

زمین‌شناسی، مراحل کانی‌سازی و زمین‌شیمی هاله‌های دگرسانی کانسار مس-مولیبدن (±نقره) سنج (شمال کرج)، کمان ماگمایی البرز

ابراهیم طالع فاضل*^۱، بهزاد مهربانی^۲، معصومه حیات الغیبی^۳

۱-استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲-استاد گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

۳-دانشجو دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه لرستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۳

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۳/۲۸

چکیده

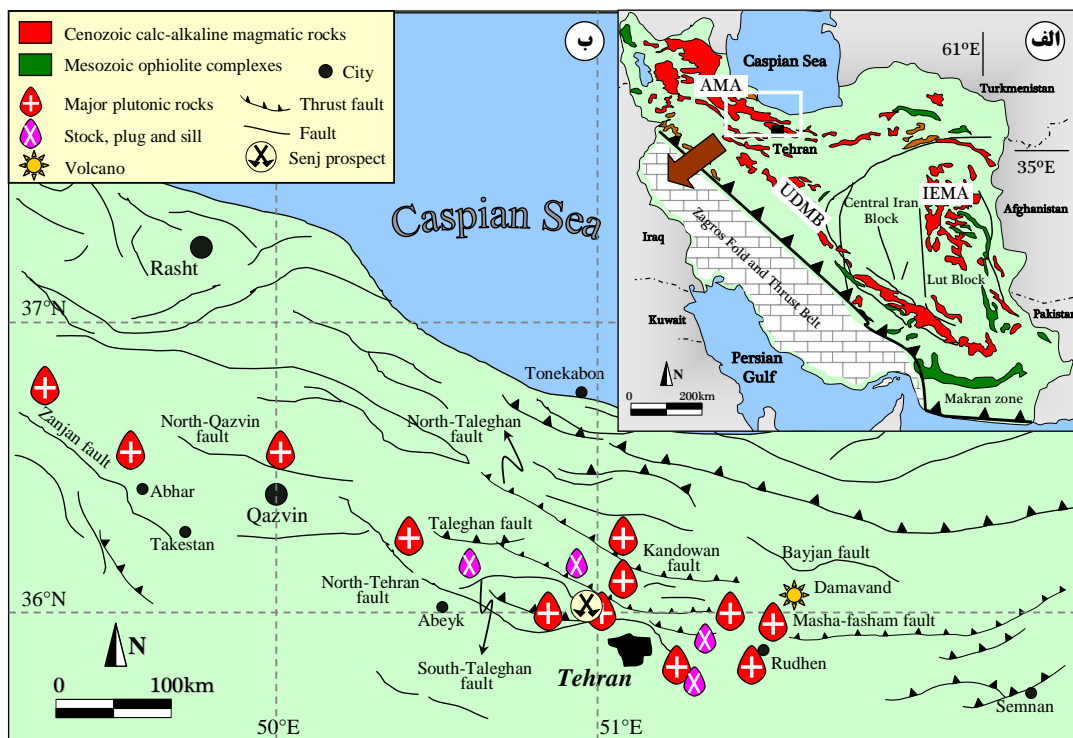
کانسار مس-مولیبدن سنج واقع در بخش مرکزی کمان ماگمایی البرز و شمال استان البرز (کرج) قرار دارد. منطقه سنج به طور کلی متشکل از سنگ‌های نفوذی مافیک تا حدواسط ترشیری و انواع سنگ‌های آذرآواری است. سیل نفوذی سد کرج با ترکیب مونزوگابرو، مونزودیوریت و دیوریت به سن ائوسن بالایی در سنگ‌های آذرآواری سازند کرج نفوذ کرده و در مجاورت آن کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری عناصر مس و مولیبدن (±نقره و طلا)، رخ داده است. کانه‌های سولفیدی (کالکوپیریت، بورنیت، مولیبدنیت و پیریت)، اکسیدی (مگنتیت و هماتیت) و کربناته (مالاکیت و آزوریت) مهم‌ترین پارائز کانی‌سازی در منطقه هستند. کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک به‌عنوان غنی‌ترین بخش کانسنگ با متوسط عیارهای ۲/۵ درصد مس و ۰/۲ درصد مولیبدن همراه با دگرسانی پتاسیک-فیلیک در میزبان توف پورفیری قابل مشاهده است. کانی‌سازی انتشاری نیز متشکل از کانی‌های پراکنده کالکوپیریت و مولیبدنیت با متوسط عیارهای مس ۱/۲ درصد و مولیبدن ۰/۰۸ درصد همراه با دگرسانی آرژیلیک حدواسط در میزبان آندزیت توف پورفیری رخ داده است. پهنه غنی‌سازی برون‌زاد با گسترش کم، متشکل از کانسنگ اکسی-هیدروکسیدی با کانی‌سازی ضعیف مس و کانسنگ سولفیدی غنی‌شده (جانشین) با بیشینه عیار مس ۲/۸ درصد مشخص می‌شود. دگرسانی‌های مگنتیت-بیوتیت (سیلیکات پتاسیم)، پتاسیک-فیلیک (مجموعه فلدسپار پتاسیک-بیوتیت-سریسیت-کوارتز±پیریت)، آرژیلیک حدواسط (مجموعه کائولینیت-ایلیت±کوارتز±کلسیت) و پروپیلیتیک (مجموعه اپیدوت-کلریت-لامونتیت-کلسیت±پیریت)، دگرسانی‌های اصلی کانسار سنج هستند. براساس مطالعات زمین‌شیمی دگرسانی، بالاترین تمرکز عیاری عناصر کانه‌ساز مس و مولیبدن در دگرسانی‌های پتاسیک-فیلیک با حضور کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک صورت گرفته و دگرسانی‌های آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک از عیار کمتری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: استوک‌ورک و انتشاری، زمین‌شیمی دگرسانی، مس و مولیبدن، کمان ماگمایی البرز، سنج.

مقدمه

میزبان ذخایر و آثار کانه‌زایی‌های فلزی و غیرفلزی متعددی از قبیل مس، آهن، منگنز، سرب و روی و سنگ‌های ساختمانی است که رخداد مداوم فعالیت‌های آتشفشانی و متعاقب آن رخداد دگرسانی‌های متنوع سیلیسی، فیلیک، پروپیلیتیک و نظایر آن، بسترساز مناسبی برای ردیابی نشانه‌های معدنی شده است (خوبی و همکاران، ۱۳۷۸).

توده‌های نفوذی پراکنده در پهنه البرز مرکزی به سن ائوسن پسین-لیگوسن (۲۳ تا ۳۷ میلیون سال)، با نفوذ در سنگ‌های آذرآواری سازند کرج و معادل آن، منجر به رخداد ذخایر و نشانه‌های معدنی مختلفی با ماهیت اپی‌ترمال (نوع رگه‌ای) و مجاورتی (اسکارن)، در بخش مرکزی کمان ماگمایی البرز شده است (قربانی، ۱۳۸۶؛ ولی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷) (شکل ۱). سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی در البرز مرکزی



شکل ۱: الف) نقشه تکتونو-ماگمایی ایران و موقعیت کمان ماگمایی البرز در آن (نقشه پایه از نوگل‌سادات و الماسیان، ۱۹۹۳) و ب) نقشه گسل‌ها و پراکندگی توده‌های نفوذی اصلی و فرعی در البرز مرکزی (با تغییرات از ولی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷) و موقعیت منطقه سنج در آن. حروف اختصاری شامل، کمان ماگمایی البرز (AMA)، کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (UDMB)؛ مجموعه ماگمایی شرق ایران (IEMA).

تا $36^{\circ}04'$ عرض شمالی واقع شده است. در سال ۱۳۶۶ معدن سنج به‌طور رسمی به‌وسیله شرکت خدمات و توسعه معادن ایران با هدف پی‌جویی مواد معدنی مورد اکتشاف چکشی قرار گرفته که طی آن

منطقه معدنی سنج به وسعت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال کرج و ۱۰ کیلومتری شمال برغان، در مختصات جغرافیایی $51^{\circ}00'$ تا $51^{\circ}07'$ طول شرقی و $36^{\circ}01'$

همکاران، ۲۰۰۵؛ آگارد و همکاران، ۲۰۱۱؛ وردل و همکاران، ۲۰۱۱ و آلن و همکاران، ۲۰۱۳). منطقه مورد مطالعه در برکه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران (امینی، ۱۹۹۳) و کرج (مهدی‌زاده، ۱۹۹۵) قرار گرفته است. گسترده‌ترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه متعلق به سنگ‌های آذرآواری سازند کرج و معادل آن به سن ائوسن است. براساس مطالعات ددوال (۱۹۶۷)، سازند کرج با مقطع تیپ ۳۳۰۰ متر متشکل از پنج عضو به ترتیب از پایین به بالا شامل، (۱) عضو شیل زیرین (۱۰۰۰ متر) متشکل از شیل‌های سیلیسی تیره با درون لایه‌های نازک توف سنگی، (۲) عضو توف میانی (۱۱۲۰ متر) متشکل از توف‌های ضخیم لایه زیتونی با درون لایه‌های توف بلورین، (۳) عضو شیل آسارا (۱۷۰ متر) متشکل از شیل‌های آهکی رس‌دار تیره بیتومن‌دار با آثار گیاهی، (۴) عضو توف بالایی (۹۰۰ متر) متشکل از آندزیت توف پورفیری، توف پورفیری و توف سنگی ریزدانه و (۵) عضو شیل و سنگ آهک کندوان (۸۵۰ متر) که هم‌ارز سازند قرمز پایینی و قم بوده و بالاترین عضو سازند کرج در منطقه است. عضو توف بالایی متشکل از واحدهای توف پورفیری و آندزیت توف پورفیری به‌عنوان میزبان کانی‌سازی در منطقه سنج هستند (شکل‌های ۲ و ۳). سیل نفوذی بنیان سد کرج با ظاهر بشقابی شکل، ضخامت ۴۶۰ متر و جهت شیب NE-SW ۶۰ در میان واحدهای آذرآواری سازند کرج جایگزین شده و در شمال شهر کرج رخنمون دارد. براساس مطالعات ولی‌زاده (۱۳۶۶) ترکیب سنگ‌شناختی این سیل نفوذی از حاشیه به سمت مرکز شامل چهار بخش؛ (۱) حاشیه انجماد سریع (گابرو پورفیری)، (۲) بخش گابرویی (هیالومیکرولیتیک پورفیری)، (۳) بخش دیوریتی (گرانولار) و (۴) بخش مونزونیتی (گرانولار تا افیتیک) است (شکل ۲). طبق مطالعات وردل و همکاران (۲۰۱۱)، بر پایه سن‌سنجی $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ بر روی بیوتیت‌های گابروی مبارک آباد در شرق سیل

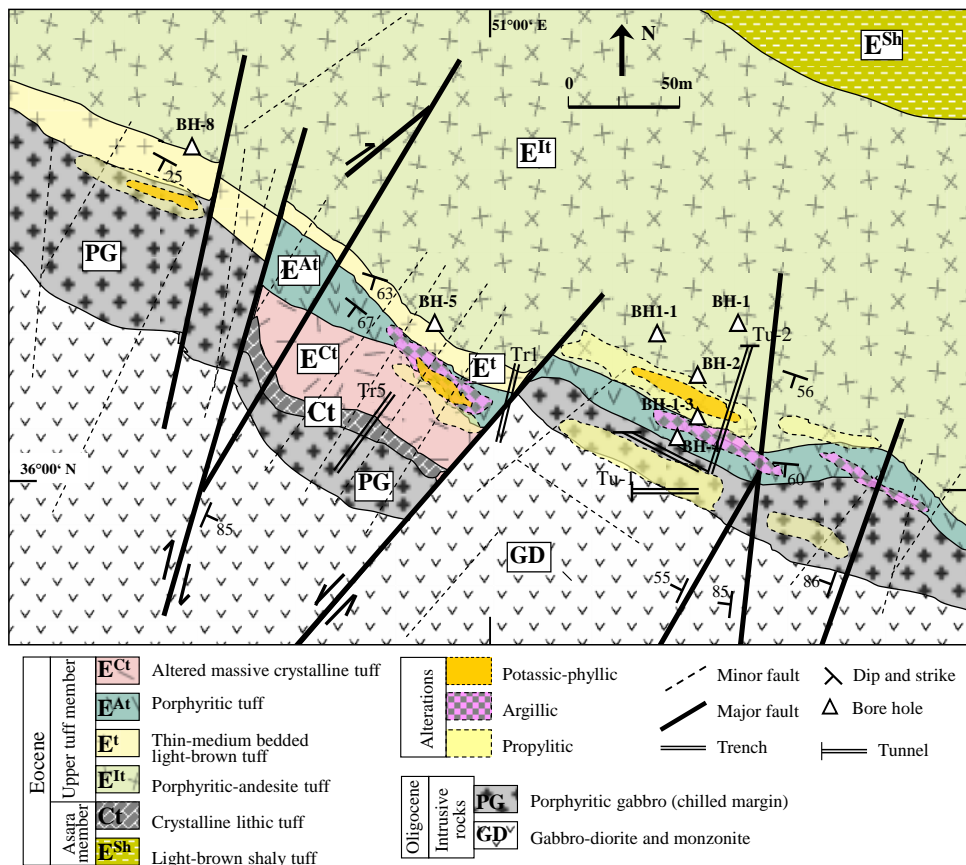
تعدادی چاهک و ترانشه در منطقه حفر شده است. منطقه مورد مطالعه در گزارش شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران (۱۳۸۸) به‌عنوان منطقه‌ای نویدبخش برای ردیابی عناصر مولیبدن، مس، طلا، نقره و عناصر نادر خاکی (REE) معرفی شده است. براساس گزارش اکتشافات تفصیلی بر روی منطقه توسط شرکت مهندسی مشاور پیچاپ‌کاوش (۱۳۸۶)، کانسار سنج دارای تناژ کمتر از ۱ میلیون تن و عیار متوسط ۳ درصد مس و ۰/۲ درصد مولیبدن است. بررسی زمین‌شناسی کانسار (شامل شکل‌کانی‌سازی، کانی‌شناسی کانسنگ و باطله، ساخت و بافت)، زمین‌شیمی هاله‌های دگرسانی، توزیع آماری عناصر کانه‌ساز در دگرسانی‌ها و منطقه‌بندی کانسار از اهداف این پژوهش است. منطقه چندفلزی سنج در کمان ماگمایی البرز شاخص‌ترین مجموعه کانی‌سازی مس-مولیبدن (\pm نقره) در این زون محسوب می‌شود که با مطالعه خصوصیات و شرایط رخداد کانی‌سازی در آن، ارتباط زمانی-فضایی کانی‌سازی با سیل نفوذی سنج مورد بررسی قرار گرفته است. بدیهی است دستیابی به این نتایج علاوه بر جنبه‌های علمی، می‌تواند نقش مهمی در پیشبرد ادامه مراحل اکتشافی در منطقه داشته باشد.

محدوده مورد مطالعه

رشته کوه‌های البرز مرکزی به‌عنوان بخشی از نوار زمین‌ساختی فعال آلپ-همیالیا، بخش جنوبی تحذب دریای خزر را در بر گرفته و دارای گستره‌ای از سمنان تا قزوین است (اشتوکلین، ۱۹۷۴) (شکل ۱). طبق مطالعات ماگماتیسیم کمان ماگمایی البرز با ترکیب حدواسط و ماهیت کالک آلکان تا پتاسیک در محیط تکتونیکی-ماگمایی کششی پشت قوس تشکیل شده است (آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ مک‌کوری و همکاران، ۲۰۰۳؛ حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۰۴؛ وینسنت و

گسل‌هایی با راستای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی روندهای اصلی در منطقه سنج هستند که گسل‌های شرقی-غربی در امتداد محل تماس سیل نفوذی کرج و در فاصله چندمتری بلافاصل توده قابل مشاهده است. گسل‌های شمالی-جنوبی نیز از میان توده نفوذی شروع شده و تا نزدیکی منطقه سنج-دوران واقع در شمال منطقه امتداد دارند.

نفوذی سنج، سن این گابروها معادل $37/2 \pm 0/38$ میلیون سال (Priabonian) بدست آمده که با توجه به شرایط تکتونوماگمایی مشابه، سن مذکور قابل تعمیم برای سیل نفوذی بنیان کرج نیز می‌باشد (مقدور مشهور و همکاران، ۲۰۱۵). ترکیب این سیل از نظر کانی‌شناختی شامل پلاژیوکلاز (لابرادور)، ارتوکلاز، اوژیت و به مقدار ناچیز آمفیبول است. از نظر ساختاری



شکل ۲: الف) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه معدنی سنج (با تغییرات از پیچاب کاوش، ۱۳۸۶) و ب) نیم‌رخ زمین‌شناسی در راستای شمال شرق-جنوب غرب (A-B) از واحدهای سنگی و رخداد دگرسانی‌های مختلف.

عملیات، تعداد ۱۰ گمانه اکتشافی (معادل ۱۰۰۰ متر مغزه حفاری) در منطقه حفر شده و نقشه زمین‌شناسی محلی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ از کانسار سنج تهیه شده است. تعداد ۶۵۰ نمونه‌سنگی از مغزه‌ها به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) (تجزیه ۴۴ عنصری) در آزمایشگاه SGS

مواد و روش‌ها

برنامه‌ریزی اکتشافی و عملیات پی‌جویی در منطقه معدنی سنج در سال ۱۳۸۸ با کارفرمایی شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و مشاوره شرکت مهندسین مشاور پیچاب کاوش انجام شده است. طی این

Mineral Services تورنتو (کانادا)، انجام شده است. حد حساسیت تجزیه‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۱ گرم در تن (ppm) بوده و برای اطمینان از ذوب کامل عناصر قلیایی از کمک ذوب‌های لیتیوم استفاده شده است. تجزیه ICP-MS با هدف دستیابی به ترکیب شیمی سنگ کل (whole rock chemistry) و عیارسنجی (ore assay) انجام شده که نتایج آن در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین برای کنترل نتایج داده‌ها، تعدادی از نمونه‌ها بصورت تصادفی به روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) مورد تجزیه قرار گرفتند. نمونه‌برداری به صورت متریک (از مغزه‌های حفاری) و غیرمتریک (نمونه‌برداری Chip) از بخش‌های مختلف ذخیره شامل، هاله‌های دگرسانی، رگه و رگچه‌های کانه‌دار و سنگ‌میزبان کانی‌سازی انجام شد. هم‌چنین تعداد ۱۰ نمونه پودرسنگ از سنگ‌میزبان و هاله‌های دگرسان، به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مورد تجزیه قرار گرفت.

کانه‌زایی

فعالیت‌های معدن‌کاری در منطقه سنج به منظور استخراج مولیبدن نخستین بار در سال ۱۳۴۷ به کمک ۶ تونل عمود بر لایه‌بندی (۲ تونل ریل‌گذاری) با درازای متوسط ۲۰ متر، چند ترانشه و گزنگ انجام گرفته و به‌عنوان قدیمی‌ترین معدن متروک منطقه به شمار می‌رود (مؤمن‌زاده و رشیدنژاد، ۱۳۶۴). طبق

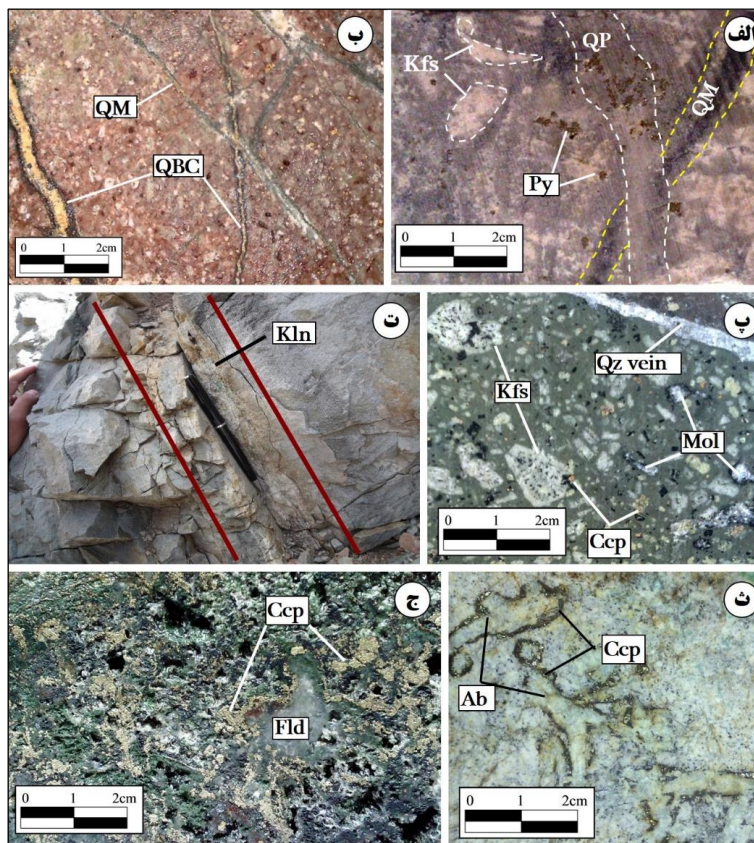
مطالعات درزه‌نگاری، توازی بسیار زیادی میان درزه‌های حاوی کانی‌سازی و لایه‌بندی در منطقه وجود دارد که این پدیده را می‌توان بخصوص در داخل و فراز تونل ۱ (شکل ۳ الف) و نیز تعدادی از ترانشه‌های قدیمی منطقه مشاهده کرد. کانه‌زایی در منطقه سنج با ژئومتری عدسی‌شکل تا رگه‌ای و بیشینه عمق ۱۲۰ متر صورت گرفته است. ساخت و بافت کانی‌سازی بصورت رگه-رگچه‌ای، انتشاری و جانشیننی همراه با عناصر اصلی مس و مولیبدن و عناصر فرعی نقره، طلا، سرب، کبالت و نیکل مشخص می‌شود که اغلب در محل تماس توده نفوذی سیل مونزودیوریتی با سنگ‌های آذرآواری و در میزبان واحدهای سنگی توف و آندزیت توف پورفیری رخ داده است (شکل ۳ ب و پ). مهم‌ترین عناصر ساختاری منطقه گسل‌های اصلی با درازای تقریبی ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر، راستای N20-40E و شیب ۵۰ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب‌شرق و شمال‌غرب است که عمدتاً پس از تشکیل سیل مونزودیوریتی سد کرج بخش‌های زیادی از واحدهای سنگی را بصورت ساختار مشابه هورست و گرابن جابجا کرده است (شکل ۲). هم‌زمان با جایگیری سیل نفوذی در سنگ‌های آذرآواری میزبان، گسل‌ها و درزه‌های فرعی با راستای شرقی-غربی و شمال‌غرب-جنوب‌شرق ناشی از نیروهای جانبی حاصل از جایگیری تشکیل شده‌اند که این ساختارها کنترل‌کننده‌های اصلی کانی‌سازی رگه-رگچه‌ای در منطقه هستند.



شکل ۳: تصاویر صحرایی از بخش‌های مختلف کانسار سنج شامل، الف) مجاورت سیل مونزودیوریتی و توف پورفیری که در محل تماس آنها تونل ۱ (T1) حفر شده است، ب) نمایی دیگر از توده نفوذی مونزودیوریتی در میزبان واحد توف بلورین بالایی که در میان آن تونل حفر شده است، پ) کانی‌سازی انتشاری مولیبدنیت در میزبان آندزیت توف پورفیری و ت) نمایی نزدیک از واحد سنگی آندزیت توف پورفیری.

(شکل ۴ الف و ب)، (۲) کانی‌سازی انتشاری مولیبدنیت، کالکوپیریت و پیریت در میزبان آندزیت توف پورفیری (شکل ۴ پ و ت) و (۳) کانی‌سازی جانیشینی اولیه در حاشیه کانی‌های سیلیکاته (نظیر پلاژیوکلاز و فلدسپارتاسیک) و ثانویه (طی غنی‌سازی برون‌زاد)، در منطقه رخ داده است (شکل ۴ ت و ج).

مراحل کانی‌سازی و دگرسانی: همان‌طور که اشاره شد کانسار سنج در محل تماس سیل مونزودیوریتی و واحد توف سازند کرج، با کنترل عناصر ساختاری منطقه در راستای تقریبی شرقی-غربی و شمال‌غرب-جنوب‌شرق تشکیل شده است. کانی‌سازی عمدتاً به سه شکل انجام شده است: (۱) کانی‌سازی استوکورک مس-مولیبدن در میزبان توف پورفیری



شکل ۴: تصاویر صحرایی و نمونه‌دستی از ساخت و بافت و دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی در منطقه شامل: الف) ساخت استوک‌ورک در میزبان دگرسانی پتاسیک-فیلیک با حضور رگچه‌های متقاطع کوارتز-مولیبدنیت (QM) که توسط رگچه کوارتز-پیریت (QP) قطع شده است به همراه دانه‌های پراکنده پیریت و فلدسپارپتاسیک در زمینه، ب) کانی‌سازی استوک‌ورک در میزبان توف پورفیری که در آن رگچه نسل اول کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC) توسط رگچه‌های میلی‌متری کوارتز-مولیبدنیت (QM) قطع شده است، پ) ساخت انتشاری متشکل از کانه‌های سولفیدی مولیبدنیت و کالکوپیریت همراه با رگه تأخیری کوارتز و دانه‌های فلدسپار در میزبان آندزیت توف پورفیری، ت) رخداد دگرسانی آرژلیک حدواسط با حضور کائولینیت در امتداد شکستگی‌های سنگ میزبان توف، ث و ج) کانه‌زایی جانیشینی اولیه شامل جانیشینی کالکوپیریت در حاشیه کانی‌های آلبیت و فلدسپارپتاسیک. حروف اختصاری: کالکوپیریت: Ccp، مولیبدنیت: Mol، پیریت: Py، فلدسپارپتاسیک: Kfs، آلبیت: Ab، کوارتز: Qz، کائولینیت: Kln (حروف اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز، ۲۰۱۰).

خوش‌وجه، گالن، کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت، کانی‌های اکسیدی-هیدروکسیدی شامل هماتیت، مگنتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت، کانی‌های کربناته مالاکیت و آزوریت و کانی‌های باطله از قبیل کوارتز، کلسیت، کلریت و لامونتیت، مجموعاً به‌عنوان کانی‌های کانسنگ و باطله در منطقه سنج هستند. هم‌چنین بافت‌های شکافه‌پرکن، انتشاری، استوک‌ورک، جانیشینی اولیه (از قبیل کالکوپیریت در حاشیه

به دلیل بالا بودن سطح آب‌زیرزمینی، تأثیر فرآیندهای برون‌زاد بر کانه‌زایی تقریباً بالا بوده و کانی‌سازی برون‌زاد سولفیدی-اکسیدی در منطقه به ترتیب از سطح به عمق شامل سه مجموعه هیدروکسیدی-کربناته (رخمون‌های سطحی)، اکسیدی-سولفیدی (عمق ۵۰ متر) و سولفیدی درون‌زاد (عمق ۵۰ تا ۱۲۰ متر) است (حیات الغیبی، ۱۳۹۰). کانه‌های سولفیدی نظیر کالکوپیریت-بورنیت، مولیبدنیت، پیریت

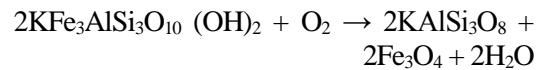
رگه کوارتز-پیریت (QP) است (شکل‌های ۴ الف و ب). رگه‌های فوق با ضخامت تقریبی ۰/۳ میلی‌متر تا حداکثر ۲ سانتیمتر در مجموعه دگرسانی پتاسیک-فیلیک با حضور کانی‌های فلدسپارپتاسیک، بیوتیت، سریسیت، کوارتز و پیریت تشکیل شده‌اند (شکل ۴). کالکوپیریت و بورنیت با بافت انحلال جامد بصورت تیغه‌های برون رستی کالکوپیریت در میزبان بورنیت در این مرحله قابل مشاهده است (شکل ۵ ب). بلورهای مولیبدنیت بصورت فلسی شکل (flaky) و منفرد با ابعاد تقریبی ۰/۱ میلی‌متر در میزبان کوارتز مشاهده شد (شکل ۵ پ). گالن و کلسیت نیز به مقدار ناچیز همراه با این مرحله کانی‌سازی تشکیل شده‌اند. مرحله سوم) کانی‌سازی انتشاری: به صورت کانی‌سازی کالکوپیریت و مولیبدنیت در میزبان آندزیت توف پورفیری قابل تشخیص است (شکل ۴ پ). این کانی‌سازی همراه با دگرسانی آرژیلیک حدواسط (مجموعه کائولینیت-ایلیت ± کوارتز ± کلسیت) رخ داده که اغلب همراه با ذرات پراکنده پیریت به ویژه در شکستگی‌ها و محل تماس سیل مونزونیتی و توف‌ها در منطقه تشکیل شده است (شکل ۴ ت). درشت بلورهای پلاژیوکلاز با ابعاد تقریبی ۰/۲ تا ۱ سانتیمتر متعلق به سنگ میزبان آندزیت پورفیری طی دگرسانی توسط کائولینیت و ایلیت (شناسایی توسط مطالعات XRD) جانشین شده‌اند (شکل ۵ ت).

مرحله چهارم) کانی‌سازی جانشینی اولیه: با حضور مقادیر ناچیز کالکوپیریت در حاشیه درشت بلورهای فلدسپارپتاسیک و آلپیت (شکل‌های ۴ ث و ج) در سنگ میزبان توف پورفیری و همراه با دگرسانی پروپیلیتیک (مجموعه اپیدوت-کلریت-لامونیت-کلسیت ± پیریت) تشکیل شده است. این مرحله با کانی‌سازی فلزی ناچیز و حضور مجموعه کانی‌های دگرسان اپیدوت، آلپیت، کلریت و زئولیت (لامونیت) و پیریت‌های خوش‌وجه تا نیمه خوش‌وجه پراکنده در فاصله دست کم ۱۰۰ متری از توده نفوذی در مقاطع

پلاژیوکلاز و فلدسپارپتاسیک)، جانشینی ثانویه (از قبیل کولیت، کالکوسیت و دیژنیت در حاشیه کالکوپیریت و بورنیت) و برون‌رستی (بورنیت-کالکوپیریت)، بافت‌های رایج در کانسنگ هستند. براساس مطالعات، رخداد کانی‌سازی و دگرسانی گرمایی مرتبط با آن در منطقه سنج با در نظر گرفتن مجموعه کانی‌های دگرسانی و سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه، دست کم به پنج مرحله به شرح زیر قابل تفکیک است.

مرحله اول) دگرسانی مگنتیت-بیوتیت (سیلیکات پتاسیم): در ابتدا با نفوذ سیل مونزونیتی در دمای بالا و در میزبان توده و نیز در مجاورت آن در سنگ میزبان توف پورفیری تا فاصله ۵۰ متری رخ داده است که در آن مگنتیت به صورت پراکنده در میزبان بیوتیت تشکیل شده است (شکل ۵ الف). در این مرحله با افزایش اکسیداسیون محیط طبق واکنش رابطه ۱ بیوتیت به مگنتیت تبدیل شده و طی این واکنش فلدسپار پتاسیک آزاد می‌شود. آثاری از کانه‌زایی سولفیدی در این مرحله مشاهده نشد.

رابطه ۱)



فلدسپارپتاسیک

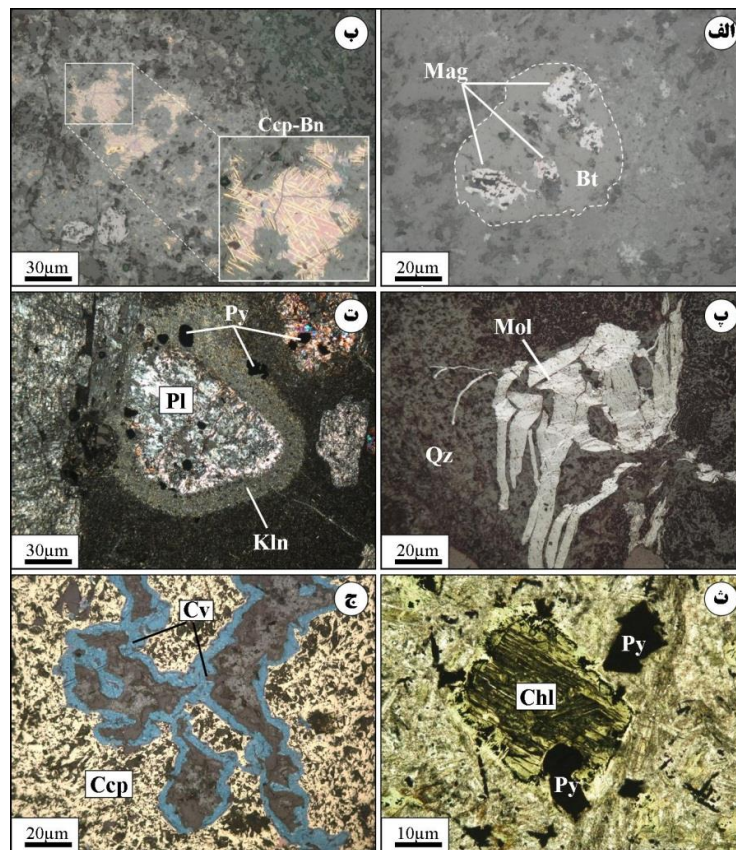
بیوتیت

مگنتیت

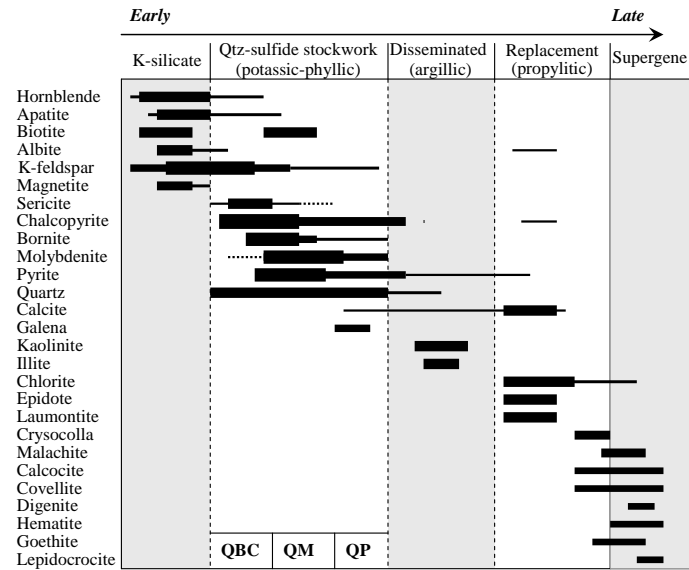
مرحله دوم) کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک: با حداکثر عیار مس (۴/۵ درصد) و مولیبدن (۰/۳ درصد) با حضور رگه-رگچه‌های متقاطع کوارتز-سولفیدی در میزبان واحد سنگی توف پورفیری و کمتر در واحد آندزیت توف پورفیری تشکیل شده است. براساس مشاهدات پتروگرافی، توزیع فضایی-زمانی رگه‌ها و روابط متقاطع میان آنها دست کم سه تیپ رگه در بخش کانه‌زایی استوک‌ورک منطقه سنج تشخیص داده شد. این رگه‌ها به ترتیب زمانی شامل رگه کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC)، رگه کوارتز-مولیبدنیت (QM) و

شده است. کانی‌سازی جانشینی ثانویه با گسترش کم و بیشینه عیار مس (۲/۸ درصد)، حضور کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت به صورت جانشینی در حاشیه کالکوپیریت (شکل ۵ ج) و مجموعه کانی‌های اکسی-هیدروکسیدی هماتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت تشخیص داده شد. رخداد زمانی مراحل مختلف کانی‌سازی در منطقه در شکل ۶ نشان داده شده است.

و لاگ‌های حفاری قابل تشخیص است (شکل ۵ ث). با استفاده از تجزیه‌های شیمیایی انجام شده بر روی رگچه‌های کلریتی در این مرحله، وجود مقادیری مولیبدن و مس در این رگه‌ها شناسایی شد. مرحله پنجم) کانی‌سازی جانشینی ثانویه: به عنوان آخرین مرحله کانی‌سازی در منطقه، طی رخداد غنی‌سازی برون‌زاد تا بیشینه عمق ۵۰ متر تشکیل



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ نوری عبوری-بازتابی از رخداد کانی‌سازی در کانسار سنج. الف) جانشینی مگنتیت در میزبان بیوتیت در دگرسانی مگنتیت-بیوتیت (نور بازتابی عادی)، ب) تیغه‌های برون‌رستی کالکوپیریت در میزبان بورنیت (بافت انحلال جامد) مرتبط با کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوکورک (نور بازتابی عادی)، پ) کانی‌سازی مولیبدنیت به صورت فلسی‌شکل در رگه کوارتز-مولیبدنیت (QM) (نور بازتابی عادی)، ت) دگرسانی آرزلیک حدوداً با حضور کائولینیت در حاشیه پلاژیوکلازهای سریسیتی‌شده همراه با پیریت‌های پراکنده (نور عبوری متقاطع)، ث) دگرسانی پروپیلیتیک با حضور کلریت و پیریت‌های نیمه‌خودشکل (نور عبوری عادی)، ج) کانه‌زایی غنی‌سازی برون‌زاد با جانشینی کوولیت در حاشیه کالکوپیریت (نور بازتابی عادی). حروف اختصاری: کالکوپیریت: Ccp، مولیبدنیت: Mol، کوارتز: Qz، بیوتیت: Bt، پلاژیوکلاز: Pl، مگنتیت: Mag، کلریت: Chl، کوولیت: Cv، پیریت: Py، کائولینیت: Kln، بورنیت: Bn (حروف اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز، ۲۰۱۰).



شکل ۶: توالی زمانی مراحل مختلف کانی‌سازی و دگرسانی در کانسار سنج براساس شواهد میکروسکوپی و لاگ‌های حفاری

همراه با مجموعه کانه‌های اکسیدی آهن (هماتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت)، کربنات و سیلیکات آبدار مس به‌ترتیب شامل مالاکیت و کریزوکلا و ۲) پهنه سولفیدی غنی‌شده (همراه مجموعه کانه‌های کالکوسیت، دیژنیت، بورنیت و کوولیت) با حداکثر عیار ۲/۸ درصد مس (پیچاج کاوش، ۱۳۸۶)، که از حد زیرین پهنه اکسیدی آغاز شده و تا ضخامتی حدود ۲۰ تا ۳۰ متر را شامل می‌شود (شکل ۵ ج). به‌طور کلی می‌توان گفت به دلیل گسترش نسبتاً کم سولفیدهای مس اولیه در بخش کانسنگ درون‌زاد و حجم پایین محلول‌های اسیدی فروشسته حاوی مس از سنگ‌میزبان، بخش غنی‌سازی سولفیدی برون‌زاد در منطقه سنج به خوبی گسترش نداشته است.

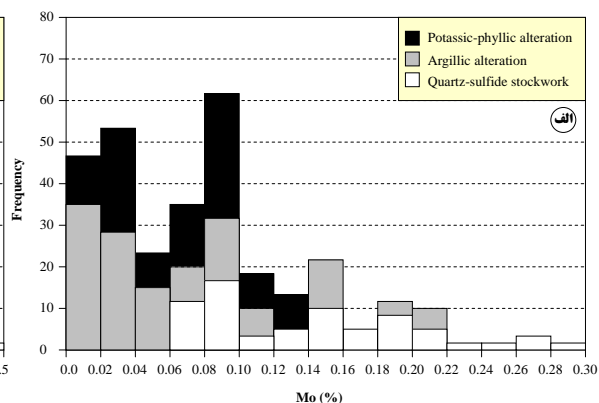
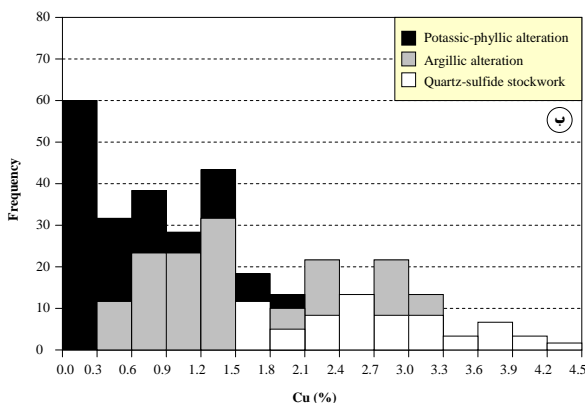
زمین‌شیمی

زمین‌شیمی هاله‌های دگرسانی: در کانسار سنج دگرسانی‌های درون‌زاد مرتبط با کانسنگ شامل مجموعه پتاسیک-فیلیک، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک (حاوی رگچه‌های کلریت) است. طبق مطالعات کانی‌شناسی میکروسکوپی و تجزیه XRD، زون دگرسانی پتاسیک-فیلیک شامل مجموعه

غنی‌سازی برون‌زاد: بررسی گمانه‌های حفاری (BH-1، BH-3، BH-4، BH-2)، حاکی از وجود آثار پهنه غنی‌سازی برون‌زاد تا عمق تقریبی ۵۰ متری در منطقه مورد مطالعه است. پدیده غنی‌سازی برون‌زاد در منطقه همزمان با بالا آمدگی تدریجی سطح آب‌زیرزمینی رخ داده که شاهد آن وجود شکستگی‌های نامنظم همراه با پیریت، کالکوپیریت و اکسیدهای آهن آبدار و ساخت و بافت جانشینی است (فورنیر، ۱۹۹۹؛ ریچاردز، ۲۰۱۱). تبادلات میان آب‌های اکسیژن‌دار فرورو و سنگ میزبان حاوی کانی‌های سولفیدهای اولیه موجب تشکیل محلول‌های اسیدی غنی از H^+ و رخداد غنی‌سازی برون‌زاد در سنگ‌های دربرگیرنده شده (هارتلی و ریچ، ۲۰۰۵؛ ریش و همکاران، ۲۰۰۹؛ اشتوکو و همکاران، ۲۰۱۱)، که در غالب موارد این مجموعه دارای همپوشانی با دگرسانی‌های درون‌زاد در منطقه است. با توجه به شواهد آزمایشگاهی و گمانه‌های حفاری، دو بخش مجزای غنی‌سازی برون‌زاد در منطقه شناسایی شده که شامل، ۱) بخش اکسیده (شسته‌شده)، که بخش فوقانی سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین را به خود اختصاص داده و دارای ضخامت ۱۰ تا ۲۰ متر

از ۰/۳ درصد در دگرسانی پتاسیک-فیلیک و کمترین فراوانی آن به کلاس عیاری ۴/۲ تا حداکثر ۴/۵ درصد مرتبط با کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک، تعلق دارد (شکل ۷ ب). هم‌چنین دامنه عیاری مس در دگرسانی پتاسیک-فیلیک بین ۰/۰۵ تا ۲/۰ درصد، دگرسانی آرژیلیک حدواسط بین ۰/۴ تا حداکثر ۳/۲ درصد و در کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک از حداقل ۱/۶ درصد تا حداکثر ۴/۵ درصد، در تغییر است (شکل ۷ ب). در مجموع بالاترین میزان تمرکز عیاری عناصر کانه‌ساز مولیبدن و مس به ترتیب در بخش کانه‌زایی استوک‌ورک، دگرسانی پتاسیک-فیلیک و دگرسانی آرژیلیک حدواسط صورت گرفته است. هم‌چنین تجزیه‌های انجام شده بر روی رگچه‌های کلریتی مرتبط با دگرسانی پروپیلیتیکی حاکی از وجود مقادیر مس و مولیبدن به ترتیب با حداکثر عیارهای ۶/۷ و ۷/۵ گرم در تن در سنگ میزبان توف پورفیری در منطقه است (حیات‌الغیبی و همکاران، ۱۳۸۹). مشخصات دگرسانی‌ها به همراه کانی‌شناسی، بافت و ساخت و عیار مس و مولیبدن در هر دگرسانی به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، نتایج تجزیه شیمیایی با استفاده از ۳۵ نمونه سنگی معرف از عناصر اصلی و فرعی به همراه گوگرد با استفاده از تجزیه دستگاهی ICP-MS در جدول ۲ ارائه شده است.

فلدسپار پتاسیک-بیوتیت-سرسیست-کوارتز±پیریت، دگرسانی آرژیلیک حدواسط شامل مجموعه کائولینیت-ایلیت±کوارتز±کلسیت و دگرسانی پروپیلیتیکی شامل مجموعه اپیدوت-کلریت-لامونتیت-کلسیت±پیریت است. براساس توزیع آماری عناصر مولیبدن و مس در کانه‌زایی و دگرسانی‌های مرتبط با آنها، به‌طور کلی تغییرات دامنه عیار مولیبدن از کمتر از ۰/۰۰۱ تا حداکثر ۰/۳ درصد و دامنه عیار مس از ۰/۰۲ تا حداکثر ۴/۵ درصد در تغییر است (شکل ۷). به منظور بررسی تمرکز عناصر کانه‌ساز در بخش‌های مختلف کانه‌زایی و سنگ میزبان دگرسانی این بخش‌ها از یکدیگر تفکیک شده و نمودار تغییرات عیار عناصر در آنها به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس، بالاترین جمعیت آماری مولیبدن به کلاس عیاری ۰/۰۸ تا ۰/۱ درصد مرتبط با دگرسانی پتاسیک-فیلیک و کمترین فراوانی آن به کلاس عیاری ۰/۲۲ تا ۰/۳۰ درصد مرتبط با کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک، تعلق دارد (شکل ۷ الف). هم‌چنین دامنه عیاری مولیبدن در دگرسانی پتاسیک-فیلیک بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۳ درصد، دگرسانی آرژیلیک حدواسط بین ۰/۰۲ تا ۰/۲۲ درصد و در کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک از ۰/۰۷ تا حداکثر ۰/۳۰ درصد در تغییر است (شکل ۷ الف). بالاترین جمعیت آماری مس نیز به کلاس عیاری کمتر



شکل ۷: نمودار ستونی توزیع عیاری عناصر کانه‌ساز مولیبدن (الف) و مس (ب) در دگرسانی‌های پتاسیک-فیلیک، آرژیلیک حدواسط و کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک

جدول ۱: مشخصات دگرسانی‌ها، کانی‌شناسی و عیار مرتبط با هر دگرسانی در منطقه

عیار (درصد)	کانی‌سازی	بافت و ساخت	کانی‌های فرعی	کانی‌های اصلی	دگرسانی
-----	فاقد کانی‌سازی سولفیدی	جانیشینی و دانه پراکنده	آپاتیت، هورنبلاند و آلپیت	مگنتیت، بیوتیت و ارتوکلاز	بیوتیت-مگنتیت (سیلیکات پتاسیم)
مس (بین ۰/۰۵ تا ۲/۰) مولیبدن (بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۳)	کانی‌سازی استوکورک مس و مولیبدن	رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی	پیریت و کلسیت	فلدسپار پتاسیک، بیوتیت، سریسیت و کوارتز	پتاسیک-فیلیک
مس (بین ۰/۴ تا ۳/۲) مولیبدن (بین ۰/۰۲ تا ۰/۲۲)	کالکوپیریت و مولیبدنیت	انتشاری	کوارتز، کلسیت و پیریت	کانولینیت و ایلیت	آرژلیک
مس (۶/۷ گرم در تن) مولیبدن (۷/۵ گرم در تن)	کانی‌سازی ضعیف مس و مولیبدن در رگه‌های کلریت	جانیشینی اولیه	پیریت و رگه-رگچه‌های کلریتی	اپیدوت، کلریت، لامونتیت و کلسیت	پروپیلیتیک

مولیبدن-طلا-روی (عامل ۳)، بدست آمد. نتایج روش تجزیه و تحلیل عاملی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، به منظور شناخت ارتباط زایشی متقابل میان عناصر با استفاده از روش چندمتغیره تجزیه خوشه‌ای، دست کم سه گروه زوج عنصری شامل، (۱) گروه مس-نقره (ضریب ۰/۸۸)، (۲) گروه نیکل-آرسنیک (ضریب ۰/۸۲) و (۳) گروه طلا-مولیبدن (ضریب ۰/۷۶)، شناسایی شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش تجزیه خوشه‌ای نیز موید روش آماری تجزیه و تحلیل عاملی است که در شکل ۸ نشان داده شده است. برای بررسی همبستگی میان عناصر کانسارساز با یکدیگر از ماتریس همبستگی رتبه‌ای پیرسون با سطح اعتماد بالا (۹۹ درصد و بالاتر) استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود مس با طلا و نقره دارای همبستگی بالایی (تقریباً ۰/۸) بوده و پس از آن آرسنیک با سایر عناصر طلا، نقره، مس و سرب همبستگی تقریبی بیش از ۰/۷۵ را نشان می‌دهد. با توجه به شواهد ژئوشیمیایی و همبستگی عناصر می‌توان گفت همبستگی گروه نخست شامل عناصر مس-نقره-سرب مرتبط با کانه‌زایی کالکوپیریت در منطقه است که شواهد تجزیه ریزکوالکترونی نیز حضور این عناصر در ساختمان کالکوپیریت را تایید می‌نماید

زمین‌شیمی کانسنگ: در بررسی‌های زمین‌شیمیایی بر روی ۳۵ نمونه برداشت شده از بخش‌های مختلف کانسنگ و سنگ‌میزبان به روش متریک و غیرمتریک (chip)، به منظور بررسی خصوصیات زمین‌شیمیایی عناصر کانسارساز با استفاده از تجزیه دستگاهی ICP-MS مورد تجزیه قرار گرفتند. علاوه بر آن برای کنترل نتایج تجزیه، تعدادی از نمونه‌ها به صورت تصادفی به روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج این تجزیه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. پس از بررسی دقت داده‌ها با استفاده از نمودار تامپسون و هاوارت (۱۹۷۶)، به‌طور ویژه داده‌های ۹ عنصر کانسنگ‌ساز شامل طلا، نقره، مس، مولیبدن، روی، سرب، نیکل، کبالت و آرسنیک مورد پردازش قرار گرفتند. پس از تعیین نحوه توزیع عناصر (غالباً لاگ‌نرمال) با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و تعیین پارامترهای آماری توصیفی از قبیل میانگین، میانه، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی رتبه‌ای پیرسون، بررسی‌های آماری چند متغیره شامل تجزیه و تحلیل عاملی و خوشه‌ای برای عناصر موردنظر محاسبه شد. تجزیه و تحلیل عاملی به‌منظور بررسی تغییرات همزمان عناصر انجام گرفته که براساس آن سه گروه عنصری به ترتیب شامل، گروه مس-سرب-نقره-طلا (عامل ۱)، گروه نیکل-آرسنیک (عامل ۲) و گروه

عنصری مولیبدن-طلا را ناشی از وجود مقادیر طلا در رگه‌های کوارتز-مولیبدنیت (QM) مرتبط با کانسنگ استوکورک در نظر گرفت که یکی از خصوصیات بارز در ذخایر مولیبدن پورفیری است.

(حیات الغیبی، ۱۳۹۰). علاوه بر این، گروه عنصری نیکل-آرسنیک در منطقه سنج نیز مرتبط با حضور فاز آرسنورنیکل یا نیکلین (ترکیب NiAs) است که طی مطالعات کانه‌نگاری توسط فرح‌خواه (۱۳۸۸) نیز گزارش شده است. بر این مبنا، می‌توان همبستگی گروه

جدول ۲: نتایج تجزیه دستگاهی تعداد ۳۵ نمونه سنگی از عناصر اصلی و فرعی کانسار سنج با استفاده از روش ICP-MS

شماره نمونه	S (wt.%)	Sb (ppm)	As (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Mo (ppm)	Cu (ppm)	Ag (ppm)	Au (ppb)
TUDW-16	۰/۴۱	۰/۱۲	۱۰	۱۵	۲۸	۱۷۷	۱۸	۴۱۳۰	۳۸۰۰	۱/۹۹	۹۷
TUDW-17	۰/۱۴	۱/۹۹	۳۳۴	۳۲	۲۸۲	۶۴	۲۶	۱۰۲۰	۱۷۵۰	۰/۹۴	۱۶
TUDW-18	۰/۰۵	۰/۱۱	۹	۱۶	۲۱	۴۲	۱۹	۳۸۳	۶۸۶	۰/۴۰	۱۱
TUDW-19	۰/۲۲	۰/۱۱	۱۹	۲۲	۲۵	۱۵۸	۱۴	۱۷۶۰	۳۱۴۰	۱/۷۱	۴۲
TUDW-20*	۰/۱۲	۰/۰۷	۸	۱۷	۲۱	۳۷	۲۲	۲۵	۳۵۱۰	۱/۶۳	۱۱
TUDW-21	۰/۱۶	۰/۰۸	۱۹	۱۹	۱۸	۷۱	۱۸	۶۸۲	۳۶۹۰	۱/۷۵	۳۱
TU2D-12	۰/۰۹	۰/۱۱	۴	۲۶	۳۲۱	۸۶	۵۳	۱۲۶۰	۱۴۴	۰/۱۱	dl
TU2D-13*	۰/۷۴	۰/۷۴	۹	۱۳	۱۴۸	۱۴۹	۴۹	۱۳۳۳	۱۸۲۰	۱/۳۹	۲۵
TU2D-14	۰/۰۱	۰/۰۸	۲	۳۰	۳۱۱	۲۸	۵۰	۱۷	۳۴	۰/۰۲	dl
TU2D-15	۰/۰۳	۰/۱۰	۱۲	۲۱	۱۱۸	۱۵۶	۱۵	۱۰	۳۴۵	۰/۱۴	۱۱
TU2D-16	۰/۰۳	۰/۱۲	۶	۲۶	۱۵۲	۱۳۲	۲۴	۸۵	۲۸۰	۰/۱۴	dl
TU2D-17	۰/۱۳	۰/۲۱	۱۵	۲۷	۲۹	۲۹۹	۱۲۷	۱۸۱۰	۳۴۳	۰/۱۹	۱۵
BH2-32	dl	۰/۱۴	۳	۳۳	۱۸	۷۸	۳۳	۷۹	۳۰	۰/۰۲	dl
BH2-33*	dl	۰/۱۷	۳	۳۲	۱۹	۲۹	۳۵	۳۰	۶۰	۰/۰۳	dl
BH2-34	۰/۰۲	۰/۱۷	۱	۳۴	۱۹	۲۶	۳۶	۳۷	۱۸۷	۰/۰۳	dl
BH2-54	dl	۰/۰۸	۱	۳۵	۲۵۴	۶	۳۷	۱۹	۲۶	dl	dl
BH2-55	۰/۰۲	۰/۰۷	۳	۳۹	۳۹۱	۳۲	۴۷	۸۵	۱۱۸	۰/۰۳	dl
BH2-56*	۰/۰۱	۰/۱۱	۵	۳۸	۳۱۹	۷۸	۳۱	۶۹	۸۶	۰/۰۵	dl
BH2-57	dl	۰/۰۶	۲	۳۱	۲۹	۱۹	۳۳	۲۸	۱۷	dl	dl
BH2-58	۰/۰۱	۰/۱۳	۳	۳۵	۲۸۲	۷	۳۰	۲۷۷	۱۰۱	۰/۰۵	dl
BH2-62	۰/۰۲	۰/۰۸	۶	۴۱	۲۹۳	۱۱	۳۳	۱۳۱	۴۴۵	۰/۱۵	۹
BH2-63	۰/۰۱	۰/۰۹	۷	۳۶	۲۷	۴۲	۳۱	۲۹۷	۳۴۹	۰/۱۸	dl
BH2-64	۰/۰۱	۰/۱۰	۴	۳۳	۲۹	۱۳	۲۶	۱۰۵	۱۶۸	۰/۱۲	dl
BH2-65	dl	۰/۰۶	۲	۴۰	۳۸	۶۳	۳۴	۵۶	۲۷	۰/۰۳	dl
BH2-66	dl	۰/۰۶	۱	۳۹	۳۳	۵۶	۳۷	۸	۳۲	dl	dl
BH2-67	۰/۰۱	۰/۰۳	dl	۲۴	۲۳۵	۹۵	۳۷	۲۶	۵۱	۰/۰۲	dl
BH6-22	dl	۰/۰۵	dl	۳۲	۲۲۵	۱۴	۲۸	۹۲۴	۹۶	۰/۰۳	۶
BH6-23*	dl	۰/۰۵	dl	۳۳	۲۶۵	۴۱	۲۵	۴۵۴	۳۴	۰/۰۵	dl
BH6-24	۰/۰۱	۰/۲۲	dl	۴۲	۳۴	۳۲	۲۹	۶۶۶	۱۱۸	۰/۰۶	dl
BH6-25*	۰/۰۱	۰/۲۷	۲	۴۴	۳۶	۲۵	۳۲	۱۸۵	۷۲	۰/۰۶	dl
BH6-26	dl	۰/۲۲	۲	۴۸	۳۷	۲	۳۰	۳۹	۳۴	۰/۰۶	dl
BH6-27	dl	۰/۲۴	۲	۴۲	۳۱	۴۹	۲۳	۱۰۵	۵۵	۰/۰۷	dl
BH6-28	dl	۰/۲	dl	۴۲	۲۹	۳۴	۲۲	۷۷	۶۵	۰/۰۶	dl
BH6-29	dl	۰/۱۸	۱	۴۱	۲۹	۲۵	۲۴	۴۷	۸۲	۰/۰۵	dl
BH6-30	dl	۰/۱۹	۲	۴۳	۲۲	۲	۲۵	۱۶	۵۳	۰/۰۲	dl

dl: detection limit

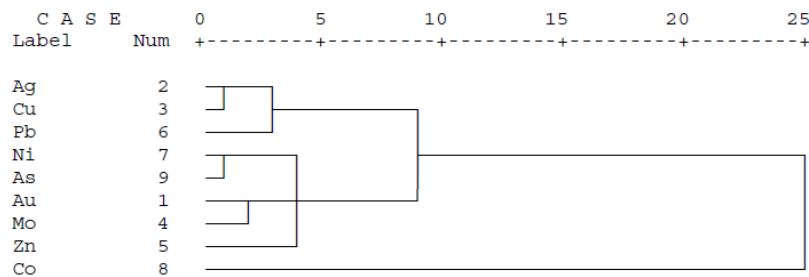
* نمونه‌های کنترل شده به روش تجزیه دستگاهی طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)

TU: نمونه برداشت شده از تونل و BH: نمونه برداشت شده از گمانه

جدول ۳: نتایج تجزیه و تحلیل عاملی متشکل از سه گروه عنصری بر روی ۹ عنصر کانه‌ساز در منطقه سنج

Elements	Components		
	۱	۲	۳
Au	۰/۸۷۵	-۰/۰۸۸	۰/۸۴۳
Ag	۰/۹۴۸	۰/۰۲۲	-۰/۱۰۲
Cu	۰/۹۱۳	۰/۰۳۵	-۰/۱۸۱
Mo	۰/۶۲۳	-۰/۱۸۰	۰/۵۲۲
Zn	-۰/۱۸۵	-۰/۱۰۱	۰/۹۰۲
Pb	۰/۸۶۹	-۰/۱۰۳	۰/۰۰۰
Ni	۰/۱۳۰	۰/۹۸۲	۰/۱۱۲
Co	-۰/۷۸۶	۰/۲۲۴	-۰/۱۵۴
As	۰/۲۶۸	۰/۹۴۹	۰/۱۱۷

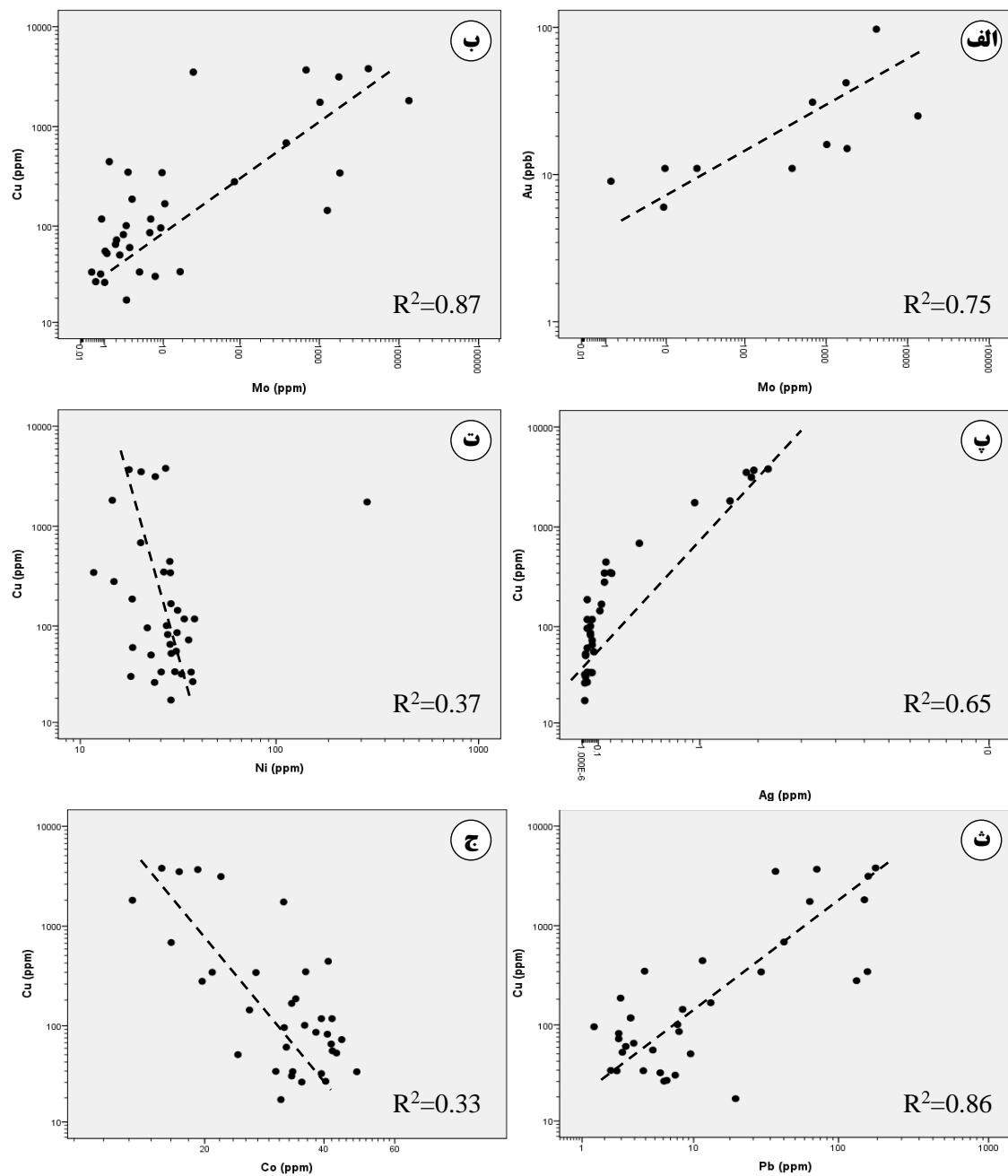
Dendrogram using Ward Method



شکل ۸: نمودار سلسله مراتبی (خوشه‌ای) عناصر کانه‌ساز منطقه سنج بر مبنای ضریب همبستگی رتبه‌ای پیرسون

جدول ۴: نتایج ضریب همبستگی رتبه‌ای پیرسون برای ۹ عنصر کانه‌ساز در منطقه

	Au	Ag	Cu	Mo	Zn	Pb	Ni	Co	As
Au	۱/۰۰۰								
Ag	۰/۷۴۳	۱/۰۰۰) ۰/۶Correlation coefficient (>				
Cu	۰/۷۶۹	۰/۸۸۲	۱/۰۰۰						
Mo	۰/۶۷۲	۰/۶۵۸	۰/۶۹۸	۱/۰۰۰					
Zn	-۰/۳۷۵	-۰/۴۹۶	-۰/۳۹۷	-۰/۲۰۴	۱/۰۰۰				
Pb	۰/۶۷۱	۰/۶۱۹	۰/۵۹۶	۰/۶۱۱	۰/۳۰۷	۱/۰۰۰			
Ni	-۰/۳۵۰	-۰/۱۹۹	-۰/۳۳۰	-۰/۴۲۲	۰/۲۶۰	-۰/۳۶۴	۱/۰۰۰		
Co	-۰/۶۳۹	-۰/۴۵۲	-۰/۵۴۲	-۰/۸۱۷	۰/۱۲۵	-۰/۷۱۷	۰/۶۲۳	۱/۰۰۰	
As	۰/۷۱۶	۰/۷۶۱	۰/۷۵۰	۰/۶۴۰	-۰/۲۴۷	۰/۷۵۶	-۰/۲۱۹	-۰/۵۷۲	۱/۰۰۰

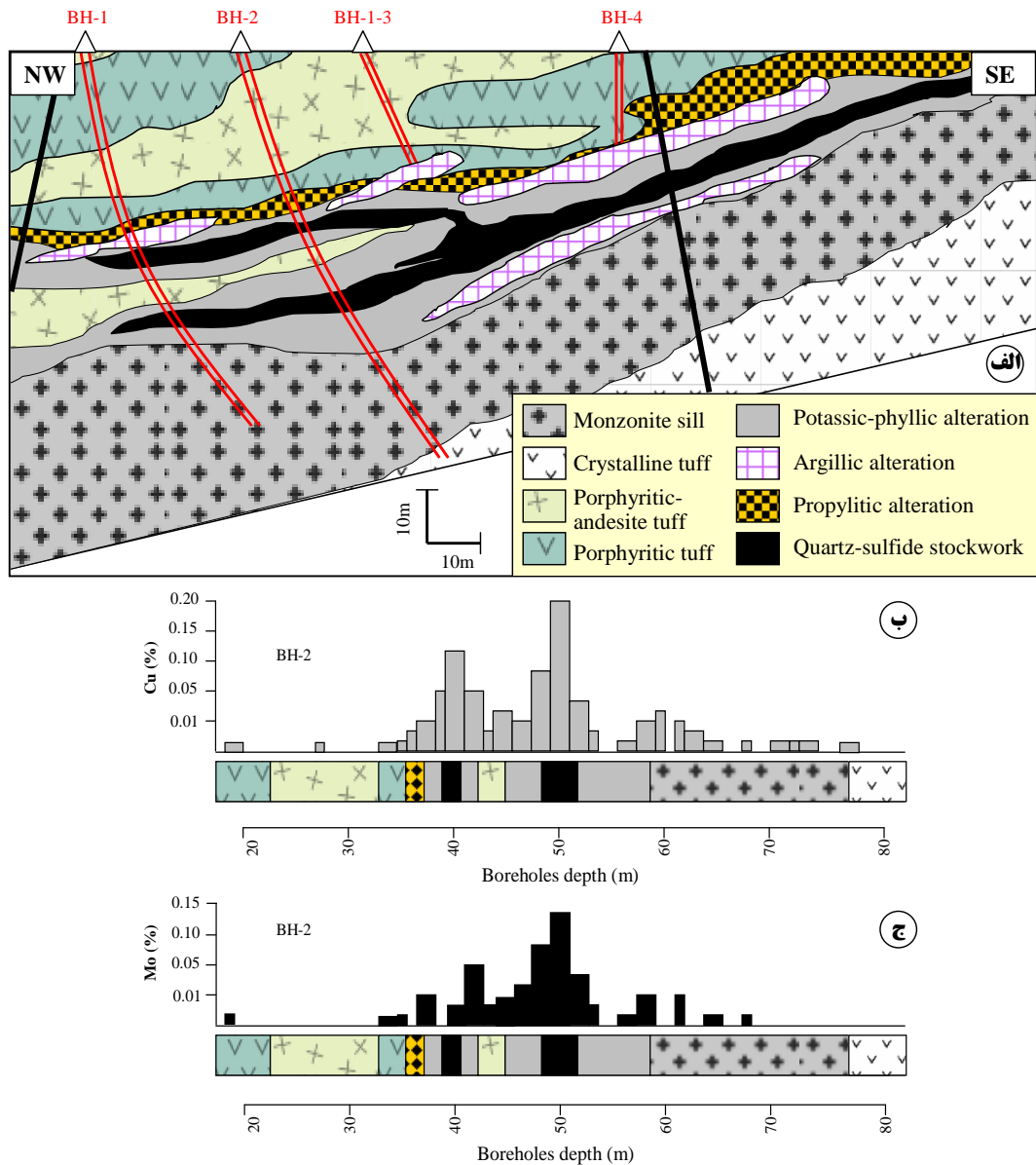


شکل ۹: نمودار نقطه‌ای ضریب همبستگی رتبه‌ای پیرسون در مقیاس لگاریتمی بین عناصر کانه‌ساز شامل، الف) مولیبدن-طلا، ب) مولیبدن-مس، پ) نقره-مس، ت) نیکل-مس، ث) سرب-مس و ج) کبالت-مس.

بحث و نتایج

در منطقه معدنی سنج، پس از جایگیری سیل مونزونیتی در عمق و شکل‌گیری فضای شکستگی در بخش‌های فوقانی و اطراف آن در تماس با واحدهای سنگی توفی منطقه، شکستگی‌ها و ریزشکستگی‌های متقاطعی در واحدهای سنگ میزبان ایجاد شده است. این شکستگی‌ها اغلب مجاری مناسبی برای عبور سیالات گرمایی در اطراف توده نفوذی فراهم می‌کنند (کیث و همکاران، ۱۹۹۳؛ سیلیتو و هدنکوئیست، ۲۰۰۳). در نتیجه جایگیری و صعود این محلول‌ها در امتداد شکستگی‌ها و مجاری ناپیوسته در بخش‌های فوقانی و محل تماس واحدهای سنگی توف با سیل مونزونیتی، سنگ میزبان کانی‌سازی که اغلب واحدهای سنگی توفی را تشکیل می‌دهند دچار دگرسانی و رخداد کانی‌سازی‌های چندمرحله‌ای شده است. وجود رگه-رگچه‌های متقاطع کوارتز-سولفیدی نشان‌دهنده رخداد چند مرحله شکستگی و خردشدگی ناشی از فعالیت‌های گرمایی همراه با تغییر در خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز است (فورنیر، ۱۹۹۹؛ ویس، ۲۰۱۵؛ ریچاردز، ۲۰۰۳، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱). کانی‌سازی در کانسار سنج به دو صورت شامل، (۱) کانی‌سازی مرتبط با دگرسانی‌های درون‌زاد پتاسیک-فیلیک، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک و (۲) کانی‌سازی مرتبط با فرآیند غنی‌سازی برون‌زاد متشکل از بخش‌های اکسید-هیدروکسیدی (شسته‌شده) و زون سولفیدی غنی‌شده رخ داده است. با استفاده از تجزیه‌های انجام شده بر روی رگچه‌های کلریتی مرتبط با دگرسانی

پروپیلیتیک، وجود مقادیر مس (حداکثر ۶/۷ گرم در تن) و مولیبدن (حداکثر ۷/۵ گرم در تن) در این رگه‌ها بدست آمد. کانه‌های درون‌زاد در منطقه سنج شامل کانی‌های سولفیدی پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و مولیبدنیت است که اغلب در دگرسانی پتاسیک-فیلیک و کانه‌زایی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک مرتبط با آن گسترش دارد. کانی‌سازی در پهنه برون‌زاد نیز با تأثیر از بخش درون‌زاد متشکل از کانی‌های اکسی-هیدروکسیدی آهن (گوتیت و لپیدوکروسیت)، کربنات و سیلیکات‌های آبدار مس (مالاکیت و کریزوکلا) و سولفیدهای غنی‌شده مس (کالکوسیت، کولیت و دیژنیت) است. با توجه به بررسی‌های عمقی و نمونه‌برداری متریک از گمانه‌های حفاری، تغییرات عیاری مس و مولیبدن در واحدهای سنگی دگرسانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). نیمرخ معدنی با استفاده از لاگ نگاری چهار گمانه اکتشافی BH-1، BH-2، BH-3 و BH-4 که موقعیت آنها در شکل ۲ نشان داده شده ترسیم شده است. در این شکل تغییرات عیاری عناصر مس و مولیبدن بر حسب درصد (%، به‌عنوان نمونه در گمانه شماره BH-2 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود بیشترین محتوای فلزی عناصر مس و مولیبدن در گمانه شماره BH-2 به ترتیب در واحدهای سنگی کانسنگ کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک (حداکثر عیار ۰/۲ درصد مس و ۰/۱۲ درصد مولیبدن)، مجموعه دگرسانی پتاسیک-فیلیک و واحدهای سنگی میزبان رخ داده است.



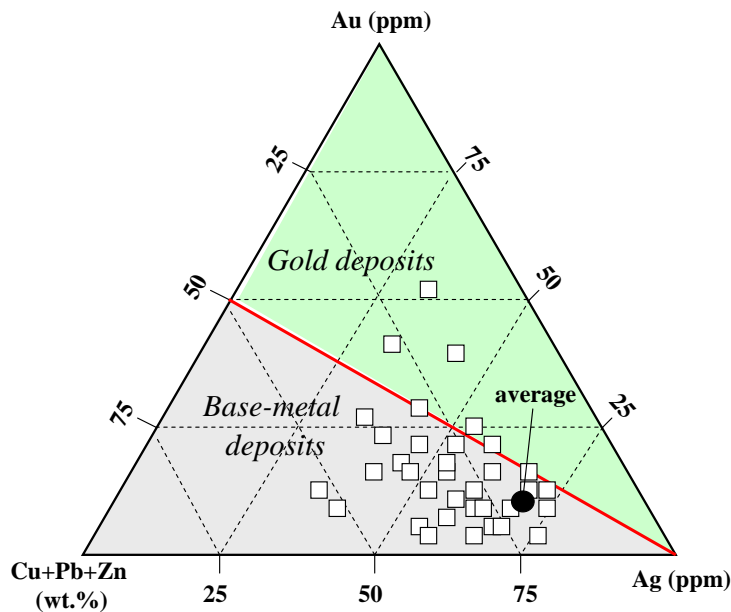
شکل ۱۰: ارتباط واحدهای سنگی مختلف با هاله‌های دگرسانی، منطقه‌بندی ژئوشیمیایی و عیار عناصر کانه‌ساز مس و مولیبدن شامل، الف) نیم‌رخ شماتیک در جهت NW-SE در امتداد چهار گمانه اکتشافی در منطقه، ب و ج) توزیع عیاری عناصر مس (Cu) و مولیبدن (Mo) بر حسب درصد در گمانه ۲ (برای مشاهده موقعیت گمانه‌ها به شکل ۳ مراجعه شود). در این شکل هدف بررسی توزیع عیارسنجی عناصر مس و مولیبدن بوده و شیب لایه‌ها به‌طور فرضی ترسیم شده است.

استوک‌ورک، رگه‌های کوارتز-بیوتیت-کالکوپیریت (QBC)، کوارتز-مولیبدنیت (QM) و کوارتز-پیریت (QP) همراه با دگرسانی پتاسیک-فیلیک رخ داده و متعاقب آن کانه‌زایی انتشاری کالکوپیریت و مولیبدنیت مرتبط با دگرسانی آرژلیک حواسط

شروع کانی‌سازی در منطقه سنج با حضور مگنتیت پراکنده در میزبان بیوتیت (مرحله پیش از کانی‌سازی) مشخص می‌شود. پس از آن رخداد کانی‌سازی اصلی در منطقه در قالب کانی‌سازی استوک‌ورک و انتشاری مس و مولیبدن انجام شده است. طی کانی‌سازی

بدست آمده از داده‌ها عنصر کانه‌ساز مس با عناصر گرانبه‌های طلا و نقره دارای همبستگی بالایی بوده و پس از آن آرسنیک با سایر عناصر طلا، نقره، مس و سرب همبستگی نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد. با استفاده از محاسبه مقادیر میانگین عیار عناصر طلا (۰/۰۵ گرم در تن)، نقره (۱/۱۶ گرم در تن) و مجموع عناصر فلزی پایه سرب+روی+مس (۰/۶۴ درصد) به همراه ترسیم ۳۵ نمونه معرف کانه‌ساز در نمودار سه‌تایی طلا-نقره-فلزات پایه (سرب-روی-مس) توسط هنینگتون و همکاران (۱۹۹۹)، پولسن و همکاران (۲۰۰۰) و برث وایت و فاور (۲۰۰۲)، کانسار سنج در محدوده ذخایر فلزات پایه (±نقره) گرمایی قرار می‌گیرد (شکل ۱۱).

تشکیل شده است. به تدریج با کاهش نسبت آب به سنگ (w/t) و کاهش تدریجی محتوای فلزی و حجم سیال، مجموعه کانی‌های اپیدوت-کلریت-لامونتیت-کلسیت±پیریت در قالب دگرسانی پروپلیتیک با کانی‌سازی ضعیف مس و مولیبدن در رگچه‌های کلریتی به‌عنوان آخرین مرحله کانه‌زایی درون‌زاد تشکیل شده است (هملی و همکاران، ۱۹۹۲؛ رید، ۱۹۹۷؛ راسک و همکاران، ۲۰۰۸). پس از آن مرحله غنی‌سازی برون‌زاد، در نتیجه عملکرد آب‌های فرورو و تشکیل مجموعه کانی‌های سولفیدی مس از قبیل کالکوسیت، کوولیت و دیژنیت در حاشیه کانه‌های درون‌زاد مس به همراه کلاک هیدروکسیدهای آهن گوتیت و لپیدوکروسیت رخ داده است. براساس ضرایب همبستگی عناصر و متغیرهای زمین‌شیمیایی



شکل ۱۱: نمودار سه‌تایی طلا-نقره-فلزات پایه (سرب-روی-مس) (با تغییرات از پولسن و همکاران، ۲۰۰۰) که در آن موقعیت نمونه کانه‌ساز (مربع سفید) به همراه میانگین داده‌ها (دایره سیاه) نشان داده شده است. بر این اساس کانسار سنج در محدوده کانسارهای فلزات پایه (±نقره) گرمایی قرار می‌گیرد.

همبری سیل مونزونیتی سنج موازی با سنگ‌های آذرآواری و در میزبان واحدهای سنگی توف تا آندزیت-توف پورفیری و حداکثر عمق ۱۲۰ متری تشکیل شده

نتیجه‌گیری

کانی‌سازی مس-مولیبدن در کانسار سنج با ژئومتری عدسی‌شکل تا رگه‌ای و انتشاری (افشان) در محل

طلا (ضریب همبستگی ۰/۸۸)، گروه نیکل-آرسنیک (ضریب همبستگی ۰/۸۲) و گروه مولیبدن-طلا-روی (ضریب همبستگی ۰/۷۶)، بدست آمد. با استفاده از محاسبه مقادیر میانگین عیار عناصر طلا (۰/۰۵ گرم در تن)، نقره (۱/۱۶ گرم در تن) و مجموع عناصر فلزی پایه سرب+روی+مس (۰/۶۴ درصد)، کانسار سنج در محدوده ذخایر فلزات پایه (±نقره) گرمایی قرار می‌گیرد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از مدیریت محترم شرکت مهندسی مشاور پیچاپ کاوش، جناب آقای مهندس طاهری که اطلاعات حفاری و دسترسی به مغزه‌ها را فراهم نموده و حمایت‌های زیادی در انجام این پژوهش بر عهده داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

- شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران، ۱۳۸۸. گزارش عملیات حفاری اکتشاف کانسار پلی‌متال سنج (استان تهران).

- قربانی، م.، ۱۳۸۶. زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی ایران، انتشارات آریز زمین، ۵۱۵ ص.
- مؤمن‌زاده، م. و رشید نژاد، ن.، ۱۳۶۴. گزارش مختصری از معدن متروکه مس و مولیبدن سنج، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- مهدی‌زاده، س.، ۱۹۹۵. گزارش برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کرج، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- نوگل سادات، م.ا. و الماسیان، م.، ۱۹۹۳. نقشه تکتونیک ایران در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- ولی‌زاده، م.، ۱۳۶۶. بررسی پترولوژی توده آذرین بنیان سد کرج، نشریه علوم دانشگاه تهران، جلد ۱۵، شماره ۱۶، ص ۵-۲۸.

- ولی‌زاده، م.، عبدالمهدی، ح.ر. و صادقیان، م.، ۱۳۸۷. بررسی زمین‌شناختی توده‌های نفوذی عمده البرز مرکزی، فصلنامه علوم زمین، سال هفدهم، شماره ۶۷، ص ۱۸۲-۱۹۷.

است. ساخت و بافت کانی‌سازی اغلب به‌صورت رگه-رگچه‌ای (استوک‌ورک)، انتشاری و جانیشینی همراه با عناصر اصلی مس-مولیبدن و مجموعه عناصر فرعی نقره، طلا، سرب، کبالت و نیکل مشخص می‌شود. کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی استوک‌ورک به‌عنوان غنی‌ترین بخش کانسنگ با متوسط عیارهای ۲/۵ درصد مس و ۰/۲ درصد مولیبدن همراه با دگرسانی پتاسیک-فیلیک، کانی‌سازی انتشاری کالکوپیریت و مولیبدنیت با متوسط عیارهای مس ۱/۲ درصد و مولیبدن ۰/۰۸ درصد همراه با دگرسانی آرژیلیک حدواسط و کانی‌سازی جانیشینی برون‌زاد با حداکثر عمق ۵۰ متر و متوسط عیار مس ۱ درصد، رخ داده است. طبق شواهد ژئوشیمیایی و همبستگی میان عناصر کانه‌ساز در منطقه دست کم سه گروه عنصری به ترتیب شامل، گروه مس-سرب-نقره-

منابع

- امینی، ب.، ۱۹۹۳. گزارش برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ تهران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- حیات‌الغیبی، م.، ۱۳۹۰. مطالعات کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیالات درگیر کانسار مس-مولیبدن سنج (شمال کرج)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران، ۱۷۰ ص.

- حیات‌الغیبی، م.، مهرابی، ب. و شاه‌رخ، س.و.، ۱۳۸۹. زمین‌شیمی و دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای و انتشاری کانسار مس-مولیبدن سنج (شمال کرج)، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- خویی، ن.، قربانی، م. و تاج بخش، پ.، ۱۳۷۸. کانسارهای مس در ایران، طرح تدوین کتاب، شماره ۶۸، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۴۲۱ ص.

- شرکت مهندسی مشاور پیچاپ کاوش، ۱۳۸۶. گزارش اکتشافات تفصیلی معدن مولیبدن سنج.

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B. and Wortel, M.J.R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process: *Geological Magazine*, v. 148, p. 692-725.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Neill, I., Emami, M.H. and Mcleod, C.L., 2013. Generation of arc and within-plate chemical signatures in collision zone magmatism: quaternary lavas from Kurdistan Province, Iran: *Journal of Petrology*, v. 0, p. 1-25.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran: *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 659-672.
- Brathwaite, R.L. and Faure, K., 2002. The Waihi epithermal gold-silver-base metal sulfide-quartz vein system, New Zealand: temperature and salinity controls on electrum and sulfide deposition: *Economic Geology*, v. 97, p. 269-290.
- Dedval, E., 1967. Zur Geologie des mittleren und Interen Karaj Tales zentral Elburz (Iran), Mitt. Geological Institute, E.T.H. University Zurich, v. 76, p. 125.
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment: *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v. 94, p. 1193-1211.
- Hannington, M.D., Poulsen, K.H., Thompson, J.F.H. and Sillitoe, R.H., 1999. Volcanogenic gold in massive sulfide environment: *Reviews in Economic Geology*, v. 8, p. 325-356.
- Hartley, A.J. and Rice, C.M., 2005. Controls on supergene enrichment of porphyry copper deposits in the Central Andes: A review and discussion: *Mineralium Deposita*, v. 40, p. 515-525.
- Hassanzadeh, J., Axen, G.J., Guest, B., Stockli, D.F. and Ghazi, A.M., 2004. The Alborz and NW Urumieh-Dokhtar magmatic belts, Iran: rifted parts of a single ancestral arc, abstracts with programs: *Geological Society of American*, v. 36, 434. p.
- Hemeley, J.J., Cygan, G.L., Fein, J.B. and Robinson, G.R., 1992. Hydrothermal ore forming processes in the light of studies in rock buffered systems, Iron-Copper-Lead-Zinc sulfide solubility relation: *Economic Geology*, v. 87, p. 1-22.
- Keith, J.D., Christiansen, E.H. and Carten, R.B., 1993. The genesis of giant porphyry molybdenum deposits, in Whiting, B.H., Hodgson, C.J., and Mason, R., eds., *Giant Ore Deposits: The Society of Economic Geologists, Special Publication Number*, v. 2, p. 285-317.
- Maghdour-Mashhour, R., Esmaily, D., Shabani, A.A.T., Chiaradia, M. and Latypov, R., 2015. Petrology and geochemistry of the Karaj Dam basement sill: Implications for geodynamic evolution of the Alborz magmatic belt: *Chemie der Erde*, v. 75, p. 237-260.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions: *Geophysics Research Letter*, v. 30, p. 2036-2045.
- Poulsen, K.H., Robert, F. and Dube', B., 2000. Geological classification of Canadian gold deposits: *Geological Survey Canadian Bulletin*, v. 540, p. 9-29.
- Reed, M.H., 1997. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition, In H.L. Barnes (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, John Wiley, p. 303-366.
- Reich, M., Palacios, C., Vargas, G., Luo, S., Cameron, E.M., Leybourne, M.I., Parada, M.A., Zúñiga, A. and You, C.F., 2009. Supergene enrichment of copper deposits since the onset of modern hyperaridity in the Atacama Desert, Chile: *Mineralium Deposita*, v. 44, p. 497-504.
- Richards, J.P., 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation: *Economic Geology*, v. 98, p. 1515-1533.
- Richards, J.P., 2009. Post subduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere: *Geology*, v. 37, p. 247-250.
- Richards, J.P., 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins: *Ore Geology Reviews*, v. 40, p. 1-26.
- Rusk, B., Reed, M.H. and Dilles, J.H., 2008. Fluid Inclusion Evidence for Magmatic-Hydrothermal Fluid Evolution in the Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Butte,

- Montana: Economic Geology, v. 103, p. 307-334.
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits, in Simmons, S.F., and Graham, I., eds., Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids; Rulers and Witnesses of Processes within the Earth: Economic Geology, Special Publication, v. 10, p. 315-343.
- Števkó, M., Sejkora, J. and Bačík, P., 2011. Mineralogy and origin of supergene mineralization at the Farbište ore occurrence near Poniky, central Slovakia: Journal of Geosciences, v. 57, p. 273-298.
- Stöcklin, J., 1974. A-Northern Iran: Alborz Mountains, Meszoic-Cenozoic orogenic Belt, data for orogenic studies, Geological Society London Special Publications 4, p. 213-234 (Collec. Ed. A. M. Spence, scottish Academic press).
- Thompson, M. and Howarth, R.J., 1976. Duplicate analysis in geochemical practice (2 parts): Analyst, v. 101, p. 690-709.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J. and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran, Tectonics, v. 30, p. 1-20.
- Vincent, S.J., Allen, M.B., Ismail-Zadeh, A.D., Flecker, R., Foland, K.A. and Simmons, M.D., 2005. Insights from the Talysh of Azerbaijan into the Paleogene evolution of the South Caspian region: Geological Society of American Bulletin, v. 117, p. 1513-1533.
- Weis, P., 2015. The dynamic interplay between saline fluid flow and rock permeability in magmatic-hydrothermal systems: Geofluids, v. 15, p. 350-371.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals: American Mineralogist, v. 95, p. 185-187.