

I

نام خانوادگی: کنگرانی	نام: فاطمه
عنوان پایان نامه: بررسی ژئوشیمی و کانی شناسی افق بوکسیتی بیگلر (شمال غرب آبگرم- استان قزوین)	
استاد راهنما: دکتر علی اصغر کلاگری استاد مشاور: مهندس علی عابدینی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: زمین شناسی
گرایش: زمین شناسی اقتصادی	دانشگاه: تبریز
تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۶/۱۲/۵	تعداد صفحه: ۱۰۰
کلید واژه‌ها: قزوین، بیگلر، پرمو تریاس، بوکسیت تیپ مدیترانه و بافت پلیتومورفیک	
چکیده	
<p>نهشته بوکسیت پرمو-تریاس بیگلر، در ۱۵ کیلومتری شمال غرب آبگرم، در جنوب غرب استان قزوین واقع گردیده است. این نهشته در مرز بین سازندهای کربناتی روته و الیکا و طولی حدود ۱/۵ کیلومتر با روند شمال غرب-جنوب شرق قرار دارد. این نهشته به صورت چینه سان و ضخامتی متغیر از ۵ تا ۲۱ متر بوده که شامل ۹ لایه سنگی مجزای باشد.</p> <p>مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهند که واحدهای بوکسیتی این نهشته حاوی بافت‌های اسکلتی، برشی دروغین، پورفیری دروغین، نودولار و فلوئیدال-کلومورفیک بوده و از یک ژنز برجزا برخوردارند. با توجه به نتایج آنالیزهای پراش پرتو X (XRD) دیاسپور، همتایت، آاناتاز، کائولینیت بیشترین حجم کانیایی واحدهای این نهشته را تشکیل می‌دهند که توسط کانی‌های گوتیت، موسکویت، فلدسپار، آاناتاز، پیروکسن، لپیدوکروسیت، کلسیت، زئولیت و کوارتز در مقادیر ناچیز همراهی می‌شوند. مطالعات کانی شناسی نشان می‌دهند که در تکوین این نهشته آب‌های سطحی با ماهیت اکسیدی-اسیدی و آب‌های زیرزمینی با ماهیت بازی- احیا در نقش مهمی ایفا نموده‌اند.</p> <p>تلفیق یافته‌های حاصل از مشاهدات صحرایی، شواهد کانی شناسی و بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که سنگ‌های آندزیتی پرمین که هنوز بقایایی از آنها در محل کنتاکت نهشته با سنگ‌های کربناتی بستر حضور دارند، احتمال‌ترین سنگ مادر برای نهشته بیگلر می‌باشند.</p> <p>علاوه بر فاکتورهایی چون تغییر pH محلول‌های هوازه کننده، حضور کمپلکس‌های کربناتی و کلوئیدهای ارگانیکی، عملکرد سنگ بستر به عنوان سد ژئوشیمیایی، پتانسیل یونی، ترکیب شیمیایی سنگ مادر، شدت دگرسانی، تثبیت در کانی‌های مقاوم و فرایندهای جذب سطحی نیز نقش بسیار مهمی در توزیع عناصر در این نهشته ایفا نموده‌اند. این مطالعات همچنین نشان می‌دهند که بوکسیت بیگلر یک مرحله انتقالی از بوکسیت های لاتریتی به بوکسیت های کارستی را طی نموده و بیشترین شباهت را به کانسارهای تیپ مدیترانه دارد.</p>	

II

عناوین مطالب

سپاسگذاری

چکیده فارسی

فصل اول: بررسی منابع

- ۱-۱- ژئوشیمی عناصر Fe, Si, Ti و Al در محیط‌های هوازدگی ۱
- ۲-۱- تعریف بوکسیت ۳
- ۳-۱- خواص فیزیکی بوکسیت ۳
- ۱-۳-۱- نحوه شکستگی بوکسیت ۳
- ۲-۳-۱- لمس بوکسیت ۳
- ۳-۳-۱- سختی بوکسیت ۳
- ۴-۳-۱- میزان تراکم بوکسیت ۴
- ۵-۳-۱- رنگ بوکسیت ۴
- ۴-۱- کانی شناسی بوکسیت ۴
- ۱-۴-۱- اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم ۵
- ۲-۴-۱- کانی‌های رسی ۵
- ۳-۴-۱- اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن ۵
- ۴-۴-۱- اکسیدهای تیتانیوم ۶
- ۵-۴-۱- اکسید سیلیس ۶
- ۶-۴-۱- سایر کانی‌های تشکیل دهنده بوکسیت ۶
- ۵-۱- بافت بوکسیت ۷
- ۶-۱- ژنز بوکسیت ۱۰
- ۲-۶-۱- تشکیل بوکسیت کارستی ۱۰
- ۱-۲-۶-۱- فرضیه لاتریتوزنیک ۱۱
- ۲-۲-۶-۱- فرضیه تراروسا ۱۱
- ۳-۲-۶-۱- فرضیه شیموژنیک ۱۲
- ۴-۲-۶-۱- فرضیه هیدروترمال ۱۲
- ۵-۲-۶-۱- فرضیه ولکانوژنیک ۱۲

III

- ۱۲-۳-۶-۱- عوامل موثر در تشکیل نهشته های بوکسیتی..... ۱۲
- ۱۳-۷-۱- طبقه بندی بوکسیت..... ۱۳
- ۱۵-۸-۱- شاخص های هوازدگی..... ۱۵
- ۱۶-۹-۱- توزیع زمانی و مکانی بوکسیت ها در دنیا..... ۱۶
- ۱۶-۹-۱-۱- توزیع زمانی بوکسیت ها در دنیا..... ۱۶
- ۱۷-۹-۱-۲- توزیع مکانی بوکسیت در جهان..... ۱۷
- ۱۷-۱۰-۱- توزیع بوکسیت در ایران..... ۱۷
- ۱۸-۱۱-۱- مصارف مختلف بوکسیت..... ۱۸
- ۱۸-۱۱-۱-۱- کاربردهای متالورژیکی..... ۱۸
- ۱۹-۱۱-۱-۲- کاربرد بوکسیت در صنایع غیر متالورژی..... ۱۹
- ۲۰-۱۱-۱-۲-۱- مصارف بوکسیت در صنایع نسوز..... ۲۰
- ۲۰-۱۱-۱-۲-۲- مصارف بوکسیت در تهیه مواد ساینده..... ۲۰
- ۲۰-۱۱-۱-۳-۲- مصارف بوکسیت در تهیه انواع سیمان..... ۲۰
- ۲۱-۱۱-۱-۴-۲- مصارف بوکسیت در صنایع فولادسازی..... ۲۱
- ۲۱-۱۱-۱-۵-۲- مصارف شیمیایی بوکسیت..... ۲۱
- ۲۱-۱۱-۱-۶-۲- مصارف بوکسیت فعال شده..... ۲۱
- ۲۱-۱۱-۱-۷-۲- مصارف بوکسیت کلسینه..... ۲۱
- ۲۱-۱۲-۱- اثرات زیست محیطی بوکسیت..... ۲۱
- ۲۱-۱۲-۱-۱- مرحله اکتشاف..... ۲۱
- ۲۲-۱۲-۱-۲- مرحله استخراج..... ۲۲
- ۲۲-۱۲-۱-۲- مرحله پالایش..... ۲۲
- ۲۳-۱۳-۱- پیشینه پژوهش..... ۲۳
- ۲۳-۱۴-۱- هدف از مطالعه..... ۲۳

فصل دوم: مواد و روش ها

- ۲۴-۱-۲- مشخصات و موقعیت جغرافیایی منطقه..... ۲۴
- ۲۶-۲-۲- روش کار و سیر مطالعاتی..... ۲۶

Iv

۲۶	۱-۲-۲ مطالعات صحرائی
۲۶	۲-۲-۲ مطالعات آزمایشگاهی
۲۷	۳-۲ زمین شناسی ناحیه
فصل سوم: بحث و نتایج	
۲۹	۱-۳ زمین شناسی عمومی منطقه بیگلر
۲۹	۱-۱-۳ سازند لالون (CI)
۳۰	۲-۱-۳ سازند میلا (Cm)
۳۰	۳-۱-۳ سازند درود (Pd)
۳۰	۴-۱-۳ سازند روته (Ru)
۴۱	۷-۱-۳ سازند الیکا (Tr1)
۴۱	۸-۱-۳ افق بوکسیتی (BX)، مرز بین سازند الیکا و شمشک
۴۱	۹-۱-۳ سازند شمشک (Js)
۴۲	۲-۳ مطالعات پتروگرافی
۴۲	۱-۲-۳ پتروگرافی ماسه سنگ درود
۴۲	۲-۲-۳ پتروگرافی سنگ‌های کربناتی روته
۴۲	۳-۲-۳ پتروگرافی سنگ‌های آذرین
۴۳	۴-۲-۳ پتروگرافی و کانی شناسی بوکسیت
۴۸	۱-۴-۲-۳ محدوده تغییرات Eh-pH در طی تشکیل بوکسیت با استفاده از تجمعات کانایی
۴۸	۵-۲-۳ پتروگرافی آهک الیکا
۵۱	۳-۳ ژئوشیمی
۵۱	۱-۳-۳ پروتولیت نهشته
۵۵	۲-۳-۳ شدت فرایند هوازدگی
۵۶	۳-۳-۳ شاخص هوازدگی
۵۸	۴-۳-۳ ژئوشیمی عنصری
۵۸	۱-۴-۴-۳ روش ژئوشیمی محاسبات تغییر جرم

V

- ۶۵ ۳-۴-۲- اکسیدهای اصلی و فرعی
- ۶۹ ۳-۴-۳- عناصر لیتوفیلی درشت یون
- ۷۰ ۳-۴-۴- عناصر با قدرت میدان پایداری بالا
- ۷۰ ۳-۴-۵- عناصر جزئی عبوری
- ۷۵ ۳-۴-۶- عناصر نادر خاکی
- ۷۸ ۳-۴-۶-۱- الگوهای توزیع REEها در واحدهای بوکسیتی
- ۷۹ ۳-۴-۶-۲- بررسی آنومالی Ce, Eu و نسبت‌های $(La/Yb)_{w/p}$ و $(LREE/HREE)_{w/p}$
- ۸۰ ۳-۴-۶-۳- کانی‌های میزبان عناصر نادر خاکی
- ۸۶ ۳-۴-۵- تیپ نهشته بوکسیت پرمو- تریاس بیگلر

فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۸۹ ۴-۱- بررسی‌های صحرائی
- ۹۰ ۴-۲- پتروگرافی و کانی شناسی
- ۹۱ ۴-۳- سنگ مادر
- ۹۲ ۴-۴- ژئوشیمی
- ۹۳ ۴-۵- پیشنهادات
- ۹۴ منابع

ضمایم

چکیده انگلیسی

۱-۱- ژئوشیمی عناصر Si, Ti, Fe و Al در محیط‌های هوازدگی

در فرایندهای رسوبی، آلومینا تحت شرایط اسیدی ($\text{pH} < 4$) و یا شرایط قلیایی ($\text{pH} > 9$) متحرک می‌باشد (Smironov, 1983). ترسیب هیدروکسیدهای آلومینیوم در pHهای بالاتر از ۴/۱ شروع می‌شود (Mason and Moore, 1982). آلومینای کلوئیدی نسبت به سیلیس کلوئیدی پایداری کمتری دارد و سریعتر از سیلیس شروع به انعقاد می‌کند. جدایش دو ترکیب در طول مهاجرت مشترک، انجام می‌گیرد. آلومینا معمولاً نسبت به آهن پویایی کمتری داشته و برای حل شدن آن شرایط اسیدی‌تر نسبت به انحلال آهن، مورد نیاز است (McFarlane, 1976). علیرغم اینکه انحلال طبیعی آلومینیوم به آسانی انحلال آهن نیست، تجمعات بازمانی آن کمتر از نهشته‌های آهن رایج است. در این رابطه شرایط لازم برای تمرکز بیشتر آلومینا عبارتند از: بارش‌های فراوان، وفور میکروفلورا

(رستنی های میکروسکوپی)، زهکشی آزاد و غیره که همگی آنها pHهای نسبتاً بالا ایجاد می نمایند (McFarlane, 1976).

آلومینیوم می تواند به شرط حضور مواد هوموس (Humus)، در محدوده وسیعی از pH در خاک متحرک شود. در یک پروفیل هوازده فرضی، آلومینا و آهن ممکن است رفتار متضادی داشته باشند، بطوریکه افزایش یکی موجب کاهش دیگری گردد (McFarlane, 1976).

آهن فریک در شرایط اکسید کننده خاک های معمولی بسیار پایدار است و عملاً بی تحرک محسوب می شود. با وجود این، آهن می تواند مسافت های بسیار محدودی بصورت کلئید یا به صورت کمپلکس ارگانیکی جابه جا گردد. تحت شرایط آبگیری یا احیاء توسط باکتری های خاک، آهن فریک می تواند با تبدیل شدن به آهن فرو متحرک شود. آهن فرو عمدتاً در pHهای کمتر از ۵/۵ وارد محلول ها می شود اما یافته های آزمایشگاهی نشان می دهند که این عنصر حتی در pHهای کمتر از ۴ نیز می تواند به صورت بازماند (residual) باقی بماند. به مانند آلومینیوم، آهن نیز می تواند به شرط حضور مواد هوموس در محدوده وسیعی از pH در خاک متحرک شود. بسیاری از محققین، امکان جابه جایی آهن توسط محلول های توری را مورد بحث قرار داده اند (McFarlane, 1976). پوشش گیاهی در مناطق حاره ای از مهمترین فاکتورهایی است که موجب افزایش تحرک آهن می گردد (McFarlane, 1976).

موضوع تحرک سیلیس هنوز مسائل دشواری در پیش رو دارد. دماهای نسبتاً بالای سطح الارضی جابه جایی و انتقال آن را باعث می شوند. در مناطق حاره ای، پایین بودن اسیدیته محلول های موجود در خاک تحرک سیلیس را موجب می گردد. در مقابل، یافته های آزمایشگاهی نشان می دهند که مقدار جابه جایی سیلیس در ضمن آزمایشات شویس مواد، در محلول هایی با اسیدیته کمتر به مراتب بیش از محلول های اندکی قلیایی می باشد. سیلیس در شرایط تقریباً خنثی حلالیت بیشتری نسبت به شرایط اسیدی ندارد (Kruskopf, 1967). تحرک سیلیس به تحقیقات بیشتری نیاز دارد.

برای تحرک تیتانیوم محدوده pH کمی در نظر گرفته می شود. لیکن شرایط اسیدیته قوی و حضور مقادیر قابل ملاحظه ای از مواد ارگانیک، موجب تحرک این عنصر می شود (Ma et al, 2007). از آنجایی که تیتانیوم ممکن است جابه جا شود بنابراین عدم تمرکز این عنصر نمی تواند دلیلی بر عدم امکان بازماندگی آن در فرایند هوازدگی باشد. همین طور تجمع تیتانیوم در قسمت های سطحی پوسته نشانه ای برای منشأ بازماند آن نیست، مگر اینکه فرم

پایدار و اولیه بودن در آن ثابت شود. تیتانیوم که غالباً بصورت ایلمنیت دیده می‌شود، یک فرم اولیه و پایدار به شمار می‌رود (Valeton, 1972).

۲-۱- تعریف بوکسیت

بوکسیت یک ماده معدنی رسوبی غنی از مواد آلئیتیک (Allitic) است که در نتیجه هوازدگی سنگ‌های مختلف در آب و هوای گرم یا نیمه گرم با توجه به مورفولوژی و زهکشی مناسب تشکیل شده و مجموع هیدروکسید یا اکسیدهای موجود در آن بیش از ۵۰٪ بوده و هیدروکسیدهای آلومینیوم بیشترین مقدار آن را تشکیل می‌دهند (Bardossy, 1982).

در صنعت، بوکسیت به کانه‌ای اطلاق می‌شود که نه تنها باید شرایط موجود در تعریف زمین‌شناسی بوکسیت در مورد آن صدق کند، بلکه لازم است که تولید آن در شرایط جغرافیایی و اقتصادی مورد نظر نیز مقرون به‌صرفه باشد. به عبارت دیگر، اصطلاح کانسنگ بوکسیت در مورد بوکسیتی بکار می‌رود که مقدار آلومینا در آن بیشتر از ۴۰ الی ۵۰ درصد وزنی، Fe_2O_3 حداکثر ۲۰ درصد وزنی و مقدار SiO_2 حداکثر ۳ الی ۵ درصد وزنی باشد.

۳-۱- خواص فیزیکی بوکسیت

مهمترین خواص فیزیکی بوکسیت عبارتند از: نحوه شکستگی، لمس، سختی، تراکم و رنگ

۱-۳-۱- نحوه شکستگی بوکسیت

بطور کلی وضعیت شکستگی بوکسیت را می‌توان به صورت ناهموار، هموار، صدفی، متورق و خاکی مشاهده نمود.

۱-۳-۲- لمس بوکسیت

بوکسیت‌ها از نظر لمس بصورت بسیار زبر، زبر، تا حدودی زبر، نرم، چرب و صاف می‌باشند.

۱-۳-۳- سختی بوکسیت

سختی بوکسیت عبارت است از مقاومت کانسنگ در برابر تغییر شکلی که ممکن است در نتیجه اعمال فشارهای مکانیکی خارجی پدید آید. بنابراین، این ویژگی بوکسیت به سادگی از روی سختی متوسط کانی‌های تشکیل

دهنده کانسنگ بدست نمی آید، بلکه این ویژگی علاوه بر سختی اجزاء مینرالی، به بافت، اندازه و تراکم اجزاء نیز بستگی دارد.

۱-۳-۴- میزان تراکم بوکسیت

تراکم بوکسیت می تواند بطور کلی بر حسب تخلخل آن سنجیده شود. در یک نهشته معین، بوکسیت های مرغوب دارای تخلخل بالایی هستند. کانسنگ های بسیار متخلخل، نفوذپذیری خوبی داشته و بنابراین در مقابل فرسایش آب مقاوم تر هستند.

۱-۳-۵- رنگ بوکسیت

رنگ بوکسیت شامل طیف وسیعی از رنگ ها مانند سفید، زرد کم رنگ، اخرا، قهوه ای زرد، صورتی مایل به قهوه ای، قرمز آجری، قرمز حنایی، قهوه ای شکلاتی، بنفش، سبز، خاکستری روشن، و حتی سیاه را در بر می گیرد. رنگ بوکسیت معمولاً توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، کانی های رسی آهن دار، مواد آلی و به ندرت کانی های منگنز که در ترکیب بوکسیت وجود دارند، تعیین می گردد. کائولینیت، هالوزیت و کانی های تیتانیوم، بی رنگ یا سفید هستند. هماتیت رنگ قرمز، صورتی یا بنفش، و گوتیت رنگ زرد یا قهوه ای متمایل به زرد ایجاد می کند. مگمیت رنگ بوکسیت را قهوه ای و فری شاموزیت رنگ بوکسیت را قهوه ای تیره می سازد. رنگ خاکستری متعلق به پیریت و مارکاسیت، خاکستری روشن متعلق به سیدریت، سبز از آن کلریت و سیاه خاکستری مربوط به مواد آلی، اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز می باشد. با افزایش مقدار کانی های کروم دار، رنگ بوکسیت تیره تر می شود. بررسی ها نشان می دهد علاوه بر ترکیب مینرالوژیکی، فرآیندهای ژئوشیمیایی موثر بر تشکیل بوکسیت نیز در رنگ آن تأثیر دارند. در شرایط اکسید کننده بوکسیت های قرمز، بنفش، صورتی، زرد، قهوه ای زرد و نیز بوکسیت های رنگارنگ تشکیل می گردد، حال آنکه محیط های احیا کننده ضعیف با رنگ قهوه ای تیره و محیط های احیا کننده قوی با رنگ های سبز، خاکستری و سیاه مشخص می شوند. از لحاظ رنگ بیشترین فراوانی از آن بوکسیت های قرمز، صورتی، بنفش، خاکستری و بوکسیت های چندرنگ است.

۱-۴-۱- کانی شناسی بوکسیت

بوکسیت ماده ای با ترکیب متغیر است که اساساً از یک یا چند کانی با ترکیب اکسید هیدراته آلومینیوم و ناخالصی هایی از کانی های رسی، اکسید آهن و تیتان و کانی هایی در مقادیر کم و حتی ناچیز، تشکیل شده است.

۱-۴-۱- اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم

اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم که در ترکیب بوکسیت یافت می‌شوند عبارتند از گیبسیت، بوهمیت، دیاسپور، و چند کانی دیگر. با وجود اینکه کروندوم در برخی نهشته‌های بوکسیتی یافت می‌شود لیکن در اکثر اوقات این کانی را جزء کانی‌های سازنده بوکسیت در نظر نمی‌گیرند. کانی شناسی بوکسیت‌ها رابطه نزدیک با سن نهشته‌ها دارد. بوکسیت‌های جوان گیبسیتی، با افزایش سن، مقدار کانی‌های بوهمیت و دیاسپور بیشتر می‌شود. از سایر اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم می‌توان به بایریت ($\alpha\text{-Al(OH)}_3$ (Bayerite)، نورداستراندیت (Nordstrandite) Al(OH)_3 ، توکانیت (Tucanite) $\text{Al}_2(\text{OH})_6 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ، اسکاربروئیت ($\text{Al}_2(\text{CO}_3) \cdot 12\text{Al(OH)}_3$ (Scarbroite) و آلوموژل اشاره کرد (Bardossy, 1982).

۱-۴-۲- کانی‌های رسی

کانی‌های رسی معمولاً به چهار زیر گروه (۱) کائولینیت، (۲) مونت موریلونیت یا اسمکیت، (۳) ایلیت و (۴) کلریت تقسیم می‌شوند. تمامی اعضای این چهار زیرگروه جزو آلومینوسیلیکات‌های لایه‌ای هستند (Grim, 1968; Mason and Moore, 1982).

مهمترین کانی‌های رسی موجود در بوکسیت‌ها عبارتند از: کائولینیت، هالوزیت، دیکیت، نانترونیت و بیدلیت. کائولینیت به عنوان یکی از مهمترین ناخالصی‌ها، تقریباً در تمامی بوکسیت‌ها و واحدهای بافت ساز آنها دیده می‌شود. هالوزیت نیز جزو ناخالصی‌های مهم بوکسیتی بوده و می‌تواند محصول تبلور آلفان بی‌شکل باشد. از سایر سیلیکات‌های ورقه‌ای که در ترکیب نهشته‌های بوکسیتی حضور دارند می‌توان به کانی‌های شاموزیت، موسکویت، ایلیت و پیروفیلیت اشاره کرد (Bardossy, 1982).

۱-۴-۳- اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن

هماتیت به مقدار فراوان و در اغلب بوکسیت‌ها و گوتیت در برخی از ذخایر بوکسیتی کانی معمول آهن‌دار می‌باشد. مگنتیت به صورت آواری و بعضاً بصورت پیروئید در ذخایر بوکسیتی دیده می‌شود. مگمیت در ماتریکس یا به صورت دانه‌ای در کانسنگ‌های بوکسیت مشاهده شده است. از سایر اکسیدهای آهن می‌توان به اولویت ($\text{Fe}^{+2}, \text{Ti}^{+4}$) $\text{Fe}^{+2} \text{O}_4$ (Ulvite) و کرومیت (Cr_2FeO_4) و از هیدروکسید آهن به سیدروژل ($\text{FeOOH}^+ \text{aq}$) اشاره کرد (Bardossy, 1982).

۱-۴-۴- اکسیدهای تیتانیوم

کانی آناتاز در بسیاری از ذخایر بوکسیتی از جمله بوکسیت‌های کارستی دیده می‌شود. روتیل مانند آناتاز در خمیره کانسنگ دیده می‌شود. ایلمنیت معمولاً به صورت آواری دیده می‌شود که مقدار آن از دو کانی قبلی کمتر است از سایر کانی‌های این سری می‌توان به بروکیت (Brookite) (TiO_2)، فری ایلمنیت (Ferri-ilmenite) و پروسکیت (Perovskite) (CaTiO_3) و جیکیلیت (Geikielite) (MgTiO_3) اشاره کرد (Bardossy, 1982).

۱-۴-۵- اکسید سیلیس

ناخالصی‌های سیلیس موجود در بوکسیت‌ها معمولاً به صورت کوارتز ظاهر می‌شوند. لیکن در بعضی نهشته‌ها اوپال و کریستوبالیت نیز گزارش شده‌اند. کوارتز غالباً در بوکسیت‌های کارستی مشاهده و عمدتاً دارای منشأ آواری است (Bardossy, 1982).

۱-۴-۶- سایرکانی‌های همراهی کننده بوکسیت

این کانی‌ها عمدتاً شامل کربنات‌ها، فسفات‌ها و سولفیدها می‌باشند.

کربنات‌ها: کلسیت (CaCO_3) و دولومیت $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ بیشتر در بوکسیت‌های کارستی و به میزان چند درصد وجود دارند. سیدریت (FeCO_3) در معدودی از کانسنگ‌های بوکسیت، بخصوص انواع کارستی می‌تواند حتی تا ۲۵٪ نیز حضور داشته باشد (Bardossy, 1982).

سولفات‌ها: آلونیت $(\text{K,Na})\text{Al}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ جزو کانی‌های فراوان ذخایر بوکسیت کارستی است و معمولاً اپی‌ژنتیک و یا سوپ‌ژنتیک می‌باشد. از دیگر کانی‌های سولفات‌ها موجود در ذخایر بوکسیتی، می‌توان به آلومینیت (Aluminite) و ژپیس اشاره نمود (Bardossy, 1982).

فسفات‌ها: آپاتیت $\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)_3$ فراوانترین کانی فسفات‌ها در بوکسیت‌های کارستی است و به صورت ذرات ریز در خمیره کانسنگ‌ها دیده می‌شود. کراندالیت با فرمول $\text{CaAl}_3\text{H}(\text{OH})_6(\text{PO}_4)_2$ ، بعد از آپاتیت، فراوانترین کانی فسفات‌ها ذخایر بوکسیتی است (Bardossy, 1982).

سولفیدها: پیریت FeS_2 عمده‌ترین سولفور موجود در بوکسیت‌ها است که غالباً منشأ دیاژنتیک دارد. علاوه بر پیریت کانی‌های براووئیت (Bravoite) $(\text{Ni,Fe})\text{S}_2$ و پیریت نیکل‌دار نیز در بوکسیت‌های شاموزیتی یافت می‌شوند. کانی‌های مارکاسیت و گالن سولفیدهای دیگری هستند که از برخی نهشته‌های کارستی گزارش شده‌اند (Bardossy, 1982).

۱-۵- بافت بوکسیت

منظور از بافت بوکسیت عبارت است از شکل و اندازه‌ی اجزای مینرالی و سنگی سازنده‌ی بوکسیت و نحوه‌ی تجمع، حالت و چگونگی آرایش آنها. واحدهای بافتی ساده شامل یک دانه‌ی منفرد از یک نوع کانی بوده و واحدهای مرکب مشتمل بر تجمعی از این دانه هستند. در طبقه‌بندی این عناصر باید به عوامل ژنتیکی و مورفولوژیکی توجه داشت. باردوسی (Bardossy, 1982) با توجه به این موارد آنها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرده است:

الف) واحدهای بافت ساز زمینه: شامل ریزترین اجزای بوکسیت‌ها است. بسته به اندازه‌ی متوسط اجزاء چهار نوع ماتریکس قابل تمایز است:

- ۱- زمینه پلیتومورفیک (Pelitomorphic Matrix) که در آن اندازه‌ی ذرات کمتر از ۱ میکرون است.
- ۲- زمینه میکروگرانولار (Microgranular Matrix) که در آن اندازه‌ی ذرات بین ۱ تا ۵ میکرون است.
- ۳- زمینه پان ایدیومورفیک (Panidiomorphic Matrix) که در آن اندازه‌ی ذرات ۵ تا ۱۰۰ میکرون است.
- ۴- زمینه درشت بلور (Macrocrystalline Matrix) که در آن اندازه‌ی ذرات بیش از ۱۰۰ میکرون است.

ب) واحدهای بافت ساز متمایز: این واحدها شامل انواع زیر می‌باشند:

۱- کانی‌های بافت ساز: این کانی‌ها شامل کانی‌های درج‌ازا، کانی‌های دروغین (Pseudomorph) و کانی‌های آواری می‌باشند.

۲- قطعات بافت ساز بوکسیتی: این قطعات شامل ذرات بوکسیتی آواری با قطر ۶۰ میکرون تا ۲ میلی متر، قطعات بوکسیتی آواری با قطر ۲ میلی متر تا ۱۰ سانتی متر، قلوه‌های بوکسیت با قطر بزرگتر از ۱۰ سانتی متر، دانه‌های کروی (Spheroids) می‌باشند.

۳- واحدهای بافت ساز با شکل متحدالمرکز: این واحدها شامل میکرواوئیدها (Micro-oooids) با قطر کوچکتر از ۱۰۰ میکرون، اوئیدها (Ooids) با قطر ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرون، پیزوئیدها (Pisoids) با قطر ۱ تا ۵ میلی متر و ماکروپیزوئیدها (Macro-Pisoids) با قطر بیش از ۵ میلی متر می‌باشند.

بطور کلی و بدون در نظر گرفتن قطر واحدهای مذکور، می‌توان تمامی آنها را اسپاستوئیدها (Spastoids) نامید.

۴- فیلم‌ها و پوشش‌های روی عناصر قبلی

۵- پرکننده‌های فضای خالی (Pore Filling)

۶- گره‌ها (Nodes)

۷- آشیانه‌ها و کنکرسیون‌ها (Nests and Concretions)

۸- شکافه پرکن‌ها (Fissure Fillings)

۱-۵-۲- انواع بافت در ذخایر بوکسیتی

(الف) بافت‌های درجازا (Authigenic Textures):

۱- بافت پلیتومورفیک (Pelitomorphic Texture): این بافت عمدتاً از ماتریکس پلیتومورفیک تشکیل شده و منشأ آن می‌تواند سین‌ژنتیک، اپی‌ژنتیک و یا سوپ‌ژنتیک باشد.

۲- بافت میکروگرانولار (Microgranular Texture): این بافت عمدتاً از ماتریکس میکروگرانولار تشکیل شده و منشأ آن سین‌ژنتیک، دیاژنتیک و اپی‌ژنتیک است.

۳- بافت پان ایدیومورفیک-گرانولار (Panidiomorphic-granular Texture): دانه‌های مینرالی ایدیومورف بخش اصلی بافت مذکور را تشکیل داده و منشأ آن می‌تواند دیاژنتیک یا اپی‌ژنتیک باشد.

۴- بافت پورفیری دروغین (Pseudoporphyrlic Texture): در این بافت دانه‌های مینرالی درشت درجازا توسط یک زمینه پلیتومورفیک یا میکروگرانولار احاطه می‌شوند. منشأ این بافت دیاژنتیک یا اپی‌ژنتیک است.

۵- بافت اوئیدی (Ooidic texture): این بافت منشأ دیاژنتیک داشته و شامل تعداد زیادی اوئید است.

۶- بافت پیزوئیدی (Pisoidic Texture): در این بافت، واحدهای پیزوئید به وفور دیده می‌شوند. منشأ آن دیاژنتیک است.

۷- بافت ماکروپیزوئیدی (Macropisoidic Texture): این بافت عمدتاً از واحدهای ماکروپیزوئیدی با منشأ دیاژنتیک تشکیل شده است.

۸- بافت جریان‌ی - کلومورفی (Fluidal-collomorphic Texture): در این بافت، ماتریکس فضاهای بین خرده سنگ‌ها و پبل‌های بوکسیتی را در بر می‌گیرد. این ماتریکس ممکن است شامل واحدهای بافت‌ساز دیگری باشد که در اشکال جریان‌ی یا منظم آرایش یافته‌اند. این بافت به ندرت و فقط در بوکسیت‌های کارستی دیده می‌شود.

۹- بافت برشی دروغین (Pseudobreccia Texture): در این بافت، ماتریکس بوسیله شبکه بهم فشرده‌ای از رگه‌ها قطع می‌گردد. این رگه‌ها بر اثر گذشت زمان از ژل پدید آمده و قطعاتی را به وجود می‌آورند که در نگاه

اول، به بوکسیت حالت برشی می دهند اما قرارگیری منظم قطعات مذکور در کنار هم نشان دهنده منشأ درج‌زای آنها است. این بافت ممکن است در اثر فرآیندهای دیاژنتیک و اپی ژنتیک بوجود آید.

۱۰- بافت نودولار (Nodular Texture): این بافت عمدتاً به صورت گرهک‌های مدور یا کنکرسین‌های نامنظم بوده و منشأ آن می‌تواند دیاژنتیک یا اپی ژنتیک باشد.

۱۱- بافت پلیتی (Pelitic Texture): این بافت متشکل از اجزاء خیلی ریز (Pelite) و نسبتاً گرد بوده و می‌تواند اولیه یا ثانویه باشد.

ب) بافت های آواری (Allogenic-clastic Textures):

۱- بافت میکروکلاستیک (Microclastic Texture): خرده سنگ‌های تخریبی با قطر کمتر از ۶۰ میکرون، واحد اصلی سازنده این بافت می‌باشند.

۲- بافت آرنایتی (Arenitic Texture): این بافت عمدتاً از اجزای تخریبی با قطر ۶۰ تا ۲۰۰۰ میکرون تشکیل شده است.

۳- بافت دانه مدور (Round grained Texture): این بافت عمدتاً از دانه‌های گرد شده تشکیل شده است.

۴- بافت کنگلومرای (Conglomerate Texture): این بافت عمدتاً از پیل‌های بوکسیتی درشت‌تر از ۲ میلیمتر تشکیل شده است.

۵- بافت برشی (Breccia Texture): اندازه خرده سنگ‌های بوکسیتی تشکیل دهنده این بافت در محدوده ۲ الی ۱۰۰ میلیمتر می‌باشند.

۶- بافت آگلومرای (Agglomerate Texture): این بافت از قلوه‌های بوکسیتی بزرگتر از ۱۰ سانتی متر تشکیل شده است.

ج) بافت‌های دگرگونی:

۱- بافت گرانوبلاستیک (Granoblastic Texture): این بافت از بلورهای درشت ایزومتریک و تقریباً هم اندازه تشکیل شده است.

۲- بافت پورفیروبلاستیک (Porphyroblastic Texture): در این بافت یک ماتریکس پان ایدیومورف، بلورهای درشت پورفیروبلاست را احاطه کرده است.

۳- بافت لپیدوبلاستیک (Lepidoblastic Texture): این بافت عمدتاً از بلورهای درشت پولکی یا صفحه‌ای تشکیل شده است.

۱-۶- ژنز بوکسیت

فرضیه‌های گوناگون و متناقضی وجود دارد که به توضیح و چگونگی تشکیل بوکسیت‌ها می‌پردازند. در این میان زمین‌شناسان این مسئله را بطور کلی پذیرفته‌اند که بوکسیت از هوازگی شیمیایی سنگ‌های حاوی آلومینیوم نتیجه می‌شود. قبل از تشریح فرضیه‌های مختلف در مورد ژنز، شایان ذکر است که اصطلاح بوکسیت‌های لاتریتی و بوکسیت‌های کارستی، به ترتیب برای بوکسیت‌های تشکیل شده بر روی سنگ بستر آذرین و سنگ بستر کربناته بکار برده می‌شود. اگرچه نحوه تشکیل این بوکسیت‌ها تشابهات زیادی دارد، ولی به علت رفتار خاص سنگ‌های بستر کربناته در تشکیل این کانسنگ‌ها، تشکیل این دو نوع نهشته بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۶-۱- تشکیل بوکسیت‌های لاتریتی

این بوکسیت محصول تجمع یافته نوع به خصوصی از هوازگی است که روی سنگ‌های سیلیکاته آلومینیوم‌دار که کوارتز آزاد قابل توجهی ندارند، صورت می‌گیرد. وقتی چنین سنگ‌هایی در معرض هوازگی شیمیایی قرار می‌گیرند، کانی‌ها و ترکیبات بسیار محلول، شسته شده و اجتماعی از ترکیبات کم محلول برجای می‌ماند. در واقع این فرضیه مبتنی بر عمل نوع خاصی از هوازگی است. در آب و هوای گرم و تحت شرایط مشخصی، سیلیکات‌های متشکله سنگ‌ها و کانی‌های رسی خرد و تجزیه شده، بخش اعظم سیلیس خارج می‌گردد و اکسیدهای آلومینیوم و آهن (و به مقدار کمی اکسید تیتانیوم و احتمالاً منگنز) به صورت بازماند در محل تمرکز می‌یابند، این فرآیند تحت عنوان لاتریتی شدن معروف است. چنانچه فرایند مذکور به حد کافی در یک زمان طولانی ادامه یابد و محصولات هوازده از فرسایش در امان باشند، نهشته‌های لاتریتی حاصل می‌شوند. بوکسیت‌ها و لاتریت‌های آلومینیوم‌دار، انواعی از لاتریت‌ها می‌باشند که غنی از آلومینیوم می‌باشند. این نهشته‌های غنی از آلومینیوم در صورتی به وجود می‌آیند که در روند لاتریتی شدن علاوه بر سیلیس و فلزات محلول قسمتی از آهن نیز از زون هوازگی شسته شده و خارج شود. بنابراین بوکسیت، محصول فرآیند بوکسیتی شدن و لاتریتی شدن شدید، محسوب می‌شود.

۱-۶-۲- تشکیل بوکسیت کارستی

در مورد منشأ مواد آلومینه در بوکسیت‌هایی که بر روی سنگ‌های کربناته نهشته شده‌اند، عقاید مختلفی وجود دارد. برخی از زمین شناسان بر این باورند که منشأ آنها بازماندهای نامحلولی هستند که بعد از شسته شدن سنگ‌های کربناته، برجای مانده‌اند. به عقیده‌ی عده‌ای دیگر، فروافتادگی‌های کارستی حوضه‌های تله مانندی هستند که مواد آلومینه به درون آنها حمل شده و سپس تحت تأثیر فرآیند لاتریتی شدن قرار می‌گیرند. به عقیده‌ی باردوسی (Bardossy, 1982) عوامل اساسی در تشکیل بوکسیت‌های کارستی عبارتند از: (۱) منشأ مواد، (۲) نحوه-ی بوکسیتی شدن و شرایط آب و هوایی، ژئومورفولوژیکی، فیزیکوشیمیایی و زیست شناختی حاکم بر آن، (۳) انتقال و نحوه‌ی آن و (۴) مکان و محیط نهشته شدن ذخایر. ایشان همچنین فرضیه‌های ارائه شده در مورد منشأ بوکسیت‌های کارستی را بر اساس نقش و اهمیتی که برای هر یک از عوامل بالا قائل هستند به گروه‌های زیر تقسیم کرده است:

۱-۶-۲-۱- فرضیه لاتریتوژنیک (**Lateritogenic Theory**): براساس این فرضیه، بوکسیت‌های کارستی از لاتریت‌های برجا یا از لاتریت‌هایی که قبلاً تشکیل شده و در اثر فرسایش به محل فعلی انتقال یافته‌اند، منشأ می‌گیرند. به عقیده بسیاری از زمین شناسان مانند آرونیس (Aronis, 1955)، باردوسی (Bardossy and Mack, 1967) و کومبس (Combes, 1969) بوکسیت‌های مرکز یونان، آریچ فرانسه و ذخایر اورال مرکزی بدین صورت تشکیل شده‌اند.

۱-۶-۲-۲- فرضیه تراروسا (**Terra Rossa Theory**): تراروسا در زبان ایتالیایی به معنی خاک سرخ بوده و پسماند حاصل از هوازدگی سنگ‌های کربناته قدیمی‌تر از بوکسیت می‌باشد. تفاوت تراروسا و بوکسیت در این است که در تراروسا مقدار سیلیس بیشتر و مقدار آلومینیوم و تیتان کمتر است. در این فرضیه، بوکسیت بطور درجا و یا جابجایی محدود، در اثر بوکسیتی شدن تراروسای حاصل از سنگ‌های بستر ذخایر مذکور، پدید می‌آید. بنابراین بوکسیت کارستی محصول هوازدگی تراروسای حاصل از دگرسانی سنگ‌های کربناته هستند. تراروسا در محیط قلیایی تبدیل به بوکسیت می‌شود و سیلیس آزاد شده و به شکل کوارتز سامیتی (psamitic quartz) - که سالدام (Saldam) نامیده می‌شود - درحفرات سنگ‌های آهکی مجاور ناحیه بوکسیتی رسوب می‌کند. ماریک (Maric, 1972) و وندل و همکاران (Vendel et al, 1971) بعضی از کانسارهای بوکسیتی کارستی جهان را نتیجه بوکسیتی شدن تراروسای حاصل از سنگ‌های آهکی بستر می‌دانند.

۱-۶-۲-۳- فرضیه شیموژنیک (**Chemogenic Theory**): براساس این فرضیه، آلومینیوم، آهن و تیتانیوم حاصل از هوازدگی سنگها، به صورت محلول وارد دریاها یا دریاچهها می شود و در آنجا تحت شرایط مناسب به صورت بوکسیت رسوب می نماید. مطابق نظریه های اخیر، اسیدهای آلی و اسید سولفوریک حاصل از هوازدگی سطحی سنگهای پیریت دار، به عنوان حلال در این فرآیند عمل می نماید.

از طرفداران این نظریه می توان تروبینا (Trubina, 1958) و کریوتسوف (Krevtsov, 1969) را نام برد.

۱-۶-۲-۴- فرضیه هیدروترمال (**Hydrothermal Theory**): براساس این فرضیه، آبهای گرم ضمن حرکت خود به سمت بالا، آلومینیوم، آهن، و تیتانیوم موجود در سنگهای مختلف مسیر خود را حل نموده و به شکل سولفات بالا می آورند و در اثر تغییرات، بوکسیت را در محدوده آبهشان رسوب می دهند. محلولهای بالا آمده توسط سیستمهای هیدروترمال همچنین می توانند بوسیله آبهای جاری اسیدی به دریا حمل شده و پس از خنثی شدن حالت اسیدیشان، در آنجا به صورت بوکسیت رسوب نمایند. از طرفداران این نظریه می توان به زیلینف (Zelenov, 1964) و یانشین (Yanshin, 1968) اشاره کرد.

۱-۶-۲-۵- فرضیه ولکانوژنیک (**Volcanogenic Theory**): براساس این فرضیه، ذخایر بوکسیت کارستی بطور درجا و از هوازدگی لاتریتی خاکسترهای آتشفشانی که بر روی سنگهای کربناته قرار دارند، تشکیل می شوند. این نظریه توسط کومر (Comer, 1974) در مورد ذخایر جامائیکا مطرح شده است.

۱-۶-۲-۶- فرضیه فیتوژنیک (**Phytogenic Theory**): برگ (Berg, 1949) به عنوان تنها مدافع این نظریه معتقد است که بوکسیت های دونین در شمال کوه های اورال، محصول فرایندهای حیاتی گیاهان مردابی می باشند. باید توجه داشت که هر یک از فرضیه های مذکور، براساس مطالعات انجام یافته بر روی نهشته های مشخصی از بوکسیت های کارستی ارائه شده است. لذا هیچ یک بطور جامع بیانگر نحوه تشکیل بوکسیت های کارستی نیستند. در بین این فرضیات تئوری های لاتریتوژنیک و تراوسا طرفداران بیشتری دارند.

۱-۶-۳- عوامل موثر در تشکیل نهشته های بوکسیتی

شرایط اصلی و مطلوب برای تشکیل بوکسیت را می توان چنین خلاصه نمود:

(۱) آب و هوای گرم یا نیمه گرم (Sinitysn, 1976).

(۲) وجود سنگ های آلومینیوم دار و واجد کانی های قابل حل که قابلیت تبدیل به بوکسیت در شرایط مناسب هوازدگی را داشته باشند (Shaffer, 1983).

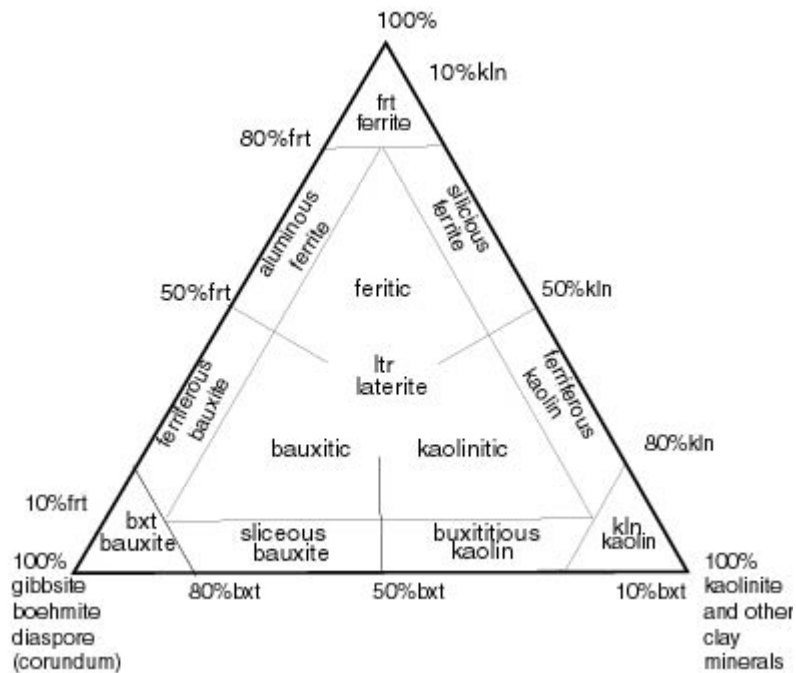
- ۳) وجود تناوبی از بارندگی های متوسط تا فراوان و فصول خشک به منظور تأمین امکان فروپاشی سیلیکات ها و انحلال سیلیس تحت شرایط خاص pH و Eh (Shaffer, 1983).
- ۴) حضور پوشش گیاهی و باکتری ها (Gow and lozej, 1993).
- ۵) شرایط توپوگرافی ملایم تا متوسط که حرکت آزاد آب های زیرزمینی را باعث شده و کمترین میزان فرسایش را موجب گردد. چنین سطوحی، تراوش و نفوذ تدریجی آب های جوی فرورو را از محیط مقدور می سازند (Bardossy, 1982).
- ۶) شرایط زیرسطحی مناسب که خروج باطله های محلول را از محیط تسهیل نماید (Valeton, 1972).
- ۷) وجود پایداری تکتونیکی برای مدت های مدید (Bardossy and Aleva, 1990).
- ۸) نگهداری و حفظ شدگی محصولات مورد نظر (Valeton, 1972).

۱-۷- طبقه بندی بوکسیت

نحوه تشکیل بوکسیت توسط بسیاری از دانشمندان از دیدگاه علم خاک شناسی مطالعه شده است. قرار دادن این ماده در رده بندی های پترولوژیکی و ذخائر معدنی، به مراتب بهتر از قرار دادن آن در طبقه بندی خاک ها است. در این رابطه معیارهایی از قبیل لیتولوژی سنگ بستر (Bardossy, 1982)، ترکیب شیمیایی (Pedro and Berrier, 1971; Bushinsky, 1966)، کانی شناسی (Valeton, 1972; Bardossy, 1982) و موقعیت توپوگرافی (Grubb, 1973) برای طبقه بندی بوکسیت ها پیشنهاد شده اند.

مهمترین طبقه بندی علمی در مورد بوکسیت ها بر پایه گروه های مینرالی (شکل ۱-۱) انجام گرفته است، زیرا هم اجزاء آواری، و هم کانی های نو ظهور می توانند در مشخص کردن صفات ویژه بوکسیت ها موثر باشند.

باردوسی (Bardossy, 1982) طبقه بندی ساده و در عین حال بر اساس سنگ بستر ارائه نموده و آنها را به دو گروه کلی تقسیم کرد. الف) کانسارهای بوکسیت با سنگ بستر آلوموسیلیکاته: این گروه شامل دو گروه زیر می باشند:



شکل ۱-۱- طبقه بندی پتروگرافی بوکسیت، فریت، کائولن و سنگ‌های حد واسط آنها (Bardossy and Aleva, 1990)

۱- نهشته‌های بوکسیت - لاتریتی (Lateritic Bauxite Deposits) که از لاتریتی شدن درجا بر روی سنگ‌های آلومینوسیلیکاته حاصل می‌شوند و شامل دو تیپ، (۱) نهشته‌های بازماندی و (۲) نهشته‌های با ترسیب مجدد موضعی و محدود می‌باشند.

۲- ذخایر نوع تیخون (Tikhvin-Type Deposits): این نهشته‌ها از پروفیل‌های لاتریتی بازماند سرچشمه گرفته و پس از انتقال، به صورت آلوتون بر روی سنگ‌های آلوموسیلیکاته قرار گرفته‌اند.

ب) کانسارهای بوکسیت با بستر کربناته (بوکسیت‌های کارستی) (Karst Bauxite) که با توجه به وضعیت نمونه‌های تیپیک این نوع ذخایر در نقاط مختلف دنیا و همچنین بر اساس ویژگی‌های نهشته‌شناسی و مورفولوژی کانسار، به شش تیپ تفکیک شده‌اند (Bardossy, 1982):

۱-۲- ذخایر تیپ مدیترانه ای (Mediterranean-Type Deposits)

۲-۲- ذخایر تیپ تیمان (Timan-Type Deposits)

۳-۲- ذخایر تیپ قزاقستان (Kazakhstan-Type Deposits)

۴-۲- ذخایر تیپ آریج (Ariege-Type Deposits)

۲-۵- ذخایر تیپ سالنتو (Salento-Type Deposits)

۲-۶- ذخایر تیپ تولسک (Tulsk -Type Deposits)

۱-۸- شاخص های هوازدگی (Weathering Indices)

فرآیندهای هوازدگی ویژگی های ژئوشیمیایی، پتروگرافیکی و مینرالوگرافی سنگها را تغییر می دهند. شاخص های هوازدگی عموماً برای سنجش درجه دگرسانی شیمیایی در مواد مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. تا بحال بیش از ۳۰ شاخص هوازدگی به منظورهای مختلف توسط پژوهشگران ارائه شده است. اکثر شاخص های ارائه شده برای سنگ های اسیدی و حدواسط کاربرد دارند (Ruxton, 1968; Irfan, 1996). تعدادی نیز برای سنگ های بازیک ارائه شده اند (Colman, 1982) و تعدادی نیز قابل کاربرد برای همه سنگها می باشد. اساس همه فرمول های ارائه شده برای این شاخص ها آن است که رفتار شیمیایی عناصر بوسیله درجه هوازدگی کنترل شده و معمولاً با افزایش شدت هوازدگی، اکسیدهای بی تحرک مثل Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و TiO_2 در محیط عمل باقی مانده درحالی که SiO_2 ، Na_2O ، K_2O ، CaO و MgO از محیط عمل خارج شده و بر مقدار LOI افزوده شده است. همه این شاخص ها بر اساس نسبت درصد وزنی یا مولکولی بین گروه های گوناگون اکسیدهای اصلی فرموله شده اند (نسبت تمرکز عناصر متحرک به عناصر بی تحرک).

در حالت کلی شاخص های هوازدگی باید دارای مشخصات زیر باشند (Harnois, 1988; Fedo et al., 1995):

- ۱- باید برای استفاده آسان بوده و شامل عناصر کلی موجود در آنالیزهای شیمیایی باشند.
- ۲- باید محدوده وسیعی از عناصر موبایل در محیط هوازدگی را در فرمول خود شرکت دهند.
- ۳- باید تناسب شیمیایی مناسبی با افزایش هوازدگی داشته باشند و تغییر فاحشی با افزایش میزان هوازدگی نشان دهند.
- ۴- باید قابل کاربرد برای محدوده وسیعی از سنگها و انواع تیپ های سنگی داشته باشند. مهمترین شاخص های هوازدگی در جدول ۱-۱ آورده شده اند.