

ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌آماری نهشته‌های بوکسیت تاگویی، منطقه جاجرم، شمال شرق ایران

بهروز رفیعی*^۱، حبیب ملایی^۲، حسن رمضان پور^۳ و حسن محسنی^۱

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

۳- کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

*behrouzrafiei@yahoo.com

دریافت: ۹۰/۱۰/۳ پذیرش: ۹۱/۵/۲۳

چکیده

کانسار بوکسیت جاجرم در ۱۵ کیلومتری شمال شرق جاجرم استان خراسان شمالی واقع شده است. این کانسار به شکل یک افق چینه‌سان در مرز بین سازند الیکا و سازند شمشک گسترش یافته است. منطقه تاگویی در واقع ادامه روند غرب به شرق ماده معدنی بوکسیت بعد از دو منطقه گل‌بینی و زو بوده که به صورت نوار باریک با عرض بیش از یک کیلومتر و طول ۷ کیلومتر دیده می‌شود. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی و پردازش داده‌های آماری نشان می‌دهند که طی فرآیندهای هوازدگی دو ساز و کار آهن‌زدایی و سیلیس‌زدایی نقش بارزی در جابه‌جایی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و اکسیدهای سیلیس داشته‌اند. علاوه بر فاکتورهایی چون Eh و pH آب‌های زیرزمینی، توپوگرافی منطقه نیز در جا به جایی این اکسیدها به طرف شرق نقش مهمی دارد. میزان زهکشی متفاوت و شستشوی برخی از عناصر از بخش‌های بالایی نهشته و ته‌نشینی آن در بخش‌های زیرین، منجر به تشکیل ۴ لایه مجزا به ترتیب از بالا به پایین بوکسیت کاتولینیتی بالایی، بوکسیت سخت، بوکسیت شیلی و بوکسیت کاتولینیتی زیرین شده است.

واژه‌های کلیدی: کارست بوکسیت، زمین آماری، ژئوشیمی، آهن زدایی، سیلیس زدایی

مقدمه

دوران سوم زمین‌شناسی و دوره‌های میوسن - پلیوسن

تعلق دارند [۱۶].

اکسیدهای اصلی به ویژه Al_2O_3 ، SiO_2 ، Fe_2O_3 و TiO_2 بیش از ۹۰ درصد ترکیب شیمیایی بوکسیت را به خود اختصاص داده‌اند و از طرفی به همراه ویژگی کانی‌شناسی کمک شایانی در ترسیم پروفیل بوکسیت به عمل می‌آورند. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی توزیع اکسیدهای اصلی در پروفیل عمودی توده‌های بوکسیتی و نیز نحوه تغییرات جانبی این اکسیدها در پروفیل‌های بوکسیتی حفاری شده در ۴ بلوک یاد شده به کمک روش‌های آماری می‌باشد.

مطالعات پیشین

بوکسیت در ایران در هر سه زون ساختاری البرز (پرمین - ژوراسیک)، ایران مرکزی (تریاس و یا ژوراسیک زیرین) و زاگرس (کرتاسه بالایی) مشاهده شده است [۲۲]. برای

سنگ معدن بوکسیت به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد Al_2O_3 مهم‌ترین منبع تولید آلومینیوم در جهان به شمار می‌آید. بوکسیت‌ها مواد برجای مانده رسوبی هستند که از هوازدگی و فرسایش سنگ‌های منشأ اولیه از قبیل گرانیت، بازالت، نفلین سینیت و یا مواد رسی تحت شرایط آب و هوای حاره‌ای و نیمه حاره‌ای با توجه به مورفولوژی و زهکشی مناسب تشکیل می‌شوند [۱۶].

از بین تمام بوکسیت‌های شناخته شده دنیا حدود ۸۸٪ متعلق به بوکسیت لاتریتی، ۱۱/۵٪ نوع کارستی و تنها ۰/۵٪ متعلق به نوع تیخون می‌باشد [۱۷]. رسوبات بوکسیت کارستی به طور غالب در نیم‌کره شمالی و بین عرض‌های جغرافیایی ۱۰ تا ۷۰ درجه شناسایی شده و از طرفی کمر بند مدیترانه‌ای به عنوان بزرگ‌ترین کمر بند بوکسیت کارستی در جهان شناخته شده است. از لحاظ توزیع چینه‌شناسی نیز بوکسیت‌های کارستی بیشتر به

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

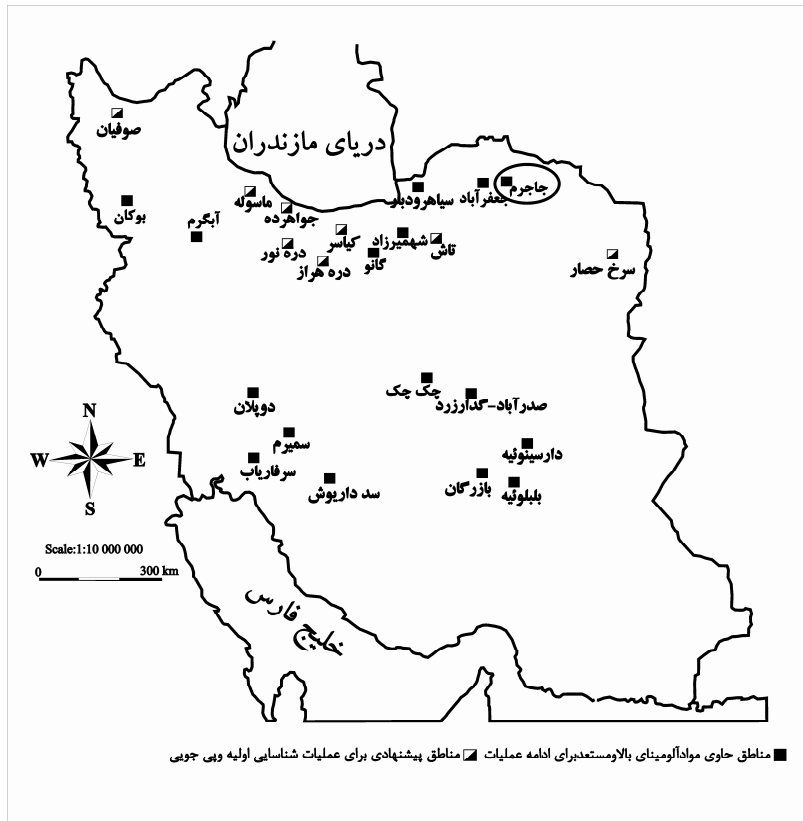
کانسار بوکسیت جاجرم در شمال خاوری ایران در استان خراسان شمالی و در ۱۷۵ کیلومتری جنوب باختری بجنورد و ۱۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان جاجرم قرار گرفته است (شکل ۲). منطقه تاگویی به صورت نوار باریکی با عرض بیش از ۱ کیلومتر و طولی نزدیک به ۷ کیلومتر بین طول جغرافیایی $33^{\circ} 33' 00''$ تا $37^{\circ} 30' 30''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 01' 40''$ تا $34^{\circ} 03' 34''$ شمالی قرار گرفته است. نهشته بوکسیتی جاجرم در جنوبی‌ترین بخش البرز شرقی واقع شده و دارای یک روند شرقی - غربی می‌باشد (شکل ۳). با توجه به گسل‌های اصلی موجود، این منطقه به ۴ بخش سنگ‌تراش، تاگویی، زو و گل‌بینی تقسیم شده است (شکل ۲) [۷].

قدیمی‌ترین نهشته‌های موجود در منطقه جاجرم متعلق به سازند پادها به سن دونین زیرین است. در منطقه تاگویی سازند مبارک به سن کربونیفر زیرین که عمدتاً کربناته و شیلی بوده و به صورت گسل خورده و بهم ریخته در انتهای بخش شرقی دیده می‌شود، جزو قدیمی‌ترین نهشته‌های این منطقه معدنی می‌باشد (شکل ۳). بر روی این سازند، یک افق بوکسیتی به نام افق A قرار دارد که سنگ‌پوش آن را سازند نسن تشکیل می‌دهد [۱۲]. در ناحیه مورد مطالعه سازند کربناته الیکا رخنمون داشته و ارتفاعات جنوبی منطقه را می‌سازد و به دو بخش زیرین و زبرین تقسیم می‌شود [۷]. بخش زیرین در خارج از محدوده منطقه مورد مطالعه قرار دارد. رسوبات بخش زیرین از دولومیت‌های آهکی، آهک مارنی نازک لایه متورق همراه با مقدار کمی شیل و مارن زرد تا صورتی رنگ تشکیل شده است. بخش زبرین سازند الیکا را دولومیت‌های با لایه‌بندی خوب تا ضخیم لایه به رنگ کرم تیره و خاکستری روشن تشکیل می‌دهد. بر روی این بخش افق قرمز رنگ آهن‌دار نسبتاً پیوسته با عیار آلومینیوم قابل توجه به نام افق بوکسیتی B قرار گرفته که به مراتب از افق A بهتر است و به همین منظور بیش‌ترین کارهای اکتشافی و استخراجی بر روی این افق انجام شده است [۷]. برش شماتیک زمین‌شناسی و مورفولوژی منطقه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

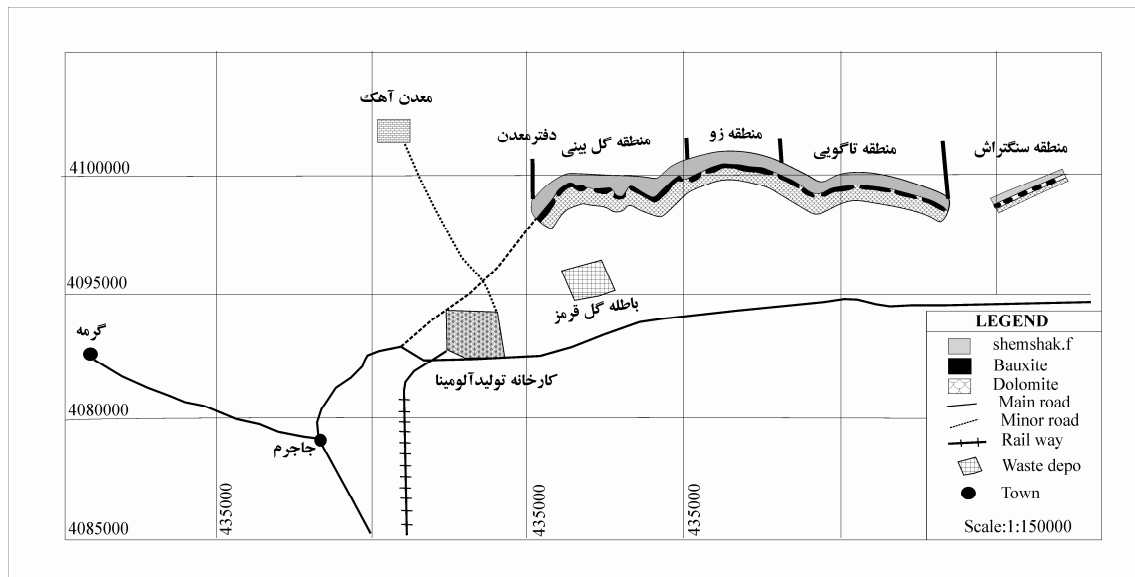
اولین بار والتر و کورستان (۱۹۵۸) بوکسیت را در بلبوئیه کرمان کشف نمودند [۲۲].

در سال ۱۹۶۶ جستجو و پیگیری بوکسیت به واسطه نقشه‌برداری زمین‌شناسی آغاز گردید و در همین زمان چندین توده بوکسیتی در یزد، سمیرم و گروه آهکی بنگستان به ترتیب توسط واله، شریفی نوریان، موحد و صمیمی نمین کشف گردید [۲۲]. طی سال‌های اخیر مطالعات جامع‌تری بر اساس آنالیزهای عناصر کمیاب و نادر خاکی در اکثر معادن بوکسیت ایران انجام شده است. کلاگری و همکاران [۱۸] بوکسیت‌های البرز غربی در آذربایجان غربی را مورد مطالعه قرار دادند. زراسفندی و همکاران [۲۸] بوکسیت‌های واقع در رشته کوه زاگرس را بررسی کرده است. رفیعی و همکاران [۲۰] ژنز بوکسیت-های ناحیه آبگرم استان قزوین واقع در ایران مرکزی را مطالعه کرده‌اند. شفاعت‌دوست [۹] نیز گزارش جامعی در مورد پراکندگی بوکسیت در ایران ارائه نموده است. در شکل ۱ نقشه پراکندگی بوکسیت در ایران بر اساس مناطق حاوی آلومینای بالا و مستعد برای ادامه عملیات و مناطق پیشنهادی برای عملیات شناسایی اولیه و پی جویی نمایش داده است.

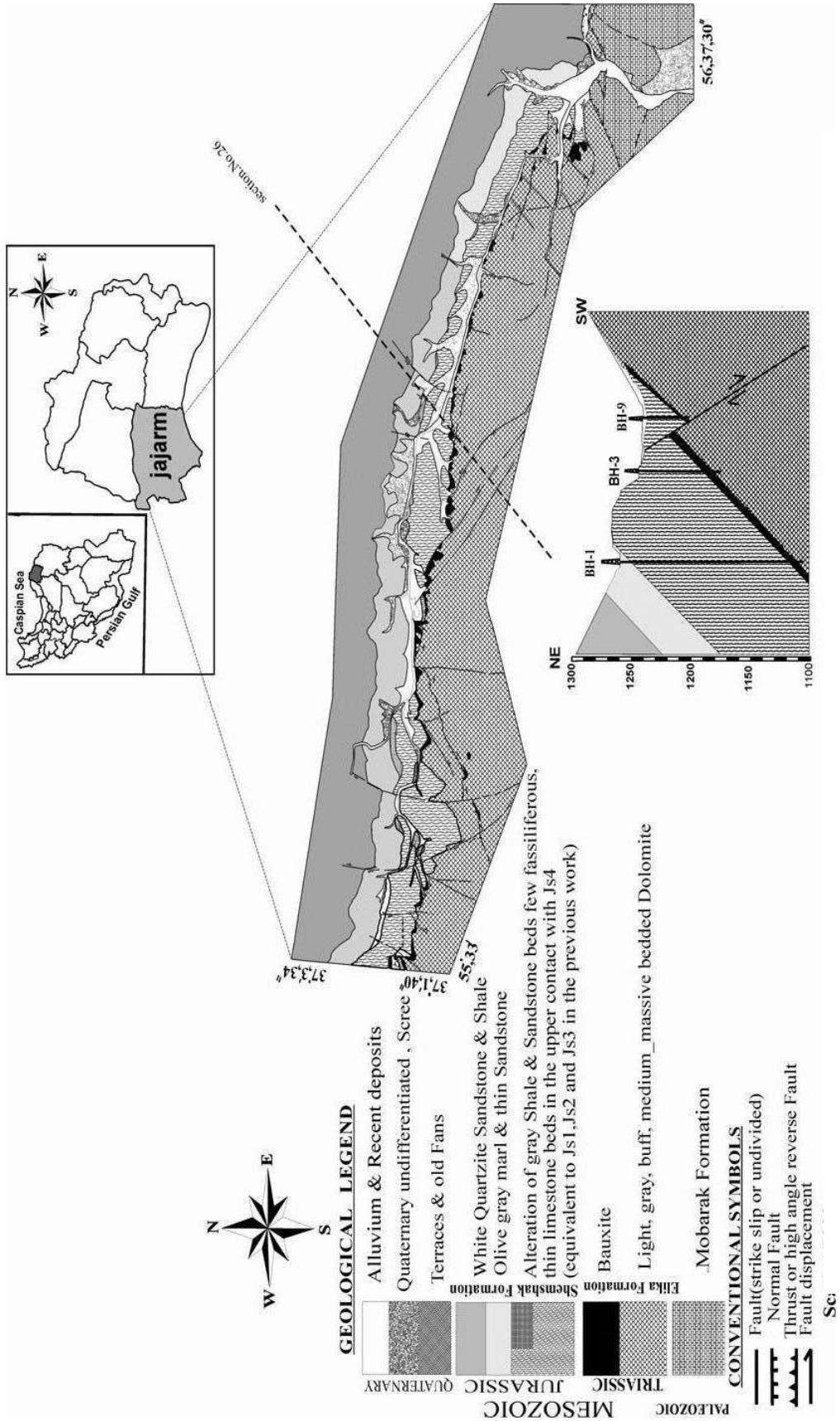
واله (۱۳۴۹) [بر گرفته از ۱۳] ضمن مطالعه منطقه جاجرم، وجود زون بوکسیتی را در مرز بین سازندهای شمشک و الیکا گزارش نمود. صمیمی‌نمین و ملاک‌پور [۱۰]، به منظور بررسی ترکیب و نوع بوکسیت تعداد ۱۰۰ نمونه جمع‌آوری شده را مورد تجزیه شیمیایی قرار دادند. عملیات اکتشافی تحت عنوان طرح تولید آلومینا از بوکسیت توسط وزارت صنایع و معادن [۱۴]، به اجرا درآمد. مطالعه کانی‌شناسی، جغرافیای دیرینه و سنگ منشا بوکسیت و هم‌چنین مطالعه اکتشافی بوکسیت کال جعفرآباد که بی‌ارتباط با بوکسیت جاجرم نیست به ترتیب توسط خیری [۵]، رحیم‌زاده [۶] و قصرانی [۱۱] صورت گرفته است. زمین‌شناسی و تکتونیکی محدوده کانسار بوکسیت جاجرم توسط شرکت خاک‌خوب [۸]، و عملیات اکتشافی در این کانسار توسط شرکت ایتوک ایران [۷]، به انجام رسیده است. جعفرزاده [۳]، ناصری [۱۳] و اثنی عشری [۱] نیز ژئوشیمی و ژنز بوکسیت را مورد بررسی قرار داده و برای اولین بار به عناصر کمیاب در بوکسیت جاجرم پرداخته‌اند.



شکل ۱. پراکندگی ذخایر بوکسیتی در ایران (با تغییرات و اصلاحاتی از [۲۲])



شکل ۲. تصویر شماتیک از موقعیت معادن بوکسیت، کارخانه تولید آلومینا و راه‌های ارتباطی به معدن جاجرم [۷]



شکل ۳. نقشه زمین شناسی منطقه مور و مطالعه و موقعیت زهشته‌های بوکسیتی در برش عرضی (برش شماره ۲۶ در امتداد جنوب غرب - شمال شرق) [۷]

توصیف ماده معدنی

این واحد که معدن بوکسیت جاجرم را تشکیل داده و بزرگ‌ترین معدن بوکسیت ایران می‌باشد، بر روی سنگ‌های دولومیتی سازند الیکا و در زیر شیل‌ها و ماسه سنگ‌های سازند شمشک قرار گرفته است. امتداد تقریبی آن شرقی- غربی بوده و بیش از ۱۲ کیلومتر گسترش داشته و به طرف غرب و جنوب‌غرب توسط نهشته‌های آبرفتی پوشیده می‌شود. لایه بوکسیت دارای ضخامت و کیفیت یکسانی نیست و به طور کلی ضخامت بوکسیت بین کمتر از یک متر تا حدود ۴۰ متر تغییر می‌کند. در حفاری‌های اکتشافی و در مناطق استخراج شده، لایه‌های تشکیل دهنده این واحد به صورت زیر از بالا به پایین مشخص شده است [۷]:

- بوکسیت کائولینیتی بالایی
- بوکسیت سخت
- بوکسیت نرم یا شیلی
- بوکسیت کائولینیتی زیرین

مواد و روش‌ها

جهت پی‌جویی و برآورد کمیت و کیفیت ماده معدنی در منطقه تاگویی جاجرم، در چندین سال و طی مراحل مختلف توسط شرکت‌های پیمانکاری متعدد عمل گمانه‌زنی انجام شده و نمونه‌های افق بوکسیتی شده به وسیله دستگاه XRF (Siemens (SRS-3000)) در مجتمع آلومینای جاجرم مورد آنالیز قرار گرفته است. تعداد ۵۰ گمانه در ۴ بلوک مورد مطالعه قرار گرفته است. موقعیت گمانه‌ها در هر بلوک در شکل ۵ نمایش داده شده است. تعداد کل آنالیزها برای اکسیدهای آلومینیوم و سیلیسیوم ۴۳۵ و برای اکسیدهای آهن و تیتانیوم ۳۳۹ مورد می‌باشد. با این حال تعداد نمونه‌های آنالیز شده در هر یک از ۴ بلوک و نیز تعداد اکسیدهای اندازه‌گیری شده در هر بلوک متفاوت می‌باشد. تعداد نمونه‌های آنالیز شده به تفکیک هر بلوک در جدول ۱ نشان داده شده است.

نقشه پراکندگی و هم‌چنین پروفیل غرب به شرق گمانه‌ها در منطقه تاگویی به کمک نرم‌افزار RockWorks15 ترسیم شده و پردازش داده‌های آماری با نرم‌افزار SPSS17

انجام شده است. در آنالیز خوشه‌ای روش پیرسون مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج

آنالیز شیمیایی

نتایج آنالیز XRF نمونه‌های بوکسیتی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به این جدول مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار در کل منطقه برای اکسید آلومینیوم به ترتیب 23.72% ، 63.3% ، 43.27% و 7.3% ، اکسید سیلیسیوم 3.92% ، 40.57% ، 17.34% و 8.53% ، اکسید آهن 1.84% ، 40.81% ، 11.7% و 7.09% و برای اکسید تیتانیوم 3.14% ، 9.45% ، 5.36% و 1.21% می‌باشد. بیش‌ترین میزان غنی‌شدگی و تمرکز برای اکسیدهای آلومینیوم، سیلیسیوم و آهن به ترتیب در بلوک‌های ۱، ۳ و ۲ دیده می‌شود. بیش‌ترین مقادیر Al_2O_3 و SiO_2 در بلوک ۱ (به ترتیب 63.3% و 40.57%)، بیش‌ترین مقدار Fe_2O_3 در بلوک ۴ (40.81%) و حداکثر میزان TiO_2 در بلوک ۲ (9.45%) مشاهده شده است.

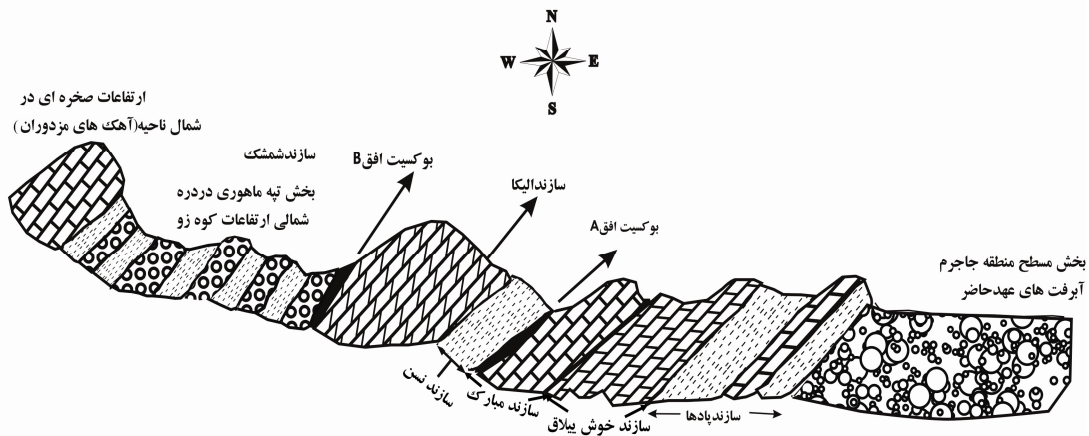
شکل ۶ روند تغییرات اکسیدهای اصلی نسبت به عمق در افق بوکسیتی گمانه‌های ۴ بلوک منطقه تاگویی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقادیر Al_2O_3 و TiO_2 در تمام گمانه‌ها، به استثنای بلوک ۴ که بیش‌ترین غنی‌شدگی در بخش میانی رو به بالای افق بوکسیتی مشاهده می‌شود، به سمت پایین افزایش می‌یابد. تغییرات شیمیایی SiO_2 در دو قسمت بالایی و پایینی افق بوکسیتی بیش‌تر بوده و بیش‌ترین تهی‌شدگی در بخش میانی وجود دارد. مقدار Fe_2O_3 نیز در دو بخش بالایی و پایینی افق، کم بوده اما در بخش میانی رو به پایین افق بوکسیتی بیش‌ترین غنی‌شدگی را نشان می‌دهد.

پردازش آماری

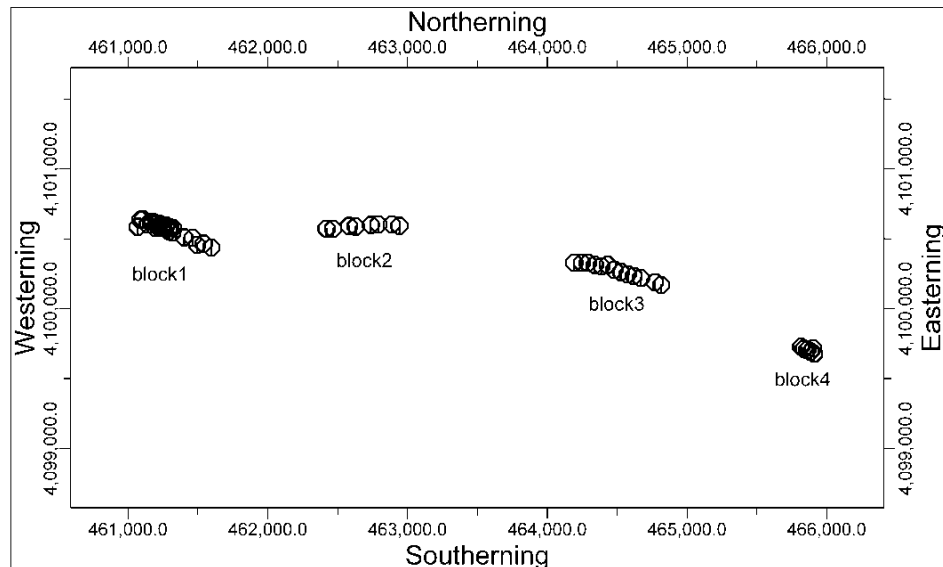
اولین مرحله پردازش داده‌های ژئوشیمیایی، بررسی پارامترهای آماری مربوط به عناصر و ترکیب‌ها جهت شناخت نحوه توزیع هر یک از آن‌ها می‌باشد که با محاسبه پارامترهای آماری از قبیل میانگین، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و واریانس می‌توان به این موضوع دست یافت [۴]. در این قسمت برای هر یک از ۴ اکسید

آلومینیوم، سیلیسیوم، آهن و تیتانیوم به عنوان یک متغیر آماری در جدول ۱، حداقل و حداکثر مقادیر، میانگین، میانه، انحراف معیار و چولگی محاسبه شده‌اند. ضرایب همبستگی میان اکسیدهای اصلی برای هر بلوک در جدول ۲ نشان داده شده است. این عمل به منظور یافتن همبستگی بین متغیرها و تخمین مقدار یک یا چند متغیر دیگر صورت می‌گیرد. آنالیز خوشه‌ای نیز برای هر بلوک به صورت مجزا انجام شده است (شکل ۷). آنالیزهای خوشه‌ای در تمام بلوک‌ها دارای دو شاخه اصلی است. در بلوک‌های ۱، ۲ و ۴،

TiO_2 و Al_2O_3 در یک خوشه قرار دارند و بیانگر بیش‌ترین ارتباط با یکدیگر هستند. دو اکسید دیگر یعنی SiO_2 و Fe_2O_3 ارتباط کمتری با یکدیگر و دو اکسید آلومینیوم و تیتانیوم دارند. در بلوک ۳، TiO_2 و Fe_2O_3 در یک خوشه قرار دارند و دو اکسید دیگر جدا قرار گرفته‌اند. در بلوک‌های ۱ و ۴ SiO_2 در شاخه‌ای کاملاً جدا قرار گرفته است و دارای ارتباط معنی‌داری با سایر اکسیدها نمی‌باشد. در بلوک ۲، SiO_2 و Fe_2O_3 با یک ارتباط ضعیف در یک خوشه قرار دارند.



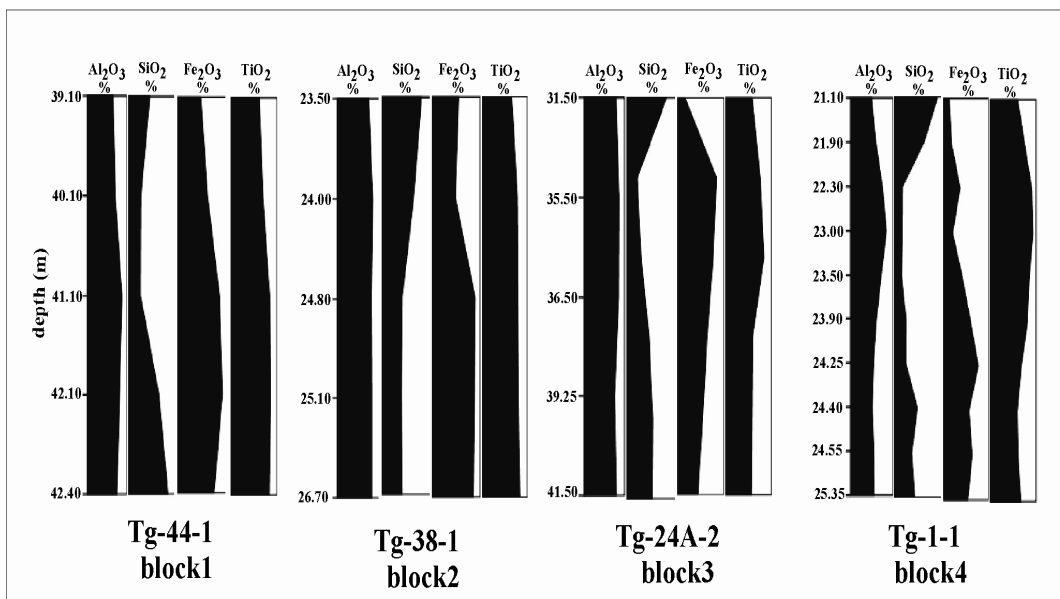
شکل ۴. تصویری از برش عرضی مورفولوژی و زمین‌شناسی منطقه تاگویی (بدون مقیاس)



شکل ۵. نقشه پراکندگی گمانه‌ها (۵۰ عدد) در منطقه تاگویی

جدول ۱. نتایج آماری برای هریک از بلوک‌های منطقه تاگویی و نیز برای تمام داده‌ها و منطقه

متغیر	کل منطقه	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳	بلوک ۴
Al₂O₃					
n	۴۳۵	۲۳۷	۵۱	۹۹	۴۸
min(%)	۲۳/۷۲	۳۱/۴۹	۲۸/۵۱	۲۳/۷۲	۳۶/۷
max(%)	۶۳/۳	۶۳/۳	۵۲/۲۴	۵۰/۴۸	۶۲/۸۲
mean(%)	۴۳/۲۷	۴۵/۱۲	۴۲/۴۹	۳۸/۱۱	۴۴/۸۴
median(%)	۴۲/۸۷	۴۴/۶۴	۴۱/۷۹	۳۸/۷۲	۴۲/۰۲
SD(%)	۷/۳	۷/۳۴	۴/۹۴	۶/۴۱	۶/۹۳
Skewness	۰/۲۸	۰/۳۷	-۰/۲۱	-۰/۱	۰/۹۷
SiO₂					
n	۴۳۵	۲۳۷	۵۱	۹۹	۴۸
min(%)	۳/۹۲	۳/۹۲	۶/۵۲	۶/۹۲	۶/۰۶
max(%)	۴۰/۵۷	۴۰/۵۷	۲۶/۶۹	۳۹/۰۷	۳۸/۶۸
mean(%)	۱۷/۳۴	۱۷/۳۴	۱۴/۵۹	۱۹/۲۵	۱۷/۰۲
median(%)	۱۵/۳۶	۱۴/۷	۱۲/۷	۱۹/۴۹	۱۲/۰۹
SD(%)	۸/۵۳	۹/۴۸	۵/۷۴	۶/۸	۹/۴۶
Skewness	۰/۵۷	-۰/۵۱	۰/۸۱	۰/۲۴	-۰/۸۹
Fe₂O₃					
n	۳۳۹	۲۳۷	۴۲	۱۲	۴۸
min(%)	۱/۸۴	۱/۸۴	۶/۵۲	۵/۴۱	۲/۹۶
max(%)	۴۰/۸۱	۳۸/۲۵	۳۳/۱۸	۲۶/۵۶	۴۰/۸۱
mean(%)	۱۸/۷	۱۸/۰۱	۲۲/۴۲	۱۸/۰۴	۱۹/۳۹
median(%)	۱۹	۱۸/۴۴	۲۴/۱۱	۱۹/۱۴	۱۹/۱۴
SD(%)	۷/۰۹	۶/۱	۶/۹۳	۷/۰۱	۱۰/۱۹
Skewness	۰/۰۵	-۰/۱	-۰/۶	-۰/۶۴	-۰/۱۹
TiO₂					
n	۳۳۹	۲۳۷	۴۲	۱۲	۴۸
min(%)	۳/۱۴	۳/۲	۳/۵	۳/۱۴	۳/۲
max(%)	۹/۴۵	۹/۰۳	۹/۴۵	۵/۳۷	۶/۹۳
mean(%)	۵/۳۶	۵/۵۳	۵/۰۹	۴/۱۴	۴/۹۴
median(%)	۵/۱۹	۵/۴۵	۴/۹۱	۳/۸۱	۴/۷۳
SD(%)	۱/۲۱	۱/۱۹	۱/۳	۰/۷۵	۱
Skewness	۰/۶۹	-۰/۵۱	۱/۹۵	۰/۶۷	-۰/۳۸

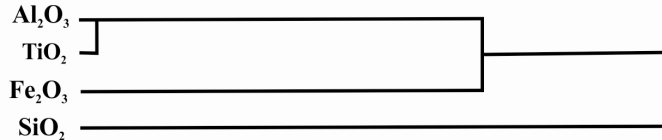


شکل ۶. روند تغییرات ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی نسبت به عمق در گمانه‌های ۴ بلوک منطقه تاگویی

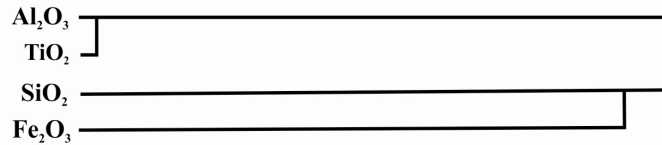
جدول ۲. ضریب همبستگی خطی بین عناصر اصلی در نمونه‌های بوکسیت منطقه تاگویی، این ضرایب به تفکیک هر بلوک ذکر شده است.

متغیر	بلوک	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Al ₂ O ₃	بلوک ۱	۱			
	بلوک ۲	۱			
	بلوک ۳	۱			
	بلوک ۴	۱			
SiO ₂	بلوک ۱	-۰/۷۷	۱		
	بلوک ۲	-۰/۲۱	۱		
	بلوک ۳	-۰/۴۵	۱		
	بلوک ۴	-۰/۵۹	۱		
Fe ₂ O ₃	بلوک ۱	-۰/۱	-۰/۴۸	۱	
	بلوک ۲	-۰/۰۹	-۰/۱۲	۱	
	بلوک ۳	-۰/۲۱	۰/۴۴	۱	
	بلوک ۴	-۰/۲۷	-۰/۵۶	۱	
TiO ₂	بلوک ۱	۰/۸۳	-۰/۶۷	-۰/۱۶	۱
	بلوک ۲	۰/۱۵	-۰/۲۷	-۰/۲۴	۱
	بلوک ۳	۰/۶۴	۰/۱۸	۰/۷۱	۱
	بلوک ۴	۰/۹۱	-۰/۴۱	-۰/۴۱	۱

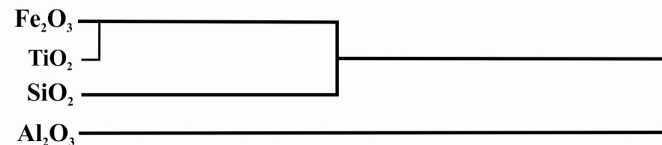
A)Block1



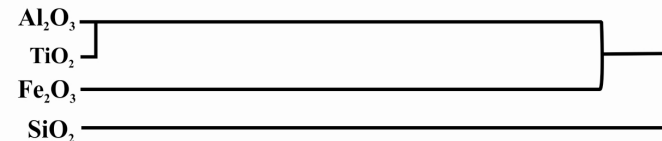
B)Block2



C)Block3



D)Block4



شکل ۷. نمودار درختی تجزیه و تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های بوکسیتی منطقه تاگویی، برای هر بلوک نموداری جداگانه رسم شده است.

بحث

سنگ‌تراش، تاگویی، زو و گل‌بینی تقسیم‌بندی شده (شکل ۲) و هر کدام از این مناطق نیز به نوبه خود در اثر عملکرد گسل‌های فرعی به بلوک‌هایی مجزا تقسیم شده‌اند. مناطق نامبرده از شرق به غرب توالی

در نتیجه عملکرد گسل‌های اصلی موجود در کانسار جاجرم، این نهشته معدنی از شرق به غرب به چهار منطقه

به طور معمول در بوکسیت، عناصر آهن و سیلیسیوم دارای رابطه منفی با اکسید آلومینیوم هستند یعنی فرآیند تجمع آلومینیوم با کاهش عناصر یاد شده همراه است، اما در مراحل اولیه بوکسیت‌زایی این رابطه به صورت مستقیم است. رابطه مستقیم اکسید سیلیسیوم با اکسید آلومینیوم در مراحل اولیه به این دلیل است که در فرآیند هوازگی آلومینوسیلیکات‌ها و تشکیل بوکسیت، عناصر قلیایی و قلیایی خاکی اولین عناصری هستند که از محیط خارج می‌شوند و عناصری مانند تیتانیوم، آلومینیوم، سیلیسیوم و آهن که از قدرت تحرک کمتری نسبت به عناصر قلیایی برخوردار هستند به یک نسبت تجمع حاصل می‌نمایند. بنابراین در مراحل اولیه بوکسیت‌زایی همراه با تجمع آلومینیوم، درصد فراوانی سیلیسیوم و آهن نیز افزایش می‌یابد. در مرحله بعدی به دلیل تحرک‌پذیری بیشتر آهن نسبت به سیلیسیوم، اکسید آهن زودتر از محیط خارج شده و رابطه منفی با اکسید آلومینیوم پیدا می‌کند. در این مرحله هنوز نه تنها شرایط کاهش سیلیسیوم فراهم نشده بلکه افزایش نیز نشان می‌دهد. با پیشرفت شرایط بوکسیت‌زایی و تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی، در مرحله سوم سیلیسیوم نیز شروع به کاهش می‌کند [۲۵]. جهت بررسی ژنز بوکسیت منطقه تاگویی براساس فاکتورهای مذکور موثر بر روی آن، از دیاگرام سه متغیره Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و SiO_2 استفاده شد (شکل ۸) [۲۱]. بر اساس این دیاگرام شدت بوکسیتی شدن منطقه تاگویی در محدوده بوکسیتی شدن متوسط و شدیدتر قرار می‌گیرد (شکل ۸). از طرفی با توجه به مقادیر نسبت میانگین اکسید آلومینیوم به اکسید سیلیسیوم در ۴ بلوک منطقه تاگویی (جدول ۱)، و ترسیم جداگانه میانگین این اکسیدها به صورت مجزا بر روی دیاگرام سه متغیره (شکل ۸)، فرآیند شدت بوکسیتی شدن در بلوک‌های منطقه تاگویی به صورت جداگانه نمایش داده شده و مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به شکل ۸ (علامت ∇) و مقدار مدول (۲/۹۱، جدول ۱) بلوک ۲ منطقه تاگویی شدت بوکسیتی شدن بیش‌تری در قیاس با سایر بلوک‌ها داشته و در محدوده بوکسیتی شدن شدید قرار گرفته است. ترتیب سایر بلوک‌ها براساس مقدار مدول از بیش‌ترین به کمترین شامل بلوک ۴، ۱ و ۳ بوده که هر سه در دیاگرام سه متغیره (شکل ۸) در محدوده بوکسیتی شدن متوسط قرار گرفته‌اند. با بررسی شدت بوکسیتی شدن منطقه تاگویی و

زمین‌شناسی و ستون چینه‌شناسی یکسانی دارند اما تفاوت‌هایی از قبیل شدت کارستی شدن سنگ بستر، ضخامت ماده معدنی و هم‌چنین کیفیت ماده معدنی در بخش‌های مختلف مبین عدم یکنواختی و ناهماهنگی ژئوشیمیایی (ژنز) کانسار جاجرم بوده که مستقل از تأثیر عوامل زمین‌ساختی و عملکرد گسلی نمی‌باشد. این تفاوت ژئوشیمیایی حتی در هر کدام از بلوک‌های منطقه نیز با توجه به مطالعات صورت گرفته دیده شده است. تفاوت‌های ژئوشیمیایی مذکور را می‌توان با مقایسه کیفیت بوکسیت یا مدول یعنی نسبت آلومینا به سیلیس فعال این مناطق مشاهده نمود. با افزایش مقدار این نسبت (مدول)، کیفیت ماده معدنی بهتر خواهد بود. با توجه به نتایج آنالیزهای ۵۰ گمانه منطقه تاگویی، کیفیت بوکسیت این منطقه حدود ۴۴/۵٪ بوده و مدول آن ۲/۶۷ است، در حالی که کیفیت بوکسیت سایر مناطق کانسار جاجرم با توجه به مطالعات متعدد صورت گرفته تقریباً ۴۷٪ تا ۴۸٪ و مدول ۴/۷ می‌باشد [۱۲].

بوکسیتی شدن یکی از فرآیندهای موثر بر ژنز بوکسیت در زمان تشکیل آن بوده که حتی پس از اتمام، نسبت به تغییرات فیزیکوشیمیایی محیط اطراف خود حساسیت نشان می‌دهد. یکی از فاکتورهای مهم جهت تشکیل بوکسیت طی فرآیند بوکسیتی شدن، میزان تراوایی سنگ منشا می‌باشد. درزها، شکاف‌ها و مناطق با تکتونیک فعال (عوامل زمین‌ساختی) نقش مهمی در افزایش تراوایی سنگ منشا، نفوذ و تراوش آب زیرزمینی و در نهایت پیشرفت فرآیند بوکسیتی شدن دارند. در نتیجه چنین واقعه‌ای است که دیاسپوری شدن بوکسیت بیش‌تر در محلی اتفاق می‌افتد که سنگ بستر به شدت کارستی شده و آب‌های زیرزمینی می‌تواند به بخش‌های پایینی نفوذ کند. فاکتور مهم دیگر تأثیر گذار بر روی فرآیند بوکسیتی شدن و ژنز آن فرورفتگی‌های کارستی بوده که نقش دوگانه‌ای داشته به طریقی که از یک طرف منجر به تجمع مواد اولیه مورد نیاز برای تشکیل بوکسیت شده و از طرف دیگر زهکشی مناسب را جهت تراوش آب باران فراهم می‌کند [۱۷]. مسئله دیگری که علاوه بر فرآیند بوکسیتی شدن و فاکتورهای موثر آن (تراوایی و فرورفتگی کارستی) بر روی ژنز بوکسیت تأثیرگذار است رفتار تغییر مقادیر اکسید آلومینیوم نسبت به اکسیدهای آهن و سیلیسیوم به عنوان اکسیدهای تشکیل دهنده اصلی بوکسیت می‌باشد.

بلوک (شکل ۸، جدول ۱) نسبت به سایر بلوک‌ها بیش‌تر بوده که همراهی باطله گل قرمز (شکل ۲) با نهشته بوکسیت جاجرم را در طی استخراج تایید می‌کند. بلوک ۳ با کم‌ترین مقدار بوکسیتی شدن (علامت □، شکل ۸) و کم‌ترین مقدار مدول ۱/۹۸ به نسبت سایر بلوک‌ها حاکی از مقدار بالای اکسید سیلیسیوم در این بلوک با میانگین (۱۹/۲۵٪، جدول ۱) است. بنابراین بلوک ۳ منطقه تاگویی را می‌توان بلوک غنی‌شده از سیلیسیوم یا سیلیسی شدن مجدد نامید. رفتار اکسیدهای اصلی بلوک ۴ در شرقی‌ترین قسمت منطقه شبیه بلوک ۱ واقع در غربی‌ترین بخش منطقه تاگویی است به گونه‌ای که آنالیز خوشه‌ای (شکل ۷) این بلوک شباهت بسیاری با آنالیز خوشه‌ای بلوک ۱ داشته و تنها تفاوت بارز آن ضریب همبستگی ۰/۹۱ (جدول ۲) بین اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیوم در بلوک ۴ بوده و همچنین از لحاظ مقدار مدول (۲/۶۳) و غلظت سایر اکسیدها، مقادیر از بلوک ۱ بیش‌تر می‌باشد. با توجه به وضعیت غنی‌شدگی و یا انحلال عناصر Al (Al₂O₃)، Si (SiO₂) و Fe (Fe₂O₃) در بلوک‌های مختلف بوکسیت منطقه تاگویی، تغییرات Eh و pH را می‌توان مهم‌ترین عامل تغییرات این عناصر در نظر گرفت (شکل ۹) [۲۳].

با توجه به شکل ۹ اکسیدهای اصلی بوکسیت در نتیجه تغییرات Eh و pH، رفتار متفاوت از خود نشان می‌دهند که در تمامی آن‌ها برخی اکسیدها شسته شده و از محل تشکیل دور می‌شوند و برخی نامحلول بوده و در محل رسوب می‌کنند. با این تفاسیر بلوک ۲ منطقه تاگویی بازگو کننده حالت ۱ شکل ۹ (pH > ۴ و Eh < ۰/۶) بوده یعنی اکسیدهای آهن و آلومینیوم نامحلول بوده و در این بلوک سیلیسیم محلول بوده و شسته شده که این رویداد منجر به بالا رفتن مقدار مدول یا عیار بوکسیت در این بلوک شده است. بلوک ۱ و ۴ بازگو کننده حالت شماره ۲ (pH > ۴ و Eh > ۰/۲) بوده که در آن آهن شدیداً شسته شده، سیلیس نیز شسته شده اما شدت آن در قیاس با آهن کم‌تر بوده و تنها اکسید آلومینیوم در این بلوک نامحلول است. بلوک ۳ منطقه تاگویی بازگو کننده حالت ۳ (pH > ۴ و Eh < ۰/۶) شکل ۹ می‌باشد که در این بلوک اکسید سیلیسیم نامحلول بوده و دو اکسید دیگر محلول بوده به گونه‌ای که اکسید آلومینیوم محلول طی فرآیند کاتولینیتی شدن به اکسید سیلیسیم تبدیل شده است.

بلوک‌ها به صورت جداگانه می‌توان ادعا کرد که خاصیت تراوایی سنگ بستر بوکسیت و درز و شکاف‌های موجود که از فاکتورهای بارز برای بوکسیتی شدن هستند در کل منطقه و به ویژه بلوک ۲ وجود داشته و از طرفی زمان لازم برای بوکسیتی شدن نیز فراهم بوده است. در ادامه برای مطالعه تغییرات ژئوشیمیایی (ژنز) بوکسیت منطقه تاگویی و بلوک‌های این مناطق به بررسی رفتار اکسیدها در هر بلوک به کمک آنالیز خوشه‌ای (شکل ۷) و ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۲) پرداخته شد.

در بلوک ۱ با توجه به آنالیز خوشه‌ای، اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیوم یک شاخه مجزا را تشکیل می‌دهند و ضریب همبستگی بین این دو اکسید نیز ۰/۸۱+ می‌باشد (جدول ۲). اکسیدهای آهن و سیلیسیوم شاخه دیگر را تشکیل داده و ضرایب همبستگی آن‌ها با اکسید آلومینیوم نیز به ترتیب ۰/۷۷- و ۰/۱- می‌باشد. این بلوک دارای عیار بوکسیت ۲/۶ بوده و می‌توان آن را بلوک تهی شده از اکسید آهن (آهن شویی) با کم‌ترین مقدار اکسید آهن (۱۸/۰۱٪) نامید. وقوع فرآیند آهن شویی مبین فعالیت‌های زیستی گیاهان باتلاقی و میکروب‌های موجود است که موجب ایجاد محیطی اسیدی (pH حدود ۳/۵ الی ۶) و شرایط احیایی شده‌اند. در این محیط Fe³⁺ به Fe²⁺ احیا شده و به خارج آبشویی می‌شود [۱۵]. اکثر مثال‌ها بیان کننده آن هستند که به دنبال فرونشست آهسته، سطح آب زیرزمینی به تدریج تا سطح بالا آمده و گوراب‌ها بر روی رسوبات توسعه پیدا می‌کنند. بنابراین فعالیت میکروبیولوژیکی و غنی از مواد هوموس منجر به احیا آب زیرزمینی شده، پدیده انحلال و در ادامه حذف آهن از قسمت‌های بالایی رسوبات صورت می‌گیرد. این پدیده در رسوبات کرانه‌ای سورینام و گینه نیز گزارش شده است. علاوه بر این، فرآیند آهن زدایی گسترده تحت شرایط احیا در رسوبات بوکسیت زبیره در عربستان سعودی و سوراشر^۱ و کاچ^۲ هندوستان نیز روی داده است [۱۷].

در بلوک ۲ آنالیز خوشه‌ای (شکل ۷) به گونه‌ای است که اکسید آهن به تنهایی در شاخه‌ای کاملاً مجزا قرار گرفته و رفتاری متمایز نسبت به سایر اکسیدها از خود نشان می‌دهد، که دلیلی بر تجمع و عیار بالای این اکسید در بلوک ۲ است. از طرفی با توجه به عیار بوکسیت در این

¹ Saurashtra

² Kutch

دلیل تماس مستقیم با سنگ بستر کربناتی که باعث ایجاد شرایطی متفاوت با شرایط حاکم بر بوکسیت‌های شیلی شده و نحوه زهکشی و حرکت سیال‌ها در این لایه، به وجود آمده است [۲].

نتیجه‌گیری

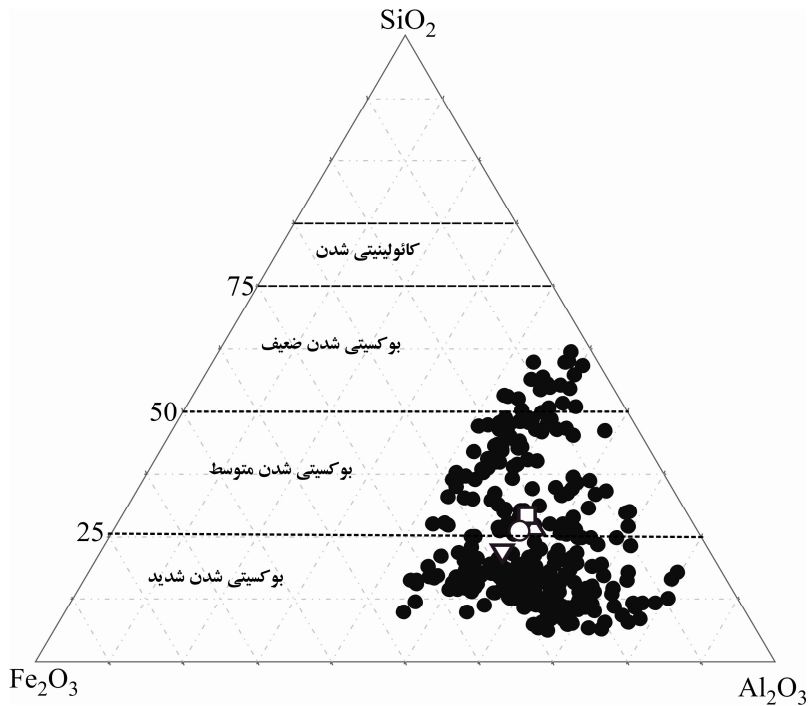
بوکسیت جاجرم دارای دو افق A و B بوده، به طوری که افق A بر روی سازند مبارک قرار گرفته و توسط سازند سن پوشیده شده است. افق B بر روی دولومیت‌های الیکا و در زیر سازند شمشک یافت می‌شود. روند تغییرات جانبی اکسیدهای اصلی در منطقه تاگویی از یک رابطه منطقی پیروی نمی‌کند به گونه‌ای که در بلوک ۱ اکسید آلومینیوم، بلوک ۲ اکسید آهن و در بلوک ۳ اکسید سیلیسیوم بیش‌ترین غنی‌شدگی را دارند. نقش عوامل ژئوشیمیایی pH و Eh را می‌توان اصلی‌ترین عامل تغییرات رفتار اکسیدهای اصلی در هر دو بعد جانبی و عمودی منطقه تاگویی بیان نمود. میزان زهکشی متفاوت و شستشوی برخی از عناصر از بخش‌های بالایی توده و ته‌نشینی آن در بخش‌های زیرین در نتیجه تغییرات pH و Eh محیط، منجر به تشکیل ۴ لایه مجزا به ترتیب از بالا به پایین بوکسیت کائولینیتی بالایی، بوکسیت سخت، بوکسیت شیلی و بوکسیت کائولینیتی زیرین شده است.

تشکر و قدردانی

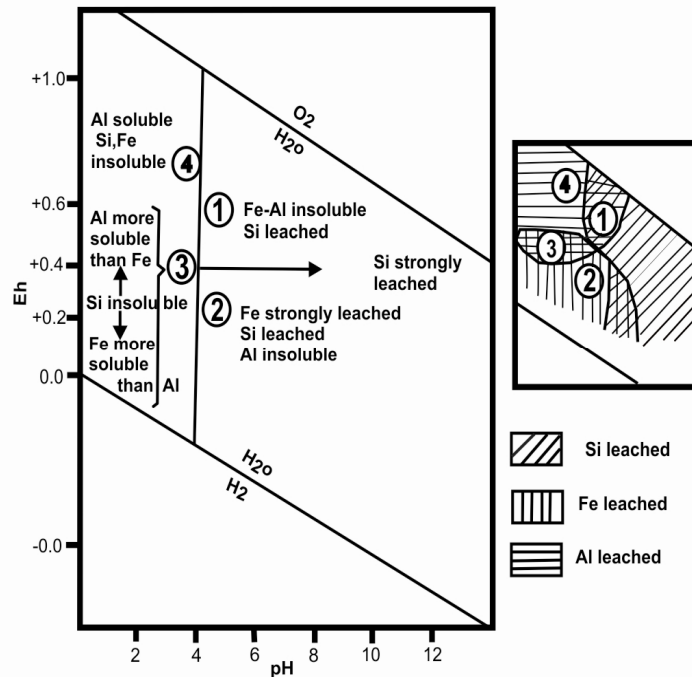
این تحقیق در قالب طرح تحقیقاتی در دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شده و کلیه هزینه‌های آن از طرف آن دانشگاه تقبل گردیده است. بدین وسیله نویسندگان نهایت سپاس و قدردانی خود را از مهندسین بخش معدن بوکسیت جاجرم آقایان مهندس رامین رضائیان، مهندس رضا جعفرزاده کیکانلو و مهندس حسین حسینی فائق و هم‌چنین آقای مهندس حسین شریف ریاست محترم کنترل کیفیت در بخش آلومینای جاجرم ابراز می‌دارند.

تغییرات ژئوشیمیایی اکسیدها تنها منحصر به بعد جانبی نبوده بلکه از لحاظ عمودی نیز این عناصر دستخوش تغییرات شده‌اند. بر اساس همین تغییرات، در تمام مناطق معدنی واقع در کانسار جاجرم و منطقه تاگویی چهار افق بوکسیتی مشاهده می‌شود که از بالا به پایین که عبارتند از: ۱- بوکسیت کائولینیتی بالایی، ۲- بوکسیت سخت، ۳- بوکسیت شیلی و ۴- بوکسیت کائولینیتی زیرین. هر چند در برخی مناطق نقش گسل‌ها این نظم و ترتیب را از بین برده است.

این لایه‌ها بر اساس کانی‌شناسی و ژئوشیمی از یکدیگر تفکیک شده‌اند. به طور کلی تغییرات کانی‌شناسی در پروفیل‌های بوکسیت امری طبیعی است ولی در کانسارهای مختلف با هم فرق می‌کند [۱۹]. در لایه کائولینیتی بالایی، کائولینیت کانی غالب بوده و دیگر کانی‌ها نسبت به آن در مقادیر کمتری دارند. دیاسپور کانی اصلی بخش بوکسیت سخت بوده و کانی‌های هماتیت، کائولینیت و آنتاز جزو کانی‌های فرعی می‌باشند. لایه کائولینیت زیرین نیز که بر روی بستر کربناته قرار دارد، از کانی‌های کائولینیت، ایلیت و به مقدار کمتری هماتیت و کوارتز تشکیل می‌شود [۲]. با توجه به تغییرات اکسیدهای اصلی (شکل ۹) اکسید سیلیسیوم با میانگین ۲۹/۱۴٪ و ۱۷/۹۳٪ (بوکسیت کائولینیتی بالایی و زیرین)، اکسید آلومینیوم با میانگین ۴۶/۱۳٪ (لایه بوکسیت سخت) و اکسید آهن با میانگین ۲۶/۷۶٪ (لایه بوکسیت شیلی)، حداکثر غنی‌شدگی را دارند. شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که لایه کائولینیتی بالایی احتمالاً در اثر شستشو و انتقال سیلیس از ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک به افق بوکسیتی، بر روی قسمت بالایی افق بوکسیتی تشکیل شده است. عدم زهکشی مناسب در بوکسیت‌های شیلی و هم‌چنین نزدیکی این بخش با سنگ‌های کربناتی باعث بالا رفتن pH محیط و ایجاد شرایط قلیایی شده است. همین مسئله مانع ایجاد شرایط مورد نیاز برای بوکسیتی‌شدن رسوبات در بخش زیرین توده و تکامل بوکسیت شیلی شده است. بوکسیت‌های سخت نیز به احتمال زیاد در ابتدا ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی اولیه‌ای همانند بوکسیت‌های شیلی داشته ولی به دلیل شرایط اسیدی‌تر، زهکشی مناسب‌تر و فراوانی بیش‌تر سیال‌ها تشکیل شده‌اند. بوکسیت کائولینیتی زیرین به



شکل ۸. دیاگرام مثلثی آلومین، سیلیس و اکسید آهن و طبقه‌بندی بوکسیت‌ها بر اساس شدت بوکسیتی‌شدن [۲۱] برای منطقه تاگوی و میانگین آن‌ها در هر بلوک (بلوک ۱ ○، بلوک ۲ ▽، بلوک ۳ □ و بلوک ۴ △)



شکل ۹. شرایط اسیدیته و اکسیداسیون - احیای مناسب برای تشکیل بوکسیت، آهن شویی و انحلال سیلیس [۱۵]

منابع

- صنعتی)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۲۶.
- [۱۴] وزارت صنایع و معادن، گروه اکتشاف، گزارش اکتشافی طرح تجهیز معدن و احداث کارخانه تولید آلومینا از بوکسیت، گزارش عملیاتی (۱۳۷۰).
- [15] Augustithis, S.S (1982) "Atlas of the sphaeroidal textures and structures and their genetic significance", Theophrastus Publications S.A. Athens, 329.
- [16] Bardossy, G (1982) "Karst bauxites", Elsevier scientific, Amsterdam, 440.
- [17] Bardossy, G., Aleva, G.J.J (1990) "Lateritic bauxites", Elsevier Scientific, Amsterdam, 624.
- [18] Calagari, A., Abedini, A (2007) "Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran", Journal of Geochemical Exploration, Vol 94 : 1-18.
- [19] Maclean, H., Bonavia, F. F., Sanna, G (1997) "Argillite debris converted to bauxite during karst weathering, evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia", Mineralum Deposita., 607-616
- [20] Rafiei, B., Mollai, H., Ghorbani, M (2008) "The genesis of Late Triassic allochthonous karst-type bauxite deposits of the Kisejin area, Ab-e-Garm district, Iran", N. Jb. Geol. Paläont., Vol 250: 217-231.
- [21] Schellmann, A (1982) "Considerations on the definition and classification of Laterites", Proceeding of IUGS/UNESCO, Seminar on Laterisation Processes, 1-10.
- [22] Sharifi, M., Rahimzadeh, F., Ehsanbakhsh, M (1991) "Bauxite deposits related to the Tethyan Basins in Iran", Journal of Acta Geologica Hungarica, 413-425.
- [23] Valetton, I., Biermann, M., Rosenberg, F (1987) "Genesis of nikel laterites and bauxites in Greece the Jurassic and Cretaceous and their relation to ultrasic parent rocks", Ore Geology Reviews., 2, 359-404.
- [24] Zarasvandi, A., Charchi, A., Carranza, E.J.M., Alizadeh, B (2008) "Karst bauxite deposits in the Zagros Mountain Belt, Iran", Ore Geology Reviews., 34 521-532.
- [25] Zhang, C., Lalor, G (2003) "Multivariate relationship and spatial distribution of geochemical features of soils in Jamaica", Chemical Speciation and Bioavailability Vol 14: 57-65.
- [۱] اثنی‌عشری، ا (۱۳۸۲) بررسی ژئوشیمیایی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرش ویژه به ژئوشیمی عناصر کمیاب، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ص ۱۶۶.
- [۲] اسماعیلی، ا، اثنی‌عشری، ا، رحیم‌پوریناب ح (۱۳۸۷) بررسی ترکیب سنگ منشا و دلایل لایه‌بندی در کانسار بوکسیت جاجرم (شمال خاور ایران) با استفاده از داده‌های زمین‌شیمیایی، مجله علوم زمین، شماره ۷۰ ص ۳۸-۵۱.
- [۳] جعفرزاده، ر (۱۳۸۱) "بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و وزن بوکسیت جاجرم، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی دانشگاه شیراز، ص ۱۰۹.
- [۴] حسنی‌پاک، ع، ا، شرف‌الدین، م (۱۳۸۰) تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۵] خیری، ف (۱۳۶۶) بررسی تغییرات کانی‌شناسی بوکسیت و نحوه تشکیل آن در زون B بلوک گل‌بینی منطقه جاجرم، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ص ۱۱۲.
- [۶] رحیم‌زاده، ف (۱۳۷۶) نوع و مدل زایشی بوکسیت جاجرم، گزارشات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ص ۶۸.
- [۷] شرکت مهندسی و تکنولوژی ایتوک ایران، گزارش زمین‌شناسی بخش تاگویی کانسار بوکسیت جاجرم، (۱۳۷۵)، ص ۹۶.
- [۸] شرکت مهندسی و تکنولوژی خاک خوب، گزارش زمین‌شناسی و تکتونیک محدود کانسار بوکسیت جاجرم، (۱۳۷۰)، ص ۱۸۷.
- [۹] شفاعت‌دوست، س (۱۳۸۳) گزارش جمع‌بندی مطالعات و اکتشافات سراسری بوکسیت‌های ایران، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران.
- [۱۰] صمیمی‌نمین، م، ملاک‌پور، ر (۱۳۴۹) بوکسیت ناحیه جاجرم، گزارشات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.
- [۱۱] قصرانی، ج، ر (۱۳۷۴) اکتشافات مقدماتی بوکسیت جهان‌آباد (کال جعفرآباد)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۱۲] ملایی، ح، شریفیان عطاره، ر (۱۳۸۴) ویژگی‌های زمین‌شناسی و اکتشافی بوکسیت جاجرم (جنوب باختری خراسان شمالی - شمال باختری خراسان بزرگ)، مجله علوم زمین، شماره ۵۷ ص ۸۶-۹۹.
- [۱۳] ناصری، م (۱۳۸۲) کانی‌شناسی و ژئوشیمی بوکسیت جاجرم (با نگرش بر قابلیت‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد