آهن‌دار با محتوای $Fe=3/42-7/44\%wt$ که مقدار واقعی آهن اولیه در آنها نیست (بخش شرایط تشکیل را ببینید)؛ فراوان‌ترین فاز سولفیدی در کانسار ماهر است و در مواردی اسفالریت‌های روشن آهن‌دار با محتوای $Fe=2/19-4/22\%wt$ در حاشیه خارجی آنها قرار دارند (شکل‌های ۲-D و ۴-H). بر پایه مطالعه میکروسکوپی، اسفالریت‌های تیره آهن‌دار شامل مقدار زیادی تاول‌ها و تیغه‌های کالکوپیریت (بیش از ۵ درصد) به نام بافت بیماری کالکوپیریت (Barton, 1978; chalcopyrite disease) هستند که هم به‌صورت پراکنده و هم در جهت صفحات بلورشناسی رخ داده‌اند (شکل ۳-D). کانی اسفالریت فقیر از آهن ($Fe=0/08-1/14\%wt$)، به‌صورت بی‌شکل و در بخش‌های غنی از مس در پیرامون کالکوپیریت و گاه تنانیت و همچنین به‌صورت پرکننده فضای خالی تشکیل شده است و به علت جانشین شدن توسط دیژنیت و یا کولیت، گاه تنها حاشیه نازکی از آن دیده

در رگه - رگچه‌های دارای اسفالریت آهن دار را بر کرده است.
 - سولفید کادمیم (CdS) که معادل کانی گرنوکیت و کانی برونزاد و کمیاب هاولیت است، بیشتر در بخش‌های شمالی رگه پلی‌متال رخ داده است و بر پایه مطالعه میکروسکوپی، بیشتر به صورت نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل و به رنگ خاکستری در کالکوپریت و اسفالریت دیده می‌شود (شکل ۳-۱) که نشان از منشأ درونزاد آن دارد. چون، هر چند کانی سولفید کادمیم بیشتر به عنوان محصول هوازدگی اسفالریت دارای Cd تشکیل می‌شود؛ ولی بر پایه سری شرم عنصر Cd نمی‌تواند در محیط برونزاد جانشین عنصر Cu در ساختار سولفیدی شود و گرنوکیت درونزاد به‌طور رایج با اسفالریت همراه است. وجود کادمیم بالا در محیط اکسیدان به ویژه در شمال کانسار (در مطالعات فراوری مشخص شده است) نیز می‌تواند حاکی از فرورشت نشدن و یا فرورشت بسیار کم این عنصر به منطقه زیر اکسیدان باشد.

- بر پایه تجزیه مایکروپروب، نقره به مقدار قابل توجه در شبکه انواع سولفوسالت‌های بیسموت به جز مشتقات بیسموتینیت، گالن، بخش تراهدریت مجموعه تراهدریت- تنانیت و کوولیت و گاه به‌صورت خالص در روتیل درون بیوتیت سریستی شده (شکل ۴-۲) وجود دارد. در یک نمونه نیز شیلتیت، استولزیت (stolzite) کلسیم‌دار و تنگستات آهن- منگنز- روی در شکستگی‌های اسفالریت‌های بیمار و دارای ادخال‌هایی از کالکوپریت، سولفوسالت‌های بیسموت و گالن که از حاشیه‌گیری و کوولیتی شده‌اند، شناسایی شد که تا حدود ۱۰ درصد وزنی طلا دارند (شکل‌های ۳-۳ و ۴-۴).

- در رگه‌های سرب، گالن با بافت توده‌ای دیده می‌شود که تحت تأثیر هوازدگی و سیال مس‌دار به آنگلیزیت، سروزیت، لیناریت و کوولیت تبدیل شده است (شکل ۳-۱). کانی‌شناسی رگه‌های منگنز شامل پسیلوملان، منگانیت، پیرولوزیت و سیلیکات‌های منگنز (رودونیت) با بافت کلوفرمی (دمای بسیار پایین تشکیل کانه) است (شکل ۳-۳).

- بر پایه مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، کانی‌های برونزاد شامل گویت، ژاروسیت، ناتروژاروسیت، همانیت، نئوتوسیت، مالاکیت، آزوریت، آتاکامیت، پاراتا کامیت، کلرید مس و سرب، کریزوکولا، آنگلیزیت، سروزیت، لیناریت، کانی‌های غیرسولفیدی روی، آهن و منگنز به ویژه اسمیت‌زونیت دارای مقادیر متفاوتی آهن و منگنز و کمی کالکوسیت، کوولیت، اسفالریت مس‌دار و اسفالریت پودری، گوگرد آزاد، فسفات روی، آرسنات سرب و کانی اکسیدی تنگستن‌دار ناشناخته است.

۶- دگرسانی

بر پایه مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، در محدوده مورد بررسی انواع دگرسانی شامل سریستی (فیلیک)، پروپیلیتی، آرژیلی متوسط و پیشرفته و به مقدار بسیار کم کوارتز-آدولاریا تشکیل شده است.

۶-۱. دگرسانی سریستی

این دگرسانی هم در بخش‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی- نیمه آتشفشانی و آذرآواری محدوده ماهور (به‌ویژه در واحد داسیت- ریوداسیت) به عنوان دگرسانی سریستی پیش از کانه‌زایی پلی‌متال و هم به‌صورت هاله دگرسانی بیشتر رگه - رگچه‌های کانه‌دار به عنوان مهم‌ترین دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی دیده می‌شود. مجموعه کانی‌های این دگرسانی که به‌طور چیره طی فرایندهای جانشینی بیشتر به‌صورت ریزبلور و جانشین کننده بلورهای پلاژیوکلاز و یا فلدسپار و زمینه سنگ و در مواردی به‌صورت رگچه‌ای رخ داده‌اند، شامل کوارتز، سریست (مسکویت)، پیریت، کربنات و گاه همراه با مقادیر متفاوتی کانی رسی، کلریت و روتیل است (شکل‌های ۵-۱ و ۵-۲) و در دگرسانی سریستی پیش از کانه‌زایی، مقادیر زیادی تورمالین سیاه دیده می‌شود. دگرسانی سریستی در ماهور شامل مؤلفه سیلیسی شدن (Seedorff et al., 2005) است. بنابراین، سیلیسی شدن شدید به همراه پیریت‌زایی افشان گسترده در بخش‌هایی از سنگ‌های محدوده بیشتر متعلق به این

فاماتینیت با مقداری As (۱/۷۸-۱/۱۸ wt%) به جای Sb، به مقدار کم، ریزدانه و بی‌شکل، به رنگ صورتی کم‌رنگ و انیزوتروپ، در برخی از شکستگی‌ها و مرزهای دانه‌های کالکوپریت حاشیه شده توسط اسفالریت فقیر از آهن و کوولیت دیده می‌شود و مقدار کمی نیز از حاشیه کوولیتی شده است (شکل ۳-۳) که بیانگر تشکیل فاماتینیت پس از اسفالریت فقیر از آهن است.

- بر پایه مطالعه میکروسکوپی، سولفوسالت‌های بیسموت به مقدار قابل توجه در کانه‌زایی پلی‌متال ماهور شناسایی شدند. سولفوسالت‌های بیسموت ساختارهای شبه گالن گوناگونی تشکیل می‌دهند که هم شاخص شناسایی این گروه از سولفوسالت‌های آنتیمن و سولفوسالت‌های آرسنیک است (Chang et al., 1988) و هم به دلیل ویژگی‌های میکروسکوپی بسیار مشابه با گالن (ولی با شدت انیزوتروپی مختلف) به سادگی با گالن، استینیت، بولانتریت و جیمسونیت اشتباه می‌شوند. در این کانسار، کانی‌های این گروه بیشتر در بخش‌های غنی از مس و به‌صورت جانشین‌کننده کالکوپریت، پیریت، اسفالریت فقیر از آهن و یا دانه‌های مستقل در کوارتز دیده می‌شوند و در مواردی اسفالریت آهن‌دار روشن و سالم را نیز جانشین و یا قطع کرده‌اند (شکل‌های ۴-۴، G، H، I و F) که نشانگر تشکیل آنها پس از اسفالریت آهن‌دار و در فاصله تشکیل کالکوپریت تا پس از اسفالریت فقیر از آهن است. تجزیه مایکروپروب افزون بر تأیید حضور این گروه از کانی‌ها، موجب شناسایی انواع مختلفی از آنها به شرح خلاصه زیر شد: ۱) سولفوسالت‌های بیسموت- مس- سرب، بیشتر شامل کانی‌هایی از سری آیکینیت- بیسموتینیت (aikinite-bismuthinite) با فرمول عمومی $Cu_xPb_xBi_{12-x}S_{18}$ و معروف به مشتقات بیسموتینیت، و همچنین کانی فلرتالیت (felbertalite; $Cu_2Pb_6Bi_8S_{19}$) با میانگین $Ag=1/11\%wt$ (۲) سولفوسالت‌های بیسموت- مس- سرب- نقره شامل بری‌ایت (Berryite; $Cu_3Ag_2Pb_3Bi_7S_{16}$) با $Ag=6/6-7/07\%wt$ و مقداری $Te=0/03-0/29\%wt$ و گاه $Se=0/44\%wt$ در جایگاه گوگرد آن و ترکیباتی ناشناخته با مقدار Cu ، Bi و Pb متفاوت و $Ag=0/77-5\%wt$ (۳) سولفوسالت‌های بیسموت- مس همچون امپلسیت (empletite; $CuBiS_2$) بیشتر نقره‌دار با $Ag=2/63-3/78\%wt$ و گاه همولوگ سرب‌دار آن و همچنین ویتچنیت ($wittichenite$; Cu_3BiS_3) با $Ag=0/02-0/07\%wt$ (۴) سولفوسالت‌های بیسموت- سرب- مس- نقره همچون موم‌ایت ($mummeite$; $Cu_{0.58}Ag_{3.11}Pb_{1.10}Bi_{6.65}S_{13}$) با $Cu=3/95\%wt$ و $Ag=9/76\%wt$ (۵) سولفوسالت‌های بیسموت- سرب دارای نقره با مقداری $Te=0/1-1/1\%wt$ در جایگاه گوگرد آن (شکل ۴-۴)؛ شامل کانی‌هایی از خانواده لیلیانیت (lillianite) همچون بورس‌آیت ($Bursaite$; $Pb_3Bi_4S_{11}$) یا ترکیبی میان لیلیانیت و گستاویت ($Gustavite$; $PbAgBi_3S_6$) با میانگین $Ag=2/22\%wt$ است که گاه به جای نقره شامل مس است، مقدار کمی هیرووسکی‌ایت ($Hrovoskyite$, $Pb_6BiS_9 - Pb_{10}AgBi_5S_{18}$) دارای مس ($1/59\%wt$) و نقره ($0/44\%wt$) و آشمالمیت ($acshalmite$; $Pb_6Bi_2S_9$) با $Ag=2/05-3/08\%wt$. گفتنی است، محلول جامد سری لیلیانیت (lillianite series, $Ag_xPb_{3-2x}Bi_{2+x}S_6$) میان لیلیانیت و گستاویت وجود دارد که جایگزینی زوج Ag و Pb به جای $2Pb$ در آن احتمال دارد. در این کانی‌ها به ویژه در سری آیکینیت- بیسموتینیت و میان آنها و بری‌ایت بافت‌های اکسلوشن و درهم‌رشدی دیده می‌شود (شکل ۴-۴).

گالن با محتوای $Sb=0/02\%wt$ و $Bi=0/08\%wt$ ، $Ag=0/56-1/65\%wt$ در کانسار پلی‌متال ماهور کانی‌سازی کرده است و بیشتر به شکل جانشین‌کننده پیریت، کالکوپریت، اسفالریت آهن‌دار و گاه سولفوسالت بیسموت (شکل ۳-۳) و نزدیک سطح همراه با کمی باریت دیده می‌شود. این کانی در مواردی فضاهای خالی

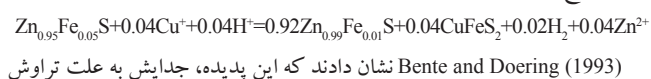
رگچه‌های کانه‌دار، بیشتر در حاشیه خارجی هاله دگرسانی سرسیتی دیده می‌شود. حضور مونت‌موریلونیت می‌تواند به علت تغییر در شرایط pH سیال گرمابی از اسیدی به خنثی، تغییر در ترکیب شیمیایی سیال گرمابی یا نسبت واکنش آب به سنگ باشد (Simpson et al., 2001).

بر پایه تجزیه XRD، دگرسانی آرژیلی برونزاد شامل مجموعه کانی‌های کوارتز، آلونیت ($K[Al_3(OH)_6(SO_4)_2]$)، ناتروآلونیت ($Na[Al_3(OH)_6(SO_4)_2]$)، کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ارتوز، ژپس، انیدریت، هالیت و کمی کریزوتیل است که با گستردگی زیاد و هم‌روند با کانه‌زایی پلی‌متال، سنگ‌های میزبان کانه‌زایی را تحت تأثیر قرار داده و همراهی آن با زاروسیت، ناتروآروسیت و بخش اکسیدان، نشانگر تشکیل آن طی فرایند هوازدگی است. هر چند به علت وجود دگرسانی آرژیلی متوسط و پیشرفته درونزاد در سنگ دیواره رگه- رگچه‌های کانه‌دار و همچنین منشأ گرمابی ناتروآلونیت (Arribas et al., 1995)، همه دگرسانی آرژیلی موجود در سطح را نمی‌توان به فرایندهای برونزاد نسبت داد.

۷- شرایط تشکیل کانه‌ها

مقدار میانگین As موجود در آرسنوپیریت که کانی شاخص حالت سولفیداسیون پایین است (Einaudi et al., 2003)، بر پایه روابط فازی در سامانه Fe-As-S و نمودار ترکیب-دما (Kretschmar and Scott, 1976) نشانگر تشکیل این کانی در دمای بالا و حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

اسفالریت آهن‌دار تیره نشانگر تشکیل در دمای بالا و یا fS_2 پایین است و حضور زیاد آن در کانسار پلی‌متال ماهور، نشان از تشکیل بیشتر کانسار تحت این شرایط دارد. مقدار آهن موجود در اسفالریت نسبت مستقیم با دما و نسبت وارون با fS_2 دارد (Vaughan and Craig, 1997). بنابراین، تشکیل اسفالریت‌های آهن‌دار روشن در حاشیه اسفالریت‌های تیره نشانگر افزایش fS_2 (به احتمال به دلیل کاهش دما) طی نهشت این کانه‌هاست. بافت بیماری کالکوپیریت دیده شده در اسفالریت آهن‌دار تیره ماهور ویژگی بسیار رایج کانسارهای دگرگون نشده سولفید توده‌ای و رگه‌های مس و روی‌دار گرمابی تشکیل شده در دمای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Barton and Bethke, 1987; Craig and Vaughan, 1994). به علت مقادیر بسیار پایین انحلال تعادلی CuS در اسفالریت در سامانه Cu-Fe-Zn (Wiggins and Craig, 1980; Hutchison and Scott, 1981;) و محتوای بالای مس در این اسفالریت‌ها نمی‌تواند با اکسولوشن کالکوپیریت توضیح داده شود؛ اگر چه با وجود منشأ جانیشینی انتخابی برای این بافت، سال‌هاست در ایران بدون توجه به مقدار ادخال‌ها و دمای کانه‌سازی، به‌طور چیره به عنوان بافت اکسولوشن امولسیدیدی و ادخال‌های کالکوپیریت به عنوان کالکوپیریت نسل اول و ناشی از سردشدگی از دمای بالاتر تفسیر می‌شوند. بر پایه مطالعات (Barton and Bethke, 1987)، بیماری کالکوپیریت (به جز بافت bidchines در دماهای بالاتر) اولیه است و به علت جانیشینی انتخابی سیال کلریدی مس‌دار با آهن موجود در اسفالریت غنی از آهن رخ می‌دهد که اسفالریت با محتوای آهن کمتر نتیجه آن خواهد بود (علتی که مقدار آهن پایین تر اسفالریت‌های تیره نسبت به روشن را در کانه‌زایی ماهور توضیح می‌دهد) و می‌توان آن را با واکنش زیر توضیح داد:



(diffusion-induced segregation, DIS) است که در نتیجه گرادیان اختلاف fS_2 و فعالیت فلز صورت می‌گیرد و مستلزم اسفالریت‌های با بیش از ۵% آهن اولیه است (عامل بیمار نبودن اسفالریت‌های آهن‌دار روشن در ماهور). افزایش fS_2 سبب اکسایش بخشی Fe^{2+} درون اسفالریت به Fe^{3+} می‌شود و مس تراوش شده به درون اسفالریت با آن واکنش می‌دهد و سبب پدیده DIS با محتوای آهن پایین برای این کالکوپیریت‌ها می‌شود؛ فرایندی که در آزمایش‌های (Lepetit et al., 2003) نیز

دگرسانی است. دگرسانی سرسیتی پیش از کانه‌زایی به‌صورت برشی شده میزبان کانه‌زایی شده (شکل‌های ۲- K و L) و یا با رگچه‌های کانه‌دار دارای دگرسانی سنگ دیواره در برخی جاها قطع شده است. چنین روابط تقاطعی تأییدکننده وجود فعالیت گرمابی پیش از مرحله کانه‌زایی در محدوده است. تورمالین به اشکال شعاعی (تورمالین خورشیدی)، منشوری و سوزنی تا ۱ سانتی‌متر و به رنگ‌های سبز، آبی، قهوه‌ای و قرمز در نور XPL دیده می‌شود که بیشتر به‌صورت هم‌رشدی با کوارتز و یا جانیشینی پلاژیوکلازا و فلدسپارهای قلیایی سرسیتی شده تشکیل شده است (یونسی و همکاران، ۱۳۹۵) (شکل‌های ۵- C و D) و بر پایه تصویر BSE دانه‌هایی از کانی قلع‌دار، گالن و پیریت نیز در آن دیده می‌شود. تورمالین کانی رایج در دگرسانی سرسیتی و نشانگر غنی بودن سیال‌های دگرسان‌کننده از عنصر B است (Sillitoe, 2000; Seedorf et al., 2005).

۶-۲. دگرسانی پرویلیتی

در این محدوده، دگرسانی پرویلیتی بیشتر شامل پاراژنز کلریت (به‌ویژه در سنگ‌های حدواسط از نوع پنین)، اپیدوت، کربنات (بیشتر در ژرفای زیاد) با مقدار کمی کوارتز، کالکوپیریت، آلپیت، پیریت و اکینولیت است که در بخش باختر و جنوب باختری محدوده، در واحد آندزیتی ائوسن به ویژه در حاشیه استوک نیمه‌نفوذی دیوریتی و همچنین در دایک‌های میکرودیوریتی نمود آشکارتری دارد. این دگرسانی در فاصله دورتر از رگچه‌های کانه‌دار و در مواردی در مجاورت بلافاصله رگچه‌های بسیار کوچک پیریت- کالکوپیریت نیز دیده می‌شود که بیشتر شامل اپیدوت سبز رنگ پیستاسیتی است (شکل ۵- E). اپیدوت در بخش‌های ژرف تر سامانه‌های اپی‌ترمال در دمای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود (Browne and Ellis, 1970; White and Hedenquist, 1995).

۶-۳. دگرسانی کوارتز-آدولاریا

آدولاریا به‌صورت بلورهای رومبوندی تا بی‌شکل و با برجستگی بالا در مطالعات میکروسکوپی و تجزیه میکروپروب شناسایی شد که همراه بلورهای ریز کوارتز گرمابی و زیرکن، به‌طور محلی به عنوان دگرسانی سنگ دیواره رگچه سولفیدی شامل اسفالریت بسیار تیره بیمار با کمی پیریت تشکیل شده است (شکل ۵- F). آدولاریا در شرایط pH نزدیک به خنثی تا قلیایی تشکیل می‌شود (Cooke et al., 1996) و از کانی‌های شاخص کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین است که به‌طور محلی در کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون متوسط نیز دیده می‌شود (Simmons et al., 2005).

۶-۴. دگرسانی آرژیلی متوسط و پیشرفته

این دگرسانی‌ها به دو صورت درونزاد و برونزاد در محدوده ماهور تشکیل شده است. در محدوده مورد بررسی، افزون بر دگرسانی آرژیلی پیشرفته برونزاد، مقدار بسیار کمی از این دگرسانی در سنگ دیواره رگچه‌های سیلیسی غنی از مس و دارای اسفالریت فقیر از آهن، فاماتینیت، دژنیت و کولیت اولیه، به‌صورت در هم تنیده با دگرسانی سرسیتی، دیده می‌شود و شامل مجموعه کوارتز (به‌صورت ریزبلور درون کانی‌های اولیه و زمینه سنگ)، کانی رسی (کائولینیت و ترکیب میان کائولینیت و پیروفیلیت) و مقدار کمی ژپس است که در یک مورد تجزیه میکروپروب ترکیبی معادل پیروفیلیت نیز نشان داد. شناسایی کائولینیت درونزاد از برونزاد بسیار مشکل است؛ ولی همراهی با سیلیسی شدن زیاد (Sillitoe, 2005) و گاه کمی پیروفیلیت (نشانگر دمای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، همراه نشدن با زاروسیت و تشکیل آن در ژرفا نشان از منشأ درونزاد آن در سنگ دیواره دارد. به باور (White and Hedenquist, 1995) تشکیل کائولینیت در سنگ دیواره رگه‌های کانی‌سازی شده در ارتباط با محلول‌های گرمابی با دمای ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، pH برابر ۴ تا ۵ و شرایط اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا است.

حضور مجموعه ارتوز، کائولینیت، بیدلایت، ایلیت همراه کمی مونت‌موریلونیت و کلریت در محدوده ماهور که بیشتر درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند را جانیشین کرده‌اند؛ نشانگر دگرسانی آرژیلی متوسط است که در سنگ دیواره رگه-

مستقر پس از تشکیل این سولفوسالت‌های بیسموت است. گالن با مقدار بالای Ag و Bi پس از سولفوسالت‌های بیسموت تشکیل شده است.

تشکیل کانی اسفالریت فقیر از آهن به عنوان یکی از کانی‌های شاخص شرایط سولفیداسیون بالا (Einudi et al., 2003) پس از نهشت کالکوپیریت نشان از افزایش حالت سولفیداسیون سیال کانه‌زا در بخش غنی از مس دارد که تشکیل کمی فاماتینیت نیز آن را تأیید می‌کند. به باور (Einudi et al., 2003) این تغییر حالت سولفیداسیون به دنبال سرد شدن و افزایش فوگاسیته گوگرد صورت می‌گیرد. با سرد شدن بیشتر سیال کانه‌زا، کمی دیزنیت و به احتمال کولیت نیز که از کانی‌های شاخص شرایط سولفیداسیون خیلی بالا و اکسایش بالا هستند (Einudi et al., 2003)، در این کانسار به صورت جانشین کننده اسفالریت فقیر از آهن، کالکوپیریت و یا تنانیت و در مواردی در رگچه‌ها تشکیل شده‌اند. وجود مقادیری نقره و بیسموت در تجزیه‌های دیزنیت و کولیت می‌تواند به علت حضور نقره و ادخال‌های میکرونی سولفوسالت بیسموت باشد؛ ولی مقدار آهن منشأ درون‌زاد را برای بخشی از این کانی‌ها پیشنهاد می‌کند. در سامانه Cu-S، در ماهای خیلی بالا تنها محلول جامد دیزنیت- کالکوسیت ($Cu_{1.73}S-Cu_2S$) پایدار است (Vaughan and Craig, 1997) و دیزنیت به عنوان فاز چیره، شامل مقادیر کمی آهن است (Morimoto and Koto, 1970; Vaughan and Craig, 1997). بر پایه (Lewis 1997) نیز کولیت‌های اولیه دارای مقادیر بالایی از عناصر دیگر به ویژه آهن هستند؛ ولی کولیت برون‌زاد خالص است و از ترکیب استوکیومتری اش انحراف نشان نمی‌دهد.

تشکیل محلی شینلیت، استولزیت و تنگستات آهن- روی- منگنز در مراحل پایانی کانه‌زایی و تحت شرایط fH_2S پایین و fO_2 بالا صورت گرفته است. تشکیل کمی باریت در همراهی با گالن، نشانگر پایان فرایند کانی‌سازی گرمایی در کانسار پلی‌متال ماهور است.

۸- نتیجه‌گیری (ژنز و نوع کانه‌زایی)

کانی‌سازی Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهور در لوت مرکزی، در همراهی با سنگ‌های آذرین کالک‌آلکانل پتاسیم بالا تا شوشونیتی متعلق به محیط زمین‌ساختی پس از برخورد تشکیل شده است (یونسی و همکاران، ۱۳۹۵). این کانی‌سازی بیشتر به میزبانی واحد داسیت- ریوداسیت به سن ائوسن بالایی- الیگوسن رخ داده است و دارای کنترل ساختاری است. محتوای سولفید در کانسار پلی‌متال ماهور بالاست و کانی‌سازی شامل کانی‌های اصلی پیریت، اسفالریت آهن دار و کالکوپیریت همراه با گالن، سولفوسالت‌های مس، سولفوسالت‌های بیسموت، اسفالریت فقیر از آهن و کمی گرینوکیت، آرسنوپیریت، دیزنیت و به احتمال کولیت است که نقره به مقدار قابل توجه در شبکه انواع سولفوسالت‌های بیسموت به جز مشتقات بیسموتینیت، گالن و تا حدودی بخش تتراهدريت مجموعه تتراهدريت- تنانیت و کولیت حضور دارد و مقدار قابل اغماضی کانی‌های تنگستن طلا دار به طور محلی رخ داده است. بنابراین، همراهی‌های فلزی بیشتر شامل روی و مس (به‌طور چیره اسفالریت تیره توده‌ای و کالکوپیریت) با مقداری سرب، بیسموت، نقره و مقادیر ناچیزی طلا، تنگستن و قلع است که نتایج حاصل از این پژوهش، نسبت بالای نقره به طلا را در آن نشان می‌دهد. نسبت بالای نقره به طلا، الگوی منطقه‌بندی کانی‌سازی در مقیاس کانسار (رخداد مس نسبت به روی در ژرفای بیشتر و در نیمه باختری کانسار) و منطقه (رگه‌های سرب و منگنز در سنگ‌های آندزیتی و داسیتی در حاشیه کانه‌زایی پلی‌متال) و همچنین شواهد بافتی (از جمله بیماری کالکوپیریت) در کانه‌زایی پلی‌متال ماهور شواهدی از نهشت فلزات از کمپلکس‌های کلریدی هستند. نهشت فلزات و تشکیل کانی‌ها تابعی از متغیرهای پیچیده شامل دما، اسیدیته و مقدار آهن، مس، روی، آنتیموان، آرسنیک، بیسموت، نقره و گوگرد در دسترس بوده است که بر پایه شواهد بافتی و روابط تقاطع، توالی پاراژنزی کانی‌سازی پلی‌متال ماهور به‌طور خلاصه شامل سه مرحله اصلی (۱) کوارتز- پیریت، (۲) اسفالریت آهن دار و (۳) کالکوپیریت همراه با انواع سولفوسالت‌ها و در مواردی گالن و کانی‌های سولفیداسیون بالا شامل اسفالریت فقیر

ثابت شده است. در کانه‌زایی ماهور نیز ادخال‌های کالکوپیریت درون اسفالریت کمترین مقدار آهن را نشان می‌دهند. بر پایه (Barton and Bethke 1987) و (Eldridge et al. 1988)، طی واکنش سیال کلریدی مس دار با اسفالریت آهن دار، اگر محتوای مس محلول خیلی بالا و S در منبع کم باشد؛ در سیال به شدت فوق اشباع در همه سولفیدهای مس، تنها جانشینی توده‌ای اسفالریت توسط کالکوپیریت صورت می‌گیرد (بافت جانشینی ساده) و تنها وقتی سطح فوق اشباع پایین باشد؛ سبب جانشینی انتخابی بخشی بیماری کالکوپیریت می‌شود. بنابراین، شواهد بافتی (بافت بیماری کالکوپیریت و بافت جانشینی ساده کالکوپیریت در حاشیه اسفالریت) به همراه دانه‌های مجزای کالکوپیریت با محتوای آهن بالاتر، افزون بر نشان دادن تشکیل کالکوپیریت پس از اسفالریت‌های آهن دار که توسط روابط پاراژنزی نیز تأیید می‌شود (شکل ۲- H)؛ بیانگر تغییر تدریجی شدت فوق اشباع شدن سیال کانه‌زا از مس و همچنین افزایش fS_2 و حالت اکسایش آن است. حضور اسفالریت ستاره‌ای در کالکوپیریت که پیش‌تر به عنوان اکسلوشن تفسیر می‌شد؛ حاصل جانشینی است (Augustithis, 1995) و به باور (Marignac 1989) نتیجه‌ای از فوق اشباع شدن محلی سیال از اسفالریت در زمان رشد کالکوپیریت است که نیاز به نرخ بالای نهشت دارد. کالکوپیریت کانی شاخص شرایط سولفیداسیون متوسط است (Einudi et al., 2003). بر پایه نمودار درصد مولی FeS در اسفالریت در حال تعادل با پیریت یا پیروتیت در برابر دما و a_{S_2} (Scott, 1974) و با توجه به فراوانی پیریت و نبود پیروتیت در این کانسار، مقدار FeS اولیه اسفالریت‌های بیمار در کانه‌زایی ماهور بیش از ۲۰ wt% نبوده است و بنابراین کانی اسفالریت آهن دار نیز بر پایه (Einudi et al. 2003) در شرایط سولفیداسیون متوسط تشکیل شده است. تغییر ترکیب مشخص در مقدار درصد وزنی عناصر Cu, As, S, Fe و نسبت Cu/Fe و Zn/Fe در پیریت‌های رگچه‌ای همراه کانه‌ها، افزون بر نشان دادن تشکیل پیریت طی واکنش‌های تشکیل دهنده کانه‌ها، شواهدی از تغییر fS_2 طی نهشت کانه‌هاست (Lusk and Calder, 2004).

تتراهدريت- تنانیت از سیال کانه‌زا با اسیدیته بالا، شوری بالا و محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط اکسایش- احیا به نسبت گسترده‌ای تشکیل می‌شوند؛ ولی فاماتینیت- انارژیت از سیال‌های اسیدی‌تر، دما بالاتر (۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و همراه با مجموعه سولفیداسیون بالا رخ می‌دهند (Ixer and Patrick, 2003). به باور (Einudi et al. 2003) انارژیت و فاماتینیت، کانی‌های شاخص سولفیداسیون بالا و مجموعه تتراهدريت- تنانیت سولفیداسیون متوسط هستند و مرز تغییر حالت سولفیداسیون متوسط به سولفیداسیون بالا با تبدیل تتراهدريت- تنانیت به فاماتینیت- انارژیت مشخص شده است. جانشینی مقدار زیادی Zn و Fe در جایگاه Cu و جانشینی Sb و As به جای یکدیگر به ویژه Sb به جای As در این سولفوسالت‌ها و حضور فاماتینیت می‌تواند نشان‌دهنده مقدار بالای Zn, Fe و Sb در سیال کانه‌زا باشد.

سولفوسالت‌های بیسموت که درون‌زاد هستند و نسبت به سولفوسالت‌های آنتیموان و سولفوسالت‌های آرسنیک در دمای بالاتری تشکیل می‌شوند؛ ویژگی کانسارهای گرمایی سولفیداسیون متوسط تا بالا با منشأ بیشتر ماگمایی سیال کانه‌زا را نشان می‌دهند. بافت‌های اکسلوشن و درهم‌رشدی دیده شده در سولفوسالت‌های بیسموت (شکل ۴- G) نشانگر تشکیل فازهای جامد اولیه در دمای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. بر پایه آزمایش‌های (Chang et al. 1988) در سامانه $Cu_2S-PbS-Bi_2S_3$ ، مشتقات بیسموتینیت در دمای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد محلول جامد کاملی تشکیل می‌دهند که طی کاهش دما به چند فاز ویژه تبدیل می‌شوند. محلول‌های جامد تشکیل شده در دمای بالا (۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)، به ویژه در سری آیکینیت- بیسموتینیت به‌طور مؤثری در دمای پایین‌تر کمیاب هستند (Topa et al., 2002). بیشتر پاراژنزا در سامانه Pb-Bi-Ag-(Cu)-S نیز در دمای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهند (Foord and Shawe, 1988). حاشیه‌های ویچینیت نشانگر اثر واکنش سیال اسیدی

اسفالریت بسیار رایج و پیریت اولین فاز سولفیدی در مرحله کانه‌زایی است؛ (۶) بافت توده‌ای و محتوای سولفید بالا؛ (۷) نسبت نقره به طلای بالا؛ (۸) تشکیل در شرایط مزو- اپی ترمال (دمای ۲۰۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد)؛ (۹) دگرسانی سنگ دیواره بیشتر سریستی تا آرزیلی متوسط که در کانسارهای کردیلرن سولفیداسیون بالا شامل دگرسانی سریستی و آرزیلی پیشرفته است؛ (۱۰) منطقه‌بندی مشخص فلزی، کانه، دگرسانی و حالت سولفیداسیون؛ البته ویژگی منطقه‌بندی خوب گسترش یافته در بیشتر این کانسارها به علت وابسته بودن آن به عامل‌های دما، مسیر سیال‌های کانه‌زا و اندرکنش آنها با سنگ میزبان (Baumgartner et al., 2008)، ویژگی لازم این کانسارها نیست (Fontboté and Bendežú, 2009). به باور Einaudi et al. (2003) در این کانسارها مقادیر بالای روی، آهن و آنتیموان سبب ثبات تنانیت می‌شود و از تشکیل انارژیت جلوگیری می‌کند. بنابراین، مقدار بالای کانی‌سازی این عناصر در کانسار پلی‌متال ماهور، می‌تواند عامل عدم مشاهده انارژیت با وجود حضور مقادیر کانی‌های سولفیداسیون بالا در این کانسار باشد؛ هر چند ممکن است بخش انارژیت‌دار در منطقه تحت اکتشاف و حفاری قرار نگرفته و یا در اثر فرسایش از بین رفته باشد.

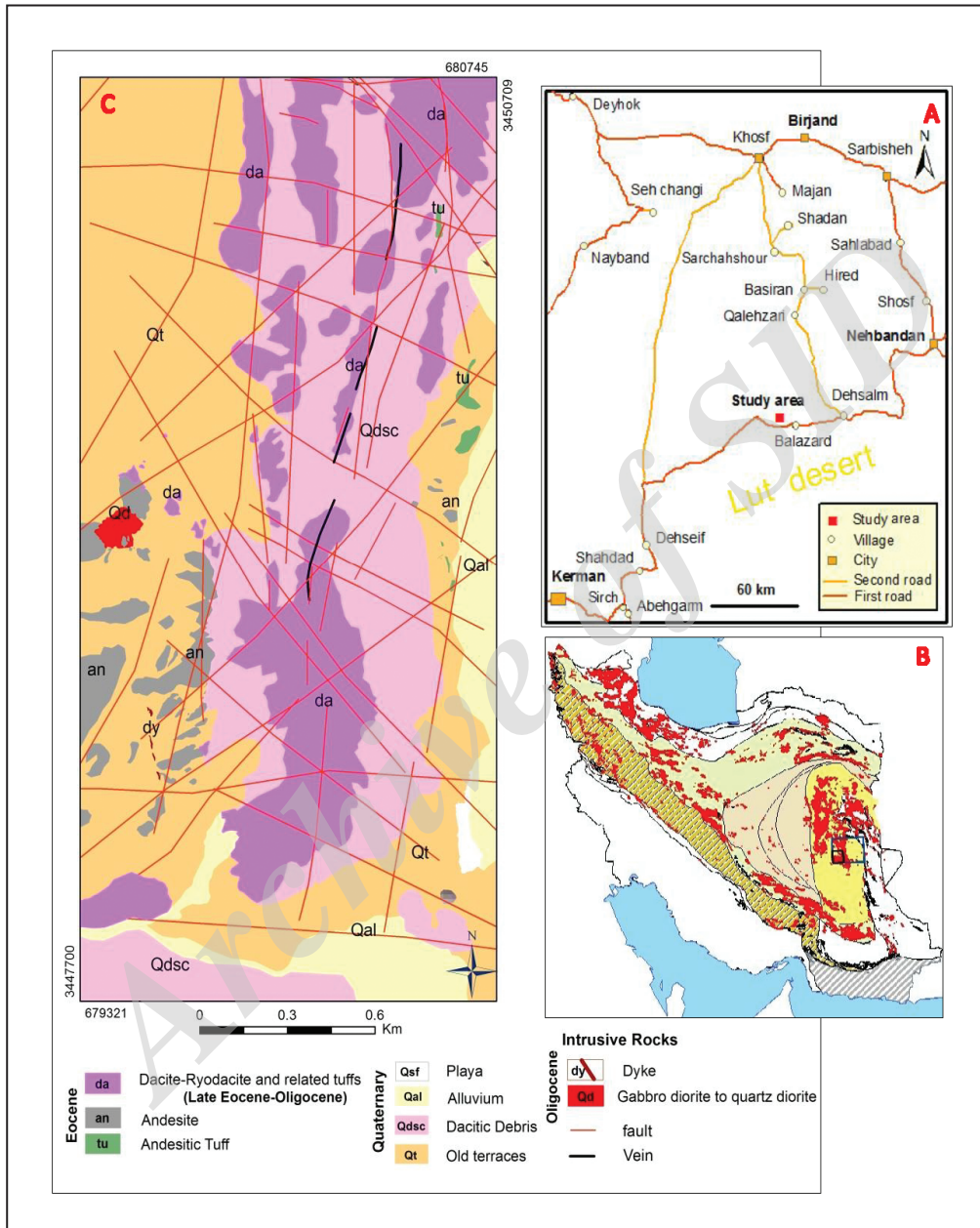
بر پایه Einaudi et al. (2003) شماری از کانسارهای پلی‌متال کردیلرن روی کانسارهای پورفیری قرار می‌گیرند (مانند رگه‌های Main Stage در بیوت) در حالی که بقیه ارتباطی به کانسارهای پورفیری ندارند (مثل سرو د پاسکو). Seedorff et al. (2005) عنوان می‌کنند که کانی‌زایی مس پورفیری می‌تواند همراه با کانسارهای طلای اپی‌ترمال و در مناطق دورتر همراه با کانسارهای فلزات پایه (روی، سرب، نقره و منگنز) باشد. بنابراین، در نگاه اول رده‌بندی کانسار ماهور به عنوان لود پلی‌متال نوع کردیلرن همراه با رگه‌های سرب و منگنز در حاشیه، در کنار توجه به رخداد کانسارهای پورفیری در لوت (برای نمونه شادان، ماهرآباد، ده‌سلم و چاه‌شلغمی)، انتظار برای اکتشاف کانسار مس پورفیری پنهان را افزایش می‌دهد؛ ولی این کانی‌سازی با تناژ کوچک و عیار کمتر در سنگ میزبان آتشفشانی- نیمه‌آتشفشانی، آتشفشانی و توف‌های مربوطه تشکیل شده و بر پایه حفاری‌های انجام شده تاکنون، کانه‌زایی روی و شرایط سولفیداسیون متوسط در آن چیره است که متأسفانه بیشتر از ویژگی‌های اساسی کانسارهای پلی‌متال کردیلرن بدون ریشه کانه‌زایی پورفیری در باور (Bartos 1989) است؛ هر چند استثنائاتی وجود دارند.

سپاسگزاری

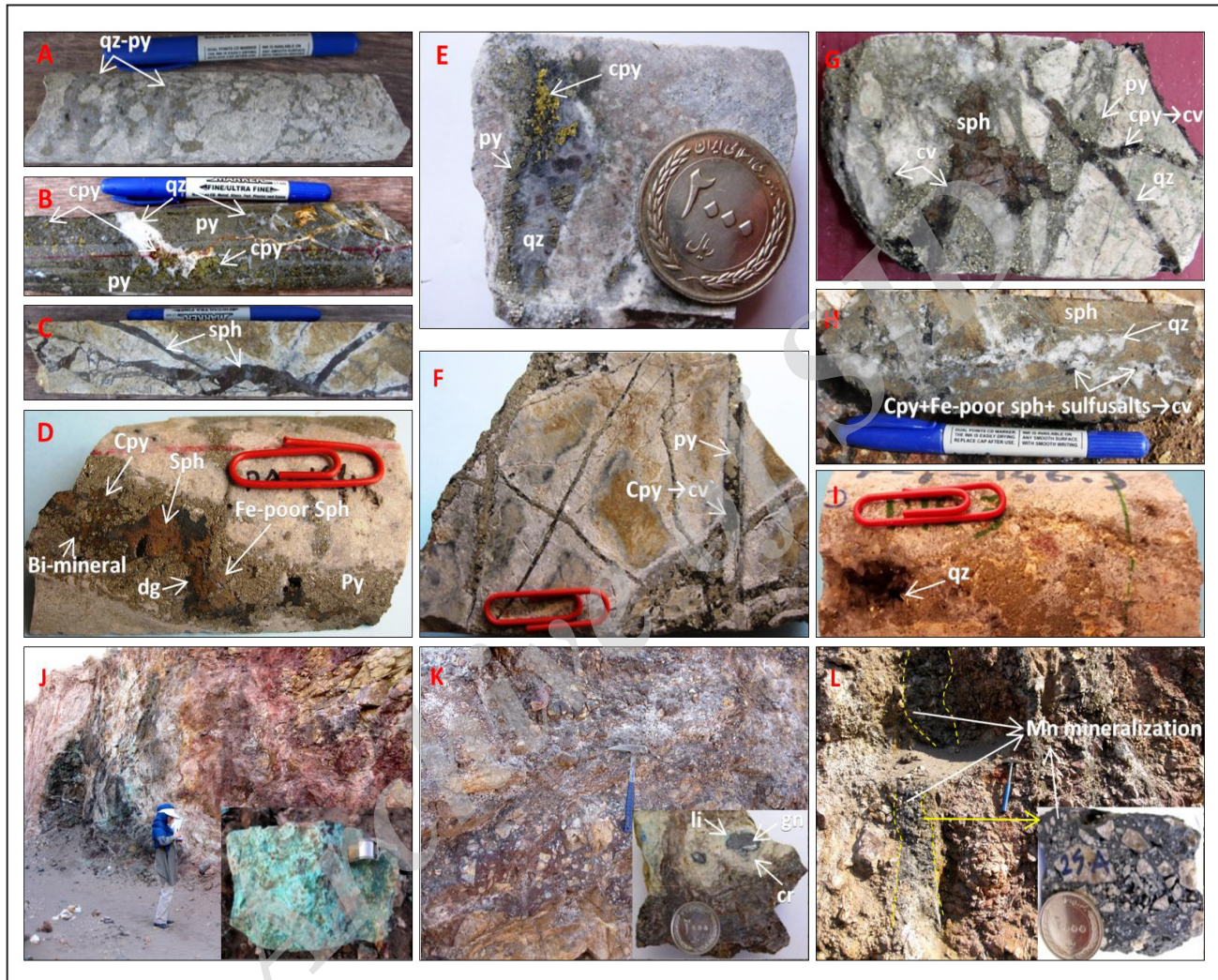
نگارندگان از شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس‌کانی - آقای دکتر گورابجیری - و از آقای مهندس نیکبخت و آقای مهندس محمدی برای فراهم کردن امکانات صحرائی، از سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) به علت حمایت مالی بخشی از پروژه و همچنین از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران به ویژه آقای مهندس قلی‌زاده برای انجام تجزیه میکروپروب سپاسگزاری می‌کنند. بی‌شک راهنمایی‌های ارزنده و علمی داوران محترم که در ارتقای سطح مقاله نقش بسزایی داشتند نیز شایسته سپاسگزاری است.

از آهن، فامانیت، دیژنیت و به احتمال کولیت است که پس از دگرسانی سریستی تورمالین‌دار صورت گرفته است و با دگرسانی آرزیلی و کانه‌زایی برونزاد دنبال شده است (جدول ۱). نوع کانی‌ها و دگرسانی سنگ دیواره، شرایط تشکیل کانه‌ها و شواهد بافتی در کانی‌سازی پلی‌متال ماهور و همچنین حضور فضاهای خالی پر شده از کوارتزهای خودشکل‌نشان می‌دهند که این کانسار از سیال گرمایی با منشأ بیشتر ماگمایی، در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (شرایط مزو- اپی ترمال) و در محدوده گسترده‌ای از شرایط سولفیداسیون متوسط با pH کم (۴ تا ۵/۵) تشکیل شده است که مقداری در بخش غنی از مس به حالت سولفیداسیون بالا نوسان کرده است. سیال کانه‌زا بیشتر به علت واکنش با سنگ دیواره خنثی و یا قلیایی شده است (تکامل پس‌رونده). تشکیل مقادیر کمی کانی‌های سولفیداسیون بالا پس از تشکیل کالکوپیریت و گاه تنانیت و به باور (Bartos 1989)، تشکیل اولیه آرسنوپیریت و تشکیل تأخیری اسفالریت فقیر از آهن شاهده‌ای از تغییر حالت سولفیداسیون متوسط به سولفیداسیون بالای سیال کانه‌زا (تکامل پیش‌رونده) در بخش کوچکی از بخش غنی از مس است که همراهی دگرسانی سریستی شدید تا گاه آرزیلی پیشرفته درونزاد با کانی‌های تأخیری سولفیداسیون بالا و دگرسانی سریستی شدید تا آرزیلی متوسط و اپیدوتی با مجموعه کانی‌های سولفیداسیون متوسط نشان می‌دهند که افزایش حالت سولفیداسیون با کاهش pH (کمتر از ۴) و افزایش fO_2 همراه بوده است. نهشت محلی مقادیر جزئی کانی‌های تنگستن‌طلادار در پاسخ به شرایط fO_2 بالا و fH_2S پایین صورت گرفته است. با تشکیل کمی باریت، مرحله گرمایی در کانسار پلی‌متال ماهور پایان یافته است.

ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساختار کانه‌زایی و زمین‌شناسی کانسار ماهور در مقایسه با انواع کانی‌سازی‌های ماگمایی- گرمایی، بیشترین تشابه را با ویژگی‌های کانسارهای لود پلی‌متال کردیلرن (Bendežú et al., 2008; Fontboté and Bendežú, 2009) همچون بیوت (مونتانا)، سرو د پاسکو (Cerro de Pasco) و کاساپالکا (Casapalca) (پرو) نشان می‌دهد که پیش‌تر کانسارهای مزوترمال (Lindgern, 1933; Park and MaC Diarmid, 1975)، لودها یا رگه‌های فلزات پایه کردیلرن (BML) (Cordilleran Base Metal Lode) یا بیوت (Meyer et al., 1968; Sawkins, 1972; Einaudi, 1982; Guilbert and Park, 1986;) (Bartos, 1989) نامیده شده‌اند. ویژگی‌های این کانسارها بر گرفته از (Sawkins 1972) و (Bendežú et al. 2008)، (Guilbert and Park 1986)، (Einaudi 1977 and 1982) و (Fontboté and Bendežú 2009) شامل موارد زیر است: (۱) ارتباط زمانی و مکانی با فعالیت‌های آذرین کالک‌آلکانل و موقعیت زمین‌ساختی مشابه بیشتر کانسارهای مس پورفیری و طلا- نقره اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا؛ (۲) رخداد اصلی به صورت پرکننده فضاهای باز (رگه- رگچه‌ها، توده‌های برشی) در سنگ میزبان‌های سیلیکاتی و به صورت جانشینی در سنگ میزبان‌های کربناته با نسبت طول به عرض بالا؛ (۳) کنترل ساختاری کانه‌زایی؛ (۴) همراهی فلزی مس- روی- سرب (نقره- بیسموت- طلا)- تنگستن- قلع مشابه کانسارهای پورفیری؛ (۵) بر عکس کانسارهای پورفیری، نهشت کانسار پس از مرحله اولیه سیلیسی شدن و پیریت‌زایی افشان (دگرسانی سریستی) صورت گرفته و برش‌های آذرین و گرمایی رایج، مولبدن کیمیا،

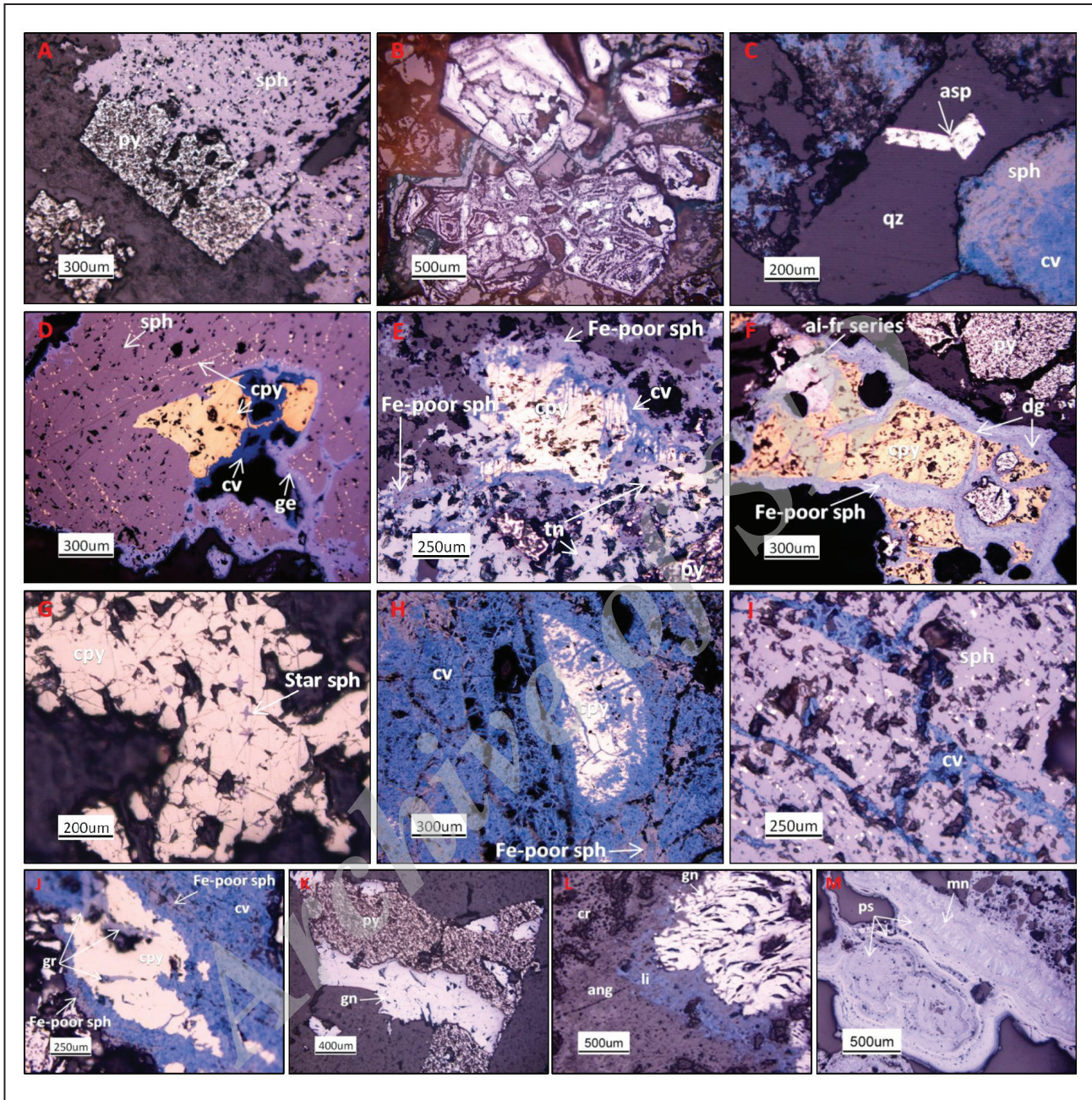


شکل ۱- (A) موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی؛ (B) پهنه‌های ساختاری ایران (تلفیقی از آقائباتی، ۱۳۸۳ و Alavi, 1991) و موقعیت محدوده مورد مطالعه در مرکز بلوک لوت که با مستطیل نشان داده شده است. (C) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده معدنی - اکتشافی ماهور (شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، ۱۳۹۱؛ بازنگری از یونسی و همکاران، ۱۳۹۵ با تغییرات) که موقعیت رگه پلی‌متال روی آن نشان داده شده است.



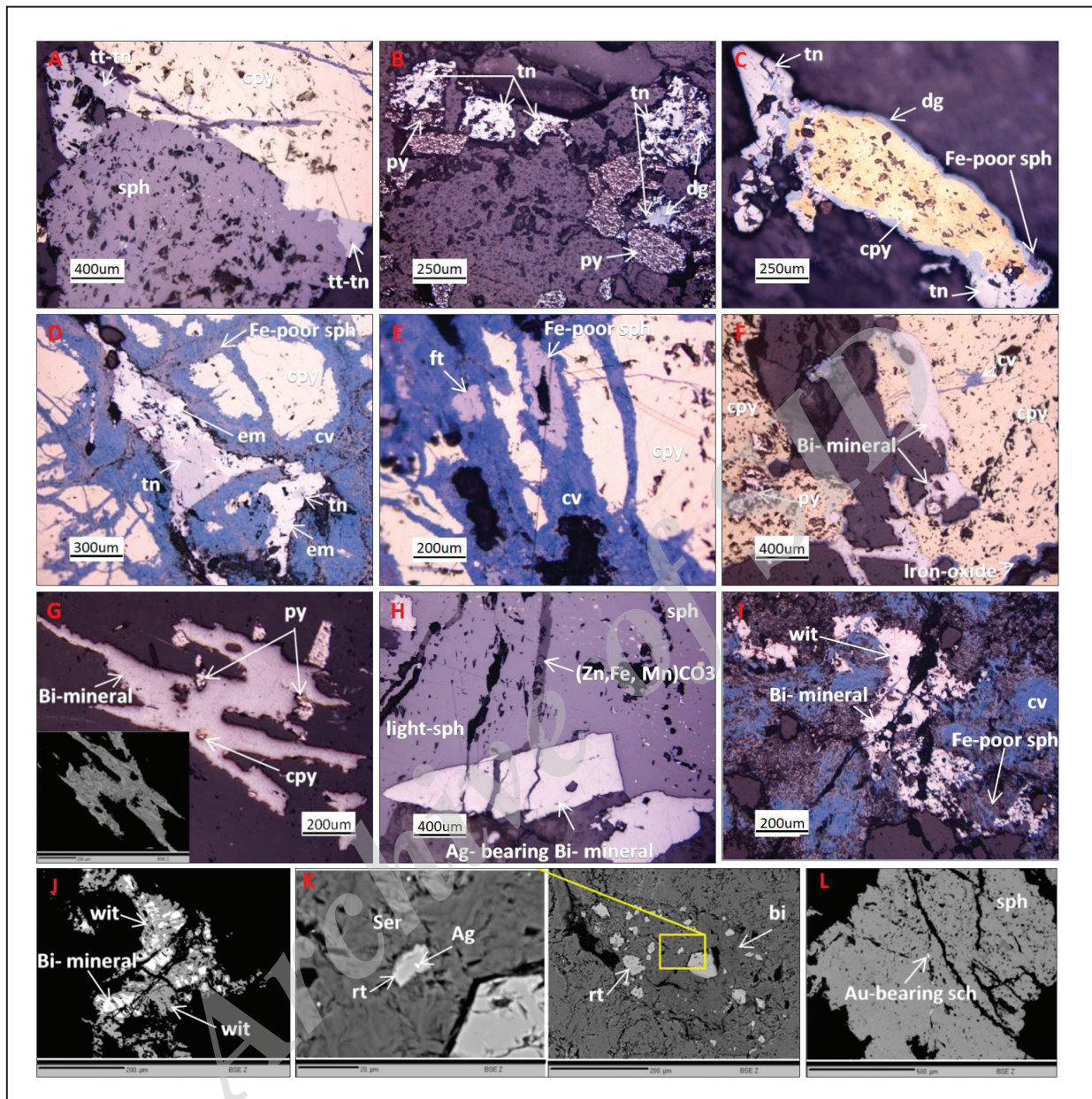
شکل ۲- تصاویر ماکروسکوپی از ساخت کانه‌زایی: (A) کوارتز- پیریت پرکننده فضای میان قطعات برشی در سنگ میزبان اسیدی؛ (B) پیریت توده‌ای که رگچه‌های کوارتزی دارای کانه‌زایی کالکوپیریت آن را قطع کرده‌اند؛ (C) رگچه‌های سولفیدی بیشتر برشی اسفالریت توده‌ای با ۱۰ متر کانی‌سازی؛ (D) رگچه سولفیدی پیریت-اسفالریت-کالکوپیریت-دیژنیت با کانی سولفوسالت بیسموت؛ (E) کانه‌زایی پیریت و کالکوپیریت همراه رگچه کوارتز؛ (F) استوک‌ورک‌های پیریت-کالکوپیریت کولیته شده؛ (G) رگچه‌های اسفالریت تیره کمی کولیته شده که رگچه برشی پیریت اولیه را بریده‌اند؛ (H) رگچه‌های کوارتز دارای کانه‌زایی مس که اسفالریت توده‌ای را قطع کرده‌اند؛ (I) نهشت مستقیم کوارتز در فضای خالی به صورت بلورهای درشت خودشکل تا نیمه‌شکل دار؛ (J) نمایی از بخش اکسیدان در کانسار پلی‌متال ماهور با نمونه دستی از کربنات‌های مس در گوشه سمت راست آن؛ (K و L) سنگ میزبان داسیتی برشی شده با دگرسانی سریستی تورمالین دار و میزبان کانه‌زایی سرب و منگنز که در گوشه سمت راست نمونه دستی آنها دیده می‌شود.

qz: کوارتز؛ py: پیریت؛ cpy: کالکوپیریت؛ sph: اسفالریت؛ dg: دیژنیت؛ cv: کولیت؛ gn: گالن؛ cr: سروزیت؛ li: لیناریت؛ Mn: منگنز.



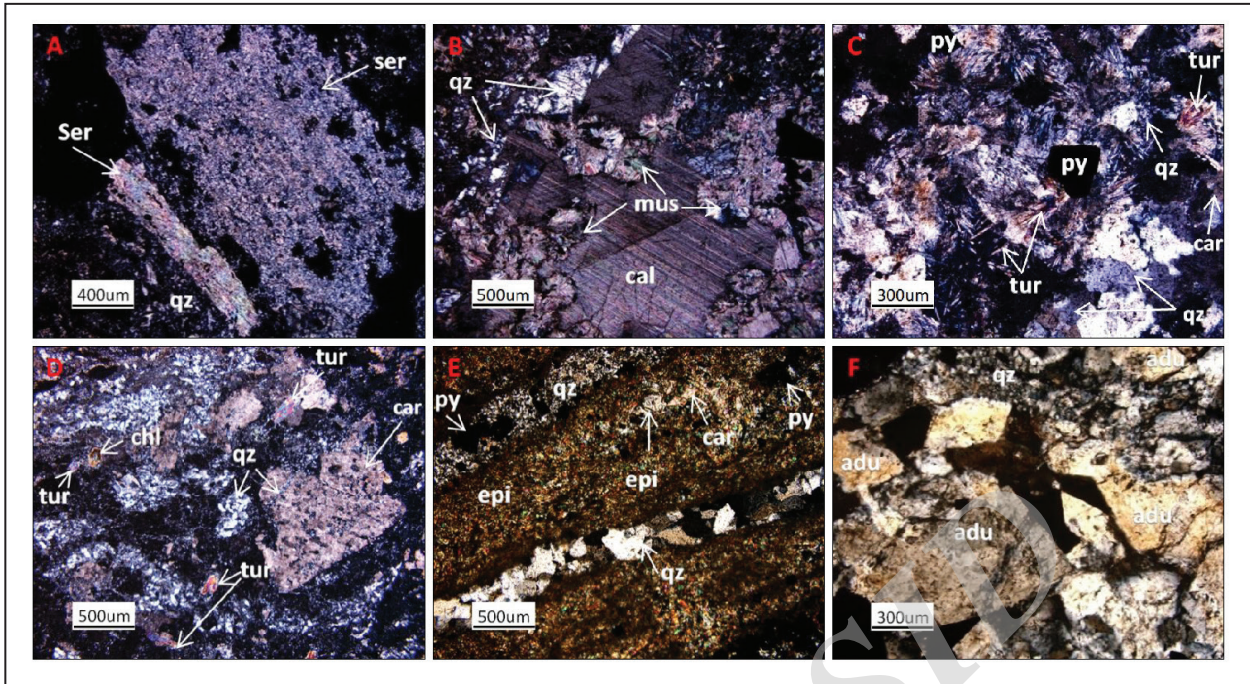
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی کانه‌زایی سولفیدی ماهور در نور بازتابی: (A) اسفالریت آهن‌دار تیره در حال جانشینی پیریت اولیه در رگچه کانه‌دار؛ (B) شکل‌های دروغین پیریت به علت جانشینی کامل پیریت توسط گوتیت و ژاروسیت؛ (C) آرسنوپیریت خودشکل؛ (D) نمایی از کانی کالکوپیریت درون اسفالریت‌های آهن‌دار به صورت پراکنده و در جهت صفحات بلورشناسی (بیماری کالکوپیریت، chalcopyrite disease) که در آن بافت جانشینی ساده کالکوپیریت در حاشیه اسفالریت نیز دیده می‌شود؛ اسفالریت از حاشیه در حال گیریتی (geerite) شدن است؛ (E و F) کانی اسفالریت فقیر از آهن که به صورت حاشیه نازکی در پیرامون و درون شکستگی‌های کالکوپیریت و تنانیت تشکیل شده و هر سه کانی توسط دیژنیت و یا کوولیت جانشین شده‌اند؛ (G) تصویری از ستاره‌های اسفالریت در کالکوپیریت (star sphalerite)؛ (H) تشکیل کوولیت تیغه‌ای به صورت بخشی (Residual texture) و کامل به خرج کالکوپیریت؛ (I) رگچه‌هایی از کوولیت ماکل‌دار که اسفالریت آهن‌دار را قطع کرده‌اند؛ (J) گرینوکیست درون کالکوپیریت و اسفالریت؛ (K) گالن نقره‌دار در حال جانشین کردن پیریت؛ (L) گالن در رگه سرب که تحت تأثیر فرایندهای برونزاد به لیناریت، آنگلیزیت و سروزیت تبدیل شده است؛ (M) بافت کلوفرمی کانی‌های منگنز در رگه منگنز.

qz: کوآرتز؛ py: پیریت؛ asp: آرسنوپیریت؛ cpy: کالکوپیریت؛ sph: اسفالریت؛ gn: گالن؛ dg: دیژنیت؛ cv: کوولیت؛ ge: گیریت؛ gr: گرینوکیست؛ ang: آنگلیزیت؛ cr: سروزیت؛ li: لیناریت؛ mn: منگانیت؛ ps: پسیلوملان.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی و BSE کانی‌های سولفوسالتی و نقره و طلا در کانسار ماهور: (A) جانشینی تتراهدريت- تنانیت در حاشیه کالکوپیریت و اسفالریت آهن‌دار؛ (B و C) تنانیت به صورت بخشی و یا کامل جانشین پیریت و کالکوپیریت شده و خود کمی دیزیتی شده است؛ (D) تنانیت عاری از نقره که جانشین امپلسیت شده است؛ (E) فامانیت کولیتی شده در شکستگی‌های اسفالریت فقیر از آهن کولیتی شده؛ (F و G) سولفوسالت‌های بیسموت در حال جانشین کردن و یا قطع کالکوپیریت و پیریت؛ تصویر BSE نشانگر محلول جامد یا درهم‌شدی میان سولفوسالت‌های بیسموت در گوشه چپ تصویر (G) جانشینی شده است؛ (H) سولفوسالت بیسموت- سرب نقره‌دار که اسفالریت آهن‌دار را جانشین و یا قطع کرده است و رگچه‌های کربنات روی- آهن منگنزدار (اسمیت‌زونیت) هر دو کانی اسفالریت آهن‌دار و سولفوسالت بیسموت را قطع کرده‌اند؛ (I و J) کولیتی شدن سولفوسالت‌های بیسموت در بخش‌های به شدت کولیتی شده که در تصویر BSE آن کانی ویتچینیت (Cu_3BiS_3) آشکارا در حاشیه و شکستگی‌های آن دیده می‌شود؛ (K) تصویر BSE نقره خالص در روتیل درون بیوتیت سریستی شده؛ (L) تصویر BSE شیلیت طلا در شکستگی‌های اسفالریت بیمار.

tt: تتراهدريت؛ tn: تنانیت؛ fa: فامانیت؛ py: پیریت؛ cpy: کالکوپیریت؛ sph: اسفالریت؛ dg: دیزیت؛ cv: کولیت؛ em: امپلسیت؛ wit: ویتچینیت؛ ser: سریست؛ rt: روتیل؛ bi: بیوتیت؛ sch: شیلیت.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی (در نور عبوری پلاریزه) از دگرسانی‌های گرمایی در محدوده ماهور: (A) سریستی شدن کامل پلاژیوکلاز، بیوتیتی که به سریست درشت‌دانه (مسکوویت) تبدیل شده و کوارتز ثانویه در دگرسانی سریستی؛ (B) رگچه کلسیت-مسکوویت-کوارتز مربوط به دگرسانی سریستی؛ (C) دگرسانی سریستی با مجموعه کوارتز-تورمالین منشوری-پیریت افشان؛ (D) دگرسانی سریستی تورمالین‌دار همراه با کربنات؛ (E) دگرسانی اپیدوتی با رگچه‌های کوارتز در مجاورت بلافضل رگچه‌های بسیار کوچک پیریت-کالکوپیریت در ژرفای ۲۳۳ متری از سطح حاضر؛ (F) دگرسانی کوارتز-آدولاریا.
ser: سریست؛ mus: مسکوویت؛ qz: کوارتز؛ cal: کلسیت؛ car: کربنات؛ tur: تورمالین؛ py: پیریت؛ chl: کلریت؛ epi: اپیدوت؛ adu: آدولاریا.

جدول ۱- توالی پاراژنزی کانی‌ها و دگرسانی‌ها در کانسار پلی‌متال ماهور.

Paragenetic stages	Before main stage	Cordilleran Poly Metal Lode				Supergene
		Main stage			Late stage	
		Quartz-pyrite stage	Zn stage	Cu-Bi-Ag-Zn-Pb stage		
silicification	---	---	---	---	---	
propylitic	---	---	---	---	---	
sericitic	---	---	---	---	---	
argillic	---	---	---	---	---	
adularia	---	---	---	---	---	
advanced argillic	---	---	---	---	---	
tourmaline	---	---	---	---	---	
disseminated pyrite	---	---	---	---	---	
quartz vein-veinlets	---	---	---	---	---	
pyrite vein- veinlets	---	---	---	---	---	
calcite vein- veinlets	---	---	---	---	---	
Fe-bearing sphalerite	---	---	---	---	---	
Fe-poor sphalerite	---	---	---	---	---	
greenokite	---	---	---	---	---	
galena	---	---	---	---	---	
chalcopryrite	---	---	---	---	---	
arsenopyrite	---	---	---	---	---	
Bi sulfosalts	---	---	---	---	---	
wittichenite	---	---	---	---	---	
Tennantite	---	---	---	---	---	
tetrahedrite-tennantite	---	---	---	---	---	
Famathinite	---	---	---	---	---	
Au- bearing W minerals	---	---	---	---	---	
covellite	---	---	---	---	---	
digenite	---	---	---	---	---	
chalcocite	---	---	---	---	---	
Barite	---	---	---	---	---	
gypsum	---	---	---	---	---	
hematite	---	---	---	---	---	
goetite	---	---	---	---	---	
jarosite and natro jarosite	---	---	---	---	---	
alunite and natro alunite	---	---	---	---	---	
hawleite	---	---	---	---	---	
malachite, azurite and ...	---	---	---	---	---	
atachamite and paratacamite	---	---	---	---	---	
secondary Zn- minerals	---	---	---	---	---	
secondary Pb- minerals	---	---	---	---	---	

کتابنگاری

- آقاباتی، س. ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- اسفرم، م.، ۱۳۹۰- ژئوشیمی و توالی پارائزنی کانی‌های موجود در کانسار پلی‌متال ماهور، غرب نهندان (شرق ایران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (چکیده)، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- امامی، م. ه.، ۱۳۷۹- ماگماتیسم در ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۷۱، ۶۲۲ ص.
- بومری، م.، بیابانگرد، ح.، ناکاشیما، ک. و اسفرم، م.، ۱۳۹۲- پیدایش و شیمی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی برون‌زاد در کانسار پلی‌متال ماهور، غرب نهندان، پترولوژی، سال چهاردهم، ص. ۱۷ تا ۳۰.
- شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، ۱۳۹۱- گزارش نهایی اکتشاف در ناحیه امیدبخش ماهور، استان خراسان جنوبی.
- مؤید، م.، ۱۳۸۰- بررسی‌های پترولوژیکی سنگهای نوار ولکانو-پلوتونیک ترشیری البرزغری-آذربایجان با نگرشی ویژه بر منطقه هشتجین، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی، ۳۲۸ ص.
- میرزایی راینی، ر.، احمدی، ع. و میرزاد، ح.، ۱۳۹۱- بررسی کانی‌شناسی و شاره‌های درگیر در کانسار چندفلزی ماهور، شرق بلوک لوت، ایران مرکزی، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیستم، شماره ۲، ص. ۳۰۷ تا ۳۱۸.
- میری بیدختی، ر.، ۱۳۹۴- کانی‌سازی، دگرسانی، پترولوژی و سن سنجی توده‌های نفوذی شمال غرب- غرب ده‌سلم، رساله دکترا، دانشگاه فردوسی مشهد.
- یوسف‌زاده م. ح.، ۱۳۸۸- پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی ترشیری منطقه بیرجند - خوسف با نگرشی ویژه بر آنکلاوهای موجود در آن، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۸۶ ص.
- یونسی، س.، حسین‌زاده، م. ر.، مؤید، م. و مقصودی، ع.، ۱۳۹۵- بررسی زمین‌شناسی، پترولوژی و پتروژنز سنگ‌های آذرین محدوده معدنی- اکتشافی ماهور، باختر ده‌سلم، با نگرشی بر جایگاه تکنونوماگمایی لوت، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور، ص. ۱۷۹ تا ۱۹۸.

References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin 103: 983-992.
- Arribas, A. Jr., Cunningham, O., Rytuba, J., Rye, O., Kelly, W., Podwysoccki, 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.
- Augustithis, S. S., 1995- Atlas of the Textural Patterns of Ore Minerals and Metallogenic Processes. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 659pp.
- Barton, P. B. Jr., 1978- Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan. Mining Geology 28: 293-300.
- Barton, P. B. Jr. and Bethke, P. M., 1987- Chalcopyrite disease in sphalerite: pathology and epidemiology. American Mineralogist 72: 451–467.
- Bartos, P. J., 1989- Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationship to underlying porphyry copper deposits. Economic Geology 84: 1671-1683.
- Baumgartner, R., Fontboté, L. and Vennemann, T., 2008- Mineral zoning and geochemistry of epithermal polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi mineralization at Cerro de Pasco, Peru. Economic Geology 103: 493-537.
- Bendezú, R., Page, L., Spikings, R., Pecskey, Z. and Fontboté, L., 2008- New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alunite ages from the Colquijirca District, Peru: Evidence of long period of magmatic SO_2 degassing during formation of epithermal Au-Ag and Cordilleran polymetallic ores. Mineralium Deposita 43: 777-789.
- Bente, K. and Doering, Th., 1993- Solid-state diffusion in sphalerites: an experimental verification of the “chalcopyrite disease”. European Journal Mineralogy 5: 465–478.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18: 210–265.
- Berberian, M., 1977- Against the Rigidity of the Lut Block, a seismotectonic discussion, Geology Survey of Iran, Report No. 40
- Browne, P. R. L., and Ellis, A. J., 1970- The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry. American Journal of Science 269: 97-215.
- Camp, V. E. and Griffis, R. J., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the sistan suture zone, eastern Iran. Lithos 15(3): 221-239.
- Chang, L. L. Y., Daqing, W. U. and Knowles, C. R., 1988- Phase relations in the system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{S}-\text{PbS}-\text{Bi}_2\text{S}_3$. Economic Geology 83: 405-418.
- Cooke, D. R., Mcphail, D. C., and Bloom, M. S., 1996- Epithermal gold mineralization, Acupan, Baguio district, Philippines; geology, mineralization, alteration, and the thermochemical environment of ore deposition. Economic Geology 91: 243-272.
- Craig, J. R. and Vaughan, D. J., 1994- Ore microscopy and ore petrography, A Wiley- Interscience Publication, New York, 433p.
- Einaudi, M. T., 1977- Environment of ore deposition at Cerro de Pasco, Peru, Economic Geology 72: 893–924.
- Einaudi, M. T., 1982- Description of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America. In: Titley SR (ed.), Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America. University of Arizona Press, Tucson: 139–184.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W. and Inan, E. E., 2003- Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transition from porphyry to epithermal environments, Society of Economic Geologists, Special Publication 10: 285-313.
- Eldridge, C. S., Bourcier, W. L., Ohmoto, H. and Barnes H. L., 1988- Hydrothermal inoculation and incubation of the chalcopyrite disease in sphalerite. Economic Geology 83: 978–989.
- Fontboté, L. and Bendezú, R., 2009- Cordilleran or Butte-type veins and replacement bodies as a deposit class in porphyry systems. In: Williams et al., P.J. (ed) Proceedings of the 10th Biennial Society of Geology Applied to Ore Deposits Meeting, Townsville, Australia:

- 521-523.
- Foord, E. E. and Shawe, D. R., 1988- Coexisting galena PbSs and sulfosalts evidence for multiple episodes of mineralization in the Round Mountain and Manharan Gold Districts in Nevada. *Canadian Mineralogist* 26: 355–376.
- Guilbert, J. M. and Park, C. F. Jr., 1986- The geology of ore deposits. W. H. Freeman and Company, New York, 985 p.
- Hutchison, M. N. and Scott, S. D., 1981- Sphalerite geobarometry in the Cu–Fe–Zn–S system. *Economic Geology* 76: 143–153.
- Ixer, R. A. and Patrick, R. A. D., 2003- Copper-arsenic ores and Bronze Age mining and metallurgy with special reference to the British Isles. In P.T. Craddock, and J. Lang (eds), *Mining and Metal Production through the Ages*. London: British Museum, 9-21.
- Kojima, S. and Sugaki A., 1984- Phase relations in the central portion of the Cu–Fe–Zn–S system between 800 and 500 °C. *Mineralogica Journal* 12: 15–28.
- Kojima, S. and Sugaki, A., 1985- Phase relations in the Cu–Fe–Zn–S system between 500 j and 300 °C under hydrothermal conditions. *Economic Geology* 80: 158–171.
- Kretschmar, U. and Scott, S. D., 1976- Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe –As –S and their application. *Canadian Mineralogist* 14: 364 –386.
- Lepetit, P., Bente, K., Doering, T. and Luckhaus, S., 2003- Crystal chemistry of Fe-containing sphalerites, *Physics and Chemistry of Minerals* 30(4): 185–191.
- Lewis, M. H., 1997- Characterization of hypogene covellite assemblages at the Chuquicamata porphyry copper deposit, Chile, Section 4500N. MSc thesis, Halifax, NS, Dalhousie University, 223p.
- Lindgren, W., 1933- Mineral deposits. 4th ed., McGraw-Hill, New York, 930p.
- Lusk, J. and Calder, B. O. E., 2004- The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu–Fe–Zn–S, Fe–Zn–S and Cu–Fe–S systems at 1 bar and temperatures between 250 and 535 °C, *Chemical Geology* 203: 319–345.
- Marignac, Ch., 1989- Sphalerite stars in chalcopyrite: are they always the result of an unmixing process? *Mineralium Deposita* 24: 82-176.
- Meyer, C., Shea, E. P. and Goddard, C. C., Jr., 1968- Ore deposits at Butte, Montana, In Ridge, J.D., (ed.), *Ore deposits of the United States 1933-1967, 2: New York, American Institute of of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1363-1416.*
- Morimoto, N. and Koto, K., 1970- Phase relations in the Cu-S system at low temperatures: stability of anilite, *American Mineralogist* 55: 106-117.
- Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., Chu ,C. H., Lee, H. Y. and Lo, C. H., 2013- Eocene–Oligocene post-collisional magmatism in the Lut–Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos* 180- 181: 234-25.
- Park, C. F. and MaC Diarmid, R. A., 1975- Ore deposits, Freeman and Company. San Francisco, 530 p.
- Sawkins, F. J., 1972- Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *Journal Geology* 80: 377–396.
- Scott, S. D., 1974- Experimental methods in sulfide synthesis. In: *Sulfide Mineralogy: P.H. Ribbe (eds.) Reviews in Mineralogy 1. Washington, DC: Mineralogical Society of America Pp.S-1 to S-38*
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Jr., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A. and Barton, M. D., 2005- porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. 251-298.
- Sillitoe, R. H., 2000- Gold-Rich Porphyry Deposits: Descriptive and Genetic Models and Their Role in Exploration and Discovery. *SEG reviews*, 13: 315-345.
- Sillitoe, R. H., 2005- Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits, *Economic Geology 100th Anniversary: 723-768.*
- Simmons, S. F., White, N. C. and John, D. A., 2005- Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology 100th Anniversary: 485-522.*
- Simpson, M. P., Mauk, J. and Simmons, S. F., 2001- Hydrothermal alteration and paleohydrology of the Golden Cross epithermal deposit, Waihi, New Zealand, *Economic Geology* 96: 773-796.
- Stöcklin, J., Eftekharneshad, J. and Hushmandzadeh, A., 1972- Central Lut reconnaissance East Iran, Geological Survey of Iran, Report No.22.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J. and Camp, V. E., 1983- The sistan suture zone of eastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 94: 134-156.
- Topa, D., Makovicky, E. and Paar, W. H., 2002- Composition ranges and exsolution pairs for the members of the bismuthinite-aikinite series from felbertal, Austria. *Canadian Mineralogist* 40: 849-869.
- Vaughan, D. and Craig, J., 1997- Sulfide ore mineral stabilities, morphologies and intergrowth textures, In: Barnes, H.L., (eds.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd edition. New York, Wiley: 367–434.
- Warren, I., Simmons, S. F. and Mauk, J. L., 2007- Whole- rock geochemical techniques for evaluating hydrothermal alteration, mass changes, and compositional with epithermal Au-Ag mineralization. *Economic Geology* 102: 923-948.
- White, N. C. and Hedenquist, J. W., 1995- Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologists, Newsletter* 23: 9-13.
- Wiggins, L. B. and Craig, J. R., 1980- Reconnaissance of the Cu–Fe–Zn–S system: sphalerite phase relationships. *Economic Geology* 75: 742–751.

Mineralogy of Mahour Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) deposit, west of Dehsalm: implications for genesis and mineralization type

S. Younesi^{1*}, M. R. Hosseinzadeh² and M. Moayyed³

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

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

³Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2016 October 02

Accepted: 2017 March 13

Abstract

The Mahour Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) deposit located in central Lut Block, formed in an intensely crushed fault zone, dominantly in dacite-rhyodacite volcanic-subvolcanic unit of Late Eocene- Oligocene age. Mineralization occurred as veins, veinlets and breccia massive sulfide and/or as quartz, quartz-carbonate or quartz-muscovite (sericite)- carbonate vein-veinlets. Apart from negligible dark sphalerite, only fine-grained pyrite is observed as disseminated phase within the host rocks. Hypogene mineralization is complex and the main minerals, in order of abundance, are pyrite, Fe-bearing sphalerite and chalcopyrite, with subordinate galena, Cu-sulfosalts, Bi-sulfosalts, Fe-poor sphalerite, and a few greenokite, arsenopyrite, digenite and probably covellite. The considerable amounts of Ag exist in lattice of some sulfosalt and sulfide minerals, as well as locally negligible Au-bearing W minerals. Mineralization is dominantly associated with sericitic, intermediate argillic and propylitic alterations and rarely with advanced argillic and quartz-adularia that formed at three main stages including: 1- quartz-pyrite, 2- Fe-bearing sphalerite, and 3- chalcopyrite stage with sulfosalts and minor high sulfidation minerals. Mineralization occurred after silicification and disseminated pyritization that comprise tourmaline (sericitic alteration prior to mineralization) and then weathering process affected it. According to very low dissolution of Cu in Cu-Zn-S equilibrium system, high density of chalcopyrite inclusions in Fe-bearing dark sphalerites in Mahour reveals replacement origin of chalcopyrite disease texture. This texture and mineralogy (ore and alteration) indicate formation of Mahour polymetal mineralization at temperature range of 200-400°C and from an intermediate sulfidation state and low acidity fluid which was neutralized to alkaline by interaction with wall rock. Although, a minor evidence for evolution to high sulfidation state, more acidic and oxidation conditions is recorded in Cu-rich zone. Mineralogical features of the Mahour deposit indicate predominantly magmatic origin for mineralizing hydrothermal fluid, and in combination with mineralization structure, association with calc-alkaline to shoshonitic igneous rocks and tectonic setting of host rocks, are very similar to cordilleran style polymetal lode deposits.

Keywords: Mineralogy, Microprob, Chalcopyrite disease, Sulfosalt, Intermediate to high sulfidation, Cordilleran Polymetal Lode, Mahour, Lut Block.

For Persian Version see pages 295 to 308

*Corresponding author: S. Younesi; E-mail: Sim_younesi@Yahoo.com