مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و نهم، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۰، از صفحهٔ ۶۵۱ تا ۶۶۲

انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و سیال‌های درگیر واحدهای آتشفشانی در منطقه اکتشافی بوژان، شمال‌شرق نیشابور

حمید حافظی مقدس[۱]، سید مسعود همام*[۱]، هادی شفایی مقدم[۲]

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

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۸/۲۶، نسخه نهایی: ۹۹/۱۰/۲۷)

چکیده: منطقه بوژان در شمال‌شرق ایران در امتداد رشته کوه‌های البرز قرار دارد و بخشی از پهنه ساختاری بینالود محسوب می‌شود. زمین‌شناسی منطقه شامل گدازه‌های آندزیتی، تراکیتی، بازالتی و آندزی بازالتی بوده که همراه با توده‌های عمیق، نیمه‌عمیق و آذرآواری است و دستخوش دگرسانی پروپیلیتی نیز شده‌اند. کانی‌سازی بیشتر همراه رگچه‌های سیلیسی و کربناتی رخ داده است و دارای انواع بافت پرکننده فضاهای خالی، گل‌کلمی و برشی هستند. کالکوپیریت مهمترین و فراوانترین کانی سولفیدی است که به صورت اولیه درون این رگچه‌ها حضور دارد. بررسی سیال‌های درگیر بر رگچه‌های سیلیسی و کربناتی نشان‌دهنده‌ی حضور سیال‌های اولیه دوفازی غنی از مایع با شوری ۱۰٫۶۱ تا ۱۴٫۶۷درصد نمک طعام و دمای همگن‌شدگی حدود ۱۹۵ تا ۲۶۲ درجه سانتیگراد است. همچنین کاهش دما مهمترین عامل در ته‌نشینی فلزات همراه سیال کانسارساز در منطقه اکتشافی بوژان است. به طور کلی، کانی‌سازی در منطقه اکتشافی بوژان دارای روند رگه-رگچه‌ای منطبق با شکستگی‌های موجود است. بر پایه بررسی‌های صحرایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و بررسی سیال‌های درگیر، منطقه اکتشافی بوژان از سامانه‌های رگه‌ای فراگرمایی است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی؛ دگرسانی؛ سیال‌های درگیر؛ رگچه‌های سیلیسی-کربناتی؛ بوژان؛ نیشابور.*

مقدمه

رشته کوه‌های بینالود با روند تقریبی شمال غرب-جنوب شرق، بین صفحه مستحکم توران و خرد قاره ایران مرکزی قرار دارند. مرز جنوبی آن گسل میامی یا گسل شاهرود و حد شمال‌غربی آن را گسل سمنان می‌دانند. گسترش واقعی این پهنه در ایران بین نواحی شمال سبزوار و نیشابور تا مشهد است. این پهنه بخشی از البرز را شامل می‌شود که مشخصه‌های زمین‌شناسی ویژه‌ای دارد. واحد زمین‌شناسی بینالود را پهنه تدریجی بین ایران مرکزی و البرز درنظر می‌گیرند، زیرا رسوب‌ها و رخساره-های پالئوزوئیک آن شبیه البرز هستند. مجموعه آذرین و دگرگونی این پهنه که به ویژه درجنوب و غرب مشهد بیرون زدگی دارند، شامل سه فاز دگرگونی ناحیه‌ای و دو مرحله گرانیت‌زایی است و در آن توده‌های فرابازی نیز وجود دارند [۲،۱]. در مورد سن مجموعه‌های دگرگونی و آذرین نظرهای متفاوتی وجود دارد؛ برخی آن را به پرکامبرین و بعضی به ژوراسیک نسبت داده‌اند. البته، شواهد زمین‌شناسی و تعیین سن مطلق نشان داده است که فازهای دگرگونی و گرانیت‌زایی اولیه آن به فاز کوهزایی هرسی‌نین و بعدها در تریاس میانی در مجموع در معرض دگرگونی‌های سیمرین پیشین قرار گرفته‌اند.

از شاخص‌های مهم پهنه بینالود که کمتر مورد توجه قرار گرفته است سنگ‌های آتشفشانی هستند که با یک روند خطی از دره گرینه تا دره بوژان در شمال نیشابور گسترش یافته‌اند.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۷۰۳۱۴۱، پست الکترونیکی: homam@um.ac.ir

در نبود داده‌های سن‌سنجی برای این سنگ‌ها، براساس شواهد چینه‌شناسی می‌توان سن این مجموعه آتشفشانی-آذرآواری را اردویسین - سیلورین در نظر گرفت. در منطقه اکتشافی بوژان در کنار این مجموعه های سنگی، رگه‌های سیلیسی- کربناتی متعدد همراه با کانه‌زایی مس شناسایی شده است. در واقع تاکنون از این نظر بررسی جامعی در منطقه بوژان انجام نشده است. ازاین‌رو در این نوشتار، شواهدی از کانه‌زایی فلزی، نوع دگرسانی و نتایج بررسی میان‌بارهای سیال در منطقه بوژان ارایه می‌شود.

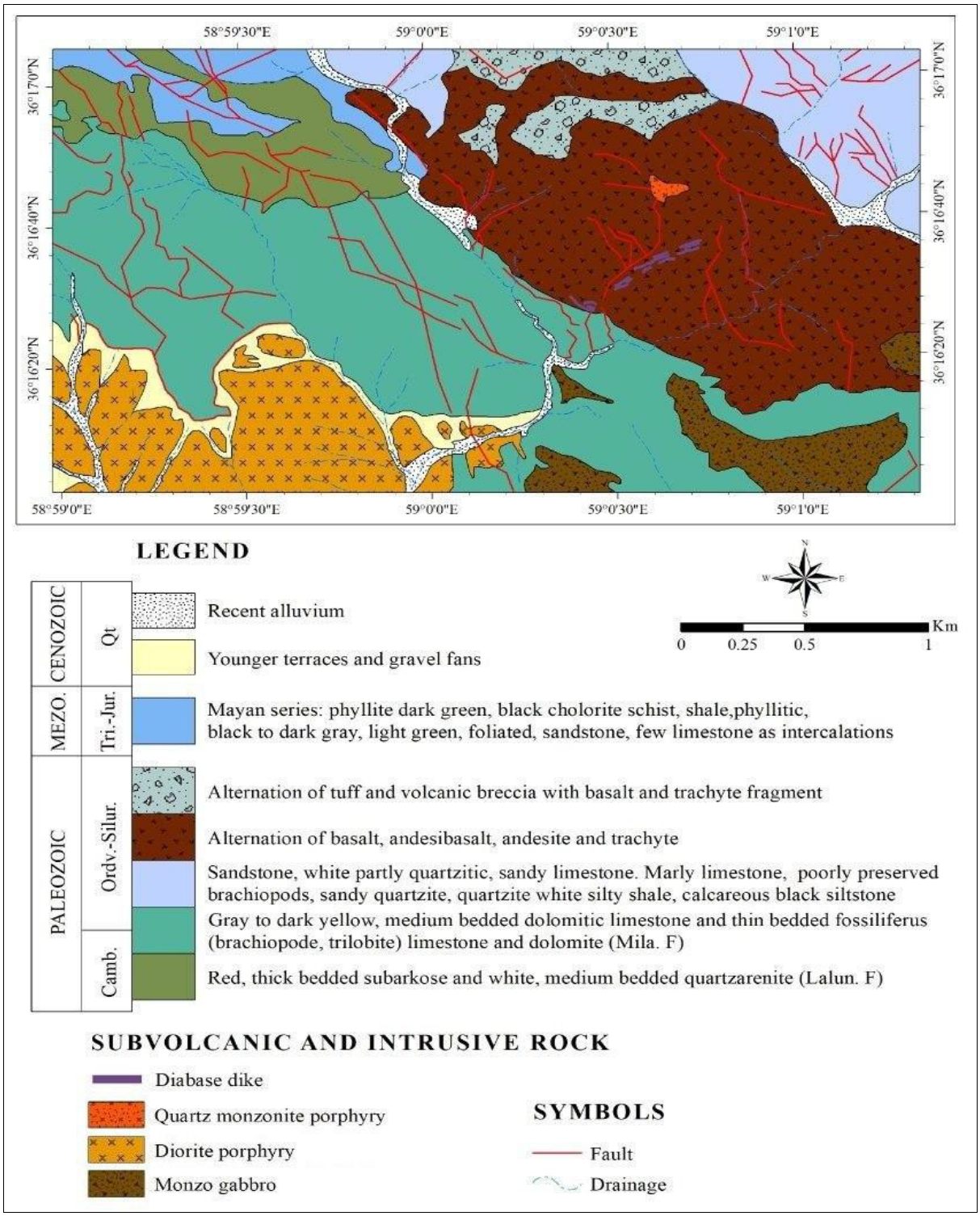
زمین‌شناسی عمومی

کوه‌های البرز در شمال ایران مشخص کننده محدوده برخورد در کمربند کوهزایی آلپ – هیمالیا محسوب می‌شوند که مانند پلی بین هندوکش و هیمالیا در شرق‌دور و خاورمیانه و لسر کاکاسوس و آلپ در مدیترانه و اروپا عمل می‌کنند [۳]. دگرگونی زمین‌ساختی کمربند کوهزایی البرز به فرورانش به سمت شمال پالئوتتیس به زیر اوراسیا در نظر گرفته شده که سرانجام منجر به برخورد بین خرد قاره ایران و صفحه اوراسیا گردیده است [۵،۴]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری پیرامون مجموعه افیولیتی و دگرگونی مشهد انجام شده است [۱، ۶-۹]. بر اساس بررسی‌های انجام شده، بقایای این پوسته اقیانوسی قدیمی را به بهترین وجه می‌توان در مجموعه افیولیتی مشهد مشاهده کرد. علوی [۴] سه گروه سنگی را در مجموعه افیولیتی مشهد تشخیص داد؛ گروه اول سنگ‌های افیولیتی تشکیل شده از پریدوتیت (با ترکیب ورلیت و لرزولیت)، پیروکسنیت، گابرو و بازالت با ساخت بالشی هستند که اغلب در جنوب-جنوب‌غرب مشهد و شمال‌غرب آن در دهکده ویرانی دیده می‌شوند. گروه دوم رسوب‌های دگرگون شده شامل مجموعه ضخیمی از فیلیت، اسلیت، شیست، مرمر، متا کنگلومراهای کربناتی و اولیستسترم‌ها هستند که ویژگی‌های رسوبی نهشته‌های توربیدیتی عمیق را به نشان می‌دهند. گروه سوم رخنمون‌های کمی از سنگ‌های آذرآواری دگرگون شده چون متاتوف و متالاپیلی‌توف به احتمال بسیار برآمده از فرایندهای آتشفشانی در شرایط خشکی بوده و نشانگر حضور یک قوس ماگمایی در کنار مکان تشکیل سنگ‌های دگرگونی هستند.

بر اساس سن سنجی به روش آرگون-آرگون برای گابروهای پهنه دگرگونی مشهد سنی معادل اواخر پنسیلوانین تا اوائل پرمین (۲۷۷٫۴ تا ۲۸۱٫۴ میلیون سال) برای آنها تعیین شده است [۳]. توده‌های گرانیتوئیدی مشهد با ترکیبی از دیوریت تا پگماتیت و آپلیت در سنگ‌های مجموعه دگرگونی جنوب مشهد نفوذ کرده‌اند. با بررسی زمین‌شیمی و سن‌سنجی سنگ‌های گرانیتوئیدی پهنه دگرگونی مشهد، سن ۴ ± ۲۱۷ میلیون سال برای گرانودیوریت‌های کوهسنگی و سن ۴ ± ۲۱۵ میلیون سال برای دیوریت‌های ده نو گزارش شده است [۲].

منطقه بوژان در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ طرقبه [۱۰] واقع است. به طور کلی، واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای رسوبی، سنگ‌های آتشفشانی، دایک‌های دیابازی و توده‌های نفوذی هستند (شکل ۱). واحدهای رسوبی در منطقه مورد بررسی شامل لای، کنگلومرا و آهک ماسه‌ای هستند (شکل ۱) که اغلب کوه‌های بلند بینالود را ساخته‌اند. این واحدها بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارند. بر اساس شواهد چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی وابسته به سیلورین و واحدهای کربناتی- کنگلومرایی مربوط به دونین هستند.

آغاز فعالیت آتشفشانی در سنگ‌های سیلورین– دونین در محیط دریایی کم ژرفا (دارای سنگواره مرجان) بوده است. اواخر پالئوزوئیک پسین، حوضه‌ای کم ژرفا وابسته به کرانه قاره منطقه را در برگرفته و به تدریج ژرفای این حوضه افزایش یافته است. به دلیل موقعیت ویژه زمین‌شناسی، پهنه ستبری از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آتشفشانی در پهنه بینالود وجود دارند [۱۱]. برپایه بررسی‌های صحرایی و ازمایشگاهی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه بوژان تهیه شد و بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، واحدهای آذرین منطقه به سه دسته کلی تقسیم می‌گردند (شکل ۱). آنهاعبارتند از ۱) واحدهای آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب حدواسط تا مافیک که در نیمه شرقی منطقه دارای راستای شمال غرب-جنوب شرق هستند، ۲) توده‌های عمیق و نیمه‌عمیق که یک روند مشخص از حدواسط تا مافیک را نشان می‌دهند و در برخوردگاه واحدهای رسوبی و آتشفشانی در جنوب منطقه قرار دارند و ۳) دایک‌های دیابازی که واحدهای اتشفشانی و رسوبی را قطع نموده‌اند.



شکل۱ نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ دره بوژان (شمال غرب نیشابور).

واحدهای سنگی منطقه شامل بازالت، آندزیت بازالت، آندزیت و تراکیت هستند که بیشتر در شمال تا شرق و مرکز منطقه گسترش یافته‌اند (شکل ۲). این واحدها اغلب دارای بافت‌های پورفیری و گلومروپورفیری تا جریانی هستند. دایک‌های دیابازی و واحدهای نفوذی کوارتز مونزونیت پورفیری، دیوریت پورفیری و مونزوگابرو کمترین گسترش را در منطقه دارند و بیشتر در جنوب تا جنوب غرب منطقه گسترش یافته‌اند (شکل ۲).

شکل ۲ الف) نمایی از برخوردگاه تشکیلات رسوبی میلا با واحد مونزو گابرو در جنوب منطقه (دید به سمت شمال)؛ ب) نمایی از ماسه سنگ‌های واحدهای آواری سیلورین (دید به سمت غرب؛ پ) نفوذ دایک‌های دیابازی به درون واحدهای رسوبی منطقه.

روش پژوهش

بررسی‌های صحرایی با تاکید بر تفکیک واحدهای آتشفشانی و نفوذی و کنترل واحدهای سنگی موجود در منطقه، شناسایی پهنه‌های دگرسانی و ارتباط آنها با کانی‌سازی انجام شد [۱۰]. در مجموع، بیش از ۱۰۰ نمونه از واحدهای سنگی، پهنه‌های دگرسان شده و کانه‌دار از منطقه مورد بررسی برداشت گردید. سپس، ۸۰ مقطع نازک، ۱۵ قطعه صیقلی و مقطع نازک صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌نگاری تهیه شد. افزون بر این، نمونه‌برداری به دلیل گسترش به نسبت خوب رگچه‌های سیلیسی و کربناتی در منطقه انجام شد و تعداد ۸ مقطع دوبر صیقل از رگچه‌های سیلیسی و کربناتی منطقه تهیه گردید. کنترل دما و شوری محلول کانسارساز با یک دستگاه سرد و گرم کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن ۱± و گستره دمایی دستگاه ۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتیگراد بود. مقدار شوری در سامانه HOKIEFLINCS-H_2O-NaCl با نرم افزار EXCELL [۱۲، ۱۳] محاسبه شد. بررسی‌های ریزدماسنجی برای کانی‌های کوارتز و کلسیت در آزمایشگاه سیالات درگیر گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد با دستگاه Linkam و کنترل‌کننده دمایی THMSG-600 متصل به میکروسکوپ Leitz انجام شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برابر با $\pm 1^{\circ}C$ برای دمای همگن شدگی تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد و $\pm 0/1^{\circ}C$ برای دمای انجماد است. نخست بررسی‌های سنگ‌نگاری برای ۸ مقطع دوبرصیقل تهیه شده از کوارتز و کلسیت انجام شد.

سنگ‌شناسی

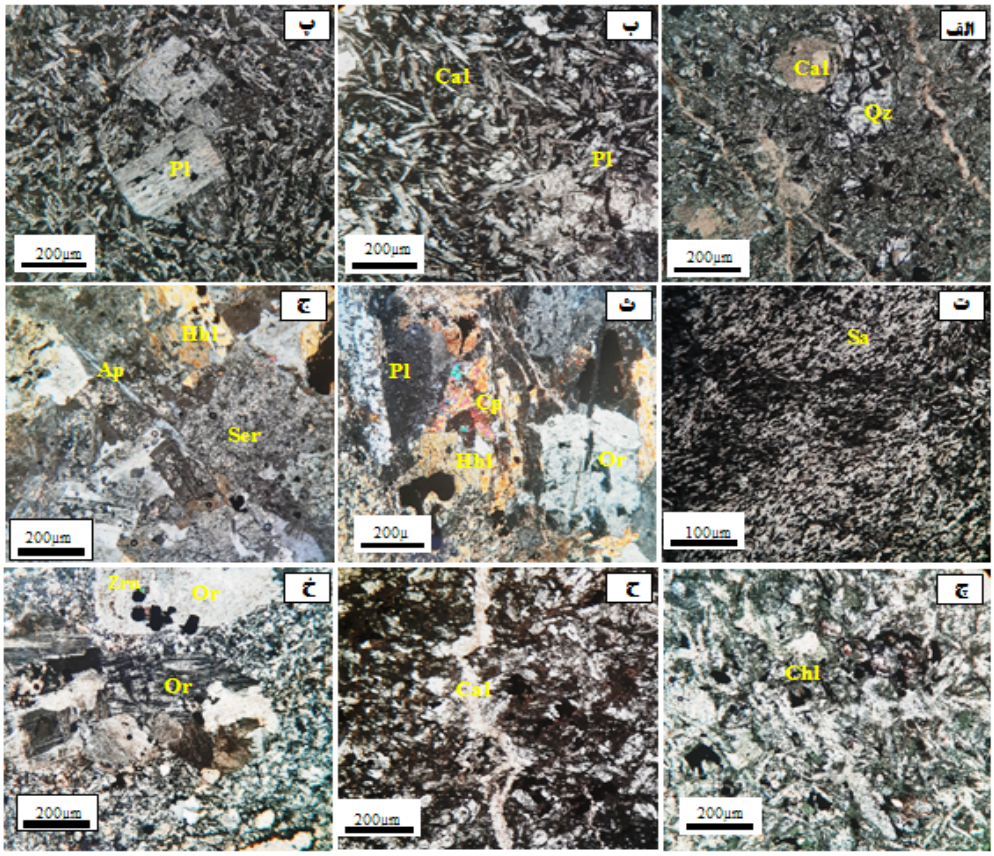
بازالت: واحد بازالت در شمال و شرق منطقه با راستای شمال غرب –جنوب شرق گسترش یافته است. این واحد دارای حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد درشت بلور بوده و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، الیوین و پیروکسن است که بافت پورفیری و گلومروپورفیری دارند. درشت بلورها شامل پلاژیوکلاز (حدود ۱۸-۱۵ درصد)، پیروکسن (اوژیت، حدود ۱۰-۷ درصد) و الیوین (حدود ۱۰-۵ درصد) هستند. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و حدود ۱ درصد کانی کدر است. این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلتی شدید شده و شامل کانی‌های ثانویه کلریت، کلسیت و مقدار کم اپیدوت است. حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد پلاژیوکلازهای موجود به کلریت تبدیل شده و اوژیت کاملا کلریتی شده و به مقدار جزئی به اپیدوت دگرسان شده است است (شکل ۳ الف).

الیوین بازالت: واحد الیوین بازالت نیز بخشی از مجموعه آتشفشانی با راستای شمال غرب- جنوب شرق بوده که در شرق منطقه بوژان رخنمون یافته است. بافت این واحد سنگی پورفیری با زمینه ریزسنگی است. درشت‌بلورهای موجود حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجم کل را تشکیل می‌دهند و شامل پلاژیوکلاز (بیشتر از نوع آندزین، حدود ۲۵-۲۰٪)، پیروکسن (حدود ۵-۳٪) و الیوین (۳-۲٪) در زمینه‌ای از ریزسنگ‌های درشت و کانی‌کدر هستند. این واحد دستخوش دگرسانی کربناتی و کلریتی شده است. کانی‌های ثانویه موجود شامل کلریت، کربنات و به مقدار کم سریسیت هستند. کلریت‌ها از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین چون الیوین و پیروکسن ایجاد

شده‌اند و کربنات کلسیم نیز به صورت رگچه‌ای و فراگیر در واحد بازالتی در متن سنگ ایجاد شده‌اند (شکل ۳ ب).

آندزیت: این واحد آتشفشانی بیشتر در شرق منطقه مورد بررسی رخنمون یافته است. این واحد بافت غالب پورفیری و گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط دارد و مقدار درشت بلورهای آن بین ۳۰ تا ۴۰ درصد متغیر است. مهمترین کانی تشکیل دهنده‌ی آندزیت‌ها درشت بلورها و ریزسنگ‌های پلاژیوکلاز (آندزین و الیگوکلاز) هستند که بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با ماکل‌های چندریخت حدود ۳۰-۳۵ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. افزون براین، فلدسپارهای قلیایی ۳-۲٪، پیروکسن‌ها (اوژیت) ۵-۲٪ و کانی‌های کدر ۵-۳٪ از حجم سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ پ). کانی اسفن نیز مهمترین کانی فرعی تشکیل‌دهنده این واحد است. این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلیتی شده است. از کانی‌های ثانویه این واحد می‌توان به سریسیت، کلریت، کربنات و زئوزیت اشاره کرد که کانی کلریت به صورت فراگیر در متن سنگ دیده می‌شود.

تراکیت: این واحد نیز در شرق منطقه گسترش دارد و دارای بافت پورفیری جریانی (تراکیتی) است. درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلاز (آندزین، ۳۰-۲۵٪)، فلدسپار قلیایی (۱۸-۱۵٪) و پیروکسن (۵-۲٪) هستند (شکل ۳ ت). این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلیتی متوسط تا شدید شده است. در این دگرسانی فراوان‌ترین کانی کلریت بوده و کربنات بصورت جزئی درون حفره‌ها را پر کرده است و کلریت هم در متن سنگ حضور دارد و هم درون حفره‌ها را پر کرده است. همچنین تعداد بسیار کمی رگچه‌های کربنات، کلریت و اپیدوت در این واحد وجود دارد.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی (در نور قطبیده متقاطع، XPL) از الف) بقایای الیوین و پر شدن توسط کلسیت و کوارتز ثانویه در واحد بازالت، ب) بافت بادامکی و تیغه‌های پلاژیوکلاز در واحد آندزی بازالت، پ) بافت گلومروپورفیری و درشت بلور پلاژیوکلاز در واحد آندزیتی، ت) جهت‌گیری کانی سانیدین با ماکل کارلسباد در واحد تراکیتی، ث) واحد مونزوگابرو، ج) سرسیتی شدن پلاژیوکلازها در واحد مونزوگابرو، چ) دگرسانی پروپیلیتی شدید در واحد مونزو گابرو، ح) حضور رگچه‌های کلسیتی و کربناتی در واحد دیوریتی و خ) واحد کوارتز مونزونیت پورفیری. (Zrn: زیرکان، Chl: کلریت، Or: اورتوکلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Hbl: هورنبلند، Ser: سرسیت، Ap: آپاتیت، Cal:کلسیت و Sa: سانیدین.).

مونزوگابرو: این واحد نفوذی در جنوب شرق منطقه در مرز بین واحدهای رسوبی و آتشفشانی رخنمون یافته بوده و به طورمعمول دارای بافت‌های میان‌دانه‌ای، خال‌خال و نیمه‌پوست-ماری است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این سنگ پلاژیوکلاز، هورنبلند، کلینوپیروکسن و فلدسپار قلیایی و کانی-های فرعی آن اسفن و آپاتیت هستند (شکل‌های ۳ ث و ج). پلاژیوکلازها بر اساس زاویه خاموشی از نوع لابرادوریت و آندزین هستند که بخش عمده درشت‌بلورها را تشکیل می‌دهند. فلدسپارهای قلیایی نیز به‌صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار از نوع ارتوکلاز و کلینوپیروکسن‌ها اغلب نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل از نوع اوژیت هستند. هورنبلندهای بی‌شکل با فراوانی حدود ۳۰-۲۰ درصد، مهمترین کانی مافیک واحدهای مونزو گابرویی منطقه بوژان هستند. واحد مونزو گابرو دستخوش دگرسانی پروپیلتی ضعیف شده است. در این واحد، پلاژیوکلازها به اپیدوت، سرسیت و کلسیت، ارتوکلاز به کانی-های رسی، پیروکسن و هورنبلند نیز به کلریت و کربنات دگرسان شده‌اند (شکل ۳ چ).

دیوریت: این توده حدواسط در جنوب غرب منطقه در مرز با واحدهای رسوبی واقع است. این واحد بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی دارای بافت میان‌دانه‌ای و نیمه‌خودریخت دانه‌ای است. پلاژیوکلازها (آندزین) و فلدسپات قلیایی (ارتوکلاز) کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده واحد دیوریتی هستند. پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با فراوانی حدود ۸۰ درصد بیشترین حجم سنگ را تشکیل می‌دهند و ارتوکلازها نیز دارای فراوانی حدود ۱۵-۱۰ درصدی هستند. کانی‌های کدر (بیشتر مگنتیت) و آپاتیت‌های ریزدانه و خودشکل کانی‌های فرعی واحد دیوریتی هستند. این واحد دستخوش دگرسانی کلریتی متوسط شده است. از کانی‌های ثانویه این واحد به کربنات به صورت رگچه‌ای و کلریت و کانی رسی می‌توان اشاره کرد (شکل ۳ ح).

کواتز مونزونیت پورفیری: این واحد نیمه‌عمیق در شرق منطقه به شکل توده‌ای در مجموعه آتشفشانی نفوذ کرده است. بافت غالب آن پورفیری است و پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و کوارتز کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ خ). پلاژیوکلازها (بیشتر الیگوکلاز و آلبیت) از فراوان‌ترین اجزای تشکیل دهنده این واحد هستند که بصورت درشت بلور بی‌شکل تا نیمه شکلدار حدود ۱۵-۱۰ درصد و ریزسنگ در زمینه سنگ دیده می‌شوند. ارتوکلاز و کوارتز نیز به ترتیب با فراوانی ۱۰-۸ و ۶-۵ درصد به صورت بلورهای بی‌شکل در زمینه سنگ دیده می‌شوند. از کانی‌های فرعی این واحد می‌توان به آپاتیت و زیرکن اشاره کرد. این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلیتی ضعیف شده است. مگنتیت مهمترین کانی کدر در این سنگ‌ها محسوب می‌شود. کانی‌های کلریت و کانی رسی به عنوان کانی ثانویه از دگرسانی پلاژیوکلازها و ارتوکلازها در واحد کوارتز مونزونیت پورفیری حضور دارند.

دیاباز: این واحد در شرق منطقه به شکل دایک درون مجموعه آتشفشانی-رسوبی نفوذ کرده است. بافت اصلی این واحد نیمه-پوست‌ماری و میان‌دانه‌ای است. بلورهای پلاژیوکلاز با فراوانی حدود ۶۰-۵۵ درصد و کلینوپیروکسن با حدود ۴۰-۳۵ درصد کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازها با ماکل‌های چندریخت بصورت نیمه شکل‌دار با شکل‌های تیغه‌ای توسط کلینوپیروکسن دربرگرفته شده و بافت نیمه‌پوست‌ماری را ایجاد نموده‌اند. کانی کدر (مگنتیت) و آپاتیت مهمترین کانی‌های فرعی این واحد هستند. این واحد دستخوش دگرگونی پروپلیتی شدید شده است. بلورهای پلاژیوکلازها اغلب سوسوریتی شده و به کانی‌های ثانویه سرسیت، کربنات و اپیدوت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها نیز همه به کلریت دگرسان شده‌اند.

کانه‌زایی و دگرسانی

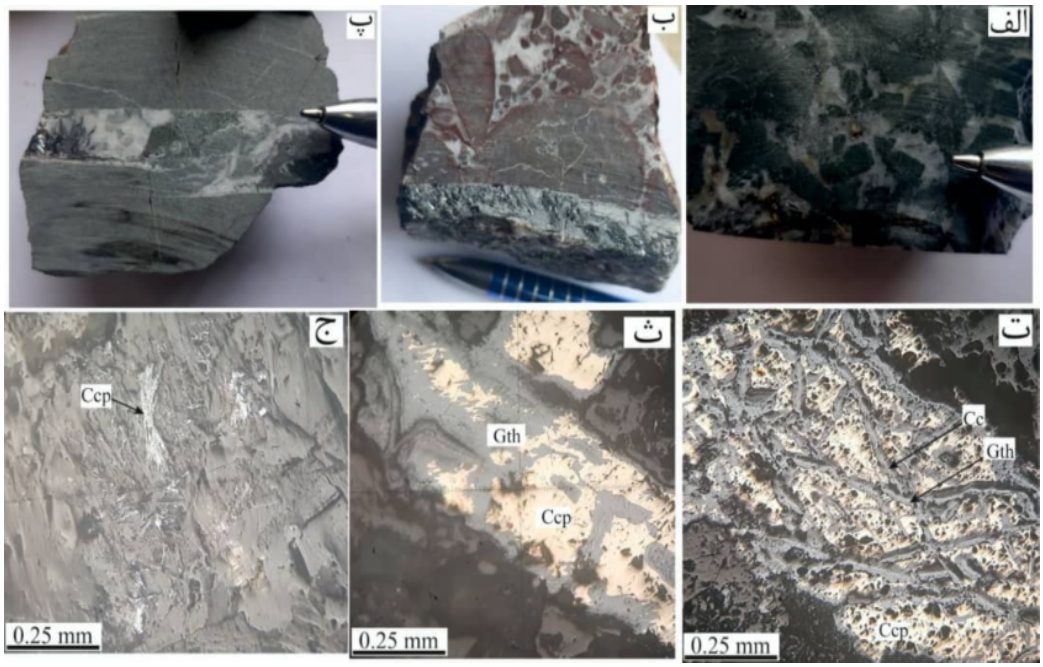
کانی‌سازی در منطقه اکتشافی بوژان به شکل رگه‌ای و شامل کانه‌های اولیه پیریت و کالکوپیریت است که با کانه‌های ثانویه اسپکیولاریت، کالکوسیت، مالاکیت، گوتیت و اکسیدهای آهن در منطقه همراه با رگچه‌های سیلیسی و کربناتی حضور دارند. مهمترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی کوارتز و کلسیت هستند که به صورت رگچه‌هایی با ضخامت و طول متغیر وجود دارند. اصلی‌ترین ساخت و بافت‌های قابل مشاهده همراه با این کانی‌ها بافت پرکننده فضاهای خالی، گل‌کلمی و برشی است که درون متن سنگ درونگیر حضور دارند. کالکوپیریت فراوانترین و مهمترین کانی سولفیدی موجود در رگچه‌هاست که به صورت اولیه دیده می‌شود (شکل ۴).

کالکوپیریت اغلب بصورت دانه‌درشت با اندازه ۰٫۲ تا ۵ میلیمتر در رگچه‌ها همراه با گوتیت و دیده می‌شود (شکل‌های ۴ الف، ت و ث). همچنین پیریت‌های اولیه بسیار ناچیز هستند و بیشتر آنها به گوتیت و اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند.

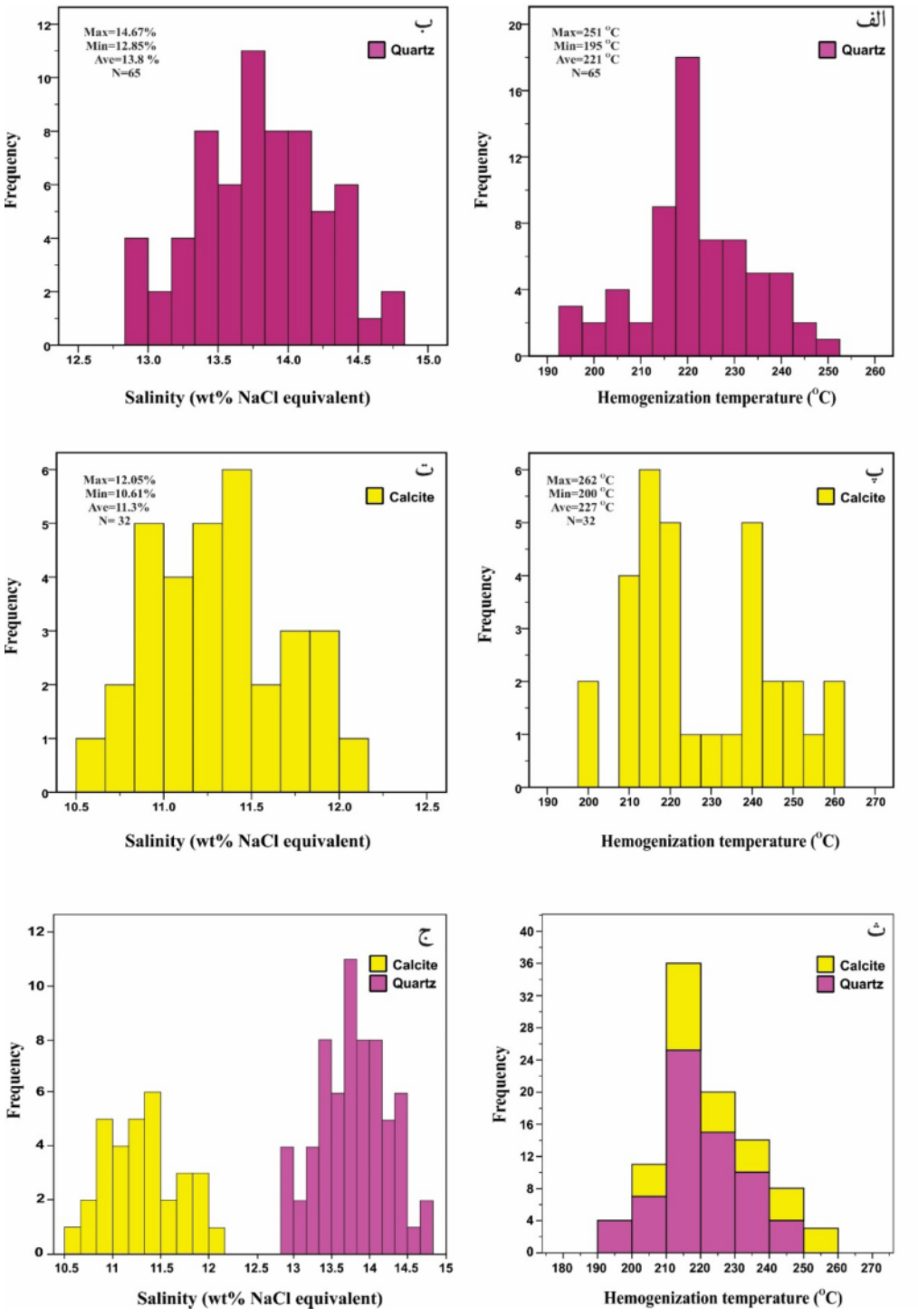
فراوانترین کانی ثانویه نیز مالاکیت است که از تبدیل کالکوپیریت‌ها ایجاد شده‌اند و به صورت پراکنده و جانشینی همراه با مقادیر بسیار جزئی کالکوسیت ثانویه درون رگچه‌ها حضور دارند. مهمترین عوامل کنترل کننده‌ی کانی سازی شکستگی‌ها، دگرسانی‌ها و محلول‌های گرمابی هستند که در پهنه‌های درون‌زاد و اکسایشی رخ داده‌اند. دگرسانی عمده همراه با کانی‌سازی پهنه‌های پروپلیتی ضعیف، متوسط و شدید در مقیاس ناحیه‌ای گسترده است و دگرسانی‌های موجود بر بخش قابل توجهی از واحدهای آتشفشانی منطقه اثر گذاشته‌اند. مهمترین کانی پهنه دگرسانی کلریت است و مقادیر جزئی اپیدوت، کربنات، کانی رسی و سریسیت نیز دیده می‌شود. به طور کلی، کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی روند رگه-رگچه‌ای دارد و درون سنگ میزبان بازالتی-آندزیتی رخ داده که همراه با دگرسانی غالب پروپیلیتی است.

سیال‌های درگیر

یافته‌های برآمده از بررسی سیال‌های درگیر در شاخه‌های مختلف علوم زمین جایگاه ویژه‌ای دارند. از مهمترین کاربردهای آن پی‌جویی کانسارهای گرمابی- ماگمایی است. بررسی سیال-های درگیر در سامانه‌های گرمابی- ماگمایی برای شناسایی خاستگاه سیال کانسارساز و ارتباط آن با سیال‌های ماگمایی و آب‌های جوی نتایج ارزشمندی در مورد مکان تشکیل پهنه‌های دگرسانی، محل کانی‌سازی و ویژگی‌های فیزیکو- شیمیایی محیط تشکیل کانسار به همراه داشته است [۱۴]. از اینرو، بررسی سیال‌های درگیر در سامانه‌های کانی‌سازی اهمیت بسیاری دارد. از رایجرین روش‌ها برای تعیین و بررسی خاستگاه و همچنین دمای کانی‌سازی بررسی سیال‌های درگیر به دام افتاده درون کانی‌هاست [۱۵]. به طور کلی، طی رشد بلور در طول پهنه‌های رشد، به علت نقص بلورین ایجاد شده در اثر عوامل مختلفی چون پدیده‌های تکتونیکی، حجم‌های کوچکی از سیال درون بلور به دام می‌افتد [۱۶]. در نتیجه به منظور تعیین دمای تشکیل رگچه‌های سیلیسی و کربناتی در منطقه اکتشافی، تعداد ۵ نمونه از رگچه‌های سیلیسی و ۳ نمونه از رگچه‌های کربناتی همراه با کانی‌سازی برای بررسی سیال‌های درگیر انتخاب شدند.



شکل۴ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی کانه‌های موجود در منطقه اکتشافی بوژان: الف) حضور کالکوپیریت درون رگچه‌های کوارتز و کلسیت، ب) حضور اسپکیولاریت به صورت سوزنی درون رگچه کلسیت، پ) سوزن‌های اسپکیولاریت درون رگچه کوارتز، ت) کانه کالکوپیریت در حال تبدیل به کالکوسیت همراه با گوتیت، ث) حضور کالکوپیریت و گوتیت، ج) میانبار کالکوپیریت درون اسپکیولاریت (Cc: کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت و Gth: گوتیت [۱۷]).



شکل۵ نمودارهای دمای همگن‌شدگی و مقدار شوری در رگچه‌های سیلیسی و کربناتی و مقایسه آنها با هم در منطقه اکتشافی بوژان.

براساس بررسی‌های انجام شده بر کانی‌های کوارتز وکلسیت، سیال‌های درگیر اولیه تقریبا فراوان هستند و اغلب به صورت نامنظم، بی‌شکل و گاهی کروی دیده می‌شوند. اندازه تقریبی این سیال‌های درگیر اولیه ۵ تا ۱۵ میکرون است، ولی بیشتر آنها بسیار کوچک هستند. بررسی‌ها نشان‌دهنده وجود سیال‌های درگیر اولیه (P) و ثانویه (S) در این رگچه‌هاست. بطور کلی، در نمونه‌های کوارتز و کلسیت مورد بررسی، دو نوع سیال درگیر اولیه شامل انواع سیال‌های دو فازی مایع-گاز غنی

از مایع (LV) و همچنین سیال‌های تک فازی تمام مایع (L) شناسایی گردید. فراوانی سیال‌های تک فازی تمام مایع در همه نمونه‌ها بیشتر از انواع دیگر است. سپس بررسی‌های دماسنجی و تعیین مقدار شوری برای سیال‌های درگیر اولیه غنی از فاز مایع (LV) انجام شد که چکیده نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. سیال‌های دوفازی غنی از فاز مایع با ۸۰ تا ۹۰ درصدحجمی فاز مایع در مرحله همگن‌سازی به فاز مایع همگن می‌شوند. بررسی‌های دماسنجی بر سیال‌های دوفازی غنی از مایع نشان می‌دهد که اولین دمای ذوب یخ (T_{fm}) یا دمای نقطه همگدازی در کانی کوارتز برابر با ۴۷٫۱- تا ۴۶- درجه سانتی‌گراد و در کانی کلسیت ۴۶٫۸- تا ۴۶- درجه سانتی‌گراد است. در واقع، بر اساس این دما می‌توان ترکیب سیال درگیر و نوع نمک‌های موجود در آن را شناسایی کرد [۱۶]. دمای نقطه همگدازی میانگین به دست آمده (برای کوارتز °C ۴۶/۵- و برای کلسیت °C۴۶٫۳۸-) نشان می‌دهد که سیال کانسارساز در منطقه اکتشافی بوژان از سامانه $H_2O–CaCl_2$ است [۱۸].

همچنین، دمای همگن‌شدگی به فاز مایع (از بین رفتن حباب گاز) در سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع در رگچه‌های کوارتز حدود ۱۹۵ تا ۲۵۱ درجه سانتی‌گراد (با میانگین °C۲۲۱) و در رگچه‌های کلسیت حدود ۲۰۰ تا ۲۶۲ درجه سانتی‌گراد (میانگین °C۲۲۷) است (شکل‌های ۵ الف وپ). در ادامه، دمای آخرین قطعه یخ ذوب شده (T_m) برای برآورد مقدار شوری سیال متبلور شده از بلور اندازه‌گیری شد. دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_m) در رگچه‌های کوارتز حدود ۱۰٫۷- تا ۹- درجه سانتی‌گراد (میانگین °C ۹٫۸۹-) و در رگچه‌های کلسیت حدود ۸٫۳- تا ۷٫۳- درجه سانتی‌گراد (میانگین °C۷٫۶۷-) محاسبه شد. بر اساس دمای T_m اندازه‌گیری شده، شوری سیال‌های درگیر در رگچه‌های کوارتز ۱۲٫۸۵ تا ۱۴٫۶۷ درصد وزنی NaCl (با میانگین ۱۳٫۸ درصد NaCl) و در رگچه‌های کلسیت ۱۰٫۶۱ تا ۱۲٫۰۵ درصد وزنی NaCl (میانگین ۱۱٫۳ درصد NaCl) به دست آمد (شکل‌های ۵ ب و ت). چنانکه مشخص است که هر دو نوع رگچه سیلیسی و کربناتی دارای دمای همگن‌شدگی و شوری پایین هستند (شکل‌های ۵ ث وج). افزون بر این، در نمودار دمای همگن‌شدگی (Th) نسبت به شوری این سیال‌های درگیر، روند آمیختگی همراه با سردشدن سیال به خوبی نمایان است. بررسی این نمودارها از این رو اهمیت دارد که در بسیاری از کانسارها عوامل فیزیکی و شیمیایی عامل ته نشینی و تمرکز اقتصادی کانسار هستند [۱۹].

در واقع، دو فرایند آمیختگی سیال‌ها (سیال ماگمایی با آب‌های جوی) و همچنین پدیده جوشش، عوامل اصلی در ناپایداری عناصر همراه موجود در سیال هستند که سرانجام با تغییر در عواملی چون دما، شوری، پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، درجه اسیدی (Ph)، گریزندگی اکسیژن و گوگرد، منجر به ته‌نشینی کانسارهای گرمابی می‌شوند [۲۰]. با توجه به بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده برای رگچه‌های سیلیسی و کربناتی، هیچ دلیلی بر پدیده جوشش در نمونه‌ها دیده نشد.

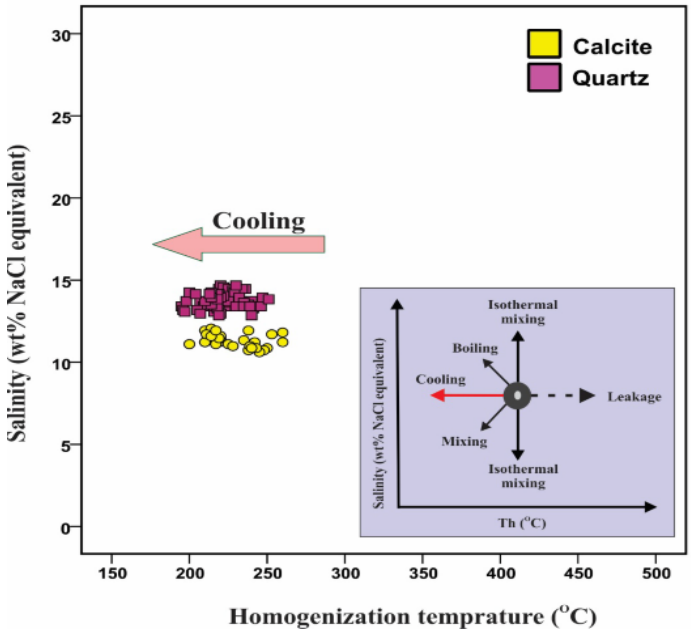
جدول۱ نتایج ریز دماسنجی سیال‌های درگیر اولیه در منطقه اکتشافی بوژان.

شماره نمونه	کانی میزبان	نوع سیال درگیر	تعداد	Th (°C)	Tm_{ice} (°C)	شوری (wt% NaCl eqv.)
BQ-5	کوارتز	LV	۱۳	۲۱۶-۲۲۴	-107 to -9.2	۱۳٫۷-۱۴٫۵
BQ-9	کوارتز	LV	۱۴	۲۰۷-۲۳۶	-10.7 to -9.8	۱۳٫۴-۱۴٫۵
BQ-10	کوارتز	LV	۱۳	۱۹۵-۲۲۵	-10.2 to -9.1	۱۲٫۹-۱۴٫۱
BQ-11	کوارتز	LV	۱۲	۲۰۰-۲۲۰	-10.3 to -9	۱۲٫۸-۱۴٫۲
BQ-12	کوارتز	LV	۱۳	۲۳۰-۲۴۷	-10 to -9	۱۲٫۸-۱۳٫۹
BC-1	کلسیت	LV	۶	۲۰۰-۲۱۴	-7.7 to -7.5	۱۱٫۱-۱۱٫۳
BC-6	کلسیت	LV	۱۱	۲۱۰-۲۲۰	-8.3 to -7.5	۱۱٫۱-۱۲
BC-8	کلسیت	LV	۱۵	۲۲۵-۲۶۰	-8.2 to -7.1	۱۰٫۶-۱۱٫۹

در واقع، پدیده جوشش را می‌توان همان همراهی سیال غنی از مایع با سیال غنی از گاز تعریف کرد [۲۱]. بنابراین دونوع سیال تقریباً هم‌دما (۱۶۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) اما با شوری متفاوت (۱۰٫۶۱ تا ۱۲٫۰۵ و ۱۲٫۸۵ تا ۱۴٫۶۷ درصد وزنی NaCl) در شکل‌گیری کانسار مس نقش داشته‌اند. به بیان دیگر، سیال ماگمایی به نسبت گرم و کمی شور دچار آمیختگی با آب‌های جوی سردتر با شوری کمتر شده است. بنابراین کاهش دما و شوری و سپس سردشدگی محتملترین سازوکار ناپایداری عناصر همراه سیال کانسارساز در منطقه اکتشافی بوژان بوده که منجر به ته‌نشینی عناصر همراه سیال‌ها شده است (شکل۶). سپس این عناصر همراه سیال که از عمق آمده‌اند، در فضاهای مناسب مانند گسل‌ها، درز و شکستگی‌ها ته‌نشست کرده و منجر به تشکیل کانسار نوع رگه‌ای در منطقه بوژان می‌شوند. افزون بر این، دمای تشکیل رگه-رگچه‌های سیلیس و کربنات همراه مس کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است و این نشان می‌دهد که کمپلکس‌های بی‌سولفیدی نقش مهمی در انتقال و حمل فلزات داشته‌اند.

برداشت

کانی‌سازی سطحی در منطقه اکتشافی بوژان به طور عمده درون واحدهای آتشفشانی میزبان رخ داده است. سنگ‌های آتشفشانی از نظر رده‌بندی زمین‌شیمیایی در گستره تراکیت، آندزیت بازالت، آندزیت و بازالت قرار دارند که توده‌های عمیق و نیمه عمیق مونزو گابرو، دیوریت، کوارتز مونزونیت پورفیری و دایک‌های دیابازی آنها را قطع می‌کنند. در گستره کانی‌سازی کالکوپیریت، مهمترین و فراوانترین کانی اولیه سولفیدی مس است که با کانی‌های ثانویه کالکوسیت، مالاکیت، گوتیت و اسپکیولاریت همراه رگچه‌های کربناتی و سیلیسی حضور دارند و دگرسانی پروپیلیتی مهم‌ترین پهنه دگرسانی تشکیل شده با این رگچه‌هاست. بررسی سیال‌های درگیر درنمونه‌های کوارتز و کلسیت برآمده از سیال کانسارساز بیانگر وجود سیال‌های تکفازی مایع و دوفازی غنی از مایع است. بررسی‌های ریزدماسنجی بر سیال‌های دوفازی غنی از مایع دمای همگن‌شدگی ۱۹۵ تا ۲۶۲ درجه سانتیگراد و شوری ۱۰٫۶۱ تا ۱۴٫۶۷درصد نمک طعام را نشان می‌دهد. به احتمال بسیار، کاهش دما در اثر آمیختگی محلول گرم و شور با سیال جوی به نسبت سردتر با شوری کمتر همراه با سردشدن سیال نقش اصلی را در شکل‌گیری منطقه بوژان دارد. سرانجام، رخداد کانی‌سازی در منطقه اکتشافی بوژان به صورت رگه‌ای با کنترل گسلی است. عواملی چون همبرزایی ساده کانه‌های موجود، نوع و گسترش دگرسانی‌ها، کنترل‌های ساختاری، دما و شوری پایین سیال کانه‌دار نشان‌دهنده‌ی سامانه کانی‌سازی رگه‌ای فراگرمایی در منطقه اکتشافی مس بوژان است.



شکل۶ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری برای سیال کانه‌ساز منطقه اکتشافی بوژان [۱۹].

قدردانی

این مقاله در راستای طرح شماره ۳ با کد ۳/۵۰۸۶۰ تهیه شده است که نگارندگان به این وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بابت حمایت‌های مادی و معنوی سپاسگزاری می نمایند.

مراجع

[1] Majidi B., *"The ultrabasic lava flows of Mashhad, North East Iran.*", Geological Magazine 118 1 (1981) 49-58.

[2] Karimpour m. h., Farmer G. L., Stern C. R., *"Geochronology, Radiogenic Isotope Geochemistry, and Petrogenesis of Sangbast Paleo-Tethys*. (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy Vol. 17 No. 4 (2010) 702-715.

[3] Ghazi M., Hassanipak A.A., Tucker P.J., Mobasher K., *"Geochemistry and Ar40- Ar39 ages of the Mashhad Ophiolite, NE Iran",* abstracts as: Eos. Trans. AGU, 82(47), Fall Meet. (2001).

[4] Alavi Mehdi, *"Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran",* Geological Society of America Bulletin 103 8 (1991) 983-992.

[5] Alavi Mehdi, *"Thrust tectonics of the Binaloud region; NE Iran",* Tectonics. 11 2 (1992) 360-370.

[6] Homam S. M., Rahimi B., *"Mineral assemblages sequence of contact aureole of Mashhad granite."* (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy Vol. 18 No. 1 (2010) 125-134.

[7] Alberti A., Moazez. Z., *"Plutonic and metamorphic rocks of the Mashhad area (northeastern Iran, Khorasan)",* Boll. Soc. Geol. Italy 93 (1974) 1157-1196.

[8] Samadi R., Valizadeh M. V., Mirnejad H., Kawabata H., *"Geothermometry and Geobarometry of Metamorphic Rocks of Dehnow, (Northwest of Mashhad)." (in Persian)",* Journal of Geoscience Vol 21 No. 84 (2012) 3-14

[9] Mirnejad H., Obeid M., Hasanandzadeh J., *"petrogenesis of Mashhad granitoids: An insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in northeast of Iran",* Lithos Vol. 170 No. 1 (2013) 105-116

[10] Pourlatifi A., *"Geological Map of Torghabeh 1:100000"*, Geological survey of Iran 2001.

[11] Nabavi M.H., *"A Preface to Iran's Geology."* Geology Survey & Mineral Exploration of Iran, *(*1976*)* 109 P.

[12] 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 H2O–NaCl*", Computer in Geosciences, 49. 334–337.

[13] 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 1992, 14-22.

[14] Bodnar R. J., Vityk M. O., *"Interpretation of micro-thermometric data for H2O–NaCl fluid inclusions. In: De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. (Eds.), Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications. Short Course of the Working Group, Siena,"* 1994 117–130.

[15] Sorby H. C., *"On the microscopic structure of crystals indicating the origin of minerals and rocks,"* Journal of Geological Society, London, 14. 453-500.

[16] Wiesheu R., Hein U. F., *"The history of fluid inclusion studies. In: Fritscher, B. and Henderson, F. (Eds.), Toward a History of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry,"* Institute für Geschichte der Naturwissenschaften, Munich, 1998 309–325.

[17] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals*", American Mineralogist, 95 (2010) 185-187.

[18] Oakes C.S., Bodnar R.J., Simonson J.M., *"The system NaCl–CaCl2–H2O: I. The ice liqiudus at 1 atm total pressure"*, Geochim. Cosmochim. Acta 1990 54, 603–610.

[19] Shepherd T. J., Rankin A. H., Alderton D. H. M., *"A practical guide to fluid inclusion studies."* Blackie, Glasgow, 1985 239p.

[20] Wilkinson J.J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits.",* Lithos 2001 55, 229–272.

[21] Simmons S. F., White N. C., John D. A., *"Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, J.R. and Richards, J.P.) Eds.(100th Anniversary Volume."*, Economic Geology, 2005 485–522.