

## بررسی پتانسیل اقتصادی و فراوری عناصر مختلف در کانسار بوکسیت جاجرم (استان خراسان شمالی) و محصولات حاصل از فرایند بایر

امیر اثنی عشری\*، داریوش اسماعیلی

دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات- آدرس الکترونیکی: aashari@ut.ac.ir

(دریافت: ۸۷/۵/۲۱؛ پذیرش: ۸۸/۵/۲۸)

### چکیده

کانسار بوکسیت جاجرم که بزرگترین کانسار بوکسیت ایران به شمار می رود در استان خراسان شمالی واقع شده و شامل دو بخش بوکسیت قرمز و رسهای بوکسیتی است. در سالیان اخیر در کارخانه تولید آلومینای جاجرم طی فرایند بایر (Bayer process)، از بوکسیت‌های قرمز این منطقه جهت تولید پودر آلومینا ( $Al_2O_3$ ) استفاده می شود و مقدار زیادی گل قرمز (red mud) نیز به عنوان یک محصول فرعی تولید می شود. در این مقاله با مقایسه بوکسیت جاجرم با سایر نهشته‌های بوکسیتی شناخته شده جهان، آستانه اقتصادی و پتانسیل فراوری عناصر مختلف در بوکسیت جاجرم مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این مطالعه عناصر خاکی کمیاب (REE) به مقدار قابل توجهی در بخشهایی از افق رس بوکسیتی متمرکز شده و به نظر می‌رسد که عمدتاً توسط رسها به صورت سطحی جذب شده اند که همین مساله باعث تسهیل استحصال این عناصر می‌شود. مقایسه بوکسیت جاجرم با نهشته‌های بوکسیتی غنی از گالیم نشان می‌دهد که در بوکسیت‌های جاجرم گالیم از تمرکز بالایی برخوردار نیست ولی لیکور حاصل از فرایند بایر به مقدار بسیار قابل توجهی از گالیم غنی شده است. این امر بیانگر اهمیت بوکسیت‌های جاجرم از لحاظ تمرکز گالیم است. مطالعه گل قرمز کارخانه جاجرم نشان می‌دهد که از لحاظ تیتانیوم غنی بوده ولی به نظر می‌رسد ارزش چندانی از لحاظ تمرکز عناصر خاکی کمیاب و اسکاندیم نداشته باشد. علاوه با مقایسه‌ای که بین ترکیب بوکسیت جاجرم با ترکیب میانگین پوسته‌ای، گرانیته‌ها و دیابازها انجام شد مشخص گردید که این بوکسیتها به شدت از عناصر Zr, V, Nb, Hf, U, Ta و Bi غنی شده‌اند ولی تمرکز تمامی آنها پایین‌تر از آستانه اقتصادی است.

**واژه‌های کلیدی:** بوکسیت، جاجرم، پتانسیل اقتصادی، عناصر، فرایند بایر

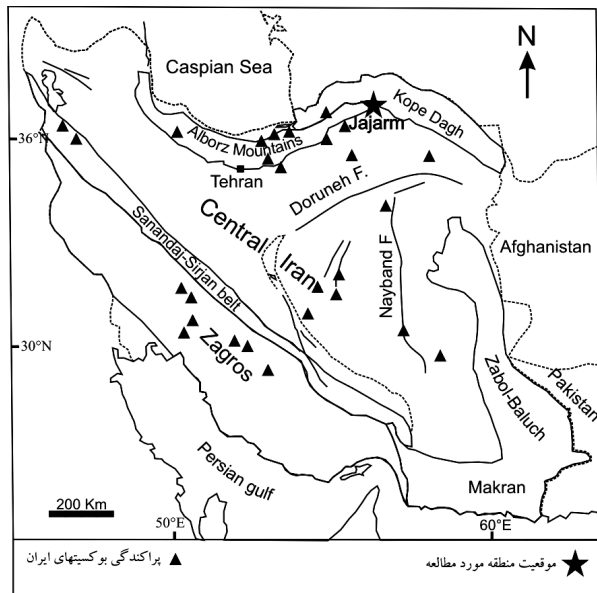
### مقدمه

روش استفاده از این کانسار در نظر گرفته می شود. علاوه بر آلومینیم سایر عناصر غیرمتحرک و یا کم تحرک نیز در بوکسیتها متمرکز می شوند که البته این عناصر عمدتاً در حدی نیستند که از لحاظ اقتصادی فراوانی آنها مقرون به صرفه باشد ( Bardossy & Aleva 1990).

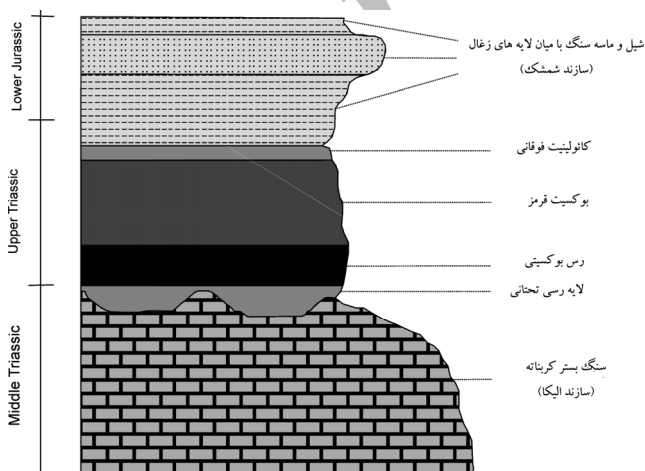
چندین سال است که از معدن بوکسیت جاجرم عمل استخراج بوکسیت صورت می‌گیرد. مواد معدنی در ابتدا به دلیل پایین بودن عیارشان با بوکسیت‌های پرعیارتر سایر نقاط ایران مخلوط شده و سپس به کارخانه تولید آلومینا در نزدیکی معدن منتقل می‌شوند. مخلوط حاصله وارد کارخانه شده و طی فرایندی تحت عنوان فرایند بایر (Bayer process)، پودر آلومینای آن ( $Al_2O_3$ ) استحصال می‌شود. نهایتاً با تولید پودر آلومینا، مواد برجای مانده به صورت گل قرمز (Red mud) و به عنوان یک محصول فرعی باقی می‌مانند. گل قرمز برجای مانده که از حجم قابل ملاحظه‌ای نیز برخوردار است دارای آثار زیانبار

اصلی ترین منبع تولید آلومینیم در جهان امروزی سنگ معدن بوکسیت است که به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد  $Al_2O_3$  جهت تولید آلومینیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بوکسیتها مواد برجای مانده ای هستند که از تخریب و فرسایش سنگهای منشاء اولیه از قبیل گرانیته، بازالت، نفلین سینیت و یا مواد رسی اولیه حاصل می‌شوند (Bardossy 1982، Bardossy & Aleva 1990). در حین فرایندهای هوازدگی و تخریب سنگهای اولیه، عناصر متحرک از محیط تشکیل بوکسیت شسته شده و عناصر غیرمتحرک نسبت به سنگ منشاء اولیه، در چنین محیطی غنی می‌شوند. از آنجاییکه آلومینیم از جمله عناصر غیرمتحرکی است که نسبت به سایر عناصر به مقدار زیاد و فراوانتری در سنگ منشاء بوکسیت وجود دارد بنابراین مقدار تمرکز آن در بوکسیتها نیز نسبت به سایر عناصر بسیار بیشتر است و به همین دلیل از نظر اقتصادی استخراج آلومینیم از بوکسیت مقرون به صرفه ترین

نهشته بوکسیتی جاجرم دارای یک روند شرقی-غربی بوده و با توجه به گسلهای اصلی به چهار بخش عمده تقسیم شده است که عبارتند از بخشهای سنگ تراش، تاگویی، زو و گل بینی. هر کدام از این بخشها نیز با توجه به گسلهای کوچکتر عرضی و غالباً امتداد لغز به بلوکهای کوچکتر تقسیم شده‌اند. از آنجاییکه هم اینک دو بخش زو و گل بینی در حال بهره‌برداری هستند مطالعه ما به نهشته‌های معدنی مربوط به این دو بخش محدود می‌شود. منطقه گل بینی شامل هشت بلوک و منطقه زو نیز از چهار بلوک تشکیل شده است. بلوک ۵ گل‌بینی به دلیل صعب العبور بودن و عدم امکان نمونه‌برداری، در این مطالعه لحاظ نشده است. در جدول ۱ مشخص شده که از هر واحد چه تعداد نمونه مورد آنالیز شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب قرار گرفته است.



شکل ۱- موقعیت شهرستان جاجرم در نقشه ساختاری ایران.



شکل ۲- ستون چینه شناسی کانسار بوکسیت جاجرم و سنگهای میزبان آن.

زیست محیطی است و بایستی به شکلی از آثار زیانبار آن کاسته شده و یا به نوعی از آن بهره‌برداری اقتصادی صورت گیرد.

تاکنون مطالعات مختلفی بر روی این کانسار صورت گرفته است (به عنوان مثال: خیری ۱۳۶۶؛ برآبادی ۱۳۷۷؛ جعفرزاده ۱۳۷۹؛ ناصری ۱۳۸۲؛ خادمی ۱۳۸۴؛ اثنی‌عشری ۱۳۸۵؛ اسماعیلی و همکاران ۱۳۸۵؛ رحیم‌پوربناب و اسماعیلی ۱۳۸۶). هدف از ارائه این مقاله، بررسی مقدار تمرکز برخی عناصر اصلی و کمیاب در بوکسیت جاجرم است. در این مقاله به اقتباس از مطالعات مختلفی که اخیراً در این زمینه صورت گرفته (به عنوان مثال: Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1994., Ochsenkühn-Petropoulou et al. 2001, Moskalyk et al. 1994., Tsakanka et al. 2004., Kanazawa & Kamitani 2005) و همچنین مقایسه ترکیب بوکسیت جاجرم و محصولات فرعی حاصل از فرایند بایر با موارد مشابه آنها در سایر نقاط دنیا (به عنوان مثال: Jennifer 1990, Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1994, Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1995, Sayan & Bayramoglu 2000, Bhat 2002, Tsakanka et al. 2004)، سعی شده است تا علاوه بر میزان آلومینا، از دیگر جنبه‌های اقتصادی نیز، بوکسیت جاجرم مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله عناصر اصلی و کمیابی که در بوکسیتها دارای ارزش اقتصادی هستند مورد بررسی قرار گرفته و تمرکز این عناصر در بوکسیت جاجرم با سایر نهشته‌های بوکسیتی جهان مقایسه شده است. از سوی دیگر در انتهای این مبحث ترکیب این نهشته با ترکیب متوسط پوسته زمین، گرانیتهای و دیابازها نیز مقایسه گردیده و مشخص شده است که در مقایسه با این ترکیبات، چه عناصری در بوکسیت جاجرم تمرکز نشان می‌دهند همچنین با مقایسه غلظت این عناصر در بوکسیت جاجرم با سایر نهشته‌های بوکسیتی یا غیر بوکسیتی که عناصر مزبور در آنها ارزش اقتصادی دارند مشخص شد که آیا چنین عناصری این قابلیت را دارند که از لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار گیرند یا خیر. از سوی دیگر با توجه به آثار زیانبار گل قرمز حاصل از کارخانه تولید آلومینا و بلا استفاده بودن آن، نحوه استفاده بهینه از این محصول فرعی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### موقعیت زمین‌شناسی

کانسار بوکسیت جاجرم در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان جاجرم (شکل ۱) در استان خراسان شمالی و با مختصات جغرافیایی  $37^{\circ}2'$  تا  $37^{\circ}3'$  شمالی و  $56^{\circ}30'$  تا  $56^{\circ}36'$  شرقی در نقشه زمین‌شناسی سنخواست با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سهیلی و سهندی، ۱۳۷۸) واقع گردیده است. در این منطقه سازند شممشک با ناپیوستگی فرسایشی بر روی سازند الیکا قرار گرفته است و افق بوکسیت موردنظر با چهار بخش لایه رسی تحتانی، رس بوکسیتی، بوکسیت قرمز و کاتولینیت بالایی در بین این دو سازند واقع شده است (شکل ۲).

## ترکیب کانی شناسی

بوکسیت جاجرم به رنگهای قرمز، خاکستری، سبز و برخی رنگهای دیگر دیده می شود. رسهای بوکسیتی نرم بوده دارای لمس صابونی می باشند و گاهی آثار لایه بندی از خود نشان می دهند و عمدتاً نیز از کائولینیت، همتایت و مقادیر کمی دیاسپور تشکیل شده و از نظر تولید آلومینا ارزش اقتصادی ندارند. نوع دیگر بوکسیت که دارای سختی بیشتری نسبت به نوع قبلی است بوکسیت های قرمز بوده و کانسنگ اصلی معدن محسوب می شوند. در بوکسیت های قرمز جاجرم دیاسپور کانی اصلی آلومینیم به حساب می آید. لایه رسی تحتانی که مستقیماً بر روی سنگ بستر کربناته قرار دارد عمدتاً ترکیب رسی دارد ولی در برخی قسمت ها و به صورت محلی بوکسیت های پرعیاری را تشکیل داده اند. لایه کائولینیت فوقانی نیز در حدفاصل بوکسیت های قرمز و سازند شمشک واقع شده و ترکیب کائولینیتی دارد.

جدول ۱- تعداد نمونه های آنالیز شده از بخش های مختلف منطقه مورد مطالعه. علامت G به معنای گل بینی و Z به معنای زو است. شماره های کنار هر حرف نیز شماره بلوک معدنی را مشخص می کند.

کائولینیت فوقانی	بوکسیت قرمز	رس بوکسیتی	لایه رسی تحتانی
G1	1	2	7
G2	1	2	5
G3	1	2	6
G4	1	2	6
G6	1	2	6
G7	1	2	5
G8	1	2	4
Z1	1	2	6
Z2	1	2	6
Z3	1	2	6
Z4	1	2	6

## روش مطالعه

جهت رسیدن به اهداف پیش بینی شده در این مقاله، پس از حدود ۲۰ روز مطالعات صحرایی، تعداد ۵۰۰ نمونه از بلوک های معدنی مختلف به صورت سیستماتیک برداشت گردید. پس از مطالعه حدود ۱۲۰ مقطع نازک تهیه شده از این نمونه ها، مجموعاً ۱۱۳ نمونه انتخاب و در آزمایشگاه Actlabs کشور کانادا به روش های ICP-AES و ICP-MS به ترتیب مورد آنالیز عناصر اصلی و کمیاب قرار گرفتند. از بین نمونه های آنالیز شده تعدادی از آنها مربوط به بوکسیت های سایر نقاط ایران می باشند. از آنجاییکه مخلوطی از بوکسیت های سایر نقاط ایران با بوکسیت جاجرم خوراک کارخانه تولید آلومینا را تشکیل می دهند لذا در این مقاله ترکیب این بوکسیت ها با ترکیب بوکسیت جاجرم مقایسه شده است. همچنین تعدادی از نمونه های آنالیز شده مربوط به محصولات فرعی (گل قرمز و لیکور) تولیدی کارخانه آلومینای جاجرم

هستند و در مطالعه پیش رو از نتایج آنالیز آنها نیز استفاده به عمل آمده است.

## مقایسه ترکیب شیمیایی بوکسیت جاجرم و محصولات فرعی کارخانه تولید آلومینا با سایر نهشته های بوکسیتی

برونووی و همکاران (۱۹۸۵) بر اساس ۶۷۰۰ آنالیز شیمیایی حاصل از ۴۸ نهشته بوکسیتی متفاوت، ترکیب متوسطی را برای بوکسیت ها بدست آوردند. این مؤلفین تفاوتی را برای بوکسیت های لاتریتی، کارستی و نوع تیخوین (Tikhvin) در نظر نگرفته و مقادیر متوسط عناصری که توسط آنها محاسبه گردیده است قابل تعمیم به تمامی نهشته های بوکسیتی می باشد. بر اساس محاسبات این محققین Ag، Hf، Cr، Bi، As و Th از عناصری هستند که بیشترین تمرکز را در بوکسیت ها دارند و ضریب تمرکز این عناصر از Al نیز پیشی می گیرد. ولی میزان تمرکز عناصر Zr، Yb، V، U، Sn، Sc، Sb، Pb، Ni، In، Ga و REE کمتر از Al بوده و عناصر La، k، Ge، F، Eu، Cu، Co، Ca، C، Zn، Tb، Ta، Sr، Se، S، Rb، P، Na، Mg نیز تهنی شدگی نشان می دهند.

در نهشته های بوکسیتی، از لحاظ اقتصادی می توان عناصر فرعی و نادر را به سه گروه تقسیم کرد (Bardossy & Aleva 1990):

۱) عناصری که از نظر اقتصادی از بوکسیت ها قابل بهره برداری هستند. این عناصر را می توان به عنوان محصول فرعی فرایند بایر (مثل Ga) و یا به صورت مجزا (مثل طلا) از بوکسیت جدا نمود.

۲) عناصر آلوده کننده که باعث بالا رفتن هزینه تولید آلومینا می شوند. به عنوان مثال می توان به Zn، Cu، Pb، So<sub>3</sub>، Co<sub>2</sub>، MgO، CaO و Corg (کربن آلی) اشاره کرد.

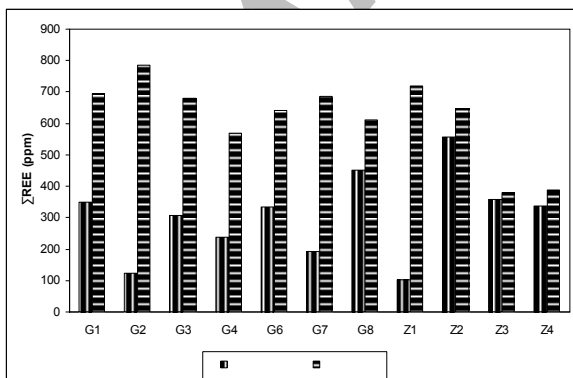
۳) اکثریت عناصر نادر از نظر اقتصادی اهمیت خاصی ندارند، تمرکز آنها پایین تر از حد اقتصادی است و حضور آنها تأثیری در فرایند تولید آلومینا ندارد.

در جدول ۲ مقادیر میانگین برخی از عناصر در ۶۳ نمونه تجزیه شده بوکسیت قرمز جاجرم و همچنین میانگین تمرکز آنها در سایر نهشته های بوکسیتی (Bronevoi et al. 1985) ارائه شده است و می توان با مقایسه این دو، تخمین قابل قبولی را از تمرکز بسیاری از عناصر در بوکسیت جاجرم در مقایسه با سایر نهشته های بوکسیتی انجام داد.

با توجه به داده های موجود در جدول ۲، بوکسیت جاجرم نسبت به سایر نهشته های بوکسیتی از عناصر Tl، Ta، Ce، Nb و Bi غنی شده است. مجموع عناصر خاکی کمیاب (ΣREE) در مقایسه با سایر نهشته های بوکسیتی به مقدار زیادی در بخش بوکسیت قرمز جاجرم متمرکز نشده اند ولی عنصر Ce برخلاف سایر نهشته ها به شدت در بوکسیت جاجرم غنی شدگی نشان می دهد. نظر به اهمیت عناصر مختلف در

کمیاب سنگین تا حدودی به همراه عناصر Th و U هستند. از لحاظ کانی شناسی کانیهای زیادی وجود دارند که محتوی عناصر خاکی کمیاب بوده و به عنوان منبعی برای این عناصر محسوب می‌شوند. کانیهای باستانزیت، موناژیت، لوپاریت (Loparite)، فسفریت، آپاتیت، یودیالیت (Eudialyte)، موناژیت ثانویه، چلوریت (Chelornite) و اسپنتورانیم (Spenturanium) از منابع مطرح عناصر خاکی کمیاب هستند. از آنجاییکه آنالیزهای XRD هیچیک از کانیهای فوق الذکر را در بوکسیت جاجرم نشان نداده اند، بنابراین انتظار می رود که در نمونه های آنالیز شده، این کانیها موجود نبوده و یا اینکه مقدار آنها پایین تر از دقت اندازه گیری باشد. البته با توجه به بررسی هایی که بر روی ضرایب همبستگی عناصر انجام گردیده است مشخص شده که کانیهای رابدوفین (Rhabdophane)، موناژیت، فلورنسیت (Florensite)، چرکیت (Churchite)، زنوتایم (Xenotime) و یوکسنیت (Euxenite) میزبانان احتمالی این عناصر در بوکسیت جاجرم هستند ولی مقدار آنها در حدی نیست که توسط آنالیز XRD قابل تشخیص باشند (اثنی عشری، ۱۳۸۵). همچنین ذکر این نکته نیز لازم به نظر می رسد که تمامی این کانیها بجز چرکیت می توانند به صورت یک کانی فرعی در سنگ مادر نهشته های بوکسیتی دیده شوند (Henderson, 1984) و بنابراین احتمال حضور آنها در بوکسیت جاجرم دور از انتظار نیست.

در جدول ۲ تمرکز متوسط  $\sum REE$  در بخش بوکسیت قرمز در مقایسه با سایر نهشته های بوکسیتی نشان داده شده است. شکل ۳ نیز نشان می دهد که تمرکز  $\sum REE$  در رسهای بوکسیتی به مراتب بیشتر از بوکسیت های قرمز است و این مساله به دلیل شسته شدن  $\sum REE$  از بخش بوکسیت قرمز و ته نشست آنها در رسهای بوکسیتی است (اثنی عشری، ۱۳۸۵) بطوریکه حداکثر میانگین تمرکز این عناصر در رسهای بوکسیتی بلوک ۲ گل بینی (G2) بوده و به 785ppm می رسد و حداقل تمرکز آنها نیز در بلوک ۳ زو بوده و در حدود 380ppm است.



شکل ۳- میزان تمرکز متوسط عناصر خاکی کمیاب ( $\sum REE$ ) در دو بخش بوکسیت قرمز و رس بوکسیتی. علامت G به معنای گل بینی و Z به معنای زو است. شماره های کنار هر حرف نیز شماره بلوک معدنی را مشخص می کند.

نهشته های بوکسیتی، در ادامه بحث این عناصر به صورت مجزا مورد بررسی قرار می گیرند و تاکید اصلی بر روی عناصر Ga, Sc, REE و TiO<sub>2</sub> می باشد که اخیرا توجه زیادی به فراوری آنها از بوکسیتها معطوف شده است.

جدول ۲- ترکیب میانگین ۶۳ نمونه از برخی عناصر در بخش بوکسیت قرمز کاناسر بوکسیت جاجرم. داده ها بر حسب ppm است.

علائق جهانی در نهشته های بوکسیتی	بوکسیت جاجرم	علامت اختصاصی
5	5	Be
10 - 120	47	Sc
77 - 1370	537	V
85 - 5100	325	Cr
7 - 70	72	Co
7 - 320	72	Ni
10 - 133	41	Cu
28 - 180	47	Zn
40 - 110	47	Ga
0.5 - 4.5	158	Ce
19 - 115	81	As
35 - 2010	311	S
174 - 675	618	Zr
14 - 93	244	Nb
1.9 - 4.2	1.2	Ag
0.03 - 0.32	0.19	In
6 - 14	7.6	Sn
0.6 - 8.6	4	Sb
38 - 806	320	? REE
9 - 170	50	La
1 - 5	2.5	Eu
0.3 - 3.0	2	Yb
2.8 - 17	3.5	Yb
5 - 29	19	Hf
0.7 - 3.9	11	Ta
0.06 - 0.4	10	Tl
20 - 185	32	Pb
0.2 - 2.2	11.2	Bi
6 - 56	32	Tl
2 - 22	22	U

### ۱- عناصر خاکی کمیاب

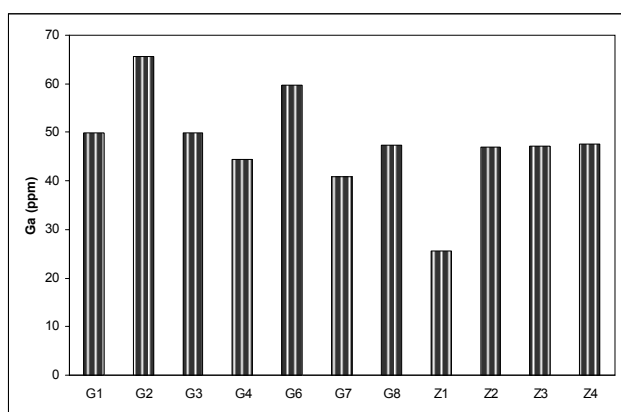
شعاع یونی عناصر خاکی کمیاب با شعاع یونی عناصری مانند Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Th<sup>4+</sup> و U<sup>4+</sup> بسیار شبیه است و بنابراین عناصر خاکی کمیاب به مقدار زیادی می توانند در ساختمان بلوری کانیهای حاوی این عناصر حضور داشته باشند. در بوکسیت قرمز جاجرم نیز با توجه به همبستگی نسبتا خوبی که بین U و Th با عناصر HREE (Dy-Lu) وجود دارد (تقریبا ۰/۵؛ اثنی عشری، ۱۳۸۵) به نظر می رسد که عناصر خاکی

## ۲- گالیم

گالیم یکی از عناصر نادر موجود در پوسته زمین است و فراوانی آن در حدود 16ppm می‌باشد. این عنصر در مقادیر بسیار کم در بسیاری از سنگها و کانه های سایر فلزات یافت می‌شود. گالیم در نهشته های مس، در سولفیدها و سولفوسالتهای وجود دارد و عمدتاً جانشین آهن می‌شود. همچنین در بخشهای اکسیدی این نهشته ها، عمدتاً در کانیهای گروه ژاروسیت و لیمونیت دیده می‌شود. در نهشته های آلکالن-پرالکالن نیز عمدتاً جایگزین آلومینیم در آلیت و یا گاهی نیز جایگزین Al در میکا می‌گردد (Bernstein 1986, Petkof 1985, Tekverk fay & 1986). همچنین گالیم به عنوان یک محصول فرعی از بوکسیت و سولفید روی بدست می‌آید و مقادیر نادری از آن نیز در بیشتر کانیهای آلومینوسیلیکاته و رسها از قبیل کائولینیت و دیاسپور وجود دارد (Christie & Brathwaite 2002). در نهشته های بوکسیتی با افزایش شدت هوازدگی در سنگهای مادر بوکسیتها، نسبت Ga:Al افزایش می‌یابد. ذخایر جهانی گالیم قابل بازیافت در نهشته های بوکسیتی به طور تقریبی در حدود دو میلیون تن ارزیابی شده است (Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry 2002). به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفت که گالیم عمدتاً بعنوان یک محصول فرعی در طی فراوری آلومینیم از بوکسیت بازیافت می‌شود. در طی فراوری بوکسیت جهت بازیافت آلومینیم، گالیم در طی فرایند بایر از لیکور کاستیک (Caustic Liquor) استخراج می‌شود. فرایند بایر باعث تمرکز گالیم در محلولهای قلیایی می‌شود، بطوریکه نسبت Al:Ga از 5000 به 300 کاهش می‌یابد. در فرایند بایر گالیم به همراه آلومینا (اکسید آلومینیم) بازیافت می‌شود. به محض سرد شدن و دانه‌بندی محلول آلومینات سدیم، تری هیدرات آلومینیم متبلور می‌شود و هیدروکسید گالیم در فاز لیکور تجمع می‌یابد. پس از غنی‌شدگی لیکور و تعدیل pH، می‌توان گالیم خالص را به روش الکترولیتی از لیکور بازیافت نمود. چنین روش جداسازی گالیم از یک محیط قلیایی توسط گلدشمیت (1937) پیشنهاد گردید. بطور کلی بازیافت گالیم به سه روش مختلف و برای لیکور حاوی 70-150 mg/l گالیم به کار می‌رود (Moskalyk, 2003). این روشها عبارتند از: ۱- رسوب گیری جزء به جزء (Fractional precipitation) ۲- فرایندهای الکترولیتی (Electrolytic processes) ۳- عوامل تجزیه کننده (Chelating agents).

در جدول ۳ میزان تمرکز برخی از عناصر در لیکور حاصل از کارخانه جاجرم آورده شده است. شکل ۴ نیز میانگین پراکندگی عنصر گالیم را در بلوکهای مختلف دو منطقه زو و گل‌بینی نشان می‌دهد. مقدار متوسط گالیم از 26ppm (در بلوک (ازو)) تا 66ppm (در بلوک ۲ گل‌بینی) در تغییر است. از آنجاییکه بوکسیت جاجرم با سایر

بوکسیت‌های پرعیارتر مثل بوکسیت‌های شاه‌بلاقی و مندون یزد مخلوط می‌شوند لذا نمونه‌هایی از این بوکسیتها هم مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. مقدار گالیم موجود در این نمونهها در حدود 60ppm است (جدول ۳) یعنی مقداری بیشتر از آنچه که بطور متوسط در بوکسیت‌های جاجرم دیده می‌شود (47ppm). بنابراین اگر فرض شود که این دو نمونه معرف مقدار متوسط گالیم در دو نهشته شاه بلاقی و مندون باشند لذا می‌توان چنین تصور کرد که استفاده بیشتر از این بوکسیتها در تولید آلومینا می‌تواند باعث بالاتر رفتن مقدار گالیم در لیکور حاصله شود. از طرف دیگر در منطقه جاجرم، بلوک ۲ گل‌بینی بیشترین مقدار و بلوک یک زو نیز کمترین مقدار گالیم را دارا هستند (به ترتیب 66ppm و 26). بنابراین انتظار می‌رود که لیکور حاصل از آنها نیز به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار گالیم باشند.



شکل ۴- میانگین تمرکز عنصر گالیم در بوکسیت‌های قرمز جاجرم. G=منطقه گل‌بینی، Z=منطقه زو.

## ۳- گل قرمز

گل قرمز اصلی ترین محصول فرعی تولید آلومینا در فرایند بایر است. ذخیره سازی مقادیر زیادی گل قرمز نه تنها به دلیل بالا بودن pH آن (معمولاً در حدود ۱۲-۱۳) باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی برای ساکنین محلی و تمامی موجودات زنده می‌شود بلکه از نظر اقتصادی نیز مشکلاتی را برای تولیدکنندگان آلومینا ایجاد می‌کند. البته در حال حاضر با توجه به جدیدالاحداث بودن کارخانه تولید آلومینای جاجرم این مشکلات در منطقه نمایان نشده است ولی با توجه به اینکه حجم گل قرمز تولیدی رو به افزایش است لذا در آینده می‌تواند مشکلاتی را در منطقه ایجاد کند. استفاده و بکارگیری مناسب این ماده خام ثانویه، در موارد مختلف می‌تواند سود اقتصادی زیادی داشته و مشکلات زیست محیطی حاصل از آن را کاهش دهد، به عنوان مثال فرایندهای زیادی به منظور بازیافت آهن از گل قرمز صورت گرفته است و این پتانسیل وجود دارد که از گل قرمز به عنوان ماده اولیه در

جدول ۳- آنالیز شیمیایی عناصر اصلی و برخی عناصر کمیاب در بوکسیت‌های معادن شاه بلاقی، مندون، حیدرآباد و میانگین ترکیب بوکسیت قرمز جاجرم و همچنین نمونه گل قرمز و دو نوع لیکور حاصل از کارخانه تولید آلومینای جاجرم.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Sc	Ga	Y
معدن شاه بلاقی	12.7	53.0	1.8	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	18.7	0.2	12.8	71.0	58.5	24.0
معدن مندون	4.2	60.5	19.3	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	2.7	0.1	12.9	59.0	59.2	100.6
معدن حیدرآباد یزد	3.5	49.7	28.5	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	5.6	0.1	10.2	51.0	46.0	63.1
میانگین در بوکسیت قرمز	16.7	41.7	21.6	0.2	0.4	0.7	0.1	0.6	5.8	0.1	11.8	46.6	46.8	32.5
گل قرمز	14.8	17.7	27.6	0.1	1.7	14.7	5.4	0.1	7.2	0.2	9.7	67.0	28.1	56.0
لیکور خروجی واحد ۱۳	1.0	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	40.9	6.6	0.0	0.0	26.7	0.0	257.9	0.0
لیکور خروجی واحد انحلال	0.3	26.3	0.1	0.0	0.0	0.1	34.9	10.6	0.0	0.1	26.7	0.0	342.5	0.0
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
معدن شاه بلاقی	59.0	87.2	8.1	25.4	4.3	1.4	4.3	0.7	4.0	0.8	2.2	0.3	2.1	0.3
معدن مندون	96.4	217.2	22.6	84.0	17.7	3.9	15.7	2.8	15.5	3.2	9.6	1.4	9.1	1.4
معدن حیدرآباد یزد	87.3	243.7	18.8	68.8	15.8	4.3	15.2	2.3	12.1	2.3	6.7	1.0	6.7	1.0
میانگین در بوکسیت قرمز	49.7	157.6	48.8	30.6	6.6	2.6	6.1	1.9	5.6	2.0	3.8	0.8	3.5	0.9
گل قرمز	95.7	311.4	20.3	72.3	14.6	3.8	12.5	2.1	10.9	2.1	5.8	0.9	5.7	0.9
لیکور خروجی واحد ۱۳	0.3	0.6	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
لیکور خروجی واحد انحلال	0.2	0.7	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

صنایع آهن و استیل استفاده شود (Parekh & Goldberger 1978; Shamsuddin 1986). گل قرمز ممکن است مستقیماً در مواد ساختمانی خاکریزها (Levee construction material)، خاکریز جاده ها، بعنوان پوششی مناسب برای زباله های دفن شده، تولید خاکهای مصنوعی، Fertilizer filters و بعنوان عاملی جهت جلوگیری از تخریب سواحل استفاده شود همچنین با انجام یک سری کارهای مقدماتی نیز می توان گل قرمز را مورد استفاده قرار داد، بعنوان مثال با اضافه کردن سدیم سیلیکا (Sodium silica) به گل قرمز، می توان آجر ساخت. سایر محصولات ساختمانی از قبیل دره الوار (Lumber) و تیرهای برق رسانی (Utility poles) نیز از خشک کردن گل قرمز بدست می آیند (Brown & Kirkpatrick 1999) و بیش از ۳۷٪ وزنی گل قرمز در تولید لعابهای سرامیکی بکار می رود (Yalcin & Sevinc 2000). یکی از کاربردهای مهم گل قرمز، استحصال برخی عناصر فلزی از قبیل اکسید تیتانیوم، اسکاندیم و عناصر خاکی کمیاب از آن می باشد. ترکیب گل قرمز در ارتباط مستقیم با بوکسیت‌هایی است که وارد کارخانه می شوند لذا در این قسمت توضیحاتی در ارتباط با این عناصر و فراوانی آنها در بوکسیت جاجرم ارائه می شود.

تحقیقات دیگر نشان می دهد که گل قرمز به عنوان یک محصول فرعی در فرایند بایر عمدتاً از اکسیدهای Fe, Ca, Al, Si, Ti, Na, V, Zr, Nb (Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1994, Ochsenkühn-Petropoulou 2001) و همچنین از عناصر Sc, Y و لانتانیدها که از نظر اقتصادی تمرکز قابل توجهی و در حدود ۱۰۰۰ g/ton دارند غنی می باشد (Tsakanka et al. 2004). تمرکز Sc در گل قرمز غالباً بسیار بالا و در حدود ۱۳۰ g/ton در گل قرمز خشک می باشد که معادل ۰.۰۲٪ Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است (Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1994, Ochsenkühn-Petropoulou et al. 1995). در شکل ۳ فراوانی عناصر خاکی کمیاب در بخشهای مختلف افقهای بوکسیتی جاجرم نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می شود بوکسیت‌های قرمز که خوراک اصلی کارخانه را تشکیل می دهند به مراتب کمتر از رسهای بوکسیتی از این عناصر غنی شده اند. شکل ۵ نیز فراوانی اسکاندیم را در بخشهای مختلف بوکسیت‌های قرمز نشان می دهد و همانطور که مشخص است بیشترین فراوانی آن در بلوک ۴ زو دیده می شود.

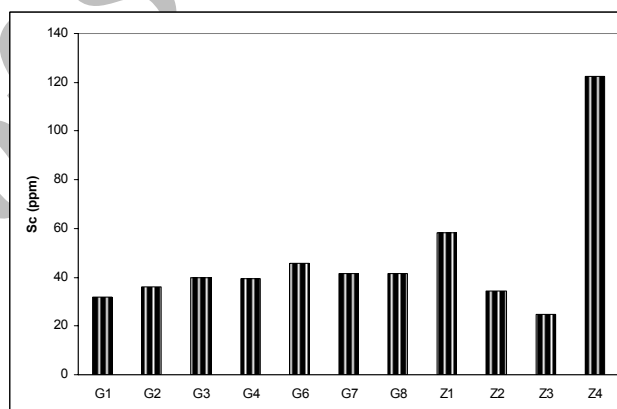
صنایع آهن و استیل استفاده شود (Parekh & Goldberger 1978; Shamsuddin 1986). گل قرمز ممکن است مستقیماً در مواد ساختمانی خاکریزها (Levee construction material)، خاکریز جاده ها، بعنوان پوششی مناسب برای زباله های دفن شده، تولید خاکهای مصنوعی، Fertilizer filters و بعنوان عاملی جهت جلوگیری از تخریب سواحل استفاده شود همچنین با انجام یک سری کارهای مقدماتی نیز می توان گل قرمز را مورد استفاده قرار داد، بعنوان مثال با اضافه کردن سدیم سیلیکا (Sodium silica) به گل قرمز، می توان آجر ساخت. سایر محصولات ساختمانی از قبیل دره الوار (Lumber) و تیرهای برق رسانی (Utility poles) نیز از خشک کردن گل قرمز بدست می آیند (Brown & Kirkpatrick 1999) و بیش از ۳۷٪ وزنی گل قرمز در تولید لعابهای سرامیکی بکار می رود (Yalcin & Sevinc 2000). یکی از کاربردهای مهم گل قرمز، استحصال برخی عناصر فلزی از قبیل اکسید تیتانیوم، اسکاندیم و عناصر خاکی کمیاب از آن می باشد. ترکیب گل قرمز در ارتباط مستقیم با بوکسیت‌هایی است که وارد کارخانه می شوند لذا در این قسمت توضیحاتی در ارتباط با این عناصر و فراوانی آنها در بوکسیت جاجرم ارائه می شود.

اسکاندیم (Sc) و عناصر خاکی کمیاب (REEs): کانی خاصی که منشاء اصلی عنصر اسکاندیم باشد وجود ندارد و این عنصر عمدتاً به عنوان یک محصول فرعی از تولید اورانیم و تنگستن و همچنین از معدنکاری آپاتیت و تیتانومگنتیت بدست می آید (Vijayan et al.

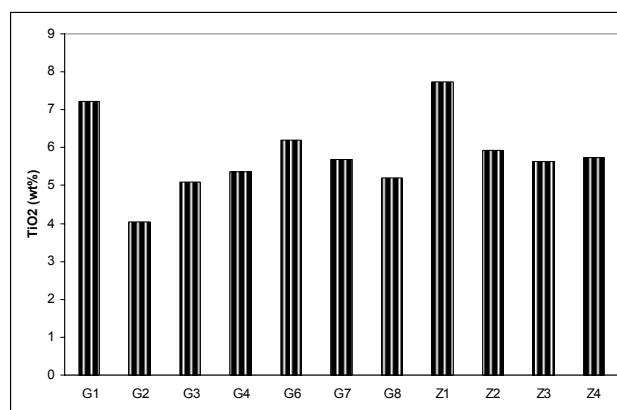
برداری عناصر خاکی کمیاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایندهای هوازگی باعث تمرکز عناصر خاکی کمیاب در کانیهای خاصی در قشر هوازده می‌شوند که منشاء آنها سنگهای غنی از REE می‌باشد. بوکسیتها و نهشته های لاتریتی نیکل دار نیز از این قبیل رسوبات هستند. یک نوع جدید از نهشته های خاکی کمیاب در منطقه Jiangxi و نواحی اطراف آن در جنوب چین (Kanazawa & Kamitani 2005) گزارش شده است که در آن گرانیتوئیدهای نسبتاً غنی از REE کاملاً هوازده شده و خاکیهای نادر در لایه های رسی موجود در قشر هوازده متمرکز شده اند. زمین شناسان چینی، چنین نهشته های جدیدی را نوع جذب سطحی یون (Ion adsorbition-type) می نامند بطوریکه REE ها عمدتاً در سطح کانیهای رسی و به شکل یون جذب شده اند و در نهایت تشکیل نهشته های عناصر خاکی کمیاب نوع جذب یونی را داده اند. همچنین این نوع نهشته‌ها در یک منطقه وسیعی در شمال چین بالاخص در منطقه Nanling نیز گسترش دارند. در این منطقه نهشته های کوچک بسیار زیادی هستند که در نتیجه هوازگی لاتریتی گرانیتها حاصل شده اند. بطورکلی جهت تشکیل این نوع از نهشته ها دو شرط لازم است 1: (Kanazawa & Kamitani 2005)

حضور مقدار کافی از عناصر خاکی کمیاب در سنگ منشاء ۲- تا دوام هوازگی یا فرایند لاتریتی شدن برای مدت طولانی. در این نهشته ها یونهای خاکی کمیاب توسط کائولینیت و هالوسیت جذب شده اند. اگر چه نهشته های خاکیهای نادر جذب سطحی یونی به مقدار کمی حاوی عناصر خاکی کمیاب هستند (۰/۲٪-۰/۰۵٪) اما معدنکاری و فراوری آنها آسان است. اکسیدهای عناصر خاکی کمیاب (REOs) بایک روش بسیار ساده تولید می‌شوند و برخی از اسیدهای شیمیایی برای شستشوی خاکیهای نادر بکار می‌روند. سودمندی دیگر نهشته‌های جذب سطحی یونی، مقادیر بسیار کم عناصر زیانبار رادیواکتیو است. در منطقه جاجرم، با توجه به فراوانتر بودن عناصر خاکی کمیاب در بخش رس بوکسیتی و بالا بودن مقدار رس در این بخش از نهشته، به نظر می‌رسد که بسیاری از این عناصر توسط رسها بصورت سطحی جذب شده باشند، زیرا در بسیاری از نهشته های رسی، کانیهای رسی تا حدود ۹۰-۲۰ درصد عناصر خاکی کمیاب را جذب می‌نمایند (Balashov & Grin 1969., Maksimović 1980., Roaldset & Rosenqvist 1971). همچنین مقایسه بین مقدار عناصر خاکی کمیاب در رسهای بوکسیتی جاجرم (شکل ۳) و نهشته های جنوب چین که عناصر خاکی کمیاب از آنها استحصال می‌شود (با مقدار عناصر خاکی کمیاب ۵۰۰-۲۰۰۰ ppm) نشان می‌دهد که در منطقه جاجرم نیز مقدار متوسط عناصر خاکی کمیاب در بیشتر بخشها در همین گستره هستند ولی در برخی از نمونه ها مقدار آنها تا ۱۵۴۰ ppm نیز می‌رسد. البته نکته ای که در این زمینه باید به آن

اکسید تیتانیم ( $TiO_2$ ): در شکل ۶ فراوانی متوسط  $TiO_2$  در بلوکهای مختلف افق بوکسیتی جاجرم نشان داده شده است و همانگونه که مشخص است، بلوکهای ۱ گل‌بینی و ۱ زو بیشترین فراوانی اکسید تیتانیم را دارا هستند. اخیراً در ترکیه استحصال تیتانیم از گل قرمز با  $TiO_2 = ۴/۸۱\%$  مورد بررسی قرار گرفته است (Sayan & Bayramoglu 2000). همچنین با استفاده از روش Donnan dialysis برخی از عناصر موجود در گل قرمز از قبیل  $Al(III)$ ,  $Fe(III)$ ,  $Ti(IV)$  و  $Na(I)$  (بخصوص  $Ti$ ) را می‌توان تغلیظ نمود (Cengeloglu *et al.*, 2003). گل قرمزی که در این روش مورد بررسی قرار گرفته است نیز محتوی  $4.9\% TiO_2$  می‌باشد. بنابراین با توجه به مقدار متوسط  $TiO_2$  در بوکسیتهای جاجرم ( $۵/۸۱\%$ ) و گل قرمز حاصل از آن ( $۷/۲\%$ ) (جدول ۳) به نظر می‌رسد که گل قرمز حاصل از کارخانه تولید آلومینا در جاجرم نیز دارای پتانسیل بالقوه ای جهت تولید  $TiO_2$  باشد.



شکل ۵- میانگین تمرکز اسکاندیم در بوکسیتهای قرمز جاجرم. G=منطقه گل‌بینی، Z=منطقه زو.



شکل ۶- میانگین تمرکز اکسید تیتانیم در بوکسیتهای قرمز جاجرم. G=منطقه گل‌بینی، Z=منطقه زو.

## بحث

نهشته‌های برجای مانده هوازده از جمله منابعی هستند که جهت بهره

کارخانه آلومینای جاجرم با مقادیر ppm ۲۵۸ و ۳۴۲ کاملاً قابل دسترس و امکان پذیر است.

در بخشهای قبلی مشخص شد که گل قرمز می‌تواند به عنوان یکی از منابع سرشار از اسکاندیم و عناصر خاکی کمیاب بحساب آید. یکی از روشهای پیشنهادی در زمینه فراوری Sc و عناصر خاکی کمیاب از گل قرمز روش

Reversed-phase high-performance liquid chromatography (Reversed-phase HPLC) است (Tsakanka et al, 2004). همانطور که اشاره شد مقدار متوسط عناصر REE, Y و Sc در گلهای قرمز معادل  $1000 \text{ g/ton}$  و همچنین مقدار Sc در گل قرمز خشک در حدود  $130 \text{ g/ton}$  است. نتایج حاصل از آنالیزهای گل قرمز جاجرم نشان می‌دهد که مجموع عناصر REE, Y و Sc در حدود  $683 \text{ ppm}$  و مقدار Sc نیز در حدود  $70 \text{ ppm}$  (مقدار  $70 \text{ ppm}$  مربوط به گل قرمز مرطوب است و چنانچه گل قرمز از آب تهی گردد، مقدار نسبی این عنصر نیز افزایش خواهد یافت) (جدول ۳) می‌باشد و از این لحاظ فراوانی آنها کمتر از مقادیر متوسطی است که در بالا به آن اشاره شد، اما از آنجا که اولاً بوکسیت مورد استفاده در کارخانه، ترکیبی از بوکسیت‌های جاجرم و سایر نقاط ایران است و بنابراین تمرکز آن در گل قرمز، متأثر از مقدار این عنصر در بوکسیت‌های سایر نقاط ایران نیز می‌باشد و ثانیاً از آنجاییکه افق بوکسیت جاجرم گسترش زیادی داشته و ترکیب آن در بلوکهای مختلف متفاوت است لذا مقدار عناصر REE, Y و Sc موجود در گل قرمز بستگی به ترکیب بوکسیت اولیه دارد لذا این مسأله به صرفه بودن فراوری این عنصر را کاملاً منتفی ننموده و مطالعات سیستماتیک بیشتری را پیشنهاد می‌نماید. بعلاوه با توجه به اینکه گل قرمز آنالیز شده، نماینده ترکیب میانگین گل قرمز حاصل از کلیه بوکسیت‌های بلوکهای مختلف نبوده و همچنین دقیقاً معلوم نیست که مربوط به کدام بلوک معدنی است، لذا ترکیب شیمیایی آن نمی‌تواند نماینده ترکیب کلی گل قرمز کارخانه باشد. همچنین آنالیزهای انجام شده بر روی بوکسیت‌های قرمز مربوط به بلوکهای مختلف نشان می‌دهد که مقدار Sc در بلوک چهار گل بینی نسبت به سایر بلوکها بالاتر بوده ( $122 \text{ ppm}$ ) و بوکسیت‌های قرمز بلوک ۲ و نیز بیشترین مقدار REE ( $556 \text{ ppm}$ ) را در خود جای داده است. بنابراین انتظار می‌رود که گل قرمز حاصل از نمونه‌های مربوط به این بلوکها نیز به ترتیب حاوی Sc و REE بالاتری باشند.

در جدول ۲ میزان تمرکز متوسط برخی عناصر در بوکسیت‌ها نشان داده شده است. علاوه بر مقایسه ترکیب بوکسیت جاجرم با سایر بوکسیت‌های شناخته شده جهان می‌توان ترکیب این کانسار را با ترکیب متوسط سنگهای پوسته ای و سایر سنگهای فراوان در سطح زمین از قبیل گرانیتها و دیابازها نیز مقایسه کرد. این مقایسه نشان می‌دهد

اشاره کرد اینست که در این روش بایستی این مسأله مورد توجه قرار گیرد که این عناصر تا چه حد توسط کانیه‌های رسی جذب سطحی شده اند. ولی در مجموع می‌توان گفت با توجه به کم هزینه بودن جدایش REE، احتمال آن وجود دارد که بتوان عناصر خاکی کمیاب را از رسهای بوکسیتی فراوری نمود.

در ارتباط با فراوری گالیم در فرایند بایر نیز نکته اساسی میزان فراوانی گالیم در بوکسیت و یا لیکور حاصل از کارخانه تولید آلومینا می‌باشد. آمارهایی که در این زمینه ارائه شده است تا حدودی متفاوت است بطوریکه طبق جدول ۲ مقدار متوسط گالیم در نهشته‌های مختلف بوکسیتی بین  $40-110 \text{ ppm}$  است و متوسط این مقدار در بوکسیت جاجرم حدود  $47 (0.0047\%) \text{ ppm}$  می‌باشد. همچنین موسکالیک ( $2003$ )، مقدار گالیم را در نهشته‌های بوکسیتی از  $0.003\%$  تا  $0.008\%$  در تغییر دانسته و بوکسیت Surinam را به عنوان نهشته‌ای با بیشترین مقدار گالیم ( $0.008\%$ ) معرفی نموده است. البته تا حدود  $500 \text{ ppm}$  (50%) گالیم نیز در نهشته‌های بوکسیتی گزارش شده است (Mineral Information Institute, 2003). در منطقه جامو (Jammu) در شمال هند مقدار متوسط گالیم در نمونه‌های بوکسیت که از اعماق ۲-۱ متری برداشت شده است در حدود  $0.015\%$  بوده و احتمالاً از نظر اقتصادی نیز قابل بهره برداری می‌باشد (Bhat 2002). با توجه به این مطالب، مشخص می‌شود که بوکسیت‌های جاجرم در مقایسه با سایر نهشته‌های بوکسیتی میزان مقدار بالایی از عنصر گالیم نیستند و اگر مقدار متوسط گالیم را در نهشته‌های بوکسیتی  $50 \text{ ppm}$  در نظر بگیریم (Jennifer, 1990)، می‌توان گفت که بوکسیت‌های جاجرم در اندازه میانگین جهانی گالیم دارند. از سوی دیگر استحصال گالیم از لیکور یکی از اصلی‌ترین منابع گالیم بحساب می‌آید بنابراین مقدار گالیم در لیکور نیز فاکتور مهمی در اقتصادی بودن فراوری این عنصر بحساب می‌آید. مقدار گالیمی که در لیکور حاصل از فرایند بایر وجود دارد بین  $100-300 \text{ ppm}$  در تغییر است که البته این میزان بستگی به مقدار گالیم موجود در بوکسیت دارد (Mihaylov & Distin, 1992). آنالیزهای انجام شده بر روی لیکور خروجی واحد ۱۳ و لیکور خروجی واحد انحلال کارخانه آلومینای جاجرم نشان می‌دهند که مقدار گالیم در این محصولات به ترتیب معادل  $258 \text{ ppm}$  و  $342$  می‌باشد (جدول ۲)، یعنی در لیکور حاصل از واحد انحلال، مقدار گالیم از حداکثری که در بالا به آن اشاره شد نیز بیشتر است. بنابراین اینطور به نظر می‌رسد که بر خلاف مقدار نسبتاً پایین گالیم در بوکسیت‌ها، تمرکز این عنصر در لیکور حاصل از فرایند بایر بالا باشد. از طرفی با توجه به استحصال گالیم در کارخانه ای در هند (Indian Aluminium, Muri, India) با مقدار گالیم حدود  $190 \text{ ppm}$  در لیکور (Puvvada, 1999)، استحصال و فراوری گالیم از لیکور حاصل از



امریکا نیز در حدود ppm۱۶۶۵ زیرکنیم دارد. بنابراین مقایسه مقدار زیرکنیم در نهشته های جاجرم با معادن فوق نشان می دهد که مقدار Zr در بوکسیت جاجرم در حدی نیست که قابلیت استحصال را داشته باشد. همچنین مقایسه مقدار زیرکنیم در بوکسیت جاجرم با سایر نهشته های بوکسیتی شناخت شده جهان (جدول ۲) نیز نشان می دهد که مقدار Zr در این کانسار بالاتر از مقدار میانگین این عنصر در سایر نهشته ها نمی باشد.

وانادیم نیز از جمله عناصری است که در نهشته جاجرم غنی شدگی نشان می دهد (جدول ۴) ولی مقایسه تمرکز آن در بوکسیت جاجرم با سایر نهشته های بوکسیتی (جدول ۲) نشان می دهد که بوکسیت های جاجرم غنی شدگی قابل توجهی از عنصر وانادیم نشان نمی دهند. بعلاوه تاکنون هیچ گزارشی از فراوری وانادیم از نهشته های بوکسیتی منتشر نشده و این عنصر عمدتاً از برجای مانده های نفتی ( Petroleum residues) و سنگهای مگنتیتی وانادیم دار و تا حدودی از کانیهای موجود در نهشته های اورانیم فراوری می گردد.

عناصر Nb و Ta نیز غنی شدگی نشان می دهند (جداول ۲ و ۴). از طرفی مهمترین کانی محتوی Nb, پیروکلر (اکسید ثبویم- تیتانیم- کلسیم) است، اگرچه کانیهای Columbite و Fersmit نیز بعنوان

دهد که بوکسیت جاجرم از عناصر Zr, V, As, Nb, Hf, U, Ta و Bi غنی شده است. جدول ۴ نیز میزان تمرکز این عناصر را در بخشها و لایه های مختلف بوکسیت جاجرم به همراه افقهای کائولینیت فوقانی و لایه رسی تحتانی نشان می دهد. همانطور که در این جدول مشخص است زیرکنیم از جمله عناصری است که نسبت به سه ترکیب فوق، در بوکسیت جاجرم غنی شده است. مهمترین منشاء عنصر زیرکنیم کانی زیرکن (ZrSiO<sub>4</sub>) است (SiO<sub>2</sub> - 33% , ZrO<sub>2</sub> - 67%) که یکی از مقاومترین کانیها در برابر تجزیه و هوازدگی می باشد. یک منشاء صنعتی دیگر جهت استخراج زیرکنیم کانی Eudalyte است که یک زیرکونوسیلیکات پیچیده) ( با فرمول شیمیایی Na<sub>12</sub>Ca<sub>6</sub>Fe<sub>3</sub>Zr<sub>3</sub>[Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>]<sub>2</sub>[Si<sub>9</sub>O<sub>24</sub>(OH)<sub>3</sub>]<sub>2</sub> است ( Golyshev et al. 1972). زیرکن علاوه بر زیرکنیم می تواند محتوی عناصر مهمی از قبیل Hf, REE, Nb و Ta نیز باشد. با توجه به همبستگی بسیار بالایی که بین عنصر Zr با Hf, Nb و Ta در رسهای بوکسیتی هر دو منطقه وجود دارد (همبستگی نزدیک به یک) (اثنی عشری ۱۳۸۵) می توان انتظار داشت که زیرکن یکی از کانیهای عمده حاوی Zr در رسهای بوکسیتی باشد که عناصر Hf و Ta را نیز در خود جای داده است. در منطقه Situk Beach در آلاسکا که عناصر Zr و Ti از یک پلاسر ساحلی در حال استخراج است، تمرکز Zr در برخی نمونه ها به ppm۲۵۳۴ و ppm۳۰۳۲ می رسد. پلاسر Black sand beach در

جدول ۴- مقایسه ترکیب برخی از عناصر با ترکیب متوسط پوسته، گرانیتها و دیابازها (Dana, 1999). داده ها بر حسب ppm می باشند.

elements	تمرکز در پوسته (۱)، گرانیتها (۲) و دیابازها (۳)		گل بینی							
			لایه رسی تحتانی	رس بوکسیتی	بوکسیت قرمز	کائولینیت بالایی	لایه رسی تحتانی	رس بوکسیتی	بوکسیت قرمز	کائولینیت بالایی
Zr	۱	۱۶۵								
	۲	۲۱۰	۴۷۲	۴۳۰	۶۹۴	۵۵۷	۵۱۳	۶۵۰	۶۹۸	۵۱۴
	۳	۱۰۵								
V	۱	۱۳۵								
	۲	۱۷	۴۲۰	۴۰۸	۵۶۲	۴۷۹	۴۸۱	۵۱۰	۵۰۲	۴۶۰
	۳	۲۶۴								
Nb	۱	۲۰								
	۲	۲۴	۲۴۴	۱۳۳	۲۴۸	۲۱۰	۱۵۶	۱۵۲	۲۲۹	۱۵۰
	۳	۹/۵								
Hf	۱	۳								
	۲	۵/۲	۲۳	۱۰	۲۰	۲۳	۲۱	۱۶	۱۷	۲۲
	۳	۲/۷								
U	۱	۱/۸								
	۲	۳/۴	۱۶	۱۹	۱۳	۱۴	۲۷	۲۷	۱۵	۲۵
	۳	۰/۵۸								
Ta	۱	۲								
	۲	۱/۵	۷/۱	۱۰/۲	۸/۰	۷/۴	۶/۹	۱۱/۵	۷/۶	۷/۲
	۳	۰/۵۰								
Bi	۱	۰/۲								
	۲	۰/۰۷	۵/۰	۱۵/۴	۶/۹	۷/۸	۴/۱	۷/۵	۷/۰	۴/۳
	۳	۰/۰۵								

توجهی از این عناصر توسط رسها جذب سطحی شده‌اند، بنابراین احتمالاً استحصال این عناصر از رسهای بوکسیتی دور از دسترس نیست؛

۲- علی‌رغم تمرکز نسبتاً پایین گالیم در بوکسیت جاجرم، این عنصر به میزان قابل توجهی در لیکور تولیدی کارخانه تولید آلومینای جاجرم متمرکز می‌شود. با توجه به اینکه لیکور تولیدی کارخانه‌های تولید آلومینا یکی از منابع اصلی گالیم محسوب می‌شود بنابراین چنین به نظر می‌رسد که بوکسیت جاجرم از این لحاظ دارای اهمیت بسزایی باشد؛

۳- بررسی تمرکز اسکاندیم و عناصر خاکی کمیاب موجود در گل قرمز نشان می‌دهد که میزان این عناصر در گل قرمز کمتر از مقداری است که از لحاظ اقتصادی قابل بهره برداری باشد؛

۴- با توجه به بالا بودن میزان  $TiO_2$  در گل قرمز تولیدی کارخانه آلومینای جاجرم، این امکان وجود دارد که بتوان این ترکیب را نیز از گل قرمز حاصله استحصال نمود؛

۵- مقایسه نمونه‌های بوکسیت آنالیز شده با ترکیبات متوسط گرانیتی، دیابازی و ترکیب متوسط پوسته‌ای نشان می‌دهد که اگرچه بوکسیت جاجرم از عناصر  $Zr, V, As, Nb, Hf, U, Ta$  غنی شده است ولی تمرکز این عناصر در منطقه جاجرم کمتر از حد آستانه اقتصادی است.

### سیاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی پردیس علوم دانشگاه تهران که با تصویب طرح نوع ششم بخشی از هزینه‌های این پژوهش و همچنین امکانات آزمایشگاهی، نرم‌افزاری و سخت‌افزاری لازم را فراهم نموده است سپاسگزاری می‌گردد. همچنین این پژوهش از حمایت و همکاری صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (طرح شماره ۸۴۱۲۴) و شرکت آلومینای ایران نیز برخوردار گردیده است که بدینوسیله از آنها قدردانی می‌شود.

منبعی برای نیویوم شناخته شده‌اند. حداکثر مقدار Nb در بوکسیت جاجرم، در بوکسیت‌های قرمز گل بینی گزارش شده است ( $248 \text{ ppm} = 0.025\%$ ) که مقدار آن از حد آستانه اقتصادی این عنصر (۰.۳٪  $Nb_2O_5$ ) پایین‌تر بوده و استحصال آن امیدبخش نیست. از سویی دیگر همبستگی بین Ta و Nb بخصوص در بخش رس بوکسیتی (اثنی عشری، ۱۳۸۵) نشان می‌دهد که این دو عنصر تا حدودی در ساختار کانیه‌های متشابهی از قبیل پیروکلر جای گرفته‌اند.

علیرغم اینکه عنصر هافنیم در کانسار جاجرم تا حدودی غنی‌شدگی نشان می‌دهد (جدول ۴)، ولی در مقایسه با سایر نهشته‌های بوکسیتی (جدول ۲)، غنی‌شدگی آن در بوکسیت جاجرم چشمگیر نیست. هافنیم نیز از کانی زیرکن بدست می‌آید و با توجه به همبستگی بالایی که با زیرکنیم دارد تصور می‌شود که این عنصر در بوکسیت‌های مورد مطالعه به همراه زیرکنیم در کانی زیرکن متمرکز شده است.

جدول ۴ نشان می‌دهد که در مقایسه با ترکیبات متوسط پوسته، گرانیتها و دیابازها، عنصر بیسموت در بوکسیت جاجرم غنی‌شدگی نشان می‌دهد. کانی اصلی محتوی بیسموت که قابلیت استخراج این عنصر از آن وجود دارد بیسموتینیت می‌باشد اما از آنجاییکه شرایط تشکیل این کانی در بوکسیت جاجرم فراهم نمی‌باشد و مطالعات XRD نیز دلالت بر عدم حضور بیسموتینیت در این منطقه دارند بنابراین مقدار این عنصر در جاجرم بسیار کمتر از حدی است که قابلیت استخراج داشته باشد.

### نتیجه‌گیری

مقایسه بوکسیت جاجرم با سایر نهشته‌های بوکسیتی که جهت استحصال عناصر مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد که: ۱- برخلاف بوکسیت‌های قرمز که در مقایسه با سایر نهشته‌های بوکسیتی به مقدار زیادی از REE غنی نشده‌اند، بخشهایی از رسهای بوکسیتی از این عناصر غنی بوده و با توجه به اینکه ظاهراً بخش قابل

### منابع

- اثنی عشری ا. ۱۳۸۵: بررسی ژئوشیمیایی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرش ویژه به ژئوشیمی عناصر کمیاب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده زمین‌شناسی، ۱۶۶ صفحه.
- اسماعیلی د.، اثنی عشری ا.، رحیم‌پوربناب ح.، امینی فضل ع. ۱۳۸۵: مطالعه ژئوشیمیایی عناصر خاکی کمیاب (REE) در کانسار بوکسیت جاجرم (شمال خاوری ایران)، فصلنامه علوم زمین، سال شانزدهم، ۶۲: ۱۳-۲.
- برآبادی ج. ۱۳۷۷: طراحی و تحلیل پایداری شیب در معدن بوکسیت جاجرم بلوک ۷ گل‌بینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۱۳ صفحه.

- جعفرزاده ر. ۱۳۷۹: بررسی کانی‌شناسی ژئوشیمی و وزنز کانسار بوکسیت جاجرم. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم. ۱۰۹ صفحه.
- خادمی س. ۱۳۸۴: پتروگرافی و وزنز کانسار بوکسیت جاجرم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده زمین‌شناسی، ۱۴۲ صفحه.
- خیری ف. ۱۳۶۶: بررسی تغییرات کانی‌شناسی بوکسیت و نحوه تشکیل آن در زون B بلوک گل بینی منطقه جاجرم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده علوم، ۱۱۲ صفحه.
- رحیم‌پوربناب ح.، اسماعیلی د. ۱۳۸۶: کانی‌شناسی، پتروگرافی و وزنز کانسار بوکسیت جاجرم، مجله علوم دانشگاه تهران، ۳۳: ۱۰۷-۱۲۳.
- سهیلی م.، سهندی م. ۱۳۷۸: گزارش پشت نقشه برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سنخواست تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ناصری م. ۱۳۸۲: بررسی ژئوشیمی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرشی بر قابلیت‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد صنعتی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، ۱۲۶ صفحه.
- Balashov Yu.A., Grin J.P. 1969: About the stock of mobile rare-earth elements in sedimentary rocks. *Geokhimiya*, 7: 807-816.
- Bardossy G. 1982: Karst Bauxites: Bauxite Deposits on Carbonate Rocks. Developments in Economic Geology. 14, Elsevier Amsterdam. 441p.
- Bardossy G., Aleva G.J.J. 1990: Lateritic Bauxite: Developments in Economic Geology. 27. Elsevier Amsterdam. 623p.
- Bernstein, L.R. 1986: Gallium and Germanium Exploration Opportunities; Geological Survey of Canada unpublished report.
- Bhat C.K. 2002: Estimation of gallium in a bauxite-ore deposit using an energy-dispersive X-ray fluorescence technique. *Radiation Physics and Chemistry*. 65: 193-197.
- Borisenko L., Komissarova L., Shatskii, V. 1970: Scandiums A rare metallic element. *Min. Mag.* 123: p. 499.
- Bronevoi V.A., A.V. Zhilberminc. V.A. Teeniakov. 1985: Average chemical composition of bauxites and their evolution in time (in Russian). *Geokhimiya, Moscow*. 4: 435-446.
- Brown S.O., Kirkpatrick. 1999: "Red Mud Product Development," in *Light Metals* (Mineral, Metals and Materials Society, Warrendale, 1999) p. 25.
- Cengeloglu Y., Kir E., Ersoz M., Buyukerkek, T., Gezgin, S. 2003: Recovery and concentration of metals from red mud by Donnan dialysis. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 223: 95-101.
- Christie T., Brathwaite B. 2002: Mineral Commodity Report 19-beryllium, gallium, lithium, uranium and zirconium, Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd. 32 p.
- Goldschmidt V.M. 1937: The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J.chem. Soc.* 139: 655-675.
- Golyshev V.M., Simonov V.I., Belov, N.V. 1972: *Cristallographia*, 1119.
- Henderson, P. 1984. Rare earth element geochemistry. Elsevier Amsterdam. 2: 510p.
- Jennifer, P. 1990: "High-tech" metals in British Columbia. British Columbia. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources.
- Kanazawa Y., Kamitani M. 2005: Rare earth minerals and resources in the world. Journal of Alloys and Compounds. Not published data.
- Maksimović Z. 1980: The origin of yttrium and lanthanides in karstic bauxites of the Grebnik Mountain, Yugoslavia. *Bull. Acad. Serb. Sci. Arts*. 20: 1-6.
- Mason B., Moore C.B., 1982: Principles of geochemistry, forth edition. John Wiley & sons, New York, 344 pp
- Mihaylov P.A., Distin., 1992: Gallium solvent extraction in hydrometallurgy: an overview, *Hydrometallurgy*. 28: 13-27. Mineral Information Institute., 2003. Gallium, 2 p.
- Moskalyk R.R. 2003: Gallium: the backbone of the electronics industry. *Minerals Engineering*. 16: 921-929.
- Ochsenkühn-Petropoulou, M., Lyberopulu, Th., Parissakis, G. 1994: Direct determination of lanthanides yttrium and scandium in bauxites and red mud from alumina production. *Anal. Chim. Acta*. 296: 305.
- Ochsenkühn-Petropulu M., Lyberopulu Th., Parissakis, G. 1995: Selective separation and determination of scandium from yttrium and lanthanides in red mud by a combined ion exchange/solvent extraction method. *Anal Chim Acta* 315: 231.
- Ochsenkühn-Petropoulou M., Mendrinou L., Tsakanika L., 2001: Separation of scandium from red mud by a selective ionexchange process. *Proceedings of the 2nd International Conference on Instrumental Methods of Analysis (IMA 2001)*, Ioannina, Sept 5-8, 2001; pp 16 and 85.
- Parekh B.K., Goldberger W.M. 1978: Utilization of Bayer Process Muds: Problems and Possibilities. *Proceedings of the Sixth Mineral Waste Utilization Symposium*, Chicago, IL, ed. Eugene Aleshin, 2-3 May, pp. 123-132.
- Petkof B. 1985: Gallium; in Mineral Facts and Problems, 1985 Edition, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin 675: 291- 296.
- Puvvada G.V.K. 1999: Liquid-liquid extraction of gallium from Bayer process liquor using Kelex 100 in the presence of surfactants. *Hydrometallurgy*, 52: 9-19.
- Roadset E., Rosenqvist I.Th. 1971: Adsorbed rare earth elements as a clue to the origin of some glacial clays. *Bull. Group Franc. Argiles*, 23: 191-194.
- Sayan E., Bayramogl M. 2000: Statistical modeling of sulfuric acid leaching of TiO<sub>2</sub> from red mud. *Hydrometallurgy*. 57:181-186.

- Shamsuddin, M. 1986: Metal Recovery form Scrap and Waste. *Journal of Metals*. 29-30.
- Tekverk, R.W., Fay J.E. 1986: Gallium: An Overview, Markets, Supplies and Occurrence; in *Geo- Expo/86*, Exploration in the North American Cordillera, *Geological Association of Canada*, Cordilleran Section and *The Association of Exploration Geochemists*. 209-212.
- Tsakanika L.V., Ochsenkuhn-Petropoulou M.T., Mendrinou, L.N., 2004: Investigation of the separation of scandium and rare earth elements from red mud by use of reversed-phase HPLC. *Anal Bioanal Chem*. **379**: 796–802.
- Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, 2002: Gallium and Gallium Compounds, sixth ed. *John Wiley & Sons*, Rexdale, Ontario (9 Chapters).
- Vijayan S., Melnyk A., Singh R., Nutall K. 1989: Rare earths: Their mining, processing, and growing industrial usage. *Miner. Eng.* **41**: p.13.
- Yalcin Z., Sevinc V. 2000. utilization of ceramic waste in ceramic glazes. *Ceramics International*. **26**: 485-493.

Archive of SID