

# کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و منشأ کانسار بوکسیت کارستی باگوشی، شمال باختری استان فارس، ایران

حسن زمانیان<sup>۱</sup>، قاسم بیرانوند<sup>۲\*</sup> و فرهاد احمدنژاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
<sup>۳</sup>دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

## چکیده

کانسار بوکسیت کارستی باگوشی در ۳۷ کیلومتری شمال باختر شهر مصیری در استان فارس و در ناحیه زاگرس چین‌خورده قرار دارد و از پایین به بالا شامل افق کائولینیتی، بوکسیت برشی، قهوه‌ای، پیژویدی و قرمز است که بر روی سازند سروک قرار دارند. بوهمیت، کائولینیت، همتیت، پیروفیلیت، آاناتاز، کلسیت و دیاسپور از کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده کانسار هستند. بافت کانه‌ها پیژویدی، پیژویدی-آئیدی و آئیدی-تخریبی همراه با زمینه پلیمورفیک و میکروگرانولار است. مشاهدات میکروسکوپی شامل زمینه پلیمورفیک و بافت پیژویدی و آئیدی، شکستگی‌های شعاعی در پیژویدها، رشد پوسته‌های ساده پیرامون هسته پیژویدهای قبلی و پیژویدهایی با پوسته‌های بدون شکستگی شعاعی و دایره‌ای، نشانگر پدیداری برجاساد بوکسیت است؛ و از طرف دیگر، تکه‌های شکسته شده پیژویدها، پیژویدهای دگرزاد و تکه‌های تخریبی بیانگر ترابرد مواد بوکسیتی هستند. از این رو، منشأ مواد بوکسیتی بیشتر برجاساد که در برخی قسمت‌ها به‌طور محلی دستخوش ترابرد و بازنهشت در فرورفتگی‌های کارستی شده‌اند. محاسبات تغییرات جرم برحسب عنصر نامتحرک Ti نشان می‌دهد که Na، K، Mg، Fe، Si از سیستم هواز دگی فروشویی شده؛ Al، Zr، V، Th، Nb، Ba و عناصر نادر خاکی به‌ویژه عناصر نادر خاکی سبک غنی شده و U نسبتاً نامتحرک بوده‌اند. مطالعات زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده غنی‌شدگی پیش‌رونده عناصر نادر خاکی و تفکیک قابل توجه عناصر نادر خاکی سبک و عناصر نادر خاکی سنگین به سمت بخش‌های پایینی افق بوکسیتی باگوشی است. این مطالعات همچنین حاکی از غنی‌شدگی آشکار عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌ها نسبت به سنگ مادر و حضور بی‌هنجاری منفی Eu در سراسر افق بوکسیتی است. در این کانسار Ce رفتار متمایزی نسبت به دیگر عناصر نادر خاکی (به‌ویژه عناصر نادر خاکی سبک) دارد و تغییرات اندکی در مقدار بی‌هنجاری Ce در سرتاسر افق به چشم می‌خورد. این مطالعات نشان می‌دهد که توزیع و تفکیک عناصر کمیاب و نادر خاکی طی فرایند بوکسیتی شدن در کانسار باگوشی توسط عواملی مانند نوسانات در pH محلول خاک، بتانسیل یونی عناصر نادر خاکی و حضور سنگ بستر کربناتی به عنوان سد زمین‌شیمیایی کنترل می‌شود. شواهدی مانند بی‌هنجاری‌های Eu، نسبت عناصر کمیاب (Nb/Ta و Zr/Hf) و همچنین همسانی الگوی عناصر نادر خاکی تأیید کننده سهم سنگ آهک‌های رسی زیرین (سازند سروک) به عنوان سنگ مادر بوکسیت باگوشی است و پیشنهاد می‌کند که مواد منشأ دربردارنده رسوبات سیلیسی آواری هستند که از یک حاشیه قاره‌ای مشتق شده است.

**کلیدواژه‌ها:** بوکسیت، کارست، باگوشی، زمین‌شیمی، عناصر نادر خاکی.

\***نویسنده مسئول:** قاسم بیرانوند

E-mail: ghiranvand@gmail.com

## ۱- پیش‌نوشتار

علیرغم بررسی‌های گسترده زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی، شناسایی سنگ مادر و درک فرایندهای کانه‌ساز در بوکسیت‌های کارستی عموماً مبهم است (Ahmadnejad et al., 2017). مطالعات قبلی نشان می‌دهد که بیشتر کانسارهای بوکسیت لائیتی مستقیماً در ارتباط با واحدهای سنگی زیرین خود (به‌عنوان سنگ مادر) هستند (Bardossy and Aleva, 1990; Esmaeily et al., 2010). در حالی که این مسئله به ندرت در مورد کانسارهای بوکسیت کارستی توسعه یافته بر روی سنگ‌های کربناته صدق می‌کند (Mameli et al., 2007; Ahmadnejad et al., 2017). بوکسیت‌زایی در کانسارهای با سنگ میزبان کارستی غالباً با تفکیک قابل توجه عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی همراه است. بر همین اساس معمولاً تشخیص سهم نسبی منشأهای گوناگون و تکامل روابط سنگ مادر و توده معدنی طی تشکیل کانسارهای بوکسیت بسیار مشکل است (Mongelli et al., 2014). برای رفع این مشکل محققین از روش‌های زمین‌شیمیایی گوناگونی شامل بی‌هنجاری Eu در مقابل نسبت  $TiO_2/Al_2O_3$ ، بی‌هنجاری Eu در مقابل نسبت Sm/Nd، نسبت عناصر نامتحرک، الگوی عناصر نادر خاکی و نمودارهای سه‌گانه Ga، Zr و Cr (برای تعیین سنگ مادر بوکسیت‌ها استفاده می‌کنند (احیاء و لطفی، ۱۳۸۸؛ Mameli et al., 2007؛ Calagari and Abedini, 2007؛ Ahmadnejad et al., 2017).

بیش از ۱۹۰ رخدادهای بوکسیت کارستی در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس (ZSFB) شناسایی شده و ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناختی و زمین‌شیمیایی

برخی از آنها از جمله سرفاریاب (احیاء و لطفی، ۱۳۸۸؛ Zarasvandi et al., 2010)، مومبی (Zamanian et al., 2016) و بیدگل (Ahmadnejad et al., 2017) مورد بررسی قرار گرفته است. کانسار بوکسیت باگوشی در فاصله ۳۷ کیلومتری شمال باختری شهر مصیری در استان فارس و از نظر ساختاری در ناحیه زاگرس چین‌خورده قرار دارد (شکل ۱). هدف از این پژوهش بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و زمین‌شیمیایی (عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی) و شناخت محیط نهشتی و شرایط کانی‌سازی بوکسیت در این کانسار بوده که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. این پژوهش در کنار سایر پژوهش‌های قبلی و آتی، به شناخت بهتر فرایندهای مؤثر در پدیداری کانسارهای بوکسیت در این بخش از ZSFB کمک خواهد کرد.

## ۲- روش پژوهش

در این پژوهش ضمن بازدید صحرایی از منطقه مورد مطالعه، ۵۹ نمونه از افق‌های مختلف بوکسیتی برداشت شد. از این تعداد، ۴۰ نمونه معرف برای تهیه مقاطع نازک به منظور بررسی ویژگی‌های بافتی (در آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه لرستان) و ۶ نمونه معرف از افق‌های مختلف بوکسیتی و یک نمونه از زمینه پیژویدها و آئیدها برای تجزیه پراش پرتو ایکس به منظور شناخت فازهای کانی (تجزیه با دستگاه XRD فیلیپس مدل PW1800IPS در آزمایشگاه شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین

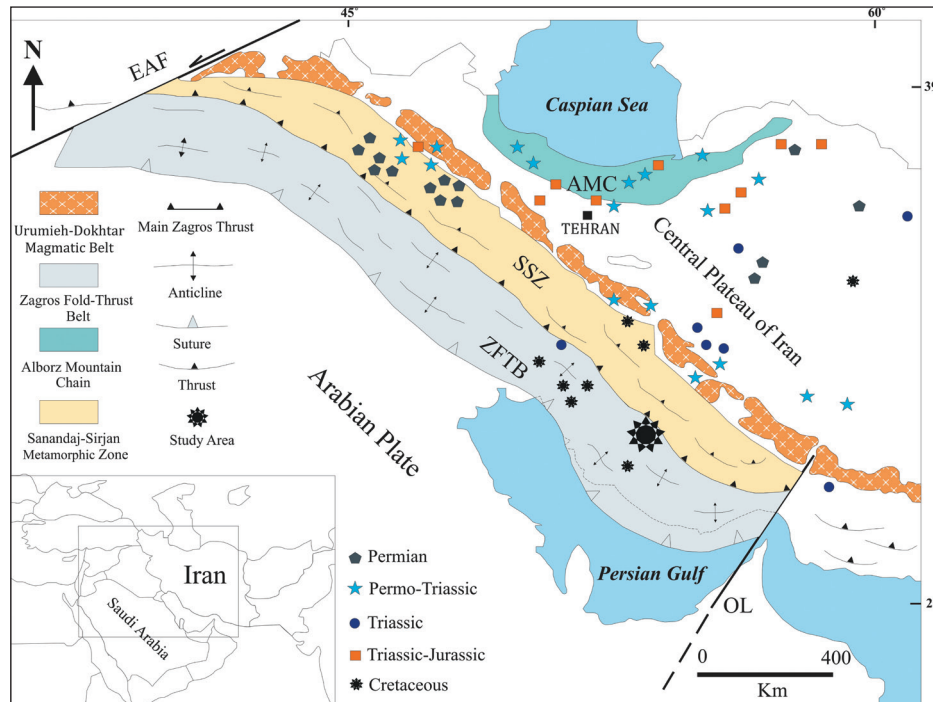
نادر خاکی برابر با ۰/۱ تا ۰/۳ پی‌پی‌ام و درصد خطای نسبی برابر با  $\pm 5\%$  درصد است. محاسبات ضریب غنی‌شدگی (Enrichment Factor)، ترکیب بازساختی (Reconstructed Composition) و همچنین میزان کاهش و افزایش جرم (Mass Change) به کمک فرمول‌های ذیل انجام گرفته است (MacLean, 1990):

$$EF = \text{فراوانی عنصر در سنگ} / \text{فراوانی عنصر در سنگ مادر}$$

$$EF = RC * \text{درصد فراوانی ترکیب در سنگ هوازده}$$

$$RC = \text{درصد فراوانی عنصر در سنگ مادر}$$

آمیتیس مشهد انجام شد) انتخاب شد. همچنین به منظور بررسی زمین‌شیمی و تعیین محتوای عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی کانسار بوکسیت باگوشی، ۱۱ نمونه معرف نیز از واحدهای سنگی مختلف این بوکسیت و یک نمونه از سنگ‌آهک سازند سروک انتخاب شده است. اکسیدهای عناصر اصلی با استفاده از روش XRF و عناصر کمیاب و نادر خاکی با استفاده از روش ICP-MS در آزمایشگاه تجزیه و عناصر در کشور کانادا تجزیه شده‌اند. حد آشکارسازی برای اکسیدهای اصلی برابر با ۰/۱ درصد، برای عناصر کمیاب برابر با ۰/۱ تا ۸ پی‌پی‌ام و برای عناصر



شکل ۱- زیرزون‌های زمین‌ساختی کوهزایی زاگرس، باختر ایران و توزیع کانسارهای بوکسیت در نقشه ایران (اقتباس از Alavi, 2007 و Ahmadnejad et al., 2017) موقعیت نهشته باگوشی در نقشه مشخص شده است (EAF= گسل خاور آناطولی، OL= خطواره عمان).

### ۳- زمین‌شناسی

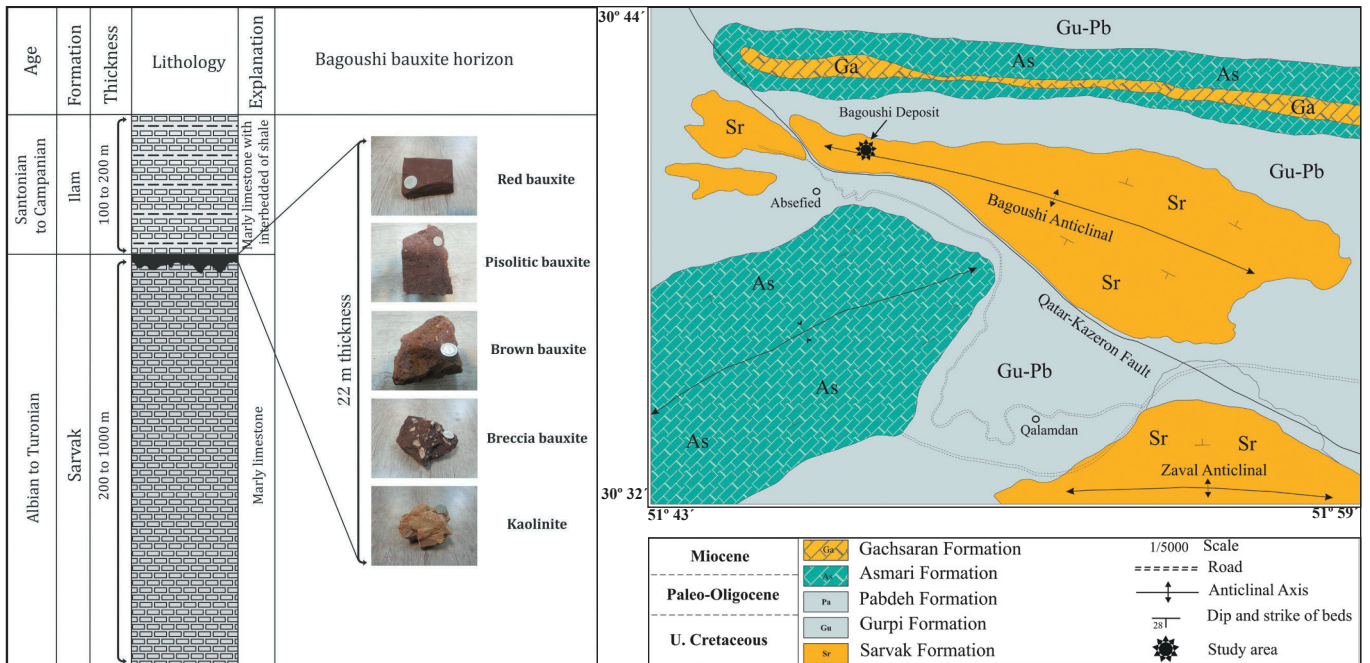
کمر بند چین‌خورده زاگرس، ناحیه‌ای ساختاری با روند شمال باختری- جنوب خاوری است که در گستره‌ای نزدیک به ۲۰۰۰ کیلومتر مربع از جنوب خاوری ترکیه، جنوب سوریه و شمال خاوری عراق تا باختر و جنوب ایران گسترش یافته است و کانسار بوکسیت باگوشی و دیگر بوکسیت‌های کارستی منطقه را میزبانی می‌کند (شکل ۱). کانسار بوکسیت باگوشی در یال شمالی طاق‌دیس باگوشی و در موقعیت جغرافیایی  $30^{\circ} 25' 12''$  شمالی و  $51^{\circ} 30' 13''$  خاوری واقع شده است (شکل ۲- A). این طاق‌دیس امتداد شمال باختری- جنوب خاوری دارد و دارای گسل‌هایی در جهت عمود بر محور چین‌ها است. نهشته بوکسیت باگوشی به صورت توده عدسی شکل قرمز رنگ درون گودال‌ها و حفرات کارستی موجود در سطح فرسایش یافته سازند سروک قرار دارد که قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی در منطقه است. روی این عدسی بوکسیتی را سازند ایلام (سانتوین تا کامپانین) شامل لایه‌های آهکی رسی ریزدانه خاکستری روشن تا تیره به ضخامت نیم تا دو متر با میان‌لایه‌های نازک شیل پوشانده است که گاهی در اثر هوازدگی سفیدرنگ شده‌اند (شکل ۲- B). این ذخیره بوکسیتی به صورت یک عدسی واحد با ضخامت حدود ۲۲ متر و عرض ۵۰ متر است.

### ۴- مطالعات کانی‌شناسی و بافتی

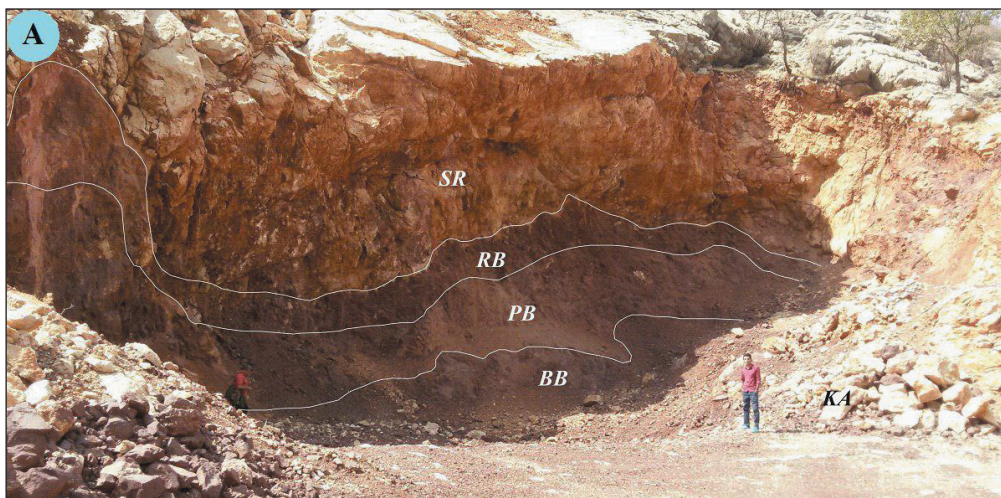
بررسی‌های صحرایی و شواهد ماکروسکوپی نشان می‌دهد که کانسار بوکسیت باگوشی از پایین به بالا شامل افق کائولینیتی، بوکسیت برشی، قهوه‌ای، پیرویدیتی و قرمز است که بر روی سازند سروک قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۲- B و ۳). به دلیل ریزپلور بودن کانی‌های سازنده کانسارها در کانسار باگوشی، شناسایی فازهای کانی به وسیله آزمایش پراش اشعه ایکس انجام شد. افق‌های بوکسیتی ترکیب کانی‌شناسی تقریباً همسانی شامل بوهمیت، کائولینیت، هماتیت، پیروفیلیت، آاناتاز، کلسیت و دیاسپور دارد و سنگ میزبان کانسار (سازند سروک) متشکل از کلسیت، کوارتز، هماتیت و مونتموریلونیت و افق کائولینیت نیز متشکل از کائولینیت، پیروفیلیت، بوهمیت و آاناتاز است. زمینه پیرویدیتها و آئیدها در کانه‌های بوکسیتی از کانی‌های نهان‌بلور بوهمیت، هماتیت و کائولینیت تشکیل شده و بافت چیره در کانه‌ها پیرویدیتی، پیرویدیتی - آئیدی و تخریبی بوده که با زمینه پلیتومورفیک و میکروگرانولار همراه است (شکل‌های ۴- A تا H). افق برشی نیز بافت برشی دروغین در یک زمینه پلیتومورفیک دارد و می‌توان آن را نتیجه‌ای از انحلال کرنات همراه با کارستی شدن و فروریختن لایه‌های پوشاننده دانست. مشاهدات میکروسکوپی، ۶ گونه ساختار آئیدی و پیرویدیتی در کانه‌های بوکسیتی باگوشی مشخص

آب‌شویی آهن (شکل ۴- E)؛ (۴) وجود پیرویدهای دمبلی‌شکل در یک زمینه پلیتومورفیک (شکل ۴- F)؛ (۵) رخداد پیرویدهای دگرزاد (Allogenic) که هسته آنها از آئیدهای کروی کوچک‌تر پدید آمده است (شکل ۴- G)؛ (۶) وجود تکه‌های شکسته شده پیروید در میان سایر پیرویدها (شکل ۴- H).

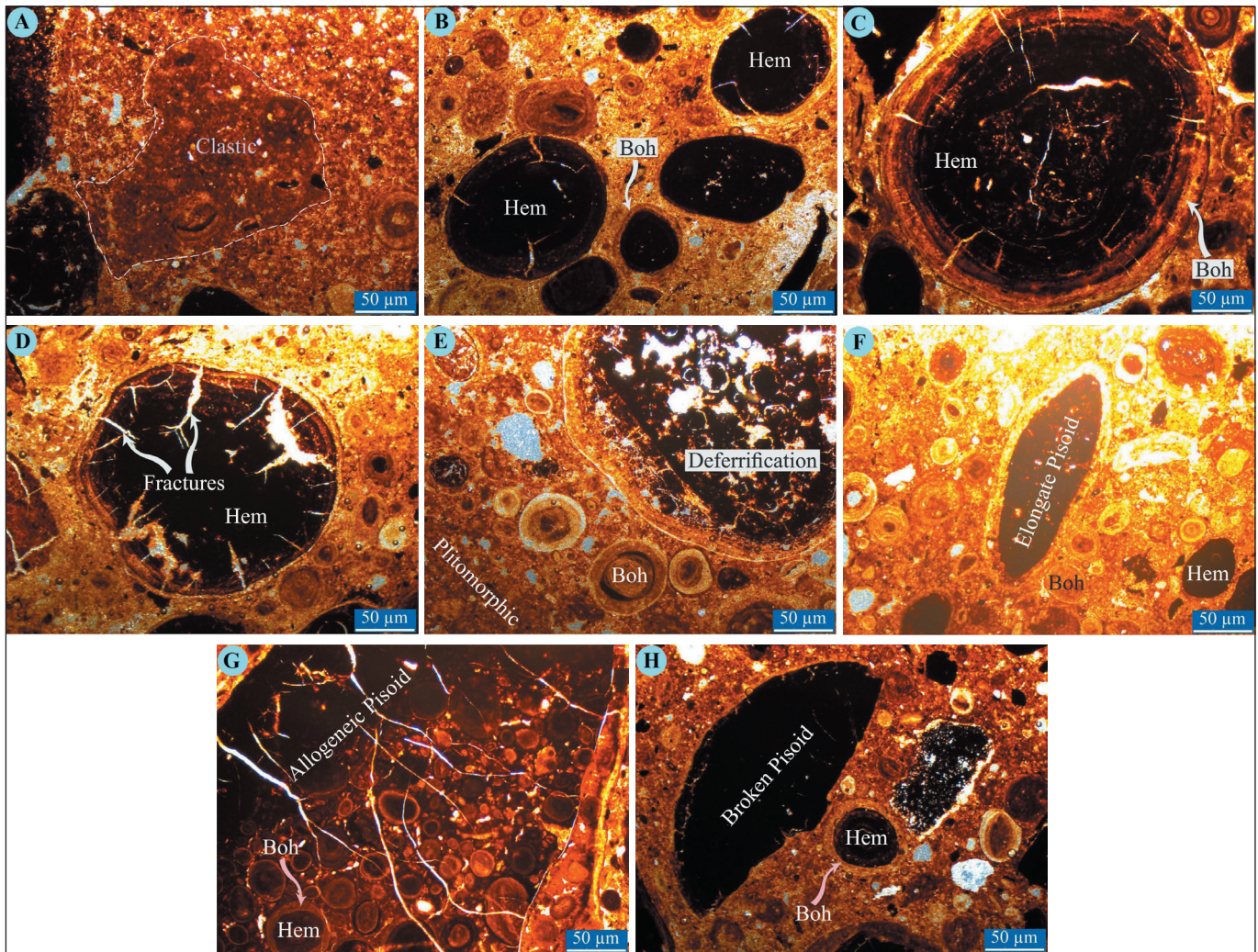
می‌سازد: (۱) پیرویدها و آئیدهایی با هسته هماتی و پوسته بوهمیتی (شکل ۴- B)؛ (۲) شکستگی‌های شعاعی و نامنظم در پیرویدها که یا به درون پیروید محدود هستند (شکل ۴- C) یا پوسته پیروید را در می‌نوردند و به زمینه نفوذ می‌کنند (شکل ۴- D)؛ (۳) تجمعاتی از پیرویدها در زمینه‌ای با رنگ روشن، به‌عنوان نشانه‌ای از فرایند



شکل ۲- (A) نقشه زمین‌شناسی منطقه باگوشی، موقعیت نهشته بوکسیت باگوشی در نقشه با \* نمایش داده شده است؛ (B) ستون چینه‌شناسی و توالی افق‌های بوکسیتی در کانسار باگوشی.



شکل ۳- نمایشی از نهشته بوکسیت کارستی باگوشی همراه با تفکیک افق‌های مختلف بوکسیتی (SR=سازند سروک، RB=بوکسیت قرمز، PB=بوکسیت پیرویدی، BB=بوکسیت برشی، KA=واحد کائولینیتی).



شکل ۴- A) یک قطعه تخریبی در زمینه پلیتومورفیک؛ B) پیزویدهایی با هسته هماتیته و پوشش بوهمیتی؛ C و D) شکستگی‌های شعاعی و نامنظم در پیزویدها که یا به درون پیزوید محدود هستند (C) و یا از پوسته پیزوید رد می‌شوند و به زمینه نفوذ می‌کنند (D)؛ E) پدیده آهن شویی؛ F) یک پیزوید دمبلی شکل؛ G) پیزوید دگرزاد؛ H) قطعه شکسته شده پیزوید در میان سایر پیزویدها (Hem=هماتیت، Boh=بوهمیت).

## ۵- زمین‌شیمی

مقادیر عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی در ۱۱ نمونه معرف برداشت شده از افق‌های بوکسیتی و سنگ آهک سازند سروک در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۵-۱. زمین‌شیمی عناصر اصلی

سنگ آهک سازند سروک حاوی حداقل اجزای رسی بوده که این امر در مقادیر پایین  $K$ ،  $Si$ ،  $Al$ ،  $Fe$ ،  $Mg$  و  $CaO$  منعکس شده است (جدول ۱). کانسنگ بوکسیت باگوشی بیشتر متشکل از  $Al_2O_3$  (۴۳/۵۴ تا ۶۲/۴۷ درصد وزنی)،  $SiO_2$  (۲/۶۵ تا ۳۱/۴۵ درصد وزنی)،  $Fe_2O_3$  (۷/۹۱ تا ۲۷/۱۱ درصد وزنی) و  $TiO_2$  (۱/۶۵ تا ۲/۶ درصد وزنی)  $L.O.I$  متغیر از ۱۱/۸ تا ۱۴/۶ درصد وزنی است. همچنین  $MgO$ ،  $Cr_2O_3$  و دیگر عناصر تشکیل دهنده کانسنگ‌های بوکسیتی هستند. مقادیر آهن در بخش‌های مختلف نهشته متغیر است، با این وجود، به سمت افق‌های پایینی محتوای آهن کاهش و مقادیر آلومینیم افزایش می‌یابد. مقادیر اندک  $SiO_2$  در کانسنگ‌های بوکسیتی احتمالاً به سبب درجه بالای لاتریت‌زایی است. در نمونه‌های مورد مطالعه، نمودارهای دوتایی اکسیدهای اصلی همبستگی بین عناصر را آشکار می‌سازند. همبستگی قوی مثبت بین  $Al_2O_3$  ( $R^2=0.94$ )،  $TiO_2$ ، همبستگی مثبت قوی بین  $Fe_2O_3$  ( $R^2=0.71$ ) و  $Cr_2O_3$ ، همبستگی منفی بین  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  ( $R^2=-0.35$ ) و همبستگی منفی بین  $Al_2O_3$  ( $R^2=-0.60$ ) و  $Fe_2O_3$  در نمونه‌های

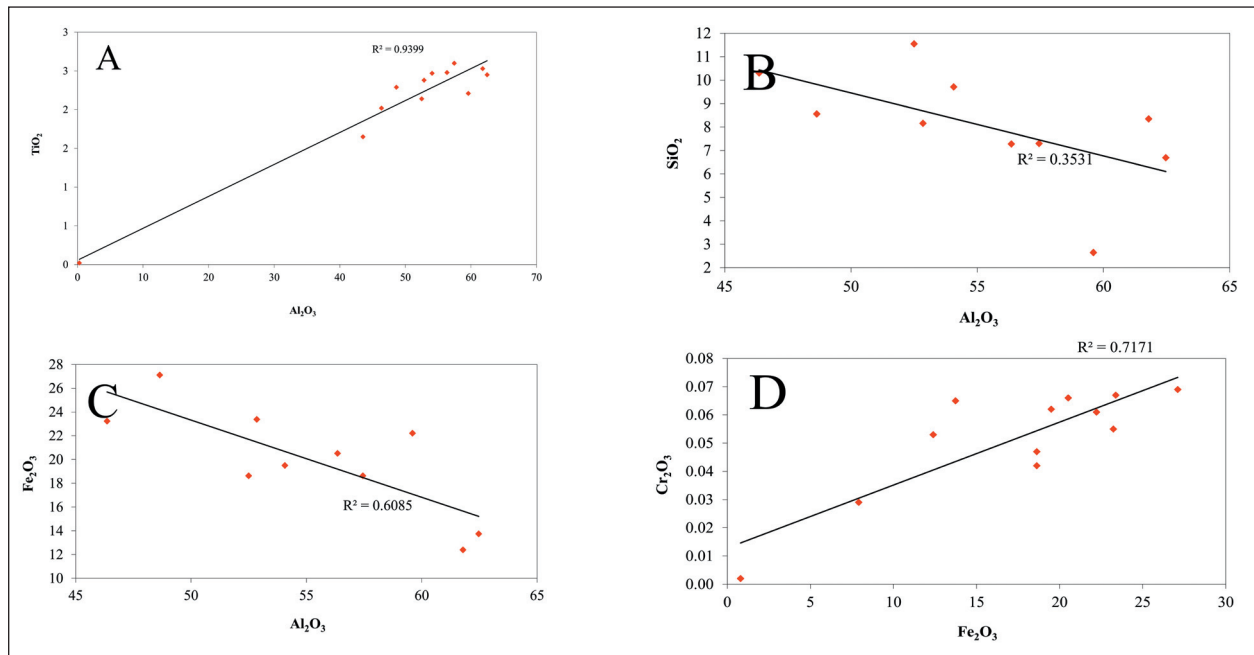
بوکسیتی مشاهده می‌شود (شکل‌های ۵- A تا D). عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در نمونه‌ها کمتر از ۰/۱ درصد فراوانی دارند؛ زیرا این عناصر شدیداً متحرک هستند و در طول هوازدگی شیمیایی شسته می‌شوند (Gu et al., 2013).

### ۵-۲. زمین‌شیمی عناصر کمیاب

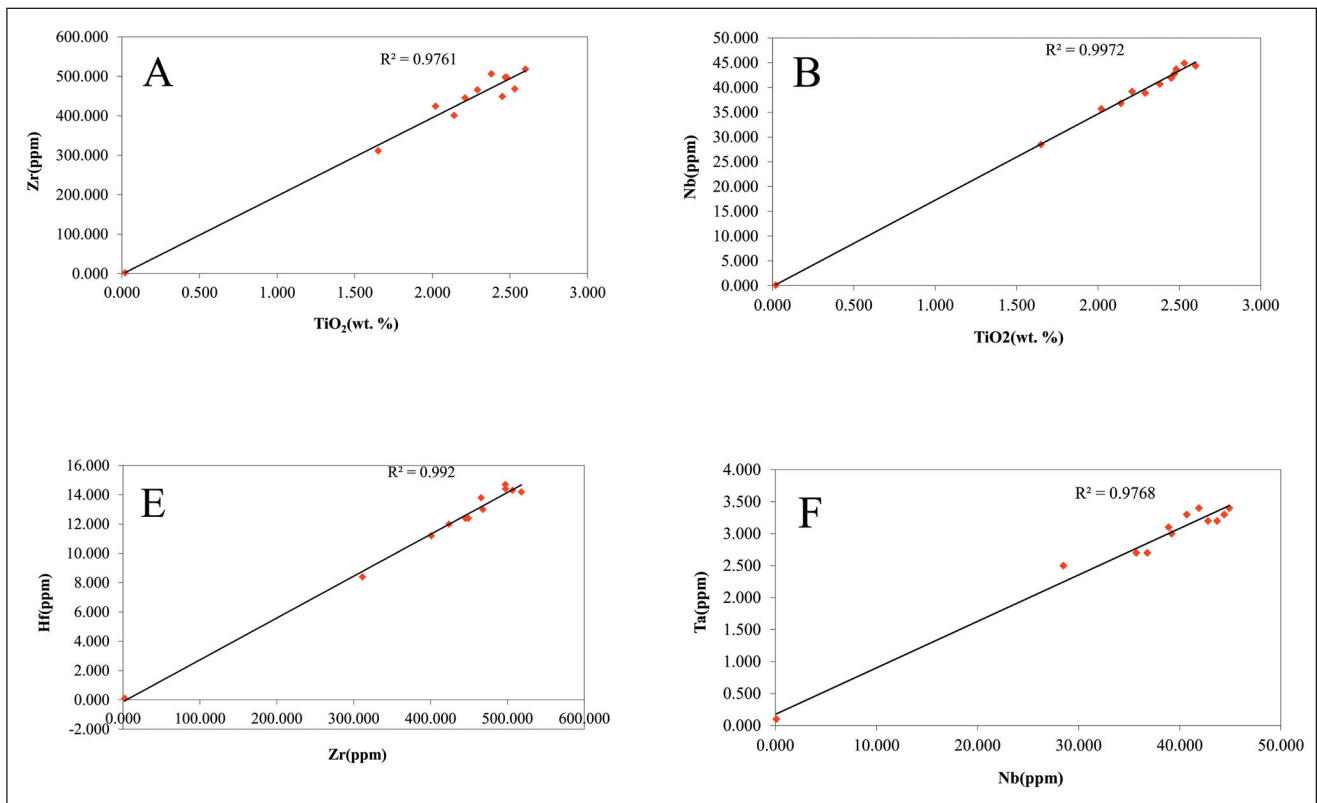
سنگ بستر (سازند سروک)، حاوی مقادیر اندکی عناصر کمیاب در حد چند پی‌پی‌ام است (جدول ۱). در حالی که کانسنگ‌های بوکسیتی نسبت به سازند سروک از لحاظ  $Zr$ ،  $Nb$ ،  $Cr$ ،  $Ni$ ،  $Hf$ ،  $V$ ،  $Y$ ،  $Th$ ،  $Ga$  و  $Ta$  (شکل‌های ۶- A تا B) دارد. از طرفی،  $Zr$  و  $Hf$  ( $R^2=0.99$ ) و نیز  $Nb$  و  $Ta$  ( $R^2=0.97$ )، همبستگی‌های مثبت قوی به نمایش می‌گذارند (شکل‌های ۶- C و D). این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که  $Ti$  و  $HFSE$ ، رفتار زمین‌شیمیایی همسانی دارند و در طول مراحل بوکسیت‌زایی نسبتاً غیر متحرک بوده‌اند (Liu et al., 2010; Zarasvandi et al., 2012; Gu et al., 2013). نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب نرمال شده با پوسته قاره‌ای فوقانی (Taylor and McLennan, 1985) (UCC) ویژگی‌های مشابهی چون تهی‌شدگی  $Ba$ ،  $Rb$ ،  $K$ ،  $Sr$  و غنی‌شدگی  $Zr$ ،  $U$ ،  $Nd$ ،  $La$ ،  $Ce$ ،  $Th$  و  $Sm$  را مشخص می‌سازد (شکل ۷- A).

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی به دست آمده از آزمایش ICP-MS بر روی نمونه‌های برداشت شده از کانسار بوکسیت کارستی باگوشی.

	RB1-3	RB-FW-9	BT1-2	PB1-3	PB2-4	WRB1-5	PB3-6	BT2-7	PB4-8	BB1-10	K-14	Sr
Description	Red Bauxite	Red Bauxite	Pisolitic Bauxite	Pisolitic Bauxite	Pisolitic Bauxite	Weathered Bauxite	Pisolitic Bauxite	Pisolitic Bauxite	Pisolitic Bauxite	Brecciated Bauxite	Kaolinitic Horizon	Sarvak Formation
Depth	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
SiO <sub>2</sub>	11.55	8.35	9.71	7.30	8.56	8.16	7.28	6.69	2.65	10.31	31.45	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52.50	61.79	54.07	57.45	48.64	52.85	56.35	62.47	59.60	46.36	43.54	0.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.63	12.39	19.50	18.63	27.11	23.38	20.52	13.74	22.22	23.23	7.91	0.80
MgO	0.36	0.36	0.33	0.37	0.27	0.31	0.27	0.03	0.11	0.21	0.03	0.23
CaO	0.65	0.15	0.17	0.18	0.78	0.15	0.14	0.14	0.15	3.58	0.16	55.45
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01
K <sub>2</sub> O	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.04	0.01
TiO <sub>2</sub>	2.14	2.53	2.47	2.60	2.29	2.38	2.48	2.45	2.21	2.02	1.65	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02	0.06	0.01
MnO	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.04	0.06	0.01	0.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.03	0.00
L.O.I	13.70	14.00	13.20	13.00	11.80	12.30	12.50	13.80	12.50	12.50	14.60	42.80
Ni	228.00	235.00	224.00	241.00	200.00	220.00	222.00	227.00	87.00	87.00	222.00	220.00
Sc	34.00	39.00	50.00	47.00	62.00	56.00	25.00	40.00	66.00	66.00	25.00	16.00
Ba	42.00	40.00	64.00	79.00	55.00	61.00	26.00	43.00	62.00	62.00	26.00	8.00
Be	8.00	10.00	8.00	8.00	5.00	3.00	6.00	11.00	11.00	11.00	6.00	1.00
Co	13.50	18.00	17.00	17.50	15.70	16.90	13.40	19.20	10.10	10.10	13.40	67.10
Cs	0.80	0.80	0.60	0.90	0.70	0.60	0.60	0.80	0.40	0.40	0.60	0.01
Ga	47.10	56.40	56.70	51.70	51.50	55.00	58.90	57.60	75.60	51.60	34.40	0.50
Hf	11.20	13.00	14.40	14.20	13.80	14.30	14.70	12.40	12.40	12.00	8.40	0.10
Nb	36.80	44.90	42.80	44.40	38.90	40.70	43.70	41.90	39.20	35.70	28.50	0.10
Rb	1.20	1.20	1.30	1.30	1.30	1.10	1.50	1.20	0.60	1.40	1.10	0.10
Sr	314.70	167.70	212.60	212.30	209.40	222.80	118.20	109.80	186.90	173.60	370.60	112.10
Ta	2.70	3.40	3.20	3.30	3.10	3.30	3.20	3.40	3.00	2.70	2.50	0.10
Th	36.60	40.10	48.50	48.20	64.50	58.70	60.20	37.70	58.70	50.20	24.60	0.30
V	195.00	193.00	282.00	218.00	288.00	269.00	255.00	197.00	260.00	253.00	156.00	12.00
Zr	400.90	468.10	497.50	518.20	465.90	506.50	497.30	449.20	445.50	424.10	311.30	2.20
Y	58.40	77.30	98.30	100.80	76.60	82.60	93.50	89.80	133.60	66.10	44.80	8.00
La	97.60	85.90	155.70	148.00	110.50	117.30	118.50	101.80	252.30	88.80	77.50	18.50
Ce	179.00	149.70	377.10	276.00	225.90	213.40	224.50	195.40	613.60	160.60	125.20	32.80
Pr	17.38	17.95	43.79	29.83	24.69	23.45	27.27	23.31	64.38	17.49	15.11	4.24
Nd	54.50	66.10	180.70	111.00	94.20	84.50	104.30	89.50	254.20	63.30	49.40	15.96
Sm	8.09	12.07	35.34	19.59	18.11	15.52	19.96	17.64	49.76	11.08	7.42	2.75
Eu	1.61	2.50	4+6.9	4.29	3.85	3.26	4.16	3.65	10.06	2.36	1.35	0.54
Gd	7.65	11.36	28.90	19.78	15.85	14.48	18.43	16.52	43.17	10.28	5.84	2.65
Tb	1.41	1.92	3.69	3.01	2.42	2.41	2.82	2.54	5.34	1.73	0.99	0.37
Dy	10.26	12.43	19.23	17.83	14.19	14.64	16.84	15.10	25.67	10.91	6.26	2.25
Ho	2.19	2.74	3.52	3.37	2.89	2.99	3.43	3.09	4.33	2.45	1.52	0.46
Er	7.07	8.58	9.61	10.39	8.94	9.33	10.26	9.56	11.32	7.53	4.87	1.33
Tm	1.12	1.31	1.46	1.52	1.34	1.40	1.50	1.41	1.59	1.19	0.77	0.18
Yb	7.24	8.78	9.40	9.84	8.59	9.04	9.71	9.23	9.87	7.70	5.12	1.30
Lu	1.10	1.35	1.43	1.51	1.35	1.44	1.49	1.38	1.51	1.23	0.80	0.18
∑REE	396.22	382.69	81+876	655.96	532.82	513.16	563.17	490.13	1,347.10	386.65	302.15	83.51
Eu/Eu*	0.63	0.65	0.66	0.67	0.69	0.66	0.66	0.65	0.66	0.68	0.63	0.61
Ce/Ce*	0.97	0.87	1.08	0.95	1.00	0.93	0.92	0.93	1.13	0.92	0.83	0.86
(La/Yb) <sub>n</sub>	9.09	6.60	11.17	10.14	8.67	8.75	8.23	7.44	17.23	7.78	10.21	9.59
La/Y	1.67	1.11	1.58	1.47	1.44	1.42	1.27	1.13	1.89	1.34	1.73	2.31
Sm/Nd	0.15	0.18	0.2	0.18	0.19	0.17	0.19	0.16	0.17	0.18	0.17	0.17



شکل ۵- نمودارهای دوتایی اکسیدهای عناصر اصلی در کانسار بوکسیت باگوشی: (A:  $Al_2O_3$  vs  $TiO_2$ ; B:  $Al_2O_3$  vs  $SiO_2$ ; C:  $Al_2O_3$  vs  $Fe_2O_3$ ; D:  $Fe_2O_3$  vs  $Cr_2O_3$ )

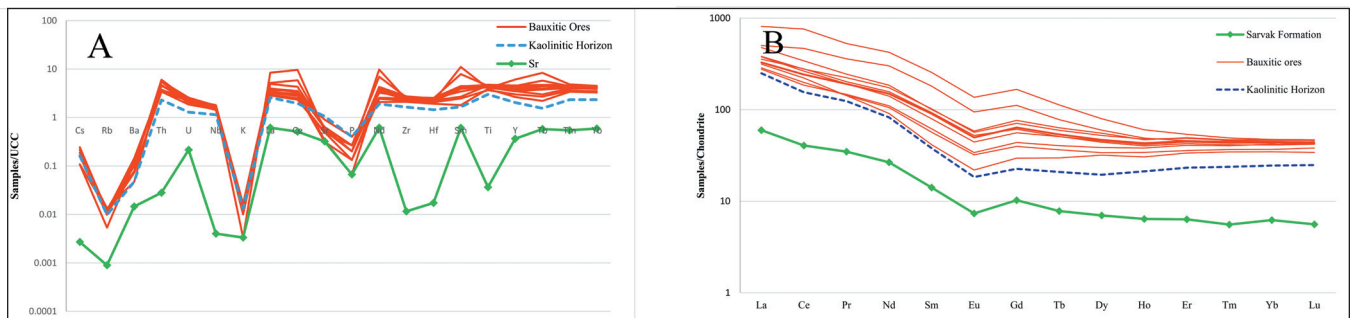


شکل ۶- نمودارهای دوتایی ضرایب همبستگی بین: (A:  $Zr$  vs  $TiO_2$ ; B:  $Nb$  vs  $TiO_2$ ; C:  $Hf$  vs  $Zr$ ; D:  $Ta$  vs  $Nb$ )

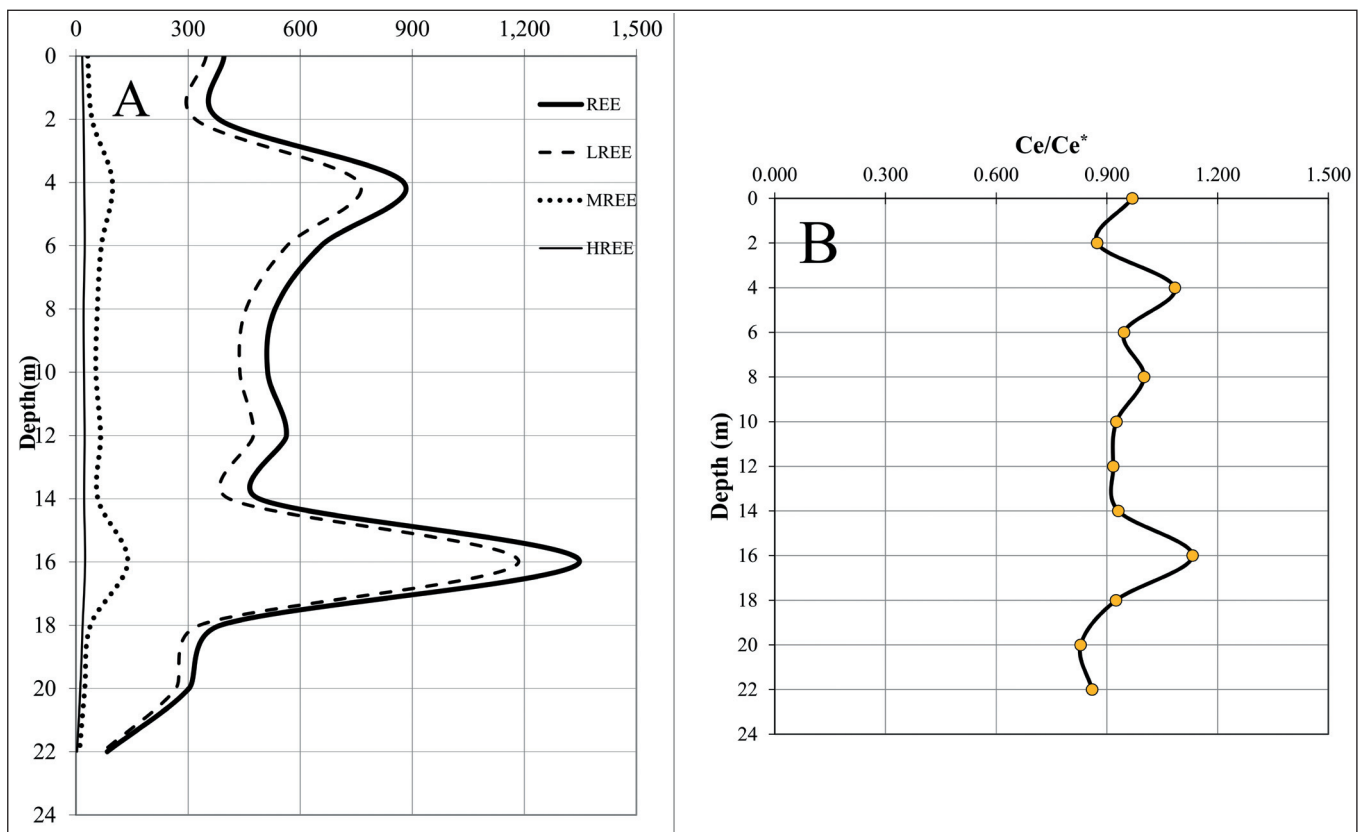
### ۵-۳. زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

سنگ آهک سازند سروک به‌عنوان سنگ بستر کانسنگ‌های بوکسیت باگوشی با مقادیر پایین عناصر نادر خاکی (۸۳/۵ ppm) مشخص می‌شود. کانسنگ‌های بوکسیتی با مقادیر عناصر نادر خاکی متغیر (۳۸۲/۶ تا ۱۳۴۷/۱)، نسبت‌های La/Yb<sub>N</sub> از ۶/۵۹ تا ۱۷/۲۳، بی‌هنجاری‌های منفی و تقریباً یکنواخت Eu (از ۰/۶۲ تا ۰/۶۹) و بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی Ce (۰/۸۷۳ تا ۱/۱۳۲) قابل توصیف هستند. الگوهای توزیع عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت نمونه‌های نهشته باگوشی نشانگر جدایش نسبی بین عناصر نادر خاکی سبک و عناصر نادر خاکی سنگین، غنی‌شدگی آشکار عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین

و بی‌هنجاری‌های منفی Eu است و همچنین نشان می‌دهد که عناصر نادر خاکی در نمونه‌های بوکسیت نسبت به سازند سروک دستخوش غنی‌شدگی آشکاری شده‌اند (شکل ۷-۸). افزایش غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عمق آشکار بوده و بررسی الگوی تغییرات عناصر نادر خاکی نسبت به عمق نشان‌دهنده غنی‌شدگی بیشتر عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی متوسط و عناصر نادر خاکی سنگین است (شکل ۸-۸). مقادیر بی‌هنجاری Ce عموماً نزدیک به ۱ بوده و تغییر اندکی در مقدار این بی‌هنجاری در سرتاسر افق بوکسیتی به چشم می‌خورد. تنها دو نمونه بی‌هنجاری مثبت Ce نشان می‌دهند و سایر نمونه‌ها بی‌هنجاری منفی دارند (شکل ۸-۸).



شکل ۷-۸) نمودار عنکبوتی نرمال شده با پوسته قاره‌ای فوقانی (UCC) برای نمونه‌های معرف نهشته بوکسیت باگوشی (Taylor and McLennan, 1985)؛ (B) الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1985).



شکل ۸-۸) نمودار تغییرات تمرکز عناصر نادر خاکی نسبت به عمق که حاکی از افزایش پیشرونده مقدار این عناصر به سمت بخش‌های پایینی افق بوکسیتی است؛ (B) نمودار تغییرات  $Ce/Ce^*$  نسبت به عمق. بی‌هنجاری‌های Ce عموماً نزدیک به ۱ هستند و تغییر اندکی نشان می‌دهند.

## ۶- بحث

### ۶-۱. محیط تشکیل و ترا برد مواد بوکسیتی

بوهیمت به همراه دیاسپور کانی غالب در نهشته‌های بوکسیت کارستی بوده و ته‌نشست آن به‌عنوان کانی اولیه بوکسیت تحت شرایط سطحی نیازمند pH بالاتر از ۵ است، در حالی که هماتیت و گوتیت در pH بالاتر از ۷ و Eh بالاتر از ۰/۲ پدید می‌آیند (Temur and Kansun, 2006). همراهی هماتیت و بوهیمت در بوکسیت پیرویدی نشانگر شرایط اکسایش در محیط غیر اشباع (Vadose) است. کائولینیت ممکن است دارای منشأ دیرزاد، همزاد و یا برجا باشد. کائولینیت‌های دیرزاد بیشتر در نتیجه فرایند کائولینیتی شدن بوکسیت پدید می‌آیند و این منشأ برای کائولینیت‌ها در نهشته باگوشی محتمل‌تر است که پرشدگی درز و شکاف و حفرات کانسنگ‌ها با کائولینیت این احتمال را تأیید می‌کند. رخداد آتاز به شکل پراکنده در زمینه کانه‌ها نشانگر شرایط کاهشی و pH پایین در هنگام پدید آمدن بوکسیت کارستی باگوشی است (Ozlu, 1983). بر اساس شرایط پایداری کانی‌های اصلی، افق‌های بوکسیتی باگوشی بیشتر در محیطی با عملکرد آب‌های سطحی اسیدی و اکسایشی تا آب‌های زیرزمینی قلیایی و کاهشی پدید آمده‌اند. پایداری شرایط محیطی و تکتونیک در طی دیاژنز و عدم رسوب‌گذاری مجدد، مواد ریزبلور ماتریکس پلیمورفیک را به وجود می‌آورد (شکل ۴- A). پدیداری آئیدها و پیرویدها در کانه‌ها (شکل ۴- B) به ناهمگنی منشأ کلویدهای اولیه برآمده از دگرسانی و هوازگی سنگ‌های مادر منتسب است (Zamanian et al., 2016). هسته آشکار در پیرویدهایی با هسته ساده بیانگر این است که پوسته‌های این پیرویدها در پیرامون پیرویدهای قبلی رشد می‌کنند و برجا بودن نهشته بوکسیتی را نشان می‌دهند. رشد کنکرسونی آئیدها و پیرویدها (پیرویدها و آئیدهایی با هسته هماتیته و پوسته بوهیمیتی) (شکل ۴- B) دو مرحله متفاوت را شامل می‌شود. مرحله نخست نشانگر دوره نسبتاً درازمدت آب‌وهوای استوایی و مرطوب و عامل پدیداری هسته‌های بزرگ هماتیته و مرحله دوم نشانگر چیرگی دوره‌های کوتاه‌مدت آب‌وهوای خشک و موجب پدیداری پوسته‌های نازک بوهیمیتی است (Mongelli, 1997). منشأ شکستگی‌های محدود به درون پیروید (شکل ۴- C)، تراکم و خشک‌شدگی ژل اولیه در طول تشکیل کانه در اثر فرایندهای دیاژنتیک و دیرزاد و منشأ شکستگی‌های منتشر به زمینه (شکل ۴- D) مربوط به پیامد فرایندهای دیرزاد و زمین‌ساختی هستند. وجود پوسته‌های ترک نخورده در پیرامون هسته‌های شکسته شده بیانگر ادامه فرایند بوکسیتی شدن در گودال‌های کارستی پس از ترا برد است. پوسته‌های بدون شکستگی شعاعی و دایره‌ای در پیرویدها، ناشی از ترا برد نیستند و وجود شکستگی منظم دایره‌ای در هسته بیرونی، ناشی از نخستین گام از پوسته‌زایی است (Delvigne, 1998). فرایند آب‌شویی آهن (شکل ۴- E) از فرایندهای دیرزاد مهم بوده که منتج به غنی‌شدگی آلومینیم در افق‌های بوکسیتی شده و نشانه‌ای از فرایندهای زیستی و میکروبی است که به چیرگی شرایط اسیدی و کاهشی می‌انجامد (Augustithis, 1982). پیرویدهای دبل‌شکل در زمینه پلیمورفیک (شکل ۴- F) حاکی از تغییر شکل بر اثر فعالیت زمین‌ساختی و فشردگی و بیانگر شرایط باز نهشتی طی تکامل کانسار باگوشی هستند (Liu et al., 2010). حضور پیرویدهای دگرزاد (شکل ۴- G) دال بر ترا برد مواد بوکسیتی بوده (Taylor and Eggleton, 2004) و وجود تکه‌های شکسته شده پیروید در میان سایر پیرویدها (شکل ۴- H) نمایانگر ترا برد دوباره مواد بوکسیتی و شرایط باز نهشتی است (Gu et al., 2013). شواهدی چون بافت‌های پلیمورفیک، پیرویدی و آئیدی در کانسنگ‌ها، پیرویدهایی با شکستگی‌های شعاعی، همچنین رشد پوسته‌های ساده در پیرامون هسته پیرویدهای قبلی و پیرویدهایی با پوسته‌های بدون شکستگی شعاعی و دایره‌ای، دال بر پدیداری برجازاد این نهشته است. از طرفی رخدادهایی مانند تکه‌های شکسته شده پیرویدها، رخداد پیرویدهای دگرزاد و حضور تکه‌های تخریبی در مقاطع میکروسکوپی نشان از ترا برد مواد بوکسیتی دارند. این مشخصه‌های بافتی این احتمال را تأیید می‌کنند که منشأ مواد بوکسیتی در نهشته باگوشی غالباً برجا بوده که به‌طور محلی در برخی قسمت‌ها دستخوش حمل و نقل شده و در فرورفتگی‌های کارستی باز نهشت شده است.

### ۶-۲. مطالعات تغییر جرم

محاسبه تغییرات جرم در طی فرایند بوکسیتی شدن با روش عناصر نام‌تحرک ( $Ti, Zr, Nb$  و  $Th$ ) انجام شد. بنیان این روش، یکسانی نسبت عناصر نام‌تحرک مانند  $Al/Ti$  و  $Zr/Ti$  در سنگ مادر و سنگ دگرسان شده حاصل از آن است و از این رو می‌توان از این نسبت‌ها برای تشخیص سنگ مادر استفاده کرد. پیرو بررسی‌های میدانی و مطالعات زمین‌شیمیایی که در ادامه به تفصیل آن پرداخته خواهد شد، سازند آهکی سروک به عنوان سنگ مادر نهشته بوکسیت باگوشی و بر مبنای فراوانی و رفتار یکنواخت آن در طول فرایندهای هوازگی (Hill et al., 2000) عنصر  $Ti$  به عنوان عنصر غیر متحرک در مطالعات تبادل جرم نهشته انتخاب شد. همچنین برای بررسی افزوده شدن و حذف عناصری از محیط، بهنجارسازی کربنات و  $L.O.I$  بر روی داده‌ها صورت گرفت، زیرا به علت تغییر مقدار کلسیم و نیز میزان  $L.O.I$  در نمونه‌ها، نمی‌توان به درستی در مورد فرایندهای غنی‌شدگی و تهی‌شدگی اظهار نظر کرد. برای تعیین تحرک عناصر منفرد در طول فرایندهای بوکسیت‌زایی، بررسی تغییرات مطلق اجزا (عناصر یا اکسیدها) در پوده سنگ (saproelite) و زون بوکسیتی، نسبت به نمونه سنگ مادر مهم است. در شکل ۹ تغییرات جرم محاسبه شده عناصر اصلی، کمیاب و نادر حاکی به نمایش درآمده است. تبادل جرم کل در نهشته بوکسیت باگوشی منفی بوده که نشانگر کاهش جرم کلی در سیستم هوازگی است. به‌طور خلاصه محاسبات تغییرات جرم واحدهای بوکسیتی برحسب عنصر نام‌تحرک  $Ti$  نشان می‌دهد که عناصری مانند  $Co, Ni, Mn, Na, K, Mg, Fe, Si, Sr$  از سیستم هوازگی فروشویی شده‌اند؛  $Nb, Th, V, Y, Zr, Al, Ba$  در سیستم بازماندی افزایش جرم نشان داده و  $Be, Cs, Rb, Ta, Hf, U$  در طول فرایندهای بوکسیت‌زایی نسبتاً نام‌تحرک بوده‌اند. عناصر نادر حاکی تغییرات جرم مثبت دارند و در این بین سهم عناصر نادر حاکی سبک بیشتر است (شکل ۹).

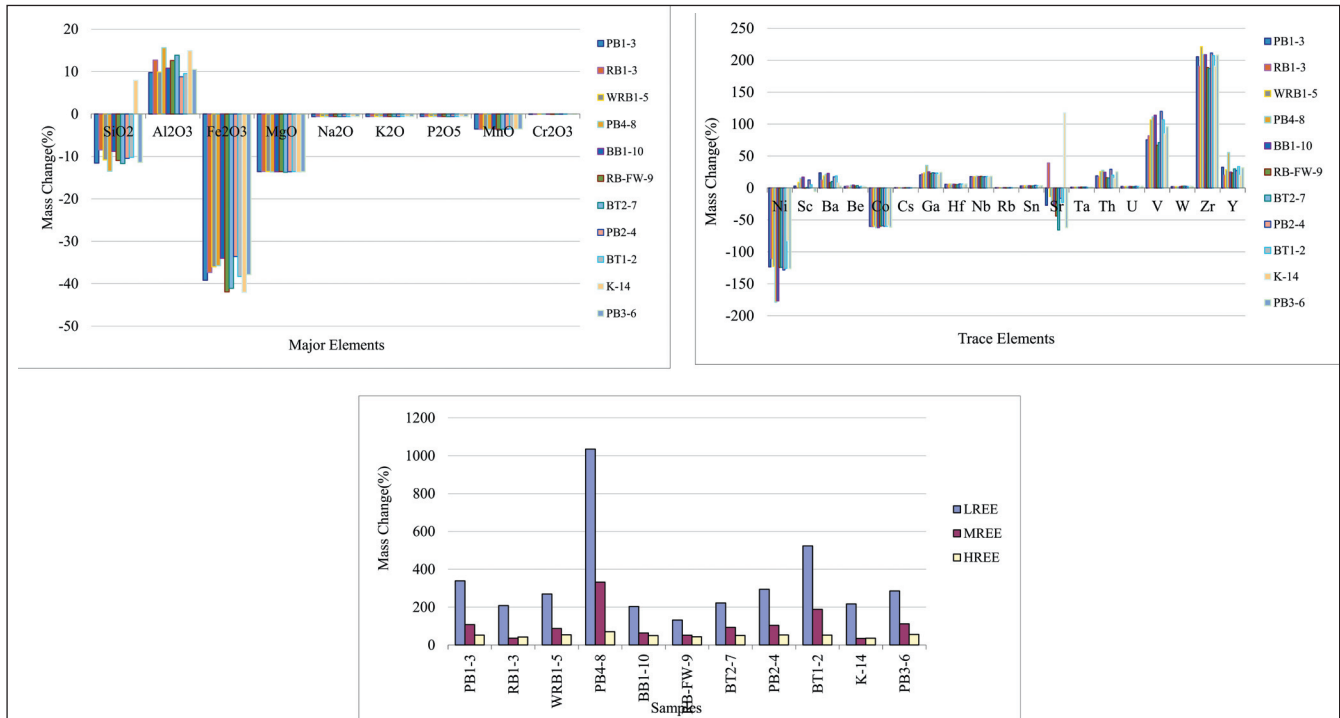
### ۶-۳. رفتار عناصر اصلی و کمیاب طی فرایند بوکسیت‌زایی

همبستگی منفی بین  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  (شکل ۵- B) احتمالاً به سبب انحلال محتوای بوهیمت و فراوانی کائولینیت بوده است (Zarasvandi et al., 2012). تهی‌شدگی سیلیس ممکن است در اثر دگرسانی فلدسپار به کائولینیت یا سرسیست و پس از آن تجزیه کائولینیت به گیبسیت و اسید سیلیسیک و/یا کوارتز ثانویه باشد، همچنین مقادیر زیادی از سیلیس در pH ۸ یا بالاتر و فعالیت بالای آب در یک سیستم زهکشی گسترده فروشویی می‌شود (Karadag et al., 2009). همبستگی منفی بین  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  (شکل ۵- C) می‌تواند به سبب جایگزینی  $Al$  در گوتیت باشد (Boulangue et al., 1996)، همچنین تبادل جرم مثبت و افزایش جرم  $Al$  و کاهش جرم  $Fe_2O_3$  (شکل ۹) عمدتاً حاصل از فروشویی شدید  $Fe$  از نهشته بوکسیتی است که می‌تواند نشان‌دهنده آب‌وهوای مرطوب پایدار در حین فرایندهای بوکسیت‌زایی باشد (Hill et al., 2000). در بین عناصر اصلی،  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  دارای بالاترین همبستگی مثبت هستند و به نظر می‌رسد که این الگو با فروشویی سیلیس و غنی‌شدگی بازماندی آلومینیم و تیتانیم در افق‌های شدیداً هوازده سازگار است (شکل‌های ۵- A و B). تیتانیم و آلومینیم در طول فرایند هوازگی غیر متحرک بوده و به دنبال آن می‌توان روندی خطی با ضرایب همبستگی بالا برای آنها در بوکسیت‌ها متصور شد (Zamanian et al., 2016). همبستگی مثبت و قوی  $Fe_2O_3$  و  $Cr_2O_3$  (شکل ۵- D) ممکن است به سبب غنی‌شدگی کروم توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن باشد (Laskou and Economou-Eliopoulos, 2007)؛ از طرفی  $Cr^{3+}$  می‌تواند در شبکه بلوری هماتیت و گوتیت به آسانی جایگزین  $Fe^{3+}$  شود (Schwertmann et al., 1996). به‌طور کلی عناصر HFSE ( $Nb, Hf, Zr, Ta$ ) رفتار زمین‌شیمیایی همسانی دارند و در طول فرایند هوازگی کم‌وبیش پایدار هستند (شکل ۹) که می‌تواند به حضور کانی‌های فرعی مقاوم در افق‌های بوکسیتی مربوط باشد (Zamanian et al., 2016).  $Y$  در طول فرایندهای هوازگی به عنوان یک عنصر غیر متحرک عمل کند و افزایش جرم نشان دهد (شکل ۹) و معمولاً در حضور بوهیمت یا دیاسپور غنی می‌شود (به سبب ظرفیت جذب بالای آنها) اما در جایی که گیبسیت



Calagari and Abedini (2007) افزایش جرم V را حاصل جایگزینی آن با Ti در کانی‌های تیتانیم‌دار می‌دانند.

Zr غالب باشد؛ تهی می‌شود (Mordberg, 1993). افزایش جرم و غنی‌شدگی در تمامی نمونه‌ها ممکن است مربوط به حضور زیرکن باشد. (شکل ۹)



شکل ۹- نمودار تغییرات جرم عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی در نمونه‌های برداشت شده از کانسار بوکسیت باگوشی.

(Zamanian et al., 2016). به سبب اکسیداسیون  $Ce^{+3}$  به  $Ce^{+4}$  در محیط شدیداً آکسایشی ایجاد شده در طول بوکسیت‌زایی، رفتار Ce مشابه با دیگر عناصر نادر خاکی نیست و برخی از پژوهشگران این پدیده را گزارش کرده‌اند (Abedini and Calagari, 2014; Mongelli et al., 2014). این پدیده به توزیع ارب Ce در افق‌های بوکسیتی و غنی‌شدگی Ce در بخش‌های بالایی نهشته بوکسیتی منتج می‌شود، در حالی که سایر عناصر نادر خاکی به صورت جزئی توسط محلول‌های فروروی نفوذی فروشویی می‌شوند و نهایتاً نزدیک به سنگ بستر که به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی عمل می‌کند تمرکز می‌یابند. در نتیجه بی‌هنجاری منفی Ce و غنی‌شدگی دیگر عناصر نادر خاکی سه‌طرفیتی بیشتر در بخش‌های پایینی افق‌های بوکسیتی مشاهده می‌شود (Karadag et al., 2009). علاوه بر این، یک همبستگی قوی بین پتانسیل یونیزاسیون عناصر نادر خاکی و تحرکشان وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که  $Ce^{+4}$  و عناصر نادر خاکی سنگین پتانسیل یونیزاسیون بالاتری (تحرک کمتر) در مقایسه با دیگر عناصر نادر خاکی سبک دارند و معمولاً در بخش‌های بالایی افق بوکسیتی تمرکز می‌یابند. در مقابل غلبه شرایط قلیایی در بخش‌های پایینی افق بوکسیتی همراه با پتانسیل یونیزاسیون پایین‌تر عناصر نادر خاکی سبک عامل مناسبی برای غنی‌شدگی آنها در این بخش از کانسار است. در نهشته بوکسیت کارستی باگوشی، بی‌هنجاری‌های Ce عموماً نزدیک به ۱ است و تغییر اندکی در مقدار این بی‌هنجاری در سرتاسر افق بوکسیتی به چشم می‌خورد. تنها نمونه‌های PT1-2 و PB4-8 بی‌هنجاری مثبت Ce نشان می‌دهد و سایر نمونه‌ها بی‌هنجاری منفی دارند (شکل ۸- B). افزایش جرم Ce و سایر عناصر نادر خاکی سبک در نهشته بوکسیت باگوشی، احتمالاً به سبب جذب انتخابی آن به وسیله اکسیدهای فلزی (مانند هماتیت) و کانی‌های رسی است (Bradbury and Baeyens, 2002). در مطالعه حاضر از نسبت  $(La/Yb)_N$  به

#### ۴-۶. عوامل کنترل‌کننده رفتار عناصر نادر خاکی طی فرایند بوکسیت‌زایی

داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که متوسط محتوای عناصر نادر خاکی ( $\Sigma REEs$ ) در کانسار بوکسیت باگوشی به تدریج از بخش‌های بالایی افق بوکسیتی به سمت بخش‌های پایینی افزایش می‌یابد (جدول ۱ و شکل ۸). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محیط‌هایی که شرایط اسیدی غالب است، یون‌های سه‌طرفیتی عناصر نادر خاکی نمی‌توانند به آسانی بر روی سطح کانی‌های رسی جذب سطحی شوند و از این رو غالباً همراه با محلول‌ها به سمت بخش‌های پایینی افق‌های بوکسیتی مهاجرت می‌کنند. همگام با این فرایند فقدان زهکشی مناسب و بافر بودن محلول‌های نزدیک به سنگ بستر آهکی در بخش‌های پایینی افق بوکسیتی، منجر به غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در این بخش می‌شود (Abedini and Calagari, 2014; Zamanian et al., 2016; Ahmadnejad et al., 2017). در مطالعه حاضر از نسبت  $La/Y$  به عنوان پارامتر مناسب جهت تعیین pH در محیط کانی‌سازی استفاده شده است. مقادیر نسبت  $La/Y$  کمتر از ۱ در محیط نشان‌دهنده یک محیط اسیدی و مقادیر بیشتر از ۱ نشان‌دهنده محیط قلیایی است. بررسی این شاخص در کانسنگ‌های بوکسیت باگوشی چیرگی یک محیط نهشت قلیایی را در این کانسار نشان می‌دهد (جدول ۱). به منظور بررسی رفتار Ce و سایر عناصر نادر خاکی در کانسار باگوشی، نسبت  $Ce/Ce^*$  و  $\Sigma REE$  در مقابل عمق رسم شده است (شکل‌های ۸- A و B). این نمودارها نشان می‌دهند که در بیشتر نمونه‌های بوکسیت باگوشی، عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین دچار غنی‌شدگی شده‌اند و یک افزایش تدریجی در مقدار عناصر نادر خاکی سبک (به‌جز Ce) به سمت بخش‌های پایینی افق بوکسیتی مشاهده می‌شود (جدول ۱ و شکل ۹). این مشاهدات با مطالعات قبلی مربوط به الگوی پراکندگی و تحرک عناصر نادر خاکی طی فرایندهای خاک‌زاد سازگار است

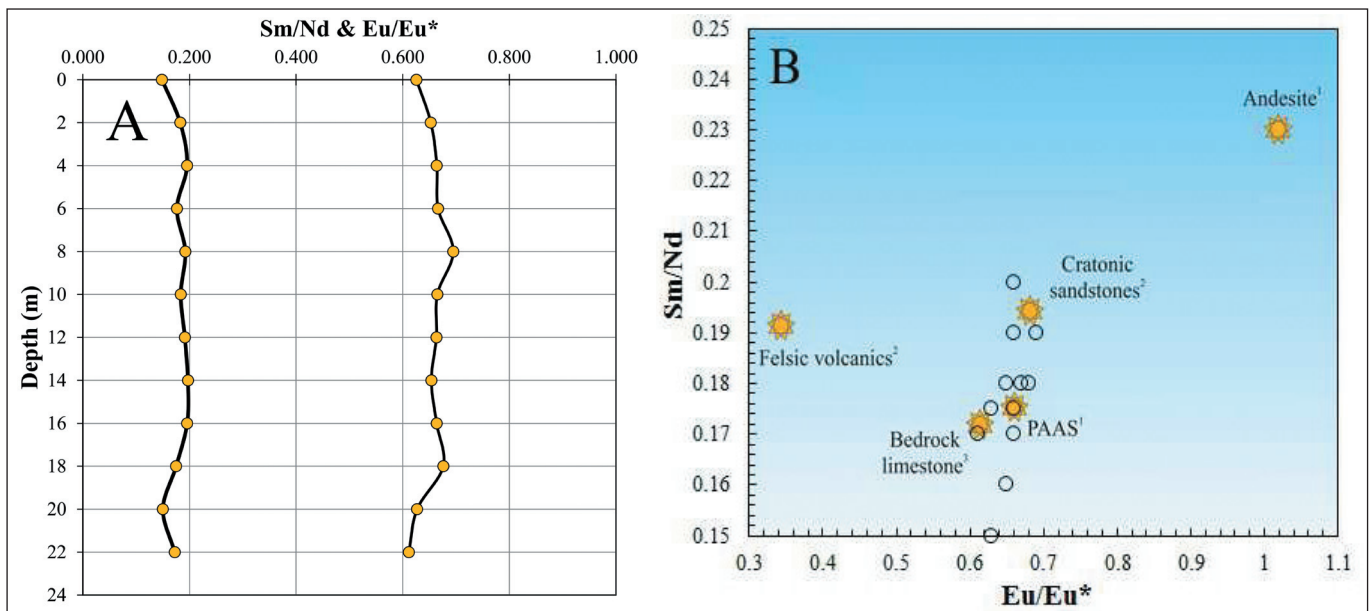
سنگ‌بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Morelli et al., 2000). یکنواختی مقادیر  $Eu/Eu^*$  به عنوان یک شاخص مورد اطمینان برای آشکارسازی منشأ مواد هوازده در سرتاسر پروفایل بوکسیتی باگوشی بدان معنی است که بوکسیت‌زایی بر مقادیر بی‌هنجاری  $Eu$  در محدوده مورد مطالعه تأثیر نگذاشته است (شکل ۱۰- A). همچنین در طول هوازدهی گرمسیری شدید فقط جدایش جزئی بین  $Sm$  و  $Nd$  رخ داده و چنین رخدادی در بوکسیت باگوشی نیز قابل تشخیص است (شکل ۱۰- A). در نمودار  $Eu/Eu^*$  در مقابل  $Sm/Nd$  بیشتر نمونه‌های بوکسیت باگوشی در نزدیکی محدوده شیل پست آرکنن استرالیا و ماسه‌سنگ‌های کراتونی قرار گرفته است (شکل ۱۰- B). این موضوع تأیید کننده سهم سنگ‌آهک رسی بستر (سازند سروک) به عنوان سنگ مادر بوکسیت باگوشی است و نشان می‌دهد که مواد اولیه برای تشکیل بوکسیت از یک منشأ رسوبی سیلیسی آواری فراهم شده‌اند.

منظور تعیین درجه تفکیک عناصر نادر خاکی سبک از عناصر نادر خاکی سنگین طی فرایندهای زمین‌شیمیایی استفاده شده است (جدول ۱). نسبت  $(La/Yb)_N$  در نمونه‌های بوکسیتی کانسار باگوشی تا حدودی نزدیک و در برخی موارد پایین‌تر از متوسط ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (نسبت  $(La/Yb)_N$  در PAAS برابر با ۹/۲) بوده (جدول ۱) که نشانگر تفکیک جزئی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین طی فرایند بوکسیت‌زایی است.

#### ۵-۶. شناسایی سنگ مادر

گستره وسیعی از لیتولوژی‌ها به عنوان سنگ مادر محتمل برای بوکسیت‌های کارستی پیشنهاد شده‌اند. بر اساس شواهد موجود، سنگ مادر محتمل نهشته باگوشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

— **بی‌هنجاری  $Eu$** : شاخص‌های عنصری مانند  $Eu/Eu^*$  برای مدل‌سازی ارتباط با



شکل ۱۰- A) تغییرات نسبت  $Eu/Eu^*$  و  $Sm/Nd$  با افزایش عمق؛ یکنواختی این نسبت‌ها در سرتاسر پروفایل بوکسیتی باگوشی بدان معنی است که بوکسیت‌زایی بر مقادیر این بی‌هنجاری در محدوده مورد مطالعه تأثیر نگذاشته است؛ B) نمودار  $Eu/Eu^*$  در برابر  $Sm/Nd$  نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های بوکسیت باگوشی در نزدیکی محدوده شیل پست آرکنن استرالیا و ماسه‌سنگ‌های کراتونی قرار گرفته‌اند.

می‌دهند. این پدیده نشان‌دهنده که یک همبستگی زایشی قوی بین سنگ‌آهک سازند سروک و کانسنگ‌های بوکسیتی باگوشی و منشأ گرفتن این نمونه‌ها از یک منبع همگن است.

— **الگوهای رفتاری عناصر نادر خاکی**: با وجود اینکه عناصر نادر خاکی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مشابهی دارند اما در طول هوازدهی دستخوش تفریق بین عنصری می‌شوند (Mongelli, 1997). امروزه از عناصر نادر خاکی به عنوان شاخصی برای شناسایی سنگ منشأ کانسارهای بوکسیت استفاده می‌شود. الگوهای عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت را می‌توان برای شناسایی منشأ مواد بوکسیتی به کاربرد (Gu et al., 2013). شباهت الگوی رفتاری عناصر نادر خاکی، شامل جدایش آشکار عناصر نادر خاکی سبک و عناصر نادر خاکی سنگین و بی‌هنجاری منفی یوروپیم در نمونه‌های برداشت شده از نهشته بوکسیت باگوشی و سنگ‌آهک سازند سروک، می‌تواند دال بر این باشد که عناصر نادر خاکی از بازمانده‌های هوازدهی سنگ‌آهک سازند سروک مشتق شده‌اند (شکل ۷- B).

— **نسبت عناصر غیر متحرک**: شناسایی عناصر غیر متحرک در طول بوکسیت‌زایی، برای شناسایی سنگ مادر ضروری است. تحرک و عدم تحرک عناصر در طول فرایند بوکسیت‌زایی ناشی از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عناصر آنهاست (Zamanian et al., 2016). مطالعات نشان می‌دهد که عناصر قلیایی و قلیایی خاکی، کانی‌های پایدار ثانویه تشکیل نمی‌دهند و عمدتاً از افق‌های بوکسیتی فروشویی می‌شوند، این در حالی است که عناصری همچون  $Cr$ ،  $Zr$ ،  $Nb$ ،  $Th$ ،  $Ta$ ،  $Ti$ ،  $Ga$ ،  $Hf$ ،  $Ni$  در طول فرایندهای بوکسیت‌زایی غیر متحرک هستند (Calagari and Abedini, 2007; Zamanian et al., 2016; Ahmadnejad et al., 2017). Valetton et al. (1987) نشان می‌دهند که نسبت‌های عناصر غیر متحرک (برای مثال  $Zr/Hf$  و  $Nb/Ti$ ) در نهشته‌های بوکسیت با سنگ مادر همسان است. از این رو، می‌توان از این نسبت‌ها برای شناسایی سنگ مادر بهره جست. در این مطالعه، نمودارهای دوتایی  $Ti$  و  $Zr$  (شکل ۶- A) و  $Nb$  و  $Ti$  (شکل ۶- B)،  $Zr$  و  $Hf$  (شکل ۶- C) و  $Nb$  و  $Ta$  (شکل ۶- D) روند کاملاً همبسته‌ای را برای سنگ‌آهک سازند سروک و کانسنگ‌های بوکسیتی نشان

## ۷- نتیجه‌گیری

بوکسیت باگوشی است. داده‌های زمین‌شیمیایی آشکار می‌کند که Ce به‌عنوان یک شاخص زمین‌شیمیایی مهم در کانسارهای بوکسیت رفتار متفاوتی نسبت به دیگر عناصر نادر خاکی دارد و تغییرات اندکی را در مقدار بی‌هنجاری Ce در سراسر افق بوکسیتی به نمایش می‌گذارد، در حالی که الگوی تغییرات عناصر نادر خاکی در مقابل عمق نشان‌دهنده غنی‌شدگی پیش‌رونده عناصر نادر خاکی به سمت بخش‌های پایینی افق بوکسیتی است. این مشاهدات نشان می‌دهد که عواملی همانند نوسانات در pH محلول خاک، پتانسیل یونی عناصر نادر خاکی و حضور سنگ بستر کربناتی به عنوان سد زمین‌شیمیایی نقش قابل توجهی در توزیع و تفکیک عناصر نادر خاکی طی تشکیل کانسار باگوشی بازی می‌کنند.

به منظور شناسایی سنگ مادر کانسار باگوشی از پارامترهای مختلفی شامل بی‌هنجاری‌های Eu، نسبت عناصر کمیاب (Nb/Ta و Zr/Hf) و همچنین همسانی الگوی عناصر نادر خاکی استفاده شده است. نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌کند که مواد اولیه برای تشکیل کانسار باگوشی بر بردارنده رسوبات سیلیسی-آواری است که از حاشیه قاره‌ای مشتق شده است. به‌طور دقیق‌تر می‌توان گفت که سنگ‌آهک رسی زیرین (سازند سروک) منشأ اصلی تأمین‌کننده مواد مورد نیاز برای تشکیل کانسار بوکسیت باگوشی بوده است.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی کمیته تحقیقات دانشگاه لرستان در به انجام رساندن این تحقیق و همچنین از راهنمایی‌های ارزنده داوران محترم در بهبود هر چه بیشتر محتوای مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند.

افق‌های بوکسیتی ترکیب کانی‌شناسی متشکل از بوهمیت، کائولینیت، هماتیت، پیروفیلیت، آنازاس و دیاسپور دارند. کانی‌های سازنده زمینه کانه‌های بوکسیتی بیشتر نهران بلور و شامل بوهمیت، هماتیت و کائولینیت است. بر اساس شرایط پایداری کانی‌های اصلی، افق‌های بوکسیتی باگوشی بیشتر در محیطی با عملکرد آب‌های سطحی اسیدی و اکسایشی تا آب‌های زیرزمینی قلیایی و کاهش‌ی پدید می‌آیند.

بافت‌های پلیمورفیک، پیرویدی و آئیدی در کانسنگ‌ها، پیرویدهایی با شکستگی‌های شعاعی، همچنین رشد پوسته‌های ساده در پیرامون هسته پیرویدهای قبلی و پیرویدهایی با پوسته‌های بدون شکستگی شعاعی و دایره‌ای، دال بر پدیداری برج‌زاد این نهشته است. از طرف دیگر، تکه‌های شکسته شده پیرویدها، رخداد پیرویدهای دگرزاد و حضور تکه‌های تخریبی در مقاطع میکروسکوپی نشان از تراورد مواد بوکسیتی دارند. ویژگی‌های بافتی فوق‌الذکر نشان می‌دهد که منشأ مواد بوکسیتی غالباً برجا است که در برخی قسمت‌ها به‌طور محلی تحت تأثیر حمل و نقل قرار گرفته و در فرورفتگی‌های کارستی باز نهشت شده‌اند.

محاسبات تغییرات جرم نشان می‌دهد که عناصری مانند Na، Si، Fe، Mg، K از سیستم هوازدگی فروشویی شده‌اند؛ Ba، Al، Zr، V، Th، Nb در سیستم بازماندی دستخوش غنی‌شدگی شده‌اند و U، Hf، Ta، Co، Rb، Cs، Be در طول فرایندهای بوکسیت‌زایی نسبتاً نامتحرک بوده‌اند. عناصر نادر خاکی تغییرات جرم مثبت دارند و در این بین سهم عناصر نادر خاکی سبک بیشتر است.

غنی‌شدگی آشکار عناصر نادر خاکی در افق بوکسیتی نسبت به سنگ مادر آهکی و بی‌هنجاری‌های منفی Eu از ویژگی‌های رفتاری عناصر نادر خاکی در نهشته

## کتابنگاری

احیا، ف. و لطفی، م.، ۱۳۸۸- رهیافتی ژئوشیمیایی و زمین‌آماری برای منشأ نهشته‌های بوکسیت سرفاریاب، استان کهگیلویه و بویراحمد، جنوب باختر ایران. مجله علوم زمین، شماره ۷۴، صص. ۹۱ تا ۹۸.

## References

- Abedini, A. and Calagari, A. A., 2014- REE geochemical characteristics of titanium-rich bauxites: the Permian Kanigorgeh horizon, NW Iran. *Turk. J. Earth Sci.* 23, 513- 532.
- Ahmadnejad, A., Zamanian, H., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Buccione, R. and Salamab Ellahi, S., 2017- Mineralogical and geochemical evolution of the Bidgol bauxite deposit, Zagros Mountain belt, Iran: Implication for ore genesis, rare earth elements fractionation and parental affinity, *Ore Geology reviews*, 755- 783.
- Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *Am. J. Sci.* 307, 1064- 1095.
- Augustithis, S. S., 1982- Atlas of the Sphaeroidal Textures and Structures and their Genetic Significance. Theophrastus S.A. Athens (pp. 329).
- Bardossy, G. Y. and Aleva, G. Y. Y., 1990- Lateritic Bauxites. Akademia, Kiado "Budapest", 646p.
- Boulangé, B., Bouzat, G. and Pouliquen, M., 1996- Mineralogical and geochemical characteristics of two bauxitic profiles, Fria, Guinea republic, *Mineralium Deposita* 31, 432- 438.
- Boynton, W. V., 1985- Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, in: Henderson, P. (Ed.), *Rare Earth Element geochemistry. Developments in geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 63- 114.
- Bradbury, M. H. and Baeyens, B., 2002- Sorption of Eu on Na- and Ca-montmorillonites: experimental investigations and modeling with cation exchange and surface complexation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 2325- 2334.
- Calagari, A. A. and Abedini, A., 2007- Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azerbaijan, Iran. *Journal of geochemical Exploration* 94, 1- 18.
- Delvigne, J. E., 1998- Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering, mineralogical association of Canada, 494p.
- Esmaili, D., Rahimpour-Bonab, H., Esna-Ashari, A. and Kananian, A., 2010- Petrography and geochemistry of the Jajarm Karst bauxite ore deposit, NE Iran: implications for source rock material and ore genesis. *Turkish Journal of Earth Sciences* 19, 267- 284.

- Gu, J., Huang, Z., Fan, H., Jin, Z., Yan, Z. and Zhang, J., 2013- Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *J. Geochem. Explor.* 130, 44- 59.
- Hill, I. G., Worden, R. H. and Meighan, I. G., 2000- Geochemical evolution of a palaeolaterite: the inter-basaltic Formation, Northern Ireland. *Chem. Geol.* 166, 65- 84.
- Karadage, M. M., Kupeli, S., Aryk, S., Aÿhan, A., Zedef, V. and DÖyn, A., 2009- Rare earth element(REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas- bauxite deposit(Seydis-ehir/Konya – Southern Turkey), *Chemie der Erde* 69, 143- 159.
- Laskou, M. and Economou-Eliopoulos, M., 2007- The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-Ghiona bauxite deposits, Greece. *J. Gechem. Explor.* 93, 67- 77.
- Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q., Sun, S., Meng, J., 2010- Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento type bauxite deposits, western “Guangxi”, China, *Journal of Geochemical Exploration* 105, 137- 152.
- Maclean, W. H, 1990- Mass change calculations in altered rock series. *mineral.Depos.* 25, 44- 49.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G. and 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. *Int. J. earth Sci. (Geol. Rundsch.)* 96, 887- 902.
- Mongelli, G., 1997- Ce-anomalies in the textura components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (southern Italy). *Chem.Geol.* 14, 69- 79.
- Mongelli, G., Boni, M., Buccione, R. and Sinisi, R., 2014- Geochemistry of the Apulian karst bauxites (southern Italy): chemical fractionation and parental affinities. *Ore geol. Rev.* 63, 9- 21.
- Morelli, F., Cullers, R., Laviano, R. and Mongelli, G., 2000- Geochemistry and palaeoenvironmental significance of Upper Cretaceous clay-rich beds from the Peri-adriatic Apulia carbonate platform, southern Italy. *Periodico di Mineralogia* 69 (2), 165–183.
- Mordberg, L. E., 1993- Patterns of distribution and behavior of trace elements in bauxites. *Geochemical and Isotopic Record of Continental Weathering* 107 (3–4), 241- 244.
- Özlü, N., 1983- The trace elements content of karst bauxite and their parent rocks in the Mediterranean belt. *Mineralium Deposita* 18, 469- 476.
- Schwertmann, U., Pfab, G. and Structural, V., 1996- Cr in lateritic iron oxides: genetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 4279- 4283.
- Taylor, G. and Eggleton, T., 2004- The origin of the Weipa bauxite’, In: Roach, I.C. (ed). *Regolith*. CRC LEME, 350- 354.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985- *The Continental Crust: Its Composition and evolution*. Blackwell, London (312 pp.).
- Temur, S. and Kansun, G., 2006- Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. *J. Asian Earth Sci.* 27, 512- 522.
- Valeton, I., Biermann, M., Reche, R. and Rosenberg, F., 1987- Genesis of Ni-laterites and bauxites in Greece during the Jurassic and Cretaceous, and their relation to ultrabasic parent rocks. *Ore Geology Reviews* 2, 359- 404.
- Zamanian, H., Ahmadnejad, F. and Zarasvandi, A., 2016- Mineralogical and geochemical investigations of Mombi bauxite deposit, Zagros Mountain, Iran. *Chemie der Erde*, p.p 2- 6.
- Zarasvandi, A., Carranza, E. J. M. and Ellahi, S. S., 2012- Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Dehnow bauxite deposits, Zagros fold Belt, Iran. *Ore Geol. Rev.* 48, 125- 138.
- Zarasvandi, A., Zamanian, H., Hejazi, E., 2010- Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Geochem. Explor.* 107, 77- 85.

# Mineralogy, Geochemistry and the Origin of the Bagoushi Karst Bauxite Deposit, Northwestern Fars Province, Iran

H. Zamanian<sup>1</sup>, G. Beiranvand<sup>2\*</sup> and F. Ahmadnejad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

<sup>2</sup>M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

<sup>3</sup>Ph.D., Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 2017 June 11

Accepted: 2018 May 22

## Abstract

Bagoushi deposit is located at 37 km northwest of Masiri in Fars province. Structurally, the deposit is situated in the Zagros Simply Folded belt and developed in Upper Cretaceous carbonates. From the bottom to top, the deposit is consisted of kaolinitic, brecciated, brown, pisolitic and red bauxite horizons. Boehmite, kaolinite, hematite, pyrophyllite, anatase, calcite and diaspore are the major mineral phases. The main ore textures of the deposit include pisolitic, pisolitic-oolitic and clastic with pelitomorphitic and microgranular matrixes. Some textural features such as pelitomorphitic matrix, pisolitic and oolitic textures, radial fractures in pisoids, growth of simple cortex around earlier pisoids, pisoids with cortexes lacking radial and circular fractures, are indicative of autochthonous origin; and broken pisoids, allogenic pisoids and clastic grains reveal the transportation of bauxitic materials; therefore the bauxite materials is authigenic, but in some parts were transported and re-deposited, at least locally. The mass change calculations relative to the immobile element Ti show that elements such as Si, Fe, Mg, K and Na are leached out; Al, Zr, V, Th, Nb, Ba and REEs particularly LREE are concentrated; and Hf, Ta, Co, Rb, Cs, Be and U are relatively immobile during the bauxitisation process. The bauxite ores are characterized by progressive enrichment of the REE compared to parent rock, intense LREE/HREE fractionation, relatively stable negative Eu anomalies, and weak negative Ce anomalies. Geochemical data reveal progressive enrichment of the REE and intense LREE/HREE fractionation toward the lower parts of the bauxite profile. In the studied deposit Ce behaves differently from the other REEs (especially LREE) and show few changes in the Ce anomalies throughout the bauxite horizon. These observations suggest that factors such as fluctuations in soil solution pH, REE ionization potential and function of carbonate host rock as a geochemical barrier had significant role in the distribution and fractionation of trace elements and REEs during bauxitisation in the Bagoushi bauxite deposit. Several lines of evidences such as Eu anomalies, immobile element ratios (Zr/Hf and Nb/Ta), as well as similarity in REE patterns indicate that the underlying marly limestone (Sarvak Formation) could be considered as the source of bauxite horizons and suggest that the source material for the Bagoushi bauxite was provided from a siliciclastic material derived from a continental margin.

**Keywords:** Bauxite, Karst, Bagoushi, Geochemistry, Rare Earth Element

For Persian Version see pages 269 to 280

\*Corresponding author: G. Beiranvand; E-mail: ghbiranvand@gmail.com