

# کانی‌سازی و زمین‌شیمی عناصر خاکی کمیاب افق لاتریتی حیدرآباد، جنوب ارومیه، استان آذربایجان غربی

صمد علیپور<sup>۱\*</sup>، علی عابدینی<sup>۱</sup> و شهلا ابدالی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.  
<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۲۵

## چکیده

افق لاتریتی حیدرآباد در فاصله ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی قرار دارد. این افق به شکل چینه‌سان درون سنگ‌های کربناتی سازند روته (پرمین بالایی) توسعه یافته است. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری، کانسنگ‌های این افق بافت‌های میگروگرانولار، پورفیری دروغین، جریانی-کلومورفی، ماکروپیزویدی، پان‌ایدیومورفیک-گرانولار، اسپاستویدی، پلیمورفیک، گرهمک‌دار (نودولار) و آئیدی و یک منشأ برج‌آباد دارند. با توجه به مطالعات کانی‌شناسی، کانسنگ‌های این افق شامل کانی‌های دیاسپور، کزندوم، هماتیت، مگنتیت، گوتیت، روتیل، پاراگوتیت، مارگاریت، آمسیت، برترین، مونت‌موریلونیت، کلریت، کلریتوید، مسکوویت - ایلیت، کوارتز پیریت، انیدریت، کلسیت و دولومیت هستند. حضور مقادیر بالای کانی‌های سیلیکاتی نشان‌دهنده نارس بودن و سامانه زهکشی ضعیف در طی تکون این افق بازماندی است. نتایج تجزیه‌های شیمیایی نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های Eu و Ce در کانسنگ‌های لاتریتی به ترتیب بازه‌ای از ۰/۶۷ تا ۲/۷۴ و ۰/۸۶ تا ۲/۱۶ دارند. محاسبات مقادیر ضریب غنی‌شدگی عناصر در دو پروفیل انتخابی آشکار می‌کند که دو فرایند شستشو و تثبیت، تنظیم‌کننده‌های اصلی تمرکزات REEs در کانسنگ‌های این افق هستند. نتایج به‌دست آمده از مطالعات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان از آن دارند که تغییرات pH محلول‌های هوازده‌کننده، نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، شدت دگرسانی، عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی، جذب سطحی و روبش نقش مهمی در پراکندگی عناصر کمیاب خاکی در این نهشته داشته‌اند. ضرایب همبستگی میان عناصر نشان می‌دهد که فسفات‌های ثانویه، روتیل و مسکوویت-ایلیت میزبانان احتمالی REEs در کانسنگ‌ها هستند.

**کلیدواژه‌ها:** لاتریت، کزندوم، کانی‌سازی، حیدرآباد، ارومیه.

\*نویسنده مسئول: صمد علیپور

E-mail: s.alipour@urmia.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

نهشته و در سوی عمود بر امتداد لایه‌ها صورت گرفته است. بخش آزمایشگاهی شامل تهیه ۳۰ مقطع نازک و صیقلی برای بررسی ویژگی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری کانسنگ‌ها به‌ویژه تشخیص بافت آنها بوده است. در پی آن ترکیب کانی‌شناسی ۱۰ نمونه از کانسنگ‌ها با استفاده از تجزیه پراش پرتو X (XRD) در شرکت کانساران بینالود مشخص شد (جدول ۱). همچنین ۱۰ نمونه از کانسنگ‌ها به روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) برای تعیین ترکیب شیمیایی عناصر اصلی، فرعی، جزئی، و خاکی کمیاب در آزمایشگاه شرکت SGS کشور کانادا تجزیه شدند (جدول ۲). مقادیر LOI کانسنگ‌ها به‌وسیله تعیین وزن نمونه پیش و پس از حرارت دادن در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت توسط شرکت یادشده تعیین شد.

## ۲- زمین‌شناسی

آشکارترین واحدهای سنگی منطبقه مورد مطالعه به ترتیب قدیم به جدید شامل سازندهای کربناتی-شیلی میلا (کامبرو-اردووسین)، کربناتی روته (پرمین بالایی)، آهک‌های ریفی و مارنی قم (میوسن) و رسوبات کواترنری هستند. افق بازماندی یادشده، به شکل چینه‌سان و به صورت چندین لایه و عدسی مجزا، با ۳ روند کلی NE-SW، NW-SE و E-W، با ستبرایی متغیر از ۲ تا ۱۰ متر، درون واحدهای کربناتی سازند روته گسترش و تکامل یافته است (شکل ۱). سنگ‌های کربناتی روته که به عنوان سنگ‌های درونگیر افق بازماندی رفتار کرده‌اند، از دید سنگ‌شناسی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آهکی با میان‌لایه‌هایی از آهک‌های دولومیتی و دولومیت به رنگ‌های خاکستری تیره تا روشن هستند که گاه کوارتزیت و شیل به‌صورت محلی و گرهمک‌ها، باندها و ریز رگچه‌هایی از چرت دارند. افق بازماندی یادشده توسط چندین گسل امتدادی به‌طور محلی جابه‌جا شده و تغییر امتداد یافته

افق لاتریتی حیدرآباد، به مختصات جغرافیایی ۳۲' ۴۵° تا ۲۸' ۴۵° طول خاوری و ۳۸' ۳۷° و ۵' ۳۷° عرض شمالی، در فاصله ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومیه در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این افق بر پایه تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران (نبوی، ۱۳۵۵) بخشی از پهنه خوی-مهاباد و بر پایه تقسیم‌بندی کانسارهای بوکسیتی در دنیا (Bardossy, 1982) بخشی از کمربند بوکسیت کارستی ایران-همالیاست. کزندوم مهم‌ترین کانی زمین‌شناسی اقتصادی این نهشته به‌شمار می‌آید. با وجود بررسی‌های تفصیلی روی مسائل زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نهشته‌های لاتریتی در جنوب استان آذربایجان غربی توسط پژوهشگرانی همچون عابدینی (۱۳۸۷)، عابدینی و همکاران (۱۳۸۷الف و ب)، عابدینی و کلاگری (۱۳۸۸ و ۱۳۸۹) و Calagari & Abedini (2007)، تا سال ۱۳۸۹ بررسی‌های جامعی روی مسایل کانی‌شناسی و ارتباط آن با زمین‌شیمی عناصر خاکی کمیاب (REEs) این افق انجام نشده بود. ابدالی (۱۳۸۹) به‌طور جامع در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی این افق بازماندی پرداخت. نوشتار حاضر اطلاعات به نسبت جامعی از جنبه‌های کانی‌سازی، انواع کانسنگی، رفتار REEs در طی فرایند لاتریت‌زایی، کانی‌های میزبان REEs و دلایل رخداد بی‌هنجاری‌های Eu و Ce این افق بازماندی ارائه می‌دهد.

## ۲- روش مطالعه

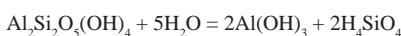
مطالعه افق لاتریتی حیدرآباد در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. بررسی‌های صحرایی شامل بررسی هندسی ماده معدنی، نقش فرایندهای زمین‌ساختی در ریخت‌شناسی نهشته، تغییرات رنگ و بافت، انواع کانسنگی، روابط صحرایی، انتخاب محل‌های مناسب برای نمونه برداری و نمونه‌برداری از کانسنگ‌ها بوده است. نمونه‌برداری ترجیحاً از ترانه‌ها و رخنمون‌های سنگی در دو پروفیل انتخابی از

## ۶- انواع کانیایی

رسم کانسنگ‌های مورد مطالعه در نمودار سه‌متغیره  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  (Aleva (1994) (شکل ۳) نشان می‌دهد که کانسنگ‌های مورد بررسی مشتمل بر ۶ گونه سنگیو کسیت کائولینیتی، کائولینیت بوکسیتی، کائولینیت، لاتریت، بوکسیت و بوکسیت فریتی هستند. با توجه به یافته‌های ژئوشیمیایی و موقعیت کانسنگ‌ها در نمودار سه‌متغیره  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  (Aleva (1994) لاتریت‌ها و بوکسیت فریتی در پروفیل اول و بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت در پروفیل دوم بیشترین گسترش یافتگی را نشان می‌دهند.

## ۷- جنبه‌های ژنتیکی کانی‌سازی با استفاده از شواهد بافتی و کانی‌شناسی

با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی به نظر می‌رسد که همگن بودن کلویید اولیه و یا نبود هسته‌های مناسب همراه با ضعیف بودن انرژی حوضه ته‌نشینی، تشکیل کانسنگ‌ها در یک محیط آبی آرام و تغییر مداوم سطح آب‌های زیرزمینی مانع از گسترش شدید بافت‌های آئیدی، پیرویدی و اسپاستویدی چه از نظر کمی و چه از نظر تعداد دواپر هم‌مرکز دور هسته‌ها گردیده و سبب گسترش شدید بافت‌های گره‌ک‌دار در کانسنگ‌های این افق شده است (Valeton, 1972). تشکیل گره‌ک‌های آهن‌دار (گره‌ک‌های هماتی) در بیشتر کانسنگ‌های با آهن بالا به عوامل زیادی مانند تغییرات در فعالیت آب در محیط‌های خاک‌زاد بستگی دارد و ممکن است ریشه در نوسانات آب‌وهوایی داشته باشد (Mongelli, 2002). با توجه به تشکیل کنکرسون‌هایی مانند گره‌ک‌ها (در مقادیر بیشتر) و آئیدها (در مقادیر کمتر) به نظر می‌رسد تغییرات آب‌وهوایی در ۲ مرحله مختلف به ترتیب (۱) دوره به‌نسبت طولانی با آب‌وهوای استوایی بیشتر مرطوب و (۲) تناوب آب‌وهوایی کوتاه‌مدت خشک و مرطوب، در تشکیل کانسنگ‌های این افق در منطقه حکمفرما بوده است (Mongelli, 2002). محدود بودن برخی از شکستگی‌ها در هسته‌های هماتی ماکروپیرویدها، آئیدها و اسپاستویدها به‌صورت شکل‌های نامنظم و شعاعی و عدم تداوم آنها در متن کانسنگ‌ها دلیل محکمی بر تراکم و انقباض ژل آلومینوسیلیکاتی در طول شکل‌گیری کانسنگ‌هاست (Bardossy & Aleva, 1990). شکستگی‌های تداوم یافته در متن کانسنگ‌ها نیز احتمالاً در اثر تراکم ژل و عملکرد نیروهای زمین‌ساختی ایجاد شده‌اند. همچنین حالت دمبلی شکل آئیدها و اسپاستویدها احتمالاً در اثر عملکرد تنش‌های ساختاری روی نهشته ایجاد شده است. حضور مقادیر بالایی از کانی‌های سیلیکاتی در کانسنگ‌های افق لاتریتی مورد مطالعه نشان از آن دارد که افق بازماندی حیدرآباد از دید تکوینی نارس بوده و در طی مراحل تشکیل و تکامل خود از هوازگی سنگ‌های اولیه زهنکی خوبی نداشته است و بیشتر کانی‌های حد واسط در هنگام تبدیل سنگ (های) مادر به نهشته، به دلیل کند بودن فرایند لاتریتی شدن حفظ شده‌اند. با توجه به مرز کاملاً تند و مشخص میان کانسنگ‌های لاتریتی با سنگ‌های درونگیر کربناتی، گیبسیت احتمالاً اولین کانی آلومینای آزاد تشکیل شده طی تکوین کانسنگ‌های این افق بوده است که در اثر هوازگی مستقیم فلدسپارها و یا سیلیس‌زدایی کانی‌های کائولینیت به‌وجود آمده است (Voicu et al., 1997):



Kaolinite                      Gibbsite

کائولینیت‌ها نیز احتمالاً از دگرسانی فلدسپارها و مسکوویت‌ها شکل گرفته‌اند. مسکوویت‌ها نیز به نوبه خود محصول دگرسانی کانی‌های فلدسپار هستند. کائولینیت‌ها در طی تکوین این نهشته احتمالاً در اثر فشارهای زمین‌ساختی و فرایندهای دیاژنزی به‌طور کامل به کانی‌های آلومینای آزاد تبدیل شده‌اند. با توجه به تجمعات کانیایی در کانسنگ‌ها، روند تبدیلی گیبسیت به بوهمیت، بوهمیت به دیاسپور و تبدیل بخشی دیاسپور به کرنوم در طی تکوین کانسنگ‌های این افق

است. این افق، با توجه به ساختار و عملکرد گسل‌های موجود در منطقه به دو بخش مجزای باختری و خاوری با فاصله زیاد تبدیل شده است. از این رو از هر بخش یک پروفیل عمود بر امتداد افق برای نمونه‌گیری و مطالعه انتخاب شد. در دو پروفیل انتخابی روی این نهشته، بر پایه رنگ، ۸ نوع کانسنگ مجزا به رنگ‌های سبز، سیاه، خاکستری مایل به سیاه، سرخ آجری، کرم مایل به سبز، سبز تیره، کرم روشن، و سبز مایل به خاکستری تشخیص داده شد. وجود مرزهای کاملاً تند میان این افق با سنگ میزبان کربناتی، لیمونیت‌زایی کانسنگ‌های سرخ آجری، گسترش بافت‌های پلیتومورفیک در کانسنگ‌های کرم مایل به سبز و کرم روشن، وجود رگچه‌هایی از تراورتن در محل درز و شکاف‌های افق، تغییرات شدید در ستبرای افق و گسترش شدید بافت‌های گره‌ک‌دار در بیشتر کانسنگ‌ها از مهم‌ترین و برجسته‌ترین سیماهای زمین‌شناسی این افق به‌شمار می‌روند. وجود رنگ‌های مختلف در این افق نشان از شرایط متفاوت اکسایش و احیا در طی تشکیل و گسترش این کانسنگ‌ها دارد.

## ۴- سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری

با توجه به نبود امکان شناسایی کانی‌ها توسط مطالعات میکروسکوپی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری بیشتر برای تعیین وضعیت بافتی و ژنتیکی افق مورد مطالعه صورت گرفته است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان از آن دارند که شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم در تشکیل کانسنگ‌های این افق، سبب تشکیل و گسترش بافت‌های آئیدی متشکل از آئیدهای ساده (شکل ۲- a) و مرکب (شکل ۲- b)، پیرویدی، ماکروپیرویدی (شکل ۲- c)، گره‌ک‌دار، اسپاستویدی، جریان-کومورفی (شکل ۲- d)، پورفیری دروغین، میکروگرانولار، پانایدیومورفیک-گرانولار (شکل ۲- e) و پلیتومورفیک در این افق شده است. حضور این بافت‌ها نشان‌دهنده منشأ برجزای این افق است (Bardossy, 1982). در این میان بافت‌های گره‌ک‌دار فراوانی خیلی بیشتری نسبت به بافت‌های آئیدی، اسپاستویدی و ماکروپیرویدی در کانسنگ‌ها دارند.

در کانسنگ‌های مورد مطالعه سامانه شکستگی (Septaria) در پیرویدها به‌خوبی گسترش یافته است و مراحل تشکیل آنها را در گذشته نشان می‌دهد. سامانه شکستگی در موارد همانندی توسط پژوهشگرانی چون (Boulangé (1984، Bardossy & Aleva (1990) و (Alipour (2006) مطالعه و رده‌بندی شده است. در این افق لاتریتی نیز سامانه‌های شکستگی (Septarias) با توجه به تمرکز ترک‌ها و شکستگی‌ها در حاشیه، مرکز و یا در کل سامانه به دو گروه قابل تفکیک هستند؛ گروه اول شکستگی‌هایی محدود به مرکز پیروید هستند (ترک‌های مرکزی) و در حاشیه گسترش ندارند. این ترک‌ها در زمانی که هنوز نوارهای حاشیه‌ای تشکیل نشده بوده‌اند، به علت از دست دادن آب از ژل اولیه پیروید حاصل شده‌اند (شکل‌های ۲- a و f). گروه دوم درزه‌ها و شکستگی‌هایی هستند که در حاشیه متمرکز هستند و در مرکز ادامه نیافته‌اند (ترک‌های حاشیه‌ای). ترک‌های حاشیه‌ای جوان هستند و پس از تشکیل نوارهای حاشیه‌ای در اثر آبگیری و کاهش حجم حاصل شده‌اند (شکل ۲- e).

## ۵- کانی‌شناسی کانسنگ‌ها

تجزیه‌های پراش پرتو X (XRD) نشان می‌دهد که کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسنگ‌های این افق گوناگونی کانی‌شناسی به نسبت زیادی دارند. این کانی‌ها را می‌توان در ۷ دسته کلی بررسی کرد؛ (۱) هیدروکسیدها و اکسیدهای آلومینیم (دیاسپور و کرنوم)؛ (۲) هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن (هماتیت، مگنتیت و گوتیت)؛ (۳) اکسیدهای تیتانیم (روتیل)؛ (۴) سیلیکات‌ها (پاراگوینت، مارگاریت، آمیتیت، برترین، مونت‌موریلونیت، کلریت، کلریتوید، مسکوویت-ایلیت و کوارتز)؛ (۵) سولفیدها (پیریت)؛ (۶) سولفات‌ها (انیدریت) و (۷) کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت) (جدول ۱).

کانسنگ‌ها محاسبه شد (جدول ۳). این شاخص‌ها بر پایه غلظت عناصری مانند Si, Al, Ti, Mg, Ca, K, Na و L.O.I بنیانگذاری شده‌اند و کارایی بالایی برای مطالعات هوازنگی شیمیایی ضعیف تا متوسط دارند؛ ولی برای مطالعات هوازنگی شیمیایی شدید مناسب نیستند (Nesbitt & Wilson, 1992; Patino et al., 2005). مقایسه ارقام به دست آمده از این شاخص‌ها (جدول ۳) با مقادیر ارائه شده برای سنگ‌های سالم و کاملاً هوازده (جدول ۴)، نشان می‌دهد که شدت فرایند هوازنگی در پروفیل کانسنگ‌ها بسیار بالا بوده است. بازه تغییرات ۸۶/۱۶ تا ۹۹/۴۹ درصدی در پروفیل اول و ۸۰/۶۵ تا ۹۹/۰۱ درصدی در پروفیل دوم و میزان شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA) در کانسنگ‌های این نهشته با در نظر گرفتن مقدار نظری  $50 \leq$  این شاخص برای سنگ‌های کاملاً سالم (جدول ۴)، نشان از بیرون آمدن عناصر Na, Ca و K در فرایندهای لاتریت‌زایی و به گفتار بهتر تبدیل فلدسپارهای سنگ مادر به کانی‌های رسی در تکوین این نهشته دارد. غلظت‌های CaO, Na<sub>2</sub>O, MgO و K<sub>2</sub>O در محصولات هوازنگی به شدت پایین است. در نتیجه مقدار CIA به‌طور میانگین در پروفیل اول بزرگ‌تر از ۹۰ درصد و در پروفیل دوم به‌طور میانگین ۸۸/۸۱ درصد است. بر عکس تمرکزات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (به‌طور میانگین ۳۶/۴۹ درصد)، Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (به‌طور میانگین ۲۰/۳۵ درصد) و TiO<sub>2</sub> (به‌طور میانگین ۳/۳۸ درصد) خیلی بیشتر است. با توجه به مطالب یادشده می‌توان پیشنهاد کرد که شدت هوازنگی شیمیایی در طی تکوین این نهشته می‌تواند به صورت شدید رده‌بندی شود (Nesbitt & Wilson, 1992). با بررسی مقادیر شاخص‌های دگرسانی شیمیایی (CIA)، کانی‌شناسی دگرسانی (MIA)، پلاژیوکلاز دگرسانی (PIA) و هوازنگی شیمیایی (CIW) در کانسنگ‌ها چنین دریافت می‌شود که عناصر Na, Ca و K در طی فرایندهای هوازنگی از سامانه خارج شده‌اند. تغییرات شدید شاخص هوازنگی شیمیایی (CWI) در سامانه هوازده نشان از غنی‌شدگی عناصر Al, Fe, Ti و L.O.I، بیرون آمدن بخشی Si و حضور به‌نسبت بالای کانی‌های سیلیکاتی در سامانه مورد مطالعه دارد.

## ۹- زمین‌شیمی عناصر خاکی کمیاب

### ۹-۱. الگوی پراکندگی REEها در کانسنگ‌ها

الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت و UCC (Taylor & McLennan, 1985) برای کانسنگ‌های مورد مطالعه در هر دو پروفیل نشان از غنی‌شدگی بیشتر LREEها نسبت به HREEها دارد (شکل‌های ۵ و ۶)، با این تفاوت که میزان غنی‌شدگی LREEها بیشتر از HREEهاست. الگوی پراکندگی REEها در مواد هوازده و کانسنگ‌های بازماندی به عنوان نشانگرهای مهمی برای تعیین سنگ‌های منشأ پذیرفته شده‌اند (Gonzalez-Lopez et al., 2005; Muzaffer-Karadag et al., 2009). معمولاً سنگ‌های بازی در طی فرایندهای هوازنگی دچار تفریق ضعیف LREEها از HREEها می‌شوند؛ در صورتی که سنگ‌های فلسیک الگوهای تفریق شدیدتر LREEها از HREEها را نشان می‌دهند. با این توصیفات، الگوی پراکندگی REEهای بهنجار شده به کندریت و UCC نشان از تفریق به‌نسبت ضعیف LREEها از HREEها در طی لاتریتی شدن دارند. این سیما پیشنهاد کننده یک منشأ بازی برای نهشته لاتریت حیدرآباد است. در این مطالعه برای بررسی روند تغییرات REEها در طی فرایند لاتریتی شدن به ترتیب از روابط زیر استفاده شد:

$$(La/Yb)_N = [(La_{sample}/La_{chondrite}) / (Yb_{sample}/Yb_{chondrite})]$$

$$(LREE/HREE)_N = [(LREE/HREE)_{Sample}] / [(LREE/HREE)_{chondrite}]$$

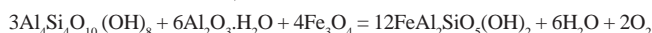
محاسبات انجام شده برای کانسنگ‌های پروفیل اول نشان می‌دهد که مقدار  $(La/Yb)_N$  از ۳/۸۰ تا ۱۱/۵۷ و مقدار  $(LREE/HREE)_N$  از ۳/۳۹ تا ۵/۲۳ تغییر می‌کند. برای کانسنگ‌های پروفیل دوم نیز مقدار  $(La/Yb)_N$  از ۳/۱۲ تا ۱۲/۱۶ متغیر است. بیشترین مقادیر نسبت  $(La/Yb)_N$  در پروفیل اول در کانسنگ سبز و در پروفیل

محمول به نظر می‌رسد. در منطقه حیدرآباد، در سامانه کربناتی پرمین مرتبط با نهشته لاتریتی آثاری از دگرگونی‌های تماسی و حرارتی دیده نمی‌شود. با توجه با این مسئله به نظر می‌رسد که پیدایش کرسول در کانسنگ‌ها به دلیل دگرگونی ناحیه‌ای اعمال شده روی کانسنگ‌ها و بیرون آمدن آب از کانی‌های دیاسپور مطابق واکنش زیر صورت گرفته است:



(Urai & Feenstra, 2001)

روتیل در این نهشته از آنتاز در اثر عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و فرایندهای دیاژنتیک حاصل روی کانسنگ‌ها به وجود آمده است. مونت‌موریلونیت‌ها در این نهشته به احتمال فراوان از دگرسانی کانی‌های آلپیت و پیروکسن ایجاد شده‌اند (Temur & Kansun, 2006). پاراگونیت و مارگاریت از محصولات دگرگونی در این نهشته است (Temur & Kansun, 2006). کلریت‌ها از دگرسانی سیلیکات‌های آهن-منیزیم‌داری چون پیروکسن‌ها و آمفیبول‌ها تشکیل شده‌اند. گوتیت‌ها نیز به احتمال فراوان از دگرسانی آمفیبول‌ها (Mutakyahwa et al., 2003) و یا اکسایش کانی‌هایی مانند پیریت به وجود آمده‌اند (Bardossy, 1982). گوتیت‌ها در بخش‌هایی که با کرسول همراهند، به احتمال زیاد از آنگیری هماتیت‌ها شکل گرفته‌اند. هماتیت‌ها نیز به‌طور مستقیم از اکسایش پیریت‌ها و یا از آب‌زدایی گوتیت‌ها منشأ گرفته‌اند. تشکیل ایدریت در این نهشته به احتمال زیاد در ارتباط با اسیدسولفوریک ناشی از اکسایش پیریت‌ها بوده است (Bardossy, 1982). کلریتویدها که در این نهشته با کرسول همراه هستند، حاصل فرایندهای دگرگونی ناحیه‌ای (در حد رخساره شیبست) اعمال شده بر این افق هستند. بررسی‌های Ganguly (1969) نشان داده است که تجمعات کانیایی کلریتوید-دیاسپور-کائولینیت-مسکویت-مگنتیت-هماتیت-روتیل می‌تواند در اثر واکنش‌های زیر به هم پیوسته باشند:



Kaolinite Diaspore Magnetite Chloritoid



Kaolinite Diaspore Hematite Chloritoid

با توجه به حضور این تجمعات کانیایی در کانسنگ‌های مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که چنین واکنش‌هایی سبب تشکیل کانی کلریتوید در این نهشته شده‌اند. کوارتز در این نهشته احتمالاً خاستگاه تخریبی دارد.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد برای رسوب‌گذاری گیبسیت به عنوان کانی آلومینای آزاد اولیه در شرایط سطحی نیاز به pH در محدوده ۴/۵ تا ۶/۵ است و مقدار سیلیس حل شده در آب برای رسوب آن باید کمتر از  $10^{-4.5}$  مول باشد (Temur & Kansun, 2006). برای رسوب‌گذاری هماتیت و گوتیت نیاز به pH بالاتر از ۷ و Eh بزرگ‌تر از ۰/۲ است. شاموزیت در محیط‌های احیایی (اگر بازه pH میان ۷ تا ۸ باشد، Eh باید  $-0.2 >$  و اگر pH در محدوده ۸ تا ۹ باشد، Eh باید  $>0$  باشد) در شرایط فشار پایین تشکیل می‌شود (Temur & Kansun, 2006). با توجه به چگونگی پراکندگی کانی‌های یادشده حاضر در کانسنگ‌های مورد مطالعه در نمودار دو متغیره Eh-pH محیط‌های طبیعی (Garrels & Christ, 1965) (شکل ۴) به نظر می‌رسد افق لاتریتی مورد مطالعه در یک محیطی با عملکرد آب‌های سطحی اکسیدی-اسیدی تا آب‌های زیرزمینی بازی و احیا تشکیل شده باشد.

## ۸- شاخص‌های هوازنگی

در این مطالعه برای درک بهتر روند کانی‌سازی، شاخص‌های هوازنگی همچون شاخص شیمیایی دگرسانی (CIA)، شاخص کانی‌شناسی دگرسانی (MIA)، شاخص پلاژیوکلاز دگرسانی (PIA)، شاخص شیمیایی هوازنگی (CIW)، شاخص هوازنگی شیمیایی (CWI)، شاخص دگرسانی ۱ (WI-1) و شاخص دگرسانی ۲ (WI-2) برای

بنابراین، با توجه به این مسئله می‌توان احتمال داد که بی‌هنجاری منفی Eu در اثر تخریب کانی‌های پلاژیوکلاز سنگ مادر در طی فرایندهای هوازدگی و وارد شدن ترجیحی این عنصر به درون محلول‌های هوازده کننده (White et al., 2001) و بی‌هنجاری مثبت Eu به دلیل جذب سطحی Eu توسط کانی‌های رسی ایجاد شده است.

#### ۹-۴. کانی‌های میزبان REEها

چندین گروه از کانی‌ها به عنوان میزبان REEها توسط پژوهشگران مختلف معرفی شده‌اند. از مهم‌ترین این کانی‌ها می‌توان به کانی‌های رسی، کانی‌های فسفاتی ثانویه مانند آپاتیت، اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن اشاره کرد (Ma et al., 2007). در این بررسی برای تعیین کانی‌های احتمالی میزبان REEها ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (Spearmans Rank Correlation) (Rollinson, 1993) میان REE با عناصر اصلی، فرعی و جزئی محاسبه شد.

**الف) پروفیل اول:** همبستگی منفی میان Al با REEها (-۰/۳۰) و مثبت و ضعیف Si با REEها (۰/۱۰) نشان می‌دهد کانی‌های رسی در کانسنک‌ها نمی‌توانند عامل تمرکزدهنده مهمی برای REEها باشند. همبستگی‌های مثبت و منفی ضعیف میان REEها با Fe (-۰/۳۰) نشان می‌دهند که کانی‌های آهن‌دار نقشی در تمرکز REEها در کانسنک‌های این پروفیل نداشته‌اند. همبستگی منفی میان Mn با REEها (-۰/۷) نیز نشان از آن دارند که نقش اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز در تمرکز و تجمع REEها در این نهشته بسیار کم‌رنگ است. همبستگی مثبت و متوسط تا خوب K با REE (۰/۸۲) نشان می‌دهد که کانی‌های مسکوویت-ایلیت از میزبانان اصلی برای تمرکز REE در این پروفیل هستند. همبستگی منفی میان REE با Ti (-۰/۶۰) و P (-۰/۶۱) نشان می‌دهد که کانی‌های روتیل و فسفات‌های ثانویه نقشی در تثبیت REEs در کانسنک‌های این پروفیل نداشته‌اند. زیرکن که از دید شیمیایی پایدارترین کانی در طی فرایندهای هوازدگی به‌شمار می‌رود (Oh & Richter, 2005) و می‌تواند به عنوان حامل و کنترل‌کننده پراکندگی HREE در سامانه‌های هوازده و دگرسان شده باشد (Compton et al., 2003)، با توجه به همبستگی منفی و ضعیف Zr با HREE (-۰/۳۰) نمی‌تواند نقشی در تمرکز HREEها در کانسنک‌های این پروفیل داشته باشد.

**ب) پروفیل دوم:** همبستگی‌های مثبت و خوب میان Al با REE (۰/۸) و منفی و خوب میان Si با REE (-۰/۷۰) نشان می‌دهند کانی‌های رسی در این واحدهای بازمانده نمی‌توانند عامل تمرکزدهنده مهمی برای REEها باشند. همبستگی‌های منفی و مثبت ضعیف میان REE با Fe (۰/۱۰) نشان از این دارند که هماتیت و گوتیت به عنوان کانی‌هایی فرعی در تمرکز REEها در این پروفیل نمی‌توانند نقش داشته باشند. همبستگی منفی و بسیار ضعیف میان Mn با REE (-۰/۱۱) نیز نشان می‌دهد که نقش اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز در تمرکز و تجمع REEها در این پروفیل بسیار کم‌رنگ است. همبستگی منفی و متوسط میان REE با K (-۰/۵۰) نشان می‌دهد که کانی‌های مسکوویت-ایلیت نیز نقشی در تمرکز این عناصر در این پروفیل نداشته‌اند. همبستگی مثبت و خوب REE با Ti (۰/۹۰) نشان از نقش مهم روتیل در تثبیت و تمرکز REEها در کانسنک‌ها دارد. همبستگی مثبت و خوب میان REE با P (۰/۸۷) نشان‌دهنده نقش مهم کانی‌های فسفاتی ثانویه در تمرکز REEها در پروفیل است. همبستگی مثبت و خوب Y با P (۰/۷۴) می‌تواند دلیلی بر حضور احتمالی کانی‌های فسفاتی چورچیت (Churchite)  $(\text{YPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$  (Wang et al., 2010) و زینوتایم (Xenotime)  $(\text{YPO}_4)$  (Gonzalez-Lopez et al., 2005) در کانسنک‌ها باشد. همچنین، همبستگی مثبت و خوب میان P با La (۰/۸۷)، Ce (۰/۹۷) و Nd (۰/۹۷) می‌تواند دلیلی بر حضور احتمالی کانی‌های فسفاتی چون مونازیت (Monazite)  $(\text{Ce,La,Nd,TH}_2\text{PO}_4)$  و رابدوفان (Rhabdophane)  $(\text{Ce,La}(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{O})$  در کانسنک‌ها باشد (Roy & Smykatz-Kloss, 2007).

دوم در کانسنک کرم روشن دیده می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که معمولاً با افزایش pH محلول‌های آبگین ثبات کمپلکس‌های حامل HREE بیشتر می‌شود و در نتیجه این مسئله سبب تفریق LREEها از HREEها در طی فرایند لاتریتی شدن می‌شود (Ronov et al., 1967). با توجه به تغییرات شدید در نسبت‌های  $(\text{La/Yb})_N$  و  $(\text{LREE/HREE})_N$  می‌توان چنین دریافت که تغییرات pH محلول‌های مسئول لاتریت‌زایی یکی از عامل‌های اصلی کنترل‌کننده پراکندگی REEها در کانسنک‌ها بوده است. تنها دلیل منطقی که می‌توان برای افزایش pH محلول‌های مسئول لاتریتی شدن پیشنهاد کرد بافرینک محلول‌های فروروی اسیدی توسط سنگ بستر کربناتی است (Maksimovic & Panto, 1991).

#### ۹-۲. تحرک و پراکندگی REEها در کانسنک‌ها

در این مطالعه برای بررسی رفتار عناصر خاکی کمیاب در طی فرایند لاتریت‌زایی مقادیر ضریب غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب (Malpas et al., 2001)، با فرض ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) (Taylor & McLennan, 1985) به عنوان سنگ مادر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E.F. (\text{Enrichment Factor}) = 100 \times [(X_w/X_p) - 1]$$

نتایج محاسبات ضریب غنی‌شدگی نشان‌دهنده آن است که REEها رفتار متغیری طی فرایند لاتریت‌زایی در حیدرآباد از خود نشان می‌دهند، به طوری که محدوده تهی‌شدگی و غنی‌شدگی در میان واحدهای بازمانده از ۲۰/۶۷ تا ۷۲۸/۴۱ درصد در پروفیل اول و از ۴۰/۶۷ تا ۴۴۵/۴۵ درصد در پروفیل دوم در نوسان است (جدول ۵). از آنجایی که pHهای پایین سبب تحرک REEها و pHهای بالا سبب رسوب REEها می‌شود (Patino et al., 2003)، می‌توان ادعا کرد که دلیل اصلی تغییرات در تمرکز REEها در کانسنک‌های مورد مطالعه تغییرات pH محلول‌های هوازده کننده توسط سنگ بستر کربناتی بوده است. معمولاً روبنده‌های REEها با افزایش pH عملکرد بهتری برای روبش و جذب REEها از خود نشان می‌دهند (Muzaffer-Karadag et al., 2009). به نظر می‌رسد که افزایش pH محلول‌های هوازده کننده در حیدرآباد به احتمال قوی توسط عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی به دلیل بالا آمدن سطح سفره آب‌های زیرزمینی رخ داده است.

#### ۹-۳. تفسیر بی‌هنجاری‌های Eu و Ce

در این مطالعه برای محاسبه میزان بی‌هنجاری Eu و Ce به ترتیب از روابط زیر استفاده شده است:

$$\text{Eu/Eu}^* = (\text{Eu}_N) / \sqrt{(\text{Sm}_N) \times (\text{Gd}_N)} \quad (\text{Taylor \& McLennan, 1985})$$

$$\text{Ce/Ce}^* = (2\text{Ce}_N) / (\text{La}_N + \text{Pr}_N) \quad (\text{Ma et al., 2007})$$

در روابط یادشده حرف N بهنجار شدن عناصر یادشده نسبت به ترکیب کندریت (Taylor & McLennan, 1985) را نشان می‌دهد. محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که میزان بی‌هنجاری Ce برای پروفیل اول از بازه ۰/۸۶ تا ۲/۱۶ و برای پروفیل دوم از بازه ۰/۹ تا ۱/۷۵ متغیر است. بیشترین مقدار بی‌هنجاری Ce در پروفیل اول در کانسنک خاکستری مایل به سیاه و در پروفیل دوم در کانسنک سبز مایل به خاکستری دیده می‌شود. نکته قابل توجه این است که مقادیر بی‌هنجاری مثبت بالایی یاد شده منطبق بر کانسنک‌هایی هستند که مقدار آهن در آنها فراوانی بالایی دارد. به نظر می‌رسد که رخداد این بی‌هنجاری‌های مثبت برای Ce به احتمال فراوان مرتبط با روبش آن توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است (Mameli et al., 2007). همچنین، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار ناهنجاری Eu در پروفیل اول از ۰/۷۲ تا ۱/۱۴ و در پروفیل دوم از ۰/۶۷ تا ۲/۷۴ تغییر می‌کند. بیشترین مقدار بی‌هنجاری Eu در پروفیل اول مربوط به کانسنک خاکستری مایل به سیاه و در پروفیل دوم مربوط به کانسنک کرم مایل به سبز است. در این دو کانسنک‌ها آهن فراوانی پایینی نسبت به بقیه کانسنک‌ها دارد.

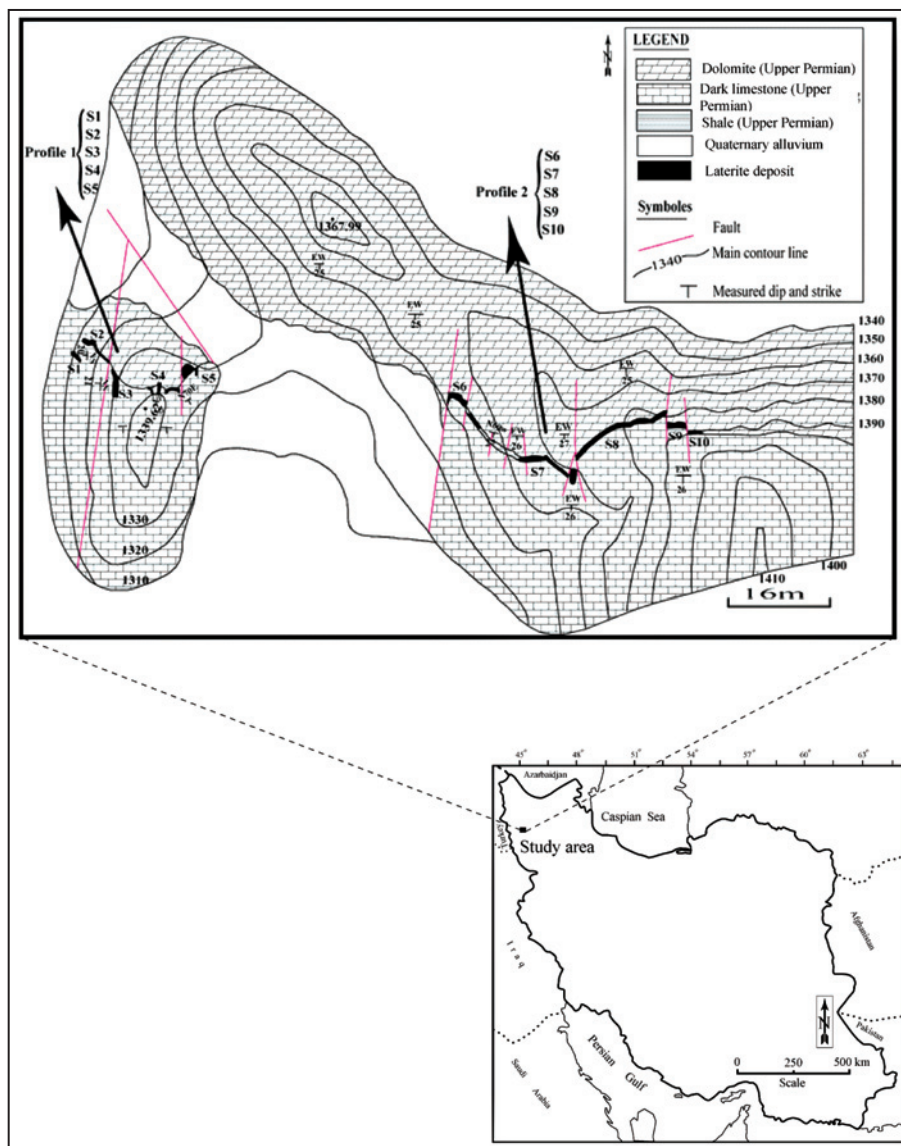
### ۱۰- نتیجه گیری

- ضرایب همبستگی میان عناصر پیشنهاد می کند که فسفات های ثانویه (زینوتایم، موناژیت و رابدوفان)، روتیل و مسکوویت- ایلیت میزبانان اصلی REE ها در نهشته لاتریت حیدرآباد هستند.  
- الگوی پراکندگی REE ها در کانسنگ ها بر طبیعت مافیک سنگ مادر این نهشته تأکید دارد.

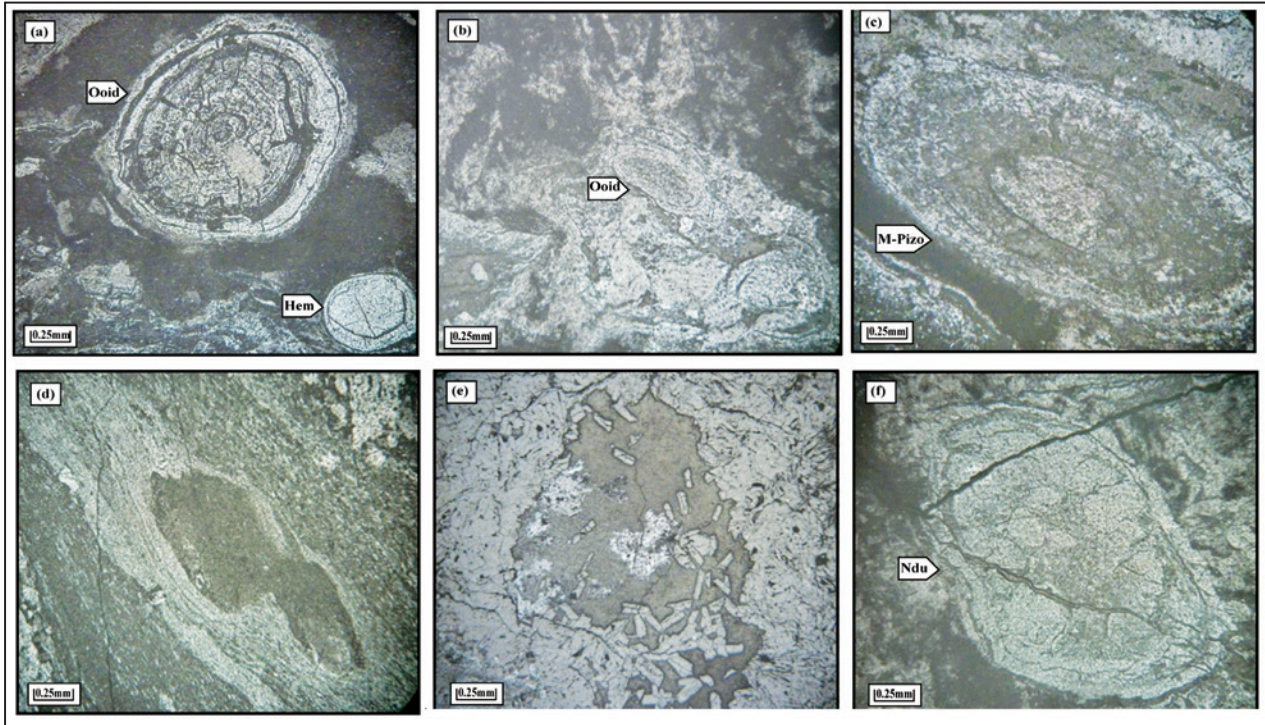
### سیاسگزاری

نگارندگان از حمایت های مالی معاونت پژوهشی و مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده اند، بنابراین نهایت سپاس خود را از آنها ابراز می دارند. همچنین از نظرات و پیشنهادات ارزنده داوران مجله سیاسگزاری می شود.

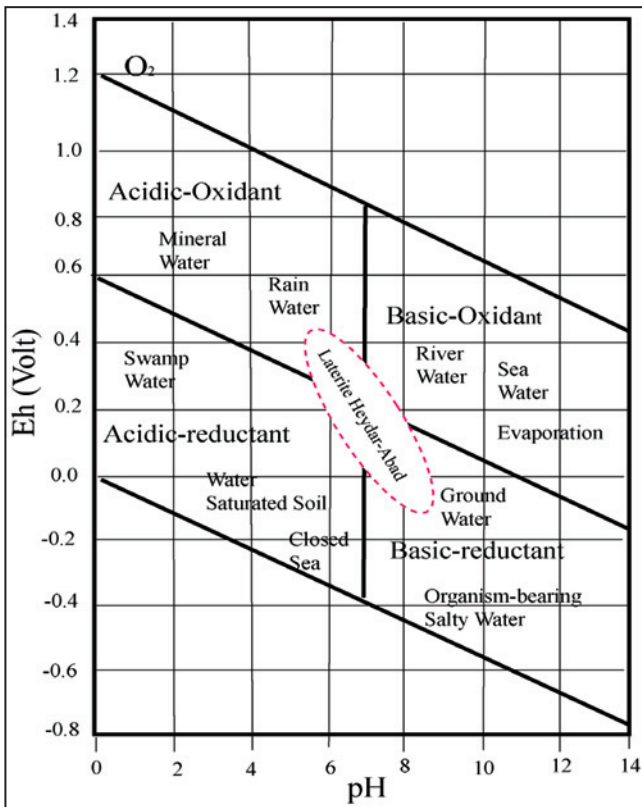
- مطالعات میکروسکوپی نشان می دهد که این نهشته یک منشأ برجا دارد و نیروهای زمین ساختی و انقباض ژل دو سازوکار اصلی تأثیرگذار در بافت کانسنگ ها هستند.  
- این نهشته در یک محیطی با عملکرد آب های سطحی اکسیدی-اسیدی تا آب های زیرزمینی بازی و احیا تشکیل شده است.  
- همراهی کانی های کلریتوبید، دیاسپور، کائولینیت، مسکوویت، مگنتیت، هماتیت، روتیل و کزندوم در کانسنگ ها آشکار می کند که این نهشته، دگرگونی در حد رخساره شیست سبز را تجربه کرده است.  
- بررسی های زمین شیمیایی نشان می دهد که تغییرات pH محلول های هوازده کننده، عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک سد زمین شیمیایی و جذب سطحی و روبش توسط فازهای کانیایی نوشکل (Neomorph) از عوامل کلیدی در پراکندگی، تثبیت و تحرک REE ها در کانسنگ های این نهشته بوده اند.



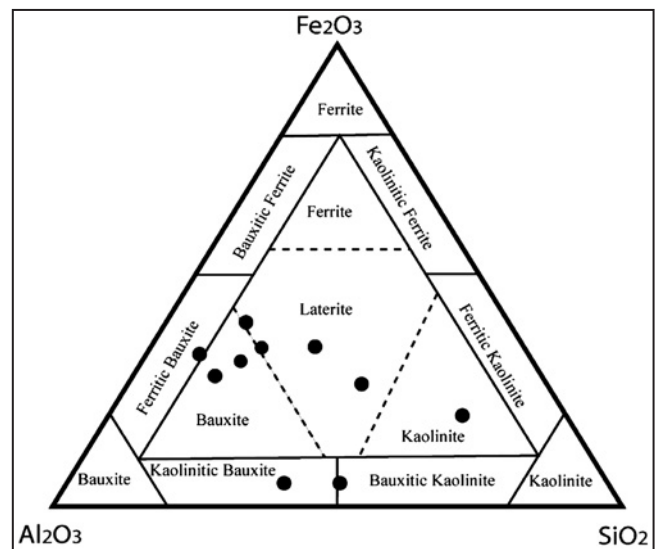
شکل ۱- نقشه زمین شناسی محدوده ذخیره معدنی، برگرفته از شرکت منطقه ای معادن آذربایجان غربی (۱۳۷۴) با کمی تغییرات.



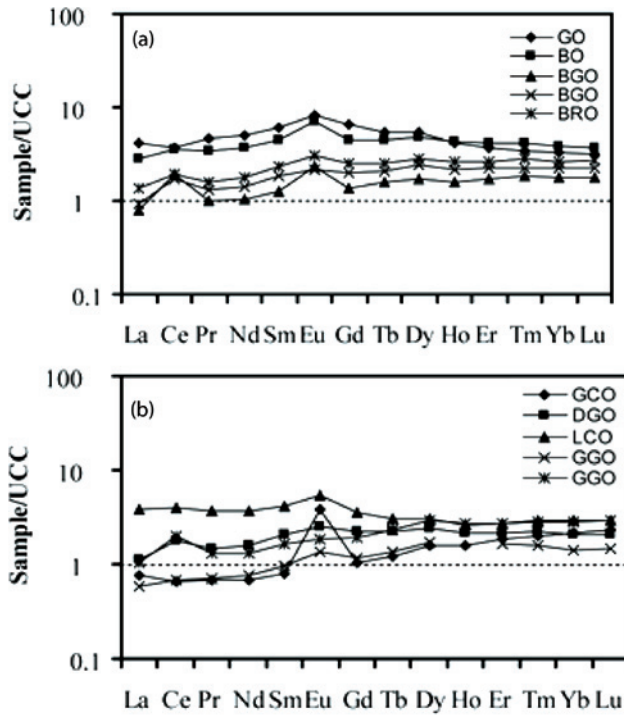
شکل ۲- (a) یک نوع آئید با حلقه‌های کاملاً مشخص به همراه شکستگی‌هایی در حاشیه هماتیته ناشی از تراکم ژل آلومینوسیلیکاتی؛ (b) آئید مرکب؛ (c) ماکرو پیزوئید؛ (d) بافت جریان-کلمورفی در نتیجه عملکرد نیروهای زمین‌ساختی؛ (e) بافت پان‌ایدیومورفیک گرانولار و ترک‌های مرکزی؛ (f) شکستگی‌های تداوم یافته در متن کانستگ. همه شکل‌ها در نور بازتابی و به صورت XPL گرفته شده‌اند. نشانه‌های اختصاری به کار رفته عبارتند از: Ooid=آئید، Hem=هماتیت، M-Pizo=ماکرو پیزوئید. Ndu=گرهک (نودول).



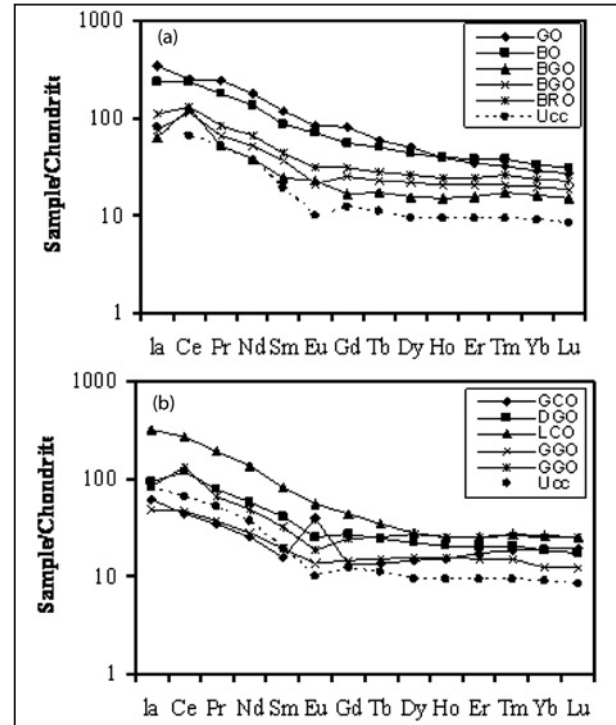
شکل ۴- نمودار Eh-pH محیط‌های اتمسفریک طبیعی با توجه به حیطه پایداری کانی‌ها (Garrels & Christ, 1965) که در آن موقعیت نهشته نهشته لاتریت حیدرآباد مشخص شده است. مقادیر pH و Eh تشکیل کانی‌های گیبسیت، هماتیت، گوتیت و شاموزیت از Temur & Kansun (2006) برگرفته شده است.



شکل ۳- موقعیت کانستگ‌های مورد مطالعه در نمودار سه متغیره  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  (Alewa, 1994).



شکل ۶- الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده نسبت به UCC (Taylor & McLennan, 1985) برای کانسنگ‌های پروفیل (a) اول و (b) دوم.



شکل ۵- الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت (Taylor & McLennan, 1985) برای کانسنگ‌های پروفیل (a) اول و (b) دوم.

جدول ۱- نتایج تجزیه پراش پرتو X (XRD) کانسنگ‌های مورد مطالعه.

شماره نمونه	نوع کانسنگ	فازهای کانایی اصلی	فازهای کانایی فرعی	فازهای کانایی جزئی
S1	کانسنگ سبز	پاراگونیت، هماتیت، کلریت، مگنتیت، مسکوویت- ایلیت، گوتیت	کوارتز، دولومیت	-
S2	کانسنگ سیاه	هماتیت، کلریتوید، دیاسپور، اندریت	دولومیت، کوارتز، پیریت، مارگاریت، آمیتیت	-
S3	خاکستری مایل به سیاه	کلریتوید، دیاسپور، آمیتیت	دولومیت	کلسیت، کوارتز
S4	خاکستری مایل به سیاه	کلریتوید، دیاسپور، آمیتیت، مگنتیت	کوارتز	کلسیت، دولومیت
S5	سرخ آجری	کلریتوید، کزندوم، هماتیت	آمیتیت، روتیل، دولومیت، کوارتز، دیاسپور، مگنتیت، گوتیت	-
S6	کرم مایل به سبز	پاراگونیت، روتیل، مسکوویت- ایلیت، آمیتیت، هماتیت	-	-
S7	سبز تیره	برترین، گوتیت	روتیل، مونت موریلونیت، دولومیت، کوارتز، مارگاریت	-
S8	کرم روشن	مارگاریت، روتیل	-	-
S9	سبز مایل به خاکستری	کوارتز، کلریت	روتیل، مسکوویت- ایلیت، دولومیت	-
S10	سبز مایل به خاکستری	آمیتیت، کلریتوید، کزندوم	روتیل، دیاسپور، دولومیت، کوارتز، مارگاریت	-

جدول ۲- ترکیب شیمیایی کانسنگ‌های مورد مطالعه.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
	Profile-1					Profile-2				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.9	41.2	40.4	44.9	51.6	41.7	30.6	45	19.5	51.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.3	32.5	27	24.1	26.5	3.37	26.5	3.54	16.2	23.5
SiO <sub>2</sub>	32.9	12.2	16.4	14.2	8.29	38.6	22.8	30.4	52.9	12.7
TiO <sub>2</sub>	2.64	3.76	3.94	4.26	4.98	4.22	4.02	4.81	1.3	4.37
CaO	0.52	1.89	0.23	0.48	0.19	2.81	3.65	9.5	0.19	0.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.21	0.14	0.22	0.19	0.15	0.13	0.16	0.05	0.18
K <sub>2</sub> O	1.44	0.05	0.005	0.03	0.005	1.45	0.02	0.1	0.45	0.04
MgO	1.19	0.23	2.65	2.8	0.14	0.16	0.7	0.27	4.4	0.83
MnO	0.02	0.07	0.1	0.08	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	0.06	0.07
Na <sub>2</sub> O	2.2	0.7	0.05	0.05	0.05	3.7	0.4	1.2	0.3	0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.04	0.08	0.1	0.09	0.05	0.08	0.1	0.06	0.08
LOI	8.74	5.88	7.38	8.1	7.19	5.91	9.79	5.6	5.17	5.44
Sum	99.04	98.73	98.38	99.32	99.24	102.13	98.7	100.69	100.58	98.85

ادامه جدول ۲

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
	Profile-1					Profile-2				
Ba	90	5	5	20	130	50	70	5	20	30
Sr	310	270	10	40	80	680	160	460	40	80
Y	80	80	20	40	40	30	30	40	30	40
Zn	87	14	21	40	51	13	14	6	97	81
Zr	370	670	620	690	850	730	580	740	180	740
Co	39.5	31.1	71.1	45.6	26.1	3.5	23.3	4.5	25.1	12.7
CS	7	0.3	0.1	0.05	0.05	3.7	0.05	0.2	0.7	0.2
CU	14	8	2.5	2.5	125	136	2.5	6	14	71
Ni	308	199	137	95	90	42	48	28	125	97
Ta	3.7	5.5	6.1	6.3	7.8	6.1	5.9	7.1	1.2	7
U	6.31	14.9	14.3	14.9	18	22.7	26.2	26.8	2.74	16.5
V	667	583	484	591	657	565	412	426	162	573
Ga	34	54	55	60	60	40	49	57	26	69
Rb	51.5	1	0.4	0.4	0.4	38.7	0.7	1.7	15.6	1.5
Hf	10	15	16	17	20	17	15	19	5	19
Th	17	27	28.9	32.2	37.4	23.7	24	34.2	6.7	37.1
La	125	85.7	23.8	28.1	41.3	22.8	34.2	117	17.8	31
Ce	238	226	121	108	125	42	115	257	44.4	127
Pr	33	24.2	7.17	9.15	11.4	4.8	10.6	26	5.01	9.16
Nd	129	95.5	27	37.4	46.3	17.9	41.2	95.9	20.2	34.6
Sm	27.6	19.9	5.7	8.4	10.3	3.6	9.3	18.6	4.4	7.5
Eu	7.29	6.25	2.01	1.88	2.67	3.39	2.22	4.8	1.19	1.63
Gd	24.9	16.9	5.13	7.63	9.4	3.97	8.35	13.4	4.43	7.36
Tb	3.49	2.91	1	1.32	1.63	0.79	1.42	1.98	0.88	1.48
Dy	18.9	16.8	6.05	8.49	9.94	5.61	8.46	10.8	6.04	10.2
Ho	3.33	3.38	1.29	1.75	2.11	1.29	1.74	2.12	1.32	2.14
Er	8.62	9.46	3.87	5.17	6.09	4.25	4.88	6.35	3.74	6.31
Tm	1.14	1.34	0.62	0.74	0.92	0.67	0.74	0.98	0.53	0.92
Yb	7.3	8.4	4.0	5.0	5.9	4.8	4.6	6.5	3.1	6.3
Lu	1.03	1.18	0.57	0.71	0.86	0.74	0.66	0.95	0.47	0.95

جدول ۳- خلاصه مشخصات شاخص‌های هوازدگی.

Index	Abbreviation Name	Formula	References
CWI	Chemical Weathering Index	$(100) [(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + L.O.I)] / \text{all chemical components}$	Sueoka (1988)
CIA	Chemical Index of Alteration	$(100) [(Al_2O_3) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$	Nesbitt & Young (1982)
MIA	Mineralogical Index of Alteration	$2(CIA - 50)$	Voicu et al. (1997); Voicu & Bardoux (2002)
CIW	Chemical Index of Weathering	$(100) [(Al_2O_3) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$	Harnois (1988)
PIA	Plagioclase Index of Alteration	$(100) [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)]$	Fedo et al. (1995)
WI-1	Weathering Index 1	$[(SiO_2 + CaO) / (Fe_2O_3 + TiO_2)]$	Darmody et al. (2005)
WI-2	Weathering Index 2	$[(SiO_2 + CaO) / (Fe_2O_3 + TiO_2 + Al_2O_3)]$	Darmody et al. (2005)

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های هوازدگی برای کانسنگ‌های افق لاتریتی مورد مطالعه.

Index	CWI	CIA	MIA	CIW	PIA	WI-1	WI-2
<b>Optimum fresh value</b>	<50	≤50	≤50	≤50	≤50	-	-
<b>Optimum weathered value</b>	100	100	100	100	100	-	-
<b>Profil 1</b>							
Green ores	60.03	86.16	72.32	90.5	89.99	1.46	0.68
Black ores	84.13	93.55	87.10	93.67	93.66	0.39	0.19
Blackish grey ores	79.51	99.24	98.49	99.26	99.26	0.54	0.24
Blackish greyoers	81.35	98.65	97.30	98.72	98.72	0.52	0.21
Brick red ores	90.77	99.49	98.98	99.50	99.50	0.27	0.11
<b>Profil 2</b>							
Greenish cream ores	52.26	82.57	65.134	85.28	84.78	5.46	0.91
Dark green ores	71.36	87.54	75.08	87.60	87.59	0.87	0.45
Light cream ores	58.64	80.65	61.29	80.79	80.76	4.78	0.75
Grayish green ores	39.54	94.28	88.56	96.94	96.85	3.03	1.61
Grayish green ores	85.17	99.01	98.02	99.09	99.09	0.47	0.17



جدول ۵- محاسبه فاکتور غنی‌شدگی REEs برای کانسنگ‌های لاتریتی همراه با مقادیر نسبت‌های عنصری. علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: کانسنگ‌های سبز (S1:GO)، سیاه (S2:BO)، خاکستری مایل به سیاه (S3:BGO)، خاکستری مایل به سیاه (S4:BGO)، قرمز آجری (S5:BRO)، کرم مایل به سبز (S6:GCO)، سبز تیره (S7:DGO)، کرم روشن (S8:LGO)، سبز مایل به خاکستری (S9:GGO)، و سبز مایل به خاکستری (S10:GGO).

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
	GO	BO	BGO	BGO	BRO	GCO	DGO	LCO	GGO	GGO
La	316.67	185.67	-20.67	-6.33	37.67	-24.00	14.00	290.00	-40.67	3.33
Ce	271.88	253.13	89.06	68.75	95.31	-34.38	79.69	301.56	-30.63	98.44
Pr	364.79	240.85	0.99	28.87	60.56	-32.39	49.30	266.20	-29.44	29.01
Nd	396.15	267.31	3.85	43.85	78.08	-31.15	58.46	268.85	-22.31	33.08
Sm	513.33	342.22	26.67	86.67	128.89	-20.00	106.67	313.33	-2.22	66.67
Eu	728.41	610.23	128.41	113.64	203.41	285.23	152.27	445.45	35.23	8.52
Gd	555.26	344.74	35.00	100.79	147.37	4.47	119.74	252.63	16.58	93.68
Tb	445.31	354.69	56.25	106.25	154.69	23.44	121.88	209.38	37.50	131.25
Dy	440.00	380.00	72.86	142.57	184.00	60.29	141.71	208.57	72.57	191.43
Ho	316.25	322.50	61.25	118.75	163.75	61.25	117.50	165.00	65.00	167.50
Er	274.78	311.30	68.26	124.78	164.78	84.78	112.17	176.09	62.61	174.35
Tm	245.45	306.06	87.88	124.24	178.79	103.03	124.24	196.97	60.61	178.79
Yb	228.83	278.38	80.18	125.23	165.77	116.22	107.21	192.79	39.64	183.78
Lu	221.88	268.75	78.13	121.88	168.75	131.25	106.25	196.88	46.88	196.88
(LREE/HREE) <sub>N</sub>	5.227	4.274	4.316	3.388	3.514	2.124	3.844	7.028	2.372	3.020
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.57	6.89	4.02	3.80	4.73	3.21	5.02	12.16	3.88	3.33
Ce*	0.86	1.15	2.16	1.57	1.33	0.90	1.41	1.06	1.09	1.75
Eu*	0.85	1.04	1.14	0.72	0.83	2.74	0.77	0.93	0.82	0.67

## کتابنگاری

- ابدالی، ش.، ۱۳۸۹- بررسی کانی‌سازی و ژئوشیمی افق لاتریتی حیدرآباد، جنوب ارومیه، استان آذربایجان غربی، رساله کارشناسی ارشد گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه، ۱۳۴ ص.
- شرکت منطقه‌ای معادن آذربایجان غربی، ۱۳۷۴- گزارش اکتشافی بوکسیت حیدرآباد، ۴۰ ص.
- عابدینی، ع. و کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۸- بررسی فاکتورهای کنترل‌کننده توزیع عناصر جزئی (شامل عناصر نادر خاکی) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در کانی‌شسته، شرق بوکان، شمال غرب ایران، مجله علوم زمین، شماره ۷۲، ص ۱۵۴-۱۴۵.
- عابدینی، ع. و کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۹- ژئوشیمی کانسنگ‌های بوکسیتی- لاتریتی جوانمرد، شمال خاور بوکان، استان آذربایجان غربی، مجله زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۵، ص ۳۸-۲۹.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا. و حاج‌علیلو، ب.، ۱۳۸۷ الف- ویژگی‌های زمین‌شناسی- کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر کمیاب در نهشته بوکسیت آعاجری، جنوب شاهین دژ، شمال غرب ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲، ص ۳۵۶-۳۴۱.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، حاج‌علیلو، ب. و جهانگیری، ا.، ۱۳۸۷ ب- مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی در نهشته پرمو- تریاس شمال خاوری بوکان، شمال باختری ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳، ص ۴۷۲-۴۵۹.
- عابدینی، ع.، ۱۳۸۷- بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز نهشته‌های بوکسیتی- لاتریتی پرمین تا تریاس در شمال غرب ایران، رساله دکترای گروه زمین‌شناسی دانشگاه تبریز، ۱۸۴ ص.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ ص.

## References

- Aleva, G. J. J., 1994- Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry. ISIRC, Wageningen.
- Alipour, S., 2006- "Lag" a new classification system for concealed minerla exploration. Iranian Journal of Science and Tecnology Transaction A- Science 30, pp.35-56.
- Bardossy, G. Y. & Aleva, G. Y. Y., 1990- Lateritic Bauxites. Akademia, Kiado Budapest, 646p.
- Bardossy, G., 1982- Karst Bauxites. Elsevier Scientific, Amsterdam, 441p.
- Boulangé, B., 1984- Les formation bauxitiques lateriques de Cote d Ivoire. Paris: Travaux et Doduments ORSTOM.
- Calagari, A. A. & Abedini, A., 2007- Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite deposit at Kanisheeteh, east of Bukan, Iran. Journal of Geochemical Exploration, 94, 1-18.
- Compton, J. S., White, R. A. & Smith, M., 2003- Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the western Cape, south Africa. Chemical Geology, 201, pp.239-255.
- Darmody, R. G., Thorn, C. E. & Allen, C. E., 2005- Chemical weathering and boulder mantles, Kärkevagge, Swedish Lapland. Geomorphology, 67, pp.159-170.

- Fedo, C. M., Nesbitt, P. & Young, G. M., 1995- Unraveling the effect of K metasomatism in sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, pp.363-381.
- Ganguly, J., 1969- Chloritoid stability and related paragenesis: Theory, experiments and applications. *American Journal of Sciences*, 267, pp.910–944.
- Garrels, R. M. & Christ, C. L., 1965- *Solution, Minerals and Equilibria*. Harper and Row, New York, 450p.
- Gonzalez-Lopez, J. M., Bauluz, B., Fernandez-Nieto, C. & Oliete, A. Y., 2005- Factors controlling the trace element distribution in fine-grained rocks: the Albian kaolinite-rich deposits of the Oliete Basin (NE Spain). *Chemical Geology*, 214, pp.1-19.
- Harnois, L., 1988- The C.I.W. index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 23, pp.1-101.
- Ma, J., Wei, G., Xu, Y., Long, W. & Sun, W., 2007- Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, pp.3223–3237.
- Maksimovic, Z. & Panto, G. Y., 1991- Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece. *Geoderma*, 51, 93–109.
- Malpas, J., Duzgoren-Aydin, N. S. & Aydin, A., 2001- Behaviour of chemical elements during of pyroclastic rocks. *Hong Kong. Environmental International*, 26, pp.359- 368.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G. & Dinelli, E., 2007- Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (western Sardinia, Italy): Insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences*, 96, pp.887–902.
- Mongelli, G., 2002- Growth of hematite and boehmite in concretions from ancient karst bauxite: Clue for past climate. *Catena*, 50, pp. 43–51.
- Mutakyahwa, M. K. D., Ikingura, J. R. & Mruma, A. H., 2003- Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 36, pp.357–369.
- Muzaffer-Karadağ, M., Küpeli, S., Arýk, F., Ayhan, A., Zedef, V. & Döyen, A., 2009- Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya–Southern Turkey). *Chemie. Der Erde- Geochemistry*, 69, pp.143–159.
- Nesbitt, H. W. & Wilson, R. E., 1992- Resent chemical weathering basalts. *American Journal of Earth Sciences*, 292, pp. 740–777.
- Nesbitt, H. W. & Young, G. M., 1982- Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 279, pp. 715–717.
- Oh, N. H. & Richter, D. D., 2005- Elemental translocation and loss from three highly weathered soil - bedrock profiles in the southeastern United States. *Geoderma*, 126, pp.5-25.
- Patino, L. C., Velbel, M. A., Price, J. R. & Wade, J. A., 2003- Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala. *Chemical Geology*, 202, pp. 343-364.
- Patino, L. C., Velbel, M. A., Price, J. R. & Wade, J. A., 2005- Element redistribution during weathering of volcanic rocks in sedimentary landscapes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, A683.
- Rollinson, H., 1993- *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical.
- Ronov, A. B., Balashov, Y. A. & Migdisov, A. A., 1967- Geochemistry of REE's in a sedimentary cycle. *Geochemistry International*, 14, pp.1–17.
- Roy, P. D. & Smykatz-Kloss, W., 2007- REE geochemistry of the recent playa sediments from the Thar Desert, India: An implication to playa sediment provenance. *Chemie der Erde- Geochemistry*, 67, pp.55- 68.
- Sueoka, T., 1988- Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index. *Second Int. Conf. Geomech. Trop. Soils*, Singapore, 1, pp.55-61.
- Taylor, S. R. & McLennan, S. M., 1985- *The continental crust: Its composition and evolution*. Oxford, Blackwell.
- Temur, S. & Kansun, G., 2006- Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, pp. 512–522.
- Urai, J. & Feenstra, A., 2001- Weakening associated with the diasporic-corundum dehydration reaction on metabauxites: an example from Naxos (Greece). *Journal of Structural Geology*, 23, pp. 941-950.
- Valeton, I., 1972- *Bauxites*. Elsevier. 226p.
- Voicu, G. & Bardoux, M., 2002- Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama-Mazaruni greenstone belt at Omai gold mine, Guinea shield. *Applied Geochemistry*, 17, pp. 321-336.
- Voicu, G., Bardoux, M. & Voicu, D., 1997- Mineralogical norm calculations applied to tropical weathering profiles. *Mineralogical Magazine*, 61, pp.185–196.
- Wang, Q., Deng, J., Liu, X., Zhang, Q., Sun, S., Jiang, C. & Zhou, F., 2010- Discovery of the REE minerals and its geological significance in the Quyang bauxite deposit, West Guangxi, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39, 701–712.
- White, A. F., Bullen, T. D., Schultz, M. S., Blum, A. E., Huntington, T. G. & Peters, N. E., 2001- Differential rates of feldspar weathering in granitic regoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, pp. 847– 869.

# Mineralization and Geochemistry of Rare Earth Elements of Heydar-Abad Laterite Horizon, South of Urmia, West Azarbaijan Province, Iran

S. Alipour<sup>1\*</sup>, A. Abedini<sup>1</sup> & S. Abdali<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran.

<sup>2</sup> M. Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran.

Received: 2012 July25

Accepted: 2012 December15

## Abstract

The Heydar-Abad laterite horizon is located at 65 km south of Urmia, West Azarbaijan province. This horizon was developed as stratiform bed within the carbonate rocks of the late Permian Ruteh Formation. Based on the petrographical and mineralogical studies, the ores of this horizon contain micro-granular, fluidal-collomorphic, panidiomorphic-granular, spastoidic, pelitomorph, nodular, and ooidic textures and have an authigenic origin. According to the mineralogical investigations, the ores of this horizon include minerals such as diasporite, corundum, hematite, magnetite, goethite, rutile, paragonite, margarite, amesite, berthierine, montmorillonite, chlorite, chloritoid, muscovite-illite, quartz, pyrite, anhydrite, calcite, and dolomite. The presence of high quantities of silicate minerals indicates immaturity and poor draining system during the development of this residual horizon. The results of chemical analyses show that Eu and Ce anomalies in the ores are within the ranges of 0.67 to 2.74 and 0.86 to 2.16, respectively. The calculations of values of enrichment factor of elements in two selected profiles reveal that two processes of leaching and fixation are major regulators of concentrations of REEs in ores of this horizon. The results obtained from the mineralogical and geochemical studies show that changes of pH of weathering solution, fluctuations of level of ground-waters, alteration intensity, and function of carbonate bedrocks as a geochemical barrier, adsorption, and scavenging have played an important role in distribution of the rare earth elements (REEs) in this deposit. The correlation coefficients show that the secondary phosphates, rutile and muscovite-illite are potential hosts for REEs in the ore.

**Keywords:** Laterite, Corundum, Mineralization, Heydar-Abad, Urmia.

For Persian Version see pages 195 to 204

\*Corresponding author: S. Alipour; E-mail: s.alipour@urmia.ac.ir