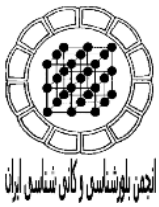
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۹۹، از صفحهٔ ۸۸۳ تا ۸۹۴



زمین‌شناسی، کانی‌سازی، زمین شیمی و بررسی سیال های درگیر در منطقه اکتشافی مس مشکان، شمال‌شرق سبزوار

محبوبه مرادی ناوخ[۱]، آزاده ملکزاده شفارودی[۲*]، مریم جاویدی مقدم[۱]

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

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

(دریافت مقاله: ۹۸/۹/۲۲، نسخه نهایی: ۹۸/۱۲/۲۴)

چکیده: منطقه اکتشافی مس مشکان در شمال‌شرق سبزوار و در جنوب کمربند ماگمایی قوچان-سبزوار واقع است. زمین‌شناسی منطقه شامل واحد آتشفشانی (هورنبلند آندزیت) و واحدهای رسوبی (کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک، شیل و آهک ماسه‌ای) به سن ائوسن است. کانی‌سازی رگه‌ای مس بیشتر با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب در واحدهای رسوبی ایجاد شده است. کانی‌های اولیه شامل کوارتز، باریت، پیریت، کالکوسیت و بورنیت هستند که در اثر اکسایش به کانی‌های مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت، گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند. بیشترین بی‌هنجاری‌های زمین شیمی در رگه‌ها برای مس ۴٫۶ درصد (با میانگین ۲٫۱ درصد)، آرسنیک ۱۰۰ گرم در تن (با میانگین ۵۵٫۱ گرم در تن) و آنتیموان ۶۵ گرم در تن (با میانگین ۲۸٫۶ گرم در تن) است. بر پایه بررسی سیال‌های درگیر دو فازی در کانی کوارتز و باریت، کمینه دمای تشکیل کانی‌سازی ۱۷۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و درجه شوری بین ۱۰٫۷ تا ۱۵٫۲ درصد وزنی است. کاهش دما و رقیق شدگی توسط آب‌های جوی می‌توانند مهمترین عوامل ته‌نشست سولفیدها باشند. کنترل ساختاری کانی‌سازی، دگرسانی محدود به کناره رگه، دما و شوری کم محلول کانه‌دار و کانی‌شناسی ساده ذخیره، مشابه کانسارهای رگه‌ای فراگرمایی است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی؛ زمین شیمی؛ سیال‌های درگیر؛ مشکان؛ سبزوار؛ خراسان رضوی.*

مقدمه

منطقه اکتشافی مس مشکان در استان خراسان رضوی و در فاصله ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان سبزوار (شمال سلطان آباد و شمال غرب روستای مشکان) بین طول‌های ″۵۵ '۶ °۵۸ تا ″۴۰ '۷ °۵۸ و عرض‌های ″۵۹' ۳۷ °۳۶ تا ″۳۵ '۳۸ °۳۶ واقع است. این منطقه از نظر زمین‌شناسی در مرز بین پهنه زمین‌ساختاری البرز شرقی، پهنه بینالود و شمال پهنه افیولیتی سبزوار واقع شده است (شکل ۱).

منطقه مورد بررسی در جنوب کمربند ماگمایی قوچان سبزوار قرار دارد است. این کمان ماگمایی با روند شمال‌غربی جنوب‌شرقی درافیولیت سبزوار و پیرامون آن نفوذ کرده است و به سمت شمال تا کوه‌های البرز ادامه دارد [۱]. این نوار آتشفشانی در یک پهنه فرورانشی تشکیل شده است، اغلب ماهیت آهکی قلیایی دارد و سن آن از جنوب (در کنار نوار افیولیتی سبزوار) به سوی شمال (جنوب قوچان) از ائوسن تا-پلیوپلیستوسن تغییر می‌کند [۲]. حجم عمده سنگ‌های آتشفشانی با ماهیت آهکی قلیایی و وجود تعداد بسیاری کانی-سازی‌های آهن و مس مانند معدن مس- طلا-اورانیوم-عناصر خاکی نادر سبک نوع مس-طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) فیروزه نیشابور [۳] آهن ± مس شترسنگ [۴]، آهن ابوذر [۵]، مس-طلای پورفیری جلمبادان [۶]، کانسار مگنتیت-آپاتیت خانلق [۷] همراه با نهشته‌های فراوان مس، نشان دهنده

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۹۲۱۳۲، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

پتانسیل بالای این کمان ماگمایی برای کانی‌سازی‌های مختلف است. در گزارش نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکان، منطقه اکتشافی مس مشکان فقط به عنوان یک نهشته باریت معرفی شده است، و بنابراین از نظر علمی هیچ بررسی تفصیلی بویژه پیرامون بخش مس‌دار آن انجام نشده است. این پژوهش نخستین بررسی پیرامون کانی‌سازی مس افزون بر باریت موجود در این منطقه است. در این مقاله، نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی، بافتی، زمین شیمی و سیال‌های درگیر و سرانجام مدل کانی‌سازی ارائه شده است.

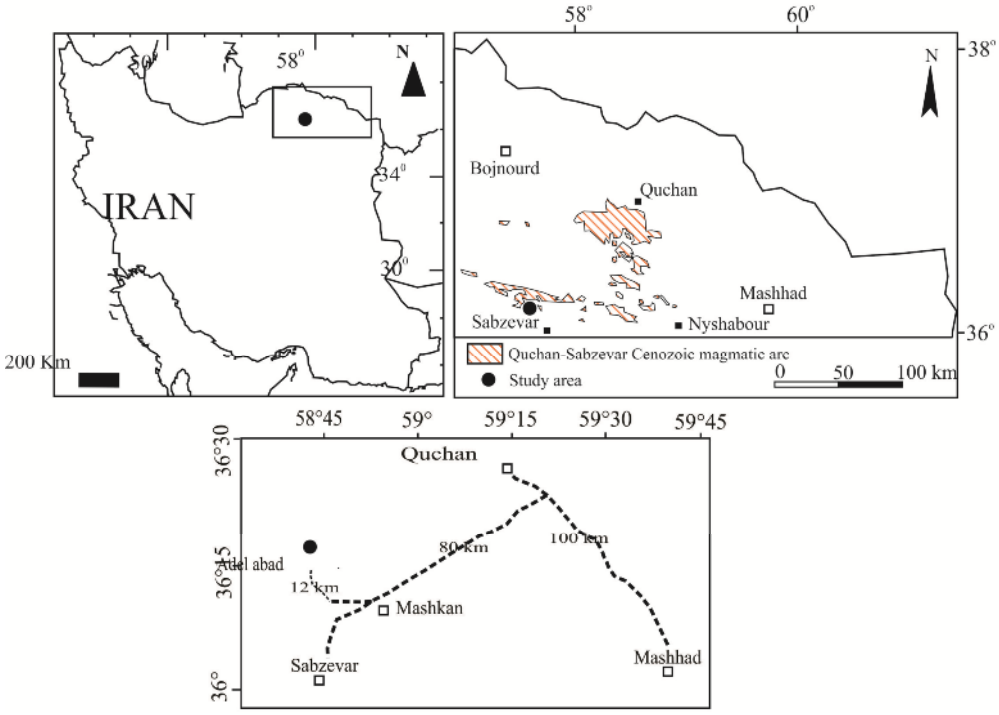
روش بررسی

به منظور شناسایی ماهیت کانی‌سازی در منطقه اکتشافی مشکان، نخست برداشت اطلاعات صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و رگه‌های مس و باریت در گستره‌ای به وسعت تقریبی ۱ کیلومترمربع انجام شد. در مجموع، تعداد ۲۰ مقطع نازک و ۱۸ مقطع نازک صیقلی و قطعه صیقلی تهیه و بررسی شدند. سپس بر پایه برداشت‌های صحرایی و آزمایشگاهی، نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ درنرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. به منظور بررسی زمین شیمی، تعداد ۸ نمونه خرده سنگی از محل ترانشه‌ها برداشت و پس از خردایش و نرمایش به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES؛ با محلول تیزآب سلطانی که از ترکیب اسید نیتریک و اسید هیدروکلریدریک بدست می‌آید) برای ۳۴ عنصر و به روش عیارسنجی گرمایی برای طلا در آزمایشگاه زرآزما تجزیه شدند.

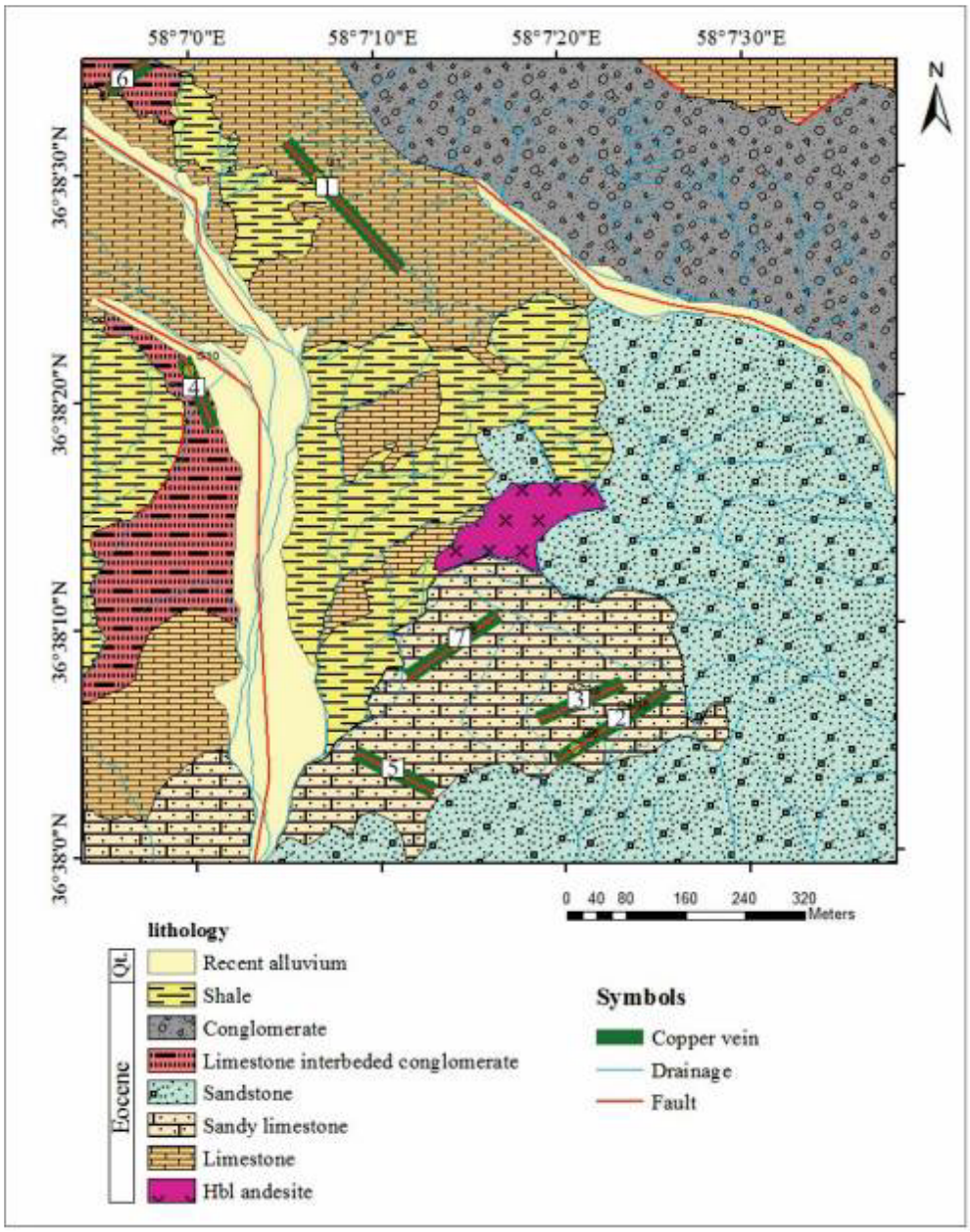
برای بررسی سیال های درگیر، ۳ مقطع دوبرصیقل از کانی کوارتز (مهمترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی مس) و یک مقطع دوبرصیقل از کانی باریت تهیه شدند و دماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری برای آن‌ها انجام شد. این آزمایش با یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله‌های سرد و گرم کردن ±۱°C و گستره دمایی دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد است. مقدار شوری در سیستم H_2O-NaCl با استفاده از نرم افزار HOKIEFLINCS-H_2O–NaCl موجود در سامانه اکسل [۹،۸] محاسبه شده است. سپس نمودارهای مناسب در نرم افزار SPSS رسم گردیدند.

زمین‌شناسی

از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد بررسی در گوشه جنوب غرب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکان [۱۰] واقع است. حجم عمده سنگ-های رخنمون یافته در این منطقه، واحدهای رسوبی کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک، شیل و ماسه‌سنگ آهکی به سن ائوسن هستند (شکل۲).



شکل ۱ جایگاه منطقه مشکان در شمال‌شرق ایران و راه‌های دسترسی به آن همراه با موقعیت کمربند ماگمایی قوچان-سبزوار.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه مس مشکان.

براساس بازدید صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، واحدهای زمین‌شناسی شناسایی شده در گستره اکتشافی مشکان به دو دسته سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های رسوبی تقسیم می‌شوند. قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، واحد آتشفشانی هورنبلند آندزیت است که قطعه‌هایی از آن در کنگلومرای رخنمون یافته دیده شد. این واحد در قسمت مرکزی منطقه رخنمون یافته است (شکل ۲). واحد هورنبلند آندزیت دارای بافت پورفیری بوده (۴۵ درصد درشت بلور) و شامل کانی‌های پلاژیوکلاز (۳۰-۲۵ درصد)، هورنبلند (۷-۵ درصد)، بیوتیت (۳-۲ درصد)، فلدسپات قلیایی (۳-۲ درصد) و کوارتز (۲-۱ درصد) است. هورنبلندها دارای لبه سوخته هستند (شکل ۳ الف). این واحد آتشفشانی تنها رخنمون از سنگ‌های آتشفشانی کمان ماگمایی قوچان- سبزوار است که در چارگوش منطقه مورد بررسی دیده می‌شود. سنگ‌های رسوبی بیشترین

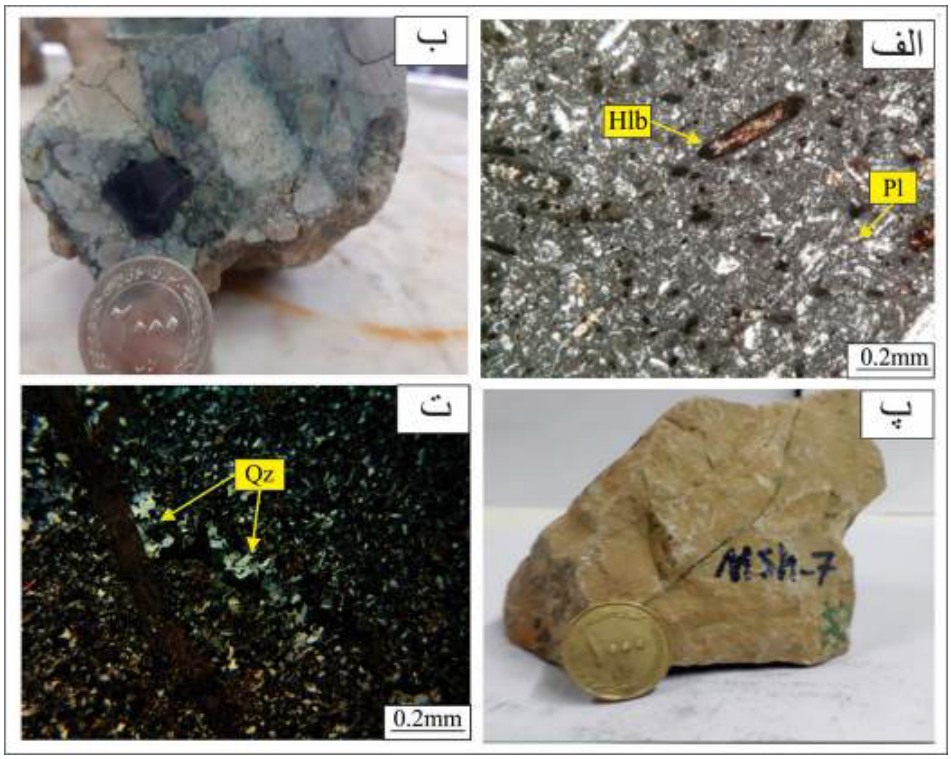
گسترش را در منطقه مورد بررسی دارند. در قسمت‌های شمال تا شمال‌شرق، واحد کنگلومرایی رخنمون داشته که در آن، قطعه‌هایی از جنس آندزیت و تراکی آندزیت به اندازه ۱ در ۱ متر (در صحرا) تا ۲-۱ سانتی‌متر (زیر میکروسکوپ) وجود دارند (شکل ۳ ب). واحد آهکی در قسمت‌های شمالی و جنوب‌غرب منطقه گسترش یافته (شکل ۲) و بیشتر از کربنات تشکیل شده است و قطعه‌هایی از ماسه‌سنگ را نیز شامل می‌شود (شکل ۳ پ). رگه شماره یک مس‌دار با روند شمال غرب-جنوب شرق در این واحد میزبان است. در قسمت‌های مرکزی به سمت جنوب، واحد آهک ماسه‌ای رخنمون دارد و بیشتر رگه‌های کانی‌سازی در این واحد، شناسایی شدند (شکل ۲). دراین واحد کربنات و کوارتز فراوان یافت می‌شوند. واحد ماسه-سنگ در قسمت‌های شرق تا جنوب‌شرقی منطقه گسترش یافته (شکل ۲) و از کوارتز، کانی‌های کدر و به مقدار بسیار کم فلدسپار تشکیل شده است (شکل ۳ ت). همچنین در بخش-هایی از غرب و شمال‌غرب، واحد آهکی با میان لایه‌هایی از کنگلومرا و در قسمت‌های مرکزی تا غرب نیز واحد شیلی رخنمون دارند. این واحد نیز میزبان یک رگه مس‌دار و باریت است (شکل ۲).

دگرسانی

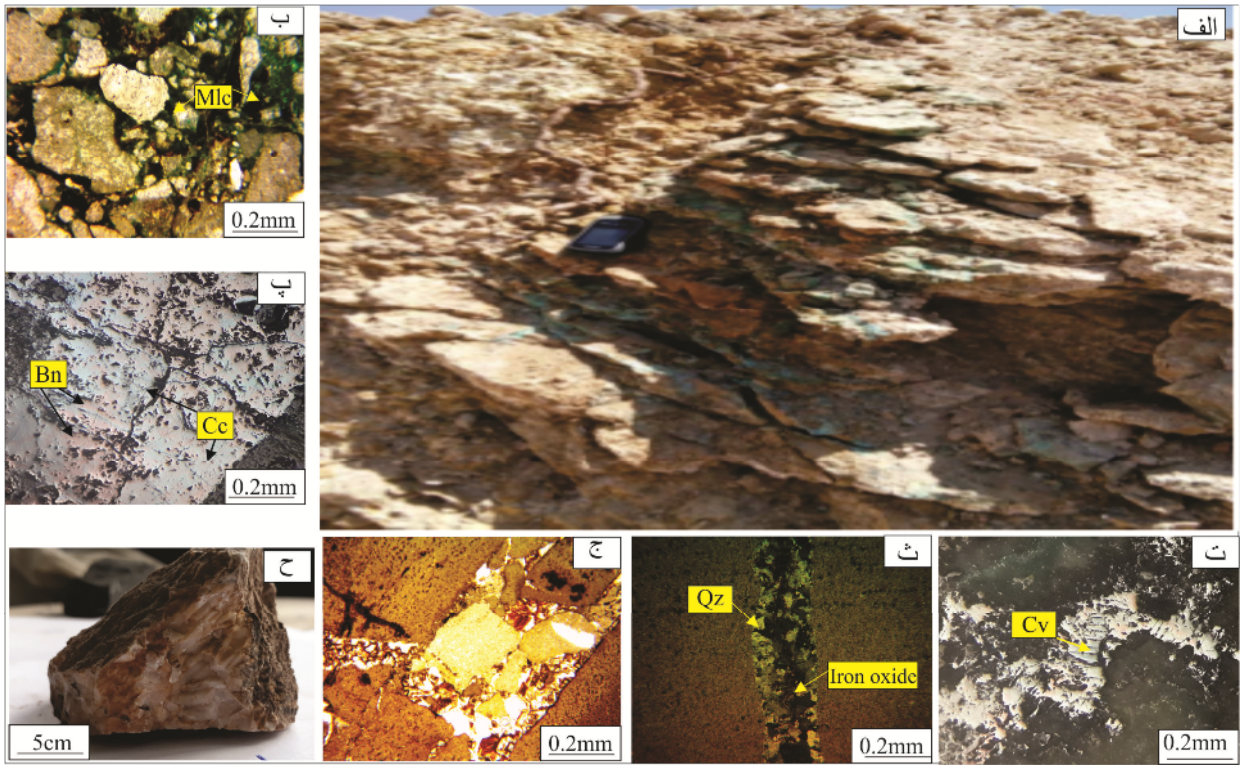
در سامانه‌های رگه‌ای، گسترش دگرسانی محدود به پیرامون رگه است. دگرسانی آرژیلی در لبه رگه به ضخامت ۳ تا ۵ سانتی‌متر شناسایی شد. در این دگرسانی، اغلب پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. دگرسانی غالب در منطقه مورد بررسی سیلیسی شدن است که بیشتر به صورت کوارتز به اندازه ۰/۱ تا ۳ میلی متر همراه با ماده معدنی دیده می‌شود. این دگرسانی همچنین به صورت کوارتز نهان بلور در سنگ میزبان دیده می‌شود. دگرسانی کربناتی به صورت رگچه‌های کلسیت با عرض حدود ۱ تا ۲ میلی متر بوده و بدون کانی‌سازی است. این رگچه‌ها در بعضی قسمت‌ها کانی‌سازی را قطع کرده‌اند و تاخیری هستند. دگرسانی پروپلیتی ضعیف نیز اغلب بر واحد آندزیتی اثر گذاشته و موجب شده است که طی آن، هورنبلند به کلریت و پلاژیوکلاز به اپیدوت تبدیل شوند.

کانی‌سازی

کانی‌سازی در منطقه مشکان کنترل گسلی دارد و به صورت رگه‌ای و روزادی است (شکل ۴ الف). عمده‌ترین سنگ میزبان رگه‌ها واحد آهک ماسه‌ای است. همچنین در واحدهای آهکی و آهک، رگه‌ها با میان لایه‌های کنگلومرا (شکل ۴ ب) نیز رگه‌ها دیده شدند. تعداد ۷ رگه اصلی در منطقه شناسایی شد (شکل ۲).



شکل ۳ واحدهای سنگی منطقه مس مشکان: الف) تصویر میکروسکوپی واحد هورنبلند آندزیت، ب) نمونه دستی از کانی‌سازی مالاکیت در بین قطعه‌های کنگلومرا، پ) واحد آهکی و ت) تصویر میکروسکوپی رگچه کوارتز در واحد ماسه‌سنگ. تصاویر میکروسکوپی در نور قطبیده متقاطع، XPL، گرفته شده اند. (Hbl= هورنبلند، Pl= پلاژیوکلاز و Qz= کوارتز [۱۱].)



شکل ۴ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از کانی‌سازی منطقه اکتشافی مس مشکان: الف) نمایی از رگه مالاکیت، ب) کانی‌سازی مالاکیت در بین قطعه‌های کنگلومرا در نور قطبیده صفحه‌ای، PPl، پ) بورنیت و کالکوسیت در PPL، ت) کالکوسیت‌های ثانویه همراه با کوولیت در PPL، ث) رگچه کوارتز-اکسید آهن درنور قطبیده متقاطع، XPL، ج) اکسید آهن در PPL، ح) نمونه دستی از باریت. (Bn= بورنیت، Cc= کالکوسیت، Cv= کوولیت، Mlc= مالاکیت و Qz= کوارتز [۱۱].)

رگه‌های مس‌دار با عرضی حدود ۱ متر و طول ۱۰ تا ۱۵ متر با روند شمال‌شرق – جنوب‌غرب و شیب تقریبی ۳۰ تا ۳۵ درجه به سمت شمال هستند (شکل ۴ الف). کانی‌سازی در این رگه-رگچه‌ها شامل کانی‌های اولیه کوارتز، پیریت، کالکوسیت، بورنیت، باریت و کانی‌های ثانویه مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت، گوتیت و هماتیت است (شکل ۵).

کالکوسیت فراوانترین کانی سولفیدی در رگچه‌ها بوده و اغلب به دو صورت اولیه و ثانویه قابل دیده است. کالکوسیت اولیه اغلب بصورت درشت دانه با ابعاد ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر در رگه‌ها همراه با بورنیت (هم‌رشدی) دیده می‌شود (شکل ۴ پ). نبود لبه واکنشی برای کالکوسیت نشان دهنده شکل‌گیری آن به صورت اولیه است [۱۳،۱۲]. این کالکوسیت‌ها درشت‌بلور هستند و به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شوند. بورنیت به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل و با اندازه ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر در رگچه‌ها دیده می‌شود. بورنیت اغلب همراه با کالکوسیت اولیه با بافت هم رشدی (میرمیکیتی) وجود دارد (شکل ۴ پ). پیریت به صورت اولیه دیده نشد، ولی در بعضی قسمت‌ها قالب آن شناسایی شد که به طور کامل به گوتیت تبدیل شده است.

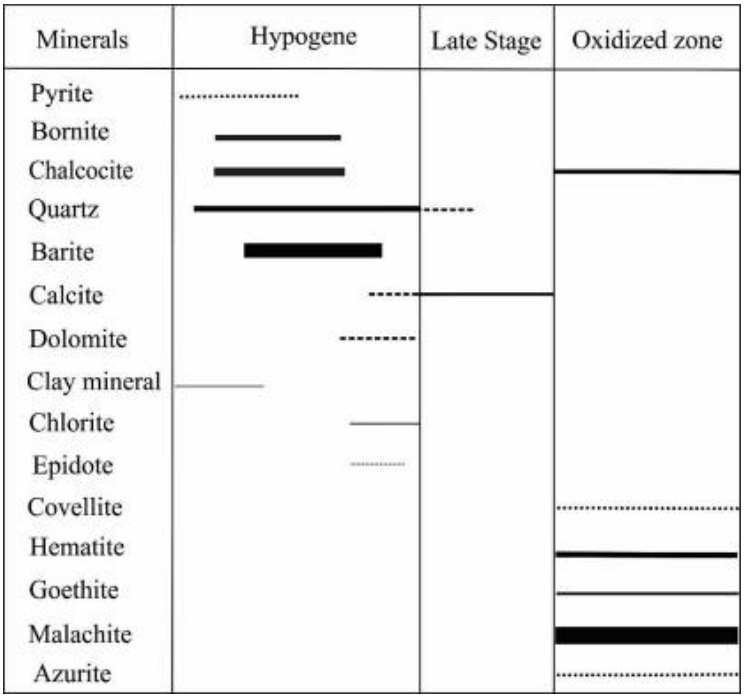
کوارتز مهمترین باطله همراه با کانی‌سازی است. این کانی با بافت پرکننده فضای خالی و اندازه ۵۰ میکرون تا بیش از ۳ میلی‌متر در رگچه‌ها شناسایی گردید (شکل ۴ ث). کوارتزها اغلب نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار و شیری رنگ هستند. همچنین، کوارتز به صورت نهان بلور نیز شناسایی شد. مقدار جزیی دولومیت با اندازه حدود ۵۰ میکرون به صورت رگچه‌ای همراه با اکسیدهای آهن (بیشتر هماتیت) و کوارتز دیده شد. در رگچه‌های کوارتز-دولومیت-اکسید آهن، کانی سولفیدی اولیه وجود ندارد. کانی باریت بیشتر در مرکز رگه‌ها شکل گرفته‌است (شکل ۴ چ). این کانی در رگه‌ها دارای اندازه ۰/۱ تا ۱ میلی-

متر بوده و بافت‌های توده‌ای، شعاعی و پرکننده فضای خالی را ایجاد نموده است.

فراوان‌ترین کانی ثانویه مالاکیت است که با دیگر کانی‌های ثانویه چون کالکوسیت ثانویه، آزوریت، هماتیت و گوتیت همراه است (شکل ۵). مالاکیت کانی ثانویه کربناتی مس است که به صورت لکه‌های پراکنده تا جانشینی کامل سولفیدها در حجم بالا در نواحی اکسایشی دیده می‌شود (شکل ۴ ب). اغلب کانی-های سولفیدی اولیه کالکوسیت و بورنیت تبدیل به کانی مالاکیت شده‌اند و گاه در میان آنها، کالکوسیت و کوولیت به صورت باقیمانده دیده می‌شود. آزوریت دیگر کانی ثانویه کربناتی مس است که با فراوانی بسیار کم نسبت به مالاکیت، همراه با این کانی در محل درز و شکستگی‌ها وجود دارد. کالکوسیت ثانویه با اندازه چند ده میکرون اغلب همراه با کوولیت در زون اکسایشی دیده می‌شود. کوولیت در زون اکسایشی، در لبه و سطوح درز و شکستگی‌های کانی کالکوسیت دیده می‌شود. گوتیت توسط هوازدگی و اکسایش کانی سولفیدی آهن (پیریت) ایجاد شده و به صورت رگچه‌ای، پراکنده و بافت گل کلمی قابل دیده است. هماتیت بیشتر در رخنمون‌های سطحی رگه‌ها و رگچه‌ها را آغشته نموده است (شکل‌های ۴ ث و ج).

زمین‌شیمی

در بررسی‌های زمین‌شیمی، چگونگی پراکندگی عناصر مختلف در رگه‌های کانه‌دار و ارتباط و همبستگی این عناصر با هم مورد نظر است. نتایج تجزیه زمین‌شیمی نمونه های برداشت شده از محل ترانشه‌ها (عمود بر راستای رگه کانی‌سازی) به روش خرده سنگی در جدول ۱ است. مقدار مس در نمونه‌ها از ۳۴ تا ۴۶۹۶۵ گرم در تن در تغییر است. بیشترین مقدار مس مربوط به رگه شماره ۴ در غرب منطقه در سنگ میزبان آهک با میان لایه کنگلومرا بوده و به دلیل حضور کانی‌هایی چون مالاکیت، بورنیت و کالکوسیت است. مقدار آرسنیک از ۲ گرم در تن تا بیش از ۱۰۰ گرم در تن متغیر است. بیشترین مقدار آرسنیک در رگه‌های شماره ۱ تا ۴ واقع در قسمت جنوب‌شرق منطقه و در واحد آهک ماسه‌ای و همچنین در واحد آهکی در بخش شمالی و واحد آهک با میان لایه‌هایی از کنگلومرا در بخش غربی منطقه دیده می‌شود. مقدار باریم نیز به طور متوسط از ۲۲۴ تا ۸۵۱۳ گرم در تن در تغییر است که بیشترین مقدار آن در بخش جنوبی منطقه در واحد آهک ماسه‌ای و مربوط به رگه شماره ۵ است. گستره تغییرات سرب و روی نیز به ترتیب ۶ تا ۲۹ و ۲۸ تا ۵۰۷ گرم در تن است، اما هیچ کانی مشخصی برای این دو عنصر در مقاطع دیده نشد. بیشترین مقدار سرب مربوط به رگه شماره ۲ در واحد آهک ماسه‌ای (جنوب شرق منطقه) و بیشترین مقدار روی در ارتباط با رگه شماره ۱ در واحد آهکی (بخش شمالی منطقه) است. مقدار آنتیموان نیز از ۱/۰۲ تا ۶۵/۴ گرم در تن تغییر می‌کند که بیشینه آن در بخش جنوبی منطقه و مربوط به رگه شماره ۵ و دارای همبستگی مثبت با باریم است. براساس تجزیه طلا، هیچ ناهنجاری طلا در رگه‌ها وجود ندارد و همه مقادیر آن کمتر از ۵ میلی‌گرم در تن است.



شکل ۵ توالی همبرزایی و ترتیب تشکیل کانی‌ها و کانه‌ها در منطقه اکتشافی مس مشکان.

جدول۱ نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌های خرده سنگی منطقه مشکان به روش ICP-OES.

شماره نمونه	As (ppm)	Ba (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)	Zn (ppm)
G1	۱۰۰>	۷۵۳	۶۵۷۵	۲۵	۱۹٫۵	۵۰۷
G2	۱۰۰>	۶۲۹	۳۹۱۰۲	۲۹	۳۵٫۸	۱۸۸
G3	۱۰۰>	۲۲۴	۲۷۷۵۸	۲۳	۵۱٫۵	۲۹۲
G4	۱۰۰>	۷۳۴	۴۶۹۶۵	۱۷	۱٫۰۴	۸۷
G5	۲۳٫۹	۱۰۲۱	۴۰۱۵۷	۸	۱٫۰۲	۸۵
G6	۱۲٫۶	۲۹۲	۷۲۳۶	۷	۱۱	۷۹
G8	۱٫۹	۸۵۱۳	۳۴	۲۶	۶۵٫۴	۲۸
G10	۲	۴۱۴	۵۵	۶	۴۳٫۷	۳۵

توزیع عناصر در واحدهای سنگی و وابستگی آنها با هم از مهم‌ترین موارد بررسی‌های زمین‌شیمیایی است که با استفاده از آن می‌توان به محیط و فرایندهای موثر در پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی پی برد [۱۴]. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون [۱۵]، ارتباط و همبستگی میان عناصر مختلف در پهنه کانی‌سازی منطقه مشکان بررسی شد (جدول ۲). مس با آهن همبستگی مثبت ضعیف (۰٫۱۹۴+) نشان می‌دهد که بیانگر نبود کالکوپیریت به عنوان کانه اصلی در منطقه است (این کانی در منطقه مورد بررسی شناسایی نشد). مس با آرسنیک همبستگی مثبت متوسط (۰٫۵۱۱+) و با نقره همبستگی مثبت بالا (۰٫۸۵۱+) نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر حضور این عناصر در ترکیب کالکوسیت باشد. همچنین نقره با سرب همبستگی مثبت ضعیف (۰٫۲۴۹+) دارد. هرچند کانی سولفیدی اولیه روی‌دار (اسفالریت) در منطقه شناسایی نشد، اما بر پایه داده‌های زمین‌شیمی، این احتمال وجود دارد که کانی اسفالریت در اثر اکسایش به کانی‌ثانویه تبدیل شده باشد. روی با آهن همبستگی مثبت بالا (۰٫۸۸۶+) نشان می‌دهد که می‌تواند مربوط به وجود کانی‌های ثانویه روی‌دار یا جذب روی در ساختار اکسیدهای آهن در پهنه گوسان باشد.

بررسی سیال‌های درگیر

در منطقه مشکان، کوارتز مهمترین و فراوان ترین کانی غیر فلزی همراه با رگه- رگچه‌های مس بوده که دارای سیال های درگیر مناسب برای تعیین دما و شیمی محلول کانه‌دار است. همچنین در این رگه‌ها، باریت کانی مناسب برای این بررسی-های ست. بررسی سیال‌های درگیر برای ۳ مقطع دوبرصیقل از کانی‌های کوارتز همراه با کانی‌سازی مس و یک مقطع دوبرصیقل از کانی باریت مربوط به رگه باریت منطقه انجام شد که چکیده نتایج در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲ ضرایب همبستگی مربوط به هر جفت عنصر در پهنه گوسان منطقه شورک (+++: همبستگی مثبت بالا، ++: همبستگی مثبت متوسط، +: همبستگی مثبت ضعیف، -: همبستگی منفی ضعیف، --: همبستگی منفی متوسط و ---: همبستگی منفی بالا). **(فرمت اعداد اعشاری جدول درست نمی باشد!)**

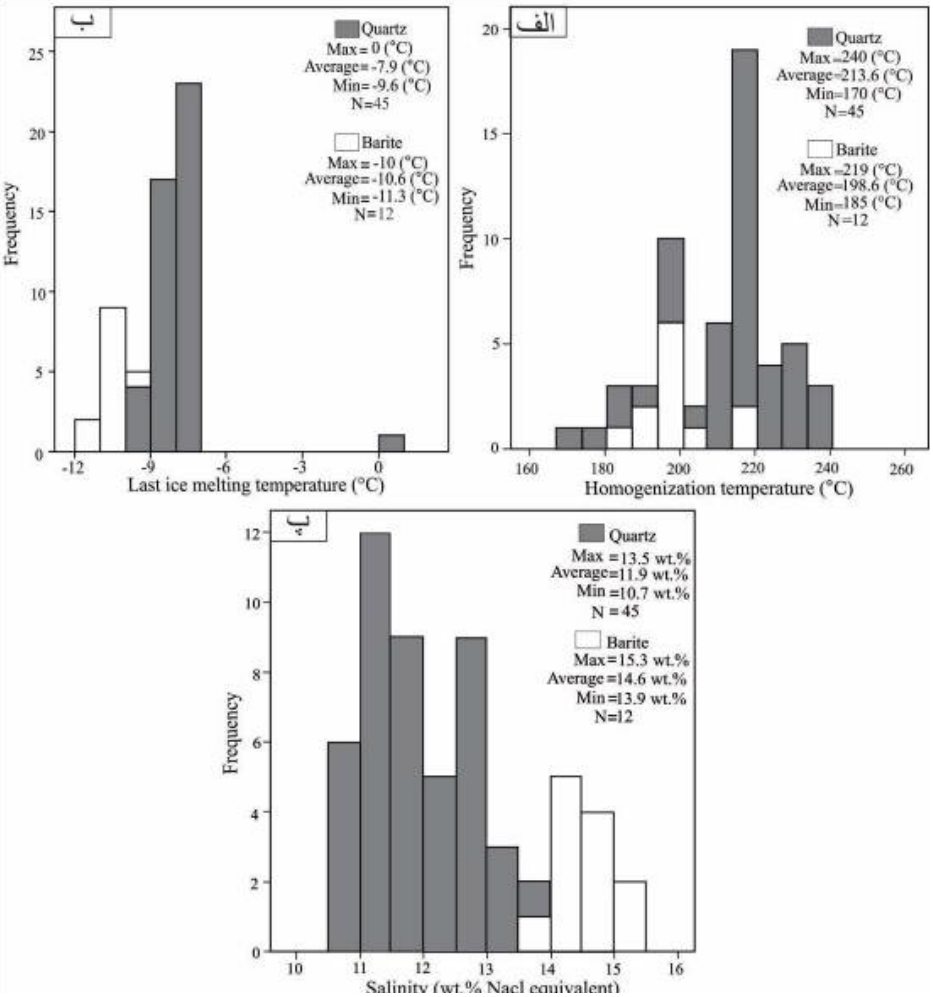
	As	Ba	Cu	Sb	Zn	Pb	Ag	Fe
As	۱	-	++	-	+++	+++	+++	+++
Ba	۰٫۳۵۲-	۱	--	-	-	--	--	--
Cu	۰٫۳۵۲	۰٫۳۸۹-	۱	--	-	+	+++	+
Sb	۰٫۱۲۱-	۰٫۲۶۶-	۰٫۳۷۶-	۱	-	-	--	+
Zn	-۰٫۶۹۰	۰٫۳۲۵-	۰٫۱۹-	۰٫۸۰-	۱	++	++	+++
Pb	۰٫۶۸۱	۰٫۳۶۰	۰٫۱۱۵	-۰٫۱۳۲	۰٫۵۱۲	۱	+	++
Ag	۰٫۶۸۶	۰٫۴۹۰-	۰٫۸۵۱	۰٫۴۶۸-	۰٫۴۶۸	۰٫۲۴۹	۱	+
Fe	۰٫۸۳۹	۰٫۳۷۷-	۰٫۱۹۴	۰٫۱۵۸	۰٫۸۸۶	۰٫۶۴۶	۰٫۵۳۱	۱

جدول۳ نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر اولیه در منطقه مس مشکان.

شماره نمونه	کانی میزبان	تعداد	T_h (°C)	$T_{m\text{-}ice}$ (°C)	شوری (wt.%Nacl)
M-17	کوارتز	۱۴	۱۸۴ تا ۲۴۰	-۸٫۲ تا -۹٫۶	۱۱٫۹ تا ۱۳٫۵
M-9	کوارتز	۱۵	۲۱۲ تا ۲۲۱	۰ تا -۸٫۸	۱۱٫۹ تا ۱۲٫۶
MP	کوارتز	۱۶	۱۷۰ تا ۲۲۶	-۷٫۲ تا -۷٫۹	۱۰٫۷ تا ۱۱٫۶
M-18	باریت	۱۲	۱۸۵ تا ۲۱۹	-۱۰ تا -۱۱٫۳	۱۳٫۹ تا ۱۵٫۳

براساس بررسی‌های انجام شده، اغلب سیال‌های درگیر در نمونه‌ها بی‌شکل تا شکل‌دار و با شکل‌های مثلثی، مخروطی و به مقدار کمتر میله‌ای هستند. اندازه سیال‌های درگیر بررسی شده حدود ۴ تا ۷ میکرون و بیشتر آنها کوچکتر از ۵ میکرون هستند. بر اساس تقسیم‌بندی‌های معمول [۱۷،۱۶]، این سیال ها از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) هستند. دمای همگن‌شدگی (T_h) برای سیال‌های درگیر از نوع کوارتز ۱۷۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد و برای باریت ۱۸۵ تا ۲۱۹ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۹۸ درجه سانتی گراد است (شکل ۶ الف). نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) در این سیال‌ها نیز برای کوارتز در گستره ۵۷٫۷- تا ۵۳٫۸- درجه سانتی‌گراد و برای باریت ۵۴٫۷- تا ۵۴- درجه سانتی‌گراد است.

نخستین دمای ذوب‌شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد [۱۷،۱۶]. مقادیر T_{fm} بدست آمده بیانگر حضور نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در سیال کانه-سازی است. دمای نهایی ذوب (T_m) نیز برای کوارتز بین ۹٫۶- تا صفر درجه سانتی‌گراد با میانگین ۷٫۹- درجه سانتی‌گراد و برای باریت ۱۱٫۳- تا ۱۰- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۰٫۶۴- درجه سانتی‌گراد است (شکل ۶ ب). براساس سامانه NaCl-H_2O [۹،۸]، مقدار شوری برای سیال‌های درگیر از نوع کوارتز ۱۰٫۷ تا ۱۳٫۵ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۱٫۹ درصد وزنی NaCl و برای سیال درگیر نوع باریت ۱۳٫۹ تا ۱۵٫۳ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۴٫۶ درصد وزنی NaCl است (شکل ۶ پ).



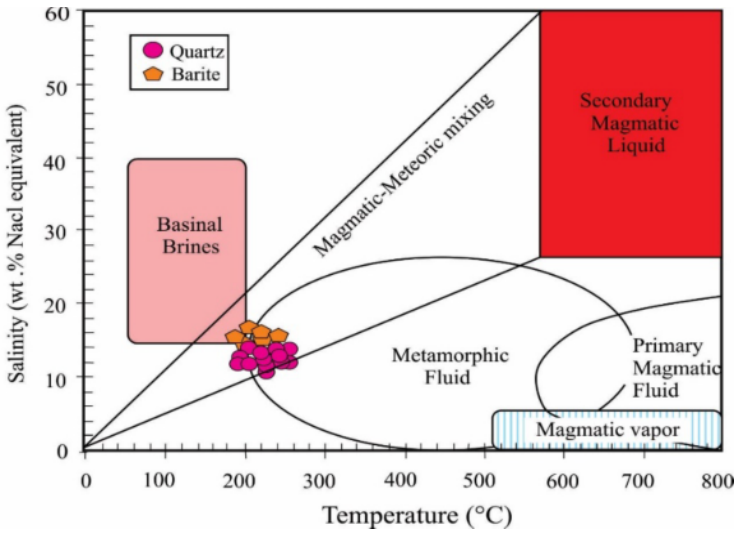
شکل۶ نمودارهای ستونی الف) دمای همگن شدگی، ب) آخرین دمای ذوب یخ و پ) مقدار شوری مربوط به کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه مشکان.

بحث

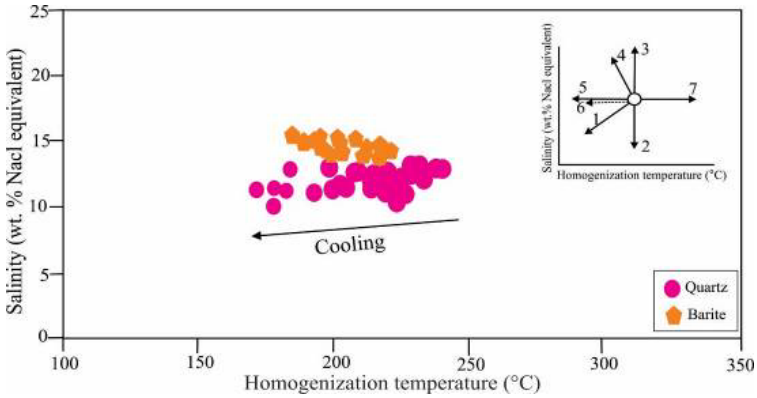
تکامل سیال کانه‌ساز

نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی برای محیط آب‌های مختلف برای سیال‌های درگیر (LV) نشان می‌دهد که بخشی از سیال‌های درگیر منطقه مشکان در گستره آمیختگی آب ماگمایی و آب‌های جوی و بخش کمی در محیط آب‌های دگرگونی قرار دارند (شکل ۷). از آنجا که آثار دگرگونی ناحیه‌ای در این منطقه وجود ندارد، فرضیه دخالت آب دگرگونی در حمل فلزات پذیرفته نیست. بنابراین می‌توان محلول کانه‌دار را آمیزه‌ای از آب‌های ماگمایی و جوی در نظر گرفت.

بررسی سیال‌های درگیر منطقه مشکان نشان می‌دهد که محلول کانه‌دار با دمای ۱۷۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی گراد و شوری ۱۰ تا ۱۳ درصد وزنی که خود نتیجه آمیختگی محلول ماگمایی گرم و شور با آب جوی سرد و دارای شوری کمتر هستند در شکل‌گیری کانی‌سازی مس و سیال دیگری با گستره دمایی مشابه (۱۸۵ تا ۲۱۹ درجه سانتی گراد) اما با شوری بیشتر (۱۳ تا ۱۵ درصد وزنی) در شکل‌گیری باریت نقش داشته است و کاهش دما نقش اصلی را در ته‌نشست کانی‌ها ایفا می‌کند (شکل‌های ۷ و ۸). در بررسی سیال‌های درگیر، شواهد سنگ‌نگاری برای فرآیند جوشش (حضور سیال های غنی از مایع و غنی از بخار) دیده نشد.



شکل ۷ نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر منطقه مشکان (محیط‌های تعریف شده بر گرفته از مرجع [۱۸] هستند.



شکل ۸ نمودار شوری–دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر منطقه مشکان. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری برگرفته از مرجع [۱۷] هستند. روند ۱= مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و با شوری کمتر B، روندهای ۲ و ۳= مخلوط شدگی سیال A با سیال های دیگر با شوری مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴= افزایش شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش، روند ۵= سرد شدگی سیال، روند ۶= باریک شدگی میان-بارهای سیال و روند ۷= تراوش میان‌بارهای سیال طی گرمایش.

سرانجام می‌توان چنین گفت که عناصر فلزی ماگمای مادر توسط محلول ماگمایی با دما و شوری بالا حمل شده و به دلیل دمای بالای توده نفوذی، به سمت بالا حرکت می‌کنند. آب‌های جوی با دما و شوری پایین از درز، شکستگی‌ها و گسل‌ها به عمق راه یافته، با محلول ماگمایی آمیخته شده و فرآیند همرفتی – مخلوط شدگی سیال بین توده نفوذی در عمق (به عنوان موتور گرمایی) و اعماق کمتر ایجاد شده است. سرانجام بر اثر عواملی چون کاهش دما و افزایش pH، کانی‌سازی در فضای مناسب مانند پهنه‌های گسلی برجای گذاشته شده است. از آنجا که دمای تشکیل رگه‌های مس‌دار و باریت منطقه کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی گراد است، کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در حمل عناصر و فلزات نقش داشته‌اند [۱۸].

مدل کانی‌سازی

رخداد کانه‌زایی مس و باریت مشکان یک کانی‌سازی رگه‌ای با کنترل ساختاری بوده که در سنگ‌های رسوبی تشکیل شده است. براساس نظر برخی پژوهشگران [۱۹-۲۳]، شواهدی مانند دما و شوری کم محلول کانه‌دار، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش محدود آن در لبه رگه و کانی‌شناسی ساده منطقه مشکان از نشانه‌های سامانه‌های رگه‌ای فراگرمایی است.

در جدول ۴، برخی ویژگی‌های کانی‌سازی مس در منطقه مشکان با دیگر کانسارهای مشابه از نقاط مختلف ایران مانند شورک، غارکفتر، شکسته‌سبز، میرخش در شمال‌غرب بیرجند [۲۴]، زاوه در تربت حیدریه [۲۵] و مس چهل کوره در زاهدان

[۲۶-۲۸] مقایسه شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه مشکان واحدهای رسوبی بوده که متفاوت از بقیه کانسارهاست، زیرا بیشتر ذخایر رگه‌ای مس‌دار در سنگ میزبان آتشفشانی دیده می‌شوند. البته از آنجا که سنگ میزبان نقشی در تشکیل کانسار ندارد، این امر نمی‌تواند به عنوان یک اختلاف اساسی در نظر گرفته شود. در کانسارهای رگه‌ای مقایسه شده، انواع دگرسانی‌ها تا حدی مشابه هستند و همچنین کانی‌شناسی اولیه در آنها ساده است. دمای تشکیل کانسار مشکان از دیگر کانسارهای مقایسه شده پایین‌تر است. همچنین درصد شوری کانسار مشکان کمتر از کانسارهای شورک، غارکفتر، شکسته-سبز و میرخش مشابه با کانسار زاوه است. مقدار عنصر مس در همه این کانسارها بیش از ۲ درصد است. دمای تشکیل و درصد شوری پایین در کنار سنگ میزبان متفاوت، کانی‌سازی رگه‌ای مس مشکان را از دیگر کانسارهای رگه‌ای مس‌دار متمایز می‌کند.

جدول۴ مقایسه کانسار مس مشکان با برخی کانسارهای رگه‌ای مس دار در نقاط مختلف ایران

نام کانسار	سنگ میزبان	کانی‌شناسی	دگرسانی	دمای تشکیل (°C)	مقدار شوری (٪)	بیشینه مقدار عنصر مس(٪)	مرجع
رگه معدنی مس± نقره میر خش (قطعه لوت)	توف آندزیتی	پیریت، کالکوسیت	سلیسی، آرژیلی، کربناتی	۲۱۴ تا ۲۹۳	۱۲ تا ۲۳	۵٫۶	[۲۴]
رگه معدنی مس± نقره شکسته سبز (قطعه لوت)	توف آندزیتی	کالکوسیت	سلیسی، آرژیلی، کربناتی	۲۲۸ تا ۳۱۶	۷٫۲ تا ۱۸٫۲	۲٫۴	[۲۴]
رگه معدنی مس± نقره غار کفتر (قطعه لوت)	توف آندزیتی	کالکوسیت	سلیسی، آرژیلی، کربناتی	۲۱۳ تا ۳۰۰	۷٫۹ تا ۱۶٫۶	۴٫۲	[۲۴]
رگه معدنی مس± نقره شورک (قطعه لوت)	توف آندزیتی	کالکوسیت، پیریت، بورنیت	سلیسی، آرژیلی، کربناتی	۱۷۵ تا ۲۸۶	۹٫۳ تا ۲۱٫۵	۵	[۲۴]
مس زاوه (تربت حیدریه)	جوش سنگ	پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت	سلیسی، کمتر پروپلتیک و آرژیلی	۳۱۰ تا ۳۸۷	۸٫۹ تا ۱۵٫۸	۲٫۱	[۲۵]
مس چهل کوره (زاهدان)	ماسه سنگ تیره، شیل و لای سنگ	پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت	سلیسی، کربناتی، کلریتی	۳۳۰ تا ۴۸۲	۱ تا ۱۵	۱	[۲۶-۲۸]
مس مشکان (شمال شرق سبزوار)	ماسه‌سنگ آهکی	پیریت، کالکوسیت، بورنیت	سلیسی، به صورت محدود کربناتی و پروپلتی	۱۷۰ تا ۲۴۰	۱۰٫۷ تا ۱۵٫۲	۴٫۶	این پژوهش

برداشت

رخداد کانه‌زایی مس مشکان به صورت رگه-رگچه‌ای در سامانه گسلی (با راستای بیشتر شمال‌غربی– جنوب‌شرقی) در سنگ میزبان رسوبی و از کانی‌های سولفید اولیه کوارتز، کالکوسیت، بورنیت و پیریت شکل گرفته است. دگرسانی‌ها دارای روند خطی و شامل آرژیلی، سیلیسی، کربناتی و پروپلتی هستند. بر اساس نتایج تجزیه زمین‌شیمی نمونه‌های برداشت شده از محل رگه‌ها، بالاترین مقدار مس بیش از ۴٫۶ درصد، سرب ۲۹ گرم در تن، آنتیموان ۶۵ گرم در تن و روی ۵۰۷ گرم در تن است. براساس بررسی سیال‌های درگیر، محلول کانه‌دار با دمای ۱۷۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۰ تا ۱۳ درصد وزنی که خود نتیجه آمیختگی محلول ماگمایی گرم و شور با آب جوی سرد و دارای شوری کمتر بوده در شکل‌گیری کانی‌سازی مس و سیال دیگری با گستره دمایی مشابه اما شوری بیشتر در شکل-گیری باریت نقش داشته است. کاهش دما نقش اصلی را در ته-نشست کانی‌ها ایفا کرده است.

شواهدی چون کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی‌ها و گسترش محدود در لبه رگه، کانی‌شناسی ساده ذخیره و دما و شوری کم محلول کانه‌دار از نشانه‌های سامانه‌های رگه‌ای فراگرمایی است. این شواهد در کنار بی‌هنجاری‌های بالای مس، روی، آرسنیک و آنتیموان، می‌توانند نشان دهنده پتانسیل کانی‌سازی عناصری چون مس، روی، آرسنیک و آنتیموان از

نوع فراگرمایی در منطقه مس مشکان باشند. در این منطقه، توده‌ای شناسایی نشد که بتوان ارتباط آن را با کانی‌سازی بررسی نمود. این احتمال وجود دارد که توده مربوط به کانی-سازی در عمق یا در فاصله‌ای دورتر از منطقه مورد بررسی باشد. با توجه به وجود نهشته‌های فراوان مس در نواحی پیرامون منطقه مورد بررسی و وجود کانسارهای بزرگی چون معدن فیروزه نیشابور و آهن شترسنگ، احتمال دارد که تشکیل این رگه‌ها وابسته به فعالیت‌های ماگمایی- گرمابی کمربند ماگمایی قوچان- سبزوار باشد.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح شماره ۳/۴۹۰۱۴ مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۱۴ انجام شده است. از آقای مهندس علی تنها برای راهنمایی و معرفی منطقه و نیز آقایان حسینی و غلامی که در اجرای عملیات صحرایی کمک نموده‌اند سپاسگذاریم.

مراجع

[1] Alavi M., *"Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran"*, Geological Society of American Bullitan 103 (1991) 983-992.

[2] Spies O., Lensch G., Mihem A., and *"Chemistry of the post-ophiolithic tertiary volcanic between Sabzevar and Quchan, NE Iran (in Persian)"*, in Almassi A. (eds.), Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, (1983) 247-266.

[3] Karimpur M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esfandiarpour A., Mohammadnejad H., *"Nyshabour Turquoise mine: The first Cu-Au-ULREE IOCG type in Iran (in Persian)"*, Iranian Journal of Economic Geology 3 (2012) 193-216.

[4] Gholami S., *"Geology, mineralization, geochemistry, and magnetometry of Shotor Sang iron deposit, NE Sabzevar"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 240p.

[5] Panahi M., *"Geology, petrography, alteration and geochemistry in eastern part of Hamdi kaolin of Halak Abad (southwestern Sabzevar) with view of copper porphyry exploration, and study of mineralization, geochemistry and magnetometry in eastern of Abozar iron mine, Neyshabour (northeastern of Sabzevar)"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 411p.

[6] Eshbak P., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., "Study of Au±Cu mineralization of Jalambadan area (NW Sabzavar) based on mineralogy of alteration and mineralization zones, and geochemistry (in Persian)", Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (2018) 31-46.

[7] Zaree A., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., *"Khanlogh magnetite-apetite deposit, NW Neyshabour: Mineralogy, structure and texture, alteration, and determination of model (in Persian)"*, Iranaian Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (24) (2016) 131-144.

[8] 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.

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

[10] Amini B., *"Geological map of Mashkan"*. Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, (2006).

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

[12] Ossandón G., Fréraut R., Gustafson L.B., Lindsay D.D., *"Zentilli M., Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report",* Economic Geology 96 (2001) 351-366.

[13] Ramdohr P., *"The ore minerals and their intergrowths"*, 2nd edition. Pergamon, Oxford, 1980, 1207p.

[14] Barnes H. L., *"Geochemistry of hydrothermal ore deposits"*, Third edition, New York, John Wiley and Sons, (1997) 797pp.

[15] Rollinson H., *"Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation"*, Longman Scientific & Technical, Essex, UK, (1993) 352 p.

[16] Roedder E., *"Fluid Inclusions"*, In: Ribbe PE (ed) Reviews in Mineralogy, 12, Mineral Soci Am, Washington DC, (1984) 1-644.

[17] Shephered T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., *"A practical guide to fluid inclusion studies"*, Blackie, London (1985).

[18] Seward T.M., *"The hydrothermal geochemistry of gold"*, in: Foster, R. P. (ed.), gold

metallogeny and exploration, Blakie and Sons Ltd. (1991) 432 p.

[19] Robb L. J., *"Introduction to ore-forming processes"*, Blackwell science, Victoria (2005) 373p.

[20] Foster R. P., *"Gold Metallogeny and Exploration"*, Department of Geology University of Southampton (1996) 432p.

[21] Pirajno F., *"Hydrothermal processes and mineral systems"*, springer sicence, perth, (2009) 203p.

[22] Sillitoe R. H., *"Epithermal models: Genetic types, geometrical control and shallow features"*, Geological Association of Canada Special paper 40 (1993) 403 - 417.

[23] Camprubi A., Albinson T., *"Epithermal deposites in Mexico, Update of current knowledge and an empirical reclassification"*, The Geologcal Society of America 422 (2007) 14-39.

[24] Javidi Moghaddam M., Karimpour M.H., Ebrahimi Nasrabadi K., Haidarian Shahri M.R., Malekzadeh Shafaroudi A., *"Mineralogy, geochemistry, fluid inclusion and oxygen isotope investigations of epithermal Cu ± Ag veins of the Khur Area, Lut Block, Eastern Iran"*, Acta Geologica Sinica 92 (2018) 1139-1156.

[25] Boroozinyat B., Malekzadeh A., Haidarian Shahri M.R., *"Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion studies in Zaveh copper mineralization occurrence, southeast of Torbat-e-Hydarieh (in Persian)"*, Iranaian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 131-144.

[26] Maanijou, M., Rasa, I., and Lentz, D., "*Petrology, Geochemistry, and Stable Isotope Studies of the Chehelkureh Cu-Zn-Pb deposit, Zahedan",* Economic Geology 107 (2012) 683-712.

[27] Maanijou M., Geochemistry, "*origin of ore fluids, and formation of Chehelkureh copper deposit (NW of Zahedan)"*. Ph. D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran (2007) 236p.

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