

شواهد باریت گرمابی در منطقه مشکان، شمال شرق سبزوار: کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر

شریفه محمدی پور^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: ۹۸/۷/۲۸، نسخه نهایی: ۹۸/۱۱/۱)

چکیده: منطقه اکتشافی باریت مشکان در شمال شرق سبزوار در استان خراسان رضوی واقع است. زمین‌شناسی منطقه شامل واحدهای رسوبی کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک با میان لایه‌های شیل، شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ و واحدهای آتشفشانی آندزیت و تراکی آندزیت به سن ائوسن است. باریت با بافت‌های پرکننده فضای خالی، توده‌ای، شعاعی و صفحه‌ای در رگه‌هایی با راستای بیشتر شمال غرب-جنوب شرق ایجاد شده است. کانی‌شناسی منطقه شامل باریت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های ثانویه مالاکیت، آزوریت، گوتیت و هماتیت است. کانی‌سازی رگه‌ای در دو مرحله کانی‌سازی اصلی (باریت+کوارتز) و فاز تاخیری (کلسیت) تشکیل شده است. سیال‌های درگیر در نمونه‌های کوارتز و باریت بی‌شکل تا شکل‌دار (مخروطی و میله‌ای) و با اندازه حدود ۴ تا ۱۲ میکرون هستند. بر پایه بررسی سیال‌های درگیر اولیه در بلورهای کوارتز و باریت همزمان با مرحله اصلی کانی‌سازی رگه‌ای، کمترین دمای تشکیل کانی‌سازی ۱۸۱ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۶/۵ تا ۱۳/۶ درصد وزنی است. بیشترین بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمی در رگه‌ها برای روی ۳۹۴ گرم در تن، آنتیموان ۵۲ گرم در تن و سرب ۹۰ گرم در تن است. شواهدی چون کنترل ساختاری (گسل) کانی‌سازی، زمین‌شناسی، کانی-شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر نشان دهنده شکل‌گیری رگه‌ها در شرایط گرمابی هستند. کاهش دما و آمیختگی با سیالی با شوری بالا در دگرگونی سیال‌های گرمابی و در نهایت شکل‌گیری رگه‌ها موثر بوده است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی؛ ژئوشیمی؛ سیال‌های درگیر؛ باریت؛ مشکان؛ خراسان رضوی.

مقدمه

جغرافیایی ۱۶° ۶' ۵۸" تا ۵۸° ۶' ۵۸" و عرض‌های جغرافیایی ۳۶° ۳۷' ۳۶" تا ۳۶° ۳۸' ۸" واقع است. این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری در مرز بین فاصله پهنه‌های البرز شرقی، بینالود و شمال پهنه افیولیتی سبزوار قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد بررسی در جنوب کمان ماگمایی سنوزویک قوچان-سبزوار واقع است. این کمان ماگمایی با سن ائوسن تا پلیستوسن در افیولیت سبزوار و پیرامون آن نفوذ کرده است و از شمال تا کوه‌های البرز ادامه دارد [۳].

در مجموعه کمان ماگمایی قوچان-سبزوار، معادن (فیروزه نیشابور [۴]، آهن شترسنگ [۵]، آهن کلاه ابودر [۶] و چند

حدود ۱۰۰ کانسار و منطقه پی جویی کوچک باریت در ایران وجود دارند که ذخائر آن‌ها به حدود ۱۰ میلیون تن می‌رسد [۱]. سن کانی‌سازی‌ها که بیشتر بر اساس سن سنگ میزبان برآورد شده است، از اواخر پرکامبرین تا میوسن متغیر است [۲]. بزرگترین ذخایر باریت ایران در پهنه‌های البرز مرکزی و ایران مرکزی دیده شده‌اند و سنگ میزبان آنها بیشتر دولومیت یا سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی است [۲]. منطقه اکتشافی باریت مشکان به مساحت یک کیلومتر مربع در ۵۵ کیلومتری شمال-شرق شهرستان سبزوار، در استان خراسان رضوی بین طول‌های

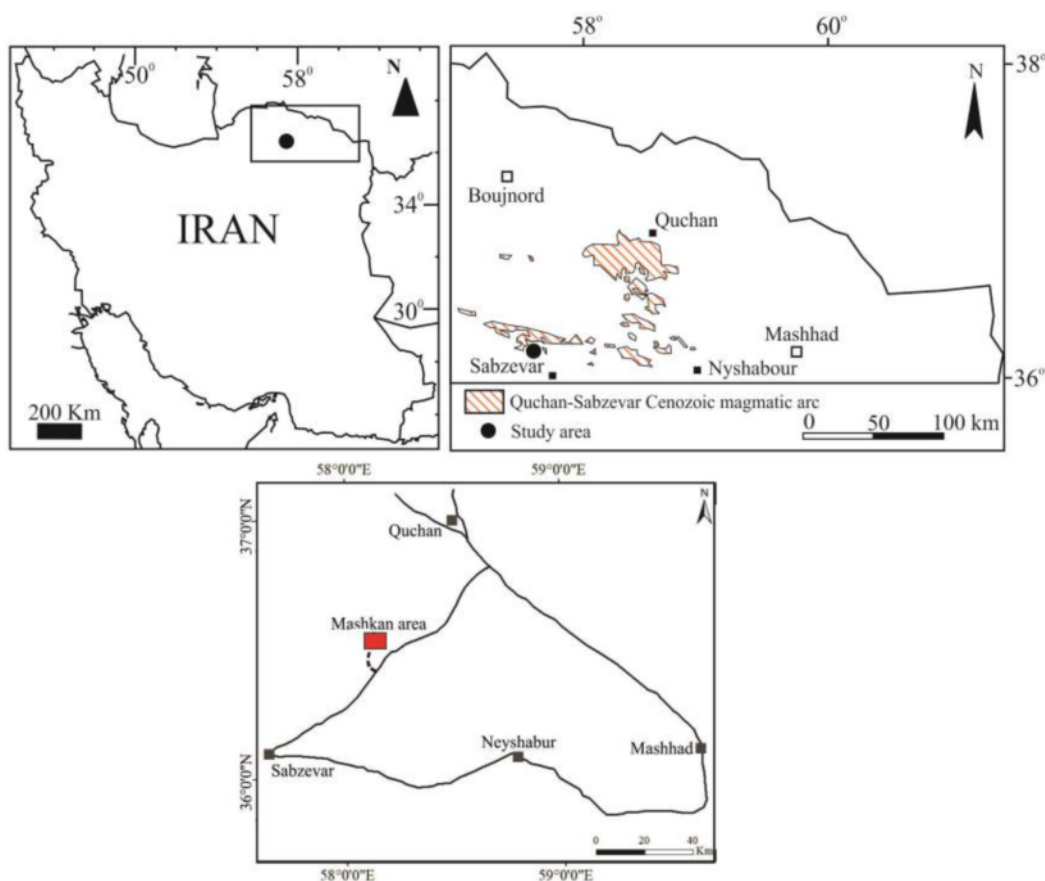
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۸۸، نمابر: ۰۵۱۳۸۷۹۶۴۱۶، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

کانسارهایی در این پهنه فلزایی در شمال شرق ایران است.

روش کار

در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر، بررسی های صحرایی و نمونه برداری از واحدهای سنگی و رگه ها در منطقه اکتشافی باریت مشکان انجام شد. بیش از ۶۰ نمونه سنگی از منطقه مورد بررسی جمع آوری شد که از این میان، ۲۵ مقطع نازک برای بررسی های سنگ نگاری و ۱۰ مقطع نازک صیقلی و قطعه صیقلی برای بررسی های فلزی تهیه شدند. نقشه زمین-شناسی-کانی سازی در نرم افزار ArcGIS تهیه گردید. به منظور اکتشاف های شیمیایی، ۱۰ نمونه زمین شیمیایی به روش خرده سنگی از رگه های کانی سازی برداشت شد که از این میان، ۹ نمونه به روش طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای عناصر معدنی و ۵ نمونه به روش عیارسنجی گرمایی برای عنصر طلا در آزمایشگاه زرآما تجزیه شدند. همچنین به منظور تفسیر زمین شیمیایی دقیق تر کانی سازی باریت، از نتایج تجزیه ۱۵ نمونه از منطقه به روش طیف سنجی فلئورسانی پرتوی X (XRF) [۱۰] استفاده شد.

منطقه اکتشافی (مس-طلای پورفیری جلمبادان [۷] و مگنتیت-آپاتیت خاقلق [۸]) وجود دارد که نشانگر پتانسیل بالای کانی سازی در این کمان ماگمایی است. با وجود بررسی های جامع بر انواع کانی سازی های مس، طلا و آهن در کمان ماگمایی قوچان-سبزوار، پژوهشی پیرامون کانی سازی باریت در این کمان انجام نشده است. تنها نتایج منتشر شده پیرامون منطقه مورد بررسی شامل نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکان [۹] و گزارش پایان عملیات اکتشاف باریت مشکان [۱۰] است. تاکنون بررسی جامع و گسترده ای بر ویژگی های کانی شناسی باریت و سیال های عامل کانی سازی در این منطقه اکتشافی انجام نشده است. در این پژوهش، نوع کانی زایی و چگونگی تشکیل آن بر پایه بررسی های زمین شناسی، کانی شناختی، بافت، زمین شیمیایی و سیال های درگیر مشخص شده است. این کانسار بزرگترین کانی سازی باریت شناخته شده در کمان ماگمایی قوچان-سبزوار محسوب می شود و از آنجا که کانسارهای باریت در این کمان کمتر بررسی شده اند، بررسی جامع و تعیین خاستگاه آن کمک شایانی به اکتشاف چنین



شکل ۱ جایگاه منطقه مشکان در شمال شرق ایران و راه های دسترسی به آن همراه با موقعیت کمربند ماگمایی قوچان-سبزوار.

سبزوار) تا پلیو-پلیستوسن در شمال (جنوب قوچان) تغییر می‌کند. جوانترین واحدهای سنگی در مقیاس ناحیه‌ای نیز رسوب‌های آواری و نهشته‌های کواترنری هستند.

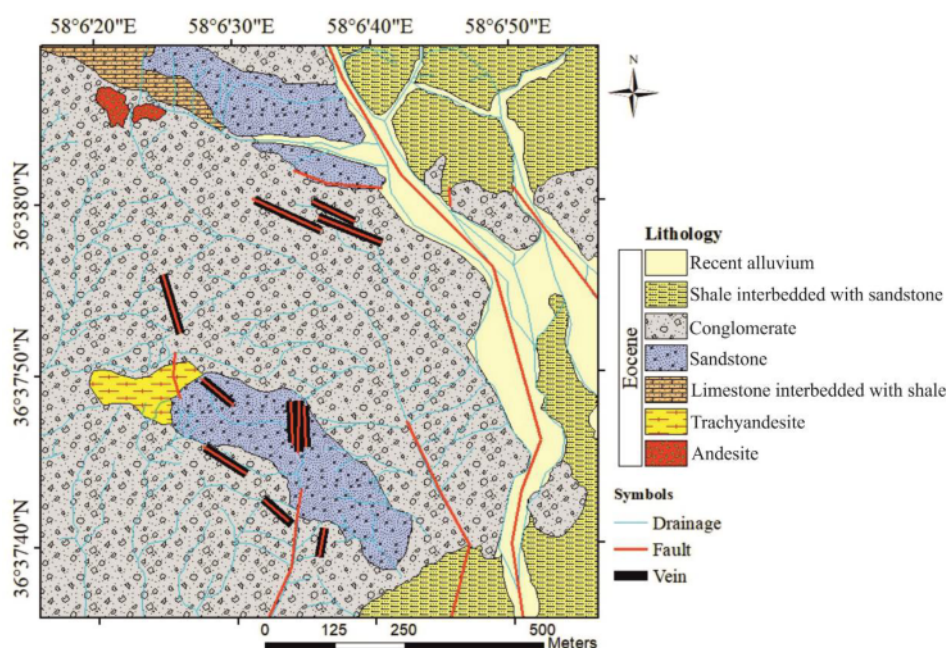
زمین‌شناسی

منطقه اکتشافی باریت مشکان در بخش شرقی نقشه زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکان [۹] واقع است. بر اساس بررسی های صحرایی و آزمایشگاهی، واحدهای سنگی شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای آتشفشانی (آندزیت، تراکی آندزیت) و رسوبی (کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آهک با میان لایه‌های شیل و شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ) به سن ائوسن هستند. قدیمی‌ترین واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای آتشفشانی آندزیت و تراکی آندزیت هستند. واحد آندزیتی با گسترش بسیار کم در شمال غرب منطقه رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری بوده و شامل درشت بلورهایی از پلاژیوکلاز (۲۰-۱۵ درصد)، فلدسپارقلیایی (۵-۳ درصد)، هورنبلند (۱۰-۸ درصد) و بیوتیت (۵-۳ درصد) است (شکل ۳ الف). در این واحد، هورنبلندها اپاسیتی شده‌اند. این امر در اثر اکسایش گرمابی، تغییرات دما، نرخ سرد شدگی و فوران، کاهش فشار جانبی و در گریزندگی اکسیژن بالا انجام می‌شود [۱۲]. وجود هورنبلند با لبه سوخته نشان از افت ناگهانی فشار بخار آب طی صعود ماگما دارد [۱۳].

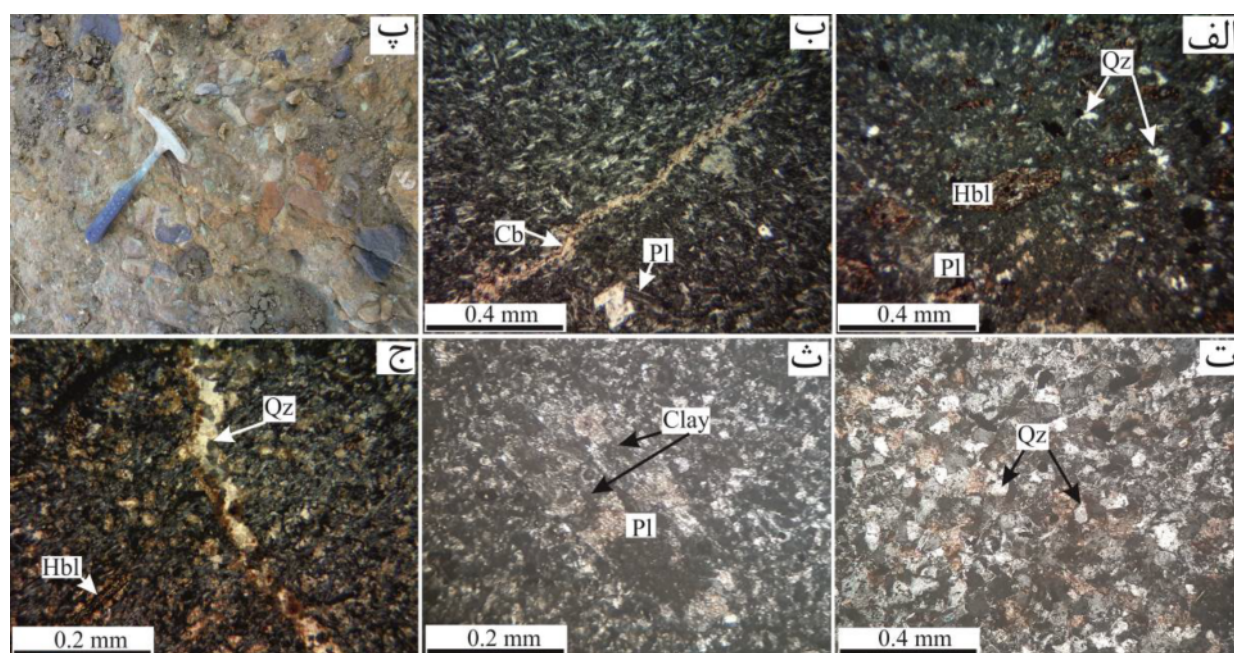
برای بررسی سیالات درگیر، تعداد ۵ مقطع دوبرصیقل از کانی‌های باریت، کوارتز و کلسیت تهیه شد. آزمایش‌های لازم توسط یک دستگاه سرد کننده و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرمایش و گرمایش کردن $\pm 1^{\circ}\text{C}$ و گستره دمایی دستگاه ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد است. مقدار شوری در سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با استفاده از نرم افزار تعبیه شده در سیستم اکسل HOKIEFLINCS- $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [۱۱] محاسبه شد. سپس، نمودارهای مناسب در نرم افزار SPSS رسم شدند.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

پس از تشکیل و جایگیری مجموعه افیولیتی سبزوار و ادامه فروانش پوسته اقیانوسی نفوتتیس سبزوار به زیر صفحه توران، فعالیت‌های ماگمایی از اوایل ائوسن آغاز شد و به دلیل تداوم فروانش پوسته اقیانوسی و هضم آن، آخرین فرآورده‌های ماگمایی آن تا پلیو-پلیستوسن فوران داشته است. این امر باعث تشکیل کمان ماگمایی قوچان-سبزوار شد. سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی کمان بر اساس بررسی های علوی [۳] به سه گروه سنگ‌های آذرین حدواسط ائوسن، سنگ‌های اسیدی الیگوسن-پلیوسن و سنگ‌های قلیایی میوسن-پلیستوسن (بازالت قلیایی و شوشونیت) تقسیم می‌شود. سن سنگ‌های آذرین این کمان از ائوسن در جنوب (در نزدیکی افیولیت



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه مشکان.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از واحدهای سنگی و دگرسانی منطقه اکتشافی باریت مشکان. الف) واحد آندزیت با هورنبلندهای اپاسیتی شده، ب) واحد تراکی آندزیت دارای رگچه‌های کربناته، پ) رخنمون واحد کنگلومرای در صحرا، ت) واحد ماسه‌سنگی، ث) دگرسانی آرژلیک در واحد آندزیتی، ج) کوارتز به صورت رگچه‌ای و پراکنده در واحد آندزیتی. تصاویر میکروسکوپی در XPL گرفته شده است. اختصارات: Qz = کوارتز، Hbl = هورنبلند، Pl = پلاژیوکلاز، Cb = کربنات [۱۴].

دگرسانی و کانی‌سازی

کانی‌سازی رگه‌ای باریت در منطقه کنترل گسلی داشته و راستای این رگه‌ها بیشتر شمال‌غرب-جنوب شرقی است و تعداد کمی نیز راستای شمالی-جنوبی دارند. شیب رگه‌ها اغلب ۱۰ تا ۶۰ درجه به سمت جنوب و گاهی به سمت شمال است. عرض این رگه‌ها ۳ تا ۱۰ متر و طول آنها از ۲۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است. سنگ میزبان رگه‌ها بیشتر واحد کنگلومرای و کمتر واحد ماسه‌سنگی است.

دگرسانی در لبه رگه‌ها بسیار محدود بوده و اغلب تا فاصله چند متری از رگه قابل دیده است. دگرسانی‌های لبه رگه شامل آرژلیک (شکل ۳ ث)، سیلیسی (شکل ۳ ج) و کربناتی است. در واحد کنگلومرای، دگرسانی‌ها بیشتر بر قطعه‌های این واحد اثر گذاشتند و تفاوتی از نظر شدت دگرسانی و جنس قطعه‌ها دیده نشد. گفتنی است که قطعه‌های سیلیسی در این واحد بدون دگرسانی هستند. دگرسانی آرژلیک در لبه رگه و سنگ میزبان کانی‌سازی شناسایی شد. در این دگرسانی، فلدسپارها بیشتر (۱۰ تا ۱۵ درصد) به کانی‌های رسی (شکل ۳ ث) و کمتر (۳ تا ۵ درصد) به سرسیت تبدیل شده‌اند. دگرسانی سیلیسی شامل شکل‌گیری کوارتز همراه با کانی‌سازی باریت

واحد تراکی آندزیتی نیز گسترش بسیار کمی در غرب منطقه دارد (شکل ۲). این واحد بافت پورفیری تا تراکیتی دارد و کانی‌های تشکیل دهنده آن شامل ۲۰ تا ۲۵ درصد پلاژیوکلاز، ۵ تا ۱۰ درصد فلدسپار قلیایی و ۸ تا ۱۰ درصد هورنبلند هستند (شکل ۳ ب).

واحد کنگلومرای بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارد (شکل ۲) و سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی است. این واحد شامل قطعه‌هایی با اندازه چند میلی‌متر تا حدود ۲۰ سانتی‌متر و گرد شدگی خوب تا متوسط است (شکل ۳ پ). جنس قطعه‌های واحد کنگلومرای متفاوت است و اغلب سیلیسی با گرد شدگی بسیار خوب تا آتشفشانی چون آندزیت و تراکی آندزیت هستند.

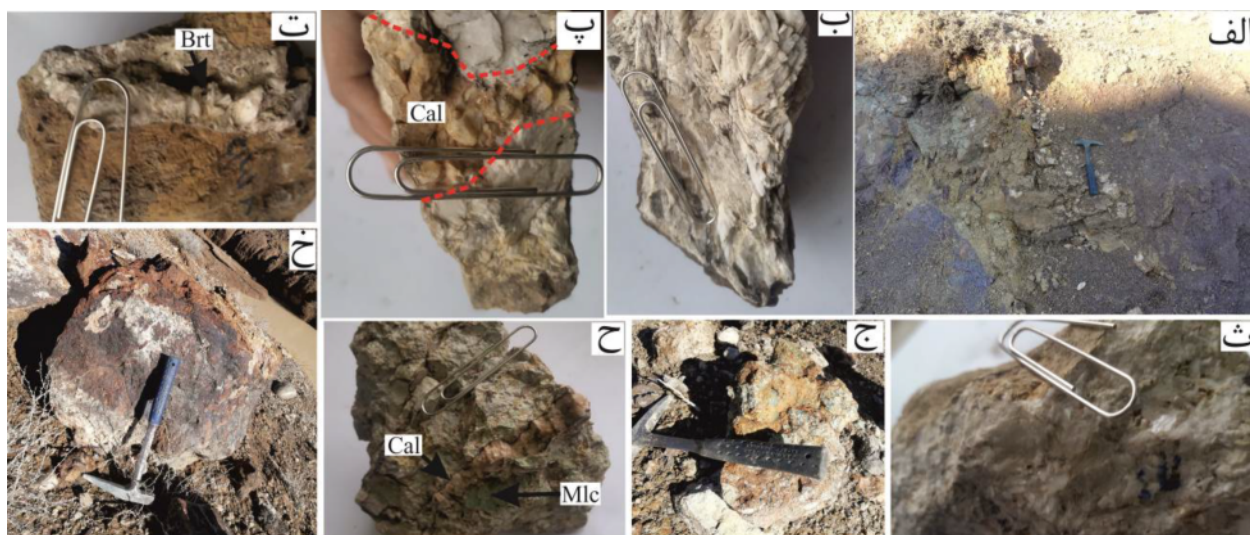
واحد ماسه‌سنگی در شمال و جنوب منطقه گسترش یافته است (شکل ۲). این واحد به رنگ قرمز تا نخودی بوده و بیشتر از کوارتز و کمتر کربنات و فلدسپار تشکیل شده است (شکل ۳ ت). همچنین، واحدهای آهک با میان لایه‌های شیل به رنگ نخودی در شمال منطقه و شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ به رنگ خاکستری تا سبز در شمال‌شرق و جنوب‌شرق منطقه رخنمون دارند (شکل ۲).

تقسیم نمود (شکل ۴). در رگه‌های باریت+کوارتز، باریت دارای بافت‌های پرکننده فضای خالی، توده‌ای، صفحه‌ای و شعاعی است (شکل‌های ۵ الف تا ث) و همچنین به صورت رگچه‌ای در شکستگی‌های واحدهای کنگلومرای دیده می‌شود. در بعضی نمونه‌های دستی، بلورهای کانی باریت به صورت سوزنی شکل با اندازه‌های ۱ تا ۲ سانتی متر دیده شد. باریت بیش از ۹۰ درصد رگه‌ها را دربر گرفته است.

است. این کوارتزها به اندازه چند ده میکرون تا ۲ میلی‌متر، اغلب به صورت پراکنده در زمینه سنگ یا رگچه‌ای شکل گرفته‌اند (شکل ۳ ج). دگرسانی کربناتی شامل رگه و رگچه-های کلسیتی است. این رگه و رگچه‌ها (شکل ۳ ب) در قسمت‌هایی رگه‌های دربردارنده کانی‌سازی را قطع نموده‌اند. کلسیت به صورت شکل‌دار و به اندازه ۰/۲ تا ۵ میلی‌متر است. کانی‌سازی در منطقه باریت مشکان را می‌توان به دو مرحله کانی‌سازی اصلی (باریت+کوارتز) و فاز تاخیری (کلسیت)

کانی ها	مرحله کانی سازی اولیه	مرحله تاخیری	زون اکسیدی
پیریت	-----		
کوارتز	-----		
باریت	—————		
کلسیت		—————	
کانی رسی	———		
سرسیت	———		
هماتیت			
گوتیت			
مالاکیت			
آزوریت			

شکل ۴ توالی همبری کانی‌سازی در منطقه اکتشافی باریت مشکان.



شکل ۵ تصاویر صحرایی و نمونه دستی از کانی‌سازی منطقه اکتشافی باریت مشکان. الف) رخنمون رگه باریت در صحرا، ب) باریت با بافت صفحه-ای، پ) باریت با بافت صفحه‌ای که توسط رگه کلسیتی قطع شده، ت) باریت با بافت شعاعی، ث) باریت با بافت توده‌ای، ج) آزوریت همراه با اکسید آهن در واحد کنگلومرای، ح) کانی‌سازی مالاکیت در واحد کنگلومرای که توسط رگچه کلسیتی قطع شده است، خ) اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت). اختصارات: Cal = کلسیت، Brt = باریت، Mlc = مالاکیت [۱۴].

پیریت در اثر اکسایش به صورت پراکنده، رگچه‌ای و بافت گل کلمی دیده می‌شود.

زمین شیمی باریت و رگه‌ها

توزیع عناصر در واحدهای سنگی و بررسی وابستگی آنها به هم، از مهم‌ترین موارد بررسی‌های زمین‌شیمیایی است که با استفاده از آن می‌توان به محیط و فرایندهای اثرگذار در پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی پی برد [۱۵، ۱۶].

شیمی باریت: بر اساس نتایج تجزیه‌ها، (جدول ۱) مقدار Sr باریت در رگه‌ها از ۰/۵۲ تا ۲/۲۷ درصد متغیر است که این مقدار برابر با ۱/۰۹ تا ۴/۷۹ درصد SrSO_4 است. این مقدار SrSO_4 نشان می‌دهد که باریت‌های مشکان در سری انحلال جامد باریت- سلسیت وابسته به عضو نهایی باریت هستند. مقدار Ba نیز از ۲۱/۲۷ تا ۵۵/۱۸ درصد متغیر است. مقدار SiO_2 از ۲/۴۶ تا ۴۴/۸ درصد بوده که مربوط به حضور کوارتز در این رگه‌هاست. مقدار CaO از ۰/۱۵ تا ۲۸ درصد است که بستگی به مقدار کلسیت در رگه‌ها دارد. مقدار TiO_2 کمتر از ۰/۶۲ درصد است. مقدار کم TiO_2 اغلب در باریت‌های گرمایی دیده می‌شود (در شرایط گرمایی، کمتر از ۱ دصد)، زیرا در این نوع ذخایر عناصر گرمایی اغلب غنی شده و مواد Ti دار کمتری وارد می‌شوند [۱۷]. مقدار Fe_2O_3 در رگه‌ها نیز از ۰/۴۲ تا ۷/۳۶ درصد متغیر بوده که به دلیل حضور اکسیدهای آهن در رگه‌هاست.

پیریت در رگه و رگچه‌ها شناسایی نگردید، اما غالب پیریت که به طور کامل به گوتیت تبدیل شده در بعضی رگه‌ها دیده شد. تنها باطله همراه با کانی‌سازی کوارتز است. شکل‌گیری کوارتز به لبه رگه و سنگ دیواره محدود است. کوارتز با بافت پر کننده فضای خالی و اندازه ۲۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر، درهم‌رشدی با کانی باریت و یا پراکنده در سنگ میزبان با اندازه ۲۰ تا ۵۰ میکرون شناسایی شد. همچنین، کوارتزهای نهان بلورین به صورت پرکننده فضای خالی شناسایی گردیدند. کوارتز کمتر از ۵ درصد رگه‌ها را تشکیل می‌دهد.

رگه و رگچه‌های کلسیتی در بعضی قسمت‌ها رگه‌های باریت+کوارتز منطقه را قطع نموده‌اند (شکل‌های ۵ پ و ج). کلسیت به صورت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار با اندازه ۰/۲ تا ۳ میلی‌متر در رگه‌هایی به عرض ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر شکل گرفته است. اندازه این کانی در رگچه‌های کلسیتی، بین چند ده میکرون تا ۱ میلی‌متر است.

کانی‌های ثانویه مس‌دار شناسایی شده در منطقه شامل آزوریت و مالاکیت هستند. این کانی‌ها بیشتر در حفره‌ها و درز و شکستگی‌ها شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۵ ج و ح) و شواهدی از کانی‌های سولفیدی به صورت باقیمانده دیده نشد. اکسیدهای آهن در اثر اکسایش و هوازدگی کانیهای اولیه شکل گرفته‌اند. اکسیدهای آهن در سطح بیشتر به صورت آغستگی در سطح رگه‌ها و کمتر به صورت رگچه‌ای شناسایی شدند (شکل ۵ خ). گوتیت اکسید آهن اصلی ناشی از جان‌نشینی

جدول ۱ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین شیمیایی مورد بررسی به روش XRF در منطقه‌های باریت مشکان [۱۰] (برحسب درصد).

Sample .N	49208	49209	49210	49211	49212	49213	49214	49215	49216	49217
BaO	۳۳/۳	۲۳/۹	۴۸/۹	۵۶/۴	۳۶	۶۰/۳	۴۹/۶	۴۵/۶	۳۷/۶	۵۲/۲
SO ₃	۱۷/۹	۱۲/۹	۲۶/۳	۳۱/۵	۱۹/۶	۳۲/۸	۲۶/۶	۲۵/۳	۲۰/۴	۲۷/۸
SrO	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۹۹	۲/۷۱	۱/۰۷	۱/۷۱	۰/۹۹	۱/۹۸	۱/۰۱	۰/۷۴
SiO ₂	۱۶	۳/۷۳	۱۱/۰۲	۲/۴۶	۷/۱۸	۲/۶۳	۱۵/۱۲	۸/۷۱	۲۱/۳۱	۱۱/۱۵
TiO ₂	۰/۴۶	۰/۲۶	۰/۵	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۵۸	۰/۵۳
Fe ₂ O ₃	۴/۹۴	۵/۳۳	۵/۱۲	۳/۹۴	۷/۳۶	۰/۴۲	۲/۰۸	۴/۷	۵/۵۷	۴/۶۴
CaO	۳/۲۹	۲۸	۲/۴۸	۰/۳۸	۱۲/۴	۰/۴۴	۲/۸۸	۱/۲۱	۲/۴۴	۰/۱۵
MgO	۱۷/۳۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۲۷	۲/۲۵	۰/۱۹	۰/۴۳	۸/۹۱	۴/۹۸	۰/۴۲
CuO	-	۰/۰۲	-	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳
LOI	۵/۰۲	۲۴/۲	۳/۴۷	۱/۰۴	۱۲/۴	۰/۴۵	۰/۵	۲/۲۳	۲/۳۷	۱/۳۳
نتایج محاسبه شده										
Ba	۲۶/۶۳	۲۱/۲۷	۴۳/۵۲	۵۰/۱۹	۳۲/۰۴	۵۳/۶۶	۴۴/۱۴	۴۴/۵۸	۳۳/۴۶	۴۶/۴۵
Sr	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۸۳	۲/۲۷	۰/۸۹	۱/۴۳	۰/۸۳	۱/۶۶	۰/۸۴	۰/۶۲
SrSO ₄	۱/۱۶	۱/۰۹	۱/۷۵	۴/۷۹	۱/۸۹	۳/۰۲	۱/۷۵	۳/۵	۱/۷۸	۱/۳

(مرحله کانی‌سازی) و کلسیت (مرحله تاخیری) انجام شد. بر این اساس، اغلب سیال‌های درگیر در نمونه‌ها بی‌شکل تا شکل-دار و به صورت مخروطی و به مقدار کمتر میله‌ای هستند. اندازه سیال‌های درگیر بررسی شده حدود ۴ تا ۱۲ میکرون است. بر اساس تقسیم‌بندی‌های متداول [۱۹، ۱۸]، این سیال‌ها از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) و بسیار کمتر تک فاز مایع (L) هستند (شکل ۶).

دمای همگن‌شدگی (Th) برای سیال‌های درگیر از کوارتز نسل اول ۳۱۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد، کوارتز نسل دوم ۱۷۵ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد، باریت ۱۸۱ تا ۲۰۴ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۹۴/۳ درجه سانتی‌گراد و کلسیت ۱۵۸ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۳ و شکل ۷ الف).

زمین‌شیمی رگه‌ها: مقدار مس و سرب به ترتیب از ۲ تا ۱۱ گرم در تن (با میانگین ۵/۵ گرم در تن) و ۶ تا ۹۰ گرم در تن (با میانگین ۲۵/۲ گرم در تن) است (جدول ۲). بیشترین مقدار مس مربوط به حضور کانی‌های ثانویه مالاکیت و آزوریت در رگه‌هاست. مقدار نقره در رگه‌ها بسیار ناچیز و کمتر از ۰/۵۳ گرم در تن است. مقدار روی در نمونه‌های برداشت شده از محل رگه‌ها بین ۲۸ تا ۳۹۴ گرم در تن (با میانگین ۱۴۳/۳۳ گرم در تن) متغیر است (جدول ۳). همچنین مقدار آنتیموان نیز در رگه‌ها بین ۱ تا ۵۲ گرم در تن و مقدار طلا کمتر از ۵ میلی-گرم در تن است (جدول ۳).

سیال‌های درگیر

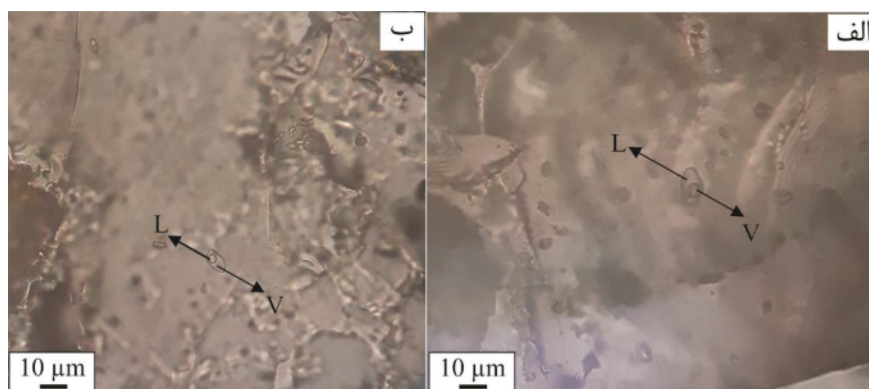
دماسنجی به روش گرمایش و تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری به روش سرمایش بر سیال‌های درگیر کانی‌های کوارتز و باریت

جدول ۲ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی خرده سنگی منطقه باریت مشکان به روش ICP-OES (برحسب ppm).

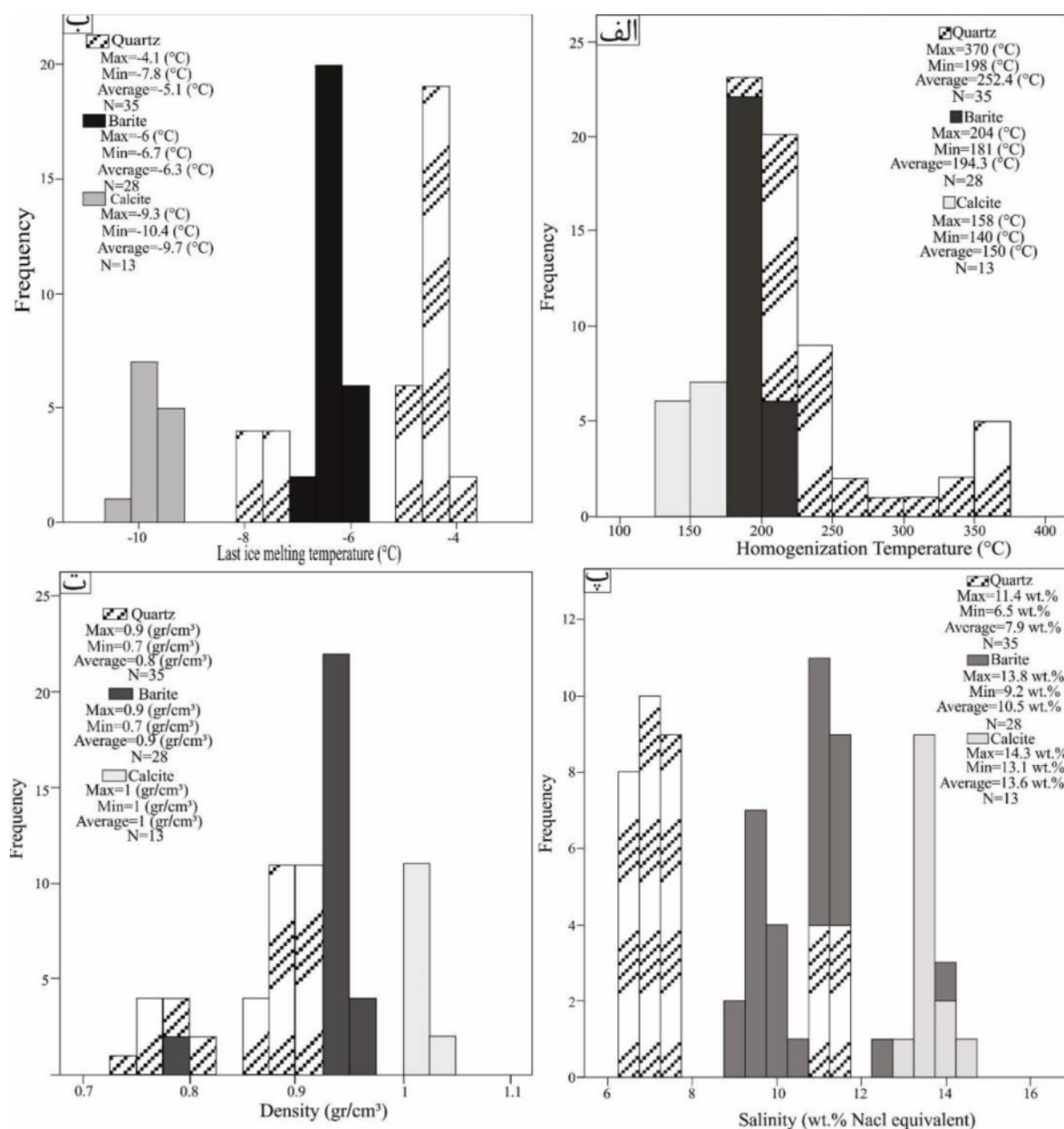
A-13C	A-12C	A-10C	A-06C	A-05C	A-04C	A-03C	A-02C	A-01C	Sample N
۵۳	۴۱	۴۶	۲۸	۴۷	۴۳	۳۷	۴۴	۴۱	Ag (ppm)
۲/۲	۱/۶	۱/۳	۲/۳	۱/۴	۱/۹	۱/۸	۲/۵	۲	As (ppm)
۴۶۸۶	۲۲/۸	۱۹/۴	۱۳/۲	۷۴/۳	۲/۳	۳/۷	۳۴۰/۸	۲۱۲۶	Ba (ppm)
۲	۵	۳	۵	۶	۵	۷	۶	۱۱	Cu (ppm)
۹۰	۷	۶	۲۱	۶	۷	۱۷	۶۷	۶	Pb (ppm)
۱۹/۵	۱/۳	۱/۳۱	۲۷/۹	۲۷	۵۲/۴	۱۷/۶	۹/۶	۱/۲	Sb (ppm)
۲۷۳	۳۰	۲۸	۲۸۴	۸۹	۶۴	۱۰/۱	۳۹۴	۲۸	Zn (ppm)

جدول ۳ نتایج بررسی‌های سیال‌های درگیر اولیه (P) در کانی‌های کوارتز، باریت و کلسیت در رگه‌های باریت منطقه مشکان.

شماره نمونه	کانی میزبان	تعداد	Th (°C)	Tm-ice (°C)	شوری (wt.%NaCl)	چگالی (gr/cm ³)
Mb36	کوارتز	۱۵	۱۹۸ تا ۲۲۴	-۴/۱ تا -۴/۷	۶/۴ تا ۷/۵	۰/۹۲ تا ۰/۸۹
Mb 30	کوارتز	۲۰	۲۲۸ تا ۳۷۰	-۴/۲ تا -۷/۸	۱۱/۴ تا ۶/۷	۰/۸۷ تا ۰/۷۳
Mb 32	باریت	۱۴	۱۸۱ تا ۲۰۴	-۶/۱ تا -۶/۷	۱۳/۸ تا ۹/۲	۰/۷۹ تا ۰/۹۵
Mb 38	باریت	۱۴	۱۸۷ تا ۲۰۰	-۶/۵ تا -۶/۳	۱۳/۶ تا ۱۰/۱	۰/۹۰ تا ۰/۷۱
Mb37	کلسیت	۱۳	۱۵۸ تا ۱۴۰	-۹/۳ تا -۱۰/۴	۱۴/۳ تا ۱۳/۱	۱ تا ۱/۰۲



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از سیال‌های درگیر دوفازی (LV) در (الف) کوارتز و (ب) باریت.



شکل ۷ نمودارهای الف) دمای همگن‌شدگی، ب) دمای آخرین ذوب یخ، پ) مقدار شوری و ت) چگالی سیال‌های درگیر در رگه‌های باریت منطقه باریت مشکان.

است. مقدار T_{fm} بدست آمده بیانگر حضور نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در سیال کانه‌سازی است.

دمای نهایی ذوب (T_m) نیز مقدار شوری را مشخص می‌کند. دمای نهایی ذوب برای کوارتز نسل اول ۵/۲- تا ۴/۱- درجه سانتی‌گراد، برای کوارتز نسل دوم ۷/۸- تا ۷/۵- درجه سانتی‌گراد، برای باریت ۶/۷- تا ۶- درجه سانتی‌گراد و برای

نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمایی دارد [۱۹، ۱۸]. نخستین دمای ذوب‌شدگی در این سیال‌ها در گستره ۵۳/۸- تا ۵۲- درجه سانتی‌گراد برای کوارتز نسل اول، ۵۳/۴- تا ۵۲- درجه سانتی‌گراد برای کوارتز نسل دوم، ۵۳/۶- تا ۵۲/۳- درجه سانتی‌گراد برای باریت و ۵۳- تا ۵۲/۱- درجه سانتی‌گراد برای کلسیت

کلسیت ۱۰/۴- تا ۹/۳- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۳ و شکل ۷ ب).

مقدار شوری براساس سامانه NaCl-H₂O [۱۸] برای سیال‌های درگیر از کوارتز نسل اول بین ۱۰/۵ تا ۱۲ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۱/۸۹ درصد وزنی NaCl، کوارتز نسل دوم بین ۶ تا ۸ درصد وزنی NaCl با میانگین ۷/۶ درصد وزنی NaCl، نوع باریت بین ۹/۲ تا ۱۳/۸۳ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۰/۵۱ درصد وزنی NaCl و برای نوع کلسیت بین ۱۳/۱۷ تا ۱۴/۳۵ درصد وزنی NaCl با میانگین ۱۳/۶۲ درصد وزنی NaCl متغیر است (جدول ۳ و شکل ۷ پ).

چگالی این سیال‌ها بر پایه سامانه NaCl-H₂O [۲۰] ۰/۸۵ تا ۰/۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای کوارتز نسل اول، ۰/۷۲ تا ۰/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰/۷۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای کوارتز نسل دوم، ۰/۷۱ تا ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای نوع باریت و ۱ تا ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب با میانگین ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای نوع کلسیت است (جدول ۳ و شکل ۷ ت).

بحث

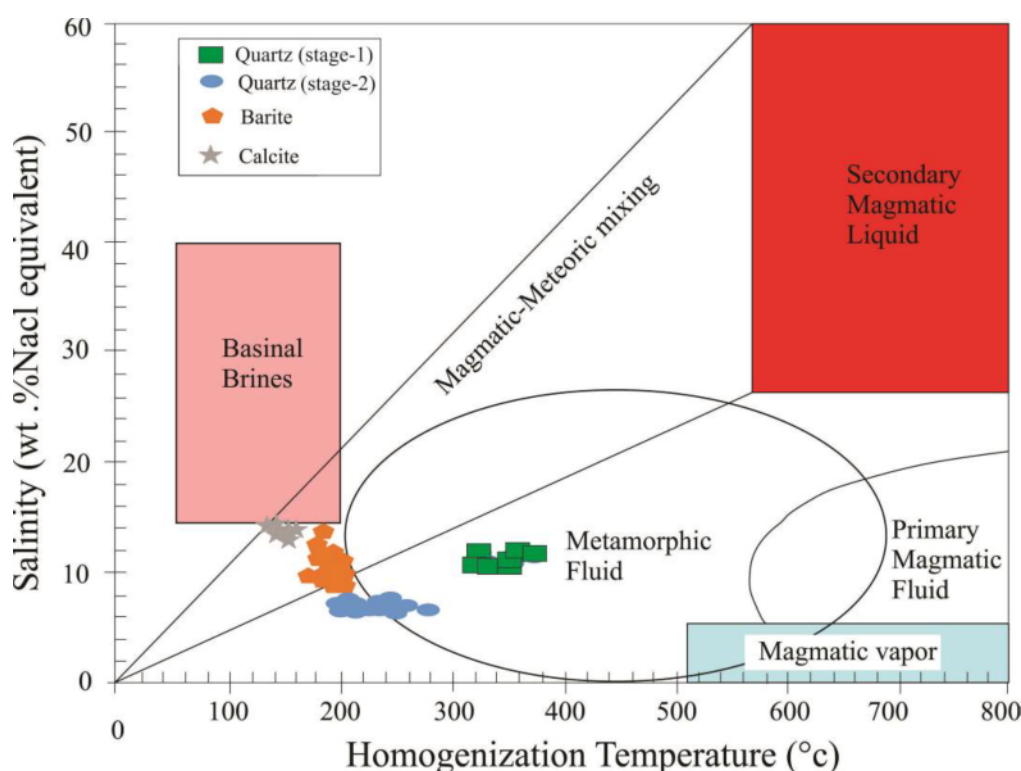
نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر برای محیط آب‌های مختلف (شکل ۸) نشان می‌دهد که سیال‌های درگیر باریت و کلسیت در منطقه مشکان در گستره آمیختگی آب ماگمایی و آب‌های جوی و کوارتز در محیط آب‌های دگرگونی قرار دارند. از آنجا که آثار دگرگونی ناحیه‌ای در این منطقه وجود ندارد، فرضیه دخالت آب دگرگونی در حمل فلزات رد می‌شود. بنابراین می‌توان محلول کانه‌دار را آمیزه‌ای از آب ماگمایی و آب جوی در نظر گرفت.

آنچه در نمودار شوری-دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر مورد توجه است، دو دسته شدن سیال‌ها با روند خطی مستقیم در کانی کوارتز است این امر نشان می‌دهد که دو نوع کوارتز در منطقه وجود دارد که از دو سیال با دما و شوری متفاوت تشکیل شده‌اند. دمای همگن شدگی و شوری سیال‌های درگیر برای نسل اول کوارتز به ترتیب ۳۱۰ تا ۳۷۵ درجه

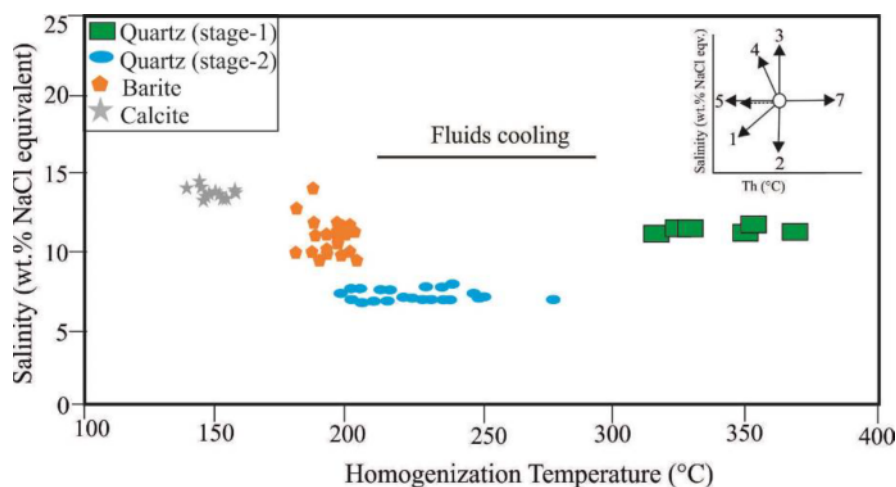
سانتی‌گراد و ۱۰/۵ تا ۱۲ درصد وزنی نمک طعام اندازه‌گیری شد. این مقادیر برای سیال‌های درگیر مربوط به کانی کوارتز نسل دوم ۱۷۵ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۶ تا ۸ درصد وزنی نمک طعام است (جدول ۳ و شکل ۹).

سیال‌ها در کانی‌های باریت نسبت به کوارتز دمای همگن شدگی کمتر و شوری بیشتری را نشان می‌دهند و کمترین دمای همگن شدگی (۱۴۰ تا ۱۵۸ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین شوری (۱۳/۱۷ تا ۱۴/۳۵ درصد وزنی نمک طعام) در سیال‌های درگیر مربوط به کانی کلسیت در مرحله تاخیری است (شکل ۹). این شواهد نشان می‌دهد که همزمان با کاهش دما و افزایش شوری، نخست کانی‌سازی باریت و کلسیت در رگه‌ها شکل گرفته است. افزایش شوری در سیال‌های درگیر می‌تواند به فرایندهایی چون جوشش یا آمیختگی با سیالی با دمای یکسان و شوری بیشتر مربوط باشد. از آنجاکه شواهد جوشش در سیال‌های درگیر (مانند وجود سیال‌های دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار) دیده نشد، آمیختگی با سیالی با شوری بیشتر که می‌تواند برآمده از آب‌های شور حوضه‌ای باشد را می‌توان به عنوان عامل مهم در ته‌نشست کانی‌ها در مرحله شکل‌گیری کانی‌سازی باریت و کلسیت دانست. همچنین توالی کانیایی در کانی‌سازی‌های رگه‌ای در منطقه مشکان نشان دهنده تغییر کانی‌های رسی (دگرسانی آرژیلیک) به کانی‌سازی اصلی همراه با کوارتز و باریت و سرانجام رگه و رگچه‌های تاخیری کلسیت است. تغییرات در مجموعه همبری نشان دهنده تکامل محلول گرمایی از شرایط pH اسیدی به قلیایی است.

کانسارهای باریت گرمایی در دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرند [۲۱-۲۳]. شوری در این سامانه‌ها دارای گستره‌ای از نزدیک به آب دریا (۳/۲ درصد وزنی نمک طعام [۲۴]) تا مقادیر بیش از آن است. کانسار باریت مشکان از نظر دمایی و شوری مشابه باریت‌های گرمایی است. همچنین، چنان که پیشتر نیز اشاره شد، مقادیر پایین TiO₂ (کمتر از ۱ درصد) در این کانسار مشابه کانسارهای باریت گرمایی است.



شکل ۸ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری در سیال‌های درگیر منطقه مشکان (محیط‌های تعریف شده بر گرفته از مرجع [۲۵] هستند).



شکل ۹ نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر منطقه مشکان. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری برگرفته از مرجع [۱۹] هستند (روند ۱=مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روندهای ۲ و ۳=مخلوط شدگی سیال A با سیال‌های 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).

برداشت

به سن ائوسن (کنگلومرا و ماسه‌سنگ) انجام شده است. کانی-شناسی رگه‌ها بسیار ساده (باریت، کوارتز و کلسیت) و از نظر زمان شکل‌گیری جوانتر از ائوسن هستند. بیشترین بی‌هنجاری-های زمین‌شیمی در رگه‌ها برای روی ۳۹۴ گرم در تن،

بر پایه بررسی‌های انجام شده در منطقه اکتشافی باریت مشکان، کانی‌سازی به صورت رگه‌ای (با راستای بیشتر شمال-غربی-جنوب‌شرقی و کمتر شمالی-جنوبی) در واحدهای رسوبی

northeastern Iran", Geological Society of American Bullitan 103 (1991) 983-992.

[4] 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.

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

[6] 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.

[7] Fatehi H., "Geology, mineralization, and geochemistry of Jalambadan prospect area, NW Sabzevar", Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2013) 240p.

[8] 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)", Iraniaian Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (24) (2016) 131-144.

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

[10] Yazarlo M.A., "Report of the end of Operation Barite Meshkan", (2014) 111p.

[11] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., "HOKIEFLINCS-H₂O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O-NaCl", Computer in Geosciences 49 (2012) 334-337.

[12] Rutherford M. J., Devine, A. D., "Magmatic conditions and magma ascent as indicated by Hornblende phase equilibria and reaction in the 1995-2002, Soufriere Hills Magma", Petrology 44 (2003) 1433-1484.

[13] Pearce T. H., Russell J. K., Wolfson I., "Laser-interference and normarski interference

آنتیموان ۵۲ گرم در تن و سرب ۹۰ گرم در تن است. اغلب سیال‌های درگیر در نمونه‌های کوارتز، باریت و کلسیت بی‌شکل تا شکل‌دار (مخروطی و به مقدار کمتر میله‌ای) و با اندازه حدود ۴ تا ۱۲ میکرون هستند. کمترین دمای تشکیل باریت ۱۸۱ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد بوده و از محلولی دربردارنده نمک‌های NaCl و CaCl₂، با شوری ۶ تا ۱۳/۶ درصد وزنی نمک طعام ایجاد شده است. همزمان با کاهش دما در سیال‌ها، شوری آنها نیز افزایش یافته است (سیال‌ها در کانی‌های باریت و کلسیت). به نظر می‌رسد که کاهش دما و آمیختگی با سیالی با شوری بالا (که می‌تواند برآمده از آب‌های شور حوضه‌ای باشد) می‌توانند مهمترین عوامل شکل‌گیری کانی‌سازی باشند. کنترل ساختاری، کانی‌شناسی ساده، بافت، زمین‌شیمی و نتایج سیال‌های درگیر نشان از شکل‌گیری باریت در شرایط گرمایی دارد. توده مربوط به کانی‌سازی در منطقه شناسایی نشد. بنابراین این احتمال وجود دارد که توده عامل کانی‌سازی در عمق یا در فاصله‌ای دورتر از منطقه مورد بررسی باشد. داده‌های زمین‌شیمیایی بی‌هنجاری عناصری چون آنتیموان، روی و سرب را در رگه‌های باریت نشان می‌دهد. به احتمال بسیار، با توجه به بی‌هنجاری‌های آنتیموان، سرب و روی منطقه مورد بررسی در بخش لبه‌ای و بالایی از یک سامانه کانی‌سازی هستند و محلول ماگمایی در عمق کانی‌سازی را کنترل می‌کند.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح شماره ۳/۴۹۱۱۷ مورخ ۱۳۹۸/۲/۳ انجام شده است. از سرکار خانم محبوبه مرادی، آقایان حجت غلامی و علی حسینی برای همراهی در پی‌جویی‌های صحرایی، جناب آقای مهندس علی تنها برای در اختیار قرار دادن اطلاعات اولیه و جناب آقای ابراهیم عاشق برای در اختیار گذاشتن منزل جهت اسکان در منطقه کمال تشکر را داریم.

مراجع

- [1] Ghorbani M., "The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources", Springer, New York (2013).
- [2] USGS., "Barite (Advance Release)", US Geol Surv Miner Yearb-2009 (2011).
- [3] Alavi M., "Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in

homogenize by halite disappearance", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 92 (2012) 14-22.

[21] Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., von Stackelberg U., Petersen S., "Goldrich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific", *Econ Geol* 88 (1993), 2182-2209.

[22] de Ronde C.E.J., Faure K., Bray C.J., Chappell D.A., Wright I.C., "Hydrothermal fluids associated with seafloor mineralization at two southern Kermadec arc volcanoes, offshore New Zealand", *Miner Deposita* 38 (2003), 217-233.

[23] Petersen, S., Herzig, P.M., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M.D., Jonasson, I.R., *Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica*", *Miner Deposita* 39 (2004), 358-379.

[24] Bischoff, J.L., Rosenbauer, R.J., "The critical point and two-phase boundary of seawater, 200–500 °C", *Earth Planet Sci Lett* 68 (1984), 172-180.

[25] Bean, R.E., "The magmatic-meteoritic transition", *Geothermal Resources Council, Special Report* 13 (1983), 245-225.

imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington", *American Mineralogist* 72 (1987) 1131-1143.

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

[15] Seward T.M., Barnes H.L., "Metal transport by hydrothermal ore fluids", *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* 3 (1997) 435-486.

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

[17] Lottermoser B.G., Ashley P.M., "Geochemistry and exploration significance of ironstones and barite-rich rocks in the Proterozoic Willyama Supergroup, Olary Block, South Australia", *Journal of Geochemical Exploration* 57 (1996) 57–73.

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

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

[20] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis, M., Bodnar, R.J., "A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that