



IRANIAN SOCIETY of  
CRYSTALLOGRAPHY  
and MINERALOGY

Vol. 16, No. 3, Fall 1387/2008

IRANIAN JOURNAL OF  
CRYSTALLOGRAPHY  
and MINERALOGY

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

A. Abedini<sup>1</sup>, A. A. Calagari<sup>1,2</sup>, B. Hadjalilu<sup>3</sup>, A. Jahangiri<sup>1</sup>

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, Payamnour 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, clinochlore, 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)<sub>N</sub> 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 شمال‌خاوری بوکان، شمال باختری ایران

علی عابدینی<sup>۱</sup>، علی اصغر کلاگری<sup>۲\*</sup>، بهزاد حاج علیلو<sup>۳</sup>، احمد جهانگیری<sup>۱</sup>

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 شمال‌خاوری بوکان، به شکل چینه‌سان در مرز بین سازنده‌های روتہ و الیکا گسترش و تکامل چافته 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، بوهیمت، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، پیروفیلیت، کلینوکلر، ایلیت، مونتموریولونیت، آناتاز، روتیل، آلبیت، 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، تفکیک HREEها را طی فرایندهای بوکسیتی شدن نشان می‌دهند. ملاحظات ژئوشیمیایی بیشتر نشان می‌دهند که تمکزهای LREEها با کانیهای هماتیت، گوتیت، اکسیدهای منگنز، Cerianite و فسفاتهای ثانویه (Vitusite، Rhabdophane)، Monazite و Gorceixite، Fergusonite و Euxenite رخ داده‌اند. تلفیق نتایج حاصل از بررسیهای کانی-REEها با کانی‌های رسی، روتیل، آناتاز، زیرکن، Euxenite و Fergusonite رخ داده‌اند. تلفیق نتایج حاصل از بررسیهای کانی-شناسی و ژئوشیمیایی پیشنهاد می‌کنند که علاوه بر فاکتورهایی چون تغییرات pH آبگونهای 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، شمال‌خاوری بوکان.

### ۱- مقدمه

قاعده مستثنی نبوده، و همواره مورد توجه زمین‌شناسان بوده است. بالکای و صمیمی [۱] به بررسی‌های چکشی برای شناسایی افقها و عدیسه‌های 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 نهشته-های بوکسیتی مورد توجه پژوهشگران داخلی و خارجی بوده است. بخش شمال‌خاوری شهرستان بوکان به مختصات جغرافیایی "۳۸°، ۲۳'، ۴۶۰ تا ۴۶۰، ۲۵'، ۵۳'" طول خاوری و "۳۶°، ۲۲'، ۳۶۰ تا ۳۶۰، ۳۷'" عرض شمالی، نیز از این

و سنگ مادر احتمالی به روش‌های فلوروسانی 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

#### ۱-۱- بررسیهای صحرایی

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). وقفه تهنشستی در گستره زمانی پرمو- تریاس با تشکیل لایه‌ها و عدسیهایی 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 آبغونهای 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 آگلومراتی در واحد سرخ قهوه‌ای سخت، آشاری از شکلهای پیزوفیزیکی، رگه‌های اولیه‌یست و مواد کائولینیتی در واحد سرخ آجری، آثاری از دندانهای منگنز در سطح کانسنگ‌های واحد سبز خاکستری و حضور آینه‌های گسلی در واحد کرم از ویژگیهای چشمگیر ریخت‌شناسی واحدهای این نهشته بوکسیتی است.

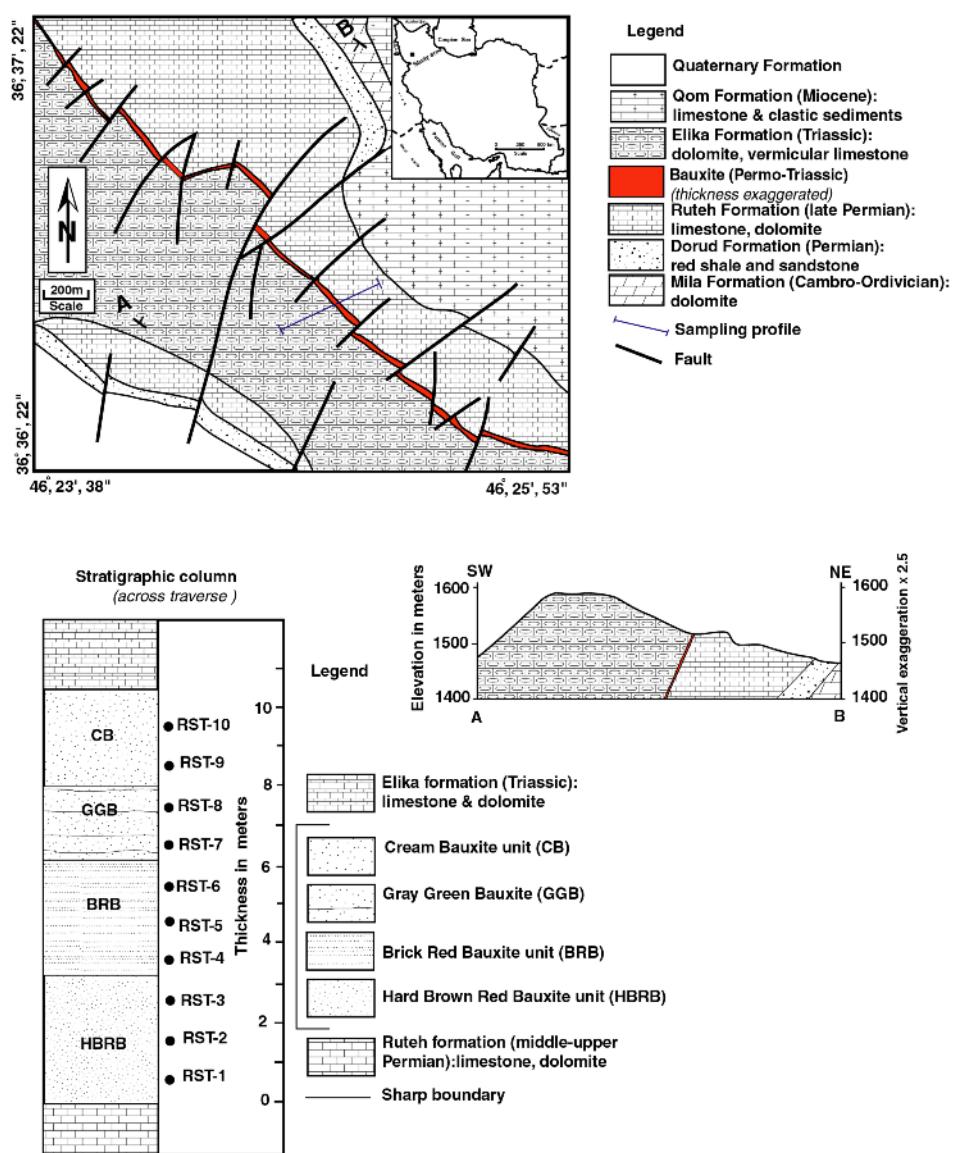
قرار داده است. خواجه محمدلو<sup>[۳]</sup> طی بررسیهای کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته‌های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان- غربی، اشاره‌هایی به کانیهای سازنده نهشته بوکسیتی این منطقه داشته است. امامعلی‌بور<sup>[۴]</sup> به بررسی امکان استحصال Ti از کانسنگ‌های این نهشته پرداخته است. بررسیهای وی نشان داد که 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<sup>[۵]</sup> به بررسی افزایش مدول Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> نمونه‌های مربوط به کانسنگ‌های این نهشته با استفاده از روش‌های فراوری و مدل سازی انحلال آنها در شرایط اسیدی، پرداخته است. در سال‌های اخیر، کارهای پژوهشی گستردۀای روی کنترل کننده‌های کانیایی و ژئوشیمیایی توزیع REE‌ها در این نوع نهشته‌ها در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است<sup>[۶-۱۵]</sup>. 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 "۴۶°، ۲۳'، ۳۸" تا ۴۶°، ۲۵'، ۵۳" طول خاوری و "۳۶°، ۳۶'، ۲۲" تا ۳۶°، ۳۷'، ۲۲" عرض شمالی، در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. بخش صحرایی 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 صحرایی، بخش آزمایشگاهی با انتخاب و تجزیه ۱۰ نمونه از کانسنگ‌های بوکسیتی به روش پراش پرتو X (XRD) در «سازمان زمین- شناسی 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

کربناتها (کلسیت) تشکیل دهنده‌های اصلی انبوهه‌های کانیایی این نهشت‌هاند. بین گروههای کانیایی 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 نهشت، 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 قهقهه‌ای سخت است.

**۲-۳- کانی‌شناسی**  
با توجه به سرشت ریزدانه و نبود خواص نوری ثابت برای اغلب کانیهای سازنده واحدهای سنگی، و عدم تشخیص کانیها با بررسیهای میکروسکوپیکی، در این کار پژوهشی از روش پراش پرتو X (XRD) برای شناسایی فازهای کانیایی استفاده شده است. نتایج حاصل دادند که ۵ گروه کانیایی 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 نهشت‌های بوکسیتی پرمو-تریاس در آن به همراه ستون چینه شناسی 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 بوكسیت شمال شرق بوکان به همراه یک نمونه سنگ بازالتی به روش‌های XRF و NAA

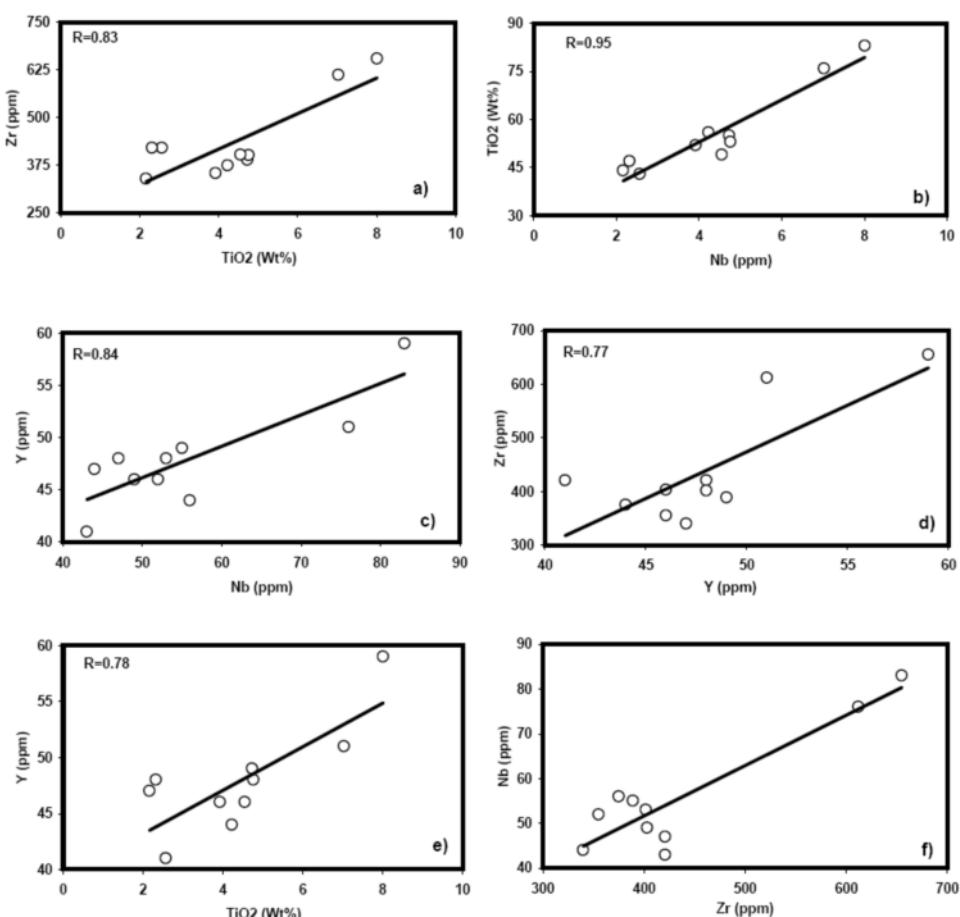
	RST-0	RST-1	RST-2	RST-3	RST-4	RST-5	RST-6	RST-7	RST-8	RST-9	RST-10
Name of unit	Basalt	HBRB	HBRB	HBRB	BRB	BRB	BRB	GCB	GCB	CB	CB
SiO <sub>2</sub> %	55,85	14,82	14,92	14,65	10,16	16,30	20,16	22,15	24,16	32,25	32,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,78	22,95	24,90	25,37	26,05	25,50	25,80	28,49	27,11	38,81	39,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,24	51,86	49,13	47,70	47,95	43,35	36,40	6,07	5,89	7,74	9,32
CaO	6,97	0,23	0,24	0,23	0,38	0,13	1,83	0,24	0,27	0,29	0,76
Na <sub>2</sub> O	2,63	0,56	0,50	0,41	0,08	0,02	0,27	0,13	0,18	0,21	0,22
MgO	4,34	0,34	0,63	0,93	0,85	0,11	0,12	0,47	0,43	0,11	0,21
K <sub>2</sub> O	0,93	0,58	0,11	0,03	0,11	0,17	0,78	1,59	1,63	2,78	1,83
TiO <sub>2</sub>	1,70	2,57	2,32	2,16	3,92	4,23	4,73	7,03	8,01	4,76	4,55
MnO	0,33	0,14	0,12	0,10	0,09	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,14	0,12	0,10	0,09	0,09	0,07	0,06	0,07	0,05	0,09
L.O.I	2,22	6,40	7,26	8,82	10,21	10,10	9,59	12,67	12,11	11,59	10,70
Sum	99,89	100,59	100,25	100,50	99,89	100,03	99,76	99,92	99,85	99,61	100,76
U ppm	2	1	3	9	4	3	3	5	4	4	8
Hf	5	1	1	1	2	2	2	4	5	4	4
Ba	444	688	601	501	476	410	401	476	360	311	360
Th	9	24	22	15	14	12	11	9	10	11	10
Co	12	41	69	102	98	94	88	17	16	9	10
Cr	51	988	991	1001	946	388	451	416	312	380	170
Ni	32	288	191	166	120	130	140	99	102	109	111
Rb	11	10	9	6	7	6	6	23	29	38	49
V	107	966	811	961	1007	652	701	693	786	569	360
Y	27	41	48	47	46	44	49	51	59	48	46
Zr	228	421	421	340	355	375	389	612	655	402	403
Nb	32	43	47	44	52	56	55	76	83	53	49
Sr	310	170	163	152	96	187	116	41	49	214	266
La	33	117	104	87	91	90	88	29	27	24	31
Ce	41	395	383	294	226	213	201	36	37	38	40
Nd	32	86	77	64	52	46	50	24	21	23	28
Sm	6,8	28	25	20,7	15,66	15,12	14,96	7,02	7,2	4,99	5,53
Eu	1,65	8,53	7,96	6,79	5,67	5,11	4,74	1,12	1,03	0,60	0,68
Tb	0,91	0,71	0,74	0,73	0,88	0,86	0,86	0,84	0,85	0,58	0,61
Ho	1,1	0,76	0,77	0,80	0,76	0,89	0,85	0,86	1,03	0,79	0,84
Tm	0,56	0,33	0,33	0,35	0,31	0,31	0,32	0,39	0,36	0,3	0,33
Yb	2,76	1,26	1,31	1,37	1,06	1,66	1,71	1,78	1,80	1,96	1,97
Lu	0,41	0,06	0,06	0,08	0,19	0,21	0,24	0,24	0,25	0,39	0,41

نهشته باشند. محاسبه ضرایب همبستگی و ترسیم نمودارهای دو متغیره نشان می‌دهد عناصر Ti, Nb و Zr که پتانسیل بالایی برای محفوظ ماندن از تغییرات شیمیایی در نیمرخهای هوارده نشات گرفته از سنگ‌های بازالتی دارند [۱۸-۲۲] در این نهشته همبستگی بالایی ( $R=0.95-0.77$ ) 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) و Y-Nb/TiO<sub>2</sub>  $\times 0.0001$  [۲۴] (شکل ۳b) در گسترهٔ موقعیت سنگ‌های بازالتی قرار می‌گیرند. از این‌رو سنگ‌های بازالتی را می‌توان به عنوان محتمل‌ترین سنگ مادر این نهشته در نظر گرفت.

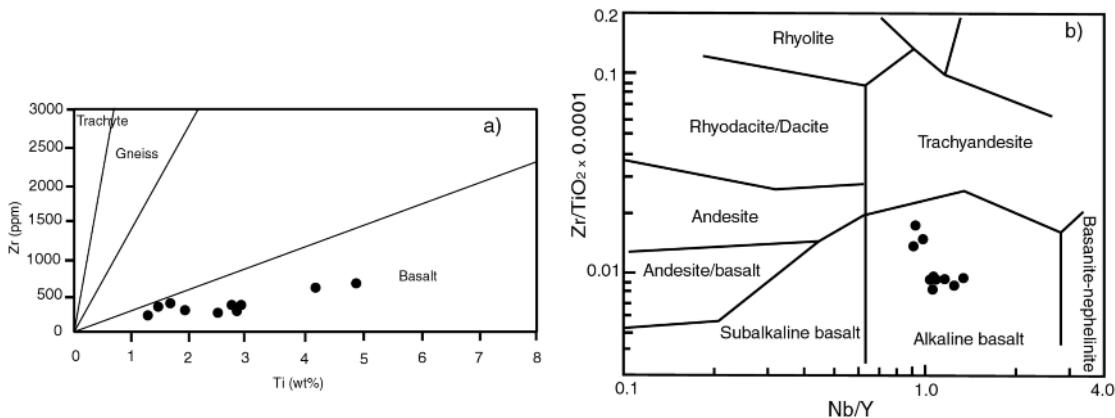
### ۳-۳-۳- ژئوشیمی

#### ۱- تعیین خاستگاه نهشته

با توجه به وجود مرز کاملاً مشخص بین این نهشته با سنگ‌های 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. مقایسهٔ 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 گسترهٔ سنگ‌های آذرین مافیک باشد. بنابراین سنگ‌های بازالتی واقع در برخوردهای واحد بوکسیت سرخ قهوه‌ای سخت با سنگ‌های بستر کربناته، می‌تواند گزینه مناسبی برای معرفی آن به عنوان خاستگاه احتمالی



شکل ۲ نمودارهای تغییرات (a) Zr-Nb (f) و TiO<sub>2</sub>-Y (e) .Zr-Y (d) .Nb-Y (c) .TiO<sub>2</sub>-Nb (b) .TiO<sub>2</sub>-Zr (a) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در شمال خاوری بوکان.



شکل ۳ موقعیت نمونه‌های بوکسیت مورد بررسی در نمودارهای دو متغیره (a)  $Zr/TiO_2 \times 0.0001 - Nb/Y$  و (b)  $Zr/TiO_2 \times 0.0001 - Nb/Y$  [۲۳] و [۲۴].

نظر گرفتن مقدار نظری  $\leq 50$  این شاخص برای سنگهای کاملاً سالم (جدول ۳)، حکایت از خروج عناصر Ca, Na, K در فرایندهای بوکسیتی شدن و به عبارت بهتر تبدیل فلدسپارهای سنگ مادر به کانیهای رسی در شکل گیری این نهشته دارد. با توجه به بازه نسبتاً کم تغییرات مجموع عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در کانسنگهای مورد مطالعه (۰-۴۳٪)، آنچه که از تغییرات مقادیر شاخص هوازدگی شیمیایی (CWI) استنباط می‌شود غنی شدگی عناصر Al, Fe, Ti و L.O.I و خروج بخشی عنصر Si طی فرایندهای هوازدگی و توزیع نامنظم کانیهای رسی (کاهش به سمت سنگ بستر) در سیستم بازماندی مورد مطالعه است (جدول ۳). با توجه به الگوی توزیع و غنی شدگی عناصر Al, Si, Fe [۳۱] (شکل ۴)، شرایط لاتریتی شدن متوسط در تشکیل واحدهای کرم و سبز خاکستری و لاتریتی شدن شدید در شکل گیری واحدهای سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای سخت حکم‌فرما بوده است.

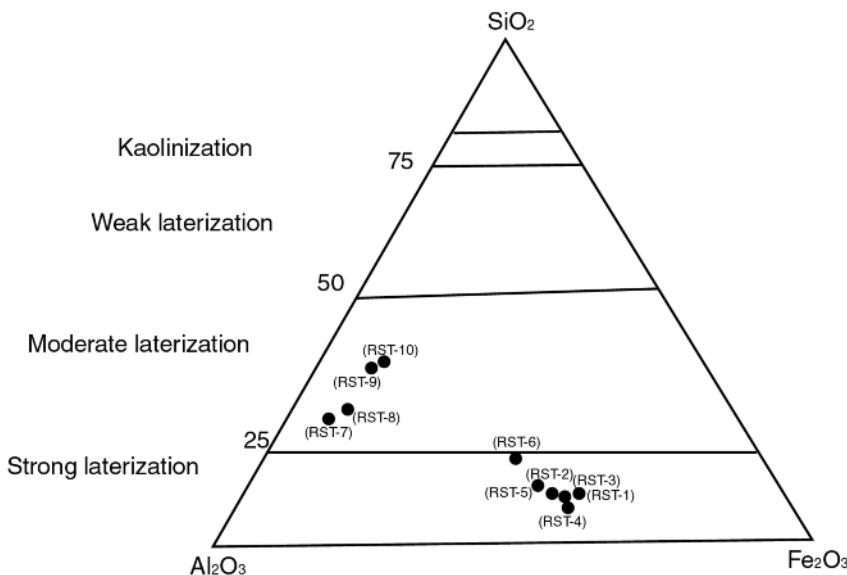
۲-۳-۳- شدت فرایندهای هوازدگی و لاتریت‌زایی (Ruxton  $SiO_2/Al_2O_3$  Ratio, CWI) شاخص هوازدگی شیمیایی (Chemical Weathering Index, CIA) شاخص شیمیایی دگرسانی (Chemical Index of Alteration, CIA) شیمیایی هوازدگی (Plagioclase Index of Weathering, CIW) شاخص پلاژیوکلاز دگرسانی (Sillica-Alteration, PIA) شاخص سیلیس-تیتان (Titania Index, STI) برای ارزیابی شدت فرایندهای هوازدگی شیمیایی سنگهای هوازدگی شده‌اند [۲۵-۳۰]. 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 شکل گیری 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	$SiO_2/Al_2O_3$	[۲۵]
CWI	Chemical Weathering Index	$(100)[Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2+L.O.I]/all\ chemical\ components$	[۲۶]
V	Vogt's Residual Index	$(Al_2O_3+K_2O)/(MgO+CaO+Na_2O)$	[۲۷]
CIA	Chemical Index of Alteration	$(100)[(Al_2O_3)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)]$	[۲۸]
CIW	Chemical Index of Weathering	$(100)[(Al_2O_3)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)]$	[۲۷]
PIA	Plagioclase Index of Alteration	$(100)[(Al_2O_3-K_2O)/Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)]$	[۲۹]
STI	Silica-Titania Index	$(100)(SiO_2/TiO_2)/[(SiO_2/TiO_2)+(SiO_2/Al_2O_3)+(Al_2O_3/TiO_2)]$	[۳۰]

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

Abbreviation Name		R	CWI	V	CIA	CIW	PIA	STI
Optimum fresh value		۱۰>	۵۰<	۱<	≤۵۰	≤۵۰	۵۰≤	۹۰>
Optimum weathered value		•	۱۰۰	Infinite	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	•
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	۹,۵۹	۴۲,۹۹
RST-10	CB	۰,۸۴	۶۳,۷۵	۳۴,۸۷	۹۳,۳۹	۹۷,۵۹	۹۷,۴۷	۴۳,۴۳



شکل ۴ موقعیت نمونه‌های نهشتہ بوکسیت شمال خاوری بوکان در نمودار سه متغیره  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [۳۱] برای تعیین فرایندهای هوازدگی.

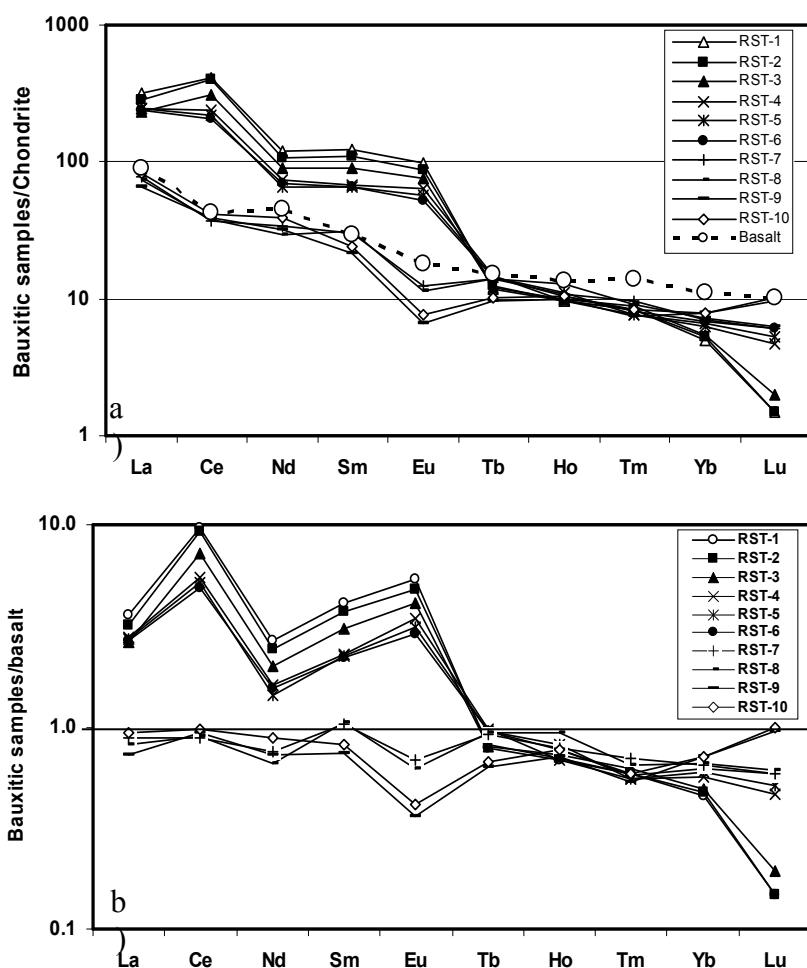
تغییرات برای LREE‌ها (La, Ce, Eu, Sm, Nd) شدید (۹۰-۶۳۴ ppm) و برای HREE‌ها (Tb, Ho, Yb, Lu) کم (۳-۴ ppm) است. الكوى توزيع REE‌ها بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت (شکل ۵a) نشان می‌دهد که REE‌ها

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

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

pHهای پایین و بالا به ترتیب باعث شستشو و تهنشستی LREEها طی فرایندهای هوازدگی می‌شوند [۳۳، ۹]. بنابراین pHهای اسیدی برای شستشوی LREEها طی شکل‌گیری واحدهای کرم و سبز خاکستری و pHهای قلیایی برای آبگونهای عامل هوازدگی برای تهنشینی LREEها طی شکل-گیری واحدهای سرخ آجری و سرخ قهوه‌ای محتمل به نظر می‌رسند. با توجه به مطالب یاد شده، عامل اصلی شستشوی REEها 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 غنی شدگی LREEها نسبت به HREEها شدیدتر بوده و غنی شدگی LREEها با نزدیک شدن به سنگ بستر کربناتی با آهنگ تقریباً منظمی تداوم داشته است. این الگوی جدایی LREEها را می‌توان دلیلی بر خاستگاه بر جازای این نهشته دانست [۳۲]. الگوی توزیع REEهای بهنجار شده نسبت به سنگ مادر بازالتی (شکل ۵b) نشان می‌دهد که LREEها در دو واحد سرخ آجری و کرم و سبز خاکستری تهی شده و در دو واحد سرخ قهوه‌ای قابل ملاحظه‌ای از HREEها طی شکل‌گیری هر چهار واحد سنگی از سیستم هوازده خارج شده‌اند. به نظر می‌رسد شستشو و تهنشستی LREEها در شکل‌گیری این سیستم بازماندی به تغییرات pH آبگونهای عامل هوازدگی کننده وابسته باشد.



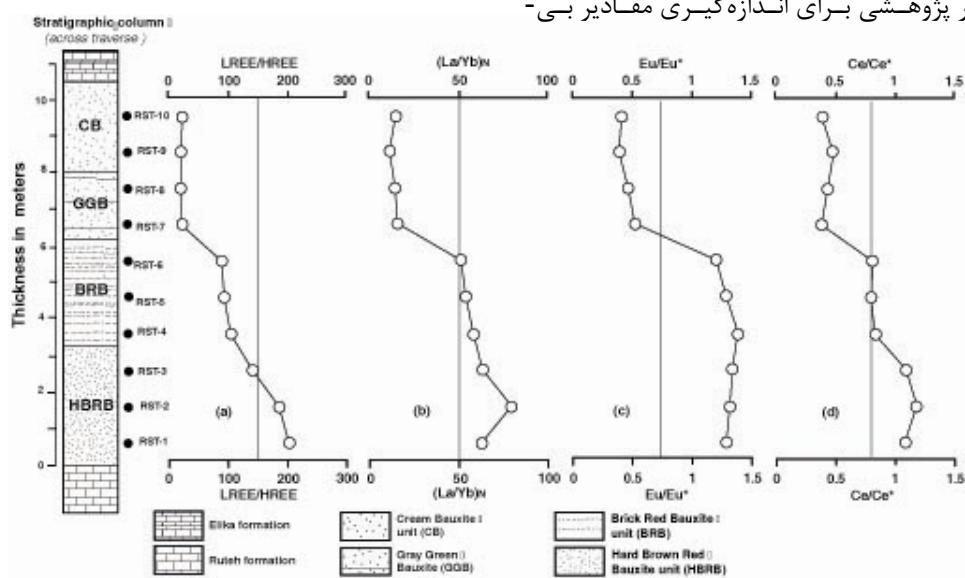
شکل ۵ (a) الگوی تغییرات REEها در واحدهای بوکسیتی و سنگ مادر بازالتی بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت و (b) الگوی تغییرات REEها در واحدهای بوکسیتی بهنجار شده نسبت به ترکیب سنگ مادر بازالتی برای نمونه‌های بوکسیتی شمال خاوری بوکان.

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

$$\text{Eu Anomaly} = (\text{Eu}_N) / \sqrt{\text{Sm}_N \times [(0.66\text{Tb}_N) + (0.33\text{Sm}_N)]} \quad [13]$$

$$\text{Ce Anomaly} = (3\text{Ce}_N) / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N) \quad [38]$$

در فرمول‌های بالا N بهنجر شدن عناصر مربوطه به ترکیب کندریت را نشان می‌دهد [۳۹]. بنابراین محاسبات یاد شده نشان می‌دهند که بازه تغییرات بی‌هنجری Eu در نیمرخ هوازده از ۰/۰۴ تا ۱/۳۹ و برای بی‌هنجری Ce از ۰/۰۴ تا ۱/۳۹ بوده است. الگوی توزیع این بی‌هنجریها حاکی از افزایش نسبی آنها با نزدیک شدن به سنگ بستر است (شکل ۶). همبستگی بالای بی‌هنجری Eu با بی‌هنجری Ce ( $R=0.9$ ) نشان از شباهت در فاکتورهای کنترل کننده تغییرات آنها طی فرایندهای بوکسیتی شدن دارد. نمودارهای دو متغیره بی‌هنجریهای Eu و Ce در برابر سه اکسید اصلی سازنده نهشته‌های  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (شکل ۷) نشان می‌دهند که کانی‌های آهن دار در فرایند روبش و تمرکز این عناصر نقش بسیار مهمی در نیمرخ هوازده و ایجاد بی‌هنجریها یاد شده ایفا کرده و نمی‌توان نقشی برای کانی‌های رسی در این زمینه قائل شد. به عبارت بهتر افزایش pH آگونهای عامل هوازدگی به دلیل ماهیت کربناته سنگ بستر به همراه فرایندهای جذب سطحی به وسیله اکسیدهای آهن نقش مهمی در ایجاد بی‌هنجریهای مثبت Eu و Ce طی فرایندهای بوکسیتی شدن در این نهشته ایفا کردند.



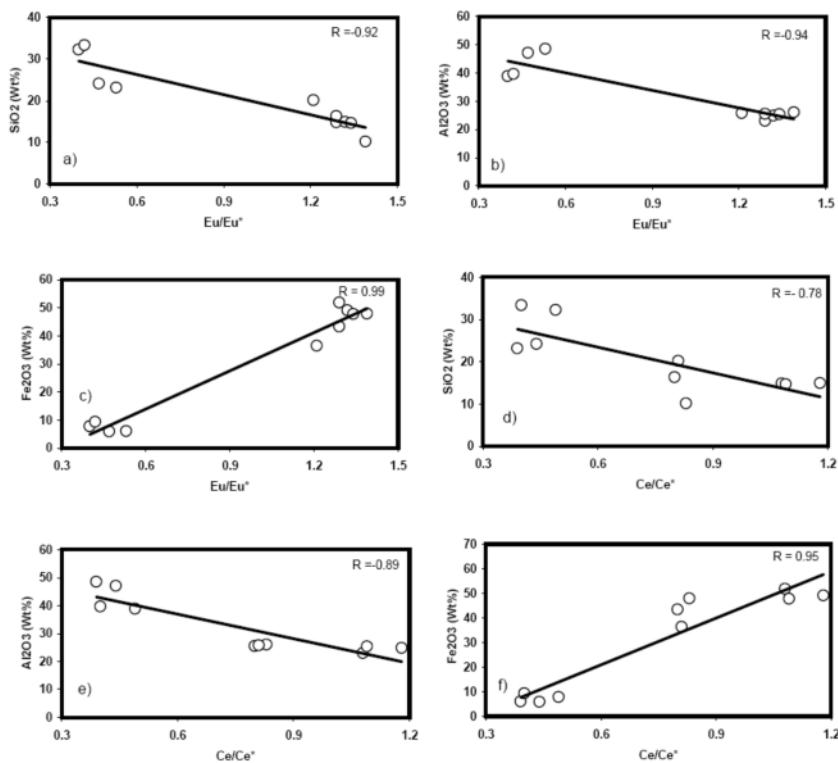
شکل ۶ تغییرات نسبت‌های (a) LREE/HREE ، (b)  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (c)  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  و (d)  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  در عرض نیمرخ مورد مطالعه. حرف N بهنجر شدن عناصر مربوطه به ترکیب کندریت [۳۹] را نشان می‌دهد.

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

نسبت تغییرات LREE/HREE در نیمرخ هوازده از ۲۱/۷۳ الى ۲۰/۳۸ 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 بازنده 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 بوکسیتی Al برابر عناصر اصلی سازنده (Al و Fe) و Si (نهشته‌های بوکسیتی Al و Si همبستگی منفی بالای ( $< -0.78$ ) با نسبت‌های یاد شده و همبستگی مثبت بالای ( $> 0.91$ ) 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 هماتیت و گوتیت یکی از عوامل اصلی غنی شدگی LREEها در این نیمرخ هوازده بوده‌اند.

### ۴-۳-۴- بی‌هنجریهای Ce و Eu

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



شکل ۷ نمودارهای تغییرات بیهنجاری Eu در برابر (a), SiO<sub>2</sub> (b), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (c) و Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (d) و Ce/Ce\* 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 تنه‌شینی آهن در سیستم بازماندی کنترل شده است. پوکروفسکی و همکاران [۴۱] طی بررسیهای خود به نتایج مشابهی رسیده‌اند. همبستگی بالا بین Ti و Nb (۰/۸۳) و نیز Ti با Tb, Ho و Yb (۰/۲۱) نشان می‌دهد که برخی از کانیهای Ti دار و Nb دار، مانند روتیل و آناتاز، تا حدودی توزیع HREE‌ها در این نهشته را در کنترل خود داشته‌اند. زیرکن که از نظر شیمیایی بی‌تحرک‌ترین کانی طی فرایندهای هوازدگی محسوب می‌شود Tm و Ho با Zr با MnO [۴۲-۴۴]، با توجه به همبستگی بالای HREE‌ها در این نهشته معرفی کرد. همبستگی‌های بالای HREE با La, Nd, Sm, Eu و MnO با Al, Si, Ce, La, Sm, Nd, Ce, La, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> در نیمرخ بوکسیتی می‌تواند مبین به تله افتادن LREE‌ها به وسیله اکسیدهای منگنز طی فرایندهای هوازدگی باشد [۴۵، ۴۶]. ضرایب همبستگی بالای مثبت بین Eu و Sm, Nd, Ce, La با P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (۰/۷۹) می‌تواند نشانگر کنترل توزیع بخشی از LREE‌ها به

### ۳-۶-۶- کانی‌های میزبان REE‌ها

با بررسیهای پراش پرتو X (XRD) در فازهای کانی‌ای شناسایی شده‌اند که فراوانی بالای ۴٪ داشته‌اند. بنابراین علاوه بر فازهای کانی‌ای شناسایی شده، کانیهای دیگری نیز می‌توانند میزبان REE‌ها در این نهشته باشند که با بررسیهای آنالیزهای پراش پرتو X شناسایی نشده‌اند. 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 La, Ce, Nd, Sm و Sm, Nd با Ce, La, Sm, 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 (۰/۶۱) بین Al و Si با Ce, La, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb و Lu (HREE) حاکی از اینست که کانیهای رسی برخلاف LREE‌ها بخشی از توزیع HREE‌ها را در کنترل خود دارند. همبستگی‌های بالای Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با LREE‌ها (۰/۸۶) دلالت

سنگهای بازالتی واقع در برخوردگاه این نهشته با سنگهای بستر کربناته، متحملترین سنگ مادر این نهشته‌اند. محاسبات شاخصهای هوازدگی و دگرسانی نشان از توزیع ناموزون کانیهای رسی طی فرایندهای لاتریتی شدن متوسط تا شدید و غنی‌شدگی عناصر Al، Fe و Ti در سیستم هوازده دارند. شواهد ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که این نهشته از یک پیدایش کامل‌بر جازا برخوردار بوده و افزایش pH آبگونهای عامل هوازدگی به وسیله سنگهای بستر، حضور کانیهای مقاوم در سیستم بازماندی، پایداری کمپلکس‌های حمل کننده به همراه تعییرات در پتانسیل یونی REE‌ها و فرایندهای جذب سطحی مهمترین عوامل جدایی HREE‌ها از LREE‌ها 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 بی‌هنجریهای 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، Monazite، Euxenite، Rhabdophane، Cerianite، Gorceixite، Vitusite، Fergusonite و اکسیدهای منگنز می‌باشان 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 نویسنده‌گان نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین آن سازمانها ابراز دارند.

وسیله کانیهای فسفاتی باشد. همبستگی بالای  $\text{Na}_2\text{O}$  با  $\text{P}_2\text{O}_5$  و Nd ( $>0.6$ ) نشان از حضور احتمالی کانی فسفاته Vitusite در این نهشته دارد. Ba که رفتارهای کاملاً متغیری طی فرایندهای هوازدگی از خود نشان می‌دهد [۴۷]، در نیمرخ Sm و Nd ( $>0.67$ ) دارد که می‌تواند حاکی از حضور احتمالی کانیهای فسفات آلومینیومداری مانند Gorceixite و  $[\text{BaAl}_3(\text{LREE}, \text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}]$  در نهشته مورد بررسی باشد. همبستگیهای بالای بین عناصر La و Ce با  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $>0.79$ ) دلیلی است بر حضور احتمالی کانیهای Rhabdophane و Monazite در این نهشته. همچنین همبستگیهای بالای بین Th با  $\text{Ce}$  ( $>0.77$ ) و Y با  $\text{Nb}$  ( $>0.78$ ) و Y با  $\text{Nb}$  ( $>0.84$ ) به ترتیب دلیلی بر حضور احتمالی کانیهای Fergusonite، Euxenite، Cerianite و Fergusonite در کانسنگ‌های 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 سازندگان کربناتی - شیلی روته و کربناتی الیکا گسترش و تکامل یافته است. عملکرد فرایندهای هوازدگی طی شکل‌گیری این نهشته با گسترش کانیهای دیاسپور، بوهمیت، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، پیروفیلیت، روتیل، کلینوکلر، ایلیت، مونت‌موریلوبونیت، آناتاز، آلبیت، سانیدین، کوارتز، و کلسیت همراه شده است. با توجه به بررسی‌های صحرایی، یافته‌های کانی‌شناسی و الگوی توزیع عناصر Cr، Ni، Zr، Ti، 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.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	Y	Zr	V	Th	Ba
La	-0.94	0.98	-0.85	-0.77	0.75	0.79	0.58	0.58	0.64	0.78	0.67
Ce	-0.85	0.86	-0.78	-0.82	0.83	0.84	-0.56	-0.51	0.67	0.91	0.82
Nd	-0.75	0.91	-0.86	-0.84	0.89	0.89	0.75	-0.51	0.65	0.92	0.86
Sm	-0.89	0.92	-0.79	-0.78	0.88	0.88	0.79	-0.42	0.70	0.92	0.81
Eu	-0.89	0.97	-0.85	-0.81	0.85	0.83	0.71	-0.52	0.71	0.85	0.46
Tb	0.89	-0.91	0.77	0.71	-0.87	-0.80	-0.21	0.34	-0.81	-0.86	0.11
Ho	0.61	0.01	-0.56	0.81	-0.67	-0.45	0.76	0.71	-0.11	-0.57	-0.53
Tm	0.14	-0.35	0.10	0.46	0.14	-0.11	0.53	0.77	0.11	-0.14	0.14
Yb	0.74	-0.87	0.85	0.71	-0.90	-0.84	-0.81	0.30	-0.81	-0.88	-0.92
Lu	0.64	-0.81	0.89	0.56	-0.80	-0.74	-0.79	0.17	-0.83	-0.79	-0.85

- 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 basalt 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] Valeton 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., "Recent 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.

## - مراجع -

- [1] Balkay B., Samimi M., "Geological investigations of Iranian bauxites and other high-alumina materials", Geological survey of Iran, Internal paper (1972).
- [2] حسامی ع، "بررسی های اکتشافی بوکسیت های خاوری بوکان"، رساله کارشناسی ارشد دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۰) ۲۸۵ ص.
- [3] خواجه محمدلو ن، "کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئونهشتۀ های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان غربی و تعیین کاربری آنها"، رساله کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۸۳) ۱۳۸ ص.
- [4] امامعلی پور ع، "بررسی امکان استحصال Ti از کانسینگ های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان غربی"، طرح پژوهشی گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه، (۱۳۸۲).
- [5] عبدالهی ه، "افزایش مدل Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> نمونه کانسینگ بوکسیت بوکان با کاربرد روش‌های فراوری، و مدل سازی لیچینگ (انحلال)، آن در شرایط اسیدی"، رساله کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن دانشکده فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۴) ۱۶۵ ص.
- [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 Dogankuzu 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: Dixson, 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, Singapore (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., Nordstrom 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