

Studies of Mineralogy and Geochemistry of Rare Earth Elements (REEs) in Permo-Triassic Bauxite Deposit, Northeast of Bukan, NW of Iran

A. Abedini¹, A. A. Calagari^{1,2}, B. Hadjalilu³, A. Jahangiri¹

1- Geology Department, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz 51664.

2- Research Institute for Fundamental Sciences (RIFS), Tabriz University, Tabriz 51664

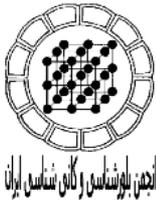
3- Geology Department, Payamnou University, Tabriz

E-mail: abedini2020@yahoo.com

(Received: 15/1/2008, in revised form: 12/7/2008)

Abstract: Bauxite deposit of Permo-Triassic age in northeast of Bukan was developed stratiformly along the boundary between Ruteh and Elika formations, and includes four distinct rock units. This deposit was affected by tectonic and morphological processes. Mineralogical and geochemical investigations showed that during weathering processes, two mechanisms of ferruginization and deferruginization played crucial role in formation of minerals such as diaspore, boehmite, hematite, goethite, kaolinite, pyrophyllite, clinocllore, illite, montmorillonite, anatase, rutile, albite, sanidine, quartz, and calcite in this deposit. By taking notice of field evidence and of mineralogical and geochemical data, the basalts (whose remnants are still present along the contact of this deposit with carbonate bedrock) are the potential parent rock of this deposit. The distribution pattern of REEs (normalized to chondrite and basaltic parent rock) along with anomaly variations of Eu, Ce, and $(La/Yb)_N$ indicates differentiation of LREEs from HREEs during bauxitization processes. Further geochemical considerations indicate that the concentrations of LREEs were occurred by hematite, goethite, manganese oxides, cerianite, and secondary phosphates (rhabdophane, vitusite, gorceixite, monazite) and of HREEs by clay minerals, rutile, anatase, zircon, euxenite, and fergusonite. Incorporation of the results obtained from mineralogical and geochemical investigations suggests that in addition to factors such as pH of weathering solutions, ionic potential, composition of the parent rock, and fixation by residual minerals, adsorption processes also played crucial role in enrichment of REEs during moderate to intense lateritization in the study area.

Keywords: Bauxite, parent rock, REEs geochemistry, deferruginization, host minerals, NE Bukan.



مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی عناصر خاکی کمیاب (REE) در نهشته بوکسیتی پرمو- تریاس شمال خاوری بوکان، شمال باختری ایران

علی عابدینی^۱، علی اصغر کلاگری^۲، بهزاد حاج علیلو^۳، احمد جهانگیری^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، کد پستی ۵۱۶۶۴

۲- موسسه تحقیقاتی علوم پایه، دانشگاه تبریز، تبریز، کد پستی ۵۱۶۶۴

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور تبریز

E-mail: abedini2020@yahoo.com

(دریافت مقاله ۸۶/۱۰/۲۵، نسخه نهایی ۸۷/۴/۲۲)

چکیده: نهشته بوکسیتی پرمو- تریاس شمال خاوری بوکان، به شکل چینه‌سان در مرز بین سازندهای روته و الیکا گسترش و تکامل یافته و شامل ۴ واحد سنگی مجزاء است. این نهشته تحت تاثیر فرایندهای زمین‌ساختی و ریخت‌شناسی قرار گرفته است. بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که در طی فرایندهای هوازدگی، دو ساز و کار آهن‌زدایی و آهن‌زایی نقش بارزی در تشکیل کانیهای دیاسپور، بوهمیت، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، پیروفیلیت، کلینوکلر، ایلیت، مونت‌موریلونیت، آاناتاز، روتیل، آلپیت، سانیدین، کوارتز، و کلسیت در این نهشته ایفا کرده‌اند. با توجه به شواهد صحرایی و یافته‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، بازالتها (که هنوز بقایایی از آنها در طول برخوردگاه این نهشته با سنگ بستر کربناته موجود است) سنگ مادر این نهشته هستند. الگوی توزیع REE (هنجار شده به کندریت و سنگ مادر بازالتی) همراه با تغییرات ناهنجاریهای Eu و Ce و $(La/Yb)_N$ ، تفکیک HREEها را طی فرایندهای بوکسیتی شدن نشان می‌دهند. ملاحظات ژئوشیمیایی بیشتر نشان می‌دهند که تمرکزهای LREEها با کانیهای هماتیت، گوتیت، اکسیدهای منگنز، Cerianite و فسفاتهای ثانویه (Vitusite, Rhabdophane, Monazite و Gorceixite)، و تمرکز HREEها با کانی‌های رسی، روتیل، آاناتاز، زیرکن، Euxenite و Fergusonite رخ داده‌اند. تلفیق نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی پیشنهاد می‌کنند که علاوه بر فاکتورهایی چون تغییرات pH آبگونی‌های عامل هوازدگی، پتانسیل یونی، ترکیب شیمیایی سنگ مادر و تثبیت در کانیهای مقاوم، فرایندهای جذب سطحی نیز نقش مهمی در غنی‌شدگی REEها طی لاتریتی شدن متوسط تا شدید در گستره مورد مطالعه ایفا کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بوکسیت، سنگ مادر، ژئوشیمی عناصر REE، آهن‌زدایی، کانیهای میزبان، شمال خاوری بوکان.

۱- مقدمه

قاعده مستثنی نبوده، و همواره مورد توجه زمین‌شناسان بوده است. بالکای و صمیمی [۱] به بررسی‌های چکشی برای شناسایی افقها و عدسیهای بوکسیتی در این منطقه پرداخته‌اند. حسامی [۲] ویژگیهای زمین‌شناسی نهشته یاد شده را به عنوان بخشی از رساله کارشناسی ارشد خود، از لحاظ فسیل-شناسی سنگهای درونگیر و کاربردهای صنعتی مورد بررسی

جنوب استان آذربایجان باختری از دیرباز به دلیل وجود نهشته‌های بوکسیتی مورد توجه پژوهشگران داخلی و خارجی بوده است. بخش شمال خاوری شهرستان بوکان به مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 23'$ تا $46^{\circ} 53'$ و $46^{\circ} 25'$ طول خاوری و $22^{\circ} 36'$ تا $36^{\circ} 22'$ عرض شمالی، نیز از این

و سنگ مادر احتمالی به روش‌های فلئورسانی پرتو X (XRF) و فعال‌سازی نوترونی (NAA) (جدول ۱) در عرض یکی از نیمرخهای نمونه‌برداری شده انتخاب و به ترتیب در شرکت کانساران بینالود و بخش مینیاتوری سازمان انرژی اتمی اصفهان آنالیز شدند.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- بررسی‌های صحرائی

واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی به ترتیب، از قدیم به جدید شامل سازندهای دولومیتی میلا، شیلی-ماسه سنگی درود، کربناتی روت، کربناتی الیکا، آهکی-کلاستیکی قم و ته-نشستهای کواترنری هستند (شکل ۱). وقفه‌ته‌نشستی در گستره زمانی پرمو-تریاس با تشکیل لایه‌ها و عدسیه‌هایی از جنس بوکسیت در مرز بین سازندهای روت و الیکا در این منطقه همراه بوده است. از نظر هندسی، این نهشته بوکسیتی دارای روند NW-SE، طولی در حدود ۳ کیلومتر و ضخامتی متغیر از ۸ الی ۱۶ متر است. جابه‌جایی نهشته به وسیله گسل‌های راستایی و تبدیل آنها به ۱۵ بلوک سنگی مجزا (شکل ۱)، همراه با تغییر شدید شیب نهشته از ۳۰ تا ۸۵° از تاثیرهای نیروهای زمین‌ساختی حاکم بر ریخت‌شناسی منطقه مورد مطالعه بوده است. توقف ته‌نشستی، پیش و پس از بوکسیت-زایی در این منطقه، با استفاده از مرزهای کاملاً مشخص بین نهشته با سنگهای کربناتی کمر بالا و پایین قابل تشخیص است. از نکات چشمگیر ریخت‌شناسی در رابطه با افق بوکسیتی، رنگ سرخ تا ارغوانی سنگهای بستر کربناتی در برخی بخشها، به واسطه نفوذ آبگونی‌های آهن‌دار از ماده معدنی به درون درز و شکافهای موجود و نیز حضور آثاری از سنگهای بازالتی است. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، این نهشته به ۴ واحد سنگی جدا از هم قابل شناسایی است که به ترتیب از پایین به بالا شامل بوکسیت‌های (۱) سرخ قهوه‌ای سخت، (۲) سرخ آجری، (۳) سبز خاکستری و (۴) کرم است (شکل ۱). لایه‌بندی، تورق، کانی‌سازی گوتیت به شکل گل کلمی و بافت آگلومرایی در واحد سرخ قهوه‌ای سخت، آثاری از شکلهای پیژوئیدی، رگه‌های اولیژیست و مواد کائولینیتی در واحد سرخ آجری، آثاری از دندریته‌های منگنز در سطح کانسنگ‌های واحد سبز خاکستری و حضور آینه‌های گسلی در واحد کرم از ویژگی‌های چشمگیر ریخت‌شناسی واحدهای این نهشته بوکسیتی است.

قرار داده است. خواجه محمدلو [۳] طی بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته‌های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان-غربی، اشاره‌هایی به کانیهای سازنده نهشته بوکسیتی این منطقه داشته است. امامعلی‌پور [۴] به بررسی امکان استحصال Ti از کانسنگ‌های این نهشته پرداخته است. بررسی‌های وی نشان داد که با فناوری‌هایی مانند انحلال مواد در اسید سولفوریک، نیتریک، و سود سوزآور و نیز روشهای شناوری و مغناطیسی، امکان استحصال Ti از کانسنگ‌های این نهشته در شرایط فعلی وجود ندارد. عبدالهی [۵] به بررسی افزایش مدول Al_2O_3/SiO_2 نمونه‌های مربوط به کانسنگ‌های این نهشته با استفاده از روش‌های فراوری و مدل‌سازی انحلال آنها در شرایط اسیدی، پرداخته است. در سال‌های اخیر، کارهای پژوهشی گسترده‌ای روی کنترل‌کننده‌های کانیایی و ژئوشیمیایی توزیع REEها در این نوع نهشته‌ها در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است [۶-۱۵]. تا به حال چنین بررسی‌هایی روی نهشته بوکسیت کارستی شمال خاوری بوکان در مختصات یاد شده انجام نشده است. این مقاله به بررسی خاستگاه، کانی‌شناسی، عوامل دخیل در تمرکز REEها و کانیهای میزبان احتمالی آنها در این نهشته پرداخته است.

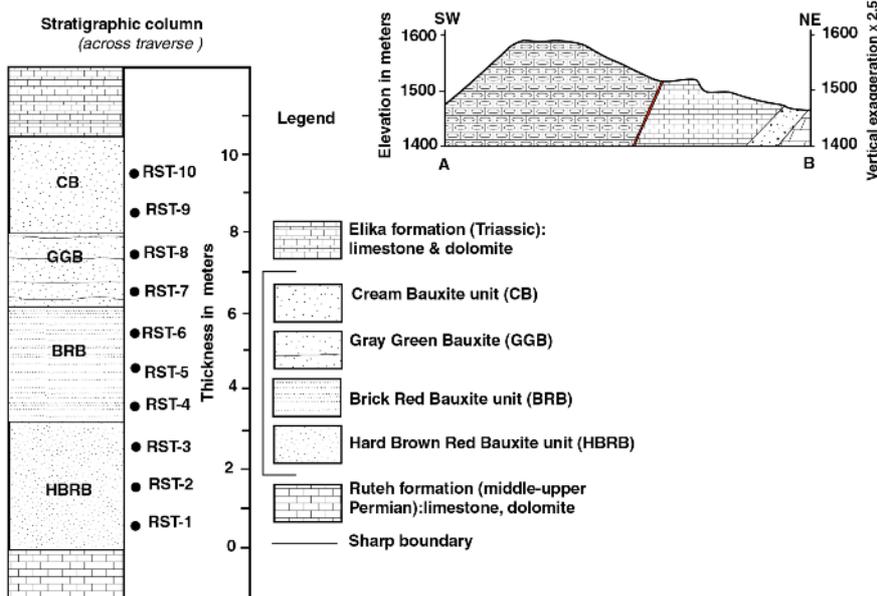
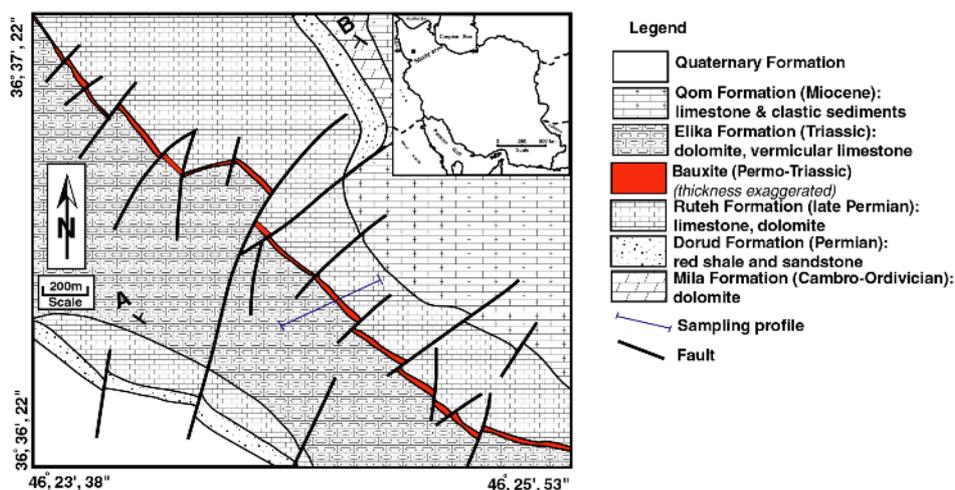
۲- روش مطالعه

مطالعه نهشته بوکسیتی پرمو-تریاس شمال خاوری بوکان به مختصات جغرافیایی $36^{\circ}23'38''$ تا $46^{\circ}25'53''$ طول خاوری و $36^{\circ}36'22''$ تا $36^{\circ}37'22''$ عرض شمالی، در دو بخش صحرائی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. بخش صحرائی شامل بررسی هندسی ماده معدنی و نقش فرایندهای زمین‌ساختی در ریخت‌شناسی نهشته، تغییرات رنگ و بافت، انواع مختلف سنگی حاضر، نحوه ارتباط نهشته با سنگهای بستر و پوشش و نهایتاً تهیه نقشه زمین‌شناسی و نیمرخ از منطقه (شکل ۱) همراه با نمونه‌برداری از کانسنگ‌های بوکسیتی و سنگهای مادر احتمالی (به تعداد ۴۵ نمونه) در طول و عرض نهشته بوده است. پس از بررسی‌های صحرائی، بخش آزمایشگاهی با انتخاب و تجزیه ۱۰ نمونه از کانسنگ‌های بوکسیتی به روش پراش پرتو X (XRD) در «سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور» برای تعیین فازهای کانیایی واحدهای سنگی این نهشته آغاز شد. پس از تعیین فازهای کانیایی، تعداد ۱۱ نمونه برای تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی، جزئی و کمیاب خاکی از کانسنگ‌های نهشته بوکسیتی

۳-۲- کانی‌شناسی

کربناتها (کلسیت) تشکیل دهنده‌های اصلی انبوهه‌های کانیاپی این نهشته‌اند. بین گروه‌های کانیاپی یاد شده تکتوسیلیکاتها و کربناتها از فراوانی کمتری برخوردارند و فقط در واحد بوکسیت سبز خاکستری، شناسایی شدند. نکته قابل توجه در مورد تغییرات در کانی‌شناسی واحدهای سنگی این نهشته، افزایش میزان فیلوسیلیکاتها (کلینوکلر و پیروفیلیت) در واحدهای بوکسیتی کرم و سبز خاکستری و افزایش میزان کانیهای هماتیت و گوتیت در واحدهای بوکسیت سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای سخت است.

با توجه به سرشت ریزدانه و نبود خواص نوری ثابت برای اغلب کانیهای سازنده واحدهای سنگی، و عدم تشخیص کانیهها با بررسیهای میکروسکوپیکی، در این کار پژوهشی از روش پراش پرتو X (XRD) برای شناسایی فازهای کانیاپی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان دادند که ۵ گروه کانیاپی شامل هیدروکسیدهای آلومینیوم و آهن (دیاسپور، بوهمیت و گوتیت)، اکسیدهای آهن و تیتان (هماتیت، روتیل و آناتاز)، فیلوسیلیکاتها (کائولینیت، ایلیت، مونت موریلونیت، پیروفیلیت و کلینوکلر)، تکتوسیلیکاتها (کوارتز، آلبیت و سانیدین) و



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نهشته بوکسیتی پرمو-تریاس در آن به همراه ستون چینه‌شناسی در عرض نیمرخ انتخابی برای بررسیهای ژئوشیمیایی که در آن واحدهای بوکسیتی شمال خاوری بوکان و محل نمونه‌های آنالیز شده مشخص شده‌اند.

جدول ۱ نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های بوکسیت شمال شرق بوکان به همراه یک نمونه سنگ بازالتی به روش‌های XRF و NAA.

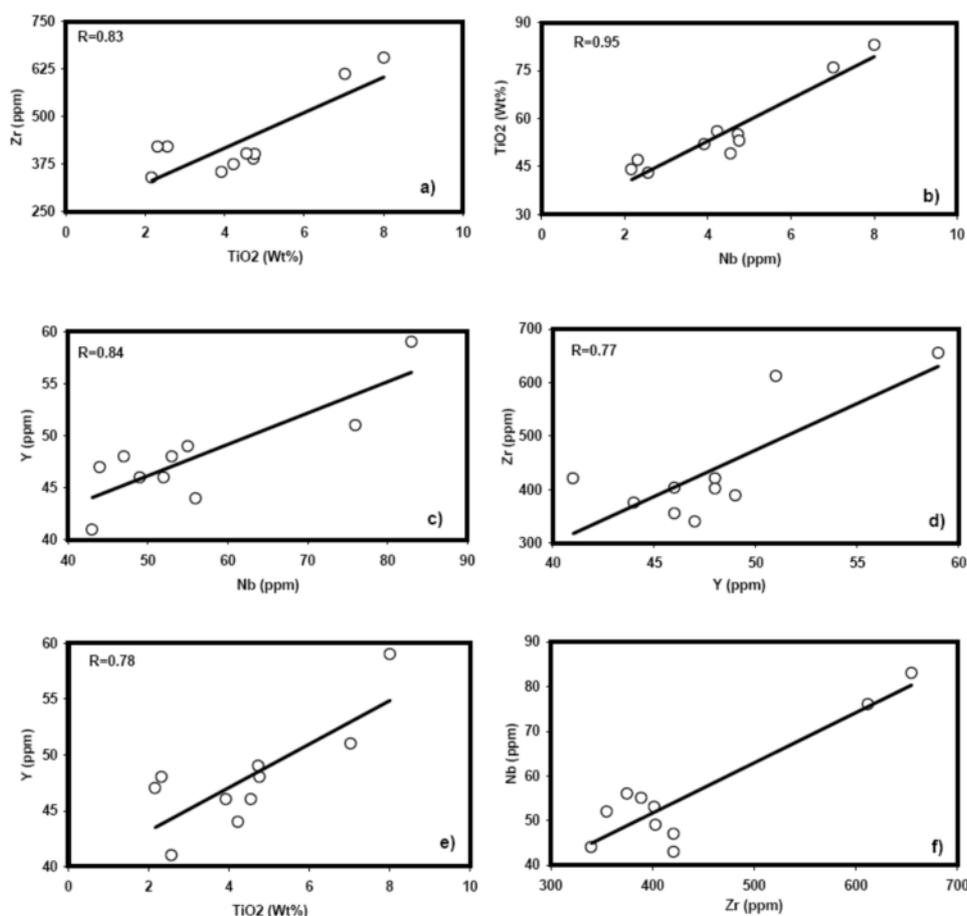
	RST-0	RST-1	RST-2	RST-3	RST-4	RST-5	RST-6	RST-7	RST-8	RST-9	RST-10
Name of unit	Basalt	HBRB	HBRB	HBRB	BRB	BRB	BRB	GCB	GCB	CB	CB
SiO ₂ %	۵۵٫۸۵	۱۴٫۸۲	۱۴٫۹۲	۱۴٫۶۵	۱۰٫۱۶	۱۶٫۳۰	۲۰٫۱۶	۲۳٫۱۵	۲۴٫۱۶	۳۲٫۲۵	۳۳٫۳۹
Al ₂ O ₃	۱۳٫۷۸	۲۲٫۹۵	۲۴٫۹۰	۲۵٫۳۷	۲۶٫۰۵	۲۵٫۵۰	۲۵٫۸۰	۴۸٫۴۹	۴۷٫۱۱	۳۸٫۸۱	۳۹٫۶۶
Fe ₂ O ₃	۹٫۲۴	۵۱٫۸۶	۴۹٫۱۳	۴۷٫۷۰	۴۷٫۹۵	۴۳٫۳۵	۳۶٫۴۰	۶٫۰۷	۵٫۸۹	۷٫۷۴	۹٫۳۲
CaO	۶٫۹۷	۰٫۲۳	۰٫۲۴	۰٫۲۳	۰٫۳۸	۰٫۱۳	۱٫۸۳	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۹	۰٫۷۶
Na ₂ O	۳٫۶۳	۰٫۵۶	۰٫۵۰	۰٫۴۱	۰٫۰۸	۰٫۰۲	۰٫۲۷	۰٫۱۳	۰٫۱۶	۰٫۲۱	۰٫۲۲
MgO	۴٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۶۳	۰٫۹۳	۰٫۸۵	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۴۷	۰٫۴۳	۰٫۱۱	۰٫۲۱
K ₂ O	۰٫۹۳	۰٫۵۸	۰٫۱۱	۰٫۰۳	۰٫۱۱	۰٫۱۷	۰٫۷۸	۱٫۵۹	۱٫۶۳	۳٫۷۸	۱٫۸۳
TiO ₂	۱٫۷۰	۲٫۵۷	۲٫۳۲	۲٫۱۶	۳٫۹۲	۴٫۲۳	۴٫۷۳	۷٫۰۳	۸٫۰۱	۴٫۷۶	۴٫۵۵
MnO	۰٫۳۳	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳
P ₂ O ₅	۰٫۸۹	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۹
L.O.I	۲٫۲۳	۶٫۴۰	۷٫۲۶	۸٫۸۲	۱۰٫۲۱	۱۰٫۱۰	۹٫۵۹	۱۲٫۶۷	۱۲٫۱۱	۱۱٫۵۹	۱۰٫۷۰
Sum	۹۹٫۸۹	۱۰۰٫۵۹	۱۰۰٫۲۵	۱۰۰٫۵۰	۹۹٫۸۹	۱۰۰٫۰۳	۹۹٫۷۶	۹۹٫۹۲	۹۹٫۸۵	۹۹٫۶۱	۱۰۰٫۷۶
U ppm	۲	۱	۳	۹	۴	۳	۳	۵	۴	۴	۸
Hf	۵	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۴	۵	۴	۴
Ba	۴۴۴	۶۸۸	۶۰۱	۵۰۱	۴۷۶	۴۱۰	۴۰۱	۴۷۶	۳۶۰	۳۱۱	۳۶۰
Th	۹	۲۴	۲۲	۱۵	۱۴	۱۲	۱۱	۹	۱۰	۱۱	۱۰
Co	۱۲	۴۱	۶۹	۱۰۲	۹۸	۹۴	۸۸	۱۷	۱۶	۹	۱۰
Cr	۵۱	۹۸۸	۹۹۱	۱۰۰۱	۹۴۶	۳۸۸	۴۵۱	۴۱۶	۳۱۲	۳۸۰	۱۷۰
Ni	۳۲	۲۸۸	۱۹۱	۱۶۶	۱۳۰	۱۳۰	۱۴۰	۹۹	۱۰۲	۱۰۹	۱۱۱
Rb	۱۱	۱۰	۹	۶	۷	۶	۶	۲۳	۲۹	۳۸	۴۹
V	۱۰۷	۹۶۶	۸۱۱	۹۶۱	۱۰۰۷	۶۵۲	۷۰۱	۶۹۳	۷۸۶	۵۶۹	۳۶۰
Y	۲۷	۴۱	۴۸	۴۷	۴۶	۴۴	۴۹	۵۱	۵۹	۴۸	۴۶
Zr	۲۲۸	۴۲۱	۴۲۱	۳۴۰	۳۵۵	۳۷۵	۳۸۹	۶۱۲	۶۵۵	۴۰۲	۴۰۲
Nb	۳۲	۴۳	۴۷	۴۴	۵۲	۵۶	۵۵	۷۶	۸۳	۵۳	۴۹
Sr	۳۱۰	۱۷۰	۱۶۳	۱۵۲	۹۶	۱۸۷	۱۱۶	۴۱	۴۹	۲۱۴	۲۶۶
La	۳۳	۱۱۷	۱۰۴	۸۷	۹۱	۹۰	۸۸	۲۹	۲۷	۲۴	۳۱
Ce	۴۱	۳۹۵	۳۸۳	۲۹۴	۲۲۶	۲۱۳	۲۰۱	۳۶	۳۷	۳۸	۴۰
Nd	۳۲	۸۶	۷۷	۶۴	۵۲	۴۶	۵۰	۲۴	۲۱	۲۳	۲۸
Sm	۶۸	۲۸	۲۵	۲۰٫۷	۱۵٫۶۶	۱۵٫۱۲	۱۴٫۹۶	۷٫۰۲	۷٫۲	۴٫۹۹	۵٫۵۳
Eu	۱٫۶۵	۸٫۵۳	۷٫۹۶	۶٫۷۹	۵٫۶۷	۵٫۱۱	۴٫۷۴	۱٫۱۲	۱٫۰۳	۰٫۶۰	۰٫۶۸
Tb	۰٫۹۱	۰٫۷۱	۰٫۷۴	۰٫۷۳	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۸۶	۰٫۸۴	۰٫۸۵	۰٫۵۸	۰٫۶۱
Ho	۱٫۱	۰٫۷۶	۰٫۷۷	۰٫۸۰	۰٫۷۶	۰٫۸۹	۰٫۸۵	۰٫۸۶	۱٫۰۳	۰٫۷۹	۰٫۸۴
Tm	۰٫۵۶	۰٫۳۳	۰٫۳۳	۰٫۳۵	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۰٫۳۲	۰٫۳۹	۰٫۳۶	۰٫۳	۰٫۳۳
Yb	۲٫۷۶	۱٫۲۶	۱٫۳۱	۱٫۳۷	۱٫۵۶	۱٫۶۶	۱٫۷۱	۱٫۷۸	۱٫۸۰	۱٫۹۶	۱٫۹۷
Lu	۰٫۴۱	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۱۹	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۵	۰٫۳۹	۰٫۴۱

۳-۳- ژئوشیمی

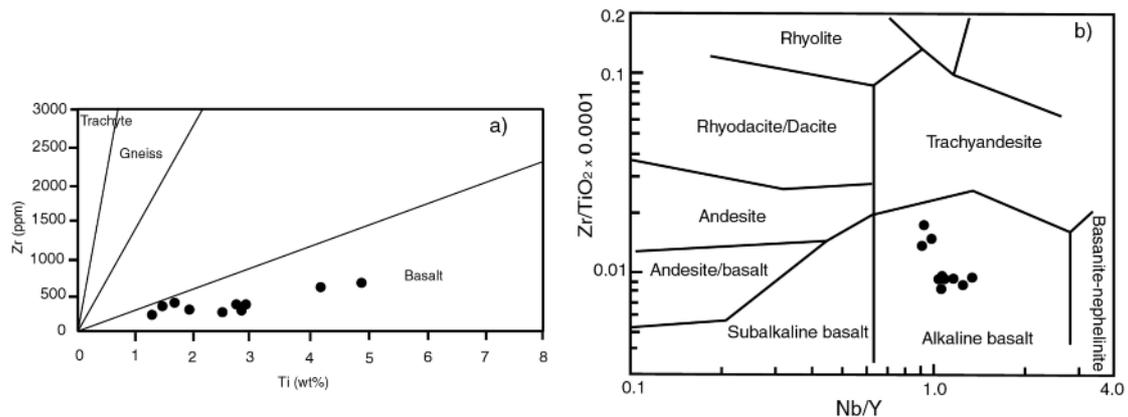
۳-۳-۱- تعیین خاستگاه نهشته

با توجه به وجود مرز کاملاً مشخص بین این نهشته با سنگ-های درونگیر، نمی‌توان سنگ بستر را به عنوان خاستگاه احتمالی واحدهای سنگی در نظر گرفت. وجود کانیهای تکتوسیلیکاتی (آلبیت و سانیدین) به عنوان کانیهای باقیمانده از پروتولیت در واحد سبز خاکستری، می‌تواند دلیلی بر خاستگاه آلومینوسیلیکاته این نهشته باشد. مقایسه ترکیب شیمیایی نهشته بوکسیتی مورد مطالعه با ترکیب شیمیایی ذخایر بوکسیتی نشات گرفته از سنگ‌های مادر مختلف در نقاط مختلف دنیا [۱۶، ۱۷] نشان می‌دهد که پروتولیت احتمالی این نهشته بایستی در گستره سنگهای آذرین مافیک باشد. بنابراین سنگهای بازالتی واقع در برخوردگاه واحد بوکسیت سرخ قهوه‌ای سخت با سنگهای بستر کربناته، می‌تواند گزینه مناسبی برای معرفی آن به عنوان خاستگاه احتمالی

نهشته باشند. محاسبه ضرایب همبستگی و ترسیم نمودارهای دو متغیره نشان می‌دهد عناصر Zr ، Nb ، Ti و Y که پتانسیل بالایی برای محفوظ ماندن از تغییرات شیمیایی در نیمرخهای هوازده نشات گرفته از سنگ‌های بازالتی دارند [۱۸-۲۲] در این نهشته همبستگی بالایی ($R=0.77-0.95$) با یکدیگر نشان می‌دهند (شکل ۲). به عبارت بهتر این عناصر با شکل تقریباً یکنواختی در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در منطقه مورد مطالعه غنی شده‌اند، و نسبتهای آنها نسبت به سنگ مادرشان تقریباً ثابت مانده است. بنابراین نقاط یافته‌های مربوط به نمونه‌های بوکسیتی در نمودارهای دو متغیره $Ti-Zr$ [۲۳] (شکل ۳a) در $Zr/TiO_2 \times 0.0001-Nb/Y$ (شکل ۳b) و Zr/Y (شکل ۳c) گستره موقعیت سنگهای بازالتی قرار می‌گیرند. از اینرو سنگهای بازالتی را می‌توان به عنوان محتمل‌ترین سنگ مادر این نهشته در نظر گرفت.



شکل ۲ نمودارهای تغییرات $Zr-Nb$ (f) و TiO_2-Y (e)، $Zr-Y$ (d)، $Nb-Y$ (c)، TiO_2-Nb (b)، TiO_2-Zr (a) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در شمال خاوری بوکان.



شکل ۳ موقعیت نمونه‌های بوکسیت مورد بررسی در نمودارهای دو متغیره (a) Ti-Zr [۲۳] و (b) Zr/TiO₂ × 0.0001-Nb/Y [۲۴].

نظر گرفتن مقدار نظری ≤ 50 این شاخص برای سنگهای کاملاً سالم (جدول ۳)، حکایت از خروج عناصر Na, Ca, K در فرایندهای بوکسیتی شدن و به عبارت بهتر تبدیل فلدسپارهای سنگ مادر به کانیه‌های رسی در شکل‌گیری این نهشته دارد. با توجه به بازه نسبتاً کم تغییرات مجموع عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در کانسنگهای مورد مطالعه (۴۳٪ - ۴۳۹٪)، آنچه که از تغییرات مقادیر شاخص هوازدگی شیمیایی (CWI) استنباط می‌شود غنی‌شدگی عناصر Al, Fe, Ti و L.O.I و خروج بخشی عنصر Si طی فرایندهای هوازدگی و توزیع نامنظم کانیه‌های رسی (کاهش به سمت سنگ بستر) در سیستم بازماندی مورد مطالعه است (جدول ۳). با توجه به الگوی توزیع و غنی‌شدگی عناصر Al, Si, Fe [۳۱] (شکل ۴)، شرایط لاتریتی شدن متوسط در تشکیل واحدهای کرم و سبز خاکستری و لاتریتی شدن شدید در شکل‌گیری واحدهای سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای سخت حکمفرما بوده است.

۳-۳-۲- شدت فرایندهای هوازدگی و لاتریتی‌زایی

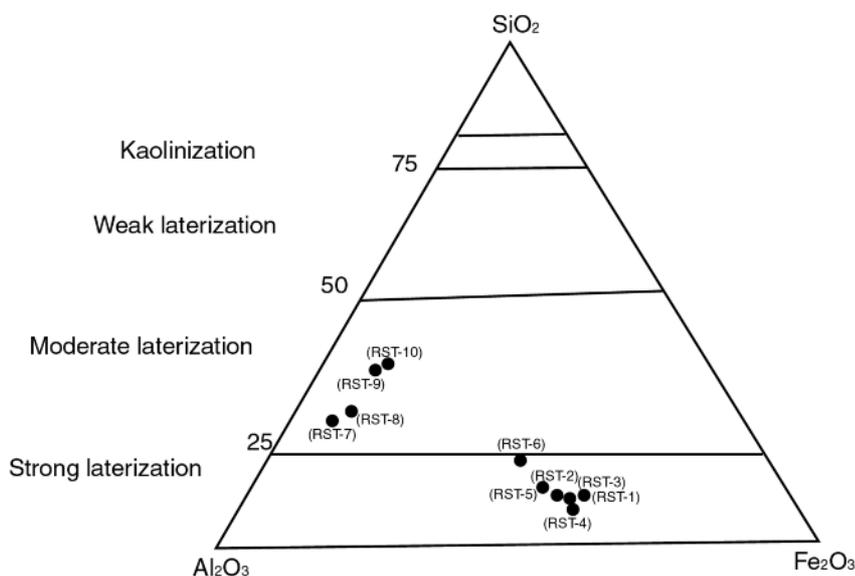
شاخصهای زیادی مانند نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ruxton Ratio, R) شاخص هوازدگی شیمیایی (Chemical Weathering Index, CWI)، شاخص شیمیایی دگرسانی (Chemical Index of Alteration, CIA)، شاخص شیمیایی هوازدگی (Chemical Index of Weathering, CIW)، شاخص پلاژیوکلاز دگرسانی (Plagioclase Index of Alteration, PIA)، شاخص سیلیس-تیتان (Silica-Titania Index, STI) برای ارزیابی شدت فرایندهای هوازدگی شیمیایی سنگهای هوازده پیشنهاد شده‌اند [۲۵-۳۰] (جدول ۲). مقایسه نتایج به دست آمده از محاسبات این شاخص‌ها در نمونه‌های بوکسیتی شمال خاوری بوکان با مقادیر ارائه شده برای سنگهای سالم و کاملاً هوازده (جدول ۳)، بیانگر شدت فرایندهای هوازدگی شیمیایی در شکل‌گیری این نهشته است. بازه تغییرات ۸۹٫۹۶ تا ۹۸٫۷۶ درصدی، میزان شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA) در کانسنگ‌های این نهشته با در

جدول ۲ خلاصه مشخصات شاخصهای هوازدگی استفاده شده در این کار پژوهشی.

Index	Abbreviation Name	Formula	Reference
R	Ruxton Ratio	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	[۲۵]
CWI	Chemical Weathering Index	$(100)[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{L.O.I}]/\text{all chemical components}$	[۲۶]
V	Vogt's Residual Index	$(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})/(\text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$	[۲۷]
CIA	Chemical Index of Alteration	$(100)[(\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$	[۲۸]
CIW	Chemical Index of Weathering	$(100)[(\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})]$	[۲۷]
PIA	Plagioclase Index of Alteration	$(100)[(\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})]$	[۲۹]
STI	Silica-Titania Index	$(100)(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/[(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2) + (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)]$	[۳۰]

جدول ۳ مقادیر شاخصهای هوازدگی در نمونه‌های مربوط به واحدهای بوکسیتی شمال خاوری بوکان. مقادیر نظری شاخصها برای سنگ سالم و هوازده از منابع مربوط به جدول ۲ اقتباس شده‌اند.

Abbreviation Name		R	CWI	V	CIA	CIW	PIA	STI
Optimum fresh value		$1.0 >$	$5.0 <$	$1 <$	≤ 5.0	≤ 5.0	$5.0 \leq$	$9.0 >$
Optimum weathered value		.	1.0	Infinite	1.0	1.0	1.0	.
Sample No	Unit Name							
RST-1	HBRB	۰.۶۵	۸۳.۲۹	۲۰.۸۲	۹۴.۳۷	۹۶.۶۷	۹۶.۵۹	۳۷.۵۹
RST-2	HBRB	۰.۶۰	۸۳.۴۰	۱۸.۲۶	۹۶.۷۰	۹۷.۱۱	۹۷.۱۰	۳۶.۲۰
RST-3	HBRB	۰.۵۸	۸۳.۶۳	۱۶.۱۸	۹۷.۴۳	۹۷.۵۴	۹۷.۵۳	۳۵.۵۰
RST-4	BRB	۰.۳۹	۸۸.۲۳	۱۹.۹۷	۹۷.۸۶	۹۸.۲۶	۹۸.۲۶	۲۶.۹۲
RST-5	BRB	۰.۶۴	۸۳.۱۶	۹۸.۷۳	۹۸.۷۶	۹۹.۴۲	۹۹.۴۱	۳۶.۶۳
RST-6	BRB	۰.۷۸	۷۶.۷۰	۱۱.۹۷	۸۹.۹۶	۹۲.۴۷	۹۲.۲۶	۴۰.۶۰
RST-7	GCB	۰.۵۱	۷۴.۳۲	۵۹.۶۲	۹۶.۱۱	۹۹.۲۴	۹۹.۲۱	۳۰.۸۷
RST-8	GCB	۰.۵۱	۷۳.۲۳	۵۶.۶۷	۹۵.۸۱	۹۹.۱۰	۹۹.۰۶	۳۲.۰۵
RST-9	CB	۰.۸۳	۶۳.۱۵	۶۹.۶۷	۹۰.۰۷	۹۸.۷۳	۹۵.۹	۴۲.۹۹
RST-10	CB	۰.۸۴	۶۳.۷۵	۳۴.۸۷	۹۳.۳۹	۹۷.۵۹	۹۷.۴۷	۴۳.۴۳



شکل ۴ موقعیت نمونه‌های نهشته بوکسیت شمال خاوری بوکان در نمودار سه متغیره $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ [۳۱] برای تعیین فرایندهای هوازدگی.

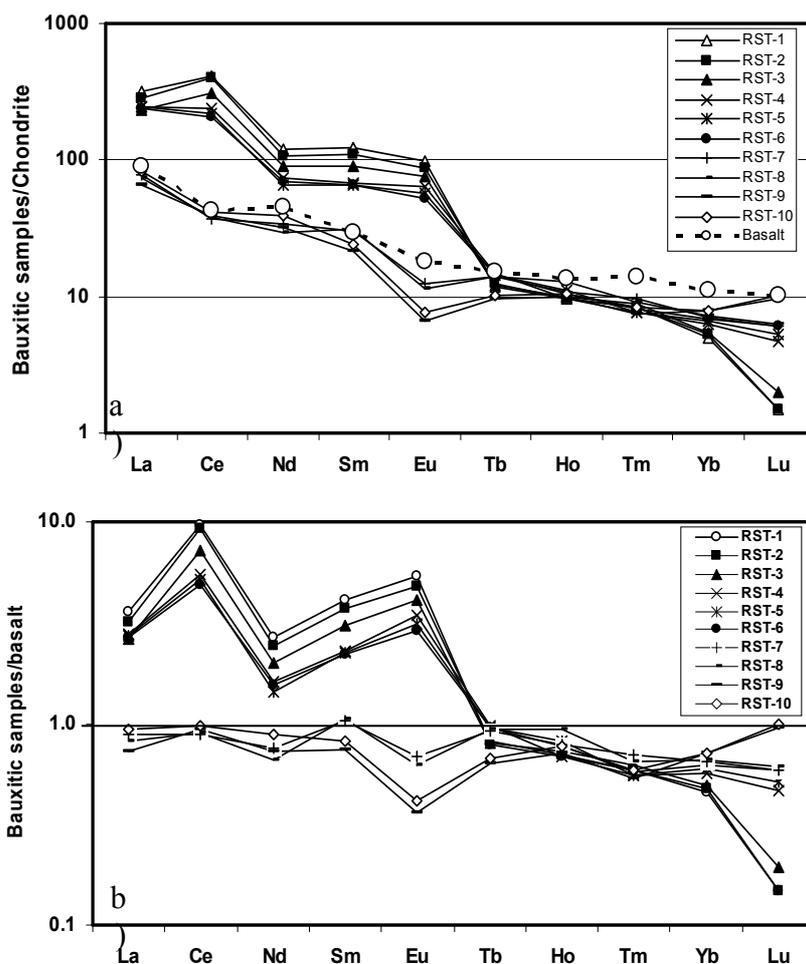
تغییرات برای LREEها (Eu و Sm, Nd, Ce, La) شدید و HREEها (Yb, Tm, Ho, Tb) کم (۳-۴ ppm) است. الگوی توزیع REEها بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت (شکل ۵a) نشان می‌دهد که REEها

۳-۳-۳- شیمی و الگوهای توزیع REEها در طی فرایندهای بوکسیتی شدن

ترتیب فراوانی REEها در این نهشته به صورت $Ce > La > Nd > Sm > Eu > Yb > Ho > Tb > Tm > Lu$ است (جدول ۱). بازه

pH های پایین و بالا به ترتیب باعث شستشو و ته‌نشستی LREE ها طی فرایندهای هوازدگی می‌شوند [۹، ۳۳]. بنابراین pH های اسیدی برای شستشوی LREE ها طی شکل‌گیری واحدهای کرم و سبز خاکستری و pH های قلیایی برای آبگونی‌های عامل هوازدگی برای ته‌نشینی LREE ها طی شکل‌گیری واحدهای سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای محتمل به نظر می‌رسند. با توجه به مطالب یاد شده، عامل اصلی شستشوی HREE ها از دو واحد سنگی بوکسیت کرم و سبز خاکستری، احتمالاً به واسطه نفوذ آبهای جوی با pH اسیدی و از دو واحد سنگی بوکسیت سرخ قهوه‌ای سخت و سرخ آجری به واسطه تشکیل کمپلکسهای یونی پایدار کربناتی با این عناصر (در اثر خنثی‌سازی pH آبهای فروروی جوی به وسیله سنگهای کربناتی بستر) بوده است [۳۴].

طی فرایندهای بوکسیتی شدن دستخوش جدایی شده‌اند. این جدایی بدین صورت بوده است که غنی‌شدگی LREE ها نسبت به HREE ها شدیدتر بوده و غنی‌شدگی LREE ها با نزدیک شدن به سنگ بستر کربناتی با آهنک تقریباً منظمی تا دوام داشته است. این الگوی جدایی LREE ها را می‌توان دلیلی بر خاستگاه برج‌آزای این نهشته دانست [۳۲]. الگوی توزیع REE های بهنجار شده نسبت به سنگ مادر بازالتی (شکل ۵b) نشان می‌دهد که LREE ها در دو واحد بوکسیت کرم و سبز خاکستری تهی شده و در دو واحد سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای سخت غنی شده‌اند. این در حالی است که بخش قابل ملاحظه‌ای از HREE ها طی شکل‌گیری هر چهار واحد سنگی از سیستم هوازده خارج شده‌اند. به نظر می‌رسد شستشو و ته‌نشستی LREE ها در شکل‌گیری این سیستم بازماندی به تغییرات pH آبگونی‌های عامل هوازدگی کننده وابسته باشد.



شکل ۵ (a) الگوی تغییرات REE ها در واحدهای بوکسیتی و سنگ مادر بازالتی بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت و (b) الگوی تغییرات REE ها در واحدهای بوکسیتی بهنجار شده نسبت به ترکیب سنگ مادر بازالتی برای نمونه‌های بوکسیتی شمال خاوری بوکان.

هنجاریهای Eu و Ce در نمونه‌های بوکسیتی نیمرخ هوازده، به ترتیب از فرمول‌های زیر استفاده شد:

$$\text{Eu Anomaly} = (\text{Eu}_N) / \sqrt{\text{Sm}_N \times [(0.66\text{Tb}_N) + (0.33\text{Sm}_N)]} \quad [۱۳]$$

$$\text{Ce Anomaly} = (3\text{Ce}_N) / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N) \quad [۳۸]$$

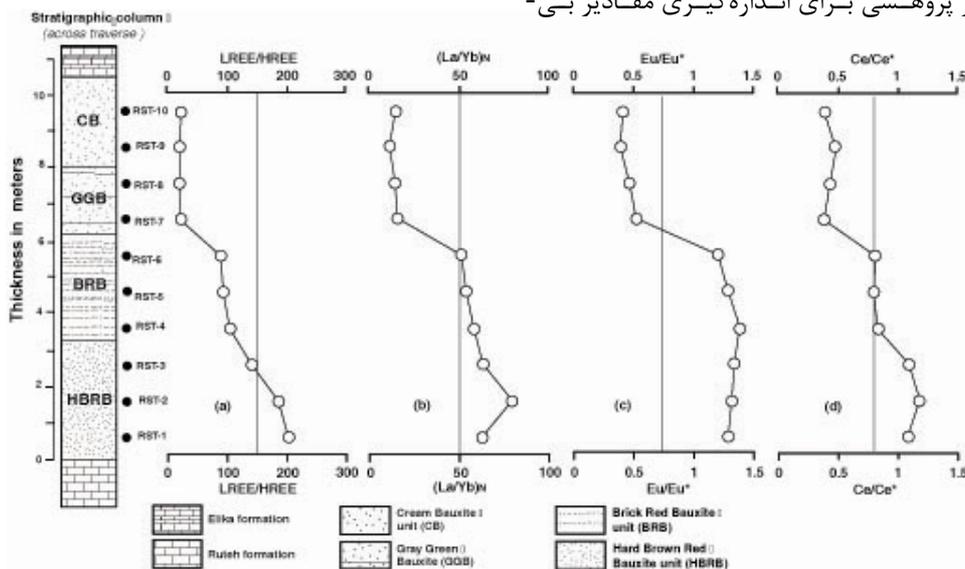
در فرمول‌های بالا N بهنجار شدن عناصر مربوطه به ترکیب کندریت را نشان می‌دهد [۳۹]. بنابراین محاسبات یاد شده نشان می‌دهند که بازه تغییرات بی‌هنجاری Eu در نیمرخ هوازده از ۰/۴۲ تا ۱/۳۹ و برای بی‌هنجاری Ce از ۰/۴ تا ۱/۳۹ بوده است. الگوی توزیع این بی‌هنجاریها حاکی از افزایش نسبی آنها با نزدیک شدن به سنگ بستر است (شکل ۶). همبستگی بالای بی‌هنجاری Eu با بی‌هنجاری Ce ($R=0.9$) نشان از شباهت در فاکتورهای کنترل کننده تغییرات آنها طی فرایندهای بوکسیتی شدن دارد. نمودارهای دو متغیره بی-هنجاریهای Eu و Ce در برابر سه اکسید اصلی سازنده نهشته-های SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 (شکل ۷) نشان می‌دهند که کانی‌های آهن‌دار در فرایند روبش و تمرکز این عناصر نقش بسیار مهمی در نیمرخ هوازده و ایجاد بی‌هنجاریهای یاد شده ایفا کرده و نمی‌توان نقشی برای کانیهای رسی در این زمینه قائل شد. به عبارت بهتر افزایش pH آبگونیهای عامل هوازدگی به دلیل ماهیت کربناته سنگ بستر به همراه فرایندهای جذب سطحی به وسیله اکسیدهای آهن نقش مهمی در ایجاد بی-هنجاریهای مثبت Eu و Ce طی فرایندهای بوکسیتی شدن در این نهشته ایفا کرده‌اند.

۳-۳-۴- الگوی توزیع LREEs/HREEs و $(\text{La}/\text{Yb})_N$ در نیمرخ هوازده

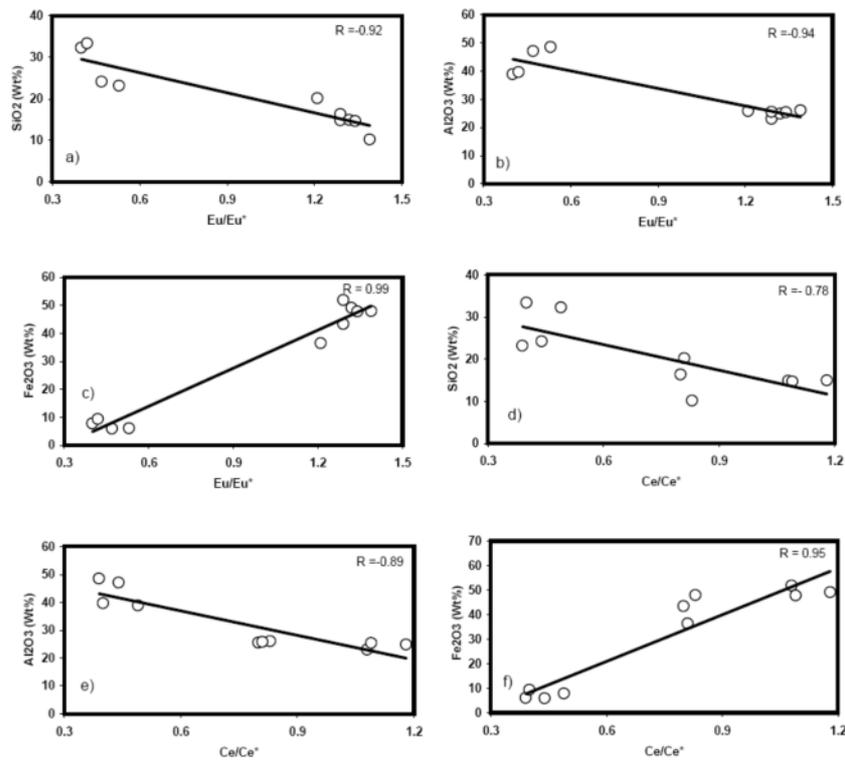
نسبت تغییرات LREE/HREE در نیمرخ هوازده از ۲۱/۷۳ الی ۲۰۳/۳۸ متغیر بوده و با آهنگ نسبتاً منظمی به سمت سنگ بستر روند صعودی نشان می‌دهد (شکل ۶). محاسبه تغییرات نسبت $[(\text{La}_{\text{bauxite}}/\text{La}_{\text{Chondrite}})/(\text{Yb}_{\text{bauxite}}/\text{Yb}_{\text{Chondrite}})]$ در نیمرخ بازماندی نشان می‌دهد که مقادیر این نسبت از ۱۲/۲۴ تا ۷۹/۳۹ متغیر بوده و با نزدیک شدن به سنگ بستر یک روند افزایشی دارد (شکل ۶). برای بررسی علت این تغییرات مبادرت به محاسبه ضرایب همبستگی نسبت‌های یاد شده در برابر عناصر اصلی سازنده (Al، Fe و Si) نهشته‌های بوکسیتی مورد مطالعه کردیم. با توجه به نتایج به دست آمده عناصر Al و Si همبستگی منفی بالایی (< -0.78) با نسبت‌های یاد شده و همبستگی مثبت بالایی با Fe (> 0.91) نشان می‌دهند. همبستگیهای یاد شده حکایت از آن دارند که LREEها نسبت به HREEها در این نهشته‌ها به دلیل شعاع‌های یونی بزرگ‌تر و بارهای یونی کمتر (کاهش پتانسیل یونی) ترجیحاً به اکسیدهای آهن، تحت شرایط قلیایی جذب شده‌اند [۳۵-۳۷]. به عبارت بهتر فرایندهای شستشو از کانیهای رسی و جذب سطحی به وسیله کانیهای همتایت و گوتیت یکی از عوامل اصلی غنی‌شدگی LREEها در این نیمرخ هوازده بوده‌اند.

۳-۳-۵- بی‌هنجاریهای Eu و Ce

با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری عناصر خاکی کمیاب Pr و Gd، در این کار پژوهشی برای اندازه‌گیری مقادیر بی-



شکل ۶ تغییرات نسبت‌های (a) LREE/HREE، (b) $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ، (c) ناهنجاری Eu و (d) ناهنجاری Ce در عرض نیمرخ مورد مطالعه. حرف N بهنجار شدن عناصر مربوطه به ترکیب کندریت [۳۹] را نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمودارهای تغییرات بیهنجاری Eu در برابر SiO_2 (a)، Al_2O_3 (b) و Fe_2O_3 (c) و بی هنجاری Ce در برابر SiO_2 (d)، Al_2O_3 (e) و Fe_2O_3 (f) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در شمال خاوری بوکان.

بر این دارند که کانی هماتیت و گوتیت یک عامل مهم روبش و تمرکز La ، Ce ، Nd ، Sm و Eu در این نهشته بوده‌اند. در واقع الگوی توزیع LREEها در این نهشته با ته‌نشینی آهن در سیستم بازماندی کنترل شده است. پوکروفسکی و همکاران [۴۱] طی بررسیهای خود به نتایج مشابهی رسیده‌اند. همبستگی بالا بین Ti و Nb (0.83) و نیز Ti با Ho ، Tb و Yb (>0.71) نشان می‌دهد که برخی از کانیهای Ti دار و Nb دار، مانند روتیل و آناز، تا حدودی توزیع HREEها در این نهشته را در کنترل خود داشته‌اند. زیرکن که از نظر شیمیایی بی‌تحرک‌ترین کانی طی فرایندهای هوازدگی محسوب می‌شود [۴۲-۴۴]، با توجه به همبستگی بالای Zr با Ho و Tm (>0.71)، می‌توان آن را به عنوان کنترل کننده بخشی از توزیع HREEها در این نهشته معرفی کرد. همبستگی‌های بالای MnO با La ، Nd ، Sm و Eu (>0.75) در نیمرخ بوکسیتی می‌تواند مبین به تله افتادن LREEها به وسیله اکسیدهای منگنز طی فرایندهای هوازدگی باشد [۴۵، ۴۶]. ضرایب همبستگی بالای مثبت بین P_2O_5 با La ، Ce ، Nd ، Sm و Eu (>0.79) می‌تواند نشانگر کنترل توزیع بخشی از LREEها به

۳-۳-۶- کانی‌های میزبان REEها

با بررسیهای پراش پرتو X (XRD) در فازهای کانیایی شناسایی شده‌اند که فراوانی بالای ۴٪ داشته‌اند. بنابراین علاوه بر فازهای کانیایی شناسایی شده، کانیهای دیگری نیز می‌توانند میزبان REEها در این نهشته باشند که با بررسیهای آنالیزهای پراش پرتو X شناسایی نشدند. لذا در این کار پژوهشی به منظور تعیین کانیهای میزبان احتمالی REEها در واحدهای بوکسیتی مبادرت به محاسبه ضرایب همبستگی خطی [۴۰] بین عناصر خاکی کمیاب با عناصر دیگر سازنده نهشته‌های بوکسیتی شده است (جدول ۴). ضرایب همبستگی منفی معنی‌دار Al و Si با LREEها (La ، Ce ، Sm و Nd) نشان می‌دهند که کانیهای رسی در این رخساره‌ها نمی‌توانند حمل کننده این عناصر باشند. به عبارت بهتر کانیهای رسی در این نهشته‌ها نمی‌توانند میزبان مهمی برای LREEها باشند. ضرایب همبستگی بالا (>0.61) بین Al و Si با HREEها (Tb ، Yb و Lu) حاکی از اینست که کانیهای رسی بر خلاف LREEها بخشی از توزیع HREEها را در کنترل خود دارند. همبستگیهای بالای LREEها با Fe_2O_3 (>0.86) دلالت

سنگهای بازالتی واقع در برخوردگاه این نهشته با سنگهای بستر کربناته، محتملترین سنگ مادر این نهشته‌اند. محاسبات شاخص‌های هوازگی و دگرسانی نشان از توزیع ناموزون کانیهای رسی طی فرایندهای لاتریتی شدن متوسط تا شدید و غنی‌شدگی عناصر Al, Fe, Ti در سیستم هوازده دارند. شواهد ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که این نهشته از یک پیدایش کاملاً برجزا برخوردار بوده و افزایش pH آبگونیهای عامل هوازگی به وسیله سنگهای بستر، حضور کانیهای مقاوم در سیستم بازماندی، پایداری کمپلکس‌های حمل‌کننده به همراه تغییرات در پتانسیل یونی REEها و فرایندهای جذب سطحی مهمترین عوامل جدایی LREEها از HREEها و غنی‌شدگی LREEها در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در شمال خاوری بوکان بوده‌اند. بررسیهای انجام شده نشان می‌دهند که کانیهای هماتیت و گوتیت نقش مهمی در ایجاد بی-هنجاریهای مثبت Eu و Ce و الگوهای توزیع REEها در این نهشته داشته‌اند. یافته‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که کانیهای رسی، روتیل، آناتاز و زیرکن، هماتیت، گوتیت، مونازیت، Cerianite, Euxenite, Rhabdophane، و اکسیدهای منگنز میزبانان احتمالی REEها در این نهشته هستند.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش از حمایت‌های مالی معاونت تحصیلات تکمیلی و اداره امور پژوهشی دانشگاه تبریز برخوردار بوده است، لذا جا دارد که نویسندگان نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین آن سازمانها ابراز دارند.

وسيله کانیهای فسفاتی باشد. همبستگی بالای Na_2O با P_2O_5 ، Ce و Nd (>0.6) نشان از حضور احتمالی کانی فسفاته Vitusite در این نهشته دارد. Ba که رفتارهای کاملاً متغیری طی فرایندهای هوازگی از خود نشان می‌دهد [۴۷]، در نیمرخ مورد مطالعه همبستگی بالایی با P_2O_5 ، La، Ce، Sm و Nd (>0.67) دارد که می‌تواند حاکی از حضور احتمالی کانیهای فسفات آلومینیوم دارمانند Gorceixite $[\text{BaAl}_3(\text{LREE}, \text{PO}_4)_2 (\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ [۴۸، ۴۹] در نهشته مورد بررسی باشد. همبستگیهای بالای بین عناصر La، Ce و Nd با P_2O_5 (>0.79) دلیلی است بر حضور احتمالی کانیهای همبستگیهای بالای بین Th با Ce (0.77)، Ti و Nb و Y با یکدیگر (>0.78) و Y با Nb (0.84) به ترتیب دلیلی بر حضور احتمالی کانیهای Euxenite، Cerianite و Fergusonite به عنوان کانیهای تمرکز دهنده بخشی REEها در کانسنگهای این نهشته است.

۴- برداشت

نهشته بوکسیت پرمو- تریاس شمال خاوری بوکان به شکل چینه‌سان، در مرز بین سازندهای کربناتی - شیلی روتی و کربناتی الیکا گسترش و تکامل یافته است. عملکرد فرایندهای هوازگی طی شکل‌گیری این نهشته با گسترش کانیهای دیاسپور، بوهمیت، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، پیروفیلیت، روتیل، کلینوکلر، ایلیت، مونت‌موریلونیت، آناتاز، آلیت، سائیدین، کوارتز، و کلسیت همراه شده است. با توجه به بررسی‌های صحرائی، یافته‌های کانی‌شناسی و الگوی توزیع عناصر Ti, Zr, Ni, Cr, Nb و Y در سیستم بازماندی،

جدول ۴ ضرایب همبستگی خطی بین عناصر خاکی کمیاب و برخی از عناصر اصلی، فرعی، و جزئی در نمونه‌های بوکسیت شمال خاوری بوکان. برای محاسبه ضرایب از فرمول‌های ارائه شده توسط رولینسون [۴۰] استفاده شده است.

	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	P_2O_5	Y	Zr	V	Th	Ba
La	-۰.۹۴	۰.۹۸	-۰.۸۵	-۰.۷۷	۰.۷۵	۰.۷۹	۰.۵۸	۰.۵۸	۰.۶۴	۰.۷۸	۰.۶۷
Ce	-۰.۸۵	۰.۸۶	-۰.۷۸	-۰.۸۲	۰.۸۳	۰.۸۴	-۰.۵۶	-۰.۵۱	۰.۶۷	۰.۹۱	۰.۸۲
Nd	-۰.۷۵	۰.۹۱	-۰.۸۶	-۰.۸۴	۰.۸۹	۰.۸۹	۰.۷۵	-۰.۵۱	۰.۶۵	۰.۹۲	۰.۸۶
Sm	-۰.۸۹	۰.۹۲	-۰.۷۹	-۰.۷۸	۰.۸۸	۰.۸۸	۰.۷۹	-۰.۴۲	۰.۷۰	۰.۹۲	۰.۸۱
Eu	-۰.۸۹	۰.۹۷	-۰.۸۵	-۰.۸۱	۰.۸۵	۰.۸۳	۰.۷۱	-۰.۵۲	۰.۷۱	۰.۸۵	۰.۴۶
Tb	۰.۸۹	-۰.۹۱	۰.۷۷	۰.۷۱	-۰.۸۷	-۰.۸۰	-۰.۲۱	۰.۳۴	-۰.۸۱	-۰.۸۶	۰.۱۱
Ho	۰.۶۱	۰.۰۱	-۰.۵۶	۰.۸۱	-۰.۶۷	-۰.۴۵	۰.۷۶	۰.۷۱	-۰.۱۱	-۰.۵۷	-۰.۵۳
Tm	۰.۱۴	-۰.۳۵	۰.۱۰	۰.۴۶	۰.۱۴	-۰.۱۱	۰.۵۳	۰.۷۷	۰.۱۱	-۰.۱۴	۰.۱۴
Yb	۰.۷۴	-۰.۸۷	۰.۸۵	۰.۷۱	-۰.۹۰	-۰.۸۴	-۰.۸۱	۰.۳۰	-۰.۸۱	-۰.۸۸	-۰.۹۲
Lu	۰.۶۴	-۰.۸۱	۰.۸۹	۰.۵۶	-۰.۸۰	-۰.۷۴	-۰.۷۹	۰.۱۷	-۰.۸۳	-۰.۷۹	-۰.۸۵

Ghiona bauxite deposits, Greece", Journal of Geochemical Exploration 93 (2007) 67-77.

[12] Ma J., Wei G., Xu Y., Long W., Sun W., "Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalts in Hainan Island, South China", Geochimica et Cosmochimica Acta 71 (2007) 3223-3237.

[13] Mameli P., Mongelli G., Oggiano G., Dinelli E., "Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity", International Journal of Earth Sciences 96 (2007) 887-902.

[14] Calagari A.A., Abedini A., "Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite deposit at Kanisheeteh, east of Bukan, Iran", Journal of Geochemical Exploration 94 (2007) 1-18.

[15] Wimpenny J., Gannoun A., Burton K.W., Widdowson M., Jamed R.H., Gilason S.R., "Re and Os isotope and elemental behaviour accompanying laterite formation in the Deccan region of India", Earth and Planetary Science Letters 261 (2007) 239-258.

[16] Valetton I., "Bauxites", Elsevier, 226p.

[17] Schwartz T., "Distribution and genesis of bauxite on the Mambilla Plateau, SE Nigeria", Applied Geochemistry 12 (1997) 119-131.

[18] Nesbitt H.W., Wilson R.E., "Resent chemical weathering basalts", American Journal of Earth Science 292 (1992) 740-777.

[19] Braun J.J., Pagel M., Herbillon A., Rosin C., "Mobilization and redistribution of REEs and Th in a syenitic lateritic profile- a mass balance study", Geochimica et Cosmochimica Acta 57 (1993) 4419-4434.

[20] MacLean W.H., Bonavia F. F., Sanna G., "Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo deposit, Sardinia", Mineralium Deposita 32 (1997) 607-616.

[21] Hill I. G., Worden R.H.G., Meighan I.G., "Geochemical evolution of a paleolaterite: the interbasaltic formation, Northern Ireland", Chemical Geology 166 (2000) 65-84.

[22] Kurtz A.C., Derry L.A., Chadwick O.A., "Refractory element mobility in volcanic soils", Geology 28 (2000) 683-686.

[23] Hallberg J.A., "A geochemical aid to igneous rocks identification in deeply weathered terrain", J. of Geochemical Exploration 20 (1984) 1-8.

[24] Winchester J.A., Floyd P.A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", Chemical Geology 20 (1977) 325-343.

۶- مراجع

[1] Balkay B., Samimi M., "Geological investigations of Iranian bauxites and other high-alumina materials", Geological survey of Iran, Internal paper (1972).

[۲] حسامی ع.، "بررسی های اکتشافی بوکسیت های خاورمی بوکان"، رساله کارشناسی ارشد دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۰) ۲۸۵ص.

[۳] خواجه محمدرنو، "کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز نهشته- های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان غربی و تعیین کاربری آنها"، رساله کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۸۳) ۱۳۸ص.

[۴] امامعلی پور ع.، "بررسی امکان استحصال Ti از کانسنگ های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان غربی"، طرح پژوهشی گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه، (۱۳۸۲).

[۵] عبدالهی ه.، "افزایش مدول Al_2O_3/SiO_2 نمونه کانسنگ بوکسیت بوکان با کاربرد روش های فراوری، و مدل سازی لیچینگ (انحلال) آن در شرایط اسیدی"، رساله کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۴) ۱۶۵ص.

[6] Elipoulos D.G., Economou-Eliopoulos M., "Geochemical and mineralogical characteristics of Fe-Ni- and bauxitic-laterite deposits of Greece", Ore Geology Reviews 16 (2000) 41-58.

[7] Öztürk H., Hein R.J., Hanilci N., "Genesis of the Dogçankuzu and Mortas, bauxite deposits, Taurides, Turkey: separation of Al, Fe and Mn and implications for passive margin metallogeny", Economic Geology 97 (2002) 1063-1077.

[8] Mutakyahwa M.K.D., Ikingura J.R., Mruma A.H., "Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania", J. of African Earth Sciences 36 (2003) 357-369.

[9] Patino L.C., Velbel M.A., Price J.R., Wade J.A., "Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala", Chemical Geology 202 (2003) 343-364.

[10] Laskou M., Economou-Eliopoulos M., "Microorganisms as fossils and present day development in Ni-laterites and bauxites of the Balkan peninsula", In: Mao, et al. (Eds.), 8 th SGA Meeting, "Mineral Deposits Research Meeting the Global Challenge" Beijing, August 18-21 (2005) 1003-1006.

[11] Laskou M., Economou-Eliopoulos M., "The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-

- Biscay (France)*", Marine Chemistry 100 (2006) 39-52.
- [39] Taylor S.R., McLennan S.M., *"The continental crust: its composition and evolution"*, Blackwell, Oxford, (1985) 1-312.
- [40] Rollinson H., *"Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation"*, Longman Scientific and Technical (1993).
- [41] Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B., *"Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 70 (2006) 3239-3260.
- [42] Milness A.R., Fitzpatrick R.W., *"Titanium and zirconium minerals"*, In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), SSSA, Madison, WI, (1989) 1131-1205.
- [43] Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.H., Graham C.M., *"Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the earth 4.4 age"*, Nature 409 (2001) 175-178.
- [44] Oh N.H., Richter D.D., *"Elemental translocation and loss from three highly weathered soil - bedrock profiles in the southeastern United States"*, Geoderma 126 (2005) 5-25.
- [45] Walter A.V., Nahon D., Flicoteaux R., Girard J.P., Melfi A., *"Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of typical weathering of typical apatite-rich carbonatite from Brazil"*, Planetary Science Letters 303 (1995) 591-601.
- [46] Koppi A.J., Edis R., Foeld D.J., Geering H.R., Klessa D.A., Cockayne D.J.H., *"REEs trends and Ce-U-Mn associations in weathered rock from Koongarra, northern territory, Australia"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 60 (1996) 1695-1707.
- [47] Gouveia M.A., Prudencio M.I., Figueiredo M.O., Pereira L.C.J., Waerenborgh J.C., Morgado I., Pena T., Lopes A., *"Behaviour of REE and other trace and major elements during weathering of granitic rocks, Evora, Portugal"*, Chemical Geology 107 (1993) 293-296.
- [48] Angelica R.S., Da Costa M.L., *"Geochemistry of REEs in surface lateritic rocks and soils from the Maicuru complex, Para, Brazil"*, Journal of Geochemical Exploration 47 (1993) 165-182.
- [49] Costa M.L., Araujo E.S., *"Application of multi-element geochemistry in Au-phosphate-bearing lateritic crusts for identification of their parent rocks"*, Journal of Geochemical Exploration 57 (1996) 257-272.
- [25] Ruxton B.P., *"Measures of the degree of chemical weathering of rocks"*, Geology 76 (1968) 518-527.
- [26] Sueoka T., *"Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index"*, Second International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore1 (1988) 5-61.
- [27] Harnois L., *"The C.I.W. index: a new chemical index of weathering"*, Sedimentary Geology 23 (1988) 1-101.
- [28] Nesbitt H.W., Young G.M., *"Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites"*, Nature 279 (1982) 715-717.
- [29] Fedo C.M., Nesbitt P., Young G.M., *"Unraveling the effect of K metasomatism in sedimentary rocks and paleosols", with implications for paleoweathering conditions and provenance"*, Geology 23 (1995) 363-381.
- [30] De Jayawardena U.S., Izawa E., *"A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka"*, Engineering Geology 36 (1994) 303-310.
- [31] Schellmann W., *"A new definition of laterite"*, Natural Resources and Development 18 (1983) 7-21.
- [32] Maksimovic Z., Panto G.Y., *"Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece"*, Geoderma 51 (1991) 93-109.
- [33] Aubert D., Stille P., Probst A., *"REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 65 (2001) 387-406.
- [34] Cantrell K.J., Byrne R.H., *"Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions"*, Geochim et Cosmochim Acta 51 (1987) 597-605.
- [35] Koeppenkastrop D., De Carlo E.H., *"Uptake of rare earth elements from solution by metal oxides"*, Environmental and Science Technology 27 (1993) 1796-1802.
- [36] Coppin F., Berger G., Castet S., Loubet M., *"Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite"*, Chemical Geology 182 (2002) 57-68.
- [37] Verplanck P.L., Nordstorm D.K., Taylor H.E., Kimball B.A., *"Rare earth element partitioning between hydrous ferric oxides and acid mine water during iron oxidation"*, Applied Geochemistry 19 (2004) 1339-1354.
- [38] Chaillou G., Anschutz P., Lavaux G., Blanc G., *"REEs in the modern sediments of the Bay of*