

کانی شناسی، زمین شیمی و کاربردهای صنعتی کانسنگ های بوکسیت درزی ولی، خاور بوکان، شمال باختر ایران

علی عابدینی^۱، صمد علیپور^۱ و مریم خسروی^۲

^۱ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۱۷

چکیده

نهشته بوکسیت درزی ولی، در فاصله ۲۰ کیلومتری خاور بوکان، جنوب استان آذربایجان غربی (شمال باختر ایران) واقع شده است. این نهشته به صورت لایه ها و عدسی های منفصل چینه سان در درون سنگ های کربناتی سازند روته (پرمین بالایی) گسترش یافته است. مطالعات کانی شناسی نشان می دهند که آب های سطحی با ماهیت اکسیدی-اسیدی و آب های زیرزمینی با ماهیت بازی-احیا نقش بارزی در توسعه و تکامل این نهشته ایفا نموده اند. بر اساس شواهد صحرایی و مطالعات زمین شیمیایی، سنگ های بازالتی محتمل ترین سنگ مادر این نهشته هستند. محاسبات فاکتور غنی شدگی آشکار می کنند که عناصر Si, Ca, Mg, Na, K, Mn, Co, Rb و Hf در طی تکوین این نهشته شسته شده، و عناصر Al, Ti, V, Th, Ga, Zr, Nb, U, Cr غنی شده اند. این در حالی است که عناصر Fe, P, Ni, Ba, Y و متحمل فرایندهای شستشو- تثبیت شده اند. نتایج به دست آمده نشان می دهند که عواملی مانند جذب سطحی، رویش، تمرکزهای بازماندی، بافرینگ محلول های هوازده کننده توسط سنگ بستر کربناتی، کنترل کانیایی، تفاوت در شدت دگرسانی، مواد آلی، و نوسانات سطح سفره آب های زیرزمینی نقش ارزنده ای در توزیع عناصر اصلی، فرعی، و جزئی در این نهشته ایفا نموده اند. این مطالعه همچنین آشکار می کند که کانسنگ های فقیر از آهن و غنی از آهن این نهشته به ترتیب ویژگی های مناسبی برای استفاده در صنایع دیرگداز و سیمان را دارا هستند.

کلیدواژه ها: بوکسیت، زمین شیمی، توزیع عناصر، کاربردهای صنعتی، درزی ولی، بوکان.

*نویسنده مسئول: علی عابدینی

E-mail: abedini2020@yahoo.com

۱- پیش گفتار

منطقه درزی ولی، به مختصات جغرافیایی "۵۱'، ۲۰'، ۴۶° تا "۵۳'، ۲۳'، ۴۶° طول خاوری و "۰۰'، ۳۰'، ۳۶° تا "۵۳'، ۳۲'، ۳۶° عرض شمالی، در فاصله ۲۰ کیلومتری خاور شهرستان بوکان، جنوب استان آذربایجان غربی (شمال باختر ایران) واقع شده است. وقفه های رسوب گذاری در مقطع زمانی پرمین در این منطقه با تشکیل و توسعه یک نهشته بازماندی با ترکیب بوکسیتی در داخل سنگ های کربناتی روته همراه بوده است (شکل ۱). تا به حال مطالعات انگشت شماری بر روی مسائل زمین شناسی این نهشته توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است. مطالعات زمین شناسی ناحیه ای، بررسی های زمین آماری و اکتشافات چکشی به منظور شناسایی کانسنگ های بوکسیتی در این منطقه و مناطق مجاور به ترتیب توسط (Balkay & Samimi, 1972)، حسامی (۱۳۷۰)، افتخارنژاد (۱۳۵۵) و آقاباتی (۱۳۸۵) انجام شده است. همچنین، بررسی های کانی شناسی و زمین شیمی نهشته های بوکسیتی، لائیتی و کانولینیتی در مناطق مجاور منطقه درزی ولی به تفصیل توسط پژوهشگرانی نظیر (Kamineni & Efthekhar-Nezad, 1977)، عابدینی و همکاران (۱۳۸۷، ۱۳۹۱)، عابدینی و کلاگری (۱۳۸۸ الف و ب، ۱۳۸۹)، (Abedini & Calagari, 2013a, b, c)، (Abedini et al., 2014) مورد توجه قرار گرفته است. در سال های اخیر، کارهای تحقیقاتی گسترده ای روی کانی شناسی و کنترل کننده های زمین شیمیایی مؤثر در توزیع عناصر اصلی، فرعی، و جزئی در نهشته های بوکسیتی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است (Mameli et al., 2007; Calagari et al., 2010; Zarasvandi et al., 2008, 2010). تا به حال چنین مطالعاتی بر روی نهشته بوکسیتی درزی ولی بوکان انجام نشده است. این مقاله به بررسی کانی شناسی، فاکتورهای کنترل کننده تحرک، توزیع و غنی شدگی عناصر اصلی، فرعی و جزئی در طی تکوین و توسعه کانسنگ های این نهشته و تعیین کاربردهای احتمالی آنها با استفاده از داده های زمین شیمیایی می پردازد.

۲- روش مطالعه

مطالعه کانسنگ های بوکسیتی در منطقه درزی ولی در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. بخش صحرایی شامل بررسی شکل و هندسه نهشته، نقش فرایندهای زمین ساختی در ریخت شناسی کانسنگ ها، تیپ های کانسنگی حاضر در منطقه، نمونه گیری از سنگ های آذرین منطقه، روابط صحرایی، نمونه گیری های پراکنده و غیر سیستماتیک از کلیه لایه ها و عدسی های بوکسیتی، و در نهایت، انتخاب یک نیمرخ مناسب به سبب برای ۸ متر (عمود بر امتداد یکی از لایه های بوکسیتی که کلیه انواع کانسنگی حاضر در محدوده مورد مطالعه را تحت پوشش قرار می دهد) جهت نمونه گیری سیستماتیک بوده است. در این بخش ۸۰ نمونه سنگی بر اساس تغییرات در ویژگی های فیزیکی نظیر رنگ، چگالی، سختی و بافت از کانسنگ ها و سنگ های همراه برداشت شدند. بخش آزمایشگاهی با شناسایی ترکیب کانی شناسی کانسنگ ها با استفاده از آنالیز پراش پرتو X (XRD) به تعداد ۱۹ نمونه در شرکت کانساران بینالود شروع گردید. پس از آن، برای مطالعات زمین شیمیایی و تعیین کاربردهای احتمالی نهشته، مبادرت به انجام آنالیزهای طیف سنج انتشار اتمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-AES) (با کد آنالیزی ME-ICP06) و طیف سنج جرمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-MS) (با کد آنالیزی ME-MS81) به تعداد ۱۵ نمونه از کانسنگ ها در نیمرخ انتخابی و ۱ نمونه از سنگ های آذرین منطقه به ترتیب برای تعیین مقادیر عناصر اصلی و فرعی، و جزئی در آزمایشگاه شرکت ALS Chemex کشور کانادا شد. مقادیر LOI نمونه های یاد شده توسط شرکت یاد شده با اندازه گیری پیش و پس از حرارت دادن (۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت) محاسبه شدند. نتایج تجزیه های شیمیایی عناصر اصلی، فرعی و جزئی به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند. در این بررسی، افزون بر انجام کارهای یاد شده بالا، برای تفسیرهای زمین شیمیایی، ضرایب همبستگی اسپیرمن بین برخی از عناصر با استفاده از نرم افزار SPSS، محاسبه شد (جدول ۳).

۳- زمین‌شناسی

بارزترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازندهای ماسه‌سنگی، شیلی، کربناتی روته (پرمین بالایی)، شیلی، ماسه‌سنگی شمشک (ژوراسیک)، کنگلومرای، شیلی (کرتاسه زیرین)، آهکی میکروکریستالیزه (کرتاسه بالایی) و رسوبات پلیوکواترنری هستند (شکل ۱). نهشته بوکسیتی در این منطقه در درون سنگ‌های کربناتی روته قرار دارد (شکل ۱). از نظر ژئومتری، این نهشته به صورت لایه‌ها و عدسی‌های منفصل چینه‌سان (شکل ۲- الف و ب) به صورت پنج افق کاملاً مجزا، با سه روند NE-SW، NW-SE و E-W با ستریابی متغیر از ۲ الی ۱۷ متر و در مجموع طولی بالغ بر ۱ کیلومتر به طور هم‌شیب در داخل واحدهای کربناتی سازند روته توسعه یافته‌اند. عملکرد سه گسل بر روی دو تا از این لایه‌ها سبب تبدیل آن دو افق به ۵ بلوک سنگی مجزا شده است (شکل ۱). مرز بین این بلوک‌ها در صحرا به واسطه توسعه نسبتاً شدید بافت‌های کاتاکلاستیک قابل تشخیص است. از جمله سیماهای زمین‌شناسی مهم این نهشته می‌توان به وجود مرزهای کاملاً تند و مشخص بین لایه‌ها و عدسی‌های بازماندی با سنگ‌های درونگیر کربناتی و وجود آثاری از سنگ‌های آذرین بازالتی در درون سنگ‌های درونگیر کربناتی اشاره کرد. در یک نیرخ انتخابی بر روی یکی از لایه‌های بازماندی، با توجه به رنگ و سایر ویژگی‌های فیزیکی، ۴ واحد سنگی مجزا تشخیص داده شد. این واحدهای سنگی به ترتیب از پایین به بالا شامل ۱) کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای، ۲) کانسنگ‌های کرم مایل به سبز، ۳) کانسنگ‌های سبز مایل به خاکستری و ۴) کانسنگ‌های سبز تیره هستند (شکل ۳). وجود رنگ‌های قرمز قهوه‌ای، کرم مایل به سبز، سبز مایل به خاکستری و سبز تیره، دلالت بر وجود شرایط متفاوت اکسیداسیون و احیا در تشکیل این نهشته دارد. از مهم‌ترین ویژگی‌های مزوسکوپی کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای می‌توان به جلای چرب، سختی نسبتاً پایین، اگرگات خاکی، حضور آئید، پیروید و گرهک‌های آهن در سطح، آثاری از دندریت‌های منگنز، لیمونیت‌زایی، وجود خلل و فرج‌های شکل دار، و بافت کلوform و ماکروپیرویدیدی اشاره نمود. این در حالی است که کانسنگ‌های کرم مایل به سبز دارای سختی بالا، لمس صابونی، دندریت‌های منگنز، سطح شکست صدفی و بافت پلیتومورفیک می‌باشند. اگرگات خاکی، لمس صابونی، و وجود بافت‌های پلیتومورفیک و جریانی از ویژگی‌های بارز نمونه‌های دستی مربوط به کانسنگ‌های سبز مایل به خاکستری و بافت توده‌ای و آثاری از آئید و پیروید از مهم‌ترین ویژگی‌های مزوسکوپی کانسنگ‌های سبز تیره هستند.

۴- کانی‌شناسی نهشته

آنالیزهای پراش پرتو X (XRD) نشان می‌دهند کانسنگ‌های مورد بررسی از تنوع کانی‌شناسی نسبتاً خوبی برخوردار هستند. بر این اساس، نهشته بوکسیت درزی ولی از پنج دسته کانی تشکیل شده است که عبارتند از: ۱) هیدروکسیدها و اکسیدهای آلومینیم (دیاسپور، بوهمیت و کروندم)، ۲) هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت)، ۳) اکسیدهای تیتانیم (روتیل و آناتاز)، ۴) سیلیکات‌ها (پیروفیلیت، ایلیت، شاموزیت، کائولینیت، مسکوویت، کلریت و کوارتز) و ۵) کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت) (جدول ۴). در این بین، کروندم تنها در کانسنگ‌های سبز مایل به خاکستری، و دولومیت در کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای و سبز مایل به خاکستری شناسایی شده است. بقیه کانی‌ها در هر چهار تیپ کانسنگی حضور دارند.

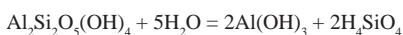
۵- بحث و بررسی

۵-۱- سنگ مادر نهشته

بررسی‌های عابدینی (۱۳۸۷) و عابدینی و کلاگری (۱۳۸۸ الف، ۱۳۹۰) نشان داده‌اند که سنگ‌هایی با ترکیب بازالت- آندزیت محتمل‌ترین سنگ مادر برای نهشته‌های

۵-۲- جنبه‌های ژئوتیکی کانی‌سازی

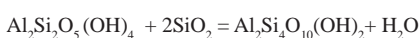
حضور مقادیر بالایی از کانی‌های سیلیکاتی در کانسنگ‌ها حکایت از آن دارد که نهشته مورد مطالعه از نظر تکوینی نارس بوده و در طی مراحل تشکیل و تکامل خود از هوازگی سنگ‌های اولیه، از زهکشی خوبی برخوردار نبوده و بیشتر کانی‌های حد واسط در حین تبدیل سنگ مادر به کانسنگ‌های بازماندی به دلیل کند بودن فرایند هوازگی حفظ شده‌اند. با توجه به وجود همبری آشکار و مشخص بین نهشته با سنگ‌های درونگیر، گیبسیت به احتمال فراوان اولین کانی آلومینای آزاد تشکیل شده در طی تکوین این نهشته بوده که خود به واسطه هوازگی مستقیم فلدسپارها و یا از سیلیس‌زدایی کانی‌های کائولینیت حاصل شده است (Voicu et al., 1997):



Kaolinite

Gibbsite

کائولینیت در کانسنگ‌های این نهشته به احتمال قوی از دگرسانی فلدسپار و مسکوویت شکل گرفته و خود مسکوویت محصول دگرسانی فلدسپار است. به نظر می‌رسد در طی آب‌زدایی به واسطه تراکم و فشارهای دیاژنتیک، گیبسیت‌های نشأت گرفته از دگرسانی کائولینیت‌ها به بوهمیت تبدیل شده‌اند که در نهایت خود آنها نیز در نتیجه تغییر ساختار بلوری در اثر دیاژنز و تنش‌های ساختمانی به طور بخشی به دیاسپور تبدیل گشته‌اند (Temur & Kansun, 2006). ظاهراً گیبسیت‌ها در طی فعل و انفعالات یاد شده نتوانسته‌اند در امان بمانند و به همین دلیل آثاری از این کانی در آنالیزهای پراش پرتو X مشاهده نمی‌شود. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه آثاری از دگرگونی‌های تماسی و حرارتی مشاهده نشده و یا توسط پژوهشگران دیگر گزارش نشده است، از این رو به نظر می‌رسد ظهور کروندم در کانسنگ‌ها در ارتباط با عملکرد فرایندهای دیاژنتیک و فشارهای دینامیکی بر روی دیاسپور باشد. پیروفیلیت به طور معمول در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط دگرگونی و دگرسانی تشکیل می‌شود (Boulangue et al., 1996). با توجه به عدم مشاهده آثاری از عملکرد فرایندهای دگرگونی بر روی نهشته و سنگ‌های درونگیر آن، این کانی به احتمال فراوان در اثر دگرشکلی‌های ساختاری و فشارهای دینامیکی وارده بر روی کائولینیت حاصل شده است. سیلیس لازم برای این تغییر و تبدیل توسط آب‌های زیرزمینی تأمین شده است (Balkay & Bardossy, 1967).



Kaolinite

Pyrophyllite

بی تحرک Nb، Ti، Zr، Al، Th و Hf در کانسنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر این عناصر در بازه نسبتاً وسیعی در تغییر است (جدول ۵). با توجه به این مسئله، در این مطالعه استفاده از روش محاسبات فاکتور غنی‌شدگی عناصر به روش‌های زمین‌شیمی تعادل جرم برای بررسی فاکتورهای کنترل‌کننده توزیع عناصر اصلی، فرعی، و جزئی ترجیح داده شد. بر این اساس، با در نظر گرفتن کانی‌شناسی سنگ‌های بازالتی که شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلاند، فرومنیزین (الیون و اوژیت)، کلریت، سریسیت، بیوتیت، کلسیت، آپاتیت، زیرکن و کانی‌های کدر (پیریت و ایلمنیت) هستند (عابدینی، ۱۳۸۷)، از رابطه زیر برای محاسبات فاکتور غنی‌شدگی عناصر استفاده شد:

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

در فرمول یاد شده X_p و X_w به ترتیب بیانگر فراوانی عنصر مورد نظر در نمونه بوکسیتی و فراوانی عنصر مورد نظر در سنگ مادر بازالتی است. با توجه به نتایج به دست آمده از محاسبات فاکتور غنی‌شدگی عناصر، رفتار زمین‌شیمیایی عناصر در طی فرایندهای دگرسانی و هوازگی سنگ‌های بازالتی را می‌توان به سه دسته کلی طبقه‌بندی کرد (شکل ۹):

- ۱- عناصر شسته شده- تثبیت شده: Fe، P، Ni، Ba، و Y در طی فرایندهای هوازگی سنگ‌های بازالتی متحمل فرایندهای شستشو- تثبیت شده‌اند.
- ۲- عناصر تهی شده: Si، Ca، Mg، Na، K، Mn، Co، Rb و Hf در طی فرایندهای بوکسیتی شدن به طور بخشی از سیستم خارج شده‌اند.
- ۳- عناصر غنی شده: Al، Ti، V، Th، Ga، Zr، Nb، U، و Cr در طی تکوین نهشته با غنی‌شدگی همراه شده‌اند.

۵-۶. فاکتورهای کنترل‌کننده تغییرات عناصر در طی بوکسیتی شدن

• **عناصر شسته شده- تثبیت شده:** بررسی فاکتور غنی‌شدگی Fe نشان می‌دهد که این عنصر از بخش‌های بالایی نیم‌رخ شسته شده و در بخش‌های تحتانی غنی شده است (شکل ۹-الف). تحرک Fe احتمالاً توسط محیط نسبتاً اسیدی و در حضور مواد آلی صورت گرفته است (Ma et al., 2007). با در نظر گرفتن کانی‌شناسی سنگ مادر بازالتی، اکسیداسیون پیریت، و دگرسانی و هوازگی کانی‌های ایلمنیت، اوژیت، هورنبلاند و الیون منشأ Fe در این سیستم بازماندی بوده است. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی مبنی بر حضور مواد آلی در بخش‌های بالایی (حضور کانسنگ‌های خاکستری رنگ در نهشته)، تشکیل کمپلکس‌های آلی Fe به همراه نفوذ محلول‌های هوازده‌کننده فروروی اسیدی باعث خروج آهن از بخش‌های بالایی نیم‌رخ شده است. به نظر می‌رسد که ایجاد شرایط احیایی محلی در نتیجه اکسیداسیون مواد آلی پارامتر تشدیدکننده دیگری بوده است که باعث خروج Fe از بخش‌های بالایی شده است (Mameli et al., 2007). با در نظر گرفتن نحوه توزیع Fe در نیم‌رخ می‌توان ادعا نمود که محلول‌های هوازده‌کننده اسیدی با نزدیک شدن به سنگ‌های بستر کربناتی، و مصرف H^+ و افزایش pH، رسوب‌گذاری Fe را در بخش‌های زیرین فراهم نموده‌اند. وجود روندهای متناوب افزایشی-کاهشی Fe در نیم‌رخ مورد مطالعه نکته قابل توجه دیگری است که می‌تواند نشأت گرفته از نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی باشد (Ma et al., 2007). تهی‌شدگی P (شکل ۹-الف) از بخش‌های بالایی نیم‌رخ گویای شکسته شدن آپاتیت‌های سنگ مادر بازالتی در طی فرایندهای بوکسیتی شدن است. غنی‌شدگی آن در بخش‌های زیرین احتمالاً به واسطه رسوب P به صورت کانی‌های فسفات‌های ثانویه صورت گرفته است. Ni اگرچه می‌تواند به شدت به وسیله اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن جذب سطحی و رویده شود، ولی این جذب وابسته به pH بوده، و در شرایط پایین (محیط اسیدی) ضعیف‌تر است (Sparks, 1995). با توجه به این مسئله، به نظر می‌رسد غنی‌شدگی عنصر Ni (شکل ۹-پ) به واسطه رویش آن توسط کانی‌های هماتیت و گوتیت رخ داده است. حاکم بودن شرایط قلیایی، به واسطه عملکرد سنگ بستر

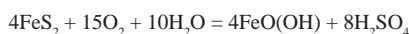
هماتیت در کانسنگ‌ها به احتمال قوی از اکسیداسیون پیریت (Bardossy, 1982) و کانی‌های فرومنیزین، و یا آب زدایی گوتیت به وجود آمده است.



Pyrite

Hematite

تشکیل آتاناز ممکن است به دلیل شکستن کانی‌هایی نظیر ایلمنیت یا اوژیت تشکیل شده باشد (Hill et al., 2000). آتاناز در حضور غلظت‌های پایین از عناصر قلیایی یک فاز کانیایی پایدار در درجه حرارت‌های سطحی است (Bardossy, 1982)، اما روتیل در دماهای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار نیست. روتیل در این نهشته در اثر تغییر ساختار بلوری آتاناز در اثر عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و فرایندهای دیازنتیک (Bardossy & Aleva, 1990) حاصل شده است. ایلیت محصول دگرسانی مسکوویت (Temur & Kansun, 2006) می‌باشد. کلریت در این نهشته به احتمال فراوان از دگرسانی سیلیکات‌های آهن-منیزیم‌داری چون پیروکسن و آمفیبول ایجاد شده است. شاموزیت در این نهشته در اثر شرایط احیایی حاکم بر روی کانسنگ‌های آهن‌دار و تأمین سیلیس از طریق آب‌های زیرزمینی تشکیل شده است (Bardossy, 1982). به نظر می‌رسد که کوارتز در این نهشته منشأ تخریبی داشته باشد. گوتیت در کانسنگ‌ها حاصل دگرسانی آمفیبول (Mutakyahwa et al., 2003) و یا اکسیداسیون پیریت (Bardossy, 1982) است:



Pyrite

Goethite

۵-۳. شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل کانسنگ‌ها

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که برای رسوب‌گذاری گیسیت به عنوان کانی آلومینای آزاد اولیه تحت شرایط سطحی، نیاز به pHهایی در محدوده بین ۴/۵ تا ۶/۵ بوده و مقدار سیلیس حل شده در آب برای رسوب آن، باید کمتر از $10^{-2.5}$ 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 بین ۷ الی ۸ باشد، Eh باید > 0.2 و اگر pH در محدوده ۸ تا ۹ باشد، Eh باید بیشتر از صفر باشد) تحت شرایط فشار پایین تشکیل می‌شود (Temur & Kansun, 2006). حضور آتاناز در کانسنگ‌های بازماندی نشان دهنده شرایط احیایی و pH پایین در طی تشکیل این نهشته است (Özlü, 1983). مقایسه بازه میدان پایداری کانی‌های اصلی سازنده کانسنگ‌های بازماندی با تغییرات pH و Eh محیط‌های طبیعی (Garrels & Christ, 1965) نشان می‌دهد که آب‌های سطحی با ماهیت اسیدی-اکسیدی و آب‌های زیرزمینی با ماهیت بازی-احیا نقش بسیار مهمی در تکوین این نهشته‌ها داشته‌اند (شکل ۷).

۵-۴. طبقه‌بندی کانسنگ‌ها بر اساس شیمی عناصر اصلی

موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی در نمودار سه متغیره Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SiO_2 (Aleva, 1994) سه تیپ کانسنگی، (۱) لاتریت، (۲) لاتریت بوکسیتی و کائولینیت بوکسیتی را برای این نهشته مشخص می‌سازد (شکل ۸). مقایسه موقعیت کانسنگ‌ها در نیم‌رخ مورد مطالعه (شکل ۳) با موقعیت قرارگیری کانسنگ‌ها در نمودار یاد شده (شکل ۸) نشان می‌دهد که کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای ترکیبی در حد لاتریت و لاتریت بوکسیتی، کانسنگ‌های کرم مایل به سبز ترکیبی در حد کائولینیت بوکسیتی، کانسنگ‌های سبز مایل به خاکستری ترکیبی در حد کائولینیت بوکسیتی و کانسنگ‌های سبز تیره ترکیبی در حد لاتریت بوکسیتی و کائولینیت بوکسیتی دارند.

۵-۵. محاسبات فاکتور غنی‌شدگی عناصر در طی تکوین نهشته

در مطالعه نهشته‌های بوکسیتی می‌توان از تکنیک‌های مختلف زمین‌شیمی تعادل جرم و محاسبات فاکتور غنی‌شدگی مبادرت به بررسی رفتار عناصر نمود (Calagari & Abedini, 2007). بررسی‌های انجام شده بر روی نحوه توزیع عناصر

تیتانیم (روتیل و آناتاز) را نشان می‌دهد (Muggler, 1988). Th در محیط‌های بسیار اسیدی تحرک بیشتری دارد (Taboada et al., 2006). با توجه به غنی‌شدگی این عنصر (شکل ۹-ت) در بخش‌های بالایی می‌توان چنین استنباط نمود که فرایندهای جذب سطحی توسط کانی‌های رسی نقش ارزنده‌ای در تثبیت این عنصر در نهشته مورد مطالعه داشته است (Hudson et al., 1999). با در نظر گرفتن شرایط قلیایی در تکوین بخش‌های زیرین نهشته به نظر می‌رسد که هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن عامل مهم دیگری در تثبیت این عنصر در نهشته بوده‌اند (Murakami et al., 1997). غنی‌شدگی U (شکل ۹-ج) در بخش‌های بالایی نیم‌رخ به واسطه حاکم بودن شرایط اسیدی و احتمالاً جذب سطحی توسط کانی‌های رسی صورت گرفته است (Barnett et al., 2000). همبستگی‌های مثبت و متوسط بین Ga با Si (۰/۶۳) و Al (۰/۶۶) (جدول ۳) نشان می‌دهند که دیاسپور، بوهمیت و کانی‌های رسی (Muggler, 1988) نقش ارزنده‌ای در تثبیت Ga در این نهشته ایفا نموده‌اند. همبستگی‌های مثبت و قوی بین Nb با Ti (۰/۷۳) و Zr (۰/۸۵) (جدول ۳) گویای نقش مؤثر کانی‌های روتیل، آناتاز، و زیرکن در تثبیت و غنی‌شدگی Nb در نهشته مورد مطالعه می‌باشد.

۵-۷. ارزیابی اقتصادی - کاربردی

استفاده از نمودار سه متغیره $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Schellman, 1983) (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که سنگ مادر در طی تبدیل به کانسنگ‌های بوکسیتی در درزی‌ولی متحمل فرایندهای لائیتی شدن ضعیف، متوسط و شدید شده است. نکته قابل توجه در مورد تغییر وضعیت از شدت لائیتی شدن ضعیف به لائیتی شدن متوسط این است که در طی تکوین کانسنگ‌های حاوی Si پایین، تفریق خوبی بین Fe و Al صورت گرفته و نیز در کانسنگ‌های بوکسیتی حاوی Fe پایین، تفریق خوبی بین Si و Al رخ نداده است. به عبارت بهتر، کانسنگ‌های این نهشته در طی فرایندهای هوازدهی نتوانسته‌اند جدایش خوبی از Si و Fe داشته باشند که از دلایل مهم آن می‌توان به وجود سنگ مادر نامناسب (سنگ مادر بازالتی با اکسید سیلیسیم در حدود ۵۲ درصد وزنی)، طولانی بودن زمان بوکسیتی شدن سنگ مادر، تشکیل فازهای کانیایی حد واسطه، محیط تشکیل و سیستم زهکشی ضعیف اشاره کرد. با توجه به مطالعات زمین‌شیمیایی تبدیل و گذر کانسنگ‌های بوکسیتی سیلیس بالا به سیلیس پایین احتمالاً در نتیجه نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی و بافرینگ آب‌های فرورو توسط عملکرد سنگ‌های بستر کربناتی به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی و در نتیجه رسوب‌گذاری آهن رخ داده است.

مقایسه ترکیب شیمیایی متوسط کانسنگ‌های بازماندی مورد مطالعه (جدول ۶) با درجات تجاری ترکیب شیمیایی کانسنگ‌های بوکسیتی جهت استفاده برای مصارف صنعتی ارائه شده توسط (Edwards & Atkinson, 1986) (جدول ۷) نشان می‌دهد که هیچ یک از واحدهای بازماندی شرایط لازم برای استفاده در صنایع متالورژی را ندارند. این بررسی همچنین نشان می‌دهد که با تغییراتی مانند کاهش سیلیس می‌توان از کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای برای استفاده از سیمان استفاده نمود. استفاده از کانسنگ‌های بوکسیتی این منطقه برای مصارف شیمیایی منتفی است، زیرا شرط لازم برای استفاده در مصارف شیمیایی، گیبسیتی بودن کانی آلومینای آزاد کانسنگ‌ها است. با مقایسه مقادیر متوسط اکسیدهای اصلی کانسنگ‌های درزی‌ولی (جدول ۶) با ترکیب شیمیایی ایده‌آل بوکسیت به عنوان سنگ اولیه آجر و مواد دیرگداز (Manning, 1995) (جدول ۸) چنین استنباط می‌شوند که از کانسنگ‌های کرم مایل به سبز و سبز مایل به خاکستری می‌توان در تولید آجر و مواد دیرگداز استفاده نمود. با توجه به میزان پایین آلومینیم به عنوان عناصر مفید و بالا بودن مقادیر عناصر سیلیسیم، آهن و تیتانیم به عنوان عناصر مضر، هیچ یک از کانسنگ‌های بوکسیتی منطقه مورد مطالعه (جدول ۶) نسبت به ترکیبات ایده‌آل ارائه شده برای تولید ساینده‌ها (جدول ۷) مناسب نیستند. همچنین بالا بودن میزان

کربناتی به عنوان سد زمین‌شیمیایی و افزایش میزان رسوب‌گذاری آهن به شکل کانی‌های هماتیت و یا گوتیت، شرایطی مناسبی برای جذب ترجیحی Ni توسط این کانی‌ها در بخش زیرین نیم‌رخ را فراهم نموده است (Laskou & Economou-Eliopoulos, 2007). تهی‌شدگی Ba (شکل ۹-ت) به دلیل دگرسانی فلدسپارهای سنگ‌های مادر و آزاد شدن آن به محلول‌های هوازده کننده و غنی‌شدگی آن (شکل ۸-ت) به واسطه جذب سطحی توسط ژل‌های کائولینیتی صورت گرفته است (Plank & Langmuir, 1988). بررسی روند تغییرات Y در نیم‌رخ مورد مطالعه نشان می‌دهد که شستشو و رسوب Y در شکل‌گیری این سیستم بازماندی به تغییرات pH محلول‌های هوازده کننده وابسته است. pH های پایین و بالا به ترتیب باعث شستشو و رسوب Y در طی فرایندهای هوازدهی می‌شوند (Patino et al., 2003).

• **عناصر تهی شده:** تهی‌شدگی Si (شکل ۹-ب) در نیم‌رخ مورد مطالعه در نتیجه کائولینیتی شدن و یا مسکوویت شدن فلدسپارها و به صورت متوالی در نتیجه تبدیل بخشی کائولینیت به کانی‌های آلومینای آزاد و خروج اسید سیلیسیک (Muzaffer-Karadag et al., 2009) رخ داده است. تهی‌شدگی عناصر Na، Ca و K (شکل ۹-ب)، در طی تشکیل نهشته در نتیجه ورود این عناصر به محلول‌های هوازده کننده در نتیجه تخریب فلدسپارها در سیستم‌های واکنشی آب-سنگ صورت گرفته است. تهی‌شدگی Mg و Mn (شکل ۹-ب) احتمالاً در نتیجه شکسته شدن کانی‌های فرومنیزین مانند الومین و اوژیت، و آزاد شدن بخشی عناصر یاد شده به محلول‌های هوازده کننده رخ داده است. محلول‌هایی که باعث آزاد شدن عناصر قلیایی از کانی‌های سنگ مادر شده‌اند، احتمالاً غنی از اسیدهای کربنیک و هومیک بوده‌اند (Muzaffer-Karadag et al., 2009). در کل به نظر می‌رسد وجود الگوهای نامنظم در نحوه کاهش جرم عناصر Si، K و Mg در نیم‌رخ مورد مطالعه احتمالاً ناشی از اختلاف در میزان شدت دگرسانی سنگ مادر می‌باشد. تهی‌شدگی Co (شکل ۹-پ) به دلیل تخریب کانی‌های فرومنیزین سنگ مادر رخ داده است (Ndjigui et al., 2008). تهی‌شدگی Rb (شکل ۹-ت) در سیستم بازماندی مورد مطالعه به دلیل شکسته شدن فلدسپارهای سنگ مادر صورت گرفته است (Plank & Langmuir, 1988). خروج Hf از سیستم احتمالاً به دلیل کمپلکس شدن این عنصر توسط لیگندهای آلی رخ داده است (Ma et al., 2007) (شکل ۹-ث).

• **عناصر غنی شده:** غنی‌شدگی Al (شکل ۹-الف) احتمالاً به دلیل غنی‌شدگی بازماندی این عنصر در نتیجه کاهش حجم سیستم در طی فرایندهای بوکسیتی شدن صورت گرفته است. این عنصر در پروفیل‌های هوازده نامحلول بوده و به سختی توسط محلول‌های هوازده کننده منتقل می‌شود (Nesbitt & Wilson, 1992). غنی‌شدگی Ti (شکل ۹-الف) احتمالاً به واسطه شکسته شدن کانی‌های ایلمینیت و پیروکسن، و تثبیت آن به فرم کانی‌های روتیل و آناتاز رخ داده است. پیروکسن نوع اوژیتی به طور مشخص حاوی ۰/۵ تا ۰/۸ درصد وزنی TiO_2 است (Deer et al., 1992). توزیع عناصر V و Cr در تشکیلات لائیتی می‌تواند در ارتباط با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن باشد (Marques et al., 2004). V^{3+} و Cr^{3+} به راحتی می‌تواند جایگزین Fe^{3+} در شبکه کانی‌های هماتیت و گوتیت شوند (Schwertmann & Pfab, 1996). همبستگی منفی بین V با Fe (۰/۰۹-) و Cr با Fe (۰/۳۳-) (جدول ۳) نشان می‌دهند که کانی‌های آهن دار نقشی در تمرکز عناصر یاد شده در نهشته مورد مطالعه نداشته‌اند. همبستگی مثبت و قوی بین Cr با Si (۰/۷۲) و Al (۰/۷۳) دلالت بر تثبیت و غنی‌شدگی Cr (شکل ۹-ج) (جدول ۳) توسط کانی‌های رسی به واسطه فرایندهای جذب سطحی در این نهشته دارد (Newman, 1987). مقایسه چگونگی تغییرات جرم V (شکل ۸-پ) با Ti (شکل ۹-الف) نشان می‌دهند روندهای غنی‌شدگی تقریباً مشابهی بین این دو عنصر در نیم‌رخ مورد مطالعه وجود دارد. این شباهت حضور احتمالی V در شبکه اکسیدهای

و تکامل کانسنگ‌های این نهشته ایفا نموده‌اند.
 - با توجه به یافته‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی، این نهشته شامل سه نوع کانسنگی، (۱) لاتریت، (۲) لاتریت بوکسیتی، و (۳) کائولینیت بوکسیتی است.
 - نتایج به دست آمده از محاسبات فاکتور غنی‌شدگی و ضرایب همبستگی بین عناصر آشکار می‌سازند که تحرک، توزیع و غنی‌شدگی عناصر اصلی، فرعی، و جزئی در نهشته بوکسیت درزی ولی تابعی از عواملی چون، (۱) جذب سطحی، (۲) روبش، (۳) تمرکزهای بازماندی، (۳) عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی، (۴) کنترل کانیاپی (ثبیت در فازهای کانیاپی تازه تشکیل شده و حضور در فازهای کانیاپی مقاوم)، (۵) تفاوت در میزان شدت دگرسانی، (۶) میزان دسترسی به لیگندهای آلی، و (۷) نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی می‌باشد.
 - بررسی ترکیب کانی‌شناسی و داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند که کانسنگ‌های فقیر از آهن این نهشته ویژگی‌های مناسبی برای استفاده در صنایع دیرگداز و کانسنگ‌های غنی از آهن قابلیت کاربرد در صنایع سیمان را دارا هستند.

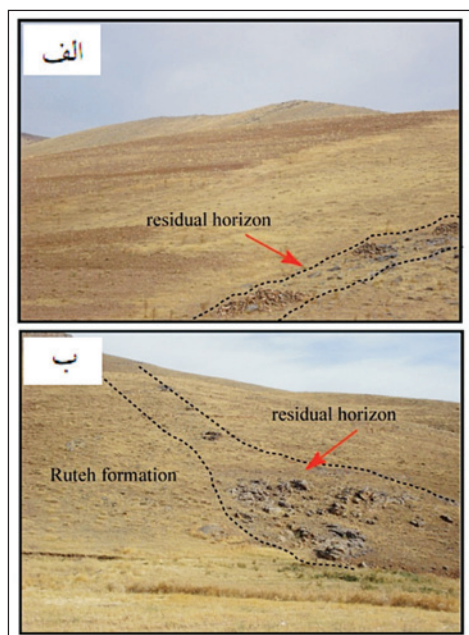
سپاسگزاری

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند، از این رو شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادات ارزنده و سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

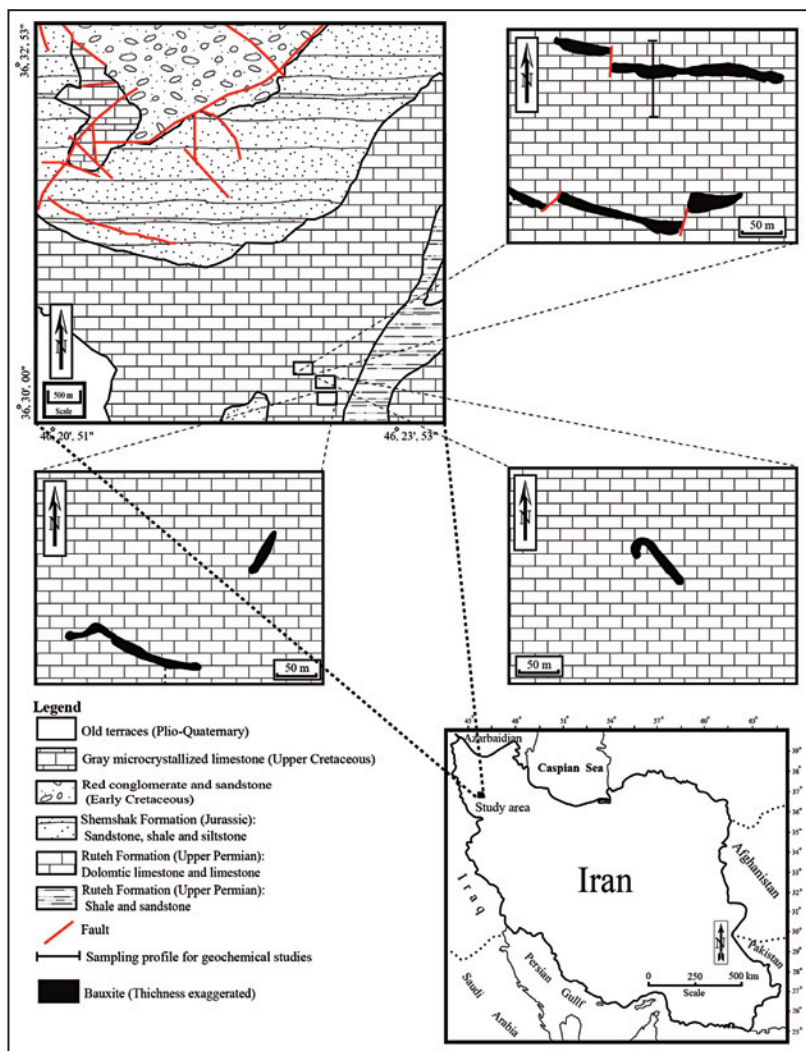
کانی‌های رسی در کانسنگ‌ها استفاده از آنها را در صنایع پروپانت‌ها منتفی می‌کند. در این مطالعه برای تعیین میزان تقریبی تحمل حرارتی کانسنگ‌های غنی از Al_2O_3 و SiO_2 منطقه مورد مطالعه (به استثنای کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای) از نمودار سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-CaO$ (Dourdounis et al., 2004) (شکل ۱۱) استفاده شد. این نمودار نشان می‌دهد که از نظر تئوریک کانسنگ‌ها دارای تحمل حرارتی بالای $1800^\circ C$ می‌باشند. با توجه به دمای مطرح شده برای کانسنگ‌ها و مقایسه آن با مقادیر کانسنگ‌های بوکسیتی و رسی حاوی مقادیر بالایی از کائولینیت و سیلیس (Halvac, 1983) برای مصارف دیرگدازی (جدول ۹) می‌توان اظهار کرد که تنها کانسنگ‌های سبز تیره شرایط مناسبی برای استفاده در کوره‌های الکتریکی، ذوب فولاد، کوره‌های دوار آهک و سیمان، کوره‌های پتروشیمی و آستر بندی کوره‌های بلند را دارا می‌باشد. تست‌های تکنولوژی برای بررسی‌های دقیق‌تر ضروری به نظر می‌رسد.

۶- نتیجه گیری

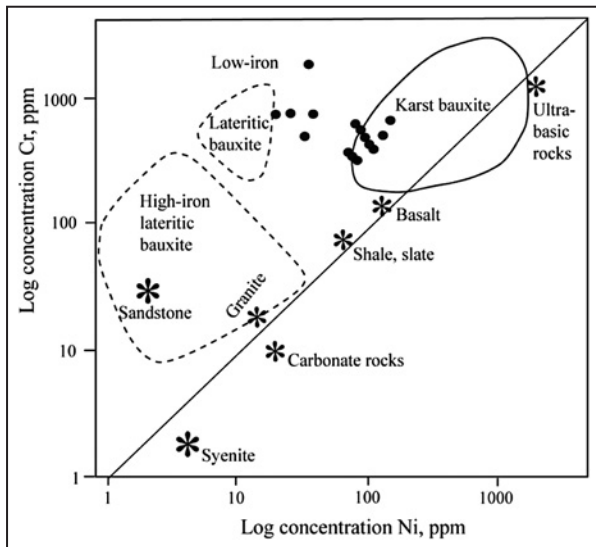
مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نهشته بوکسیت پرمین درزی ولی بوکان عبارتند از:
 - شواهد صحرایی همراه با مقادیر عناصر Ti ، Zr ، Ga ، Cr ، Ni در کانسنگ‌ها نشان می‌دهند که سنگ‌های بازالتی سنگ مادر احتمالی این نهشته هستند.
 - با توجه به یافته‌های کانی‌شناسی به نظر می‌رسد که آب‌های سطحی با ماهیت اکسیدی-اسیدی و آب‌های زیرزمینی با ماهیت بازی-احیاء نقش مهمی در توسعه



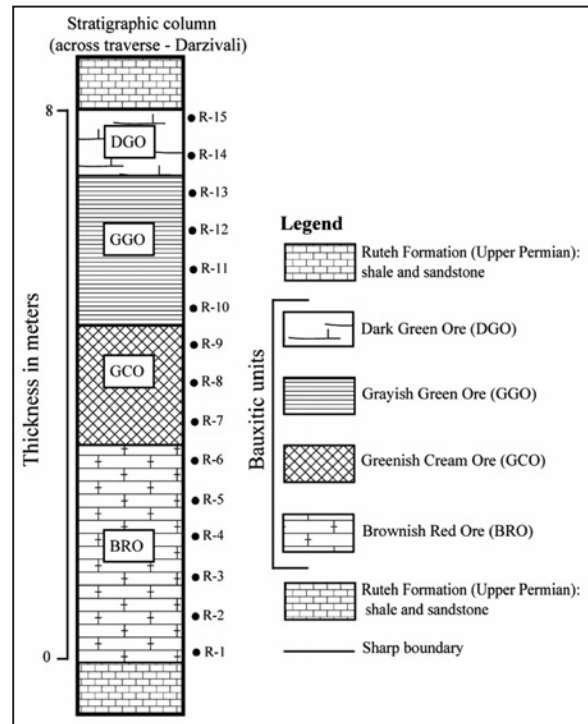
شکل ۲- الف) دورنمایی از افق بازماندی بوکسیتی در منطقه درزی ولی. دید به سمت شمال خاور. ب) تصویری از عدسی بوکسیتی بازماندی در منطقه. دید به سمت خاور.



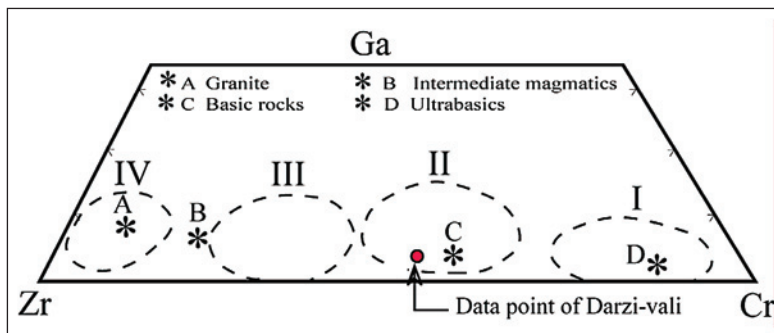
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت منطقه درزی ولی در نقشه جغرافیایی ایران.



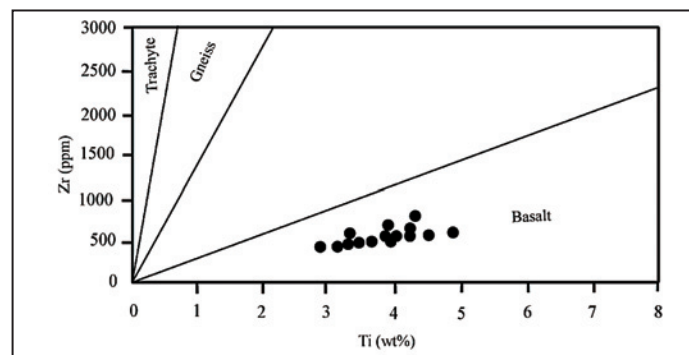
شکل ۴- موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی درزی‌ولی در نمودار دو متغیره Cr-Ni (Schroll & Sauer, 1968). دایره توپر موقعیت کانسنگ‌های مورد مطالعه را بر روی نمودار مذکور نشان می‌دهند.



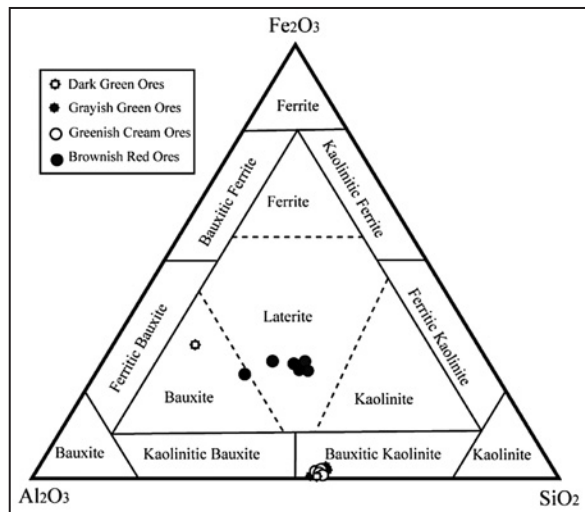
شکل ۳- ستون چینه‌شناسی نیمرخ مورد مطالعه در نهشته بوکسیتی درزی‌ولی که در آن محل نمونه‌های برداشت شده برای انجام تجزیه‌های زمین‌شیمیایی با دایره توپر نشان داده شده‌اند.



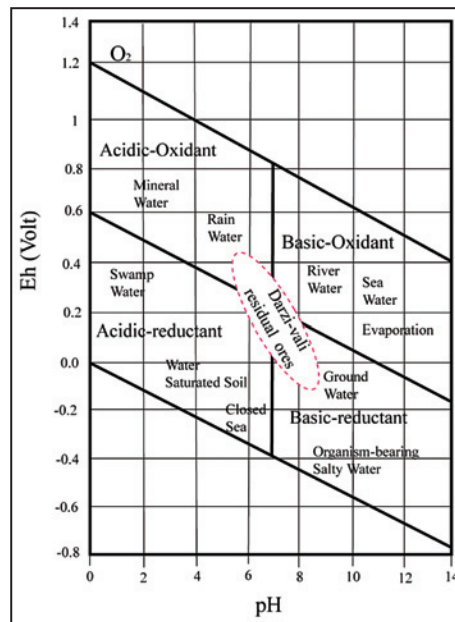
شکل ۵- موقعیت نهشته بوکسیت درزی‌ولی در نمودار سه متغیره Ga-Zr-Cr (Özli, 1983). I, II, III و IV به ترتیب بیانگر مناطق اثر سنگ‌های مادر اولترامافیک، مافیک، حدواسط یا رسی و اسیدی هستند. حروف A, B, C و D به ترتیب نشان دهنده محل قرارگیری سنگ‌های مادر گرانیتی، سنگ‌های حد واسط، سنگ‌های آذرین بازیک و الترابازیک برای نهشته‌های لاتریتی می‌باشند (Özli, 1983).



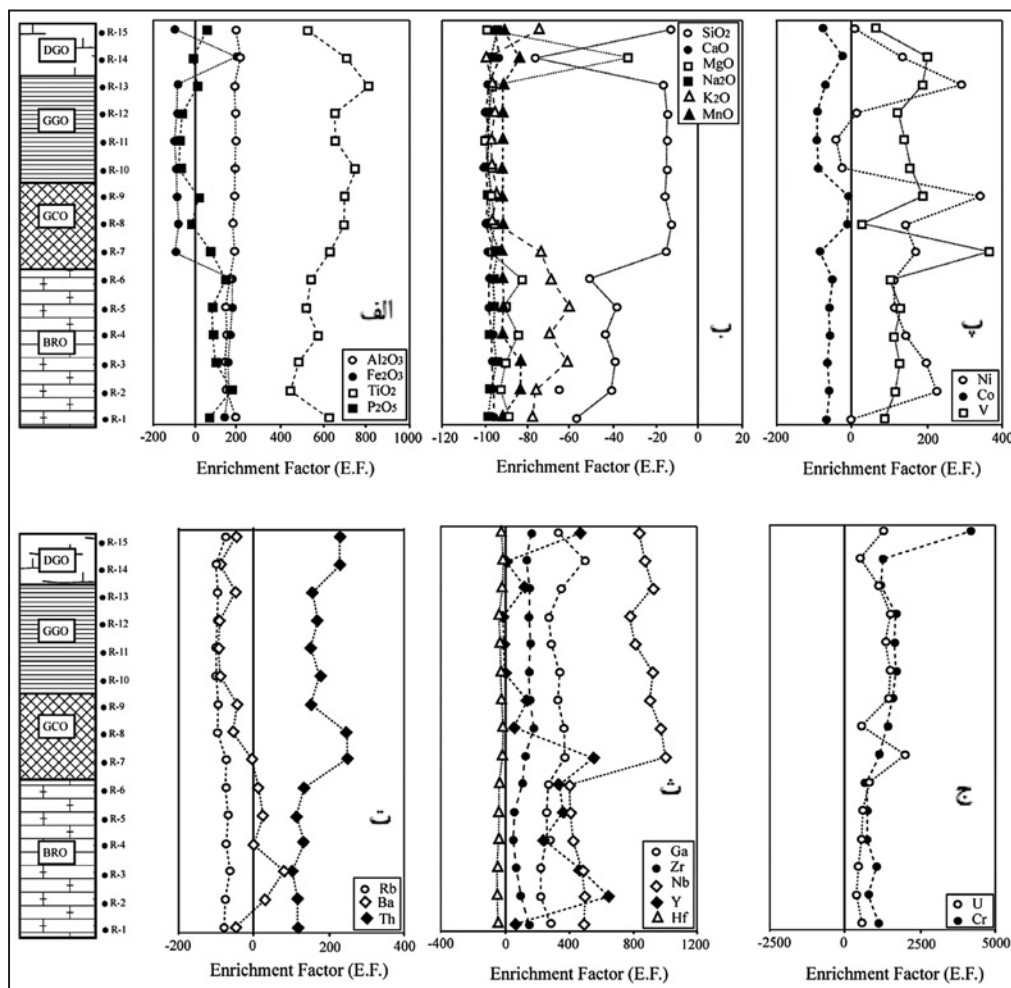
شکل ۶- موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه در نمودار دو متغیره Ti-Zr (Hallberg, 1984).



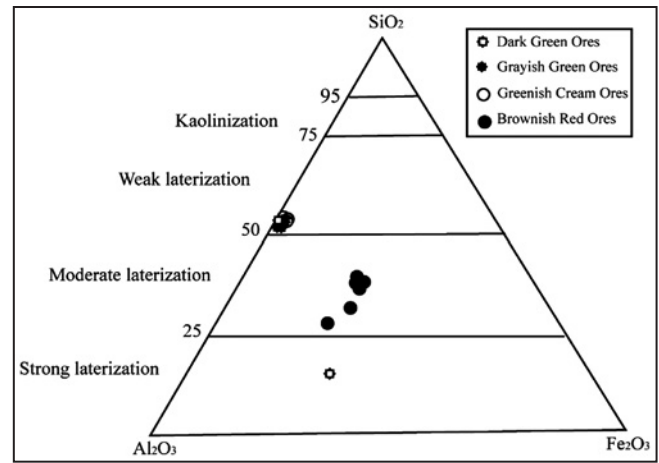
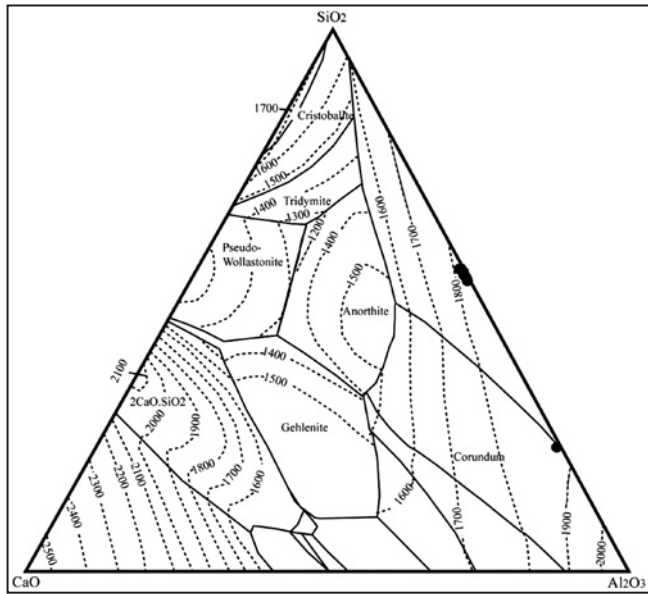
شکل ۸- موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه در نمودار سه متغیره (Aleva, 1994) $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$.



شکل ۷- نمودار Eh-pH محیط‌های اتمسفریک طبیعی با توجه به حیطه‌ی پایداری کانی‌ها (Garrels & Christ, 1965) که در آن موقعیت نهشته‌های بازماندی مورد مطالعه مشخص شده است. مقادیر pH و Eh تشکیل کانی‌های گیبسیت، همتایت، گوتیت و شاموزیت از Temur & Kansun (2006) برگرفته شده است.



شکل ۹- الگوی تغییرات فاکتورهای غنی‌شدگی برای عناصر اصلی، فرعی، و جزئی در نیمرخ مورد مطالعه.



شکل ۱۱- موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی غنی از سیلیس و آلومینیم (به استثنای کانسنگ‌های قرمز قهوه‌ای) در نمودار سه متغیره $Al_2O_3-SiO_2-CaO$ (Dourdounis et al., 2004).

شکل ۱۰- الگوی پراکندگی کانسنگ‌های بوکسیتی درزی‌ولی در نمودار سه متغیره $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ برای تعیین فرایندهای هوازدگی (Schellmann, 1983).

جدول ۱- نتایج تجزیه‌های شیمیایی ICP-AES عناصر اصلی و فرعی در کانسنگ‌های بوکسیتی و سنگ مادر بازالتی. مقادیر اکسیدها و L.O.I بر حسب درصد وزنی هستند. علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: BRO=کانسنگ قرمز قهوه‌ای، GCO=کانسنگ کرم مایل به سبز، GGO=کانسنگ سبز مایل به خاکستری، و DGO=کانسنگ سبز تیره.

		R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6	R-7	
Rock type	Basalt	BRO	BRO	BRO	BRO	BRO	BRO	GCO	
SiO ₂	۵۲/۹	۴۵/۸	۱۲/۶۰	۴۴/۱	۴۵/۴	۴۵/۳	۴۵/۳	۴۴/۴	
Al ₂ O ₃	۲۰/۴	۳۸/۷	۴۳/۰	۳۷/۶	۳۸/۷	۳۸/۹	۳۸/۲	۳۷/۱	
Fe ₂ O ₃	۸/۰۱	۰/۲۸	۲۴/۳	۱/۰۴	۰/۸۹	۰/۵۹	۱/۱۶	۱/۲۵	
CaO	۶/۰۳	۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۱	
MgO	۲/۴۹	۰/۰۶	۱/۷۰	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۸	
Na ₂ O	۳/۹۷	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۰	
K ₂ O	۳/۶۶	۰/۹۴	<۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۱	
TiO ₂	۰/۸۸	۵/۵۱	۷/۱۴	۸/۰۷	۶/۵۹	۶/۶۸	۷/۵۱	۷/۰۶	
MnO	۰/۱۲	<۰/۰۱	۰/۰۲	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	
P ₂ O ₅	۰/۳۶	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۴۰	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۴۳	
L.O.I	۱/۱۹	۸/۰۰	۹/۵۸	۷/۳۹	۷/۷۲	۷/۷۸	۷/۶۵	۸/۲۹	
Sum	۱۰۰/۰۱	۱۰۰/۲۳	۹۹/۱۱	۹۹/۰۸	۹۹/۸۷	۹۹/۶۶	۱۰۰/۰۲	۹۹/۰۳	
		R-8	R-9	R-10	R-11	R-12	R-13	R-14	R-15
Rock type	GCO	GCO	GGO	GGO	GGO	GGO	DGO	DGO	
SiO ₂	۴۶/۲	۴۴/۸	۲۶/۰	۳۲/۸	۲۹/۹	۳۲/۳	۳۱/۵	۲۲/۸	
Al ₂ O ₃	۳۶/۶	۳۸/۰	۳۲/۷	۲۹/۴	۳۰/۰	۲۹/۰	۲۹/۹	۳۸/۴	
Fe ₂ O ₃	۱/۷۸	۰/۳۷	۲۱/۲	۲۲/۲	۲۱/۲	۱۹/۵۵	۲۰/۲	۱۹/۰۰	
CaO	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۱۸	
MgO	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۳۰	
Na ₂ O	۰/۰۶	۰/۲۳	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۶	
K ₂ O	۰/۱۲	۰/۹۷	۱/۱۴	۱/۴۶	۱/۱۲	۱/۴۴	۰/۸۳	۰/۸۲	
TiO ₂	۷/۰۳	۶/۵۰	۵/۶۹	۵/۵۰	۶/۰۳	۵/۲۲	۴/۷۶	۶/۴۳	
MnO	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	
P ₂ O ₅	۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۸۷	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۹۷	۰/۵۹	
L.O.I	۷/۸۳	۸/۵۹	۸/۹۳	۶/۹۹	۷/۸۶	۸/۵۷	۸/۲۶	۸/۸۱	
Sum	۱۰۰/۱۵	۱۰۰/۲۹	۹۷/۳۶	۹۹/۵	۹۷/۵۱	۹۷/۴۶	۹۷/۰۷	۹۷/۴۱	

جدول ۲- نتایج تجزیه های شیمیایی ICP-MS عناصر جزئی در کانسنگ های بوکسیتی و سنگ مادر بازالتی. مقادیر عناصر جزئی بر حسب ppm هستند. علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: BRO=کانسنگ قرمز قهوه ای، GCO=کانسنگ کرم مایل به سبز، GGO=کانسنگ سبز مایل به خاکستری، و DGO=کانسنگ سبز تیره.

	T-1	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6	R-7
Rock type	Basalt	BRO	BRO	BRO	BRO	BRO	BRO	GCO
V ppm	۱۹۱	۳۲۴	۵۸۱	۵۵۹	۴۲۱	۴۶۵	۴۹۵	۵۶۱
Cr	۴۰	۱۷۲۰	۵۵۰	۴۹۰	۷۲۰	۷۰۰	۷۲۰	۶۶۰
Co	۱۷/۳	۳/۲	۱۳/۲	۴/۶	۱/۵	۱/۱	۱/۵	۱۵/۹
Ni	۳۴	۳۵	۸۰	۱۳۳	۳۸	۲۰	۲۵	۱۵۰
Rb	۱۰۲	۲۷/۶	۰/۶	۴/۴	۵/۱	۳/۰	۳/۱	۵/۹
Ba	۸۹۱	۵۴۰	۴۲/۰	۴۶۸	۱۱۲/۵	۶۸/۲	۶۲/۰	۵۳۵
Ga	۲۰/۱	۵۳/۳	۴۵/۶	۴۸/۶	۵۰/۲	۵۲/۱	۵۰/۶	۴۶/۷
Th	۷/۲۹	۲۳/۹	۲۳/۹	۱۸/۴۵	۱۹/۵۵	۱۸/۳۵	۲۰/۲	۱۸/۴۵
U	۲/۵۴	۳۵/۴	۱۴/۹۰	۳۲/۰	۴۱/۴	۳۷/۳	۴۱/۳	۴۰/۹
Y	۲۴/۲	۱۳۹/۰	۱۸/۹	۵۶/۵	۲۰/۰	۱۸/۱	۱۸/۰	۶۲/۶
Zr	۱۳۵	۵۷۴	۸۰۷	۵۹۵	۴۹۵	۵۲۰	۵۸۷	۵۷۴
Nb	۱۵/۶	۱۴۷/۵	۱۵۲/۵	۱۶۱/۰	۱۳۶/۵	۱۴۳/۰	۱۶۱/۰	۱۵۷/۰
Hf	۲۰/۱	۱۴/۷	۱۹/۸	۱۵/۷	۱۲/۴	۱۳/۴	۱۵/۱	۱۵/۲

	R-8	R-9	R-10	R-11	R-12	R-13	R-14	R-15
Rock type	GCO	GCO	GGO	GGO	GGO	GGO	DGO	DGO
V ppm	۲۵۲	۹۰۶	۳۸۹	۴۴۱	۴۰۶	۴۴۱	۴۲۰	۳۷۴
Cr	۶۰۰	۵۱۰	۳۵۰	۳۴۰	۳۱۰	۴۶۰	۳۸۰	۴۸۰
Co	۱۵/۳	۲/۵	۸/۳	۶/۸	۷/۰	۶/۱	۷/۰	۵/۷
Ni	۸۳	۹۲	۷۱	۷۴	۸۳	۱۰۱	۱۱۱	۳۳
Rb	۳/۴	۲۴/۵	۲۶/۵	۳۴/۳	۲۶/۷	۳۷/۹	۲۵/۲	۲۲/۴
Ba	۳۸۵	۸۸۱	۱۰۰۵	۱۱۵۰	۸۸۸	۱۶۶۵	۱۱۹۰	۴۱۷
Ga	۵۶/۵	۴۷/۰	۴۰/۸	۳۰/۸	۳۱/۷	۳۳/۵	۳۹/۴	۵۲/۱
Th	۲۵/۴	۲۵/۵	۱۶/۹۰	۱۵/۶۵	۱۶/۹۵	۱۴/۷۰	۱۵/۷۵	۱۶/۰۵
U	۱۷/۰۵	۵۴/۵	۲۲/۳	۱۸/۸۰	۱۹/۷۰	۱۴/۳۰	۱۲/۵۵	۱۶/۶۰
Y	۳۵/۸	۱۶۰/۵	۱۰۳/۰	۱۱۴/۰	۷۹/۵	۱۳۸/۰	۱۸۲/۵	۳۹/۸
Zr	۶۲۷	۶۴۹	۴۹۶	۴۸۲	۴۹۹	۴۳۴	۴۳۶	۵۱۳
Nb	۱۶۸/۰	۱۷۳/۰	۸۰/۶	۷۹/۲	۸۲/۴	۸۸/۵	۹۴/۲	۹۴/۹
Hf	۱۶/۳	۱۷/۴	۱۲/۳	۱۱/۷	۱۳/۰	۱۰/۷	۱۰/۸	۱۱/۳

جدول ۳- ضرایب همبستگی اسپیرمن بین برخی از عناصر انتخابی در کانسنگ های مورد مطالعه.

	Si	Al	Fe	Ti	V	Zr	Nb	Cr	Ga	U
Si	۱/۰۰									
Al	۰/۲۳	۱/۰۰								
Fe	-۰/۷۷	-۰/۴۸	۱/۰۰							
Ti	۰/۲۴	۰/۵۶	-۰/۲۷	۱/۰۰						
V	-۰/۱۰	۰/۲۰	-۰/۰۹	۰/۴۸	۱/۰۰					
Zr	۰/۲۳	۰/۵۸	-۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۳۸	۱/۰۰				
Nb	۰/۵۳	۰/۴۷	-۰/۶۰	۰/۷۳	۰/۳۹	۰/۸۵	۱/۰۰			
Cr	۰/۷۲	۰/۷۳	-۰/۷۳	۰/۵۱	۰/۱۲	۰/۳۸	۰/۶۴	۱/۰۰		
Ga	۰/۶۳	۰/۶۶	-۰/۷۰	۰/۴۶	-۰/۲۶	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۷۷	۱/۰۰	
U	۰/۵۹	۰/۴۳	-۰/۷۲	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۵۲	۱/۰۰

جدول ۴- ترکیب کانی‌شناسی کانسنگ‌های مورد مطالعه.

تعداد نمونه	نوع کانسنگ	فازهای کانیایی
۱	سبز تیره	کلریت، کائولینیت، دیاسپور، آاناتاز، کلسیت و روتیل
۱۰	سبز مایل به خاکستری	پروفیلیت، دیاسپور، روتیل، آاناتاز، مسکوویت، کائولینیت، بوهمیت، کوارتز، کلریت و دولومیت
۳	کرم مایل به سبز	پروفیلیت، کائولینیت، ایلیت، دیاسپور، کلسیت، آاناتاز، روتیل، بوهمیت، مسکوویت، کلریت، دولومیت و کوارتز
۵	قرمز قهوه‌ای	دیاسپور، هماتیت، شاموزیت، کائولینیت، ایلیت، روتیل، آاناتاز، کلریت و گوتیت

جدول ۵- محدوده تغییرات عناصر بی‌تحرك در کانسنگ‌های مورد مطالعه. مقادیر اکسیدها بر حسب درصد وزنی و مقادیر عناصر جزئی بر حسب ppm است.

منطقه	عنصر	کمینه	پیشینه	دامنه تغییرات
Darzi-vali	Al ₂ O ₃	۲۹/۰	۴۳/۰	۱۴
	TiO ₂	۴/۷۶	۸/۰۷	۳/۳۱
	Hf	۱۰/۷	۱۹/۸	۹/۱
	Nb	۷۹/۲	۱۷۳/۰	۹۳/۸
	Th	۱۴/۷۰	۲۵/۵	۱۰/۸
	Zr	۴۳۴	۸۰۷	۳۷۳

جدول ۶- میانگین ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی کانسنگ‌های بوکسیتی منطقه مورد مطالعه.

نوع کانسنگ	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
سبز تیره	۶/۳۳	۱۲/۲۹	۲۹/۲۰	۴۰/۸۵
سبز مایل به خاکستری	۷/۲۱	۰/۹۲	۴۵/۰۳	۳۸/۳۵
کرم مایل به سبز	۶/۸۶	۱/۱۳	۴۵/۱۳	۳۷/۲۳
قرمز قهوه‌ای	۵/۶۱	۲۰/۵۶	۲۹/۲۲	۳۱/۵۷

جدول ۷- درجات تجاری ترکیب شیمیایی بوکسیت‌ها برای مصارف مختلف صنعتی (Edwards & Atkinson, 1986). تجزیه‌های تیپیک برای کانسنگ‌های بوکسیتی (Harbon & Dickson 1983) برگرفته شده است.

پروپانت‌ها	ساینده‌ها	نسوز (کلسینه شده)	سیمان	شیمیایی	متالورژی	نیازمندی
آلومینا بالا، سیلیس پایین، رس‌ها پایین، مقدار آهن بحرانی نیست	آلومینا بالا، آهن تا حدی پایین، سیلیس پایین، تیتانیوم پایین	آلومینا بالا، آهن پایین، قلیایی‌ها خیلی پایین	آلومینا متوسط تا بالا، سیلیس پایین، آهن بالا، کانسنگ ترجیحاً «دیاسپوری» باشد	کانسنگ باید گیبسیتی باشد، آهن خیلی پایین، سیلیس پایین و لی خیلی بحرانی نیست	آلومینا بالا، آهن پایین، سیلیس پایین، تیتانیوم پایین	نیازمندی
غیر قابل دسترس	٪۸۸-۸۰	>٪۸۵/۵	٪۵۵-۴۵	>٪۵۵	٪۵۵-۵۰	Al ₂ O ₃
	٪۸-۴	<٪۷/۵	<٪۶	٪۱۸-۵	٪۱۵-۰	SiO ₂
	٪۵-۲	<٪۲/۵	٪۳۰-۲۰	<٪۲	٪۳۰-۵	Fe ₂ O ₃
	٪۵-۲	<٪۴	٪۳	٪۶-۰	٪۶-۰	TiO ₂

جدول ۸- ترکیب شیمیایی ایده‌ال بوکسیت به عنوان سنگ اولیه آجر و مواد دیرگداز (Manning, 1995).

Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
۳۵/۷۰	۳۹/۳۰	۴/۸۹	۴/۱۹

جدول ۹- مواد اولیه، ترکیب شیمیایی و کاربرد دیرگدازها (Halvac, 1983).

مواد اولیه	اکسیدهای تشکیل دهنده عمده به ترتیب فراوانی	دما (بر حسب درجه سانتی گراد)	کاربرد
بوکسیت	Al_2O_3 SiO_2	۱۷۷۰-۱۸۵۰	کوره‌های الکتریکی، ذوب فولاد، کوره‌های دوار آهک و سیمان، کوره‌های پتروشیمی و آستر بندی کوره‌های بلند
کائولینیت	SiO_2 Al_2O_3	۱۶۰۰-۱۷۵۰	کوره‌های ذوب آهن، کوره‌های حرارتی سرامیکی، دیگ‌های بخار و کوره‌های الکتریکی

کتابنگاری

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۵- نقشه زمین شناسی مهاباد به ۱:۲۵۰۰۰۰. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آفانیاتی، ع.، ۱۳۸۵- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهار گوش مهاباد. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حسامی، ع.، ۱۳۷۰- بررسی های اکتشافی بوکسیت های شرق بوکان. رساله کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن دانشگاه تهران، ۲۸۵ ص.
- عابدینی، ع.، ۱۳۸۷- بررسی کانی شناسی، ژئوشیمی و ژنز نهشته های بوکسیتی-لاتریتی شمال غرب ایران. رساله دکتری زمین شناسی اقتصادی دانشگاه تبریز، ۱۸۷ ص.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۸ الف- کانی شناسی و خاستگاه نهشته های بوکسیتی پرمین در شمال سقز، استان کردستان. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۴، ص ۵۱۸-۵۰۳.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۸ ب- بررسی فاکتورهای کنترل کننده توزیع عناصر جزئی (شامل عناصر نادر خاکی) در طی فرایندهای بوکسیتی شدن در کانی شسته، شرق بوکان، شمال غرب ایران. مجله علوم زمین، شماره ۷۲، ص ۱۴۵-۱۵۴.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۹- ژئوشیمی کانسنگ های بوکسیتی-لاتریتی جوانمرد، شمال خاور بوکان، استان آذربایجان غربی. مجله زمین شناسی ایران، شماره ۱۵، ص ۲۹-۳۸.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، ۱۳۹۰- مطالعات ژئوشیمیایی نهشته های بوکسیتی-کائولینیتی پرمین در شمال سقز، استان کردستان. مجله علوم زمین، شماره ۷۹، ص ۶۷-۷۴.
- عابدینی، ع.، کلاگری، ع. ا.، حاج علیلو، ب.، ۱۳۸۷- ویژگی های زمین شناسی- کانی شناسی و ژئوشیمی عناصر کمیاب در نهشته بوکسیت آخاجری. جنوب شاهین دژ، شمال غرب ایران. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲، ص ۳۴۱-۳۵۶.
- عابدینی، ع.، مرادی، ش.، علیزاده، ا.، ۱۳۹۱- فاکتورهای کنترل کننده توزیع عناصر اصلی، فرعی، جزئی و نادر خاکی در نهشته لاتریت داش آغل، شرق بوکان، استان آذربایجان غربی، شمال غرب ایران. یافته های نوین زمین شناسی کاربردی، شماره ۱۲، ص ۳۸-۵۹.

References

- Abedini, A. & Calagari, A., 2013a- Rare earth elements geochemistry of Sheikh-Marut laterite deposit, NW Mahabd, West- Azarbaijan province, Iran. Acta Geologica Sinica-English Edition 87 (1), 176-185.
- Abedini, A. & Calagari, A., 2013b- Geochemical characteristics of Kanigorgeh ferruginous bauxite horizon, West- Azarbaijan province, NW Iran. Peridico di Mineralogia 82, 1-23.
- Abedini, A. & Calagari, A., 2013c- Geochemical characteristics of bauxites: the Permian Shahindezh horizon, NW Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlugen 270 (3), 301-324.
- Abedini, A., Calagari, A. & Mikaeili, K., 2014- Geochemical characteristics of laterites: the Alibaltalu deposit, Iran. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 148, 69-84.
- Aleva, G. J. J., 1994- Laterites: Concepts, geology, morphology and chemistry. ISIRC, Wageningen, 169p.
- Balkay, B. & Bardossy, G. Y., 1967- Lateritesedeses rezfolyamant vizsgalatok guineai lateritekben (Study of partial processes of laterization on Guinean laterites), Foldt. Kozl. Budapest, Vol. 97, 91-100.
- Balkay, B. & Samimi, M., 1972- Geological investigations of Iranian bauxites and other high-alumina materials. Geological survey of Iran, Internal paper.
- Bardossy, G., 1982- Karst bauxites. Elsevier Scientific, Amsterdam, 441p.
- Bardossy, G. Y. & Aleva, G. Y. Y., 1990- Lateritic bauxites. Akademia, Kiado Budapest, 646 p.
- Barnett, M., Jardine, P. M., Brooks, S. C. & Selim, H. M., 2000- Adsorption and transport of U (VI) in subsurface media. Soil Science Society of American Journal 64, 908-914.
- Boulangue, B., Bouzat, G. & Pouliquen, M., 1996- Mineralogical and geochemical characteristics of two bauxitic profiles, Fria, Guinea republic. Mineralium Deposita 31, 432-438.
- Calagari, A. A. & Abedini, A., 2007- Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West- Azarbaijan, Iran. Journal of Geochemical Exploration 94, 1-18.
- Calagari, A. A., Kangrani, F. & Abedini, A., 2010 - Geochemistry of minor, 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, 225-236.

- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussmann, J., 1992- The rock forming minerals. Longman, London, 720p.
- Dourdounis, E., Stivanakis, V., Angelopoulos, G. N., Chaniotakis, E., Frogoudakis, E., Papanastasiou, D. & Papamantellos, D. C., 2004- High-alumina cement production from FeNi-ERF slag, limestone and diasporic bauxite. *Cement and Concrete Research* 34, 941-947.
- Edwards, R. & Atkinson, K., 1986 - Ore deposit geology. Chapman & Hall, 446p.
- Garrels, R. M. & Christ, C. L., 1965 - Solution, Minerals and Equilibria. Harper and Row, New York, 450 p.
- Hallberg, J. A., 1984 - A geochemical aid to igneous rocks identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration* 20, 1-8.
- Halvac, J., 1983 -The technology of glass and ceramics: An introduction. *Glass Science Technology*, 431p.
- Harbon, P. & Dickson, T., 1983 - Non metallurgical grades-bauxites crème de la crème. *Industrial minerals* 192, 25- 43.
- Hill, I. G., Worden, R. H. G. & Meighan, I. G., 2000 - Geochemical evolution of a paleolaterite: the interbasaltic formation, Northern Ireland. *Chemical Geology* 166, 65-84.
- Hudson, E. A., Terminello, L. J., Viani, B. E., Denecke, M., Reich, T. & Allen, P. G., 1999 - The structure of U⁶⁺ sorption complexes on vermiculite and hydrobiotite. *Clays and Clay Minerals* 47, 439- 457.
- Kamineni, D.C. & Eftekhkar-Nezhad, J., 1977. Mineralogy of the Permian laterite of NW Iran. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen* 24, 195-204.
- Laskou, M. & Economou-Eliopoulos, M., 2007 - The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-Ghiona bauxite deposits, Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 93, 67-77.
- 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, 3223-3237.
- Mameli, P., Mongelli, G. & Dinelli, E., 2007 - Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (western Sardinia, Italy): Insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences* 96, 887-902.
- Manning, D. A. C., 1995 - Introduction to industrial minerals. Chapman and Hall, London, 279p.
- Marques, J. J., Schulze, D. G., Curi, N. & Mertzman, S. A., 2004 - Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma* 121, 31-43.
- Muggler, C. C., 1988 - Polygenetic oxisols on Tertiary surfaces, Minas Gerais Brazil. Ph.D thesis, Wageningen University, Netherlands, 285p.
- Murakami, T., Ohnuki, T., Isobe, H. & Sato, T., 1997 - Mobility of Uranium during weathering, *American Mineralogist* 82, 888-899.
- 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, 357-369.
- Muzaffer-Karadag, M., Kupeli, S., Arik, F., Ayhan, A., Zedef, V. & Doyen, A., 2009 - Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit (Seydisehir/Konya-Southern Turkey). *Chemie der Erde-Geochemistry* 69, 143-159.
- Ndjigui, P., Bilong, P., Bitom, D. & Dia, A., 2008 - Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomie ultramafic complex, southeast Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 305-328.
- Nesbitt, H. W. & Wilson, R. E., 1992 - Recent chemical weathering of basalt. *American Journal of Sciences* 292, 740-777.
- Newman, A. D. C., 1987 - Chemistry of clays and clay minerals. Mineralogical Society, Monograph 6, 1-480.
- Özlu, N., 1983 - Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt. *Mineralium Deposita* 18, 469-476.
- 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, 343-364.
- Plank, T. & Langmuir, C. H., 1988 - The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology* 145, 325-394.
- Schellmann, W., 1983 - A new definition of laterite. *Natural Resources and Development* 18, 7-21.
- Schroll, E. & Sauer, D., 1968 - Beitrag zur geochemie von titan, chrom, nikel, cobalt, vanadium und molibdan in bauxitischen gestemen und problem der stofflichen herkunft des aluminiums. *Travaux de ICSOBA, Zagreb* 5, 83-96.
- Schwertmann, U. & Pfab, G., 1996 - Structural V and Cr in lateritic iron oxides: genetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 4279-4283.
- Sparks, D. L., 1995 - Environmental soil chemistry. Academic Press, New York, 267p.
- Taboada, T., Cortizas, A. M., Garcia, C. & Garcia-Rodeja, E., 2006 - U and Th in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain. *Science of the Total Environment* 356, 192-206.
- Temur, S. & Kansun, G., 2006 - Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 512-522.
- Voicu, G., Bardoux, M. & Voicu, D., 1997 - Mineralogical norm calculations applied to tropical weathering profiles. *Mineralogical Magazine* 61, 185-196.
- Zarasvandi, A., Charchi, A., Carranza, E. J. M. & Alizadeh, B., 2008 - Karst bauxite deposits in the Zagros Mountain Belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 3, 4521-532.
- Zarasvandi, A., Zamanian, H. & Hejazi, E., 2010 - Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 107, 77-85.