



بررسی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و پیدایشی کانسار بوکسیت کارستی جاجرم، شمال شرق ایران

لیلا امینی^۱، غلامحسین شمعانیان^{۲*}، مصطفی رقیمی^۱، رضا جعفر زاده^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

۲- شرکت آلومینای ایران (مجتمع بوکیت جاجرم)

(دریافت مقاله: ۸۹/۲/۲۵، نسخه نهایی: ۸۹/۷/۳۰)

چکیده: کانسار بوکسیت جاجرم که در ۱۷۵ کیلومتری جنوب غربی بجنورد قرار دارد، بخشی از کمربند بوکسیت کارستی ایران-هیمالیا محسوب می‌شود. این کانسار به شکل یک افق چینه‌سان بین دولومیت‌های تریاس و شیل و ماسه سنگ‌های ژوراسیک تشکیل شده است. مرز زیرین این افق بیشتر موج‌سان بوده و بوکسیت حفره‌های دولومیت‌های فرودپواره را پر کرده است، در حالی که مرز بالایی آن با شیل و ماسه سنگ‌های فرادپواره هم‌ساز است. بررسی‌های بافتی، هر دو خاستگاه بر جازا و نابر جازا را برای بوکسیت‌ها نشان می‌دهد. دیاسپور، بوهمیت، گیبسیت، شاموزیت، هماتیت، گوتیت، کانی‌های رسی، آناتاز، کانکرنیت، کراندالیت، پیریت و کوارتز در پاراژنز کانسنگ شناسایی شدند. این کانی‌ها طی سه مرحله هوازدگی، دیاژنتیک و اپی‌ژنتیک تشکیل شده است. تلفیق داده‌های کانی-شناسی و زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که این کانسار طی دو مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول، مواد بوکسیتی، اکسیدهای Fe و Ti، و کانی‌های رسی بر اثر فرایندهای بوکسیتی‌شدن در جازا از بازالت‌های قلیایی تشکیل شده‌اند. در مرحله دوم، این مواد به حفره‌های کارستی انتقال یافته و با نهشت خود یک افق بوکسیتی نسبتاً ضخیم را ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: بوکسیت کارستی، دیاسپور، بوکسیتی‌شدن، بر جازا، نابر جازا، جاجرم.

مقدمه

کانسارهای بوکسیتی، کانسارهای برونزادی هستند که در شرایط سطحی قاره‌ای و در آب و هوای گرم و مرطوب بر اثر هوازدگی شدید شیمیایی تشکیل می‌شوند. در تشکیل این کانسارها عوامل اقلیمی، زمین‌ساختی، زمین‌ریخت‌شناسی، سنگ‌شیمیایی و سنگ‌فیزیکی دخالت دارند [۲، ۱]. کانسارهای بوکسیتی به دلیل تفاوت در سنگ خاستگاه، سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ بستر، رخداد صحرایی و چگونگی تشکیل دارای رده‌بندی‌های مختلفی هستند، که بر مبنای خاستگاه و چگونگی تشکیل به سه گروه لاتریتی، رسوبی و کارستی قابل تقسیم‌اند [۳].

کانسارهای بوکسیت کارستی که تنها ۱۰ درصد از کل

ذخایر بوکسیتی جهان را تشکیل می‌دهند، به دلیل دارا بودن پیچیدگی‌های پیدایشی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار داشته‌اند [۴-۷]. چیزی که در این کانسارها بیشتر مورد توجه است، چگونگی جدایی عناصر آلومینیم و سیلیسیوم طی فرایندهای بوکسیتی‌شدن است. بر اساس بررسی‌های انجام شده [۳، ۵، ۸-۱۰]، تغییرات pH از مهمترین عوامل مؤثر بر جدایی این عناصر از یکدیگر است. انحلال‌پذیری اکسید آلومینیم در مقایسه با سیلیس، در pH کمتر از ۴ افزایش می‌یابد. در PH‌های بین ۵ تا ۹، انحلال‌پذیری سیلیس اندکی افزایش پیدا می‌کند، ولی اکسید آلومینیم کاملاً نامحلول است [۹، ۱۱]. در این شرایط، با انباشت و غنی‌شدگی اکسید آلومینیم در بخش بالایی افق‌های بوکسیتی، سیلیس، عناصر

* نویسنده مسئول، تلفن: ۴۴۲۷۱۷۳ (۰۱۷۱)، نمابر: ۴۴۲۷۰۴۰ (۰۱۷۱)، پست الکترونیکی: shamanian@yahoo.com

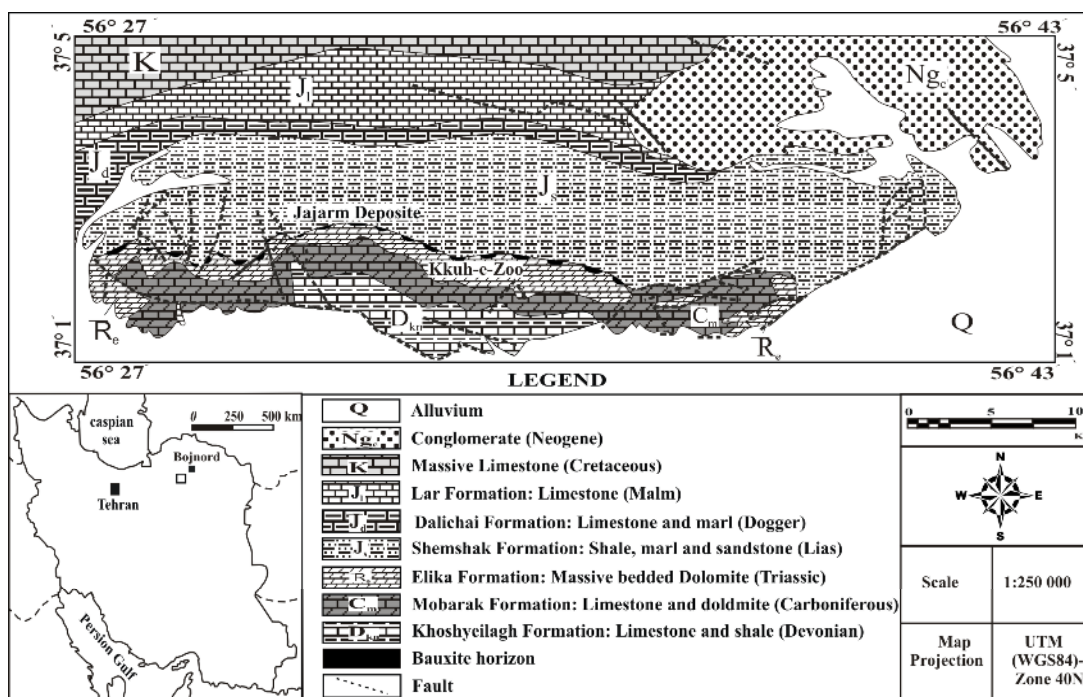
این کانسار توسط پژوهشگران مختلف [۱۴-۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله سعی می‌شود تا با بررسی تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در افق‌های بوکسیتی به تعیین شرایط هوازگی و دلایل منطقه‌بندی افق‌های بوکسیتی پرداخته شود و در نهایت با ارائه مدل ژنتیکی، چگونگی تشکیل این کانسار مورد بررسی قرار گیرد.

زمین‌شناسی

از نظر زمین‌شناسی، منطقه‌ی مورد بررسی در حوضه‌ی ساختاری بینالود واقع شده است. این حوضه از نظر زمین‌ساختی منطقه‌ای بسیار پرتکاپو محسوب می‌شود که با تظاهر چین‌ها و گسل‌های متعدد با ساز و کار راستای طولی و رانشی مشخص می‌شود [۱۹]. عملکرد نیروهای زمین‌ساختی در حاشیه‌ی شرقی حوضه‌ی بینالود باعث چین‌خوردگی طبقات شده و چین‌خوردگی‌هایی مانند تاقدیس زو با ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح دریا را پدید آورده است. کانسار بوکسیت جاجرم در یال شمالی تاقدیس زو قرار دارد که نقشه‌ی ساده شده آن در شکل ۱ به نمایش درآمده است. بر اساس نقشه‌ی زمین‌شناسی کوه کورخود [۲۰] قدیمی‌ترین واحد سنگ‌چینه‌ای رخنمون یافته در منطقه‌ی مورد بررسی شامل دولومیت، ماسه‌سنگ و

قلیایی و عناصر نادر خاکی از این بخش شسته شده و به سمت پایین مهاجرت می‌کنند. برخی از این عناصر در بخش پایینی افق‌های بوکسیتی کارستی، به دلیل وجود سد زمین‌شیمیایی کربناتی، غنی‌شدگی می‌یابند [۸]. در نتیجه این رویداد، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی افق‌های بوکسیتی تغییر یافته و باعث پیدایش منطقه‌بندی در آن‌ها می‌شود. ترکیب کانی‌شناسی کانسارهای بوکسیتی با افزایش دما و فشار و گذشت زمان تغییر می‌کند. گیبسیت در کانسارهای جوان در مقایسه با کانسارهای قدیمی‌تر از فراوانی بیشتری برخوردار است و با افزایش دما و فشار به ترتیب به بوهمیت، دیاسپور و کرسندوم تبدیل می‌شود [۳، ۸].

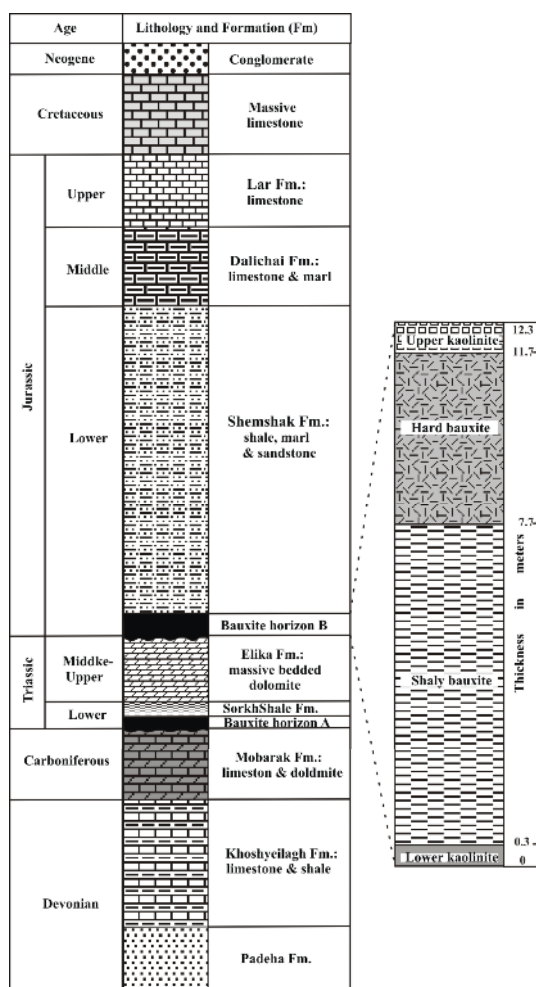
کانسار بوکسیت کارستی جاجرم با موقعیت جغرافیائی ۲۱° ۳۷' طول شرقی و ۵۶° ۳۱' عرض شمالی در فاصله‌ی ۱۷۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان بجنورد (شکل ۱) و در بخش شرقی کمربند بوکسیتی ایران- هیمالیا واقع شده است. این کانسار، با گسترش طولی ۱۶ کیلومتر و حداکثر ضخامت ۴۰ متر، دارای ۲۲ میلیون تن ذخیره‌ی کشف شده است [۱۲، ۱۳]. از ویژگی‌های چشمگیر این کانسار وجود منطقه‌بندی قائم و تغییرات مشخص بافتی و کانی‌شناسی در افق‌های بوکسیتی است. تاکنون، برخی از جنبه‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی کانسار بوکسیت جاجرم. نقشه زمین‌شناسی پایه از [۲۰]. گستره‌ی مورد بررسی با مربع توخالی در نقشه ایران مشخص شده است.

پیشروی دریا در دوران دوم است [۲۳]. در منطقه ی مورد بررسی، این سازند با سنگ‌های کربناتی سازند الیکا پوشیده شده است که بخش زیرین آن از دولومیت، مارن و شیل با سن تریاس زیرین و بخش بالائی آن از لایه‌های ضخیم دولومیت و دولومیت آهکی با سن احتمالی تریاس میانی تشکیل شده است [۱۸]. در تریاس فوقانی، رویدادهای کششی که پس از زمین-ساختی سیمرین پیشین رخ داده است باعث تشکیل گدازه‌های بازالتی قلیایی شده است [۲۴، ۲۳]، و از سوی دیگر ایجاد شرایط قاره‌ای در این زمان، شرایط تشکیل افق‌های بوکسیتی را فراهم آورده است [۲۳]. در منطقه‌ی مورد بررسی، این افق بوکسیتی که به نام افق B موسوم است، در حفره‌های کارستی سازند الیکا تظاهر دارد و با شیل و ماسه سنگ‌های سازند شمشک با سن ژوراسیک تحتانی پوشیده شده است (شکل ۲).

ژیپس‌های وابسته به سازند پادها با سن دونین زیرین است [۲۱] (شکل ۲). روی این سازند، تناوبی از سنگ‌آهک، دولومیت، شیل، سیلت‌سنگ و سنگ‌های آتشفشانی بازی وابسته به سازند خوش‌یلاق با سن دونین قرار دارد که با سنگ‌های کربناتی سازند مبارک با سن کربونیفر پوشیده شده است. پسروی دریا در پایان کربنیفر پیشین، شرایط مناسبی برای گسترش فرایندهای بوکسیتی شدن در فاصله زمانی بین پرمین تا تریاس زیرین فراهم آورده است و موجب تشکیل اولین افق بوکسیتی به نام افق A در منطقه شده است [۱۵]. این افق روی سنگ‌های کربناتی سازند مبارک و در زیر شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ‌شیل با سن تریاس پایینی قرار دارد [۲۲]. شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ‌شیل بیانگر محیط رسوبگذاری ساحلی تا کم عمق بوده و نشان دهنده‌ی اولین



شکل ۲ دنباله‌ی چینه‌شناسی شماتیک واحدهای سنگ‌چینه‌ای موجود در منطقه‌ی جاجرم (چپ). افق بوکسیتی B واقع در بخش گل‌بینی. این نیمرخ یکی از نیمرخ‌های مورد بررسی در این پژوهش است [۲۰-۲۲].

سازندهای دلیچای و لار به ترتیب با سن ژوراسیک میانی و ژوراسیک فوقانی روی سازند شمشک قرار گرفته‌اند و با سنگ‌های کربناتی کرتاسه که در بخش گسترده‌ای از یال شمالی تاقدیس زو رخنمون دارد، پوشیده شده‌اند [۱۴]. این مجموعه چینه‌شناسی، با کنگلومراهای وابسته به نئوژن پوشیده شده است.

مشخصات ماده‌ی معدنی

ماده‌ی معدنی در کانسار بوکسیت جاجرم شامل دو افق بوکسیتی A و B است. افق A، یک واحد بوکسیت شیلی با ضخامت متوسط ۵ متر است که بین سنگ‌های کربناتی سازند مبارک و شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ‌شیل قرار دارد (شکل ۲) و فاقد ارزش اقتصادی است. افق B، با روند عمومی شرقی - غربی (شکل ۱)، در منطقه‌ای به طول ۱۶ کیلومتر و با ضخامت ۱ تا ۴۰ متر، بیشتر به صورت توده‌های عدسی‌شکل در حفره‌های کارستی سازند الیکا تشکیل شده است. مرز زیرین این عدسی‌ها با دولومیت‌های الیکا نامنظم و مرز بالایی آن با شیل و ماسه‌سنگ‌های شمشک منظم و همخوان است (شکل ۲). این گستره گسترش طولی افق B، بر اثر عملکرد گسل‌های راستا لغز، به ۴ بخش اصلی قابل تقسیم است که به ترتیب از شرق به غرب به نام‌های سنگ تراش، تاگوئی، زو و گلبینی نامگذاری شده‌اند. در حال حاضر بهره برداری ماده‌ی معدنی از

بخش‌های زو و گلبینی در حال انجام است که حدود ۸/۲۵ کیلومتر از گسترش طولی افق B را در بر می‌گیرد.

روش بررسی

بررسی‌های انجام شده در این پژوهش شامل دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی است. در بررسی‌های صحرایی، با انتخاب چهار نیمرخ زمین‌شناسی در بخش‌های زو و گلبینی، تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و ضخامت عدسی‌های بوکسیتی و چگونگی ارتباط نهشته‌ها با سنگ‌های بستر و پوشش، مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، تعداد ۳۰ نمونه از بخش‌های مختلف کانسنگ بوکسیتی در طول چهار نیمرخ انتخاب شده بر مبنای تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و رنگ ظاهری جمع‌آوری شدند. علاوه بر این، به منظور بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۳۲ نمونه از همین نقاط به روش لبپری جمع‌آوری شدند. بررسی‌های آزمایشگاهی شامل سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی است. بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی به روش‌های مرسوم میکروسکوپی روی مقاطع نازک و صیقلی انجام شدند. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های مورد بررسی به روش پراش پرتو ایکس (XRD) و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، به روش فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) در آزمایشگاه تحقیقاتی معدن بوکسیت جاجرم تعیین شدند که نتایج آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱ نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی به روش پراش پرتو ایکس (XRD) روی نمونه‌های مورد بررسی در کانسار بوکسیت جاجرم.

شماره نمونه	واحد سنگ شناسی	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
M-1	کانولینیت بالایی	دیکیت، کانولینیت	هالوئیزیت، دیاسپور، آاناتاز، کانکرنیت، هماتیت، کلسیت، کوارتز، گیبسیت، ایلیت، دولومیت، پیریت، پروتیت
M-2	بوکسیت سخت قرمز	دیاسپور، آاناتاز	هماتیت، مگهمیت، بوهمیت، کانکرنیت، کوارتز، کانولینیت
M-3	بوکسیت سخت خاکستری	دیاسپور، شاموزیت، آاناتاز	ایلیت، کانکرنیت، گیبسیت، هماتیت، مگهمیت، کلسیت، پروتیت، دولومیت، پیریت
M-4	بوکسیت شاموزیتی	شاموزیت، آاناتاز، دیاسپور	هماتیت، گوتیت، مگهمیت، ایلیت، پروتیت، کلسیت
M-5	بوکسیت سخت سفید	دیاسپور	آاناتاز، هالوئیزیت، کوارتز
M-6	بخش پائینی بوکسیت سخت	شاموزیت، آاناتاز	دیاسپور، پروتیت، هماتیت، کلسیت، کراندالیت، گوتیت، مگهمیت، کانکرنیت
M-7	بوکسیت شیلی	دیکیت، آاناتاز، مگهمیت، هماتیت، دیاسپور	کراندالیت، کانولینیت، هالوئیزیت، ایلیت، کانکرنیت، کلسیت، هالیت، دولومیت، کوارتز
M-8	کانولینیت پائینی	دیکیت، کانولینیت	هالوئیزیت، ایلیت، دیاسپور، آاناتاز، کراندالیت، کوارتز، هماتیت، مگهمیت

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) در نمونه‌های مورد مطالعه در کانسار بوکسیت جاجرم (مقادیر اکسیدهای اصلی و فرعی و LOI بر حسب درصد وزنی و مقادیر عناصر جزئی بر حسب ppm).

	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11	J-12	J-13	J-14	J-15	J-16	J-17	J-18	J-19	J-20	J-21	J-22	J-23	J-24
Al ₂ O ₃ Wt%	۴۲٫۳۳	۶۶٫۲۴	۶۵٫۷	۳۵٫۷۹	۳۶٫۹۳	۳۷	۴۶٫۰۷	۴۱٫۹۹	۴۳٫۳۵	۳۴٫۴۹	۳۴٫۸۴	۳۵٫۲۱	۳۴٫۶۴	۳۷٫۵۶	۵۶٫۴	۵۲٫۵۴	۳۵٫۱۱	۳۸٫۸۲	۳۷٫۱۷	۳۶٫۵۱	۳۵٫۹۲	۴۳٫۹۱	۵۳٫۸	۳۰٫۰۹
SiO ₂	۳۰٫۸۸	۶٫۱۶	۶٫۷۱	۲۱٫۱۴	۳۸٫۳۹	۲۷٫۵۵	۸٫۴۶	۱۱٫۸۹	۱۱٫۳۹	۲۴٫۴۹	۲۸٫۹۷	۴۳٫۴۸	۳۶٫۴	۲۲٫۶۳	۸۰٫۴	۵۶٫۹	۳۴٫۰۸	۳۵٫۴۶	۳۹٫۱۴	۳۰٫۱۴	۲۴٫۷۴	۱۰٫۸۲	۷٫۴۶	۳۳٫۱۲
Fe ₂ O ₃	۴٫۶۲	۱٫۷۸	۳٫۳۵	۲۵٫۳۲	۳٫۰۶	۱۳٫۵۴	۲۵٫۶۷	۲۷٫۶۶	۲۶٫۱۳	۲۴٫۳۱	۱۷٫۸۷	۱٫۶۲	۹٫۲۴	۲۱٫۰۴	۱۱٫۸۷	۱۹٫۲۴	۹٫۸۱	۴٫۹۶	۱٫۹۵	۱۴٫۱۶	۲۱٫۱	۲۸٫۸	۱۶٫۳۶	۱۲٫۶۷
TiO ₂	۵٫۴۳	۸٫۲۸	۷٫۱۳	۳٫۷۴	۴٫۱۸	۳٫۶۹	۵٫۳۱	۵٫۰۸	۵٫۳۷	۴	۴٫۳۴	۳٫۵۲	۴٫۶۷	۴٫۵	۷٫۹۷	۶٫۱۱	۳٫۹۳	۵٫۰۵	۴٫۳۲	۴٫۰۴	۴٫۳۵	۴٫۵۱	۶٫۱۴	۴٫۵
P ₂ O ₅	۰٫۱۹۷	۰٫۰۷	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۱	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۱۴	۰٫۱۹	۰٫۱۶	۰٫۰۹	۰٫۱۵	n.d.
K ₂ O	۰٫۵۳	۰٫۲۶	۰٫۷۱	۰٫۵۲	۰٫۳۷	۰٫۷۹	۰٫۲۲	۰٫۲۲	۰٫۲۵	۰٫۲۷	۰٫۳۳	۲٫۶۷	۰٫۷۵	۰٫۲۱	۰٫۲	۰٫۳۱	۱٫۸۸	۰٫۲۴	۲٫۲۱	۲٫۲۵	۰٫۵۴	۰٫۱۲	۰٫۴۳	۰٫۱۴
CaO	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۱	۰٫۲۲	۰٫۰۹	۱٫۱۶	۰٫۶۹	۰٫۱۱	۰٫۲۳	۰٫۱۵	۰٫۲۳	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۳	۰٫۱۵	۱٫۰۲	۰٫۷۷	۰٫۰۳	۰٫۱۷	۰٫۲۶	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۱٫۱۱	۳٫۱۹
Na ₂ O	۱	۱٫۳۹	۱٫۰۸	۰٫۹۷	۱٫۰۶	۱٫۰۴	۱٫۱	۰٫۸۱	۰٫۸۳	۰٫۹۴	۰٫۹۷	۱٫۱۲	۱٫۰۶	۱	۱٫۱۳	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۰۱	۱٫۱	۱٫۰۳	۰٫۹۵	۰٫۷۹	۱٫۱۸	۰٫۸۸
V ₂ O ₅	۰٫۱۰۸	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۱۱	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۸
Cr ₂ O ₃	۰٫۰۳۱	۰٫۰۲	n.d.	۰٫۰۷	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۷	n.d.
MnO	۰٫۰۴۲	۰٫۰۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰۵	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۱۱	۰٫۰۰۵	n.d.	۰٫۱۵	۰٫۱۰	۰٫۱۴	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰٫۰۰۵	۰٫۱۰	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۰٫۲۱	۰٫۱۳
MgO	۱٫۴	۱٫۲۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۲	۱٫۴۷	۱٫۱۳	۱٫۸۳	۱٫۸۹	۱٫۳۳	۱٫۰۱	۱٫۴۲	۱٫۴۳	۱٫۴۵	۱٫۴۴	۱٫۳۶	۱٫۷۵	۱٫۴	۱٫۶۳	۱٫۶	۱٫۴۳	۱٫۵۱	۱٫۲۲	۱٫۲۵
L.O.I	۱۲٫۶۷	۱۳٫۸	۱۲٫۴۹	۱۰٫۰۷	۱۳٫۰۴	۱۲٫۴۳	۱۰٫۹۴	۹٫۶۸	۱۰٫۵۶	۱۰٫۱۳	۱۱٫۱۵	۹٫۷۶	۱۲٫۲۹	۱۱	۱۲٫۳۶	۱۲٫۴	۱۱٫۰۱	۱۳٫۳۷	۱۰٫۲۲	۹٫۱۸	۱۰٫۲۱	۸٫۹۱	۱۲٫۳	۱۳٫۶۷
Total	۹۹٫۳۰	۹۹٫۴۷	۹۶٫۸۶	۹۹٫۱۴	۹۸٫۶۲	۹۹٫۰۴	۹۹٫۹۸	۹۹٫۷۲	۱۰۰٫۴۴	۱۰۰٫۵۲	۱۰۰٫۰۵	۹۹٫۰۷	۱۰۰٫۷	۱۰۰٫۲	۹۹٫۹۹	۱۰۰٫۲۵	۹۹٫۵۷	۱۰۰٫۴۲	۹۹٫۱۸	۹۹٫۶۹	۹۹٫۸۹	۱۰۰٫۰۱	۱۰۰٫۰۶	۹۹٫۷۳
Ba ppm	۳۱۰	۵۵۰	n.d.	n.d.	۵۱۰	۳۱۱۰	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۲۹۰	۶۰۰	۱۹۰	۱۴۰	۲۷۰	۲۵۰	۷۹۰	۲۹۰	۲۹۰	۳۷۰	۱۳۰	۲۶۰	۲۹۰	۳۱۰
La	۸۱۰	۱۱۶۰	n.d.	n.d.	۱۲۹۰	۱۲۳۰	n.d.	n.d.	n.d.	۳۰۰	۵۳۰	۱۲۳۰	۴۸۰	n.d.	۷۹۰	n.d.	۱۲۲۰	n.d.	۱۲۳۰	۱۱۱۰	n.d.	n.d.	۳۶۰	۴۶۰
Ce	۱۵۶۰	۱۲۷۰	n.d.	n.d.	۱۲۶۰	۱۶۸۰	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۷۰۰	۱۶۹۰	۵۹۰	n.d.	۴۹۰	n.d.	۱۸۶۰	۹۴۰	۱۳۱۰	۱۵۴۰	۴۹۰	n.d.	۱۱۰	۶۶۰
Hf	۱۸۰	۲۰	n.d.	۱۷۲۰	۱۲۰	۷۹۰	n.d.	۱۴۳۰	۱۲۹۰	۱۷۷۰	۱۰۴۰	n.d.	n.d.	۱۳۳۰	۶۷۰	۱۳۳۰	۳۶۰	۲۱۰	۵۰	۸۲۰	۱۱۹۰	۱۵۶۰	۱۰۱۰	۶۲۰
Ni	۴۶٫۸	۷٫۸	n.d.	۲۷۳	۱۳۲٫۶	۹۳٫۶	۲۳٫۴	۱۸۷٫۲	۱۴۰٫۴	۱۸۷٫۲	۱۵۶	۲۱۰٫۶	۳۹	۱۳۲٫۶	۹۳٫۶	۹۳٫۶	۵۴٫۶	۷٫۸	۲۱۰٫۶	۲۱۸٫۴	۱۲۴٫۸	۲۵۶٫۲	۹۳٫۶	n.d.
Cu	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۲۲۲	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۴۰	۱۶	n.d.	n.d.	n.d.	۴۸	n.d.	۱۱۲	۲۴	n.d.	n.d.	n.d.	۸
Sr	۱۴۹۵٫۲	۴۹۵٫۶	۱۰۱۴٫۶	۴۷۰٫۴	۶۵۵٫۲	۳۰۲٫۴	۵۰۴	۱۱۷٫۶	۱۴۲٫۸	۲۷۷٫۲	۷۴۷٫۶	۶۴۶٫۸	۷۰۵٫۶	۶۶۳٫۶	۸۱۴٫۸	۶۰۴٫۸	۱۴۲٫۸	۵۸۸	۴۸۷٫۲	۵۲۹٫۲	۶۸۸٫۸	۳۱۹٫۲	۸۰۶٫۴	۹۲٫۴
Zn	۲۴	۸	n.d.	۲۵۶	۲۴	۴۰	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۴۸	n.d.	n.d.	۱۶	n.d.	۱۶	۸	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Nb	۴۷٫۶	۹۱٫۸	۶۸	۳۰٫۶	۳۷٫۴	۳۰٫۶	۴۰٫۸	۴۰٫۸	۴۴٫۲	۳۴	۳۴	۲۷٫۲	۴۰٫۸	۳۷٫۴	۹۸٫۶	۵۱	۳۴	۴۴٫۲	۳۷٫۴	۳۴	۳۴	۳۰٫۶	۶۴٫۶	۴۰٫۸
Ta	n.d.	n.d.	n.d.	۱۲۸	n.d.	۴۸	n.d.	n.d.	n.d.	۲۴۰	۱۲۴	n.d.	n.d.	۵۶	n.d.	n.d.	n.d.	۳۲	۲۴	n.d.	۸۸	n.d.	n.d.	۷۲

n.d: پائین تر از حد تشخیص دستگاه

بحث و بررسی

مشخصات بافتی

بررسی‌های بافتی روی نمونه‌های مورد بررسی، نشان دهنده دو خاستگاه برجازا و نابرجازا برای نهشته‌های بوکسیتی جاجرم است. بافت‌های اووئیدی، پیزوئیدی، برشی دروغین و کلوفرمی از شواهد برجازا بودن نهشته است که در نمونه‌های مورد بررسی شناسایی شدند. بافت‌های اووئیدی (شکل ۳ الف) و پیزوئیدی (شکل ۳ ب) از فراوان‌ترین بافت‌های مشاهده شده در این کانسار است. این بافت‌ها دارای خاستگاه دیاژنتیکی بوده و بیانگر خاستگاه برجازای نهشته [۴] و انرژی بالا در محیط

نهشت است [۱۰]. پیزوئیدها و اووئیدهای مورد بررسی دارای نواربندی ظریف متشکل از کانی‌های هماتیت، دیاسپور و پیریت است (شکل ۳-ب)، که نوسان‌های شرایط اکسایش و احیاء محیط را [۵، ۲۵] در زمان نهشت این کانسار نشان می‌دهد. بافت برشی دروغین (شکل ۳ پ) نشان‌دهنده عملکرد نیروهای فشارشی، آبدی کلوئیدی و تبلور دوباره است [۲۵، ۲۶]، و بافت کلوفرمی (شکل ۳ ت) نتیجه جدایش آهن‌نگین هماتیت از ژل آلومینوسیلیکات است. علاوه بر شواهد بافتی، بررسی‌های صحرایی، نشانگر نمایش لایه‌ای ماده معدنی در

واحد کائولینیت بالائی

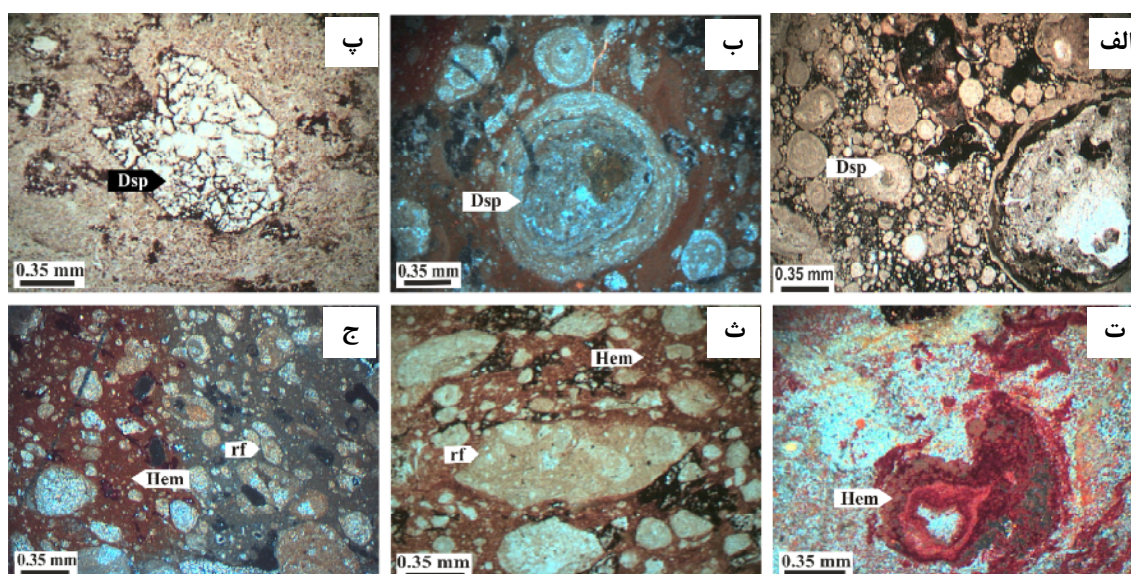
واحد کائولینیت بالایی دارای ضخامت ۲۵ تا ۷۵ سانتی‌متر است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD این واحد بیشتر از دیکیت و کائولینیت و به مقدار کمتر از آناز، کلسیت و همتایت تشکیل یافته است. بر اساس نتایج تجزیه‌ی شیمیایی، مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 به ترتیب از ۳۰/۱۰ تا ۴۲/۳۳ درصد برای Al_2O_3 ، ۲۷/۵۵ تا ۳۵/۳۶ درصد برای SiO_2 و ۴/۶۲ تا ۱۳/۵۴ درصد برای Fe_2O_3 تغییر می‌کند. برای تعیین رخساره‌ی بوکسیتی و نوع هوازگی به ترتیب از نمودارهای سه‌تایی آلو [۲۸] و شلمن [۲۹] استفاده شد. براساس نمودار آلو، رخساره‌های لاتریتی و بوکسیت کائولینیتی (شکل ۴ الف) و براساس نمودار شلمن، نوع هوازگی لاتریتی شدن ضعیف برای این واحد تعیین شد (شکل ۴ ب). الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در واحد کائولینیت بالائی و واحد بوکسیت سخت یکسان است [۱۸]، که می‌تواند بیانگر تشکیل کائولینیت‌های این واحد در نتیجه‌ی سیلیسی شدن دوباره واحد بوکسیت سخت [۳۰] باشد. این واحد در مقایسه با واحد کائولینیت پائینی، دارای ضخامت کمتر، ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی یکنواخت‌تر و فاقد کانی کراندالیت است.

برخی از نقاط است که بر اساس پتراشک [۴]، بیانگر خاستگاه برج‌زا برای این نهشته است.

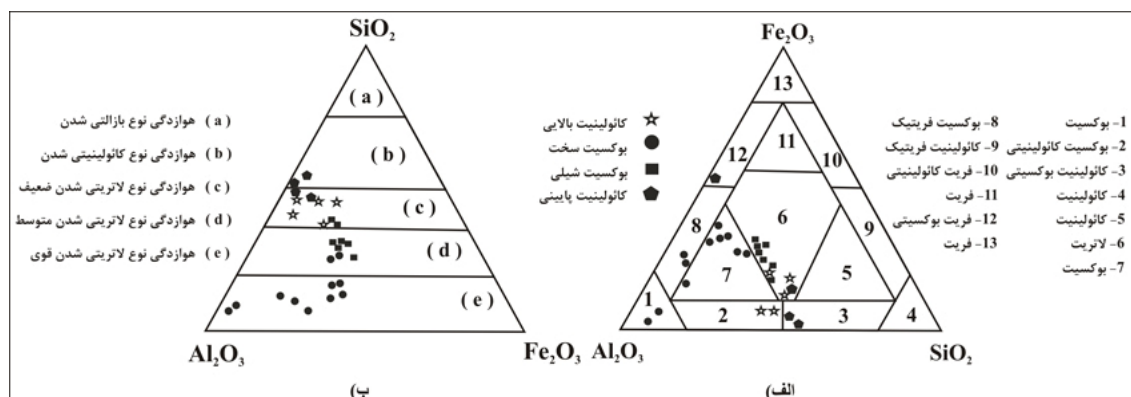
بافت آرنایتی که از قطعات بوکسیت آواری با اندازه‌ی ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون تشکیل یافته و از شواهد آواری و نابرجازای نهشته‌های بوکسیتی است [۱]، در نمونه‌های مورد بررسی دیده می‌شود (شکل ۳ ث). قطعات بیضوی و گرد شده با ساختار درونی همگن که پلت نامیده می‌شود و بیانگر خاستگاه آواری بوکسیت است [۱]، در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شد (شکل ۳ ج). پیزوئیدها و اوئیدهای خرد شده (شکل ۳ ث)، پیزوئیدها و اوئیدهای با اندازه و شکل متفاوت (شکل ۳ الف)، قطعات سنگی خرد شده (شکل ۳ ث) و حضور بوهمیت و لایه-بندی متقاطع، از دیگر شواهد نابرجازا بودن بوکسیت‌های کارستی است [۱، ۵، ۲۷]، که در نمونه‌های مورد بررسی شناسایی شدند.

مشخصات کانی‌شناسی

عدسی‌های بوکسیتی دارای منطقه‌بندی داخلی است و بر مبنای مشخصات بافتی و کانی‌شناسی از بالا به پایین به واحدهای کائولینیت بالایی، بوکسیت سخت، بوکسیت شیلی و کائولینیت پائینی قابل تفکیک است.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از مهمترین بافت‌ها و کانی‌های مورد بررسی در کانسار بوکسیت جاجرم. الف) بافت اوئیدی و قطعات کروی با اندازه‌های متفاوت، ب) بافت پیزوئیدی، پ) بافت برشی دروغین، ت) بافت کلوفرمی، ه) بافت آرنایتی، ث) قطعات کروی پلت و اوئیدهای خرد شده. علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: Dsp = دیاسپور، Hem = همتایت و rf = قطعات سنگی. تصاویر الف، پ، ث در نور عبوری عادی و تصاویر ب، ت، و در نور عبوری قطبیده گرفته شده‌اند.



شکل ۴ الف) نمودار سه‌تایی آلا [۲۶] ($\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$) برای تعیین نوع رخساره و ب) نمودار سه‌تایی شلمن [۲۷] ($\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$) برای تعیین نوع هوازدگی نمونه‌های مورد بررسی.

واحد بوکسیت سخت

واحد بوکسیت سخت با ضخامت ۲ تا ۳۰ متر، اصلی‌ترین واحد کانسار بوکسیت جاجرم است که به آن بوکسیت صنعتی نیز گفته می‌شود. بوکسیت‌های این واحد، بر اساس رنگ ظاهری به ۱۲ رنگ مختلف [۳۱]، از قبیل قرمز، سفید، سیاه، خاکستری، سبز و قهوه‌ای دیده می‌شوند. ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده‌ی نوسان‌های شرایط اکسایش و احیایی طی تشکیل این واحد است. شرایط اکسایش را که با حضور بوکسیت‌های قرمز رنگ مشخص می‌شود می‌توان به اکسایش برون‌زای کانی‌های آهن‌دار و تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن ثانویه نسبت داد که در محیط اکسایشی حاشیه‌ی قاره تشکیل شده است [۱۴]. تشکیل این کانی‌ها نیازمند یک محیط اکسایشی با pH بالاتر از ۷ و Eh بیشتر از ۰/۲ است [۱۰]. در شرایط اکسایشی، علاوه بر کانی‌های ثانویه آهن، کانی‌های دیاسپور، بوهمیت، آناتاز و کانکرنیت نیز تشکیل شده‌اند. همنشین بوهمیت و هماتیت، نشانگر شرایط اکسایش و اسیدی ضعیف در بوکسیت‌های قرمز است [۱]. شرایط احیایی، با حضور بوکسیت‌های سبز و خاکستری غنی از شاموزیت مشخص می‌شود. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، کانی‌های پیریت و پیروتیت در این رخساره شناسایی شد. آهن مورد نیاز برای تشکیل این کانی‌ها از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تأمین شده است که در شرایط احیایی تحرک دوباره یافته و به صورت کانی‌های سولفیدی نهشته شده است. گوگرد مورد نیاز برای تشکیل کانی‌های سولفیدی را می‌توان به احیای باکتریایی سولفات‌های آب دریا [۵] نسبت

داد. حضور کانی شاموزیت، که در محیط‌های کم فشار با pH حدود ۷ تا ۸ و Eh بیش از ۰/۲- تشکیل می‌شود [۱۰]، و کانی‌های پیریت و پیروتیت بیانگر تسلط شرایط احیایی در بخشی از گذشته‌ی این کانسار است.

دیاسپور کانی اصلی آلومینیوم‌دار در کانسار بوکسیت جاجرم و کانی غالب در واحد بوکسیت سخت است. به عقیده‌ی تمور و کنسان [۱۰]، فرایند بوکسیتی شدن با تشکیل کانی گیبسیت شروع شده و پس از فشردگی و آبدایی به بوهمیت و سرانجام طی دگرگونی‌های با درجه‌ی پائین و تنش‌های زمین-ساختی با تغییر ساختار بلوری به دیاسپور تبدیل می‌شود. با توجه به عدم کانی‌سازی کرندوم و نبود علائم دگرگونی گرمایی در کانسنگ بوکسیتی و سنگ‌های درونگیر کانسار جاجرم و نیز گسل‌خوردگی شدید منطقه، به نظر می‌رسد فرایند بوکسیتی شدن در این کانسار با تشکیل یک ژل آمورف مشتمل بر ترکیب‌های Al, Ti, Si, Fe شروع شده و کانی گیبسیت را پدید آورده است. این کانی بر اثر فشارهای ناشی از تنش‌های زمین‌ساختی و فرایندهای دیاژنتیکی [۱] به بوهمیت نهان بلور تغییر یافته و سرانجام بر اثر تبلور دوباره به کانی دیاسپور تبدیل شده است. حضور کانی بوهمیت درنتایج کانی‌شناسی به روش XRD و عملکرد تنش‌های زمین‌ساختی که با حضور گسل‌های متعدد در منطقه مشخص می‌شود، از شواهد رخداد این پدیده است.

آناتاز، یکی دیگر از کانی‌های مهم در واحد بوکسیت سخت است. این کانی معمولاً در شرایط اسیدی و Eh احیایی و غلظت پائین عناصر قلیایی، فاز کانیایی پایدار در دماهای سطحی است

قلیایی است (شکل ۴ ب). این شرایط با غنی‌شدگی عناصر متحرک در این افق، همخوانی دارد. یکنواختی الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در این واحد و واحد کائولینیت پائینی [۱۸]، را می‌توان به خاستگاه یکسان آن‌ها نسبت داد.

واحد کائولینیت پائینی

واحد کائولینیت پائینی، با ضخامت ۲۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر، دارای مرز مشخص با دولومیت‌های الیکا است. بر اساس نتایج تجزیه‌ی شیمیایی، مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 به ترتیب از ۳۴٫۶۴ تا ۳۷٫۱۷ درصد برای Al_2O_3 ، ۳۶٫۱۴ تا ۴۳٫۴۸ درصد برای SiO_2 و ۱٫۶۲ تا ۹٫۲۴ درصد برای Fe_2O_3 تغییر می‌کند. یکی از ویژگی‌های زمین‌شیمیایی این واحد، غنی‌شدگی آن نسبت به عناصر نادر خاکی است که می‌توان آن را به عملکرد سنگ بستر کربناتی [۸، ۹] به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی نسبت داد. این واحد، بیشتر از دیکیت، ایلیت و کائولینیت تشکیل شده است. کراندالیت که میزبان مناسبی برای عناصر استرانسیوم، باریوم، آهن و عناصر نادر خاکی است [۳۲]، در این واحد شناسایی شد. این کانی شاخص بوکسیت‌های کارستی است [۱] و از فراوانی بسیار اندک در بوکسیت‌های لاتریتی، برخوردار است [۳۳]. تشکیل کائولینیت در بوکسیت‌های کارستی به جانشینی دیاژنتیکی کانی‌های آلومینیم‌دار با سیلیس و یا آبزدایی کانی‌های آلومینیم آبدار نسبت داده شده است [۷]. آبزدایی کانی‌های آلومینیم آبدار ممکن است در نتیجه‌ی کاهش فعالیت آب (a_w) در دمای ثابت، افزایش دما در فعالیت ثابت آب و یا کاهش همزمان فعالیت آب (a_w) و افزایش دما انجام شود [۳۴]. فراوانی کانی‌های آبزدا و یا نیمه آبزدا شده مانند دیاسپور، همتایت و کائولینیت در منطقه‌ی مورد بررسی در مقایسه با کانی‌های آبدار مانند گیبسیت، مونتموریلونیت و گوتیت، نشانگر نقش فرایندهای آبزدایی در تشکیل واحد کائولینیتی پائینی است.

براساس نمودار آلو رخساره‌های فریت بوکسیتی، بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت بوکسیتی برای این واحد تعیین شد (شکل ۴ الف). نمودار شلمن، هوازدگی نوع کائولینیتی شدن و لاتریتی شدن ضعیف را برای این واحد نشان می‌دهد (شکل ۴ ب).

[۲] که با افزایش دما و فشار به روتیل تبدیل می‌شود [۱]. بررسی‌های کانی‌شناسی در این پژوهش حضور روتیل را نشان نمی‌دهد، ولی حضور آن توسط پژوهشگران قبلی [۱۴، ۱۸، ۳۱] نشان داده شده است. با توجه به عدم وجود شواهد دگرگونی در منطقه‌ی مورد بررسی، به نظر می‌رسد روتیل بر اثر عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و فرایندهای دیاژنتیکی از آناتاز تشکیل شده است.

واحد بوکسیت سخت دارای بیشترین مقدار Al_2O_3 (۴۱٫۲۰ تا ۶۶٫۲۴ درصد) است. مقدار SiO_2 در این افق از ۵٫۶۹ تا ۱۱٫۸۹ درصد و مقدار Fe_2O_3 از ۱٫۷۸ تا ۲۸٫۸۰ درصد تغییر می‌کند. بر اساس نمودار آلو، به استثنای بوکسیت‌های قرمز رنگ که در گستره‌ی رخساره‌ی بوکسیت آهن‌دار قرار دارند، نمونه‌های دیگر در گستره‌ی رخساره‌ی بوکسیتی قرار می‌گیرند (شکل ۴ الف). بین نمونه‌های وابسته به رخساره‌ی بوکسیتی، نمونه‌های بوکسیت سفید دارای بیشترین مقدار Al_2O_3 است. به نظر می‌رسد شستشو و سفیدشدگی این بوکسیت‌ها نتیجه‌ی آهن‌زدایی کانسنگ توسط آب‌های زیرزمینی است [۳]. بر اساس نمودار شلمن، به جز بوکسیت‌های سیاه رنگ که معرف لاتریتی شدن متوسط است، نمونه‌های دیگر در گستره‌ی هوازدگی لاتریتی شدن قوی قرار می‌گیرد (شکل ۴ ب). این موضوع بیانگر گسترش فرایند بوکسیتی شدن در اثر پیشرفت هوازدگی و در شرایط اسیدی و زهکشی مناسب است.

واحد بوکسیت شیلی

واحد بوکسیت شیلی که به رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای و سیاه تظاهر دارد دارای ضخامت ۳ تا ۵ متر است. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD این واحد بیشتر از همتایت و دیکیت و به مقدار کمتر از دیاسپور، آناتاز و کراندالیت تشکیل یافته است. این واحد به علت مقدار بالای SiO_2 (۲۱٫۱۴ تا ۳۰٫۱۴ درصد) و Fe_2O_3 (۱۴٫۱۶ تا ۲۵٫۳۲ درصد) و پائین بودن مقدار Al_2O_3 (۳۴٫۴۹ تا ۳۷٫۵۶ درصد) به بوکسیت غیر صنعتی نیز معروف است. بر اساس نمودار آلو این واحد دارای رخساره‌ی نوع لاتریتی است (شکل ۴ الف). نمودار شلمن، هوازدگی نوع لاتریتی شدن ضعیف تا متوسط را برای این واحد نشان می‌دهد که بیانگر عدم زهکشی مناسب و تسلط شرایط

مشخصات زمین‌شیمیایی

توزیع عناصر در بوکسیت‌های کارستی بستگی به عوامل متعددی از قبیل ترکیب شیمیایی سنگ مادر، خواص شیمیایی عناصر و شکل کانیایی آن‌ها در سنگ مادر، شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط تشکیل و فرایندهای دیاژنتیک و اپیژنتیک دارد [۳۵]. گرچه در طی فرایند بوکسیتی شدن، عناصر متحرک و ساکن به ترتیب تهی‌شدگی و غنی‌شدگی می‌یابند، ولی در صورت وجود عناصر متحرک در کانی‌هایی با انحلال‌پذیری بسیار کم، ممکن است مقدار این عناصر غنی‌شدگی یابد [۷].

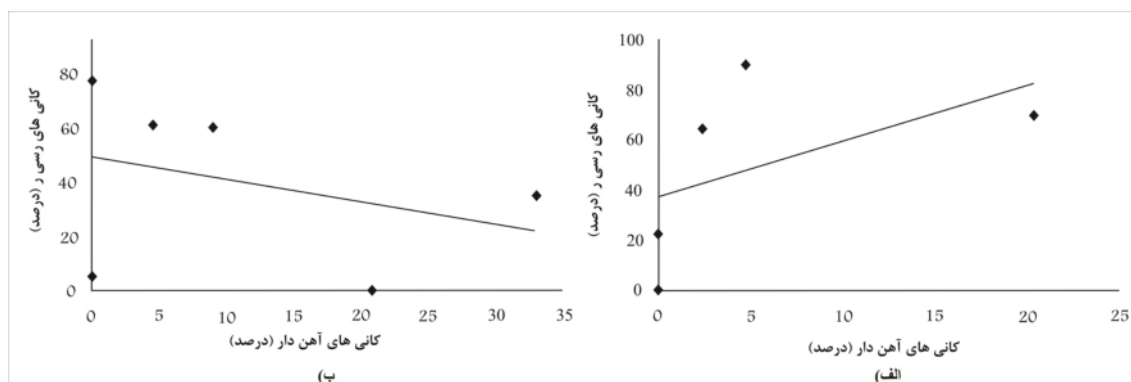
براساس نتایج تجزیه‌ی شیمیایی، روند تغییرات مقدار TiO_2 در چهار نیمرخ مورد بررسی یکسان است. بیشترین مقدار این اکسید ($8/28\%$) وابسته به واحد بوکسیت سخت است که با حضور کانی آناکاز مشخص می‌شود. بر اساس نمودارهای دوتایی، بیشترین همبستگی ($R = 0/93$) بین این اکسید با Al_2O_3 مشاهده می‌شود. تغییرات مقدار CaO و K_2O در تمامی نیمرخ‌های مورد بررسی دارای روند مشابه بوده و به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تهی‌شدگی در واحد بوکسیت سخت و واحد کائولینیت پایینی است. این عناصر به علت تحرک‌پذیری بالا و عدم توانایی تشکیل کانی‌های ثانویه پایدار [۸]، از بخش بالایی نیمرخ‌های بوکسیتی شسته شده و به سمت پایین مهاجرت کرده‌اند که با همبستگی منفی این عناصر با Al_2O_3 همخوانی دارد.

بررسی تغییرات مقدار P_2O_5 ، نشانگر افزایش نسبی مقدار این اکسید از بالا به پایین و غنی‌شدگی آن در واحدهای بوکسیت شیلی و کائولینیت پایینی است که با تشکیل کانی کرائندالیت ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH}_6)$) مشخص می‌شود. این کانی طی بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD شناسایی شد. بررسی تغییرات عناصر Ce و La نیز نشانگر روند افزایشی این عناصر از بالا به پایین است. این عناصر، در شرایط اسیدی شسته شده و با افزایش pH تمرکز می‌یابند. با افزایش pH، عنصر La توسط همتایت و کانی‌های رسی جذب سطحی می‌شود [۲۶] و عنصر Ce از حالت سه ظرفیتی به چهار ظرفیتی تغییر یافته و تمرکز می‌یابد [۱۸، ۳۶، ۳۷]. بررسی همبستگی میان این عناصر با P_2O_5 بیانگر همبستگی مثبت

میان آن‌ها است که با تشکیل کانی کرائندالیت همخوانی دارد. به این ترتیب، سنگ‌های دولومیتی سازند الیکا به عنوان یک سد زمین‌شیمیایی عمل کرده و با افزایش pH باعث تمرکز این عناصر در افق کائولینیت پایینی شده است.

مقدار Cr_2O_3 در واحد بوکسیت سخت غنی‌شدگی یافته و با Fe_2O_3 دارای همبستگی مثبت است که می‌توان آن را به شباهت رفتار کروم و آهن در کانی‌های همتایت و گوتیت نسبت داد [۳۷]. این غنی‌شدگی را می‌توان برای عناصر نیکل، زیرکونیم و گالیم نیز مشاهده کرد که از ویژگی‌های بوکسیت‌های کارستی است [۵، ۳۸] و به همین دلیل به آن‌ها عناصر بوکسیتوفیل گفته می‌شود [۳۹]. عناصر وانادیم و نیوبیم دارای همبستگی مثبت با اکسید آلومینیوم هستند و به دلیل جایگزینی تیتانیم در کانی‌های تیتان‌دار [۲۶]، در واحد بوکسیت سخت غنی‌شدگی نشان می‌دهند.

بررسی تغییرات مقدار Fe_2O_3 در نیمرخ‌های مورد بررسی، جز در نیمرخ ۴، نشان‌دهنده‌ی بیشترین مقدار آن در واحدهای بوکسیت سخت و بوکسیت شیلی است. بر اساس نتایج کانی‌شناسی، افزایش مقدار Fe_2O_3 با حضور کانی‌های همتایت، مگهمیت، گوتیت و پیروتیت مشخص می‌شود. نیمرخ ۴، در مقایسه با نیمرخ‌های مورد بررسی دیگر، به طور کامل از بوکسیت‌های سفید رنگ تشکیل یافته و فاقد بوکسیت‌های قرمز است. از آنجا که بوکسیت‌های سفید در نسبت‌های بالای آب به سنگ تشکیل می‌شوند [۹]، فراوانی این نوع بوکسیت در برخی از عدسی‌های بوکسیتی و از جمله در نیمرخ ۴، نشانگر زهکشی مناسب به وسیله‌ی آب‌های جوی فرورو و زیرزمینی است. کمترین مقدار Fe_2O_3 ، در واحد کائولینیت پایینی مشاهده شد. محاسبه‌ی مقدار نیمه کمی کانی‌های آهن‌دار و کانی‌های رسی به روش جانز و همکاران [۴۰] در بوکسیت‌های سفید و قرمز جاجرم و مقایسه‌ی آن با یکدیگر، نشانگر جدایش کانی‌های رسی و آهن‌دار در بوکسیت‌های سفید است (شکل ۵) که در بوکسیت‌های کانسار آغاجری نیز گزارش شده است [۳۷]. این جدایش در بوکسیت‌های سفید می‌تواند با انحلال توأم آهن در شرایط احیایی و نهشت کانی‌های رسی طی تکامل کانسار ایجاد شود [۳].



شکل ۵ مقایسه‌ی تغییرات مقادیر نیمه کمی کانی‌های آهن‌دار در برابر کانی‌های رسی در بوکسیت‌های قرمز رنگ (الف) و بوکسیت‌های سفید رنگ (ب).

برداشت

دیاسپور فراوان‌ترین کانی بوکسیتی در منطقه‌ی مورد بررسی است که تشکیل آن را می‌توان به فرایندهای دیازنز و تنش‌های زمین‌ساختی نسبت داد. فرایندهای بوکسیت‌زایی معمولاً با تشکیل گیبسیت آغاز می‌شود [۳] که با کاهش pH ناپایدار شده [۴۱] و طی فرایندهای دیازنز و دگرگونی به‌ترتیب به کانی‌های بوهمیت، دیاسپور و کروندوم تبدیل می‌شود [۳، ۱۰]. براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، کانی‌های موجود در کانسار بوکسیت جاجرم طی سه مرحله هوازدگی، دیازنتیک و اپی‌ژنتیک تشکیل شده است (شکل ۶). براساس شواهد زمین‌شناسی و کانی‌شناسی، به نظر می‌رسد گیبسیت، اولین کانی بوکسیتی تشکیل شده در کانسار جاجرم است که طی فرایندهای هوازدگی همراه با کانی‌های رسی، آنتاز، کوارتز، کانکرینیت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به‌وجود آمده است (شکل ۶). با توجه به عدم وجود شواهد دگرگونی و عدم حضور کروندوم، تشکیل بوهمیت و دیاسپور را می‌توان بیشتر به فرایندهای دیازنز و تنش‌های ساختاری نسبت داد. پیریت، پیرویت و شاموزیت از کانی‌های دیگری هستند که طی فرایندهای دیازنزی [۲] در کانسار بوکسیت جاجرم تشکیل شده‌اند. در مرحله اپی‌ژنتیک در مناطق زهکش شده به وسیله‌ی آب‌های زیرزمینی، آهن از واحد بوکسیت سخت شسته و بوکسیت‌های سفید به جای گذاشته شده است. طی این فرایند، عناصر نادر خاکی و فسفر به سمت پائین مهاجرت کرده و باعث تشکیل کراندالیت در واحد کائولینیت پائینی می‌شود.

بررسی توزیع زمین‌شیمیایی عناصر در نیمرخ‌های مورد بررسی نشان‌دهنده‌ی توزیع قائم نامنظم عناصر کروم، وانادیم و نیوبیم و افزایش مقدار عناصر نادر خاکی و فسفر از بالا به پایین

است، که با توزیع عناصر در بوکسیت‌های کارستی نوع مدیترانه‌ای همخوانی دارد [۴۲].

داده‌های به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که به احتمال زیاد بوکسیت‌های جاجرم از بازالت‌های قلیایی تریاس فوقانی ریشه گرفته است. بر اساس نمودار دوتایی Cr نسبت به Ni (شکل ۷) داده‌های تجزیه شیمیایی بوکسیت‌های شیلی و بوکسیت‌های سخت در گستره‌ی بوکسیت‌های کارستی و با سنگ مادر بازالتی قرار می‌گیرند که با نتایج پژوهشگران قبلی [۱۴، ۱۸] همخوانی دارد. بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی مدل پیدایشی زیر برای این کانسار پیشنهاد می‌شود:

مرحله ۱) با رخداد کوهزایی سیمین پیشین در زمان تریاس فوقانی و فراهم شدن شرایط قاره‌ای در این زمان دولومیت‌های سازند الیکا در معرض کارستی شدن قرار گرفته است. از طرفی، رویدادهای کششی پس از سیمین پیشین، باعث تشکیل گدازه‌های بازالتی قلیایی و قرار گیری آن روی سازند الیکا شده است [۲۴]. این بازالت‌ها به عنوان سنگ مادر نهشته‌های بوکسیتی، در معرض فرایندهای بوکسیتی شدن قرار گرفته و با شستشوی عناصر قلیایی و سیلیس، و غنی‌شدگی عناصر نامتحرک مانند Al، Fe، Ti و REE، خاک‌های بوکسیتی تشکیل شده است (شکل ۸ الف).

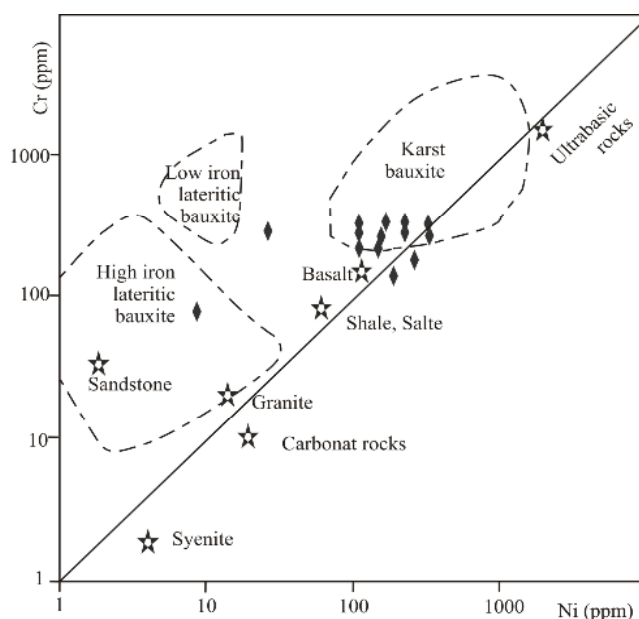
مرحله ۲) خاک‌های بوکسیتی در یک محیط ساحلی و بر اثر نوسان‌های سطح آب به حفره‌های کارستی سازند الیکا انتقال یافته است (شکل ۸ ب). وجود بافت آرنایتی، قطعات بوکسیت آواری، قطعات سنگی، پلت، پیروئیدها و اووئیدهای خرد شده از شواهد جابه‌جایی مواد بوکسیتی و نهشت آن‌ها در حفره‌های کارستی است. از طرفی، وجود بافت‌های اووئیدی، پیروئیدی، کلوفرمی و برش دروغین از بافت‌های تأیید کننده‌ی

مرحله ۳) با پیشروی دریا، رسوب‌های آواری سازند شمشک و سنگ‌های کربناتی سازند دلیچای و لار روی عدسی‌های بوکسیتی نهشته شده‌اند (شکل ۸ پ). در پایان این مرحله، رویدادهای زمین‌ساختی سیمیرین پسین، لارامید و آلپی باعث چین‌خوردگی و گسلش طبقات شده است.

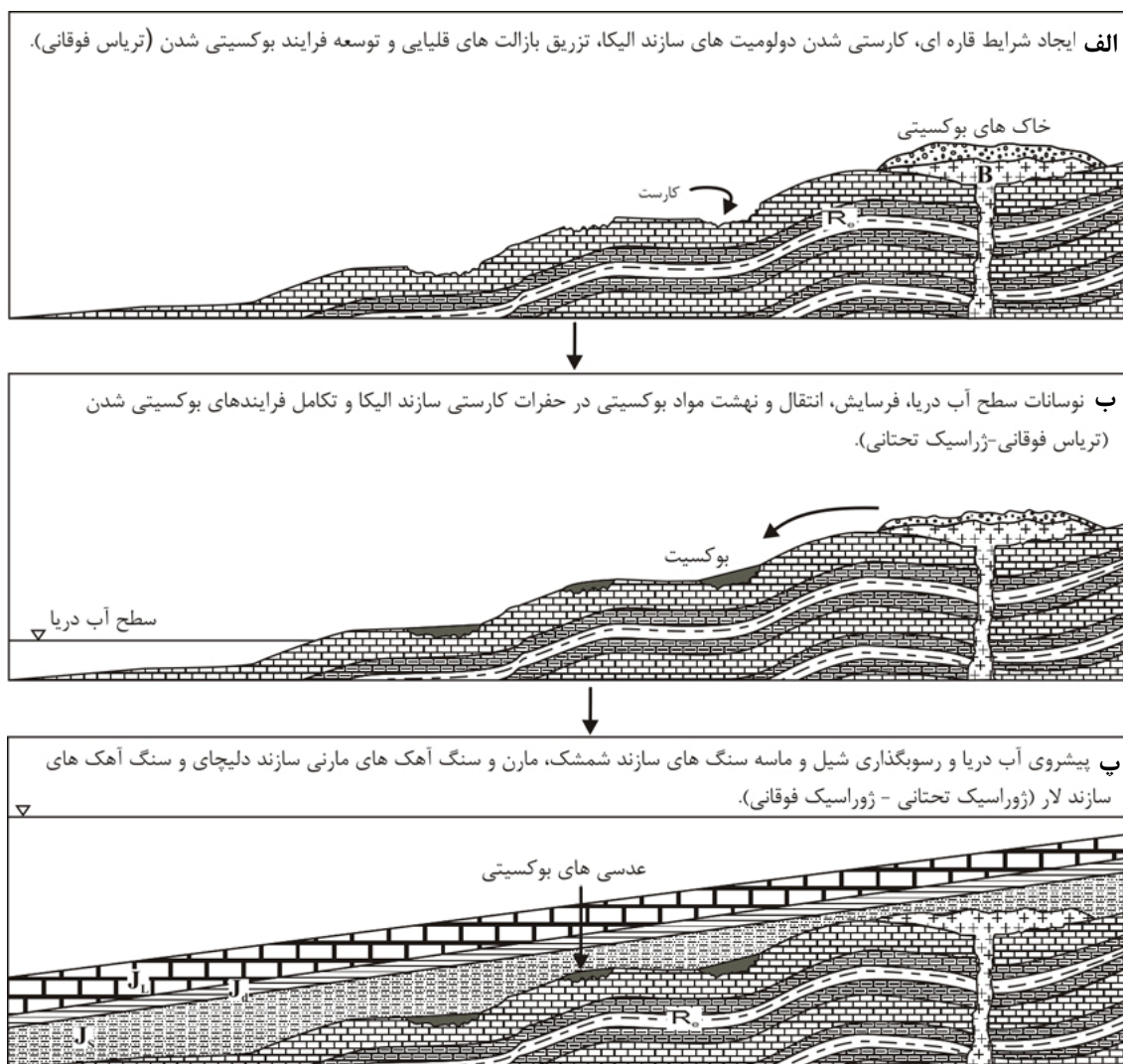
نهشت برجای بوکسیت‌های مورد بررسی است. شرایط احيائي و اکسیدی در این محیط ساحلی به‌طور پیوسته در حال نوسان بوده که با شاموزیت، وجود پیزوئیدها و اوئیدهای با نواربندی ظریف و متشکل از کانی‌های هماتیت، دیاسپور و پیریت مشخص می‌شود.

کانی ها	مرحله هوازدگی	مرحله دیاژنتیک	مرحله اپی ژنتیک
کانی های رسی	_____	_____	_____
گیبسیت	_____		
بوهمیت		_____	
دیاسپور		_____	
شاموزیت		_____	_____
آنتاز	_____		
هماتیت	_____		_____
گوتیت	_____		_____
کانکرنیت	_____		
کراندالیت			_____
کوارتز	_____		
پیریت		_____	
پیروتیت		_____	

شکل ۶ مراحل پیشنهادی برای شکل‌گیری کانی‌های موجود در کانسار بوکسیت جاجرم.



شکل ۷ نمودار تغییرات مقادیر غلظت Ni در برابر Cr برای انواع نهشته‌های بوکسیتی نسبت به سنگ خاستگاه‌های متفاوت اقتباس از [۴۱]. داده‌های وابسته به نمونه‌های مورد بررسی (لوزی توپر)، بیشتر در گستره‌ی بوکسیت‌های کارستی با سنگ خاستگاه بازالتی قرار گرفته است.



شکل ۸ مدل پیشنهادی برای تشکیل کنسار بوکسیت جاجریم. علامت های اختصاری به کار رفته عبارتند از: B=بازالت های قلیایی، R_e=سنگ آهک مارنی، مارن و دولومیت های سازند الیکا، J_s=شیل و ماسه سنگ های سازند شمشک، J_m=مارن و سنگ آهک های مارنی سازند دلیچای، J_l=سنگ آهک های سازند لار.

مراجع

- [4] Petrascheck W.E., "The genesis of allochthonous karst-type bauxite deposits of southern Europe", Mineralum deposita journal 24 (1989) 77-81.
- [5] Öztrük H., Hein J.R., Hanilci N., "Genesis of the Dogankuzu and Mortaz bauxite deposits, Turides, Turkey, Separation Al, Fe and Mn implication for passive margin metallogeny", Economic Geology 97 (2002) 1063-1077.
- [6] عابدینی ع، کلاگری ع.ا، "کانی شناسی و خاستگاه نهشته های بوکسیتی پرمین در شمال سقز، استان کردستان"،
- [1] Bardossy G., "Karst Bauxites-Bauxite deposits on carbonate rocks", Developments in Economic Geology, Elsevier, Amsterdam, 14 (1982) 441 p.
- [2] Özlo N., "Trace-element content Karst Bauxites and their parent rock in the Mediterranean belt", Mineralum deposita 18 (1983) 469-476.
- [3] Bogatyrev B.A., Zhukov V.V., Tsekhovsky Yu.G., "Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits", Lithology and Mineral Resources 44 (2009) 135-151.

- مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۴ (۱۳۸۸) ص ۵۰۳-۵۱۸.
- [7] Karadag M.M., Kupeli S., Aryk F., Ayhan A., Zedaf V., Doyen A., "Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas Bauxite deposit (Seydisehir/Konya – Southern Turkey)", *Chemie der Erde* 69 (2009) 143-159.
- [8] Mordberg L.E., "Geochemistry of trace element in Paleozoic bauxite profiles in northern Russia", *Geochemical Exploration journal* 57 (1996) 187-199.
- [9] Maclean W.H., Bonavia F.F., Sanna G., "Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia", *Mineralum deposita journal* 32 (1997) 607-616.
- [10] Temur S., Kansun G., "Geology and petrography of the Mastadagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences* 27(2006) 512-522.
- [۱۱] کراسکوف ک.، برد د.، ۱۹۷۶، "مبانی زمین‌شیمی"، ترجمه شده توسط مر ف.، مدبری س.، انتشارات دانشگاه شیراز، (۱۳۷۷)، ۷۸۸ ص.
- [۱۲] گزارش اکتشافی وزارت معادن و فلزات، طرح تجهیز معدن و احداث کارخانه تولید آلومینا، منتشر نشده، (۱۳۷۶) ۴۳ ص.
- [۱۳] شرکت آلومینای ایران، "معرفی مجتمع آلومینای جاجرم"، مجله نظام مهندسی معدن، شماره ۵ (۱۳۸۸) ص ۲۶-۳۶.
- [۱۴] جعفرزاده ر.، "بررسی کانی‌شناسی بوکسیت جاجرم"، رساله کارشناسی ارشد زمین‌شناسی دانشکده علوم شیراز (۱۳۷۹) ۱۵۶ ص.
- [۱۵] ناصری م.، "بررسی ژئوشیمی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرشی بر قابلیت‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد صنعتی"، رساله کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۲) ۱۲۶ ص.
- [۱۶] مولائی ح.، شریفیان عطار ر.، "ویژگی‌های زمین‌شناسی و اکتشافی بوکسیت جاجرم (جنوب باختری خراسان شمالی-شمال باختری خراسان بزرگ)"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۸ (۱۳۸۴) ص ۸۶-۹۹.
- [۱۷] اسماعیلی د.، اثنی‌عشری ا.، رحیم‌پوربناب ح.، امینی فضل ع.، "ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب (REE) در کانسار بوکسیت جاجرم (شمال خاوری ایران)"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۲ (۱۳۸۵) ص ۲-۱۳.
- [18] Esmaeily D., Rahimpour-Bonab H., Esnaashari A., Kananian A., "Petrography and Geochemistry of the Jajarm Karst Bauxite Ore Deposit, NE Iran: Implications for Source Rock Material and Ore Genesis", *Turkish Journal of Earth Sciences* 19 (2010) 267-284.
- [۱۹] آقاباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافی معدنی کشور (۱۳۸۳) ۵۸۶ ص.
- [۲۰] افشار ا.، سهیلی م.، واله ن.، "نقشه زمین‌شناسی کوه کورخود با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۲۱] افشارحرب ع.، "زمین‌شناسی کپه‌داغ"، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۱، تهران. (۱۳۷۱).
- [۲۲] مهندسین خاک خوب، "گزارش زمین‌شناسی و تکتونیکی کانسار بوکسیت جاجرم"، منتشر نشده، (۱۳۷۰) ۳۶ ص.
- [۲۳] درویش زاده ع.، "زمین‌شناسی ایران"، نشر دانش امروز (۱۳۷۰) ۹۰۱ ص.
- [24] Berberian M., King G.C.P., "Towards a palogeography and tectonic evolution of Iran", *Earth Sci* 18 (1981) 210-265.
- [۲۵] کلاگری ع.ا.، عابدینی ع.، مؤذن م.، "سنگ‌های دیاباز منشأ عمده واحد بوکسیت ی پرمو-تریاس در قبی، غرب میاندوآب، آذربایجان غربی، ایران"، نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، جلد ۴، شماره ۲ (۱۳۸۳) ص ۳۸۷-۴۰۰.
- [26] Calagari A.A., Abedini A., "Geochemical investigations on permo - triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, west-Azarbaidjan, Iran", *Geochemical Exploration journal* 94 (2007) 1-18.
- [27] Grubb P.C.L., "Genesis of the Weipa bauxite deposits, N.E. Australia", *Mineralum deposita*. 6 (1971) 265-274.
- [28] Aleva G.J.J., "Laterites: concept, geology, morphology and chemistry", International Soil Reference and Information Center (ISRIC). Wageningen, The Netherlands. (1994) 169pp.
- [29] Schellmann W., "A new definition of laterite. In: Banerji, P.K. (Ed.), *Laterization processes*", Geological Survey of India. Memoir 120 (1986) 11-17.
- [30] Boulange B., Bouzat G., Pouliquen M., "Mineralogical and geochemical characteristics of two bauxite profiles, Fria, Guinea Republic", *Mineralium Deposita* 31 (1996) 432-438.

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۷) ص ۳۴۱-۳۵۶.

[38] Mordberg L.E., "Association of trace elements in bauxites and evolution of conditions of bauxite formation. In: S. Ishihara, T. Urabe and H. Ohmoto (Editors)", Proceedings of the 29th International Geological Congress. 1992. Resour. Geol. Spec. Iss, 15 (1993) 412-433pp.

[39] D' Argenio B., Mindszenty A., "Bauxites and related paleokarst: Tectonic and climatic event markers at regional unconformities", *Eclogae Geologicae Helveticae* 88 (1995) 453-499pp.

[40] Johns W.D., Grim R.E., Bradly W.F., "Quantitative estimation of clay minerals by diffraction methods", *J. Sediment Petrol* 24 (1954) 242-251.

[41] Mongelli G., Acquafredda A., "Ferruginous concretions in a Late Cretaceous karst bauxite: composition and conditions of formation", *Chemical Geology* 158 (1999) 315-320.

[42] Maksimovic Z., "Genesis of some Mediterranean karstic bauxite deposits", *Trav. ICSOBA* 13 (1976) 1-14.

[43] Schroll E., Sauer D., "Beitrag zur geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molibdan in Bauxitischen Gesteinen und problem der stofflichen herkunft des Aluminiums", *Travaux de ICSOBA* 5 (1968) 83-96.

[۳۱] ملائی ح.، شریفیان عطار ر.، "مطالعه بافت و فازهای کانی‌های تشکیل دهنده بوکسیت جاجرم، خراسان شمالی، شمال شرق ایران"، *مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران*، شماره ۲ (۱۳۸۵) ص ۳۳۹-۳۶۶.

[32] Bates R., Jackson J., "Glossary of geology", American Geological Institute, (1982) 751p.

[33] Bardossy G., Aleva G.J.J., "Lateritic bauxite", *Developments in Economic Geology*. Elsevier, Amsterdam, 27 (1990) 624pp.

[34] Tardy Y., Trolard F., Roquin C., Novikoff A., "Distribution of hydrated and dehydrated minerals in lateritic profiles and landscapes. Geochemistry of the earth's surface and of mineral formation", *Second International Symposium, France, proceeding*, (1990) 133-136.

[35] Mordberg L.E., "Geochemical evolution of a Devonian diaspore-crandallite-svanbergite-bearing weathering profile in the Middle Timan, Russia", *Geochemical Exploration* 66 (1999) 353-361.

[36] Mongelli G., "Ce-anomalies in textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate Platform (Southern Italy)", *Chemical Geology*. 140 (1998) 69-79.

[۳۷] عابدینی ع.، کلاگری ع.ا.، حاج علیلو ب.، "ویژگی‌های زمین شناسی-کانی شناسی و زمین شیمی عناصر کمیاب در نهشته بوکسیت آغا جری، جنوب شاهین دژ، شمال غرب ایران"،