

بررسی ترکیب سنگ منشأ و دلیل لایه‌بندی در کانسار بوکسیت جاجرم (شمال خاور ایران) با استفاده از داده‌های زمین‌شیمیایی

نویسنده: داریوش اسماعیلی*، امیر اثنی عشری* و حسین رحیم‌پوربناب*

*پرديس علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Study of Source Rock Composition and Reason of Layering in Jajarm Bauxite Deposit (North East of Iran) by using Geochemical Data

By: D. Esmaily*, A. Esna Ashari* & H. Rahimpour Bonab*

*School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۹/۱۰

چکیده

کانسار بوکسیت جاجرم (شمال خاور ایران) از پایین به بالا از چهار بخش لایه رسی زیرین، بوکسیت شیلی، بوکسیت سخت و کائولینیت بالایی تشکیل شده است. بررسی ضرایب همبستگی و نمودارهای پراکندگی عناصر کم تحرک در چهار افق این کانسار نشان دهنده یک منشأ همگن اولیه در ابتدای تشکیل نهشته بوکسیتی است که به تدریج و به دلیل شرایط متفاوت حاکم بر بخش‌های مختلف نهشته، مواد اولیه تفکیک یافته‌اند. میزان زهکشی متفاوت و شستشوی برخی از عناصر از بخش‌های بالایی نهشته و ته‌نشینی آن در بخش‌های زیرین، باعث تفکیک بوکسیت شیلی از بوکسیت سخت و تماس بخش زیرین بوکسیت‌های شیلی با سنگ بستر کربناتی و تفاوت در میزان زهکشی در محل تماس این دولایه، باعث تشکیل لایه رسی زیرین در حدفاصل بوکسیت شیلی و سنگ بستر کربناتی شده است. همچنین شواهد زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند که لایه کائولینیت بالایی احتمالاً در اثر شستشوی سیلیس از افق‌های بالایی و ته‌نشینی آن در لایه بوکسیت سخت تشکیل شده است. مقایسه نمونه‌های مورد مطالعه با کندریت و ترکیب متوسط پوسته قاره‌ای بالایی، نشان می‌دهد که هر دو گروه از سنگ‌های بازی و سنگ‌های رسوبی در فرایند تکامل بوکسیت جاجرم نقش داشته است به گونه‌ای که این نهشته بوکسیتی می‌تواند حاصل دگرسانی یک لایه لاتریتی اولیه در نزدیکی محل فعلی آن در نظر گرفته شود که در اثر عملکرد فرایندهای هوازدگی به درون یک محیط کارستی انتقال یافته و در حین انتقال، مواد با منشأ قاره‌ای نیز به آنها اضافه شده است.

کلید واژه‌ها: بوکسیت، جاجرم، سنگ منشأ، داده‌های زمین‌شیمی

Abstract

Study of source rock materials in Jajarm bauxite deposit is the main subject of this study to show its origin. From bottom to top, this deposit consists of lower argillaceous layer, argillaceous bauxite, hard bauxite and upper kaolinite units. Correlation coefficients and scatter diagrams of immobile elements in these four layers, demonstrate an early homogenous origin at the beginning of the bauxite formation. Accordingly, source materials were separated slowly due to the different conditions dominated in different parts of the deposit. Difference in drainage conditions and leaching of some elements from upper part and their re-deposition in lower parts of the deposit are the main reasons for hard bauxite separation from argillaceous one. Formation of the lower argillaceous layer, located between argillaceous bauxite and carbonate footwall is due to the direct contact of the argillaceous bauxite and carbonate footwall and also difference in drainage rate in contact area of the two layers. Geochemical

evidence also depicts that upper kaolinite formation is the result of the silica leaching from upper horizons and its re-deposition in hard bauxites. Compositional comparison of studied samples with chondrite and upper continental crust demonstrates the effect of both of the basic and sedimentary rocks in evolution of the Jajarm bauxite. Formation of this deposit can be considered as a result of the alteration of the primitive laterite in an area close to the current location of the deposit. During alteration and transportation bauxite is deposited on the karstic topography and then some continental sediment was added to it.

Key Words: Bauxite, Jajarm, Source Rock, Geochemical Data

۱- مقدمه

لاتریتی حاصل شده است (MacLean et al., 1997). به طور کلی، منشأ آلومینا در بوکسیت‌های کارستی، همواره مورد سؤال بوده است. به عقیده برخی (برای مثال Bardossy, 1982)، سنگ آهک و دولومیت به عنوان سنگ‌های منشأ بوکسیت‌ها، مقدار کافی از ناخالصی سیلیکات آلومینیم ندارند و بنابراین آلومینای موجود در آنها منشأ خارجی دارد. اساساً در این خصوص، دو شیوه نگرش وجود دارد: گروهی عقیده دارند که سیلیکات‌های آلومینیم نابرجا بوده اما به صورت برجا بر روی سنگ‌های کربناتی بوکسیتی شده‌اند (Comer, 1974; Valetton, 1966; Taylor and Hughes, 1975) در حالی که بعضی دیگر (Nicolas, 1968) این نوع بوکسیت را در کل نابرجا می‌دانند که بر روی سنگ‌های کربناتی نهشته شده‌اند. Bardossy (1982)، موضوع سنگ‌های منشأ در بوکسیت‌های کارستی را به این صورت خلاصه نمود: "هیچیک از تئوری‌های مرتبط با مواد منشأ بوکسیت‌های کارستی از اعتبار لازم برخوردار نمی‌باشند، مواد منشأ ممکن است در نهشته‌های مختلف متفاوت باشند که دقیقاً به تکامل زمین‌شناسی ناحیه بوکسیتی بستگی دارد. در حقیقت در بسیاری از مناطق بوکسیتی، مشارکت ترکیبی از سنگ‌های منشأ محتمل‌تر به نظر می‌رسد". همچنین به تازگی برای تعیین منشأ بوکسیت‌های کارستی مطالعات زیادی بر روی عناصر کمیاب صورت گرفته است (به عنوان مثال MacLean et al., 1997; Taylor & Eggleton, 2004; Eliopoulos & Economou-Eliopoulos, 2000). این مطالعات نشان می‌دهند که زایش بوکسیت‌های کارستی در یک منطقه، نباید به سادگی به سایر نهشته‌های مشابه عمومیت داده شود و در هر نهشته، باید با احتیاط زیاد به تفسیر وقایع پرداخت، به طوری که ارزیابی دقیق تمامی پارامترها، همچون ویژگی‌های کانی‌شناختی، زمین‌شیمی بوکسیت، سنگ منشأ احتمالی و تحولات دیرینه جغرافیایی منطقه باید مورد توجه قرار گیرد.

کانسار بوکسیت جاجرم در شمال خاور ایران از دیر باز مورد مطالعات چندی قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به خیری (۱۳۶۶) و رحیم‌زاده (۱۳۷۶)

بعز نفلین سینیت و آلونیت، بوکسیت تنها ماده معدنی آلومینیم به شمار می‌آید. بوکسیت‌ها نتیجه هوازدگی سنگ‌های مختلف در آب و هوای حاره‌ای و یا نیمه‌حاره‌ای هستند که در زمین‌ریخت‌ها و زهکشی مناسب تشکیل می‌شوند. به طور کلی، به مجموعه‌ای از هیدروکسیدهای آلومینیم که از آنها بتوان در شرایط اقتصادی و مقرون به صرفه آلومینا (Al_2O_3) استحصال کرد، بوکسیت گفته می‌شود. البته اکسیدهای Fe و Ti نیز اغلب با این مجموعه همراهند (Bardossy, 1982). یکی از مهم‌ترین عوامل در تشکیل بوکسیت، هوازدگی فیزیکی کانی‌های آلومینیم‌دار است. هوازدگی شیمیایی نیز که همزمان با هوازدگی فیزیکی عمل می‌کند، باعث انحلال و تجزیه کانی‌های اولیه شده و در نهایت کانی‌های جدید یا فازهای نامتبلور تشکیل می‌شوند که خود باعث تشکیل بوکسیت می‌شوند. وجود شرایط مساعد همچون شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب، ترکیب کانی‌شناسی سنگ منشأ، پوشش گیاهی، شرایط pH و Eh و ریخت‌شناسی مناسب، برای شکل‌گیری نهشته‌های بوکسیتی بسیار تعیین‌کننده و الزامی است. بوکسیت‌ها به‌طور عمده به دو دسته بوکسیت‌های لاتریتی و بوکسیت‌های کارستی تقسیم بندی شده‌اند (Bardossy, 1982). انواع لاتریتی عمدتاً به صورت برجا و بر روی سنگ منشأی که غالباً آذرین است تکامل می‌یابند، ولی انواع کارستی، منشأ پیچیده‌تری دارند و بر روی سنگ‌های آهکی و در یک محیط کارستی تشکیل می‌شوند. منشأ آلومینیم در برخی از نهشته‌های بوکسیتی برای سال‌ها مورد بحث بوده است (برای مثال: Gow and Lozej, 1993). بسیاری از بوکسیت‌ها را می‌توان با توجه به بافت و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آنها به سنگ بسترشان نسبت داد، ولی در بوکسیت‌هایی که بستر سنگ آهکی دارند، عوامل بیشتری مد نظر قرار می‌گیرد. اجزای رسی موجود در سنگ آهک زیرین تا مواد آواری که توسط رودخانه به درون پی‌سنگ راه یافته‌اند (Bardossy, 1982, 1984) و یا انواعی که منشأ آنها خاکسترهای آتشفشانی است (Bardossy, 1984; Lyew-Ayee, 1986) از جمله این عوامل است. همچنین در همه این مدل‌ها، آلومینیم به صورت برجا و عنصری نامتحرک از یک باقی‌مانده

مقادیر کمی دیاسپور تشکیل شده و از نظر تولید آلومینا ارزش اقتصادی ندارند. نوع دیگر بوکسیت که سختی بیشتری نسبت به نوع شیلی دارد بوکسیت سخت نامیده می‌شود و کانسنگ اصلی معدن به شمار می‌آید. در بوکسیت‌های سخت جاجرم، دیاسپور کانی اصلی آلومینیم است. کانی‌های شاموزیت و هماتیت مهم‌ترین کانی‌های آبدار جاجرم بوده که در برخی قسمت‌ها به دلیل فراوانی بیشتر به ترتیب باعث ایجاد رنگ سبز و سرخ در نمونه‌های بوکسیت شده است. همچنین گوتیت، سیدریت، آناز و کائولینیت نیز از دیگر کانی‌های مهم تشکیل دهنده بوکسیت جاجرم است. شاموزیت که در شرایط کاهنده تشکیل شده است (رحیم‌پورناب و اسماعیلی، ۱۳۸۶) در برخی بخش‌های کانسار فراوانی بیشتری دارد (تا ۱۷٪) و موجب رنگ سبز کانسار در این بخش‌ها شده است. مهم‌ترین کانی سیلیکاتی همراه بوکسیت، کائولینیت است که به صورت سیلیس فعال، با مقدار کمی کوارتز به عنوان سیلیس غیر فعال همراه است. کانی اصلی تیتانیم نیز در بوکسیت جاجرم، آناز است که با کمی روتیل همراهی می‌شود. بوکسیت جاجرم از چهار بخش اصلی به ترتیب زیر تشکیل شده است (شکل ۲):

- ۱- لایه رسی زیرین: این بخش از نهشته با ستبرای حدود ۸۰-۵۰ سانتی‌متر بر روی دولومیت‌های البکا (که سنگ بستر بوکسیت به شمار می‌آید) قرار گرفته است. این لایه در بخش زیرین خاکستری رنگ است ولی به تدریج و به سمت لایه بوکسیتی به سرخ متمایل می‌شود.

- ۲- بوکسیت شیلی: این بخش نیز با ستبرای حدود ۳-۲/۵ متر به طور مستقیم بر روی لایه رسی زیرین قرار گرفته و همان طور که از نام آن نیز مشخص است، به مقدار زیادی دارای کانی‌های رسی است، این نوع بوکسیت خاصیت شکنندگی داشته و به راحتی خرد می‌شود. رنگ آن سرخ تا قهوه‌ای بوده و کانی هماتیت در آن به فراوانی دیده می‌شود.

- ۳- بوکسیت سخت: مرغوب‌ترین قسمت کانسار بوده و به طور میانگین ۵ متر ضخامت دارد اما ستبرای آن در برخی گمانه‌ها به ۷۰ متر هم می‌رسد. رنگ بوکسیت سرخ آجری و در مواردی خاکستری و رنگ‌های دیگر است. این بخش از نهشته که در حال حاضر از آن برای تولید آلومینا استفاده می‌شود، نسبت به دیگر بوکسیت‌هایی که دارای ارزش اقتصادی هستند، سیلیس بالاتری دارد و به همین دلیل تولید آلومینا (Al_2O_3) از آن با مشکلاتی همراه است.
- ۴- کائولینیت بالایی: این بخش از نهشته به رنگ روشن و ۵۰-۲۰ سانتی‌متر ستبرای دارد. کائولینیت بالایی دارای سنگال‌های (کنکرسین‌های) هماتی است (افق لکه‌دار) و در زیر سازند شمشک قرار دارد.

۳- روش مطالعه

به منظور بررسی‌های زمین‌شیمیایی و تعیین منشأ بوکسیت جاجرم، پس از حدود ۲۰ روز مطالعات صحرایی، ۵۰۰ نمونه از بلوک‌های معدنی مختلف به

اشاره کرد. اثنی‌عشری (۱۳۸۵) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به مطالعه زمین‌شیمیایی این کانسار با تأکید بر زمین‌شیمی عناصر جزئی پرداخته است. رحیم‌پورناب و اسماعیلی (۱۳۸۶) با انجام مطالعات سنگ‌نگاری، بوکسیت جاجرم را یک نهشته نابرجا معرفی کرده‌اند که از یک مکان اولیه (احتمالاً یک توده بازی) انتقال یافته و در یک محیط کارستی تکامل یافته است. به علاوه، اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۵) عناصر خاکی کمیاب این کانسار را مورد مطالعه قرار داده و ارتباط بین پتانسیل یونی این عناصر و تمرکز آنها در بخش‌های مختلف کانسار و همچنین کانی‌های میزبان احتمالی این عناصر را مشخص کردند. با وجود این در هیچ کدام از مطالعات قبلی، ترکیب سنگ اولیه و منشأ لایه‌بندی در این کانسار از دیدگاه زمین‌شیمیایی مورد کنکاش قرار نگرفته است. اگرچه رحیم‌پورناب و اسماعیلی (۱۳۸۶) تلاش کرده‌اند تا از دیدگاه کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری راه را برای چنین مطالعاتی هموار نمایند. به همین دلیل در مطالعه پیش رو سعی شده است تا با استفاده از داده‌های زمین‌شیمیایی علاوه بر بررسی منشأ بوکسیت جاجرم، علت وجود دو نوع بوکسیت سخت و شیلی و همچنین منشأ افق‌های کائولینیت بالایی و لایه رسی زیرین در این کانسار مورد بررسی قرار گیرد.

۲- موقعیت زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

کانسار بوکسیت جاجرم در استان خراسان شمالی و در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال خاور جاجرم (شکل ۱) با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 3'$ تا $37^{\circ} 3'$ شمالی و $30'$ تا $56'$ تا $56'$ خاوری در نقشه زمین‌شناسی سنخواست با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سهندی و سهیلی، ۱۹۹۹) واقع است.

این ناحیه در مرز بین حوضه‌های رسوبی - زمین‌ساختی البرز خاوری، کپه‌داغ و خاور ایران قرار گرفته و واحدهای مختلف سنگ‌شناسی آن در زمان‌های مختلف متأثر از شرایط آب و هوایی و رسوبگذاری آنها بوده و مجموعه قابل توجهی از نهشته‌های رسوبی را در منطقه برجای گذاشته است. رخنمون‌های سنگی متعلق به پالئوزویک و مزوزویک در محدوده کوه زو گسترش دارد و در منطقه جاجرم نهشته‌های سنوزویک به صورت رسوبات تخریبی و تبخیری و بالاخره آذرین در قسمت جنوبی‌تر قابل مشاهده است. قدیمی‌ترین نهشته‌های موجود در منطقه جاجرم متعلق به دونین پیشین است (سازند پادها). در این منطقه سازند شمشک با ناپوستگی فرسایشی بر روی سازند الیکا قرار گرفته است و افق بوکسیت مورد نظر با چهار بخش لایه رسی زیرین، بوکسیت شیلی، بوکسیت سخت و کائولینیت بالایی بین این دو سازند تشکیل شده است (شکل ۲). بوکسیت جاجرم به رنگ‌های سرخ، خاکستری، سبز و برخی رنگ‌های دیگر دیده می‌شود (شکل ۳). انواع شیلی آن نرم و دارای لمس صابونی بوده و گاه آثار لایه‌بندی از خود نشان می‌دهند و به طور عمده از کائولینیت، هماتیت و

سنگین محتوی Ti, Zr, Nb و ... از کانی‌های سبک آلومینیم‌دار کائولینیت و بوهمیت می‌شود.

به علت طبیعت تخریب کارستی که در طی آن هر دو نوع هوازدگی شیمیایی و مکانیکی فعال هستند، تشخیص منشأ رسوبات تخریبی رسی که به بوکسیت تبدیل شده‌اند در این نوع از بوکسیت‌ها دشوار است. منشأ این رسوبات تخریبی در بوکسیت‌های کارستی به‌طور عمده سنگ‌آهک‌های رسی مناطق کم ژرفای دریایی که به صورت سنگ بستر بوکسیت درآمده‌اند، رسوبات رودخانه‌ای حاصل از فرسایش مناطق چین‌خورده و خاکسترهای آتشفشانی هستند (MacLean et al., 1997). (MacLean (1990) به منظور تشخیص همگن بودن و یا منشأ ناهمگن سنگ منشأ بوکسیت‌ها از تغییرات بعضی از عناصر کمیاب کم تحرک در برابر آلومینیم و تیتانیم استفاده کرد.

به عقیده این محقق در صورتی که سنگ‌های منشأ همگن باشند، یک روند خطی برای هر یک از زوج عناصر کم تحرک ایجاد می‌شود و اگر یک یا چند منشأ ناهمگن در تشکیل بوکسیت مؤثر باشند، ممکن است توزیع نامنظمی از عناصر ایجاد شود. هر چهار لایه رسی زیرین، بوکسیت شیلی، بوکسیت سخت و لایه رسی بالای بوکسیت جاجرم در نمودارهای تغییرات Zr, Nb و Th در مقابل TiO_2 , Th و Zr, Nb در برابر Al_2O_3 (شکل‌های ۴ و ۵) از یک روند خطی واحد پیروی نموده و بنابراین به احتمال یک منشأ همگن مشترک دارند.

همچنین توریم و اسکاندیم و تا حدودی کروم و کبالت از عناصری هستند که انحلال‌پذیری بسیار کمی داشته و مشخصات شیمیایی سنگ منشأ را نشان می‌دهند و به همین دلیل، در تعیین منشأ، کاربرد زیادی دارند (McLennan et al., 1980; Rollinson, 1993). La و Th در سنگ‌های اسیدی نسبت به سنگ‌های بازی فراوانی بیشتری دارند و عکس این مسئله برای عناصر Sc و Co صادق است. بنابراین نسبت‌های La/Sc, Th/Sc و La/Co در تعیین منشأ مفید بوده (Taylor & McLennan, 1985) و می‌توان انتظار داشت که غنی‌شدگی عناصر ناسازگار نسبت به عناصر سازگار (برای مثال غنی‌شدگی LREE و مقدار بالای Th/Sc) نشان‌دهنده ترکیب نسبتاً "فلسیک سنگ منشأ" باشد (McLennan et al., 1993; Cullers & Berendsen, 1998). در شکل ۶ نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار مثلثی La-Th-Sc که توسط González López et al. (2005) برای تعیین منشأ رسوبات ارائه شده تصویر شده است؛ همانطور که ملاحظه می‌شود بوکسیت‌های شیلی در محدوده سنگ‌های با منشأ فلسیک و بوکسیت‌های سخت نیز تقریباً در محدوده سنگ‌های با منشأ بازی قرار می‌گیرند. از آنجا که لانتانیم در بوکسیت‌ها از عناصر متحرک به شمار می‌آید، لذا انتظار می‌رود که این عنصر بتواند از بوکسیت‌های سخت شسته شده و در بوکسیت‌های

صورت سیستماتیک برداشت شد. پس از مطالعه ۱۲۰ مقطع نازک تهیه شده از این نمونه‌ها، ۳۲ نمونه انتخاب و در آزمایشگاه Actlabs کشور کانادا به روش ICP-MS و ICP-MS برای عناصر اصلی و جزئی تجزیه شیمیایی شدند (جدول ۱). همچنین بر روی همین تعداد نمونه، آزمایش XRD در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد تا از این راه منشأ کانسار بوکسیت جاجرم و لایه‌های رسی در برگیرنده آن بررسی شود.

۴- منشأ کانسار بوکسیت جاجرم

۴-۱- افق بوکسیتی

مشاهدات صحرائی در منطقه جاجرم، گویای توسعه و پیشرفت فرایند کارستی شدن بر روی سنگ بستر کربناتی در محدوده کانسار بوکسیت جاجرم است که در نگاه اول و از دیدگاه صحرائی، منشأ کارستی را برای این کانسار تداعی می‌کند. از طرفی حضور کانی‌های فلدسپاتی در برخی از نمونه‌ها (مانند نمونه A017 در جدول ۱) نیز احتمال تأثیر کانی‌های سیلیکاتی را در شکل‌گیری و تکامل بوکسیت جاجرم تقویت می‌کند.

عناصر نامتحرک به دلیل مقاومتی که در برابر عوامل هوازدگی از خود نشان می‌دهند، در مقایسه با دیگر عناصر می‌توانند ویژگی‌های بیشتری از سنگ منشأ اولیه را بازگو نمایند. عناصر HFSE مانند Zr, Hf, Y, Nb و Ti در محیط‌های رسوبی به نسبت نامتحرک هستند و بنابراین برای تعیین منشأ می‌توانند مفید باشند (Taylor and McLean, 1985). از آنجا که عناصر HFSE در طی تبلور و عمل ذوب بخشی، ترجیحاً وارد بخش مذاب می‌شوند (Feng & Kerrich, 1990)، بنابراین سنگ‌های فلسیک در مقایسه با سنگ‌های مافییک از عناصر HFSE غنی می‌شوند. همچنین عناصر خاکی کمیاب نیز در بسیاری از رسوبات برای تعیین منشأ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Ronov et al., 1972, 1974; Roaldset, 1973; Wildeman & Condie, 1973; Cullers et al., 1979, 1988). دو عنصر تیتانیم و زیرکیم از عناصر نامتحرک در بوکسیت‌ها هستند که بر اثر فرایندهای هوازدگی در واحدهای بوکسیتی متمرکز می‌شوند. تغییرات TiO_2 در برابر Zr (شکل ۴) نشان‌دهنده روند واحدی در تمامی واحدهای کائولینیت بالایی (K_2)، بوکسیت سخت (H.B)، بوکسیت شیلی (Sh.B) و لایه رسی زیرین (K_1) کانسار بوکسیت جاجرم است. همچنین عناصر نامتحرک Zr, Nb, Cr, Th و V نیز همبستگی مثبت خوبی را با Al_2O_3 و TiO_2 نشان می‌دهند (شکل ۵). پراکندگی اندکی که در بعضی از این نمودارها دیده می‌شود نیز می‌تواند به عوامل مختلفی مانند تحرک اندک این عناصر، ناهمگن بودن سنگ منشأ و جدایش مواد لاتریتی شده بر اثر عملکرد باد نسبت داده شود (MacLean et al., 1997). مورد اخیر باعث جدایش کانی‌های

می‌رود. بر اساس این نمودار، بوکسیت‌های سخت جاجرم در محدوده مرزی بوکسیت‌های با منشأ بازی و بوکسیت‌های با منشأ رسوبی قرار می‌گیرند، به طوری که بخشی از نمونه‌ها در محدوده منشأ بازی و برخی در محدوده سنگ‌های رسوبی واقع شده‌اند. از این نمودار چنین استنباط می‌شود که احتمالاً منشأ رسوبی نیز تا حدودی در شکل‌گیری این نهشته نقش داشته‌اند.

همچنین از روندهای موجود در خاکی کمیاب نیز برای مشخص کردن ترکیب سنگ منشأ استفاده می‌شود (González López et al., 2005). سنگ‌های بازی الگوهای بهنجار شده کندریتی کمتر تفریق یافته‌ای را نشان می‌دهند و نسبت‌های LREE/HREE پایین داشته و تقریباً فاقد بی‌هنجاری منفی یوروپیم است، در حالی که سنگ‌های اسیدی معمولاً الگوهای بهنجار شده کندریتی تفریق یافته‌تری را نشان داده و دارای بی‌هنجاری منفی یوروپیم هستند. این الگوها به‌طور عمده در رسوبات حاصل از تخریب این سنگ‌ها حفظ می‌شوند (Taylor & McLean, 1985; Cullers & Graft, 1983). شکل ۹ نمودار بهنجار شده کندریتی ترکیب‌های میانگین گرانیتی، دیابازها، ترکیب میانگین بخش بالایی پوسته قاره‌ای UCC (Upper Continental Crust) و بوکسیت سخت جاجرم را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود بوکسیت‌های سخت جاجرم بسیار شبیه به ترکیب متوسط UCC است با این تفاوت که در مقایسه با UCC، عناصر HREE به مقدار بیشتری در بوکسیت سخت متمرکز شده‌اند و عناصر HREE، (بجز Ce) نیز تا حدودی نسبت به ترکیب UCC تهی‌شدگی نشان می‌دهند. این مسئله با توجه به پتانسیل یونی بالاتر عناصر HREE نسبت به LREE قابل توجیه است، زیرا عناصر LREE به دلیل پتانسیل یونی پایین‌تر به مقدار بیشتری از بوکسیت‌های سخت شسته شده و در بخش بوکسیت‌های شیلی متمرکز شده‌اند ولی عناصر HREE به دلیل تحرک کمتر در مقایسه با عناصر LREE به مقدار کمتری از بوکسیت‌های سخت شسته شده‌اند. همین مسئله باعث شده است تا مقدار عناصر خاکی کمیاب در بوکسیت‌های شیلی بیشتر از بوکسیت‌های سخت باشد ولی به دلیل شستشوی بیشتر عناصر LREE، این عناصر در مقایسه با عناصر HREE به نسبت بیشتری در بوکسیت شیلی متمرکز شده‌اند.

بنابراین بر اساس نمودارهای رسم شده در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان چنین گفت که علاوه بر تأثیر یک ترکیب بازی اولیه (شکل‌های ۶ و ۷)، سنگ‌های رسوبی با منشأ قاره‌ای نیز در تکامل بوکسیت جاجرم نقش داشته‌اند.

نحوه تفکیک بوکسیت شیلی و بوکسیت سخت: یکی از موضوعات مهم در بررسی روند تکاملی بوکسیت جاجرم، مطالعه نحوه تکامل و تشکیل اقله‌های مختلف موجود در این کانسار است. در قسمت قبل بیان شد که به طور کلی اقله بوکسیتی دارای یک منشأ همگن اولیه بوده که متعاقباً و در طی

شیلی متمرکز شده باشد و بنابراین قرارگیری بوکسیت‌های شیلی در محدوده سنگ‌های فلسیک در این نمودار، دلیل بر فلسیک بودن منشأ آنها نبوده بلکه می‌تواند دلیلی بر شستشو در منشأ اولیه باشد. بوکسیت‌های سخت نیز از محل مربوط به سنگ‌های بازالتی کمی دور شده و به سمت قطب توریم نزدیک شده‌اند. در بوکسیت‌های سخت جاجرم عنصر اسکاندیم در مقایسه با دیگر عناصر نا متحرک (از جمله توریم) در بخش بوکسیت‌های شیلی به نسبت بیشتری متمرکز شده است، به طوری که متوسط تمرکز این عنصر در دو بخش بوکسیت سخت و شیلی تقریباً برابر است (تقریباً ۴۲ ppm) (به‌رغم اینکه متوسط تمرکز عنصر Sc در هر دو بخش بوکسیت سخت و شیلی با هم برابر است ولی شکل ۶ خلاف این موضوع را نشان می‌دهد (به عبارت دیگر به نظر می‌رسد تمرکز Sc در بوکسیت سخت بیشتر از بوکسیت شیلی است). علت این مسئله آنست که در این شکل موقعیت نمونه‌ها تابعی از تمرکز نسبی سه عنصر La, Th و Sc در مقایسه با یکدیگر است و نه تمرکز مطلق آنها در نمونه‌های مختلف) ولی توریم به دلیل تحرک پایین، بیشتر در بوکسیت‌های سخت متمرکز شده است. بنابراین در مقایسه با منشأ اولیه بوکسیت، نسبت Th/Sc در بوکسیت‌های سخت افزایش یافته است و همین مسئله باعث شده تا در نمودار فوق محل بوکسیت‌های سخت تا حدودی به قطب توریم نزدیک و از قطب اسکاندیم دور شود.

بنابراین اگر چه نمودار شکل ۶ در اصل برای سنگ‌های رسوبی در نظر گرفته شده است ولی با کمی احتیاط و با در نظر گرفتن میزان تحرک عناصر لانتانیم، توریم و اسکاندیم در نهشته‌های بوکسیتی، می‌توان از آن برای تعیین منشأ این گونه نهشته‌ها نیز استفاده نمود و چنین ادعان داشت که منشأ اولیه بوکسیت‌های جاجرم عمدتاً دارای ترکیب بازی بوده است. (Schroll & Sauer, 1968) نیز به منظور بررسی منشأ بوکسیت‌ها از نمودار تغییرات کروم در برابر نیکل استفاده کردند (شکل ۷). به اعتقاد این محققان، مقدار عناصر کمیاب در بوکسیت‌های لانتانیتی مستقیماً به ترکیب سنگ منشأ وابسته است ولی بوکسیت‌های کارستی تغییرات کمتری را در میزان عناصر کمیاب نشان می‌دهند که این مسئله با چند منشأ بودن این سنگ‌ها همخوان است. این امر با فرضیه‌های زایشی بوکسیت‌های کارستی که بر اساس آن محیط تقریباً کربناتی این نهشته‌ها، نقش تعدیل‌کننده بر غنی‌سازی و تهی‌شدگی عناصر کمیاب دارند (Bardossy, 1982) نیز سازگار است. بر اساس این نمودار، بوکسیت‌های سخت جاجرم در محدوده بوکسیت‌های کارستی و یا نزدیک به آن قرار گرفته و ترکیب آنها از نظر مقدار عناصر نیکل و کروم به سنگ‌های بازالتی شبیه است.

شکل ۸ نموداری را نشان می‌دهد که بر اساس میزان عناصر زیرکیم، نیکل، کروم و گالیم طراحی شده و به منظور تعیین منشأ بوکسیت‌ها به کار

نشان‌دهنده زهکشی افقی (زهکشی به موازات سنگ بستر کربناتی) در این لایه است که باعث بوکسیتی شدن بخش کوچکی از بوکسیت‌های شیلی شده است.

بر اساس معادله شماره ۱، حذف کانی کلریت و شستشوی سیلیس، با تشکیل کانی‌هایی همچون کائولینیت، هماتیت و مقادیر کمی آاناتاز همراه است (MacLean et al., 1997) که در مرحله بعد با شستشوی بیشتر سیلیس (مطابق معادله ۲)، کانی‌های بوکسیتی تشکیل می‌شوند. نمونه A025 نیز که از کانی‌های هماتیت، کائولینیت و آاناتاز تشکیل شده است احتمالاً بر اثر واکنش شماره ۱ و از بین رفتن کلریت و شستشوی نسبی سیلیس ایجاد شده است. در برخی از نمونه‌ها مانند نمونه شماره A009 که کانی دیاسپور نیز در آن دیده شده است، احتمالاً بر اثر شرایط زهکشی بهتر و پیشرفت واکنش ۲ چنین ترکیب کانی‌شناسی (جدول ۲) حاصل شده است. با تداوم شرایط زهکشی در برخی قسمت‌های لایه رسی و به دنبال آن پیشرفت واکنش ۲ نمونه‌هایی همچون نمونه A001 ایجاد شده‌اند که دارای مقدار زیادی کانی دیاسپور بوده و تا ۵۸٪ از Al_2O_3 غنی شده‌اند.

اگر در بین نمونه‌های جدول ۲، دو نمونه A001 و A009 را به دلیل اینکه کانی اصلی آنها دیاسپور است به عنوان نمونه‌هایی در نظر بگیریم که بیشتر از دیگران شسته شده‌اند، انتظار می‌رود که این نمونه‌ها نسبت به دیگر انواع موجود در جدول ۲ از عناصر نامتحرک غنی شده باشند. در جدول ۳ مقدار تمرکز برخی از عناصر کم تحرک آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود دو نمونه A001 و A009 نسبت به دیگر نمونه‌ها تقریباً از عناصر نامتحرک غنی شده‌اند که این امر حاکی از شرایط زهکشی بهتر در آنها بوده است.

۴-۳- لایه کائولینیت بالایی

برخلاف لایه رسی زیرین، لایه کائولینیتی بالایی ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی تقریباً یکنواختی دارد. جدول ۴ ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌هایی از این لایه را بر اساس تجزیه XRD نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تقریباً در همه نمونه‌ها کائولینیت کانی اصلی است و دیگر کانی‌ها نسبت به کائولینیت در اقلیت هستند. سیلیسیم به دلیل تشابه شیمیایی با آلومینیم، به آسانی با کانی‌های آلومینیم‌دار واکنش می‌دهد، کانی‌های آلومینوسیلیکاتی ثانویه نیز که عمدتاً شامل کائولینیت، متاهالوویت و هالوویت هستند بدین شکل تشکیل می‌شوند. بر اساس مطالعات (Yariv & Cross (1974 بهترین شرایط برای تشکیل این کانی‌ها در pH=4 مهیا است که منجر به تشکیل کائولینیت‌های ثانویه با درجه تبلور بسیار بالا می‌شود. کانی‌های جدید به صورت رگچه‌ها و غشاهایی در بوکسیت‌ها و خرده‌های بوکسیتی

و بر روی سنگ بستر کربناتی قرار دارد و عمدتاً از کانی‌های رسی نوع کائولینیت، ایلیت و به مقدار کمتری هماتیت و کوارتز تشکیل شده است. این لایه در قسمت‌های مختلف خود از لحاظ سنگ‌شناسی و ترکیبی، یک ناهمگونی نشان می‌دهد به طوری که برای مثال در نمونه A001 از همین لایه، دیاسپور کانی اصلی و دارای حدود ۵۸٪ Al_2O_3 و تنها ۸/۵٪ SiO_2 است (جدول ۱). نمونه شماره A005 نیز مربوط به بخش دیگری از این لایه است که عمدتاً از کانی رسی ایلیت و تا حدودی کانی‌های هماتیت و کوارتز تشکیل شده است. همچنین در برخی از نمونه‌های تجزیه شیمیایی شده از قبیل نمونه A025، کائولینیت کانی اصلی به شمار می‌آید (جدول ۲). تفاوت در ترکیب این لایه را می‌توان ناشی از تفاوت در شرایط حاکم بر بخش‌های مختلف آن دانست، به طوری که برای مثال در نمونه A001 شرایط زهکشی و سایر عوامل مؤثر در تشکیل بوکسیت به گونه‌ای بوده‌اند که یک لایه بوکسیتی با عیار بالا ایجاد گردد ولی در بخش‌های دیگر شرایط برای تشکیل یک لایه رسی غیر کائولینیتی و یا یک لایه رسی کائولینیتی مهیا بوده است.

جدول ۲ وضعیت کانی‌شناسی حاصل از نتایج تجزیه XRD این لایه که دارای واحدهای سنگی مختلف می‌باشد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که گفته شد به نظر می‌رسد که تفاوت‌های کانی‌شناسی مشاهده شده در این جدول عمدتاً ناشی از شرایط متفاوت زهکشی حاکم بر این لایه نازک بوده است. تصور می‌شود که زهکشی بالا باعث تبدیل بوکسیت‌های شیلی به یک لایه بوکسیتی نازک و پرعیار شده است ولی در بخش‌های دیگر که عمل زهکشی ضعیف بوده است در بخش بالایی سنگ کربناتی، بوکسیت‌های رسی به یک لایه رسی غیر بوکسیتی تبدیل شده‌اند که البته ممکن است تا حدودی دارای کانی‌های بوکسیتی نیز باشند. بنابراین به نظر می‌رسد که این لایه در اصل جزئی از لایه بوکسیت شیلی باشد که به دلیل شرایط حاکم بر بخش بالایی سنگ کربناتی بدین شکل در آمده است. شکل ۱۰ نیز که نمودار بهنجار شده کندریتی لایه رسی زیرین و بوکسیت‌های شیلی را نشان می‌دهد گویای شباهت غیر قابل انکاری است که بین این دو لایه دیده می‌شود.

به طور کلی به نظر می‌رسد که دو عامل در تکامل لایه رسی زیرین و تمایز آن از بوکسیت شیلی مؤثر بوده است: نخست، تماس مستقیم این لایه با سنگ بستر کربناتی است که باعث ایجاد شرایطی متفاوت با شرایط حاکم بر بوکسیت‌های شیلی شده است و عامل دیگر، نحوه زهکشی و حرکت سیال‌ها در این لایه است، برای مثال اگر ترکیب بوکسیتی که به‌طور مستقیم بر روی سنگ بستر کربناتی قرار گرفته است (برای مثال نمونه A001) بر اثر زهکشی قائم حاصل شده باشد، باید بوکسیت‌های شیلی این منطقه نیز خود به بوکسیت‌های پرعیار تبدیل شده باشند، ولی حضور بوکسیت‌های شیلی

همچنین گفته شد که ممکن است منشأ اولیه بوکسیت‌ها همگن یا ناهمگن باشند که در ارتباط با نهشته جاجرم، بیشتر وجود یک ترکیب اولیه همگن محتمل‌تر است (شکل‌های ۴ و ۵). ترکیب همگن اولیه به تدریج بر اثر عوامل مختلف، که مهم‌ترین آن تفاوت در میزان زهکشی و عملکرد سنگ بستر کربناتی است دستخوش تغییر شده و به همین دلیل، چهار لایه مختلف از ترکیب همگن اولیه حاصل شده است. در طی این تغییرات بوکسیت‌های سخت در حال تهی شدن و بوکسیت‌های شیلی در حال غنی شدن نسبی از عناصر متحرک بوده‌اند. در این فرایند، بخشی از عناصر Al و K, Si, Fe, Mg که از بخش‌های بالایی شسته شده‌اند، به سمت بخش‌های رسی زیرین حرکت کرده و در این بخش به شکل کانی‌های ایلیت، همتیت، کوارتز یا سیلیس نامتبلور رسوب می‌کنند (MacLean et al., 1997). بنابراین زمانی که در بخش‌های بالایی نهشته، کانی‌های بوکسیتی در حال تشکیل بوده‌اند، مقادیر کمی از کانی‌های رسی در حال اضافه شدن به بخش‌های زیرین بوده و این اجزای دوباره رسوب یافته، بافت‌ها و ویژگی‌های جدیدی را به بخش بوکسیت شیلی اضافه کرده‌اند. در لایه رسی زیرین (برای مثال نمونه‌های A005 و A021) این عامل در تشکیل کانی‌های ایلیت، همتیت و کوارتزی تأثیر نبوده و مهاجرت عناصر فوق به بخش‌های زیرین و عدم زهکشی مناسب در این بخش‌ها، باعث تشکیل این کانی‌ها شده است. در خصوص لایه کائولینیتی بالایی نیز بیشتر به نظر می‌رسد که شستشو و انتقال سیلیس از ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک به افق بوکسیتی، موجب شکل‌گیری این لایه بر قسمت بالایی افق بوکسیتی شده است.

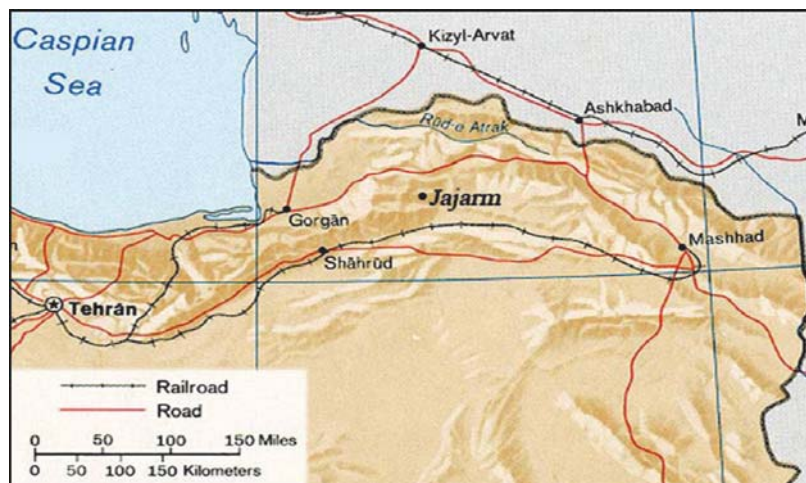
سپاسگزاری

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 می‌شود. همچنین این پژوهش از حمایت و همکاری صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (طرح شماره ۸۴۱۲۴) و شرکت آلومینای ایران نیز برخوردار شده است که بدین وسیله از آنها قدردانی می‌شود.

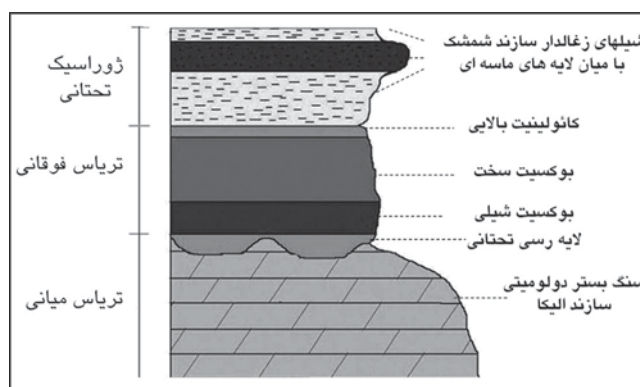
موجود در خمیره کائولینیتی تشکیل می‌شوند (Valeton, 1974). در برخی از نهشته‌ها نیز کائولینیت ثانویه به طور کامل و با سترایی در حدود ۴-۱ متر قشر بالایی بوکسیت‌ها را می‌پوشاند. مرز زیرین این لایه‌های سیلیسی شده نامنظم ولی بسیار ناگهانی است. بنابراین شاید بتوان لایه کائولینیت بالایی را حاصل شسته شدن سیلیس از لایه‌های بالایی (سازند شمشک) و نهشته شدن آن در بخش بالایی بوکسیت دانست که موجب کائولینیتی شدن کانی‌های آلومینیم‌دار اولیه شده‌اند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

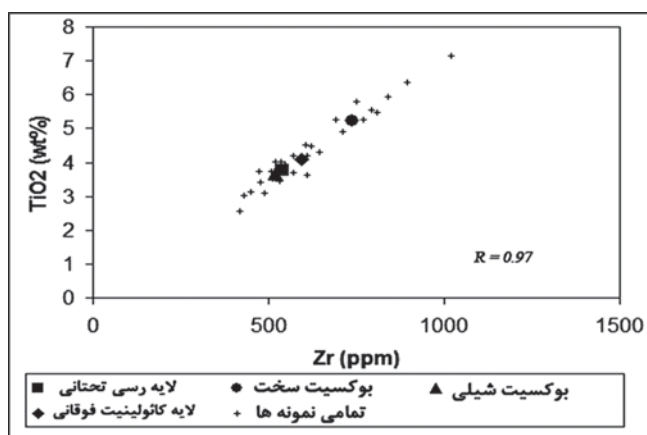
بر خلاف بوکسیت‌های لاتریتی که در بسیاری از مواقع منشأ مشخصی دارند، منشأ بوکسیت‌های کارستی تنوع بیشتری داشته و ترکیب‌های مختلفی همچون مواد با منشأ آذرین، رسوبی و حتی ناخالصی‌های آلومینیم‌دار موجود در سنگ بستر کربناتی و یا ترکیبی از چندین منشأ متفاوت، می‌تواند عامل مؤثری در تشکیل و تکامل این نوع از نهشته‌های بوکسیتی باشند. در تکامل نهشته بوکسیت جاجرم نیز به نظر می‌رسد که بیش از یک منشأ نقش داشته است. شکل‌های ۶ و ۷ منشأ بازی و شکل ۸ ترکیبی از سنگ‌های بازی و رسوبی و شکل ۹ یک منشأ قاره‌ای را به عنوان مواد اولیه بوکسیت جاجرم معرفی می‌کند. سنگ‌های بازی احتمالاً واحد ملافیبری موجود بر روی سازند الیکا بوده‌اند که در نقاط مختلف البرز در حدفاصل سازندهای الیکا و شمشک رخنمون دارند. اگرچه در محل معدن جاجرم اثری از این ملافیبرها دیده نمی‌شود ولی به سمت باختر در نواحی شه‌میرزاد و فیروزکوه، ملافیبرهای در حال دگرسانی به بوکسیت به طور واضح قابل مشاهده‌اند. در مقیاس ناحیه‌ای نیز چنانچه وسعت نهشته بوکسیتی زیاد باشد، روندهای مشخصی قابل مشاهده است که علت آن تغییر شرایط آب و هوایی (عمدتاً میزان بارندگی)، ارتفاع و ترکیب سنگ منشأ است (Bardossy & Aleva, 1990). از آنجاکه در شمال ایران، واحد ملافیبری یاد شده گسترش زیادی دارد، بنابراین می‌توان انتظار داشت که این واحد ملافیبری اولیه تحت تأثیر شرایط محیطی، دستخوش تغییرات متفاوتی شده است که نتیجه آن از بین رفتن کامل این سنگ‌ها در ناحیه جاجرم بوده است. در حین تشکیل بوکسیت، مواد رسوبی دیگری نیز که منشأ قاره‌ای داشته‌اند به توده‌های بازی اولیه اضافه شده و باعث شده‌اند بوکسیت‌های حاصل، ویژگی سنگ‌های رسوبی را نیز تا حدودی نشان دهند. مطالعات رحیم‌پوربناب و اسماعیلی (۱۳۸۶) نیز نشان می‌دهد که این توده نابرجا بوده و ترکیب‌های بازی اولیه از نواحی اطراف جابه‌جا شده و در نهایت به محل فعلی انتقال یافته‌اند.



شکل ۱ - موقعیت شهر جاجرم در نقشه جغرافیایی شمال خاور ایران. این نقشه خطوط سرخ رنگ موقعیت راه‌ها و خط چین‌های سیاه شبکه راه آهن را نشان می‌دهند.



شکل ۲- ستون چینه شناسی منطقه (رحیم پوریناب و اسماعیلی، ۱۳۸۵)



شکل ۴- نمودار TiO_2 (wt%) در برابر Zr (ppm) به همراه ترکیب میانگین هر یک از سنگ ها. مقدار R میزان ضریب همبستگی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از معدن بوکسیت جاجرم، سنگ بستر دولومیتی الیکا به رنگ روشن و افق بوکسیتی به رنگ تیره دیده می‌شود



جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی ۳۲ نمونه اکسیدهای عناصر اصلی و عناصر کمیاب کانسار بوکسیت جاجرم

sample	بوکسیت شیبی												لایه رسی نحتلی				
	A036	A006	A010	A013	A015	A017	A019	A022	A026	A029	A031	A001	A005	A009	A021	A025	
wt%																	
SiO2	29	30	26	18	28	28	25	24	31	24	35	9	38	29	45	37	
Al2O3	36	30	27	33	38	33	38	43	39	29	30	58	29	47	35	30	
MgO	0.6	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	0.3	0.1	0.5	0.3	0.5	0.4	
TiO2	3	4	3	4	4	4	4	4	5	3	3	6	3	5	3	3	
P2O5	0.10	0.19	0.08	0.16	0.12	0.14	0.14	0.13	0.08	0.07	0.17	0.19	0.22	0.12	0.16	0.14	
ppm																	
Ba	35	102	40	57	56	66	63	148	32	32	173	14	177	46	146	1041	
Sr	272	946	311	542	412	453	672	629	383	305	780	1209	1158	523	759	509	
Y	21	83	89	42	22	108	57	60	22	83	65	67	87	70	77	95	
Zr	42	40	42	57	39	50	45	43	38	35	31	40	32	41	31	35	
Sc	417	511	417	474	532	570	572	546	607	488	476	838	430	712	530	450	
V	350	411	574	516	485	522	453	396	497	428	423	736	442	496	492	453	
Cr	155	108	141	96	129	156	139	149	176	202	132	288	112	215	152	119	
Ni	178	112	147	78	69	118	119	154	30	114	134	121	61	92	118	109	
Zn	63	-	78	-	39	124	-	66	36	-	39	-	39	-	39	52	
Ga	58	39	29	50	35	42	48	45	44	42	31	68	33	56	31	41	
Rb	11	9	7	14	4	11	10	43	17	10	34	25	141	78	138	67	
Nb	104	102	93	117	130	140	126	118	132	113	99	148	95	158	117	96	
Sn	5	5	5	6	6	6	6	6	6	5	6	4	5	7	6	7	
La	225	183	84	191	234	268	106	129	25	95	107	88	201	234	146	218	
Ce	1080	180	152	443	332	353	215	192	279	215	189	205	240	198	254	243	
Pr	44	34	24	36	26	58	27	40	7	26	30	30	71	66	46	68	
Nd	173	97	141	95	56	221	112	154	26	109	139	136	258	159	180	195	
Sm	35	17	46	16	7	45	23	29	5	25	29	31	42	18	29	28	
Eu	9	5	15	4	2	12	5	7	1	7	7	7	9	3	6	6	
Gd	23	16	47	11	5	40	16	24	4	23	23	18	23	14	19	23	
Tb	3	2	6	2	1	5	3	4	1	4	3	3	3	2	3	3	
Dy	13	13	27	11	5	23	14	20	3	19	14	14	15	15	17	19	
Ho	2	3	4	2	1	4	3	3	1	4	2	3	3	4	4	4	
Er	7	8	10	7	3	11	8	10	2	11	7	8	10	13	12	13	
Tm	1.0	1.1	1.3	1.0	0.5	1.3	1.6	-	2	1.6	1.1	1.2	1.5	2.3	1.8	2.1	
Yb	7	7	8	7	3	9	8	10	2	10	7	9	11	16	11	13	
Lu	1.1	1.0	1.0	1.0	-	1.3	1.3	1.6	-	1.5	1.0	1.2	1.6	2.3	1.7	2.1	
Th	20	20	19	20	23	25	22	26	25	21	21	31	21	31	22	22	

sample	بوکسیت سخت												کاتولینیت فونالی				
	A003	A007	A011	A014	A016	A018	A020	A023	A027	A030	A032	A004	A008	A012	A024	A028	
wt%																	
SiO2	11	10	29	7	4	6	28	18	19	42	6	39	36	32	34	36	
Al2O3	49	42	34	56	47	50	40	37	36	36	44	33	31	32	30	31	
MgO	0.5	0.5	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2	0.9	1.0	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	
TiO2	5	6	4	7	5	6	4	6	4	4	5	4	4	4	4	4	
P2O5	0.05	0.10	0.03	0.08	0.15	0.14	0.02	0.10	0.08	0.01	0.06	0.04	0.02	0.05	0.08	0.03	
ppm																	
Ba	21	2256	9	333	57	110	30	134	86	22	2666	925	184	62	108	41	
Sr	329	505	86	358	437	1054	87	229	329	71	332	181	68	237	165	103	
Y	53	41	16	49	19	54	35	56	28	17	23	14	30	24	19	23	
Zr	34	58	38	46	31	50	45	46	38	30	48	26	39	39	31	35	
Sc	809	792	527	1020	771	894	643	749	620	609	691	520	534	608	518	507	
V	501	581	607	705	526	692	549	551	482	448	549	408	403	482	412	402	
Cr	256	240	198	287	256	280	210	193	189	182	232	169	174	199	151	151	
Ni	71	87	42	125	-	35	81	94	69	-	-	25	101	24	37	44	
Zn	82	62	-	115	44	114	-	57	60	-	33	-	102	-	46	-	
Ga	61	62	41	68	52	68	41	49	49	28	51	34	33	42	29	37	
Rb	26	6	10	3	14	9	5	9	12	16	6	10	18	34	5	7	
Nb	155	156	111	181	155	175	134	163	140	109	154	105	126	110	116	119	
Sn	9	8	6	9	8	8	7	7	7	6	7	5	6	5	5	6	
La	13	26	23	21	8	19	18	128	26	4	23	10	6	52	11	14	
Ce	89	173	108	115	209	219	36	288	152	55	183	46	39	157	108	140	
Pr	3	6	4	2	1	4	2	4	24	6	1	6	2	2	8	2	4
Nd	12	21	12	19	8	37	18	84	25	4	22	7	11	21	11	16	
Sm	3	5	2	6	2	9	5	15	7	1	6	2	3	4	3	5	
Eu	1	2	1	2	1	2	1	4	2	-	2	0.4	1.2	1.0	0.9	1.5	
Gd	4	5	2	7	2	8	5	15	7	2	5	2	4	3	3	5	
Tb	1	1	-	1	-	1	2	1	-	1	-	0.3	0.8	0.6	0.6	0.7	
Dy	5	5	2	9	2	7	6	13	5	2	5	2	4	4	3	4	
Ho	1	1	1	2	1	1	2	1	-	1	-	0.4	0.8	0.8	0.6	0.7	
Er	3	3	2	5	2	4	3	7	3	1	3	1	2	2	2	2	
Tm	-	-	-	0.8	-	0.6	-	1.0	-	-	-	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	
Yb	3	3	2	5	2	3	3	6	2	1	3	1	2	3	2	2	
Lu	-	-	-	-	-	-	-	0.9	-	-	-	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	
Th	36	35	25	39	31	34	26	28	26	23	30	22	26	26	19	22	

جدول ۳- میزان تمرکز برخی از عناصر کم تحرک در لایه رسی زیرین.

شماره نمونه	Sc ppm	Zr ppm	V ppm	Cr ppm	Nb ppm	Th ppm	U ppm
A001	40.0	838.0	736.0	288.0	148.2	31.5	25.2
A009	41.0	712.0	496.0	215.4	157.7	31.1	19.6
A005	32.0	430.0	442.0	111.7	95.4	21.4	25.1
A021	31.0	530.0	492.0	152.5	116.7	22.2	9.8
A025	35.0	450.0	453.0	118.6	96.3	21.8	11.6

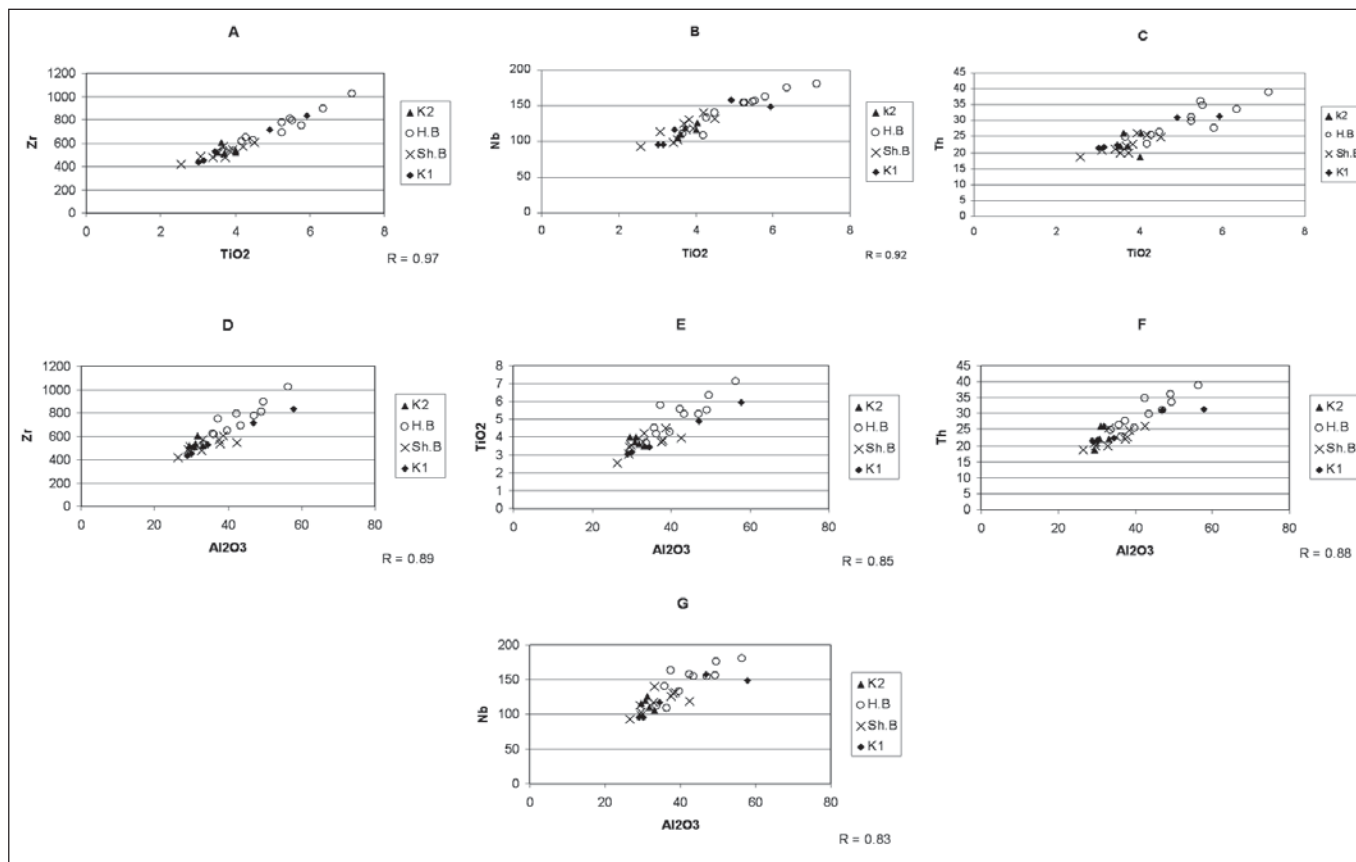
جدول ۲- کانی شناسی لایه رسی زیرین بر اساس نتایج تجزیه XRD. از

سمت چپ به راست درصد کانی ها کاهش می یابد.

شماره نمونه	کانی های تشکیل دهنده			
	دیاسپور	پیریت	آاناتاز	کانی های رسی
A001	دیاسپور	پیریت	آاناتاز	کانی های رسی
A005	ایلیت	هماتیت	کوارتز	-
A009	دیاسپور	کوارتز	ایلیت	کاتولینیت
A021	ایلیت	کوارتز	-	-
A025	هماتیت	کاتولینیت	آاناتاز	-

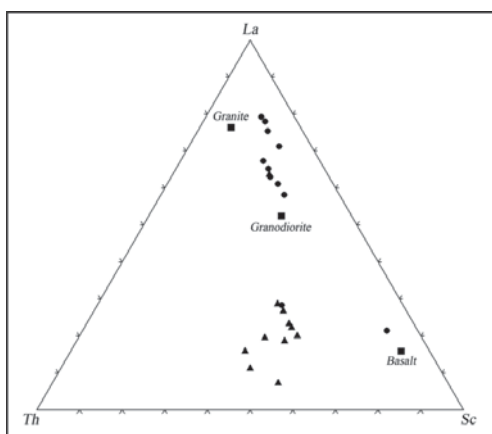
جدول ۴- نتایج تجزیه XRD برای نمونه های لایه کاتولینیت بالایی که بر روی بوکسیت سخت قرار گرفته است. از سمت چپ به راست درصد کانی ها کاهش می یابد.

شماره نمونه	کانی های تشکیل دهنده			
	کاتولینیت	هماتیت	دیاسپور	ژیپس
A004	کاتولینیت	هماتیت	دیاسپور	ژیپس
A008	کاتولینیت	آاناتاز	هماتیت	گوتیت
A012	کاتولینیت	ژاروسیت	-	-
A024	هماتیت	کاتولینیت	کلسیت	آاناتاز
A028	کاتولینیت	آاناتاز	هماتیت	کلسیت



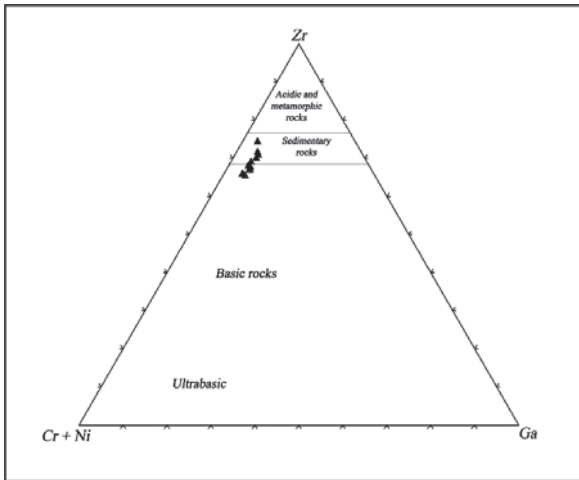
شکل ۵- نمودار هارکر برای برخی از عناصر در افق‌های مختلف بوکسیت جاجرم.

در این نمودارها کائولینیت بالای K_2 ، بوکسیت سخت با H.B، بوکسیت شیلی با Sh.B و لایه رسی زیرین با علامت K_1 مشخص شده است. مقدار ضریب همبستگی نیز با حرف R مشخص می‌شود. TiO_2 و Al_2O_3 بر حسب درصد وزنی و سایر عناصر بر حسب ppm است.

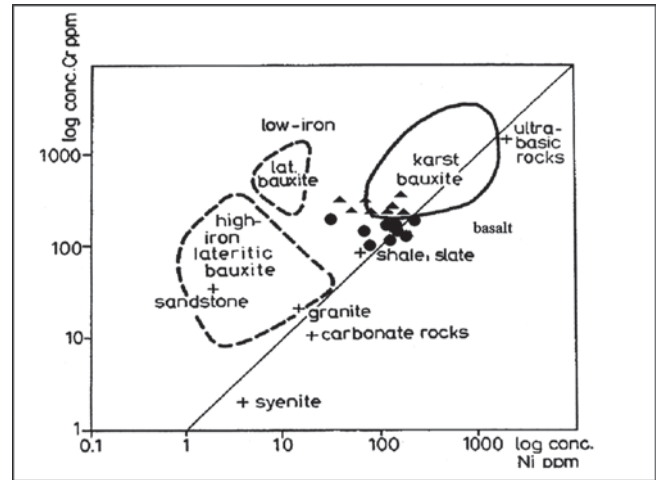


شکل ۶- نمودار سه تایی لانتانیم، توریم و اسکاندیم برای تعیین منشأ بوکسیت (González López et al., 2005) که بر روی آن موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه و ترکیب متوسط گرانیت‌ها، گرانودیوریت‌ها و بازالت‌ها تصویر شده است.

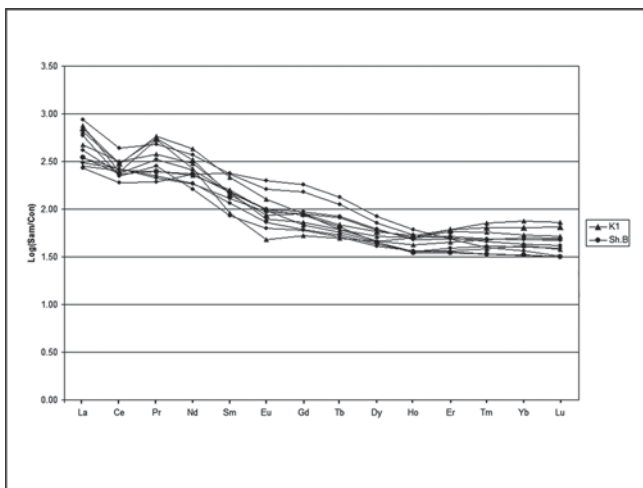
• بوکسیت شیلی ▲ بوکسیت سخت ■ ترکیب متوسط گرانیت، گرانودیوریت و بازالت



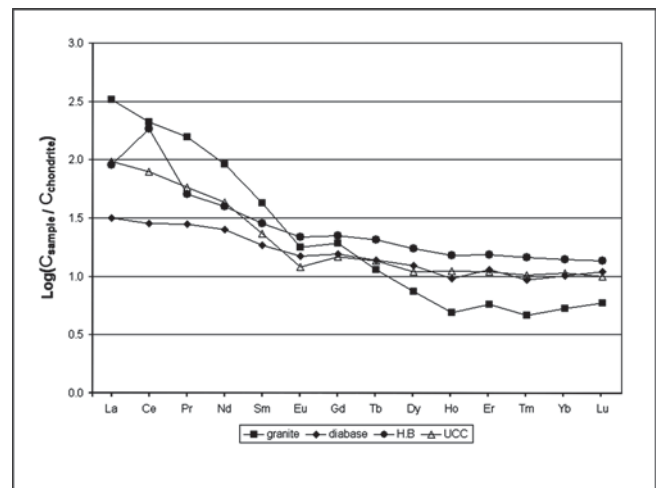
شکل ۸- نمودار سه گانه زیرکیم، گالیم و کروم- نیکل برای بوکسیت‌های با سنگ منشأ متفاوت، اقتباس از Balasubramaniam et al. (1986) و موقعیت نمونه‌های بوکسیت سخت جاجرم بر روی آن. از آنجا که این نمودار مخصوص نهشته‌های بوکسیتی است و بوکسیت‌های شیلی به طور کامل فرایند بوکسیتی شدن را طی نکرده‌اند. لذا در این نمودار فقط موقعیت بوکسیت‌های سخت نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمودار دوتایی Cr/Ni در بوکسیت‌های کارستی و لاتریتی و سنگ منشأهای متفاوت (Schroll and Sauer, 1968) و موقعیت نمونه‌های بوکسیت جاجرم بر روی آن.
▲ بوکسیت سخت • بوکسیت شیلی



شکل ۱۰- مقایسه نمودارهای بهنجار شده کندریتی بوکسیت شیلی و لایه رسی زیرین. در این نمودار محور قائم نشان دهنده نسبت لگاریتم غلظت عناصر خاکی کمیاب در نمونه به غلظت آنها در کندریت است. داده‌های مربوط به کندریت از Boynton (1984) اقتباس شده است. علامت Sh.B نشان دهنده بوکسیت‌های شیلی و K₁ نیز معرف لایه رسی زیرین است.



شکل ۹- نمودارهای بهنجار شده کندریتی بوکسیت‌های سخت در مقایسه با ترکیب میانگین پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) (Taylor & McLennan, 1981)، سنگ‌های گرانیتی و دیابازی (Dana, 1999). محور عمودی این نمودارها نسبت لگاریتم غلظت عنصر به لگاریتم غلظت همان عنصر در کندریت را نشان می‌دهد. ترکیب کندریتی در این نمودارها به اقتباس از Boynton (1984) و علامت H.B نشان دهنده بوکسیت سخت جاجرم است.

کتابنگاری

- اثنی عشری، ا.، ۱۳۸۵- "بررسی ژئوشیمیایی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرش ویژه به ژئوشیمی عناصر کمیاب" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، 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، شماره شصت و دو، صفحات ۱۳-۲.
- خیری، ف.، ۱۳۶۶- "بررسی تغییرات کانی شناسی بوکسیت و نحوه تشکیل آن در زون B بلوک گل‌بینی منطقه جاجرم". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم دانشگاه تهران، ۱۱۲ صفحه.
- رحیم‌زاده، ف.، ۱۳۷۶- نوع و مدل زایشی بوکسیت جاجرم. از گزارشات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رحیم‌پوربناب، ح.، اسماعیلی، ح.، ۱۳۸۶- کانی شناسی، پتروگرافی و ژنز کانسار بوکسیت جاجرم. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و سوم، شماره یک، صفحات ۱۲۳-۱۰۷.
- سهیلی، م.، سهندی، م. ر.، ۱۳۷۸- گزارش پشت نقشه برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سنخواست. تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Balasubramaniam, K.S., Surendra, M. & Ravikumar, T.V., 1986-Genesis of certain bauxite profiles from India. *Chemical Geology*. 60, 227-235.
- Bardossy, G., 1982- *Karst Bauxites: Bauxite Deposits on Carbonate Rocks*. Developments in Economic Geology, Elsevier. Vol. 14.
- Bardossy, G., 1984 - European bauxite deposits. In: Leonard Jacob Jr (ed), *Bauxite, Proc 1984 Bauxite Symposium*, Los Angeles, California. Society of Mining Engineers, New York, pp 411± 435
- Bardossy, G., Aleva, G.J.J., 1990- *Lateritic Bauxite*. ELSEVIER, 623p
- Boynton, w.v., 1984 - *Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies*. In: Henderson P.(ed.), *Rare earth element geochemistry* Elsevier, 63-114.
- Comer, J.B., 1974 - *Genesis of Jamaica bauxite*, *Economic Geology*. 69, 1251-1264.
- Cullers, R.L., Berendsen, P., 1998- *The provenance and chemical variation of sandstones associated with the Mid-continent Rift System, USA*. *Eur. J. Mineral*. 10, 987-1002.
- Cullers, R.L., Chaudhuri, S., Kilbane, N., Koch, R., 1979- *Rare earths in size fractions and sedimentary rocks of Pennsylvanian-Permian age from the mid-continent of the USA*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 1285- 1301.
- Cullers, R.L., Basu, A., Suttner, L., 1988- *Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholite, Montana, USA*. *Chem. Geol*. 70, 335- 348.
- Cullers, R.L., Graf, J., 1983- *Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and silicic rocks, ore petrogenesis*. In: Henderson, P. (Ed.), *Rare-Earth Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. 275- 312.
- Dana, J.D., 1999- *Manual of mineralogy*. Revised 21th edition. John Wiley and sons, INC.
- Eliopoulos, D.G., Economou-Eliopoulos, M., 2000. *Geochemical and mineralogical characteristics of Fe-Ni- and bauxitic-laterite deposits of Greece*. *Ore Geology Reviews* 16, 41-58.
- Feng, R., Kerrich, R., 1990- *Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstones belt, Canada: implications for provenance and tectonic setting*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 1061- 1081.

- Goldschmidt, V.M., 1937-The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J.chem. Soc.* 139, 655-675.
- González López, J.M., Bauluz, B., Fernandez-Nieto, C., Olite, A.Y., 2005- Factors controlling the trace element distribution in fine grained rocks: the Albian kaolinite- rich deposits of the Oliete Basin (NE Spain). *Chemical geology*, 214, 1-19.
- Gow NN., Lozej GP., 1993-Bauxite. *Geosci Can* 20: 9±16 Lyew-Ayee PA (1986) A case for the volcanic origin of Jamaican bauxites. *Proc Bauxite Symposium VI, 1986. J Geol Soc Jamaica* 9±39.
- Haskin, M.A. & Haskin L.A., 1966- Rare earths in European shales: a redetermination. *Science*. 154, 507-509.
- Lyew-Ayee, PA., 1986-A case for the volcanic origin of Jamaican bauxites. *Proc Bauxite Symposium VI, 1986. J Geol Soc Jamaica* 9±39.
- MacLean, W.H., Bonavia, F.F., Sanna, G., 1997- Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia. *Mineralium Deposita* 32, 607±616.
- McLennan, S.M., Nancy, W.B., Taylor, R., 1980- Rare earth element-thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, 1833– 1839.
- McLennan, S.M., Hemming, S.R., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993- Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, Spec. Pap. - Geol. Soc. Am., vol. 284, pp. 21–40.
- Maksimovic a and Pantób, 1990- Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece. *Geoderma*. 51, 93-109.
- Rollinson, H.R., 1993- Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, p. 352.
- Ronov, A.B., Balashov, Y.A., Girin, Y.P., Bratishko, R.K., Kazakov, G.A., 1972- Trends in rare-earth distribution in the \ sedimentary shell in the earth's crust. *Geochem. Int.* 9, 987–1016.
- Ronov, A.B., Balashov, Y.A., Girin, Y.P., Bratishko, R.K., Kazakov, G.A., 1974 - Regularities of rare earth distribution in the sedimentary shell and in the crust of the earth. *Sedimentology* 21, 171– 193.
- Schroll, E., Sauer D., 1964 - Ein Beitrag zur Geochemie der seltenen Elemente in Bauxiten. *Symp. Bauxites, Oxydes, Hydroxides d Aluminium*, 1963 Zagreb. I 201-225.
- Schroll, E., Sauer, D., 1968- Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molibdan in bauxitischen Gesteinen und das problem der stofflichen Herkunft des Aluminiums, *Travaux de l ICSOBA, Zagreb*. 5, 83-96.
- Taylor, G., Eggleton, T., 2004 - THE ORIGIN OF THE WEIPA BAUXITE. *Regolith*. 350-354.
- Taylor, G.R. & Hughes, G., 1975- Biogenesis of the Rennell bauxite, *Economic Geology*. 70, 542-546.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1981- The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Phil. Trans. R. Soc.*, A301, 381-399.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985- *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford. p. 312.
- Valeton, I., 1966- Sur la genese des gisements de bauxite du sud-est de la France, *Bulletin Societe Geologique de France*. 7, 685-701.
- Valeton, I., 1974 -Resilification at the top of the foreland bauxite in Suriname and Guyana. *Miner. Deposita*. 9, 169-173.
- Wildeman, T.R., Condie, K.C., 1973- Rare-earths in Archean greywackes from Wyoming and from Fig Tree Group, South Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 37, 439– 453.
- Yariv, S., Cross, H., 1979- *Geochemistry of Colloidd systems*. Springer Verlag, Berlin, 255 pp.