

# بررسی فاکتورهای کنترل کننده توزیع عناصر جزئی (شامل عناصر نادر خاکی) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در کانی‌شسته، خاور بوکان، شمال باختر ایران

نوشته: علی عابدینی\* و علی اصغر کلاگری\*\*

\*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
 \*\*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۲/۰۴

## چکیده

نهشته بوکسیت کارستی کانی شسته، در ۱۹ کیلومتری خاور بوکان، در جنوب استان آذربایجان شرقی، شمال باختر ایران واقع شده است. این افق در مرز بین سازندهای کربناتی-شیلی روت (پرمین میانی تا بالایی) و کربناتی الیکا (تریاس زیرین) قرار داشته و شامل ۵ واحد سنگی جدا از هم است. شواهد صحرایی، مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی نشان داده‌اند که نوسانات شرایط آب و هوایی به همراه تنش‌های ساختاری تأثیر بسزایی در تشکیل این افق داشته‌اند. الگوی توزیع REEها (بهنجار شده به کندریت)، تفریق و غنی‌شدگی شدید LREEها نسبت به HREEها و نحوه تشکیل برج‌زای افق را نشان می‌دهند. محاسبات شاخص هوازدهگی مطلق، فرض Nb به عنوان عنصر بی‌حرک و پوسته قاره‌ای بالایی به عنوان منشأ برای مواد مادر، نشان می‌دهند که فرایندهای شستشو و تثبیت، دو تنظیم کننده اصلی در تمرکز عناصر جزئی در این افق هستند. مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که توزیع Al، Fe و Si تأثیر زیادی در تغییرات نسبت La/Y، توزیع عناصر جزئی در سیستم بازماندی و ناهنجاری Eu داشته‌اند. تلفیق نتایج به دست آمده نشان داده که تغییرات بافتی، جذب ترجیحی به وسیله اکسیدهای فلزی (هماتیت)، بافرینگ محلول‌های هوازده کننده توسط سنگ بستر کربناتی، کنترل کانی‌شناختی و تغییر pH محیط، مهم‌ترین عامل‌های کنترل کننده در توزیع LILE، HFSE، HREE، LREE و TTE، طی فرایندهای لاتریتی شدن در کانی‌شسته هستند.

**کلید واژه‌ها:** بوکسیت کارستی، شاخص هوازدهگی مطلق، عناصر جزئی، کانی‌شسته، بوکان

## ۱- مقدمه

منطقه کانی‌شسته، در ۱۹ کیلومتری خاور شهرستان بوکان، به مختصات جغرافیایی " ۵۸، ۱۸' تا " ۴۶، ۴۰" عرض شمالی، در جنوب استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این منطقه به سبب حضور افق‌های بوکسیتی-لاتریتی از دیرباز مورد توجه کارشناسان خارجی و داخلی بوده است. (Balkay & Samimi, 1972) و افتخارنژاد (۱۹۷۳) اولین پژوهشگرانی بودند که این منطقه را به ترتیب از نظر پتانسیل یابی ذخایر بوکسیتی و زمین‌شناسی ناحیه‌ای مطالعه و بررسی کرده‌اند. مطالعات آنها منجر به شناسایی نهشته‌های بوکسیتی-لاتریتی در دو افق پرمو-تریاس و تریاس بالایی در خاور بوکان شد. (Kamini & Eftekhari-Nezad, 1977) ویژگی‌های کانی‌شناختی این ذخایر را به صورت مقدماتی در طی مطالعه ذخایر لاتریت شمال باختر ایران مورد بررسی قرار داده‌اند. حسامی (۱۳۷۰) ویژگی‌های زمین‌شناختی این دو افق را از دیدگاه زمین‌آماری مورد بررسی قرار داده است. (Calagari & Abedini, 2007) با استفاده از محاسبات تعادل جرم در سیستم‌های دگرسانی و هوازدهگی به بررسی ویژگی‌های سنگ‌نگاری، ژنتیکی و تعیین منشأ احتمالی نهشته بوکسیت پرمو تریاس منطقه پرداخته‌اند. با نگرشی بر مطالعات انجام شده پیشین بر روی این ذخایر و به‌رغم بررسی‌های تفصیلی بر روی رفتار عناصر جزئی و بوژه عناصر نادر خاکی ذخایر بوکسیت در نقاط مختلف دنیا (Maksimovic & Panto, 1991; MacLean et al., 1997; Mongelli, 1997; Hill et al., 2000; Meyer et al., 2002; Temur et al., 2005; Santos et al., 2006; Mamei et al., 2007) تاکنون مطالعات جامعی در این خصوص بر روی این نهشته انجام نشده است. این مقاله اطلاعات به نسبت جامعی در خصوص فاکتورهای کنترل کننده، سازوکارهای تفریق و غنی‌شدگی عناصر جزئی (بوژه عناصر نادر خاکی) را در طی فرایند تشکیل این نهشته ارائه می‌دهد.

## ۲- روش مطالعه

مطالعه سنگ‌های بوکسیتی در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. در بخش صحرایی پیمایش‌هایی در فروردین ماه سال ۱۳۸۴ برای بررسی تشکیلات زمین‌شناسی موجود، شکل نهشته و نحوه ارتباط آن با سنگ‌های درون‌گیر و ویژگی‌های ماکروسکوپی انواع رخساره‌های سنگی موجود صورت گرفته است. با توجه به تغییرات سنگ‌شناسی، تعداد ۱۰۰ نمونه از سنگ‌های بوکسیتی، سنگ بستر و پوشش برداشت شده است. نمونه‌برداری افق بوکسیتی در دو نیم‌رخ عمود بر افق بوکسیتی بر اساس تغییراتی که در ویژگی‌های فیزیکی نظیر رنگ، چگالی، سختی و بافت، انجام شده است. شناسایی ویژگی‌های اصلی سنگ‌شناسی شامل ویژگی‌های بافتی و ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها با مطالعات پتروگرافی حدود ۲۰ مقطع نازک و صیقلی و پراش پرتو ایکس (XRD) حدود ۱۰ نمونه بوکسیتی در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال باختر کشور انجام شده است. همچنین برای مطالعات ژئوشیمیایی از تجزیه ۳۳ نمونه به روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) (جدول‌های ۱ و ۲) و ۵ نمونه به روش تجزیه فعال‌سازی نوترونی (NAA) (جدول ۳) بهره گرفته شده است. تجزیه‌های شیمیایی یاد شده به ترتیب در شرکت کانساران بینالود و بخش مینیاتوری سازمان انرژی اتمی اصفهان انجام شده است. دقت تجزیه‌های XRF برای عناصر اصلی حدود ۰/۵٪ ± و برای عناصر جزئی ۲٪ ± بوده است. همچنین محدوده آشکارسازی (Detection limit) برای شناسایی عناصر اصلی حدود ۰/۰۱ در صد وزنی و برای عناصر جزئی شامل V، Co، Cu، Rb، Mo، Y و W حدود ۱ ppm و برای بقیه عناصر جزئی در حدود ۲ ppm بوده است.

## ۳- بحث

### ۳-۱. زمین‌شناسی

بارزترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه به ترتیب قدیم به جدید شامل سازندهای فیلیتی، گنایسی و آتشفشانی (پرکامبرین زیرین)، کربناتی-شیلی میلا

در اثر انقباض ژل به وجود آمده‌اند (شکل ۲ d) (Bardossy & Aleva, 1990). در این واحدها، هسته ائویدها را کانی‌های هماتیت تشکیل داده‌اند. واحدهای کرم مایل به سبز و زرد نیز به مانند واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای، از تنوع بافتی و ساختاری بیشتری برخوردار هستند. بافت‌های پورفیری دروغین و جریانی مهم‌ترین ساختارهای موجود در این واحدها هستند. دیاسپورها به تنهایی و گهگاه به همراه هماتیت به صورت بلورهای تخت و کشیده و به حالت پهن شده (شکل ۲e) مشاهده می‌شوند. برخلاف سه واحد زیرین در این واحدها جانشینی کانی‌های دیاسپور و رسی به جای هماتیت عامل اصلی تشکیل بافت پورفیری دروغین بوده است. ساختارهای سایه فشاری که نشان از عملکرد فشارهای زمین‌ساختی و تنش‌های ساختاری هستند به فراوانی در این واحدها مشاهده می‌شوند. جنس کانی‌های باقیمانده در این واحدها به طور عمده از نوع آمفیبول هستند (شکل ۲f).

### ۳-۳. ژئوشیمی

#### — pH محیط تشکیل بوکسیت

ارزیابی تغییرات نسبت La/Y در عرض یک نهشته بوکسیتی، متغیر بسیار مناسبی برای مشخص کردن محدوده تغییرات pH آن است. در این شرایط نسبت  $< 1$  نشان‌دهنده حاکم بودن شرایط اسیدی و نسبت  $> 1$  نشان‌دهنده شرایط قلیایی حاکم در روند تکوینی یک سامانه بوکسیتی است (Crunici & Jurkovic, 1990; Maksimovic & Panto, 1991). بررسی نحوه تغییرات این نسبت در عرض دو نیمرخ مورد مطالعه در نهشته بوکسیت کانی شسته (شکل‌های ۳a, b) حاکی از پایین بودن این نسبت در بخش‌های بالایی، و افزایش شدید آن در بخش‌های زیرین است. بنابراین حضور شرایط به نسبت اسیدی در شکل‌گیری واحدهای کرم مایل به سبز و زرد و شرایط به شدت قلیایی در تشکیل واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای این نهشته محتمل است. رسم نمودارهای دو متغیره La/Y در برابر  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  نشان می‌دهد که توزیع Fe در نهشته بوکسیتی با نسبت La/Y رابطه مستقیم و با توزیع Si و Al رابطه معکوس دارد (شکل‌های ۳a, b, c). با توجه به این الگوهای توزیع، می‌توان چنین تصور کرد که تغییرات نسبت La/Y در نهشته مورد مطالعه، با توزیع این عناصر کنترل شده است.

#### — شدت فرایند هوازدگی

بر اساس نمودار سه متغیره  $SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$  (Schellmann, 1983) (شکل ۵) نهشته بوکسیت کانی‌شسته طی فرایند هوازدگی شرایط لاتریتی شدن ضعیف که به طور عمده در واحدهای کرم مایل به سبز و زرد متجلی شده است، به‌رغم این که تفکیک بسیار خوبی بین  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  رخ داده است و کم‌و بیش تمامی نمونه‌ها دارای آهن پایینی هستند ولی در کل،  $SiO_2$  به عنوان یک اکسید مضر در سیستم بازمماندی باقیمانده است. در واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای که فرایند لاتریتی شدن متوسط را متحمل شده‌اند، به‌رغم پایین بودن مقدار  $SiO_2$ ، تفکیکی بین  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  صورت نگرفته است.

#### — الگوی توزیع REE

متوسط ترتیب فراوانی REEها در این نهشته به صورت  $Ce > La > Nd > Sm > Eu > Ho > Yb > Tb > Tm > Lu$  (جدول ۳). بازه تغییرات برای LREEها ( $Eu > La > Ce > Nd > Sm$ ) شدید (۷۳-۱۲۱ ppm) و برای HREEها ( $Tb > Lu$ ) کم (۱۴-۴ ppm) است. الگوی توزیع REEها بهنجار شده به ترکیب کندریت (Taylor and McLennan, 1985) برای واحدهای بوکسیتی کانی‌شسته (شکل ۶) نشان از غنی‌شدگی LREEها ( $La, Ce, Nd, Sm, Eu$ ) و HREEها ( $Tb, Lu$ ) (شکل ۶) نسبت به کندریت دارد. در این میان غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در تمامی واحدها بجز واحد سرخ قهوه‌ای شدیدتر است. این الگو، تفریق و غنی‌شدگی LREE نسبت به HREEها را در طی فرایند بوکسیتی شدن

(کامبرین)، ماسه‌سنگی درود (پرمین زیرین)، کربناتی روته (پرمین میانی تا بالایی)، کربناتی الیکا (تریاس زیرین)، شیلی و ماسه‌سنگی شمشک (ژوراسیک)، آهکی و رسوبات آواری قم (میوسن)، و تشکیلات کواترنری هستند (شکل ۱). از ویژگی‌های بارز این منطقه حضور افقی از عدسی‌های بوکسیتی در مرز بین سازندهای روته و الیکا است (شکل ۲a). این افق دارای روند NE-SW بوده (شکل ۱) و به‌طور متوسط ۱۰ متر ستبراً دارد. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که سنگ بستر این افق در بیشتر نقاط در تماس با بوکسیت، در نتیجه نفوذ تدریجی محلول‌های آهن‌دار از بوکسیت به درون درز و شکاف‌های موجود، به رنگ صورتی تا ارغوانی در آمده است. عملکرد گسل‌های کوچک بوئیه گسل‌های امتدادلغز باعث جابه‌جایی‌های کوچک در بخش‌های مختلف افق بوکسیتی شده و آثار این فعالیت‌های زمین‌ساختی با حضور آینه‌های گسلی مشهود است. این افق همچنین، همبری واضح با سنگ‌های درون‌گیر بستر و پوشش دارد. این مرز مشخص می‌تواند دلیلی بر توقف رسوبگذاری قبل و بعد از تشکیل بوکسیت باشد. در بعضی قسمت‌ها در قاعده افق بوکسیت و در بخش‌های بالایی سنگ‌های کربناتی سازند روته برونزدهایی از شیل‌های نازک‌لایه دیده می‌شود که به‌شدت فرسایش یافته و متورق شده‌اند. بر اساس مشاهدات صحرایی و رنگ لایه‌های بوکسیتی، ۵ واحد سنگی مجزا در داخل این افق تشخیص داده شد. این واحدهای سنگی به ترتیب از پایین به بالا شامل بوکسیت‌های (۱) سرخ تیره، (۲) سرخ، (۳) سرخ قهوه‌ای، (۴) کرم مایل به سبز و (۵) زرد هستند. نمونه‌های مربوط به واحدهای کرم مایل به سبز و زرد چگالی و سختی کمتری نسبت به نمونه‌های مربوط به واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای دارند. سختی نمونه‌های مربوط به واحدهای کرم مایل به سبز و زرد در جهت لایه‌بندی این واحدها کاهش نشان می‌دهد. از ویژگی‌های بارز دو واحد یاد شده، وجود ادخال‌های سیاه رنگ در یک زمینه دانه‌ریز است که به آنها حالت اسفنجی بخشیده است. برونزدهای مربوط به واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای گاهی به دلیل انحلال و آب‌شویی هماهنگ، طرح‌های چند رنگی نشان می‌دهند. لایه‌بندی‌های ظریف در دو واحد بالایی به سمت پایین، جای خود را به ساختارهای توده‌ای فاقد لایه‌بندی داده است. مهم‌ترین مشخصه سه واحد زیرین، حضور گرهک‌های هماتیت در متن کانسنگ‌ها است. اندازه این گرهک‌ها به سمت سنگ بستر کربناتی افزایش می‌یابد.

### ۳-۲. سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

مطالعات سنگ‌نگاری و نتایج XRD نشان می‌دهد که کانی‌های دیاسپور، هماتیت، کلریت، پیروفیلیت، روتیل، مسکوویت، کانولینیت، کوارتز و آمفیبول کم‌و بیش در همه واحدهای بوکسیتی حضور دارند. اختلاف اساسی واحدهای بوکسیتی فراوانی کانی‌های رسی در واحدهای کرم مایل به سبز و زرد و هماتیت در واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای است. همچنین افزون بر کانی‌های یاد شده، ناکریت، فلدسپار و کلسیت نیز واحدهای کرم مایل به سبز و زرد را همراهی می‌کنند. از نظر بافتی، تفاوت‌های فراوانی بین دو واحد بالایی با سه واحد زیرین مشاهده می‌شود. شرایط فیزیکو‌شیمیایی حاکم در تشکیل واحدهای سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای باعث شکل‌گیری بافت‌های گرهکی (Nodular)، دانه‌ای تمام خودریخت (Panidiomorphic granular)، پورفیری دروغین (شکل ۲b)، برشی دروغین (شکل ۲c)، ائویدی و جریانی شده است. هماتیت‌ها در این واحدها عمدتاً به صورت گرهک، گرانول و رگه‌ای مشاهده می‌شوند. وجود رگه‌های اولیژیست در این واحدها، توزیع دوباره آهن در نیمرخ بوکسیتی را نشان می‌دهند. گاهی این رگه‌ها، گرهک‌های هماتیت را که جهت‌گیری‌های ضعیفی نشان می‌دهند قطع کرده‌اند. همچنین گاهی در داخل کانی‌های هماتیت، شکاف‌هایی به صورت نامنظم و یا شعاعی دیده می‌شود که به خود کانی‌ها محدود بوده و در زمینه سنگ تداوم نیافته‌اند. این شکاف‌ها به گمان

متغیری طی فرایندهای بوکسیتی شدن در کانی شسته از خود نشان داده‌اند، به طوری که محدوده تهی‌شدگی و غنی‌شدگی در بین واحدهای بوکسیتی از ۳۴/۱۶- تا ۱۸۳/۱۲% متغیر است (جدول ۵). این محاسبات همچنین نشان می‌دهد که این عناصر از دو واحد بالایی (کرم مایل به سبز و زرد) شسته شده و در سه واحد زیرین (سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای) رسوب کرده‌اند. بیشترین تمرکز REEها، در واحد زیرین (سرخ تیره)، در نزدیک همبری آن با سنگ بستر کربناتی رخ داده که به گمان در طی مرحله آغازین دیاژنز، در شرایط اکسیدان صورت گرفته است (Maksimovic & Panto, 1991). بررسی تغییرات درصد شاخص هواز دگی مطلق نشان می‌دهد LREEها نسبت به HREEها با نزدیک شدن به سنگ بستر تفریق بیشتری یافته‌اند (شکل‌های a, b). در واقع، LREEها از دو واحد بالایی (کرم مایل به سبز و زرد) شسته و در سه واحد زیرین (سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای) غنی شده‌اند. HREEها برخلاف LREEها، در طی فرایند بوکسیتی شدن در کانی شسته بجز در واحد سرخ قهوه‌ای، در طی فرایند شکل‌گیری بقیه واحدها از سامانه بازماندی خارج شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی تغییرات نسبت La/Y (شکل ۳)، عامل اصلی شستشوی HREEها از دو واحد بالایی، به احتمال آب‌های تراوش کننده سطحی توسط سنگ‌های کربناتی، در شرایط pH پایین بوده است. HREEها در دو واحد زیرین (سرخ تیره و سرخ) به دلیل تشکیل کمپلکس‌های یونی پایدار کربناتی در اثر خنثی‌سازی pH آب‌های تراوش کننده از سیستم خارج شده‌اند (Cantrell and Byrne, 1987). همبستگی بالای درصد تغییرات شاخص هواز دگی مطلق HREEها با درصد تغییرات شاخص هواز دگی Zr (جدول ۴) و همچنین درصد تغییرات شاخص هواز دگی HREEها با مقدار Nb واحدهای بوکسیتی (جدول ۴) حضور HREEها در کانی‌های Zr و Nb دار در دو واحد سرخ قهوه‌ای را نشان می‌دهد (Nesbitt et al., 1997; Belousova et al., 1998; Compton et al., 2003; Lopez et al., 2005). مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌های رسی (کلریت، کائولینیت، پیروفیلیت و ناکریت) در دو واحد بالایی و هماتیت به فرم غالب گرهک در سه واحد زیرین غنی شده‌اند. از آنجایی که LREEها نسبت به HREEها ترجیحاً به اکسیدهای فلزی (هماتیت)، در شرایط قلیایی جذب می‌شوند (Koeppenkastrup and De Carlo, 1993; White, 2000; Coppin et al., 2002) می‌توان ادعا نمود که چنین شرایطی نیز برای افزایش و غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREEها در سه واحد زیرین نهشته بوکسیتی کانی شسته حکمفرما بوده است (شکل ۸). همچنین نسبت  $(La/Yb)_{UCC}$  در این نهشته از واحد بالایی (زرد) به واحد زیرین (سرخ تیره) از ۱/۰۱ به ۱۴/۲۶ افزایش یافته است (جدول ۳). یکی از دلایل اصلی افزایش این نسبت در واحدهای آهن دار زیرین (سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای) می‌تواند به دلیل حاکم بودن شرایط به نسبت قلیایی و در نتیجه جذب ترجیحی LREEها بر روی سطوح کانی هماتیت باشد (Sholkovitz, 1995). در این شرایط HREEها به دلیل تشکیل کمپلکس‌های کربناتی پایدار از سه واحد زیرین خارج شده‌اند (Johannesson et al., 1995; 1996). همبستگی پایین بین REE و LOI (جدول ۴) نشان می‌دهد که توزیع مقادیر REEها در این نهشته به طور بخشی در کنترل مقادیر LOI سیستم بازماندی نبوده است. به عبارت بهتر فازهای آبدار (کانی‌های رسی) نقش مهمی در کنترل شیمی REE در واحدهای بوکسیتی ندارند. ضرایب همبستگی منفی بین LREEها با Si و مثبت بین LREEها با Fe (جدول ۴) شستشوی این عناصر از کانی‌های رسی در بخش‌های بالایی (واحدهای کرم مایل به سبز و زرد) و جذب ترجیحی آنها به وسیله گرهک‌های هماتیت در واحدهای زیرین (سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه‌ای) را نشان می‌دهند.

#### – عناصر جزئی واسطه (TTE:Co, Ni, V, Cr)

عناصر Ni و Co اگرچه می‌توانند به شدت به وسیله اکسیدهای آهن (هماتیت)

را نشان می‌دهد. غنی‌شدگی LREEها در واحدهای بوکسیتی با نزدیک شدن به سنگ بستر کربناتی و میزان تفریق شدگی آنها نسبت به HREEها بیشتر می‌شود. این تیپ الگوی غنی‌شدگی می‌تواند دلالت بر تشکیل برجزای این نهشته داشته باشد (Maksimovic & Panto, 1991). عنصر Eu در تمامی واحدهای بوکسیتی نسبت به عناصر مجاور خود ناهنجاری منفی و عنصر Tm و Ho در واحد سرخ قهوه‌ای و سرخ ناهنجاری مثبت نشان می‌دهد. ناهنجاری منفی Eu در این نهشته می‌تواند به دلیل تخریب کانی‌های پلاژیوکلاز سنگ مادر طی فرایندهای هواز دگی باشد (Taylor & McLennan, 1985; Condie et al., 1995; White et al., 2001). با توجه به همبستگی‌های بالای عناصر Tm و Ho با Zr (جدول ۴) چنین به نظر می‌رسد که ناهنجاری‌های مثبت عناصر Tm و Ho در واحدهای سرخ قهوه‌ای و سرخ به دلیل حضور این عناصر در شبکه کانی‌های Zr دار بوده است.

#### – درجه ناهنجاری Eu

ناهنجاری Eu از طریق مقایسه غلظت اندازه‌گیری شده Eu با غلظت قابل پیش‌بینی ( $Eu^*$ ) که از درون‌یابی بین اعداد بهنجار شده Sm و Gd به دست می‌آید، به طور کمی بیان می‌شود. در واقع نسبت  $Eu/Eu^*$  سنجشی از ناهنجاری Eu بوده و اگر بزرگ‌تر از ۱ باشد ناهنجاری مثبت و اگر کوچک‌تر از ۱ باشد ناهنجاری منفی خواهد بود. در این مطالعه برای محاسبه ناهنجاری Eu به دلیل نبود امکان اندازه‌گیری Gd، مقدار  $Eu/Eu^*$  از طریق درون‌یابی بین اعداد Sm و Tb بهنجار شده به ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی و با استفاده از رابطه  $(Eu/Eu^* = (Eu_{bauxite}/Eu_{UCC}) / [(Sm_{bauxite}/Sm_{UCC}) \times \{0.66(Tb_{bauxite}/Tb_{UCC}) + 0.33(Sm_{bauxite}/Sm_{UCC})\}])$  (Mameli et al., 2007) محاسبه شد. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد این ناهنجاری از ۰/۶۸ تا ۱/۳۵ متغیر است (جدول ۳). این تغییرات می‌تواند به دلیل افزایش pH محلول‌های هواز ده کننده با نزدیک شدن به سنگ بستر کربناتی باشد. ترسیم نمودارهای  $Fe_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  در مقابل ناهنجاری Eu (شکل ۷) نشان می‌دهد افزایش این ناهنجاری با رسوبگذاری Fe در سیستم بازماندی و کاهش مقدار Al و Si همراه بوده است. بنابراین با توجه به مسائل یاد شده در بالا، توزیع عناصر اصلی در این نهشته یکی از مهم‌ترین عامل‌های کنترل کننده تغییر مقدار این ناهنجاری بوده است.

#### – محاسبات شاخص هواز دگی مطلق

در این مطالعه برای برآورد تحرک عناصر تشکیل دهنده واحدهای بوکسیتی از روش محاسبات شاخص هواز دگی مطلق (Nesbitt, 1979) به شکل معادله زیر که بر مبنای (۱) عنصر بی‌تحرک و (۲) مواد مادر استوار است، استفاده شده است:

$$\%Change = \left[ \frac{(Element_{sample} / Immobile Element_{sample})}{(Element_{parent material} / Immobile Element_{parent material})} - 1 \right] \times 100$$

۱- عنصر بی‌تحرک: برای برآورد تحرک عناصر، لازم است عنصری را که تغییرات شیمیایی اندکی دارد و در طی فرایندهای هواز دگی بی‌تحرک می‌ماند انتخاب و تغییرات عناصر دیگر را نسبت به این عنصر محاسبه کرد. به دلیل این که بیشتر در هواز دگی به عنوان عنصر بی‌تحرک به حساب می‌آید (White et al., 2001; Kurtz et al., 2000, 2001)، به عنوان عنصر بی‌تحرک انتخاب شد.

۲- مواد مادر: در این مطالعه از ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (Upper Continental Crust) (Taylor and McLennan, 1985) به عنوان مواد مادر استفاده شد. این شاخص به طور معمول کارایی بسیار بالایی برای محاسبه تحرک عناصر در مواد به شدت هواز ده دارد (Duzgoren-Aydin et al., 2002).

#### – عناصر نادر حاکی (REE)

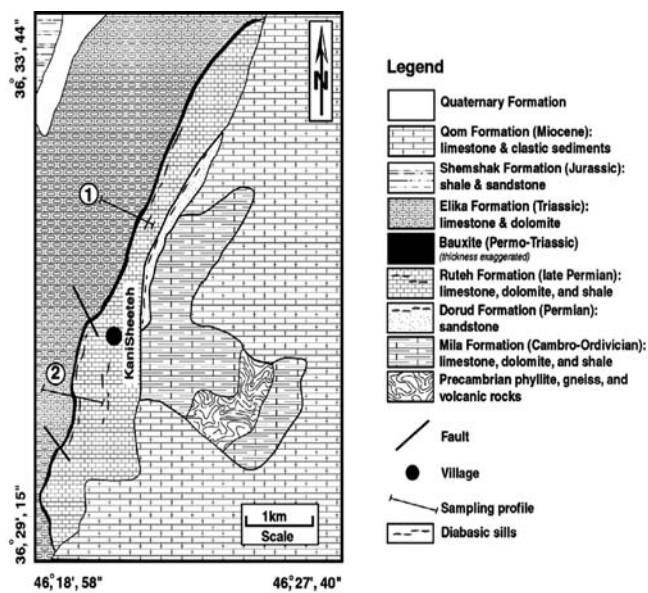
نتایج محاسبات شاخص هواز دگی مطلق حاکی از آن است که REEها رفتار

#### ۴- نتیجه گیری

نهشته بوکسیت کانی شسته در خاور بوکان واقع بوده و در مرز بین سازندهای روت و الیکا توسعه یافته است. مطالعات انجام شده نشان می دهد تغییر در میزان فعالیت آب در محیط خاک زاد و نوسانات آب و هوایی باعث شکل گیری بافت های گرهکی و ائویدی- آهن دار در این نهشته شده اند. عملکرد فرایندهای هوازدگی در طی تکوین این سامانه بازماندی با تشکیل کانی های دیاسپور، هماتیت، کلریت، پیروفیلیت، موسکویت، کائولینیت، کوارتز، آمفیبول، ناکریت، فلدسپار و کلسیت همراه بوده است. الگوی توزیع REEها بهنجار شده نسبت به کندریت، تفریق و غنی شدگی LREEها نسبت به HREEها و رز بر جازای نهشته را نشان می دهند. نهشته بوکسیت کانی شسته در طی تکوین خود مراحل لاتریتی شدن تا متوسط را طی کرده و تغییر pH محیط، عامل اصلی تغییر در نسبت La/Y و ناهنجاری Eu سیستم و همچنین توزیع عناصر اصلی و جزئی در عرض نهشته بوده است. بررسی های ژئوشیمیایی نشان می دهند سنگ بستر کربناتی نقش دوگانه ای در توزیع عناصر جزئی نهشته داشته است. این سنگ ها ابتدا با خشی سازی (Buffering) محلول های هوازده کننده باعث افزایش رسوبگذاری Fe به صورت کانی هماتیت در بخش های زیرین شده که این کانی به نوبه خود طی فرایند جذب سطحی و ترجیحی باعث تمرکز به نسبت شدید عناصر LREE Co، Ni، Cr، V و Th در واحدهای زیرین نهشته شده است. از طرفی این سنگ ها با تشکیل کمپلکس های یونی پایدار کربناته با HREEها و تشکیل یون پایدار یورانیل ( $UO_2^{2+}$ ) باعث خروج HREEها و U از نهشته شده اند. همچنین این بررسی ها نشان می دهد علاوه بر موارد یاد شده که نقش مهمی در توزیع عناصر جزئی در سامانه بازماندی مورد مطالعه داشته اند، کانی های Zr، Ti، دار، Nb و پلاژیوکلاز به سهم خود بخشی از توزیع برخی از عناصر جزئی مانند HREE، Zr، Ti و Hf را در کنترل خود داشته اند.

#### سپاسگزاری

نگارندگان از حمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز برخوردار بوده اند، بنابراین شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادهای ارزنده و سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می نمایند.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت افق بوکسیتی پرمو- تریاس

در آن.

جذب سطحی شوند ولی این جذب وابسته به pH بوده و در شرایط pH پایین (محیط اسیدی) ضعیف تر است (Mckenzie, 1980; Sparks, 1995). توزیع عناصر V و Cr نیز می تواند در تشکیلات لاتریتی در ارتباط با اکسیدهای آهن باشد (Singh & Gilkes, 1992; Schwertmann & Pfab, 1996; Marques et al., 2004).  $Cr^{3+}$  و  $V^{+3}$  به راحتی می توانند جایگزین Fe در شبکه کانی هماتیت شوند (Schwertmann & Pfab, 1996). با توجه به شباهت به نسبت زیاد میزان درصد تغییرات هوازدگی مطلق عناصر Cr، V، Ni با Fe (شکل ۹a) و Co (شکل ۹b)، مهم ترین عامل کنترل کننده توزیع این عناصر فرعی در سیستم بازماندی، فرایندهای جذب سطحی توسط هماتیت بوده است. حاکم بودن شرایط قلیایی در تشکیل واحدهای زیرین (سرخ تیره، سرخ و سرخ قهوه ای)، با افزایش میزان رسوبگذاری آهن به صورت کانی هماتیت، شرایطی مناسب برای جذب ترجیحی بیشتر این عناصر توسط این کانی در این واحدها فراهم شده است (Laskou & Economou-Eliopoulos, 2007). مقایسه درصد تغییرات شاخص هوازدگی مطلق  $SiO_2$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  (شکل ۹b) در بین واحدهای بوکسیتی به خوبی جایگزینی هماتیت به جای کانی های رسی را با نزدیک شدن به سنگ بستر کربناتی نشان می دهد. چنین سازوکاری، همراه با حضور Fe به فرم ائوید و گرهک در سه واحد زیرین دلالت بر تغییر در میزان فعالیت آب در محیط خاک زاد و نوسانات آب و هوایی در تشکیل این نهشته دارد (Mongelli, 2002).

#### عناصر لیثوفیل درشت یون (LILE: Rb, Ba, Sr, U, Th)

عناصر Rb و Ba در این نهشته به دلیل نبود کانی های تثبیت کننده آنها مانند رزمیکولیت و مونت موریلونیت در طی فرایند هوازدگی از سامانه بازماندی خارج شده اند (Calagari & Abedini, 2007) (شکل ۱۰a). Sr نیز فقط در دو واحد سرخ قهوه ای و سرخ غنی شدگی نشان می دهد. مهم ترین دلایلی که می توان برای غنی شدگی این عنصر در دو واحد یاد شده تصور کرد جایگزینی این عنصر به جای Ca در شبکه کانی های باقیمانده پلاژیوکلاز در این نهشته است (شکل ۱۰a). تهی شدگی U در سه واحد زیرین نشان دهنده حاکم بودن شرایط اکسیدان طی فرایند شکل گیری این واحدها است. در این شرایط  $U^{6+}$  نسبت به  $U^{5+}$  و  $U^{4+}$  پایداری بیشتری داشته (Cowart and Burnett, 1994; Taboada et al., 2006) و به صورت یون یورانیل ( $UO_2^{2+}$ ) از محیط عمل خارج شده است. غنی شدگی U در دو واحد بالایی را می توان به حاکم بودن شرایط اسیدی و جذب سطحی آن به وسیله کانی های رسی نسبت داد (Turner et al., 1996; Hudson et al., 1999; Barnett et al., 2000). در محیط های اسیدی تحرک بیشتری دارد (Kataba-Pendias & Pendias, 1992); شباهت غنی شدگی Th (شکل ۱۰a) با غنی شدگی Fe (شکل ۹b) در سه واحد زیرین نشان می دهد که این عنصر در سه واحد زیرین توسط کانی هماتیت با فرایند جذب سطحی در سامانه بازماندی تثبیت شده است (Barnett et al., 2000). در کل چنین استنباط می شود که تغییر شرایط pH محیط بازماندی نقش بسیار مهمی در تفریق دو عنصر U و Th در عرض نهشته بوکسیتی کانی شسته داشته است.

#### عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE: Zr, Ti, Hf, Y)

عناصر Zr، Ti، Hf تغییرات بسیار اندکی از نظر میزان درصد هوازدگی مطلق در عرض نیمرخ بوکسیتی نشان می دهند. این مسئله می تواند در ارتباط با طبیعت بی تحرکی (Immobility) این عناصر در طی فرایندهای هوازدگی باشد. شباهت زیاد الگوی توزیع این عناصر نسبت به هم در عرض نهشته بوکسیتی (شکل ۱۰b) منعکس کننده حضور احتمالی این عناصر در شبکه کانی های فرعی زیرکن و اکسیدهای تیتانیم (روتیل) است. عنصر Y نیز به دلیل تشکیل نشدن این نهشته از یک ژل آلوموسیلیکاته و در نتیجه نبود یک عامل تثبیت کننده از سامانه خارج شده است (Calagari and Abedini, 2007).



جدول ۱- نتایج تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های بوکسیت کانی شسته به روش XRF (مقادیر اکسیدها و L.O.I بر حسب درصد وزنی و مقادیر عناصر جزئی بر حسب ppm است)

	Rs-1	Rs-2	Rs-3	Rs-4	Rs-5	Rs-6	Rs-7	Rs-8	Rs-9	Rs-10	Rs-11	Rs-12	Rs-13	Rs-14	Rs-15	Rs-16	Rs-17	Rs-18
SiO <sub>2</sub> %	28.21	40.34	25.42	23.57	39.20	31.34	35.27	37.44	38.39	43.61	55.63	54.45	52.35	46.63	56.60	45.95	50.30	57.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.80	29.22	33.36	32.26	20.84	22.18	27.02	21.87	20.24	24.59	28.43	26.35	27.22	29.32	27.58	29.58	30.74	26.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.20	17.18	26.96	29.56	28.07	33.97	22.40	29.45	29.71	20.56	5.02	7.30	6.65	10.14	3.99	8.50	4.80	3.21
TiO <sub>2</sub>	4.80	3.76	3.76	3.89	3.33	3.09	4.12	3.53	3.63	4.17	2.94	2.44	2.588	3.08	3.29	4.43	4.21	3.03
L.O.I	9.67	7.82	9.09	9.04	6.37	7.38	7.40	6.03	6.07	6.02	7.19	8.50	10.36	8.69	7.68	10.62	8.96	8.40
U ppm	21	17	20	9	6	6	1	1	1	1	4	8	13	10	17	22	19	17
Th	21	24	23	30	15	7	2	6	3	2	5	13	3	4	10	15	16	10
Ba	683	79	259	316	564	548	5	526	681	19	54	69	10	153	95	71	82	54
Ce	540	315	246	181	547	517	295	354	701	699	54	99	95	42	12	112	94	28
La	245	156	125	168	255	259	145	203	405	295	32	45	20	15	10	35	41	19
Ga	14	14	10	14	18	15	13	15	19	12	14	17	10	15	18	13	16	10
Hf	20	21	19	20	19	13	20	28	15	19	24	26	23	18	15	16	28	21
Co	54	50	81	79	34	66	1	49	51	23	12	21	21	86	12	25	8	6
Cr	982	476	514	612	309	556	685	456	481	357	403	327	421	403	380	368	339	376
Cu	1	3	5	1	34	1	32	12	11	3	72	54	32	28	94	27	3	22
Nb	75	65	65	65	47	45	51	44	50	48	38	35	33	42	45	60	67	45
Pb	27	4	9	10	16	29	15	22	27	11	12	2	6	16	7	58	90	12
Rb	1	15	14	11	20	16	1	12	13	88	10	10	26	8	12	12	9	15
Mo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	1108	680	865	980	642	743	1125	859	886	564	242	306	255	276	219	399	312	404
W	1	14	12	1	1	1	1	1	1	1	10	2	9	1	1	6	1	1
Y	13	18	18	20	18	20	18	1	15	17	17	15	13	14	16	16	14	15
Zr	465	446	428	430	418	323	850	325	349	334	328	296	280	288	360	466	468	353
Zn	110	48	53	52	57	82	42	26	22	19	32	35	31	54	24	107	54	15
Ni	53	183	238	264	296	304	101	153	157	57	104	160	114	271	69	215	146	182
Sr	85	86	86	1299	236	1050	1060	1208	533	37	69	46	84	33	151	168	85	187

جدول ۲- ادامه نتایج تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های بوکسیت کانی شسته به روش XRF

	V1-1	V1-2	V1-3	V1-4	V1-5	V1-6	V1-7	V1-8	V1-9	V1-10	V1-11	V1-12	V1-13	V1-14	V1-15
SiO <sub>2</sub> %	24.65	22.88	37.38	37.83	41.65	40.62	36.35	42.55	57.72	46.69	49.68	51.47	56.15	57.13	58.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.55	24.30	21.30	20.81	24.04	24.99	22.00	24.99	27.24	26.20	24.47	27.04	27.35	25.90	27.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.44	40.01	28.06	28.69	21.35	21.81	28.38	21.66	3.40	14.25	13.33	9.43	4.96	5.89	2.52
TiO <sub>2</sub>	3.42	2.99	2.942	3.97	3.58	4.07	3.51	3.76	3.15	2.32	2.32	2.56	2.56	2.75	2.66
L.O.I	9.02	8.27	8.14	6.31	6.62	6.85	8.45	5.91	7.70	9.26	8.78	8.09	8.11	7.36	8.04
U ppm	15	1	1	1	1	2	1	1	14	20	12	3	9	14	7
Th	20	24	6	4	6	8	3	10	9	7	3	3	3	4	6
Ba	394	228	537	532	163	130	612	99	114	122	144	150	125	115	44
Ce	357	265	381	331	502	376	457	763	357	19	81	69	11	15	12
La	159	158	225	216	258	254	215	358	12	45	32	10	12	7	16
Ga	16	17	16	10	15	15	18	14	13	14	14	18	12	15	14
Hf	19	25	17	14	19	26	24	20	18	22	29	13	18	14	16
Co	111	122	39	43	36	34	43	30	7	49	42	60	6	12	4
Cr	731	741	313	370	302	341	340	426	370	363	312	398	445	336	307
Cu	1	2	8	33	28	28	16	7	110	91	32	44	60	36	16
Nb	63	46	47	71	58	46	42	48	46	24	25	34	33	33	41
Pb	2	6	20	21	5	22	22	19	7	17	5	2	8	1	7
Rb	7	9	22	22	24	16	13	7	6	12	14	19	6	8	8
Mo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	1080	1117	479	742	565	826	861	548	209	518	401	247	284	231	200
W	1	1	1	3	34	12	1	18	1	1	1	1	6	11	9
Y	15	15	18	19	20	15	17	16	15	14	13	14	13	13	13
Zr	365	304	328	457	370	309	329	332	350	236	269	259	290	271	314
Zn	58	54	39	52	53	25	16	13	26	54	50	56	28	28	19
Ni	203	222	312	288	254	136	123	69	59	225	294	231	105	80	88
Sr	102	73	540	1235	1383	1062	1112	549	32	88	74	68	59	35	34

جدول ۳- نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر خاکی کمیاب (REE) واحدهای بوکسیتی کانی شسته به روش NAA

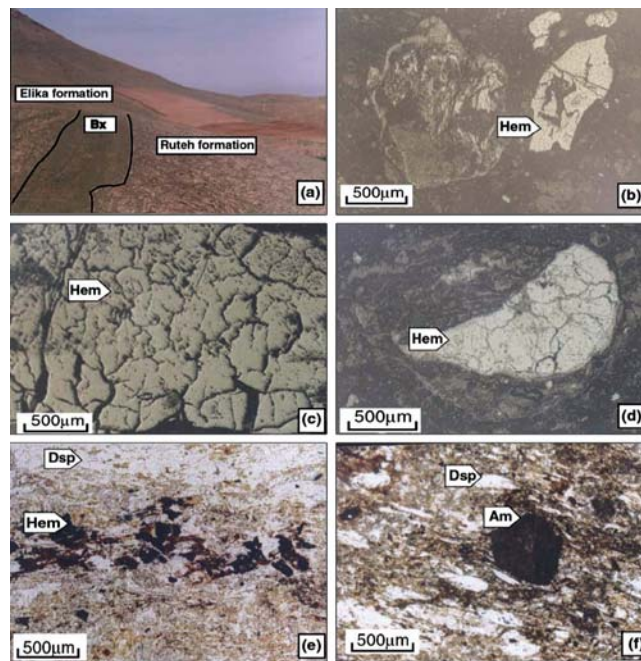
واحد بوکسیتی	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Ho	Tm
زرد	29	56.4	26	8.7	1.23	1	1.20	0.30
کرم مایل به سبز	35.3	47.3	32	6.2	0.76	0.68	1.10	0.37
قرمز قهوه ای	76.8	213	25	10	1.92	1.8	5.74	3.5
قرمز	201	180	28	17	3.10	1.6	3.92	1.27
قرمز تیره	341	369	117	39.7	6.92	3.40	1.90	0.45
واحد بوکسیتی	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	La/Yb(N)	*Eu/Eu
زرد	2.12	0.36	128.31	123.33	4.98	24.76	1.01	0.78
کرم مایل به سبز	2.21	0.46	126.38	121.56	4.82	26.22	1.18	0.68
قرمز قهوه ای	2.3	0.70	340.76	326.72	14.04	23.27	2.47	1.35
قرمز	1.95	0.30	438.14	429.10	9.04	47.47	7.62	1.06
قرمز تیره	1.77	0.10	881.24	873.62	7.62	115.65	14.26	1.04

جدول ۴- ضرایب همبستگی خطی (Rollinson, 1993) بین برخی از عناصر اصلی، جزئی، خاکی کمیاب، L.O.I و در صد شاخص هوازدگی مطلق HREE و Zr

	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L.O.I	Zr	Nb	Tm	Ho	LREE	REE	Zr%	HREE%
SiO <sub>2</sub>	1										
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.94	1									
L.O.I	0.01	0.01	1								
Zr	-0.43	0.35	0.11	1							
Nb	-0.66	0.56	0.23	0.45	1						
Tm	-0.33	0.45	-0.85	0.75	0.01	1					
Ho	-0.52	0.65	-0.93	0.83	0.20	0.95	1				
LREE	-0.89	0.85	0.41	0.45	0.85	0.01	0.10	1			
REE	-0.92	0.87	0.38	0.44	0.85	-0.01	0.11	0.99	1		
Zr%	0.41	-0.90	-0.51	0.62	-0.67	0.69	0.46	-0.65	-0.64	1	
HREE%	-0.35	0.45	-0.83	0.74	0.85	0.99	0.93	0.01	0.01	0.75	1

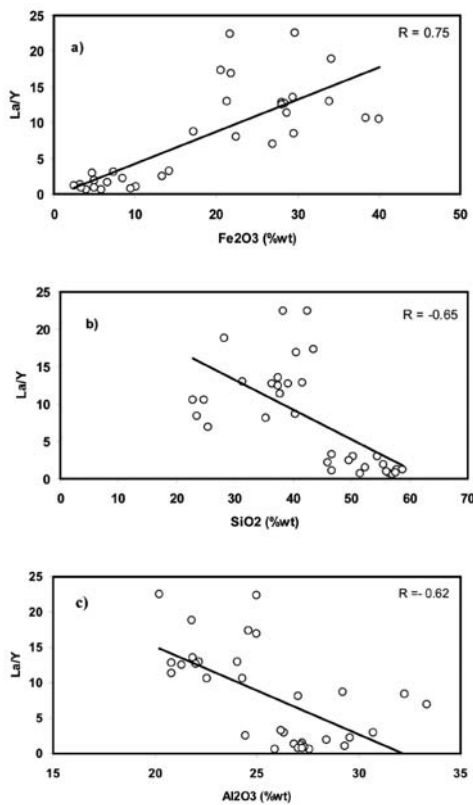
جدول ۵- نتایج محاسبات شاخص هوازدگی مطلق (Nesbitt, 1979) عناصر اصلی، جزئی و خاکی کمیاب واحدهای بوکسیتی، فرض Nb به عنوان عنصر بی تحرک و ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی به عنوان مواد مادر (Taylor and McLennan, 1985).

واحد بوکسیتی	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Rb	Ba	Sr	Th	U	Y
زرد	-1.07	-50.00	-60.71	256.52	-99.51	-91.89	-85.24	-54.29	191.15	-65.42
کرم مایل به سبز	18.18	-41.29	-9.17	290.54	-99.39	-88.57	-86.87	-62.11	114.31	-53.93
قرمز قهوه ای	-19.53	-65.88	100.00	294.68	-99.52	-62.76	23.40	15.36	-81.00	-68.57
قرمز	-28.00	-72.61	76.88	232.73	-99.59	-68.92	135.58	17.02	-35.06	-60.74
قرمز تیره	-30.00	-78.90	83.39	200.83	-99.62	-72.50	-80.71	19.12	-93.45	-69.69
واحد بوکسیتی	Zr	Hf	V	Cr	Co	Ni	La	Ce	Nd	Sm
زرد	2.98	78.03	176.26	320.45	35.65	269.56	-47.46	-52.10	-45.65	5.07
کرم مایل به سبز	6.69	144.64	264.86	420.08	62.97	280.78	-20.49	-50.06	-16.84	-6.90
قرمز قهوه ای	22.34	92.59	608.11	626.44	186.17	500.32	36.17	77.03	-48.85	18.20
قرمز	-8.13	48.90	560.91	600.96	162.72	484.09	204.54	27.84	-51.04	71.71
قرمز تیره	-14.69	43.68	566.45	645.23	216.67	465.11	373.61	140.02	95.00	267.59
واحد بوکسیتی	Eu	Tb	Ho	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	
زرد	-23.60	-15.08	-18.48	-79.62	-48.10	-38.58	-46.23	-46.54	-37.20	
کرم مایل به سبز	-41.31	-28.21	-7.09	-68.75	-32.74	-2.87	-34.16	-34.49	-24.44	
قرمز قهوه ای	16.71	49.60	281.64	132.71	-44.89	16.36	39.76	38.60	73.27	
قرمز	61.03	13.64	122.73	-27.84	-60.07	-57.38	53.56	55.56	-4.66	
قرمز تیره	229.59	121.35	-1.04	-76.56	-66.78	-86.98	183.12	190.32	-26.33	

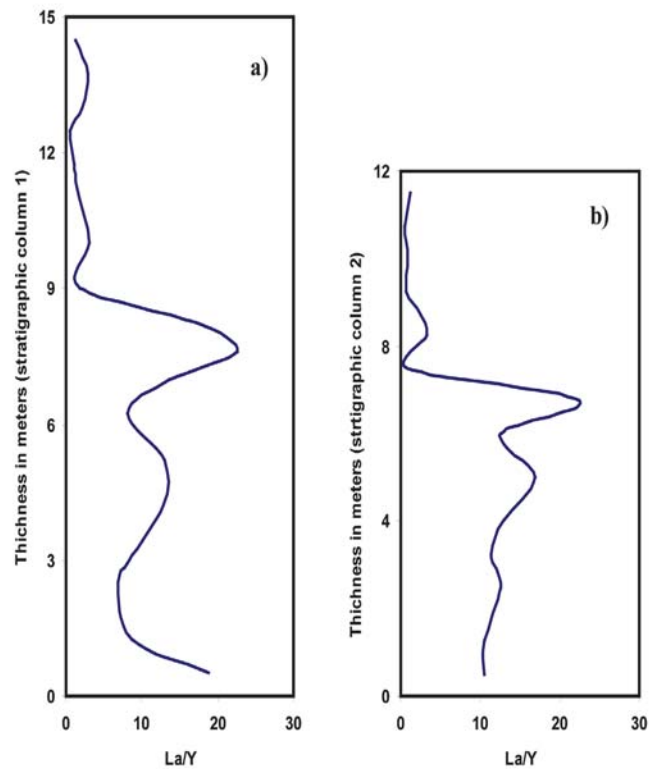


شکل ۲- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از بخش‌های مختلف نهشته بوکسیت کانی شسته. (a) نمایی از افق بوکسیت پرمو- تریاس منطقه در مرز بین سازندهای روته والیکا. (b) بافت پورفیری دروغین در واحد سرخ تیره. نور عبوری.

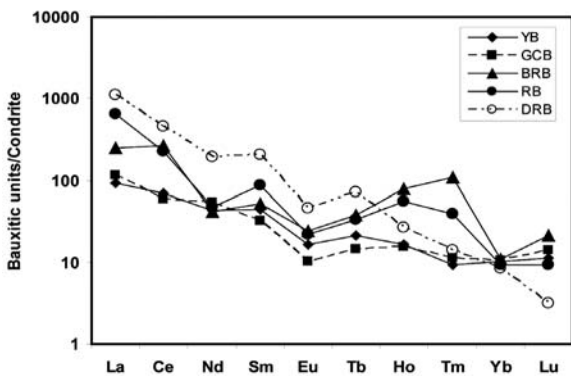
(c) بافت برشی دروغین در واحد سرخ تیره. نور عبوری. (d) ترک‌ها و شکاف‌های ناشی از انقباض ژل در واحد سرخ. نور عبوری. (e) پهن‌زدگی کانی‌های هماتیت و دیاسپور در واحد کرم مایل به سبز. نور معمولی. (f) حضور کانی آمفیبول به صورت کانی باقیمانده از سنگ مادر در بین بلورهای کشیده و پهن شده دیاسپور در واحد کرم مایل به سبز. نور معمولی. علائم اختصاری: Tr1 سازند الیکا، BX بوکسیت، Ru روته، Hem هماتیت، Am آمفیبول و Dsp دیاسپور.



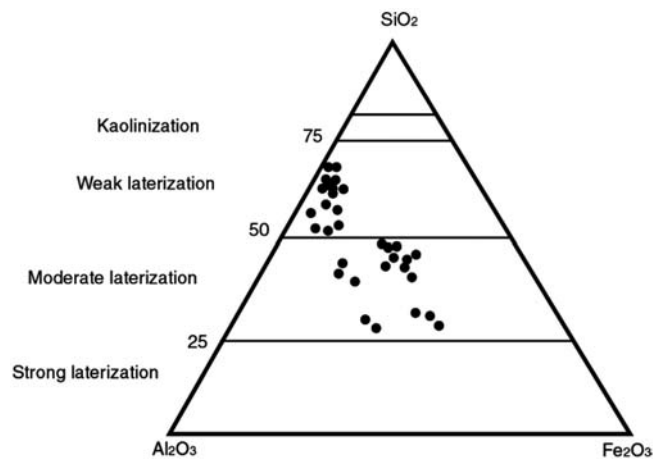
شکل ۴- تغییرات نسبت La/Y نمونه‌های بوکسیتی در برابر (a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، (b)  $\text{SiO}_2$  و (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



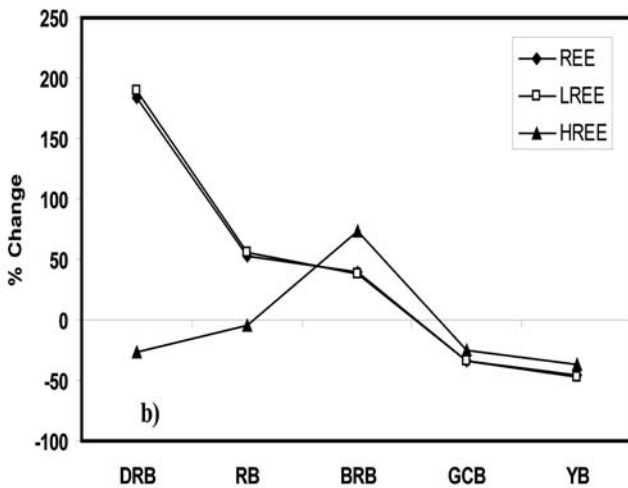
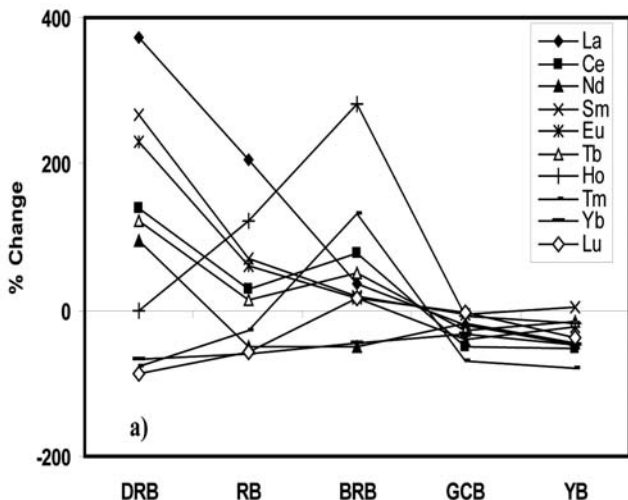
شکل ۳- تغییرات نسبت La/Y در عرض نهشته مورد مطالعه. (a) نیمرخ شماره ۱ و (b) نیمرخ شماره ۲. برای مشاهده محل نیمرخ‌های انتخابی به شکل ۱ مراجعه شود.



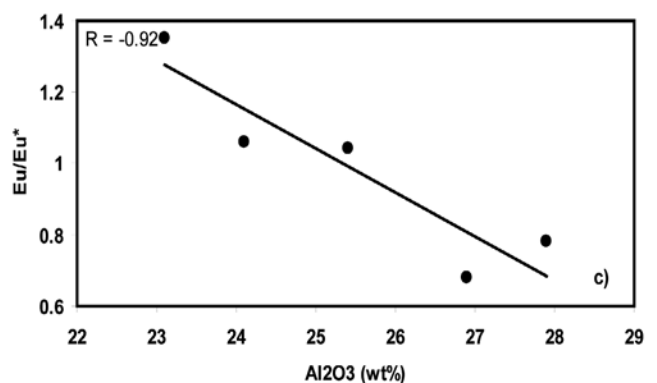
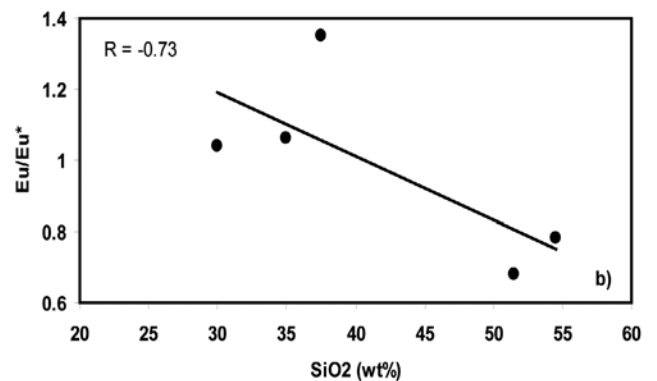
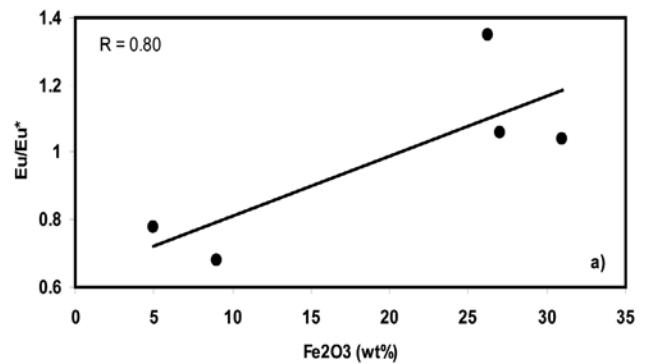
شکل ۶- الگوی توزیع REE در واحدهای بوکسیتی کانی شسته بهنجار شده نسبت به کندریت (Taylor and McLennan, 1985). علائم اختصاری: YB- بوکسیت زرد، GCB- بوکسیت کرم مایل به سبز، BRB- بوکسیت سرخ قهوه‌ای، RB- بوکسیت سرخ و DRB- بوکسیت سرخ تیره.



شکل ۵- موقعیت نمونه‌های بوکسیتی کانی شسته در نمودار سه متغیره  $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$  (Schellmann, 1983) برای تعیین شدت فرایند لاتریت‌زایی.

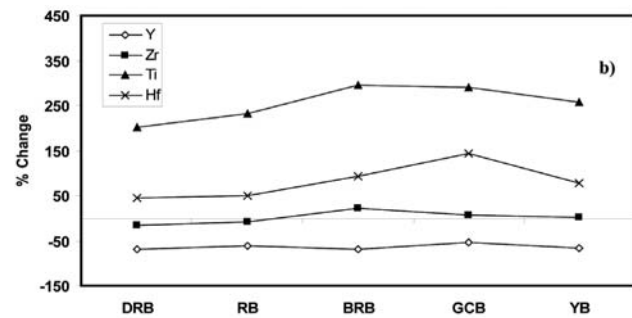
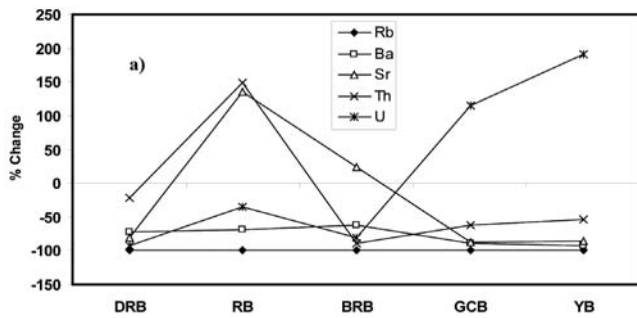


شکل ۸- نمودارهای تحریک عناصر، (a)  $La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Ho, Tm, Yb$  و (b)  $Lu$  و  $LREE, HREE$  در واحدهای بوکسیتی کانی شسته محاسبه شده براساس شاخص هوازذگی مطلق، فرض  $Nb$  به‌عنوان عنصر بی‌تحریک و ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (U.C.C.) به‌عنوان مواد مادر (Taylor and McLennan, 1985).

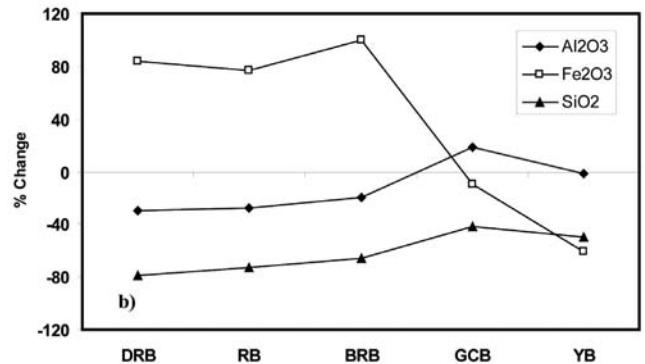
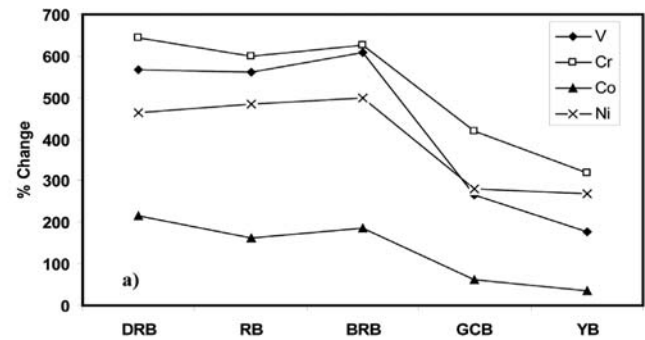


شکل ۷- تغییرات ناهنجاری Eu در برابر، (a)  $Fe_2O_3$  (b)  $SiO_2$  (c)  $Al_2O_3$ .





شکل ۱۰- نمودارهای تحرک عناصر (a سنگ‌دوست درشت یون (Rb, Ba, Sr, U, Th) و (b) قدرت میدان بالا (Zr, Ti, Hf, Y) در واحدهای بوکسیتی کانی شسته محاسبه شده بر اساس شاخص هوازدگی مطلق، فرض Nb به عنوان عنصر بی تحرک و ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (U.C.C.) به‌عنوان مواد مادر (Taylor and McLennan, 1985).



شکل ۹- نمودارهای تحرک عناصر (a) جزئی واسطه (V, Cr, Co) و (b)  $Fe_2O_3$  و  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  در واحدهای بوکسیتی کانی شسته محاسبه شده بر اساس شاخص هوازدگی مطلق، فرض Nb به عنوان عنصر بی تحرک و ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (U.C.C.) به‌عنوان مواد مادر (Taylor and McLennan, 1985).

## کتابنگاری

افتخارنژاد، ج.، ۱۹۷۳- نقشه زمین‌شناسی مهاباد به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
حسامی، ع.، ۱۳۷۰- بررسی های اکتشافی بوکسیتی های شرق بوکان. رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۲۸۵ص.

## References

- Balkay, B., Samimi, M., 1972- Geological investigations of Iranian bauxites and other high-alumina materials. Geological survey of Iran. Internal paper.  
Bardossy, G. Y., Aleva, G. Y. Y., 1990- Laterite Bauxites. Akademia, Kiado Budapest, 646p.  
Barnett, M., Jardine, P. M., Brooks, S. C., Selim, H. M., 2000- Adsorption and transport of U (VI) in subsurface media. Soil Science Society of America Journal 64, 908-914.  
Belousova, E. A., Griffin, W. L., Pearson, N. J., 1998- Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons. Mineralogical Magazine 62, 355-366.  
Calagari, A. A., Abedini, A., 2007- Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite deposit in the Kanisheeteh, east of Bukan, Iran. Journal of Geochemical Exploration 94, 1-18.  
Cantrell, K. J., Byrne, R. H., 1987- Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions. Geochim et Cosmochim Acta 51, 597-605.  
Compton, J. S., White, R. A., Smith, M., 2003- Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the western Cape, south Africa. Chemical Geology 201, 239-255.  
Condie, K. C., Dengate, J., Cullers, R. L., 1995- Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the front Range, Colorado, USA. Geochim et Cosmochim Acta 59, 279- 294.  
Coppin, F., Berger, G., Castet, S., Loubet, M., 2002- Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. Chemical Geology 182, 57-68.  
Coward, J. B., Burnett, W. C., 1994- The distribution of U and Th decay-series radionuclides in the environment- a review. Journal of Environmental Quality 23, 651-662.  
Crinci, J., Jurkovic, I., 1990- Rare earth elements in Triassic bauxites of Croatia Yugoslavia. Travaux 19, 239-248.  
Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A., Malpas, J., 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. Engineering Geology 63, 99-119.  
Johannesson, K. H., Lyons, W. B., Stetzenbach, K. J., Byrne, R. H., 1995- The solubility control of rare earth elements in natural terrestrial waters and the significance of PO4<sup>3-</sup> and CO3<sup>2-</sup> in limiting dissolved rare earth concentrations: a review of recent information. Aquatic Geochemistry 1, 157-173.  
Johannesson, K. H., Stetzenbach, K. J., Hodge, V. F., Lyons, W. B., 1996- Rare earth element complexation behavior in circumneutral pH groundwaters: assessing the role of carbonate and phosphate ions. Earth and Planetary Science Letters 139, 305-319.  
Kamineni, D. C., Eftekhari-nezad, J., 1977- Mineralogy of the Permian laterite of NW Iran. Tschernaks Min. Petr. Mitt 24, 195-204.  
Hill, I. G., Worden, R. H. G., Meighan, I. G., 2000- Geochemical evolution of a paleolaterite: the interbasaltic formation, Northern Ireland. Chemical Geology 166, 65-84.  
Hudson, E. A., Terminello, L. J., Viani, B. E., Denecke, M., Reich, T., Allen, P. G., 1999- The structure of U<sup>6+</sup> sorption complexes on vermiculite and hydrobiotite. Clays and Clay Minerals 47, 439-457.

- Kataba -Pendias, A., Pendias, H., 1992- Trace elements in soils and plants. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Koepfenkastro, D., De Carlo, E. H., 1993- Uptake of rare earth elements from solution by metal oxides. *Environmental and Science Technology* 27, 1796-1802.
- Kurtz, A. C., Derry, L. A., Chadwick, O. A., 2000- Refractory element mobility in volcanic soils. *Geology* 28, 683-686.
- Kurtz, A. C., Derry, L. A., Chadwick, O. A., 2001- Accretion of Asian dust to Hawaiian soils: Isotopic, elemental, and mineral mass balances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 1971-1983.
- Laskou, M., Economou-Eliopoulos, M., 2007- The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-Ghiona bauxite deposits, Greece. *Journal of Geochemical Exploration* 93, 67-77.
- Lopez, J. M. G., Bauluz, B., Fernandez-Nieto, C., Oliete, 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.
- 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.
- Maksimovic, Z., Panto, G.Y., 1991- Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece. *Geoderma* 51, 93-109.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., Dinelli, E., 2007- 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, 887-902.
- Margues, J. J., Schulze, D. G., Curi, N., Mertzman, S. A., 2004- Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma* 121, 31-43.
- Mckenzie, R. M., 1980- The adsorption of Pb and other heavy metals on oxides of Mn and Fe. *Australian Journal of Soil Reviews* 18, 61-73.
- Meyer, F. M., Happel, U., Hausberg, J., Wiechowski, 2002- The geometry and anatomy of the Pijigaos bauxite deposit, Venezuela. *Ore Geology Review* 20, 27-54.
- Mongelli, G., 1997- Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian Carbonate platform (southern Italy). *Chemical Geology* 140, 69-79.
- Mongelli, G., 2002- Growth of hematite and boehmite in concretions from ancient karst bauxite: clue for past climate. *Catena* 50, 43-51.
- Nesbit, H. W., 1979- Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature* 279, 206-210.
- Nesbitt, R. W., Hirata, T., Butler, I. B., Milton, J. A., 1997- UV laser ablation ICP-MS: some applications in the earth sciences. *Geostand. Newsl.* 20, 231-243.
- Rollinson, H., 1993- Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical.
- Santos, M. D. C., Varajao, A. F. D. C., Yvon, J., 2006- Geochemistry of a sedimentary lateritic kaolin deposit in Quadrilatero Ferrifero, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration* 88, 318-320.
- Schellmann, W., 1983- A new definition of laterite. *Natural Resources and Development* 18, 7-21.
- Schwertmann, U., Pfab, G., 1996- Structural V and Cr in lateritic iron oxides: genetic implications. *Geochim et Cosmochim Acta* 60, 4279-4283.
- Sholkovitz, E. R., 1995- The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Geochemistry* 1, 1-34.
- Singh, B., Gilkes, R. J., 1992- Properties and distribution of iron oxides and their associations with minor elements in the soil of southwestern Australia. *Journal of Soil Sciences* 43, 77-98.
- Sparks, D. L., 1995- *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, New York, 267p.
- Taboada, T., Cortizas, A. M., Garcia, C., Garcia-Rodeja, E., 2006- U and Th in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain. *Science of the Total Environment* 356, 192-206.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985- *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312p.
- Temur, S., Orhan, H., Kurt, H., 2005- Mass and volume change calculations of Masatdagi (Alanya-Antalya) bauxites from southern Turkey. *Geochemistry International* 43, 202-210.
- Turner, G. D., Zachara, J. M., Mckinely, J. P., Smith, S. C., 1996- Surface-charge properties and UO<sub>2</sub>- adsorption of a surface smectite. *Geochim et Cosmochim Acta* 60, 3399-3414.
- White, R. A., 2000- Behaviour of the rare earth elements in ochreous mine drainage: a laboratory and field study. Ph.D thesis, University of Wales, Aberystwyth.
- White, A. F., Bullen, T. D., Schultz, M. S., Blum, A. E., Huntington, T. G., Peters, N. E., 2001- Differential rates of feldspar weathering in granitic regoliths. *Geochim et Cosmochim Acta* 65, 847- 869.

of the clinopyroxene, plagioclase, hornblende and titanite in quartz-diorites were analysed using EPMA. High Mg and Si contents accompanied by low Ti at the rim composition of the analysed amphiboles can be attributed to subsolidus cooling event. Magmatic crystallisation temperature for quartz-diorites is determined based on compositions of hornblende and coexisting plagioclase. Clinopyroxene composition was used to estimate crystallization pressure of the investigated rocks in the Takab area. Estimated temperature and pressure are consistent with  $820\pm 75^{\circ}\text{C}$  and 8 kbar, respectively. Thermometry based on Ti content of the analysed hornblende gives temperature of  $760^{\circ}\text{C}$ . On the basis of chemical compositions of the analysed clinopyroxenes, sub-alkaline and I-type natures of the quartz-diorites in the study area can be concluded.

**Key words:** Takht-e-Soleyman complex, Diorite, Magma composition, Mineral chemistry, Thermobarometry.

For Persian Version see pages 139 to 144

E-mail: r\_hajialioghli@yahoo.co.uk

## Investigation on Controlling Factors of the Distribution of Trace-Elements (including REE) during Bauxitization Processes at Kanisheeteh, East of Bukan, NW Iran

By: A. Abedini\* & A. A. Calagari\*\*

\*Geology Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

\*\*Geology Department, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 2007 April 23

Accepted: 2008 February 23

### Abstract

Karstic bauxite horizon at Kanisheeteh is located ~19km east of Bukan, south of West-Azarbaidjan province, NW of Iran. This horizon lies conformably along the boundary of Ruteh (carbonate-shale) formation (middle to upper Permian) and Elika (carbonate) formation (lower Triassic), and consists of five distinct lithic units. Field evidence, petrographical and mineralogical examinations showed that fluctuations of climatic conditions along with structural stresses had a great influence in the formation of this horizon. Distribution pattern of REE (normalized to chondrite) indicates an intensive fractionation and enrichment of LREE over HREE, and an authigenic formation for the horizon. Calculations of absolute weathering index (AWI) and assumption of Nb as an immobile element and the upper continental crust (UCC) as a source for parent materials show that leaching and fixation processes are the two major regulators in concentrating of trace-elements in this horizon. Geochemical investigations indicate that distribution of Al, Fe, Si had great influence in changes of La/Y ratio, distribution of trace-elements in residual system, and Eu anomaly. Incorporation of the obtained results revealed that textural variations, preferential adsorption by metallic oxides (hematite), buffering of weathering solutions by carbonate bedrock, mineralogical control, and pH changes of the environment are the most important controlling factors in the distribution of LREE, HREE, HFSE, LILE and TTE during lateritization processes at Kanisheeteh.

**Keywords:** Karstic bauxite, Absolute weathering index, Trace-elements, Kanisheeteh, Bukan

For Persian Version see pages 145 to 154

E-mail: abedini2020@yahoo.com