

کنترل کانیایی بر توزیع عناصر جزئی در نهشته‌های بوکسیت نوع کارستی ایران

مریم خسروی^{۱*}، علی عابدینی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۲/۱۴)

چکیده: نهشته‌های بوکسیتی ایران در فرورفتگی‌های کارستی کربنات‌های دریایی اواخر پالئوزوئیک و مزوزوئیک وابسته به اقیانوس‌های پالئوتتیس و نتوتتیس میزبان شده‌اند. این نهشته‌ها بخشی از کمربند بوکسیت کارستی ایران- هیمالیا هستند و در چهار پهنه ساختاری، (۱) شمال غرب ایران، (۲) رشته‌کوه‌های البرز، (۳) کمربند چین‌خورده زاگرس و (۴) فلات مرکزی ایران گسترش یافته‌اند. بر اساس نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ ، کانسنگ‌های بوکسیتی ایران با ترکیب‌های کانیایی مختلف، درجه‌های متفاوتی از لاتریت‌زایی را نشان می‌دهند. تفکیک ضعیف آلومینیوم از آهن در اغلب کانسنگ‌های بوکسیتی ایران می‌تواند ناشی از عواملی چون تنوع ترکیب شیمیایی سنگ‌های مادر، طولانی بودن زمان بوکسیت‌زایی، تشکیل فازهای کانیایی حواسط و زهکشی ضعیف باشد. متوسط غلظت V، Co، Nb و Ta در نهشته‌های بوکسیت کارستی زاگرس کمتر از مقدار این عناصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن چون هماتیت و گوتیت نقش مؤثری در توزیع و تمرکز V و Co و کانی‌های آناتاز و روتیل نقش ارزنده‌ای در توزیع و تمرکز Nb و Ta داشته‌اند. در مقابل، متوسط غلظت Al، Ga و عناصر خاکی نادر در بوکسیت‌های زاگرس بیش از سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. توزیع و تمرکز Ga در این نهشته‌های بوکسیتی به احتمال بسیار با دیاسپور و یا بوهمیت کنترل گردیده است. افق‌ها و عدسی‌های غنی از دیاسپور و/یا بوهمیت در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس می‌توانند اهداف مناسبی برای پی‌جویی Ga باشند. همچنین، لایه‌های غنی از هماتیت و/یا گوتیت در نهشته‌های بوکسیتی البرز و شمال غرب ایران برای پی‌جویی Co، و لایه‌های غنی از آناتاز و/یا روتیل در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی برای پی‌جویی Nb و Ta اهمیت زیادی دارند.

واژه‌های کلیدی: نهشته‌های بوکسیت نوع کارستی ایران؛ زمین‌شیمی؛ فلزهای بحرانی؛ شمال غرب ایران؛ ایران مرکزی؛ البرز؛ زاگرس.

مقدمه

عبارتند از (۱) نهشته‌های خاکی نادر ماگمایی همراه با نهشته‌های آهن گرمابی، مجموعه‌های آذرین قلیایی، کربناتیت‌ها و پگماتیت‌ها، (۲) نهشته‌های خاکی نادر در ارتباط با ساختارهایی چون نهشته‌های نوع رگه‌ای و (۳) نهشته‌های خاکی نادر رسوبی در پلاسماهای ساحلی، آبرفتی و بازماندی، فسفریت‌ها، رس‌ها و کانسارهای زغال‌سنگ و بوکسیت [۲]. نتایج یک دهه پژوهش پیرامون بوکسیت‌ها نشان می‌دهد که

بر اساس آخرین گزارش اتحادیه اروپا، عناصری چون عناصر خاکی نادر (REE)، Al، Li، Ga، V، عناصر گروه پلاتین (PGE)، Bi، Be، Sb، Cs، Cr، Co، Ge، Hf، In، Mg، Mn، Nb، Ni، Rb، Sr، Ta، Te، Ti، W، Zn و Zr از فلزهای بحرانی و راهبردی هستند [۱]. عناصر خاکی نادر از نظر خاستگاه و پیدایش در سه نوع کانی‌زایی یافت می‌شوند که

*نویسنده مسئول، تلفن: ۳۳۹۱۵۱۴۸ (۰۳۱)، پست الکترونیکی: marvamkhosravi@iut.ac.ir



راهبردی در بیش از ۵۰ نهشته بوکسیت کارستی در شمال غرب ایران، رشته‌کوه‌های البرز، کمربند چین‌خورده زاگرس و فلات مرکزی ایران صورت گرفته است.

روش بررسی

در این پژوهش، داده‌های زمین‌شیمیایی برخی از فلزهای بحرانی و راهبردی در کانسارهای بوکسیت کارستی ایران به صورت آمار توصیفی شامل نمودارهای جعبه‌ای، کمینه، میانه، بیشینه، چارک اول و چارک سوم ارائه شده است. برای دقت و صحت کافی، همه داده‌های زمین‌شیمیایی انتخاب شده از نهشته‌های بوکسیتی ایران برآمده از روش‌های طیف‌سنجی انتشار اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-AES) برای تعیین مقادیر عناصر اصلی و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای تعیین مقادیر عناصر جزئی و خاکی نادر در آزمایشگاه شرکت ALS Chemex کشور کانادا بودند. نهشته‌های بوکسیتی انتخاب شده از شمال غرب ایران شامل جنوب شرقی مراغه، شمال سقز، شمال شرقی بوکان [۱۹]، علی‌بالتالو [۲۰]، اربنوس [۹]، باداملو [۱۱]، برهان [۲۱]، درزی ولی [۱۸]، داش‌آغل [۲۲]، حیدرآباد [۲۳]، کانی‌زرنه [۱۲]، نصرآباد [۲۴]، نوروزآباد [۲۵]، کانی‌گرگه، شاهین‌دژ و شیخ‌ماروت [۱۰]، سلیمان‌کندی [۱۳] و تاموگه (داده‌های منتشر نشده) هستند. نهشته‌های بوکسیتی انتخاب شده از رشته‌کوه‌های البرز شامل کمبلو [۲۶]، شاه‌بلاغی [۲۷]، درازکوه [۲۸]، گانو [۲۹، ۳۰]، جاجرم [۳۱] و داده‌های منتشر نشده]، زرج‌سو [۳۲]، اکراسر، کلرود، کی‌بین، کوه‌زرد، پاکده، رودبار، سنگرود و ویار [۳۳]، سپارده، قشلاق و سیاه‌رودبار [۳۴] و زان [۳۵] هستند. نهشته‌های بوکسیتی انتخاب شده از کمربند چین‌خورده زاگرس شامل مندان و دهنو [۳۶]، لوداب [۳۷]، [۳۸]، باگوشی [۳۹، ۸]، بیدگل [۷، ۸]، مومبی [۴۰] و تنگ‌پیرزال [۸] و نهشته‌های بوکسیتی انتخاب شده از فلات مرکزی ایران شامل بلبولویه و چک‌چک (داده‌های منتشر نشده) و بیگلر [۴۱] هستند. همه نهشته‌های بوکسیتی انتخاب شده از شمال غرب ایران در پهنه دگرگونی سنجندج-سیرجان و سایر نهشته‌های بوکسیتی ایران در پهنه‌های ساختاری البرز، کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس و ایران مرکزی واقع هستند.

نتایج و بحث

زمین‌شناسی

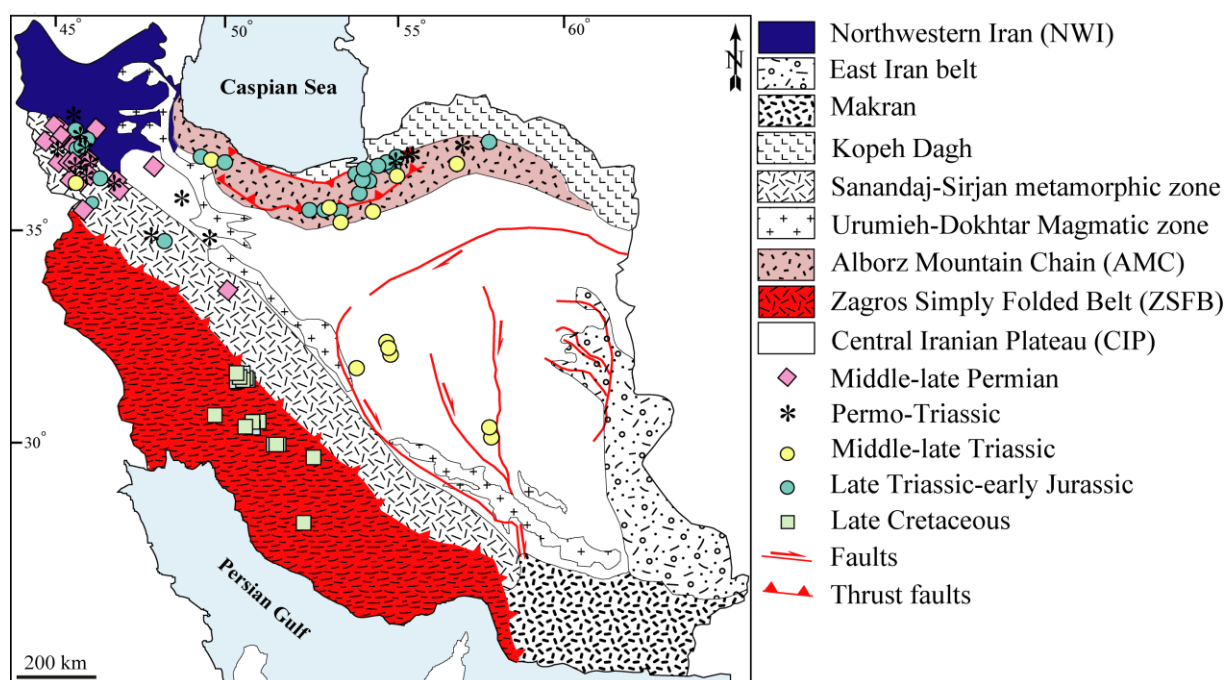
نهشته‌های بوکسیتی ایران در فرورفتگی‌های کارستی کربنات‌های اواخر پالئوزوئیک و مزوزوئیک وابسته به

بوکسیت‌ها از منابع مهم معدنی برای استخراج فلزهای راهبردی به حساب می‌آیند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی انجام شده وجود مقادیر قابل توجهی فلزهای بحرانی از جمله V, B, Sc, Li, Co, Cr, Ni و Nb را در نهشته‌های بوکسیت نوع کارستی تایید می‌کنند [۳]. به باور موجوس و همکاران [۴]، بوکسیت‌ها منبع احتمالی عناصر خاکی نادر هستند، زیرا به طور تقریبی ۵۰ درصد این عناصر با روش‌های تبادل یونی به راحتی شسته می‌شوند. افزون بر این، گل قرمز اصلی‌ترین فراورده فرعی تولید آلومینا در فرآیند بایر از بوکسیت‌ها، به طور قابل توجهی از REE و سایر فلزهای جزئی غنی است [۵].

با توجه به گرایش جامعه جهانی به صنایع پیشرفته در زمینه الکترونیک و مخابرات، تولید و مصرف REE به عنوان مواد اولیه با فناوری بالا و احتمال دسترسی نداشتن آیندگان به عناصر بحرانی و غنی‌شدگی هر چه بیشتر این عناصر در کانسارهای بوکسیت نوع کارستی نسبت به سایر انواع کانسارهای بوکسیت، این نهشته‌ها بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از نظر اهمیت عناصر بحرانی در بوکسیت‌ها، در سال‌های اخیر بررسی‌های ارزشمندی در مورد توزیع و جدایش REE و سایر عناصر بحرانی و عوامل کنترل کننده توزیع و تحرک آنها در نهشته‌های بوکسیت نوع کارستی در سرتاسر جهان انجام شده است [۳، ۶-۱۸]. از اینرو، با توجه به نیاز روزافزون صنایع مختلف کشور به کانسنگ ارزشمند بوکسیت و عناصر جزئی راهبردی چون REE و خودکفا نبودن کشور در تامین این عناصر جزئی مهم، ضرورت پی‌جویی و شناسایی کانسنگ‌های جدید بوکسیتی در کشور و پتانسیل‌یابی عناصر بحرانی از این کانسنگ‌ها بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. از این رو تجزیه و تحلیل نهشته‌های بوکسیتی ایران می‌تواند دیدگاه‌های جدید در مورد توزیع برخی عناصر جزئی راهبردی ارائه نماید. در سال‌های اخیر، توجه به فراوانی فلزهای بحرانی و عوامل کنترل کننده توزیع و تحرک آنها در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران در حال رشد و گسترش است. از اینرو، اهمیت این نهشته‌ها در بهره‌برداری اقتصادی از این فلزها قابل توجه است. با توجه به مسائل بیان شده در این پژوهش، بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی موجود، مقایسه مروری از نظر فراوانی اکسیدها و عناصر بحرانی Al_2O_3 , TiO_2 , V, Ga, Ta, Nb, Hf، عناصر خاکی نادر سبک (LREE: La-Sm) و عناصر خاکی نادر سنگین (HREE: Eu-Lu) با هدف پتانسیل‌یابی REE و سایر عناصر

روته و الیکا، در واحدهای کربناتی سازند الیکا، مرز بین سازندهای شتری و نایبند و سازندهای الیکا و شمشک برونزد دارند [۴۲]. این در حالی است که، افق‌ها و عدسی‌های بوکسیتی در کمر بند چین خورده زاگرس به طور عمده در مرز سازندهای سروک و ایلام گزارش شده‌اند. از نظرکانی‌شناسی، کانسارهای بوکسیت در ایران مانند سایر ذخایر بوکسیتی در دنیا به طور عمده از اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم (دیاسپور و یا بوهمیت) و آهن (هماتیت و یا گوتیت) و کانی‌های سیلیکاتی و رسی چون کائولینیت، پیروفیلیت، کلریت، ایلیت و مونت‌موریلونیت با فراوانی‌های متفاوت تشکیل شده‌اند [۴۲]. با توجه به بازسازی‌های دیرینه جغرافیایی، تشکیل نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران به طور مستقیم در ارتباط با جایگاه‌های زمین ساختی ایران در گذر زمان هستند. نتایج دیرینه جغرافیایی نشان می‌دهد که شکل‌گیری نهشته‌های بوکسیتی پرموتریاس در ایران در ارتباط با کافت و رانش قطعه‌های سیمیرین، و تشکیل نهشته‌های بوکسیتی تریاس- ژوراسیک در ارتباط با برخورد قطعه‌های سیمیرین و اوراسیاست. سرانجام، تشکیل نهشته‌های بوکسیتی کمر بند چین خورده زاگرس در کرتاسه پایانی در ارتباط با برخورد قوس- قاره است [۴۲].

اقیانوس‌های پالئوتتیس و نئوتتیس نهشته شده‌اند [۴۲]. با توجه به توزیع جغرافیایی کانسارهای بوکسیت در دنیا، نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران بخشی از کمر بند بوکسیت کارستی ایران- هیمالیا محسوب می‌شوند (جدول ۱) [۹-۱۱، ۱۵، ۱۸، ۴۲]. با توجه به بررسی‌های انجام شده، افق‌ها و لایه‌های بوکسیتی در ایران از نظر موقعیت مکانی در چهار ناحیه رشته‌کوه‌های البرز، شمال غرب ایران، فلات مرکزی ایران و کمر بند چین خورده زاگرس گسترش دارند. از نظر توزیع زمانی نیز، این ذخایر به پیروی از سایر ذخایر و منابع معدنی، در افق‌های زمانی ویژه‌ای گسترش یافته‌اند. به طور کلی، کانسارهای بوکسیت ایران در پنج دوره زمانی پرمین میانی- پایانی، پرموتریاس، تریاس میانی- پایانی، تریاس پایانی- ژوراسیک آغازین و کرتاسه پایانی (سنومانین پایانی- تورنین میانی) تشکیل شده‌اند [۹-۱۱، ۱۵، ۱۸، ۴۲]. شکل ۱ نقشه پراکندگی زمانی و مکانی ذخایر بوکسیت در ایران را نشان می‌دهد. نهشته‌های بوکسیتی در رشته‌کوه‌های البرز، شمال- غرب ایران و فلات مرکزی ایران به صورت لایه‌ای و عدسی شکل در چهار دوره زمانی پرمین میانی- پایانی، پرموتریاس، تریاس میانی- پایانی و تریاس پایانی- ژوراسیک آغازین به ترتیب در مرز بین سازندهای روته و نسن، مرز بین سازندهای



شکل ۱ موقعیت نهشته‌های بوکسیت کارستی در نقشه ساده شده زمین‌شناسی ایران [۴۳].

جدول ۱ خلاصه‌ای از نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران در فرورفتگی‌های کارستی کربنات‌های اواخر پالئوزوئیک و مزوزوئیک در دوره پرمین میانی - پایانی تا کرتاسه پایانی [۴۲].

پهنه ساختاری	سن بوکسیت (بر اساس شواهد صحرایی)	سنگ‌شناسی سنگ‌های بستر	سنگ‌شناسی سنگ‌های پوشش
شمال غرب ایران	پرمین میانی - پایانی، پرموتریاس، تریاس میانی - پایانی، تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین	سازند روته (پرمین میانی - پایانی): کربنات با میان لایه‌های شیل، سازند نسن (پرمین پایانی): کربنات، سازند الیکا (تریاس): کربنات و شیل، سازند شمشک (ژوراسیک آغازین): شیل، ماسه سنگ و زغال سنگ	سازند نسن (پرمین پایانی): کربنات، سازند الیکا (تریاس): کربنات و شیل، سازند شمشک (ژوراسیک آغازین): شیل، ماسه سنگ و زغال سنگ
فلات مرکزی ایران	پرمین میانی - پایانی، تریاس پایانی، تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین	سازند روته (پرمین میانی - پایانی): کربنات، سازند نایبند (تریاس پایانی): شیل، ماسه سنگ و کربنات، سازند الیکا (تریاس): کربنات	سازند نسن (پرمین پایانی): کربنات، سازند شتری (تریاس پایانی): کربنات، سازند شمشک (ژوراسیک آغازین): شیل، ماسه سنگ و زغال سنگ
رشته کوه‌های البرز	پرموتریاس، تریاس میانی - پایانی، تریاس پایانی - ژوراسیک آغازین	سازند روته (پرمین): آهک، سازند الیکا (تریاس): کربنات	سازند الیکا (تریاس): کربنات، سازند شمشک (ژوراسیک آغازین): شیل، ماسه سنگ و زغال سنگ
کمر بند چین خورده زاگرس	کرتاسه پایانی (سنومانین پایانی - تورنین میانی)	سازند سروک (سنومانین - تورنین): کربنات	سازند ایلام (سانتونین - کامپانین): کربنات نریتیک، سازند گورپی (کرتاسه پایانی): شیل

کانی‌شناسی

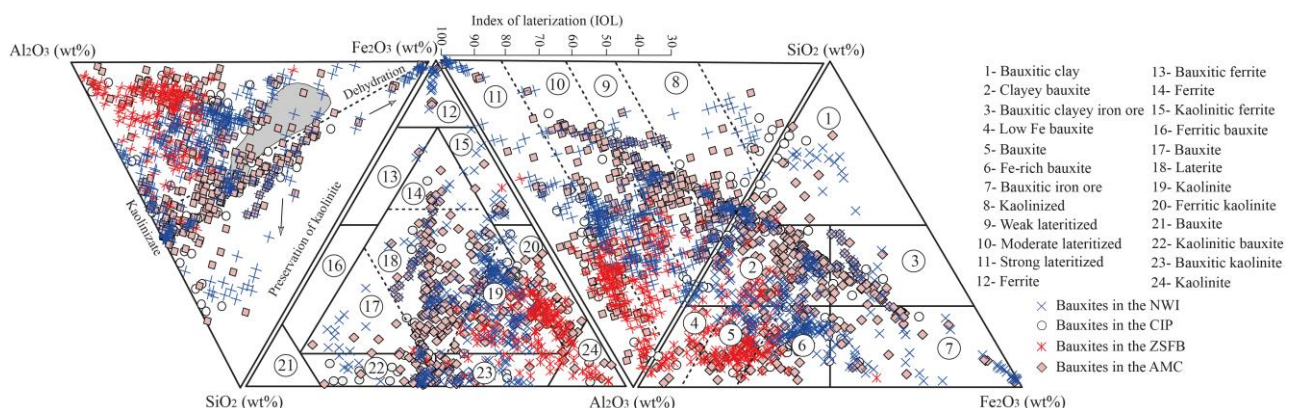
اکسیدهای اصلی Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و SiO_2 با دارا بودن بیشترین فراوانی از تشکیل‌دهنده‌های اصلی کانسنگ‌های بوکسیتی ایران محسوب می‌شوند. به طور معمول، نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ برای تعیین درجه لاتریت‌زایی [۴۴، ۴۵]، رده‌بندی کانیایی [۴۶، ۴۷]، تفکیک انواع کانسنگی [۴۸] و رده‌بندی بوکسیت [۴۹] به کار برده می‌شوند. در واقع، تشکیل انواع کانسنگ‌های بوکسیت وابسته به درجه تفریق عناصر آهن، سیلیس و آلومینیوم طی پیشرفت فرآیندهای هوازدگی است. افزایش شدت هوازدگی با کاهش شدید در فراوانی سیلیس و غنی‌شدگی نسبی آهن و آلومینیوم همراه است. جایابی مقادیر اکسیدهای اصلی کانسنگ‌های بوکسیتی شمال غرب ایران، فلات مرکزی ایران، کمر بند چین خورده زاگرس و رشته کوه‌های البرز در نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴-۴۸، ۵۰] در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور درک بهتر شدت فرآیندهای هوازدگی، شاخص لاتریت‌زایی (IOL) با استفاده از رابطه
$$IOL = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_3)/(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)]$$
 [۴۵] به صورت مقیاسی در کنار نمودار سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴] ارائه شده است. این نمودارها

درجه‌های مختلف لاتریت‌زایی و انواع کانیایی و کانسنگی متفاوتی را برای کانسنگ‌های بوکسیتی ایران نشان می‌دهند. جایابی مقادیر اکسیدهای اصلی کانسنگ‌های بوکسیتی شمال غرب ایران در نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴، ۴۵، ۴۸] آشکار می‌نمایند که این کانسنگ‌ها شامل ۶ نوع کانسنگی رس بوکسیتی، بوکسیت رسی، بوکسیت، کانسنگ آهن رس بوکسیتی، کانسنگ آهن بوکسیتی، و بوکسیت غنی از آهن هستند که طی تشکیل و گسترش شرایط لاتریت‌زایی ضعیف تا قوی و کائولینیتی شدن را تجربه نموده‌اند. هم چنین موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی شمال غرب ایران در نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۶، ۵۰] نشان می‌دهد که این کانسنگ‌ها به طور عمده در گستره ۴ نوع کانیایی لاتریت، کائولینیت، بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت بوکسیتی قرار می‌گیرند که به طور عمده فرآیندهای حفظ و تخریب کائولینیت و آهن‌زدایی در تشکیل و گسترش این کانسنگ‌ها نقش به سزایی داشته‌اند. بر اساس نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴-۴۸]، کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس شامل انواع کانسنگی بوکسیت، بوکسیت آهن پایین، بوکسیت رسی و بوکسیت غنی از آهن یا معادل آن‌ها کائولینیت، کائولینیت بوکسیتی و کائولینیت فریتی هستند که طی تشکیل خود به طور عمده دچار فرآیندهای لاتریت‌زایی

در ایران، تنها کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس در گستره لاتریت‌های دارای آهن [۵۲] واقع نیستند که این نیز بیانگر تفکیک زمین‌شیمیایی عناصر آلومینیوم، آهن و سیلیس در زمان تشکیل و گسترش این کانسنگ‌هاست.

موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی البرز در نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴، ۴۵، ۴۸] نشان می‌دهد که این کانسنگ‌ها در همه انواع کانسنگی رس بوکسیتی، بوکسیت رسی، بوکسیت، بوکسیت غنی از آهن، بوکسیت آهن پایین، کانسنگ آهن بوکسیتی و کانسنگ آهن رسی بوکسیت قرار می‌گیرند که طی تشکیل و گسترش دستخوش شرایط لاتریت‌زایی ضعیف تا قوی و کائولینیتی شدن شده‌اند. همچنین، استفاده از نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۶، ۵۰] نشان می‌دهد که کانسنگ‌های بوکسیتی البرز اغلب از انواع کانیایی فریت، کائولینیت، لاتریت، کائولینیت فریتی، بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت بوکسیتی تشکیل شده‌اند که فرایندهای متفاوت آهن‌زدایی و حفظ و تخریب کائولینیت در تشکیل و گسترش این کانسنگ‌ها نقش ارزنده‌ای داشته است. بر اساس نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴-۴۶، ۴۸]، مانند کانسنگ‌های بوکسیتی البرز، کانسنگ‌های بوکسیتی ایران مرکزی اغلب شامل انواع کانسنگی رس بوکسیتی، بوکسیت رسی، بوکسیت، بوکسیت غنی از آهن، و کانسنگ آهن رسی بوکسیت یا معادل آن‌ها کائولینیت، لاتریت، کائولینیت فریتی، بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت بوکسیتی می‌شوند که طی تشکیل خود دچار فرایندهای لاتریت‌زایی ضعیف تا قوی و کائولینیتی شدن شده‌اند.

متوسط تا قوی شده‌اند. براساس این نمودارها، با پیشرفت فرآیند لاتریت‌زایی موازی با افزایش تمرکز آلومینیوم در کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس از فراوانی عناصر سیلیس و آهن کاسته شده است. باردوسی و آلووا [۴۷] بر این باورند که نوسان‌های سطح آب‌های زیرزمینی، بارش فراوان و وجود فصول کوتاه مدت خشک در تسریع فرایندهای هوازدگی شیمیایی، خاک‌زایی و سیلیس‌زایی نقش مهمی دارند. جایابی مقادیر اکسیدهای اصلی کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس در نمودار سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۵۰] نشان می‌دهد که فرآیند آهن‌زدایی در تشکیل و گسترش این کانسنگ‌ها نقش مهمی داشته است. رفتار آهن به شدت به شرایط اکسایش- کاهش و زهکشی محیط در حال هوازدگی وابسته است [۴۵]. اکسایش مواد آلی در بخش‌های بالایی نهشته‌ها و در پی آن، ایجاد شرایط اسیدی در محیط هوازدگی، پتانسیل لازم برای تحرک آهن از کانی‌های اولیه دربردارنده آهن در سنگ مادر را فراهم می‌کند [۱۵، ۵۱] که به طور معمول چنین فرآیندی در شرایط آب و هوای گرم و مرطوب رخ می‌دهد. شسته شدن سیلیس به میزان قابل توجهی در کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس می‌تواند بازتابی از تجزیه سیلیکات‌های اولیه سنگ مادر در سامانه‌های واکنشی سنگ- آب و زهکشی قوی محیط در حال هوازدگی در زمان تشکیل و گسترش این کانسنگ‌ها باشد. در مجموع، تخریب مواد آلی در شرایط آب و هوای گرم و مرطوب و زهکشی عوامل مؤثر در تفریق و تفکیک زمین‌شیمیایی عناصر آلومینیوم، آهن و سیلیس در کانسنگ‌های بوکسیتی یاد شده محسوب می‌گردند. از میان کانسنگ‌های بوکسیتی مورد بررسی



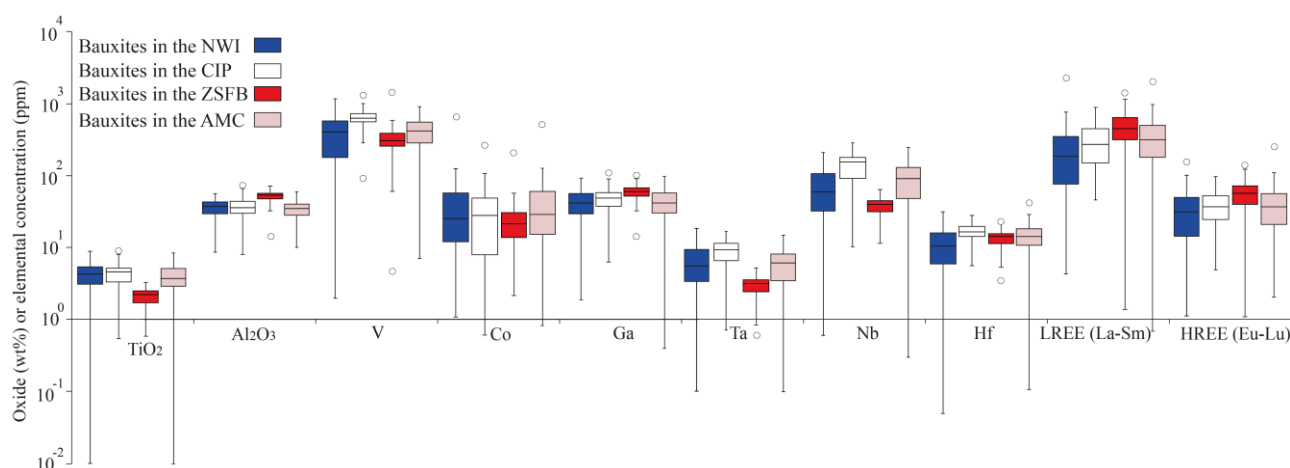
شکل ۲ کانسنگ‌های بوکسیتی شمال غرب ایران، فلات مرکزی ایران، کمربند چین خورده زاگرس و رشته‌کوه‌های البرز در نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ [۴۴-۴۶، ۴۸، ۵۰]. گستره خاکستری رنگ نشان‌دهنده داده‌های لاتریت‌های دارای آهن از تاردی [۵۲] است.

فرآیند لاتریت‌زایی در کانسنگ‌های بوکسیتی ایران مرکزی دارای مسیرهای مختلف زمین‌شیمیایی چون آهن‌زدایی و تخریب و حفظ کائولینیت است. در مجموع با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار آهن‌زدایی در شکل‌گیری نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران، البرز و ایران مرکزی با کائولینیتی شدن همراه بوده است و کانسنگ‌های بوکسیتی زاگرس به دلیل درجه تفریق بیشتر عناصر آهن، سیلیس و آلومینیوم به طور عمده طی فرآیند لاتریت‌زایی متوسط تا قوی مرغوبیت و کیفیت بهتری دارند. به طور مشابه، نهشته‌های بوکسیتی زاگرس دارای شدت لاتریت‌زایی بیشتری در مقایسه با نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران، البرز و ایران مرکزی هستند که این بیانگر تحرک بیشتر آهن و شستشوی سیلیس در این نهشته‌هاست. از دلایل مهم تفکیک ضعیف آلومینیوم از آهن و درجه‌های مختلف لاتریت‌زایی در اغلب کانسنگ‌های بوکسیتی ایران می‌توان به وجود سنگ(های) مادر با ترکیب شیمیایی متفاوت، طولانی بودن زمان بوکسیت‌زایی، تشکیل فازهای کانیایی حدواسط و زهکشی ضعیف اشاره نمود.

زمین‌شیمی

فرآیندهای هوازدهی شیمیایی در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب طی بوکسیتی شدن منجر به غنی‌شدگی عناصر Al ، Fe ، Ti ، فلزهای جزئی و REE می‌شوند [۳، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۸]. بر اساس بررسی‌های انجام شده، در نهشته‌های بوکسیتی رقابت بین عناصر آلومینیوم و آهن برای تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم و آهن به تغییر شرایط آب و هوایی وابسته است، به طوری که هماتیت در شرایط آب و هوایی مرطوب‌تری در مقایسه با اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم چون دیاسپور و بوهمیت تشکیل می‌گردد [۶]. با توجه به غنی‌شدگی عناصر بحرانی و راهبردی در کانسارهای بوکسیت نوع کارستی، مقایسه فراوانی TiO_2 ، Al_2O_3 ، V ، Co ، Ga ، Ta ، Hf ، Nb و $LREE$ و $HREE$ در نهشته‌های بوکسیتی در شمال‌غرب ایران، رشته‌کوه‌های البرز، کمربند چین‌خورده زاگرس و فلات مرکزی ایران با هدف پتانسیل‌یابی این عناصر

مهم در این نهشته‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار چارک سوم TiO_2 در نهشته‌های بوکسیتی کمربند زاگرس کمتر از مقدار چارک اول این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. قابل توجه است که مقدار چارک سوم این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران، رشته‌کوه‌های البرز و ایران مرکزی به طور تقریبی برابر است. افزون بر نهشته‌های بوکسیتی در شمال‌غرب ایران، رشته‌کوه‌های البرز و ایران مرکزی، چنین مقادیر بالای Ti در نهشته‌های بوکسیتی جهان متداول و مرسوم نیست که می‌توان به برخی از نهشته‌های بوکسیتی غنی از Ti در منطقه پایاس (Payas) ترکیه، آپولیا (Apulian) ایتالیا، پاراناسوس- گیونا (Parnassos-Ghiona) یونان [۵۳] و بیگلر، نصرآباد و کانی‌گرگه در ایران [۵۴] اشاره نمود. بالا بودن مقدار TiO_2 در نهشته‌های بوکسیتی نامبرده نشان می‌دهد که سنگ(های) مادر این نهشته‌های بوکسیتی از نظر ترکیب شیمیایی در قیاس با نهشته‌های بوکسیتی در کمربند زاگرس ترکیب بازی‌تری داشته‌اند. در مقابل، مقدار چارک اول Al_2O_3 در نهشته‌های بوکسیتی کمربند زاگرس بیش از مقدار چارک سوم این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با فرآیندهای هوازدهی و بوکسیت زایی، عناصری چون Nb ، Ti ، Zr ، Al ، Ga ، Ta ، Sc ، Y ، V ، Th و Hf به دلیل محفوظ ماندن در مقابل پدیده‌های فیزیکوشیمیایی در محیط‌های سطحی، تمایل دارند به عنوان عناصر کم تحرک عمل نمایند [۶، ۵۱، ۵۵-۵۷]. البته، این عناصر در شرایط ویژه طی فرآیندهای هوازدهی می‌توانند دچار تحرک شوند [۵۵]. گستره تغییرهای محدود فراوانی Al در قیاس با سایر عناصر یاد شده در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران نشان می‌دهد که عنصر Al در نیمرخ‌های هوازده نامحلول بوده و به سختی توسط محلول‌های هوازده کننده حمل گردیده است [۵۸]. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که Al در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران طی فرآیندهای هوازدهی از سنگ(های) مادر و بوکسیتی شدن به عنوان عنصر کم تحرک عمل نموده است.



شکل ۳ مقایسه فراوانی اکسیدها و عناصر بحرانی TiO_2 , Al_2O_3 , V, Co, Ga, Ta, Nb, Hf, LREE و HREE در نهشته‌های بوکسیتی شمال-غرب ایران، فلات مرکزی ایران، کمر بند چین خورده زاگرس و رشته‌کوه‌های البرز.

متوسط فراوانی Hf در نهشته‌های بوکسیتی البرز و زاگرس یکسان و به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار متوسط آن در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی و شمال غرب ایران است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، Zr و Hf تمایل دارند که به طور ترجیحی در ساختار کانیایی زیرکن تمرکز یابند [۶، ۱۵، ۱۷، ۵۱، ۵۶، ۶۲]. از اینرو، توزیع عنصر Hf در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران به احتمال بسیار با زیرکن کنترل گردیده است.

مقدار چارک سوم Ta در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس و ایران مرکزی به ترتیب کمتر از مقدار چارک اول و بیش از مقدار چارک سوم این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. به طور مشابه، مقدار چارک سوم Nb در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس کمتر از مقدار چارک اول این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی البرز و ایران مرکزی و بین چارک اول و متوسط فراوانی این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی شمال غرب ایران است. مشابه Ta، مقدار چارک سوم این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی بیش از مقدار چارک سوم آن در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، عناصر Ta، Nb، Ti تمایل دارند که در فازهای کانیایی دربردارنده تیتانیوم چون آناتاز و روتیل تمرکز یابند [۶، ۱۵، ۱۷، ۵۱، ۵۶، ۶۰، ۶۲]. پایین بودن فراوانی عناصر بحرانی Nb و Ta در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس به طور کامل با پایین بودن فراوانی Ti در این نهشته‌های بوکسیتی همخوانی دارد که این بیانگر جذب ترجیحی Nb و Ta در ساختار کانیایی آناتاز و روتیل در نهشته‌های بوکسیتی شمال غرب ایران، البرز و ایران مرکزی

مانند Al، مقدار چارک اول Ga در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس بیش از متوسط فراوانی این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. کمترین گستره تغییرهای فراوانی این عنصر مربوط به نهشته‌های بوکسیتی زاگرس است. از نظر زمین‌شیمیایی، Ga رفتاری شبیه Al دارد [۵۹] و بخش عمده‌ای از نمودار Eh-pH در سامانه Ga-O-H (pH حدود ۵ تا ۱۱ برای $a_{\text{Ga}} = 10^{-6}$) با کانی سوهنگیت، $\text{Ga}(\text{OH})_3$ ، اشغال می‌گردد [۶۰]. در نهشته‌های بوکسیت کارستی، همراهی Ga و Al با فعالیت پایین آب در محیط‌های هوازدگی تغییر می‌کند [۶۱] و به دلیل مقاومت Ga در برابر هوازدگی، مقادیر قابل توجهی از این عنصر می‌تواند در کانی‌های دیاسپور، بوهمیت و هماتیت غنی از Al انباشت یابد [۶، ۹، ۴۷، ۴۸، ۶۲]. هیرونیوموس و همکاران [۶۳] بر این باورند که تمرکز Ga در محیط‌های برونزاد به سازوکار شستشوی شدید در شرایط آب و هوایی گرمسیری تا نیمه گرمسیری وابسته است. فراوانی به نسبت بالای Ga در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس می‌تواند در ارتباط با بالا بودن فراوانی Al و در پی آن جذب ترجیحی این عنصر در ساختار کانیایی اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم باشد. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی، کان‌شناسی و زمین‌شیمیایی، نهشته‌های بوکسیتی زاگرس از ذخایر بوکسیتی مرغوب است و از نظر کیفی از مطلوب‌ترین ذخایر بوکسیت ایران محسوب می‌گردند. از اینرو، افق‌ها و عدسی‌های بوکسیت غنی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم (اغلب دیاسپور و یا بوهمیت) در کمر بند چین خورده زاگرس می‌توانند برای پی‌جویی‌های بعدی فلز بحرانی Ga مورد توجه قرار گیرند.

اسیدی در بخش‌های بالایی نهشته‌ها و فرآیند آهن‌زدایی و نبود رسوبگذاری کافی کانی‌های هماتیت و گوتیت می‌تواند از دلایل فراوانی پایین این عناصر بحرانی در این نهشته‌ها محسوب گردد. در واقع، با افزایش میزان رسوبگذاری آهن به صورت کانی‌های هماتیت و گوتیت، شرایطی مناسب برای جذب ترجیحی بیشتر V و Co توسط این کانی‌ها فراهم می‌شود. افزون بر این، نقش مؤثر مواد آلی در توزیع و تمرکز عناصر بحرانی V و Co در کانسنگ‌های بوکسیتی ایران را نباید نادیده گرفت، زیرا کلوئیدهای آلی می‌توانند تحرک برخی از عناصر جزئی را در محلول‌های آبگین فراهم کنند. با توجه به فراوانی به نسبت بالای عنصر بحرانی Co در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران و البرز می‌توان گفت که لایه‌های غنی از هماتیت و یا گوتیت در این نهشته‌ها می‌توانند برای پی‌جویی-های بعدی این عنصر بحرانی دارای اهمیت باشند.

در مورد REE به عنوان گروهی از مهم‌ترین عناصر راهبردی در صنعت می‌توان به این مطلب اشاره نمود که مقدار چارک سوم LREE و HREE در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس بیش از مقدار چارک سوم این عناصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران و مقادیر چارک اول و متوسط فراوانی این عناصر در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران کمتر از مقادیر چارک اول و متوسط فراوانی آنها در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. شستشو و ترسیب REE در کانسارهای بوکسیتی به pH محلول‌های هوازده کننده وابسته است. pH‌های پایین و بالا به ترتیب باعث شستشو و ترسیب این عناصر در طی فرآیندهای هوازده‌گی می‌شوند [۶۹، ۷۰]. از آنجا که تمرکز REE به pH محیط تشکیل وابسته است، طی بالا آمدن سطح سفره آب‌های زیرزمینی به دلیل انحلال سنگ بستر کربناتی مقدار pH محلول بالا رفته و شرایط برای ترسیب این عناصر فراهم می‌شود. با پایین رفتن سطح سفره آب‌های زیرزمینی و با ورود آب‌های جوی فروروی اسیدی شرایط لازم برای شستشوی بخشی این عناصر مهیا می‌گردد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تفریق و توزیع REE در کانسارهای بوکسیتی طی هوازده‌گی شدید شیمیایی و زهکشی قوی در شرایط آب و هوایی گرمسیری تا نیمه گرمسیری صورت می‌گیرد [۱۵]. توزیع REE در نهشته‌های بوکسیتی در ایجاد یک کانسار به عنوان یک منبع ممکن از لانتانیدها نقش ویژه‌ای دارد [۷۱، ۷۲]. حضور کانی‌های دارای REE حتی در

است. با توجه به فراوانی به نسبت بالای عناصر بحرانی Nb و Ta در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی می‌توان چنین گفت که لایه‌های غنی از آنتاز و روتیل در این نهشته‌ها می‌توانند برای پی‌جویی‌های بعدی این عناصر بحرانی دارای اهمیت باشند.

مقدار چارک سوم V در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی بیش از مقدار چارک سوم این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران و مقدار چارک اول آن در این نهشته‌های بوکسیتی بیش از مقدار چارک سوم آن در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس است. متوسط فراوانی V در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران و البرز یکسان و کمتر از مقدار چارک اول این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی است. همچنین، مقدار چارک سوم Co در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران و البرز بیش از مقدار چارک سوم این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی و زاگرس است. توزیع V و Cr در نهشته‌های بوکسیتی می‌تواند در ارتباط با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن باشد [۶۴، ۶۵]. هم چنین پوکروفسکی و همکاران [۶۶] بر این باورند که کلوئیدهای آهن طی فرآیندهای هوازده‌گی نقش مؤثری در تمرکز و انتقال برخی از عناصر جزئی دارند. V^{+3} و Cr^{+3} به راحتی می‌توانند جایگزین Fe^{+3} در شبکه کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن (هماتیت و گوتیت) شوند [۶۷]. هم چنین، این باور وجود دارد که Co به شدت توسط اکسیدهای آهن چون هماتیت جذب سطحی می‌شود. البته، این جذب وابسته به pH است و در شرایط pH پایین ضعیف‌تر است [۶۸]. از این رو با افزایش pH محلول‌های هوازده کننده، میزان جذب و روبش ترجیحی V و Co در محیط‌های هوازده‌گی سطحی توسط کانی‌های هماتیت و گوتیت افزایش می‌یابد. کمترین و بیشترین متوسط فراوانی Fe_2O_3 به ترتیب مربوط به نهشته‌های بوکسیتی زاگرس و نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران بوده و مقدار چارک سوم این عنصر در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران بیش از مقدار چارک سوم این عنصر در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. فراوانی پایین V و Co در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس نشان می‌دهد که توزیع این عناصر بحرانی در ارتباط با pH محیط نهشت بوده و با کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن چون هماتیت و گوتیت کنترل گردیده است. به بیان بهتر، اکسایش مواد آلی همراه با ایجاد شرایط

مقادیر پایین در نهشته‌های بوکسیتی در توزیع و تفریق لانتانیدها نقش مهمی دارند. از سوی دیگر، مواد آلی در بخش‌های بالایی نیمرخ‌های هوازده ظرفیت بالایی برای جذب سطحی REE دارند [۱۶]. با توجه به تغییرات گسترده فراوانی REE در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران می‌توان گفت که این عناصر طی فرآیندهای هوازده‌گی شیمیایی متحرک بوده‌اند و توزیع دوباره آنها در فراورده‌های هوازده با شدت هوازده‌گی تغییر کرده است [۶۷].

لانتانیدهای آزاد شده از کانی‌های اولیه سنگ مادر تمایل دارند که طی فرآیندهای کائولینیت‌زایی و لاتریت‌زایی در سطوح فازهای بی‌شکل و یا ساختار کانیایی مختلف جذب شوند [۷۳]. کانی‌های رسی [۷۳]، کانی‌های فسفاتی ثانویه [۷۴]، اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز [۷۵، ۷۶]، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن [۵۱، ۶۶] و اکسیدهای تیتانیوم چون روتیل، آتاتاز و تیتانیت [۷۷، ۷۸] از جمله میزبانان اصلی REE در بوکسیت‌ها و فراورده‌های هوازده محسوب می‌گردند. همچنین، این عناصر در نهشته‌های بوکسیت به عنوان کانی‌های حامل لانتانیدها نیز دیده می‌شوند [۷۹، ۸۰]. گروه باستانزیت و کانی‌های فسفات حاوی لانتانیدها همانند مونازیت، گورسکسیت و رابدوفان عمده کانی‌های عناصر خاکی نادر مشاهده شده در نهشته‌های بوکسیت هستند. با وجود پایین بودن مقدار متوسط فراوانی لانتانیدها در نهشته‌های بوکسیتی شمال غرب ایران، برخی کانی‌های حامل لانتانیدها در این نهشته‌ها توسط پژوهشگران گزارش شده‌اند که عبارتند از کانی‌های غنی از سربیم در کانسار بوکسیتی شیخ‌ماروت [۸۱]، کانی‌های غنی از عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) [۱۸]، سوانبرگیت و گویازیت [۸۲] در کانسار بوکسیتی درزی‌ولی، چورچیت و سریانیت در کانسار بوکسیتی باداملو [۱۱]، فلورنسیست، زینوتايم و مونازیت در کانسار بوکسیتی کانی‌زیرنه [۱۲]، پاریزیت و مونازیت در کانسار بوکسیتی سلیمان‌کندی [۱۳]، مونازیت و فلورنسیست در کانسارهای بوکسیتی قهرآباد و قاتانگور [۱۴]، مونازیت در کانسار بوکسیتی حوری [۱۶] و گویازیت، مونازیت و فلورنسیست در کانسار بوکسیتی نصرآباد [۲۴]. از آنجا که رفتار REE به pH محلول‌های هوازده کننده وابسته است، با افزایش شدت هوازده‌گی و درجه لاتریت‌زایی که با کاهش فراوانی سیلیس و آهن و افزایش فراوانی آلومینیوم در کانسنگ‌های بوکسیتی همراه است، انتظار می‌رود که فراوانی

REE در کانسارهای بوکسیتی کاهش یابد و از سامانه هوازده‌گی خارج گردند. تغییرات فراوانی REE در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران نشان می‌دهد که نهشته‌های بوکسیتی زاگرس دارای مقادیر بالاتری از این عناصر هستند، در حالیکه این نهشته‌ها به دلیل فرآیندهای لاتریت‌زایی متوسط تا قوی باید مقادیر پایینی از لانتانیدها را دارا باشند. تنها دلیل منطقی برای بالا بودن فراوانی REE در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس می‌تواند فرآیندهای جذب سطحی روی سطوح کانی‌های رسی و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، جایگزین شدن در شبکه کانیایی سیلیکات‌ها و حضور کانی‌های دارای REE در جازا باشد. گفتنی است که ترکیب محلول‌های خاک نیز نقش مهمی در جذب سطحی REE روی سطوح فازهای کانیایی فرعی دارند. از اینرو، توزیع و تفریق REE بین محلول‌های خاک و سطوح کانی‌ها تا حد بسیاری به واکنش‌های جذب و واجذب بستگی دارد که خود وابسته به pH محیط نهشت هستند [۹، ۶]. از سوی دیگر، با افزایش pH محیط تشکیل، روبنده‌ها به طور معمول عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [۷۳]. به باور چیتینر و همکاران [۸۳]، حضور کانی‌های مقاوم به هوازده‌گی در کانسارهای بوکسیتی نشان می‌دهد که حلالیت این کانی‌ها در دمای محیط و شرایط اسیدی، بسیار پایین بوده است. برخی از کانی‌های دارای REE در نهشته‌های بوکسیت کارستی زاگرس چون باگوشی، مومبی، تنگ‌پیرزال و بیدگل شناسایی شده‌اند که عبارتند از سریانیت، پاریزیت، رابدوفان، باستانزیت و چورچیت [۸]. از اینرو، تغییرات فراوانی REE در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران می‌تواند در ارتباط با عواملی چون حضور کانی‌های حامل لانتانیدها و اختلاف در پایداری آنها، تغییر pH محلول‌های هوازده کننده، تغییر شدت هوازده‌گی، عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک عامل مؤثر زمین‌شیمیایی و یا حتی نوسان‌های شدید سطح سفره آب‌های زیرزمینی باشد. در مجموع با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که توزیع و رفتار عناصر جزئی راهبردی و REE در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران با عوامل متعددی کنترل می‌گردد که از آن جمله می‌توان به ترکیب شیمیایی سنگ بستر، سنگ پوشش و سنگ(های) مادر، شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل (Eh-pH)، برهمکنش سنگ-آب، شرایط آب و هوایی، نوسان‌های سطح سفره‌های آب‌های زیرزمینی، ویژگی‌های شیمیایی عناصر، جذب سطحی، روبش، جانشینی

همریخت و حضور در فازهای کانیاپی مقاوم، شیمی محلول‌های هوازده کننده، شدت هوازده‌گی سنگ(های) مادر، میزان دسترسی به لیگاندهای آلی و غیرآلی، درجه پیوند با لیگاندهای کربناتی، اختلاف در پایداری کانی‌های حامل لانتانیدها و فرآیندهای دیاژنتیک و دیرزاد (اپی ژنتیک) اشاره کرد.

برداشت

بر اساس نمودارهای سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$ ، کانسنگ‌های بوکسیتی ایران با دارا بودن انواع کانیاپی مختلف درجه‌های متفاوتی از لاتریت‌زایی را نشان می‌دهند. ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نهشته‌های بوکسیتی ایران بازتابی از دگرگونی‌های طولانی مدت و پیچیده طی تغییرهای زمین‌شیمیایی متوالی با زمان است. نهشته‌های بوکسیتی زاگرس به دلیل درجه تفریق بیشتر عناصر آهن، سیلیس و آلومینیوم اغلب طی فرآیندهای لاتریت‌زایی متوسط تا قوی، مرغوبیت و کیفیت بهتری دارند. از دلایل مهم تفکیک ضعیف آلومینیوم از آهن در اغلب نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران می‌توان به وجود سنگ(های) مادر با ترکیب شیمیایی متفاوت، طولانی بودن زمان بوکسیت‌زایی، تشکیل فازهای کانیاپی حدواسط و زهکشی ضعیف اشاره نمود. گستره تغییرهای محدود فراوانی Al در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران نشان می‌دهد که این عنصر در نیمرخ‌های هوازده نامحلول باقی مانده و به سختی با محلول‌های هوازده‌کننده حمل می‌شود. متوسط فراوانی عناصر V و Co در نهشته‌های بوکسیت کارستی زاگرس کمتر از مقدار متوسط آنها در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. از آنجا که توزیع این فلزهای بحرانی با توزیع آهن در کانسنگ‌های بوکسیت همخوانی دارد پیشنهاد می‌شود که اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و یا گوتیت) و pH محلول‌های هوازده‌کننده نقش مؤثری در توزیع و تمرکز این دو عنصر یاد شده داشته‌اند. متوسط فراوانی عناصر Nb و Ta در نهشته‌های بوکسیت کارستی زاگرس کمتر از مقدار متوسط آنها در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. رفتار مشابه توزیع Nb و Ta با Ti نشانگر نقش مؤثر کانی‌های آنتاز و روتیل در توزیع و تمرکز این فلزهای بحرانی در کانسنگ‌های بوکسیت است. بالا بودن فراوانی TiO_2 در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران، رشته‌کوه‌های البرز و ایران مرکزی نشان می‌دهد که سنگ(های) مادر این نهشته‌های بوکسیتی از نظر ترکیب شیمیایی در قیاس با نهشته‌های

بوکسیتی کمرند چین‌خورده زاگرس ترکیب بازی‌تری داشته‌اند، در صورتیکه متوسط فراوانی Al، Ga و REE در بوکسیت‌های زاگرس بیش از مقدار متوسط آنها در سایر نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران است. رفتار مشابه توزیع Al و Ga بیانگر نقش کنترلی دیاسپور و بوهمیت در توزیع و تمرکز Ga در کانسنگ‌های بوکسیت است. با توجه به توزیع فراوانی عناصر بحرانی در نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران می‌توان پیشنهاد نمود که افق‌ها و عدسی‌های غنی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم (اغلب دیاسپور و یا بوهمیت) در نهشته‌های بوکسیتی زاگرس برای پی‌جویی‌های بعدی Ga، افق‌ها و عدسی‌های غنی از آنتاز و روتیل در نهشته‌های بوکسیتی ایران مرکزی برای پی‌جویی‌های بعدی Nb و Ta، و لایه‌های غنی از هماتیت و یا گوتیت در نهشته‌های بوکسیتی شمال‌غرب ایران و البرز برای پی‌جویی‌های بعدی Co می‌توانند مورد توجه قرار گیرند.

قدردانی

نگارندگان از نظرها و پیشنهادهای سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] European Commission, "Study on the critical raw materials for the EU", Final Report DG GROW (2023) pp. 160.
- [2] Dill H. G., "The chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium", Earth-Science Reviews 100 (2010) 1–420.
- [3] Mongelli G., Mameli P., Sinisi R., Buccione R., Oggiano, G., "REEs and other critical raw materials in Cretaceous Mediterranean-type bauxite: The case of the Sardinian ore (Italy)", Ore Geology Reviews 139 (2021) 104559.
- [4] Mouchos E., Wall F., Williamson B. J., Palumbo-Roe B., "Easily leachable rare earth element phases in the Parnassus-Giona bauxite deposits, Greece", Bulletin of the Geological Society of Greece 50 (2016) 1952–1958.
- [5] Dedy É. A., Mouchos E., Goodenough K., Williamson B. J., Wall F., "A review of the potential for rare-earth element resources from European red muds: Examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece", Mineralogical Magazine 80 (2016) 43–61.
- [6] Mongelli G., Boni M., Buccione R., Sinisi R., "Geochemistry of the Apulian karst bauxites

- karst-type bauxite deposit, NW Iran*", Journal of Geochemical Exploration 211 (2020) 106489.
- [16] Abedini A., Khosravi M., "REE geochemical characteristics of the Huri karst-type bauxite deposit, Irano-Himalayan belt, northwestern Iran", Minerals 13 (2023), 926.
- [17] Gamaletsos P. N., Godelitsas A., Filippidis A., Pontikes Y., "The rare earth elements potential of Greek bauxite active mines in the light of a sustainable REE demand", Journal of Sustainable Metallurgy 5 (2019) 20–47.
- [18] Khosravi M., Abedini A., Alipour S., Mongelli G., "The Darzi-Vali bauxite deposit, West-Azarbaidjan Province, Iran: Critical metals distribution and parental affinities", Journal of African Earth Sciences 129 (2017) 960–972.
- [19] Abedini A., "Investigations of mineralogy, geochemistry, and genesis of the Permo-Triassic bauxitic-lateritic deposits in northwest of Iran", PhD dissertation, Tabriz University, Iran (2008) pp. 184.
- [20] Abedini A., Calagari A. A., Mikaeili K., "Geochemical characteristics of laterites: The Ailbaltalu deposit, Iran", Bulletin of the Mineral Research and Exploration 48 (2014) 69–84.
- [21] Abedini A., Habibi Mehr M., "Mineralogy and geochemistry of trace and rare earth elements of the Borhan ferrite ores, southeast of Mahabad, NW Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (2018) 787–800.
- [22] Abedini A., Moradi S., Alizadeh A., "Controlling factors of distribution of major, minor, trace, and rare earth elements in the Dash-Aghel laterite deposit, east of Bukan, West-Azarbaidjan province, NW of Iran", The New Findings of Applied Geology 12 (2013) 38–59.
- [23] Alipour S., Abedini A., Abdali S., "Mineralization and geochemistry of rare earth elements of Heydar-Abad laterite horizon, south of Urmia, West-Azarbaidjan province", Scientific Quarterly Journal of Geosciences 91 (2014) 195–204.
- [24] Abedini A., Khosravi M., Mongelli G., "Critical metals distribution in the late Triassic-early Jurassic Nasr-Abad bauxite deposit, Irano-Himalayan karst bauxite belt, NW Iran", Geochemistry (2023) 126039.
- [25] Mohammadi Behjoo P., "Mineralogy and geochemistry of the Noruz Abad bauxitic-lateritic ore, NE Shahindejh, West-Azarbaidjan Province, NW Iran", M.Sc. Thesis, Geology Department, Urmia University, Iran (2019) pp. 127.
- (southern Italy): Chemical fractionation and parental affinities", Ore Geology Reviews 63 (2014) 9–21.
- [7] Ahmadnejad F., Zamanian H., Taghipour B., Zarasvandi A., Buccione R., Ellahi S. S., "Mineralogical and geochemical evolution of the Bidgol bauxite deposit, Zagros Mountain Belt, Iran: Implications for ore genesis, rare earth elements fractionation and parental affinity", Ore Geology Reviews 86 (2017) 755–783.
- [8] Ahmadnejad F., Mongelli G., "Geology, geochemistry, and genesis of REY minerals of the late Cretaceous karst bauxite deposits, Zagros Simply Folded Belt, SW Iran: Constraints on the ore-forming process", Journal of Geochemical Exploration 240 (2022) 107030.
- [9] Abedini A., Khosravi M., Calagari A. A., "Geochemical characteristics of the Arbanos karst-type bauxite deposit, NW Iran: Implications for parental affinity and factors controlling the distribution of elements", Journal of Geochemical Exploration 200 (2019) 249–265.
- [10] Abedini A., Mongelli G., Khosravi M., Sinisi R., "Geochemistry and secular trends in the middle-late Permian karst bauxite deposits, northwestern Iran", Ore Geology Reviews 124 (2020) 103660.
- [11] Abedini A., Khosravi M., Dill, H. G., "Rare earth element geochemical characteristics of the late Permian Badamlu karst bauxite deposit, NW Iran", Journal of African Earth Sciences 172 (2020) 103974.
- [12] Abedini A., Mongelli G., Khosravi M., "Geochemical constraints on the middle Triassic Kani Zarrineh karst bauxite deposit, Irano-Himalayan belt, NW Iran: Implications for elemental fractionation and parental affinity", Ore Geology Reviews 133 (2021) 104099.
- [13] Abedini A., Mongelli G., Khosravi M., "Geochemistry of the early Jurassic Soleiman Kandi karst bauxite deposit, Irano-Himalayan belt, NW Iran: Constraints on bauxite genesis and the distribution of critical raw materials", Journal of Geochemical Exploration 241 (2022) 107056.
- [14] Abedini A., Khosravi M., Mongelli G., "The middle Permian pyrophyllite-rich ferruginous bauxite, northwestern Iran, Irano-Himalayan karst belt: Constraints on elemental fractionation and provenance", Journal of Geochemical Exploration 233 (2022) 106905.
- [15] Abedini A., Khosravi M., "Geochemical constraints on the Triassic-Jurassic Amir-Abad

- [35] Calagari A. A., Farahani F. K., Abedini A., "Geochemical characteristics of a laterite: The Jurassic Zan deposit, Iran", *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 12 (2015) 67–77.
- [36] Zarasvandi A., Carranza E. J. M., Ellahi, S. S., "Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Deh-now bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran", *Ore Geology Reviews* 48 (2012) 125–138.
- [37] Azarnia S., "Mineralogy, Geochemistry and Genesis of the Lodab Deposit, Yasuj, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province", M.Sc. Thesis, Department of Earth Sciences, Shiraz University (2017) pp. 153.
- [38] Falahzadeh H., "Geochemical Comparison of the Loodab and Sar-Faryab Bauxite Deposits, the Zagros Fold Belt with emphasis on Paleo-Climates", M.Sc. Thesis, Department of Earth Sciences, Shiraz University (2019) pp. 121.
- [39] Zamanian H., Beiranvand G., Ahmadnejad F., "Mineralogy, geochemistry and the origin of the Bagoushi karst bauxite deposit, northwestern Fars province, Iran", *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 28 (2019) 269–280.
- [40] Zamanian H., Ahmadnejad F., Zarasvandi A., "Mineralogical and geochemical investigations of the Mombi bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran", *Geochemistry* 76 (2016) 13–37.
- [41] Calagari A. A., Kangarani Farahani F., Abedini A., "Geochemistry of major, trace, and rare earth elements in Biglar Permo-Triassic bauxite deposit, Northwest of Abgarm, Ghazvin Province, Iran", *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 21 (2010).
- [42] Khosravi M., V  rard C., Abedini A., "Palaeogeographic and geodynamic control on the Iranian karst-type bauxite deposits", *Ore Geology Reviews* 139 (2021) 104589.
- [43] St  cklin J., "Structural history and tectonic of Iran: a review", *AAPG bulletin* 52 (1968), 1229–1258.
- [44] Schellmann W., "Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation", *Catena* 21 (1994) 131–143.
- [45] Babechuk M. G., Widdowson M., Kamber B. S., "Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India", *Chemical Geology* 363 (2014) 56–75.
- [46] Aleva G. J. J., "Laterites: Concepts, Geology, Morphology and Chemistry", International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, The Netherlands (1994) pp. 169.
- [26] Kangarani Farahani F., Abedini A., Calagari A. A., "Mineralogy and geochemistry of Kambelu lateritic deposit, west of Damghan, Semnan province", *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24 (2015) 349–358.
- [27] Kangarani Farahani F., Calagari A. A., Abedini A., "Geochemical characteristics of Shahbolaghi laterite deposit, southeast of Damavand, Tehran province", *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 23 (2014) 165–176.
- [28] Kangarani Farahani F., Abedini A., Calagari A. A., "Mineralogical and geochemical features of Triassic–Jurassic clayey laterite deposit in Derazkuh, west of Damghan, Semnan province", *Applied Sedimentology* 1 (2014) 51–67.
- [29] Kangarani Farahani F., "Investigation of mineralogy, geochemistry, and genesis of Triassic to Jurassic deposits in Central Alborz zone of Iran", PhD dissertation, Tabriz University, Iran (2015) pp. 184.
- [30] Khosravi M., Yu W., Abedini A., Zhou J., "Geochemical constraints on the Gano karst bauxite deposit, eastern Alborz Mountains, northern Iran: implications for provenance, elemental mobility, and distribution of critical metals", *Journal of Geochemical Exploration* 262 (2024) 107468.
- [31] Esmaily D., Rahimpour-Bonab H., Esna-Ashari A., Kananian A., "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 (2010) 267–284.
- [32] Ghasemi M., Abedini A., Calagari A. A., "Mineralogy and REEs geochemistry of the Zaraj-Sou bauxite deposit, southwest of Ramsar, north Iran", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 27 (2019) 295–306.
- [33] Ghasemi M., "Investigation of mineralization, geochemistry, and genesis of laterite-bauxite and kaolinite deposits of the Eshkevarat-Rasht zone in west of Central Alborz with special regard to rare metals mineralization, north of Iran", PhD dissertation, Geology Department, Urmia University, Iran (2018) pp. 221.
- [34] Kiaeshkevarian M., Calagari A. A., Abedini A., Shamanian G., "Geochemical and mineralogical features of karst bauxite deposits from the Alborz zone (Northern Iran): Implications for conditions of formation, behavior of trace and rare earth elements and parental affinity", *Ore Geology Reviews* 125 (2020) 103691.

- [58] Nesbitt H. W., Wilson R. E., "Resent chemical weathering basalts", American Journal of Earth Sciences 292 (1992) 740–777.
- [59] Brookins D. G., "Eh–pH diagrams for geochemistry", Springer-Verlag, Berlin; New York (1988) pp. 176.
- [60] Kabata-Pendias A., "Trace elements in soils and plants", fourth ed. CRC Press, Boca Raton (2011).
- [61] Putzolu F., Papa A. P., Mondillo N., Boni M., Balassone G., Mormone A., "Ore Geology Reviews Geochemical characterization of bauxite deposits from the Abruzzi mining district (Italy)", Minerals 8 (2018) 298.
- [62] Liu X., Wang Q., Feng Y., Li Z., Cai S., "Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China", Ore Geology Reviews 55 (2013) 162–175.
- [63] Hieronymus B., Kotschoubey B., Boulègue J., "Gallium behaviour in some contrasting lateritic profiles from Cameroon and Brazil", Journal of geochemical Exploration 72 (2001) 147–163.
- [64] Schwertmann U., Pfab G., "Structural V and Cr in lateritic iron oxides: Genetic implications", Geochimica et Cosmochimica Acta 60 (1996) 4279–4283.
- [65] Marques J. J., Schulze D. G., Curi N., Mertzman S. A., "Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils", Geoderma 121 (2004) 31–43.
- [66] Pokrovsky O. S., Schott J., Dupre B., "Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil pore waters of permafrost-dominated basaltic terrain in central Siberia", Geochimica et Cosmochimica Acta 70 (2006) 3239–3260.
- [67] 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.
- [68] Sparks D. L., "Environmental soil chemistry", Academic Press, New York (1995) pp. 267.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [47] Bárdossy G., Aleva G. J. J., "Lateritic bauxites", Elsevier Scientific Publication, Amsterdam (1990) pp. 646.
- [48] Bárdossy G., "Karst bauxites", In: Elsevier Scientific, Amsterdam (1982) pp. 441.
- [49] Boulange B., Bouzat G., Pouliquen M., "Mineralogical and geochemical characteristics of two bauxitic profiles, Fria, Guinea Republic", Mineralium Deposita 31 (1996) 432–438.
- [50] Beauvais A., "Paleoclimates and dynamics of a battleship landscape of the Central African Republic: Morphology, petrology and geochemistry", Ph.D. Thesis, University of Poitiers, Poitiers (1991).
- [51] Mameli P., Mongelli 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.
- [52] Tardy Y., "Petrology of laterites and tropical soils", AA Balkema, Rotterdam (1997) pp. 408.
- [53] Mondillo N., Di Nuzzo M., Kalaitzidis S., Boni M., Santoro L., Balassone G., "Petrographic and geochemical features of the B3 bauxite horizon (Cenomanian-Turonian) in the Parnassos-Ghiona area: A contribution towards the genesis of the Greek karst bauxites", Ore Geology Reviews 143 (2022) 104759.
- [54] Khosravi M., Abedini A., "The Taragheh titanium-rich karst bauxite deposit, northwestern Iran: constraints on REE fractionation, Ce anomaly, and provenance", Journal of Geochemical Exploration 272 (2025) 107704.
- [55] Braun J. J., Ngoupayou J. R. N., Viers J., Dupre B., Bedimo J. P. B., Boeglin J. L., Robain H., Nyeck B., Freydier R., Nkamdjou L. S., Rouiller J., Muller J. P., "Present weathering rates in a humid tropical watershed: Nsimi, south Cameroon", Geochimica et Cosmochimica Acta 69 (2005) 357–387.
- [56] Calagari A. A., Abedini A., "Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran", Journal of geochemical Exploration 94 (2007) 1–18.
- [57] Wimpenny J., Gannoun A., Burton K. W., Widdowson M., Jamed R. H., Gilason S. R., "Rhenium and Osmium isotope and elemental behaviour of India", Earth and Planetary Science Letters 261 (2007) 239–258.

- [77] Kanazawa Y., Kamitani M., "Rare earth minerals in the world", Journal of Alloys and Compounds (2006) 408–412.
- [78] Roy P. D., Smykatz-Kloss W., "REE geochemistry of the recent playa sediments from the Thar Desert, India: An implication to playa sediment provenance", Geochemistry 67 (2007) 55–68.
- [79] Bárdossy G., Panto G., Varhegyi G., "Rare metals of Hungarian bauxites and conditions of their utilizations", Travaux ICSOBA. 13 (1976) 221–231.
- [80] Onac B. P., Ettinger K., Kearns J., Balasz I. I., "A modern, guano-related occurrence of foggite, $\text{CaAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and churchite-(Y), $\text{YPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in Cioclovina Cave, Romania", Mineralogy and Petrology 85 (2005) 291–302.
- [81] Abedini A., Calagari A. A., "Rare earth elements geochemistry of Sheikh-Marut laterite deposit, NW Mahabad, West-Azarbaidjan Province, Iran", Acta Geologica Sinica-English Edition 87 (2013) 176–185.
- [82] Sinisi R., Mongelli G., Perri F., Khosravi M., "Aluminum Phosphate–Sulfate (APS) minerals occurrence and REEs control in the Darzi-Vali bauxite deposit, Iran", Congresso National Parama 2019 (2019).
- [83] Cetiner Z. S., Wood S. A., Gammons C. H., "The aqueous geochemistry of the rare earth elements. Part XIV. The solubility of rare earth element phosphates from 23 to 150 °C", Chemical Geology 217 (2005) 147–169.
- [71] Sanematsu K., Kon Y., Imai A., Watanabe K., Watanabe Y., "Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand", Mineralium Deposita 48 (2013) 437–451.
- [72] Berger A., Janots E., Gnos E., Frei R., Bernier F., "Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar", Applied geochemistry 41 (2014) 218–228.
- [73] Karadağ M., Kupeli S., Arik F., Ayhan A., Zedef V., Doyen A., "Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya-Southern Turkey)", Chemie der Erde 69 (2009) 143–159.
- [74] 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.
- [75] 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", Earth and Planetary Science Letters 303 (1995) 591–601.
- [76] Koppi A. J., Edis R., Field D. J., Geering H. R., Klessa D. A., Cockayne D. J. H., "Rare earth element trends and cerium–uranium–manganese associations in weathered rock from Koongarra, northern territory, Australia", Geochimica et Cosmochimica Acta 60 (1996) 1695–1707.