

کانسار مس معدن بزرگ با میزبان آتشفشانی، نمونه‌ای از کانسارهای مس نوع مانتو، خاور شاهرود

لیلا صالحی^{۱*}، ایرج رسا^۲، سعید علیرضایی^۳ و احمد کاظمی مهرنیا^۴

^۱دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۴دکتر، شرکت مهندسی مشاور پارسی کان کاو، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۳۱

چکیده

کانسار مس معدن بزرگ در ۱۳۰ کیلومتری خاور شاهرود و در محدوده معدنی عباس‌آباد قرار دارد. این محدوده، شامل کمربندی از سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری، همراه با میان‌لایه‌های رسوبی با راستای شمال‌خاور-جنوب‌باختر، در برگیرنده ۸ کانسار مس است. سنگ‌های آتشفشانی این محدوده، به‌طور چیره شامل تراکی‌آندزیت، تراکی‌آندزیت-بازالت و تراکی‌بازالت به سن ائوسن است. این سنگ‌ها، ماهیت شوشونیتی تا پتاسیم بالا دارند و از دید جایگاه زمین‌ساختی در موقعیت کمان حاشیه فعال قاره‌ای جای می‌گیرند. سنگ درونگیر این کانسار، سنگ‌های تراکی‌آندزیت با بافت پورفیرییک تا مگاپورفیرییک، گلوپورفیرییک و بادامکی است. بر پایه مشاهدات صحرایی، مطالعات میکروسکوپی، طیف‌سنجی رامان و XRD، دو نوع دگرسانی ناحیه‌ای و محلی در واحدهای آتشفشانی دیده می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک شاخص دگرسانی ناحیه‌ای است و در همه سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری دیده می‌شود. دگرسانی محلی، مرتبط با کانه‌زایی مس است و با دگرسانی‌های کلسیمی، سیلیسی، سربستی و کلریتی مشخص می‌شود. کانه‌زایی مس، ساده و چینه‌کران است. بافت کانسنگ، دانه پراکنده، داربستی و رگه-رگچه‌ای است و کانی‌سازی به‌صورت پر کردن فضاهای خالی و همین‌طور جانمایی صورت گرفته است. بر پایه مطالعات میکروسکوپی و داده‌های EPMA، کانی‌های گروه کالکوسیت شامل کالکوسیت، ژورلثیت، آنیلیت، دیژنیت و کولیت هستند، کانه‌های اصلی این کانسار به‌شمار می‌آیند که با بورنیت و پیریت همراهی می‌شوند. کولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و گوتیت، کانی‌های ثانویه و کوارتز، زئولیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کالسدونی، کانی‌های غیرفلزی هستند. برای تشکیل این کانسار، دو مرحله گرمایی اولیه و مرحله غنی‌شدگی ثانویه-اکسایش پیشنهاد می‌شود. بر پایه مطالعات میان‌بانه‌های سیال، دمای همگن‌شدگی میان ۹۰ تا ۲۶۸ (با میانگین ۱۷۶) درجه سانتی‌گراد است. دامنه تغییرات شوری میان ۳/۴ تا ۲۲ (با میانگین ۱۳/۲) درصد وزنی نمک طعام به دست آمده است. چگالی سیال میان ۰/۸ تا ۱/۱ است. ژرفای به دام افتادن میان‌بانه‌های سیال در این کانسار کمتر از ۲۰۰ متر و فشار حاکم در طی تشکیل کانسنگ، کمتر از ۵۰ بار بوده است. کانسار معدن بزرگ، بر پایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، بافت و ساخت کانسنگ و داده‌های حاصل از میان‌بانه‌های سیال قابل مقایسه با کانسارهای مس نوع مانتو است که از برخی مجموعه‌های آتشفشانی مزوزوییک و سنوزوییک دنیا گزارش شده است.

کلیدواژه‌ها: مس نوع مانتو، معدن بزرگ، عباس‌آباد، کالکوسیت، آتشفشانی سنوزوییک، میان‌بانه‌های سیال.

*نویسنده مسئول: لیلا صالحی

E-mail: salehi1006@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

کانسار مس معدن بزرگ در ۱۳۰ کیلومتری خاور شاهرود و در محدوده معدنی عباس‌آباد قرار دارد (شکل ۱- الف). این محدوده، در تقسیم‌بندی ساختاری ایران (Alavi, 1991) جزئی از مجموعه ماگمایی شمال‌خاور ایران است (شکل ۱- ب). وجود چند کانسار مس در این محدوده، توان معدنی بالای آن را نشان می‌دهد. این کانسارها دارای سنگ میزبان آتشفشانی تا آذرآواری هستند. اولین اکتشافات سیستماتیک در این محدوده را کارشناسان یوگسلاو و رومانیایی در دهه ۱۹۶۰ انجام داده‌اند (سامانی، ۱۳۸۶). مطالعات پیشین روی این کانسار و کانسارهای مجاور (BRGM Company, 2005؛ سامانی، ۱۳۸۶) بیشتر جنبه اکتشافی و معدنی داشته است. در مورد ماهیت کانسنگ و شرایط تشکیل آن و نوع کانی‌سازی در کانسارهای محدوده معدنی عباس‌آباد، نظرات مختلفی ارائه شده است. از جمله لطفی و نوروزی (۱۳۸۰) این کانسارها را جزو کانسارهای نوع سولفید توده‌ای بشی و علی‌نیا و دهقان‌نژاد (۱۳۸۳) این کانسارها را از نوع رگه‌ای و اپی‌ترمال معرفی کرده‌اند. هدف از این پژوهش، مشخص کردن نوع کانه‌زایی بر پایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و بافت و ساخت، دگرسانی و میان‌بانه‌های سیال است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده معدنی عباس‌آباد با گسترش تقریبی ۱۳۰ کیلومتر مربع در بخش شمالی پهنه ایران مرکزی قرار دارد. این محدوده، شامل کمربندی از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی با راستای شمال‌خاور-جنوب‌باختر و سن ائوسن تا الیگوسن است که به‌طور چیره از گدازه‌های آندزیتی-بازالتی و سنگ‌های آذرآواری، همراه با شیل توفی، ماسه‌سنگ توفی، توف، شیل، سیلت‌سنگ، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌آهک نومولیت‌دار تشکیل شده است (شکل ۲). حد شمالی این کمربندی، به افولیت‌های سبزوار و حد جنوبی آن به دشت کویر می‌رسد. از دید ساختاری، این محدوده، ناودیس با محور خاوری-باختری است که توسط گسل‌های کوچک و بزرگ شکسته شده است. خلعتبری جعفری (۱۳۸۰) شکستگی‌های این ناحیه را به ۳ دسته تقسیم می‌کند؛ الف) شکستگی‌های با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری که به‌طور چیره شامل گسل‌های عادی و یا راستاغز هستند؛ ب) شکستگی‌هایی با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری تا خاوری-باختری با مؤلفه‌های متغیر که گاه گسل‌های دسته نخست را قطع می‌کنند. این شکستگی‌ها از مهم‌ترین روندهای منطقه هستند؛ ج) شکستگی‌های با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری تا شمالی-جنوبی که مهم‌ترین آن گسل کال‌آباد است.

می‌دهد که این واحد، جوان‌تر از سنگ‌های رسوبی یاد شده است (شکل ۳-ب). سنگ درونگیر ماده معدنی به شدت تحت تأثیر شکستگی‌ها، درزه‌ها و گسل‌ها قرار گرفته است و جابه‌جایی‌های محلی دیده می‌شود. در این سنگ، پدیده برشی شدن در ابعاد متغیر دیده می‌شود که با سیمان کوارتز، کلسیت و ماده معدنی همراه است (شکل ۳-پ). بافت این سنگ‌ها، پورفیریک تا مگاپورفیریک، گلوپورفیریک و بادامکی است (شکل‌های ۳-ت، ث، ج). بلورهای درشت پلاژیوکلاز از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر در متن خاکستری تا سبز سنگ یافت می‌شوند. پلاژیوکلاز به همراه کلیئوپروکسن، کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. مگنتیت به عنوان کانی همراه (accessory) وجود دارد، که به صورت بین دانه‌ای و نیز به صورت میانبار در کلیئوپروکسن و پلاژیوکلاز دیده می‌شود. مگنتیت، مارتیتی شده و در اثر این پدیده، تیغه‌های نازک هماتیت ایجاد شده است. کانی‌های ثانویه کلسیت، زئولیت، کوارتز و کالسدوننی حفرات موجود در سنگ را پر کرده و بافت و ساخت بادامکی پدید آورده‌اند (شکل ۳-ج). سنگ‌های درونگیر ماده معدنی به شدت دگرسان شده‌اند و مهم‌ترین کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، زئولیت و پرهینت است.

۶- کانه‌زایی

فرایند کانه‌زایی در همه پیکره سنگ درونگیر آتشفشانی به صورت چینه کران (Stratabound) گسترش دارد. درازای پهنه کانه‌زایی در حدود ۲ کیلومتر و ستبرای آن، از ۱۰ تا بیش از ۳۵ متر متغیر است. بیشترین تمرکز و تجمع رگه‌ها و رگچه‌های مس در مرز میان واحد آتشفشانی تراکی آندزیت (واحد E₇) با واحد رسوبی بالایی (واحد E₈) رخ داده است. از این رو، بیشتر کارهای دیرین استخراجی در این بخش حفر شده است.

۷- کانی‌شناسی، بافت و ساخت کانسنگ

ماده معدنی دارای بافت و ساخت دانه پراکنده، داربستی، رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و جانیشنی است (شکل‌های ۴-الف، ب و پ). ستبرای رگه‌ها و رگچه‌های کالکوسیت بسیار کم است و به ندرت از چند سانتی‌متر بیشتر می‌شود. این کانه، در حفرات سنگ درونگیر، ساخت و بافت پرکننده فضای خالی را نشان می‌دهد. در بیشتر موارد حفرات از خارج به داخل دارای منطقه بندی کالکوسیت+هماتیت، کوارتز+کالسدوننی، پرهینت ± کلسیت است.

کانی‌های اولیه یا درونزاد (هیپوزن) در کانسار معدن بزرگ شامل کانی‌های گروه کالکوسیت، پیریت، بورنیت و هماتیت است. همچنین کانی‌های آرسنوپیریت، کالکوپیریت و گالن به مقدار کم دیده می‌شود. کانی‌های گروه کالکوسیت به عنوان کانی‌های اولیه و اصلی مس دار در این کانسار معرفی می‌شود. این گروه یا سری سولفیدی غنی از مس شامل کالکوسیت (chalcocite)، ژورلئیت (djurleite)، روکسبیت (roxbyite)، دیژنیت (digenite) و آنیلیت (anilite) است (Gablina et al., 2006). کانی‌های غیرفلزی بیشتر شامل کوارتز، زئولیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت، هماتیت و کالسدوننی است.

پس از آنکه کانسنگ در سطح زمین و در معرض پدیده‌های پروژاد (سوپرژن) قرار گرفته است، برخی کانی‌های سازنده کانسنگ ناپایدار و به کانی‌های پایدار در شرایط سطحی تبدیل شده‌اند. این کانی‌های ثانویه به‌طور چیره شامل کوولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و گوتیت است.

بر پایه داده‌های الکترون پروب (EPMA)، حضور عناصر طلا و نقره در بورنیت و گروه کالکوسیت مشهود است (جدول ۱). از سویی در این کانسار، کانی‌های معجزای این عناصر دیده نمی‌شود. در ترکیب شیمیایی کانی‌های گروه کالکوسیت، عناصر Fe، Ag و Au حضور دارند (جدول ۱). در این کانی‌ها میانگین مقدار

یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین کانسارهای این محدوده، معدن بزرگ است که پهنه‌ای با گسترش حدود ۲/۵ کیلومترمربع را شامل می‌شود. کهن‌ترین واحدهای سنگی برونزد یافته در محدوده این کانسار، متعلق به ائوسن میانی است. این واحدها شامل مجموعه‌ای از گدازه‌های تراکی آندزیتی تا تراکی‌بازالتی، سنگ‌های آذرآواری، سنگ‌آهک فسیل‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا هستند (شکل ۲). روی این مجموعه، واحدهای ائوسن-الیگوسن قرار می‌گیرند که خود شامل ماسه‌سنگ، شیل و کنگلومرا هستند. رسوبات کواترنری نیز بخش قابل ملاحظه‌ای از مناطق کم‌ارتفاع و پست را در این محدوده به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲). بالاترین بخش مجموعه آتشفشانی، متشکل از تراکی آندزیت خاکستری با بافت پورفیریک و مگاپورفیریک است. این بخش به عنوان افق معدنی در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که میزبان کانه‌زایی مس است. ستبرای این افق در محدوده کانسار، میان ۱۲ تا ۴۰ متر و بیشترین کانه‌زایی در بخش‌های بالایی و پایینی آن رخ داده است. بیشتر گسل‌های منطقه از نوع امتدادلغز با مؤلفه جزئی شیب‌لغز هستند. این گسل‌ها، واحدهای سنگی یاد شده را قطع و گاه جابه‌جایی‌های در خور توجهی ایجاد کرده‌اند.

۳- روش پژوهش

این پژوهش بر پایه مشاهدات و برداشت‌های میدانی، بازنگری نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ عباس‌آباد (خلعبری جعفری، ۱۳۸۰) و نمونه‌برداری برای مطالعات آزمایشگاهی گوناگون استوار است. برای مطالعات سنگ‌نگاری و شناسایی مجموعه‌های دگرسانی، ۱۲۰ نمونه (۵۰ نمونه از مغزه‌های اکتشافی و ۷۰ نمونه سطحی) از سنگ‌های آتشفشانی همراه با کانه‌زایی و بدون کانه‌زایی مطالعه شد. برای شناسایی کانی‌ها و پاراژنز آنها، ۷۰ نمونه (۵۰ نمونه از مغزه‌های اکتشافی و ۲۰ نمونه سطحی) انتخاب شد. برای شناسایی کانی‌ها، افزون بر سنگ‌نگاری، از فناوری‌های XRD در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و طیف‌سنجی رامان (Raman Spectroscopy) در پژوهشکده لیزر دانشگاه شهید بهشتی استفاده شد. همچنین برای تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌ها، از روش ریز تجزیه‌ای الکترون پروب (Electron Probe Microanalysis; EPMA) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران استفاده شد. تعداد نقاط بررسی شده در این روش ۶۵ نقطه است. برای آگاهی از ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سیال‌های کانه‌ساز، ۱۴ نمونه دوبرصیقل تهیه و برای میانبارهای سیال مطالعه شد. این مطالعات با استفاده از میکروسکوپ ZEISS صفحه THMS600 مدل Linkam در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران صورت گرفت. دامنه دمایی این دستگاه ۱۹۶- تا +۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

۴- زمین‌شیمی و خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی محدوده عباس‌آباد

بر پایه مطالعات پیشین (صالحی و همکاران، ۱۳۹۳)، سنگ‌های آتشفشانی کمربند آتشفشانی-رسوبی عباس‌آباد در محدوده آندزیت، تراکی آندزیت، تراکی آندزیت-بازالت، تراکی‌بازالت و آلکالی‌بازالت قرار می‌گیرند. سرشت ماگمایی این سنگ‌ها، شوشونیتی و اولتراپتاسیک است و ویژگی‌های سنگ‌های آتشفشانی کمان‌های قاره‌ای مرتبط با فرورانش را نشان می‌دهند (صالحی و همکاران، ۱۳۹۳).

۵- ویژگی‌های سنگ درونگیر

سنگ درونگیر در کانسار مس معدن بزرگ، واحد آتشفشانی (E₇) با ترکیب تراکی آندزیت است (شکل‌های ۲ و ۳-الف). راستای این واحد در محدوده کانسار شمال خاوری-جنوب باختری و شیب عمومی آن ۴۵ درجه به سوی جنوب خاور است؛ ستبرای این واحد از ۱۰ تا ۷۰ متر تغییر می‌کند. وجود بیگانه‌سنگ‌هایی از ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در اندازه‌های مختلف در این واحد آتشفشانی، نشان

کربناتی مس همچون مالاکیت و آزوریت از اکسایش کانی‌های سولفیدی مس تشکیل می‌شوند. همچنین، با افزایش فرایند سیلیسی شدن در بخش خاوری کانسار، کانی کیزوکولا به وجود می‌آید. هماتیت و گوتیت در این مرحله، از دگرسانی کانی‌های آهن دار ایجاد شده‌اند و گسترش بالایی دارد (شکل ۷).

۸- انواع دگرسانی

بر پایه مطالعات میکروسکوپی، نتایج تجزیه XRD و طیف‌سنجی رامان (جدول ۲)، در محدوده معدنی عباس‌آباد، دو نوع دگرسانی گرمایی با ابعاد ناحیه‌ای و محلی دیده می‌شود. دگرسانی ناحیه‌ای با کانی‌های اپیدوت، کلریت، کلسیت، کوارتز و آلپیت مشخص می‌شود که شاخص دگرسانی پروپیلیتیک است (Kojima et al., 2003). کانی‌های دگرسانی بیشتر به صورت جانیشنی در کانی‌های اصلی سنگ‌های آتشفشانی و یا پرکننده حفرات و به میزان کمتر به صورت رگچه‌ای دیده می‌شوند. با هجوم سیال‌های گرمایی دارای کلسیم به سنگ‌های آتشفشانی، کانی‌های کلینوپیروکسن به آمفیبول‌های کلسیم‌دار ترمولیت-اکتینولیت تبدیل می‌شوند و پدیده اورالیتی شدن را ایجاد می‌کنند. در طی دگرسانی گرمایی و افزوده شدن آب به پلاژیوکلاز کلسیم‌دار، این کانی به اپیدوت، زوئیزیت-کلینوزوئیزیت، کلسیت، سرسیت و پرهینت تبدیل می‌شود (شکل ۸) که مجموعه سوسوریت را تشکیل می‌دهند (Gupta, 2007).

دگرسانی دوم، دگرسانی با گسترش محلی و مرتبط با کانه‌زایی مس است و تنها در سنگ‌های آتشفشانی کانه‌دار، دیده می‌شود و بیشتر با دگرسانی‌های کلسیمی، سیلیسی، سرسیتی، کلریتی، زئولیتی و هماتیته مشخص می‌شود (شکل ۸). با ورود محلول‌های گرمایی، زمینه برای تغییرات شیمیایی-کانی‌شناسی و ایجاد دگرسانی محلی آماده می‌شود. عوامل زمین‌شناسی کنترل‌کننده این دگرسانی، ساختمان‌های اولیه و ثانویه مفید در سنگ درونگیر و واکنش‌پذیری این سنگ‌هاست. وجود حفرات بادامکی فراوان، درزه، شکستگی‌ها و گسل‌خوردگی‌های بسیار در ابعاد متغیر در سنگ درونگیر، زمینه را برای نفوذپذیری و افزایش واکنش‌پذیری این سنگ‌ها بالا برده است.

دگرسانی هماتیته رابطه نزدیکی با کانه‌زایی مس دارد. این دگرسانی با سیال‌های اکسیدکننده همراه است و در بیشتر موارد سبب تشکیل کانی‌هایی با نسبت Fe^{3+}/Fe^{2+} بالا به ویژه هماتیت می‌شود که با فلدسپار پتاسیم، سرسیت، کلریت و اپیدوت همراه است (Robb, 2005). در نتیجه هماتیت‌های تیغه‌ای همراه با ته‌نشست کانی‌های مس‌دار و به صورت اولیه تشکیل شده‌اند. افزون بر دگرسانی هماتیته، دگرسانی کلسیمی و سیلیسی نیز رابطه تنگاتنگی با کانه‌زایی دارند و کانی‌های مس‌دار همراه با کلسیت، کوارتز و کالسدونی دیده می‌شوند. شدت دگرسانی‌های محلی در سنگ‌های درونگیر با فاصله گرفتن از پهنه کانه‌دار کم می‌شود. دگرسانی‌های یاد شده، از شکستگی‌ها، درزه‌ها و سامانه‌های گسلی موجود پیروی می‌کنند. کانی‌های دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی به صورت جانیشنی، پرکننده حفرات، رگچه‌ای و رگه‌ای دیده می‌شوند.

۹- میانبارهای سیال

به منظور شناخت ماهیت فیزیکو-شیمیایی سیال کانه‌ساز و بررسی تغییرات دمایی و شیمی آن در طی تشکیل کانسار، از رگه‌های کوارتز و کلسیت همزمان با کانه‌ها، مقاطع دوبرصیقل تهیه شد. از این میان، مطالعه ریزدماسنجی رگه‌های کوارتز به دلیل ریز بودن بلورهای کوارتز و آمیختگی به اکسیدهای آهن میسر نشد و نتایج حاصل، تنها از مطالعه کانی کلسیت به دست آمده است.

بیشتر میانبارهای مطالعه شده در کانی کلسیت، بیضوی، کروی، دوکی و میله‌ای یا کشیده هستند (شکل ۹) و اندازه آنها از ۵ تا ۲۶ میکرون متغیر است. بیشتر این

آهن (wt%) ۰/۶۹، نقره (wt%) ۰/۴۴ و طلا (wt%) ۰/۰۴ است (شکل ۵-الف). همچنین عناصر نقره و طلا در کانی بورنیت به ترتیب دارای میانگین (wt%) ۰/۰۴ و (wt%) ۰/۰۹۳ است (شکل ۵-ب). عیار محاسبه شده مس در کانسنگ معدن بزرگ به طور متوسط در حدود ۰/۷٪ و عیار نقره در این کانسنگ زیر ۱ ppm است (شرکت مهندسی مشاور پارسی کان‌کاو، ۱۳۹۲).

بلورهای وجه‌دار پیریت، منظره‌ای متخلخل با کناره‌های ستبر و تیره دارند و در اثر دگرسانی به هماتیت و گوتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۴-الف). برشی شدن پیریت و نفوذ سیال‌های مس‌دار در آن و تشکیل کانی‌های گروه کالکوسیت و بورنیت، از دیگر پدیده‌های دیده شده در این کانسار هستند (شکل‌های ۶-الف، ب، پ). افزون بر این ویژگی‌ها، حضور بافت میرمیکیتی که در نتیجه هم‌شدی کالکوسیت و بورنیت ایجاد شده است، در این کانسار دیده می‌شود (شکل ۶-ب). از کانی‌های سولفیدی غنی از مس، کالکوسیت و دیژنیت (شکل ۶-ت) با بیشترین فراوانی و کانی‌های ژورلثیت (شکل ۶-ث) و آلپیت (شکل ۶-پ) به میزان کم حضور دارند. ژورلثیت با فرمول Cu_3S_{16} و آلپیت با فرمول Cu_7S_8 در مرحله پروژاد، جانیشنی کالکوسیت می‌شوند (Kojima et al., 2003). رنگ ژورلثیت، در نور بازتابی، آبی و تیره‌تر از کالکوسیت است و معمولاً به صورت وصله‌ای (patchy) در کالکوسیت ظاهر می‌شود (Cook et al., 2011). آلپیت نیز به رنگ خاکستری متمایل به آبی است. دیگر ویژگی‌های نوری ژورلثیت و آلپیت، همانند کالکوسیت است. در نتیجه شناسایی این کانی‌ها از کالکوسیت، تنها با استفاده از خواص نوری، بسیار مشکل و در برخی مواقع غیر ممکن است؛ اما با استفاده از الکترون‌پروب، به راحتی تشخیص داده می‌شوند. کولیت (شکل ۶-ج) به صورت مجموعه‌های رشته‌ای یا در امتداد رخ کالکوسیت و یا به صورت حاشیه‌ای، جانیشنی کانی‌های گروه کالکوسیت شده است.

به طور کلی شرایط تشکیل و پایداری هر یک از کانی‌های گروه کالکوسیت بستگی به دما و فشار زمان تشکیل آنها دارد (Posfi & Buseck, 1994). کالکوسیت به ۳ شکل دمابالا، دماباین و فشاربالا یافت می‌شود. کالکوسیت دماباین در سامانه منوکلینک متبلور شده و در محدوده دمایی زیر ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد پایدار است. این شکل از کالکوسیت در دماهای بالاتر از ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به چندشکلی دما بالای خود تبدیل می‌شود (Posfi & Buseck, 1994). کالکوسیت دمابالا در سامانه هگزاگونال متبلور شده و محدوده پایداری آن در دمای میان ۱۰۳ تا ۴۳۵ درجه سانتی‌گراد است. این شکل از کالکوسیت، با کاهش دما به چندشکلی دما پایین تبدیل می‌شود (Gablina et al., 2006). کالکوسیت فشاربالا در فشارهای بالاتر از یک بار و در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار است و در سامانه تراگونال ایجاد می‌شود. محدوده دمایی ژورلثیت، پایین و زیر ۹۳ درجه سانتی‌گراد است (Howard & Evans, 1981). محدوده پایداری آلپیت از محدوده دمایی ژورلثیت نیز پایین‌تر و حدود ۷۲ درجه سانتی‌گراد است. محدوده پایداری دیژنیت، دمای بالای ۸۳ درجه سانتی‌گراد است (Gablina et al., 2006).

بر پایه مطالعات میکروسکوپی و نتایج داده‌های EPMA دو مرحله تکون و تشکیل برای این کانسار پیشنهاد می‌شود. اولین مرحله گرمایی درونزاد و دومین مرحله برونزاد است (شکل ۷). مرحله گرمایی درونزاد یا اولیه به دو زیر گروه آغازین و اصلی تقسیم می‌شود. زیر گروه آغازین با فرایند کانه‌زایی با تشکیل پیریت و به مقدار بسیار کم کالکوپیریت و آرسنو پیریت شناسایی می‌شود. زیر رده اصلی، مهم‌ترین بخش کانه‌زایی به شمار می‌آید و شامل کانی‌های کالکوسیت، بورنیت و دیژنیت است. همچنین در این مرحله، هماتیت از دگرسانی پیریت مرحله آغازین به وجود می‌آید.

مرحله برونزاد با غنی‌شدگی ثانویه با تشکیل ژورلثیت و آلپیت به جای کالکوسیت و کولیت به جای بورنیت و کالکوسیت دنبال می‌شود و هنگام اکسایش، کانی‌های

۱۰- نوع کانه‌زایی

بر پایه محیط زمین‌شناسی و ویژگی‌های سنگ درونگیر، به ویژه زمین‌شیمی، ساخت و بافت و نیز نوع دگرسانی و ویژگی‌های کانه‌زایی مانند پاراژنز کانسنگ، نوع کانه‌ها و باطله‌ها، بافت و ساخت کانسنگ، دما و ژرفای تشکیل کانسنگ و شوری و چگالی سیال کانه‌ساز، کانسار مس معدن بزرگ، بیشترین همانندی را با کانسارهای مس نوع ماتو در شیلی و جاهای دیگر دارد (جدول ۳).

واژه "نوع ماتو" (Manto type) واژه‌ای است که اولین بار در شیلی (Ruiz et al., 1971) و برای ذخایر مس چینه‌کران با میزبان آتشفشانی استفاده شده است. این ذخایر، در ناحیه کردیلرای ساحلی (Coastal Cordillera) و کردیلرای مرکزی (نواحی Uchumi و Talcuna) شیلی، کمر بند فلززایی مس مهمی را ایجاد می‌کنند (Kojima et al., 2008; Wilson & Zentilli, 2006). این نوع ذخایر مس، پس از کانسارهای مس پورفیری و کانسارهای IOCG، سومین ذخایر بزرگ مس در شیلی به شمار می‌آیند (Tristá-Aguilera et al., 2006). بیشتر این ذخایر دارای سن ژوراسیک تا کرتاسه هستند. در کانادا و شمال آمریکا نیز کانسارهای مس در سنگ‌های میزبان بازالتی یا آندزیتی، با عناوین کانسارهای مس بازالتی، مس کویناوی (Keweenaw)، میشیگان (Michigan) و مس طبقات سرخ آتشفشانی (Volcanic Red bed Cu) شناخته می‌شوند (Lefebure & Church, 1996). البته تفاوت‌هایی میان ذخایر کانادا و آمریکا با ذخایر نوع ماتوی شیلی وجود دارد (جدول ۳). ذخایر ماتو دارای عبار بالای مس (۲٪-۱/۵٪) و محتوای نقره پایین (۲۰-۵ g/t) و در بیشتر موارد بدون طلا هستند (Boric et al., 2002). بیشتر این ذخایر، کوچک‌اند و تناژ پایینی دارند. بزرگ‌ترین ذخایر شناخته شده در شیلی، ال سولدادو (El Soldado) با حجم ۲۰۰ میلیون تن و ماتو بلانکو (Manto Blanco) با حجم ۱۲۰ میلیون تن است (Maksaev & Zentilli, 2002). سنگ درونگیر این ذخایر، سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و بازالتی با ماهیت کالک‌آلکالین پتاسیم بالا تا توله‌ایت به رنگ خاکستری تیره تا سبز است. این سنگ‌ها در محیط کشتی مرتبط با فرورانش آند و حوضه‌های پشت کماتی تشکیل شده‌اند (Tristá-Aguilera et al., 2006; Oliveros et al., 2008). بافت چیره این سنگ‌ها، بافت پورفیریک، آفانتیک، بادامکی و برشی است (Oliveros et al., 2008). سنگ‌های میزبان این نوع کانسارها، بیشتر تحت تأثیر دگرسانی‌های پروپیلیتیک، سیلیسی، کلسیتی (Cisternas & Hermosilla, 2006) و آلینی (Maksaev & Zentilli, 2002) قرار دارند و کانی‌های معمول دگرسانی در این سنگ‌ها، کلسیت، کلریت، سرسیست، اپیدوت، هماتیت، کوارتز، زئولیت، پرنهیت، پومپلیت، اکتینولیت، آلپیت و اسمکتیت (Townley et al., 2007) است. کانه‌زایی اولیه مس ترجیحاً در بخش‌های خاص سنگ درونگیر مانند حفرات بادامکی و رگچه‌ها و به صورت پراکنده رخ داده است (Kojima et al., 2003). کانی‌شناسی توده معدنی ساده و شامل کالکوسیت، بورنیت ± دیزنیت، کالکوپیریت و کولیت است. میانگین دامنه تغییرات دمایی تشکیل این کانسارها از ۱۵۰ تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد و دارای شرایط فشار پایین و نزدیک به منحنی جوشش است (Kojima et al., 2003). حتی شواهد جوشش در این کانسارها دیده شده است (Townley et al., 2000; Ramírez et al., 2006; Oyarzun et al., 1998; Kojima et al., 2003). تغییرات شوری این کانسارها متغیر و از ۱/۵ (Kojima et al., 2008) تا ۶۲ درصد وزنی نمک طعام (Ramírez et al., 2006) گزارش شده است. نزدیکی و همپوشانی آشکاری میان محدوده دما و شوری کانسار معدن بزرگ با محدوده کانسارهای ماتو شیلی وجود دارد (شکل ۱۳). شماری از کانسارهای نوع ماتو در ایران شناخته شده‌اند که می‌توان به کانسارهای ورزگ (علی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱)، قیله بولاغ (بهزادی، ۱۳۷۳)، کشکویه (ابولی‌پور، ۱۳۹۱)، کشت مهکی (بویری کناری و همکاران، ۱۳۹۳) و وشنوه (مهرابی و فاضلی، ۱۳۸۰) اشاره کرد.

میانبارها، اولیه هستند و به شکل منفرد یا در سطوح کریستالوگرافی کلسیت میزبان دیده می‌شوند؛ فراوانی میانبارها در نمونه‌های مطالعه شده، به نسبت کم است. از دید نوع و نسبت فازها، میانبارها به سه گروه دوفازی غنی از مایع ($L \geq +V$)، دوفازی غنی از گاز ($V \geq +L$) و تک‌فازی مایع (L) قابل تقسیم هستند (شکل ۹). از میان این ۳ دسته، میانبارهای دوفازی غنی از مایع، دارای بیشترین فراوانی هستند و همه اندازه‌گیری‌ها روی این میانبارها انجام شده است. ۷۵ تا ۹۰ درصد حجم این میانبارها را فاز مایع تشکیل می‌دهد و همگن‌شدگی در این میانبارها، به فاز مایع صورت می‌گیرد. دمای همگن‌شدگی میانبارهای دوفازی مطالعه شده میان ۹۰ تا ۲۶۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. از این میان، دماهای بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین فراوانی هستند (شکل ۱۰-الف). میانگین دماهای اندازه‌گیری شده، ۱۷۶ درجه سانتی‌گراد و دامنه تغییرات شوری به دست آمده میان ۳/۳۸ تا ۲۱/۹۶ با میانگین ۱۳/۲۱ درصد وزنی نمک طعام است؛ بیشترین فراوانی مربوط به شوری‌های میان دو محدوده ۵ تا ۱۰ و ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی نمک طعام است (شکل ۱۰-ب).

به منظور تعیین ترکیب سیال، دمای یوتکتیک یا دمای اولیه ذوب یخ (Te) می‌تواند اطلاعاتی را درباره وجود کاتیون‌ها و آنیون‌ها در سیال در اختیار گذارد (Shepherd et al., 1985). دمای یوتکتیک در نمونه‌های مورد مطالعه، حدود ۵۲- درجه سانتی‌گراد است. در این حالت میانبارهای سیال از فازهای یخ، هیدروهالیت و مایع تشکیل شده‌اند. این دما منطبق بر نقطه یوتکتیک سامانه سه‌تایی $H_2O-NaCl-CaCl_2$ است (Shepherd et al., 1985) و می‌توان نتیجه گرفت که کاتیون‌های Ca^{2+} و Na^+ مهم‌ترین کاتیون‌های سازنده سیال به همراه کاتیون مس هستند.

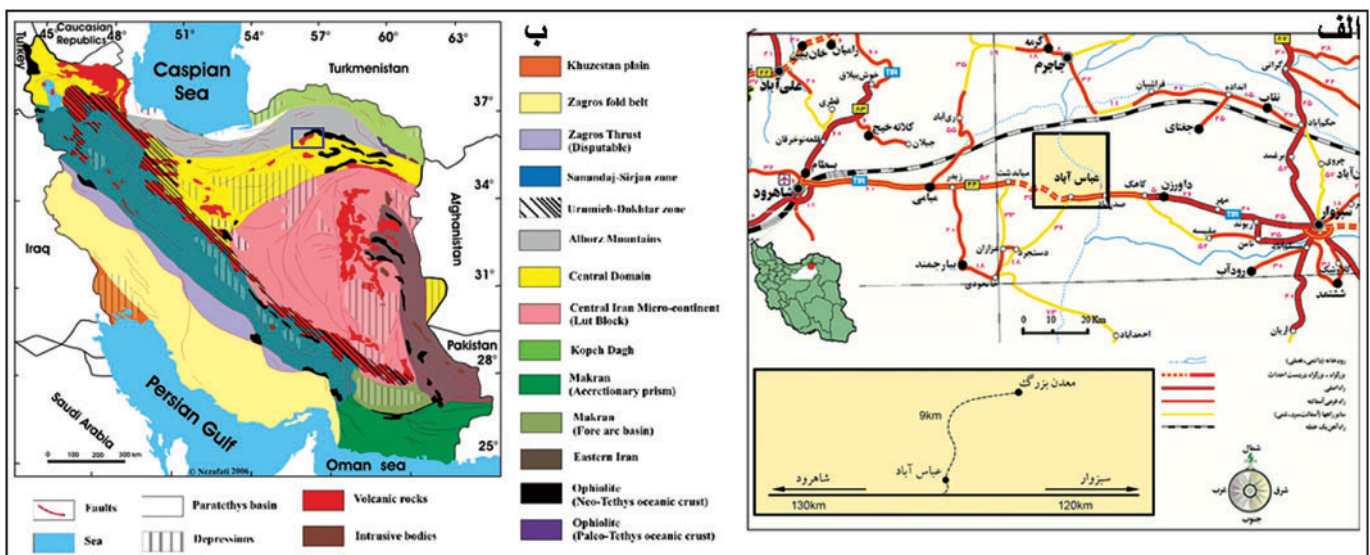
با توجه به روند تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی، چگالی سیال میان ۰/۸ تا ۱/۱ است (شکل ۱۱-الف). در این نمودار با افزایش شوری میانبارهای سیال، چگالی آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین با مشاهده تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی (شکل ۱۱-ب) و مقایسه آن با نمودار ارائه شده توسط (Wilkinson, 2001) داده‌ها در نزدیکی محدوده‌های جوشش و آمیختگی قرار می‌گیرند. هر دوی این فرایندها در تغییرات شوری مؤثر هستند (Wilkinson, 2001). فرایند جوشش، افزون بر تغییر در شوری سیال، در تغییرات دمای سیال نیز نقش دارد. از آنجایی که دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال مطالعه شده، تغییر نشان می‌دهد؛ می‌توان اولین و مهم‌ترین عامل ته‌نشست ماده معدنی را فرایند جوشش عنوان کرد. وجود میانبارهای غنی از مایع در کنار میانبارهای غنی از بخار (شکل ۹-ت)، فرایند جوشش را در این کانسنگ تأیید می‌کند. از شواهد دیگر جوشش در این کانسنگ، می‌توان به وجود آدولاریا-کوارتز در پهنه کانه‌زایی، فراوانی کالسدونی در پهنه کانه‌زایی، وجود برش‌های گرمایی (شکل ۳-پ) و وجود شبکه‌ای از کلسیت تیغه‌ای به همراه کوارتز در پهنه کانه‌زایی اشاره کرد. از آنجا که فرایند جوشش در کانسارهایی با دامنه تغییرات گسترده شوری نمی‌تواند به تنهایی عامل ته‌نشست ماده معدنی باشد (Oyarzun et al., 1998) و با توجه به دامنه تغییرات گسترده شوری در این کانسار، افزون بر فرایند جوشش، نقش آمیختگی سیال‌ها در ته‌نشست فیزیکی کانی‌های معدنی، مهم است. در نمودارهای مربوط به دمای همگن‌شدگی و شوری سیال کانه‌ساز (شکل‌های ۱۰-الف و ب و ۱۱-الف) دو دستگی دیده می‌شود. یک دسته از داده‌ها دارای دمای بالاتر و شوری پایین‌تر و دسته دیگر دارای دمای پایین‌تر و شوری بالاتر هستند که می‌تواند نشان‌دهنده دو نوع سیال گرمایی باشد.

با استفاده از دمای همگن‌شدگی و شوری طبق نمودار (Haas 1971) امکان تعیین ژرفای تشکیل سیال‌ها و کانی‌سازی وجود دارد. بر این اساس، ژرفای به دام افتادن میانبارهای سیال کانسار معدن بزرگ کمتر از ۲۰۰ متر است (شکل ۱۲-الف). به منظور تعیین فشار از نمودار (Ramdohr 1980) استفاده شده است. فشار حاکم در طی تشکیل سیال‌ها کمتر از ۵۰ بار بوده است (شکل ۱۲-ب).

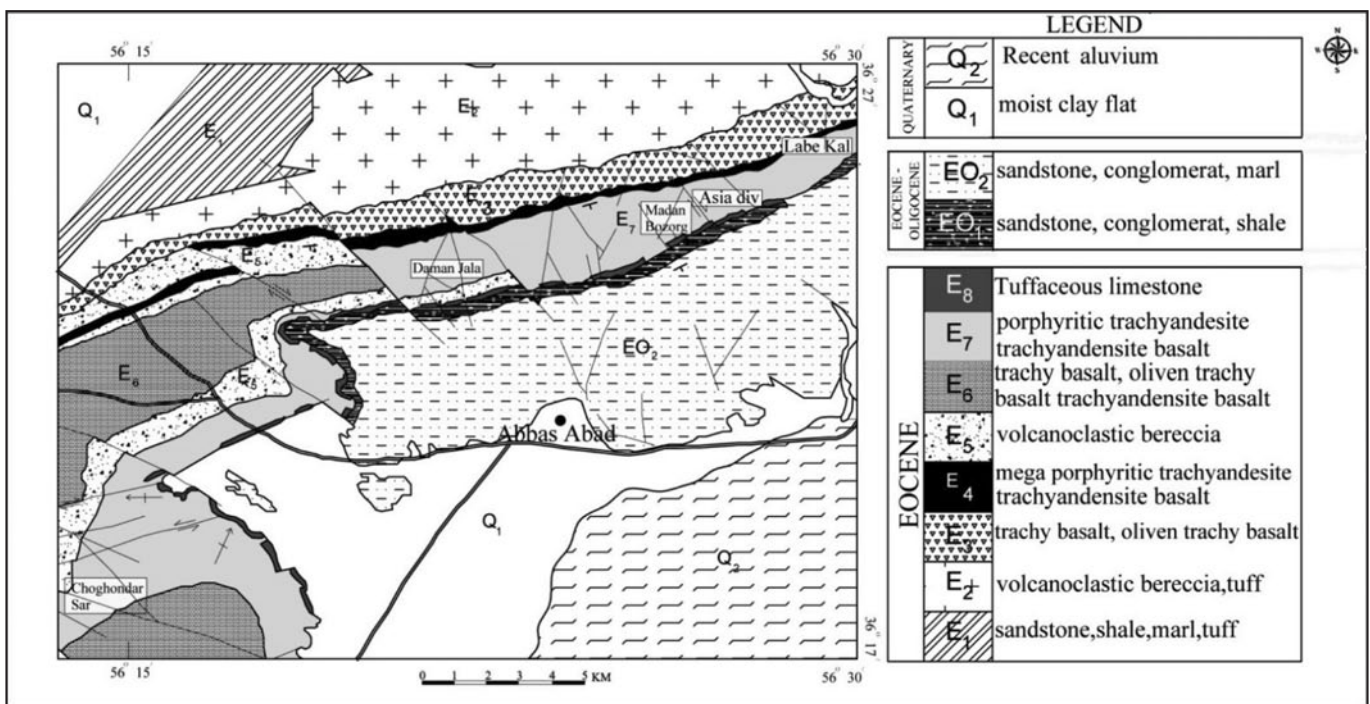
۱۱- نتیجه گیری

فضای خالی است. در تشکیل این کانسار، دو مرحله گرمایی اولیه و مرحله غنی‌شدگی ثانویه و اکسایش دخالت داشته‌اند. با توجه به مطالعات میانبراهای سیال، کانسار معدن بزرگ از نوع کانسارهای دماپایین و شوری کم تا متوسط است. مهم‌ترین عامل ته‌نشست کانسنگ مس، فرایند جوشش به همراه آمیختگی سیال‌هاست. عوامل زمین‌شناسی همچون وجود حفرات بادامکی فراوان، درزه و شکستگی و گسل‌خوردگی‌های بسیار در سنگ درونگیر، سبب رخداد دگرسانی محلی شده است. ژرفای به دام افتادن سیال‌ها در این کانسار کمتر از ۲۰۰ متر و فشار کمتر از ۵۰ بار در تشکیل آن مؤثر بوده است. این کانسار، با توجه به همانندی‌های زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی، قابل مقایسه با ذخایر مانند در شیلی است.

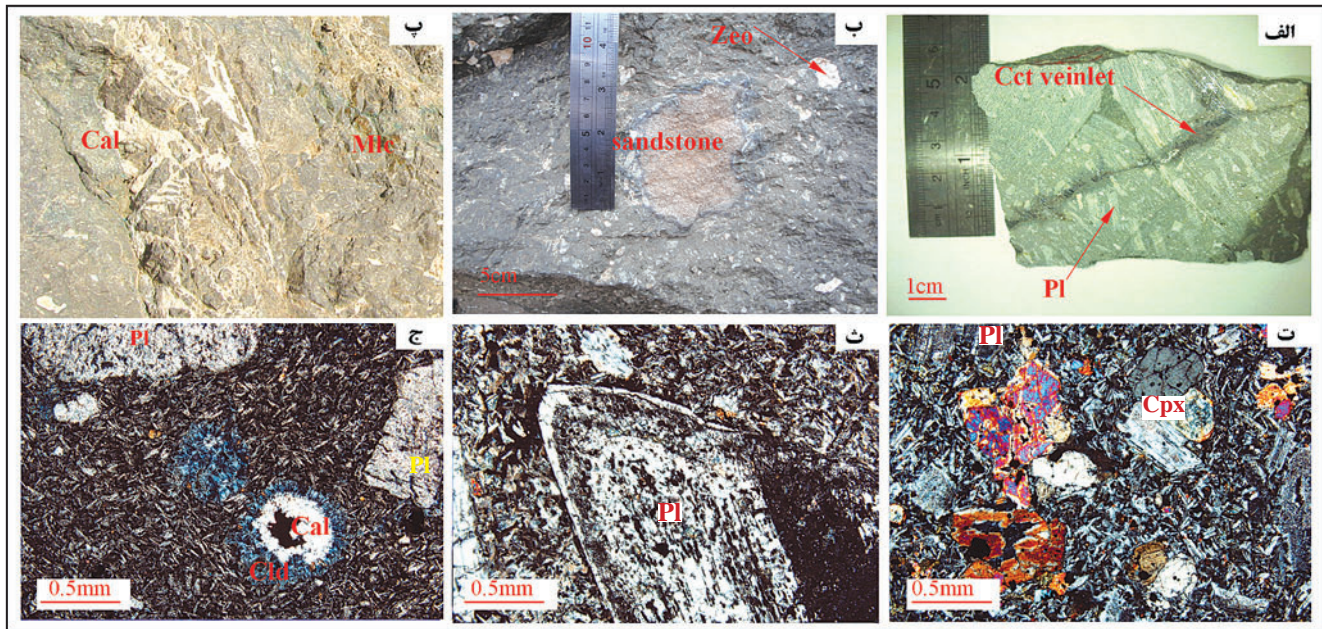
سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیتی، سنگ درونگیر کانسار معدن بزرگ است. این سنگ‌ها، دو نوع دگرسانی ناحیه‌ای و دگرسانی محلی مرتبط با کانه‌زایی مس را تحمل کرده‌اند. دگرسانی پروپیلیتیک، شاخص دگرسانی ناحیه‌ای و دگرسانی‌های سیلیسی، کلسیتی، هماتیتی، سریستی و کلریتی نشان‌دهنده دگرسانی محلی مرتبط با کانه‌زایی مس است. کانه‌زایی در این سنگ‌ها، درون‌زاد و چینه‌کران و دارای پارائز ساده کالکوسیت، بورنیت، پیریت، هماتیت و کوولیت است. کانی‌های گروه کالکوسیت کانی‌های معدنی اصلی در این کانسار است. کوولیت، ملاکیت، آزوریت، کریزوکلا و گوتیت از جمله کانی‌های ثانویه و کوارتز، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کالسدون، کانی‌های غیرفلزی این کانسار است. بافت ماده معدنی، رگه-رگچه‌ای، داربستی، پراکنده، جانشینی و پرکننده



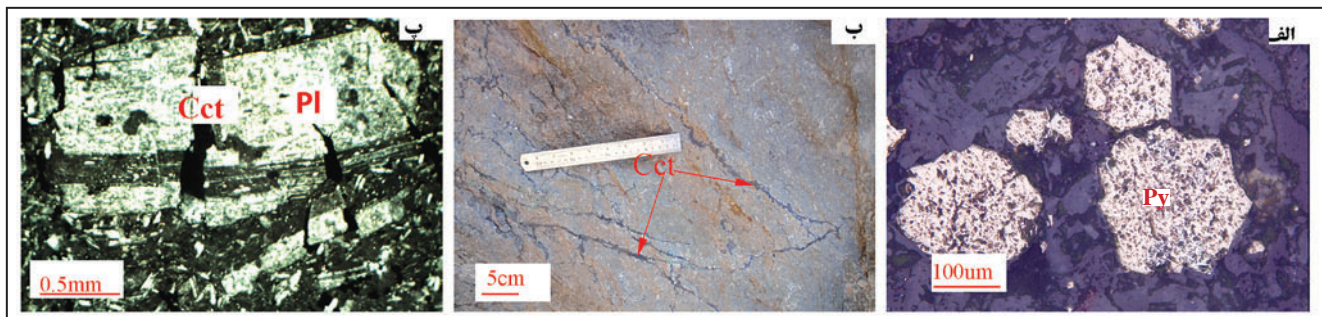
شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به کانسار مس معدن بزرگ؛ ب) نقشه زمین‌ساخت ایران (Alavi, 1991). محدوده معدنی عباس‌آباد با مستطیل آبی نمایش داده شده است.



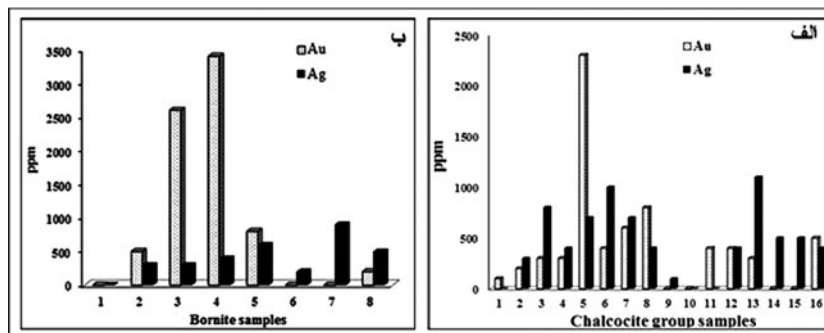
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی عباس‌آباد و موقعیت کانسارهای موجود در آن (برگرفته از خلعتبری جعفری، ۱۳۸۰).



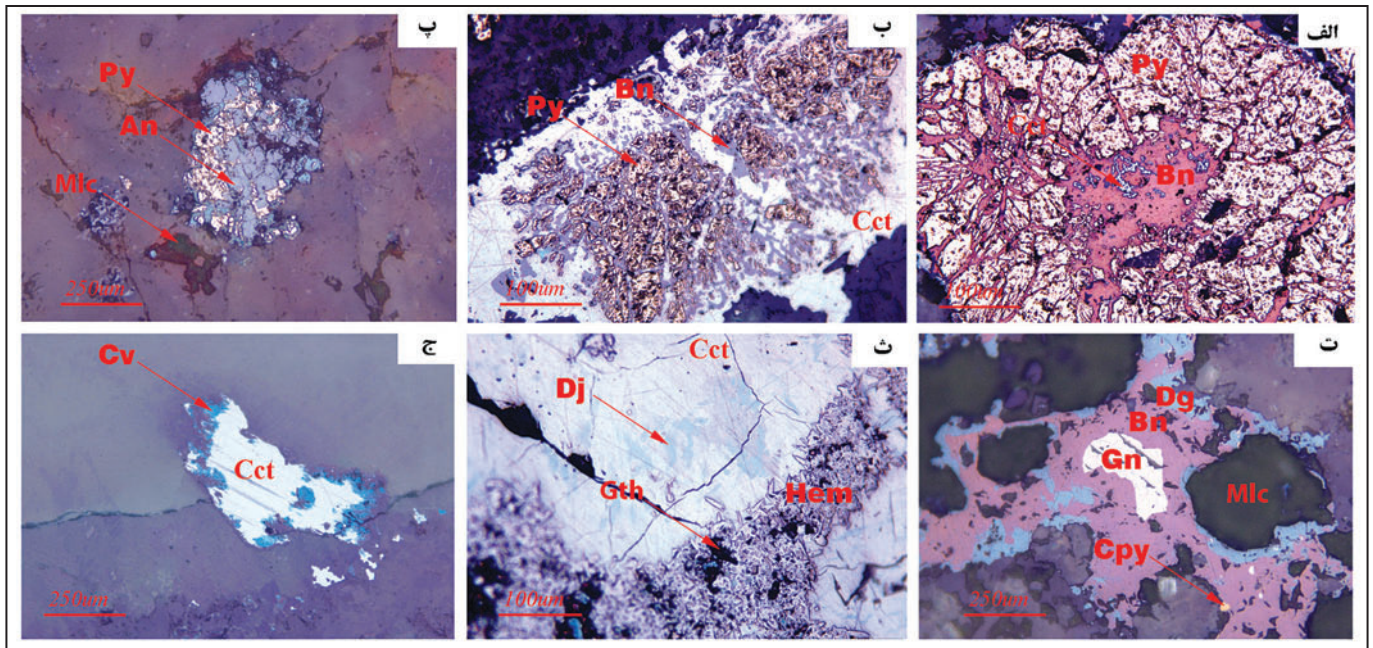
شکل ۳- تصاویری از واحد آتشفشانی با ترکیب آندزیت- تراکی آندزیت. الف) واحد آندزیت- تراکی آندزیت با پلاژیوکلازهای درشت سفید رنگ با ساخت جریان. رگچه ظریف کالکوسیت با رنگ دودی مگاپلاژیوکلازها را قطع کرده است؛ ب) وجود زئولیت ماسه‌سنگی با هاله واکنشی آشکار در سنگ آتشفشانی با ساخت بادامکی (پرسیده با زئولیت)؛ پ) برشی شدن سنگ درونگیر ماده معدنی همراه با سیمان کلسیتی؛ ت) اجتماع بلورهای درشت کلینوپیروکسن در زمینه میکروولیتی (بافت گلومروپورفیری)؛ ث) مگاپلاژیوکلاز با بافت غربالی و منطقه‌بندی ترکیبی در زمینه میکروولیتی؛ ج) حفره پرسیده با کالسدونی، کلسیت و زئولیت (بافت بادامکی). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتست از (Whitney & Evans, 2010): Cct: کالکوسیت؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Zeo: زئولیت؛ Mlc: مالاکیت؛ Cpx: کلینوپیروکسن؛ Cal: کلسیت؛ Cld: کالسدونی.



شکل ۴- تصاویری از بافت و ساخت ماده معدنی. الف) بلورهای خودشکل پیریت با بافت دانه‌پراکنده (نور PPL)؛ ب) ساخت داربستی کالکوسیت در سنگ درونگیر؛ پ) قطع شدن مگاپلاژیوکلاز توسط رگچه‌هایی از کالکوسیت (نور XPL). Cct: کالکوسیت؛ Py: پیریت؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Bn: بورنیت.



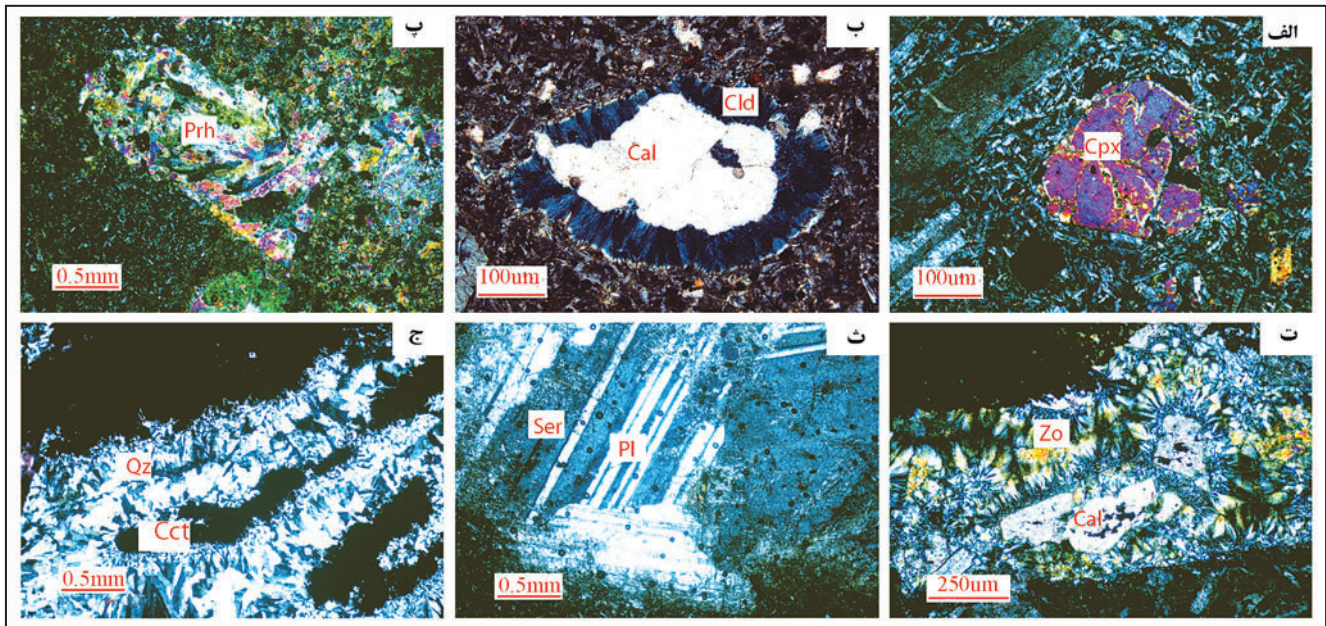
شکل ۵- الف) میانگین مقدار عناصر طلا و نقره در کانی‌های گروه کالکوسیت؛ ب) میانگین مقدار عناصر طلا و نقره در بورنیت.



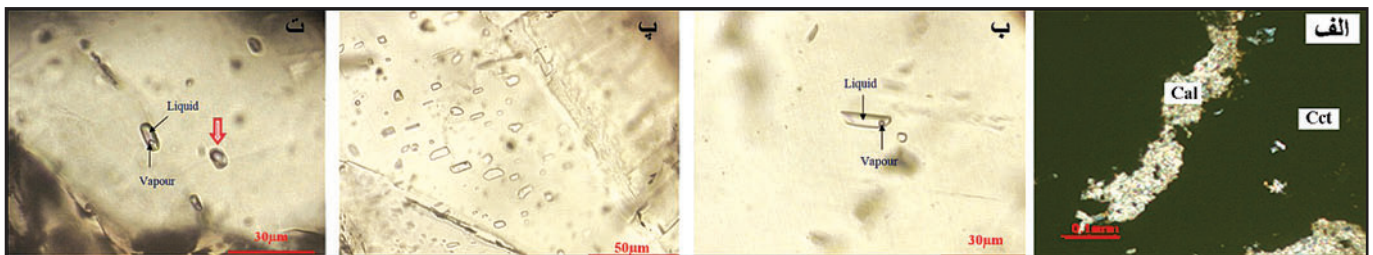
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های کانسنگ در نور پلاریزه مسطح (نور PPL). الف) برشی شدن پیریت و ورود محلول‌های دارای مس و تشکیل بورنیت و کالکوسیت در شکستگی‌ها و درزه‌های ایجاد شده؛ ب) جانشینی پیشرفته پیریت توسط بورنیت و کالکوسیت. پیریت تنها به صورت جزیره‌هایی در بخش میانی باقی مانده است. در این تصویر، درهم‌رشدی میرمیکی کالکوسیت و بورنیت به خوبی دیده می‌شود؛ پ) آنیلیت (خاکستری با ته رنگ آبی) به همراه پیریت و مالاکیت؛ ت) درهم‌رشدی دیژنیت و بورنیت به همراه گالن و تکه کوچکی از کالکوپیریت و جانشینی حاشیه‌ای مالاکیت به جای دیژنیت و بورنیت؛ ث) جانشینی ژورلئیت (آبی تیره‌تر از زمینه) به صورت وصله‌ای (Patchy) به جای کالکوسیت (کانی آبی زمینه) و تیغه‌های هماتیت به همراه گوتیت؛ ج) تبدیل کالکوسیت به کولیت. Py: پیریت؛ Bn: بورنیت؛ Cct: کالکوسیت؛ Dg: دیژنیت؛ An: آنیلیت؛ Mlc: مالاکیت؛ Gn: گالن؛ Cpy: کالکوپیریت؛ Dj: ژورلئیت؛ Hem: هماتیت؛ Gth: گوتیت؛ Cv: کولیت.

Mineral	Primary Hydrothermal Stage		Secondary Enrichment	Oxidation Stage
	Early Substage	Main substage		
Sericite				
Epidote				
Chlorite				
Quartz				
Calcite				
Gypsum				
Prehnite				
Zeolite				
Pyrite				
Chalcopyrite				
Arsenopyrite				
Bornite				
Chalcocite				
Digenite				
Anilite				
Djurleite				
Native Copper				
Galena				
Covellite				
Malachite				
Azurite				
Hematite				
Chrysocolla				
Goethite				

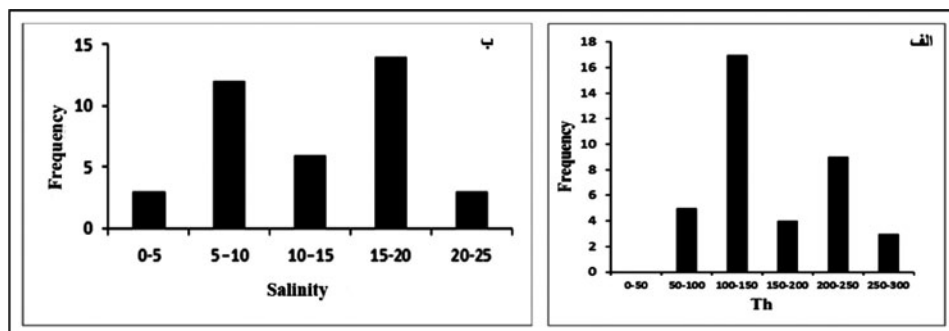
شکل ۷- توالی پاراژنزی کانی‌ها در کانسار مس معدن بزرگ.



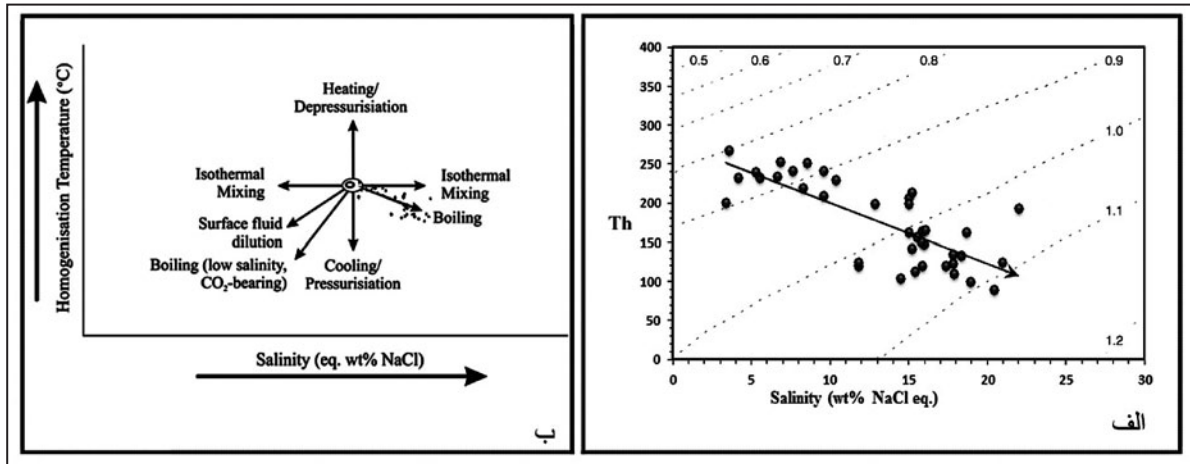
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی (نور XPL) از دگرسانی‌های ناحیه‌ای و محلی سنگ‌های آتشفشانی محدوده عباس‌آباد. الف) پدیده اورالیتی شدن درشت بلور پیروکسن و تبدیل آن به آمفیبول کلسیم‌دار (ترمولیت)؛ ب) تشکیل کلسیت و کالسدونی در حفرات بادامکی سنگ درونگیر و ایجاد بافت بادامکی؛ پ) تشکیل پرهنیت در اثر دگرسانی پلاژیوکلزهای سنگ؛ ت) دگرسانی کانی‌های فرومیزین و تشکیل کلریت آهن‌دار به همراه کلسیت در حفرات بادامکی سنگ آتشفشانی؛ ث) سریستی شدن درشت بلور پلاژیوکلز؛ ج) سیلیسی شدن سنگ درونگیر و افزایش این فرایند در حفرات بادامکی سنگ و ایجاد بافت و ساخت دروزی با ماده معدنی؛ Ser: سریست؛ Cal: کلسیت؛ Qz: کوآرتز؛ Zo: زوئیزیت و کلینوزوئیزیت؛ Prh: پرهنیت؛ Pl: پلاژیوکلز؛ Cpx کلینوپیکروکسن؛ Cld: کالسدونی؛ Cct: کالکوسیت.



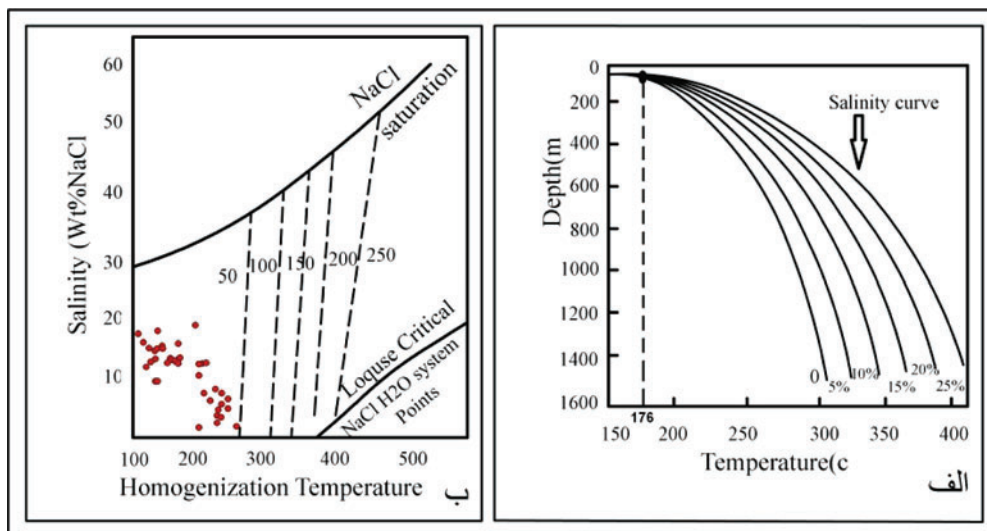
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی از میانبرهای سیال با کانی میزبان کلسیت. الف) کلسیت نسل اول همراه با رگچه کالکوسیت (نور XPL)؛ ب) میانبار اولیه با شکل میله‌ای و دوفاز غنی از مایع و حباب کوچک گاز (بزرگنمایی ۸۰۰)؛ پ) میانبارهای ثانویه با اشکال بیضی، میله‌ای و نامنظم با دوفاز مایع-بخار و یا تک‌فازی مایع به صورت صفحه‌ای (بزرگنمایی ۵۰۰ برابر)؛ ت) میانبار اولیه دوفازی غنی از مایع در کنار میانبارهای دوفازی غنی از بخار.



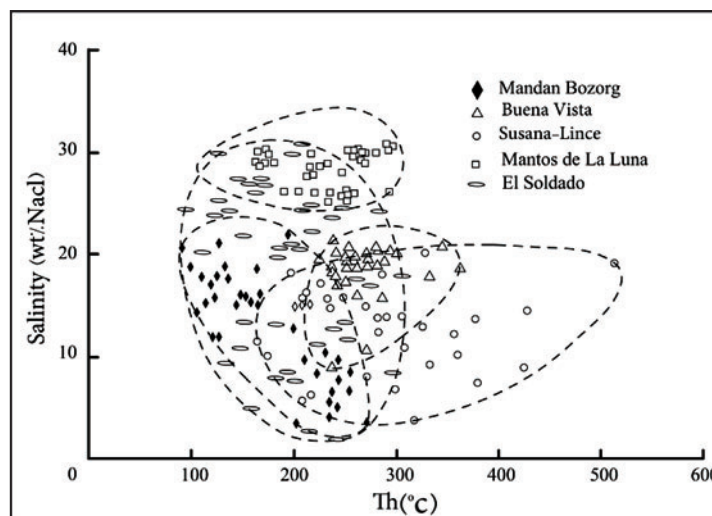
شکل ۱۰- الف) نمودار ستونی (هیستوگرام) فراوانی دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال نمونه‌های کانسار معدن بزرگ؛ ب) نمودار ستونی فراوانی درصد شوری میانبارهای سیال نمونه‌های کانسار معدن بزرگ.



شکل ۱۱- الف) نمودار تعیین چگالی سیال کانی ساز (Wilkinson, 2001)؛ ب) نمودار شوری در برابر دمای همگن‌شدگی (Wilkinson, 2001). داده‌ها فرایند جوشش را در ته‌نشست کانسنگ نشان می‌دهند.



شکل ۱۲- الف) داده‌های میانبارهای سیال در کانسار معدن بزرگ روی نمودار ژرفای به دام افتادن میانبارهای سیال (Haas, 1971)؛ ب) تعیین فشار سیال بر پایه دمای همگن‌شدگی و شوری در نمودار (Ramdohr, 1980).



شکل ۱۳- محدوده دما و شوری میانبارهای سیال در کانسار معدن بزرگ و مقایسه آن با داده‌های دما و شوری چند کانسار مس تپ مانو در شیلی (Boric et al., 2002; Kojima et al., 2003 & 2008).

جدول ۱- نتایج تجزیه الکترون میکروپروپ بورنیت و کانی‌های گروه کالکوسیت (نتایج بر حسب درصد وزنی % Wt است).

Mineral	Sample	Depth (m)			Cu	S	Fe	Au	Ag	Sb	As	Ni	Co
Digenite	63S34	34	N = 3	Mean	78.95	21.23	0.07	0.015	0.015	0.005	0.03	0.01	0.01
				Max.	79.41	21.32	0.09	0.02	0.03	0.01	0.06	0.02	0.01
				Min.	78.49	21.13	0.05	0.01	0	0	0	0	0.01
Anilite	62S7	7	N = 6	Mean	77.16	21.94	1.505	0.078	0.066	0	0.013	0	0.003
				Max.	77.48	23.22	2.47	0.23	0.1	0	0.05	0	0.02
				Min.	76.37	20.7	0.51	0.03	0.04	0	0	0	0
Chalcocite	63S25	25	N = 6	Mean	79.27	20.9	0.438	0.018	0.038	-	0.018	0.01	0.004
				Max.	80.02	21.22	1.2	0.04	0.11	-	0.05	0.02	0.02
				Min.	78.85	20.64	0.01	0	0	-	0	0	0
Djurleite	30S3	3	N = 4	Mean	78.93	21.403	0.007	0.023	0.04	0.01	0.006	0.006	0.003
				Max.	79.15	21.66	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01
				Min.	78.55	21.2	0	0	0.03	0	0	0	0
Bornite	60S26	26	N = 8	Mean	62.65	26.46	11.133	0.094	0.04	-	0.019	0.004	-
				Max.	63.34	27.22	11.66	0.34	0.09	-	0.04	0.01	-
				Min.	61.04	26.07	10.8	0	0	-	0	0	-

جدول ۲- نتایج تجزیه نمونه‌ها با روش XRD و Raman spectroscopy

Sample No.	Analysis method	Longitude (E)	Latitude (N)	Elevation	Results
MB43	XRD	56° 26' 33"	36° 24' 51"	980	Quartz, Malachite, Clinochlore
MB51	XRD	56° 26' 31"	36° 24' 51"	987	Quartz, Clinochlore, Malachite, Geothite
MB38	XRD	56° 26' 34"	36° 24' 53"	956	Calcite, Clinochlore, Albite, Chalcocite
MB74	XRD	56° 26' 35"	36° 24' 52"	973	Quartz, Calcite, Epidote, Clinochlore
MB12	XRD	56° 26' 12"	36° 24' 42"	947	Quartz, Calcite, Hematite, Chalcocite
MB24	XRD	56° 26' 15"	36° 24' 42"	963	Natrolite, Mesolite, Analcime
MB35	XRD	56° 26' 16"	36° 24' 43"	968	Natrolite, Mesolite, Calcite
MB61	XRD	56° 26' 20"	36° 24' 46"	977	Calcite, Malachite, Quartz
MB63	XRD	56° 26' 30"	36° 24' 50"	976	Prehnite, Quartz, Hematite, Calcite
MB31	XRD	56° 26' 13"	36° 24' 45"	954	Calcite, Quartz, Albite
MB63	Raman S.	56° 26' 30"	36° 24' 50"	976	Prehnite, Quartz, Calcite
CM44	Raman S.	56° 26' 13"	36° 24' 50"	988	Zeolite, Quartz
CM57	Raman S.	56° 26' 31"	36° 24' 50"	952	Calcite, Hematite
MB10	Raman S.	56° 26' 36"	36° 24' 53"	947	Quartz, Calcite, Hematite

جدول ۳- مقایسه کانسار معدن بزرگ با کانسارهای نوع ماتو، لایه‌های سرخ آتشفشانی و میشلگان.

ویژگی‌های کانه‌زایی	کانسار معدن بزرگ	کانسارهای مس ماتو	کانسارهای مس طبقات سرخ آتشفشانی	کانسارهای نوع میشلگان یا کونیاوی
محیط زمین‌ساختی	کمان قاره‌ای فرورانشی	محیط کشتی مرتبط با فرورانش آند و حوضه‌های پشت کماتی	کافت درون قاره‌ای و نزدیکی حواشی صفحات	کافت نیمه‌قاره‌ای
سنگ درونگیر و همراه	سنگ درونگیر: سنگ‌های آتشفشانی تراکی آندزیتی با ماهیت شوشونیتی (معدودی کالک‌آلکان پتاسیم بالا) سنگ همراه: سنگ‌آهک فسیل‌دار، شیل توفی، ماسه‌سنگ توفی و کنگلومرا	سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و بازالتی با ماهیت کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا توله‌ایتی سنگ همراه: شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، توف ± سنگ‌های نفوذی (گابرو تا گرانو دیوریتی)	گدازه‌های بازالتی بادامکی، سنگ‌های آذرآواری درشت و برشی سنگ همراه: توف، سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا	بازالت‌توله‌ایت جریان‌ی سنگ همراه: ماسه‌سنگ، کنگلومرا
سن سنگ درونگیر	اتوسن	ژوراسیک پایانی تا کرتاسه آغازین	پروتروزوییک تا ترشیر	پر کامبرین
دگرسانی	پروپیلیتیک، سیلیسی، کلسیتی، هماتیتی	پروپیلیتیک، سیلیسی، کلسیتی، آلبیتی	بیشتر بدون دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی و بیشتر با دگرگونی پره‌نیت-پومپیلیت، سیلیسی در دیواره سنگ درونگیر دیده می‌شود.	بیشتر بدون دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی اما دگرسانی آلبیتی، کلسیتی، کلریتی، اپیدوتی، پره‌نیت-پومپیلیت، سیلیسی در دیواره سنگ درونگیر دیده می‌شود.

ویژگی‌های کانه‌زایی	کانسار معدن بزرگ	کانسارهای مس مانتو	کانسارهای مس طبقات سرخ آتشفشانی	کانسارهای نوع میشیگان یا کوبناوی
ساخت و بافت سنگ درونگیر	پورفیری، مگاپورفیری، بادامکی، گلومروپورفیری و برشی	پورفیری، آفانتیک، بادامکی و برشی	بادامکی، برشی	حفره‌دار و بادامکی
نوع کانه‌زایی	درونزاد	درونزاد	درونزاد	درونزاد
کانی‌های معدنی	کانی‌های گروه کالکوسیت (با قالب بودن کالکوسیت و دیژنیت)، بورنیت، کولیت	کالکوسیت، دیژنیت، بورنیت، کالکوپیریت، کولیت	مس طبیعی، کالکوسیت، بورنیت، دیژنیت، ژورلینت، نقره طبیعی، گرینوکیت، سولفید آهن به‌ویژه پیریت	مس طبیعی، نقره طبیعی \pm کالکوسیت \pm دیژنیت \pm ملاکیت و آزوریت
کانی‌های باطله	کوارتز، کلریت، اپیدوت، کلسیت، کالسدونی و زئولیت	کوارتز، کلریت، اپیدوت، کلسیت و زئولیت	هماتیت، مگنتیت، کلسیت، اپیدوت، کوارتز، کلریت و زئولیت	کوارتز، کلریت، اپیدوت، کلسیت و زئولیت به مقدار کم
بافت و ساخت توده معدنی	پراکنده، رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و بادامکی	پراکنده، رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و بادامکی	پراکنده، پرکننده فضای خالی، رگه‌ای و در برخی مواقع جانیشینی	افشان دانه‌ریز، پرکننده فضای خالی و توده‌ای
غنی‌سازی برونزاد	کم	در بیشتر موارد کم	کم	کم
کلاهی آهنی	وجود ندارد	وجود ندارد	وجود ندارد	وجود ندارد
نمونه	-	Mantos Blancos (Oliveros et al., 2008), Lince-Estefanía (Tristá-Aguilera et al., 2006)	Mont Alexandre (Cabral & Beaudoin, 2007); Hinds Lake area (Case & Zagorevski, 2009)	White Pine (Brown, 1971; Swenson & person, 2000); Copper Falls mine (Larson et al., 2003); Houghton County (Rosemeyer, 2011)

کتابنگاری

ابولی‌پور، م.، ۱۳۹۱- زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانه‌زایی مس چینه‌کران در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن در منطقه کشکوییه، باختر رفسنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۰۱ ص.

بوری کناری، م.، راستاد، ا. و رشیدنژادعمران، ن.، ۱۳۹۳- کانه‌زایی مس (-نقره) نوع "Volcanic Red Bed" در کانسار کشت مهکی، شمال باختر صفاشهر، پهنه سندیج- سیرجان جنوبی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۳، صص ۱۹ تا ۳۶.

بهزادی، م.، ۱۳۷۳- بررسی زمین‌شناسی اقتصادی اندیس مس قبله بولاغ واقع در منطقه طارم سفلی- استان زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

خلعبری جعفری، م.، ۱۳۸۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ عباس‌آباد، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

سامانی، ب.، ۱۳۸۶- گزارش زمین‌شناسی معدنی- اقتصادی منابع کانسنگ مس در میدان معدنی عباس‌آباد (شهرستان شاهرود)، شرکت زمین‌شناسی و اکتشاف نازیل شرق، ۲۰۶ ص.

شرکت مهندسی مشاور پارسی کان‌کاو، ۱۳۹۲- گزارش نهایی انجام پروژه اکتشافات عمومی، تفصیلی و تکمیلی معادن مس عباس‌آباد، ۲۷۶ ص.

صالحی، ل.، رسا، ا.، علیرضایی، س. و کاظمی مهرنیا، ا.، ۱۳۹۳- پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی عباس‌آباد (شرق شاهرود) با تأکید بر دگرسانی و کانه‌زایی مس همراه آن، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۳۱، صص ۴۹ تا ۶۳.

علی‌زاده، و.، مؤمن‌زاده، م. و امامی، م.، ا.، ۱۳۹۱- سنگ‌نگاری، ژئوشیمی، کانی‌شناسی، مطالعه میان‌بارهای سیال و تعیین نوع کانه‌زایی کانسار مس ورزگ- قاین، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۶، صص ۴۸ تا ۵۸.

علی‌نیا، ف. و دهقان‌نژاد، م.، ۱۳۸۳- مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی ژئوشیمیایی معادن مس عباس‌آباد شاهرود و برآورد پتانسیل معدنی آنها، کنفرانس مهندسی معدن ایران.

لطفی، م. و نوروزی، ر.، ۱۳۸۰- مروری بر زایش کانسارهای مس و ویژگی‌های ژئودینامیکی آنها در منطقه عباس‌آباد استان سمنان، چکیده مقالات بیستمین گردهمایی علوم زمین.

مهرابی، ب. و فاضلی، آ.، ۱۳۸۰- بررسی تیپ کانی‌سازی مس در کانسار وشنوه (جنوب استان قم)، بیستمین گردهمایی علوم زمین.

References

- Alavi, M., 1991- Tectonic map of the Middle East. Geological Survey of Iran. Tehran.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N. S. F. & Zentilli, M., 2002- The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile. In Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, V. 2, PGC Publishing, Adelaide 163-184.
- BRGM Company, 2005- Review of Abbas Abad copper project: Islamic republic of Iran 53pp.

- Brown, A. C., 1971- Zoning in the White Pine copper deposit, Ontonagon County, Michigan. *Economic Geology* 66 (4): 543-573.
- Cabral, A. R. & Beaudoin, G., 2007- Volcanic red-bed copper mineralization related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. *Miner Deposita* 42: 901-912.
- Case, G. & Zagorevski, A., 2009- Volcanic redbed copper mineralization in the Hinds Lake area, central Newfoundland, Geological survey report. 09-1: 131- 146.
- Cisternas, M. E. & Hermosilla, J., 2006- The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapo area, Northern Chile. *Miner Deposita* 41: 339-355.
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Danyushevsky, L. V. & Gilbert, S., 2011- Minor and trace elements in bornite and associated Cu- (Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 6473- 6496.
- Gablina, I. F., Stepanova, T. A. & Gor'kova, N. V., 2006- Diagenetic Alterations of Copper Sulfides in Modern Ore-Bearing Sediments of the Logatchev-1 Hydrothermal Field (Mid-Atlantic Ridge 14 ° 45 - N): *Lithology and Mineral Resources*, 41(1): 27-44.
- Gupta, A. K., 2007- *Petrology and Genesis of Igneous Rocks*, Narosa Publishing House, India, 479 pp.
- Haas, J. I., 1971- The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology* 66: 940-946.
- Howard, T. & Evans, J. R., 1981- Copper coordination in low chalcocite and djurleite and other copper-rich sulfides. *American Mineralogist* 66: 807-818.
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Trista, D. & Hayashi, K., 2003- Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of northern Chile. *Mineralium Deposita* 38: 208-216.
- Kojima, S., Trista-Aguilera, D. & Hayashi, K., 2008- Genetic Aspects of the Manto-type Copper Deposits Based on Geochemical Studies of North Chilean Deposits. *Resource Geology* 59(1): 87 - 98.
- Larson, P. B., Maher, k., Ramos, F.C., Chang, Z., Gaspar, M. & Meinert, L.D., 2003- Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chemical Geology* 201: 337- 350.
- Lefebvre, D. V. & Church, B. N., 1996- Volcanic Redbed Cu, in *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 1 - Metallic Deposits*, Lefebvre, D. V. & Höy, T, Editors, British Columbia Ministry of Employment and Investment, Open File 13: 5-7.
- Maksaev, V. & Zentilli, M., 2002- Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: An Overview; in Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide 2:185-205.
- Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Ramírez, L., Fornari, M., Palacios, C. & Parada, M., 2008- Detailed ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Miner Deposita* 43: 281-293.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. & Oyarzun, J., 1998- Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts, *Mineralium Deposita* 33: 547-559.
- Posfai, M. & Buseck, P. R., 1994- Djurleite, digenite, and chalcocite: Intergrowths and transformations. *American Mineralogist* 79: 308- 315.
- Ramdohr, P., 1980- *The Ore Minerals and Their Intergrowths*, Sec. Edition, English translation of the 4th. Edition. Two volumes, pergamon press, 1205pp.
- Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Fernandez- Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M. & Lehmann, B., 2006- The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile. *Mineral Deposita* 41: 246 - 258.
- Robb, L., 2005- *Introduction of Ore Forming Processes*: John Wiley & Sons 386pp.
- Rosemeyer, T., 2011- News from the Keweenaw, Recent Mineral Finds in Michigan's Copper Country, part 4, *Rocks and Minerals*. 86: 206- 227.
- Ruiz, C., Aguilar, A., Egert, E., Espinoza, W., Peebles, F., Quezada, R. & Serrano, M., 1971- Strata-bound copper sulphide deposits of Chile: *Soc Mining Geol Japan Spec Issue* 3: 252-260.
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H. & Alderton, D. H. M., 1985- *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie and Sons, Glasgow 239pp.
- Swenson, J. B. & Person, M., 2000- The role of basin-scale transgression and sediment compaction in stratiform copper mineralization: implications from White Pine, Michigan, USA. *Journal of Geochemical Exploration* 69-70: 239-243.
- Townley, B. K., Maksaev, V., Palacios, C., Lahsen, A. & Parada, M. A., 2000- Base and precious metal geochemistry of rock units of the mainland Aysén region, Chilean Patagonia. *Journal of Geochemical Exploration* 68: 21-46.
- Townley, B., Roperch, P., Oliveros, P., Tassara, A. & Arriagada, C., 2007- Hydrothermal alteration and magnetic properties of rocks in the Carolina de Michilla stratabound copper district, northern Chile. *Miner Deposita* 42: 771-789.
- Tristá -Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. & Ferraris, F., 2006- Re-Os isotope systematics for the Lince - Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Miner Deposita* 41: 99-105.
- Whitney, D. L. & Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229-272.
- Wilson, N. S. F. & Zentilli, M., 2006- Association of pyrobitumen with copper mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, central Chile. *International Journal of Coal Geology* 65:158- 169.

The Madan Bozorg, volcanic-hosted copper deposit, East Shahroud; an example of Manto type copper deposits in Iran

L. Salehi ^{1*}, I. Rasa ², S. Alirezai ³ & A. Kazemi Mehrnia ⁴

¹ Ph.D., Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

⁴ Ph.D., Parsi Kan Kav En. Co., Tehran, Iran

Received: 2015 February 25

Accepted: 2015 August 22

Abstract

The Madan Bozorg deposit is located in the Abbas Abad mining district, about 130 km east of Shahroud. The area is covered by a NE-SW trending belt of intermediate-mafic lava flows and pyroclastic materials, as well as interlayered sedimentary rocks. Eight copper deposits have been identified in the district. Based on the chemistry, the volcanic rocks can be classified as trachyandesite, trachyandesitic basalt and trachybasalt; the rocks display high potassium calc-alkaline to shoshonitic affinities and bear geochemical attributes characteristic of continental arc settings. The Madan Bozorg deposit is hosted in trachyandesite with porphyritic to megaporphyritic, glomeroporphyritic and amygdaloidal textures. Based on field observations, microscopic studies, Raman spectroscopy and XRD results, two types of alteration, regional and local, can be distinguished. The regional or background alteration, is comparable to a propylitic assemblage and occurs in mineralized and non-mineralized volcanic units. Local alteration associated with copper mineralization includes calcic, silicic, sericitic, chloritic, zeolitic and hematitic. Copper mineralization occurs as disseminated, vein-veinlet, replacement, stockworks and irregular open space fillings. Based on microscopic studies and EPMA data, chalcocite group minerals (chalcocite, djurleite, anilite, digenite and covellite) are the main ore minerals and are accompanied by subordinate bornite, pyrite and hematite. Secondary minerals include covellite, malachite, azurite, chrysocolla and goethite. Nonmetallic minerals are quartz, chlorite, epidote, calcite, and chalcedony. Based on fluid inclusion studies on coexisting quartz, homogenization temperatures are between 90 to 268°C with an average of 176°C. Salinities vary between 3.38 to 21.96 (average, 13.21) wt% NaCl eq. Fluid density varies between 0.8 to 1.1 g.cm⁻³. The depth of fluid inclusion trapping is estimated to be less than 200 meters, and ore formation occurred at pressures less than 50 bars. The host rocks, ore mineralogy, ore textures and structures, and fluid inclusions characteristics in Madan Bozorg deposit are similar to those reported from Manto type copper deposits in Mesozoic-Cenozoic volcanic belts in South America and elsewhere.

Keywords: Manto Type Copper, Madan Bozorg, Abbas Abad, Chalcocite, Cenozoic Volcanic, Fluid Inclusion.

For Persian Version see pages 93 to 104

*Corresponding author: L. Salehi; E-mail: salehi1006@gmail.com