

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار مس (طلا) کوه میل، شمال خاور ساوه، استان مرکزی

محمد کاظم غیاثی‌زاده^۱، مسعود علی‌پوراصل^{۲*} و سید احمد مشکانی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲. دانشیار گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۳. مدیر ارشد گروه معدنی و بازرگانی زرمش، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

چکیده

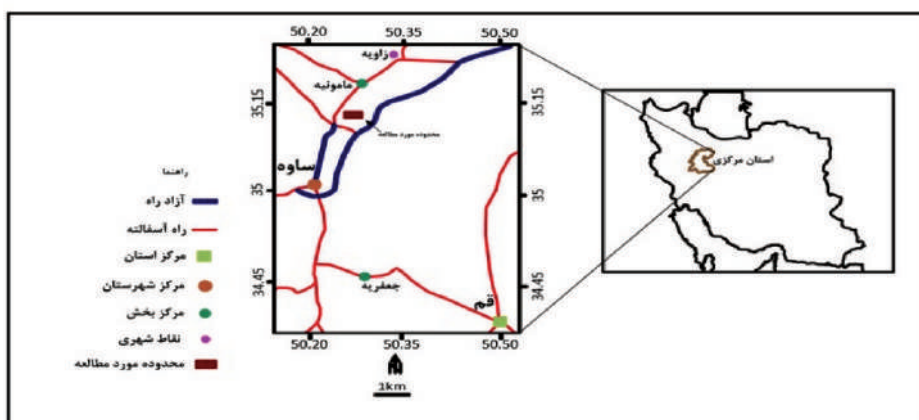
کانسار مس (طلا) کوه میل در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی ساوه و در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر واقع است. سنگ‌های گدازه‌ای و آذرآواری با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت-بازالت ائوسن میانی تا پسین در این گستره رخمون دارند و توده‌های نیمه‌عمیق کوارتزموزدیوریتی تا مونزودیوریتی ائوسن پسین به درون سنگ‌های آتشفشانی تزریق شده است. سنگ‌های آذرین با ماهیت کالک‌آلکالین در زمره گرانیتوئیدهای نوع I طبقه‌بندی می‌شوند و با کمان‌های ماگمایی مناطق حاشیه فعال قاره‌ای و برخوردی مرتبط می‌باشند. کانه‌زایی به صورت‌های رگه-رگچه‌ای، برشی و بندرت دانه‌پراکنده در سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی مشاهده می‌شود. کانه‌های اولیه شامل کالکوپیریت، پیریت، اسپیکولاریت و هماتیت و انواع ثانویه شامل کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، گوتیت و لیمونیت است. دگرسانی‌ها در این گستره شامل پروپیلیتیک، آرژیلیک، فیلیک، سیلیسی، اکسید آهنی، تورمالینی و کربناتی می‌باشد. در سنگ‌های دگرسان شده SiO_2 ، K_2O ، روبیدیم، زیرکنیم، نیوبوم، تانتالیم، اورانیم، توریم و عناصر کمیاب خاکی سبک دارای غنی‌شدگی، درحالی‌که اکسید عناصر اصلی دیگر، باریوم، استرانسیم، سزیم و عناصر کمیاب خاکی سنگین تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در این سامانه، مس با عناصر طلا، نقره، بیسموت، کادمیوم و آرسنیک همبستگی ژئوشیمیایی مثبت خوب دارد. دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال در کوارتز از ۱۱۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان شوری نیز از ۲/۶۸ تا ۲۴/۶۷ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند. براساس دمای همگن‌شدگی و شوری، فشار به دام افتادن میانبارهای سیال کمتر از ۱۰ بار و عمق جایگیری کمتر از ۵۰۰ متر ارزیابی می‌شود. سامانه کانه‌زایی مس (طلا) کوه میل در دسته کانسارهای اپی‌ترمال سولفید حدواسط طبقه‌بندی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اپی‌ترمال سولفید حدواسط، کانسار مس (طلا)، کوه میل، ساوه.

مقدمه

از پژوهش‌های زمین‌شناسی و اکتشافی پیشین در گستره کوه میل و مناطق هم‌جوار می‌توان به پژوهش‌های کانسار مس رگه‌ای گرمابی کوه پنگ در نزدیکی ساوه (رجب پور، ۱۳۹۵)، کانسار مس رگه‌ای گرمابی زرنديه (یوسفی، ۱۳۹۶)، کانسار نقره-مس نارباغی شمالی در شمال شرقی ساوه (فضلی و همکاران، ۱۳۹۸)، کانسار اسکارن آهن (مس) کرد خلیج در شمال غرب ساوه (حسنی قره تکان، ۱۳۹۸) و پژوهش‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ در گستره کوه میل (گروه معدنی زرمش، ۱۳۹۸) و ... اشاره کرد. هدف اصلی این پژوهش، مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، میانبار سیال، ژئوشیمی و تعیین تیپ کانه‌زایی مس (طلا) در گستره کوه میل است.

گستره کانسار مس (طلا) کوه میل، با مساحت تقریبی ۴/۲ کیلومترمربع در منطقه‌ای تپه‌ماهوری در شمال شرقی استان مرکزی، ۲۵ کیلومتری شمال‌خاور شهرستان ساوه و در ۱۰ کیلومتری جنوب شهر مامونیه قرار دارد. این گستره در فاصله مختصات ۴۵۱۱۷۶ تا ۴۵۲۱۷۲ طول‌های خاوری و ۳۹۰۲۰۰۰ تا ۳۸۹۹۴۷۸ عرض‌های شمالی (در سامانه مختصات UTM) واقع شده است. راه دسترسی به این گستره از بزرگراه تهران-ساوه امکان‌پذیر است (شکل ۱). از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی، بخش بیشتر این گستره اکتشافی، تپه‌ماهوری است و تنها در بخش‌های جنوبی و شرقی آن، ارتفاعات به نسبت بلندی وجود دارد که بیشینه ارتفاع آن‌ها به حدود ۱۴۷۰ متر از سطح دریای آزاد می‌رسد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی گستره اکتشافی کوه میل در ایران و استان مرکزی و راه‌های دسترسی به آن

روش مطالعه

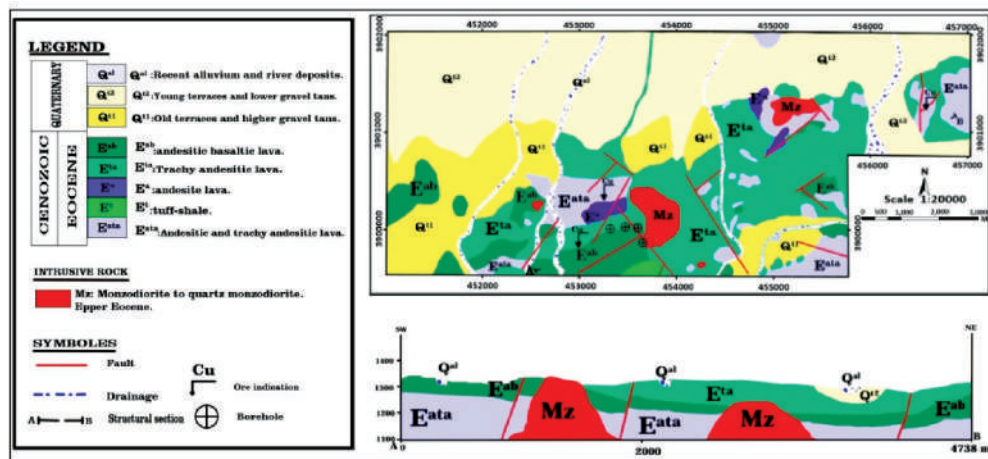
نشر نوری/جرمی (ICP-OES/MS) و تجزیه عنصر طلا به روش غال‌گذاری انتخاب شده است. مطالعه پراش‌سنجی و تجزیه ژئوشیمیایی ۱۲ نمونه سنگ و کانسنگ در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآما در تهران انجام شده است. برای انجام پژوهش‌های ریزدماسنجی تعداد پنج نمونه انتخاب و مقطع دوبر صیقلی تهیه شد و پس از پتروگرافی میانبارهای سیال، نمونه‌ها تحت مطالعات ریزدماسنجی قرار گرفتند. مطالعه میانبار سیال در آزمایشگاه میانبار سیال در دانشگاه صنعتی شاهرود به کمک Stage: THMSG600 گرمایشی و سرمایشی با مدل Linkam صورت گرفته است.

در انجام این پژوهش، برداشت‌های زمین‌شناسی صحرائی و نمونه‌برداری برای تهیه نقشه زمین‌شناسی و مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و میانبار سیال انجام شده است. در این راستا تعداد ۱۹ نمونه سنگ، ۲۷ نمونه کانسنگ برای تهیه و مطالعه مقاطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی و تعداد ۱۲ نمونه سنگ و کانسنگ برای مطالعه کانی‌شناسی به روش پراش‌سنجی اشعه ایکس (XRD)، تجزیه ژئوشیمیایی چندعنصری با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی

زمین شناسی و سنگ شناسی

آذرآواری-رسوبی با ترکیب شیل توفی، کریستال توف و توف‌های تراکی آندزیتی تا آندزیتی و گدازه‌های تراکی آندزیتی، آندزیتی و آندزیت بازالتی به سن ائوسن میانی تا پسین می‌باشد. توده‌های کوارتز مونزودیوریتی تا مونزودیوریتی ائوسن پسین در واحدهای توفی و گدازه‌های نفوذ کرده است. بر اساس اطلاعات نقشه زمین‌شناسی گستره کوه میل، واحدهای سنگ‌شناسی به شرح زیر هستند (شکل ۲).

گستره‌ی اکتشافی کوه میل در بخش میانی کمربند فلززائی ارومیه-دختر واقع شده است. این کمربند ماگمایی در نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی ته‌تیس جوان به زیرپوسته قاره‌ای ایران مرکزی تشکیل شده است. این گستره بخش کوچکی از ورقه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ساوه و زاویه را پوشش می‌دهد. سنگ‌های این گستره شامل واحدهای



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره اکتشافی کوه میل

و نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری تا خاکستری مایل به سبز با بلورهای درشت پلاژیوکلاز در زمینه دانریز تا دانه‌متوسط دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز و هورنبلند کانی‌های اولیه (اصلی) و سریسیت، اپیدوت، کلریت، اکسیدهای آهن و کلسیت کانی‌های ثانویه این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. بافت گدازه‌های تراکی آندزیتی پورفیری با زمینه ریزبلور و جریان‌ی است (شکل ۳-ت).

واحد گدازه آندزیتی: این واحد سنگی با واحدهای آذرآواری و گدازه‌های تراکی آندزیتی و آندزیت بازالتی همراه است. در صحرا و نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری تا خاکستری روشن با زمینه دانه‌متوسط تا دانه‌درشت مشاهده می‌شود. کانی‌های اولیه این سنگ‌ها پلاژیوکلاز و هورنبلند و کانی‌های ثانویه آن‌ها کلسیت و اکسیدهای آهن است و بافت سنگ از نوع پورفیری می‌باشد (شکل ۳-ت).

واحد گدازه آندزیتی تا تراکی آندزیتی: ترکیب سنگ‌های این واحد از آندزیت تا تراکی آندزیت تغییر می‌کند و بیشتر در

واحدهای آذرآواری: واحد شیل توفی، کریستال توف و توف‌های تراکی آندزیتی تا آندزیتی با واحدهای گدازه‌ای با ترکیب آندزیت و آندزیت بازالتی به صورت بین‌لایه‌ای قرار گرفته است. این واحد در صحرا و نمونه‌های دستی به رنگ‌های خاکستری روشن، خاکستری، خاکستری تیره و سبز تیره مشاهده می‌شود و آثاری از برشی شدن و رگه-رگچه‌های اپیدوت، کلسیت و اکسیدهای آهن در آن‌ها مشاهده می‌شود. سنگ‌های آذرآواری متحمل دگرسانی گرمایی شده‌اند و کانی‌های دگرسانی شامل اپیدوت، کلریت، سریسیت، کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن، کوارتز و کلسیت می‌باشند (شکل ۳-ب، پ).

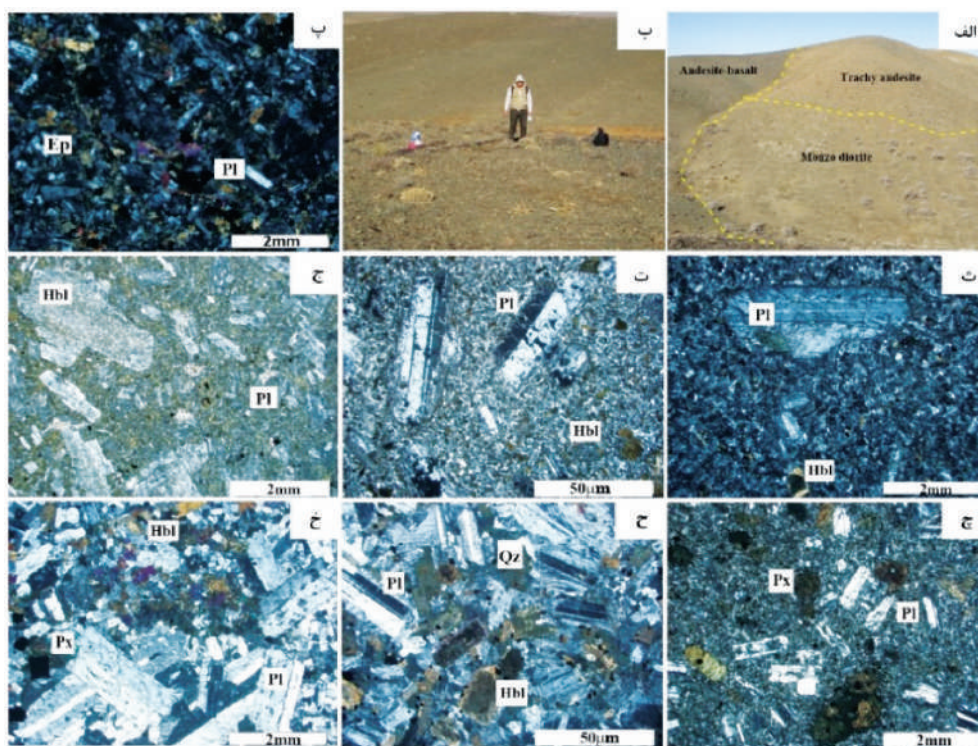
واحد گدازه تراکی آندزیتی: گدازه‌های تراکی آندزیتی با واحدهای آذرآواری و گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی همراه هستند و بیشتر در بخش جنوبی این گستره و در مجاورت با توده‌های نفوذی کوارتز مونزودیوریتی و مونزودیوریتی قرار گرفته‌اند (شکل ۳-الف). گدازه‌های تراکی آندزیتی در صحرا

کلریت، کلریت و اکسیدهای آهن است و دارای بافت هیالومیکرولیتی-پورفیری می‌باشد (شکل ۳-ج).

سنگ‌های نفوذی: بر پایه مشاهدات صحرایی و مطالعات کانی‌شناسی، ترکیب سنگ‌های نفوذی در گستره اکتشافی کوه میل از کوارتز مونزودیوریت تا مونزودیوریت تغییر می‌کند. سنگ‌های کوارتز مونزودیوریتی در واحدهای توفی و گدازه‌ای با ترکیب آندزیت-بازالت، آندزیت و تراکی آندزیت نفوذ کرده است و سبب ایجاد دگرسانی در سنگ‌های میزبان شده است (شکل ۳-الف). در صحرا و نمونه‌های دستی این سنگ‌ها به رنگ‌های خاکستری روشن تا خاکستری تیره مایل به سبز مشاهده می‌شوند و دارای بافت دانه‌ای متوسط تا درشت‌بلور هستند (شکل ۳-خ). این سنگ‌ها از پلاژیوکلاز، هورنبلند، آمفیبول و کوارتز ترکیب یافته و متحمل دگرسانی‌های رسی، اپیدوتی و کلریتی شده‌اند (شکل ۳-ج).

بخش مرکزی گستره مورد مطالعه رخنمون دارد و در مواردی میزبان کانه‌زایی مس است. این واحد در نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری مایل به سبز با زمینه دانه‌ریز تا دانه‌متوسط و دارای بلورهای درشت پلاژیوکلاز است. بلورهای درشت پلاژیوکلاز و هورنبلند کانی‌های اصلی آن‌ها هستند که در زمینه‌ای از بلورهای ریز پلاژیوکلاز قرار گرفته‌اند و دارای بافت هیالوپورفیری می‌باشند (شکل ۳-ج).

واحد گدازه آندزیت بازالتی: این واحد گدازه‌ای با واحدهای شیلی-توفی و گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی همراه است و میزبان رگه‌های کانه‌زایی مس می‌باشد. گدازه‌های آندزیت بازالتی در نمونه دستی به رنگ سبز تا خاکستری تیره با بلورهای درشت پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز است. بر اساس پژوهش‌های میکروسکوپی دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، سرپسیت، اپیدوت،



شکل ۳. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای سنگی گستره کوه میل. الف) تصویر صحرایی از همبری توده مونزودیوریت با گدازه‌های تراکی آندزیتی و آندزیت بازالتی (دید به شمال غرب)، ب) تصویر صحرایی از واحدهای توفی و شیل توفی که دارای دگرسانی پروپیلیتی است (دید به غرب)، پ) تصویر میکروسکوپی از واحد کریستال توف که دارای پلاژیوکلاز، اپیدوت و کلریت است، ت) تصویر میکروسکوپی از گدازه تراکی آندزیتی که بلورهای درشت پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه ریزبلور قابل مشاهده است، ث) تصویر میکروسکوپی از واحد آندزیتی که دارای پلاژیوکلاز و هورنبلند با بافت پورفیری-میکرولیتی است، ج) تصویر میکروسکوپی از گدازه آندزیتی که دارای کانی‌های پلاژیوکلاز و هورنبلند با بافت هیالوپورفیری است، چ) تصویر میکروسکوپی از گدازه آندزیت-بازالت که دارای پلاژیوکلاز و پیروکسن با بافت پورفیری-میکرولیتی است، ح) تصویر میکروسکوپی از کوارتز مونزودیوریت با کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و کوارتز که دارای بافت میکروگرانولار است، خ) تصویر میکروسکوپی از مونزودیوریت که دارای پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند با بافت دانه‌ای است. Pl: پلاژیوکلاز، Ep: اپیدوت، Hbl: هورنبلند، Px: پیروکسن، Qz: کوارتز

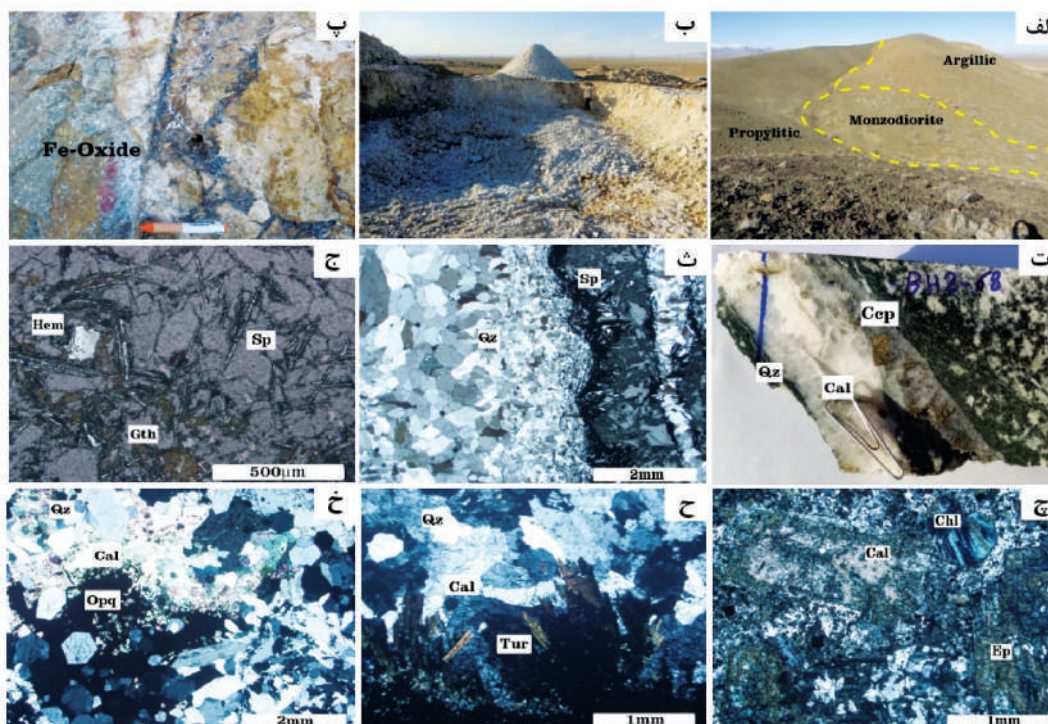
دگرسانی

در گستره اکتشافی کوه میل، برای مطالعه دگرسانی‌ها از شواهد زمین‌شناسی صحرایی، مطالعه نمونه‌های مقاطع نازک و نازک-صیقلی، کانی‌شناسی به روش پراش اشعه ایکس و سنگ‌ژئوشیمیایی استفاده شده است. دگرسانی‌ها در این گستره شامل پروپیلیتیک، آرژیلیک، اکسید آهنی، سیلیسی، تورمالینی شدن و کربناتی است. در این میان، دگرسانی‌های سیلیسی، اکسید آهنی، تورمالینی و کربناتی ارتباط نزدیک با کانه‌زایی مس و طلا دارند. دگرسانی پروپیلیتیک به صورت هاله‌ای سایر مناطق دگرسانی (به‌ویژه دگرسانی آرژیلیک) را در برمی‌گیرد. سنگ‌های که تحت تاثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند بیشتر دارای ترکیب توفی-شیلی، توف و گدازه آندزیتی تا آندزیت بازالتی هستند. در این گستره، دگرسانی پروپیلیتی شامل مجموعه‌ای از کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت است (شکل ۴-الف، چ). دگرسانی آرژیلیک از خارج به دگرسانی پروپیلیتی محدود است و دگرسانی‌های سیلیسی، اکسید آهنی، تورمالینی، کلریتی و کربناتی به صورت مناطق دگرسانی کوچک و محلی در داخل دگرسانی آرژیلیک محاط شده‌اند. سنگ‌هایی که متحمل دگرسانی آرژیلی شده‌اند دارای ترکیب تراکی آندزیتی، آندزیتی و بندرت مونزودیوریتی هستند. بر پایه پژوهش‌های کانی‌شناسی به روش‌های پراش‌سنجی اشعه ایکس و میکروسکوپی، در نمونه‌های به شدت دگرسان شده کوارتز، سربیسیت و ایلیت (کانی‌های اصلی)، پیروفیلیت و کائولینیت (کانی‌های فرعی) و آلبیت (کانی جزئی) را تشکیل می‌دهند. در نمونه‌های متوسط دگرسان شده کوارتز، آلبیت، کائولینیت، سربیسیت و ایلیت (کانی‌های اصلی) و کلسیت، آکالی فلدسپار و گوتیت (کانی‌های فرعی) را تشکیل می‌دهند. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های دگرسانی آرژیلی این گستره، مشابهت زیادی با مجموعه کانی‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط و پیشرفته دارد (شکل ۴-الف، ب). دگرسانی اکسید آهنی نیز از گسترش زیادی برخوردار است و به صورت‌های برشی، رگه-رگچه‌ای و جاننشینی در واحدهای سنگی با ترکیب تراکی آندزیتی، آندزیتی و مونزودیوریتی دیده می‌شود (شکل ۴-پ). کانی‌های این دگرسانی در گستره کوه میل شامل

اسپیکولاریت و هماتیت (بیشتر اسپیکولاریت) است که در مواردی با کوارتز، کلریت، کلسیت و سولفیدها (کالکوپیریت و پیریت) همراهی می‌شود (شکل ۴-ث، ج). اسپیکولاریت و هماتیت اولیه تحت شرایط اکسیداسیون سطحی به هماتیت ثانویه، گوتیت و لیمونیت تبدیل شده‌اند (شکل ۴-ج). دگرسانی سیلیسی به شکل‌های رگه-رگچه‌ای، برشی، سیلیسی شدن کامل و پرشدگی حفرات در سنگ‌های میزبان با ترکیب تراکی آندزیتی، آندزیتی و مونزودیوریتی گسترش دارد. این دگرسانی ارتباط تنگاتنگی با کانه‌زایی‌های اکسیدی و سولفیدی دارد و با کانی‌های کالکوپیریت، پیریت، اسپیکولاریت، هماتیت، کانی‌های رسی، تورمالین، کلریت، اپیدوت، کلسیت، مالاکیت و گوتیت همراه است (شکل ۴-ت، ث). دگرسانی تورمالینی در برخی از نمونه‌های انتخابی از مغزه‌های حفاری رویت شد که با کانی‌های کوارتز، کلریت، سربیسیت، کلسیت و کالکوپیریت همراه بوده است. سنگ‌های میزبان دگرسانی توده‌های نفوذی با ترکیب مونزودیوریت تا کوارتز مونزودیوریت بوده‌اند (شکل ۴-ح). دگرسانی کربناتی به صورت رگه-رگچه‌ای، برشی و جاننشینی کانی‌های قبلی مشاهده شده است. کلسیت هم به صورت همزاد با کوارتز، کلریت، اپیدوت، کوارتز، سولفیدها و اکسیدهای آهن وجود دارد و هم‌چنین به صورت رگه-رگچه‌های تاخیری، شکل‌های مختلف کانی‌های قبلی (زمینه سنگ میزبان، رگه‌ها و برش‌ها) را قطع می‌کند (شکل ۴-خ).

کانه‌زایی

کانه‌زایی در گستره اکتشافی کوه میل به شکل‌های رگه-رگچه‌ای، برشی، داربستی و دانه پراکنده در سنگ‌های آتشفشانی (تراکی آندزیت، آندزیت و آندزیت بازالت) و سنگ‌های نفوذی مونزودیوریتی تا کوارتز مونزودیوریتی مشاهده می‌شود. کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای در رخنمون‌های سنگی و مغزه‌های حفاری مشاهده می‌شود (شکل ۵-الف). کانه‌زایی برشی در رخنمون‌های سنگی و مغزه‌های حفاری دیده شده است با وجود این، در محیط‌های سطحی و



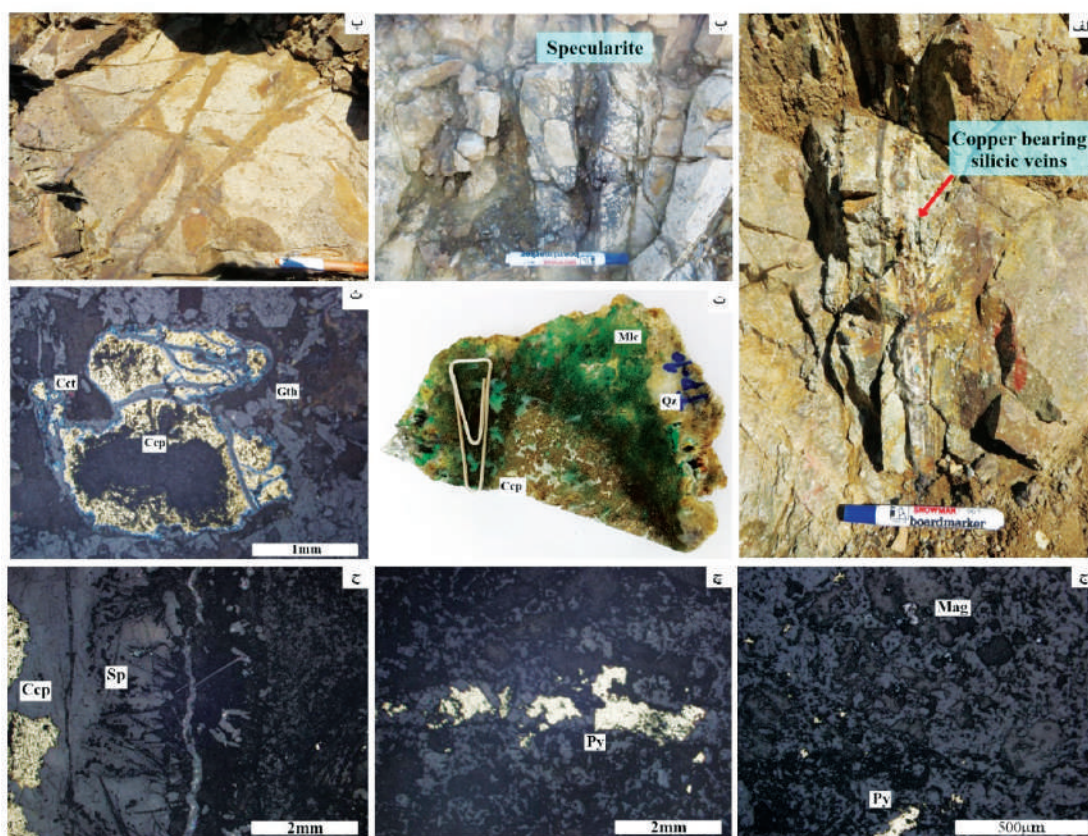
شکل ۴. الف) نمایی از دگرسانی‌های پروپلیتیک، آرژیلیک و توده مونزودیوریتی در گستره کوه میل (دید به شمال-شمال غرب)، ب) دگرسانی آرژیلی شدید در واحد تراکی‌اندزیتی و استخراج آن به‌عنوان کائولن (دید به شمال-شمال غرب)، پ) تصویری از رگه-رگچه‌های اکسید آهنی در واحد اندزیتی، ت) نمونه مغزه حفاری که رگه سیلیسی-کلسیتی-سولفیدی را در سنگ میزبان مونزودیوریت نشان می‌دهد، ث) تصویر میکروسکوپی از رگه سیلیسی-اکسید آهنی (اسپیکولاریت)، ج) تصویر میکروسکوپی در نور انعکاسی (PPL) که دارای اسپیکولاریت، هماتیت و گوتیت است، چ) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی پروپلیتیک با کانی‌های شاخص اپیدوت، کلریت و کلسیت، ح) تصویری از هم‌رشدی تورمالین، کوارتز و کلسیت (XPL)، خ) تصویر میکروسکوپی نور عبوری (XPL) که همراهی کلسیت با کوارتز و اکسیدهای آهن را نشان می‌دهد. Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Sp: اسپیکولاریت، Chl: کلریت، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Tur: تورمالین، Opq: کانی‌های اپاک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010)

شده‌اند (شکل ۵-ج). پژوهش‌های کانی‌شناسی بر روی نمونه‌های مقاطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی، منجر به شناسایی کانی‌های سولفیدی، اکسیدی، سیلیکاتی و کربناتی شده است که به صورت‌های درون‌زاد و برون‌زاد تشکیل شده‌اند. این کانی‌ها عبارت از کالکوپیریت، مگنتیت، پیریت، اسپیکولاریت، هماتیت، کالکوسیت، گوتیت، مالاکیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز و کلسیت می‌باشند. بافت‌های مهم شامل انواع رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای بین قطعات برش، پرکننده فضای حفرات، دانه پراکنده، جانشینی، شعاعی و کلوفرمی است. در این میان شکل‌های رگه-رگچه‌ای و برشی فراوان‌تر است (شکل ۵-الف-ح). در گستره کوه میل، کالکوپیریت بیشتر به همراه اسپیکولاریت، پیریت و کوارتز در سنگ‌های میزبان از جنس اندزیت، کوارتز مونزودیوریت و مونزودیوریت مشاهده

نزدیک به سطح گسترش بیشتری دارد. سنگ میزبان ساختارهای برشی، بیشتر سنگ‌های تراکی‌اندزیتی تا اندزیتی هستند (شکل ۵-ب). کانه‌زایی داربستی در اطراف کانه‌زایی‌های برشی و رگه-رگچه‌ای در دیواره ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری مشاهده شده است. سنگ‌های میزبانی که تحت تاثیر ساختارهای داربستی قرار گرفته‌اند دارای جنس تراکی‌اندزیت و مونزودیوریت هستند. ترکیب کانی‌شناسی رگه‌های داربستی از کوارتز، اسپیکولاریت و کانی‌های با منشاء برون‌زاد از قبیل هماتیت، گوتیت و لیمونیت ترکیب یافته است (شکل ۵-پ). کانه‌زایی دانه‌پراکنده شکل دیگری از کانه‌زایی در گستره کوه میل است که دانه‌هایی از کالکوپیریت، مگنتیت و پیریت به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و افشان در متن سنگ‌های مونزودیوریتی تا کوارتز مونزودیوریتی و بندرت در گدازه‌های اندزیتی تشکیل

به صورت‌های برشی و رگه-رگچه‌ای همراه با کوارتز، کالکوپیریت و هماتیت در سنگ‌های میزبان تراکی‌اندزیت و آندزیت مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب، ج). هماتیت به‌عنوان کانی اولیه و ثانویه در رگه‌ها و برش‌ها وجود دارد که نوع ثانویه آن بیشتر حاصل دگرسانی مگنتیت و کانی‌های سولفیدی است. گوتیت حاصل هوازدگی کانی‌های اکسیدی و سولفیدی است. این کانی از حاشیه‌ها و مرز شکستگی‌ها به‌طور بخشی و گاه کامل جانشین کالکوپیریت، مگنتیت، اسپیکولاریت و هماتیت می‌شود (شکل ۵-ث). مالاکیت آخرین محصول هوازدگی کانی‌های مس‌دار به‌ویژه کالکوپیریت، کالکوسیت و کولیت است و به‌صورت رگه‌ای، پرکننده فضاهای خالی، فضای بین برش‌ها و جانشینی مشاهده می‌شود (شکل ۵-ت).

می‌شود (شکل ۵). کالکوپیریت بر اثر فرآیندهای برون‌زاد، از حاشیه‌ها در حال تبدیل شدن به کالکوسیت و سپس گوتیت است (شکل ۵-ث). پیریت به‌صورت بلورهای درشت شکل‌دار و بی‌شکل و بیشتر در همراهی با کالکوپیریت وجود دارد ولی در مقایسه با آن از فراوانی کمتری برخوردار است. فرآیندهای هوازدگی و اکسیداسیون سطحی سبب تبدیل پیریت به هماتیت و گوتیت شده است (شکل ۵-ج). مگنتیت به دو صورت ماگمایی و گرمابی در سامانه کانه‌زایی کوه میل وجود دارد که فاز ماگمایی آن بیشتر به‌صورت افشان و دانه‌پراکنده بوده و مقدم بر انواع گرمابی تشکیل شده است. مگنتیت‌های گرمابی بیشتر به‌صورت رگه‌ای و پرشدگی فضاهای خالی هستند و با کانی‌های کالکوپیریت، پیریت و هماتیت هم‌یافتی دارند (شکل ۵-ج). اسپیکولاریت



شکل ۵. الف) رگه سیلیسی-اکسید آهنی دارای کانه‌زایی مس در واحد آندزیتی، ب) برشی شدن تراکی‌اندزیت دگرسان شده و پرشدگی فضای بین قطعات برش با اسپیکولاریت، پ) ساختار داربستی از اکسیدهای آهن در واحد تراکی‌اندزیتی، ت) کوارتز، کالکوپیریت و مالاکیت به‌صورت پرشدگی حفرات سنگ میزبان، ث) جانشینی کالکوپیریت به‌وسیله گوتیت از حاشیه و امتداد شکستگی‌ها، ج) تصویر میکروسکوپی از مگنتیت و پیریت به‌صورت دانه پراکنده در متن سنگ میزبان، چ) تصویر میکروسکوپی از پیریت به‌صورت رگه‌ای در متن سنگ میزبان، ح) تصویر میکروسکوپی که تشکیل اسپیکولاریت و کالکوپیریت را از حاشیه به هسته رگه نشان می‌دهد. Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Py: پیریت، Mag: مگنتیت، Gth: گوتیت، Sp: اسپیکولاریت، علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010)

نزدیک به سطح سبب خرد و برشی شدن سنگ‌های میزبان (به‌ویژه سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب تراکی‌آندزیت و آندزیت و بندرت مونزودیوریت) شده و با کاهش فشار و دمای سیال، برخی از کانه‌ها و کانی‌ها در فضای بین قطعات برش نهشته شده‌اند. بخشی از کانه‌زایی اسپیکولاریت، هماتیت و کالکوپیریت به همراه کوارتز، کلریت، کلسیت و کانی‌های دیگر در مرحله برش‌زایی گرمایی تشکیل شده‌اند. در مرحله پایانی رخداد گرمایی هیپوزن نیز سیالات باقیمانده، حفرات و درز و شکستگی‌های سنگ میزبان را پر کرده است. اندکی از کانه‌زایی کالکوپیریت، اسپیکولاریت به همراه کانی‌های کوارتز، کلریت و کلسیت در این مرحله تشکیل شده است. (پ) مرحله اکسیداسیون و کانه‌زایی برون‌زاد (سوپرژن): این مرحله به‌نوبه خود شامل مراحل برون‌زاد احیایی و اکسیدی است. کانه‌های کالکوسیت و کوولیت در مرحله برون‌زاد احیایی جانشین کالکوپیریت می‌شوند. در مرحله برون‌زاد اکسیدی کانه‌های هماتیت ثانویه، مالاکیت، گوتیت و لیمونیت جانشین مگنتیت، اسپیکولاریت، هماتیت اولیه، کالکوپیریت و پیریت شده‌اند.

بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، سامانه کانه‌زایی کوه‌میل در سه مرحله تشکیل شده است (جدول ۱): الف) مرحله ماگمایی (قبل از رخداد کانه‌زایی)، در این مرحله کانه‌های مگنتیت و پیریت با بافت دانه پراکنده و به‌صورت کانی‌های تاخیری در فضای بین بلورهای درشت پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن در سنگ‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی و کوارتز مونزودیوریتی تا مونزودیوریتی تشکیل شده‌اند و منشاء ماگمایی دارند. ب) مرحله کانه‌زایی درون‌زاد (هیپوزن)، در این مرحله کانی‌ها و کانه‌ها به‌نوبه خود در چند زیرمرحله تشکیل شده‌اند. در ابتدای مرحله کانه‌زایی درون‌زاد گرمایی، کانه‌های مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت به‌صورت دانه پراکنده در طول فرایندهای دگرسانی تورمالینی، کلریتی، اپیدوتی و سریسیتی شدن سنگ‌های میزبان تشکیل شده است. پس از رخداد کانه‌زایی دانه پراکنده با منشا گرمایی، رگه-رگچه‌های دارای کانی‌های مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت و اسپیکولاریت در سنگ‌های میزبان با ترکیب مونزودیوریت، تراکی‌آندزیت و آندزیت تشکیل شده است. در ادامه، فشار سیال گرمایی در بخش‌های

جدول ۱. کانی‌شناسی، بافت و توالی پاراژنتیکی کانه‌ها و کانی‌ها در سامانه کانه‌زایی کوه‌میل

Stages		Magmatic (Pre-ore stage)	Hypogene (Ore stage)	Supergene (Post-ore stage)	
				Reduced	Oxidized
Ore	Magnetite	—————	-----		
	Pyrite	-----	-----		
	Chalcopyrite		—————		
	Hematite		-----		-----
	Specularite		—————		
	Chalcoite			-----	
	Covellite			-----	
	Malachite				—————
	Goethite				—————
	Limonite				—————
Gangue	Tourmaline		—————		
	Epidote		—————		
	Chlorite		—————		
	Sericite		—————		
	Kaolinite		—————	-----	-----
	Pyrophyllite		—————		
	Albite		—————		
	Illite		—————		
	Quartz		—————		
	Calcite		—————		
Gypsum				-----	
Texture	Vein and Veinlets		—————		—————
	Broccelation		—————		—————
	Disseminated	—————	-----		
	Open space-filling		-----	-----	-----
	Replacement		-----	-----	-----

ژئوشیمی سنگ‌های آذرین

مقادیر غلظت عناصر اصلی و کمیاب برای ۱۰ نمونه اصلی بدون در نظر گرفتن مقدار L.O.I. به ۱۰۰ رسانده شده سنگ آذرین نفوذی و خروجی گستره کوه میل در جدول ۲ آورده شده است. برای استفاده از این داده‌ها در رسم و تفسیر نمودارهای ژئوشیمیایی، مقادیر غلظت اکسید عناصر از قبیل GCDkit، Excel و غیره رسم شده‌اند.

جدول ۲. مقادیر اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر اصلی، فرعی و کمیاب (ppm) در ۱۰ نمونه سنگ آذرین به روش‌های ICP-OES/MS

Rock type	Basaltic andesite	Trachy andesite	Quartz monzodiorite	Basaltic andesite	monzodiorite	Altered trachy andesite	monzodiorite	Altered trachy andesite	Quartz monzodiorite	Altered trachy andesite
Sample	KZ- RG-01	KZ- RG-02	KZ- RG-03	KZ- RG-04	KZ- RG-05	KZ- RG-06	KZ- RG-07	KZ- RG-08	KZ- RG-09	KZ- RG-10
SiO ₂	۵۴/۸۱	۵۲/۸۵	۵۶/۷۱	۵۴/۶۹	۵۷/۱۹	۷۴/۵۶	۵۷/۰۷	۸۴/۱۹	۵۶/۸۳	۸۳/۴۲
Al ₂ O ₃	۱۶/۸۸	۱۸/۳۳	۱۶/۱۹	۱۶/۸۹	۲۰/۰۰	۱۴/۱۲	۱۹/۰۶	۱۲/۵۷	۱۷/۱۵	۱۳/۲۶
CaO	۸/۱۱	۸/۲۹	۷/۴۲	۸/۱۷	۸/۱۹	۱/۲۶	۸/۰۰	۰/۱۰	۷/۶۲	۰/۱۲
Fe ₂ O ₃	۹/۷۵	۹/۹۴	۹/۱۲	۹/۷۹	۵/۴۶	۲/۸۲	۶/۳۶	۰/۱۶	۸/۱۹	۰/۱۴
K ₂ O	۰/۸۱	۱/۴۷	۱/۰۶	۰/۷۷	۱/۵۵	۰/۳۸	۱/۴۳	۲/۵۱	۱/۱۹	۲/۵۵
MgO	۵/۱۳	۴/۴۳	۵/۰۹	۵/۱۷	۲/۲۸	۰/۱۶	۲/۹۷	۰/۰۷	۴/۳۸	۰/۰۹
MnO	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۰۴
Na ₂ O	۳/۲۷	۳/۴۶	۳/۰۶	۳/۲۹	۴/۲۹	۵/۸۹	۳/۹۹	۰/۰۵	۳/۳۷	۰/۰۴
P ₂ O ₅	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۰۵
TiO ₂	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۶۰	۰/۸۲	۰/۲۵	۰/۸۸	۰/۲۸
As	۲۰/۲	۲۲/۶	۱۶/۵	۲۰/۳	۹	۹/۳	۱۰/۹	۱۱/۴	۱۴/۶	۱۱/۷
Ba	۲۶۲	۵۰۹	۳۳۲	۲۶۵	۳۹۸	۲۵	۳۸۲	۳۰	۳۴۹	۳۴
Be	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۳	۰/۶	۰/۲
Ca	۵۲۹۰۹	۵۳۷۰۰	۴۸۵۷۸	۵۲۹۰۶	۵۲۹۵۷	۹۱۲۶	۵۱۸۶۲	۱۳۵۸	۴۹۶۷۳	۱۳۴۵
Co	۲۸	۲۷/۷	۲۱/۹	۲۷	۱۲/۷	۲/۲	۱۵	۰/۷۵	۱۹/۶	۰/۷۵
Cr	۴۸	۳۵	۳۹	۵۰	۱۵	۱۳	۲۱	۱۰	۳۳	۱۲
Cs	۰/۶	۱/۶	۰/۸	۰/۵	۰/۹	۰/۳۷	۰/۹	۰/۳۷	۰/۸	۰/۳۷
Cu	۱۰۴	۱۲۱	۱۲۹	۱۰۲	۵۳	۱۸۵	۷۲	۷	۱۱۰	۹
Hf	۰/۵۹	۰/۵۸	۱/۱۹	۰/۶۱	۱/۶۲	۲/۴۶	۱/۵۱	۱/۳۳	۱/۳۰	۱/۳۲
Li	۸	۱۰	۸	۹	۳	۱۱	۴	۶	۷	۵
Mo	۰/۲	۱/۸	۰/۶	۰/۱	۰/۱	۰/۶	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۰/۲
Nb	۱/۸	۱/۱	۲/۳	۱/۷	۱/۷	۴/۲	۱/۹	۶/۱	۲/۲	۶/۴
Ni	۱۳	۱۰	۱۷	۱۵	۷	۱	۱۰	۸	۱۵	۶
Pb	۴	۵۱	۱۴	۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱۲	۰/۷۵
Rb	۱۲	۲۵	۱۸	۱۵	۲۷	۱۳	۲۵	۴۷	۲۰	۵۱
S	۴۳۶	۶۵۵	۲۸۹	۴۳۸	۲۰۷	۲۳۲	۲۲۸	۷۸۱	۲۶۹	۷۸۵
Sb	۰/۸	۰/۳۷	۰/۷	۰/۷	۰/۳۷	۱/۲	۰/۳۷	۱	۰/۸	۱
Sc	۲۲/۱	۲۴/۸	۲۵/۵	۲۲/۴	۱۸/۴	۹/۲	۲۰/۲	۴	۲۳/۷	۵
Sn	۱/۱	۰/۴	۱/۲	۰/۹	۰/۹	۱/۸	۱/۰	۰/۵	۱/۱	۰/۶

ادامه جدول ۲.

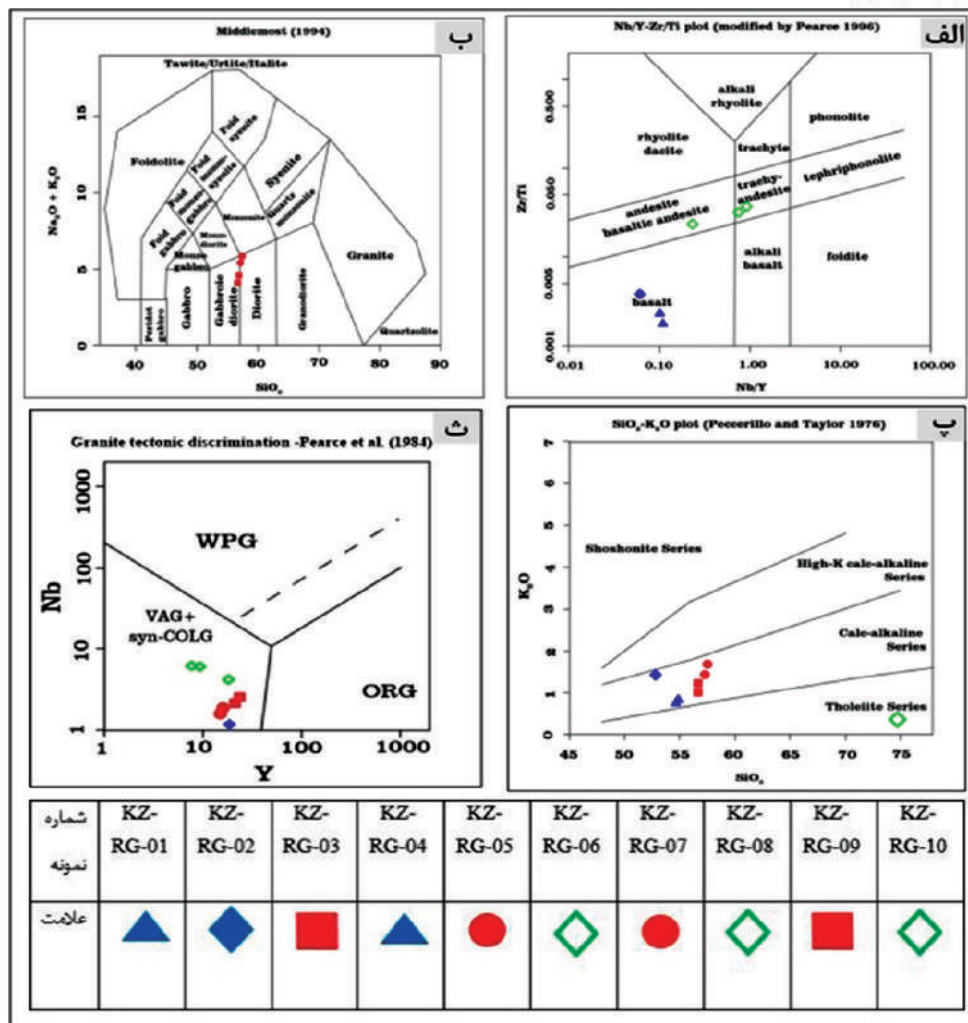
Rock type	Basaltic andesite	Trachy andesite	Quartz monzodiorite	Basaltic andesite	monzodiorite	Altered trachy andesite	monzodiorite	Altered trachy andesite	Quartz monzodiorite	Altered trachy andesite
Sample	KZ- RG-01	KZ- RG-02	KZ- RG-03	KZ- RG-04	KZ- RG-05	KZ- RG-06	KZ- RG-07	KZ- RG-08	KZ- RG-09	KZ- RG-10
Sr	۳۸۶/۳	۴۷۴/۷	۴۰۷/۸	۳۸۶/۵	۵۲۹	۸۰/۱	۴۹۸/۷	۲۰۴/۳	۴۳۸/۱	۲۰۴/۵
Ta	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۶۵	۱/۶۶	۰/۷۹	۱/۳۹	۱/۰۲	۰/۸۵	۱/۰۳
Th	۲/۰۹	۱/۹۵	۳/۱۹	۲/۱۵	۲/۹۳	۱۰/۴۵	۳/۰۰	۹/۷	۳/۱۳	۹/۵
U	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۳	۰/۷	۲/۱	۰/۷	۱/۴	۰/۶	۱/۶
V	۲۳۸	۲۶۶	۲۳۵	۲۳۵	۱۷۵	۷۷	۱۹۰	۸	۲۲۰	۱۰
Y	۱۶/۴	۱۸/۶	۲۰/۹	۱۶/۲	۱۶/۷	۱۸/۳	۱۷/۸	۸/۸	۱۹/۹	۸/۱
Zn	۱۱۷	۶۴۶	۷۴	۱۲۰	۴۱	۱۱	۴۹	۰/۷۵	۶۶	۰/۷۵
Zr	۹	۱۹	۳۴	۱۲	۴۶	۷۶	۴۳	۵۰	۳۷	۵۶
La	۹	۱۱	۱۳	۱۰	۱۰	۲۴	۱۱	۳۳	۱۲	۳۲
Ce	۱۶	۱۹	۲۴	۱۷	۲۲	۴۷	۲۳	۶۳	۲۴	۶۱
Pr	۱/۸۷	۲/۱	۲/۷۱	۱/۸۵	۲/۳۲	۴/۸	۲/۴۲	۵/۶۵	۲/۶۱	۵/۶۱
Nd	۷/۶	۸/۶	۱۱/۲	۷/۵	۸/۸	۱۸/۴	۹/۴	۱۷/۵	۱۰/۶	۱۷/۳
Sm	۲/۸۷	۳/۱۵	۳/۶	۲/۸۵	۳/۰۲	۴/۳	۳/۱۷	۲/۵۹	۳/۴۶	۲/۵۶
Eu	۱	۱/۱۸	۱/۱	۱	۱/۰۵	۰/۷۸	۱/۰۶	۰/۳۶	۱/۰۹	۰/۳۴
Gd	۲/۹۸	۲/۹۳	۳/۴۶	۲/۹۷	۳/۰۱	۳/۷۱	۳/۱۲	۱/۷۹	۳/۳۵	۱/۷۶
Tb	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۳۲	۰/۶۱	۰/۳
Dy	۳/۵۹	۳/۵۵	۴/۰۱	۳/۵۷	۳/۴۸	۳/۸۵	۳/۶۱	۱/۵۳	۳/۸۸	۱/۵۳
Er	۲/۴۳	۲/۴۹	۲/۴۶	۲/۴۵	۲/۲	۲/۵۸	۲/۲۷	۱/۲۶	۲/۴۰	۱/۲۴
Tm	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۱۸
Yb	۲/۴	۲/۶	۲/۵	۲/۳	۱/۹	۱/۷	۲/۱	۰/۹	۲/۴	۰/۸
Lu	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۲۲

ژئوشیمی سنگ‌های مناطق دگرسان شده

از آن جایی که در گستره کوه میل، پدیده دگرسانی بیشتر سنگ‌های آتشفشانی و توفی میزبان توده‌های نفوذی مونزودیوریتی و کانه‌زایی را تحت تاثیر قرار داده است، به همین دلیل می‌توان برای مطالعه شیمی دگرسانی‌ها از داده‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی سالم (تراکی‌اندزیت و اندزیت بازالت) و به شدت دگرسان شده (تراکی‌اندزیت‌های به شدت دگرسان شده) استفاده شده است. در مطالعه ژئوشیمی مناطق دگرسانی، برای بررسی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی مقادیر عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی در خلال فرآیند دگرسانی سنگ‌ها، مقدار غلظت عناصر در سنگ‌های دگرسان شده

بر اساس نمودار Nb/Y-Zr/Ti (Modified by

Pearce, 1996) سنگ‌های آتشفشانی گستره در میدان سنگ‌های اندزیت، اندزیت بازالت و تراکی‌اندزیت قرار می‌گیرد (شکل ۶-الف). بر اساس نمودار میدل‌موست (Middlemost, 1994)، سنگ‌های نفوذی منطقه از جنس گابرویدیوریت، دیوریت و مونزونیت می‌باشند (شکل ۶-ب). سری ماگمایی سنگ‌های منطقه با توجه به نمودار (Peccerillo and Taylor, 1976) کالک‌آلکالن است (شکل ۶-پ). از رفتار ژئوشیمیایی Y و Nb به عنوان نشانگرهای بسیار موثری در تشخیص انواع گرانیت‌ها استفاده می‌شود که بر اساس این نمودار، سنگ‌های آذرین منطقه، نشان‌دهنده موقعیت کمان آتشفشانی مرتبط با مناطق فرورانش و برخوردی هستند (شکل ۶-ث).



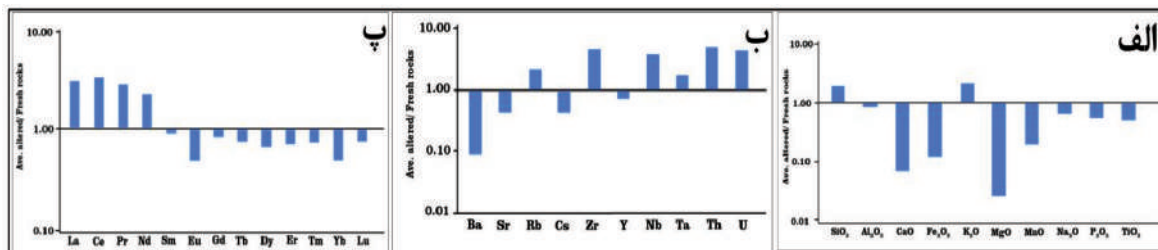
شکل ۶. الف) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه بر روی نمودار (Nb/Y-Zr/Ti اصلاح شده توسط پارس، ۱۹۹۶). ب) موقعیت سنگ‌های نفوذی منطقه بر روی نمودار (میدل موس، ۱۹۹۴). پ) تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین گستره کوه میل بر اساس نمودار پسریلو و تیور (Peccerillo and Taylor, 1976) که در گستره کالک‌آکالن قرار دارند، ث) بر اساس نمودار پرس و همکاران (Pearce et al., 1984) نمونه‌ها در موقعیت کمان آتشفشانی مرتبط با مناطق فرورانش و برخوردی قرار می‌گیرند

خارج شدن آن از ترکیب سنگ بر اثر رخداد دگرسانی و شستشوی گرمایی است. عناصر K_2O و SiO_2 در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده گستره کوه میل غنی‌شدگی دارند در حالی که عناصر CaO ، MgO ، Fe_2O_3 ، MnO ، Al_2O_3 ، TiO_2 و Na_2O ، P_2O_5 در این سنگ‌ها تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۷-الف). افزایش در مقدار SiO_2 و K_2O و کاهش در مقدار CaO و Na_2O نتیجه جاننشینی گرمایی پلاژیوکلازهای اولیه سنگ توسط آلکالی‌فلدسپار ثانویه، هیدرولیز فلدسپارها و تبدیل آن‌ها به کانی‌های رسی (ایلپیت و کائولینیت)، سریسیت و سیلیسی شدن است (Lentz and Gregoire, 1995). در سنگ‌های دگرسان

به انواع سالم و کمتر دگرسان شده آن‌ها مقایسه می‌شود (e.g., Grant, 1986; Leitch and Lentz, 1994). در این پژوهش نیز برای بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر در طول دگرسانی سنگ‌ها، نسبت متوسط مقدار غلظت عناصر در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده (نمونه‌های سنگ شماره‌های 06، 08، 10) به متوسط مقدار آن‌ها در سنگ‌های سالم و کمتر دگرسان شده (نمونه‌های سنگ شماره‌های 01، 02، 04) حساب شده است (جدول ۲). غنی‌شدگی در مقدار یک عنصر بیانگر اضافه شدن آن به ترکیب سنگ بر اثر رخداد دگرسانی است، در حالی که تهی‌شدگی در مقدار یک عنصر بیانگر

سربیم، پرازیدیمیم و نئودیمیم غنی‌شدگی دارند درحالی‌که عناصر کمیاب خاکی سنگین (ساماریوم تا لوتسیم و ایتیریم) تهی‌شدگی نشان می‌دهند. تفکیک عناصر کمیاب خاکی سبک از سنگین و غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی سبک در پهنه‌های دگرسانی آرژلیک به وجود و نبود کانی‌های حاصل از دگرسانی میزبان عناصر کمیاب خاکی سبک و میزان غلظت این عناصر در سیال گرمابی بستگی دارد که توسط تغییرات خواص فیزیوشیمیایی از قبیل افزایش pH، درجه حرارت و فراوانی کمپلکس‌های سولفات، کربنات و کلرید فراهم می‌شود (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۴۰۳). عناصر کمیاب خاکی سبک رها شده از سیال در ساختار سیلیکات‌های ورقه‌ای مانند ایلیت، کائولینیت و پیروفیلت به‌جای پتاسیم وارد می‌شوند (Henderson, 1984؛ حسین زاده و همکاران، ۱۴۰۲) (شکل ۷-پ).

شده عناصری از قبیل روبیدیم، زیرکنیم، نیوبیوم، تانتالیم، اورانیم و توریم غنی‌شدگی دارند درحالی‌که عناصری مانند باریم، استرانسیم، سزیم و ایتیریم تهی‌شدگی نشان می‌دهند. عناصر باریم و استرانسیم بیشترین شباهت ژئوشیمیایی را با عنصر کلسیم دارند و در ساختار پلاژیوکلاز و تا حدودی هورنبلند به‌صورت پذیرفته‌وارد می‌شود. جانشینی پلاژیوکلازها به‌وسیله آلکالی فلدسپار، تبدیل فلدسپارها به کانی‌های رسی و تبدیل هورنبلندها به بیوتیت و کلریت در جریان فرآیند دگرسانی، سبب کاهش در مقدار کلسیم، باریم و استرانسیم می‌شود. عناصر کمیاب از قبیل نیوبیوم، تانتالیم، توریم و اورانیم در طول دگرسانی سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا بازیک گستره کوه میل رفتار ژئوشیمیایی مشابه با عناصر کمیاب خاکی سبک دارند و مقدار غلظت آن‌ها در طول فرآیند دگرسانی افزایش می‌یابد (شکل ۷-ب). در سنگ‌های دگرسان شده عناصر کمیاب خاکی سبک از قبیل لانتانیم،



شکل ۷. توزیع ژئوشیمیایی نسبت متوسط مقدار غلظت عناصر در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده به متوسط سنگ‌های آتشفشانی سالم و غیردگرسان شده در گستره کوه میل. الف) اکسید عناصر اصلی، ب) عناصر فرعی و کمیاب، پ) عناصر کمیاب خاکی

ژئوشیمی کانسنگ

برای بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانه‌زایی در منطقه کوه میل، تعداد چهار نمونه کانسنگ برای عنصر طلا به روش غال‌گذاری تجزیه شده است. علاوه بر این، نمونه‌های کانسنگ برای اندازه‌گیری مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی به روش مخلوط چهار اسید آماده‌سازی شده و با استفاده از روش‌های ICP-OES/MS تجزیه شده‌اند. مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی در چهار نمونه کانسنگ در جدول ۳ آورده شده است.

برای ارزیابی همبستگی‌های ژئوشیمیایی میان عناصر در سامانه کانه‌زایی کوه میل، از تابع ضریب همبستگی

پیرسون استفاده شده است و نتایج محاسبات به‌صورت ماتریس ضرایب همبستگی در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، عنصر طلا با بیسموت، کادمیم، مس، آهن، مولیبدن، سرب، آنتیموان و تنگستن دارای ضریب همبستگی مثبت بسیار خوب است (۰/۷۳ تا ۰/۹۳). همبستگی طلا با مس و آهن با حضور کالکوپیریت، پیریت و اسپیکولاریت در مطالعات کانی‌شناسی مطابقت دارد. عنصر مس با طلا، نقره، بیسموت، کادمیم و آرسنیک دارای همبستگی مثبت خوب است و با سرب و روی هیچ‌گونه همبستگی ندارد و با باریم همبستگی منفی دارد.

جدول ۳. مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی (ppm) در چهار نمونه کانسنگ در گستره کوه میل

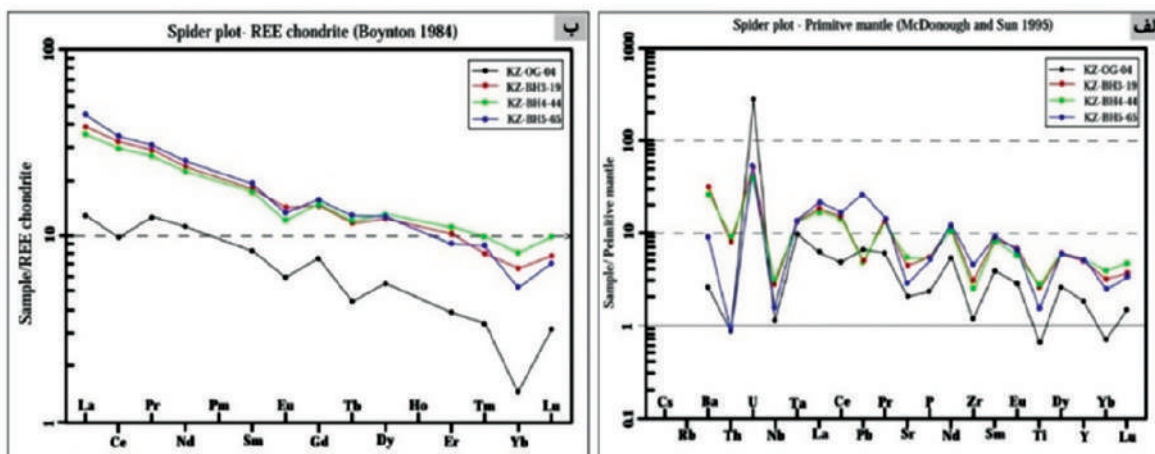
Sample	Au	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr
KZ-OG-04	۰/۶۱۷	۰/۴	۱۸۷۵۹	۲۳/۹	۱۷	۰/۱۵	۲/۹	۵۳۷۰۹	۰/۱	۸	۵/۲	۱۹
KZ-BH3-19	۰/۰۱۲	۰/۴	۶۰۲۳۳	۸	۲۱۰	۰/۵	۰/۰۷	۴۹۴۲۲	۰/۰۷	۲۶	۱۷/۵	۱۹
KZ-BH4-44	۰/۱۳۶	۰/۰۷	۵۷۶۲۱	۷/۹	۱۷۲	۰/۳	۰/۳	۴۰۵۰۸	۰/۰۷	۲۴	۱۱/۸	۲۶
KZ-BH5-65	۲/۱۸۸	۰/۶	۳۴۷۱۴	۹/۷	۶۰	۰/۲	۱/۲	۸۵۵۲۷	۰/۷	۲۸	۶/۸	۱۳
	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	K	La	Li	Lu	Mg
KZ-OG-04	۱۵۱۶۵	۱/۷۸	۰/۸۱	۰/۴۴	۸۳۹۶۵	۱/۹۶	۰/۳۷	۴۶۰	۴	۴۴	۰/۱	۲۹۵۴
KZ-BH3-19	۲۰۲۷	۴/۰۱	۲/۱۷	۱/۰۴	۶۳۹۷۱	۳/۷۷	۰/۹۶	۸۱۹۱	۱۲	۴۱	۰/۲۵	۱۵۵۷۸
KZ-BH4-44	۲۷۳۹	۴/۲۲	۲/۳۶	۰/۸۸	۶۵۲۳۵	۳/۹۱	۰/۸۱	۶۱۸۰	۱۱	۲۶	۰/۳۲	۱۴۲۶۸
KZ-BH5-65	۳۹۶۶۷	۴/۱۱	۱/۹۲	۰/۹۹	۸۰۴۶۱	۴/۰۷	۱/۲۴	۱۲۸۷	۱۴	۳۴	۰/۲۳	۸۴۷۴
	Mn	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	S	Sb	Sc
KZ-OG-04	۳۲۸	۴	۷۲۷۰	۰/۷۵	۶/۷	۷	۲۱۰	۱	۱/۵۵	۳۶۸	۵/۵	۹/۵
KZ-BH3-19	۱۸۵۱	۱	۱۴۶۵۵	۱/۸	۱۴/۳	۱۳	۴۸۲	۰/۷۵	۳/۵۶	۳۵۸۷	۲/۱	۱۴/۵
KZ-BH4-44	۱۳۶۹	۱	۱۷۲۳۶	۲	۱۳/۴	۱۵	۴۷۸	۰/۷۵	۳/۳۱	۲۹۰۱	۱/۶	۱۶/۴
KZ-BH5-65	۱۲۱۲	۴	۱۱۰۲۹	۱	۱۵/۳	۸	۴۵۱	۴	۳/۸	۳۹۹۰۰	۴/۵	۱۱/۳
	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tm	U	V
KZ-OG-04	۰/۳۷	۱/۶۲	۲/۱	۴۰/۳	۰/۳۶	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۷۶۷	۰/۱۱	۵/۷	۱۳/۹
KZ-BH3-19	۰/۳۷	۳/۴۹	۱/۳	۸۷/۷	۰/۵	۰/۵۶	۰/۰۷	۰/۶۴	۳۰۸۱	۰/۲۶	۱/۰۴	۱۴/۷
KZ-BH4-44	۰/۳۷	۳/۳۹	۱/۲	۱۰۷/۵	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۰۷	۰/۷۲	۳۲۷۸	۰/۳۲	۰/۸	۱۳/۴
KZ-BH5-65	۱/۵۱	۳/۷۸	۱/۳	۵۵/۸	۰/۵	۰/۶۱	۰/۲۲	۰/۰۷	۱۸۵۲	۰/۲۹	۱/۱	۱۰/۹
	W	Y	Yb	Zn	Zr							
KZ-OG-04	۷۸/۵	۷/۸	۰/۳	۴۶	۱۲							
KZ-BH3-19	۱۲/۴	۲۱/۶	۱/۴	۶۹	۳۲							
KZ-BH4-44	۱۰/۹	۲۲/۵	۱/۷	۵۷	۲۶							
KZ-BH5-65	۳۸/۴	۲۲/۷	۱/۱	۶۴	۴۷							

جدول ۴. مقادیر ضریب همبستگی به روش پیرسون بر پایه لگاریتم داده‌های ژئوشیمیایی کانسنگ در گستره کوه میل

Au	1																	
Ag	0.27	1																
As	0.45	0.35	1															
Ba	-0.70	-0.50	-0.95	1														
Bi	0.89	0.28	0.80	-0.93	1													
Cd	0.77	0.75	-0.01	-0.30	0.47	1												
Cu	0.93	0.70	0.49	-0.74	0.84	0.86	1											
Fe	0.85	0.48	0.79	-0.94	0.94	0.50	0.92	1										
K	-0.79	-0.50	-0.89	0.99	-0.96	-0.44	-0.83	-0.98	1									
Mo	0.87	0.74	0.71	-0.89	0.90	0.70	0.96	0.99	-0.95	1								
Pb	0.78	0.70	0.01	-0.32	0.48	0.99	0.87	0.61	-0.45	0.71	1							
S	0.26	0.24	-0.66	0.40	-0.19	0.75	0.32	-0.07	0.26	0.05	0.74	1						
Sb	0.73	0.74	0.79	-0.92	0.84	0.70	0.88	0.97	-0.95	0.97	0.59	-0.08	1					
Sn	0.31	0.37	0.99	-0.90	0.71	-0.11	0.38	0.71	-0.82	0.48	-0.09	-0.72	0.74	1				
W	0.73	0.45	0.89	-0.98	0.91	0.44	0.82	0.98	-0.99	0.95	0.45	-0.26	0.98	0.84	1			
Zn	-0.43	0.15	-0.87	-0.79	-0.76	0.22	-0.28	-0.61	0.72	-0.70	0.20	0.76	-0.48	-0.83	-0.66	1		
Element	Au	Ag	As	Ba	Bi	Cd	Cu	Fe	K	Mo	Pb	S	Sb	Sn	W	Zn		

کمان‌های حاشیه قاره‌ای و ماگماهای متأثر از ترکیب پوسته قاره‌ای است (Hofmann et al., 1986). در شکل (۸-ب) الگوی ژئوشیمیایی عناصر کمیاب خاکی نمونه‌های کانسنگ گستره کوه‌میل به کندریت (Boynton, 1984) به‌هنگار شده است. به‌هنگار سازی نسبت به کندریت دو نقش ایفا می‌کند، اول این‌که تغییرات فراوانی بین عناصر با عدد اتمی زوج و فرد را کاهش می‌دهد و دوم این‌که هرگونه تفریق نسبت به کندریتی را آشکار می‌سازد (Rollinson, 1993). با توجه به شکل (۸-ب) الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در سه نمونه کانسنگ مشابه است در حالی‌که نمونه KZ-OG-04 در مقایسه با سه نمونه کانسنگ دیگر نسبت به عناصر کمیاب خاکی تهی‌شدگی دارد. دلیل مقدار پایین عناصر کمیاب خاکی در این نمونه به احتمال زیاد به خاطر افزایش سیلیس و اکسیدهای آهن می‌باشد که در دمای پایین و pH پایین سیال گرمایی و تحت شرایط نزدیک به سطح زمین تشکیل می‌شوند.

در بررسی ژئوشیمی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در کانسنگ‌های گستره کوه‌میل، مقادیر غلظت عناصر کمیاب در چهار نمونه کانسنگ به ترکیب گوشته اولیه (شکل ۸-الف). تهی‌شدگی Ti و Nb از ویژگی‌های ماگماهای کالک‌آکالن مرتبط با کمان‌های آتشفشانی در مقایسه با ماگماهای داخل صفحات لیتوسفری می‌باشد. آنومالی منفی Nb در بیشتر نمونه‌ها مورد مطالعه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ماگماهای مربوط به محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای بوده و می‌تواند نشان‌دهنده آلودگی پوسته‌ای و سیالات آزاد شده از لیتوسفر فرورونده به وجود آمده باشد (Aldanmaz et al., 2000). آنومالی مثبت Pb نیز در نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود که می‌تواند به متاسوماتیسم گوه گوشته‌ای توسط سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورونده و یا آلیس ماگما با سنگ‌های پوسته قاره‌ای ارتباط داشته باشد (Kamber et al., 2002). آنومالی مثبت Pb و آنومالی منفی Nb، نشانه ماگماهای



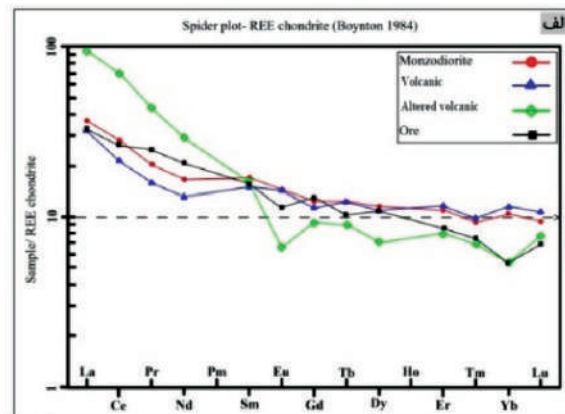
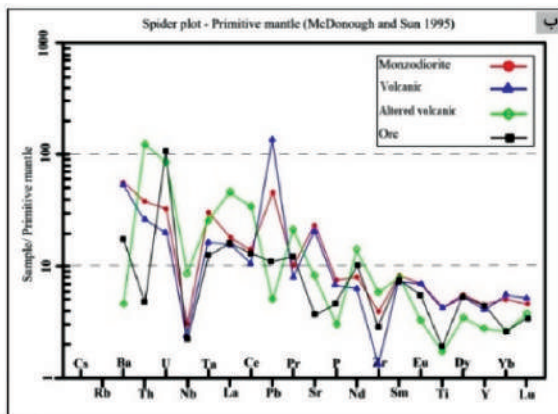
شکل ۸. الف) نمودار به‌هنگار شده عناصر کمیاب چهار نمونه کانسنگ به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، ب) نمودار به‌هنگار شده عناصر کمیاب خاکی چهار نمونه کانسنگ نسبت به کندریت (Boynton, 1984)

روند تغییرات عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانسنگ با روند این عناصر در نمونه‌های سنگ‌های میزبان سازگاری دارد و ارتباط زایشی میان کانسنگ و سنگ میزبان را بازگو می‌کند. به عبارتی عناصر مس، طلا، نقره و عناصر همراه از سیالات ماگمایی مرتبط با توده‌های

نمودار توزیع ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در متوسط ترکیب نمونه‌های کانسنگ، مونزودیوریت، سنگ‌های آتشفشانی سالم و سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده میزبان کانه‌زایی در شکل (۹-الف و ب) نشان داده شده است. نتایج حاصل از این مقایسه حاکی است که

نشان می‌دهند (شکل ۹-الف)، که دلیل آن ورود عناصر کمیاب سبک به جای پتاسیم در کانی‌های منطقه دگرسانی آرزلیک (به‌ویژه نوع پیشرفته) مانند پیروفیلت و ایلیت و یا جذب سطحی این عناصر به کانی‌های رسی مانند کائولینیت است (Henderson, 1984).

نفوذی مونزودیوریتی و نیز از شستشوی گرمابی سنگ‌های آتشفشانی میزبان منشا گرفته‌اند. در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده عناصر کمیاب خاکی سبک از قبیل لانتانیم، سریم، پرازیدیمیم و نئودیمیم در مقایسه با سنگ‌های سالم و نیز کانسنگ غنی‌شدگی جزئی دارند در حالی که عناصر کمیاب سنگین در سنگ‌های دگرسان شده تهی‌شدگی

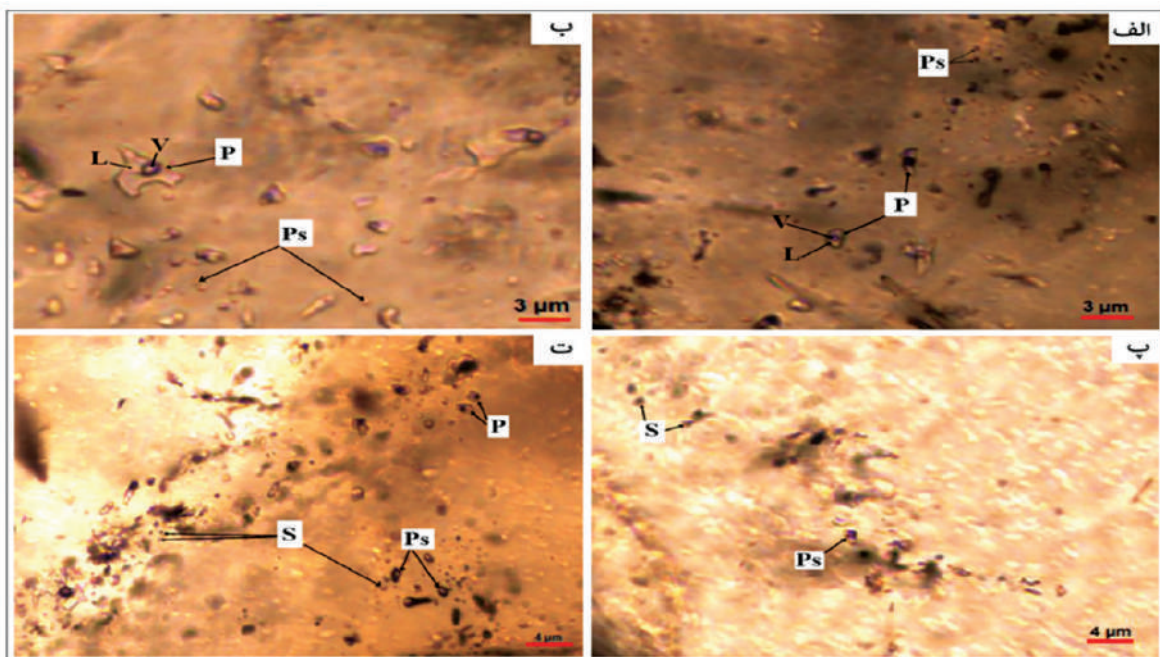


شکل ۹. الف) به‌هنجارسازی متوسط عناصر کمیاب خاکی کانسنگ و سنگ‌های میزبان به ترکیب کندریت (Boynton, 1984)، ب) به‌هنجارسازی متوسط عناصر کمیاب کانسنگ و سنگ‌های میزبان به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)

میانبارهای سیال

چگالی میانبارهای سیال در کانه‌زایی کوه میل در بازه ۰/۹ تا ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار گرفته است (شکل ۱۱-الف). این گستره وسیع دما و شوری که منجر به تغییرات چگالی سیالات می‌شود می‌تواند ناشی از تغییرات متعدد در سامانه کانه‌زایی در اثر نفوذ سیال‌های جدید و اثرات آن بر سامانه و همچنین تغییرات در شرایط فیزیکی از قبیل فشار باشد. فشار به دام افتادگی میانبارهای سیال کمتر از ۱۰ بار است (شکل ۱۱-ب). نوع کمپلکس‌های احتمالی برای حمل عناصر در سیالات گرمابی در سامانه کانه‌زایی کوه میل از نوع سولفیدی بوده است. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که SO_4^{2-} و یا HS^- مهم‌ترین آنیون‌های حمل‌کننده کاتیون‌های عناصر مختلف بوده‌اند. وجود پیریت و کالکوپیریت در کانسار کوه‌میل این مطلب را تأیید می‌کند. عنصر مس در درجه حرارت‌های پایین‌تر و محیط‌های غنی از H_2S به‌صورت کمپلکس‌های بی‌سولفیدی ولی در حرارت‌های بالا به‌صورت کمپلکس‌های کلریدی $CuCl_2^-$ و

در این پژوهش، مطالعه سنگ‌نگاری و حرارت سنجی میانبارهای سیال در پنج نمونه مینرالیزه و بر روی کوارتزهای هم‌زاد با کالکوپیریت از نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری صورت گرفته است. اندازه میانبارهای سیال موجود در بلورهای کوارتز متفاوت بوده و از ۰/۵ تا سه میکرون متغیر است و بر مبنای زایش یا زمان به تله افتادن به صورت‌های اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب هستند (شکل ۱۰-الف تا ت). در نمونه‌های کوه میل، درصد میانبارهای سیال نوع اولیه غالب است و به صورت‌های بی‌شکل، نیمه‌شکل‌دار، شکل‌دار، کشیده و کروی هستند. نتایج مطالعات ریزدماسنجی نشان می‌دهد که مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط شوری میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب ۲/۶۸، ۲۴/۶۷ و ۲۰/۲۵ درصد وزنی معادل نمک طعام است. تغییرات دمای همگن شدن میانبارهای سیال از ۱۱۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است، که میانگین آن ۱۶۴ درجه سانتی‌گراد است.



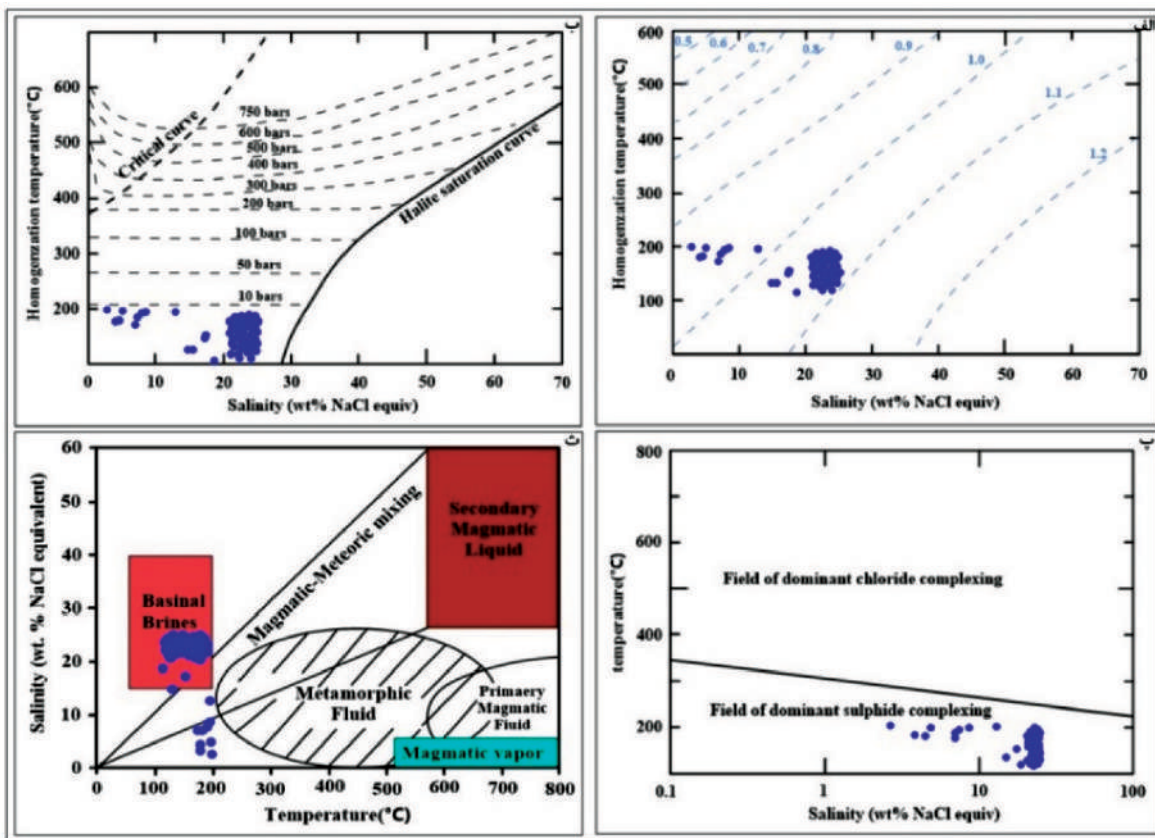
شکل ۱۰. انواع میانبارهای سیال به همراه اشکال مختلف آن‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه، الف) میانبار دوفازی نوع مایع-بخار (LV) به شکل‌های کروی و کشیده و میانبارهای اولیه و ثانویه کاذب، ب) میانبار نوع مایع-بخار، به صورت نیمه‌شکل‌دار و میانبارهای اولیه و ثانویه کاذب، پ) میانبار سیال از نوع ثانویه و ثانویه کاذب، ت) میانبار دوفازی نوع مایع-بخار به صورت کشیده و تمام‌شکل‌دار و انواع میانبارهای اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب، اولیه (P)، ثانویه (S) و ثانویه کاذب (Ps)

مرتبط با سطح زمین و در عمق کم می‌باشد، فشار حاکم بر محیط، فشار هیدرواستاتیک است. ولی اگر محیط به تله افتادن میانبارهای سیال در رابطه با ضخامت طبقات بالایی یا عمق زیاد تشکیل میانبارهای سیال باشد، فشار حاکم بر محیط، فشار لیتواستاتیک خواهد بود. در سامانه کوه میل فشار هیدرواستاتیک بر فشار لیتواستاتیک غالب است.

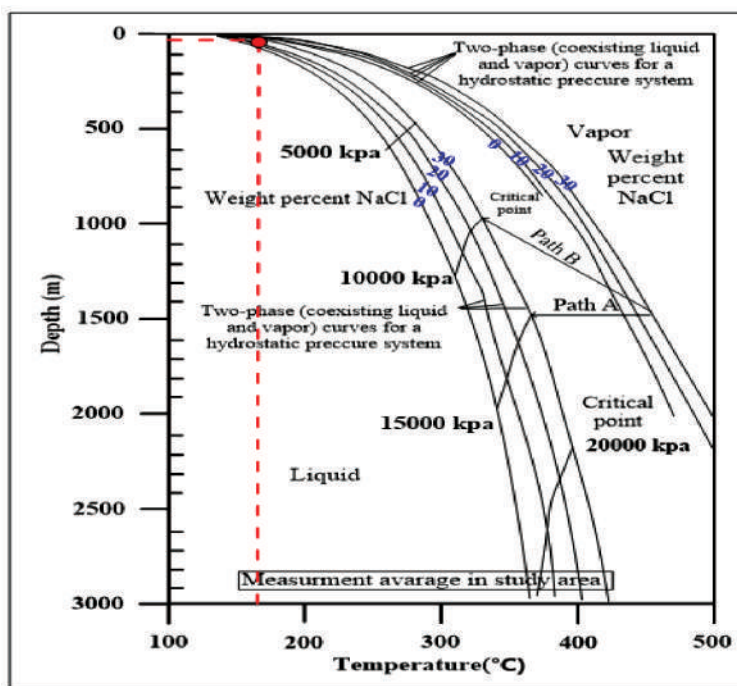
مقایسه ویژگی‌های کانسار کوه میل با کانسارهای اپی‌ترمال

کانسار مس (طلا) کوه میل در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر واقع است. سنگ میزبان کانه‌زایی بیشتر سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت، آندزیت بازالت و سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق با ترکیب مونزودیوریت تا کوارتز مونزودیوریت هستند. بافت‌های غالب در سنگ‌های آذرین پورفیری با زمینه میکروولیتی (سنگ‌های آتشفشانی) و دانه‌ای (سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق) می‌باشد. سن سنگ‌های آتشفشانی ائوسن میانی-پسین و سن سنگ‌های نفوذی نیمه‌عمیق ائوسن پسین است. بر پایه مطالعات ژئوشیمیایی، سنگ‌های آذرین نفوذی ماهیت

CuCl_3^{2-} حمل می‌شود. عنصر طلا در سیالات گرمایی بیشتر به صورت کمپلکس‌های سولفیدی حمل می‌شود (پرتاک و علی‌پوراصل، ۱۳۹۸). در محدوده کوه‌میل با توجه به حرارت پایین سیالات کانه‌ساز، عناصر مس و طلا به صورت کمپلکس‌های بی‌سولفیدی حمل و ته‌نشست یافته‌اند (شکل ۱۱-پ). حضور کانی‌های کربناته مس از جمله مالاکیت، گوتیت و کلسیت به حضور آنیون CO_3^{2-} یا HCO_3^{2-} در سیالات دلالت دارد که دارای منشأ جوی می‌باشد و شواهد خوبی مبنی بر حضور سیالات جوی در کانه‌زایی اکسیدی برون‌زاد است. براساس مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در نمونه‌های مربوط به گستره مورد مطالعه و نمودار شکل (۱۱-ث) به نظر می‌رسد که منشأ سیالات گرمایی، از نوع ماگمایی بوده است که در اثر اختلاط با آب‌های جوی و شوراب‌های حوضه‌ای رقیق شده است. براساس نمودار دما-فشار-عمق (Haas, 1971, 1976; Sourirajan and Kennedy, 1962) می‌توان عمق تقریبی کانی‌سازی را به دست آورد که کمتر از ۵۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱۲). از آنجا که محیط به تله افتادن میانبارهای سیال در منطقه کوه‌میل،



شکل ۱۱. الف) نمودار دما-شوری جهت تعیین چگالی محلول‌های NaCl-H₂O اشباع از بخار (Wilkinson, 2001)، ب) نمودار تعیین فشار-بخار محلول بر حسب دمای همگن شدن و شوری (Driesner and Heinrich, 2007)، پ) نمودار دمای همگن شدگی-شوری سیالات (Pirajno, 2009) برای تعیین کمپلکس‌های آنیونی موثر در حمل عناصر کانسار ساز، ت) نمودار درجه حرارت-شوری برای میانبارهای سیال با منشأهای متفاوت (Beane, 1983)



شکل ۱۲. نمودار دما-فشار-عمق برای تعیین عمق به دام افتادگی میانبارهای سیال و تشکیل سامانه کانه‌زایی کوه میل

کالک‌آلکالن و از نوع متالومین بوده و در زمره گرانیتوئیدهای نوع I طبقه‌بندی می‌شوند و با کمان‌های ماگمایی مناطق فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای و برخوردی مرتبط هستند. بر پایه شواهد صحرایی و مطالعات کانی‌شناسی، کانه‌زایی در گستره کوه میل بیشتر به شکل‌های رگه-رگچه‌ای، برشی، داربستی و دانه پراکنده در سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های نفوذی مشاهده می‌شود، که در این میان بافت رگه-رگچه‌ای دارای کالکوپیریت در نمونه‌های زیرسطحی غالب است. کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، اسپیکولاریت، کالکوسیت و مالاکیت از کانه‌های مهم در کانسار کوه میل می‌باشند. در سامانه کانه‌زایی کوه میل، همبستگی ژئوشیمیایی مثبت و خوب میان مس با طلا، نقره، بیسموت، کادمیوم و آرسنیک

مشاهده می‌شود. مطالعه میانبار سیال بر روی کوارتزهای همزاد با کانه‌زایی مس و طلا، دمای همگن‌شدگی و میزان شوری را به ترتیب از ۱۱۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (متوسط ۱۶۴ درجه سانتی‌گراد) و از ۲/۶۸ تا ۲۴/۶۷ (متوسط ۲۰/۲۵) درصد وزنی معادل نمک طعام نشان می‌دهد. بر اساس متوسط دمای همگن‌شدگی و شوری، فشار به‌دام افتادن میانبارهای سیال کمتر از ۱۰ بار و عمق جایگیری کمتر از ۵۰۰ متر ارزیابی می‌شود. مقایسه ویژگی‌های کانسار مس (طلا) کوه میل با ویژگی‌های عمومی کانسارهای ای‌ترمال، سامانه کانه‌زایی کوه میل بیشترین مشابهت را با کانسارهای ای‌ترمال سولفید حدواسط دارد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه ویژگی‌های کانسار مس (طلا) کوه میل با ویژگی‌های عمومی کانسارهای ای‌ترمال

مشخصات	کانسارهای ای‌ترمال نوع سولفیداسیون بالا	کانسارهای ای‌ترمال نوع سولفیداسیون پایین	کانسارهای ای‌ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	کانسار مس (طلا) کوه میل
محیط نکتونیک	حواشی کمان‌های قاره‌ای کششی و فشارشی	محیط‌های کششی قاره‌ای، جزایر کمانی، محیط‌های پشت کمان، محیط‌های کششی پس از برخورد	محیط‌های کششی در کمان‌های قاره‌ای و جزایر کمانی	محیط‌های کششی در کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای فعال
سری ماگمایی	کالک‌آلکالن	کالک‌آلکالن	کالک‌آلکالن	کالک‌آلکالن
سنگ‌های همراه	آندزیت، ریوداسیت	ریولیت-بازالت (بامودال)	آندزیت، ریوداسیت، به مقدار کم ریولیت	تراکی آندزیت، آندزیت و آندزیت بازالت
عناصر فلزی	مس-طلا-نقره (آرسنیک، روی، سرب، بیسموت، تنگستن، قلع)	طلا-نقره (سرب، روی، مس، مولیبدن، آنتیمون، جیوه)	نقره-طلا-روی-سرب-مس (آرسنیک، مولیبدن، آنتیمون، جیوه)	مس-طلا-نقره
شکل کانسار	جانشینی، برشی، رگه‌ای، توده‌ای	رگه‌ای، داربستی، برشی، دانه‌پراکنده	رگه‌ای، برشی، داربستی	رگه‌ای، برشی، داربستی، بندرت دانه‌پراکنده
کانه‌ها	انارژیت، بورنیت، کالکوپیریت، طلای آزاد، پیریت، کولیت، اسفالریت	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره (اسفالریت، گالن، تنانتیت، کالکوپیریت)	الکتروم، آکانتیت، سولفوسالت نقره، اسفالریت، گالن، سلنیدها و تلوریدهای عناصر	کالکوپیریت، پیریت، اسپیکولاریت، همتایت، مالاکیت، کالکوسیت و کولیت
کانی‌های دگرسانی	کوارتز، آلونیت، کائولینیت، کلریت	کوارتز، کلسدون، کلسیت، آدولاریا، کلریت	کوارتز، کلسدون، کلسیت، کربنات‌های منگنز، باریت، آدولاریا	کوارتز، ایلیت، کائولینیت، سریسیت، پیروفیلیت، اپیدوت، کلریت، تورمالین، کلسیت
بافت	کوارتز حفره‌ای، رگه‌ای، برشی، توده‌ای	پوسته‌ای، کلوفرمی، شانه‌ای، جانشینی کربناتی	پوسته‌ای، کلوفرم، شانه‌ای، جانشینی کربناتی	رگه-رگچه‌ای، برشی، شانه‌ای، پرکننده فضای خالی، جانشینی، کلوفرمی
ویژگی‌های سیال	آب‌های ماگمایی (اسیدی-اکسیدی)	آب‌های جوی (احیایی-نزدیک به خنثی)	آب‌های جوی و ماگمایی (نزدیک به خنثی و احیایی)	آب‌های جوی و ماگمایی (نزدیک به خنثی و احیایی)

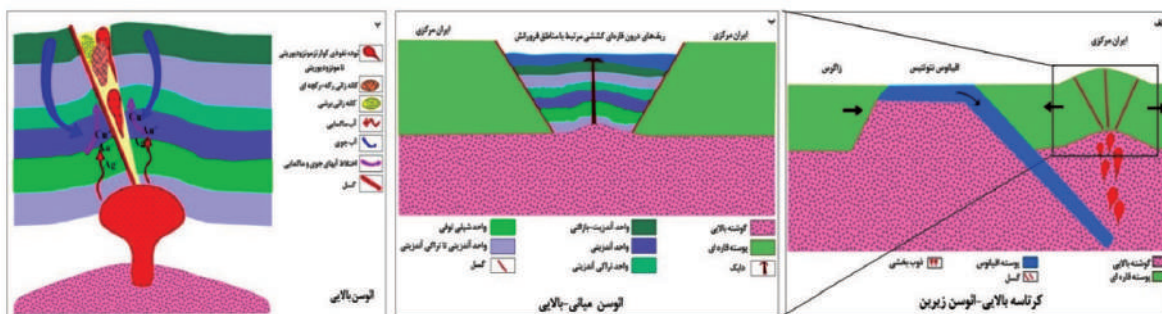
ادامه جدول ۵.

مشخصات	کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون بالا	کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون پایین	کانسارهای اپی ترمال نوع سولفیداسیون حدواسط	کانسار مس (طلا) کوه میل
عیار مس	از ۰/۱ درصد تا بیش از یک درصد (متوسط حدود ۰/۵ درصد)	کمتر از نیم درصد	از ۰/۱ درصد تا بیش از یک درصد (متوسط حدود ۰/۵ درصد)	از حدود ۰/۲ درصد تا ۳/۹۶ درصد (بر اساس تجزیه چهار نمونه)
عیار طلا	از حدود یک تا ۲۰ گرم در تن	از حدود یک تا ۱۰۰ گرم در تن	از حدود یک تا ۳۰ گرم در تن	از حدود ۰/۱ تا ۲/۵ گرم در تن (بر اساس تجزیه چهار نمونه)
دما و شوری میانبار سیال	دمای همگن شدگی: از ۱۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد متوسط شوری: کمتر از ۱۰ درصد وزنی معادل نمک طعام	دمای همگن شدگی: از ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی گراد شوری: کمتر از ۵ درصد وزنی معادل نمک طعام	دمای همگن شدگی: از ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد شوری: کمتر از ۱۰ درصد وزنی معادل نمک طعام	دمای همگن شدگی: از ۱۱۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد شوری: از ۶۸/۲ تا ۲۴/۶۷ درصد وزنی معادل نمک طعام
منابع	Hedenquist et al., 2000, 2004; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Simmons et al., 2005, Wang et al., 2019			مطالعه حاضر

مدل زایشی سامانه کانه‌زایی

فرورانش نهشته شده است (شکل ۱۳-ب)، و مرحله ۳) در این مرحله توده‌های نفوذی از جنس کوارتز مونوزودیوریتی تا مونوزودیوریتی به سن ائوسن پسین در واحدهای آتشفشانی-رسوبی با ترکیب گدازه و توف‌های تراکی‌آندزیت، شیل توفی، آندزیت و آندزیت بازالتی نفوذ کرده است. جایگیری توده‌های آذرین و سیالات گرمایی مرتبط با آن‌ها بیشتر در امتداد ساختارهای تکتونیکی از قبیل شکستگی‌ها و گسل‌ها عمیق صورت گرفته است. سیالات ماگمایی که گاهی با آب‌های جوی مخلوط شده‌اند ضمن دگرسانی سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌ای ائوسن میانی-پسین و هم‌چنین توده‌های کوارتز مونوزودیوریت تا مونوزودیوریت، در تشکیل کانه‌زایی گرمایی مس (طلا) در گستره کوه میل نقش برجسته‌ای داشته‌اند (شکل ۱۳-پ).

بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، روابط پاراژنتیکی کانی‌ها و کانه‌ها، دگرسانی‌ها، بررسی‌های ژئوشیمیایی و میانبارهای سیال مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی مس (طلا) کوه میل را می‌توان طی چند مرحله به شرح زیر خلاصه کرد: (مرحله ۱) در طول دوره کرتاسه پسین-ائوسن پیشین ورق قاره‌ای عربی به سمت شمال شرقی حرکت کرده و منجر به فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر ورق قاره‌ای ایران مرکزی شده است. در نتیجه ذوب پوسته اقیانوسی فرورونده، گوه گوشته‌ای و پوسته قاره‌ای زیرین، کمان ماگمایی ارومیه-دختر در یک حاشیه فعال قاره‌ای تشکیل شده است (شکل ۱۳-الف)، مرحله ۲) در دوره ائوسن میانی-پسین، توالی از سنگ‌های رسوبی، آذرآواری و گدازه‌ای در محیط کششی درون کمانی مرتبط با منطقه



شکل ۱۳. تصویر نمادین از مراحل تکوین و تکامل کانه‌زایی در گستره کوه میل. الف) فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر ورق قاره‌ای ایران مرکزی، ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورونده و بسته شدن اقیانوس تتیس جوان در زمان کرتاسه بالایی-اوسن پیشین، ب) تشکیل توالی آتشفشانی-رسوبی در محیط کششی درون کمانی مرتبط با مناطق فرورانش در زمان اوسن میانی-پسین، پ) نفوذ توده‌های کوارتزمونزدیوریت تا مونزدیوریت در واحدهای آتشفشانی-رسوبی در زمان اوسن پسین، گسلش و ایجاد مناطق درز و شکستگی و برش‌زایی در امتداد مناطق گسلی، صعود سیالات با منشاء ماگمایی و اختلاط آن‌ها با آب‌های جوی و انتقال مس، طلا و عناصر همراه به صورت کمپلکس‌های بی‌سولفیدی و نهشته‌گذاری آن‌ها در درز و شکستگی‌ها و فضای بین قطعات برش‌ها و تشکیل سامانه کانه‌زایی اپی‌ترمال در منطقه کوه میل

نتیجه‌گیری

غلظت مس و طلا در حد تمرکز کانساری و نقره در حد غنی‌شدگی است و مقادیر سایر عناصر پایین است. متوسط مقدار مس (۱۴۹۰۰ گرم در تن) و طلا (۰/۷۴ گرم در تن) در نمونه‌های کانسنگ گستره کوه میل در مقایسه با فراوانی پوسته‌های آن‌ها (۶۰ گرم در تن برای مس و ۰/۰۰۵ گرم در تن برای طلا) در حدود ۲۵۰ و ۱۵۰ مرتبه بیشتر است که بیان از رخداد کانه‌زایی مس و طلا در این گستره است. متوسط مقدار نقره در نمونه‌های کانسنگ (۰/۳۷ گرم در تن) در مقایسه با فراوانی پوسته‌های آن (۰/۷۵ گرم در تن) در حدود پنج مرتبه بیشتر می‌باشد که بیان از غنی‌شدگی جزئی عنصر نقره در گستره کوه میل است. مقایسه رفتار ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در متوسط ترکیب نمونه‌های کانسنگ، مونزدیوریت، سنگ‌های آتشفشانی سالم و دگرسان شده، این نتیجه به دست می‌آید که روند تغییرات این عناصر در نمونه‌های کانسنگ با روند آن‌ها در نمونه‌های سنگ‌های میزبان سازگاری دارد و ارتباط زایشی میان کانسنگ و سنگ میزبان را بازگو می‌کند. به عبارتی عناصر مس، طلا، نقره و عناصر همراه از سیالات ماگمایی مرتبط با توده‌های نفوذی مونزدیوریتی و نیز از شستشوی گرمایی سنگ‌های آتشفشانی میزبان منشا گرفته‌اند. دمای همگن‌شدگی میانبرهای سیال از ۱۱۵ تا

طی رخدادهای پس از فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر ورق قاره‌ای ایران مرکزی و برخورد ورق‌های قاره‌ای ایران مرکزی و زاگرس، ماگمای والد کالک‌آلکالن سامانه کانه‌زایی کوه میل از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی فرورونده، گوهی گوشته‌ای و پوسته قاره‌ای زیرین ضخیم شده، در موقعیت کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای فعال ایجاد شده است. دگرسانی‌های مرتبط با سامانه کانه‌زایی کوه میل شامل پروپیلیتیک، آرژیلیک، فیلیک، سیلیسی، اکسید آهنی، تورمالینی و کربناتی است، که در این میان کانه‌زایی بیشتر در مناطق دگرسانی سیلیسی و اکسید آهنی رخ داده است. شکل‌های رگه-رگچه‌ای و برشی، ساخت و بافت‌های غالب کانه‌زایی در این گستره هستند. تکامل کانی‌شناسی در سامانه کوه میل در دو مرحله درون‌زاد و برون‌زاد صورت گرفته است. در مرحله درون‌زاد مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، اسپیکولاریت و همتیت و در مرحله اکسیداسیون سطحی و برون‌زاد، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت، گوتیت و لیمونیت تشکیل شده است. برای تعیین عناصر معرف کانه‌زایی در محدوده کوه میل، مقادیر غلظت عناصر مهم از قبیل Au, Cu, Ag, As, Pb, Zn, Sb, Sn, W, Ba در نمونه‌های کانسنگ با مقدار فراوانی پوسته‌های آن‌ها مقایسه شده است. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که مقادیر

زمین‌شناسی و اکتشافی در مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ در محدوده‌ی اکتشافی کوه میل، شمال شرق ساوه، گزارش داخلی و منتشر نشده گروه معدنی زرمش.

- یوسفی، س.، ۱۳۹۶. کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار مس زرنديه، شمال شرق ساوه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۴۴.

- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2000. Petrogenetic evolution late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 67-95.

- Beane, R.E., 1983. The Magmatic-Metamorphic Transition. Geothermal Resources Council, Special Report 13, 245-253.

- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson, P., Ed., rare earth element geochemistry, Elsevier, New York, 63-114.

- Driesner, T. and Heinrich, C.A., 2007. The system H₂O-NaCl correlation formulae for Phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1000°C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 4880-4901.

- Grant, J.A., 1986. The isocon diagram-a simple solution to Gresens' Equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81, 1976-1982.

- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66, 940-946.

- Haas J.L., 1976. Thermodynamic properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the NaCl component in boiling NaCl solutions. *United State Geological Survey Bulletin*, 1421-B. 71.

- Hedenquist, J.W., Arribas, J.A. and Gonzalez-Urean, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *Society of Economic Geologists Review*, 13, 245-277.

۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان شوری آن‌ها از ۲/۶۸ تا ۲۴/۶۷ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند. براساس دمای همگن‌شدگی و شوری، فشار به‌دام افتادن میانبارهای سیال کمتر از ۱۰ بار و عمق جایگیری کمتر از ۵۰۰ متر بوده است. بر پایه مشاهدات صحرایی، مطالعات زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، دگرسانی، کانه‌زایی، ژئوشیمی، میانبارهای سیال و مقایسه کانسار مورد مطالعه با انواع کانسارهای اپی‌ترمال، سامانه کانه‌زایی کوه میل یک کانسار مس (طلا) اپی‌ترمال با درجه سولفید حدواسط معرفی می‌شود که در کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای فعال تشکیل شده است.

منابع

- پرتاک، ن. و علی‌پوراصل، م.، ۱۳۹۸. کانه‌زایی طلائی اپی‌ترمال با سنگ میزبان کربناتی کاوند، جنوب غرب زنجان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، ۵۲، ۶۳-۸۸.

- حسینی قره‌تکان، م.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و الگوی ژئوشیمی و پیدایش کانسار مس-آهن کردخلج، شمال غرب ساوه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۶.

- حسین زاده، م.ر.، مغفوری، س.، موید، م.، هادوی چهاربرج، ز. و عامل، ن.، ۱۴۰۲. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی پراکندگی عناصر در زون‌های دگرسانی نقدوز-زایلک، زون ماگمایی ارسباران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۷، ۶۵، ۷۱-۹۰.

- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش. و تاج‌الدین، ح.ع.، ۱۴۰۳. الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در پهنه‌های دگرسان و کانه‌دار کانسار لخشک (پهنه زمین درز سیستان). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۸، ۶۹، ۳۵-۴۷.

- رجب پور، ش.، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی کانسار مس ولکانیکی کوه پنگ ساوه، بخش میانی پهنه فرورانش ارومیه-دختر. مجله پژوهش‌های دانش زمین دانشگاه شهید بهشتی، ۷، ۱، ۲۵، ۱۰۹-۱۲۸.

- فضلی، ن.، قادری، م.، لنتز، د. و جیان‌وی، ل.، ۱۳۹۸. زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی و ژئوشیمی کانسار اپی‌ترمال نقره-مس نارباغی شمالی، شمال خاور ساوه. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۸، ۱۱۲، ۱۳-۲۲.

- گروه معدنی زرمش، ۱۳۹۸. بی‌جویی‌های

- Hedenquist, J.W., Sillitoe, R.H. and Arribas, A., 2004. Characteristics of and exploration for high-sulfidation epithermal Au-Cu deposits. In: Cooke, D. R., Deyell, C. L., Pongratz, J., (eds.), 24 Carat Gold Workshop: Centre for Ore Deposit Research, Special Publication, 5, 99-110.
- Henderson, P., 1984. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: P. Henderson (Editor), rare earth element geochemistry. Developments in Geochemistry, Elsevier, New York. 1-32.
- Hofmann A.W., Jochum, K.P., Seufert, M. and White, W.M., 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. Earth and Planetary Science Letters, 79, 33-45.
- Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144, 38-56.
- Leitch, C.H.B. and Lentz, D.R., 1994. The Gresens approach to mass balance constraints of alteration systems: methods, pitfalls, examples. In: D.R. Lentz (Editor), Alteration and Alteration Processes Associated with ore-forming systems. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 11, 161-192.
- Lentz, D.R. and Gregoire, C., 1995. Petrology and mass balance constraints on major, trace and rare earth element mobility in porphyry greisen alteration associated with the epizonal True Hill granite, southwestern New Brunswick, Canada. Journal of Geochemical Exploration, 52, 303-331.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. Composition of the earth. Chemical Geology, 120, 223-253.
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma and igneous rock system. Science Reviews, 37, 215-224.
- Pearce, A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984. Trace elements discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock. Journal of Petrology, 25, 956-983.
- Pearce, J.A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulfide exploration. Geological Association of Canada Short Course Notes. 79-113.
- 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, 63-81.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer, Geological Survey of Western Australia, Perth, Australia, 1273.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data, evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, 352.
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits in volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes with the earth. Society of Economic Geologists, Special Publication. 10. 315-345.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. Economic Geology 100th Anniversary. 485-522.
- Sourirajan, S. and Kennedy, G.C., 1962. The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, 260, 115-141.
- Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.X. and Li, G.M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. Ore Geology Reviews, 107, 434-456.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 185-187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55, 229-272.