

بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمی نهشته‌های بورات در پلایای شهر بابک (خاتون‌آباد و رباط- مروست) در جنوب و جنوب‌غربی استان کرمان

عاطفه قائدی*، عباس مرادیان و حمید احمدی پور

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۷

چکیده

در بخش‌هایی از جنوب غرب استان کرمان، مثل خاتون‌آباد در شرق شهر بابک و کفه رباط- مروست در غرب شهرستان شهر بابک، نهشته‌هایی از کانی‌های بورات دیده می‌شود که غالباً در فرفرافادگی‌های زون سنندج- سیرجان، در زیر قشر نازکی از خاک و به صورت نودول دیده می‌شوند. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که در مناطق مورد بررسی، کفه‌های حاوی بورات‌ها به وسیله آب‌راهه‌هایی تغذیه می‌شوند که از سنگ‌های دگرگونی زون سنندج- سیرجان، آمیزه‌های نائین- بافت و سنگ‌های آذرین کمربند ماگمایی ارومیه- دختر سرچشمه می‌گیرند و این سنگ‌ها می‌توانند منشأ احتمالی بور در این نهشته‌ها باشند. نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD نشان داد کانی‌های بوراته منطقه بیشتر از نوع هیدراته است و شامل یولکسیت، بوراکس، گووریت، ساسولیت، اینیویت هستند. داده‌های ژئوشیمیایی، نشان‌دهنده فراوانی عنصر بور (B) در این پلایاست. همبستگی خوب بین عناصر بور و کلسیم نشان‌دهنده تشکیل کانی‌های بوراته کلسیم‌دار در مناطق مورد بررسی است.

واژه‌های کلیدی: پلایای شهر بابک، بورات، یولکسیت، ساسولیت، ICP- AES XRD

مقدمه

(1970). نهشته‌های بورات از مهمترین ذخایر غیر دریایی هستند که اغلب در شرایط آب و هوایی خشک در پلایا تشکیل می‌شوند (Floyd et al., 1998). به‌طور دقیق معلوم نیست این بورات‌ها برای اولین بار در کدام کشور کشف شد و مورد کاربرد قرار گرفت؛ ولی آثار و شواهد موجود نشان می‌دهد که ایرانیان قدیم جزو اولین افرادی بودند که این ماده معدنی را مورد شناسایی قرار دادند و کاربرد اولیه آن را در صنعت - از جمله، ویژگی کمک ذوب بودن - کشف کردند. ترکیبات بور در شیشه‌سازی، تهیه پشم شیشه و صابون‌سازی به کار می‌رود. به‌عنوان کود شیمیایی و علف‌کش کاربرد دارد (Garrett, 1998). در ساخت مواد شوینده و صابون نیز به کار می‌رود. به‌عنوان ضد عفونی کننده و ماده نگه‌دارنده در پزشکی استفاده

تبخیری‌ها غالباً رسوبات شیمیایی هستند که پس از تغلیظ نمک‌های محلول در آب (بر اثر تبخیر)، رسوب کرده‌اند. کانی‌های تبخیری اصلی شامل سولفات‌ها مثل سولفات کلسیم (ژپس و انیدریت)، سولفات سدیم (میرابیلیت و تاردیت) و کلریدها مثل هالیت (NaCl) است (Tucker, 2009). کانی‌های تبخیری که به‌طور طبیعی پدید می‌آیند، بسیار زیاد هستند. امروزه در سراسر جهان توجه زیادی به محیط‌های تبخیری مثل پلایا (دریاچه‌های فصلی شور) معطوف است؛ زیرا آنها می‌توانند جایگاه املاح و مواد اقتصادی مهمی از دسته کلورورها، سولفات‌ها، کربنات‌ها، نیترات‌ها و بورات‌ها و حتی مواد رادیواکتیو از قبیل اورانیوم باشند (Hardie and Eugester, 2009).

می‌شود و همچنین به‌عنوان حلال اکسید فلزی در لحیم‌کاری و ذوب فلزات به‌کار می‌رود. به‌صورت صفحات جذب‌کننده نوترون در رآکتورهای اتمی کاربرد دارد. عنصر بور در ماده سوخت راکت‌ها به‌کار می‌رود و همچنین به‌عنوان ماده‌ای افزودنی در سوخت موتورها کاربرد دارد. کاربید بور که سخت‌تر از کروندوم است به‌عنوان ماده ساینده به‌کار می‌رود (Garrett, 1998). در ایران چندین ذخیره بور شناسایی شده است که در حال حاضر فقط کانسار بور قره‌گل مورد بهره‌برداری قرار گرفته و دارای ذخایر اقتصادی است (Rahimpourbanab and Kazemi, 2003). اندیس‌های دیگری از بور در ایران کشف شده است که مهمترین ذخایر بور و اندیس‌های شناخته شده بور ایران در حوضه رودخانه قزل‌اوزن واقع در بخش‌های غرب-شمال غرب استان زنجان هستند. یکی از مناطقی که از قدیم به‌دلیل این نهشته‌ها در ایران معروف است، پلایای شهربابک و به‌خصوص منطقه خاتون‌آباد آن است. در این مناطق، از آنها به‌عنوان کمک ذوب فلزات استفاده می‌کردند. کانی یولکسیت که در پلایای خاتون‌آباد به فراوانی یافت می‌شود، دارای خواص جواهری است (Ghaedi et al., 2014). رشد بورات‌های مناطق مورد بررسی در تابستان به اوج خود می‌رسد و به دلیل این که در زمستان دوباره حل می‌شوند، میزان دقیق ذخیره آنها قابل محاسبه نیست. هدف ما بررسی، معرفی و شناسایی کانی‌های بورات از نظر کانی‌شناسی و ژئوشیمی در مناطق مورد بررسی است. به دلیل اهمیت بسیار زیاد بورات‌ها، به‌خصوص بوراکس در صنعت و پراکندگی قابل توجه آن در استان کرمان، مناطقی که آثار ترکیبات بوردار در آنها دیده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفتند. مناطق مورد بررسی در این پژوهش، شامل حوضه‌های تبخیری (پلایا) غرب استان کرمان است که غالباً در فروافتادگی بین کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر در شمال و دگرگونی‌های زون سنندج-سیرجان و آمیزه‌های نائین-بافت در جنوب واقع شده‌اند (Nabavi, 1976) (شکل ۱). مناطق خاتون‌آباد و کویر رباط-مروست در نزدیکی شهربابک، جزو مناطقی است که مورد بررسی قرار

گرفته‌اند.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی مناطق مورد بررسی

مناطق مورد بررسی در فروافتادگی بین کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر در شمال و دگرگونی‌های زون سنندج-سیرجان در جنوب قرار دارند. فاصله این فروافتادگی از حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان سیرجان شروع شده است و تا شمال غرب شهرستان شهربابک (مروست) ادامه دارد (Moradian et al., 2009). مناطق مورد نظر به ترتیب از جنوب شرق به طرف شمال غرب عبارتند از:

۱- خاتون‌آباد شهربابک که در محدوده بین طول‌های ۲۰° ۵۵' تا ۲۵° ۵۵' شرقی و عرض‌های ۲۹° ۵۴' تا ۳۰° شمالی واقع شده است.

۲- رباط شهربابک بین طول‌های ۵۰° ۵۵' شرقی و ۱۰° ۳۰' تا ۳۰° شمالی واقع شده است و

۳- منطقه رباط مروست (میدان لاوار) بین طول‌های ۳۰° ۵۴' تا ۵۴° ۵۴' شرقی و عرض‌های ۴۸' ۳۰° تا ۳۰° شمالی قرار گرفته است. از لحاظ زمین‌شناسی مناطق مورد بررسی اغلب شامل نهشته‌های مربوط به دوران کواترنری شامل پادگانه‌ها و مخروطه‌افکنه‌های جوان و قدیمی، رسوبات بستر رودخانه‌ای، دق رسی، ماسه‌ها و رس‌های نمک‌دار، رس‌های گچی حاوی بورات‌ها، رس‌های گچ‌دار و ماسه‌دار، ماسه‌های ژیبسی و رس نمکی است.

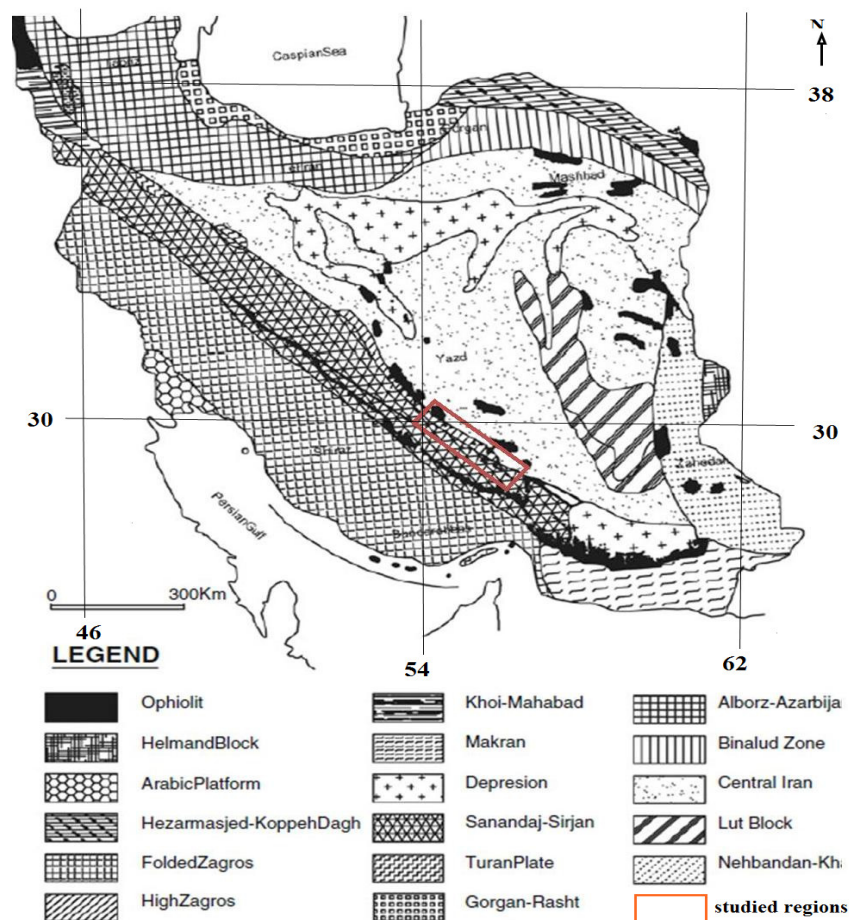
مناطق مورد بررسی در حوزه آبریز کویرهای سیرجان و مروست، در حد فاصل بخش انتهایی ارتفاعات زاگرس و رشته کوه‌های ایران مرکزی قرار گرفته‌اند (Dimitrijevic, 1973). وسعت این حوزه ۵۷۷۷۹ کیلومتر مربع است و گستره آن ۱۲/۴۳ درصد از اراضی استان کرمان را پوشش می‌دهد. حوزه آبریز سیرجان-مروست حوزه‌ای بسته است که به دو زیر حوزه سیرجان و رباط-مروست تقسیم می‌شود (Krinsley, 1970) (شکل ۲- A). کویر رباط-مروست به‌صورت رودخانه‌ای باریک از غرب شهرستان شهربابک (روستای رباط) تا شمال غرب مروست ادامه دارد و طبق نظر نبوی (Nabavi, 1976)، این گودی بر اثر فعالیت گسل‌های سراسری این ناحیه به وجود

آنالیز شدند. همچنین برای کانی‌شناسی، تعداد ۲۰ نمونه از بورات‌ها برای انجام بررسی‌های کانی‌شناسی به‌روش XRD به شرکت فرآوری مواد معدنی ایران فرستاده شدند. برای مشاهده و نمونه‌برداری کانی‌های بوراته و تبخیری‌های همراه با آن در محل‌های مناسب، به حفر چاهک یا ترانشه به اعماق مختلف از ۳۰ سانتی‌متر تا ۱ متر اقدام شد. تقریباً تمامی نمونه‌ها از افق بالایی خاک برداشت شد (شکل ۴- A). بسیاری از نمونه‌ها به دلیل فراوانی و خلوص بیشتر، از پای درختچه‌های گز که پوشش گیاهی غالب و اصلی منطقه بود، برداشت شدند. (شکل ۴- B). احتمالاً رطوبت مربوط به ریشه گیاهان زمینه‌ای مناسب برای تبلور کانی‌های بوراته هیدراته فراهم می‌کند.

آمده است. زون گسلی بزرگی با روند شمال غرب جنوب شرق که از شرق گاوخونی تا جنوب غرب مروست و سیرجان توسعه یافته است (شکل ۲- B)، می‌تواند باعث ایجاد چنین حوضه بزرگی شده باشد.

روش مطالعه

پس از بررسی و مطالعات کتابخانه‌ای، از پلایای مورد بررسی در شهربابک بازدید صحرائی به‌عمل آمد و نمونه‌برداری به‌صورت نامنظم انجام شد (شکل ۳). نمونه‌برداری در اوایل مهرماه انجام شد که اوج شکوفایی و رشد این تبخیری‌هاست. سپس از بین حدود ۱۰۰ نمونه برداشت‌شده، تعدادی از نمونه‌ها برای آنالیز شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب مناطق مورد بررسی به آزمایشگاه ALS CHEMEX کانادا فرستاده و با ICP - AES



شکل ۱. تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران (Nabavi, 1976) و مناطق مورد بررسی (پلایای شهربابک)
Fig. 1. Structural zones of Iran (Nabavi, 1976) and studied regions (Shahr- e - Babak playa)

مشخصات و ویژگی‌های نهشته‌های بورات در پلایای مورد مطالعه

برای تشکیل این کانی‌ها شرایط خاصی لازم است. ذخایر بورات به پنج صورت زیر یافت می‌شود (Garrett, 1998):

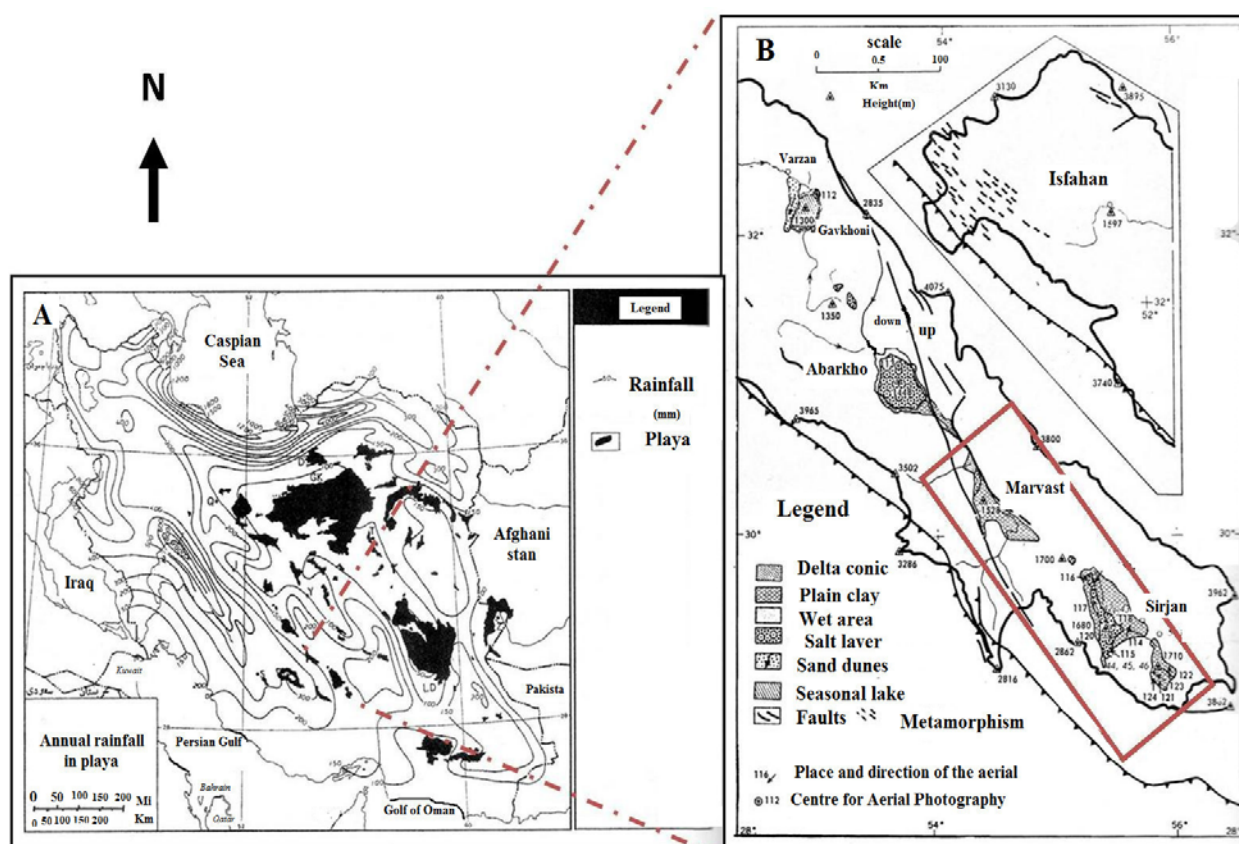
۱- رسوب گذاری از شورابه‌ها در دریاچه‌ای کم عمق دائمی یا موقتی یا دریاچه‌ای عمیق (Jones, 1966)؛

۲- به صورت پوسته پوسته یا بلور در کل پلایا (Helvaci et al., 2012) (مانند بور در پلایای شهربابک)؛

۳- رسوب گذاری مستقیم نزدیک چشمه‌ها (گرم یا داغ) یا فومرول‌ها (Alonso, 1999)؛

۴- تبخیر از آب دریا (Kistler and Helvaci, 1994) و

۵- تبلور در مرز یا نزدیکی مرز توده‌های گرانیتی (Kistler and Helvaci, 1994).



شکل ۲. A: نقشه پلایای ایران (krinsley, 1970) و B: حوزه آبخیز اصفهان. نقشه بر اساس کارهای صحرایی، تفسیر عکس‌های هوایی و نقشه زمین‌شناسی ایران توسط شرکت ملی نفت ایران (National Iranian Oil Company, 1959) تهیه شده است. مناطق مورد بررسی (پلایای شهر بابک) به صورت کادر مشخص شده‌اند.

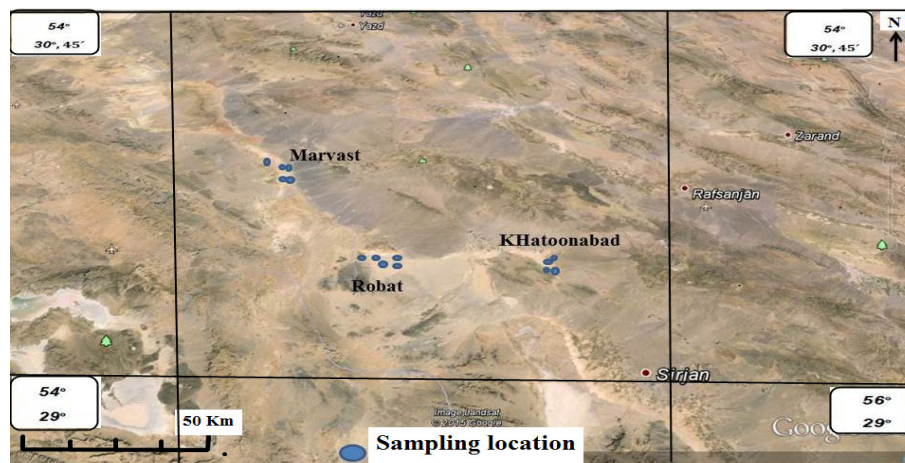
Fig. 2. A: The map of Iran playas (krinsley, 1970), and B: Map of Isfahan watersheds based on geological field works, interpretation of aerial photographs and maps have been prepared by National Iranian Oil Company, (1959). The studied regions (Shahr- e - Babak playa) marked in the box.

به صورت لایه‌های نازک یا بلورهای درون لایه‌های رسوبی نزدیک به سطح زمین تشکیل می‌شوند. شکل ابتدایی تشکیل آنها با تبخیر مکرر آب ورودی حاوی بور و با تبخیر آب

ذخایری که به وسیله رسوب گذاری از دریاچه‌های کم عمق دائمی ایجاد می‌شوند، بیشترین ذخایر بورات دنیا را تشکیل می‌دهند (Kejun, 1984). ذخایر بورات وابسته به پلایا،

گلوله‌هایی با قطر حداکثر ۲۰ سانتی‌متر هستند (شکل ۵- A). گاهی گلوله‌های سفید بزرگتر شده‌اند و قطر آنها به ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. در این حالت، شکل ابریشمی آنها بسیار شاخص است، خیلی سبک و در صحرا به راحتی قابل شناسایی هستند. لایه‌هایی که بورات‌ها در آن قرار دارند تقریباً ۲۰ تا ۸۰ سانتی‌متر ضخامت دارند. اطراف مناطق مورد بررسی توسط لایه گچی به ضخامت ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر پوشیده شده است. در مناطق بورات‌دار، گاهی می‌توان آثار کانی‌های بوراته را به صورت لکه‌های سفید در سطح زمین هم دید (شکل ۵- B)، که بر اثر فرسایش خاک توسط باد به سطح زمین رسیده‌اند. کانی‌های بورات این مناطق بر اساس شواهد کانی‌شناسی صحرائی و XRD بیشتر از نوع یولکسیت و ساسولیت هستند.

زیرزمینی که به صورت فرآیند موینگی بالا آمده است، شروع می‌شود (Helvacı, 1995; Muessig, 1956). در این ذخایر غالباً حجم رسوب و دیگر کانی‌ها، بیش از حجم بورات است. بنابراین، بلورهای بورات در زمینه‌ای از کانی‌های دیگر قرار می‌گیرد (مثل بورات‌های منطقه مورد بررسی که در زمینه‌ای از گچ قرار دارند). چرخه‌های مکرر انحلال-تبلور مجدد باعث ایجاد لایه‌های غنی از بورات خواهد شد. پلایاها می‌توانند با یک فاز دریاچه‌ای قدیمی‌تر در ارتباط باشند. بنابراین، این احتمال وجود دارد که ذخایر روی رسوبات دریاچه‌ای قرار گرفته باشند. در پلایای مناطق مورد بررسی، بورات‌ها در زیر قشر نازک خاک و در عمق ۱۰-۳۰ سانتی‌متری، به صورت گلوله‌های سفید و ابریشمی دیده می‌شوند که به صورت پراکنده و یا



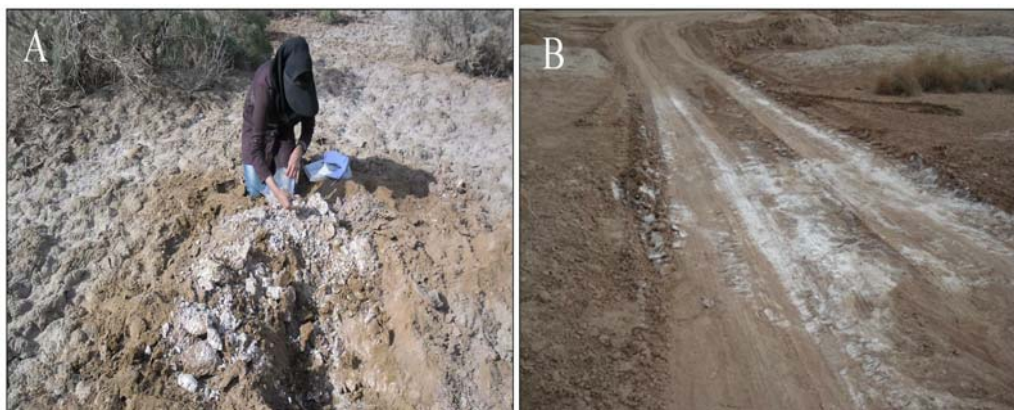
شکل ۳. تصویر ماهواره‌ای پلایای شهر بابک و محل نمونه‌برداری

Fig. 3. Playa Shahr – e- babak satellite images and location of sampling



شکل ۴. A: نمونه‌برداری از نزدیک بوته گز (مروست) و B: نمونه‌برداری از مناطق بدون گیاه (رباط)

Fig. 4. A: Sampling from near plant root (Marvast), and B: sampling from areas without vegetation (Robot)

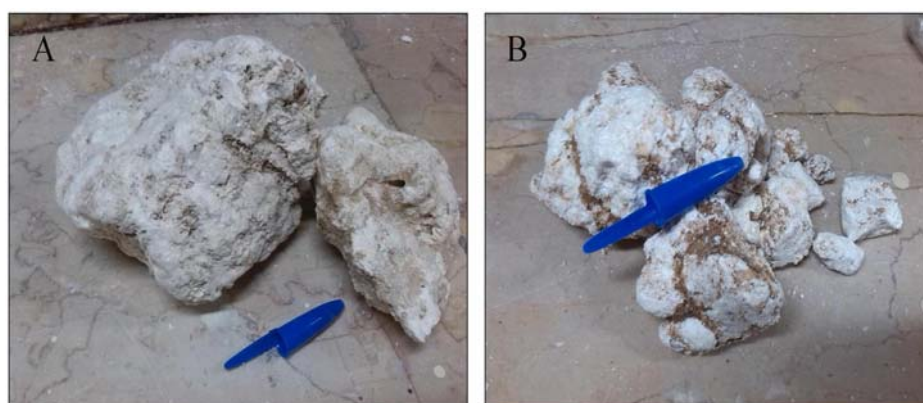


شکل ۵. A: زیر قشر نازک خاک، لکه‌های سفید و ابریشمی یولکسیت دیده می‌شود (خاتون‌آباد) و B: آثار بورات‌ها را به صورت لکه‌های سفید در سطح زمین می‌توان دید (رباط).

Fig. 5. A: under a thin layer of soil, silky white spots of Ulixite can be seen (Khatoonabad), and B: borates in the form of white spots on the surface can be seen (Robat)

غرب مروست، توده‌های بورات به صورت نودول‌هایی به قطر ۱-
۱۰ سانتی‌متر و در عمق ۱۵ سانتی‌متری دیده می‌شوند (شکل ۶-
A و B).

در قسمتی از این پلایا مانند رباط و مروست، آثار سولفات‌سدیم
هم در روی زمین و هم در زیر سطح خاک دیده می‌شود؛
به طوری که ضخامت لایه‌های سولفات‌سدیم روی زمین به ۳۰
سانتی‌متر می‌رسد. در این منطقه در پای بوته‌های گز واقع در



شکل ۶. A: کانی ساسولیت مربوط به منطقه مروست (با توجه به شواهد XRD) و B: کانی یولکسیت (توپ پنبه‌ای) با جلای ابریشمی مربوط به منطقه مروست

Fig. 6. A: Sassolite in Marvast area (according to the evidence XRD), and B: mineral Ulixite (cotton balls) with a silky luster from Marvast area

به صورت ژپس یا انیدریت و پس از آن معمولاً کانی‌های
کلریدی مثل کلروسدیم (هالیت)، کلرورپتاسیم (سیلویت و
کارنالیت)، سپس سولفات‌ها و کلرورهای منیزیم و در نهایت
معمولاً بیشوفیت و تاکی هیدریت رسوب می‌کنند
(Sonnenfeld and Perthuisot, 1989; Sonnenfeld

بحث و بررسی

کانی‌شناسی

در ارتباط با تقدم و تأخر رسوب‌گذاری کانی‌های تبخیری و
جایگاه مشخص هر کدام در داخل حوضه در هر دو نوع آن،
ابتدا کربنات‌ها به‌ویژه کربنات کلسیم و بعد سولفات کلسیم

کانی‌های متعددی هستند (Palache et al., 1952; Garrett, 1998).

الف- بورات‌های هیدراته در مناطق مورد بررسی: بورات‌ها کانی‌های حاوی عنصر بور هستند. بورات‌هایی را که در ساختمان خود مولکول آب داشته باشند، بورات‌های هیدراته می‌نامند. مهمترین این کانی‌ها در مناطق مورد بررسی عبارتند از: بوراکس، یولکسیت، اینوئیت^۱ و گووریت^۲. این کانی‌ها غالباً از کربنات‌های بور تشکیل شده‌اند و شکننده، نرم و سفید تا بی‌رنگ هستند. بسیاری در آب قابل حل هستند و غالباً در دریاچه‌های خشک یافت می‌شوند. بورات‌های هیدراته بیش از ۹۰ درصد کانی‌های اقتصادی بور را تشکیل می‌دهند (Garrett, 1998).

ب- بورات‌های غیرهیدراته در مناطق مورد بررسی: مهمترین کانی بورات غیرهیدراته در مناطق مورد بررسی ساسولیت^۳ است. بورات‌های غیرهیدراته، کانی‌هایی هستند که در ترکیب خود، مولکول H₂O نداشته باشند. این کانی‌ها تعداد بسیار کمی از کانی‌های بور را تشکیل می‌دهند و معمولاً در رابطه با سنگ‌های آذرین یا دگرگونی و بعضی در مناطق و دریاچه‌های خشک یافت می‌شوند. این کانی‌ها (برای مثال سیلیکات‌های بور و زایلیت) بسیار سخت هستند و در آب حل نمی‌شوند. جدول ۱، کانی‌های بورات هیدراته و بورات غیرهیدراته مناطق مورد بررسی را بر اساس شواهد XRD نشان می‌دهد.

(1984). در این میان هنوز جایگاه مشخصی برای رسوب‌گذاری بورات‌ها به‌طور تقریباً دقیق و معین معرفی نشده است؛ زیرا انواع مختلف کانی‌های این عنصر می‌توانند از نظر محل ژئوشیمیایی رسوب‌گذاری در طیف تقریباً وسیعی قرار گیرند (Helvacı, 1995). با وجود همه آنچه که در مورد نامشخص بودن جایگاه واقعی کانی‌های بور گفته شد، با دقت کافی در فرمول و ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی کانی‌های یادشده، مشاهده می‌شود که از کانی‌های متنوع این عنصر، کانی‌های کلسیم‌دار (مثل کلمانیت) زودتر از بقیه و در مرحله بعد کانی‌های کلسیم-سدیم‌دار (مثل یولکسیت) و پس از آن کانی‌های سدیم‌دار (مثل بوراکس) و در نهایت کانی‌های منیزم‌دار و کلردار بور مثل هیدروبوراسیت، زایلیت، پینوئیت (کانی‌های منیزم‌دار) و بوراسیت (کانی منیزم و کلردار بور) رسوب می‌کنند (Kistler and Helvacı, 1994; Carpenter and Kistler, 2006). به‌طوری‌که در مناطق مورد بررسی کانی‌هایی مثل یولکسیت در حجم زیاد، بعد از گچ دیده می‌شوند. نزدیک آن، بوراکس همراه با نمک طعام و یا نزدیک گچ و کانی‌های دیگر بورات همراه یا نزدیک کانی‌های تبخیری دیگر و در حجم‌های قابل توجه دیده می‌شوند. در پلایای شهربابک، کانی‌های بورات‌دار بیشتر همراه با ژیپس، سولفات سدیم (تناردیت)، کلسیت و هالیت دیده می‌شوند. حدود ۲۳۰ کانی بورات به‌صورت طبیعی از سال ۱۹۹۶ تاکنون مشخص شده‌اند. کانی‌های گروه بورات به دو رده بورات‌های هیدراته و غیرهیدراته تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک دارای

جدول ۱. کانی‌های مهم بوردار در مناطق مورد بررسی (پلایای شهربابک) بر اساس شواهد XRD

Table 1. Important boron minerals in the region based regions (Shahr- e - Babak playa) on XRD method

Hydrated borates	
Chemical formula	Name
Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	(Borax)
NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	(Ulexite)
CaB ₆ O ₁₀ .5H ₂ O	(Gowerite)
Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .13H ₂ O	(Inyoite)
Non-hydrated borates	
Chemical formula	Name
B(OH) ₃	(Sassolite)

1. Inyoite
2. Gowerite
3. Sassolite

یولکسیت یافت می‌شود. سختی آن ۳ است و در H_2O حل می‌شود (Erd et al., 1959). شفاف و در منطقه مورد بررسی، به دلیل توده‌ای بودن، سفید است.

اینیویت ($CaB_3O_3(OH)_5 \cdot 4H_2O$): سیستم تبلور این کانی منوکلینیک و رده منشوری $2/m$ است. معمولاً به صورت بلوری منشوری کوتاه [۰۰۱] و مسطح در {۰۰۱} هستند. همچنین به صورت کروی و دانه‌ای هم یافت می‌شوند (Christ, 1953). در مناطق مورد بررسی این کانی توسط XRD تشخیص داده شده است. ترد و شکننده و سختی آن ۲ است، در H_2O حل می‌شود، شفاف تا نیمه شفاف، بی‌رنگ و در نمونه‌های بدون آب سفید و جلای آن شیشه‌ای است (Clark, 1959).

ساولیت (H_3BO_3): سیستم تبلور آن تری کلینیک و رده ۱ به صورت پسودوهگزاگونال است (Allen and Kramer, 1957). در نمونه مورد بررسی، این کانی به فراوانی در پلایای مروست همراه با دیگر کانی‌های بوراته یافت می‌شود. این کانی در این پلایا یکی از کانی‌های فراوان بوراته است که در نمونه دستی بلورهای سوزنی آن مشخص است (شکل ۶- A). انعطاف‌پذیر است و سختی کمی دارد. سختی گوس آن ۱ است، در H_2O محلول و دارای طعم کمی شور و تلخ است. شفاف و رنگ آن در نمونه‌های مورد بررسی سفید تا خاکستری و جلای آن مرواریدی است. از کانی‌های بورات در مناطق مورد بررسی، یولکسیت و ساولیت از کانی‌های اصلی و بقیه از کانی‌های بوراته فرعی همراه با آنهاست. پیک XRD مربوط به این کانی در ادامه نشان داده شده است (شکل ۷- B).

ژئوشیمی

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب از پلایای شهرباک، خاتون‌آباد (KH)، رباط (RB)، مروست (MV) در جدول ۲ آمده است. بر اساس جدول یادشده، میانگین بیشتر عناصر در مرز مقادیر پوسته زمین است و تمرکز یا افزایش چشم‌گیری را نشان نمی‌دهد؛ اما فراوانی بور در مناطق مورد بررسی بسیار بالاست.

با توجه به بررسی‌های XRD انجام شده بر روی نمونه‌های مناطق مورد بررسی، کانی‌های منطقه از نوع کانی‌های بوراته هیدراته است و مهمترین کانی‌هایی که دارای ارزش اقتصادی هستند، عبارتند از:

یولکسیت ($NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5H_2O$): سیستم تبلور این کانی تریکلینیک، رده ۱ پیناکوئیدال است (Ghose et al., 1978). در مناطق مورد بررسی مانند خاتون‌آباد و رباط شهرباک، معمولاً به صورت توده‌های کروی دیده می‌شوند که دارای بافتی نرم هستند و به صورت بلورهای سوزنی و رشته‌ای به نام توپ پنبه‌ای یافت می‌شوند. این کانی ترد و شکننده و سختی آن ۲/۵ است. در آب کمی محلول است، توده فیبر موازی می‌تواند به عنوان فیبر نوری عمل کند. شفاف تا مات، بی‌رنگ و در تجمعات سفید، اگر همراه با خاک رس باشد، خاکستری است. جلای شیشه‌ای و ابریشمی دارد. (شکل ۶- B) پیک XRD مربوط به این کانی در ادامه نشان داده شده است (شکل ۷- A).

بوراکس ($Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$): سیستم تبلور این کانی منوکلینیک و رده منشوری $2/m$ است. بلورها معمولاً به صورت کوتاه تا بلند به صورت منشوری در [۰۰۱] و تا حدودی مسطح در {۱۰۰} هستند. به صورت توده‌ای دانه‌ای و پوششی دیده می‌شود، ترد و شکننده و سختی آن ۲-۲/۵ است. محلول در آب، طعم کمی شیرین قلیایی است و به سرعت در هوا آب خود را از دست می‌دهد. چگالی آن $1.71 g/cm^3$ (۲) است. دیامغناطیس، بی‌رنگ مایل به سفید تا خاکستری و جلای آن شیشه‌ای تا صمغی است، ممکن است حاکی هم باشد و خط اثر سفید است (Levy and Lisensky, 1978). در نمونه مورد بررسی همراه دیگر کانی‌های بوراته و بیشتر به صورت شوره در سطح زمین یافت می‌شود.

گووریت ($CaB_6O_8(OH)_4 \cdot 3H_2O$): سیستم تبلور این کانی منوکلینیک و رده منشوری $2/m$ است، در نمونه‌های خاتون‌آباد به صورت بلورهای سوزنی منشوری و همچنین کروی همراه با

Ca و B همبستگی خوبی را نشان می‌دهند که بیانگر تشکیل بورات‌های کلسیم‌دار در مناطق مورد بررسی است. این موضوع بیان‌کننده این نیست که بورات‌های سدیم‌دار تشکیل نمی‌شوند؛ بلکه در محل نمونه‌برداری مقدار بیشتری از این کانی‌ها وجود دارد. همچنین بین S و Na نیز همبستگی دیده می‌شود که بیان‌کننده تشکیل سولفات‌سدیم در این مناطق به‌خصوص در مروست است.

نمونه‌های خاتون‌آباد: در نمونه‌های خاتون‌آباد میانگین کلسیم ۱۳/۵ درصد، گوگرد ۱۲/۰۸ درصد، سدیم ۶/۳۷ درصد و بور ۸۱۴/۴ گرم در تن است. بالا بودن مقادیر بور، سدیم و کلسیم می‌تواند بیانگر کانی‌های بورات به‌خصوص یولکسیت و گووریت و از طرفی بالا بودن مقدار گوگرد و سدیم نیز می‌تواند انعکاسی از تشکیل سولفات‌سدیم (تئاردیت) باشد. یکی از دلایل بالا بودن مقدار بور و گوگرد، می‌تواند آزاد شدن این گروه از عناصر از سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی در جنوب غرب مناطق نمونه‌برداری باشد. احتمالاً منشأ گوگرد پیریت موجود در سنگ‌های آتشفشانی ناحیه است. با توجه به بازدیدهای صحرائی به‌نظر می‌رسد، انباشتگی این کانی‌ها بیشتر از نوع شوره‌ای باشند. نودول‌های بوراکس (یولکسیت) به قطر ۵ mm تا ۱۰ cm از عمق ۱۰-۳۰ سانتی‌متری زمین در بهار و تابستان تشکیل و در زمستان دوباره حل می‌شود.

نمونه‌های منطقه رباط - مروست: نمونه‌های این منطقه مانند نمونه‌های خاتون‌آباد از عناصری مانند گوگرد (۱۰/۴ درصد)، سدیم (۶/۱۸ درصد)، کلسیم (۵/۹۵ درصد)، کلر (۵/۷۷ درصد) و بور (۸۶۰ گرم در تن) است که بیانگر تشکیل کانی‌های کلریدی (نمک) سولفات‌سدیم (تئاردیت) و بورات (سولسولیت و یولکسیت) است. بیشتر نودول‌های بورات‌ها در این منطقه به قطر ۱-۱۰ سانتی‌متر و در زیر درختچه‌های گز در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک تشکیل می‌شود. نمونه‌های برداشت شده از زیر درختچه‌های گز دارای خلوص بیشتری هستند که می‌تواند به‌عنوان روشی در پی جویی‌های اولیه کانی‌های بوراته رسوبی به‌کار رود. رطوبت موجود در اطراف ریشه این گیاهان کویری، آب لازم را برای تبلور کانی‌های بوراته هیدراته فراهم می‌کند.

فراوانی B در مناطق مورد بررسی بین ۹۰ ppm تا ۱۳۰۰۰ ppm است که بیشترین مقدار آن مربوط به منطقه خاتون‌آباد و بعد از آن مروست است (شکل ۸). میزان بور در مقایسه با معادن Tülü (۴۴۲۴۹۱ ppm)، Simav (۴۴۵۱۳۸ ppm) و Acep (۳۷۱۴۹۲ ppm) در ترکیه (Kocak and Koc, 2012) بسیار کمتر است. آنومالی بالای Mg احتمالاً به دلیل وجود سنگ‌های آتشفشانی نوار دهج - ساردوئی، سنگ‌های مربوط به آتشفشان مزاحم در منطقه خاتون‌آباد، سازنده‌های آمیزه رنگین شهر بابک، سنگ‌های آتشفشانی نوار دهج - ساردوئی، سنگ‌های دگرگونی، سنگ‌های رسوبی مربوط به کرتاسه در کفه رباط - مروست که تغذیه‌کننده دشت و آب‌راه‌هایی است که از آنها سرچشمه می‌گیرد و مواد محلول و رسوبات را به این کفه حمل می‌کنند.

ضریب همبستگی داده‌ها

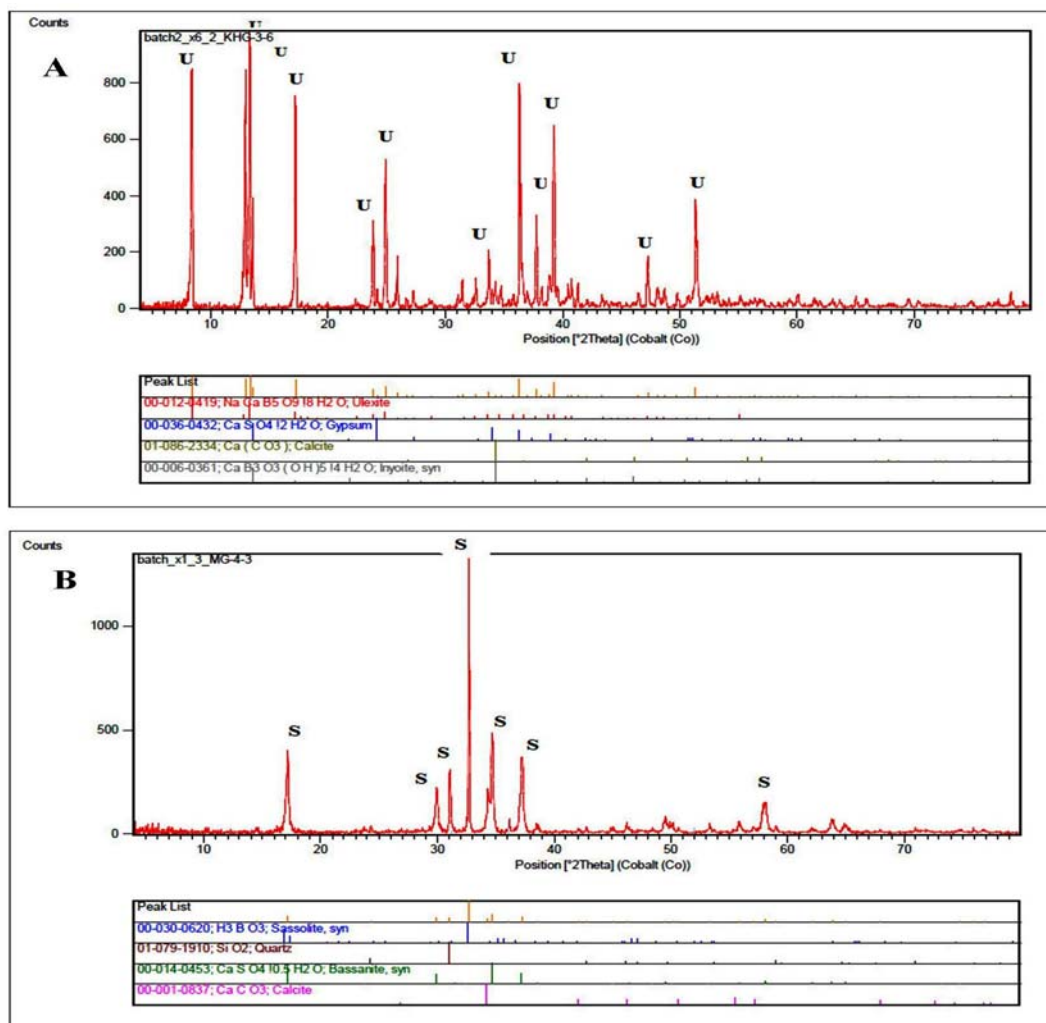
همبستگی خطی بین متغیرهای مختلف توسط ضرایب بین +۱ و -۱ تعیین می‌شود. وقتی ضرایب همبستگی عددی نزدیک به +۱ یا -۱ باشد، رابطه دو مؤلفه از اهمیتی ویژه برخوردار است. همبستگی مثبت نشان‌دهنده ویژگی‌های مشترک بین دو عنصر متفاوت مانند الگوی تکاملی مشترک است. منفی بودن ضریب همبستگی نشان‌دهنده این موضوع است که تغییرات یکی از مؤلفه‌ها، عکس مؤلفه دیگری است. طبق جدول ۳، بین عناصر B با Ca و Na همبستگی مثبت وجود دارد، همچنین بین عنصر S و Na همبستگی قوی (۰/۸۰۷) وجود دارد که نشان‌دهنده سولفات‌سدیم در بین کانی‌های تبخیری منطقه به‌خصوص در مروست است (جدول ۳).

آنالیز خوشه‌ای: برای تعیین هم‌یافت‌ها و نحوه ارتباط عناصر با یکدیگر، تحلیل خوشه‌ای انجام شد (شکل ۹). در این بخش، سه خوشه از آنالیز مربوطه ایجاد شد که انطباق خوبی با نتایج همبستگی عناصر نشان می‌دهد.

Ca, B (۱)

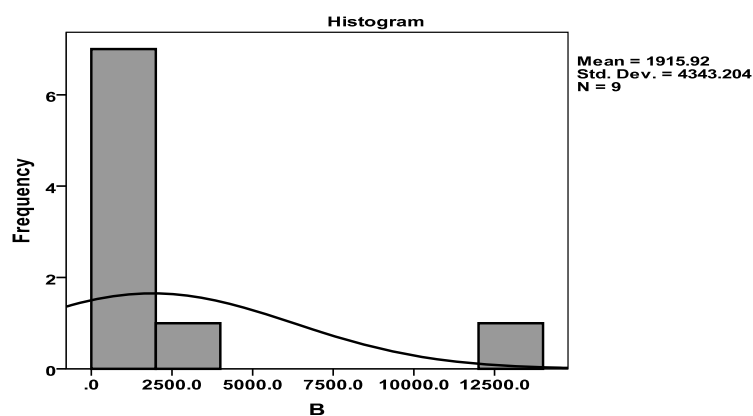
Na, S (۲)

K, Mg (۳)



شکل ۷. دو نمونه از پیک‌های XRD مربوط به کانی‌های بوراته مناطق مورد بررسی (پلاهای شهر بابک). A: پیک مربوط به کانی یولکسیت (U) و B: پیک مربوط به کانی ساسولیت (S)

Fig. 7. Two XRD peaks relate to the borate minerals in the studied areas regions (Shahr- e - Babak playa), A: Peak of mineral Ulxite (U), and B: the peak of the mineral Sassolite(S)



شکل ۸. نمودار فراوانی عنصر بور در مناطق مورد بررسی (پلاهای شهر بابک)

Fig. 8. Frequency plot for boron in the studied areas regions (Shahr- e - Babak playa)

جدول ۲. آنالیز عناصر اصلی، فرعی و کمیاب مناطق مورد بررسی (پلایای شهر بابک)

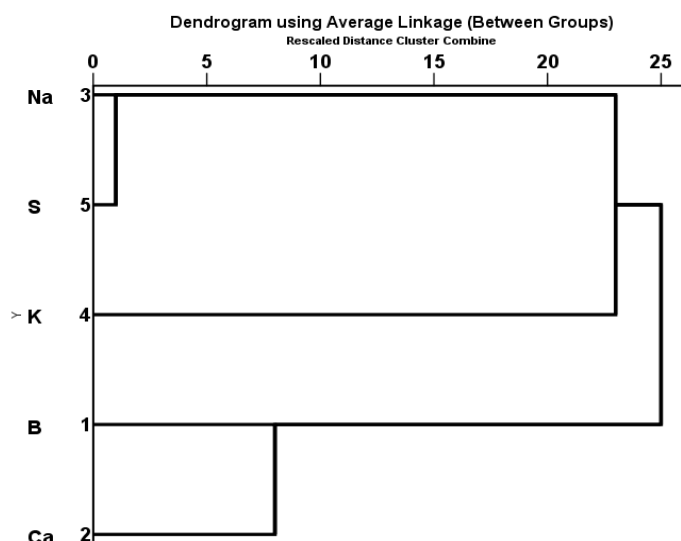
Table 2. Whole rock chemical analyses for the major and trace elements from the studied area regions (Shahr- e - Babak playa)

	RB2	RB13	RB12	MV6	MV4	MV2	KH4	KH3	KH2
Cl%	2.82	0.07	4.7	11.5	0.41	5.41	4.53	0.23	4.22
Al%	1.39	0.63	0.34	0.58	0.24	0.57	0.68	0.05	0.22
Ca%	9.1	2.25	0.81	11.7	4.5	13.65	6.57	15.65	18.54
Fe%	1.58	0.6	0.32	1.08	0.219	0.71	0.99	0.06	0.25
K%	0.57	0.16	0.36	0.11	0.04	0.13	0.15	0.02	0.1
Na%	2.12	13.3	13.3	1.41	13.3	3.84	13.3	3.15	2.67
S%	4.8	13.3	13.3	4.61	13.3	13.3	13.3	9.63	13.3
Ti%	0.035	0.028	0.015	0.026	0.007	0.014	0.028	0.002	0.007
Ag(ppm)	0.09	0.02	0.07	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
As(ppm)	11.3	10.9	2.1	13	2.9	7	9.4	25	73
Au(ppm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
B(ppm)	170	20	30	10	2230	340	1020	13333.3	90
Ba(ppm)	80	30	40	120	20	40	40	10	10
Be(ppm)	0.44	0.3	0.54	0.13	0.13	0.16	0.21	1.76	0.06
Bi(ppm)	0.09	0.14	0.19	0.09	0.03	0.04	0.06	0.005	0.02
Cd(ppm)	0.12	0.05	0.13	0.17	0.02	0.05	0.08	0.01	0.03
Ce(ppm)	14.2	33.3	49.3	5.7	1.88	4.47	6.74	0.65	1.77
Co(ppm)	8.4	2.2	1.3	4.8	1.7	4.2	4	0.7	1.6
Cr(ppm)	48	4	2	30	9	18	35	2	4
Cs(ppm)	1.55	2.42	1.9	0.47	0.29	0.53	0.82	0.48	0.32
Cu(ppm)	24.6	6.9	4.8	10.6	4.4	8	11	2.2	6.4
Ga(ppm)	3.56	1.57	0.89	1.66	0.6	1.43	1.87	0.14	0.55
Ge(ppm)	0.08	0.06	0.05	0.002	0.002	0.002	0.05	0.002	0.05
Hf(ppm)	0.17	0.24	0.12	0.08	0.04	0.08	0.14	0.001	0.03
Hg(ppm)	0.04	0.01	0.05	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
In(ppm)	0.016	0.006	0.002	0.009	0.002	0.007	0.009	0.002	0.002
La(ppm)	6.8	20.3	30.3	3	1	2.2	3.8	0.3	0.8
Li(ppm)	52.3	16.1	19.2	14.8	7.7	10	18.7	7.7	16.1
Mg(ppm)	20600	2600	1900	28900	5700	13600	7600	900	6900
Mn(ppm)	358	151	135	196	71	166	205	53	54
Mo(ppm)	1.15	1.26	2.59	3.83	0.41	0.35	2.56	0.37	0.35
Nb(ppm)	0.66	0.6	0.55	0.24	0.15	0.27	0.37	0.06	0.12
Ni(ppm)	40.3	2.8	2	28.1	10.9	23.8	13.8	1.5	4.4
P(ppm)	970	190	90	170	120	230	210	100	70
Pb(ppm)	29.1	30.8	108	118	7.3	5	23.8	5.1	2.7
Sb(ppm)	0.19	0.14	0.16	1.33	0.14	0.14	0.28	0.1	0.1
Sc(ppm)	3.9	2	1.2	2.1	1	1.8	2.2	0.5	0.8
Se(ppm)	3.4	0.3	0.6	0.9	1.5	2.3	1.2	0.3	2.7
Sn(ppm)	0.9	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1
Sr(ppm)	1030	993	770	770	1200	1050	875	4970	3700
Ta(ppm)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Te(ppm)	0.07	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03
Th(ppm)	2	1.5	1.1	0.9	0.4	0.9	1.1	0.1	0.3
Tl(ppm)	0.08	0.11	0.13	0.05	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01
U(ppm)	1.06	1.76	0.4	0.33	0.14	0.88	0.43	0.13	3.42
V(ppm)	41	15	9	19	6	14	31	12	12
W(ppm)	0.47	0.57	0.73	0.51	0.16	0.1	1	0.09	0.05
Y(ppm)	5.88	3.67	2.86	3.3	1.05	2.4	3.09	0.58	0.86
Zn(ppm)	54	18	21	48	11	20	24	3	7
Zr(ppm)	5.7	6.3	3.1	3.5	1.3	2.3	4.3	0.2	1.1

جدول ۳. ضرایب همبستگی اسپیرمن عناصر موجود در کانی‌های اصلی تبخیری مناطق مورد بررسی (پلاهای شهربابک)

Table 3. Spearman correlation coefficients of elements in the main evaporite minerals studied area regions (Shahr- e - Babak playa)

	Cl	S	K	Na	Ca	B
B	-0.350	.158	-.483	.244	.283	1.000
Ca	.100	-.050	-.767	-.409	1.000	
Na	-.305	.807	.131	1.000		
K	.150	.030	1.000			
S	-.139	1.000				
Cl	1.000					



شکل ۹. نمودار خوشه‌ای عناصر مهم کانی‌های تبخیری در مناطق مورد بررسی (پلاهای شهربابک)

Fig. 9. Dendrogram for some elements in important evaporite minerals from the studied region regions (Shahr- e - Babak playa)

منشأ بورات‌ها در مناطق مورد بررسی

منطقه خاتون آباد: این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک است و به صورت فروافتادگی در جنوب شرقی شهربابک قرار دارد. رشته کوه‌های جنوب غربی این فرورفتگی جزئی از پهنه آبرفتی بزرگتر است که در دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های آتشفشانی کمر بند ارومیه- دختر قرار دارد. این پهنه آبرفتی به صورت فروافتادگی ساختاری یا گرابن بین ارومیه- دختر و زون آمیزه رنگین شهربابک- بافت قرار گرفته است. زون آمیزه رنگین به صورت باریکه‌ای برآمده در لبه جنوب غربی

خاتون آباد در دشت‌های آبرفتی منطقه میانی دیده می‌شود. در منطقه خاتون آباد سنگ‌های آتشفشانی نوار دهج- ساردوئیه، سنگ‌های مربوط به آتشفشان مزاحم و سنگ‌های آمیزه رنگین نائین- بافت تغذیه کننده دشت هستند. با توجه به این که در این دشت کانی‌های بوراته به وفور یافت می‌شوند، می‌توان چنین نتیجه گرفت که دگرسانی سنگ‌های آتشفشانی و آذرین و همچنین پیرو کلاستیک‌های بالادست موجب تشکیل رس‌هایی مانند مونت موریلونیت (اسمکتیت) و زئولیت شده‌اند که وجود آنها در منطقه می‌تواند خاستگاه تأمین کننده یون Na^{2+} باشد.

کاتیون‌ها و آنیون‌های مهم می‌شود که در تشکیل کانی‌های تبخیری نقشی مهم دارند. گرانتیت شهر بابک به وسعت زیاد در جنوب کفه رباط- مروسست قرار دارد که خاستگاه احتمالی سولفات سدیم و بورات در این منطقه است.

نتیجه‌گیری

کانسارهای رسوبی شیمیایی بورات‌ها بسیار حائز اهمیت هستند. کانی‌های بوراته در مناطق مورد بررسی در اثر تبخیر در پلایای بسته تشکیل شده‌اند. ارتباط بسیار قوی بور- کلسیم در نمونه‌های مناطق مورد بررسی نشان می‌دهد که کانی‌های بوراته کلسیم‌دار مانند اینیویت و گووریت و همچنین بورات‌های با کاتیون مضاعف سدیم و کلسیم مانند یولکسیت از مهمترین کانی‌های تشکیل‌دهنده بورات‌های پلایای شهر بابک هستند. کانی یولکسیت و ساسولیت در مناطق مورد بررسی جزو فراوانترین کانی‌های بوراته هستند که یولکسیت از نوع کانی بوراته هیدراته و ساسولیت از نوع کانی‌های بوراته غیرهیدراته است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در این مناطق، منشأ یون‌های موجود در کانی‌های تبخیری غالباً از سنگ‌های آتشفشانی کمر بند ارومیه- دختر و سنگ‌های دگرگونی سنج- سیرجان هستند. در کل می‌توان گفت که این نهشته‌ها از نوع نهشته‌های رسوبی شیمیایی در پلایای شهر بابک هستند. با وجود این که نهشته‌های بوردار از نظر اقتصادی حائز اهمیت هستند، تاکنون بررسی چندانی در مورد آنها انجام نشده است. نهشته‌های بورات در غرب کرمان بیشتر در پلایا یا حاشیه آن تشکیل می‌شود و از این لحاظ توانایی زیادی دارند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت‌های ایمیدرو و تحقیقات و فرآوری مواد معدنی برای انجام بررسی‌های آزمایشگاهی XRD سپاس‌گزاری می‌نمایند.

همچنین در حوضه‌های قلیایی و نمکی در کنار تشکیل زئولیت‌ها سیلیکات‌های بوردار مانند (داتولیت) $(\text{CaBSiO}_4(\text{OH}))$ و دانبوریت $(\text{CaB}_2(\text{SiO}_2)_2)$ نیز تشکیل می‌شود که می‌تواند تأمین‌کننده بور برای کانی‌های تبخیری بوراته باشد (García-Veigas and Helvacı, 2013). سرپانتین از سنگ‌های تیره بازیک و سریسیت از سنگ‌های روشن اسیدی از مهمترین میزبانان بور در سنگ‌های ماگمایی دگرسان‌شده هستند. شیشه یکی از مهمترین و بهترین حمل‌کنندگان بور در سنگ‌های ولکانیکی است. سنگ‌های ولکانیکی اسیدی روشن و شیشه‌های ولکانیکی از انواع سنگ‌های گرانتیتی دارای مقدار بیشتر بور هستند (Harder, 1959).

همه این کانی‌ها در سنگ‌های بالادست فرو افتادگی خاتون‌آباد وجود دارند. ته‌نشینی کانی‌های بوراته معمولاً به صورت زونینگ است؛ به طوری که ابتدا بورات‌های کلسیم‌دار مانند کلمانیت، گووریت و اینیویت و سپس بورات‌های سدیم- کلسیم‌دار مانند یولکسیت و در نهایت بورات‌های سدیم‌دار مانند بوراکس ته‌نشست می‌شوند (García-Veigas and Helvacı, 2013). در مناطق مورد بررسی، به دلیل نبود نمونه‌برداری سیستماتیک این زونینگ دیده نمی‌شود. پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های بعدی این موضوع مورد توجه قرار گیرد.

منطقه رباط- مروسست: در کفه رباط- مروسست، آب‌راه‌ها از سازندهای آمیزه رنگین شهر بابک، سنگ‌های آتشفشانی نوار دهج ساردوئیه که بیشتر شامل جریان‌های گدازه تراکی آندزیتی و توف‌های ماسه‌ای و آگلومرای آندزیت هستند، سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های رسوبی مربوط به کرتاسه سرچشمه گرفته‌اند و مواد محلول و رسوبات را به این کفه حمل می‌کنند. منشأ کانی‌های تبخیری این حوضه که بیشتر از نوع بورات‌ها هستند، از این سازندها سرچشمه می‌گیرد. سنگ‌های آذرین موجود در منطقه بالادست پلایا در اثر هوازدگی به کانی‌های رسی دگرسان‌شده‌اند که هوازدگی این رس‌ها باعث آزاد شدن

References

Allen, R.D. and Kramer, H., 1957. Ginorite and sassolite from Death Valley, California.

American Mineralogist, 42(1-2): 56-61.

Alonso, R.N., 1999. On the origin of La Puna borates. Acta Geológica Hispánica, 34(2): 141-

- 166.
- Carpenter, S.B. and Kistler, R.B., 2006. Boron and borates. In: J.E. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker, and S.T. Krukowski (Editors), *Industrial Minerals and Rocks. Metallurgy and Exploration Inc, Colorado*, pp. 275-284.
- Christ, C.L., 1953. Studies of borate minerals, 2. X-ray crystallography of inyoite and meyerhofferite -x-ray and morphological crystallography of $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. *American Mineralogist*, 38(1 - 11): 912-918.
- Clark, J.R., 1959. Studies of borate minerals. IV. The crystal structure of inyoite, $\text{CaB}_3\text{O}_3(\text{OH})_{5.4} \cdot \text{H}_2\text{O}$. *Acta Crystallographica*, 12(2):162-170.
- Dimitrijevic, M.D., 1973. Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran, Beograd Yugoslavia, Report Yu 59, 334 pp.
- Erd, R.C., McAllister, J.F. and Almond, H., 1959. Gowerite, a new hydrous calcium borate, from the Death Valley Region, California. *American Mineralogist*, 44(9-10): 911-919.
- Floyd, P.A., Helvacı, C. and Mittwede, S.K., 1998. Geochemical discrimination of volcanic rocks associated with borate deposits: an exploration tool? *Journal of Geochemical Exploration*, 60(3): 185-205.
- García-Veigas, J. and Helvacı, C., 2013. Mineralogy and sedimentology of the Miocene Göcenoluk borate deposit, Kirka district, Western Anatolia, Turkey. *Sedimentary Geology*, 290: 85-96.
- Garrett, D.E., 1998. Borates: handbook of deposits, processing, properties, and use. Academic Press, USA, 483 pp.
- Ghaedi, A., Moradian, A. and Ahmadipour, H., 2014. Reviewing and introduction of mineralogical properties of Ulexite an unknown gem in Khatoonabad (Shahr Babak, Kerman Province). The 1st National Symposium of Gemology- Crystallography of Iran, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- Ghose, S., Wan, C. and Clark, J.R., 1978. Ulexite, $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: structure refinement, polyanion configuration, hydrogen bonding, and fiber optics. *American Mineralogist*, 63(12): 160-171.
- Harder, H., 1959. Beitrag zur Geochemie des Bors: Bor in Mineralen und magmatischen Gesteinen. Vandenhoeck and Ruprecht. Vandenhoeck, Ruprecht, 55 pp.
- Hardie, L.A. and Eugster, H.P., 1970. The evolution of closed-basin brines. *Mineralogical Society of America - Special Paper*, 3(3): 273-290.
- Helvacı, C., 1995. Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadiç borate deposits, Western Turkey. *Economic Geology*, 90(5): 1237-1260.
- Helvacı, C., Orti, F., Garcia-Veigas, J., Rosell, L. and Gundogan, G., 2012. Neogene borate deposits, Mineralogy, Petrology and Sedimentology. A workshop with special emphasis on the Anatolian deposits, International Earth Science Colloquium on the Aegean Region, 1-5 October 2012, İzmir, Turkey.
- Jones, B.F., 1966. Geochemical evolution of closed basin water in the western Great Basin. Second Symposium on Salt, Northern Ohio Geology, Ohio, United States of America.
- Kejun, S.D.G.Z.W., 1984. The origins of borates in saline lakes, Qinghai -Xizaig Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2(4): 111-126.
- Kistler, R.B. and Helvacı, C., 1994. Boron and borates. *Industrial Minerals and Rocks*, 6: 171-186.
- Kocak, I. and Koc, S., 2012. Major and Trace Element Geochemistry of the Bigadiç Borate Deposit, Balıkesir, Türkiye. *Geochemistry International*, 50(11): 926-951.
- Krinsley, D., 1970. A Geomorphological and Paleoclimatological study of the playas of Iran. Geological Survey Reston, Washington, 486 pp.
- Levy, H.A. and Lisensky, G.C., 1978. Crystal structures of sodium sulfate decahydrate (Glauber's salt) and sodium tetraborate decahydrate (borax). Redetermination by neutron diffraction. *Acta Crystallographica*, 34(12): 3502-3510.
- Moradian, A., Ahmadipour, H. and Aftabi, A., 2009. The final report of the feasibility study of evaporation and chemical processing of Brine and salt fields in Kerman. Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, 179 pp.
- Muessig, S.J., 1959. Primary borates in playa deposits; minerals of high hydration. *Economic Geology*, 54(3): 495-501.

- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp.
- National Iranian Oil Company., 1959. Map of watersheds based on geological field works, interpretation of aerial photographs and maps have been, scale 1:50000. National Iranian Oil Company.
- Palache, C., Berman, H. and Frondel, C., 1952. Dana's System of Mineralogy. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 74(2): 218-219.
- Rahimpourbanab, H. and Kazemi, H., 2003. Geology, mineralogy and genesis of deposits of boron in Ghareh Gol in South West Zanjan. Tehran University Science Journal, 29(1): 1-21.
- Sonnenfeld, P. and Perthuisot, J.P., 1989. Brines and Evaporites. 28th International Geological Congress, U.S. National Academy, Washington District of Columbia, United States of America.
- Sonnenfeld, P., 1984. Brines and evaporites. Academic Press, United States of America. 126 pp.
- Tucker, M.E., 2013. Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. Black well, Oxford, England, UK, 272 pp.



Mineralogical and geochemical studies on borate deposits from the Shahr- e - Babak playa (Khatoonabad and Robot - Marvast), Kerman province - Iran)

Atefeh Ghaedi*, Abbas Moradian and Hamid Ahmadipour

Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Submitted: Dec. 24, 2014

Accepted: Jan. 27, 2016

Keywords: *The Sahr- e - Babak Playa, Borate, Ulexite, Sassolite*

Introduction

Borate deposits are often important constituents of economic non - marine evaporates. They produce under arid climatic conditions in playa lakes (Floyd et al., 1998). In the south – western parts of the Kerman province, such as the Khatoonabad area (east of the city of Shahr –e –Babak) and Robot – Marvast basin (west of Shahr – e – Babak), there are several borate deposits. They can be seen mainly in Sanandaj – Sirjan depressions and they occur as borate bearing nodules beneath a thin layer of soil. In general, boron considerably reduces the thermal expansion of glass, provides good resistance to vibration, high temperatures and thermal shock, and improves its toughness, strength, chemical resistance and durability. It also greatly reduces the viscosity of the glass melt. These features, and others, allow it to form superior glass for many industrial and specialty applications (Garrett, 1998). In the past, the ancient residents used them as co-melting matters. Ulexite which is frequently found in the Khatoonabad playa (at 30 km South East of Shahr Babak) have Jewel properties (Ghaedi et al., 2014).

Materials and methods

After reviewing and Library Studies, geological field studies on the borate deposits were carried out from Shahr – e – Babak Playa. In order to take better samples, several pits were excavated with a depth of 30 cm to 1 meter so that borate minerals became apparent. X-ray diffraction analysis (IMIDRO, Karaj), and ICP AES (ALS CHEMEX,

Canada) methods were carried out on representative samples taken from the studied area.

Discussion

Field observations show that in the studied areas, borate bearing basins are fed by rivers which have originated from Sanandaj – Sirjan metamorphic rocks, Nain – Baft colored mélanges and igneous rocks of Urumieh – Dokhtar magmatic belt. Borate minerals also occur in fibrous aggregates and massive forms.

Mineralogy

XRD results show that the studied borate minerals mainly belong to the hydrated borates and contain ulexite, borax, gowerite, sassolite and inyoite. Geochemical data indicate that the boron is the dominant constituent in the studied playa. Borate minerals are divided into two groups of hydrated and non-hydrated borate category (Palache et al., 1952.; Garrett, 1998). Both hydrated and non-hydrated borate minerals have been formed in the Shahr-e-Babak playa.

Hydrated borate in the study areas:

Hydrated borates are those borates in which water molecules are involved (Garrett, 1998). In the studied area, the hydrated borate minerals include: Borax, Ulexite, Inyoite, Gowerite.

Non-hydrated borate in the study areas:

In the Shahr-e-Babak playa, Sassolite non-hydrated borate minerals are abundant.

According to the XRD analyses performed on samples from the study areas, the hydrated borate

*Corresponding authors Email: atefeh_gh19@yahoo.com

minerals are more important minerals. The main economic valuable minerals include:

1- Ulexite ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$): Crystal Data: Triclinic. Point Group: 1 (Ghose et al., 1978). In the Shar – e – Babak playa, ulexite occurs as deposits with massive, cauliflower-like nodules and fibrous textures.

2- Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$): Crystal Data: Monoclinic. Point Group: 2/m. Crystals are commonly short to long prismatic [001] (Levy and Lisensky, 1978). In the studied borate samples, it can be found in association with the other borate minerals, and often occurs in the form of salt marsh.

3- Gowerite ($\text{CaB}_6\text{O}_8(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$): Crystal Data: Monoclinic. Point Group: 2/m (Erd et al., 1959). In the Khatoonabad samples, it was found as prismatic and spherical crystals along with ulexite.

4- Inyoite ($\text{CaB}_3\text{O}_3(\text{OH})_5 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$): Crystal Data: Monoclinic. Point Group: 2/m (Christ, 1953). This mineral has been detected in the studied area by XRD.

Sassolite (H_3BO_3): Crystal Data: Triclinic. Point Group: 1 and as scaly pseudo-hexagonal crystals (Allen and Kramer, 1957). This mineral is found frequently in the Marvast Playa.

Geochemistry

Geochemical data indicate that in the studied playa, boron is very abundant. Good correlation between the elements, such as B and Ca confirms the formation of Calcium bearing borate mineral in the studied areas.

Origin

Field observations show that in the studied areas, borate bearing basins are fed by rivers which have originated from the Sanandaj – Sirjan metamorphic rocks, Nain – Baft colored mélanges and igneous rocks of the Urumieh – Dokhtar magmatic belt.

Result

The XRD results show that the studied borate minerals mainly are hydrated ones and contain ulexite, borax, gowerite, sassolite and inyoite. Geochemical data confirm the frequency of boron in the playa. Good correlation between the elements such as B and Ca verifies the formation

of Calcium bearing borate mineral in the studied areas.

Acknowledgements

The authors wish to thank IMIDRO for performing XRD analyses.

References

- Allen, R.D. and Kramer, H., 1957. Ginorite and sassolite from Death Valley, California. *American Mineralogist*, 42(1-2): 56-61.
- Christ, C.L., 1953. Studies of borate minerals, 2. X-ray crystallography of inyoite and meyerhofferite -x-ray and morphological crystallography of $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. *American Mineralogist*, 38(1 - 11): 912-918.
- Erd, R.C., McAllister, J.F. and Almond, H., 1959. Gowerite, a new hydrous calcium borate, from the Death Valley Region, California. *American Mineralogist*, 44(9-10): 911-919.
- Floyd, P.A., Helvacı, C. and Mittwede, S.K., 1998. Geochemical discrimination of volcanic rocks associated with borate deposits: an exploration tool? *Journal of Geochemical Exploration*, 60(3): 185-205.
- Garrett, D.E., 1998. Borates: handbook of deposits, processing, properties, and use. Academic Press, USA, 483 pp.
- Ghaedi, A., Moradian, A. and Ahmadipour, H., 2014. Reviewing and introduction of mineralogical properties of Ulexite an unknown gem in Khatoonabad (Shahr Babak, Kerman Province). The 1st National Symposium of Gemology- Crystallography of Iran, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- Ghose, S., Wan, C. and Clark, J.R., 1978. Ulexite, $\text{NaCaB}_5\text{O}_9(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: structure refinement, polyanion configuration, hydrogen bonding, and fiber optics. *American Mineralogist*, 63(12): 160–171.
- Levy, H.A. and Lisensky, G.C., 1978. Crystal structures of sodium sulfate decahydrate (Glauber's salt) and sodium tetraborate decahydrate (borax). Redetermination by neutron diffraction. *Acta Crystallographica*, 34(12): 3502-3510.
- Palache, C., Berman, H. and Frondel, C., 1952. Dana's System of Mineralogy. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 74(2): 218-219.