مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۸، از صفحهٔ ۳ تا ۱۸

انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و بررسی سیال‌های درگیر در رخداد کانه‌زایی مس زاوه، جنوب شرق تربت حیدریه

بهاره بروزی نیت[۱]، آزاده ملکزاده شفارودی[*۲،۱]، محمدرضا حیدریان شهری[۱]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۳۰، نسخه نهایی: ۹۷/۳/۱)

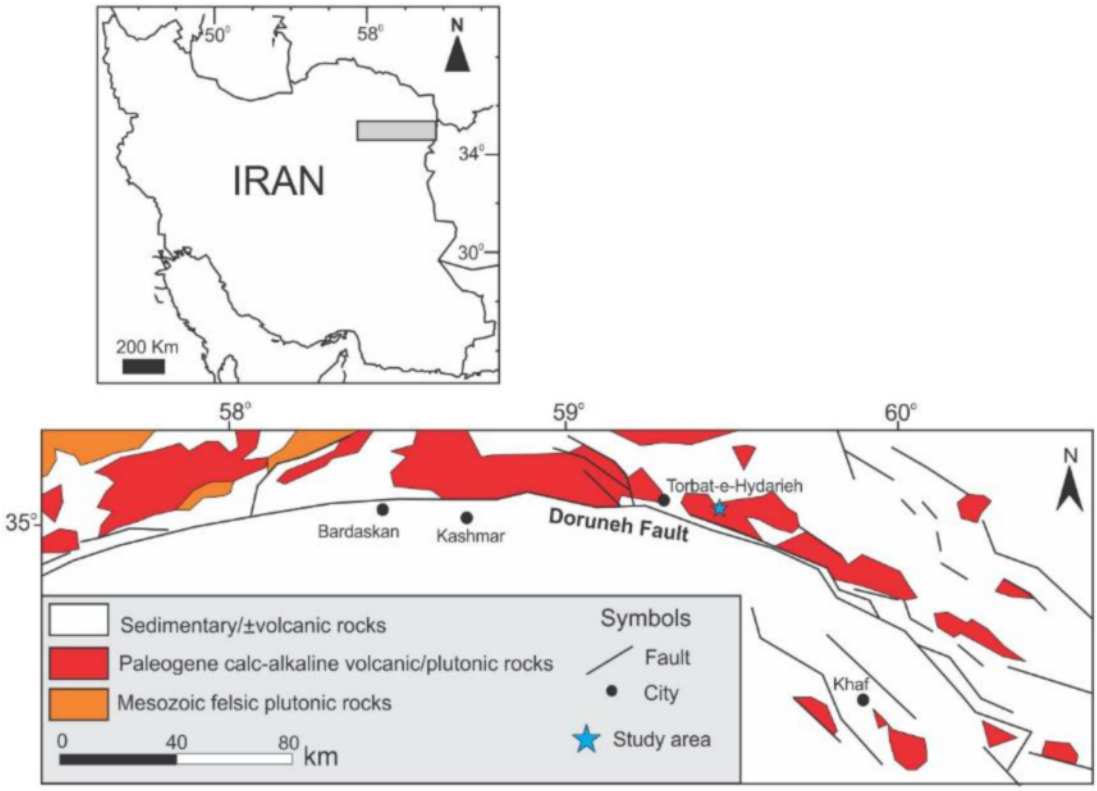
چکیده: کانی‌سازی مس زاوه در جنوب شرقی تربت حیدریه، در استان خراسان رضوی، و در پهنه فلززایی خواف- کاشمر- بردسکن قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه و واحدهای آتشفشانی آندزیتی تا ریوداسیتی ائوسن است. کانی‌سازی کنترل ساختاری داشته و به شکل رگه-رگچه‌ای با امتداد شرقی- غربی در واحد جوش‌سنگ سیلیسی ژوراسیک تشکیل شده‌است. کانی‌های اولیه شامل کالکوپیریت، پیریت و آرسنوپیریت و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کالکوزیت، بورنیت، کوولیت، سولفات‌های مس، واد (هیدروکسید منگنز)، هماتیت، گوتیت، ژاروسیت، لیمونیت و به مقدار کمتر کریزوکلا هستند. مهمترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی، کانی کوارتز است. کانی‌های اولیه اغلب با بافت رگچه‌ای و پراکنده دیده می‌شوند و کانی‌های ثانویه بیشتر دارای بافت رگه-رگچه‌ای و جانشینی ثانویه هستند. دگرسانی غالب همراه با کانی‌سازی رگه‌ای، سیلیسی شدن است. کانی‌سازی دارای بی‌هنجاری مس (با بیشینه ۲/۱ درصد)، آرسنیک (بیش از ۱ درصد)، آنتیموان (حدود ۱۰۵ گرم در تن)، سرب (۴۳۷۱ گرم در تن) و روی (با بیشینه ۱/۱ درصد) است. برپایه بررسی سیال‌های درگیر دوفازی (LV) در کانی کوارتز، کمینه دمای تشکیل کانی‌سازی بین ۳۱۰ تا ۳۸۷ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی شامل نمک‌های $CaCl_2$ و NaCl با درجه شوری بین ۸/۱ تا ۱۵/۸ درصد شکل گرفته‌است. دو سیال هم‌دما اما با شوری متفاوت در تشکیل کانی‌سازی نقش داشته‌اند. محلول کانه‌دار با شوری بین ۱۴ تا ۱۶ درصد که خود برآمده از آمیختگی آب ماگمایی و آب جوی بوده، با سیال دیگری که دارای همین گستره دمایی اما شوری بسیار کمتر (بین ۸ تا ۹ درصد وزنی) است درآمیخته است. این کاهش دما می‌تواند مهمترین عامل ته‌نشست سولفیدها باشد. سنگ میزبان، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن، دمای متوسط و شوری کم محلول کانه‌دار و کانی‌شناسی ساده منطقه زاوه مشابه کانسارهای رگه‌ای گرمابی است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی رگه‌ای گرمابی؛ جوش‌سنگ سیلیسی؛ سیال درگیر؛ زمین‌شیمی؛ زاوه؛ تربت حیدریه.*

مقدمه

منطقه اکتشافی زاوه در شمال شرق ایران، در گستره‌ای بین طول‌های "۲۶ '۲۵ °۵۹ تا "۹ '۲۶ °۵۹ و عرض‌های "۶ '۱۲ °۳۵ تا "۲۱ '۱۳ °۳۵ در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرق تربت حیدریه در استان خراسان رضوی واقع است. از نظر تقسیمات ساختاری، این منطقه در پهنه سبزوار و در بخش تقریبا میانی کمربند خواف-کاشمر- بردسکن (به اختصار KKBB) قرار دارد. این کمربند با گسترش شرقی- غربی و خمیدگی به سوی شمال، در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) جای گرفته و چنانچه تا افغانستان از یک‌سو و تا بیارجمند از سوی دیگر در نظر داشته شود، طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر و پهنای متغیر از ۱۵ تا ۸۰ کیلومتر دارد (شکل ۱). کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاه مافیک

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۵۴۸۸، نمابر: ۰۵۱-۳۸۷۹۶۴۱۶، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir



شکل ۱ موقعیت کمربند ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن در شمال شرقی ایران و نقشه زمین‌شناسی ساده شده آن همراه با موقعیت منطقه زاوه

ترشیری تشکیل شده است. این سنگ‌ها ترکیب داسیتی و آندزیتی دارند و توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت و دیوریت در آنها نفوذ کرده‌اند [۱]. این کمربند ماگمایی پتانسیل خوبی برای اکتشاف انواع ذخایر آهن، مس، طلا، نقره و ذخایر غیرفلزی دارد [۱]. کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن را یکی از پهنه‌های فلززایی مهم برای کانسارهای مس- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) معرفی کرده‌اند. از مهمترین رخدادهای کانه‌زایی KKBB می‌توان به کانی‌سازی مگنتیت - اسپکیولاریت- مس- طلای شهرک [۲]، طلا- مس پورفیری تنورچه [۳]، اسکارن آهن سنگان [۴]، ذخیره IOCG کوه زر تربت حیدریه [۵]، توده مگنتیت دربردارنده طلا در شمال تنورچه [۶]، کانی‌سازی‌های نوع IOCG شمال شرق کاشمر [۷] و ذخایر غیرفلزی مهمی چون کائولن بهاریه، اوچ پلنگ و سرسفیدال اشاره کرد.

منطقه مورد بررسی متعلق به شرکت معین سبزه‌کاران است که تاکنون ۱۰ ترانشه و ۷ گمانه در منطقه حفر کرده است؛ اما متاسفانه گمانه‌ها برای بررسی در اختیار قرار نگرفت. همچنین تعداد بسیار محدودی مقطع نازک از منطقه تهیه شده و تجزیه زمین‌شیمیایی انجام شده بود که موقعیت دقیق آنها مشخص نیست [۸]. برداشت‌های زمین‌فیزیکی به روش قطبش القایی و مقاومت الکتریکی IP/RS نیز توسط علیلو [۹] انجام شده است. هدف از این پژوهش بررسی‌های دقیق کانی‌شناختی و تعیین توالی همبرزایی، بررسی زمین‌شیمیایی رخداد کانه‌زایی و نیز بررسی سیال‌های درگیر به منظور تعیین مدل و چگونگی تشکیل کانسار مس زاوه است که برای نخستین بار انجام شده‌است.

روش بررسی

در راستای اهداف این پژوهش، برداشت اطلاعات صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی منطقه و رگه کانی‌سازی در گستره‌ای به وسعت ۲ کیلومترمربع صورت گرفت. سپس نقشه زمین‌شناسی- کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ در نرم افزار Arc GIS تهیه شد. در مجموع ۹۷ مقطع نازک، ۱۲ مقطع نازک صیقلی و ۹ قطعه صیقلی بررسی شدند. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۱۰ نمونه خرده سنگی سطحی از محل ترانشه‌ها برداشت شد و پس از خردایش و نرمایش، به روش

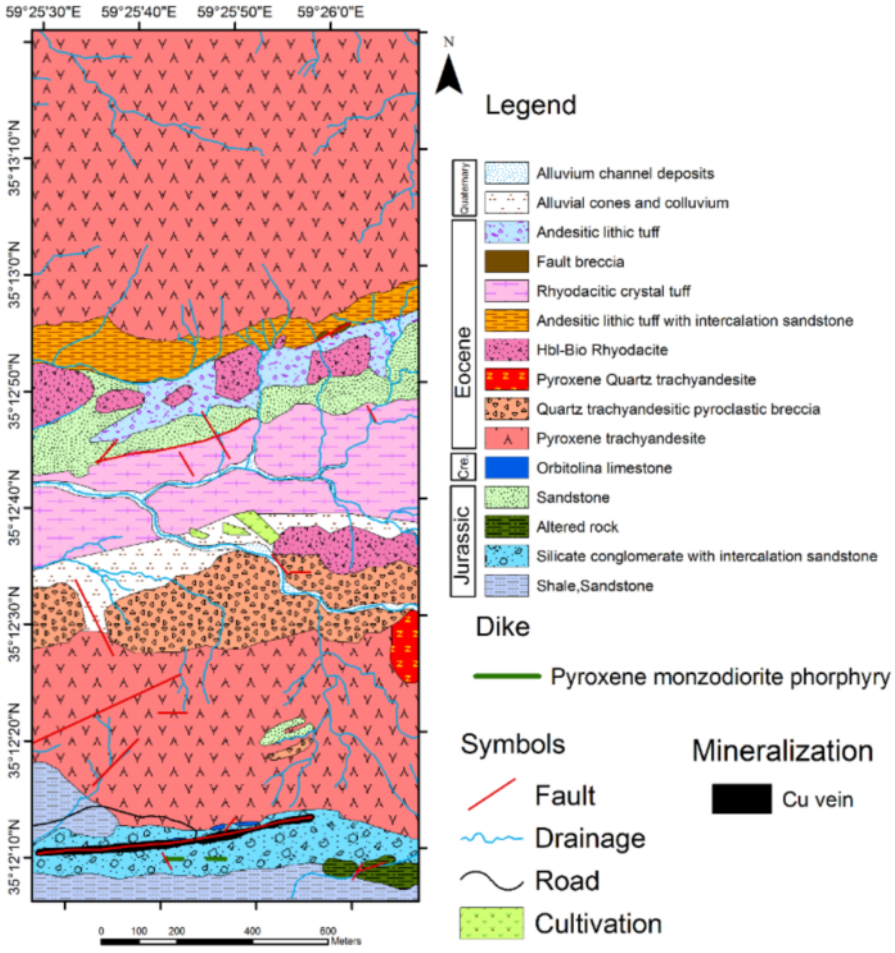
طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) (آماده‌سازی به روش تیزاب سلطانی) برای ۲۶ عنصر و روش عیارسنجی گرمایی (Fire Assay) برای طلا در آزمایشگاه زرآزما تجزیه شدند. سپس نمودارهای همبستگی برای برخی از عناصر در نرم افزار اکسل رسم شد.

سیال‌های درگیر در ۵ مقطع دوبرصیقل بر کانی کوارتز (مهترین کانی باطله همراه با کانه‌ها) به منظور دماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری بررسی شدند. این آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن $\pm 1^{\circ}C$ و گستره دمایی آن بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. مقدار شوری و چگالی در سیستم H_2O-NaCl با استفاده از نرم افزار تعبیه شده در سیستم اکسل HOKIEFLINCS-H_2O-NaCl [۱۰، ۱۱] محاسبه شد. در آخر نمودارهای ستونی مناسب در نرم افزار SPSS رسم و تفسیر شد.

زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در شرق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تربت حیدریه [۱۲] قرار دارد. از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای، این منطقه تحت تاثیر گسل‌های فراوانی قرار گرفته و از نظر زمین‌ساختی بسیار فعال است که مهمترین آنها گسل درونه در جنوب منطقه مورد بررسی است. گسل‌ها و شکستگی‌ها ساختار پیچیده‌ای دارند. درهم‌شدگی و چندگانگی فعالیت‌های زمین‌ساختی در چارچوب پدیده‌هایی چون جنبش‌های چرخشی، برشی و به احتمال زیاد جنبش‌های قائم پهنه‌ها، سبب پیدایش گسل‌های وارونه و عادی، سیستم‌های متقاطع و تغییر شکل‌های ناشی از آن‌ها شده و فرصت‌های مناسب برای نفوذ یا فوران ماگما و گدازه‌های آتشفشانی را فراهم آورده است [۱۲]. بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تربت حیدریه، قدیمی‌ترین واحدهای منطقه، سنگ‌های رسوبی هستند که شامل جوش-سنگ کوارتزیتی خاکستری، شیل، ماسه‌سنگ و لای سنگ به سن ژوراسیک و آهک خاکستری اربیتولین‌دار کرتاسه است. سنگ‌های آذرین این ناحیه شامل واحدهای آتشفشانی آندزیت، پیروکسن‌آندزیت، داسیت و آندزیت داسیتی به سن ائوسن و واحدهای نفوذی گرانیت و گرانودیوریت مربوط به پس از ژوراسیک میانی هستند.

براساس بازدید صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در گستره اکتشافی زاوه به دو دسته سنگ‌های آتشفشانی به سن ائوسن و سنگ‌های رسوبی به سن ژوراسیک و کرتاسه تقسیم می‌گردد. به طور کلی، واحدهای سنگی منطقه دارای روند شرقی- غربی هستند (شکل ۲). سنگ‌های رسوبی سازند شمشک در جنوب گستره مورد بررسی برونزد دارند. این سازند شامل ماسه‌سنگ‌هایی به رنگ خاکستری مایل به سبز و شیل‌های زیتونی رنگ با میان-لایه‌هایی از سنگ آهک ماسه‌ای است. از دیگر واحدهای رسوبی منطقه می‌توان به جوش‌سنگ سیلیسی با میان لایه‌های ماسه-سنگ قرمز، در نزدیکی سازند شمشک اشاره کرد (شکل ۲). جوش‌سنگ سیلیسی به رنگ‌های خاکستری روشن تا تیره و در قسمت‌هایی به رنگ قرمز با جورشدگی متوسط رخنمون دارد. جنس قطعات کوارتز و ابعاد آنها از ۰٫۲ میلی‌متر تا ۶ سانتی‌متر است که در سیمانی از جنس اکسیدآهن، سیلیس و کربنات قرار گرفته‌اند. در جنوب شرقی منطقه، یک واحد سنگی به شدت دگرسان شده به رنگ سیاه دیده می‌شود. این واحد به شدت دچار دگرسانی‌های پروپلیتی و سیلیسی شده است که به همین دلیل نام مشخصی را نمی‌توان برای آن در نظر گرفت. در مرکز منطقه مورد بررسی، ماسه‌سنگ قرمز رنگ با قطعات کوارتز و سیمانی از جنس اکسید آهن دیده شد که از گسترش کمی برخوردار است (شکل ۲). آهک میکریتی اربیتولین‌دار در مرز بین جوش‌سنگ سیلیسی و واحد پیروکسن تراکی‌آندزیت، به سن کرتاسه رخنمون دارد که رگچه‌های کلسیتی، دولومیتی و کربناتی به ضخامت حدود ۱ تا ۳ میلی‌متر در آن دیده می‌شود. مرز مشخصی بین این واحد با جوش‌سنگ سیلیسی و واحد پیروکسن تراکی‌آندزیت وجود دارد (شکل ۳ الف). بخش عمده سنگ‌های منطقه مورد بررسی را، واحدهای آتشفشانی حدواسط تا بازی تشکیل می‌دهند. واحد پیروکسن تراکی‌آندزیت بیشترین گسترش را در منطقه دارد و دارای مکان‌نگاری خشن و ناهموار است (شکل ۳ ب). این واحد دارای بافت پورفیری و گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز و به طور متوسط ۲۰ تا ۲۵ درصد درشت بلور است. درشت بلورها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی و پیروکسن است. این واحد در شمال منطقه دارای شکستگی‌های فراوان بوده که توسط کربنات پرشده است. برش‌های آذرآواری در مرکز منطقه و در مجاورت واحد پیروکسن تراکی‌آندزیت برونزد دارند (شکل ۲).



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی- کانی‌سازی منطقه زاوه.

شکل۳ رخنمون واحدهای سنگی منطقه. الف) نمایی از واحدهای جوش‌سنگ سیلیسی، آهک و پیروکسن تراکی آندزیت. ب) رخنمون واحـدهای پیروکسن تراکی‌آندزیت و توف (دید به سمت شمال). پ) توف ریوداسیتی (نگاه به سمت شمال‌غرب). ت) برش‌های آذرآواری.

این واحد دارای مکان‌نگاری ملایم و هموار است. قطعات آن از بمب‌ها و پهنه‌هایی به اندازه ۰٫۵ تا ۵۰ سانتی‌متر از جنس کوارتز تراکی‌آندزیت تشکیل شده است (شکل ۳ ت). واحد پیروکسن کوارتز تراکی‌آندزیت نیز به صورت بسیار محدود در شرق منطقه رخنمون دارد و دارای بافت پورفیری بسیار ریزدانه است. درشت بلورها عبارتند از: کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپات قلیایی. در بخش میانی منطقه مورد بررسی، واحد هورنبلند بیوتیت ریوداسیت به رنگ روشن در بین توف‌های آندزیتی وجود دارد (شکل ۲). بافت پورفیری درشت دانه با ۲۵ تا ۳۰ درصد درشت بلور در این واحد دیده می‌شود. درشت بلورها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، هورنبلند و بیوتیت است. از ویژگی‌های ماکروسکوپی شاخص این واحد، وجود فلدسپات‌های قلیایی بسیار درشت به رنگ صورتی است که به خوبی با چشم دیده می‌شوند. توف‌های آندزیتی در قسمت مرکزی منطقه به رنگ سبز مشاهده می‌شوند (شکل ۲). گسترش این واحد محدود بوده و از مکان‌نگاری ملایمی برخوردار است. این توف‌ها بسیار دگرسان شده‌اند و دارای بافت آذرآواری با قطعاتی زاویه‌دار از جنس آندزیت به ابعاد ۲ تا ۷ میلی‌متر هستند. توف آندزیتی با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ قرمز رنگ در مجاورت واحد پیروکسن تراکی‌آندزیت به رنگ تیره وجود دارد. در بخش میانی منطقه، توف‌های بلورین ریوداسیتی با بافت آذرآواری به رنگ‌های سفید و خاکستری رخنمون دارند (شکل ۳ پ). بلورها بیشتر از جنس کوارتز، فلدسپات قلیایی و پلاژیوکلاز هستند و از غرب به شرق درشت‌تر می‌شوند. به طور کلی در واحدهای سنگی آتشفشانی پلاژیوکلازها و فلدسپات‌های قلیایی به طور متوسط به سرسیت، و کربنات و پیروکسن‌ها به شدت به کلریت تبدیل شده‌اند. یک دایک پیروکسن مونزودیوریت پورفیری نیز با جهت شرقی- غربی در جوش سنگ سیلیسی نفوذ کرده و دچار دگرسانی پروپلیتی شده است. جوان‌ترین واحدهای سنگی، رسوبات کواترنری هستند که بیشتر در بخش میانی منطقه دیده می‌شوند (شکل ۲).

کانی‌سازی و دگرسانی

کانی‌سازی در منطقه زاوه کنترل گسلی دارد. کانه‌زایی به صورت رگه- رگچه‌ای در واحد جوش سنگ سیلیسی ژوراسیک با روند شرقی- غربی و در امتداد گسل تشکیل شده‌است که از روند گسل درونه پیروی می‌کند (شکل ۴ الف). رگه کانی‌سازی به طول حدود ۹۰۰ متر و عرض ۱٫۵ تا ۲ متر دارای شیب تقریبی ۶۰ تا ۶۵ درجه به سمت شمال است. کانی‌سازی متنوعی در منطقه دیده می‌شود؛ بطوریکه کانی‌های اولیه شامل کالکوپیریت، پیریت و آرسنوپیریت و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کالکوزیت، بورنیت، کوولیت، کات‌کبود (سولفات مس)، واد (هیدروکسید منگنز)، هماتیت، گوتیت، ژاروسیت، لیمونیت و به مقدار کمتر کریزوکلا هستند که با باطله مهم کوارتز همراهی می‌شود. این کانی‌ها در بیشتر بافتهای رگچه‌ای، پراکنده، جانشینی ثانویه و گل‌کلمی دیده می‌شوند. گسترش جانبی اکسیدهای آهن در اطراف رگه کانی‌سازی به ۱۰ متر می‌رسد. بیشترین مقدار کانی‌های سولفیدی در مرکز رگه کانی‌سازی دیده شده است. دگرسانی غالب همراه با کانی‌سازی سیلیسی شدن است که بیشتر به صورت رگچه‌هایی به ضخامت ۰٫۱ تا ۰٫۷ میلی‌متر دیده می‌شوند. در بخش‌هایی از پهنه کانی‌سازی، دگرسانی کربناتی به صورت پراکنده و رگچه‌ای به ضخامت ۰٫۱۵ میلیمتر تشکیل شده‌است. همچنین به طور بسیار محدود دگرسانی پروپلیتی به صورت پراکنده و در متن سنگ میزبان و دگرسانی آرژیلی در مرکز رگه مشاهده شد.

بافت و ساخت

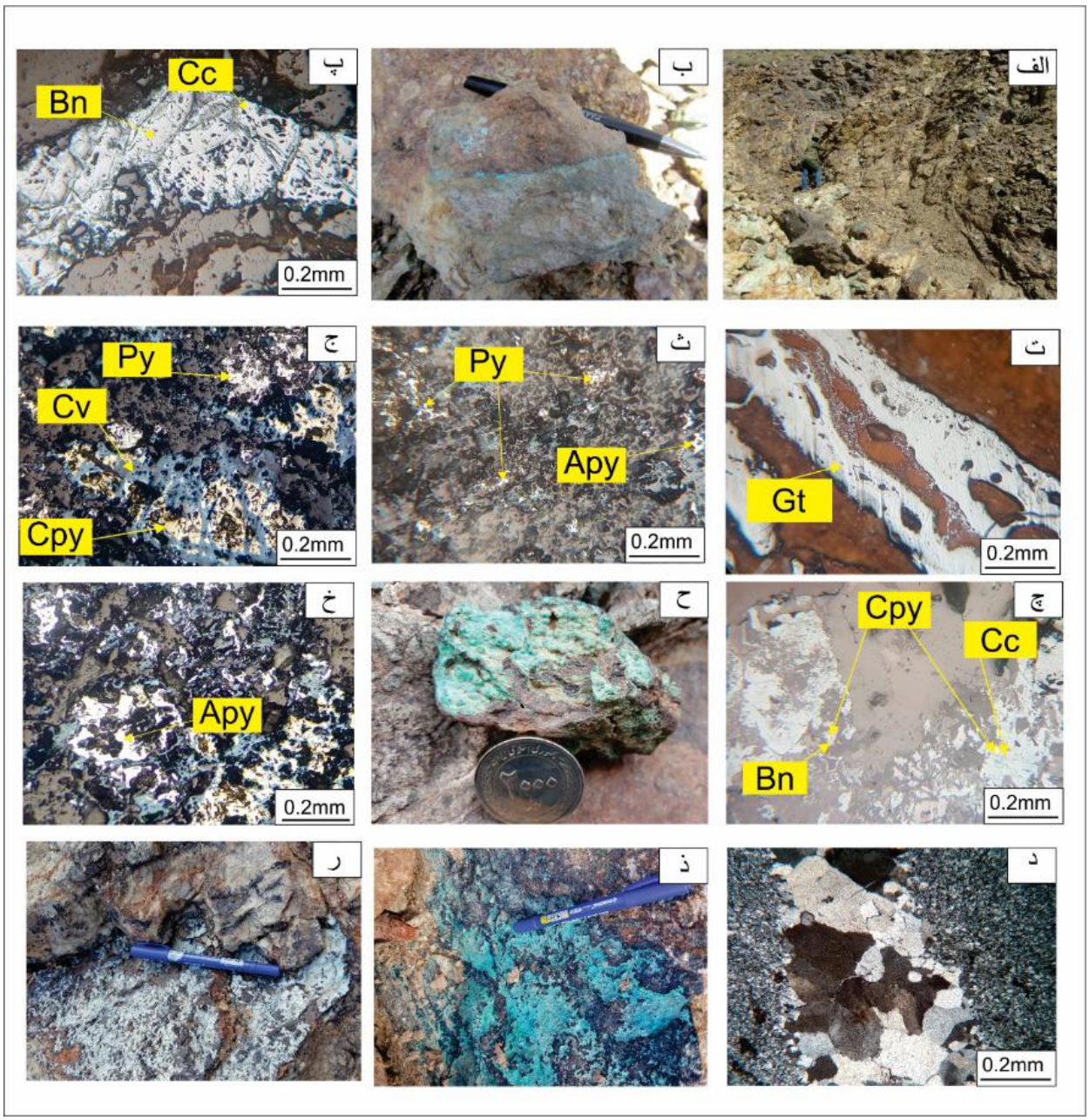
رگچه‌ای: ساخت و بافت رگچه‌ای مهمترین و فراوان‌ترین حالت کانی‌سازی در منطقه زاوه است. رگچه‌ها قطعات و سیمان جوش‌سنگ سیلیسی را قطع کرده‌اند. ضخامت رگچه‌ها از ۰٫۱ تا ۲ میلی‌متر متغیر است. براساس ترکیب کانی‌شناسی اولیه و ثانویه، تعداد ۱۰ رگچه را می‌توان در منطقه تفکیک کرد که عبارتند از: ۱. مالاکیت ± کوارتز، ۲. آزوریت ± مالاکیت، ۳. کریزوکل ± آزوریت، ۴. آرسنوپیریت ± کوارتز، ۵. بورنیت ± کالکوزیت، ۶. گوتیت ± کوارتز، ۷. هماتیت، ۸. گوتیت، ۹. کوارتز و ۱۰. کلسیت. (شکل‌های ۴ ب، پ و ت).

پراکنده: این بافت در طول رگه کانی‌سازی در سنگ میزبان دیده می‌شود، بطوریکه کانی‌سازی در فضاهای خالی بین قطعات و سیمان جوش‌سنگ تشکیل شده است. مالاکیت، آزوریت، پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت در بیشتر این بافت دیده می‌شوند (شکل ۴ ث). مقدار این کانی‌ها به شکل پراکنده حدود ۵ تا ۱۵ درصد حجم سنگ میزبان را تشکیل می‌دهد.

جانشینی ثانویه: این بافت نتیجه تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه است. کانی‌های مالاکیت، آزوریت، کوولیت،

بورنیت، کالکوزیت و کات کبود از جانشینی کالکوپیریت تشکیل شده‌اند، به طوریکه گاهی آثار کمی از کالکوپیریت‌ها در وسط این کانی‌ها به جا مانده‌است (شکل‌های ۴ ج و چ). میزان تبدیل کالکوپیریت‌ها از ۳۰ تا ۱۰۰ در صد متغیر است. پیریت و آرسنوپیریت‌ها نیز به کانی‌های هماتیت و گوتیت تبدیل شده‌اند که میزان تبدیل آن‌ها به ترتیب ۵ تا ۱۰۰ و ۱۰ تا ۱۰۰ درصد است.

بافت گل کلمی: این بافت از فراوانی زیادی برخوردار نیست و در برخی نمونه‌های مالاکیت دیده می‌شود (شکل ۴ ح).



شکل۴ کانی‌سازی منطقه زاوه. الف) رخنمون رگه کانی‌سازی. ب) بافت رگچه‌ای کریزوکلا. پ) بافت رگچه‌ای بورنیت و کالکوزیت. ت) رگچه گوتیت. ث) پیریت و آرسنوپیریت با بافت پراکنده. ج) بافت جانشینی کوولیت و بافت توده‌ای پیریت. چ) بافت جانشینی کالکوزیت و بورنیت. ح) بافت گل کلمی مالاکیت. خ) آرسنوپیریت با بافت توده‌ای و پراکنده د) رگچه سیلیس ذ) رخنمون صحرایی آزوریت. ر) نمایی از کات کبود (مالاکیت = Mlc ، آرسنوپیریت = Apy ، پیریت = Py ، کالکوپیریت = Cpy کالکوزیت = Cc ، بورنیت = Bn ، کوولیت = Cv و گوتیت = Gt، [۱۳]).

کانی‌شناختی

آرسنوپیریت: این کانی فراوان‌ترین کانی سولفیدی در منطقه زاوه است که به صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود. همچنین در برخی قسمت‌ها مقدار آن به قدری افزایش می‌یابد که حالت توده‌ای به خود می‌گیرد. آرسنوپیریت در قالب رگچه آرسنوپیریت ± کوارتز به ضخامت ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر نیز دیده می‌شود. در این رگچه‌ها، سهم این کانی بین ۶۰ تا ۱۰۰ درصد رگچه متغیر است. آرسنوپیریت‌ها بیشتر بی‌شکل تا نیمه‌شکل-دار هستند و مقدار آنها بین ۱۵ تا ۳۵ درصد از حجم کانی‌سازی متغیر است (شکل ۴ خ). مقدار ۱۰ تا ۱۰۰ در صد این کانی در سطح زمین به کانی گوتیت و هماتیت تبدیل شده است.

پیریت: پیریت دومین کانی سولفیدی فراوان منطقه است که به صورت پراکنده در سنگ میزبان دیده می‌شود و گاهی مقدار آن آنقدر افزایش می‌یابد که حالت توده‌ای پیدا می‌کند. پیریت‌ها بیشتر بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار هستند و اندازه آنها از چند میکرون تا ۲ میلی‌متر متغیر است. مقدار پیریت بین حدود ۵ تا ۲۰ درصد حجم کانی‌سازی متغیر است (شکل ۴ ث). مقدار ۵ تا ۱۰۰ در صد این کانی در سطح زمین به کانی گوتیت و هماتیت تبدیل شده است.

کالکوپیریت: کالکوپیریت تنها کانی سولفید مس‌دار اولیه منطقه زاوه است که با بافت پراکنده و اندازه بین ۰/۲ تا ۴ میلی‌متر در واحد جوش‌سنگ سیلیسی دیده می‌شود. کالکوپیریت‌ها بیشتر بی‌شکل هستند و حدود ۵ تا ۱۵ درصد از حجم کانی‌سازی را تشکیل می‌دهند. این کانی اغلب از کناره به کانی‌های کالکوزیت، کوولیت، بورنیت، مالاکیت، آزوریت و کمتر کات کبود تبدیل شده است. میزان تبدیل کالکوپیریت به کالکوزیت بین ۶۰ تا ۱۰۰ درصد، به بورنیت بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد، به کوولیت بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد و به مالاکیت، آزوریت و کات کبود بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد است (شکل ۴ ج)، بطوریکه در بیشتر موارد باقیمانده‌های اندکی از کالکوپیریت در میان کانیهای ثانویه مس‌دار دیده می‌شود.

کالکوزیت و کوولیت: کالکوزیت و کوولیت با بافت جانشینی ثانویه از تبدیل کانی کالکوپیریت به وجود آمده‌اند. آثار کالکوپیریت در برخی موارد در بین کالکوزیت‌ها و کوولیت‌ها به جا مانده است (شکل‌های ۴ ج و چ) مقدار کالکوزیت بین حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد و کوولیت بین ۱۵ تا ۴۰ درصد حجم کانی-سازی متغیر است. کوولیت‌ها بیشتر به شکل پراکنده و کالکوزیت‌ها علاوه بر پراکنده در قالب رگچه نیز دیده می‌شوند. ضخامت رگچه‌های بورنیت ± کالکوزیت بین ۰/۰۲ تا ۰/۵ میلی-متر متغیر بوده و سهم کالکوزیت در رگچه‌ها بین ۱۵ تا ۳۵ درصد است (شکل ۴ چ).

بورنیت: این کانی نیز مانند کالکوزیت و کوولیت در اثر جانشینی و تبدیل کالکوپیریت تشکیل شده‌است (شکل ۴ چ). بورنیت به شکل پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود و مقدار آن حدود ۵ تا ۲۵ درصد است. ضخامت رگچه‌های بورنیت ± کالکوزیت از ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر بوده و سهم بورنیت بین ۷۰ تا ۹۰ درصد رگچه است (شکل ۴ پ).

مالاکیت و آزوریت: مالاکیت و آزوریت فراوان‌ترین کانی‌های ثانویه مس در منطقه هستند که به صورت گل کلمی، پراکنده و رگچه‌ای در سنگ میزبان تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴ ح و ذ). مقدار مالاکیت بین ۲۰ تا ۴۵ درصد و آزوریت بین ۴ تا ۱۵ درصد متغیر است. رگچه‌های مالاکیت ± کوارتز، آزوریت ± مالاکیت و کریزوکل ± آزوریت به ضخامت بین ۰/۱ تا ۲ میلی-متر دیده می‌شوند. این دو کانی برآمده از تبدیل کالکوپیریت هستند و در برخی نمونه‌ها باقیمانده‌هایی از کالکوپیریت در آنها دیده می‌شود.

کریزوکلا و سولفات‌های مس: کریزوکلا و سولفات‌های مس به صورت جزئی در رگه کانی‌سازی زاوه با بافت رگچه‌ای و پراکنده دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ ب و ر). کریزوکلا همراه با رگچه-های آزوریتی و به مقدار ۳ تا ۸ درصد وجود دارد.

اکسیدهای آهن، واد و ژاروسیت: اکسیدهای آهن ثانویه شامل گوتیت، هماتیت و لیمونیت برآمده از تبدیل کانی‌های سولفیدی منطقه هستند. هماتیت به شکل پراکنده و گوتیت به صورت پراکنده و رگچه‌ای نتیجه تبدیل پیریت، آرسنوپیریت و کمتر کالکوپیریت هستند. ضخامت رگچه‌های گوتیت‌دار بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر متغیر است (شکل ۴ ت). میزان فراوانی گوتیت حدود ۱۰ تا ۱۸ درصد و هماتیت و لیمونیت بین ۱۵ تا ۲۰ درصد است. کمتر از ۷ درصد ژاروسیت در پهنه گوسان دیده می‌شود. هیدروکسید منگنز (واد) به فراوانی با بافت شاخه‌ای در سراسر رگه کانی‌سازی وجود دارد.

کوارتز: مهمترین و فراوان‌ترین کانه باطله همراه با کانی‌سازی در منطقه زاوه، کانی کوارتز است که به شکل پراکنده و در قالب رگچه‌های زیر دیده می‌شود: ۱- رگچه‌های کوارتز به

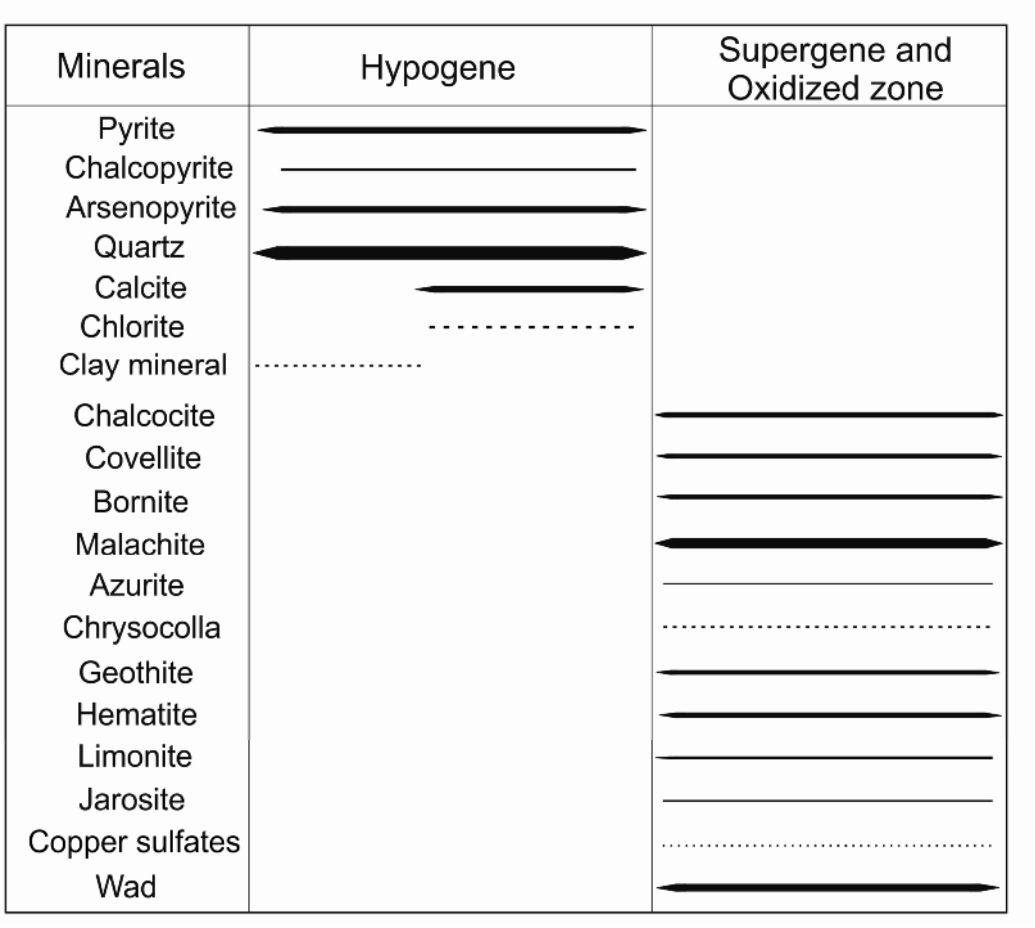
ضخامت حدود ۱ تا ۳ میلی‌متر، ۲- رگچه‌های گوتیت ± کوارتز به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر که مقدار کوارتز بین ۱۰ تا گاهی ۴۵ درصد رگچه متغیر است و ۳- رگچه مالاکیت ± کوارتز به ضخامت ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر که مقدار کوارتز بین ۵ تا گاهی ۶۰ درصد رگچه متغیر است. کوارتزهای ثانویه فراورده محلول کانه‌دار هستند که به واسطه همراه بودن با کانی‌های فلزی اولیه و ثانویه و یا قطع کردن کوارتزهای جوش‌سنگ سیلیسی شناخته می‌شوند (شکل ۴ د).

کلسیت: کلسیت به طور پراکنده و رگچه‌ای همراه با کانی‌سازی وجود دارد، اما نسبت به کانی کوارتز از فراوانی کمتری برخوردار است. ضخامت رگچه‌های کلسیتی از ۰/۱۵ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. مقدار آن در مجموع کمتر از ۵۰ درصد است.

کلریت و کانی‌های رسی: این کانی‌ها به مقدار بسیار اندک و کمتر از ۲۰ درصد همراه با پهنه کانی‌سازی دیده می‌شوند.

توالی همبرزایی

توالی همبرزایی کانسار زاوه به دو بخش پهنه درونزاد و پهنه اکسیده تقسیم می‌شود. در مرحله درونزاد محلول کانه‌دار شامل مس، آهن، آرسنیک و سیلیس از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها به واحد جوش‌سنگ سیلیسی وارد شده و در فضاهای خالی بین قطعات و سیمان و یا داخل شکستگی‌های ایجاد شده موجب تشکیل پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت همراه با کوارتز شده است. وجود مقدار بالای آرسنوپیریت نشاندهنده ماهیت نسبتاً احیایی محلول کانه‌دار است. در مرحله اکسایش، کانی‌سازی در سطح زمین رخنمون پیدا کرده و دچار فرایندهای هوازدگی و اکسایش سطحی شده است. این فرایند موجب تغییر و تبدیل کانی‌های اولیه به کانه‌های ثانویه سولفیدی مس مانند کالکوزیت، کوولیت، بورنیت و همچنین کانه‌های کربناتی و سیلیکاتی مس مانند مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا و کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی مانند هماتیت، ژاروسیت، لیمونیت و گوتیت شده‌است (شکل ۵).



شکل۵ توالی همبرزایی کانی سازی در منطقه اکتشافی زاوه.

زمین‌شیمی

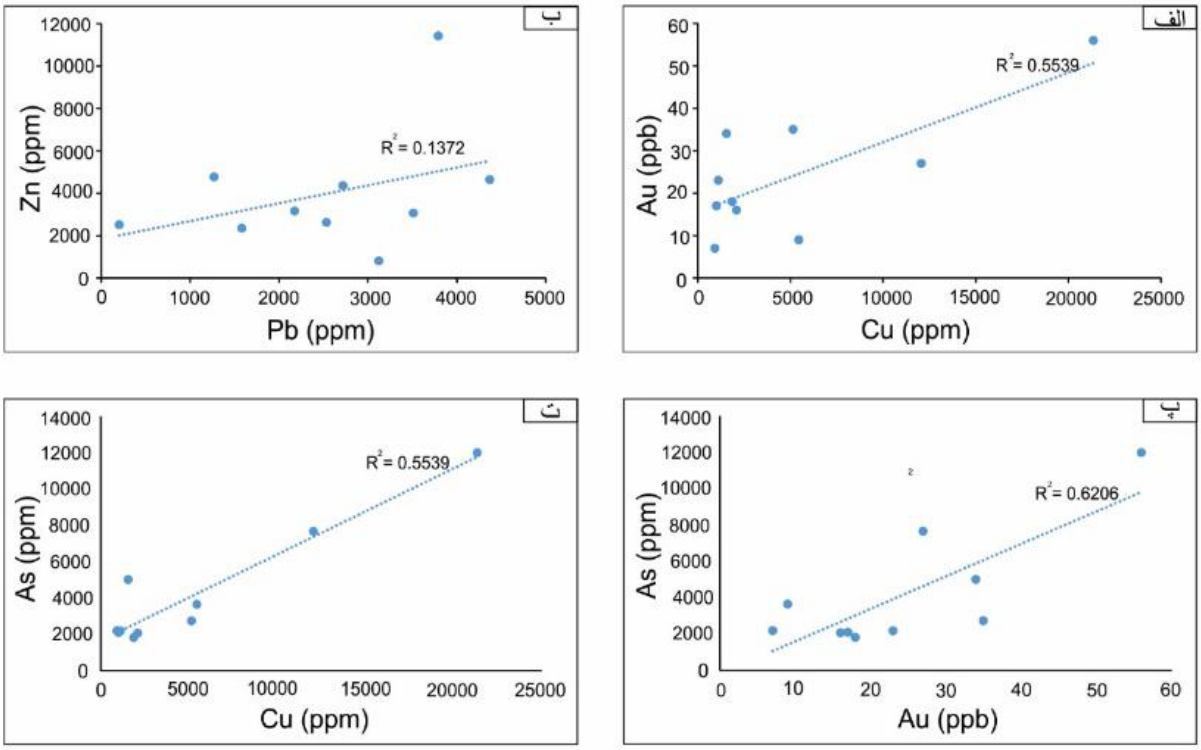
نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمی برداشت شده از محل ترانشه‌ها (عمود بر امتداد رگه کانی‌سازی) را به روش خرده سنگی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار مس از ۹۲۷ تا ۲۱۳۵۴ گرم در تن متغیر است. مقدار مس بالا مربوط به حضور کانی‌های مالاکیت، کوولیت، بورنیت، کالکوزیت، آزوریت، کریزوکلا و کالکوپیریت است و با اضافه شدن مقدار آنها در برخی قسمت‌ها، مقدار مس نیز بالاتر رفته‌است. مقدار طلا در نمونه‌ها بین ۷ تا ۵۶ میلی‌گرم درتن متغیر بوده (جدول ۱) که بسیار پایین است. وجود ۱۸۱۹گرم در تن تا بیش از ۱ درصد عنصر آرسنیک در رگه کانی‌سازی مربوط به وجود کانی آرسنوپیریت است. بیشترین مقدار آرسنیک (بیش از ۱ درصد) با بیشترین فراوانی کانی آرسنوپیریت در مرکز رگه کانی‌سازی رابطه مستقیم دارد. گستره تغییرات سرب و روی به ترتیب ۲۰۴ تا ۴۳۷۱ گرم در تن و ۸۱۵ تا ۱۱۴۱۴ گرم در تن است اما هیچ کانی مشخصی برای این دو عنصر در مقاطع دیده نشد. مقدار نقره ۰٫۸۶ تا ۱۱ گرم در تن است که قابل توجه نیست. مقدار آهن در حدود ۵ تا ۸ درصد متغیر بوده که مربوط به پهنه گوسان است. منگنز بیشینه مقدار به ۲۱۶۸ گرم در تن می‌رسد که با وجو کانی واد در رگه کانی‌سازی ارتباط دارد (جدول ۱). بیشترین مقدار آنتیموان در مرکز رگه کانی‌سازی (۱۰۵ گرم در تن) و کمترین مقدار آن (حدود ۳ گرم در تن) در دو طرف رگه است. به منظور تحلیل و بررسی داده‌های زمین‌شیمی، نمودارهای همبستگی عناصر مس- طلا، طلا- آرسنیک، سرب- روی و مس-آرسنیک رسم شد. براساس این نمودارها، با افزایش مس، مقدار طلا نیز افزایش می‌یابد. عناصر مس و طلا همبستگی متوسطی ($R^2 = 0.55$) نشان می‌دهند (شکل ۶ الف). سرب و روی از همبستگی ضعیفی برخوردار هستند ($R^2 = 0.13$) (شکل ۶ ب). همبستگی عناصر طلا و آرسنیک قابل توجه است ($R^2 = 0.62$) (شکل ۶ پ). این همبستگی مربوط به همراهی نزدیک آرسنوپیریت با کانی‌های مس‌دار اولیه و ثانویه در رگه منطقه زاوه است. بیشترین همبستگی ($R^2 = 0.89$) مربوط به عناصر مس و آرسنیک بوده که روند افزایشی هردو عنصر در نمودار قابل توجه است (شکل ۶ ت). اگرچه مقدار طلا در منطقه کم است، اما احتمال دارد که همان مقدار طلا نیز بیشتر در ساختار کانی آرسنوپیریت باشد.

بررسی سیال‌های درگیر

در کانسار مس زاوه، کانی‌سازی فلزی همراه با کانی باطله کوارتز در رگچه‌ها تشکیل شده‌است، اما از آنجا که سنگ میزبان کانی‌سازی یک جوش‌سنگ سیلیسی با قطعاتی از کوارتزهای مختلف است، انتخاب کوارتز مناسب برای بررسی سیال‌های درگیر نیازمند بررسی‌های دقیق همبرزایی و دقت بسیار است. پس از بررسی‌های لازم، مطالعه سیال‌های درگیر برای ۵ مقطع دوبرصیقل از کوارتزهای وابسته به محلول کانه‌دار انجام شد. در نهایت تعداد ۶۶ سیال درگیر برای تعیین دماسنجی به روش گرمایش و تعداد ۱۸ عدد از آنها برای تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری به روش سرمایش بررسی شدند. از آنجا که اندازه سیال‌های درگیر بسیار ریز بود، آزمایش سرمایش برای همه آنها مقدور نبود.

جدول۱ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی خرده‌سنگی منطقه زاوه (طلا به روش عیارسنجی گرمایی و بقیه به روش ICP-OES).

نمونه ها	Pb	Sb	Zn	Ag	As	Cu	Fe	Mn	Au
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
ZaCh-1	۲۷۲۰	۳	۴۳۶۳	۱٫۱	۲۰۹۷	۱۰۱۲	۸۳۱۶۸	۷۰۰	۱۷
ZaCh-2	۱۲۷۰	۲۱	۴۷۷۲	۱٫۰۵	۱۸۱۹	۱۸۶۱	۵۰۱۳۵	۱۲۱۴	۱۸
ZaCh-3	۴۳۷۱	۳	۴۶۴۴	۳٫۸	۵۰۱۲	۱۵۵۶	۵۰۸۷۷	۵۵۵	۳۴
ZaCh-4	۳۷۹۱	۲۶	۱۱۴۱۴	۹	۲۷۳۹	۵۱۴۲	۷۷۹۴۰	۱۱۸۷	۳۵
ZaCh-5	۲۰۴	۷۲	۲۵۱۷	۳٫۵	۷۶۶۵	۱۲۰۶۳	۷۳۴۲۳	۱۷۷۸	۲۷
ZaCh-6	۱۵۸۲	۳	۲۳۴۷	۲٫۴	۳۶۵۰	۵۴۵۲	۶۱۴۵۹	۲۱۶۸	۹
ZaCh-7	۲۵۳۴	۱۰۵	۲۶۲۲	۱۱	>۱%	۲۱۳۵۴	۶۸۱۴۷	۱۰۴۰	۵۶
ZaCh-8	۳۱۲۴	۳	۸۱۵	۱٫۵	۲۱۹۱	۹۲۷	۶۴۵۴۶	۴۰۴	۷
ZaCh-9	۲۱۷۷	۳	۳۱۶۴	۰٫۸۶	۲۰۷۰	۲۰۹۴	۶۰۳۵۸	۱۸۱۰	۱۶
ZaCh-10	۳۵۱۱	۳	۳۰۶۳	۱٫۶	۲۱۸۴	۱۱۱۲	۶۲۵۶۵	۷۱۰	۲۳

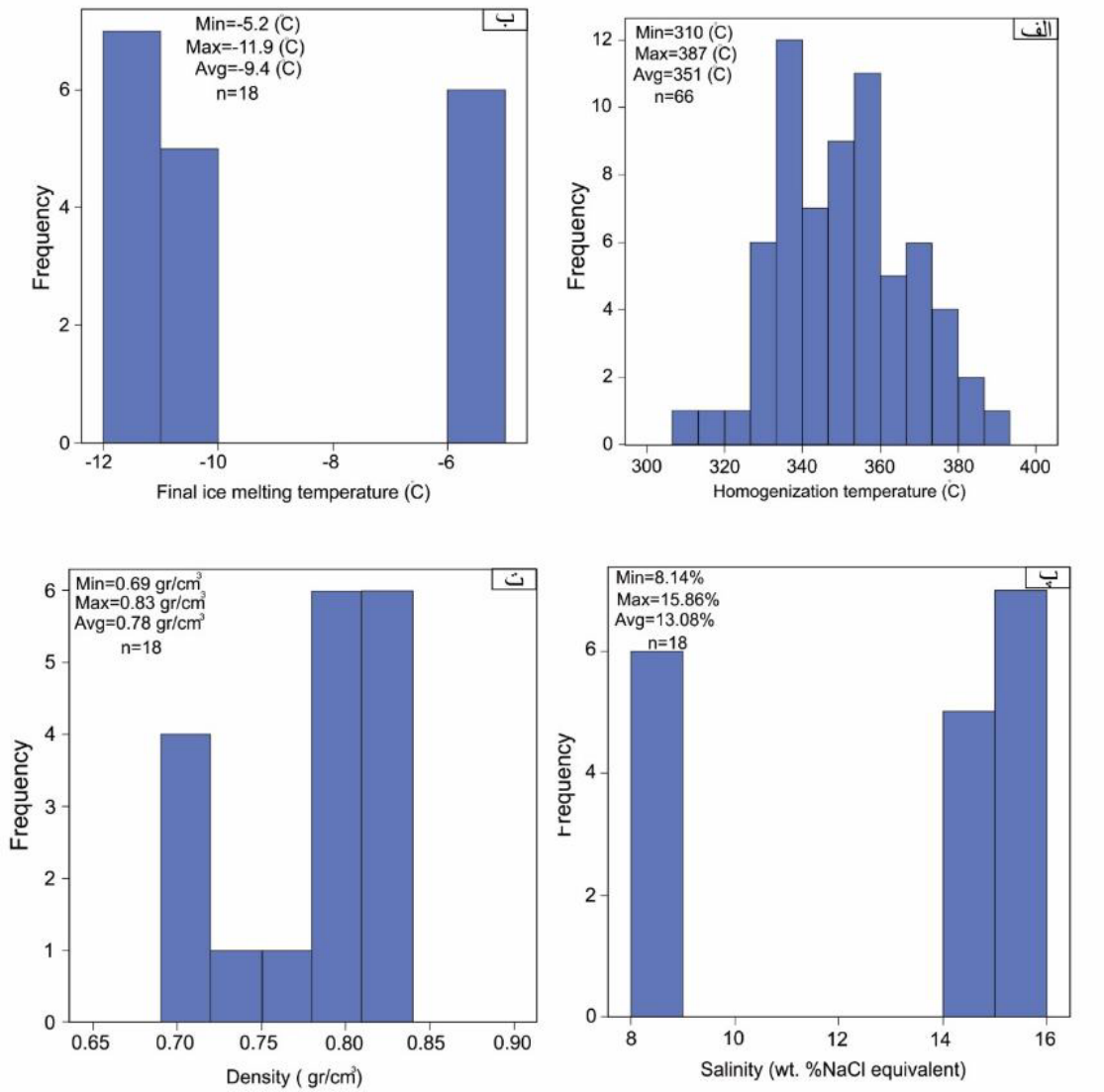


شکل۶ نمودارهای همبستگی زمین‌شیمیایی. الف) نمودار همبستگی مس و طلا. ب) نمودار همبستگی سرب و روی. پ) نمودار همبستگی طـلا و آرسنیک. ت) نمودار همبستگی مس و آرسنیک.

براساس بررسی‌های انجام شده، بیشتر سیال‌های درگیر در نمونه‌ها بی‌شکل، مدور و به مقدار کمتر میله‌ای و استوانه‌ای هستند. اندازه سیال‌های درگیر بررسی شده حدود ۵ تا ۱۰ میکرون است، اما بیشتر آن‌ها از ۶ میکرون کوچکتر هستند. بر اساس تقسیم‌بندی‌های متداول [۱۴، ۱۵]، این سیال‌ها از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) هستند. دمای همگن‌شدگی (T_h) سیال‌های درگیر بین ۳۱۰ تا ۳۸۷ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۳۵۱ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) در این سیال‌ها نیز درگستره ۵۵٫۷- و ۵۷٫۱- درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد [۱۵]. براساس T_{fm} بدست آمده، نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در این سیال‌ها وجود دارند. دمای نهایی ذوب (T_m) بین ۵٫۲- و ۱۱٫۹- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۹٫۴- درجه سانتی‌گراد است. براساس سیستم H_2O- NaCl [۱۰، ۱۱]، مقدار شوری بین ۸٫۱ و ۱۵٫۸ درصد با میانگین ۱۳٫۰۸ درصد است. مقدار چگالی سیال‌های درگیر برپایه سیستم H_2O- NaCl [۱۰، ۱۱]، بین ۰٫۶۹۸ و ۰٫۸۳ گرم بر سانتی-متر مکعب با میانگین ۰٫۷۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (جدول ۲، شکل ۷).

جدول۲ نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر نوع LV در کانی کوارتز در منطقه زاوه

شماره نمونه	تعداد	T_h (°C)	T_m(°C)	شوری wt.% equiv.	چگالی (gr/cm^3)
Za50	۹	۳۱۰ تا ۳۶۶	۵٫۲- تا ۵٫۸-	۸٫۱۴ تا ۸٫۹۵	۰٫۶۹۸ تا ۰٫۷۹۳
Za37	۸	۳۳۱ تا ۳۷۹	-	-	-
Za51	۱۵	۳۳۹ تا ۳۸۲	۱۱٫۹- تا ۱۱-	۱۴٫۹۷ تا ۱۵٫۸۶	۰٫۷۶۸ تا ۰٫۸۰۹
Za7	۱۸	۳۲۱ تا ۳۶۸	-	-	-
Za24	۱۴	۳۲۹ تا ۳۸۷	۱۱٫۷- تا ۱۰٫۸-	۱۴٫۷۷ تا ۱۵٫۶۷	۰٫۸۳۳ تا ۰٫۸۱۵



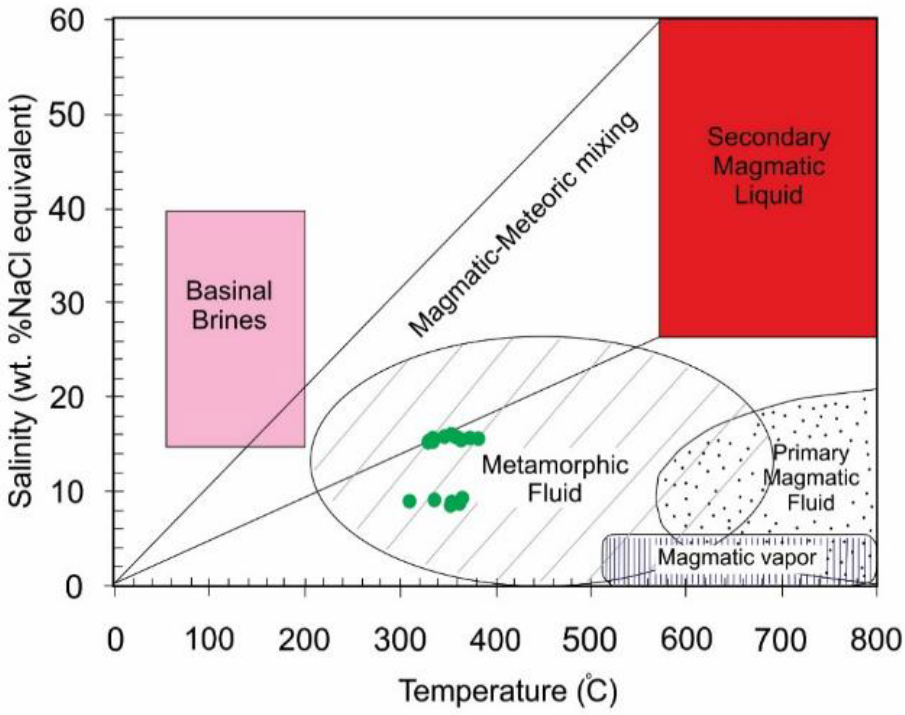
شکل۷ نمودارهای ستونی مربوط به تجزیه سیال‌های درگیر منطقه زاوه. الف) نمودار ستونی دمای همگن شدگی. ب) نمودار ستونی آخرین دمای ذوب یخ. پ) نمودار ستونی مقدار شوری. ت) نمودار ستونی مقدار چگالی.

بحث و برداشت

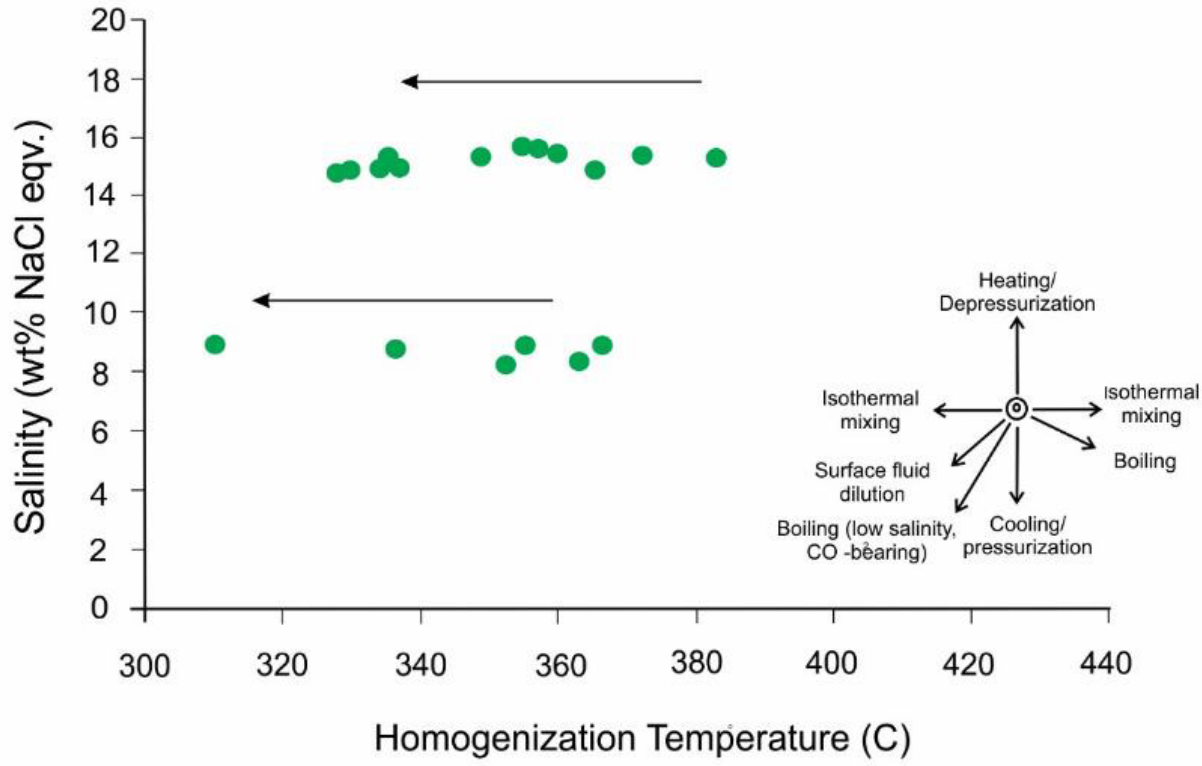
رخداد کانه‌زایی مس زاوه یک کانی‌سازی رگه‌ای با کنترل ساختاری است که در جوش‌سنگ سیلیسی ژوراسیک تشکیل شده‌است. فضای برشی شده پهنه گسلی و خلل و فرج سنگ میزبان، محل مناسبی برای راه‌یابی محلول به سمت بالا و ته‌نشست کانی‌ها را فراهم نموده و آرسنوپیریت، پیریت و کالکوپیریت همراه با کانی باطله کوارتز و کمتر کلریت، کلسیت و کانی رسی را برجای گذاشته است. فرآیند اکسایش و هوازدگی سطحی بعدی نیز کانی‌های ثانویه مس و اکسیدهای آهن را تشکیل داده‌است.

برپایه بررسی سیال‌های درگیر، دمای تشکیل کانی‌سازی بین ۳۱۰ تا ۳۸۷ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی شامل نمک‌های $CaCl_2$ و NaCl با درجه شوری بین ۸٫۱ تا ۱۵٫۸ درصد به وجود آمده‌است. معمولاً برای بدست آوردن دمای واقعی تشکیل کانسار، فشار ستون چینه‌ای که در آن زمان بر کانی‌سازی وارد بوده لازم است و باید بر دمای همگن‌شدگی بدست آمده، تصحیح فشار صورت گیرد. آثار پدیده جوشش در سیال‌های درگیر منطقه زاوه دیده نشد و از آنجا که اطلاعات لازم برای تصحیح فشار در منطقه مقدور نبود، لذا دمای بدست آمده کمترین دمای تشکیل کانی‌سازی محسوب می‌شود. دمای متوسط و شوری کم محلول کانه‌دار، کنترل ساختاری کانی-

سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن و کانی‌شناسی ساده منطقه زاوه بیانگر یک کانی‌سازی مس، آرسنیک، سرب و روی رگه‌ای گرمابی است. نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی و محیط آب‌های مختلف (شکل ۸) [۱۶] نشان می‌دهد که بخشی از سیال‌های درگیر منطقه زاوه در محیط آب‌های دگرگونی و بخشی در مرز گستره آمیختگی آب ماگمایی و آب جوی قرار گرفته‌اند (شکل ۸). روشن است که از آنجا که آثار دگرگونی ناحیه‌ای در این گستره وجود ندارد، لذا دخالت آب دگرگونی در حمل همبافت فلزات منتفی است. بنابراین بهترین گزینه محلول کانه‌دار، آمیزه آب ماگمایی و آب جوی درنظر گرفته می‌شود. در این فرآیند، عناصر فلزی ماگمای مادر توسط محلول ماگمایی با دما و شوری بالا حمل شده و به دلیل دمای بالای توده نفوذی به طرف بالا حرکت می‌کنند. آب‌های جوی با دما و شوری پایین از فضای درز و شکستگی‌ها و گسل‌ها به عمق راه پیدا کرده و با محلول ماگمایی آمیختگی می‌شوند و فرآیند همرفتی- مخلوط‌شدگی سیال بین توده نفوذی در عمق (به عنوان موتور گرمایی) و اعماق کمتر ایجاد می‌شود. سرانجام بر اثر عواملی چون کاهش دما، افزایش pH و غیره، کانی‌سازی در فضای مناسب مانند پهنه‌های گسلی برجای گذاشته می‌شود. در منطقه زاوه آثاری از توده نفوذی دیده نشده‌است و تنها رخنمون کوچکی از دایک‌های مونزودیوریتی در نزدیکی رگه وجود دارد که دچار دگرسانی پروپلیتی شده‌اند و کانی‌سازی در آنها دیده نمی‌شود. اما وجود این دایک مونزودیورتی و نیز توده‌های گرانودیوریتی که در خارج از منطقه مورد بررسی پراکنده‌اند، نشان می‌دهد که فعالیت ماگمایی و وجود توده‌های عمیق و نیمه‌عمیق در عمق که خاستگاه کانی‌سازی بوده‌اند، دور از انتظار نیست. اما آنچه در شکل ۸ مورد توجه است، دو دسته شدن سیال‌های درگیر و روند خط مستقیم آنهاست. بررسی سیال‌های درگیر منطقه زاوه نشان می‌دهد که دو سیال هم‌دما اما با شوری متفاوت (شوری بین ۱۴ تا ۱۶ درصد وزنی و ۸ تا ۹ درصد وزنی) در تشکیل کانی‌سازی نقش داشته‌اند. این امر در شکل ۹ آشکارا دیده می‌شود و روند آمیختگی دو سیال هم‌دما را تایید می‌کند. در آخر می‌توان چنین تفسیر کرد که محلول کانه‌دار با دمای بین ۳۱۰ تا ۳۸۷ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۱۴ تا ۱۶ درصد که خود نتیجه آمیختگی محلول ماگمایی گرم و شور با آب جوی سرد و دارای شوری کمتر بوده، با سیال دیگری با همین گستره دمایی اما شوری بسیار کمتر (بین ۸ تا ۹ درصد وزنی) آمیخته شده است و کاهش دما می‌تواند مهمترین عامل تشکیل کانی‌سازی باشد (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۸ نمودار مقدار شوری نسبت به دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر منطقه زاوه (محیط‌های تعریف شده برگرفته از مرجع [۱۶])



شکل ۹ نمودار شوری- دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر منطقه زاوه. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما- شوری برگرفته از مرجع [۱۵].

همچنین گزارش شده است [۱۷، ۱۸] که همبافت‌های بی-سولفیدی در کانسارهایی که در دماهای پائین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند، غالب هستند، در حالیکه در ذخایری که در دماهای بالاتر از تقریباً ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرند، همبافت‌های کلریدی غلبه دارند. دمای تشکیل رخداد کانه‌زایی زاوه نشاندهنده حمل عناصر در قالب همبافت-های کلریدی است و کاهش دما و غلظت HCl، می‌توانند با هم دو عامل مهم تشکیل کانی‌سازی و ته‌نشست سولفیدها باشند.

در جدول ۳ ویژگی‌های سنگ میزبان، کانی‌شناسی، دگرسانی، دمای تشکیل و نوع کانی‌سازی منطقه زاوه با برخی کانسارهای مشابه از نقاط مختلف ایران مانند کالچویه اصفهان [۱۹]، گلوجه زنجان [۲۰]، حاتم آباد قاین [۲۱] و شوراب فردوس [۲۲] مقایسه شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه زاوه تا حدی مشابه کانی‌سازی مس رگه‌ای در منطقه حاتم آباد قاین (استان خراسان جنوبی) بوده و متفاوت از بقیه کانسارهاست، زیرا بیشتر ذخایر رگه‌ای و فراگرمایی مس‌دار در سنگ میزبان آتشفشانی دیده می‌شوند. مقایسه کانی‌شناسی اولیه نشان می‌دهد که مگنتیت در رخداد کانه‌زایی زاوه (برخلاف کالچویه و گلوجه) وجود ندارد و نسبت به کانسار شوراب از کانی‌شناسی ساده‌تری برخوردار است. همچنین اسفالریت و گالن باوجود ناهنجاری قابل توجه سرب و روی دیده نشده است که می‌تواند در نتیجه اکسایش سطحی آنها باشد. حضور کانی آرسنوپیریت و ناهنجاری بالای آرسنیک منطقه زاوه نیز آن را از منطقه حاتم آباد قاین متمایز می‌کند. دگرسانی کانسارهای رگه‌ای با تفاوت‌های جزیی معمولاً مشابه است. اما مقایسه دمای تشکیل کانی‌سازی مس زاوه با دیگر کانسارهای نسبتاً مشابه بیانگر دمای بالاتر تشکیل آن است (جدول ۳). این امر ارتباط نزدیکتر منطقه زاوه با فعالیت‌های ماگمایی در عمق را نشان می‌دهد و می‌توان آن را یک کانی-سازی ماگمایی- گرمابی دانست.

جدول۳ مقایسه کانسار مس زاوه با برخی کانسارهای رگه‌ای مس‌دار در بخش‌های مختلف ایران.

نام کانسار	مس-طلا کالچویه (اصفهان)	مس- طلا گلوجه (زنجان)	مس حاتم آباد (قاین)	سرب- روی، مس و آنتیموان گله‌چاه-شوراب (فردوس)	مس زاوه (تربت حیدریه)
سنگ میزبان	آذرآواری و آتشفشانی	داسیت، ریوداسیت تا لاتیت	آندزیت و جوش‌سنگ	در مرز داسیت و شیل و ماسه سنگ	جوش‌سنگ
کانی‌شناسی	مگنتیت، گالن، کالکوپیریت	مگنتیت، گالن، کالکوپیریت، بورنیت، دیژنیت	پیریت، کالکوپیریت	گالن، کالکوپیریت، اسفالریت، پیریت، تتراهیدریت، استیبنیت، آرسنوپیریت، دیژنیت	کالکوپیریت، پیریت، آرسنوپیریت
دگرسانی	پروپلیتیک، سیلیسی، آرژیلی	سیلیسی، سرسیتی، آرژیلی، کلریتی	سیلیسی، کربناتی	سیلیسی، سرسیتی	سیلیسی، کمتر پروپلیتی و آرژیلی
دمای تشکیل	۱۸۰ تا ۳۲۰ درجه سانتیگراد	۱۴۰ تا ۳۲۰ درجه سانتیگراد	-	۱۴۰ تا ۳۴۰ درجه سانتیگراد	۳۱۰ تا ۳۸۷ درجه سانتیگراد
نوع کانی‌سازی	فراگرمایی کم سولفید	فراگرمایی تا معتدل	فراگرمایی	گرمابی- رگه‌ای	رگه‌ای گرمابی
مرجع	[۱۹]	[۲۰]	[۲۱]	[۲۲]	همین مقاله

ویژگی‌های رخداد کانه‌زایی مس زاوه یکی دیگر از پتانسیل‌های معدنی کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف- کاشمر- بردسکن را نشان می‌دهد که در کنار معادن، مناطق اکتشافی و رخدادهای متعدد مس، طلا، آهن، نقره و غیره که در این پهنه فلززایی در شمال شرقی ایران وجود دارد، بر اهمیت اکتشافی آن می‌افزاید. شناخت هرچه بیشتر این نوع ذخایر از نظر چگونگی تشکیل و خاستگاه عناصر و محلول کانه‌دار و ارتباط آن با توده‌های نفوذی و ساختارهای زمین‌شناسی، گام مثبتی در جهت اکتشاف بهتر آنها در شرق ایران است که می‌تواند در آینده باعث رونق اقتصادی منطقه شود.

قدردانی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۴۱۰۸۲ مورخ ۱۳۹۵/۴/۱ انجام شده‌است. از شرکت معین سبزه‌کاران به دلیل در اختیار قرار دادن گزارش‌ها و نیز دوستان عزیزی که در اجرای عملیات صحرایی کمک نمودند، متشکریم.

مراجع

[1] Karimpour M.H., Saadat S., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Exploration of Cu-Au Iron Oxide and Magnetite Ore Deposits in the Volcanic-Plutonic Khaf-Kashmar-Bardsank Belt*", 21th

National Geosciences conference, Tehran (2003) (In Persian).

[2] Yousefi L., Karimpour M.H., Haidarian Shahri M.R., "*Geology, mineralogy, fluid inclusion thermometry and ground magnetic of Shahrak Magnetite-Specularite Cu-Au prospecting area, Torbat-e-Heydariyeh, Iran*" ,Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 505-516.

[3] Karimpour M.H., Saadat S., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Geochemistry, petrology and mineralization of Tanurjeh Au-Cu porphyry*", Journal of Science (University of Tehran) 33 (2005) 173-185(In Persian).

[4] Golmohammadi A., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S.A., " *Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran"*, Ore Geology Reviews 65 (2015) 545–563.

[5] Mazloumi A.R., Karimpour M.H., Rassa I., Rahimi B., Vosoughi Abedini M., "*Kuh-E-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh «New Model of Gold Mineralization»*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 363-376 (In Persian).

[6] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite and Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 14 (2006) 3-26 (In Persian).

[7] Almasi A., Karimpour M.H., Ebrahimi Nasrabadi Kh., Rahimi B., KlÖtzli U., Francisco Santos J.,"*Geology, mineralization, U-Pb dating and Sr-Nd isotope geochemistry of intrusive bodies in northeast of Kashmar*", Journal of Economic Geology 7 (2015) 69-90 (In Persian).

[8] Roshanravan j., "*End of exploration Report of Zaveh Copper Deposit*", Moein Sabzehkaran Co., Organization of Industries and Mines of Khorasan Razavi Province (2014).

[9] Kazem Alilo S., "*Geophysical Operations Report of Zaveh Copper Deposit*", Moein Sabzehkaran Co., Organization of Industries and Mines of Khorasan Razavi Province (2014).

[10] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "*A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance*", Geochim Cosmochim Acta 92 (2012) 14-22.

[11] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., "*HOKIEFLINCS-H_2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H_2O–NaCl*", Computer in Geosciences 49 (2012) 334–337.

[12] Kholghi Khasraghi M.H., "*Geological Map of the Torbat-e-Heydarieh*", Scale 1:100000, Geological Survey of Iran (1996).

[13] Whitney D.L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist 95 (2010) 185–187.

[14] Roedder. E., "*Fluid inclusions"*, Reviews in Mineralogy 12 (1984) 644.

[15] Sheppherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M., "*A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies"*, Blackie and Son (1985) 239.

[16] Beane R.E., "*The Magmatic–Meteoric Transition. Geothermal Resources Council*", Special Report 13 (1983) 245–253.

[17] Seward T.M., "*Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal solutions, Geochim*", cosmochim, Acta 37 (1973) 379-399.

[18] Seward T.M., "*The hydrothermal geochemistry of gold, in: Foster, R.P. (ed.), gold metallogeny and exploration"*, Blakie and Sons Ltd. (1991) 432 .

[19] Mehvary R., Shamsipour R., Noghreyan M., Makizadeh M.A., "*Mineralogy and fluid inclusion studies in kalchoye Copper- gold deposit, East of Esfahan*", Journal of Economic Geology 1 (2009) 47-55 (In Persian).

[20] Mehrabi B., Tale Fazel E., Ghasemi-siani M., Eghbali M.A., "*Genesis of Golujeh Cu-Ag Vein Mineralization (N. Zanjan): Mineralogy, Geochemistry and Fluid Inclusion Evidences*",

Journal of Science.University of Tehran 35 (2010) 185-199 (In Persian).

[21] Ramezani Abbakhsh T., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., "*Geology, mineralization, geochemistry, and petrology of monzodioritc dikes in Hatamabad copper occurrence, northeast of Qaen*", Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2018) 409-422 (In Persian).

[22] Mehrabi B., Tale Fazel E., Nokhbatolfoghahai A., "*Disseminated, veinlet and vein Pb-Zn, Cu and Sb polymetallic mineralization in the GaleChah-Shurab mining district, Iranian East Magmatic Assemblage (IEMA)*", Journal of Economic Geology 3 (2011) 61-77 (In Persian).