بررسی رخداد کانه‌زایی در کانسار مس آبگاره، جنوب دامغان: براساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی

راضیه مهابادی[1و*] و فرجا... فردوست[2]

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲. دکتری، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۳۰

چکیده

نوار آتش‌فشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین در جنوب فروافتادگی کویر چاه‌جم (جنوب‌شرق دامغان)، میزبان رخدادها و ذخایر معدنی بی‌شماری همچون سرب و روی، مس، نقره و طلا است که کانسار مس آبگاره در بخش شمال‌شرقی این نوار قرار دارد. محدوده کانسار از نظر سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های آتش‌فشانی با ترکیب آندزیت، آندزیت‌بازالتی و بازالت و به مقدار کمتر آذرآواری (کریستال‌توف) به سن ائوسن میانی-بالایی می‌باشد. ماهیت این سنگ‌ها، کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی است که از دید جایگاه زمین‌ساختی، در موقعیت کمان ماگمایی مرتبط با پهنه فرورانش قرار می‌گیرند. براساس مشاهدات صحرایی و مطالعات کانه‌نگاری، کانه‌زایی در دو مرحله هیپوژن و سوپرژن و هوازدگی صورت گرفته است. کانه‌های زون هیپوژن عموماً پیریت، کالکوپیریت و بورنیت می‌باشند؛ درحالی‌که کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و کریزوکولا به‌عنوان کانی‌های اصلی زون سوپرژن مطرح هستند. شکستگی‌های حاصل از عملکرد گسل‌ها در سنگ‌های منطقه، محل مناسبی برای نفوذ محلول‌های گرمابی ایجاد کرده است و کنترل‌کننده اصلی کانی‌سازی محسوب می‌شوند. مطالعات زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که عنصر مس بیشترین همبستگی را با نقره دارد. این در حالی است که این عنصر کانی مستقلی تشکیل نداده است و احتمالاً در شبکه کانی‌های مس‌دار، جایگزین مس شده است. سنگ‌های آتش‌فشانی مورد مطالعه در نمودار به‌هنجار شده نسبت به کندریت و گوشته اولیه دارای غنی‌شدگی قابل ملاحظه‌ای از عناصر LREE و LILE نسبت به HREE و HFSE و بی‌هنجاری منفی از عناصر Ti و Nb هستند. بر اساس نمودارهای مربوطه، سنگ‌های منطقه مورد مطالعه از گوشته غنی شده منشاء گرفته و تبلور تفریقی نقش اساسی را در تحول سنگ‌ها بر عهده داشته است. بر پایه مجموعه شواهد سنگ‌شناسی، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن و کانی‌شناسی ساده می‌توان نتیجه گرفت که کانه‌زایی در محدوده آبگاره مربوط به یک سامانه واحد کانه‌زایی است که در ارتباط با تکامل سیالات گرمابی کانه‌دار، سبب تشکیل کانه‌زایی رگه‌ای مس شده است.

واژه‌های کلیدی: رخداد کانه‌زایی، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، کانسار مس آبگاره

مقدمه

سرزمین ایران به‌عنوان بخشی از نواحی مرکزی-غربی سامانه کوهزایی آلپ-هیمالیا به‌جهت تحمیل زمین‌ساخت خاص نواحی همگرایی صفحات، جولانگاه فعالیت‌های ماگمایی (آتش‌فشانی و نفوذی) گسترده‌ای به‌ویژه در دوران سنوزوئیک بوده است. نقشه‌های زمین‌شناسی و ماگمایی ایران، شدت و اهمیت این رخداد را به‌خوبی منعکس می‌کنند (یوسفی و صادقیان، ۱۳۹۴). این رویدادهای ماگمایی در

* نویسنده مرتبط: mohabadi@chmail.ir

دوره‌های زمانی گوناگون به‌صورت خروج گدازه در پهنه‌های خشکی و آبی و همچنین، نفوذ و جایگزینی توده‌های نفوذی با گستره ترکیبی گوناگون، نمودار شده‌اند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی‌های حاصل از آنالیز شیمیایی سنگ‌های ماگمایی و یا سنگ‌های دگرگون با منشاء آذرین، نشان می‌دهند که فراوانی مس در سنگ‌های ماگمایی پیش از ترشیری در بیشتر موارد در حد عادی است، اما بیشتر سنگ‌های آتش‌فشانی آندزیت، آندزیت بازالتی، بازالت و به‌خصوص تراکی‌آندزیت ائوسن میانی، فراوانی بیشتری از مس را نشان می‌دهند (حسینی‌دینانی و باقری، ۱۳۹۱). کانسار مس آبگاره به‌عنوان بخشی از منطقه معدنی و فلززایی نوار طرود-چاه‌شیرین در ۱۴۰ کیلومتری جنوب‌غرب شاهرود و ۲۶ کیلومتری شمال‌غرب طرود در موقعیت جغرافیایی "۱۴/۸۳ '۲۸ °۳۵ تا "۲۳/۳۶ '۳۱ °۳۵ عرض شمالی و "۳۴/۵۴ '۴۰ °۵۴ تا "۰/۸۱ '۴۴ °۵۴ طول شرقی، در استان سمنان قرار گرفته است. مهم‌ترین راه دسترسی به محدوده مورد مطالعه، جاده آسفالته شاهرود-طرود است که از طرود تا محدوده مورد مطالعه حدود ۳۶ کیلومتر راه خاکی جیپ‌رو وجود دارد و دسترسی به دیگر نقاط مطالعاتی از راه آبراهه‌ها صورت می‌پذیرد. تاکنون تحقیقات بسیاری توسط پژوهشگران مختلف در مورد واحدهای سنگی رخنمون یافته در مناطق پیرامون محدوده مورد مطالعه انجام شده است. بااین‌وجود به دلیل شرایط زمین‌شناسی مناسب در نوار طرود-چاه‌شیرین و منطقه مورد مطالعه، زمینه خوبی برای مطالعه و پی‌جویی ذخایر مس وجود دارد، ولی مطالعه جامعی در این زمینه در منطقه آبگاره انجام نشده است. این مقاله می‌کوشد تا با معرفی کانه‌زایی رگه‌ای در این منطقه و با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی گدازه‌های زیردریایی درمحدوده معدنی آبگاره با نگرش ویژه به مس، ضمن نشان دادن ارتباط مناطق کانه‌زایی با یکدیگر، شواهد وجود یک سامانه واحد کانه‌زایی گرمابی را بیان کند. همچنین با توجه به قرارگیری کانسار آبگاره در نوار آتش‌فشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین، می‌تواند در رابطه با شناخت فعالیت‌های ماگمایی و پتانسیل اقتصادی این نوار نیز مفید واقع شود.

روش مطالعه

پس از گردآوری و ارزیابی اطلاعات پیشین در رابطه با کانسار آبگاره، به‌منظور درک صحیح رخداد فرآیندهای مختلف کانه‌زایی و دگرسانی گرمابی، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفت. در بخش صحرایی، زمین‌شناسی منطقه، تغییرات ریخت‌شناختی رگه‌ها و دگرسانی گرمابی سنگ دیواره مورد بررسی قرار گرفت و از رخنمون رگه‌ها و سنگ دیواره دگرسان شده نمونه‌برداری شد. بررسی‌های آزمایشگاهی شامل بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ و سنگ دیواره، مجموعه دگرسانی و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها بوده است. به‌منظور شناسایی کانی‌ها و کانه‌ها و ارتباط بافتی بین آنها از نمونه‌های برداشت شده، تعداد ۲۹ مقطع نازک و ۲۸ مقطع صیقلی تهیه و مطالعه شد. همچنین، جهت تشخیص کانی‌های مجهول، ۷ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) توسط شرکت مواد معدنی زرآزما مورد تجزیه قرار گرفت. در نهایت با ترکیب نتایج حاصل از این بررسی‌ها، توالی پاراژنتیکی کانی‌سازی و مجموعه دگرسان گرمابی تعیین گردید. از طرفی، برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی و کمیاب تعداد ۱۱ نمونه از رگه و اطراف آن به روش XRF و ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مواد معدنی زرآزما مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

طرود-چاه‌شیرین

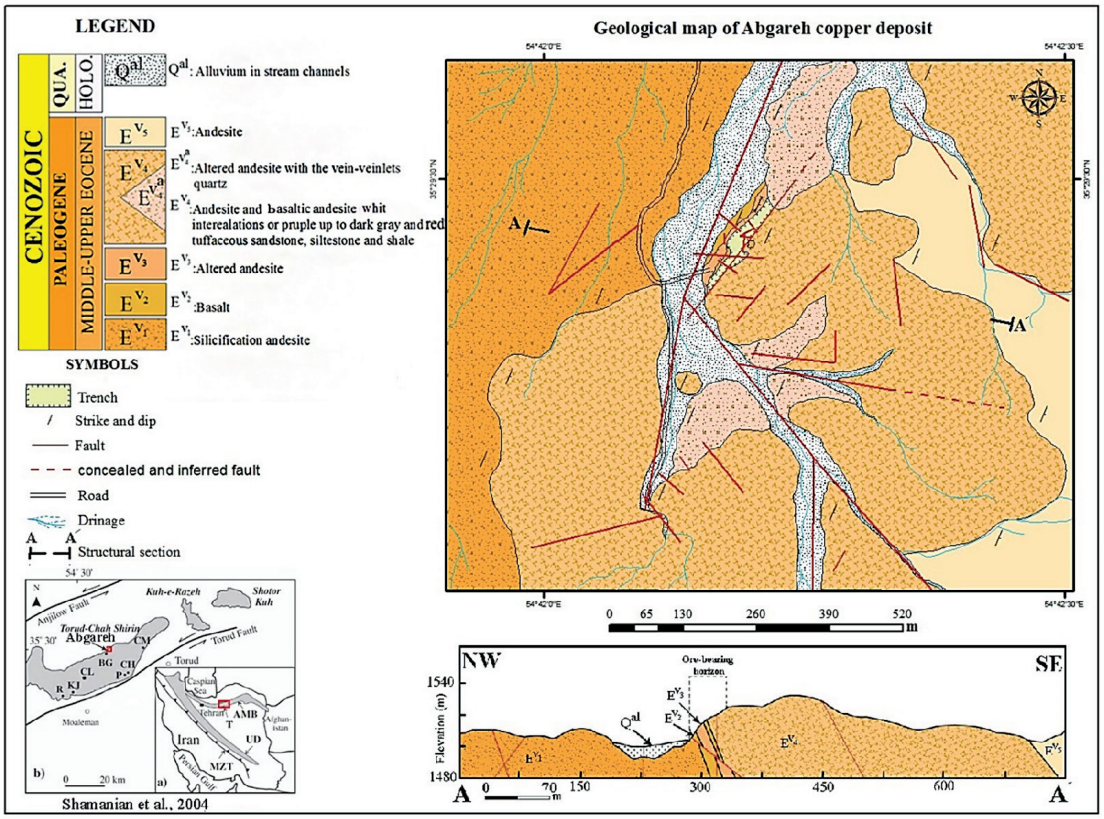
رشته‌کوه طرود-چاه‌شیرین، نوار باریک و طویلی به طول ۱۰۰ و پهنای ۱۰ کیلومتر در جنوب دامغان که بر پایه تقسیم‌بندی ساختاری ایران، بخشی از ایران مرکزی به‌شمار می‌آید، در بخش مرکزی و شرقی کمان ماگمایی البرز قرار دارد. بخش غربی این کمان در پایان به امتداد ماگمایی ارومیه-دختر متصل می‌شود که روندی موازی با زون زاگرس دارد. نخستین مطالعات زمین‌شناسی در این ناحیه توسط Huber and Stocklin (1959) انجام شده است که شروع تکاپوهای ماگمایی ترشیری را به لوتسین (ائوسن میانی)

نسبت می‌دهند (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). این نوار به‌طور چیره از سنگ‌های آذرین مزوزوئیک پسین تا ترشیری ساخته شده است که بر پایه مطالعات هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷)، اوج فعالیت ماگمایی در این مجموعه طی ائوسن میانی تا احتمالاً بالایی رخ داده است که اسکلت اصلی ارتفاعات حد فاصل طرود-چاه‌شیرین را تشکیل می‌دهد (رشیدنژادعمران، ۱۳۷۱). واحدهای زمین‌شناسی منطقه به‌ترتیب فراوانی شامل ۱) توف، لاپیلی‌توف، خاکسترهای ریولیتی و به‌صورت فرعی مارن و ماسه‌سنگ ۲) گدازه و سنگ‌های آذرآواری با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالت و ۳) داسیت، ریوداسیت و توده‌های نفوذی اسیدی نیمه‌عمیق می‌باشد (مهرابی و قاسمی سیانی، ۱۳۸۹). سنگ‌های آتش‌فشانی رشته‌کوه طرود-چاه‌شیرین توسط توده‌های نفوذی زیادی قطع شده که بر پایه شواهد زمین‌شناختی سن احتمالی آنها ائوسن‌پسین-الیگوسن است. به‌نظر می‌رسد که کلیه تحولات زمین‌شناسی این ناحیه توسط دو گسل امتدادلغز اصلی انجیلو در شمال و طرود در جنوب با راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی کنترل می‌شود (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). در نتیجه عملکرد این دو گسل، شکستگی‌ها و درزه‌ها و گسل‌هایی ایجاد گردیده‌اند که سبب نفوذ آب‌های جوی و ایجاد چرخه گرمابی در گدازه‌ها و توف‌های مسیر شده‌اند و تحت فرآیند شستشو، فلزات از سنگ‌های منشاء جدا شده و در امتداد رگه-رگچه‌ها و شکستگی‌ها به‌صورت عناصر مختلفی از جمله Cu، Zn، Pb و ... ته‌نشست شده‌اند. سنگ‌های آذرین رشته‌کوه طرود-چاه‌شیرین، کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا تا شوشونیتی می‌باشد و در نمودار به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonogh، 1989) با غنی‌شدگی عناصر LILE مانند Th، Rb، Cs، Ba و K، نسبت بالای LILE/HFSE و LREE/HFSE و تهی‌شدگی عناصر HFSE مانند Nb، Ti، Zr و Ta مشخص می‌شوند که نشان‌دهنده تشکیل آنها در کمان‌های آتش‌فشانی قاره‌ای است (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۲).

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در چهارگوش ۱/۲۵۰۰۰۰ طرود (علوی و همکاران، ۱۹۷۶) و ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ معلمان (اشراقی و جلالی، ۱۳۸۵) واقع شده است. همچنین، از نظر موقعیت زمین‌شناسی در بخش شمالی پهنه ایران مرکزی و در حقیقت، بخش کوچکی از منطقه متالوژنی طرود محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که ناحیه طرود از دیرباز مورد توجه معدن‌کاران بوده و در بخش‌های مختلف آن می‌توان آثار معدن‌کاری شدادی و سرباره‌های ذوب کوره‌های قدیمی را مشاهده کرد که منطقه معدنی آبگاره یکی از این موارد می‌باشد. در یک نگاه کلی، محدوده آبگاره از نظر سنگ‌شناسی جوان است و شامل گستره‌ای از گدازه‌های با ترکیب بازیک (بازالت) و حدواسط (آندزیت و آندزیت بازالتی)، به همراه کمی سنگ‌های آذرآواری (کریستال‌توف) می‌باشد که طی فعالیت ولکانیکی ائوسن میانی-بالایی تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲-الف). این سنگ‌ها در مناطق هموار با رسوبات عهد حاضر پوشیده شده‌اند.

آندزیت: این سنگ‌ها با مورفولوژی برجسته، هم‌روند و هم‌شیب با واحد بازالتی، بخش اعظم منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که این واحد میزبان کانه‌زایی نیز است. لازم به ذکر است که آندزیت‌ها دارای قرارگاه تکتونیکی خاص خود هستند، به‌طوری‌که در مناطق تصادم ورقه‌های همگرا به‌وفور دیده می‌شوند و از طرف دیگر ترکیب کلی آندزیت‌ها مشابه ترکیب کل پوسته زمین است (ولی‌زاده و جعفریان، ۱۳۶۸). رنگ چیره این سنگ‌ها خاکستری تیره است که گاه به سبب هوازدگی و تشکیل اکسید و هیدروکسیدهای آهن به رنگ اُخرایی مایل به قهوه‌ای دیده می‌شوند. از لحاظ کانی‌شناسی متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، همراه با کانی‌های اکسی‌هورنبلند و بیوتیت در زمینه‌ای شیشه‌ای با بافت پورفیری و گلومروپورفیری می‌باشند که پلاژیوکلازها در آنها به‌عنوان درشت‌بلور اصلی به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار کشیده‌اند. البته این پلاژیوکلازها در برخی از نمونه‌ها، بافت منطقه‌بندی زیبایی را نشان می‌دهند. همان‌طور که می‌دانید این بافت نشان‌دهنده عدم تعادل در



شـــکل ۱. نقشه زمین‌شناســـی بزرگ‌مقیاس محدوده معدنی و نیمرخ عرضی آن (براســـاس تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و برداشت‌های صحرایی). مبنای سنی واحدهای سنگی میزبان در منطقه براساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ معلمان (اشراقی و جلالی، ۱۳۸۵) می‌باشد

حین تبلور و توسعه تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در آشیانه ماگمایی می‌باشـــد (Wicander and Monroe، 1995). علاوه‌بر این، در مناطقی که دگرســـانی گرمابی بر این سنگ‌ها تحمیل شده، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به‌طور عمده توسط سریسیت‌های ریزبلور در مرکز و حاشیه جانشین شده و در مواردی نیز توسط رگه‌های تأخیری کلسیت قطع شـــده‌اند. کانی‌های بیوتیت و اکسی‌هورنبلند نیز به کلریت و اکســـیدهای آهن تجزیه شـــده‌اند. لازم به ذکر است که بیوتیت‌هـــای ماگمایی در مراحل میانی و نهایی تبلور ماگما هم‌زمان با هورنبلند و پلاژیوکلاز (با ترکیب حدواسط) متبلور می‌شوند (یزدی و همکاران، ۱۳۹۳). در آندزیت‌ها می‌توان پدیده اُپاسیته شدن را در اطراف آمفیبول‌ها به‌وفور مشاهده کرد. بنا به اعتقاد Pichler and Schmitt-Riegraf (1993) حاشیه ســـیاه اطراف هورنبلند (اُپاســـیته شدن)، ناشی از کاهش فشـــار H_2O در حین صعود ماگما و افزایش دما در طی اختلاط ماگمایی می‌باشـــد که سبب تبدیل هورنبلند به اکســـی‌هورنبلند می‌شـــود (امام‌جمعه، ۱۳۸۵). با توجه مطالعه مقاطع صیقلی، کانی‌های کدر موجود در سنگ‌های منطقه را عموماً پیریت، مگنتیت و هماتیت تشکیل می‌دهند (شکل ۲-ب، پ).

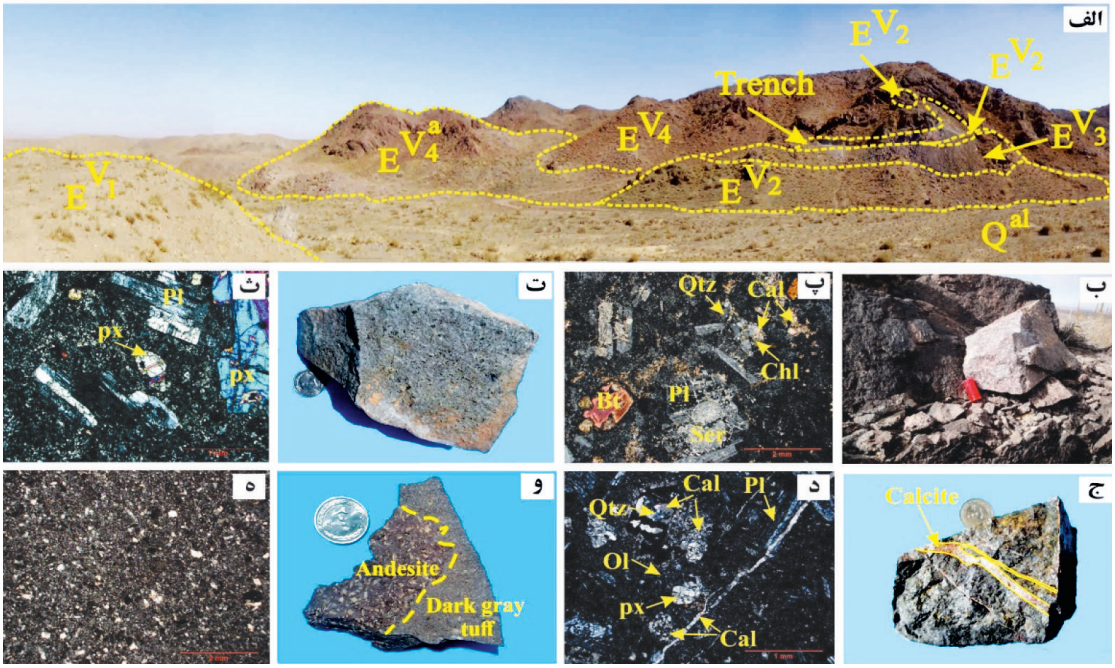
آندزیت بازالتی: این ســـنگ‌ها به رنگ سبز خاکستری، اکثراً همراه با ســـنگ‌های آندزیتی دیده می‌شوند و تفکیک آنها از ســـنگ‌های آندزیتی بر روی نقشـــه زمین‌شناســـی عملاً امکان‌پذیر نیســـت. تنها تفاوت این سنگ‌ها نسبت به ســـنگ‌های آندزیتی وجود درشـــت‌بلورهای کلینوپیروکسن (از نوع اوژیت) است. بلورهای پیروکسن به‌صورت نیمه‌شکل‌دار تا کاملاً شـــکل‌دار از چند دهم میلی‌متر تا حدود ۵ میلی‌متر متغیر هستند. بر خلاف سایر کانی‌ها، پیروکسن‌ها کمتر تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند و اغلب سالم هستند. بافت غالب در این سنگ‌ها، پورفیری می‌باشد (شکل ۲-ت، ث).

بازالت: واحد یاد شده در منطقه از گسترش محدودتری برخوردار است که در نمونه‌دستی به رنگ خاکستری تیره متمایل به سبز تیره دیده می‌شود. همچنین، رگه-رگچه‌های کلسیتی در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌های موجود در این سنگ‌ها به‌خوبی قابل مشاهده هستند که نشان‌دهنده فعال بودن چرخه هیدروترمالی بعد از تشکیل بازالت‌ها می‌باشد. از دیدکانی‌شناسی این بازالت‌ها حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین (اولیوین و پیروکسن) هستند که در زمینه میکرولیتی از جنس پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین قرار گرفته‌اند. با توجه به نبود منطقه‌بندی شیمیایی در کانی‌های پلاژیوکلاز این سنگ‌ها می‌توان این‌گونه استنباط کرد که به هنگام تبلور پلاژیوکلاز و مذاب همراه، تعادل برقرار بوده است. کانی‌های فرومنیزین به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در این سنگ‌ها حضور دارند و ازآنجایی‌که به دگرسانی خیلی حساس می‌باشند، به‌شدت به کلریت، کلسیت و اکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند. از طرفی، وجود شکستگی‌های فراوان در اولیوین، سبب ایدنگزیتی شدن آن در امتداد شکستگی‌ها می‌شود. ایدنگزیت یک شبه کانی قرمز حاوی اکسیدهای آهن سه ظرفیتی با چندرنگی ضعیف است (یوسفی، ۱۳۹۶). بافت میکرولیتی پورفیری و گلومروپورفیری از جمله بافت‌های اصلی مشاهده شده در مقاطع این سنگ‌ها محسوب می‌شود. همچنین، حفرات و شکاف‌های از قبل موجود در این واحد بازالتی، به‌طور بخشی و یا کامل توسط کانی‌های ثانویه ازجمله کوارتز و کربنات پر شده‌اند که سبب ایجاد بافت آمیگدالوئیدال یا بادامکی در این سنگ‌ها شده است (شکل ۲-ج، د).

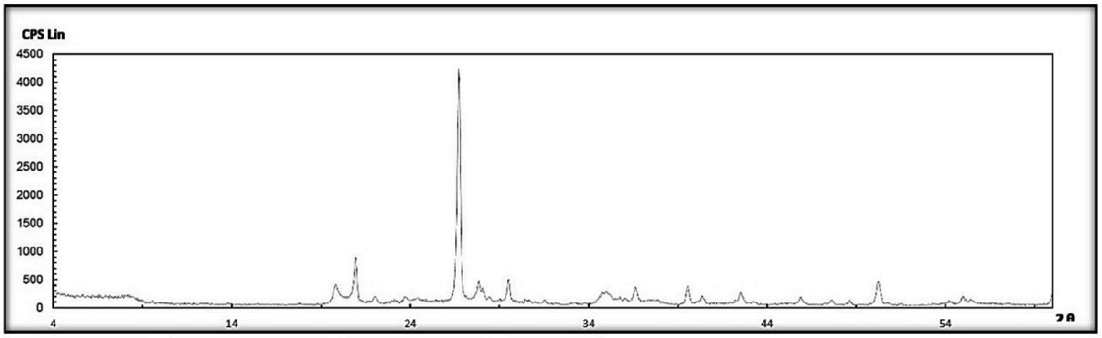
آذرآواری (کریستال‌توف): در بخش‌هایی از محدوده معدنی، این سنگ‌ها همراه با گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی دیده می‌شوند که در منطقه غالباً ماهیت نرمی دارند. بنا به عقیده Damian et al. (2007)، این سنگ‌ها به‌صورت توده‌ای، بدون طبقه‌بندی واضح و بسیار همگن هستند. رنگ آن برحسب ترکیب شیمیایی و شدت دگرسانی از خاکستری تیره تا قرمز متغیر است. دانه‌ها در ابعاد ریز بوده و از پلاژیوکلاز، بیوتیت و اکسی‌هورنبلند با حواشی اکسیده تشکیل شده‌اند که به مقدار فراوان در زمینه‌ای خاکستری تا سبز شیشه‌ای قرار گرفته‌اند. زمینه اصلی سنگ متشکل از شیشه ولکانیکی دگرسان شده و میکرولیت‌های پلاژیوکلاز همراه با ریزبلورهای کانی‌های اُپک می‌باشد (شکل ۲-و، ه).

دگرسانی گرمابی منطقه مورد مطالعه

امروزه مشخص شده است که در کانسارهای مختلف، دگرسانی‌های گوناگون، با آرایش‌های متفاوت ظاهر می‌شوند. لذا شناخت محصولات و فرآیندهای دگرسانی که می‌تواند همراه دگرسانی رخ دهد، یکی از بنیان‌های شناسایی فرآیندهای مربوط به نحوه تشکیل کانسار است که در اکتشاف کانسارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌نظر می‌رسد که شرایط دما و ترکیب معمولاً در فاصله‌های مختلف از یک شکاف، متفاوت باشد، به‌گونه‌ای که انواع گوناگونی از دگرسانی‌ها می‌توانند به‌طور هم‌زمان در کنار یکدیگر به‌وجود آیند. آنچه می‌توان گفت این است که این بازشدگی‌ها محل‌های مناسبی برای نفوذ و حرکت سیالات کانسارساز و تجمع کانی‌های فلزی به‌شمار می‌رود (Baker، 1978). بر این اساس، دست کم ۶ نوع دگرسانی مجزا، از جمله سریسیتی، سیلیسی، آرژیلیتی، کربناتی، کلریتی و اکسیدهای آهن در منطقه آبگاره و به‌ویژه در اطراف رگه‌ها تشخیص داده شد (شکل ۴-الف). این دگرسانی‌ها تمام واحدهای سنگی منطقه را تحت تأثیر خود قرار داده و سبب تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی گسترده‌ای در آنها شده‌اند. دگرسانی آرژیلیتی به‌صورت پراکنده و محلی در داخل سایر دگرسانی‌ها و در مجاورت رگه‌ها و درزه‌ها مشاهده می‌شود. سنگی آندزیتی تحت تأثیر این دگرسانی به رنگ سفید تا زرد متمایل به قهوه‌ای (در اثر آغشتگی هماتیت و لیمونیت) دیده می‌شود. براساس نتایج حاصل از آنالیز XRD دگرسانی آرژیلیتی با اجتماعی از کانی‌های کوارتز، مونت‌موریلونیت و ایلیت به‌عنوان فاز اصلی مشخص می‌شود که کانی‌های آلبیت، کلسیت، هماتیت و کلریت نیز کم‌وبیش آنها را همراهی می‌کنند (شکل ۳). بنا به عقیده Seedorff et al. (2005)، حضور ایلیت در منطقه، نشان‌دهنده pH نزدیک به خنثی است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۲. الف) دورنمایی از موقعیت رخنمون‌های سنگ میزبان کانه‌زایی در کانسار آبگاره (زاویه دید به سمت شمال‌شرق)، ب) تصویر نمونه‌دستی آندزیت، پ) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های آندزیتی و دگرسانی پلاژیوکلاز به سریسیت و کلسیت را نشان می‌دهد (XPL)، ت) تصویر نمونه‌دستی آندزیت بازالتی، ث) تصویر میکروسکوپی از آندزیت بازالتی و حضور کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن (XPL)، ج) تصویر نمونه‌دستی از بازالت به همراه رگه-رگچه‌های کلسیت، د) تصویر میکروسکوپی از بازالت و ایدنگزیتی شدن کانی اولیوین (XPL)، و) تصویر نمونه‌دستی از توف خاکستری تیره با ترکیب آندزیتی همراه با قطعات آندزیت، ه) تصویر میکروسکوپی از توف خاکستری تیره و اجزای تشکیل‌دهنده آن (XPL)، (Pl= پلاژیوکلاز، Bt= بیوتیت، Ol= اولیوین، Px= پیروکسن، Cal= کلسیت، Chl= کلریت، Qtz= کوارتز)



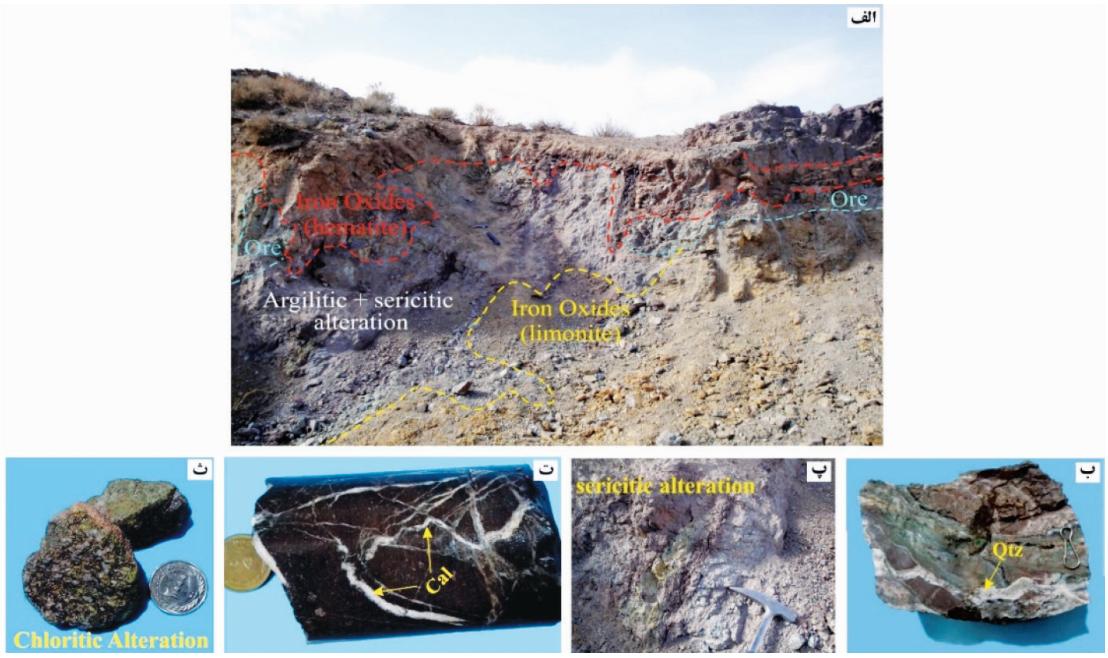
Sample:
D3
Az: 66069
Date : 17/5/2017
kV = 40
mA = 30
Ka. = Cu
Fil. = Ni

Major Phase(s)	Minor Phase(s)	Trace Phase(s)
Quartz (33-1161)	Albite (09-0466)	–
SiO2	NaAlSi3O8	
Montmorillonite-Illite (13-0135)	Calcite (05-0586)	
Ca0.2(Al,Mg)2Si4O10(OH)2 .xH2O	CaCO3	
	Hematite (33-0664)	
	Fe2O3	
	Chlorite (29-0701)	
	(Mg,Fe)6(Si,Al)4O10(OH)8	

شکل ۳. داده‌های حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) که کوارتز، مونت‌موریلونیت و ایلیت به همراه کانی‌های آلبیت، کلسیت، هماتیت و کلریت در آن مشخص شده است

دگرسانی سیلیسی نیز به‌صورت رگه-رگچه‌ای، جانشینی در زمینه و پرکننده فضاهای خالی در کنار کانی‌های مس‌دار، قابل تشخیص است (شکل ۴-ب). براساس نتایج این مطالعه، فراوانی کوارتز با نزدیک شدن به رگه‌ها افزایش می‌یابد که در اغلب کانسارهای گرمابی در ارتباط با شکستگی‌ها و فضاهای خالی تشکیل می‌شود. قابل ذکر است که دگرسانی‌های

آرژیلیتی، سریسیتی و سیلیسی از رایج‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی در اطراف رگه معدنی محسوب می‌شوند. با ادامه فرآیند دگرسانی، کربناتی شدن (با چیرگی کلسیت) دگرسانی غالب در منطقه است و در بیشتر موارد با دگرسانی سریسیتی هم‌پوشانی دارد که به‌صورت رگه-رگچه‌ای (شکل ۴-ت)، پرکننده فضاهای خالی، جانشینی در پلاژیوکلاز و زمینه سنگ دیده می‌شود. دگرسانی کلریتی در منطقه از گسترش وسیع‌تری برخوردار است که در اثر محلول گرمابی غنی از آهن و منیزیم ایجاد می‌شود و ظاهری سبز تا قهوه‌ای رنگ به سنگ می‌دهد (شکل ۴-ث). این دگرسانی در فاصله دورتری نسبت به رگه کانه‌دار دیده می‌شود. از دیگر دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی، فرآیند اکسایش ثانویه کانی‌های سولفیدی اولیه (به‌ویژه پیریت و کالکوپیریت) در زمینه سنگ میزبان آندزیتی می‌باشد که با افزایش عمق مقدار آن به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌طور معمول شدت دگرسانی در کنار پهنه کانی‌سازی افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که مجموعه سنگ‌های دارای کانه‌زایی، دارای میزان بالایی از هماتیت می‌باشند که می‌تواند به‌عنوان کلید اکتشافی در پی‌جویی پهنه‌های کانه‌دار مس دیگر در محدوده مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴. الف) تصویر صحرایی از پهنه‌بندی دگرسانی‌ها در مجاور رگه‌های کانه‌دار (زاویه دید به سمت شمال‌غرب)، ب) تصویر نمونه‌دستی از رگه-رگچه‌های کوارتز، پ) دگرسانی سریسیتی، ت) تصویر نمونه‌دستی از رگه-رگچه‌های کلسیت، ث) دگرسانی کلریتی، (Qtz= کوارتز، Cal= کلسیت)

ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ

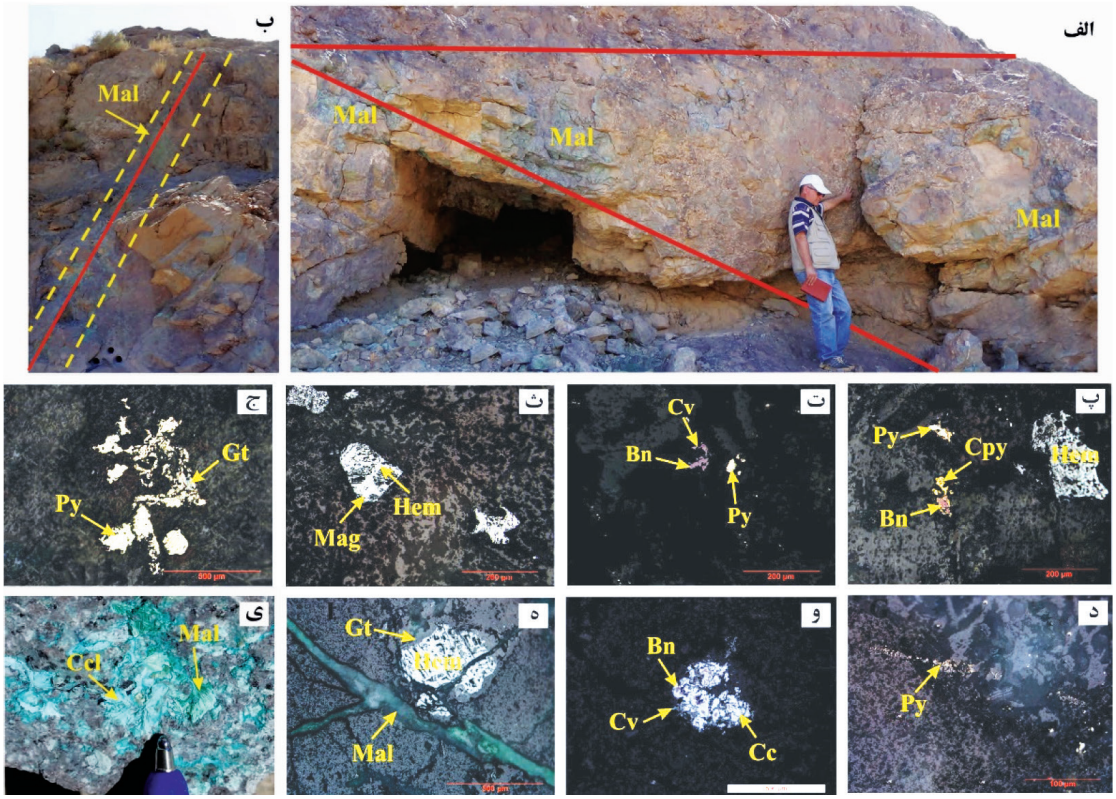
وجود کانی‌زایی مس در منطقه آبگاره، در ابتدا توسط شرکت زمین‌پویان فرآز آسیا مورد پی‌جویی و اکتشاف قرارگرفت و در نهایت دو بخش کانی‌زایی اصلی مس در این منطقه معرفی شد. رگه کانه‌دار اصلی، به طول ۱۵۰ متر و عرض ۳۰ متر، در راستای عمومی شمال‌شرق-جنوب‌غرب رخ داده است. براساس ارزیابی ذخیره احتمالی برآورد شده بر روی آنها حاکی از ۳۰۰۰۰۰ تن کانسنگ با عیار ۰/۷۸ درصد مس می‌باشد. مطالعات و پیمایش‌های صحرایی صورت گرفته در منطقه، نشان می‌دهند که بخش اعظم افق‌های کانه‌زایی به‌صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده حفره‌ها و فضاهای خالی در گدازه‌های آندزیتی تشکیل شده‌اند. نکته کلیدی که در خصوص کانه‌زایی در منطقه معدنی آبگاره می‌توان به آن اشاره کرد، نقش ساختارها و گسل‌ها به‌عنوان عامل اصلی کنترل کننده در نقل و انتقال سیالات می‌باشد که به نوبه خود سبب توسعه پهنه دگرسانی گسترده در منطقه شده

است و از طرفی نقش مؤثری را در رهگیری مواد معدنی ایفا می‌کنند (شکل ۵-الف، ب). برمبنای روابط بافتی موجود بین کانه‌ها و کانی‌ها، توالی پاراژنتیک تهیه شد (جدول ۱) که تفاوت در شکل، اندازه و ترتیب زمانی رشد کانی‌ها به همراه اطلاعات حاصل از بافت‌های جایگزینی، بیانگر دخالت چند مرحله‌ای سیال گرمابی در کانه‌زایی است. مجموعه کانی‌های محدوده آبگاره شامل کانه‌های فلزی (سولفیدی و اکسیدی) و غیرفلزی (سیلیکاتی و کربناتی) است که طی دو فاز کانی‌سازی هیپوژن و سوپرژن و هوازدگی شکل گرفته‌اند. کانه‌های هیپوژن شامل پیریت، کالکوپیریت و بورنیت می‌باشد که بیشتر به‌صورت پراکنده در سنگ میزبان مشاهده می‌شود. این کانی‌ها تحت تأثیر سیالات کانه‌ساز اکسیدان غنی از مس به کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و کریزوکولا تبدیل شده‌اند. در برخی مقاطع، کانی پیریت به‌صورت هم‌رشد با بورنیت و کالکوپیریت وجود دارد (شکل ۵-پ) و در واقع یکی از فراوان‌ترین کانی‌های در اغلب مراحل کانه‌زایی می‌باشد که در اثر هوازدگی از حاشیه به اکسیدهای آهن آبدار تبدیل شده است (شکل ۵-ج). با توجه به تأثیر شدید فرآیندهای سوپرژن بر کانه‌زایی هیپوژن، کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و بورنیت، فقط در عمیق‌ترین نمونه‌های به‌دست آمده از حفاری، به‌صورت بافت باقی‌مانده در میان کانی‌های سوپرژن سولفیدی قابل مشاهده هستند. در بخش‌های سطحی و کم‌عمق نیز کانی‌هایی نظیر بورنیت تحت تأثیر این فرآیند از حاشیه در حال تبدیل‌شدن به کالکوسیت و کوولیت می‌باشند (شکل ۵-ت، و). تبدیل کالکوسیت به کانی‌های اکسیدی مس در شرایط سطحی، نشان‌دهنده شرایط اکسیدی سیالات گرمابی در این مرحله است (Tristá-Aguilera et al., 2006). در ادامه و طی توسعه فرآیند اکسیداسیون و شستشوی کانی‌های سولفیدی، کانی‌های مراحل قبلی توسط اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) جانشین شده‌اند. قابل ذکر است که حضور اکسید و هیدروکسیدهای آهن نشان‌دهنده شرایط اکسیدان حاکم بر منطقه است. در برخی مقاطع، مگنتیت از حاشیه و در امتداد شکستگی‌ها و سطوح رخ در حال تبدیل شدن به هماتیت می‌باشد، به‌گونه‌ای که در بعضی مقاطع لکه‌هایی از مگنتیت در مرکز باقی مانده و گاهی مگنتیت به‌طور کامل به هماتیت تبدیل شده است. لازم به‌ذکر است که مارتیتی شدن در مگنتیت‌ها معمول است (شکل ۵-ث). هماتیت از جمله فراوان‌ترین کانی اکسیدی است که با افزایش مقادیر اکسیژن در بخش‌های فوقانی کانسنگ، شرایط تشکیل آن مهیا شده است. همچنین، کانی‌های مالاکیت و کریزوکولا به فرم رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و شعاعی دیده می‌شوند (شکل ۵-ه، ی). افزون بر این پس از کانه‌زایی، رگه-رگچه‌های از نوع کلسیت تأخیری در اثر انحلال یون کلسیم از کانی‌های کلسیم‌دار و عبور آب‌های سطحی دارای CO_2، در محل درزه و شکاف سنگ‌ها تشکیل شده که هیچ‌گونه ارتباطی با کانه‌زایی در آنها دیده نشده است. با توجه به مشاهدات صورت گرفته در منطقه و مطالعات میکروسکوپی، کوارتز، کلسیت و ژیپس به‌عنوان کانی‌های باطله در منطقه معدنی به‌حساب می‌آیند.

زمین‌شیمی

تعیین سری ماگمایی و موقعیت زمین‌ساختی

جهت بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر، تعیین آلکالینیته آنها و نام‌گذاری سنگ‌های منطقه به روش ژئوشیمیایی، پس از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و با توجه به دگرسانی شدید سنگ‌های منطقه، برای تعیین ماهیت این سنگ‌ها، از نمودار دوتایی TiO_2/ Zr در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977)، استفاده شده است (شکل۶-الف). براساس این نمودار، طیف ترکیبی سنگ‌های دربرگیرنده کانسار آبگاره گرایش به سمت سنگ‌های با ترکیب بازالت و آندزیت نشان می‌دهند که با نتایج سنگ‌شناسی مطابقت دارند. برای تعیین سری ماگمای مولد سنگ‌های ناحیه می‌توان براساس اختصاصات کانی‌شناسی و شیمیایی که از خود نشان می‌دهند به جدایش آنها اقدام کرد. بدین‌جهت از مقادیر اکسید عناصر اصلی برای این منظور استفاده شد. نمودار مثلثی AFM (Irvine and Baragar, 1971)، تغییرات درصد آهن را در طول تفریق نشان می‌دهد و قادر است سنگ‌های آذرین کالک‌آلکالن و تولئیتی را از یکدیگر متمایز



شکل ۵. الف و ب) حضور گسل‌ها و ارتباط آنها با کانه‌زایی مس (زاویه دید به سمت شمال‌شرق)، پ) هم‌رشدی کالکوپیریت و بورنیت با پیریت به همراه هماتیت (PPL)، ت) جانشینی بورنیت توسط کوولیت به همراه پیریت (PPL)، ث) مارتیتی شدن و تبدیل مگنتیت به هماتیت (PPL)، ج) پیریت در حال تبدیل شدن به گوتیت (PPL)، د) پیریت رگه‌ای (PPL)، و) جانشینی بورنیت توسط کالکوسیت (PPL)، ه) مالاکیت به‌صورت رگه-رگچه‌ای و شـــکافه پرکن و همچنین هماتیت که از حاشـــیه در حال تبدیل شدن به گوتیت است (PPL)، ی) تصویر نمونه‌دستی مالاکیت و کریزوکولا با بافت شـــعاعی، (Mag= مگنتیت، Py= پیریت، Cpy = کالکوپیریت، Bn= بورنیت، Cc= کالکوســـیت، Cv= کوولیت، Mal= مالاکیت، Ccl= کریزوکولا، Hem= هماتیت، Gt= گوتیت، Lm= لیمونیت)

جدول ۱. مراحل تشکیل و تکوین کانه‌زایی و توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌ها و بافت آنها در کانسار مس آبگاره

Stages / Minerals		Per-mineralization	Hypogene	Supergene and Weathering	
				Reduction	Oxidation
Mineralization	Magnetite	———			
	Pyrite	———	———		
	Chalcopyrite		———		
	Bornite		———		
	Chalcocite			———	
	Covellite			———	
	Hematite				———
	Malachite				———
	Chrysocolla				———
	Goethite				———
	Limonite				———
Gangues	Quartz		———	———	———
	Calcite		———	———	———
	Gypsum		———		———
Textures	Vein-veinlets		———	———	———
	Disseminated	———	———		
	Open space filling		———		———
	Radial				———
	Replacement			———	———

سازد (شکل۶-ب). بر این اساس، ماگمای مولد سنگ‌های منطقه از روند تفریق ماگمایی کالک‌آلکالن تبعیت می‌کند. حضور کانی‌هایی نظیر کلینوپیروکسن (اوژیت)، هورنبلند و بیوتیت در این نوع ماگماها، نتایج حاصل از نمودارهای فوق را تأیید می‌کند (Wilson، 1989). براساس نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor، 1976) سنگ‌های مورد مطالعه در سری شوشونیتی و به‌ندرت در قلمرو سری کالک‌آلکالن پتاسیم بالا قرار می‌گیرند (شکل ۶-پ). به منظور تعیین محیط تکتونیکی نیز از نمودارهای مبتنی بر پایه عناصر کمیاب، نسبت‌های بین آنها و عناصر کم‌تحرک استفاده شده است. با توجه به نمودار Wood (1980)، همه نمونه‌ها در گستره کمان قاره‌ای (CAB) واقع می‌شوند (شکل۶-ت). لازم به ذکر است که این ماگماها از اختلاط ماگماهای حاصل از گوشته و پوسته منشاء می‌گیرند (Tatsumi and Takahashi، 2006).

بررسی الگوی عناصر کمیاب و نادر خاکی

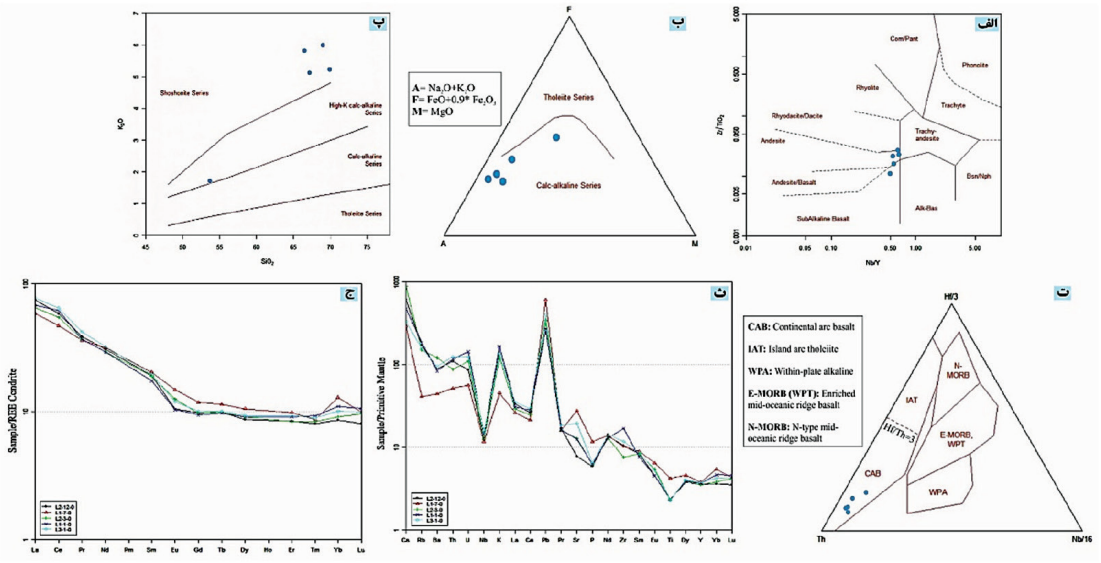
برای شناخت بهتر ویژگی‌های سنگ‌های آتش‌فشانی مورد مطالعه، داده‌ها به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه و کندریت مورد استفاده قرار گرفت که چگونگی روند آنها در شکل (۶-ث، ج) نشان داده شده است. غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر در این نمودارها، از ویژگی‌های مهم سنگ‌های ماگمایی مرتبط با کمان آتش‌فشانی است که در اثر عملکرد سیالات ناشی از فرورانش به‌وجود می‌آیند. بر پایه داده‌های به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (شکل۶-ث) (Sun and Mcdonogh، 1989)، عناصر LILE، HFSE و REE براساس کاهش ناسازگاری از چپ به راست مرتب شده‌اند. در این نمودار بی‌هنجاری مثبت عناصر ناسازگار سنگ‌دوست با شعاع یونی بزرگ (LILE) مانند K، Th، U و Pb و بی‌هنجاری منفی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) همچون Ti، Nb و P مشاهده می‌شود. Davidson (1996)، غنی‌شدگی از عناصر K،Th، U و Pb (جدول‌های ۲ و ۳) را مربوط به آلودگی گوه گوشته‌ای به رسوبات بالای پوسته اقیانوسی فرورونده نسبت می‌دهد. آنومالی منفی Nb و Ti، از ویژگی‌های شاخص ماگماتیسم‌های مرتبط با فرآیند فرورانش است که به دلیل عدم تحرک این عناصر، در فرآیندهای مربوط به ذوب‌بخشی شرکت نمی‌کنند و در نتیجه سبب تهی‌شدگی ماگمای تولید شده در گوه گوشته‌ای از Nb و Ti می‌شوند. الگوی به‌هنجار شده عناصر نادر خاکی کمیاب (REE) نسبت به کندریت (شکل۶-ج) (Boynton، 1984)، بیانگر غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین می‌باشد. در این نمودار، شیب عناصر نار خاکی از LREE تا Eu رو به پایین است، اما سپس از Eu به سمت HREE الگوی عناصر به‌صورت مسطح دیده می‌شود و حتی ممکن است به‌سوی HREEها شیب تاحدودی رو به بالا شود که این نشان‌دهنده جدایش HREE و MREE نسبت به LREE است (Prowatke and Klemme، 2006). آنومالی منفی Eu در سنگ‌های منطقه منعکس‌کننده جدایش پلاژیوکلاز از مذاب در اعماق، طی فرآید تفریق و یا منشاء گرفتن از عمقی است که فلدسپار وجود ندارد (Weaver and Tarney، 1984).

جدول ۲. نمونه‌های تجزیه شده از سنگ‌های دارای رخنمون در منطقه معدنی (اکسیدهای اصلی به روش XRF (Wt٪))

sample	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Total
L2-12	۶۶/۱۶	۰/۵۳	۱۴/۳۴	۳/۷۹	۰/۰۵	۰/۸۹	۲/۵۰	۱/۹۲	۵/۷۵	۰/۱۶	۳/۹۱	۹۵/۹۴
L1-7	۵۰/۰۰	۰/۹۷	۱۶/۶۰	۷/۲۵	۰/۱۸	۳/۰۰	۱۰/۷۸	۲/۹۱	۱/۵۷	۰/۲۸	۶/۸۱	۹۳/۰۴
L2-3	۶۴/۲۱	۰/۵۴	۱۵/۶۲	۳/۴۶	۰/۰۸	۰/۶۵	۳/۹۰	۲/۵۰	۵/۶۰	۰/۱۶	۳/۲۵	۹۶/۶
L1-1	۶۷/۲۱	۰/۶۳	۱۳/۴۳	۴/۹۴	۰/۱۰	۱/۲۰	۱/۷۱	۱/۹۴	۵/۰۲	۰/۱۶	۳/۴۷	۹۶/۱۵
L3-1	۶۵/۴۷	۰/۵۵	۱۵/۸۷	۳/۶۳	۰/۰۶	۱/۳۷	۲/۱۸	۳/۱۵	۵/۰۰	۰/۱۵	۲/۵۷	۹۷/۳۳

جـــدول ۳. نمونه‌های تجزیه شـــده از ســـنگ‌های دارای رخنمون در منطقه معدنی (عناصر فرعـــی و عناصر کمیاب خاکی به روش ICP-MS (ppm))

sample	L2-12	L1-7	L2-3	L1-1	L3-1	AT1-1	AT1-2	AT1-3	AT1-5	AT2-1	AT3-1
Ag	۰/۶	۰/۲	۰/۵	۴/۷	۰/۲	۸۱/۷	۳۱/۳	۳۰/۳	۲۳/۴	۳۳/۳	۲۸/۶
As	۷/۲	۲/۷	۳/۲	۶/۱	۷/۴	۹/۴	۸/۶	۵/۹	۹/۲	۸/۳	۳/۳
Ba	۶۲۴	۳۱۰	۸۴۹	۵۸۳	۶۶۴	۵۹۹	۵۸۱	۵۴۲	۵۱۶	۶۷۵	۵۹۰
Bi	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۴	۰/۳	۰/۵
Ce	۴۷	۳۸	۴۴	۵۰	۵۲	۴۳	۵۲	۵۴	۴۰	۴۸	۴۶
Co	۶/۲	۲۵/۷	۸/۵	۴/۸	۵/۹	۴/۵	۲/۹	۴/۲	۳/۹	۲/۸	۳/۱
Cr	۱۳	۱۳۳	۱۵	۱۴	۱۳	۱۳	۱۴	۱۴	۱۴	۱۳	۱۵
Cs	۴/۸	۲/۳	۶/۹	۳/۷	۲/۶	۳/۵	۵/۳	۵/۳	۵/۸	۴/۴	۶
Cu	۳۸	۷۰	۱۲۰	۱۵۷۲	۷۵	۱۸۲۹۱	۱۵۱۸۴	۱۳۹۵۳	۲۶۲۱۷	۲۲۱۷۰	۲۳۱۸۵
Dy	۲/۸	۳/۳۹	۲/۹۲	۲/۹۳	۳/۰۱	۲/۹۳	۳/۰۸	۳/۲۱	۲/۸	۲/۹۳	۲/۷۱
Er	۱/۷۷	۲/۰۷	۱/۷۵	۱/۹۲	۱/۹۶	۱/۹۲	۱/۹۸	۲/۱۸	۱/۹۶	۱/۹۲	۱/۸۳
Eu	۰/۷۷	۱/۰۹	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۷۸
Fe	۲۴۲۸۹	۴۰۳۴۹	۲۰۶۰۷	۲۳۰۵۴	۲۱۹۰۵	۲۵۷۸۲	۲۶۱۶۳	۲۴۸۱۵	۲۵۹۱۸	۲۵۵۸۷	۲۴۹۳۳
Gd	۲/۵۵	۳/۰۷	۲/۵۲	۲/۴۴	۲/۶۲	۲/۳۱	۲/۶۲	۲/۶۹	۲/۳۷	۲/۵۲	۲/۴۷
Hf	۳/۱۴	۲/۹۸	۲/۱۱	۵/۱۲	۳/۵۹	۴/۶۱	۴/۴۷	۴/۵۴	۳/۸۹	۴/۳۴	۴/۲۲
K	۴۰۸۲۵	۱۱۳۳۷	۳۰۵۷۷	۴۱۳۱۲	۳۳۸۳۹	۴۵۹۰۲	۳۸۰۲۸	۳۶۶۴۲	۴۵۲۲۱	۳۶۲۸۳	۴۸۱۹۹
La	۲۳	۱۸	۲۰	۲۱	۲۴	۱۸	۲۴	۲۵	۱۹	۲۲	۲۱
Li	۳۰	۲۶	۱۵	۲۵	۳۴	۲۵	۱۶	۲۱	۲۲	۱۹	۱۹
Lu	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳
Mn	۳۶۸	۱۰۹۸	۵۳۰	۴۸۱	۴۲۶	۵۹۸	۳۳۶	۴۴۰	۴۶۷	۴۷۸	۴۶۳
Nb	۸/۹	۸/۴	۹	۱۰/۳	۱۰/۹	۱۰/۱	۱۱/۸	۱۱/۹	۹/۸	۱۰/۶	۹/۸
Nd	۱۸/۵	۱۸/۹	۱۷/۶	۱۷/۵	۱۹/۳	۱۷/۵	۲۰	۲۰/۲	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۶/۹
Ni	۶	۳۳	۵	۴	۴	۳	۳	۴	۴	۳	۳
P	۵۵۹	۱۱۱۱	۵۹۴	۵۹۳	۶۱۳	۶۹۷	۷۳۷	۷۰۹	۶۹۲	۶۵۷	۷۱۹
Pb	۱۹	۴۳	۲۴	۱۹	۲۸	۲۰	۲۰	۲۱	۲۱	۳۰	۲۲
Pr	۴/۷۱	۴/۴	۴/۴۷	۴/۴۸	۵/۱۲	۴/۳۹	۵/۲۶	۵/۲	۴/۴۷	۴/۶۶	۴/۳۴
Rb	۱۰۹	۲۶	۹۵	۱۱۷	۹۹	۱۳۹	۱۲۹	۱۱۲	۱۴۲	۱۱۴	۱۴۱
Sb	۵/۰>	۱/۳	۵/۰>	۲	۵/۰>	۴/۳	۳/۳	۲/۱	۴/۲	۲/۵	۳/۳
Sc	۷/۵	۲۳/۲	۶	۶/۲	۶/۸	۶/۴	۸/۶	۷/۸	۶/۸	۷/۶	۶/۸
Sm	۳/۷۴	۳/۹۷	۳/۶۹	۳/۳۹	۳/۸	۳/۵۸	۳/۹۱	۴/۱۲	۳/۵۲	۳/۷۱	۳/۴۹
Sn	۰/۷	۱	۱/۳	۱/۵	۰/۹	۲/۱	۱/۵	۱/۵	۳/۱	۱/۶	۱/۹
Sr	۱۶۵/۲	۵۸۷/۶	۲۶۹/۷	۲۶۶/۷	۴۱۳/۵	۱۵۷/۴	۲۱۱/۸	۳۱۱/۷	۱۳۵/۷	۳۵۳/۲	۱۵۶/۲
Tb	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۶
Th	۹/۳۹	۴/۴۱	۷/۴۷	۹/۹۴	۱۰/۶	۹/۴۲	۱۱/۳۲	۱۱/۷۷	۹/۹۴	۱۰/۱۹	۹/۹
Ti	۳۰۸۷	۵۴۸۸	۳۰۶۰	۳۰۵۸	۳۰۱۱	۲۷۱۷	۳۱۷۸	۳۰۱۷	۲۵۷۴	۲۷۴۹	۲۷۲۵
Tl	۰/۴۹	۱/۰>	۰/۵۷	۱	۰/۴۹	۱/۳۶	۱/۱۴	۰/۷۵	۱/۲۳	۰/۶	۱/۰۴
Tm	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۳	۰/۲۹	۰/۳	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۲۹
U	۱/۸	۱/۱۸	۲/۳	۳	۲/۶	۳/۶	۵/۱	۳/۹	۵/۴	۳/۲	۳/۴
V	۴۵	۱۸۷	۶۴	۷۹	۶۳	۷۰	۸۱	۸۷	۶۴	۶۲	۶۷
W	۱/۱	۱>	۱/۱	۱/۹	۱/۵	۲/۲	۲	۱/۸	۱/۸	۱/۳	۱/۸
Y	۱۶/۴	۱۷/۳	۱۶/۱	۱۶/۸	۱۷	۱۵/۹	۱۷/۸	۱۸/۱	۱۷	۱۷/۵	۱۶/۴
Yb	۱/۸	۲/۷	۱/۹	۲/۳	۲/۱	۲/۱	۲/۵	۲/۵	۲/۱	۲/۴	۲/۱
Zn	۴۱	۱۱۶	۲۴۲	۳۵	۱۰۶	۸۲	۶۱	۶۰	۹۹	۸۰	۸۵
Zr	۱۱۸	۱۱۵	۸۵	۱۹۰	۱۳۱	۱۶۴	۱۷۸	۱۷۲	۱۵۷	۱۷۵	۱۵۸



شـــکل ۶. نمودارهای زمین‌شیمی ســـنگ‌های آذرین منطقه، الف) موقعیت سنگ‌های آتش‌فشانی کانسار در نمودار دوتایی Zr/TiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd، 1977) که بیشتر نمونه‌ها در محدوده آندزیت و کمتر در محدوده بازالت قرار می‌گیرند، ب) نمودار مثلثی AFM (Irvine and Baragar، 1971) و ماهیـــت کالک‌آلکالن ســـنگ‌های آذرین منطقه، پ) نمـــودار K_2O در برابر SiO_2 (Peccerillo and Taylor، 1976) و موقعیت سنگ‌ها در قلمرو سری کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی، ت) نمودار مثلثی (1980) Wood و موقعیت نمونه‌ها در گستره کمان قاره‌ای (CAB)، ث) الگوی به‌هنجار شده عناصر نسبت به گوشته اولیه (Sun and Mcdonogh، 1989) و نمایش بی‌هنجاری مثبت عناصر ناسازگار سنگ‌دوست با شعاع یونی بزرگ (LILE) و بی‌هنجاری منفی عناصر ناسازگار با شدت میدان بالا (HFSE)، ج) الگوی به‌هنجار شده عناصر خاکی کمیاب نسبت به کندریت (boynton، 1984)، نشان‌دهنده بی‌هنجاری مثبت LREE و الگوی تقریباً مسطح HREE

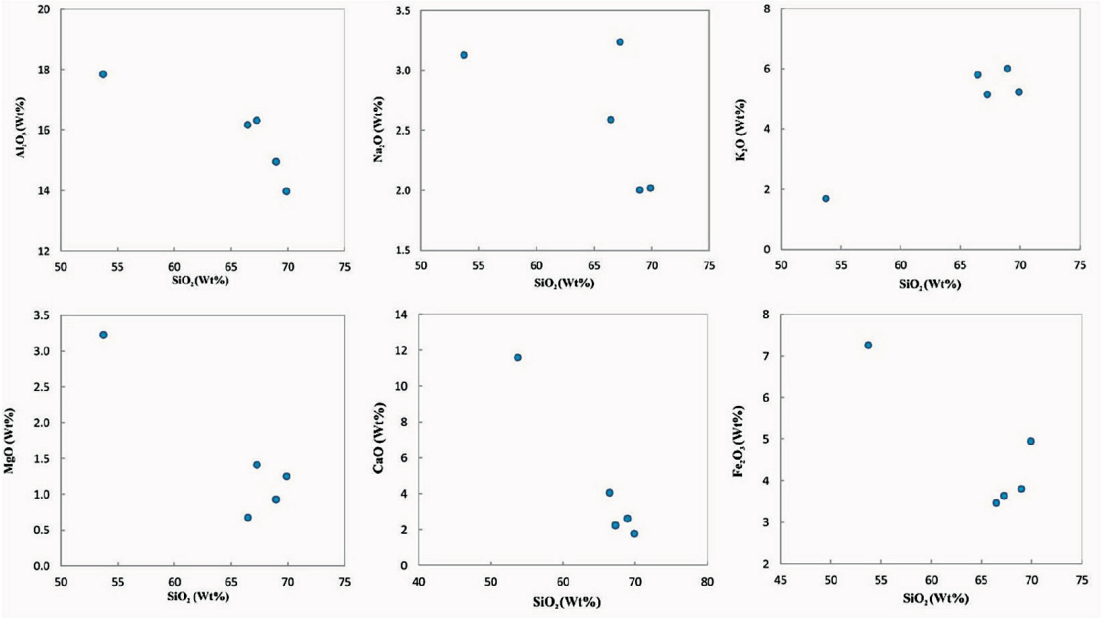
بررسی تغییر و تحول زمین‌شیمیایی سنگ‌ها به کمک نمودارهای تغییرات

برای نمایش ارتباط ژنتیکی بین ســـنگ‌های منطقه از نمودار هارکر اســـتفاده شد (شکل ۷) که از جمله مهم‌ترین کاربردهای این نمودار در سنگ‌شناسی می‌توان به پی بردن به عملکرد فرآیندهایی مثل تفریق ماگمایی، هضم و ذوب‌بخشی آذرین اشاره نمود. در این بررسی عناصر اصلی مانند Al_2O_3، MgO و Fe_2O_3 با افزایـــش SiO_2 در طی تفریق ماگمایی، روند کاهشی نشان می‌دهند. تبلور اولیه کانی‌های اولیوین و پیروکسن و جدا شدن آنها از ماگما سبب کاهش MgO و Fe_2O_3 در ماگمای باقی‌مانده می‌شود. Na_2O و K_2O جزو عناصر ناسازگار محســـوب می‌شوند که با افزایش در میزان SiO_2 ماگما روندی صعودی را از سنگ‌های بازالتی به سمت آندزیت نشـــان می‌دهند. از طرفی این روند در Na_2O خیلی واضح نیست و پراکندگی ضعیفی را نشان می‌دهد که می‌تواند در حین صعود ماگما، تحت تأثیر فرآیندهای جدایشی (تبلور تفریقی، اختلاط ماگمایی و هضم)، دســـتخوش تغییر شده باشد. اکســـید CaO نیز با افزایش میزان SiO_2 در ماگما، روند نزولی دارد که بیانگر تبلور پلاژیوکلازهای کلســـیک در طی تفریق ماگمایی است.

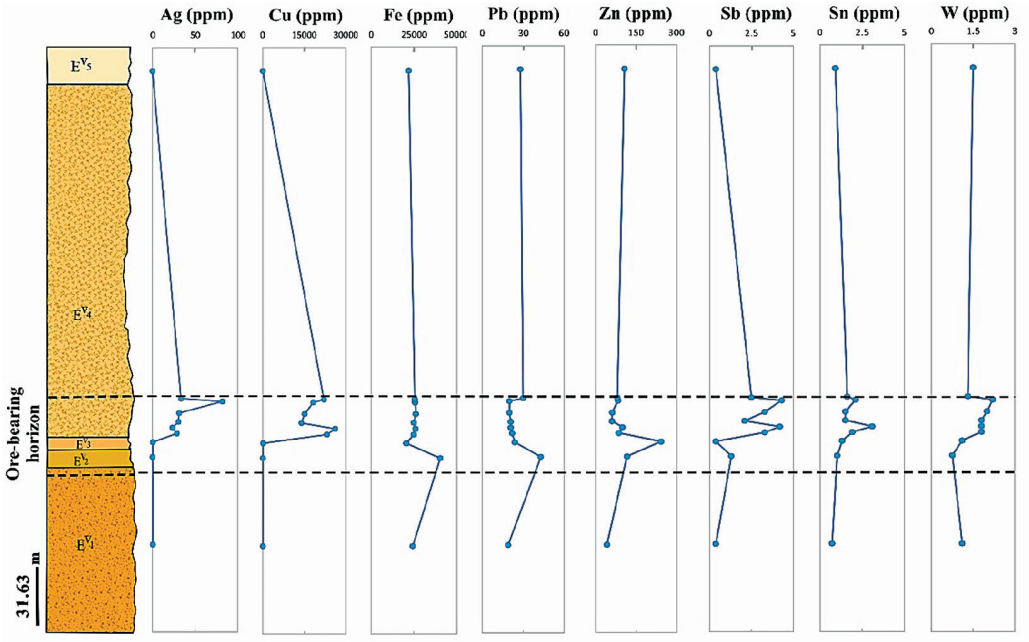
پراکندگی و همبســـتگی برخی عناصر در مقطع لیتوژئوشیمیایی منطقه آبگاره

به‌منظور روشن شدن چگونگی توزیع ژئوشیمیایی عناصر مختلف در توالی ســـنگ میزبان و مـــاده معدنی موجود در کانسار آبگاره، اقدام به تهیه مقطع لیتوژئوشیمیایی از کانسار مذکور شـــد (شکل ۸). طبق شکل، Cu با Ag در افق‌های کانه‌دار دارای بیشترین فراوانی می‌باشد و تغییرات این عناصر در بخش‌های مختلف مقاطع لیتوژئوشـــیمیایی مشابه بوده است که نشـــان دهنده همبستگی مثبت میان این عناصر می‌باشـــد. اگرچه کانی‌های حاوی نقره به‌صورت مستقل در کانســـارهای مورد مطالعه مشاهده نشده است، ولی انتظار می‌رود که در شـــبکه کانی‌های دیگر از جمله کالکوپیریت و کالکوسیت قرار گرفته باشد، زیرا این کانی‌ها میزبان خوبی

برای این عنصر به‌شمار می‌روند. از طرفی Cu با عناصر Sb، Sn و W نیز همبســـتگی مثبت دارد. این درحالی است که عناصر Zn، Pb و Fe روندی متفاوت با Cu را نشان می‌دهند که حاکی از همبستگی منفی میان این عناصر با Cu است. Cu تحت شرایط اکســـیدان و pH متوسط تا پایین، دارای محدوده قابلیت انحلال وسیعی می‌باشد، این در حالی است که Fe تحت این شـــرایط از انحلال کمتری برخوردار است. لذا، این تفاوت منجر به جدایش Cu از Fe می‌شـــود. Pb و Zn به سمت بخش‌های کانه‌زایی کاهش نشان می‌دهند که احتمالاً به تحرک‌پذیری بالای این عناصر ارتباط دارد.



شکل ۷. تغییر روند مقادیر اکسیدهای اصلی در نمودارهای هارکر سنگ‌های آتش‌فشانی دربرگیرنده کانسار آبگاره



شکل ۸. میزان تغییرات تعدادی از عناصر در مقطع لیتوژئوشیمیایی کانسار مس آبگاره (براساس داده‌های ICP-MS)

بحث و نتیجه‌گیری

با نگاهی به زمین‌شناسی گستره آبگاره در می‌یابیم که کانه‌زایی مس در منطقه، در ارتباط با شرایط مناسب زمین‌شناسی (از جمله ویژگی‌های ماگمایی و تکتونیکی) قابل توجیه است. افزون بر آن، گسترش قابل توجه کانسارها و آثار کانه‌سازی در سراسر نوار آتش‌فشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین (برای مثال کانی‌سازی مس در معادن چشمه، پوسیده، چاه‌موسی و...)، که اغلب در مجموعه واحدهای ولکانوپلوتونیک ائوسن-الیگوسن جایگیری شده‌اند، بر اهمیت عملیات اکتشافی و کاوش در زمینه کانسارهای فلزی در این نوار می‌افزاید. در کانسار مس آبگاره توالی چینه‌ای میزبان بیشتر از نوع گدازه‌ای (بازالت، آندزیت بازالتی، آندزیت) و آذرآواری (کریستال‌توف) و همچنین رخداد کانه‌زایی بیشتر به‌صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی محدود به واحد آندزیتی و بازالتی است. گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده مواد معدنی در منطقه محسوب می‌شوند که معبری مناسب برای حرکت و چرخه سیال‌های گرمابی کانه‌دار ایجاد کرده و افزون بر این سبب تمرکز رگه‌های کانه‌دار و افزایش عیار اقتصادی مس در محدوده شده‌اند. کانی‌سازی در کانسار آبگاره به‌طور چیره در دو مرحله هیپوژن و سوپرژن و هوازدگی رخ داده است. کانی‌های هیپوژن ازجمله پیریت، کالکوپیریت و بورنیت تحت تأثیر فرآیندهای سوپرژن و هوازدگی به کالکوسیت،کوولیت، مالاکیت و کریزوکولا تبدیل شده‌اند. در همین مرحله اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) نیز تشکیل شده‌اند. از مهم‌ترین شاخص‌های منطقه، رخداد گسترده انواع دگرسانی از جمله سریسیتی، سیلیسی، آرژیلیتی، کربناتی، کلریتی و اکسیدهای آهن می‌باشد که بر پایه مطالعات میکروسکوپی و XRD حضور آنها به اثبات رسیده است. همچنین، براساس مطالعات زمین‌شیمیایی مشخص شد که سنگ‌های آذرین موجود در منطقه آبگاره، در گستره کمان قاره‌ای و سری سنگ‌های کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا تا شوشونیتی قرار می‌گیرند. از طرفی، در نمودارهای به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه و کندریت، سنگ‌های آتش‌فشانی منطقه، غنی‌شدگی قابل ملاحظه‌ای از عناصر LILE مثل K، Th، U و Pb و تهی‌شدگی از عناصر موسوم به HFSE مثل Nb و Ti نشان می‌دهند که این ویژگی را می‌توان به منشاء گرفتن ماگمای آنها از گوه گوشته‌ای در یک زون فرورانش نسبت داد. در بررسی‌های زمین‌شیمیایی مربوط به نمودارهای هارکر نیز پدیده تفریق قابل مشاهده است. بنابراین تحول تفریق‌بلورین یکی از تحولات اصلی ماگمایی حاکم بر ماگمای تشکیل‌دهنده سنگ‌های مورد مطالعه محسوب می‌شود. براساس شواهد بحث شده در بالا ازجمله نوع دگرسانی، کانی‌های تشکیل‌دهنده و نحوه گسترش ماده معدنی، به‌نظر می‌رسد که کانسار مس آبگاره یک کانسار رگه‌ای گرمابی باشد.

قدردانی

در پایان سپاس خود را از شرکت زمین‌پویان فرآز آسیا، به‌ویژه آقای مهندس عزیزیان به‌پاس همه همکاری و یاری‌هایشان در انجام این پژوهش ابراز می‌دارم. همچنین، از پیشنهادها و نظرات سازنده داوران محترم مجله در ارائه بهتر مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- اشراقی، ص. ع. و جلالی، الف.، ۱۳۸۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- امام‌جمعه، الف.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار مس چاه‌موسی شمال غرب طرود، استان سمنان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۹۵.
- حسینی‌دینانی، ه. و باقری، ه.، ۱۳۹۱. تعیین مرکز تقریبی کانه‌سازی و شرایط نهشت مس-طلا با استفاده از مطالعات کانه‌نگاری و میان‌بارهای سیال در اندیس کالچویه (جنوب‌غرب نائین). مجله پترولوژی. ۹، ۳۶-۱۷.
- حسین‌زاده، ق.، کلاگری، ع. الف.، مؤید، م.، حاج‌علیلو، ب. و مؤذن، م.، ۱۳۸۸. بررسی دگرسانی و کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه سوناجیل (خاور هریس-استان آذربایجان شرقی)، فصلنامه علوم‌زمین، ۷۴، ۳-۱۲.
- حقیقی، الف.، علیرضایی، س. و اشرف‌پور، الف.، ۱۳۹۲. کانه‌زایی، دگرسانی و ویژگی‌های سیال کانه‌زا در

کانسار فلزات پایه و گرانبهای چشمه‌حافظ، رشته کوه طرود-چاه‌شیرین، شمال ایران مرکزی. فصلنامه علوم‌زمین، ۸۸، ۹۹-۱۱۰.

- رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۷۱. بررسی تحولات سنگ‌شناسی و ماگمایی و ارتباط آن با کانه‌سازی طلا در منطقه باغو (جنوب دامغان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت‌معلم، تهران.

- علوی، م.، هوشمندزاده، ع.، اطمینان، ه. و حقی‌پور، ع.، ۱۹۷۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طرود. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

- مهرابی ب. و قاسم‌سیانی م.، ۱۳۸۹. کانی‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی کانسار پلی‌متال چشمه‌حافظ، استان سمنان، ایران. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۲، ۲۰-۱.

- مهرابی، ب.، قاسم‌سیانی، م. و طالع‌فاضل، الف.، ۱۳۹۳. بررسی سامانه کانه‌زایی فلزات پایه و گران‌بها در محدوده‌های معدنی چشمه‌حافظ و چالو، کمان ماگمایی طرود-چاه‌شیرین. فصلنامه علوم‌زمین، ۹۳، ۱۱۸-۱۰۵.

- ولی‌زاده، م. و. و جعفریان، ع. ر.، ۱۳۶۸. قرابت‌های پتروژنتیک قوس ولکانو-پلوتونیک کوه‌زر-طرود و ارتباط آن با متالوژنی در ناحیه. مجله علوم دانشگاه تهران، ۱، ۳۳-۲۱.

- یزدی، ع. الف.، شاه‌حسینی، الف. و امیری، ع.، ۱۳۹۳. کاربرد شیمی کانی‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت در ارزیابی دما و فشار مجموعه نفوذی طرود. مجله ژئوشیمی، ۳، ۲۲۵-۲۳۳.

- یوسفی، ف. و صادقیان، م.، ۱۳۹۴. تحلیل بر ماهیت آنکلاوهای موجود در گنبدهای آذرین نیمه‌عمیق جنوب و جنوب‌شرق شاهرود. نوزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و نهمین همایش ملی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور.

- یوسفی، ف.، صادقیان، م.، جمال، ز.، منصوری‌مقدم، ب. و قاسمی، ح. الف.، ۱۳۹۵. پتروژنز گنبدهای آداکیتی کم‌سیلیس سهل (جنوب شاهرود، جنوب خاوری استان سمنان). مجله پترولوژی، ۲۸، ۱۰۸-۹۵.

- یوسفی، ف.، ۱۳۹۶. پتروژنز و زمین‌شناسی ایزوتوپی سنگ‌های آذرین نفوذی پس از ائوسن نوار ماگمایی طرود-احمدآباد (جنوب‌شرق شاهرود). رساله دکتری. دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۴۷.

- Baker, W.E., 1978. The role of humic acid in the transport of gold, Geochimica et Cosmochimica Acta, 42,6, 645-649.

- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, Rare Earth Element Geochemistry, 63-114.

- Damian, G., Damian, F., Macovei, G., Constantina, C. and Iepure, G., 2007. Zeolitic Tuffs from Costiui zone-Maramures Basin, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2,1, 59-74.

- Davidson, J.P., 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. Subduction top to bottom, Geophysical Monograph, 251-262.

- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, Canadian Journal of Earth Science, 8, 523-548.

- Peccerillo, A. and Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58,1, 63-81.

- Prowatke, S. and Klemme, S., 2006. Rare earth element partitioning between titanite and silicate melts: Henry's law revisited. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 4997-5012.

- Shamanian, G.H., Hedenquist, J.W., Hattori, K.H. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. Economic Geology, 99,4, 691-712.

- Sun, S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, In: Saunders,A.D., Norry,M.J., (Eds.),

magmatism in the Oceans Basins, Geological society of London Special Publication 42,313-345.

- Tatsumi Y. and Takahashi T., 2006. Operation of subduction factory and production of andesite, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences,101,3, 145-153.

- Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S. and 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. Mineralium Deposita, 41,1, 99.

- Weaver, B.L. and Tarney, J., 1984. Major and trace element composition of the continental lithosphere. Physics and Chemistry of the Earth, 15, 39-68.

- Wicander, R. and Monroe, J.S., 1995. Essentials of Geology, West Publishing Company, 428.

- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis a Global Tectonic Approach. Chapman and Hall, London, 466.

- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.

- Wood D. A., 1980, The application of a Th Hf Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province, Earth and Planetary Science Letters, 50,1, 11-30.