



بررسی زمین شناسی، کانی شناسی و فرآیند تشکیل رخداد بور محمدآباد عریان (جنوب سبزوار)

مهدی بمانی*، سیدحسین مجتهدزاده، امیرحسین کوهساری

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله: ۹۱/۳/۱۷، نسخه نهایی: ۹۱/۱۰/۱۹)

چکیده: رخداد بور محمدآباد عریان تنها رخداد بورات شمال شرق ایران است که در واحدهای سنگی مارن کرم رنگ، مارن توفی، برش آتشفشانی و توف برش مربوط به دوران کرتاسه قرار گرفته است. این رخداد در ۵۰ کیلومتری جنوب سبزوار واقع شده است. دو گسل از نوع راندگی یا معکوس محدوده کانسار را در بر می‌گیرند که دارای راستای NE-SW هستند. می‌توان گفت این گسل‌ها به عنوان معبری برای محلول‌های سازنده کانسار و نیز سازنده‌ی فضاهای لازم برای جایگزینی کانسار عمل کرده‌اند. کانی‌های تشکیل دهنده این کانسار بورات‌های آبدار منیزیوم، منیزیوم-کلسیم و کلسیم هستند که هیدروبوراسیت (بورات منیزیوم-کلسیم) مهمترین کانی کانسار است. در این منطقه گرهک‌هایی از کانی الکسیت به خوبی در سطح دیده شدند. علاوه بر آن کانی‌های تینکالکونیت و میروفریت نیز با استفاده از آنالیز نمونه‌ها به روش XRD شناسایی شدند. با توجه به اینکه رخداد معدنی در واحدهای رس سنگی، مارنی و توفی واقع شده و با توجه به شباهت آن با دیگر کانسارهای بورات شناخته شده، می‌توان گفت توده معدنی به صورت عدسی‌هایی متقاطع با سنگ درونگیر رسی-مارنی در شکستگی‌های آن قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته در ترانشه‌های حفر شده در منطقه نشان می‌دهد که از سطح به عمق از شدت کانی سازی کم می‌شود. به نظر می‌رسد شاره‌های فرورو از طریق شکستگی‌های زمین‌ساختی به اعماق کم فرورفته و پس از گرم شدن (بر اثر گرادیان زمین گرمایی بالای منطقه) با ایجاد یک سلول همرفتی گرمایی با گردش در واحدهای منطقه موجب فروشست واحدهای سنگی زیرین شده‌اند. سپس به وسیله این شاره‌های غنی از بور، در افق‌هایی که گسل‌ها لایه‌های رسی-مارنی را قطع کرده‌اند (به واسطه مهیا بودن شرایط احیایی)، کانی سازی صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: رخداد بور محمدآباد عریان؛ دگرسانی؛ شاره‌های غنی از بور؛ هیدروبوراسیت.

مقدمه

فرآیند تشکیل کانسارهای بور دنیا را در دو مدل اصلی کانسارهای بور برون‌دمی رسوبی و کانسارهای بور گرمایی ارائه داده‌اند [۳].

تنها در نواحی اندکی از جهان ذخایر عظیم بورات وجود دارد و دلیل اینکه چرا این نواحی برای تشکیل بورات مساعد بوده است کاملاً مشخص نیست. چنین گفته می‌شود که تمامی آنها در بخش بالا آمده‌ی زون‌های فرورانش هستند. این قاعده برای ذخایر کوه‌های هیمالیا به خوبی صدق می‌کند زیرا

کانسارهای بور از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردارند و مصارف گوناگونی در صنعت (فلزگری، داروسازی، شیشه سازی، تهیه شونده‌ها و ...) و کشاورزی (تهیه کودهای شیمیایی، حشره کش‌ها و ...) و غیره دارند [۱]. حدود ۲۳۰ نوع کانی مختلف حاوی عنصر بور در طبیعت پیدا شده‌اند [۲]. کانی‌های گروه بورات به دو رده بورات‌های هیدراتی و غیر هیدراتی تقسیم بندی می‌شوند که هر یک دارای کانی‌های متعددی هستند.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۵۲۶۷۸۸۶۳، نامبر: ۸۲۱۰۹۹۵ (۰۳۵۱)، پست الکترونیکی: bemanimahdi@gmail.com

دوباره^۷ موجب تمرکزهای جدیدی در سوراخ‌های ریز سنگ‌های اطراف شده است [۷].

رخداد بور محمدآباد عریان تنها رخداد شناسایی شده در شمال شرق ایران مرکزی است. در گذشته‌های نه چندان دور که قدمت آن شاید به بیش از ۵۰ سال پیش باز گردد، در منطقه‌ای به نام محمدآباد عریان در ناحیه‌ای به نام پشت قرمز و توناکار آثار و شواهدی از استحصال و فرآوری بوراکس به چشم خورده است که به نظر می‌رسد به نوعی با کانسار بوراکس در پیوند باشد. براساس شواهد موجود در این نواحی در برهه‌های مختلف زمانی و با تغییرات آب و هوایی از جمله میزان بارش و نزولات آسمانی، میزان دمای هوا و دیگر شرایط محیطی، زمینه برای بر جای گذاری بور و کانسارهای تبخیری دیگر فراهم شد که این امر موجب بررسی‌های زمین شناسی، کانی شناسی و فرایند تشکیل رخداد بور در این ناحیه شده است.

در ابتدا منطقه‌ی مورد بررسی وسعتی بیش از ۶۰۰ کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار می‌داد که پس از پی‌جویی‌های بسیار با استفاده از روش‌های دورسنجی و تهیه نقشه زمین شناسی منطقه، پیمایش‌هایی در منطقه برای بررسی صحرایی و نمونه‌گیری طرح ریزی شد [۵]. در این مقاله به موضوع کانی شناسی، زمین شناسی و فرایند تشکیل کانسار بور محمدآباد عریان پرداخته شده است.

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد بررسی

منطقه‌ی مورد بررسی در ۵۰ کیلومتری جنوب سبزوار واقع شده است، که گستره‌ای به مساحت تقریبی ۶۰۰ کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار می‌دهد. مهمترین راه‌های ارتباطی منطقه جاده‌ی قدیم بردسکن به سبزوار است (شکل ۱). در این منطقه در نقاط مختلفی به صورت پراکنده چشمه‌ها و آثاری از کانی سازی بور مشاهده شده‌اند. که از جمله‌ی آنها می‌توان مناطق توناکار، برج خارکن، چاه تاجی، چشمه پهن آب، دوچاهی، پشت قرمز و چاه شور را نام برد.

روش بررسی

در این پژوهش پس از تهیه نقشه زمین شناسی منطقه، با استفاده از بررسی‌های دورسنجی و پیمایش‌های صحرایی و استفاده از نقشه‌های زمین شناسی که قبلاً از منطقه تهیه شده

چشمه‌های آب گرم بوراکس در بیشتر امتداد خط برخورد قاره‌ها وجود دارد. در شرق آمریکا، در رشته کوه‌های نوادا نیز ذخایری تشکیل شده‌اند و خط اصلی ذخیره‌ی بورات جهان به طول ۳۴۰ کیلومتر در راستای این رشته کوه‌ها واقع است. از ذخایر دیگر بورت می‌توان به ذخایر ترکیه، یوگوسلاوی، ذخایر اسکارنی چین و روسیه اشاره کرد [۳].

در ایران کانی سازی بور در شمال غربی ایران (استان‌های زنجان و آذربایجان شرقی) بیش از ۳۰ سال پیش گزارش شده و در حدود ۲۰ سال گذشته مقدار کمی مخلوط از کانی‌های بورات‌های دارای کلسیم و منیزیم (Ca/Mg کانی‌های کلمانیت و هیدروبوراسیت) تولید شده است [۴]. به طور کلی در ایران علاوه بر منطقه‌ی قره گل-میانج در حوزه‌ی رودخانه قزل اوزن در شمال غرب ایران، در مناطق محمدآباد-عریان در شمال شرق ایران، ده شتران در حوزه‌ی سیرجان، ندوشن در ۱۰۰ کیلومتری غرب یزد و دریاچه ارومیه اثرها و رخدادهایی از کانی سازی بورات‌ها مشاهده شده‌اند [۱]. رخدادهای میانج در استان زنجان و کانسار قره گل که شباهت‌های زیادی با رخدادهای محمدآباد-عریان دارند در رسوب‌های ماری و کنگلومرای پلیوسن قرار دارند. رخدادهای محمدآباد-عریان در ساختار گسله‌ای واقع شده است که دارای روند NE-SW در درون واحدهای سنگی مارن کرم رنگ، مارن توفی، برش آتشفشانی و توف برش مربوط به دوران کرتاسه است. وجود چشمه‌های معدنی فعال در اطراف این کانسار حاکی از بالا بودن گرادیان زمین گرمایی^۲ و فعالیت‌های گرمایی در ناحیه است و می‌تواند در شناخت فرایند تشکیل کانسار راهنمای مفیدی باشد [۵].

فرایند تشکیل مشابهی برای کانسارهای بور ایران و نیز رخدادهای بور محمدآباد-عریان، را می‌توان با کانسارهای مهم ترکیه مانند بیگادیک^۳، کستالک^۴ و امت^۵ در نظر گرفت [۶]. این کانسارها بیشتر همراه با خاکسترهای آتشفشانی^۶ و رسوب‌های آهکی-مارنی دریاچه‌ای بوده و به صورت همزاد و برون‌دمی آتشفشانی تشکیل شده‌اند [۷، ۸]. سپس فرایندهای تحرک

- 1- Index
- 2- Geothermal
- 3- Bigadic
- 4- Kestelek
- 5- Emet
- 6- Volcanic

7- Remobilization

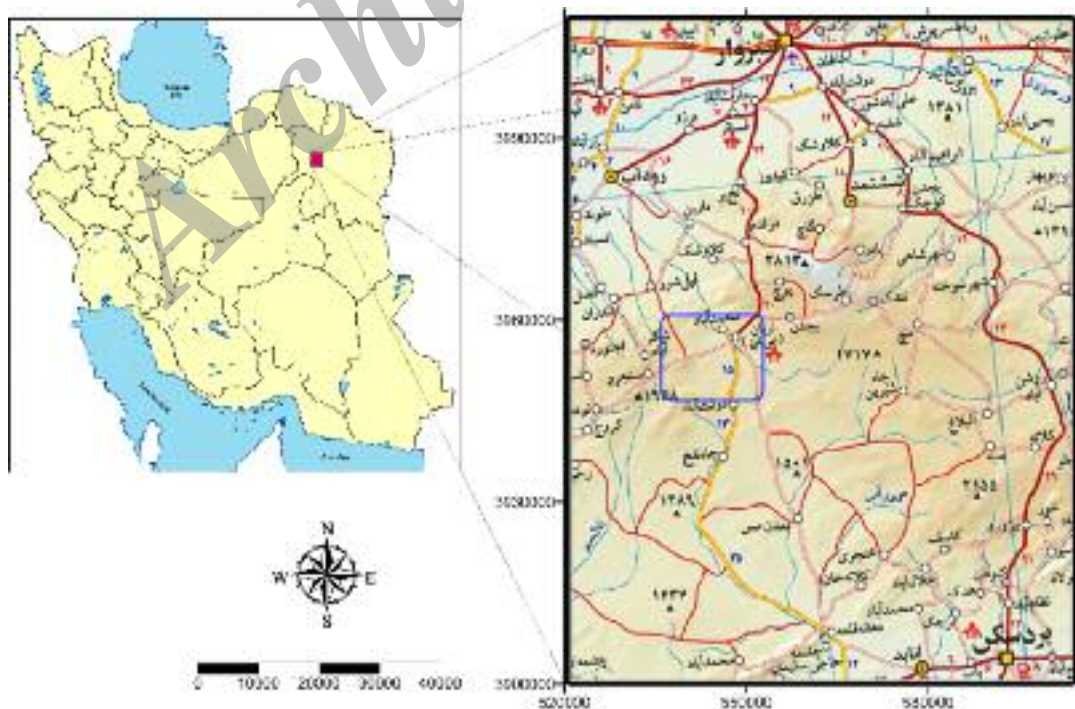
وسیعتر این ناحیه بین دو گسل بزرگ درونه (در جنوب) و گسل بینالود (در شمال) واقع شده است. زون سبزواری از شمال با زون بینالود و از جنوب با زون بلوک لوت در ارتباط است. این ارتباط زمین‌ساختی و گسله‌ای هستند. در جنوب ناحیه‌ی ششتمد، زون تکنار به صورت یک هورست گوه‌ای شکل بین دو گسل درونه و تکنار قرار گرفته است. شکل ساختاری منطقه ششتمد بدون شک تحت تاثیر گسل‌هایی مانند درونه و تکنار قرار گرفته است [۱۰].

از نظر زمین‌ساختی و زمین‌شناسی ساختاری زون سبزواری به عنوان منطقه‌ای حدواسط بین خرد ورق شرق ایران مرکزی و نیز حد جنوبی صفحه‌ی توران واقع شده و لذا چرخش‌های خرد ورق و به خصوص وارون شدن‌های پیاپی برای چرخش باعث شد تا نتوان به آسانی سیستم‌ها و قطب‌های تنش آورنده-ی گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه را دسته‌بندی کرد [۱۱]. در گستره‌ی ورقه‌ی دارین شاهد مجموعه‌ای از سیستم‌های راندگی و گسل‌های وارون هستیم که دارای شیبی به سمت شمال و شمال غربی بوده و بیانگر دو جهت اصلی فشار از سمت شمال و شمال غربی هستند. اکثر گسل‌های مهم منطقه به طور کلی به موازات گسل درونه‌ی این منطقه قرار گرفته‌اند [۱۲].

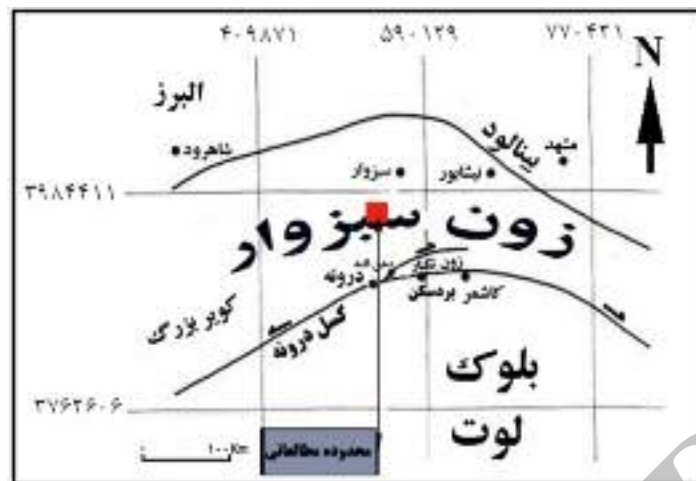
بودند، مسیرهای پیمایش برای گرفتن نمونه و بررسی واحدهای زمین‌شناسی منطقه طرح ریزی شد و در مجموع ۹ پیمایش در این منطقه انجام گرفت. در این پیمایش‌ها واحدهای زمین‌شناسی هر بخش به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفتند و از چشمه‌های گرمایی منطقه نمونه‌های شورابه‌ای و از کارهای اکتشافی که قبلاً در این منطقه انجام گردیده بود از قبیل ترانسه‌ها، نمونه‌های سنگی گرفته شد. در مجموع تعداد ۱۲۶ نمونه شورابه‌ای و ۱۰ نمونه سنگی برای آنالیز تهیه شدند. نمونه‌های شورابه‌ای به روش طیف‌نگاری نشری پلاسمای القایی مورد آنالیز قرار گرفتند و مقادیر چهار عنصر B ، K ، Li و Mg در آنها مشخص شدند. به منظور بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های سنگی، این نمونه‌ها به روش XRD مورد آنالیز قرار گرفتند و کانی‌های موجود در آنها شناسایی شدند. آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه‌های وابسته به بخش خصوصی در ایران صورت گرفتند.

زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی

بخشی از گستره‌ی مورد بررسی در نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دارین و بخشی از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ششتمد در زون سبزواری که بخشی از زون ساختاری بزرگ ایران مرکزی است، قرار دارد (شکل ۲). در نگاهی



شکل ۱ نقشه راه‌های ارتباطی به منطقه‌ی محمدآباد عریان، منطقه‌ی مورد بررسی در شکل مشخص شده است [۹].



شکل ۲ موقعیت گستره‌ی مورد بررسی در زون سبزوار [۱۱].

کرتاسه در منطقه را نهشته‌های وابسته به بخش رسوبی سری افیولیتی، تناوب توف و آندزیت، سنگ آهک‌های خاکستری روشن تا صورتی، سنگ آهک، مارن‌های خاکستری و مارن آهکی، رخساره‌های آذرآواری و سنگ‌های آتشفشانی تشکیل داده‌اند. از مهمترین واحدهای دوره ائوسن می‌توان به مارن، توف، ماسه سنگ، میکروکنگلومرتا تا کنگلومرا و آهک ضخیم لایه اشاره کرد. مهمترین واحدهای دوره میوسن را نیز مارن‌های قهوه‌ای گچدار و تناوبی از مارنهای قرمز-قهوه‌ای با ماسه سنگ‌های سرخ و لایه‌های گچی تشکیل می‌دهند. وسعت و موقعیت این واحدها را در نقشه زمین شناسی (شکل ۳) می‌توان دید.

بررسی‌های میدانی

چنانکه گفته شد به منظور بررسی‌های زمین شناسی و نمونه گیری از منطقه، تعداد ۹ پیمایش صحرائی انجام گرفت. در این بخش مشاهدات و یافته‌های مربوط به یکی از این پیمایش‌ها، که می‌توان گفت مهمترین پیمایش صورت گرفته در منطقه نیز هست، ارائه می‌شود.

پیمایش توناکار - برج خارکن: این پیمایش به طول ۱۵۰۰ متر در منطقه‌ی توناکار-برج خارکن انجام گرفت (شکل ۳) و هدف آن بررسی‌های دقیق زمین شناسی، مخصوصاً در ارتباط با کانی سازی بور بوده است. از نظر زمین شناسی این پیمایش شامل تناوبی از نهشته‌های ماسه سنگ، مارن و مارن‌های نمکدار و گاهی کنگلومرا به سن ائوسن است که نزدیک به مرز گسله با واحدهای قدیمی‌تر کرتاسه است. واحدهای کرتاسه شامل

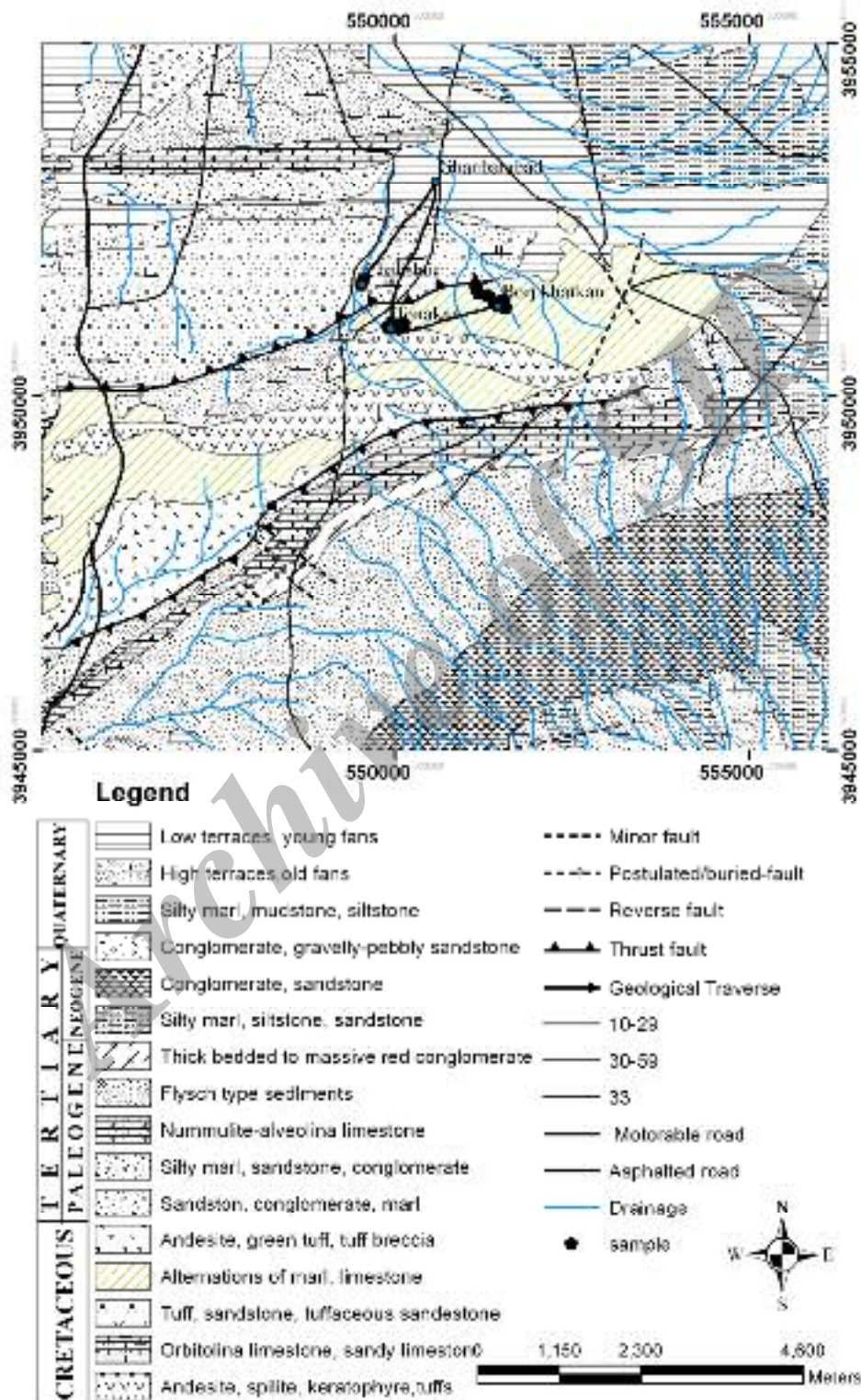
اغلب گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه دارای دوره‌ی فعالیت به نسبت جدیداند و منطقه از نظر زمین ساختی فعال بوده و تکان‌ها و زمین لرزه‌های خفیف مکرری در طول سال در برخی از روستاهای مجاور گسل‌های بخش میانی نقشه قابل ذکر است. گسل‌های مهم موجود در گستره‌ی دارین عبارتند از گسل‌های مظفرآباد-گرآب، دولت آباد-چاه شن و گسل معکوس شمال مهرکرد-جنوب ذوالفرخ [۱۲]. چین خوردگی‌های متعددی به شکل تاقدیس و ناودیس در این گستره قابل مشاهده‌اند، و نیروهای فشار به وجودآورنده‌ی گسل‌های منطقه سبب چین خوردگی آنها نیز شده است. بر حسب نقاط مختلف درجات چین خوردگی‌ها از ملایم تا متوسط، شدید و خیلی شدید و حتی به صورت برگشته در این گستره دیده می‌شوند. ولی میانگین چین خوردگی در حد شدید تا خیلی شدید است. چندین ساختار تاقدیسی^۸ و ناودیسی^۹ بزرگ در ناحیه دیده می‌شوند که از جمله ناودیس‌های منطقه می‌توان ناودیس دولت آباد، ناودیس چاه تلخ، ناودیس مهرکرد - تپه بید، ناودیس کوه قلعه دختر و ناودیس ذوالفرخ را نام برد. تاقدیس‌های مهم منطقه عبارتند از تاقدیس دو چاهی و تاقدیس نامگذاری نشده-ی بین دو تاقدیس دولت آباد و چاه تلخ در گوشه‌ی جنوب شرقی نقشه که کم و بیش با آنها هم محور است [۱۳].

مهمترین واحدهای سنگ شناسی منطقه‌ی مورد بررسی عبارتند از واحدهای کرتاسه، ائوسن و میوسن. با توجه به نقشه زمین شناسی (شکل ۳) مهمترین واحدهای مربوط به دوره‌ی

8- Synclinal

9- Anticlinal

رسوب‌های فلیشی و آهک و سنگ‌های با ترکیب آندزیت، توف، توف پرشی و اسپلیت است. مرز بین رسوب‌های کرتاسه و ائوسن تیز و یک گسل وارون است (شکل ۴).



شکل ۳ نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی محمدآباد عربان برگرفته از نقشه‌ی ۱:۵۰۰۰۰ کل منطقه‌ی مورد بررسی



شکل ۴ محدوده توناکار که مرز بین واحدهای کرتاسه و ائوسن Kmlf2 - Esme مشخص شده است (نگاه به سمت جنوب).

چشمه گذارده شده است. نهشته‌هایی که مظهر این چشمه‌ها یا چاه‌ها در آن قرار دارند ماسه سنگ‌های نازک لایه‌اند که به شدت در اثر عملکرد گسل خرد شده‌اند. در زمین‌های اطراف چشمه‌ها بویژه در سراسیبه‌های شمال-شمال خاوری آنها به سهولت می‌توان آلکسیت را که به صورت شکل‌های مدور (گرهک) با قطر چند میلیمتر و به رنگ سفید تشکیل شده‌اند یافت (شکل ۶). البته پراکندگی آلکسیت یکنواخت نیست و با شدت و ضعف شدیدی همراه است. موضوع دیگر اینکه از فراوانی این ذرات کروی آلکسیت از بالا به پایین کاسته می‌شود. این موضوع در دیواره‌ی ترانشه‌های حفر شده در منطقه به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۷).

بخش بزرگی از واحدهای دربرگیرنده‌ی چشمه‌های بورزا شامل مارن و مارن نمکدار و ماسه سنگ است. مارن‌ها به رنگ‌های تیره و روشن و بیشتر به صورت پف کرده هستند. در حوالی برج خارکن آثار کانه زائی بور و گوگرد آزاد مشاهده می‌شود (شکل ۵). از نظر زمین شناسی این گستره‌ی نیز شامل تناوبی از نهشته‌های ماسه سنگ، مارن و مارن‌های نمکدار و گاهی کنگلومرا به سن ائوسن و رسوب‌های جوانتر است. از برخی از چشمه‌ها بوی لجن و گوگرد متصاعد شده و پف کردگی زمین‌های پایین دست چشمه‌ها در ارتباط با آب‌های شور است که پس از تبخیر مارن به صورت پف کرده می‌شود. اطراف چاه و دیواره‌ی دهانه چشمه‌های این منطقه از رسوب‌های آهکی جوان یا تراورتن پوشیده شده است که با آب



شکل ۵ پراکندگی کانه آلکسیت به همراه گوگرد در رسوب‌ها دیده می‌شود.



شکل ۶ اشکال مدور گرهک دار با ترکیب آلکسیت.



شکل ۷ کاهش کانی سازی آلکسیت از سطح به عمق دیده می شود.

کانی شناسی بور در منطقه‌ی مورد بررسی

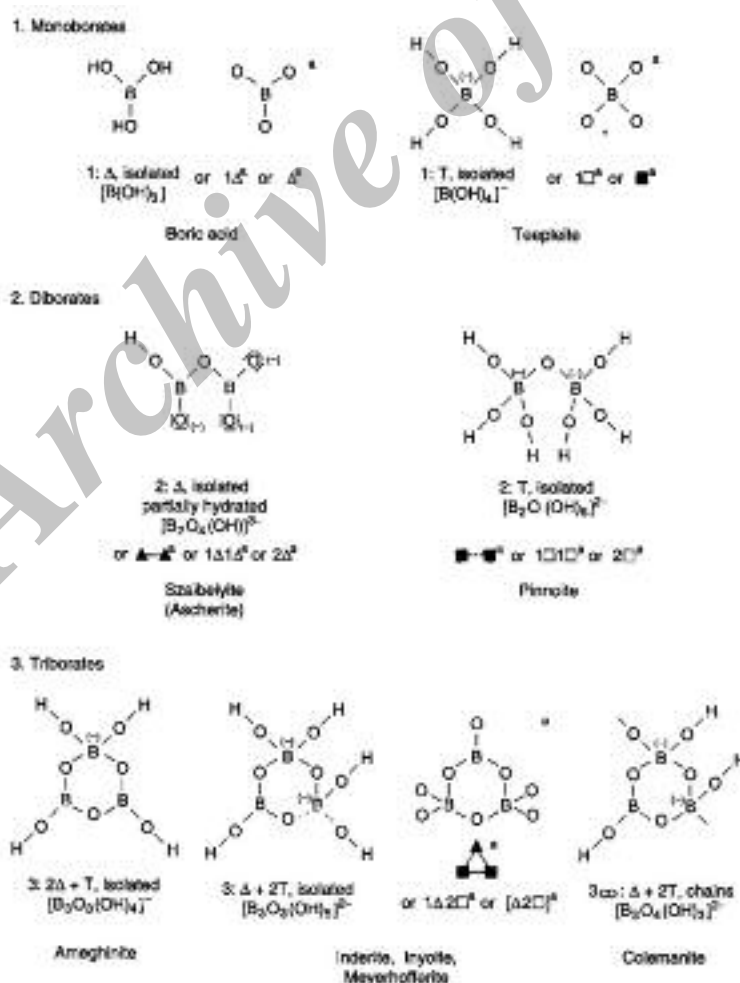
ساختار بلوری کانی‌های بوراتی و بورات‌های مصنوعی (آزمایشگاهی) به طور کامل مورد بررسی قرار گرفتند [۱۴]. بلورشناسان اغلب آرایش‌های اتمی ممکن بورات‌ها را بیان کرده و سعی کرده‌اند علت بالا بودن بسیار زیاد ترکیب‌های بورات را توضیح دهند [۱۵]. تمامی بورات‌ها دارای ترکیبایی با ساختار سه یا چهارگانه B-O هستند (شکل ۸). از ۲۳۰ کانی بورات شناخته شده در طبیعت بسیاری از آنها دارای چند کاتیون و آنیون، به صورت مولکول‌های بزرگ بوده و یا نسبت کاتیون یا آنیون آنها متفاوت است. پیوندهای سه و چهارگانه بور با اکسیژن (با بار منفی) قادر است به شکل‌های هندسی مختلفی حضور یابند. همچنین بورات‌ها می‌توانند با هر کاتیونی ترکیب شوند و یا با ترکیب‌های دیگر، نمک‌های دو یا چندتایی به

وجود آورند. بور به آسانی با سیلیکات‌ها بلوری شده و می‌تواند در برخی کانی‌ها به نسبت‌های متفاوت جایگزین آلومینیوم یا سیلیس شود [۳].

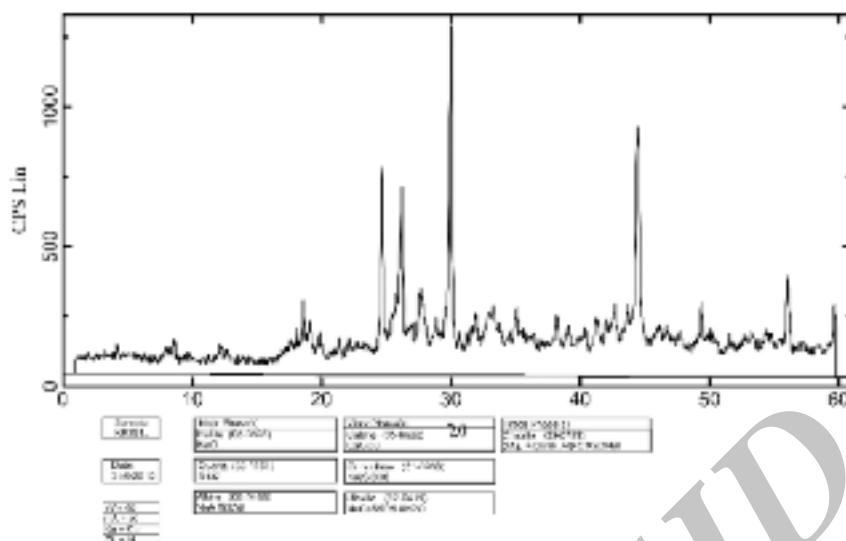
بسیاری از کانی‌های بورات می‌توانند در دمای بالا و از واکنش بور با عناصر دیگر در سنگ، حین نفوذ محلول‌های گرمایی (به همراه ماگما) به داخل تشکیلات دیگر و یا از هوازدگی یا ورود آب به ذخایر دیگر بورات در رخنمون‌ها، لبه‌ها و یا نزدیک مناطق گسلی به وجود آیند. بور می‌تواند ترکیب‌های بسیار متفاوتی در اثر تغییرات نسبتاً کمی در محتوای محلول، غلظت، pH، زمان به تعادل رسیدن، دما، دسترسی به آب یا فشار، تشکیل دهد. در نتیجه تنوع بسیار گسترده‌ی کانی‌های بورات به راحتی قابل پذیرش است. کانی‌های گروه بورات به دو رده بورات‌های هیدراتی و غیر

کانی این رخداد است. در پیمایش‌های انجام شده در منطقه و مشاهدات صحرایی صورت گرفته، گرهک‌هایی از کانی الکسیت در سطح ملاحظه شدند (شکل ۶). چنانکه بیان شد، از ترانشه‌های حفر شده در منطقه تعداد ۱۰ نمونه سنگی گرفته و این نمونه‌ها به روش XRD آنالیز شدند. نتیجه‌ی آنالیز دو نمونه از آنها در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده‌اند. همچنین کانی‌های اصلی، فرعی و جزئی شناسایی شده با این روش آنالیز، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. چنانکه در این جدول مشخص شده است، در نمونه‌ی شماره‌ی KR218Li، تینکالکونیت که یک کانی بوردار است به عنوان کانی اصلی در نمونه شناسایی شده است. علاوه بر این در نمونه‌ی شماره‌ی KR201Li، الکسیت و در نمونه‌ی شماره‌ی KR261Li، کانی‌های میروفریت و الکسیت که از کانی‌های بوردار هستند به عنوان کانی‌های فرعی شناسایی شده‌اند.

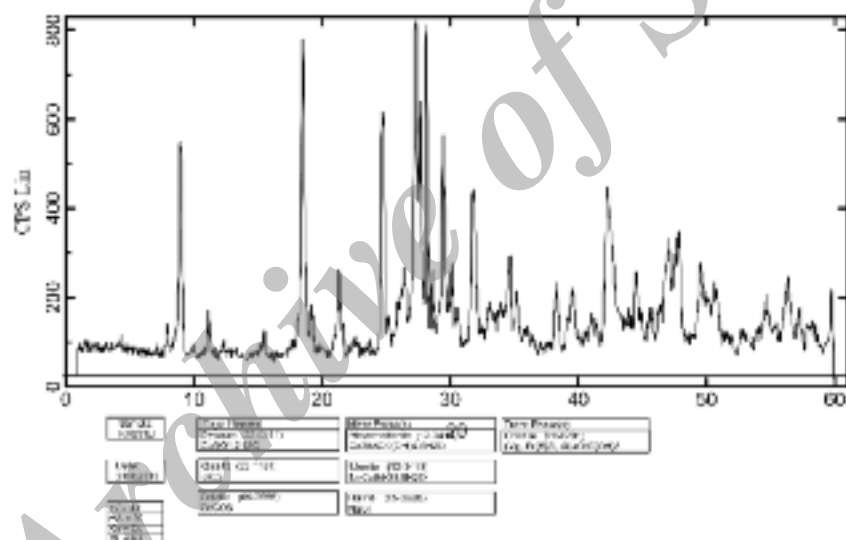
هیدراتی رده‌بندی می‌شوند که هر یک دارای کانی‌های متعددی هستند. از کانی‌های مهم بورات هیدراتی می‌توان بوراکس، کلمانیت، کرنایت، هیدروبوراسیت، پرسیت، پروبرتیت و الکسیت را نام برد، از کانی‌های مهم بورات غیر هیدراتی نیز می‌توان به ساسولیت، براسیت، سیزابلیت، داتولیت و تورمالین اشاره کرد. از میان ترکیب‌های متعدد بوردار فقط گروه کوچکی از بورات‌ها دارای ارزش اقتصادی هستند که محتوی اکسید بوریک، اکسید سدیم و یا کلسیم و یا هر دو و نیز آب تبلور یابند. کانی‌های این گروه عبارتند از بوراکس، کرنایت، کلانیست و الکایت [۳]. با توجه به وجود عنصر منیزیوم در نمونه‌های شورابه‌ای گرفته شده از منطقه‌ی مورد بررسی و نیز وجود کلسیم در آنها، می‌توان گفت کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این رخداد، بورات‌های آبدار منیزیوم، منیزیوم-کلسیم و کلسیم هستند و هیدروبوراسیت (بورات کلسیم-منیزیوم) مهمترین



شکل ۸ مثال‌هایی از سه گروه اولیه بورات‌ها [۳].



شکل ۹ نمودار آنالیز نمونه سنگی شماره KR201Li به روش XRD.



شکل ۱۰ نمودار آنالیز نمونه سنگی شماره KR261Li به روش XRD

جدول ۱- نتیجه بررسی های XRD، کانی های بوردار به صورت پرنگ نشان داده شده اند

شماره نمونه	کانی های اصلی	کانی های فرعی	کانی های جزئی
KR201Li2	هالیت، کوارتز، کلسیت، آلبیت	هورنبلند، کلریت، مونت موریلونیت	
KR206Li	کوارتز، آلبیت، کلسیت	اورتوکلاز، کلریت، مونت موریلونیت	
KR217Li	کوارتز، آلبیت، کلسیت	اورتوکلاز، کائولین، مونت موریلونیت	ژیپس
KR218Li	تینکالکونیت، هالیت، کوارتز	آلبیت، کلسیت	
KR201Li	هالیت، کوارتز، آلبیت	کلسیت، اورتوکلاز، الکسیت	کلریت
KR248Li	کلسیت	کوارتز، آلبیت، سولفور	
KR249Li	کلسیت، کوارتز	هورنبلند، آلبیت، سولفور	
KR261Li	ژیپس، کوارتز، کلسیت	میروفیریت، الکسیت، هالیت	کلریت
KR262Li	هالیت	کوارتز، آلبیت، کلسیت	ژیپس
KR262Li2	کلسیت	کوارتز، آلبیت، هورنبلند	

ژئوشیمی بور و عناصر همراه

عنصر بور در طبیعت نسبتاً کمیاب بوده و بواسطه‌ی میل شدید آن برای اکسید شدن به طور آزاد یافت نمی‌شود. این عنصر دارای قدرت احیاکنندگی بسیار شدید است و به علت پتانسیل یونی بالا دارای تحرک ژئوشیمیایی بالایی است، لذا حین تبلور ماگما در شاره‌های باقیمانده همراه با یون‌های Li, Be, Rb, Cs, REE, U, Nb, Ge و غیره، تمرکز می‌یابد. به علت پتانسیل یونی بالا همبافت‌هایی با پایداری زیاد در محلول می‌سازد و لذا قدرت تحرک زیادی در محیط‌های برون‌زا اکسیک دارد. در این محیط‌ها تغییرات شدید اسیدی (از ۳ الی ۸) نیز باعث خروج آن از محلول نمی‌شود و وجود شرایط احیایی برای نهشته شدن کانی‌های آن ضروری است [۱۶].

بنابر نظر اورتی و آلونسو (۲۰۰۰) میزان لیتیم در کانی‌های رسی همراه با کانسارهای بور همزاد از نوع برون‌دمی رسوبی بالا بوده و بیش از ۰/۳ درصد است [۲]. اصولاً تمرکزهای مهم بور همراه با رخساره‌های احیایی است و در کانی سازی بورات‌ها وجود شرایط احیایی ضروری است [۱۷]. وجود ژپیس و انیدریت همراه با کانی‌های اولیه‌ی بور حاکی از غنی بودن یون سولفات در این شاره‌هاست. با توجه به پاراژنز کانی شناسی کانسارهای بور و شرایط پایداری کانی‌های بور [۱۸]. حضور ادخال‌هایی از بلورهای کوارتز و فلدسپات در کانی‌های بور و بررسی‌های دیگر انجام شده در کانسارهای بور دنیا، pH شاره-های کانی‌ساز را حدود ۸ الی ۹ می‌توان در نظر گرفت [۱۶، ۱۹-۲۲].

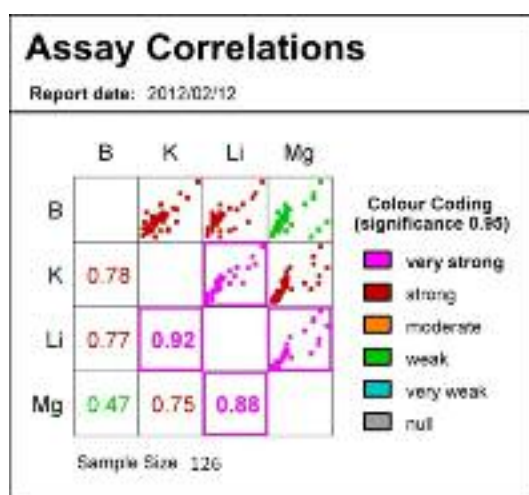
خلاصه‌ای از گزارش آماری آنالیزهای صورت گرفته روی نمونه‌های گرفته شده از منطقه، در جدول ۲ نشان داده شد.

جدول ۲ نتایج آنالیز تعدادی از نمونه‌های گرفته شده از منطقه

عنصر	تعداد نمونه‌ها	میانگین	انحراف معیار	کمینه	میانه	بیشینه
شورابه						
B	۱۲۶	۷۶۳/۵	۶۷۵/۸	۶	۶۱۸/۵	۵۹۳۰
K	۱۲۶	۱۵۳	۱۱۴/۷	۳	۱۲۵	۹۰۰
Li	۱۲۶	۱۰/۵۲	۶/۳۰	۱	۹	۳۶
Mg	۱۲۶	۱۴۶/۸	۱۴۸/۳	۱۰	۹۹/۵	۸۴۸
نمونه جامد						
B	۱۰	۳۷۸/۱۶	۴۹۴۷۴	۴۱۹	۷۷۱۴	۱۲۹۹۰۰
K	۱۰	۱۵۷۳	۹۳۱	۲۷۰	۱۷۰۰	۳۰۰۰
Li	۱۰	۷/۹	۱/۸	۴	۸	۱۱
Mg	۱۰	۵۷۹۶	۳۶۴۵	۶۷۹	۵۴۵۳	۱۱۵۶۵

نتایج آنالیز نمونه‌های شورابه‌ای به خوبی بیهنجاری مثبت بور در منطقه را نشان می‌دهد که از بیشترین و کمترین مقدار بور بین ۶ ppm تا ۵۹۳۰ ppm تغییر می‌کند و در ۲۵ نمونه مقدار بور بیش از ۱۰۰۰ ppm است که همه از گستره‌ی توناکار برداشت شده‌اند. علاوه بر این آنالیز نمونه‌های سنگی برداشت شده از منطقه نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از سنگ‌های مناطق با پتانسیل کانی سازی بالا (رس، مارن، ماسه سنگ و کنگلومرا) میزان بور در این لایه‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین در ترانشه‌های حفر شده در منطقه از فراوانی ذرات کروی آلکسیت از سطح زمین به عمق کاسته می‌شود.

بر اساس این بررسی میزان Li در اکثر نمونه‌ها بسیار ناچیز است و میانگین آن حدود ۱۲ ppm است. با توجه به پائین بودن مقدار Li، بنابر نظر اورتی و آلونسو [۲]، نمی‌توان این رخداد بور را با کانسارهای بور همزاد از نوع برون‌دمی رسوبی برابر دانست. مقادیر عنصر K در نمونه‌های شورابه‌ای در بازه‌ی ۳ ppm تا ۵۰۰ ppm متغیر است که البته مقدار این عنصر در نمونه‌های سنگی تا ۳۰۰۰ ppm نیز می‌رسد. بازه‌ی تغییرات مقادیر Mg در نمونه‌های شورابه‌ای در گستره‌ی ۱۰ ppm تا ۸۴۸ ppm است که مقادیر آن با یک جهش بزرگ در نمونه‌های سنگی در بازه ۱۴۵۶ ppm تا ۱۱۵۶۵ ppm متغیر است. با توجه به بررسی‌های ژئوشیمیایی صورت گرفته، بین عنصر B و عناصر دیگر همبستگی بالایی وجود ندارد در صورتی که بین جفت عناصر Li با Mg و Li با K همبستگی بالایی دیده می‌شود (شکل ۱۱) [۲۳].



شکل ۱۱- ماتریس ضرایب همبستگی پیرسن برای داده‌های خام منطقه

دگرسانی

کانسارهای بورات نئوزن عموماً پس از تدفین دستخوش تغییرات ثانویه گسترده‌ای شده‌اند. این تغییرات در اثر افزایش دما، فشار یا تأثیر آب‌های جوی فرورو بوده است، بنابراین معمولاً مجموعه‌ی کانی‌های اولیه‌ی بورات‌ها به ندرت حفظ شده‌اند [۱۸]. کانی‌های ثانویه عموماً دارای نسبت آب به بورات بالاتری هستند که حاکی از یک سیستم دگرسانی آب-حاکم^{۱۰} است. مطالعه‌ی ایزوتوپ‌های پایدار در ذخایر بورات در دریاچه‌ی سیلز^{۱۱} نشان می‌دهد که حتی نهشته‌های به ظاهر اولیه بورات با سن حدود ۳۵۰۰۰ سال نیز دستخوش دگرسانی شده‌اند [۲۴]. نفوذ و گردش آب‌های جوی از طریق سیستم گسل‌هایی که در گستره‌های کانی سازی وجود دارند به سمت افق‌های پایین تر صورت می‌گیرد. این شاره‌ها که غالباً غنی از یون‌های مختلف بخصوص کلسیم هستند، موجب دگرسانی کانی اولیه‌ی بور، یعنی هیدروبوراسیت، که بسیار واکنش پذیر است، می‌شوند. از کانی‌های ثانویه‌ی مهم که حاصل دگرسانی هیدروبوراسیت است کانی کلمانیت است. طی این فرآیند دگرسانی تبادل Mg با Ca بین هیدروبوراسیت و شاره‌های جوی صورت می‌گیرد و کانی کلمانیت حاصل می‌شود. کلمانیت‌هایی که بدین ترتیب حاصل شده‌اند در اثر واکنش با این محلول‌ها و آبیگری تبدیل به پریسیت می‌شوند و در برخی

مواقع شدت واکنش با شاره‌های آنچنان زیاد است که کانی‌های ثانویه‌ی بور بنیان بورات خود را نیز با کربنات محلول‌ها مبادله می‌کنند و در نهایت کلسیت حاصل می‌شود.

بطور کلی معمولاً دگرسانی‌هایی که در کانسارهای بورات مشاهده می‌شوند شامل دگرسانی‌هایی است که در اثر تدفین، افزایش دما و فشار رخ می‌دهند. بخشی از این دگرسانی‌ها نیز بر اثر واکنش با محلول‌های گرم و آب‌های زیرزمینی با کانسار دیده می‌شوند. بواسطه‌ی عمق کم تدفین می‌توان اثرهای دما و فشار در دگرسانی کانسار مورد بررسی را نادیده گرفت. اما دگرسانی بر اثر واکنش با محلول‌های گرم و آب‌های زیرزمینی در این کانسار اهمیت زیادی دارد و هم اکنون نیز در حال وقوع است.

بواسطه‌ی دگرسانی، مجموعه‌های کانی شناسی در افق‌های مختلف کانسار بور محمداً باد عریان تغییر می‌کند، بدین ترتیب که در کم عمق ترین عدسی‌های توده‌ی معدنی، کانی اصلی بور پریسیت (بورات کلسیم) است. در زیر این افق، کلمانیت (بورات کلسیم آبدار) اهمیت می‌یابد. سپس با افزایش بیشتر عمق به افقی برخورد می‌کنیم که کانی اولیه‌ی بور یعنی هیدروبوراسیت (بورات کلسیم و منیزیم آبدار) در آن فراوانی بسیار زیادی دارد. این کانی سازنده‌ی حجم اصلی توده‌ی معدنی است. با افزایش بیشتر عمق، مرتباً درصد این کانی در عدسی‌های معدنی افزایش می‌یابد.

10- water-dominated
 11- Searles

بحث و برداشت

بطور کلی برای فرآیند تشکیل کانسارهای بور دنیا دو مدل اصلی ارائه شده‌اند که شامل کانسارهای بور برون‌دمی رسوبی و کانسارهای بور گرمابی است. کانسارهای گروه اول در نهشته‌های رسوبی-تبخیری به صورت همزاد^{۱۲} یعنی حین نهشته شدن رسوبها تشکیل شده‌اند. در این حوضه‌ها فوران‌های آتشفشانی در بستر حوضه موجب ورود یون‌های بور به حوضه و نهشته شدن کانسارهای بور به صورت همزمان با رسوبگذاری شده است. در این کانسارها ساختارهای رسوبی مختلف مانند ریپل مارک، ترک‌های گلی و غیره دیده می‌شوند. از مشخصات مهم این کانسارها لایه کران^{۱۳} و چینه کران^{۱۴} بودن این نهشته‌ها است. رخساره‌های لایه‌ای و نواری این نوع از کانسارهای بور حاکی از نهشته شدن آنها در یک محیط آبی است [۲]، [۷]. در این نوع کانسارها هیچ ارتباط خاصی بین گسل‌ها و کانی‌سازی دیده نمی‌شود [۲]. گروه دیگری از کانسارهای بور به صورت گرمابی و در ارتباط با آتشفشانها تشکیل می‌شوند. این گروه از کانسارها ساختار چینه کران و حتی لایه کران ندارند و عموماً به صورت متقاطع با سنگ‌های میزبان قرار دارند. این نوع کانسارهای بور بی‌هنگامی مثبت شدیدی از عناصر S, Sr, Li, As نشان می‌دهند [۲۵]. رس‌های همراه با این کانسارها عموماً دارای لیتیوم تا حدود ۰/۰۳ درصد هستند [۲۶].

در مناطق با پتانسیل کانی‌سازی بورات‌ها هیچگونه ساختار رسوبی مشاهده نمی‌شود و توده‌ی معدنی چینه کران و لایه کران نبوده بلکه کانی‌سازی به صورت متقاطع با سنگ‌های میزبان در راستای گسل‌های منطقه و در افق‌های مختلف روی می‌دهد. بر اساس نظر هلواسی و اورتو (۱۹۹۸) کانسارهای بور که در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند حاوی کانی‌های رآلگار، اریمان، گوگرد و سلسنتین بوده و غنی‌شدگی از عناصر S, As, Sr, Li نشان می‌دهند [۸].

با توجه به حضور گوگرد در منطقه‌ی مورد بررسی (علاوه بر اینکه در بررسی‌های میدانی و مشاهدات صحرایی مشاهده شده

است، در بررسی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های سنگی نیز مشخص شده است)، وجود عناصر با خاستگاه آتشفشانی یعنی S, As, Sr, Li و نیز با توجه به پسین زاد^{۱۵} بودن کانسار و نیز عدم وجود ساختار رسوبی در منطقه و اینکه کانی‌سازی به صورت متقاطع با سنگ‌های میزبان در راستای گسل‌های منطقه و در افق‌های مختلف روی داده است، می‌توان مدل گرمابی آتشفشانی را برای آن مناسب دانست. با توجه به این نکات و بررسی‌های صحرایی و ژئوشیمیایی، چگونگی و مراحل تشکیل این کانسار را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

پس از نهشته شدن رسوب‌های منطقه طی حرکت‌های زمین‌ساختی این رسوب‌های چین خورده، گسل‌ها و شکستگی‌هایی در آنها ایجاد شده است. گسل‌های با راستای NE-SW از طرفی موجب گسترش تخلخل از نوع شکستگی در این رسوب‌ها شده و از طرف دیگر امکان گردش شاره‌های جوی فرورو در آنها را فراهم آورده‌اند. با توجه به الگوهای مشابه و بررسی‌های صورت گرفته در مناطق دیگر چنین به نظر می‌رسد که این شاره‌ها با نزول به اعماق، با توجه به گرادیان گرمایی بالای، ناحیه گرم شده و با فروشت^{۱۶} لایه‌های سنگی زیرین، که به صورت بین لایه‌ای در واحدهای رسوبی منطقه وجود دارند، از بور غنی شده‌اند که این موضوع نیاز به بررسی‌های بیشتر در منطقه دارد. موارد زیادی مشابه منطقه‌ی محمدآباد عربان در دنیا گزارش شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به کانسارهای بور در نیوزیلند اشاره کرد. بررسی‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی در شاره‌های گرمابی نیوزیلند معلوم شد که بور موجود در بسیاری از این شاره‌ها به وسیله‌ی فروشت سنگ‌های آذرین اسیدی حاصل شده‌اند [۲۷]. این فروشت بور از سنگ‌های آذرین می‌تواند حتی بدون پیدایش آثار تجزیه‌ای مهم در این سنگ‌ها باعث غنی‌شدگی شاره‌ها از بور شود [۲۸]. بدین ترتیب یک سلول از جریان همرفتی گرمابی موجب چرخش شاره‌های با خاستگاه جوی در ناحیه ایجاد شده است. این شاره‌های غنی از بور، از طریق گسل‌های منطقه چرخش کرده و در افق‌هایی که این گسل‌ها لایه‌های رسی-

15- Epigenetic
16- Leaching

12- Syngenetic
13- Stratabond
14- Stratiform

[۴] کلانتری ز.، رحیم پور ح.، "خلاصه‌ای از ژئوشیمیایی ذخایر بوراکس در شمال غرب ایران"، نوزدهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۷۹).

[۵] بمانی م.، "پی‌جویی و اکتشاف بوراکس در جنوب سبزوار با تلفیق روش‌های دورسنجی، برداشت‌های زمینی و مطالعات ژئوشیمیایی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، (۱۳۹۰) ۱۵۹ صفحه.

[۶] فرجاد باستانی م.، "کانی شناسی، کانی زایی، خاستگاه و عوامل کنترل کننده‌ی محیطی تمرکز بور در کانسار بور قره گل زنجان"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۷۶) ۳۰۷ صفحه.

[7] Helvacı C., "Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadic borate deposits, western Turkey.", *Econ. Geol.* 90, (1995)1237-1260.

[8] Helvacı C., Orti F., "Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (Western Anatolia, Turkey)", *J. Sed. Res.* 68, (1998) 1021-1033.

[9] <http://www.iranview.com/>

[۱۰] افتخار نژاد ج.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشمر"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۹۷۶).

[۱۱] آقا نباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳).

[۱۲] وحدتی دانشمند ف.، ندیم ه.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ د/رین"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۷).

[۱۳] جعفریان م. ب.، جلالی ع.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ششتمد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۷۷).

[14] Christ C. L., Clark J. R., "A crystal-chemical classification of borate structures with emphasis on hydrated borates", *Phys. Chem. Min.* 2, (1977) 59-87.

[15] Hawthorne F. C., Burns P. C., Grice J. D., "The crystal chemistry of boron. In *Boron Mineralogy, Petrology and Geology* (E. S. Grew and L. M. Anevitz, eds.)" Vol. 33, Ch. 2, (1996)

مارنی را قطع می‌کردند بواسطه‌ی برقراری شرایط احیایی امکان نهبشته شدن هیدروبوراسیت فراهم شده است.

گسل‌های با راستای NE-SW نقش بسیار مهمی در ایجاد تخلخل مورد نیاز و معبری مناسب برای گردش شاره‌ها و ایجاد سلول همرفتی گرمایی در این ناحیه ایفا کرده‌اند. توده‌ی تراورتنی موجود در بالاترین افق چینه شناسی این ناحیه که به صورت دگرشیب و محلی روی جوانترین واحدهای منطقه را می‌پوشاند و در ناحیه‌ی معدنی به صورت کاملاً موضعی وجود دارد، در ارتباط مستقیم با این سیستم گسلی بوده و در حقیقت در انتهای بالایی این گسل قرار گرفته است. وجود این واحد نشانه‌ی مهمی از وجود این سلول همرفتی گرمایی در گذشته در این ناحیه است. ظاهراً این توده‌ی تراورتنی به صورت همزاد با توده‌ی کانسار به‌وسیله‌ی این سیستم همرفتی در ناحیه‌ی معدنی به وجود آمده است.

قدردانی

وجود کوره‌های استحصال بور در جنوب سبزوار موجب شد تا انگیزه پی‌جویی‌های بوراکس در این ناحیه از سوی سازمان صنایع و معادن استان خراسان رضوی برنامه ریزی و مورد پیگیری قرار گیرد. به همین منظور این طرح به شرکت کان ایران محول شد. این کار نتیجه‌ی همکاری‌های مولف با این شرکت حین انجام طرح پی‌جویی بور است. لازم به یادآوری است تا از همکاری‌های شرکت کان ایران و نیز ریاست وقت نظام مهندسی معدن خراسان رضوی، آقای مهندس حسین عباس‌نیا، کمال تشکر را داشته باشیم.

مراجع

[۱] بمانی م.، "معرفی روش‌های پی‌جویی و اکتشاف کانه‌های بور"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، (۱۳۸۹) ۹۰ صفحه.

[2] Garrett D. E., "Borates: Handbook Of Deposits, Processing, Properties, And Use", Academic Press, New York, (1998)1178 Pages

[3] Orti F., Alonso R.N., "Gypsum-hydroboracite association in the Sijies Formation (Miocene, NW Argentina), Implications for genesis of Mg-bearing borates", *J.Sed. Res.* 70, (2000) 664-681.

[۲۳] بمانی م.، مجتهدزاده س.ح.، کوهساری ا.ح.، تعیین نقاط حفاری جهت اکتشاف کانی سازی بورات در جنوب سبزوار با تحلیل ژئوشیمیایی نمونه‌های شورابه ای، مجله علمی پژوهشی روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دانشگاه یزد، (در دست داوری)، ۱۵ صفحه.

[24] Friedman I., Smith G.I., Matsuo, S., "Economic implication of the deuterium anomaly in the brine and salts in Searles lake, California", *Eco. Geol.*, 47, (1986) 694-702.

[25] Alonso R.N., Jordan T.E., Tabbutt K.T., Vandervoort D.S., "Giant evaporate belts of the Neogene central Andes", *Geology*, 19, (1991) 401-404.

[26] Burns P.C., Grice G.D., Howthome F.C., "Borat Minerals. I. Polyhedral chisters and fundamental building blocks", *Can. Mineral*, 33, (1995) 1131-1151.

[27] Giggenbach W.F., "Variation in the chemical and isotopic composition of fluid discharge from the Taupo volcanic zone, New Zealand, In Grew, E.S and Anovitz, L.M., (eds), (1996), *Boron Mineralogy, petrology and geochemistry, Reviews in Mineralogy*", *Min. Soc. Am.* 33, (1995) 862p.

[28] Slack J.F., Coad P.R., "Multiple hydrothermal and methamorphic events in the kidd Creek volcanogenic massive sulphide deposit, Timmins, Ontario: Evidence from tourmalines and chlorites", *Can. J. Ear. Sci.* 26, (1989) 694-715.

pp. 41-116, *Mineral Soc, Amer., MSA Reviews in Mineralogy.*

[16] Oi T., Nomura M., Musashi M., Ossaka T., Okamoto M., Kekihana H., "Boron isotopic composition of some boron minerals", *Geochim. Cosmachim. Acta*, 53, (1989) 3189-3195.

[17] Gasca M.A.M., Caballero J.A.G., Eastoe C.J., "Borate deposit of Northern Sonora, Mexico: stratigraphy, tectonics, stable isotopes and fluid inclusions", *Econ. Geo.*, 93, (1998) 510-523.

[18] Smith G.I., Medrano M.D., "Continental borate deposits of Cenozoic age, In Grew, E.S and Anovitz, L.M., (eds), 1996, *Boron mineralogy, petrology and geochemistry*", *Reviews in Mineralogy, Miner. Soc. Am.* 33, (1996) 862P.

[19] You C.F., Spivaek A.J., Smith J.H., Gieskes j.M., "Mobilization of boron in convergent margins: implications for the boron geochemical cycle", *Geology* 21, (1993) 207-210.

[20] Alonso R.N., Helvaci C., Sureda R., Viramonte J., "A new Tertiary borax deposit in the Andes", *Mineral, Deposita* 23, (1988) 299-305.

[21] Floyd P. A., Helvaci C., Mittwede S. K., "Geochemical discrimination of volcanic rocks associated with borate deposit: an exploration tool?", *J. Geoch. Exp.* 60, (1998) 185-205.

[22] Palmer M.R., Helvaci C., "The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey", *Geochim. Cosmochim Acta*, 59, (1995) 3599-3605.