الگوی تشکیل کانسار مس دوچیله، شرق میامی؛ بر پایه شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی

محبوبه ظفرزاده[۱]، فردین موسیوند[۲و*]، رمضان رمضانی اومالی[۳] و امیر مهدوی[۴]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲. دانشیار زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳. دانشیار زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
۴. استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

چکیده

کانسار مس دوچیله در ۷۲ کیلومتری شرق شاهرود، ۱۵ کیلومتری شرق شهر میامی و در کمربند آتشفشانی شمال ایران مرکزی واقع شده است. توالی چینه‌شناسی پهنه دربرگیرنده کانه‌زایی، حجم قابل توجهی از نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن می‌باشد و توسط نهشته‌های نئوژن و کواترنر به‌طور محلی پوشیده می‌شود. کانه‌زایی در امتداد گسل و شکستگی‌های با روند غالب NW-SE در داخل سنگ‌های بازالتی به‌صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده‌فضای‌خالی رخ داده است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده کانسنگ شامل کانی‌های اولیه مس خالص و هماتیت و کانی‌های ثانویه کوپریت، مالاکیت، گوتیت و هماتیت و کانی‌های باطله شامل کلسیت، زئولیت و آنالسیم می‌باشد. دگرسانی‌های موجود در سنگ میزبان شامل کلریتی، کربناتی و زئولیتی می‌باشد. بررسی ژئوشیمیایی نشان می‌دهد، بیشترین میزان مس و نقره در کانسار دوچیله به ترتیب برابر ۱/۹ درصد و چهار گرم در تن می‌باشد. براساس پژوهش‌های صحرایی، کانی‌شناسی و دگرسانی، کانی‌سازی مس در ناحیه دوچیله، در طی دیاژنز و دگرگونی تدفینی و به‌طور عمده در طی مرحله کوهزایی و چین‌خوردگی، در اثر ورود سیالات داغ کانه‌ساز در امتداد شکستگی‌های عمود بر روند محوری چین‌ها رخ داده است. کانسار مس دوچیله از نظر محیط زمین‌ساختی تشکیل، سنگ میزبان، بافت و ساخت، کانی‌شناسی، دگرسانی، کنترل‌کننده‌های کانه‌زایی و محتوای فلزی، بیشترین شباهت را با کانسارهای مس بازالتی یا تیپ میشیگان نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بالاآمدگی، تیپ میشیگان، دوچیله، کوهزایی، میامی.

مقدمه

گستره کانه دار دوچیله در استان سمنان در ۷۲ کیلومتری شرق شاهرود، ۱۵ کیلومتری شرق شهر میامی و در مختصات جغرافیایی″۴۶ ′۰۱ °۵۶ تا ″۲۵ ′۵۶ °۵۵ طول شرقی و ″۹ ′۲۳ °۳۶ تا ″۵۷ ′۲۳ °۳۶ عرض شمالی واقع شده است. این ناحیه از نظر زمین‌شناسی در کمربند آتشفشانی شمال ایران مرکزی قرار دارد. دسترسی به ناحیه از جاده شاهرود-میامی-عباس‌آباد میسر است (شکل ۱). در ناحیه شرق شاهرود و میامی اندیس‌ها و کانسارهای متعددی از مس در داخل سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-

* نویسنده مرتبط: mousivand@shahroodut.ac.ir

رسوبی ائوسن مثل کانسارهای عباس‌آباد، گریک و گورخان، نرتلویی و استغانی، دوچیله و توران (طائفی و همکاران، ۱۳۹۲، ۱۳۹۳؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ظفرزاده، ۱۳۹۷؛ ظفرزاده و همکاران، ۱۳۹۶) رخ داده است و آثار شدادی و سرباره‌های ذوب قدیمی گسترده در این ناحیه دیده می‌شود. هدف از این مقاله بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و عوامل کنترل‌کننده تشکیل و تمرکز ماده معدنی در کانسار دوچیله می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان کلید اکتشافی برای کشف ذخایر جدید در گستره شرق شاهرود مورد استفاده قرار گیرد.

روش مطالعه

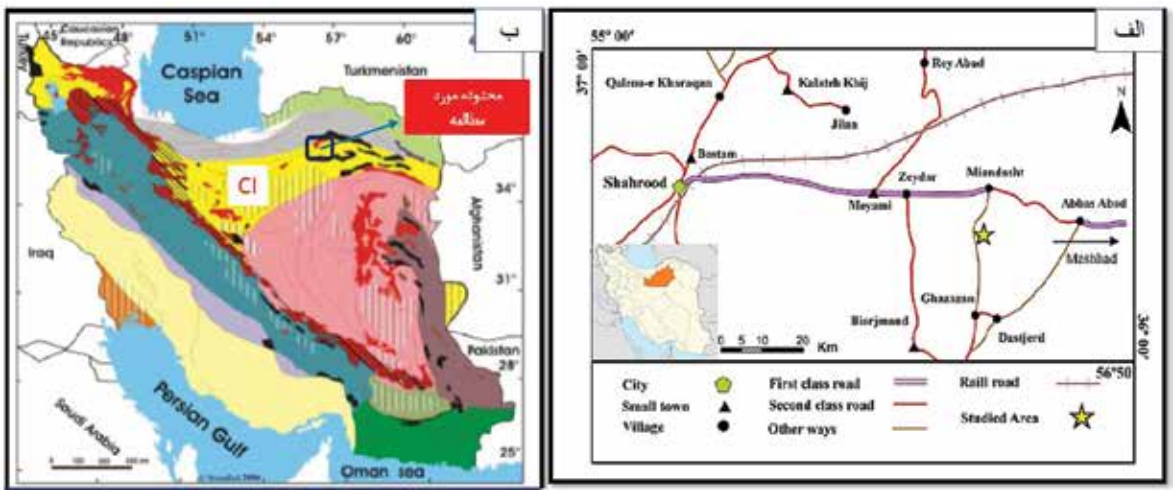
در این پژوهش بعد از بررسی و برداشت‌های صحرایی، پژوهش‌های پتروگرافی بر روی بیش از ۵۰ مقطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی برای شناخت بافت، ساخت و کانی‌شناسی مواد معدنی و سنگ‌های میزبان و نیز مطالعه پهنه‌های دگرسانی صورت گرفت. سپس، تعداد ۱۴ نمونه به‌منظور تعیین میزان عناصر کمیاب و عناصر نادر خاکی به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت پژوهش‌های مواد معدنی زرآزما و نیز تعداد چهار نمونه به روش پراش پرتوایکس به‌منظور شناسایی دقیق دگرسانی‌های ناحیه در آزمایشگاه شرکت تحقیقاتی کانساران بینالود آنالیز شد و سپس نتایج تمام پژوهش‌ها برای تشخیص الگوی رخداد کانه‌زایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

بحث

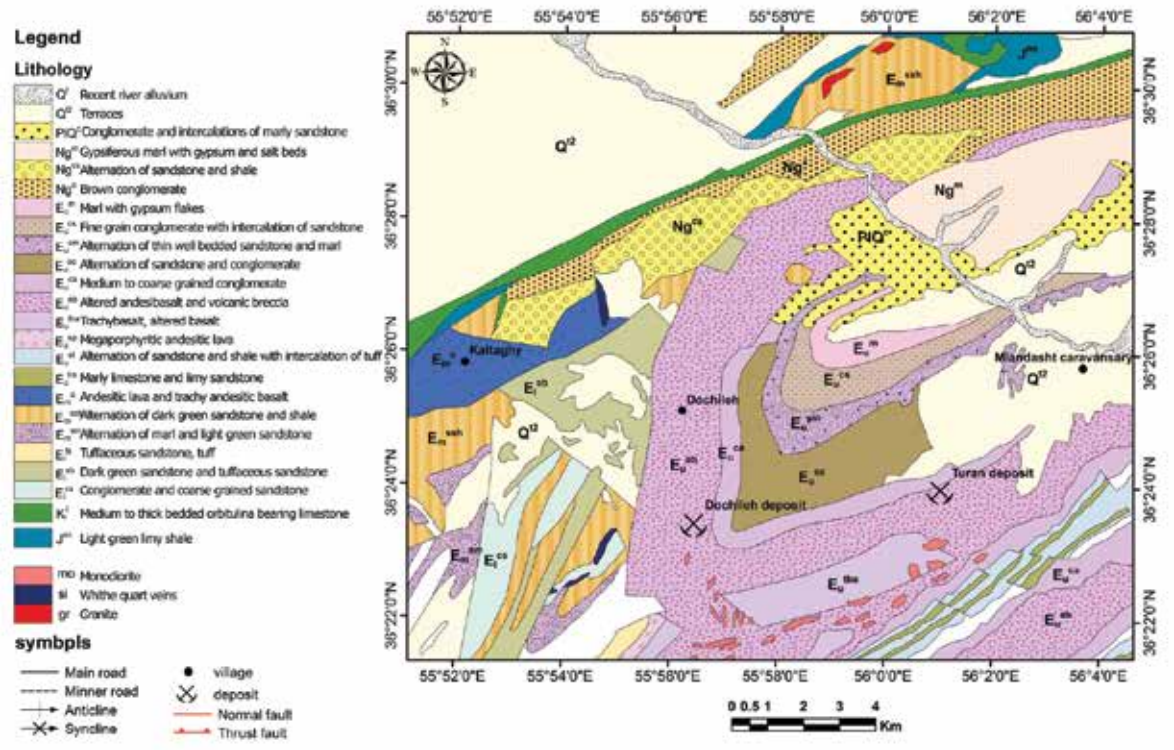
زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

ناحیه مورد مطالعه در منتهی‌الیه شمال شرق ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ میامی (امینی و همکاران، ۱۳۷۱) جای دارد. این گستره کانه دار در شرق و جنوب شرق شاهرود واقع شده و بخشی از شمال پهنه زمین ساختی ایران مرکزی (شکل ۱) و زیرپهنه سبزوار محسوب می‌شود و در آن توالی افیولیتی شمال سبزوار به سن کرتاسه بالایی و توالی‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن گسترش زیادی دارند. این پهنه از نظر زمین‌ساخت، ناحیه‌ای فعال است و در کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا قرار دارد. اوج فعالیت‌های ماگمایی در این گستره در بازه زمانی ائوسن گزارش شده است. ژئوشیمی سنگ‌های ماگمایی کرتاسه‌ی پسین و سنوزوئیک (ائوسن) نشان‌دهنده موقعیت تکتونیکی حاشیه قاره برای این ناحیه است (Takin، 1972؛ Berberian and Berberian، 1981؛ Sengor، 1984؛Mohajel and Fergusson، 2000؛Azizi and Jahangiri، 2008).

از لحاظ چینه‌شناسی، عمده برون‌زدهای موجود در این ناحیه شامل توالی آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن بالایی می‌باشد و به‌صورت ساختار ناودیسی به نام ناودیس دوچیله در ناحیه رخنمون دارند (شکل ۲). قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در ناحیه معدنی مربوط واحد شیل آهکی Jmt به سن ژوراسیک است و آهک‌های اوربیتولین‌دار



شکل ۱. الف) نقشه راه‌های دسترسی به ناحیه مورد مطالعه، ب) موقعیت منطقه مورد مطالعه در پهنه ساختاری ایران مرکزی (CI) (آقانباتی، ۱۳۸۳)

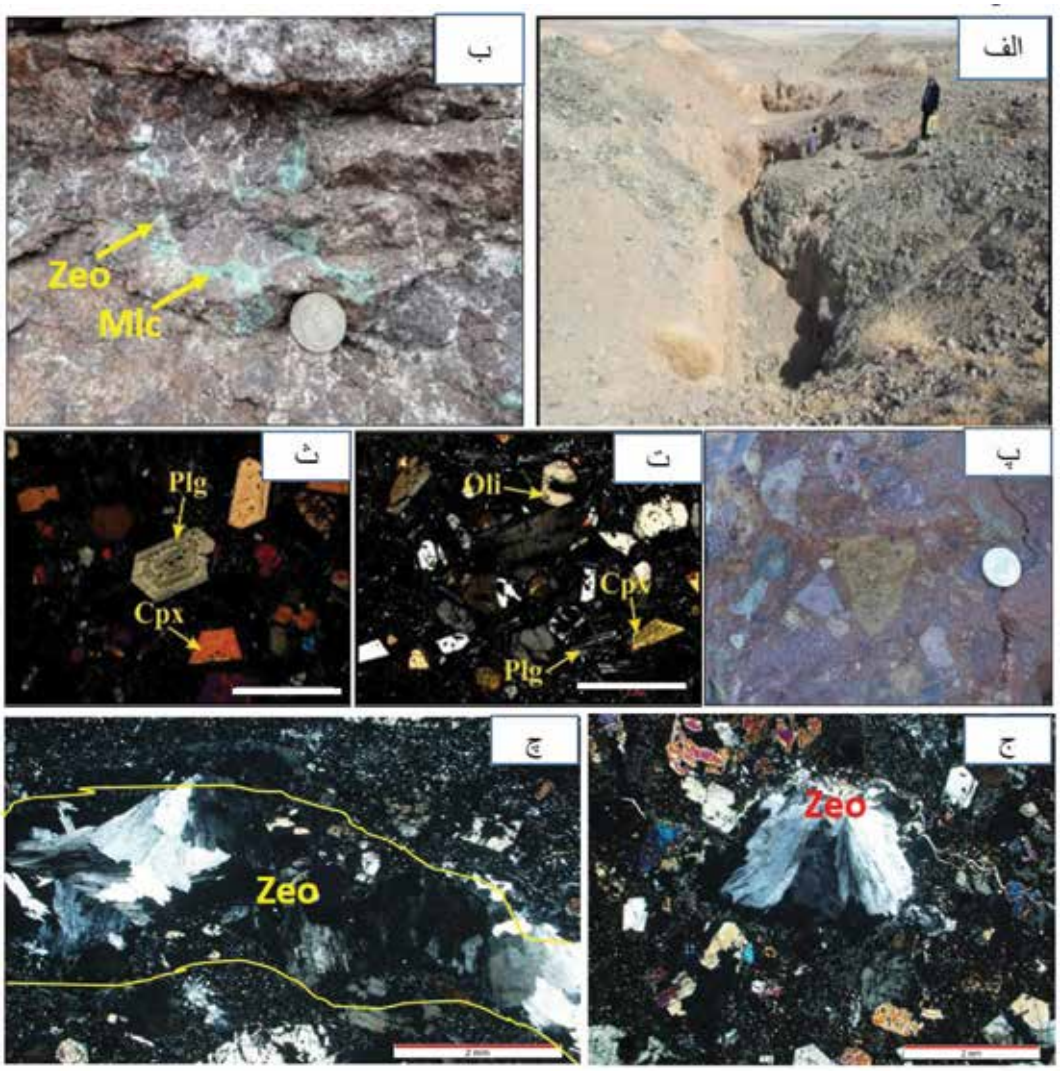


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه با تغییرات از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ میامی (امینی و همکاران، ۱۳۷۱)

Kll کرتاسه پایینی به‌صورت ناپیوستگی بر روی آن قرار دارد. پس از آن واحدهای رسوبی-آتشفشانی ائوسن قرار دارد و بیشترین رخنمون سنگی ناحیه را تشکیل می‌دهد. کانسار دوچیله درون واحدهای ائوسن بالایی تشکیل شده است که در ادامه توصیف واحدهای اصلی آنها ارائه می‌شود.

واحد E^{ab}_{u}: گسترش قابل توجهی دارد و یک آندزیت بازالت قهوه‌ای و سبزرنگ با بافت پورفیریتیک با زمینه میکرولیتیک با پورفیرهای پلاژیوکلاز (آندزین و لابرادوریت) و کلینوپیروکسن است و در بعضی موارد به یک برش با ترکیب آندزیتی تبدیل می‌شود. ضخامت واحد حدود ۱۳۵۰ متر است.

واحد گدازه (بازالت): در مشاهدات صحرایی با ریخت‌شناسی برجسته و تیره‌رنگ به همراه واحدهای آذرآواری دیده می‌شوند. این واحدهای سنگی در سطح تازه به رنگ خاکستری تیره و گاهی متمایل به قرمز قهوه‌ای تا سبز می‌باشند (شکل ۳). در مقاطع میکروسکوپی دارای بافت پورفیری و میکرولیتی پورفیری هستند که نشان‌دهنده سرد شدن ماگما در دو مرحله می‌باشد. پلاژیوکلازها به‌صورت درشت‌بلورهای خودشکل و با ماکل پلی‌سنتتیک مشاهده می‌شوند و در برخی موارد به کانی‌های کلسیت و سریسیت دگرسان شده‌اند. پیدایش پهنه‌بندی در کانی‌های سنگ آذرین به علت بر قرار نبودن تعادل کامل در خلال تبلور است و این پهنه‌بندی همگی در پلاژیوکلازها معمول‌تر است. همواره این حالت نشانه آهسته‌تر بودن سرعت ایجاد تعادل نسبت به‌سرعت تبلور می‌باشد (Shelly، 1993). واحدهای آتشفشانی ائوسن سنگ میزبان کانی‌سازی می‌باشند. کانه‌زایی اکثراً در بازالت‌های قهوه‌ای و سبز رنگ با بافت غالب پورفیریتیک رخ داده است (شکل ۳). این سنگ‌ها حاوی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن (اوژیت) و الیوین است و هماتیت، و کانی‌های اپک همراه با آن دیده می‌شود. کانی‌های ثانویه ناشی از دگرگونی تدفینی و دگرسانی نیز نظیر کلسیت و زئولیت و آنالسیم هستند که درز و شکاف و حفرات موجود در بازالت (امیگدال یا بازلت بادامکی) را پر کرده‌اند (شکل ۳). ایدنگزیتی شدن یکی از محصولات دگرسانی الیوین می‌باشد که یک شبه‌کانی قرمز رنگ حاوی اکسیدآهن سه ظرفیتی است.



شکل ۳. الف) نمایی از کارگاه شماره ۱ دوچیله در سنگ‌های بازالتی، ب) نمای نزدیک از سنگ میزبان بازالتی حاوی رگچه‌های زئولیتی (Zeo) آغشته به مالاکیت (Mlc)، پ) آگلومرا، ت، ث) تصاویر میکروسکوپی از بازالت‌های میزبان کانه‌زایی شامل پهنه‌بندی در پلاژیوکلاز و جانشینی کانی‌های اوپک به‌جای پیروکسن، ج) پرشدگی حفره توسط زئولیت، چ) رگچه زئولیتی داخل بازالت (مقیاس خطی در تصاویر برابر ۲ میلی‌متر است)

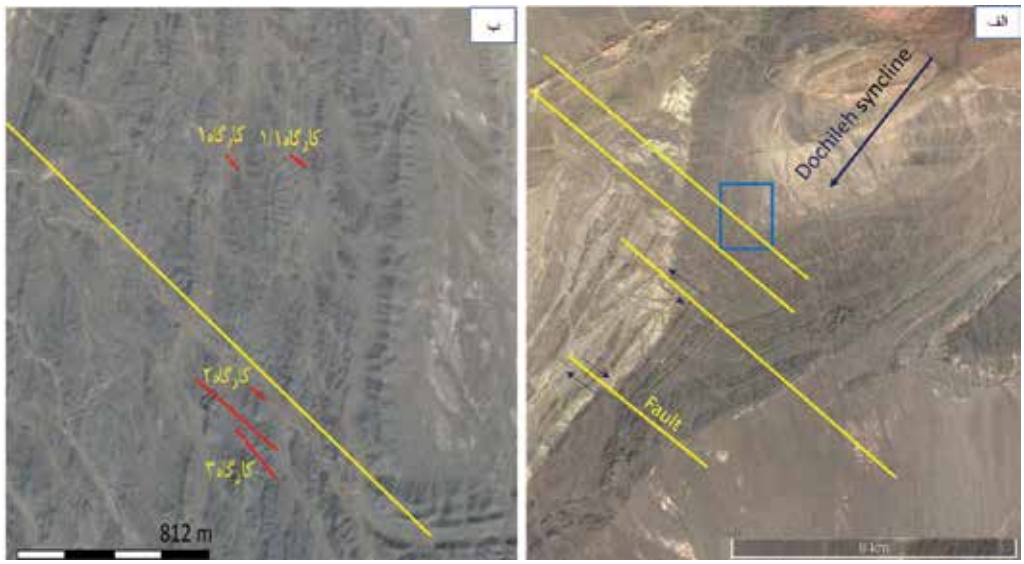
واحدهای آذرآواری (تـــوف و آگلومرا): توف‌ها در نمونه دستی به رنگ روشن متمایل به زرد و گاهی در اثر سیالات جوی به رنگ متمایل به قرمز دیده می‌شـــوند (شـــکل ۳). توف‌های ناحیه حاوی قطعات ســـنگی، کریستال، و شیشه می‌باشـــند و ترکیب ســـنگ شامل پیروکســـن، پلاژیوکلاز و کانی‌های کدر اســـت. آگلومرا سنگی اســـت که از به هم پیوستن قطعات گرد شـــده آذرآواری با ابعادی بیش از ۶۴ میلی‌متر که توسط یک ماتریکس از قطعات آذرین ریزبلور به هم متصل شده است، تشکیل شده‌اند (شکل ۳).

کانه‌زایی

در گســـتره معدنی دوچیله، سنگ‌هـــای توالی میزبان کانه‌زایی به ســـه بخش گدازه، آذرآواری و رســـوبی تقسیم می‌شـــوند و مجموعه گدازه‌های بازالتـــی میزبان کانه‌زایی می‌باشـــند که بخش اعظم رخنمون ناحیـــه مورد بررسی را تشکیل می‌دهند (شکل ۲). فعالیت‌های معدنکاری شدادی و جدیدتـــر به‌صورت کارگاه‌های دنباله‌رو زیرزمینی در داخل ســـنگ‌های بازالتی دیده می‌شوند (شـــکل ۳). با توجه به پژوهش‌های صحرایی و آزمایشـــگاهی کانی‌ســـازی به‌طور

عمده به‌صـــورت رگه-رگچه‌ای و پرکننـــده فضای خالی در داخل واحدهای گدازه و منطبق با امتداد گســـل‌ها با روند غالب NW-SE و درزه و شکستگی‌های مربوطه در ناودیس دوچیله تشکیل شده است (شکل ۴).

بر پایه همین پژوهش‌ها کانه‌های اصلی تشـــکیل‌دهنده کانســـار به دو صورت اولیه مس خالـــص و ثانویه کوپریت و مالاکیت می‌باشـــد. مس طبیعی همـــراه زئولیت، کلریت و کلسیت تشکیل شده است. سنگ میزبان کانه‌زایی در ناحیه واحد E^{ab}_{u} با ترکیب آندزی‌بازالت و برش ولکانیکی اســـت. آثار عملیات اکتشافی در منطقه دوچیلـــه، محدود به حفـــر گمانه‌ها و حفر ترانشه‌هایی است که در سال‌های اخیر انجام شده‌اند، هرچند که کارگاه‌های قدیمی شدادی متعددی در ناحیه دوچیله دیده می‌شوند. طول ترانشه‌ها از ۴ تا ۵۰ متر و عرض آنها از ۱ تا ۲/۵ متر متغیر است. عیار مس در رگه‌های کانه دار از ۰/۶ تا ۵/۱۱ درصد متغیر است.



شکل ۴. الف) موقعیت ناحیه دوچیله (مستطیل) و گسل‌های ناحیه‌ای در ناودیس دوچیله، ب) موقعیت گسل اصلی (زرد) و گسل‌های کانه دار (قرمز) و کارگاه‌های معدنی قدیمی در ناحیه دوچیله

دگرسانی

میـــزان دگرسانی در توالی آتشفشانی-رسوبی محدوده مورد مطالعه کم است. بر اساس بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی مجموعه دگرسانی‌ها در ناحیـــه مورد مطالعه عبارتند از: ۱) دگرســـانی کلریتی، ۲) دگرســـانی کربناتی، ۳) دگرســـانی آنالســـیم-زئولیتی، ۴) دگرســـانی هماتیتی (شکل ۵). پهنه‌بندی دگرسانی بیشتر بدین‌صورت است که از مرکز رگه کانه‌دار به سمت اطراف به ترتیب دگرسانی‌های زیر مشاهده می‌شود: الف) دگرسانی زئولیتی-کربناتی کانه‌دار، ب) دگرسانی کلریتی و ج) دگرسانی هماتیتی.

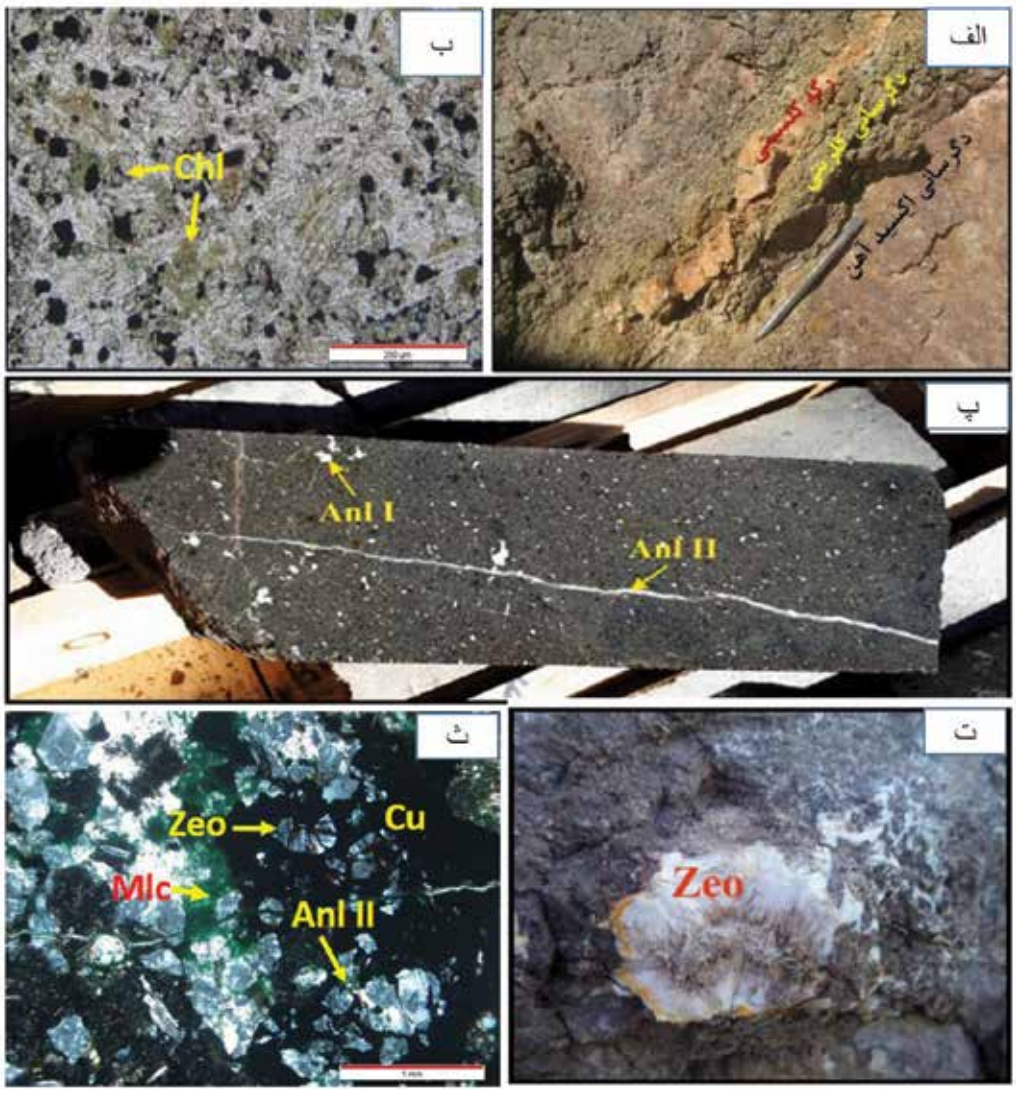
دگرسانی کلریتی: در بعضی از قسمت‌های کانسار، هاله کلریتی در درون سنگ‌های بازالت میزبان دیده می‌شود، که معرف دگرسانی کلریتی می‌باشد (شـــکل ۵). از ویژگی‌های بارز این دگرسانی، تغییر رنگ متمایل به رنگ سبز سنگ‌ها است. در اثـــر این دگرسانی در واحدهای رخنمون یافته، کانی‌های فرومنیزین (الیوین و پیروکســـن) به کانی کلریت دگرسان شده‌اند.

دگرسانی کربناتی: کربناتی شدن یک دگرسانی معمول برای تشکیل انواع کانی‌های کربناته است و رایج‌ترین آنها در ناحیه مورد مطالعـــه کلسیت می‌باشد. تشکیل کلسیت در گســـتره‌ی دمایی وسیع صورت می‌گیرد و در سنگ‌هایی با تخلخل و نفوذپذیری کم که در حضور سیالات غنی از CO_2 جانشین کانی‌های کلسیم‌دار (ماننـــد پلاژیـــوکلاز کلســـیم‌دار، زئولیـــت و اپیـــدوت) و شیشـــه‌هـــای آتشفشانی می‌شود. کربناتی شدن در این ناحیـــه عمدتاً با وجود رگه-رگچه‌های کلسیت در امتداد شکستگی‌ها و همراه با ماده معدنی

مشاهده می‌شـــود (شکل ۵) که به‌ندرت حاوی کالکوپیریت اولیه، کالکوسیت ثانویه و مالاکیت هستند.

دگرسانی آنالسیم-زئولیتی: این دگرسانی زیر مجموعه‌ای از دگرســـانی پروپیلیتیک اســـت و کانی‌های شاخص در آن عبارتند از مورونیت، کلینوپتیولیت، لامونتیت، هیولاندیت و آنالســـیم می‌باشد. این دگرســـانی در ناحیه مورد مطالعه در سنگ‌ها به‌وفور مشاهده می‌شـــود (شکل ۵) و در آنالیز پراش پرتوایکس نیز کانی آنالســـیم مشخص شده است. در ناحیه مورد مطالعه دو نسل از کانی‌های کلسیتی و آنالسیم-زئولیتی وجود دارد، نوع اول از ابتدا در سنگ میزبان بازالتی وجود داشته و اثری از کانه‌زایی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود و اغلب به‌صورت بادامک‌ها مشاهده می‌شوند، ولی در نوع دوم آثار کانه‌زایی قابل تشـــخیص است و بیشتر به‌صورت رگه‌ای مشاهده می‌شوند (شکل ۵).

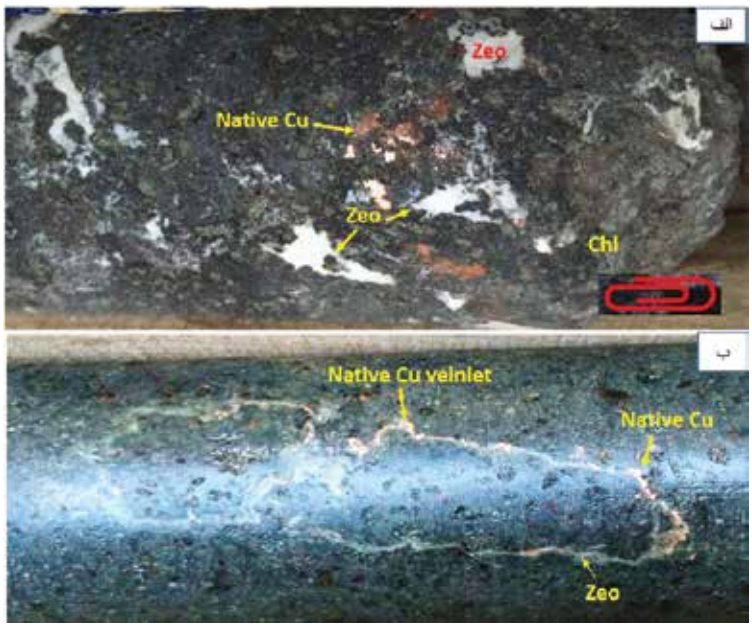
دگرســـانی هماتیتی: هماتیت نسل اول و دوم محصول دگرســـانی مگنتیت و کانی‌های مافیک در اثر برخورد سیال کانه‌ساز مس‌دار بوده که همواره به‌صورت تیغه‌ای و شکل‌دار اســـت. هماتیت نســـل ســـوم به همراه گوتیت و لیمونیت محصول هوازدگی کانی‌های مافیک و مگنتیت هستند که بی‌شکل بوده و بیشتر در بخش‌های سطحی دیده می‌شوند.



شـــکل ۵. الف) دگرســـانی‌های کلریتی و اکسید آهن (هماتیتی) در اطراف رگه کلســـیتی کانه‌دار، ب) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی کلریتی در ســـنگ بازالتی میزبان، پ) دگرسانی زئولیتی که حاوی دونسل زئولیت (آنالســـیم) می‌باشد، ت) زئولیت در بازالت‌های میزبان، ث) تصویر میکروسکوپی از آنالسیم و زئولیت همراه مس طبیعی

پژوهش‌های کانی‌شناسی و بافت و ساخت

به‌منظور انجام مطالعات بیان شـــده، از ماده‌ی معدنی و سنگ‌های میزبان، تعـــداد ۳۲ مقطع نازک و پنج مقطع نازک صیقلی تهیه شده اســـت. در مطالعات کانی‌شناسی، به‌منظور تشخیص برخی کانی‌ها، تعداد چهار نمونه به روش پراش پرتوایکس مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش‌ها میکروســـکوپی کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسار شامل کانی اولیـــه مس خالص، مگنتیت و هماتیـــت، کانی‌های ثانویه کوپریـــت، مالاکیـــت، گوتیت، هماتیت و لیمونیت اســـت (شـــکل ۶). قابل ذکر اســـت که به‌صـــورت موضعی گاهی رگه‌های کلســـیتی حاوی مقادیر ناچیزی کالکوپیریت اولیه و کالکوســـیت ثانویه و مالاکیت نیز مشاهده می‌شود که در مقایســـه با کانه‌زایی مس طبیعی فراوانـــی ناچیزی دارند. همچنیـــن کانی‌های باطله عبارتند از کلســـیت، زئولیت و آنالســـیم و کلریت. مس خالص با رنگ مسی تا دارچینی در ســـه سینه‌کار به‌صورت کانی‌ســـازی اصلی و اولیه مشاهده می‌شود. در مقطع میکروســـکوپی، مس طبیعی به‌صورت لکه‌های بی‌شـــکلی دیده می‌شود و از حاشیه توسط کوپریت جانشین شده است (شکل ۷).



شـــکل ۶. تصاویری از کانه‌ها و بافت و ســـاخت ماده معدنی در ناحیه مورد مطالعه، الف) به‌صورت بافت دانه پراکنده و پرکنند فضای خالی و ب) بافت رگچه ای که حاوی کانی‌های مس طبیعی (Cu)، زئولیت (Zeo) و کلریت (Chl) می‌باشد

براساس بررسی‌های مقاطع میکروسکوپی به نظر می‌رسد دو عامل سبب احیا مس خالص و ته‌نشست آن شده است: الف) مس خالص که در اثر واکنش سیال کانه‌ساز مس‌دار با مگنتیت احیا شـــده و در نتیجه مگنتیت به هماتیت تبدیل شـــده است (شکل ۷) و حتی گاهی مس طبیعی در شکاف مگنتیت مشاهده می‌شود و ب) کانی مافیک مثل پیروکسن به خاطر داشـــتن آهن فرو ســـبب احیا مس به‌صورت مس خالص شده است.

مگنتیت در کانسار دوچیلـــه در مقیاس نمونه دستی مشاهده نشده اما در نمونه‌های XRD و مقاطع میکروسکوپی قابل مشـــاهده اســـت و بر اســـاس روابط هم رشدی کانی مگنتیت با ســـایر کانی‌های سنگ‌ساز موجود در سنگ‌های آتشفشانی به نظر می‌رسد این کانی به‌صورت اولیه ماگمایی در طی ولکانیسم تشکیل شده است و ارتباطی با کانه‌زایی ندارد، اما در نتیجه اکسیداســـیون ناشی از کانه‌زایی و نیز هوازدگی بعدی به هماتیت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۷).

کوپریت در نمونه دستی به‌صورت قهوه‌ای مایل به قرمز، قرمز، خاکستری سربی تا سیاه مشاهده می‌شود. در مقطع میکروســـکوپی، کوپریت به‌صورت بی‌شکل دارای ساخت و بافت رگه-رگچه‌ای و شـــکافه پرکن می‌باشد (شکل ۷). در

برخی از نمونه‌ها و مقاطع کوپریت جانشین مس طبیعی شده است. مالاکیت در نمونه دستی به رنگ سبز و در مقاطع صیقلی به رنگ سبز با انعکاس کم، آنیزوتروپی و انعکاس داخلی قوی به‌صورت ثانویه با بافت رگه-رگچه‌ای، شکافه پرکن و پراکنده می‌باشد.

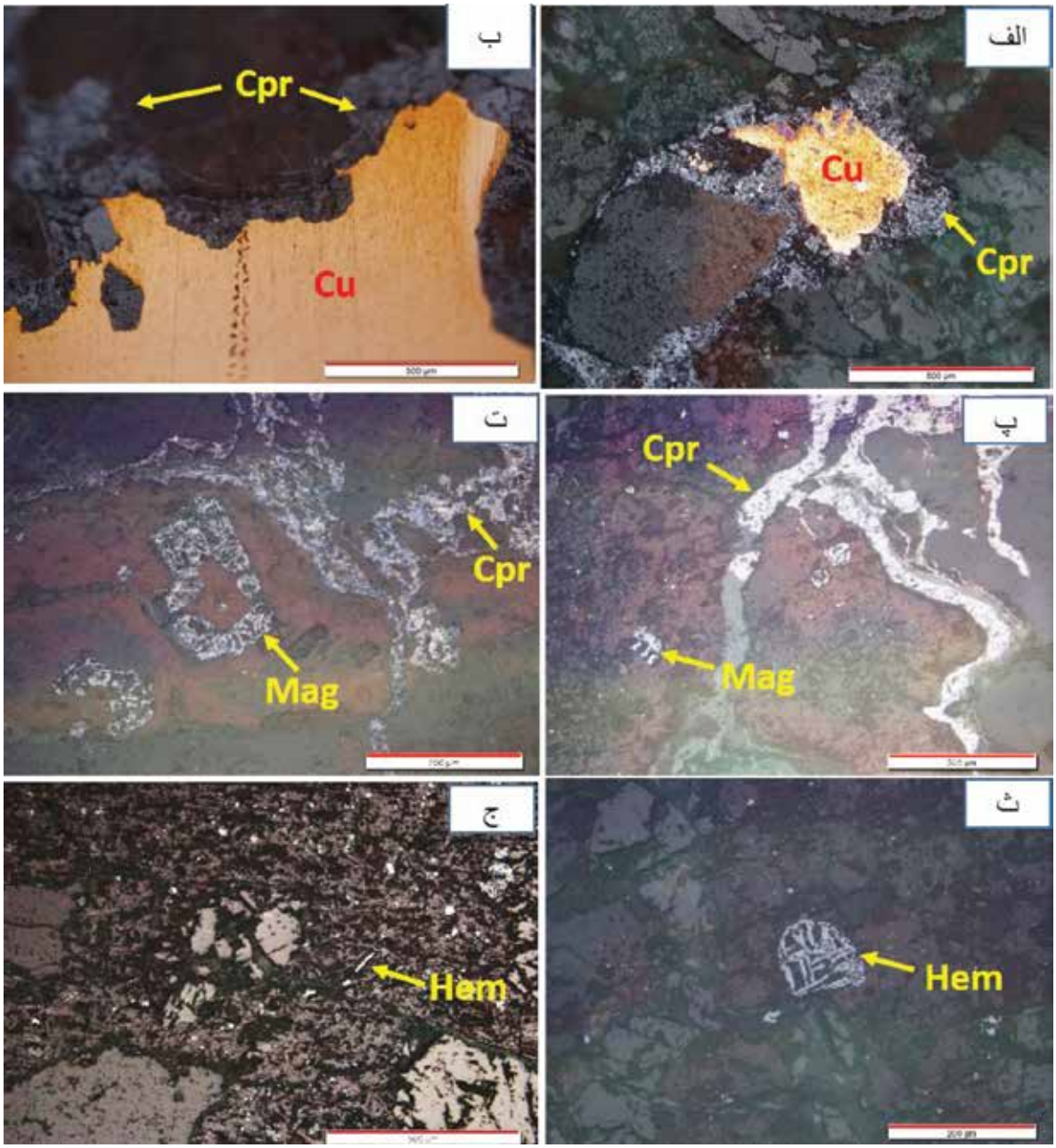
کلسیت، زئولیت و آنالسیم از جمله کانی‌های باطله و محصول دگرسانی موجود در کانسار مس دوچیله می‌باشند، که بیشتر به‌صورت حفره‌پرکن دیده شده است. آنالسیم از زیرگروه خانواده زئولیت‌ها است. این کانی در نمونه دستی به رنگ سفید، زرد و دارای جلای شیشه‌ای است. زئولیت‌ها بیشتر به‌صورت شعاعی مشاهده شده است. شواهد نشان‌دهنده دو نوع از این کانی‌ها است، به‌طوری‌که گروه اول در متن سنگ میزبان به‌صورت بادامک‌ها دیده می‌شود، درحالی‌که گروه دوم به‌صورت پرکننده فضای خالی و رگه-رگچه‌ای هم‌زمان با کانه‌زایی به وجود آمده است.

مهم‌ترین ساخت‌ها و بافت‌های مشاهده شده در کانسار دوچیله عبارتند از رگه و رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و جانشینی. بافت رگه-رگچه‌ای از جمله بافت‌های مشاهده شده در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد. کانی‌هایی که به‌صورت رگه-رگچه‌ای مشاهده می‌شوند شامل مس، کوپریت، مالاکیت و کانی‌های باطله مثل کلسیت و زئولیت است که در امتداد درزه و شکاف‌ها تشکیل شده‌اند. محلول‌های گرمابی هنگام عبور از مجرای گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و یا فضای بین قطعات سنگ‌های آذرآواری، در فضاهای خالی و حفرات مواد خود را برجای می‌گذارند و بافت پرکننده فضای خالی را تشکیل می‌دهند. این نوع بافت در کانسار مس دوچیله به‌وفور یافت می‌شود که کانی‌هایی از قبیل مس طبیعی و کوپریت و مالاکیت درز و شکاف‌ها و همچنین فضاهای خالی بین ذرات سنگ میزبان کانه‌زایی را پر کرده است. در کانسار مس دوچیله مگنتیت و کانی‌های فرومنیزین به هماتیت، گوتیت و لیمونیت تبدیل شده است. در نمونه دستی و میکروسکوپی کوپریت جانشین مس طبیعی شده است (شکل ۷). توالی پاراژنزی کانی‌ها، و بافت و ساخت ماده معدنی در کانسار مس دوچیله در شکل ۸ نشان داده شده است.

ژئوشیمی پهنه‌های کانه‌دار

برای تعیین میزان عناصر اصلی و فرعی و استفاده از نتایج آن‌ها برای تعبیر و تفسیر ژئوشیمیایی تغییرات عناصر در سنگ‌های دربرگیرنده ماده معدنی و کانسنگ مس و تعیین الگوی رخداد کانسار، تعداد ۱۴ نمونه از بخش‌های مختلف ناحیه مورد مطالعه انتخاب و برای تجزیه به روش ICP-MS به آزمایشگاه زرآزما ارسال شده است. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌ها برای عناصر کمیاب و نادر خاکی به‌صورت قسمت در میلیون می‌باشد. بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد تغییرات عناصر در رگه کانه‌دار، پهنه دگرسانی و سنگ میزبان کمتر دگرسان و تازه کارگاه‌های مختلف در کانسار دوچیله مشابه می‌باشد، بنابراین، در این مقاله به‌عنوان نمونه، تنها نمودارهای تغییرات عناصر در کارگاه ۱ دوچیله در شکل ۹ نشان داده شده است. براساس داده‌های ژئوشیمیایی، ارزشمندترین عناصر موجود در کانه‌زایی دوچیله، مس و نقره هستند. میزان مس در کانسار دوچیله به ۱/۹ درصد می‌رسد. بیشترین میزان نقره در کانسار دوچیله برابر چهار گرم در تن می‌باشد. بیشترین میزان نقره (۴ppm) در کارگاه ۱ دوچیله مربوط به پهنه دگرسانی اطراف رگه کربناتی کانه‌دار است (شکل ۹). در این کارگاه بیشترین میزان عناصر مس و سرب نیز به ترتیب برابر ۱۹۱۳۵ و چهار گرم در تن است و مربوط به پهنه دگرسانی هستند (شکل ۹).

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد، عناصر نقره، مس و سرب در پهنه دگرسان و اطراف رگه کربناتی غنی‌شدگی دارند درحالی‌که عناصر دیگر شامل روی، کبالت، آهن و منگنز در پهنه دگرسان تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۹). به نظر می‌رسد عناصر مس، نقره و سرب توسط سیال کانه‌ساز به سنگ بازالتی میزبان افزوده شده و در پهنه دگرسانی نهشته شده‌اند اما سایر عناصر شسته شده و بنابراین نسبت به سنگ میزبان تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۹). براساس بارنز (Barnes، 1979) غنی‌شدگی مس، نقره و سرب در پهنه دگرسانی می‌تواند به دلیل تحرک کمتر این عناصر نسبت به عناصر تهی‌شده مثل روی و منگنز باشد.



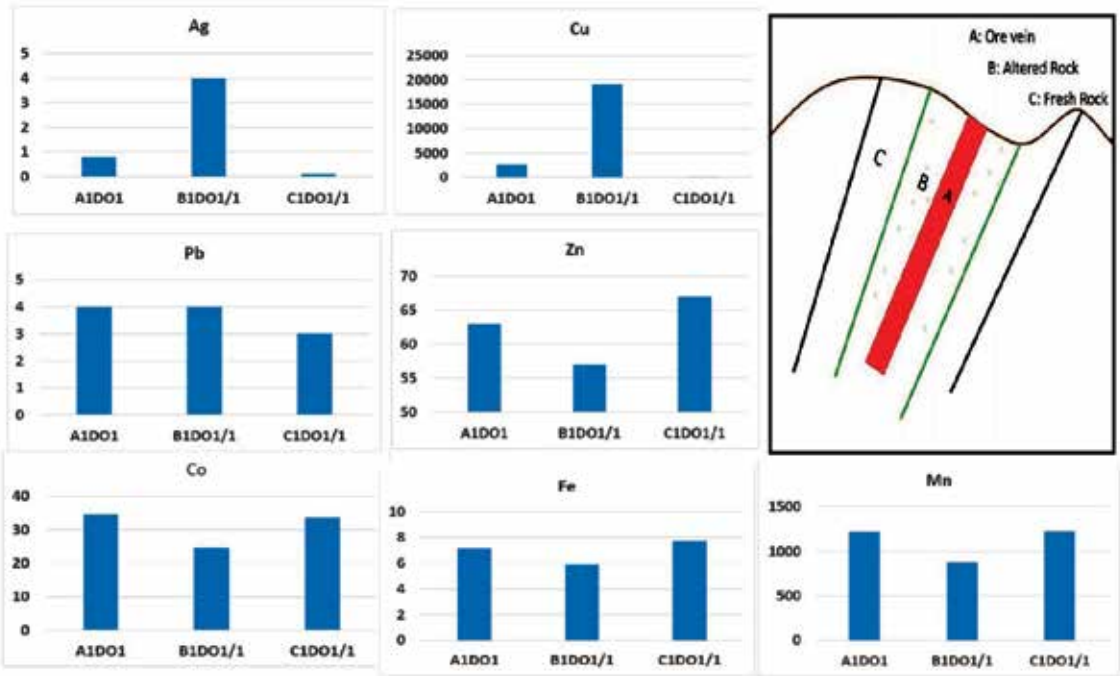
شکل ۷. الف، ب) تصاویر میکروسکوپی از مس طبیعی (Cu) که توسط کوپریت (Cpr) جانشین شده است، پ، ت) تصویر مگنتیت (Mt) در محل کانه‌زایی مس طبیعی که به کوپریت تبدیل شده است. ث) تبدیل شدن کامل مگنتیت به هماتیت (Hem)، ج) تیغه هماتیتی شکل گرفته در محل کانه‌زایی

الگوی تشکیل و تیپ کانه‌زایی

براساس مطالعات و مشاهدات صحرایی، شواهد زمین‌ساخت، مشاهدات کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی، مراحل زیر را می‌توان برای تحولات زمین‌شناسی کانه‌زایی مس در ناحیه در نظر گرفت: الف) فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی، در ائوسن باعث ایجاد رژیم کششی در بخش‌های شمالی پهنه ایران مرکزی و تشکیل حوضه‌های فروافتاده وسیع و نسبتاً عمیق شده است. در این حوضه‌ها فوران‌های مکرر آتشفشانی با ماهیت بازالتی و آندزیت بازالتی صورت می‌گیرد، که میزبان کانه‌زایی عنصر مس می‌باشند. به اعتقاد قاسمی و رضایی (Ghasemi and Reazei، 2015) و ابراهیمی و پادیار (۱۳۹۴)، محیط

Minerals \ Stages		Pre-mineralization (volcanism)	Hypogene mineralization: Diagenesis / Burial metamorphism	Hypogene mineralization: Orogeny/uplift	Supergene/ weathering
Ore minerals	Magnetite	—	—		
	Native copper		—	—	
	Hematite		—	—	
	Chalcopyrite			—	
	Cuprite				—
	Chalcocite				—
	Malachite				—
	Goethite				—
Alteration minerals	Zeolite		—	—	
	Calcite		—	—	
	Chlorite		—	—	
	Quartz		—	—	
Textures and structures	Vein-veinlets			—	
	Disseminated		—	—	
	Open space fillings		—	—	
	Replacement				—
	Colloform				—

شکل ۸. توالی پاراژنزی کانی‌ها، بافت و ساخت ماده معدنی در کانسارهای مس دوچیله



شـــکل ۹. نمودارهای تغییرات عناصر در رگه کانه دار (A)، پهنه دگرســـانی (B) و سنگ میزبان کمتر دگرسان و تازه (C) در کارگاه ۱ دوچیله (میزان آهن برحسب درصد وزنی و میزان بقیه عناصر برحسب ppm می‌باشد)

تکتونیکی تشکیل توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن در ناحیه عباس‌آباد-داورزن، از نوع کمان آتشفشانی حاشیه قاره است، که ادامه آن به سمت غرب، توالی میزبان کانسار مس دوچیله را شامل می‌شود، ب) در مرحله دیاژنز و دگرگونی تدفینی، آب‌های فسیل گرم شده و در هنگام مهاجرت به افق‌های بالاتر، با بازالت‌های توالی میزبان واکنش داده و زئولیت‌های نسل اول به‌همراه کلسیت به‌خصوص به‌صورت پرکننده حفره‌های بادامکی شکل می‌گیرد. در این مرحله شاید کانه‌زایی مس به‌صورت کم عیار همراه زئولیت نسل اول رخ داده است. پ) در مرحله بالاآمدگی و چین‌خوردگی (کوهزایی) در منطقه، سیالات شور و اکسیدان حوضه‌ای گرم شده و سپس با ایجاد گسل‌ها و شکستگی‌های ناشی از ادامه فعالیت‌های تکتونیکی، شرایط لازم برای رسیدن سیالات به قسمت‌های بالاتر توالی فراهم می‌شود. البته غیر از سیالات حوضه‌ای شاید آب‌های جوی پایین‌رونده گرم شده نیز در کانه‌زایی می‌توانند نقش داشته باشند (Brown، 2006). سیالات شور سرشار از کلر با چرخش درون پهنه‌های گسلی و برشی، مس، نقره، روی، سرب و برخی فلزات دیگر را به‌صورت کمپلکس‌های کلریدی از سنگ‌های مسیر و به‌ویژه سنگ‌های بازالتی شسته و با حرکت به سمت بالا در داخل فضاهای گسلی با روند غالب NW-SE ته نشست نموده است. تمرکز عمده عنصر مس و کانه‌زایی به‌صورت رگه-رگچه‌ای و حفره‌پرکن همراه با دگرسانی عمده کلریتی، کلسیتی و زئولیتی (نسل دوم) بوده است. عامل احیاء مس در سیال کانه‌ساز، کانی‌های مگنتیت و کانی‌های مافیک مثل پیروکسن موجود در سنگ‌های آتشفشانی است. در واقع سیال کانه‌ساز مس‌دار با برخورد با سنگ‌های آتشفشانی، کانی‌های مافیک و مگنتیت را اکسید کرده، که نتیجه آن احیاء مس به‌صورت خالص بوده است. دلیل اصلی نبود تشکیل کانی‌های سولفیدی، کمبود گوگرد در مکان ته‌نشست می‌باشد. به اعتقاد بورنهورست و لانکتون (Bornhorst and Lankton، 2009) کمبود گوگرد ناشی از گاززدایی گوگرد گدازه‌ها در زمان نهشته شدن بوده است. اکسیداسیون آهن فرو در کانی‌های مافیک و به‌ویژه مگنتیت طبق فرمول $Fe_3O_4+CuCl^- = Cu^0+Fe_2O_3$ موجب رخداد مس طبیعی و گسترش دگرسانی هماتیتی شده است. قابل ذکر است که کانه‌زایی مس خالص در ناحیه میشیگان آمریکا نیز در مرحله فشارشی رخ داده است (Bornhorst et al.، 1988). کانه‌زایی مس در ناحیه دوچیله نیز در مرحله فشارشی و چین و گسل خوردگی رخ داده است. ت) نهایتاً در مرحله اکسیداسیون، واکنش‌های هوازدگی شیمیایی سبب تبدیل مس طبیعی به کانی‌های ثانویه کوپریت و مالاکیت و مجموعه کانی‌های اکسیدی می‌شوند.

به‌طورکلی، با توجه به گسترش زئولیت در ناحیه و همراهی آن با کانه‌زایی، قطعاً دیاژنز و دگرگونی تدفینی در کانه‌زایی نقش داشته و از طرف دیگر با توجه به گسترش کانه‌زایی در پهنه‌های گسلی قطع کننده چین خورگی‌ها به نظر می‌رسد بخش مهمی از کانه‌زایی در حین و مراحل پایانی کوهزایی رخ داده باشد.

با توجه به شواهد صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی و مقایسه کانسار مس دوچیله با انواع تیپ‌های کانسارهای مس، این کانسارها با سه تیپ دارای شباهت‌های قابل تأمل هستند: ۱) ذخایر نوع میشیگان، ۲) ذخایر نوع آتشفشانی-لایه‌های سرخ و ۳) ذخایر نوع مانتو. ذخایر مس نوع آتشفشانی-لایه‌های سرخ و مانتو همواره غنی از سولفید هستند (Carrillo-Rosua et al.، 2014؛ Kirkham، 1996). اما ذخایر مس میشیگان غنی از مس طبیعی می‌باشند. کانه‌زایی مس دوچیله به علت کانی‌شناسی ساده متشکل از مس طبیعی و برخی ویژگی‌های دیگر مثل سنگ‌های میزبان و همراه، بیشترین شباهت را با نوع میشیگان یا کویناوی[1] (Brown، 2006؛ Bornhorst and Mathur، 2017) نشان می‌دهند (جدول ۱).

کانه‌زایی‌های مس با میزبان آتشفشانی با سن‌های گوناگون در ایران و جهان وجود دارد و ویژگی‌های کانه‌زایی مس دوچیله با برخی از آنها مقایسه شده است (جدول ۲). در ایران بسیاری از این کانسارها در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن رخ داده‌اند. البته کانسارهای مس با میزبان آتشفشانی در ایران اغلب غنی از سولفید و از نوع مانتو هستند مثل کانسارهای مس عباس‌آباد شاهرود (صالحی و همکاران،

1. Keweenawan

۱۳۹۴) و مس آبگاره (مهابادی و فردوست، ۱۳۹۸). علاوه بر دوچیله تعداد کمی از آنها از جمله گورخان، دارهند، قبله بولاغ و دهنه (بهزادی، ۱۳۷۳؛ طائفی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Nezafati et al., 2006؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۸) غنی از مس خالص و از نوع میشیگان هستند. قابل ذکر است کانه‌زایی مس خالص به‌صورت تیپ میشیگان در اثر تدفین برخی کانسارهای سولفیدی نیز رخ داده است مثل کانسار گرماب پایین (طاشی و همکاران، ۱۳۹۵) و سه بندون (حمامی پور بارنجی و همکاران، ۱۴۰۱). ذخایر مس خالص خیلی کم و به‌ندرت تشکیل می‌شوند زیرا محلول‌های فقیر از گوگرد غیرمعمول هستند (Wang et al., 2008). براساس تقسیم‌بندی Cornwall (1936)، انواع کانه‌زایی مس خالص که در محیط‌های مختلف تشکیل شده‌اند عبارتند از: ۱) مس در گدازه‌های آتشفشانی بازالتی، ۲) مس در توده‌های نفوذی مافیک نیمه عمیق، ۳) مس در توده‌های نفوذی اولترامافیک، ۴) مس در سنگ‌های رسوبی تخریبی، ۵) مس در کانسنگ‌های پهنه غنی شده یا سوپرژن بر روی کانسارهای سولفیدی و ۶) مس در باتلاق‌های جدید.

براساس مطالعات انجام شده بر روی ناحیه مطالعاتی و حضور مس طبیعی و نیز ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و سنگ میزبان، و دگرسانی‌های زئولیتی، کربناتی و کلریتی، کانی‌سازی در کانسار دوچیله بیشترین شباهت را با کانی‌سازی مس نوع با میزبان گدازه‌های آتشفشانی بازالتی نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه برخی ویژگی‌های کانسار دوچیله با کانسارهای نوع مانتو، آتشفشانی-لایه‌های سرخ و میشیگان

ویژگی کانسار	کانسار دوچیله	مانتو	مس آتشفشانی-لایه‌های سرخ	میشیگان
موقعیت جغرافیایی	ایران (شرق شاهرود)	شیلی و آمریکای لاتین	مونت الکساندر (کانادا)	میشیگان (جزیره کویناو ایالات متحده)
محیط تکتونیکی	کمان حاشیه قاره‌ای	کمان حاشیه قاره‌ای	بازالت‌های کمانی	ریفت درون قاره‌ای
سری ماگمایی	کالک‌آلکالن	کالک‌آلکالن	کالک‌آلکالن	سری تولئیتی
سنگ میزبان و همراه	گدازه با ترکیب بازالت، آندزیت-بازالت	آندزیت و بازالت	بازالت‌های اسپیلیتی شده	بازالت آمیگدالوبیدال با میان‌لایه‌های کنگلومرایی
سن	ائوسن	ژوراسیک	سیلورین	پالئوزوییک
کانی‌شناسی	مس طبیعی، کوپریت، مالاکیت	مالاکیت، کالکوسیت، بورنیت، کالکوپیریت، کوپریت، کریزوکولا و مس طبیعی	بورنیت، مس طبیعی، کالکوپیریت، دیژنیت، کالکوسیت، کولیت و مالاکیت	مس طبیعی، دیژنیت و کرولیت، کوپریت، مالاکیت، کاکوسیت، نقره طبیعی، دیژنیت
باطله	کلسیت، زئولیت، آنالسیم، کلریت و هماتیت	کلریت، آلبیت، کوارتز و اپیدوت	کلسیت، کوارتز، هماتیت و کلریت	کلسیت، اپیدوت، کلریت و هماتیت
دگرسانی	کلریتی، کربناتی، آنالسیم- زئولیتی و اکسیدآهن	سیلیسی، کلسیتی، آلبیتی و پروپیلیتی	کلریتی، آلبیتی و هماتیتی	اپیدوت به پومپلئیت و کلریت
ساخت و بافت	پرکننده فضاهای خالی، رگه‌رگچه‌ای و جانشینی	رگه‌ای و پرکننده فضای خالی	رگه‌ای و پرکننده فضای خالی	افشان و پرکننده فضای خالی
عوامل کنترل‌کننده	گسل و درز و شکستگی	لایه‌بندی و شکستگی	گسل	گسل و شکستگی
مرجع	تحقیق حاضر	Sillitoe, 2010	Cabral and Beaudoin, 2007	Woodruff et al., 2020

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های کانسار دوچیله با برخی کانسارهای مشابه مس با میزبان آتشفشانی در ایران و دنیا

موقعیت جغرافیایی	مس دوچیله (ایران)	ایالت‌های یونان و گوئیژو (Guizhou) چین	مونت الکساندرکبک. آپالاشین کانادا	شبه جزیره کویناوی در شمال میشیگان	اندیس معدنی مس دارهند	اندیس معدنی مس قبله بولاغ
سن	ائوسن	پرمین پسین	سیلورین	پالئوزوییک	سنوزوئیک	سنوزوئیک
سنگ میزبان و همراه	گدازه واحد آذرآواری با ترکیب بازالت، آندزیت- بازالت	سنگ‌های بیتومین سیلیسی، برش‌های ولکانیکی و گدازه‌های حفره‌دار	بازالت	واحدهای شیل، سیلتستون قاعده‌ای، برش، بازالت‌ها	بازالت آمیگدال	بازالت آمیگدال
کانی‌شناسی	مس طبیعی، کوپریت، مـالاکیـت	مس‌طبیعی، اکسیدهای مس با مقادیر کمی کالکوسیت	کالکوسیت، مس طبیعی، بورنیت، یارویت (Cu9S)	مس طبیعی، پیریت دانه‌ریز و هماتیت	مس‌طبیعی،کوپریت و مالاکیت، تنوریت و اندکی پیریت	مس طبیعی، تنوریت، مالاکیت، آزوریت، هماتیت، پیریت
دگرسانی	کلریتی، کربناتی، آنالسیم-زئولیتی و اکسیدآهن	کلریتی، کربناتی، سلیسی، زئولیتی و بیتومینی شدن	هماتیتی، کلریتی، کربناتی و کلسیتی	اپیدوت به پومپلیئیت و کلریت	-	-
ساخت و بافت ماده معدنی	پرکننده فضـاهای خالی، رگه‌رگچه‌ای و جانشینی	مس‌های طبیعی رگه‌ای، دانه‌ای و ورقه‌ای‌شکل، تنوریت‌های آغشته شده و کالکوسیت‌های عدسی‌شکل	رگه و رگچه‌ای	رگه‌های مس خالص استراتاباند و استراتی‌فرم	رگه‌ای	دانه پراکنده و پرکننده فضـاهای خالی
منابع	تحقیق حاضر	Bing-Quana et al., 2007	Dresser, 1936	Bornhorst et al., 1988; Brown, 2006; Bornhorst and Mathur, 2017	Nezafati et al., 2006	بهزادی (۱۳۷۳)

نتیجه‌گیری

کانه‌زایـی مـس در کانسـار دوچیله به‌طـور غالب در امتداد گسـل و شکسـتگی‌های با روند غالـب NW-SE در داخـل سـنگ‌های بازالتـی به‌صـورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده‌فضای‌خالی رخ داده است. کانی‌های تشکیل‌دهنده ماده معدنی شامل کانی‌های اولیه مس خالص و هماتیت و کانی‌های ثانویه کوپریت، مالاکیت، گوتیت و هماتیت است و کانی‌های باطله شامل کلسیت، زئولیت و آنالسیم می‌باشند. دگرسانی‌های موجـود در سنگ میزبان شـامل کلریتـی، کربناتی، و زئولیتی می‌باشد. اکسیداسیدن کانی‌های مافیک مثل پیروکسن و همچنین کانی مگنتیت عامل احیا مس و گسترش دگرسانی هماتیتی است. بررسی ژئوشیمی پهنه‌های کانه‌دار نشـان داد، میزان مس در کانسـار دوچیله به ۱/۹ درصد می‌رسد. بیشترین میزان نقره در کانسار دوچیله برابر چهار گرم در تن می‌باشد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که عناصر نقره، مس و سرب در پهنه دگرسان و اطراف رگه کربناتی غنی‌شدگی دارند درحالی‌که عناصر دیگر شامل روی، کبالت، آهن و منگنز در پهنه دگرسـان تهی‌شـدگی نشان می‌دهند. به‌نظر می‌رسـد عناصر مس، نقره و سرب توسط سیال کانه‌سـاز همراه دگرسانی در سـنگ میزبان بازالتی نهشته شده‌اند، اما سایر عناصر توسط سیال از سنگ شسته شده و دور شده و بنابراین نسبت به سنگ میزبان تهی‌شدگی نشان می‌دهند. براساس پژوهش‌های صحرایی، کانی‌شناسی و دگرسانی، کانی‌سـازی مس در ناحیه دوچیله طی مرحله دیاژنـز و دگرگونـی تدفینی و به‌طور عمـده در طی مرحله کوهزایی و چین‌خوردگی و در امتداد شکستگی‌های عمود بر چین‌خوردگی‌ها رخ داده است. از نظر محیط زمین‌ساختی، سنگ دربرگیرنده، کانی‌شناسی، دگرسانی، کنترل‌کننده‌های کانه‌زایی و محتوای فلزی، کانسار مس دوچیله شباهت زیادی با کانسارهای مس بازالتی یا تیپ میشیگان دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله، بدین‌وسیله از آقای مهندس بیاری به خاطر در اختیار دادن برخی از مغزه‌های حفاری معدن مس دوچیله تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع

- ابراهیمی، س. و پادیار، ف.، ۱۳۹۴. پترولوژی و جایگاه تکتونوماگمایی کانسار مس دو چیله، شمال شرق شاهرود. هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دامغان. ۱۲.

- آقانباتی، س. ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۷۰۸ ص.

- امینی.م، قلمقاش، ج. و مهرپرتو، م.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی۱/۱۰۰۰۰۰میامی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به شماره ۷۱۶۲.

- 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 شهیدبهشتی، ۲۰۰.

- حمامی پور بارنجی، ب.، تاج‌الدین، ح.، موحدنیا، م.، ۱۴۰۱. زمین‌شناسی، ساخت و بافت، میان بارهای سیال و الگوی تشکیل کانه‌زایی مس طبیعی تیپ میشیگان در کانسار سه بندون، شمال شرق ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶، ۶۱، ۱۵-۳۲.

- صالحی، ل.، رساء، ا.، علیرضایی، س.، کاظمی مهرنیا، ا.، ۱۳۹۴. کانسار مس معدن بزرگ با میزبان آتشفشانی، نمونه‌ای از کانسارهای مس نوع مانتو، خاور شاهرود. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۹۸، ۹۳ تا ۱۰۴.

- طاشی، م.، موسیوند، ف. و قاسمی، ح.، ۱۳۹۵. الگوی رخداد کانه‌زایی مس طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد مس-نقره گرماب پایین، جنوب شرق شاهرود. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۴۰، ۸۹-۱۰۵.

- طائفی، ن.، صادقیان، م. و موسیوند، ف.، ۱۳۹۲. کانی‌شناسی، ساخت و بافت و الگوی رخداد کانه‌زایی مس نرتلویی و استغانی در جنوب شرق شاهرود، سی و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران،۲۱.

- طائفی، ن.، موسیوند، ف. و صادقیان، م.، ۱۳۹۳. کانی‌شناسی و ژئوشیمی و الگوی رخداد کانه‌زایی مس در منطقه گریگ و گورخان، جنوب شرق شاهرود. ششمین همایش زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه زاهدان، ۱۵.

- ظفرزاده، م.، ۱۳۹۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی پیدایش کانسار مس دوچیله، شرق میامی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۱۰.

- ظفرزاده، م.، موسیوند، ف. و رمضانی اومالی، ر.، ۱۳۹۶. الگوی رخداد کانه‌زایی مس توران، شرق میامی، بر مبنای پژوهش‌های ساخت و بافت و کانی‌شناسی مواد معدنی. کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۰.

- مهابادی، م. و فردوست، ف.، ۱۳۹۸. بررسی رخداد کانه‌زایی در کانسار مس آبگاره، جنوب دامغان: براساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، ۵۱، ۶۵-۸۰.

- محمدی، م.، نباتیان، ق.، هنرمند، م. و ابراهیمی، م.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی و خاستگاه کانه‌زایی مس در کانسار دهنه، شمال خاور زنجان. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۳ (۲۲)، ۱۱، ۴۹۷-۵۲۴.

- Azizi, H. and Jahangiri, A., 2008. Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. Journal of Geodynamics, 45, 178-190.

- Barnes, H.L., 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. Second ed. Wiley, New-York, 797.

- Berberian, F. and Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. In: Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution (H.K. Gupta and F.M. Delany, Eds), 5-32. American Geophysical Union and Geological Society of America, Washington.

- Bing-Quana, Z.,Yao-Guo, H., Zheng-Weia, Z., Xue-Jun, C., Tong-Mo, D., Guang-Hao, C., Jian-Hua, P., Yong-Ge, S., De-Han, L., and Xiang-Yang, C., 2007. Geochemistry and geochronology of native copper mineralization re-

lated to the Emeishan flood basalts, Yunnan Province, China. Ore Geology Reviews, 32(1):366-380.

- Bornhorst, T. and Lankton, D., 2009. Copper Mining: A Billion Years of Geologic and Human History. Published report.

- Bornhorst, T.J. and Mathur, R., 2017. Copper Isotope Constraints on the Genesis of the Keweenaw Peninsula Native Copper District, Michigan, USA. Minerals, 7, 185.

- Bornhorst, T.J., Paces, J.B., Grant, N.K., Obradovich, J.D., and Huber, N.K., 1988. Age of native copper mineralization, Keweenaw Peninsula, Michigan. Economic Geology, 83, 619-625.

- Brown, A.C., 2006. Genesis of native copper lodes in the Keweenaw district, northern Michigan: A hybrid evolved meteoric and metamorphogenic model. Economic Geology, 101, 1437-1444.

- Cabral, A.R., and Beaudoin, G., 2007. Volcanic red-bed copper mineralisation related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada. Mineralium Deposita, 42, 901-912.

- Carrillo-Rosúa, J., Boyce, A.D., Morales-Ruano, S., Morata, D., Roberts, S., Munizaga, F., and Moreno-Rodríguez, V., 2014. Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean manto-type Cu-(Ag) deposits, Coastal Range of central Chile. Ore Geology Reviews, 56, 13-24.

- Cornwall, H.R., 1936. A summary of ideas on the origin of native copper deposits. Economic Geology, 51 (7) 615-631.

- Dresser, J.A., 1936. Annual report of the Quebec Bureau of Mines. Part D: Mount Alexander map area.

- Ghasemi, H., and Rezaei-Kahkhaei, M., 2015. Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan-Abbasabad Eocene volcanic (DAEV) rocks, NE Iran". Mineralogy and Petrology 109, 235-252.

- Kirkham, R., 1996. Volcanic redbed copper. Geology of Canadian mineral deposit types. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, 8, 241-252.

- Mohajjel, M., and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late-Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. Journal of Structural Geology, 22, 1125-1139.

- Nezafati, N., Momenzadeh, M. and Pernicka, E., 2006. Darhand copper occurrence: an example of Michigan-type native copper deposits in central Iran, Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge, 165-167.

- Sengor, A.M.C., 1984. The Cimmerideorogenic system and the Tectonics of Eurasia. Geological society of America, Special, 195.

- Shelly, D., 1993. Igneous and metamorphic rocks under microscope classification features, microstructures and mineral preferred orientations. Chapman and Hall, London, 405.

- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. Economic Geology, 105, 3-41.

- Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. Nature, 235, 147-150.

- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., Wan, Y.S., Li, C.F., Zi, F., Jian, Z.Q., Qiu, H.N., Chu, Z.Y., Zhao, Z.H. and Dong, Y.H., 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge". Contributions to Mineralogy and Petrology 155, 473-490.

- Woodruff, L.G., Schulz K.J., Nicholson S.W. and Dicken, C.L., 2020. Mineral deposits of the Mesoproterozoic Midcontinent Rift system in the Lake Superior region-A space and time classification. Ore Geology Reviews, 126, 103716.