

بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و سیال‌های درگیر واحدهای آتشفشاری در منطقه اکتشافی بوژان، شمال شرق 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 شمال شرق ایران در امتداد رشته کوه‌های البرز قرار دارد و بخشی از پهنه ساختاری بینالود محسوب می‌شود. زمین‌شناسی منطقه شامل گذارهای آندزیتی، تراکیتی، بازالتی و آندزی بازالتی بوده که همراه با توده‌های عمیق، نیمه‌عمیق و آذرآواری است و دستخوش دگرسانی پربیلیتی 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 ۱۴,۶۷ درصد نمک طعام و دمای همگن‌شدگی حدود ۱۹۵ تا ۲۶۲ درجه سانتیگراد است. همچنین کاهش دما مهمترین عامل در تمدنی 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

بیرون زدگی دارند، شامل سه فاز دگرگونی ناحیه‌ای و دو مرحله گرانیت‌زایی است و در آن توده‌های فرابازی نیز وجود دارد [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 هرسنین و بعدها در تریاس میانی در مجموع در معرض دگرگونی‌های سیمیرین پیشین قرار گرفته‌اند. از شاخص‌های مهم پهنه بینالود که کمتر مورد توجه قرار گرفته است سنگ‌های آتشفشاری هستند که با یک روند خطی از دره گرینه تا دره بوژان در شمال نیشابور گسترش یافته‌اند.

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 رخساره‌های پالئوزوئیک آن شبیه البرز هستند. مجموعه آذرین و دگرگونی این پهنه که به ویژه در جنوب و غرب مشهد

بر اساس سن سنجی به روش آرگون-آرگون برای گابروهای پهنه دگرگونی مشهد سنی معادل اوخر پنسیلوانین تا اوائل پرمین (۴۷۷/۴ تا ۲۸۱/۴ میلیون سال) برای آنها تعیین شده است [۳]. توده‌های گرانیت‌وئیدی مشهد با ترکیبی از دیوریت تا پگماتیت و آپلت در سنگ‌های مجموعه دگرگونی جنوب مشهد نفوذ کرده‌اند. با بررسی زمین‌شیمی و سن سنجی سنگ‌های گرانیت‌وئیدی پهنه دگرگونی مشهد، سن 217 ± 4 میلیون سال برای گرانو دیوریت‌های کوه‌سنگی و سن 215 ± 4 میلیون سال برای دیوریت‌های ده نو گزارش شده است [۲].

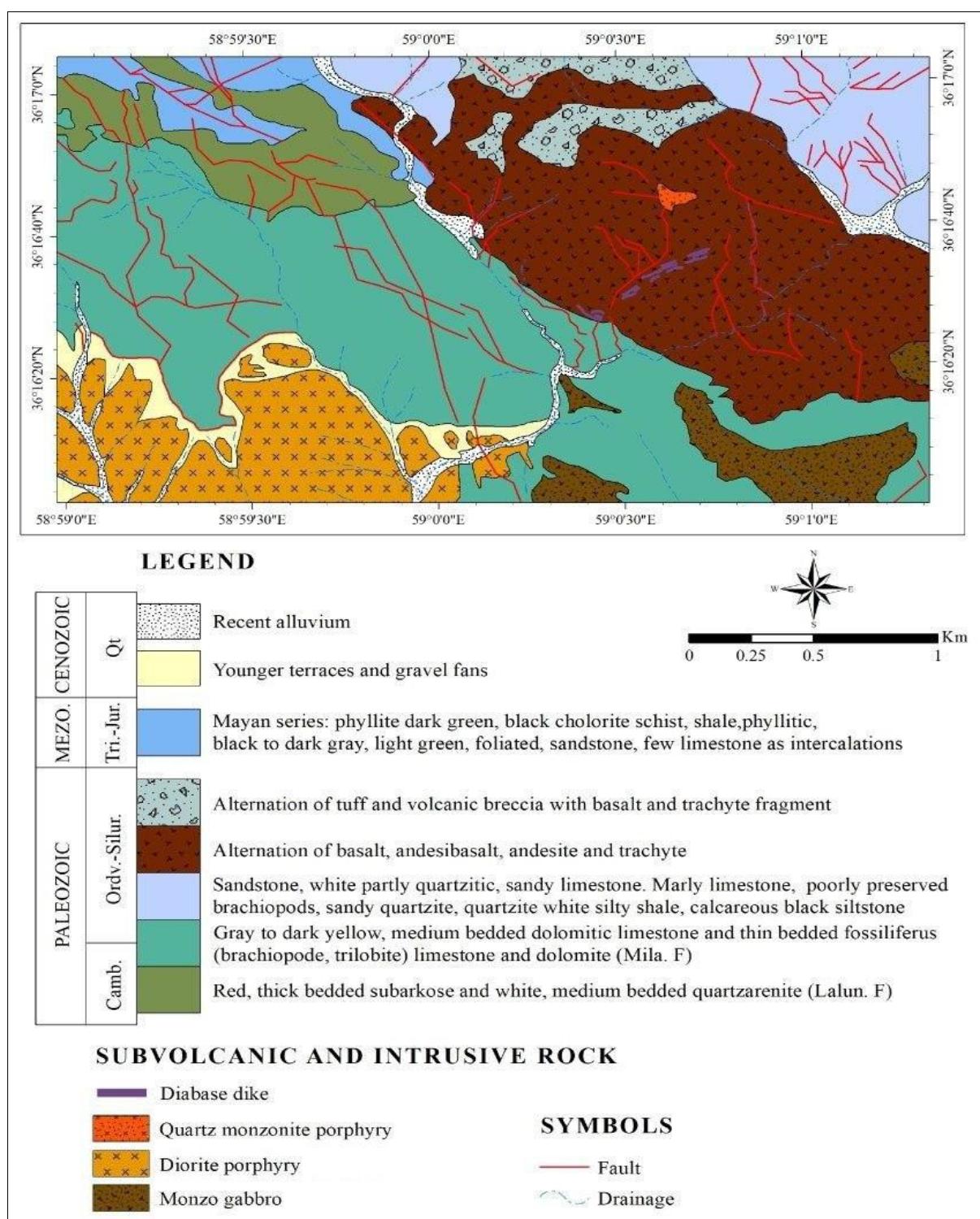
منطقه بوژان در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰ طرقه [۱۰] واقع است. به طور کلی، واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای رسوبی، سنگ‌های آتشفسانی، دایک‌های دیابازی و توده‌های نفوذی هستند (شکل ۱). واحدهای رسوبی در منطقه مورد بررسی شامل لای، کنگلومرا و آهک ماسه‌ای هستند (شکل ۱) که اغلب کوه‌های بلند بینالود را ساخته‌اند. این واحدها بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارند. بر اساس شواهد چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفسانی وابسته به سیلورین و واحدهای کربناتی-کنگلومرا ای مربوط به دونین هستند.

آغاز فعالیت آتشفسانی در سنگ‌های سیلورین-دونین در محیط دریایی کم ژرف (دارای سنگواره مرجان) بوده است. اوخر پالئوزوئیک پسین، حوضه‌ای کم ژرف 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 آتشفسانی 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 می‌گردد (شکل ۱). آنها عبارتند از (۱) واحدهای آتشفسانی 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 آتشفسانی در جنوب منطقه قرار دارند و (۳) دایک‌های دیابازی که واحدهای اتشفسانی و رسوبی را قطع نموده‌اند.

در نبود داده‌های سن سنجی برای این سنگ‌ها، براساس شواهد چینه‌شناسی می‌توان سن این مجموعه آتشفسانی-آذرآواری را اردوبیسین - سیلورین در نظر گرفت. در منطقه اکتشافی بوژان در کنار این مجموعه‌های 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. از این‌رو در این نوشتار، شواهدی از کانه‌زایی فلزی، نوع دگرسانی و نتایج بررسی میان‌بارهای سیال در منطقه بوژان ارایه می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی

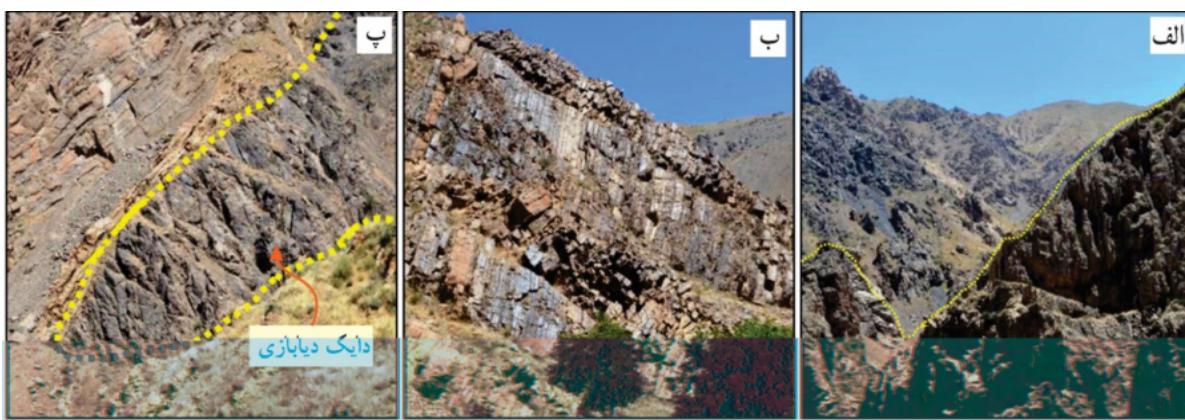
کوه‌های البرز در شمال ایران مشخص کننده محدوده برخورد در کمربند کوه‌زایی آلپ - هیمالیا محسوب می‌شوند که مانند پلی بین هندوکش و هیمالیا در شرق دور و خاور میانه و لسر کاکاسوس و آلپ در مدیترانه و اروپا عمل می‌کنند [۳]. دگرگونی زمین‌ساختی کمربند کوه‌زایی البرز به فروانش به سمت شمال پالغوتیس به زیر اوراسیا در نظر گرفته شده که سرانجام منجر به برخورد بین خرد قاره ایران و صفحه اوراسیا گردیده است [۵,۶]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری پیرامون مجموعه افیولیتی و دگرگونی مشهد انجام شده است [۹-۱۱]. 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)، پیروکسنتیت، 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، متابکنگلومراهای کربناتی و اولیستترمها هستند که ویژگی‌های رسوبی نهشته‌های توربیدیتی عمیق را به نشان می‌دهند. گروه سوم رخمنون‌های کمی از سنگ‌های آذرآواری دگرگون شده چون متابوف و متالاپیلی توف به احتمال بسیار برآمده از فرایندهای آتشفسانی در شرایط خشکی بوده و نشانگر حضور یک قوس ماغمایی در کنار مکان تشکیل سنگ‌های دگرگونی هستند.



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

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).

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.



شکل ۲ (الف) نمایی از برخوردگاه تشکیلات رسوی میلا با واحد مونزو گابری 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 رسوی منطقه.

سنگشناسی

بازالت: واحد بازالت در شمال و شرق منطقه با راستای شمال غرب-جنوب شرق گسترش یافته است. این واحد دارای حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد درشت بلور بوده و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلаз، الیوین و پیروکسن است که بافت پورفیری و گلومرپورفیری دارند. درشت بلورها شامل پلاژیوکلاز (حدود ۱۵-۱۸ درصد)، پیروکسن (اوژیت، حدود ۷-۱۰ درصد) و الیوین (حدود ۵-۱۰ درصد) هستند. کانی‌های فرعی شامل آپاتیت و حدود ۱ درصد کانی کدر است. این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلیتی 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 کاملاً کلریتی شده و به مقدار جزئی به اپیدوت دگرسان شده است (شکل ۳ الف).

الیوین بازالت: واحد الیوین بازالت نیز بخشی از مجموعه آتشفسانی با راستای شمال غرب-جنوب شرق بوده که در شرق منطقه بوژان رخنمون یافته است. بافت این واحد سنگی پورفیری با زمینه ریزسنگی است. درشت بلورهای موجود حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجم کل را تشکیل می‌دهند و شامل پلاژیوکلاز (بیشتر از نوع آندزین، حدود ۲۵٪-۲۰٪)، پیروکسن (حدود ۳-۵٪) و الیوین (۲-۳٪) در زمینهای از ریزستگ‌های 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 فرومیزین چون الیوین و پیروکسن ایجاد

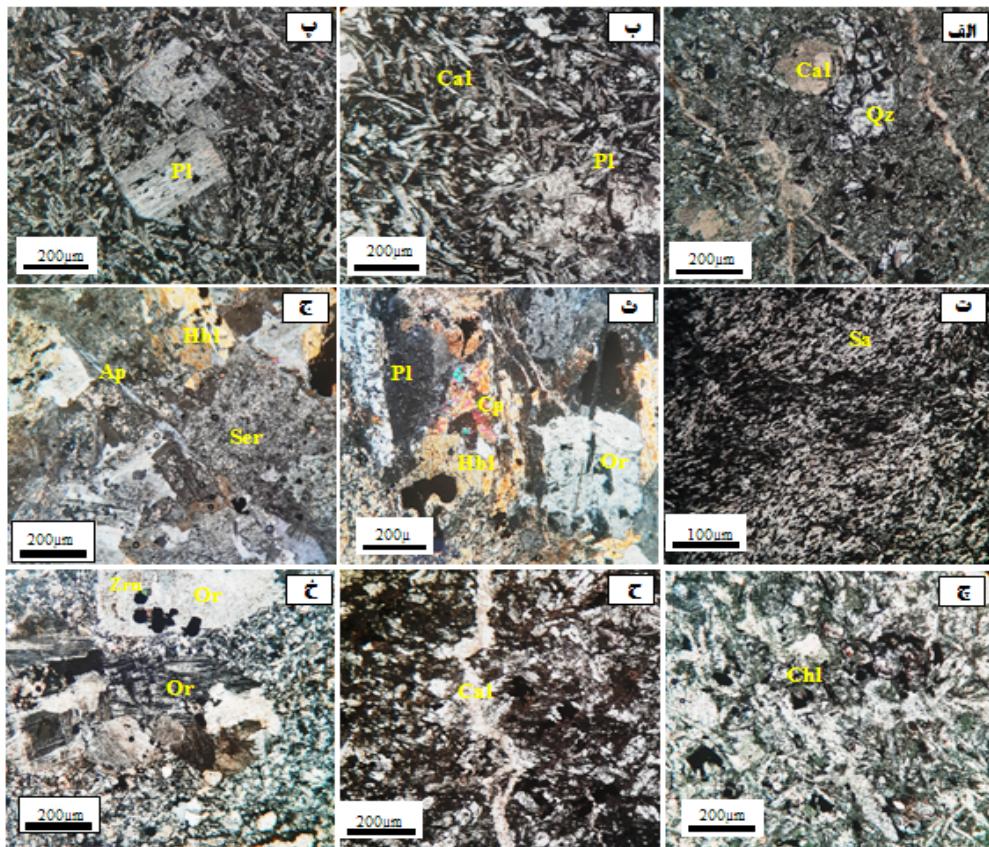
روش پژوهش

بررسی‌های صحرایی با تاکید بر تفکیک واحدهای آتشفسانی 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 1°C ± و گستره دمایی دستگاه -90°C تا $+600^{\circ}\text{C}$ درجه سانتیگراد بود. مقدار شوری در سامانه HOKIEFLINCS-EXCELL با نرم افزار $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ [۱۲، ۱۳] محاسبه شد. بررسی‌های ریزدماسنجی برای کانی‌های کوارتز و کلسیت در آزمایشگاه سیالات در گیر گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد با دستگاه Linkam و کنترل کننده دمایی THMSG-600 متصل به میکروسکوپ Leitz انجام شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برابر با 1°C ± برای دمای همگن شدگی تا 500°C درجه سانتیگراد و $0/1^{\circ}\text{C}$ ± برای دمای انجماد است. نخست بررسی‌های سنگنگاری برای ۸ مقطع دوبر صیقل تهیه شده از کوارتز و کلسیت انجام شد.

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 (آنذین، ۳۰-۲۵٪)، فلدسپار قلیایی (۱۸-۱۵٪) و پیروکسن (۵-۲٪) هستند (شکل ۳ ت). این واحد دستخوش دگرسانی پروپیلتی 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.

شده‌اند و کربنات کلسیم نیز به صورت رگچه‌ای و فراگیر در واحد بازالتی در متن سنگ ایجاد شده‌اند (شکل ۳ ب). آندزیت: این واحد آتش‌فشاری بیشتر در شرق منطقه مورد بررسی رخمنون یافته است. این واحد بافت غالب پورفیری و گلومرپورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط دارد و مقدار درشت‌بلورهای آن بین ۴۰ تا ۳۰ درصد متغیر است. مهمترین کانی تشکیل دهنده‌ی آندزیت‌ها درشت‌بلورها و ریزسنگ‌های پلاژیوکلاز (آنذین و الیگوکلاز) هستند که بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با ماکلهای چندrijخت حدود ۳۰-۳۵ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. افزون براین، فلدسپارهای قلیایی (۲-۳٪)، پیروکسن‌ها (اوژیت) (۲-۵٪) 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 پروپیلتی شده است. از کانی‌های واحد دستخوش دگرسانی پروپیلتی شده است.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی (در نور قطبیده متقاطع، XPL) از (الف) بقایای الیوین و پرشدن توسط کلسیت و کوارتز ثانویه در واحد بازالت، (ب) بافت بادامکی و تیغه‌های پلاژیوکلاز در واحد آندزی بازالت، (پ) بافت گلومرپورفیری و درشت‌بلور پلاژیوکلاز در واحد آندزیتی، (ت) جهت‌گیری کانی سانیدین با ماکلهای کارلسbad در واحد تراکیتی، (ث) واحد مونزوگابرو، (ج) سرسیتی شدن پلاژیوکلازها در واحد مونزوگابرو، (ز) دگرسانی پروپیلتی شدید در واحد مونزوگابرو، (ح) حضور رگچه‌های کلسیتی و کربناتی در واحد دیوریتی و (خ) واحد کوارتز مونزوئیت پورفیری (Zrn: زریکان، Chl: کلریت، Or: اورتوكلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپیروکسن، Ser: هورنبلند، Ap: آپاتیت، Cal: کلسیت و Sa: سانیدین).

زمینه سنگ دیده می‌شوند. ارتوکلاز و کوارتز نیز به ترتیب با فراوانی ۸-۱۰ و ۵-۶ 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 پلازیوکلازها و ارتوکلازها در واحد کوارتز مونزوئیت پورفیری حضور دارند.

دیاباز: این واحد در شرق منطقه به شکل دایک درون مجموعه آتشفسانی-رسوبی نفوذ کرده است. بافت اصلی این واحد نیمه-پوستماری و میان‌دانه‌ای است. بلورهای پلازیوکلاز با فراوانی حدود ۳۵-۴۰ درصد و کلینوپیروکسن با حدود ۵۵-۶۰ درصد کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. پلازیوکلازها 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 پلازیوکلازها 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 اسپیکیولاریت، کالکوسیت، ملاکیت، 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.

مونزوگابرو: این واحد نفوذی در جنوب شرق منطقه در مرز بین واحدهای رسوبی و آتشفسانی رخمنون یافته بوده و به طور معمول دارای بافت‌های میان‌دانه‌ای، خال‌حال و نیمه‌پوست‌ماری است. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ پلازیوکلاز، هورنبلنده، کلینوپیروکسن و فلدسپار قلیایی و کانی‌های فرعی آن اسفن و آپاتیت هستند (شکل‌های ۳ ث و ج). پلازیوکلازها بر اساس زاویه خاموشی از نوع لاپرادوریت و آندزین هستند که بخش عمدۀ درشت‌بلورها را تشکیل می‌دهند. فلدسپارهای قلیایی نیز به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار از نوع ارتوکلاز و کلینوپیروکسن‌ها اغلب نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل از نوع اوژیت هستند. هورنبلندهای بی‌شکل با فراوانی حدود ۲۰-۳۰ درصد، مهمترین کانی مافیک واحدهای مونزوگابروی منطقه بوژان هستند. واحد مونزوگابرو دستخوش دگرسانی پروپلیتی ضعیف شده است. در این واحد، پلازیوکلازها به اپیدوت، سرسیت و کلسیت، ارتوکلاز به کانی‌های رسی، پیروکسن و هورنبلنده نیز به کلریت و کربنات دگرسان شده‌اند (شکل ۳ ج).

دیوریت: این توده حدواتط در جنوب غرب منطقه در مرز با واحدهای رسوبی واقع است. این واحد بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی دارای بافت میان‌دانه‌ای و نیمه‌خودریخت دانه‌ای است. پلازیوکلازها (آندزین) و فلدسپات قلیایی (ارتوكلاز) کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده واحد دیوریتی هستند. پلازیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با فراوانی حدود ۸۰ درصد بیشترین حجم سنگ را تشکیل می‌دهند و ارتوکلازها نیز دارای فراوانی حدود ۱۰-۱۵ 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).

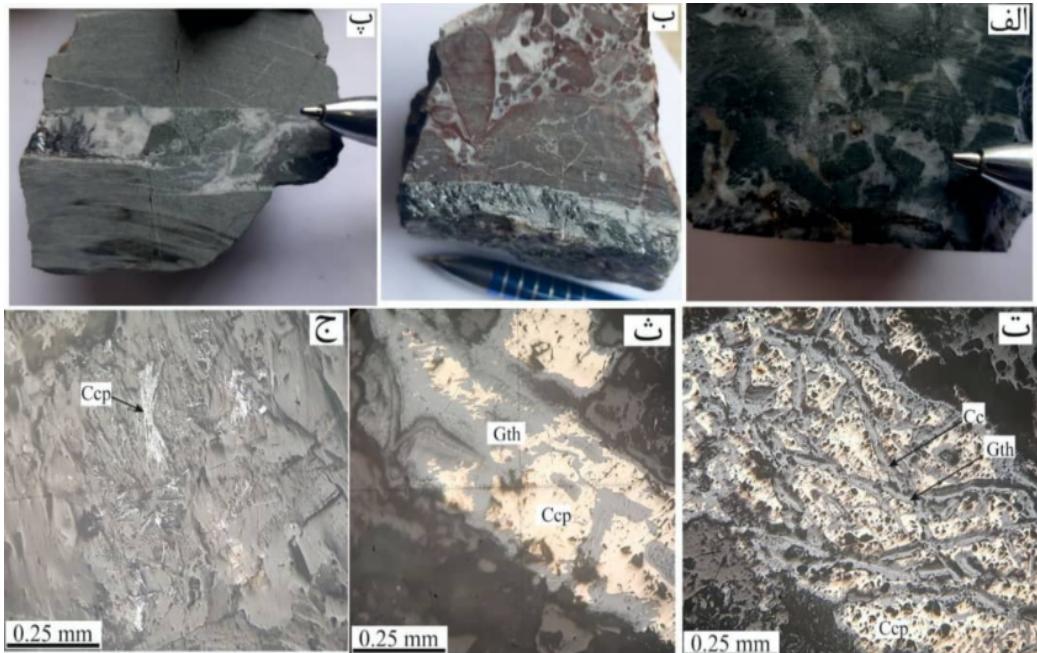
کواز مونزوئیت پورفیری: این واحد نیمه‌عمیق در شرق منطقه به شکل توده‌ای در مجموعه آتشفسانی نفوذ کرده است. بافت غالب آن پورفیری است و پلازیوکلاز، ارتوکلاز و کوارتز کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ خ). پلازیوکلازها (بیشتر الیگوکلاز و آلبیت) از فراوان‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده این واحد هستند که بصورت درشت بلور بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار حدود ۱۰-۱۵ درصد و ریزسنگ در

آن پی‌جویی کانسارهای گرمابی-ماگمایی است. بررسی سیال‌های 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.

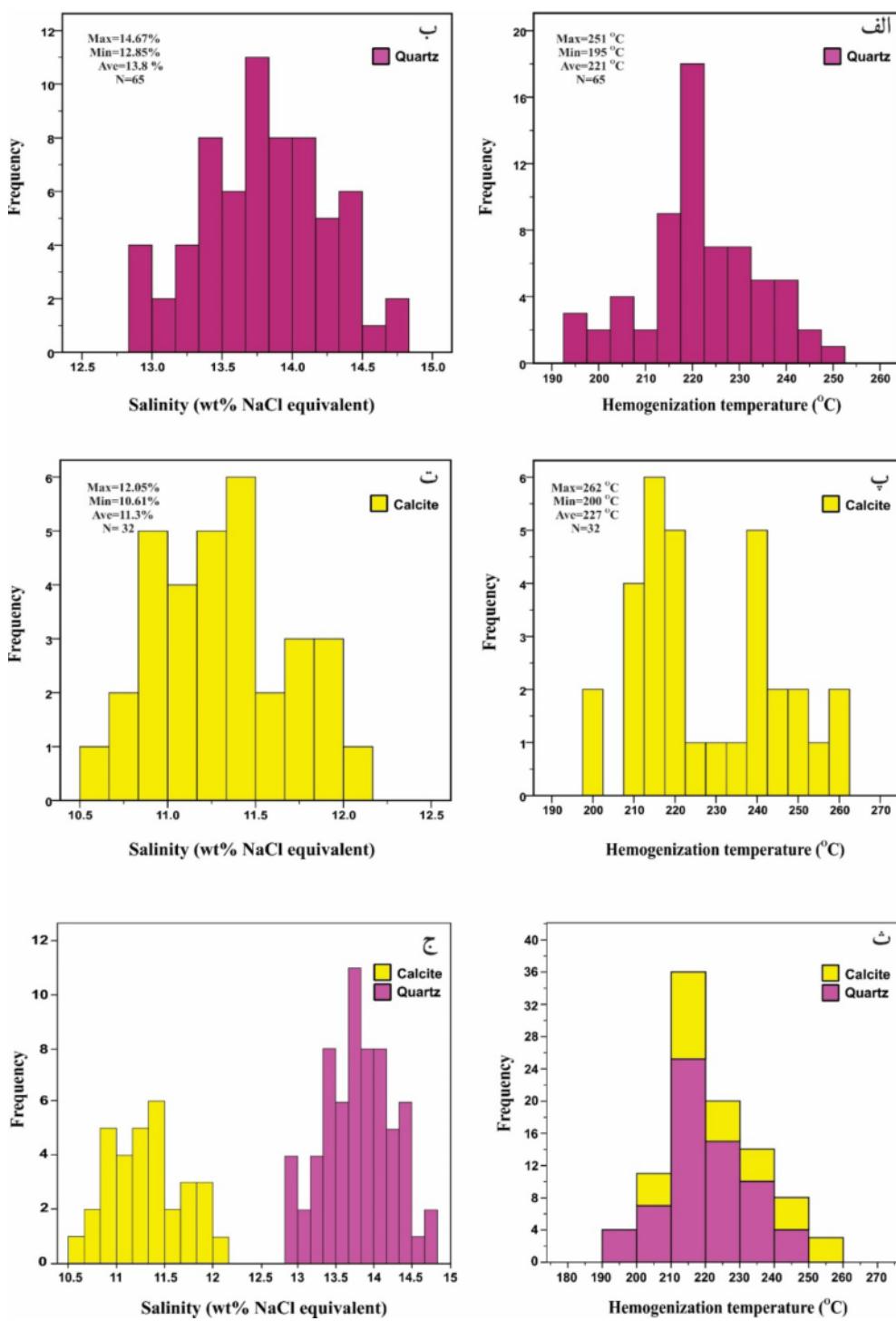
فراوانترین کانی ثانویه نیز ملاکیت است که از تبدیل کالکوپیریت‌ها ایجاد شده‌اند و به صورت پراکنده و جانشینی همراه با مقادیر بسیار جزئی کالکوسیت ثانویه درون رگچه‌ها حضور دارند. مهمترین عوامل کنترل کننده‌ی کانی سازی شکستگی‌ها، دگرسانی‌ها و محلول‌های گرمابی هستند که در پهنه‌های درون‌زاد و اکسایشی رخ داده‌اند. دگرسانی عمده همراه با کانی‌سازی پهنه‌های پروپیلیتی ضعیف، متوسط و شدید در مقیاس ناحیه‌ای گسترده است و دگرسانی‌های موجود بر بخش قابل توجهی از واحدهای آتشفسانی 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 میزان بازالتی-آنذیتی 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



شکل ۴ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی کانه‌های موجود در منطقه اکتشافی بوزان: (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 و گوتیت درون اسپکیولاریت (Cc: کالکوسیت، Cep: کالکوپیریت و Gth: گوتیت) [۱۷].



شکل ۵ نمودارهای دمای همگن‌شدن و مقدار شوری در رگچه‌های سیلیسی و کربناتی و مقایسه آنها با هم در منطقه اکتشافی بوژان.

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 دوفازی مایع–گاز غنی

براساس بررسی‌های انجام شده بر کانی‌های کوارتز و کلسیت، سیال‌های درگیر اولیه تقریباً 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

تا -۹ درجه سانتی‌گراد (میانگین -9.89°C) و در رگچه‌های کلسیت حدود -8.3° تا -7.3° درجه سانتی‌گراد (میانگین -7.67°C) محاسبه شد. بر اساس دمای T_m اندازه‌گیری شده، شوری سیال‌های درگیر در رگچه‌های کوارتز 12.85° تا 14.67° درصد وزنی NaCl (با میانگین 13.8° درصد NaCl) و در رگچه‌های کلسیت 10.61° تا 12.05° درصد وزنی NaCl (میانگین 11.3° 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 و ج). 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 شیمیابی عامل تهنشینی و تمرکز اقتصادی کانسار هستند [۱۹].

در واقع، دو فرایند آمیختگی سیال‌ها (سیال ماقمایی 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.

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 دماستنجی 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 80° تا 90° درصد حجمی فاز مایع در مرحله همگن‌سازی به فاز مایع همگن می‌شوند. بررسی‌های دماستنجی بر سیال‌های دوفازی غنی از مایع نشان می‌دهد که اولین دمای ذوب یخ (T_{fim}) یا دمای سانتی‌گراد و در کانی کلسیت حدود 46.8° تا 46° درجه سانتی‌گراد و در کانی کوارتز برابر با 47.1° تا 46° درجه سانتی‌گراد و درگیر و شوری این سیال‌ها می‌توان ترکیب سیال درگیر و نوع نمک‌های موجود در آن را شناسایی کرد [۱۶]. دمای نقطه همگذاری میانگین به دست آمده (برای کوارتز 46.5°C و برای کلسیت 46.38°C) نشان می‌دهد که سیال کانسارساز در منطقه اکتشافی بوژان از سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$ است [۱۸].

همچنین، دمای همگن‌شدگی به فاز مایع (از بین رفتمند چباب گاز) در سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع در رگچه‌های کوارتز حدود 19.5° تا 25.1° درجه سانتی‌گراد (با میانگین 22.1°C) و در رگچه‌های کلسیت حدود 20.0° تا 26.2° درجه سانتی‌گراد (میانگین 22.7°C) است (شکل‌های ۵ الف و ب). 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 -10.7° تا -9.2° درجه سانتی‌گراد (M) است [۱۸].

جدول ۱ نتایج ریز دماستنجی سیال‌های درگیر اولیه در منطقه اکتشافی بوژان.

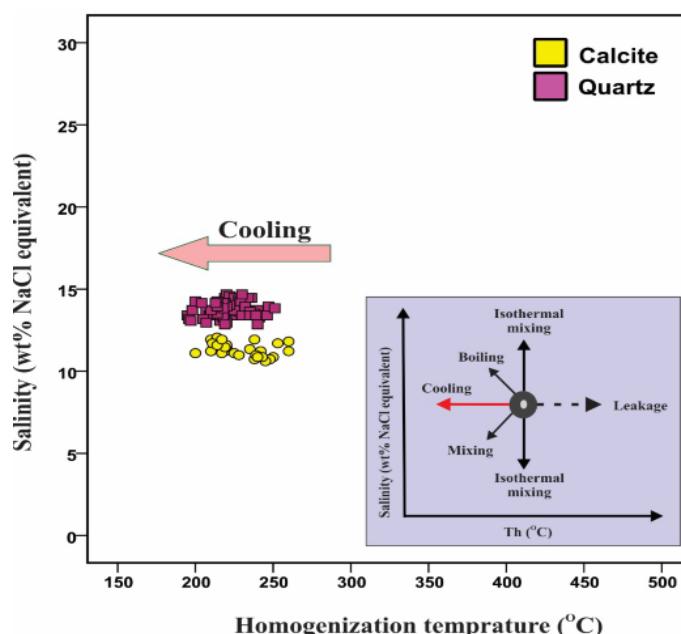
شماره نمونه	کانی میزان	نوع سیال درگیر	تعداد	$\text{Th} (\text{ }^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{m}_{\text{ice}}} (\text{ }^{\circ}\text{C})$	شوری (wt% NaCl equiv.)
BQ-5	کوارتز	LV	۱۳	$21.6-22.4$	-10.7 to -9.2	۱۳.۷-۱۴.۵
BQ-9	کوارتز	LV	۱۴	$20.7-23.6$	-10.7 to -9.8	۱۳.۴-۱۴.۵
BQ-10	کوارتز	LV	۱۳	$19.5-22.5$	-10.2 to -9.1	۱۲.۹-۱۴.۱
BQ-11	کوارتز	LV	۱۲	$20.0-22.0$	-10.3 to -9	۱۲.۸-۱۴.۲
BQ-12	کوارتز	LV	۱۳	$23.0-24.7$	-10 to -9	۱۲.۸-۱۳.۹
BC-1	کلسیت	LV	۶	$20.0-21.4$	-7.7 to -7.5	۱۱.۱-۱۱.۳
BC-6	کلسیت	LV	۱۱	$21.0-22.0$	-8.3 to -7.5	۱۱.۱-۱۲
BC-8	کلسیت	LV	۱۵	$22.5-26.0$	-8.2 to -7.1	۱۰.۶-۱۱.۹

آنزیت 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، ملاکیت، گوتیت و اسپکیولاریت همراه رگچه‌های کربناتی و سیلیسی حضور دارند و دگرسانی پروپیلیتی مهمترین پهنه دگرسانی تشکیل شده با این رگچه‌هاست. بررسی سیال‌های درگیر در نمونه‌های 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 همگن‌شدنی ۱۹۵ تا ۲۶۲ درجه سانتیگراد و شوری ۱۰۶۱ تا ۱۴۶۷ درصد نمک طعام را نشان می‌دهد. به احتمال بسیار، کاهش دما در اثر آمیختگی محلول گرم و شور با سیال جوی به نسبت سردرتر 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 نشان‌دهنده سامانه کانی‌سازی رگه‌ای فرآگرمایی در منطقه اکتشافی مس بوژان است.

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 (۱۰۶۱ تا ۱۲۰۵ و ۱۲۸۵ تا ۱۴۶۷ درصد وزنی NaCl) در شکل‌گیری کانسار مس نقش داشته‌اند. به بیان دیگر، سیال ماغمایی به نسبت گرم و کمی شور دچار آمیختگی با آب‌های جوی سردرتر با شوری کمتر شده است. بنابراین کاهش دما و شوری و سپس سردشدنی محتملترین سازوکار ناپایداری عناصر همراه سیال کانسارساز در منطقه اکتشافی بوژان بوده که منجر به تهشیین عناصر همراه سیال‌ها شده است (شکل ۶). 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 رگه‌رگچه‌های سیلیسی 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 آتشفسانی میزبان رخ داده است. سنگ‌های آتشفسانی از نظر رده‌بندی زمین‌شیمیایی در گستره تراکیت،



شکل ۶ نمودار دمای همگن‌شدنی 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 می‌نمایند.

مراجع

- 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., "Hokieflins-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. 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 liquidus at 1 atm total pressure", *Geochim. Cosmochim. Acta* 1990 54, 603-610.
- [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., Moavez 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

- [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.
- [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.