ویژگیهای زمین شناسی و اکتشافی بوکسیت جاجرم
(جنوب باختری خراسان شمالی– شمال باختری خراسان بزرگ)

نوشته: دکتر حبیب ملائی* و رضا شریفیان عطار*

Geological and Explorational Characteristics of Jajarm Bauxite Deposit in the South West of Northern Khurasan- Northwest of Greate Khurasan

By: Dr. H. Mollai* & R. Sharifyan Attar*

چکیده

کانسار بوکسیتی جاجرم که بزرگ‌ترین کانسار بوکسیت شناخته شده در ایران می‌باشد، در زون ساختاری رشته کوه البرز واقع شده است. در این منطقه، دو افق بوکسیتی به نامهایB و A تشکیل شده است. سنگ بستر افق A را کربناتهای سازند مبارک و سنگ پوشش آن را سازند نسن تشکیل می‌دهد. افق بوکسیتی B که کانسار جاجرم را تشکیل می‌دهد، بر روی دولومیتهای سازند الیکا قرار گرفته و توسط سازند شمشک پوشیده شده است. همبری مشخص بوکسیت با این دو سازند بر یک منبع مستقل تأمین کننده بوکسیت دلالت دارد. وجود ریخت شناسی ناهماهنگ همراه با ساختارهای زمین ساختی، از ویژگیهای مهم کانسار جاجرم است. گسلهای تشکیل شده در دو جهت خاوری- باختری و شمالی- جنوبی، ماده معدنی به طول ۱۶ کیلومتر را به چهار زون زمین ساختی تقسیم کرده است . بررسیهای انجام شده نشان می‌دهد که حرکات زمین ساختی تأثیر بسزایی بر کیفیت و کانی شناسی بوکسیت داشته‌اند، به گونه‌ای که کارستهای ایجاد شده بیشتر در امتداد صفحه گسل بوده و بین کیفیت بوکسیت با ستبرای آن (ژرفای کارستی) ارتباط مستقیمی وجود دارد. تشکیل بوکسیت بسیار سخت و فراورده دیاسپوری به جای بوهمیت و گیبسیت و تکرار لایه‌های بوکسیت از نتایج این فرایندهای زمین ساختی است. لذا این بوکسیت سخت دیاسپوری تاثیر قابل توجهی بر فرایند تولید آلومینا خواهد داشت. وجود نیمرخهای ثابت در لایه‌های بوکسیت (کائولین- بوکسیت سخت- بوکسیت شیلی-کائولن) در کلیه کارستها و حفاریها مشاهده می‌شود. البته ماهیت کائولن بالایی و پایینی با یکدیگر تفاوت دارد. تغییرات شدید ترکیب شیمیایی بوکسیت (اکسید آلومینیم بین ۳۰ تا ۶۰ درصد و اکسید سیلیسیم بین ۵ تا ۳۹ درصد) از ویژگیهای خاص بوکسیت جاجرم است. در نهایت، مطالعات فوق وجود یک بوکسیت دیاسپوری با بیش از ۲۲ میلیون تن ذخیره تا ژرفای ۲۵۰متر در امتداد لایه ماده معدنی و کیفیت بین ۴۷ تا ۴۸ درصد Al_2O_3 و حدود ۱۰ درصد SiO_2 را به طور میانگین تأیید می‌کند.

کلید واژه‌ها: بوکسیت ، بوکسیت جاجرم ، ویژگی اکتشافی، ویژگی زمین شناسی ، دیاسپور

Abstract

The Jajarm bauxite deposit is so far the biggest known bauxite deposit in Iran. This deposit is located in structural zone of Alburz. In this area two bauxite horizons, called A and B, with two stratigraphic gaps can be found. The A horizon is underlained by carbonate rocks of Mobarak Formation and covered by Nesen Formation. The B horizon that constitutes the Jajarm bauxite deposit overlies the dolomite of Elika Formation of the Upper Triassic age and covered by the Shemshak Formation. Sharp contact between bauxite deposit and overlaying as well as underlying units indicate an independent source for bauxite deposit. One of the most important characteristics of Jajarm bauxite deposit is its asymmetrical morphology along the tectonic structure of the area. The geologic setting is striking16 kilometers in E-W direction. In addition to major tectonic elements parallel to the strike, there are a number of minor north-south faults in the area that have tectonically divided the mine area into four regions. Based on these studies the tectonic activities have important role in mineralogy and improving the quality of bauxite deposit. Most of the karsts and sinkholes are along the fault planes and show a positive relationship with thickness and bauxite quality. Hard bauxite and diaspore formation instead of bohemite and gibbsite as well as the repetition of different bauxite layers are the result of these tectonic activities. Therefore, the hard diasporic bauxite has played very important role in the process of alumina production. Constant profiles of: Kaolinite clay-Hard bauxite- Clayey soft bauxite and Kaolinitic clay, from top to bottom can be seen in different karst and drill holes, respectively. But the nature of upper top

kaolinite is different from the bottom one. Mineralogy and variation in chemical composition (Al2O3=30% to 60% and SiO_2 between 5% to 39%) are other special characteristics of Jajarm bauxite deposit.
Based on the exploration activities 22 million tones of diasporic bauxite, up to 250 meters of depth along the layer of ore deposit and Al2O3 content range between 47% to 48% with about 10% of SiO_2 , have been proved.

Key words: Bauxite, Jajarm, Jajarm bauxite, Exploration characteristic, Geological characteristic, Diaspore.

مقدمه

کارخانه ایرالکو اراک به عنوان اولین تولید کننده آلومینیم ایران، در سال ۱۹۷۲ با ورود سالانه ۴۵ هزار تن پودر آلومینا از خارج، کار خود را آغاز کرد . در حال حاضر تولید سالانه کارخانه ایرالکو ۱۲۰۰۰۰ تن و نیاز واقعی آن ۲۴۰۰۰۰ تن پودر آلومینا است. در راستای قطع وابستگی و استقلال ملی، حذف هزینه ارزی خرید پودر آلومینا و تأمین نیاز سالانه از منابع داخلی برای کارخانه ایرالکو در اراک، در اولویت برنامه‌های توسعه اقتصادی دولت قرار داشته است. لذا اندیشه تولید آلومینا از منابع داخلی مطرح و از سال ۱۹۸۲ با حمایت سازمان ملل، مراحل اجرایی آن آغاز و با جدیت بیشتر پیگیری شد. مسائل ارزی، خودکفایی، امنیت در توسعه صنعتی و وجود منابع مختلف کشور همراه با نیروی کارشناسی بالقوه و بالفعل، منجر به بررسی امکان تولید آلومینا از بوکسیت، آلونیت و دیگر مواد آلومینوسیلیکاتی مانند نفلین سینیت شد. این مطالعات اولیه نشان داد که احداث یک واحد تولید آلومینا با ظرفیت ۱۵۰ هزار تن در سال، با توجه به وجود معادن مختلف بوکسیت، بویژه بوکسیت جاجرم و فناوری مناسب مانند روش بایر، از بوکسیت جاجرم امکان پذیر است زیرا تجزیه بیش از هزار نمونه آزمایشگاهی و نمونه‌های آزمون فناوری، میانگین کیفیت بوکسیت بین ۴۷ تا ۴۸ در صد Al_2O_3 و ۱۰/۵ درصد SiO_2 را تأیید می‌کند. مطالعات بعدی در امتداد خاوری منطقه کانسار نشان داده که هنوز منابع قابل اکتشاف و بررسی در این منطقه وجود دارد. اصلی‌ترین هیدروکسیدهای آلومینیم که به صورتهای مختلف در سنگ بوکسیت وجود دارد عبارتند از گیبسیت($Al(OH)_3$) و چند ریختی بوهمیت و دیاسپور با فرمول AlO(OH) . از نظر تئوری، گیبسیت دارای ۶۳/۴ درصد اکسید آلومینیم و۳۶ درصد آب می‌باشد، درصورتی که بوکسیتهای منوهیدرات دارای ۸۵ درصد اکسید آلومینیم و ۱۵ درصد آب هستند (Sinha, 1986). ذخیرهٔ برآورد شده بوکسیت در دنیا ۵۵ تا ۷۷ میلیارد تن است که از این مقدار ۳۳ درصد در آمریکای جنوبی، ۲۲ درصد در آفریقا، ۱۷ درصد در آسیا، ۱۳ درصد در اقیانوسیه و ۱۰ درصد دیگر در سایر نقاط دنیا کشف شده است. برای تولید یک تن آلومینا، نیاز به دو تا سه تن بوکسیت و برای تولید یک تن فلز آلومینیم، نیاز به دو تن آلومینا است (Alumina production, 2000; Neil ,1998; Petterson, 1984).

هدف و روش کار

هدف از این مقاله بررسی زمین شناسی و ساختاری محدوده کانسار و ارتباط بین ماده معدنی با سنگ بستر و پوشش، نقش ریخت شناسی و زمین ساخت در اکتشاف و استخراج، کانی شناسی، مطالعه تغییرات ماده معدنی در ژرفا و طول، مطالعه ارتباط بین کیفیت بوکسیت با ستبرا و در نهایت تعیین نوع بوکسیت جاجرم بر اساس نتایج تجزیه موجود می‌باشد. روش کار را در سه بخش می‌توان خلاصه کرد :

مرحله اول : کارهای زمین شناسی صحرایی

مرحله دوم : مطالعات اکتشافی (اکتشافات سطحی و عمقی)

مرحله سوم : مطالعات آزمایشگاهی

کارهای آزمایشگاهی در چهار مرکز تحقیقاتی بوکسیت انجام شده است. ۱) مرکز تحقیقات آلوترو– اف ک – مجارستان که در این مقاله از داده‌های آن مرکز استفاده نشده است، ۲) مرکز آزمایشگاهی جاجرم، ۳) مرکز تحقیقات کرج وابسته به وزارت صنایع و معادن، ۴) مرکزتحقیقات آلومینای جواهر لعل نهرو در ناگپور هند برای مطالعه فازهای کانی شناسی و تهیه استاندارد.

موقعیت جغرافیایی کانسار بوکسیت

کانسار بوکسیت جاجرم در ۱۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان جاجرم (شمال باختری خراسان) و در ۱۷۵ کیلومتری جنوب باختری بجنورد قرار دارد که در ۶۰۰ کیلومتری شمال خاوری تهران و در فاصله ۴۰۰ کیلومتری شمال باختری مشهد قرار دارد. کانسار بوکسیت جاجرم در کوه زو و در دامنه سلسله جبال البرز واقع گردیده است. کوه زو با شیب زیاد و ارتفاع ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر از دشت جاجرم و ۱۸۰۰ متر نسبت به سطح دریا قرار دارد . منطقه دارای آب و هوای خشک وکویری با بارندگی کم در حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال و بادهای موسمی شدید است. جمعیت این بخش نزدیک به ۱۲ هزار نفر است و با جاده‌های آسفالته با شهرهای بجنورد، شاهرود و سبزوار و از طریق یک جاده آسفالته به طول ۳۰ کیلومتر که توسط طرح تولید آلومینا بازسازی و آسفالت شده است، به ایستگاه راه آهن جاجرم ارتباط دارد .

تاریخچه مطالعاتی

زون ساختاری البرز در شمال ایران و بویژه سازند شمشک، به دلیل اهمیت اقتصادی آن همیشه مورد توجه بوده و توسط افراد مختلف، با اهداف گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است که نام بیشتر آنها در رساله دکترای افشار حرب(۱۹۷۹) آورده شده است. اولین گزارش از منطقه توسط واله با بررسی عکسهای هوایی و به عنوان یک نقطه سیاه ارائه شد و در همان سال توسط صمیمی نمین و ملاک پور ۱۰۰ نمونه جمع آوری شده از صحرا، مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که Al_2O_3 بین ۴۱/۳۰ تا ۶۹/۲ درصد و SiO_2 بین ۴ تا ۱۹/۳ درصد در تغییر است. مطالعات بعدی توسط Balky et al.(1972) نشان داد که دامنه تغییرات بوکسیت جاجرم به مراتب بیشتر از این ارقام است. چینه شناسی و زمین ساخت منطقه توسط افشار حرب(۱۹۷۹) مطالعه و ستون چینه شناختی آن رسم گردید . جمشید پور(۱۹۸۷) مطالعه البرز را با نگاهی ویژه به سازند شمشک انجام داده است. خیری (۱۹۸۸) در رساله کارشناسی ارشد خود کانی شناسی بوکسیت را مورد مطالعه قرار داد و از سال ۱۹۸۳ مطالعات سیستماتیک اکتشافی توسط وزارت معادن و فلزات آغاز شده و در حال حاضر مراحل پایانی اکتشافی خود را برای تأمین خوراک یک کارخانه ۲۸۰ هزار تنی تولید آلومینا واقع در مجاورت معدن طی می‌کند. ملائی و همکاران (۱۹۹۳) مقاله‌ای درمورد ژئوشیمی بوکسیت جاجرم ارائه دادند. ملائی (۱۳۷۳) مقاله‌ای در مورد مطالعات اکتشافی و فناوری بوکسیت در چهارمین سمپوزیوم معدنکاری ایران ارائه داده‌اند. ملائی (۱۹۹۴) مقاله‌ای با عنوان زمین شناسی و کانه آرایی ارائه نموده و در آن علت عدم کانه آرایی جاجرم توضیح داده شده است. بزرگ ابراهیمی(۱۹۹۴) در رساله کارشناسی ارشد خود روشهای استخراج بوکسیت جاجرم را مورد مطالعه قرار داد. ملائی و ترشیزیان (۲۰۰۲) در دو مقاله جداگانه به اهمیت ژوراسیک و اهمیت اقتصادی سازند شمشک در ژوراسیک با نگاه ویژه به معادن زغال سنگ و بوکسیت پرداخته‌اند. جعفر زاده(۱۳۷۹) و ناصری(۱۳۸۲) در رساله‌های کارشناسی ارشد خود ژئوشیمی و ژنز بوکسیت را مورد مطالعه قرار داده و برای اولین بار به عناصر کمیاب در بوکسیت جاجرم پرداخته‌اند. به اعتقاد ایشان منشأ بوکسیت جاجرم، سنگهای آتشفشانی زیر سازند شمشک است. قصرانی (۱۳۷۳) در رساله کارشناسی ارشد خود مطالعاتی درباره اکتشاف بوکسیت کال جعفرآباد که بی ارتباط با بوکسیت جاجرم نیست انجام داد. داودی و همکاران(۲۰۰۲) درمقاله‌ای به ویژگیهای بوکسیت البرز و فلات مرکزی ایران برای فرایند انحلال لوله‌ای پرداخته و به عنوان نمونه بوکسیت مناطق شاهبولاقی، ماندون و صدرآباد را بررسی کرده‌اند. این بوکسیتها از نظر کانی شناسی مانند کانسار جاجرم و ذخیره آنها حدوداً ۴/۸۵۵ میلیون تن گزارش کرده‌اند. در این مقاله، ذخیره بوکسیت ایران بین ۸۰ تا ۱۰۰ میلیون تن برآورد شده است در صورتی که ذخیره بزرگترین کانسار بوکسیت ایران ۲۲ میلیون تن است.

زمین‌شناسی منطقه

کانسار بوکسیتی جاجرم در کوه زو که بخشی از زون ساختاری البرز خاوری در شمال ایران است، رخنمون دارد. در چاپ اول نقشه زمین ساخت اروپا (۱۹۶۲)، البرز به شکل یک ائوژئوسنکلینال از چین خوردگی آلپی نشان داده شده که جزئی از کمربند چین خوردگی آلپ به شمار آمده و ادامه قفقاز کوچک و ترکیه شمال خاوری است (نبوی، ۱۳۵۵؛ افتخارنژاد، ۱۳۵۹؛ درویش زاده،۱۳۷۰؛ حداد کاوه و حسن علیزاده، ۱۳۶۸). بر اساس مطالعات افشار حرب (۱۹۷۹) و واحد اکتشاف طرح تولید آلومینا (گزارش اکتشافی ۱۳۶۹-۱۳۷۱) قدیمی‌ترین رسوبات بیرون زده ساختار منطقه متعلق به سازند پادها با سن دونین زیرین است که بر روی این سازند به ترتیب سازندهای خوش ییلاق (دونین میانی و بالایی) و سپس سازند مبارک (کربنیفر) قرار دارد. بر روی این سازند، یک افق بوکسیتی به نام بوکسیت افقA قرار دارد. به نظر افشارحرب(۱۹۷۹)، جعفر زاده (۱۳۷۹)، ناصری (۱۳۸۲) و واحد اکتشافی بوکسیت جاجرم(۱۳۶۹-۱۳۷۱) سنگ پوش این بوکسیت را سازند سرخ شیل (تریاس زیرین) تشکیل می‌دهد ولی در مطالعات انجام شده توسط آقایان علوی نائینی (۱۳۷۲)، درویش زاده (۱۳۷۰)، پرتوآذر (۱۳۷٤)، مذاکرات شفاهی با فرخ قائمی و آریائی، سنگ پوش این افق بوکسیتی را سازند نسن تشکیل می‌دهد. مرز رسوبات سازند نسن با رسوبات تریاس (سازند الیکا) تدریجی است. بین این سازند و سازند الیکا در برش آمل وخاشاچال، قشرنازکی از لاتریت و بوکسیت وجود دارد که تجزیه شیمیایی عناصر لاتریتی، ۳۹ درصد اکسید آلومینیوم، ٤۲ درصد اکسید سیلیسیم و۳ درصد اکسید آهن را گزارش شده است. این لایه لاتریتی نشانگر سطح فرسایش است. این ویژگی بیانگر این است که لایه‌های سنگ آهک سازند الیکا با ناپیوستگی همشیب سازند نسن را می‌پوشاند(پرتو آذر،۱۳۷٤). سازند دولومیتی الیکا (تریاس زیرین- میانی) سنگ بستر ماده معدنی بوکسیت جاجرم یا افق بوکسیتی B را تشکیل می‌دهد (شکل ۱). سنگ بستر در بیشتر نقاط در تماس با ماده معدنی، در سطح به رنگ صورتی یا سرخ روشن درآمده است. این تغییر رنگ نتیجه نفوذ تدریجی محلولهای آهن دار از ماده معدنی به درون درز و شکافهای موجود در دولومیتهای سنگ بستر است. سازند شمشک (ژوراسیک) سنگ پوش یا کمر بالیا کانسار را تشکیل می‌دهد (جدول ۱). شکل ۲ مقطع شماتیک سازند شمشک را نشان می‌دهد. دوره ژوراسیک در این منطقه دربرگیرنده سه سازند مهم شمشک (ژوراسیک زیرین) دلیچای (ژوراسیک

میانی) و سازند لار(ژوراسیک بالایی) است. دشتهای اطراف با رسوبات جوان اواخر دوران سوم پوشیده شده است. لذا تشکیل بوکسیت از نظر زمین‌شناسی و آب هوایی مربوط به شرایطی است که در محدوده زمانی بین توقف رسوبگذاری در سازند الیکا و شروع رسوبگذاری سازند شمشک قرار گرفته است. این افق بوکسیتی بر اثر فرسایش و انتقال بخشی از سازند شمشک از منطقه، پدیدار شده است . هرچند در بعضی نمونه‌های دستی، آثار همبری تدریجی با سنگهای سازند شمشک مشاهده می‌گردد ولی بوکسیت همیشه دارای یک همبری واضح با کمر پایین (دولومیت) و همچنین کمر بالا (شمشک) در روی زمین می باشد. این مرز مشخص دلیل بر توقف رسوبگذاری قبل و بعد از تشکیل بوکسیت است زیرا در غیر این صورت، باید ارتباط ماده معدنی با سنگ بستر و یا پوشش به صورت تدریجی باشد.

از نظر زمین شناسی ساختاری، منطقه مورد مطالعه شامل تعدادی تاقدیس و ناودیس با امتداد تقریبی خاوری تا شـــمال خاور- جنوب باختر است (خاک خوب، ۱۳۷۲). منطقه، تحت تأثیر رخدادهای زمین ساختی شدیدی قرارگرفته و این امر موجب تشکیل چین خوردگی در سازند شمشک و گسلهایی در سنگهای کربناتی شده است. گسلها در دو جهت تقریباً خاوری- باختری و شمالی- جنوبی رخ داده‌اند (شکل ۳). این امر موجب شده تا بتوان معدن بوکسیت جاجرم را با در نظرگرفتن خصوصیات ریخت شناسی و ساختار زمین ساختی از خاور به باختر به چهار بخش اصلی تقسیم‌بندی کرد:

۱- سنگ تراش در بخش انتهایی خاوری معدن
۲- تاگویی در بخش باختری بعد از سنگتراش
۳- بلوک زو در بخش مرکزی معدن
٤- بخش انتهایی باختری موسوم به بلوک گلبینی .

توصیف ماده معدنی

ریخت شناسی منطقه به دلیل پدیده های زمین ساختی، ناهماهنگی بسیار زیادی پیدا کرده است به طوری که در انتهای باختری کانسار از یک شیب ملایم حدود ۳۰ درجه شروع و به طرف خاور، بر ارتفاع و ستیغ و نیز شیب اضافه شده به طوری که تا حدود ۸۰ درجه شمالی می‌رسد. در این منطقه ارتفاع ستیغ کوه زو از دشت جاجرم به ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر می‌رسد. در این منطقه، دو افق بوکسیتی به نامهای A و B مربوط به دو دوره مختلف زمین شناسی رخنمون دارند و هر دو افق با روند خاوری ـ باختری به طول تقریبی ١٦ کیلومتر، بر روی یال شمالی کوه زو قرار گرفته‌اند.کوه زو به شکل یک تاقدیس با دو پلانج خاوری ـ باختری توسط یک راندگی در این امتداد به صورت چین تک شیب پدیدار شده که نواحی ستیغ و یال جنوبی آن فرسایش یافته است.

افق بوکسیتیA در مرز بین سازند مبارک و نسن اما افق B بر روی دولومیتهای سازند الیکا قرار دارد و توسط شیل و ماسه سنگهای سازند شمشک پوشیده شده است. این افق دربخش باختری معدن در نتیجه یک گسل رورانده در دولومیت الیکا تکرار شده است. در افق بوکسیتی A دو نوع ماده معدنی با تغییرات زیاد دیده می‌شود، نوع اول شامل کائولن، هماتیت و بخشهای پیزولیتی به رنگهای سرخ ارغوانی و سرخ تیره و نوع دوم دارای بوکسیت خیلی سخت و دیاسپوری به رنگ سرخ تیره و سرخ مایل به قهوه‌ای به صورت پاکتهای پراکنده با ستبرایی متغیر می‌باشد. تجزیه چندین نمونه نشان داد که درصد Al_2O_3 کمتر از ۴۰ درصد و SiO_2 بیشتر از ۲۰ درصد است، در صورتی که مدول مورد قبول برای کارخانه حداقل ۴ می‌باشد (جدول ۲ تجزیه چند نمونه از این بوکسیت را نشان می‌دهد). با توجه به مطالعات صحرایی و نتایج اولیه حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و پارامترهای حاکم بر اکتشاف و استخراج، مشخص شد که افق بوکسیتی A از کیفیتی قابل قبول برای تولید آلومینا برخوردار نیست و به همین دلیل به آن بوکسیت غیر صنعتی گفته می‌شود، لذا مطالعات زیادی روی آن صورت نگرفت. (جدول ۱ تجزیه چند نمونه از این بوکسیت را نشان می‌دهد). در صورتی که کیفیت بوکسیت افق B به مراتب بهتر از افق A است و به همین خاطر بیشترین کارهای اکتشافی و استخراجی بر روی این افق، بویژه در محدوده گلبینی و زو، انجام می‌شود که مجموعاً ۸/۲۵ کیلومتر از ۱۶ کیلومتر را در بر می‌گیرد. گسترش بوکسیت در سطح زمین به صورت لایه‌ای به نظر می‌رسد در صورتی که مطالعات زیرزمینی و استخراج بلوک ۲ نشان داده که بوکسیت در بعضی از نقاط به شکل لایه‌ای غیر پیوسته، عدسی و عمدتاً به صورت کارستهای ژرف با ستبرای تا ۴۰ متر بر روی سنگ بستر(دولومیتهای الیکا کمر پایین) قرار دارد. شکل ۴ تصاویر رخنمونهای بوکسیت را نشان می‌دهد. بوکسیت به دلیل هوازدگی سازند شمشک (کمر بالا) و انتقال مواد از محیط، رخنمـــــون پیدا کرده است. این ساختـــار تقریباً شبیه به ساختـــــار بوکسیت دوگنا کوزو و مورتاس (Dougna Kuzu & Mortas) ترکیه می‌باشد که سنگ بستر آن غیر همسطح و موجی شکل بوده و بوکسیت با ستبرای بین ۱ تا ۴۰ متر فرمهای بزرگ و گودالهای کارستی را پر کرده‌اند (Hoseyin Öztork et al., 2002).

کانی‌شناسی ماده معدنی

در کانسار جاجرم دو نوع بوکسیت با دو کیفیت متفاوت وجود دارد، یکی بوکسیت نرم وشیلی که گاهی اثر لایه بندی در آنها دیده می‌شود. این بوکسیت دارای لمس صابونی و نرم شبیه کائولن بوده به طوری که مدتی بعد از استخراج که در معرض هوای آزاد قرار می‌گیرد، از هم پاشیده شده و در دست به پودر تبدیل می‌شود. رنگ این بوکسیتها غالبا سرخ روشن تا

سرخ جگری است. از نظر کانی شناسی عمدتا از کائولن وهماتیت همراه با مقدار ناچیز دیاسپور و تیتانیم تشکیل شده‌اند. این نوع بوکسیت به عنوان بوکسیت شیلی، باطله و غیرصنعتی توصیف می‌شود. نوع دیگر بوکسیت، بوکسیت سخت دیاسپوری است. این بوکسیت دارای لمس زبر و سختی بین ۵ تا ۶ داردکه گاه به ۷ نیز می‌رسد وبه عنوان بوکسیت صنعتی نامگذاری شده است. رنگ کانیها علاوه بر شرایط تشکیل، عمدتاً به ترکیب کانی شناسی مانند کانیهای آلومینیم، آهن و سیلیس و بویژه مقدار آهن موجود در آن بستگی دارد. طی چهار سال فعالیت در معدن بوکسیت جاجرم به کمک واحد اکتشاف، افزون بر دوازده رنگ بوکسیت با کیفیتهای متفاوت از هم تفکیک شده است. به گونه‌ای که رنگ بوکسیت از سفید مایل به خاکستری، خاکستری روشن تا تیره، قهوه‌ای روشن و قهوه‌ای جگری در تغییر است. زمینه‌های مختلف رنگهای سرخ، به دلیل اکسایش سوپرژن هماتیت موجود در سنگ است. بر اساس مطالعات کانی شناسی انجام شده در چهار مرکز مختلف تحقیقاتی بوکسیت، بوکسیت جاجرم یک بوکسیت دیاسپوری همراه شاموزیت است که کانیهای آهن، تیتانیم و سیلیسیم به عنوان کانیهای اصلی، آن را همراهی می کنند.

مهم‌ترین عوامل کنترل کننده فرایند تشکیل بوکسیت عبارتند از : شرایط آب وهوایی، پوشش گیاهی، ریخت شناسی، زهکشی محیط، PH و Eh . به طور کلی پس از هوازدگی کامل فیزیکی و شیمیایی کانیهای آلومینوسیلیکاتی سنگهای آذرین ویا انحلال سنگهای کربناتی، سیلیکاتهای آلومینیم هیدرولیز گردیده و اسید سیلیسیک کلوییدی و هیدروکسید آلومیتیم تشکیل می‌شود. بعضی از کانیهای سیلیکاتی به صورت محلول در می‌آیند و در سطح هر بلور، ظرفیتهای سیر نشده‌ای وجود دارد که می‌تواند به عنوان کانون واکنش با مولکولهای آب عمل کند. در طی این عمل (هیدراسیون وهیدرولیز) بازهای قوی مانند پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم از محیط خارج شده و بخشی از آنیونهای اکسیژن موجود در شبکه‌های بلور، احتمالا به وسیله یونهای هیدروکسید جایگزین می‌شوند. آلومینیم برای تشکیل همارایی شش ترجیحی خود، شش یون OH را به دور خود خواهد کشاند، در حالی که سیلیسیم با همارایی چهار باقی خواهد ماند. یونهای فلزهای قلیایی باثبات‌ترین یونها بوده و به دنبال آنها یونهای قلیایی خاکی قرار می‌گیرند و بخش عمده این عناصر به صورت محلول حمل می‌شوند. از سوی دیگر، آلومینیم تا سیلیسیم و آهن، معمولا خیلی زود به صورت نامحلول مجدداً رسوب می‌کنند. pH محیط در انتقال اکسید آلومینیم و اکسید سیلیسم به صورت محلول وهمچنین در رسوبگذاری دوباره آنها نقش اساسی دارد.

$$CaCO_3 + H_2O \longleftrightarrow Ca^{+2} + HCO3^{-} + OH^{-}$$
$$CaAl_2Si_2O_8 + 6H_2O \longrightarrow 2Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Ca^{+2} + 4OH^{-}$$

شرایط اسیدی زمانی رخ می‌دهد که اسیدهای آلی با اسیدهای معدنی وجود داشته باشند و در نتیجه، هیدرولیز شدن آلومینیم و هیدراته شدن آهن به وسیله واکنش اکسیدی رخ می‌دهد و برای آنها فرایندهای زیر پیشنهاد می‌شود (Dominique et al.,1984).

$$4FeS_2 + 15O_2 + 10H_2O \longrightarrow 4Fe\,O(OH) + 8H_2SO_4 \quad (PH = 2\text{-}3)$$

$$Fe^{3} + H_2O \longleftrightarrow Fe(0H)_2 + H^{+}$$
$$Al^{+3} + H_2O \longleftrightarrow Al(OH)^{2} + H^{+}$$

از دیدگاه ترمودینامیک انتظار می‌رود که بر اثر هوازدگی اولیه فلدسپار، کانی گیبسیت تولید شود(White,1999).

$$KAlSi_3O_8 + 7H_2O + H^{+} \longleftrightarrow K^{+} + 3H_4SiO_{4(aq)} + Al(OH)_{3(Sol)}$$

PH در انتقال اکسید آلومینیم و اکسید سیلیسیم به صورت محلول و همچنین در رسوب گذاری دوباره آنها نقشی اساسی دارد. در PH کمتر از ۴، اکسید آلومینیم به آسانی قابل حل بوده، اما سیلیس انحلال پذیری کمتری دارد. در این گستره از pH، اکسید آلومینیم از محلول خارج می‌شود اما سیلیس با مواد مادر باقی می‌ماند. به هرحال، pH محیطهای عادی به ندرت به این حد می‌رسد. از pH ۵ تا ۹ سیلیس اندکی افزایش یافته اما اکسید آلومینیم در این pH عملا انحلال ناپذیر است(Mason,1966).در هر صورت، دریک محیط با شدت هوازدگی مناسب، کانیهای اولیه مانند پیروکسن، اولیوین و هورنبلند، درمرحله اول تبدیل به اکسیدهای آبدار بی‌شکل می‌شوند و در مرحله بعد هریک از عناصر آزاد شده مانند تیتانیم، آلومینیم، آهن و سیلیسم،کانیهای ثانویه خود را به ترتیب مانند آناتاز، گیبست، بوهمیت،گوئتیت، هماتیت و مونتموریلونیت تشکیل می‌دهند.

مطالعات اکتشافی

مطالعات اکتشافی در دو بخش سطحی و عمقی انجام شده است. بخش سطحی شامل تهیه نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین شناسی و زمین ساختی در مقیاسهای ۲۰۰۰۰ / ۱ ، ۱/۵۰۰۰ و ۱/۱۰۰۰ همراه با زدن ترانشه‌های مختلف در فواصل ۱۰۰ متری از یکدیگر است که در بعضی مواقع این فواصل به ۵۰ متر کاهش یافته است. در بخش عمقی تاکنون ۳۵۰۰۰ مترحفاری در ۳۵۰ حلقه گمانه با دستگاههای وایرلاین (Wireline) حفر و نمونه گیری شده است. شبکه حفاری اولیه به ابعاد ۴۰۰ × ۱۰۰ متر در بعضی از نقاط مانند بلوک ۶ گلبینی که عدسیهای کارستی نسبتاً بزرگ مشاهده گردیده تا فاصله ۲۵ × ۲۵ متر کاهش یافته است. در شکل ۵ مقطع تیپ گلبینی همراه با محل حفاری چند گمانه و رخنمون مربوطه دیده می‌شود. اطلاعات مربوط به تناوب رسوب گذاری و تکرار لایه بوکسیت بر اثر عملکرد زمین ساخت در عمق به وسیله این گونه عملیات اکتشافی حاصل شده است(شکل ۶). در ادامه اکتشافات به منظور آگاهی از تغییرات

ماده معدنی در امتداد طولی معدن ۲ تونل به طول بیش از ۳۵۰ متر حفرگردیده است. بر اساس حفاریهای انجام شده، ستبرای واقعی بوکسیت بین ۲ تا ۴۰ متر و ستبرای ظاهری ۲ تا ۱۰۰ متر متغیر است که البته از کیفیت یکسانی برخوردار نیستند و نیمرخ افق بوکسیت از سطح به پایین به طورکلی در برگیرنده لایه‌های زیر است:

۱- کائولن به ستبرای ۰/۷۵ تا ۰/۲۵ متر

۲- بوکسیت سخت به ستبرای بین ۳۰ تا ۲ متر

۳- بوکسیت شیلی به ستبرای بین ۵ تا ۳ متر

۴- کائولن پیریت‌دار به ستبرای۰/۲۵ تا ۱/۵ متر.

به طورکلی تغییر کانی شناسی در نیمرخهای بوکسیت امری طبیعی است ولی در کانسارهای مختلف با هم فرق می کند(کلاگری و همکاران،۱۳۸۲ ;Maclean,1997;Leonid,1999). ستبرای بوکسیت در کیفیت آن تأثیر بسزایی داشته است. بدین معنی که در کارستها و عدسیهای نسبتاً بزرگ و ستبر، بوکسیت کیفیت بالایی دارد، به گونه‌ای که اکسید آلومینیم آنها به ۶۰ درصد می‌رسد. ولی جاهایی که ستبرای بوکسیت در آنها از ۲ مترفراتر نمی‌رود، Al_2O_3 حدود ۴۰ درصد و SiO_2 حدود ۱۰ درصد و یا بیشتر است. در نتیجه کارستهای موجود در سنگ بستر، حوضچه‌های بسیار خوبی برای انباشت و گرفتار شدن بوکسیت همراه با دیگر عناصر کم تحرک مانند تیتانیم، زیرکنیم و غیره بوده‌اند(Maclean,1990). هر چند که حرکات زمین ساختی همیشه با تشکیل لایه باریک کائولن همراه بوده ولی درمجمـوع بر کیفیت بوکسیتهای اطراف تأثیر مثبت داشته‌اند. فعالیتهای زمین ساختی در بعضی از نقاط، موجب حذف و در بعضی از نقاط موجب تکرار لایه بوکسیت شده است(شکل۶). آبخور بودن شدید بعضی از گمانه‌ها، نتایج به دست آمده از گمانه ها و مطالعه نمودار چاهها، نظریه فوق را در عمق نیز تأیید می‌کند. همان طور که اشاره شد، بهترین مورد این پدیده در روی زمین، تکرار افق بوکسیتیB در منطقه گلبینی و در بین دولومیت الیکا است.

نمونه‌گیری از مغزه‌های بوکسیت حداکثر به فاصله ۱/۵ متر از آن انجام شده ولی از ترانشه‌ها به صورت کانالی و پیوسته نمونه‌برداری شده وحداکثر فاصله هر نمونه یک متر است و این فاصله با تغییرات سنگ شناسی بوکسیت به کمتر از یک متر تغییر یافته است. به منظور مطالعه کمی و کیفی ماده معدنی، تهیه نقشه‌های هم ژرفا و هم ستبرا جهت محاسبه ذخیره کانسار و نیز شکل آن، کانی شناسی و عناصر اصلی تشکیل دهنده بوکسیت مانند اکسیدهای آلومینیم، آهن، سیلیسیم و تیتانیم و عناصر فرعی بیش از ۵۰۰۰ نمونه در مرکز آزمایشگاه جاجرم و مرکز تحقیقات کرج مورد مطالعه قرار گرفته است. جدول ۳ ترکیب شیمیایی بعضی از عناصر اصلی همراه با دامنه تغییرات آن را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعه اکتشافی بوکسیت جاجرم همراه با مطالعات سطحی و عمقی، در حال حاضر وجود ۲۲ میلیون تن ذخیره بوکسیت تا ژرفای ۲۵۰ متری را در امتداد لایه بندی ماده معدنی با کیفیت بین ۴۷ تا ۴۸ درصد Al_2O_3 و حدود ۱۰/۵ درصد SiO_2 و مدول تقریبی ۴/۷ به اثبات رسانیده است. تغییرات شدید ریخت شناسی از باختر به خاور موجب شده که بوکسیت به دو روش روباز و زیر زمینی استخراج شود و این در حالی است که ۸۰ درصد معادن بوکسیت جهان به روش روباز و بدون انفجار استخراج می‌شوند زیرا ستبرای باطله در روی ماده معدنی از ۳ متر فراتر نمی‌رود و ماده معدنی نرم است، هر چند در بعضی موارد به علت سختی ، ماده معدنی به کمک انفجار برداشت می‌شـود (Neil et al.,1998) البته معادنی که به صورت زیرزمینی استخراج می‌شوند مانند معدن باکونی مجارستان(Beda et al.,1997) و همچنین بوکسیت در منطقه بارناس قیونای یونان (Ing-Spyro et al.,2002) بسیار محدود می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

۱) با توجه به مطالعات انجام شده، اولین مسئله قابل توجه در منطقه، ریخت شناسی ساختار کانسار است. ریخت شناسی ناهماهنگ منطقه موجب ایجاد شرایط متفاوت در روش استخراج شده، به طوری که فقط دربلوک گلبینی استخراج به روش روباز امکان پذیر است ولی در بقیه بلوکها مانند زو و تاگوئی، استخراج باید به روش زیرزمینی صورت گیرد، زیرا ارتفاع ستیغ کوه زو و تاگوئی از دشت جاجرم حدود ۸۰۰ متر و ستبرای سنگ پوش ماده معدنی به چند صد متر می‌رسد و مناطق صعب العبوری همراه با پرتگاههای مرتفع و غیر قابل دسترس را ایجاد کرده است. این درحالی است که استخراج ۸۰ درصد معادن بوکسیت جهان به روش روباز و بدون انفجار صورت می‌گیرد زیرا ستبرای باطله در روی ماده معدنی از ۳ متر فراتر نمی‌رود و ماده معدنی بسیار نرم است(Neil et al.,1998) .

۲) همبری مشخص سنگ پوش و بستر با بوکسیت و نبود یک زون هوازدگی تدریجی، مشخص کننده یک منبع مستقل تغذیه بوکسیت است. به اعتقاد درویش زاده (۱۳۷۰) یک تغییر رژیم رسوبگذاری در سیمرین پیشین در دوره لیاس در سراسر ایران به وجود آمده است . عدم رسوب گذاری در تریاس پسین و همچنین وجود رسوبات دریایی کم‌ژرفا و قاره‌ای در ژوراسیک پیشین و میانی، شرایط مناسبی را برای تشکیل کانسارهای بوکسیت، بویژه بوکسیت جاجرم فراهم کرده است. درشمال و قسمتهایی از ایران مرکزی، نخست مقداری گدازه بازالتی تشکیل شده و سپس در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در تریاس، شرایط مناسب برای هوازدگی فیزیکی و شیمیایی ایجاد گردیده و در نهایت فرایند تشکیل بوکسیت انجام شده است. بدین معنی که بازالتهای قاعده شمشک، محتمل‌ترین سنگ منشأ

بوکسیت جاجرم هستند. بر اساس مطالعات چینه شناسی و جغرافیای دیرینه، محیط تشکیل کانسار جاجرم شبه قاره‌ای بوده و به تدریج با پیشروی دریا حوضه ژرف‌تر شده و تغییرات لازم درآن صورت گرفته است. ضمن اینکه مطالعات میکروسکوپی بافتهای ائوییدی، پیزوییدی و بافتهای آواری میکروکلاستیک، آرنایتی، کنگلومرایی و همچنین وجود شکـــــافهای ناشی از تراکم ژل در پیزوییدها به ترتیب شرایط برجا و نابرجا برای تشکیل بوکسیت را نشـــان می‌دهد (جعفر زاده،۱۳۷۹). بدین معنی که بوکسیت لاتریتی به صورت برجا بر اثر هوازدگی سنگهای بازالت تشکیل شده و سپس در اثر فرسایش به صورت تخریبی وارد حوضه رسوبی و سنگ بستر دولومیتی همراه با کارستها گردیده است. سپس در یک شرایط اشباع تا نیمه اشباع همراه با فشارهای سنگ ایستایی، به ترتیب زمینه خروج عناصر پرتحرک تا کم تحرک فراهم شده است و از درزه‌های مگاسکوپی و میکروسکوپی موجود در سنگهای کربناتی از محیط خارج شده‌اند. در نتیجه، زمینه تجمع عناصر بی تحرک مانند آلومینیم وتیتانیم و عناصر کم تحرک مانند سیلیسیم و آهن فراهم شده است. در نهایت، عناصر در شرایط مناسب ودر یک فرایند طولانی کانیهای حاضر مانند دیاسپور، آناتاز، روتیل، هماتیت و کانیهای کائولینیتی را تشکیل داده‌اند.

۳) از نظر زمین ساختی، شرایط زمین ساختی نه تنها بر ریخت شناسی و ساختار کانسار تأثیر داشته، بلکه بر کانی شناسی و کیفیت بوکسیت نیز تأثیر بسزایی داشته است زیرا دیاسپور در ساختارهایی تشکیل می‌شود که تحت تأثیر زمین ساخت متوسط تا شدید قرار گرفته باشند (Bardossy,1984) مانند بوکسیت تیمان روسیه که از نوع دیاسپور است (Leonid,1999). بنابراین اگر تغییرات بسیار شدید می‌بود، کانیهای اصلی می‌بایست کرندوم و دیاسپور باشند. در جاهایی که اصلاً تحت تأثیر دگرگونی قرار نگرفته‌اند گیبسیت و بوهمیت کانی اصلی هستند. به اعتقاد بسیاری از دانشمندان مانند باردوشی (۱۹۸۴)، والتون (۱۹۷۲)، شهریاری (۱۳۶۵) معمولاً کانی اولیه بوکسیت یعنی گیبسیت با توجه به تأثیر فشارهای سنگ ایستایی ناشی از مواد روی آن و همچنین چین خوردگی و زمین ساخت با از دست دادن دو مولکول آب به بوهمیت و سپس در نتیجه دگرگونی خفیف به دیاسپور با یک مولکول آب و در شرایط دگرگونی شدید به کرندوم یعنی اکسید آلومینیم بدون آب تبدیل می‌شود. شهریاری (۱۳۶۵) دمای تبدیل بوهمیت و یا حتی گیبسیت را به دیاسپور ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد بیان کرده است. به طور کلی دیاسپور، نتیجه عمل دگرگونی حرکتی و یا زمین ساخت متوسط است و تشکیل کرندوم نتیجه دگرگونی شدید می‌باشد. از دیگر شرایط تشکیل دیاسپور و شاموزیت که از کانیهای اصلی جاجرم می‌باشند، محیط بازی ضعیف و کاهیده می‌باشد، در صورتی که کانی هماتیت از کانیهای اصلی آهن دار جاجرم است و در کلیه نمونه‌ها گزارش شده است در محیط اکسیدی تشکیل می‌شود. لذا بر اساس نمودار ارائه شده توسط والتون (۱۹۷۲) برای تشکیل دیاسپور و هماتیت نیاز به محیطی با Eh خنثی است. این شرایط نشان می‌دهد که تشکیل دیاسپور در فرایندی بسیار آرام با تغییر محیط از کاهشی به اکسیدی صورت می‌گیرد. در صورتی که نمودار متغیر بین دیاسپور و هماتیت و همچنین بین اکسید آلومینیم و آهن رابطه‌ای منفی را به نمایش می‌گذارد(شکل ۷). بدین معنی که افزایش آلومینیم با کاهش آهن و سیلیسیم همراه است لذا در فرایند غنی شدگی بوکسیت، شرایط فیزیکوشیمیایی از محیط اکسیدی به کاهشی و احتمالاً با افزایش دما همراه است. زمین ساخت، بوکسیت را از حالت لایه‌ای اولیه به نوع گرابن ویا کارستهای کوچک وبزرگ وعدسی مانند تبدیل کرده که این پدیده در زمان حفاری مشخص شده است. شکل ۸ تصویر شماتیک بوکسیت و ارتباط آن با کارستهای کوچک و بزرگ سنگ بستر را نشان می‌دهد. کارستها، با اندازه‌های مختلف، بیشتر بر صفحه گسلی منطبق بوده و ضمن اینکه جایگـــاه بســـیار مناسبی برای تشکیل بوکسیت با آلومینای نسبتاً بالا (۵۰ تا ۶۰ درصد) را فراهم نموده‌اند از جمله بهترین شرایط اشباع شدگی را نیز برای تشکیل دیاسپور به وجود آورده‌اند. به اعتقاد والتون (۱۹۶۵) دیاسپور ناحیه پیرمیس فرانسه در شرایط اشباع طولانی آب راکد زیرزمینی تشکیل شده‌اند. ضمن اینکه دیاسپور (AlOOH) و گوئتیت (FeOOH) همریخت هستند و ممکن است تا چند درصد جابه جایی مولکولی در شبکه دیاسپور (حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد) یا در شبکه گوئتیت (حدود ۴۰ درصد) رخ دهد. بوهمیت و گیبسیت در نتیجه نفوذ شدید آبهای زیرزمینی به داخل زون تشکیل شده در حالی که شاموزیت در شرایط دریایی نزدیک ساحل و در محیط کاهشی تشکیل می‌شود.

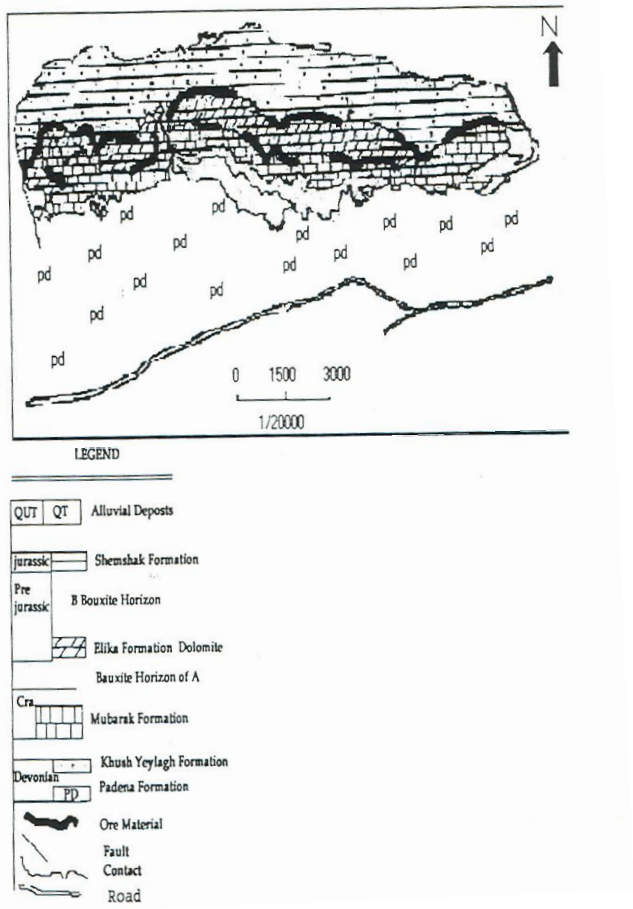
مطالعه رابطه ستبرای بوکسیت نسبت به مدول و همچنین درصد Al_2O_3 و تیتان در این گونه کارستها نشان می‌دهد که کیفیت بوکسیت و تیتان به عنوان عناصر بی تحرک با ستبرای آن نسبت مستقیم دارد و به همین نسبت از درصد اکسید سیلیسیم و آهن به عنوان عناصرکم تحرک کاسته می‌شود. شکلهای ۹ و ۱۰ این روابط را نشان می‌دهند. تشکیل کانی دیاسپور در این شرایط یکی از مهم‌ترین مسائل فناوری در تولید آلومیناست زیرا فرایند تولید آلومینا از بوهمیت و گیبسیت نسبت به دیاسپور به مراتب ساده‌تر، متداول‌تر و کم هزینه‌تر است. فعالیتهای زمین ساختی در جاجرم، موجب تشکیل بوکسیت سخت با بافت پلیتومورفیک شده است، ولی این تغییرات در حد دگرگونی شدید و تبلور دوباره نبوده تا بلورهای نسبتاً درشت با حاشیه‌های مشخص و سختی متفاوت با زمینه و کانه‌های بافت ساز را به وجود آورد که امکان غنی سازی فراهم شود. لذا با توجه به نوع بافت و ساخت بوکسیت جاجـــــرم، امکان هیچ گونه کانه آرایی وجـــــود ندارد (ملائی،۱۹۹۴). همچنین مقایسه بوکسیت جاجرم با بوکسیتهای نقاط دیگر

دنیا مانند هند، گینه، استرالیا و غیره نشان می‌دهد که درصد SiO_2 فعال در جاجرم گاه به بیش از ۳ برابر میانگین بوکسیت دیگر نقاط دنیا می‌رسد. این امر علاوه بر افزایش مصرف سود سوز آور، به همان نسبت موجب از دست دادن اکسید آلومینیم نیز می‌شود ضمن اینکه این مقدار سیلیس از نظر خردایش بر سیستمهای خردایش و نرمایش تأثیر منفی بسزایی خواهد داشت. بویژه افقهایی که تفکیک بوکسیت سخت و شیلی در آنها امکان پذیر نیست موجب آمیختگی بوکسیت خوب با بوکسیت کم کیفیت می‌گردد و درنهایت موجب افت شدید کیفیت بوکسیت می‌شود.

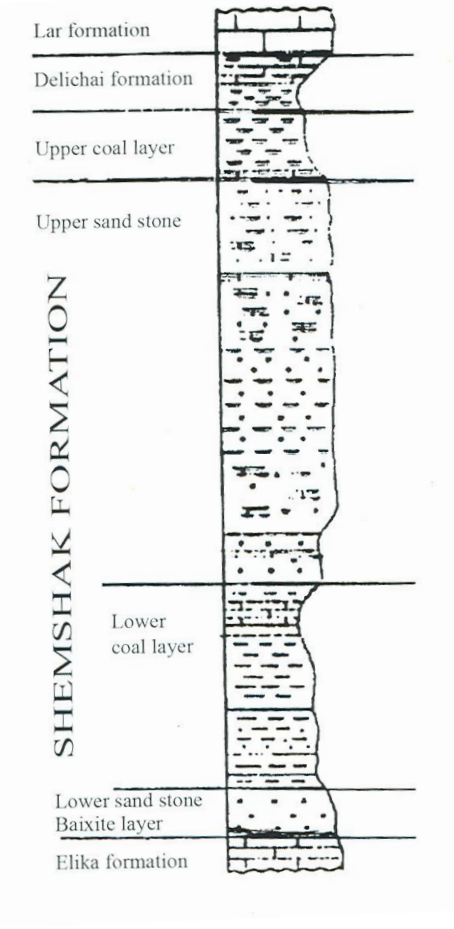
۴)کانی دیاسپوری نسبت به کانیهای بوهمیت و گیبسیت سخت‌تر ومقاوم‌تر است. لذا برای خردایش و انحلال و در نهایت استحصال آلومینا، نیاز به انرژی و سود سوز آور بیشتری خواهد بود.

۵) وجود یک نیمرخ نسبتاً متقارن به ترتیب از بالا به پایین شامل بوکسیت کائولینی یا شیلی، بوکسیت سخت، بوکسیت شیلی و در نهایت کائولن پیریت دار، در بیشتر نقاط افق بوکسیتی جاجرم دیده می‌شود. همان گونه که اشاره شد، درصد Al_2O_3 نسبت مستقیم با ستبرای افق بوکسیتی دارد (شکل ۱۱ و ۱۲). در صورتی که مطالعات طولی در تونل شماره یک هیچ گونه تغییری را نشان نمی‌دهد. بوکسیت کائولینیتی در سطح و بالای بوکسیت سخت با بوکسیت شیلی یا کائولینیتی زیر بوکسیت کاملاً ماهیت متفاوت دارند بدین معنی که بوکسیت شیلی قاعده بر اثر غنی سازی بوکسیت سخت و آزاد شدن سیلیس و آهن از افق بالایی و تجمع آن در این افق بوکسیت تشکیل شده و وجود کانی پیریت به علت محیط کاهشی و آزاد شدن آهن و گوگرد موجود به وجود آمده است ولی بوکسیت شیلی لایه بالایی، از راه یک فرایند ثانویه توسط آبهای جاری و فعالیت گیاهی اتفاق افتاده است، ضمن اینکه فرایند غنی سازی بوکسیت سخت به طور آرام ادامه دارد.

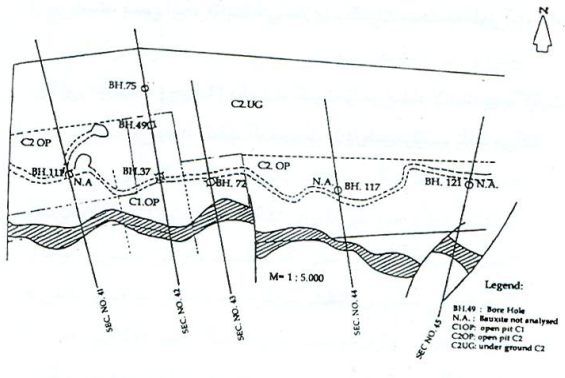
۶) این مطالعات، وجود ۲۲ میلیون بوکسیت را در امتداد لایه بندی با کیفیت ۴۷ تا ۴۸ درصد اکسید آلومینیم با ۱۰ درصد سیلیسیم تأیید می‌کند.



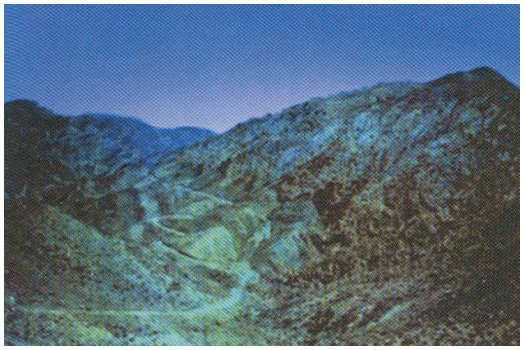
شکل ۱– نقشه زمین شناسی بوکسیت جاجرم



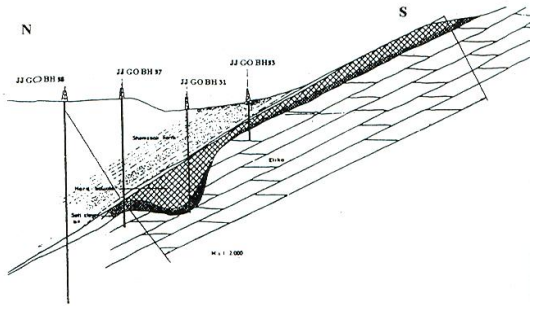
شکل ۲– مقطع شماتیک سازند شمشک



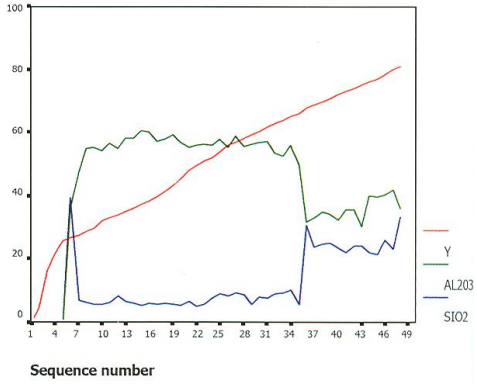
شکل ۳– نقشه زمین ساخت کانسار (خاک خوب، مقیاس ۱/۵۰۰۰)



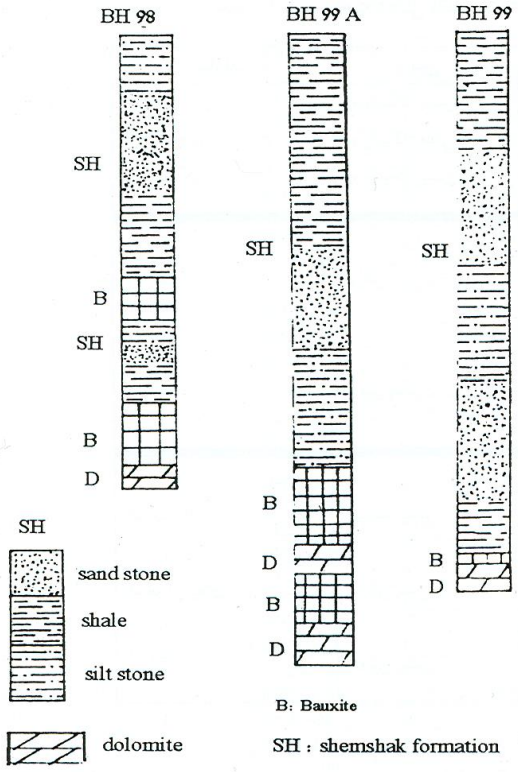
شکل ۴– رخنمون بوکسیت در سطح زمین منطقه گلبینی، دید به طرف جنوب



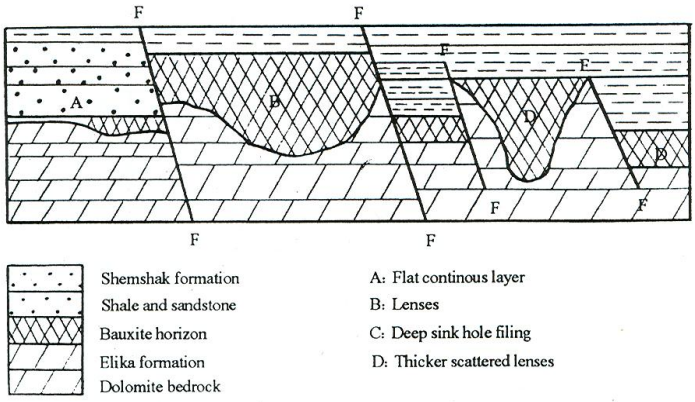
شکل ۵- مقطع تیپ گلبینی همراه با چند گمانه
(گروه اکتشاف مقیاس ۱/۲۰۰۰)



شکل ۷- نمودار تغییرات درصد Al_2O_3 و SiO_2 نسبت به ژرفا



شکل۶ - اطلاعات مربوط به چاه پیمایی چند گمانه، تناوب رسوب گذاری
وتکرار لایه‌های بوکسیت به دلیل فعالیتهای زمین ساختی



شکل ۸- تصویر شماتیک بوکسیت و سنگ بستر(بدون مقیاس)

جدول ۱- ستون چینه شناسی منطقه معدن بوکسیت جاجرم با بازنگری (از افشار حرب، ۱۹۷۹)

سازند	سن	سنگهای تشکیل دهنده
۸ـ لار	ژوراسیک پسین	آهک فسیل دار
۷ - دلیجای	ژوراسیک میانی	مارن و آهک
٦ـ شمشک	ژوراسیک پیشین	شیل، ماسه‌سنگ، شیل زغالی
		افق بوکسیت B
٥- الیکا	تریاس	دولومیت بلورین خاکستری به ستبرای ۲۰۰ متر با قاعده‌ای ازشیلهای سرخ کم ستبرا ولی رنگ مشخص آن این بخش را از سازندهای بالایی و پایینی جدا می‌سازد.
٤-نسن	پرمین پسین	سنگ آهک وشیل
		افق بوکسیت A
۳ـ مبارک	کربنیفر پیشین	۲٤۸ متر ماسه سنگهای آهک و دولومیت اسپاری متراکم
۲ـ خوش ییلاق	دونین پسین	۹۸ متر تناوبی از آهک فسیل‌دار دولومیت ، شیل و ماسه‌سنگ.
۱ـ پادها	دونین پیشین	٤۹۲ متر دولومیت ماسه با لایه‌بندی مشخص ماسه سنگ و گچ

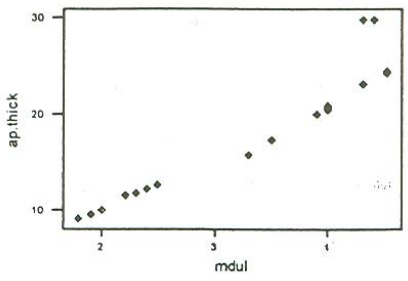
جدول۲- ترکیب شیمیایی افق بوکسیتA

(Mo=Module)

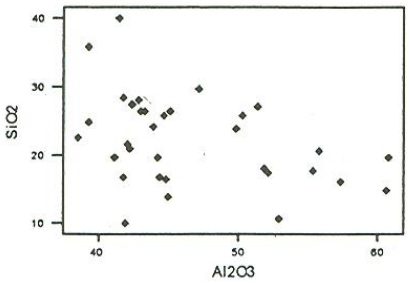
NO.	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	LOI	Mo
j1	6	35.5	39	4	0.3	0.3	12.7	1.02
j2	38.5	32.9	13.6	4	0.8	1.2	8.9	2.42
j3	9.7	36	35.7	4	0.4	0.3	12.4	1.01
j4	55.4	16.2	9.6	2.6	6.1	0.7	10.3	1.69
j5	23.4	38.4	19.4	4.4	1.2	0.3	10.8	1.98
j6	13.8	33.4	32.2	4	0.5	0.4	14.4	1.09
j7	18.8	37.7	15.9	4.7	1	0.4	11	2.37
j8	18.5	39.8	23.5	4.8	0.4	0.3	11.2	1.69
j9	21.5	43.9	10.5	5.4	4.7	0.2	13.4	4.18
j10	11.3	31.9	34.6	4	3.6	0.2	13.8	1.05
j11	18.8	32.9	26.7	4.1	4.1	0.1	13	1.23
j12	10.6	36.3	31.4	4.3	1.2	0.2	13.7	1.14
j13	18.8	40.1	21.7	5.7	1	0.3	10.3	1.85
j14	14.1	34.2	30	3.6	0.3	0.2	15.4	1.14
j15	16.6	37.3	24.8	4.3	2	0.3	12.7	1.5
j16	30.4	34.4	16.1	4.3	0.6	1.4	12.39	2.14
j17	28.6	40.9	12.3	5.2	0.6	0.8	11.3	3.33
j18	38.8	31.3	13.3	6.1	0.5	1	9	2.35
l19	13.7	41.9	24.5	5	0.4	0.5		

جدول ۳- ترکیب شیمیایی کلی بوکسیت جاجرم از گمانه‌های مختلف

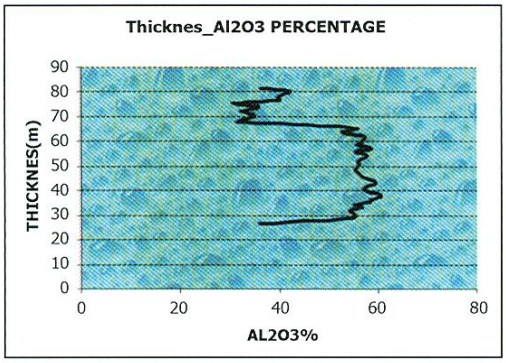
Char.sample No.3	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	LOI
BH3-O2	6.9	44.8	28.2	4.9	0.2	0.2	12.5
BH3-O5	11.7	39.3	29.9	4.1	0.7	0.2	12.6
BH4-1	25	47.8	7	4.8	2.5	0.2	12.1
BH4-2	29.2	40.7	6.9	4.6	4.9	0.2	12.9
BH4-3	24.9	40.5	9.5	4.1	6.8	0.3	13.9
BH6-3	23.6	50	7.6	5.3	0.5	0.7	12
BH12-O3	20.1	50.4	8.5	5.5	2.2	0.3	11.8
BH15-O3	10.8	57.8	8.3	7.1	0.3	0.2	12.5
BH19-O1	26.5	40.2	7.3	4.9	2.1	0.2	13.8
BH19-O2	22.8	44	9.5	5.3	4.1	0.4	13.7
BH19-O6	23.6	43.2	11.3	4.8	3.3	0.2	11.9
BH19-O8	27.2	41.8	12.2	5.2	1	0.5	11.1
BH19-O9	24.2	46.5	9	5.9	0.7	0.5	11.9
BH19-O10	26.4	41.7	12.9	5.1	0.5	0.6	11.6
BH20-2-27	23.3	42.7	11.9	4.9	2.8	0.6	12.9
BH20-3-28	22.8	47.2	8.7	5.7	2.2	0.6	12.4
BH20-5-30	22.1	48	5.9	5.5	2.7	0.6	12.7
BH20-6-31	18.2	50.5	10.4	5.9	0.8	0.4	12.1
BH22-1-56	12.6	44.8	21	5	1.4	0.2	12.4
BH22-6-61	19.3	49.6	7.1	6.2	2	0.6	13.4
BH22-	7.62	58.8	9.1	7.3	0.4	0.1	13.1
BH22-8-63	11.7	55.4	9.2	7	0.1	0.1	13.4
BH24-5-13	23	47.5	7.7	5.1	0.7	0.7	13.2
BH-24-6-14	14.3	56.5	7.4	5.6	0.3	0.3	12.6
BH26-O2	27.6	40.5	7.7	3.7	1	1	16.1
BH26-O5	28.7	49.7	1.3	5.3	0.3	0.3	11.9
BH26-O8	20.8	52.4	5.2	6.1	0.3	0.3	12.5
BH26-12	18.5	54.2	5.8	6.2	0.3	0.3	12.8
BH5-1-36	14.5	54.4	8.3	6.5	0.3	0.3	13.5
BH5-2-37	13.5	57	8	6.6	0.4	0.4	13
BH5-3-38	20.2	45.7	14.9	4.9	0.4	0.4	12.3
BH6-2	30.5	39	12.3	4.5	0.7	0.7	11.3
BH8-O1	24.8	42.7	15	4.8	0.7	0.7	11.3
BH8-02	21.2	46.8	12.5	5.2	0.6	0.6	12
BH8-03	11.7	47.3	21.5	4.6	0.3	0.3	12.7
BH12-O4	30.1	40.5	11.6	4.4	0.7	0.7	10.9
BH14-O4	31.2	40.9	9.9	4.3	0.5	0.5	10.9
BH15-O1	17.3	48.6	13.9	5.2	0.3	0.3	12
BH15 02	29.9	40.8	12.4	5.4	0.9	0.9	10.2
BH15-3	10.9	39.3	30.6	4.5	0.2	0.2	12.6



شکل ۹- نموگراف مدول و ستبرای واقعی وظاهری



شکل ۱۰- نموگراف Al_2O_3 و SiO_2



شکل ۱۱- تغییرات بوکسیت نسبت به ژرفا

کتابنگاری

بذرافشان، ع. ا.، جلیلیان ، ع. ا. ، قندهاریان، ا. ،۱۳۷۱– تهیه و تولید آلومینا از بوکسیت منطقه جاجرم . فصلنامه تحقیق شماره ۷

بزرگ ابراهیمی، ا. ،۱۳۷۳– انتخاب بهترین روش برای باز کردن معدن زیرزمینی در کانسار بوکسیتی جاجرم. پایان نامه فوق لیسانس . دانشگاه تهران.

پرتوآذر، ح.،۱۳۷۴– زمین شناسی ایران ،سیستم پرمین در ایران .طرح کتاب ،سازمان زمین شناسی کشور.

جمشید پور، ن. ،۱۳۶۶– مطالعه البرز با نگاه ویژه به سازند شمشک. پروژه کارشناسی.

درویش زاده، ع.،۱۳۷۰– زمین شناسی ایران ، نشردانش امروز.

شرکت ایتوک ،۱۳۷٤– آشنایی با طرح و پروژه های آن . وزارت معادن و فلزات، طرح تجهیز معدن و احداث کارخانه تولید آلومینا از بوکسیت

شهریاری، م. ،۱۳۶۵– ذخایر بوکسیت کارستی (با بستر کربناته) .جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.

گروه اکتشاف ،۱۳۷٤– گزارش اکتشافی. وزارت معادن و فلزات, طرح تجهیز معدن و احداث کارخانه تولید آلومینا از بوکسیت گروه اکتشافی جاجرم ۱۳۷۰ . گزارش عملیاتی ۱۳۷۰

علوی نائینی، م.،۱۳۷۲– زمین شناسی ایران ،پالئوزوئیک ایران .طرح تدوین کتاب ،سازمان زمین شناسی کشور .

قصرانی، ج. ر. ،۱۳۷٤– اکتشافات مقدماتی بوکسیت جهان آباد (کال جعفر آباد). پایان نامه فوق لیسانس دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مر، ف.، شرفی، ع. ا. ،۱۳۷۵– ترجمه اصول ژئوشیمی نوشته بریان میسون و کارلتون مر. جاپ دوم انتشارات دانشگاه شیراز

ملایی، ح. ، ۱۳۷۳– مطالعه اکتشافی و تکنولوژیکی بوکسیت جاجرم جهت تولید آلومینا . چهارمین سمپوزیوم معدن کاری ایران . دانشگاه یزد.

ملایی، ح.، آریایی، ع.ا.، عباسیان ، م. ،۱۳۷۱– ویژگیهای تاقدیس زو و ارتباط آن با ژئو شیمی و ژنز بوکسیت در ناحیه جاجرم (استان خراسان) . اولین سمپوزیوم زمین شناسی شرق ایران. دانشگاه فردوسی مشهد .

ناصری، م. ، ۱۳۸۲ – کانی شناسی و ژئوشیمی بوکسیت جاجرم – پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی (گرایش زمین شناسی اقتصادی) – دانشگاه فردوسی مشهد .

References

Alluterv-FKI ,1987 - Techno-Economic opportunity study with Bench-Scale testing of bauxite for the Islamic Repulic of Iran.

Baksa,Gy., Sitkei,F., Szabo,B., Grelinger,G., Vallo,F., Balogh, Z. ,2002- Production of special aluminum hydroxides at the Ajka Alumina Plant of MAL Hungrian Aluminium Company. Mining ,Metallurgy Millennium. M3 .University of Vienna. Germany .

Balkay, B. and Samimi Namin, M.,1994 - Preset state the search for bauxite in Iran. Geological Survey of Iran.

Bardoss, G.Y. and Aleva, G.Y. Y.,1990- Lateritic Bauxites.Akademia,Kiado.Budapest 646p.

Boda,E., Dioszegi, S.,2002- New possibliteis in underground minning of dep sinkhole type karst bauxite at Bakonyi Bauxite Mines in Hungry. Mining Metallurgy Millennium. M3 . University of Vienna. Germany.

Butty,D.E. and Chapellaz,C.A.,1984- Bauxite Genesis. proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27-March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Davoodi M.Gh., Heidar,M.R., Janfada,M., khabazade,H., Dashtebozoeg, A.R. ,2002- Characterization of Alborz,Zagros and Central Iranian Plateau Bauxites for tub Digestion Processing.Mining , Mining ,Metallurgy Millennium .University of Vienna .Germany .

Harben, P.W. and Dickson, E.M. ,1984- World distribution of Metal Grade Bauxite. Bauxite proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr7-

Henderson III, F.B., Penfeild, Gh.T. and Grubbs, D. K. ,1984- Bauxite exploration by satellite. proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Hill.V.G.and Slavko Ostojic,1984- The characteristics and classification of bauxite. proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Ikonnikov, A. B. ,1984- notes on geology of bauxite deposits in China. proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Lancashiere, R.J. ,2003- The chemistry and processing of Jamaican Bauxite.The Department of Chemistry ,University of the West Indies.Mana Camus,Kingston7 Jamaica.

Lancashiere, R.J.,1982- Bauxit and Aluminum production .Education in Chemistry. pp62-Roskill World Material Overview. (2002). Aluminum Production. Bauxite and Alumina Report on Metal and Mineral. World Aluminum Organization .home of the international Aluminum institute.

Macleon, W.H. ,1990- Mass change calculation in altered rock series. Mineralium Deposit vol.25 pp44-49.

Macleon,W.H., Bonavia, F.F. and Sanna, G.,2002- Argillite debris converted in bauxite during karst weathering Evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit ,Sardinia. Mineralium Deposit vol 32 pp607-616.

Mensah, Addai J., Gerson,A.R., Zheng,K., Odea,A., Smart, R.St.C., Work, I.,1997- The precipition mechanism of sodium alminosilicate Scalen Bayer Plant. 1997 TMS Annual Meeting.Alumina and Bauxite Technology.

Miason, B. ,1966- Princples of geochemistry.Third edition.John Willy and Sons.

Mollai, H. ,2002- The economic importance of Jurassic system in Iran ,with special reference of the Shemshak Formation .6th International Symposium on Jurassic system 12-22 September 2002, Torino ,Italy.

Mollai, H. and Torshizian ,2002- The importance of Jurassic sedimentation in the north and north east of Iran, with special reference to the Shemshak and Mozduran Formation.16Th International Sediment logical congress ,8TH -12TH July 2002 RAU University Johannesburg South Africa

Mollai,H. ,1994- Geology, Mineralogy and Beneficiation of Jajarm Bauxite, NW of Mash had , Iran. International symposium, Recent Trend Beyond 2000AD,Nagpur,India 1994.

Mordberg, L.E.,1999- Geochemical Evolution of a Devonian Diasporic –Crandallite –Svanbergite - bearing weathering profile in Middle Timan, Russia. Journal of geochemical Exploration.Vol 66 .pp353-361

Nandi, A.K.,2002- Processing low alumina bauxite. Mining Metallurgy Millennium. M3. University of Vienna. Germany.

Neil N.B. and PaoloLozi, G. ,1984- Bauxite.Geoscience Canada Valume 20 No.1Otis M. Clarke , Jr.(1984) .Bauxite deposit of the United State. proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Ozturk,H., Hin,J.R. and Hanlet,N. ,2002- Genesis of the Dogan Kuzu and Mortas Bauxite Deposits ,Taurids Turky: Separation of Al, Fe and Mn implication for. Passive Margin Metallogeny. Journal of Economic Geology Vol.97 pp1063-17

Patterson, S.H.,1984- Bauxite and Non bauxite Resources an update. Bauxite proceeding of the 1984 Bauxite Symposium February 27- March1.Edited by Leonard Jacob, Jr.

Pepos,Th., Christay,N.K. ,2002- Bauxite Mining Activities of Silver and Baryte Ores Ming Co S.A. Metallurgy Millennium. University of Vienna. Germany

Plunkert, P.A. ,2001- Bauxite and Alumina. U.S.Geological Survey .Minerals Year book.- Pengzhiheng, Lixiaobin.(1997). A study of disilication of alumina solution with HCAC. 1997 TMS Annual Meeting.Alumina and Bauxite Technology.

Rayzman, V.L and Shcherban, S.A. ,1997- Recovering Alumina, Silica and by products from caolash through the use of process for silicon pre-extraction.1997 TMS Annual Meeting ,Alumina and Bauxite Thecnology

Russia. M3 . Mining Metallurgy Millennium. M3 . University of Vienna. Germany.

Tillt-D. ,1998- Models of bauxitic pisolith genesis : Data from Weipa Queensland.Centre for Australian Reglith studies.

W. Tedder, D., 1984 - Bauxite residue fractionation with magnetic separation. Bauxite. Leonard Jacob, Jr. Editor.

White, W.M.,1999- Geochemistry .online geochemistry web site.

World –Aluminium organization ,2000- Aluminium s Economic Contribution. Home of the international aluminium institute.htm

*دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی

*Dept. of Geology, Faculty of Sciences, Islamic Azad University of Mashad