



بررسی کانی شناسی و ژئوشیمی متابوکسیت - لاتریت کَرندوم دار حیدرآباد، جنوب خاوری ارومیه، شمال باختری ایران

علی امامعلی پور^{۱*}، میر صالح میر محمدی^۲

۱ - دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی معدن

۲ - دانشگاه تهران، پردیس فنی، دانشکده مهندسی معدن

(دریافت مقاله: ۸۸/۱۰/۲۲، نسخه نهایی: ۸۹/۴/۲۳)

چکیده: کانسار بوکسیت - لاتریت حیدرآباد در فاصله ۶۳ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان ارومیه واقع شده است. این نهشته‌ی معدنی به شکل لایه‌ای هم شیب در میان واحدهای کربناتی (آهکی - دولومیتی) پرمین بالایی و تریاس زیرین جای گرفته است، اگرچه در امتداد خود دارای جابه‌جایی زمین‌ساختی است. ضخامت افق مورد بررسی ۱۵ تا ۲۰ متر و در راستای خاوری - باختری در حدود ۳/۵ کیلومتر گسترش دارد. کانسار از دو بخش تیره رنگ غنی از هماتیت و کَرندوم (افق بالایی) و روشن غنی از آلومینوسیلیکات‌های ورقه‌ای (افق پائینی) با گذر تدریجی تشکیل یافته و بافت‌های پیزولیتی، گرهکی، اووئیدی و توده‌ای در آن شایع است. بر اساس بررسی میکروسکوپی و آنالیز XRD، هماتیت، دیاسپور، کلریتوئید و کَرندوم کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده هستند. کلریت، روتیل، مگنتیت و پیریت در مقادیر کم یافت می‌شوند. نبود بوهمیت، کائولینیت و سایر کانی‌های دیگر رسی و نیز فراوانی کَرندوم، کلریتوئید، کلریت و روتیل افق بوکسیت - لاتریت حیدرآباد را از کانسارهای بوکسیتی دیگر واقع در کمر بند Irano-Himalayan در شمال باختری ایران متمایز می‌کند. شواهد زمین‌شناسی و کانی‌شناسی حاکی از این است که تاثیر یک رخداد دگرگونی گرمایی پس از فرآیند بوکسیتی شدن مسئول پیدایش این مجموعه کانی‌های شاخص بوده است. بر پایه‌ی شواهد زمین‌شناسی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی، سنگ خاستگاه (مادر) احتمالی برای کانسار حیدرآباد، دایک - سیل‌های مافیک (دیابازی) پیشنهاد می‌شود. به دلیل انباشت قابل توجه کانی‌های با سختی بالاتر از ۶ (در گستره ۹۲-۵۶ درصد)، این نهشته معدنی را می‌توان به‌عنوان پتانسیلی در کاربردهای ساینده معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: بوکسیت؛ لاتریت؛ کَرندوم؛ دیاسپور؛ کلریتوئید؛ دگرگونی؛ ژئوشیمی؛ حیدرآباد؛ ارومیه.

مقدمه

(۵درصد)، ساینده (۴درصد)، تولید سیمان (۳درصد)، صنایع شیمیایی و فولاد (۲درصد) و جوشکاری (۱درصد) به کار می‌رود [۱].

ذخایر بوکسیتی را بر اساس سنگ‌شناختی بستر می‌توان به دو گروه اصلی بوکسیت‌های با سنگ بستر آلومینوسیلیکاتی و کربناتی تقسیم کرد [۲]. بر این اساس بوکسیت‌های نوع اول

ذخایر بوکسیت و بوکسیت - لاتریت در حال حاضر تنها کانسنگ‌های باارزشی هستند که از آن‌ها آلومینیوم و در مواردی عناصر با ارزشی مثل REE و گالیم استحصال می‌شوند. در حدود ۸۵ درصد تولید جهانی بوکسیت تبدیل به فلز آلومینیوم می‌شود و بقیه‌ی آن برای تولید مواد دیرگداز

* نویسنده مسئول، تلفن: ۲۹۷۲۸۸۳ (۰۴۴۱)، نمابر: ۲۹۷۲۸۳۷ (۰۴۴۱)، پست الکترونیکی: a.imamalipour@urmia.ac.ir

برخی از آن‌ها برای تهیه آجرهای نسوز از کیفیت قابل قبولی برخوردارند [۹].

به‌طور کلی ترکیب کانی‌شناسی ذخایر بوکسیتی استان آذربایجان باختری از ذخیره‌ای به‌ذخیره دیگر متغیر است. از این رو بر اساس رده‌بندی کانی‌شناسی، کانسار علی بالتالو از نوع کائولینیتی و بوکسیت رسی، کانسار جوانمرد از نوع بوکسیت-لاتریت، قپی علی بابا در گستره‌ی فریت-بوکسیت لاتریتی و کانسار چپو از نوع کائولینیتی است. از نظر شکل انباشتگی، نهشته‌های بوکسیتی گستره‌ی جنوبی این استان به‌طور معمول از نوع پهنه‌ای و لایه‌ای هستند و گاه به شکل عدسی و پاکتی نیز پدیدار می‌شوند [۱۰]. در این بین کانسار حیدرآباد از نظر مجموعه کانی‌شناسی با دیگر کانسارهای بوکسیتی استان آذربایجان باختری متفاوت بوده و در میان آن‌ها استثنا به شمار می‌رود.

پهنه‌های ساختاری باختر و جنوب دریاچه‌ی ارومیه شامل پهنه‌ی پلاتفرمی باختر دریاچه ارومیه و پهنه‌ی اشنویه-مهاباد هستند. پهنه‌ی اشنویه - مهاباد از جنوب شرق دریاچه‌ی ارومیه شروع می‌شود و از نظر ساختاری ادامه‌ی شمال باختری زون دگرگونی سنندج-سیرجان به شمار می‌آید. به‌دلیل قرارگیری در همبری پهنه‌های ساختاری، تنوع سنگ‌شناسی و پیچیدگی چگونگی سازندها در این ناحیه بیش از دیگر نواحی استان آذربایجان باختری است [۱۱] و به‌نظر می‌رسد که ناحیه‌ی حیدرآباد به‌طور کلی از رخداد های زون‌های البرز غربی-آذربایجان و سنندج-سیرجان متأثر شده است. به‌طور کلی، جایگاه چینه‌شناسی افق‌های بوکسیتی در گستره‌ی استان آذربایجان باختری، سازندهای پرمین (برای مثال کانسار آغاجری)، پرمو-تریاس (قپی علی بابا و کانی شیته) و ژوراسیک (چپو و علی بالتالو) هستند.

در منطقه‌ی حیدرآباد سنگ‌های آهکی نازک تا متوسط لایه که در بخش‌هایی به آهک‌های دولومیتی و دولومیت تبدیل می‌شوند، رخنمون قابل توجهی دارند. این سنگ‌ها کمر پایین افق بوکسیتی حیدرآباد را تشکیل داده و متعلق به سازند روته به سن پرمین وابسته‌اند (شکل ۱). کارستی بودن ضعیف تا متوسط، وجود حفره‌ها و کانی‌های انحلالی و نیز تبلور دوباره‌ی شدید، از شواهد تأثیر دگرگونی بر این سنگ‌ها محسوب می‌شوند. افق بوکسیتی-لاتریتی مورد بررسی با ضخامت متغیر ۱۵

خود شامل بوکسیت‌های لاتریتی و تیخوین یا آلوتون (نابر جا) هستند. بوکسیت‌های با بستر کربناتی نیز که بوکسیت-های کارستی هم نامیده می‌شوند، بر اساس ریخت‌شناسی، ترکیب و ویژگی‌های جغرافیایی و جغرافیای دیرین به چند نوع تقسیم بندی شده‌اند [۳، ۲]. بوکسیت‌های کارستی حدود ۱۴ درصد ذخایر بوکسیت جهان را تشکیل می‌دهند و در میان آن نوع مدیترانه‌ای به‌صورت گسترده‌ای بررسی شده است [۲، ۴-۶].

ذخایر بوکسیتی مهم و شناخته شده در ایران که اغلب در کمربند موسوم به Irano-Hymalayan یافت می‌شوند از نظر موقعیت مکانی در چهار منطقه واقع شده‌اند:

(۱) شمال باختری ایران (مثل بوکان و شاهین دژ)، (۲) ارتفاعات زاگرس چین خورده، (۳) رشته کوه‌های البرز، و (۴) فلات مرکزی ایران [۷]. این بوکسیت‌ها از نظر زمانی محدود به پرمو-تریاس، تریاس پسین و کرتاسه میانی (سنومانین-تورنین) هستند.

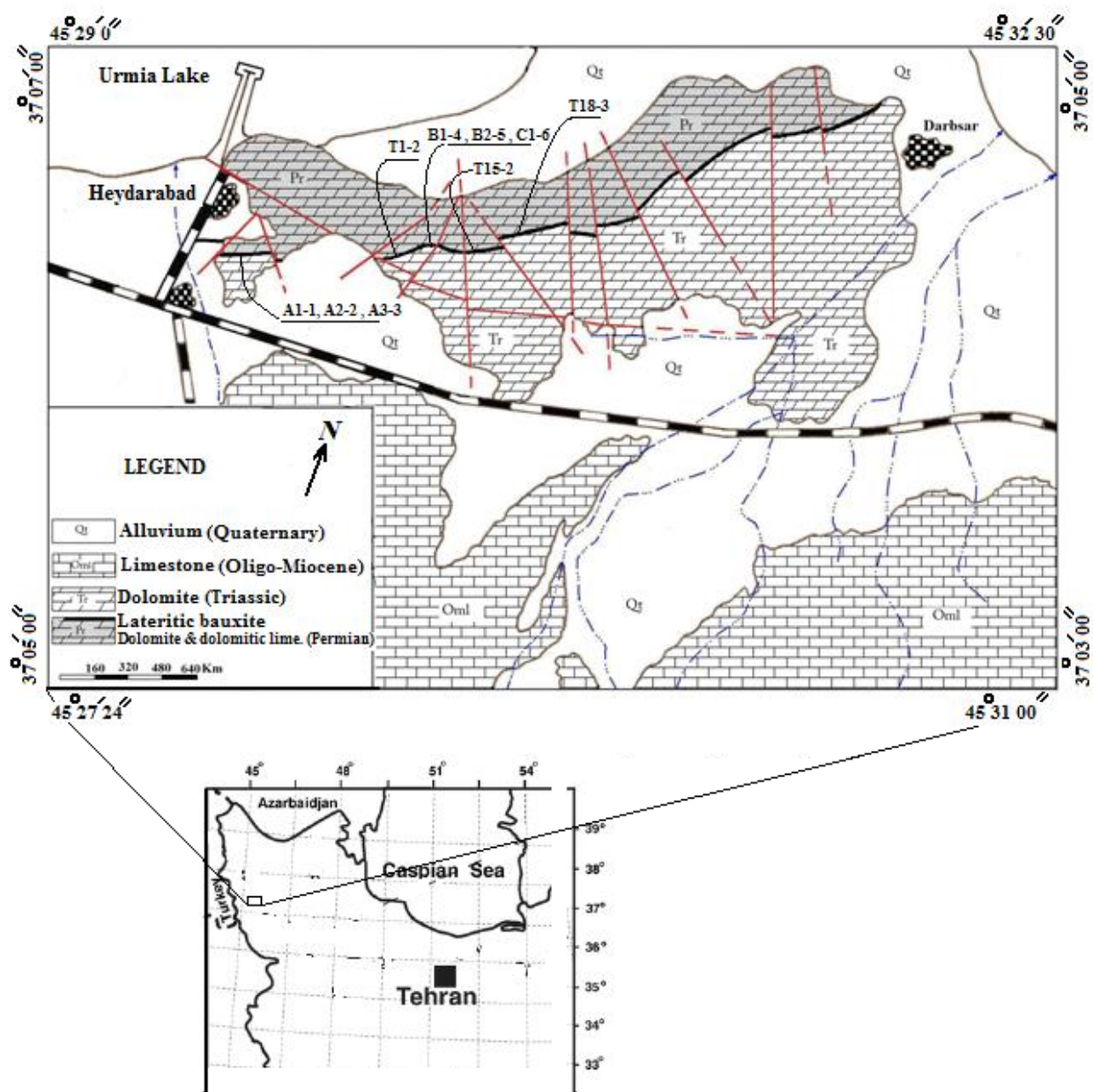
در این پژوهش ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژنز احتمالی یکی از نهشته‌های بوکسیتی-لاتریتی واقع در شمال غربی ایران بنام کانسار حیدرآباد مورد بررسی قرار گرفته و به‌عنوان یک افق دگرگون شده (متا بوکسیت-لاتریت) حاوی مقادیر قابل توجهی کانی کربندوم و متفاوت از ذخایر بوکسیتی دیگر ایران معرفی شده است.

زمین‌شناسی عمومی و روابط صحرائی

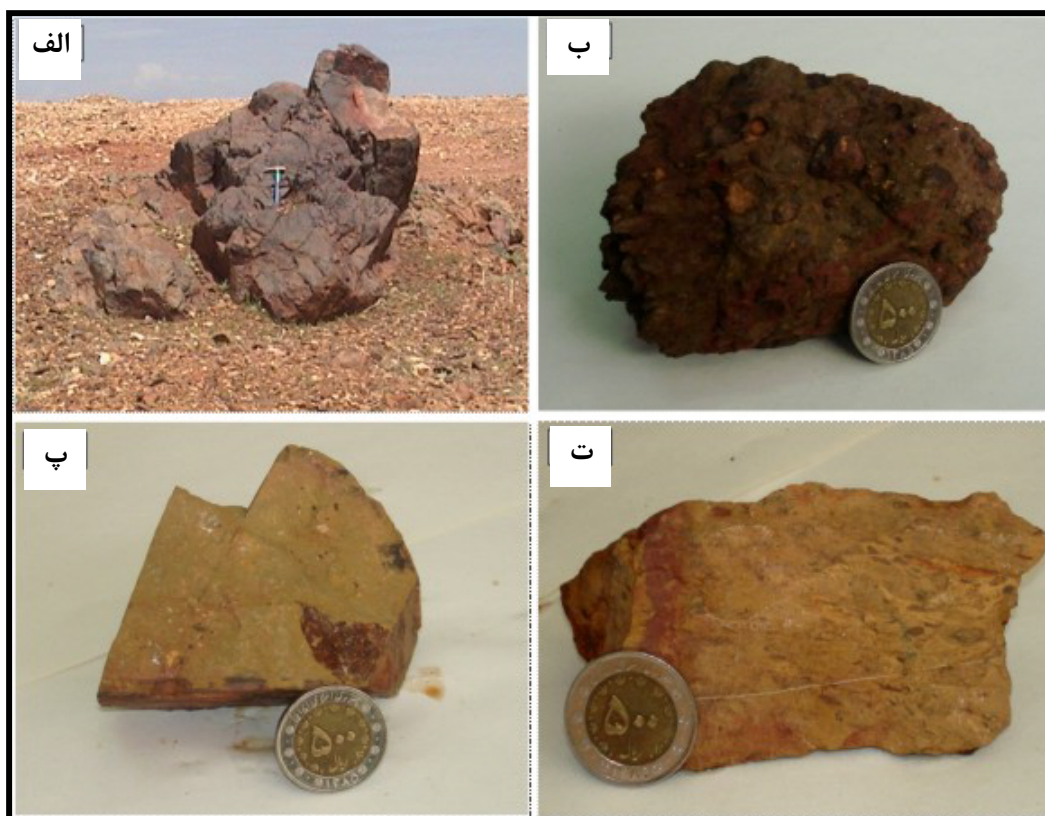
نهشته‌ی بوکسیت حیدرآباد در فاصله‌ی ۶۳ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان ارومیه، در مسیر ارومیه-مهاباد و در فاصله‌ی اندکی از جاده در کنار دریاچه‌ی ارومیه قرار دارد (شکل ۱). استان آذربایجان باختری از نظر ذخایر بوکسیت غنی بوده و در گذشته تعدادی از آن‌ها نیز به‌عنوان معدن نسوز بهره‌برداری شده‌اند [۹]. کانسارهای بوکسیتی این استان در نواحی بوکان (کانی شیته، جوانمرد)، شاهین دژ (علی بالتالو، نوروز آباد، چپو، آغاجری و...)، محور میاندوآب-مهاباد (قپی علی بابا) و جنوب شرقی ارومیه (حیدرآباد) و برخی مناطق دیگر پراکنده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که بیشتر این ذخایر به دلیل پایین بودن مدول آلومینیوم، ترکیب کانی‌شناسی نامطلوب و بالا بودن سیلیس و آهن برای بهره‌برداری آلومینا مناسب نیستند ولی

جلای فلزی، سبز تیره، قهوه‌ای مایل به سرخ و کرم رنگ است (شکل ۲). توده‌ی معدنی در کانسار حیدرآباد به مانند اغلب نهشته‌های بوکسیتی استان از دو بخش لاتریتی با رنگ ظاهری سرخ تا قهوه‌ای (افق بالایی) و بوکسیتی با رنگ ظاهری خاکستری، کرم-سبز (افق پایینی) تشکیل یافته است. در افق لاتریتی اکسیدهای آهن و در بخش بوکسیتی کانی‌های آلومینیوم دار غالب هستند.

تا ۲۰ متر و راستای عمومی N77E بر روی این سنگ‌ها قرار گرفته است (شکل ۱). این نهشته‌ی معدنی در راستای تقریباً شرقی-غربی و در حدود ۳/۵ کیلومتر گسترش دارد. با توجه به سختی بالای افق بوکسیتی، بخش‌های مقاوم در برابر هوازدگی و فرسایش در صحرا به خوبی دیده می‌شوند (شکل ۲). رنگ عمومی و ظاهری افق یاد شده تیره است، ولی کانسنگ بسته به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خود دارای رنگ‌های تیره با



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار بوکسیت-لاتریت حیدرآباد اقتباس از [۸] با تغییرات جزئی، موقعیت نمونه‌های برداشته شده در شکل نشان داده شده است.



شکل ۲ تصاویر صحرایی و نمونه دستی از بوکسیت- لاتریت حیدر آباد؛ الف) برونزد افق بالایی مقاوم در برابر هوازدگی و فرسایش، ب) بافت گرھکی، پ) بخش کرم مایل به سبز توده‌ای، ت) قطعات دگرشکل یافته در زمینه ریزدانه و توده‌ای.

می‌توان آن را بوکسیت استراتی فرم (لایه‌ای پیوسته تا نیمه پیوسته) با بستر کربناتی دانست.

روش پژوهش

در این پژوهش حاضر علاوه بر بررسی‌های صحرایی، تعداد ۱۰ نمونه نمادین از بخش‌های مختلف افق بوکسیتی-لاتریتی در یک نیمرخ نمونه برداری عمود بر راستای نهشته‌ی معدنی برداشت و مورد بررسی‌های کانی‌شناسی و آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. سنگ‌نگاری، ریزساخت و کانی‌شناسی کلی نمونه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ قطبشی در دانشکده‌ی مهندسی معدن دانشگاه تهران انجام گرفت و کانی‌شناسی دقیق کیفی و کمی آن‌ها به روش XRD با دستگاه فیلیپس مدل PW1800 بررسی شدند (جدول ۱). آنالیز شیمیایی نمونه‌ها نیز به روش XRF و با بهره‌گیری از دستگاه فیلیپس مدل PW1480 انجام شد. در این آنالیزها عناصر اصلی و تعدادی از عناصر کمیاب و نادر خاکی با به‌کارگیری پودر نمونه‌های ذوب شده به کمک لیتیم- تترابورات اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). حد

افق بوکسیتی حیدرآباد به سمت جنوب، به وسیله‌ی سنگ‌های دولومیتی خاکستری روشن که کم و بیش حاوی آثار فسیلی هستند به‌طور هم شیب پوشانده شده است (شکل ۱). این روند در سرتاسر راستای افق یاد شده ادامه دارد. این سنگ‌ها بر اساس رخنمون‌های ناحیه‌ای و نیز نقشه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (ورقه‌ی ارومیه چاپ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) سن تریاس دارند. سنگ‌های یاد شده کمر بالای ماده‌ی معدنی هستند و اثر دگرگونی به‌صورت تبلور مجدد شدید در آن‌ها نیز به مانند واحدهای سنگی کمر پایین ماده‌ی معدنی به چشم می‌خورد. این موضوع همراه با حضور کانی‌های دگرگونی در افق بوکسیتی حیدرآباد نشانگر رخداد و تأثیر فاز دگرگونی بر سنگ‌های منطقه است. از نظر ساختاری شیب عمومی واحد های سنگی به سمت جنوب است و مجموعاً بخشی از یال یک ناودیس را تشکیل می‌دهند.

بر اساس شواهد صحرایی همبری افق بوکسیتی حیدرآباد با سنگ‌های کمر بالا و پایین آن، تیز (واضح) است و در واقع

اندازه‌گیری ۰/۰۱ درصد وزنی برای عناصر اصلی و ۱-۲ ppm برای عناصر فرعی و کمیاب بوده است. خطای آزمایشگاهی حدود ± 5 درصد و ± 2 درصد به‌ترتیب برای عناصر اصلی و کمیاب گزارش شده است. مقدار L.O.I (Total Loss on

اندازه‌گیری ۰/۰۱ درصد وزنی برای عناصر اصلی و ۱-۲ ppm برای عناصر فرعی و کمیاب بوده است. خطای آزمایشگاهی حدود ± 5 درصد و ± 2 درصد به‌ترتیب برای عناصر اصلی و کمیاب گزارش شده است. مقدار L.O.I (Total Loss on

جدول ۱ نتایج تجزیه‌ی XRD نیمه کمی نمونه‌های معرف از کانسار بوکسیت-لاتریت حیدر آباد (مقادیر به درصد).

Sample no.	Colour	Hematite	Diaspore	Chloritoid	Corundum	Chlorite	Muscovite/Ilite	Pyrite	Magnetite	Rutile	$\sum H \geq 6^\circ$
HD-A1-1	قرمز تیره	۴۰	۱۵	۱۶	۱۵	۸	-	-	-	۵	۹۱
HD-A2-2	سبز تیره	۳۷	۶	۱۰	۱۳	۲۵	-	۲	-	۶	۷۴
HD-A3-3	کرمی	۴	۳	۲۸	۸	۴	۳۸	-	۸	۵	۵۶
HD-B1-4	سیاه درخشان	۳۰	۱۱	۲۶	۱۰	۱۷	-	-	۵	-	۸۲
HD-B2-5	قهوه ای تیره	۳۷	-	۳۷	۱۲	۲۰	-	-	-	-	۷۷
HD-C1-6	قهوه ای تیره	۲۵	۹	۲۸	۱۷	۲۰	-	-	-	-	۷۹

* مجموع کانی‌های با سختی برابر یا بیشتر از ۶ در هر نمونه.

جدول ۲ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی انجام شده روی اکسیدهای اصلی (بر حسب درصد وزنی) و عناصر فرعی (بر حسب ppm).

Sample no.	HD-A1-1	HD-A2-2	HD-A3-3	HD-B1-4	HD-B2-5	HD-C1-6	T15-02 ^a	T18-03 ^b	T1-02 ^c
SiO ₂	۷۸۰	۱۳۸۰	۳۵۹۰	۱۵۵۰	۱۸۲۰	۲۰۷۰	۳۳۱۴	۱۲۵۹	۳۳۴۱
Al ₂ O ₃	۳۳۹۰	۳۰۲۰	۳۲۳۰	۳۲۴۰	۲۸۴۰	۳۱۴۰	۲۱۸۴	۲۸۹۳	۲۹۸۷
Fe ₂ O ₃	۴۴۳۰	۴۰۱۰	۱۲۹۰	۳۶۹۰	۳۹۶۰	۳۲۴۰	۱۵۹۶	۴۵۱۷	۲۰۹۲
CaO	۰/۵۸	۰/۳۶	۱/۵۶	۱/۹۵	۰/۶۸	۰/۶۶	۹/۸۴	۲/۷۴	۰/۰۸
Na ₂ O	۰/۱۶	۰/۱۳	۳/۲۲	۰/۸۴	۰/۱۶	۱/۲۵	۰/۷۱	۰/۳۱	۰/۸۳
MgO	۰/۵۴	۱/۱۰	۰/۳۶	۰/۶۵	۰/۸۷	۰/۶۱	۰/۹۳	۰/۵۲	۰/۹۱
K ₂ O	۰/۰۳	۰/۰۱	۲/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۶۹	۲/۹۴	۰/۱۴	۳/۶۱
TiO ₂	۵/۸۰	۶/۶۰	۵/۲۰	۵/۵۰	۴/۹۰	۵/۲۰	۳/۷۵	۴/۰۹	۲/۷۶
MnO	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۸	-	-	-
LOI	۵/۹۹	۵/۸۵	۵/۳۷	۴/۸۴	۵/۹۱	۵/۹۶	۱۰/۶۳	۵/۲۳	۷/۳۲
Total	۹۹/۱۵	۹۸/۲۱	۹۸/۹۹	۹۸/۸۰	۹۸/۸۷	۹۸/۹۵	۹۹/۷۴	۹۹/۷۲	۹۹/۷۱

Trace elements (ppm)

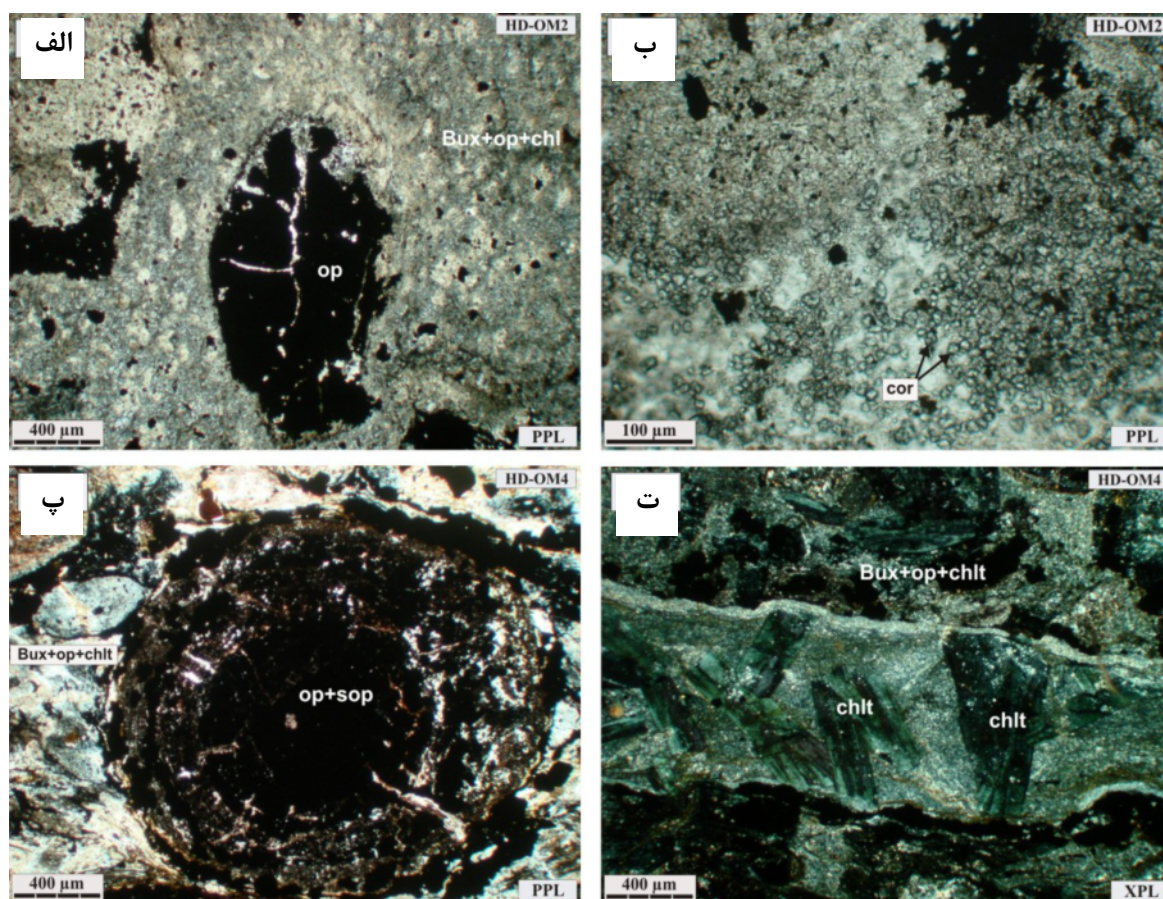
Cr	۱۲۵۰	۱۷۰۰	۱۲۳۰	۱۵۸۰	۱۳۷۰	۱۵۰۰
Co	۱۴۰	۱۲۰	۶۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۵۰
Ni	۵۰	۱۴۰	۶۰	۲۶۰	۱۴۰	۱۸۰
Cu	۴۰	۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰
Zn	۶۰	۱۶۰	۳۰	۶۰	۱۲۰	۶۰
Pb	۵۰	۱۰	۶۰	۱۰	۱۰	۱۰
Rb	۱۰	۱۰	۱۱۰	۱۰	۳۰	۵۰
Sr	۱۱۰	۲۵۶۰	۹۴۰	۴۶۰	۱۷۰	۳۵۰
Y	۱۶۰	۲۱۰	۱۶۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۳۰
Zr	۱۳۵۰	۱۶۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۱۰۰
La	۷۰	۴۰	۵۰	۵۰	۳۰	۱۰
Ce	۳۰۰	۷۰۰	۱۸۰	۴۱۰	۴۱۰	۱۴۰
Th	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
U	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
Ba	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
S	۱۵۰	۴۰۰۰	۵۰	۲۰	۴۵۰	۲۶۰

a,b,c: نمونه‌های بر گرفته شده از [۸].

سنگ نگاری و ریز بافت

هدف از بررسی‌های سنگ‌نگاری در این پژوهش در گام نخست شناخت ویژگی‌های بافتی و در مرحله‌ی بعدی کانی‌شناسی است. به دلیل خمیره‌ی بسیار ریز اغلب نمونه‌های مورد بررسی، به موازات بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌شناسی دقیق‌تر آن‌ها با بهره‌گیری از روش XRD انجام گرفت شد. بافت‌های اصلی در نمونه‌ها پیزولیتی، اووئیدی و گره‌کی بوده و بافت‌های برشی، توده‌ای و پان ایدیومورفیک نیز در مواردی دیده می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳). خمیره‌ی بیشتر نمونه‌ها ریز دانه تا کریپتوکریستالین بوده و اندازه‌ی بیشتر ذرات تشکیل دهنده نیز کوچکتر از ۱۰ میکرون بوده است. کانی‌های اصلی قابل تشخیص در سنگ‌نگاری میکروسکوپی شامل اکسیدهای آهن، دیاسپور، کلریتوئید و کلریت هستند (شکل ۳). علاوه بر این‌ها کانی‌هایی مانند کاردوم (با برجستگی زیاد و اغلب در خمیره)،

روتیل، فلدسپات و به ندرت موسکویت یا (ایلیت) نیز به دلیل اندازه‌ی بسیار ریز به سختی قابل تشخیص‌اند. توزیع کانی‌ها در نمونه‌ها نایک‌نواخت بوده و اندازه‌ی آن‌ها و نیز قطعات پیزولیت، اووئید و گره‌ک‌ها نیز متغیرند (شکل ۳). اندازه‌ی بیشتر گره‌ک‌ها و پیزولیت‌ها بین ۰/۷ تا ۷ میلی‌متر (فراوانی ۳-۱ میلی‌متر بیشتر است) است و برخی از آن‌ها در اثر تاثیر تنش پس از تشکیل، مثل فشردگی، دستخوش خرد شدگی و دگرشکلی شده‌اند (شکل ۳). کانی‌های کدر و نیمه-شفاف (با چیرگی اکسیدهای آهن) به دو صورت ریز دانه در خمیره‌ی (۵ تا ۱۰۰ میکرون) و قطعات درشت کروی تا بیضوی و در مواردی بدون شکل هندسی خاص وجود داشته و بخش بزرگ قطعات پیزولیتی و گره‌ک‌ها (به ویژه مرکز آن‌ها) را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های بوکسیت-لاتریت حیدرآباد و ریزبافت‌های آن؛ الف) گره‌ک کدر (op) در زمینه ریزدانه متشکل از کانی‌های بوکسیتی (Bux)، کدر و کلریت (chl)، ب) بلورهای ریز و نیمه شکل‌دار کاردوم (cor) در زمینه‌ی کانی‌های بوکسیتی و کدر، پ) پیزولیت ترک‌دار کدر و نیمه شفاف (sop)، ت) بلورهای شکل‌دار کلریتوئید (chl) با ماکل ساعت شنی.

از ویژگی‌های کانی‌شناسی مهم کانسار حیدر آباد در مقایسه با ذخایر بوکسیتی دیگر شمال باختری کشور وجود کَرندوم در مقادیر متغیر (۸ تا ۱۷ درصد، جدول ۱) و در مرتبه بعدی فراوانی دیاسپور و نبود بوهمیت است. مقدار کَرندوم در بخش‌های فوقانی به رنگ تیره تا سرخ تیره بیشتر بوده و در بخش‌های پایینی به رنگ کرم تا سبز اندک است. کلریتوئید یک سازنده اصلی در نمونه‌های بوکسیتی مورد بررسی بوده و مقدار آن از حداقل ۱۰ درصد تا حداکثر ۳۷ درصد در نوسان است. حضور این کانی در نهشته‌ی بوکسیتی حیدرآباد نشانگر رخداد تغییرات بعدی در مراحل پس از تشکیل کانی‌های اولیه است. به اعتقاد باردوسی [۲]، کَرندوم معمولاً از سنگ‌های مادر اولیه منتج نمی‌شود و به‌صورت ثانوی در بوکسیت‌ها تشکیل می‌گردد. همین‌طور میکروکَرندوم (بلورهای با ابعاد بسیار ریز کَرندوم) در اثر دگرگون شدن سنگ‌های بوکسیتی پدیدار می‌شود [۲].

ژئوشیمی

برای بررسی ترکیب شیمیایی بوکسیت - لاتریت‌های دگرگون شده‌ی حیدرآباد از بخش‌های مختلف کانسار بر اساس تغییرات رنگ و بافت تعداد ۶ نمونه معرف برداشته شد و عناصر اصلی و کمیاب انتخابی آن به‌وسیله XRF آنالیز شدند.

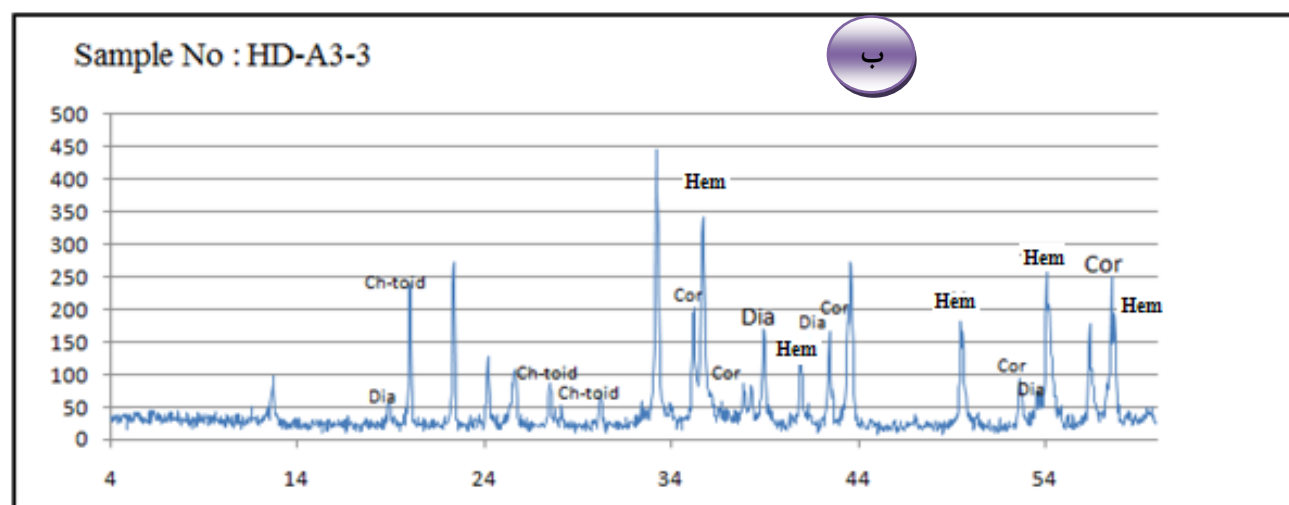
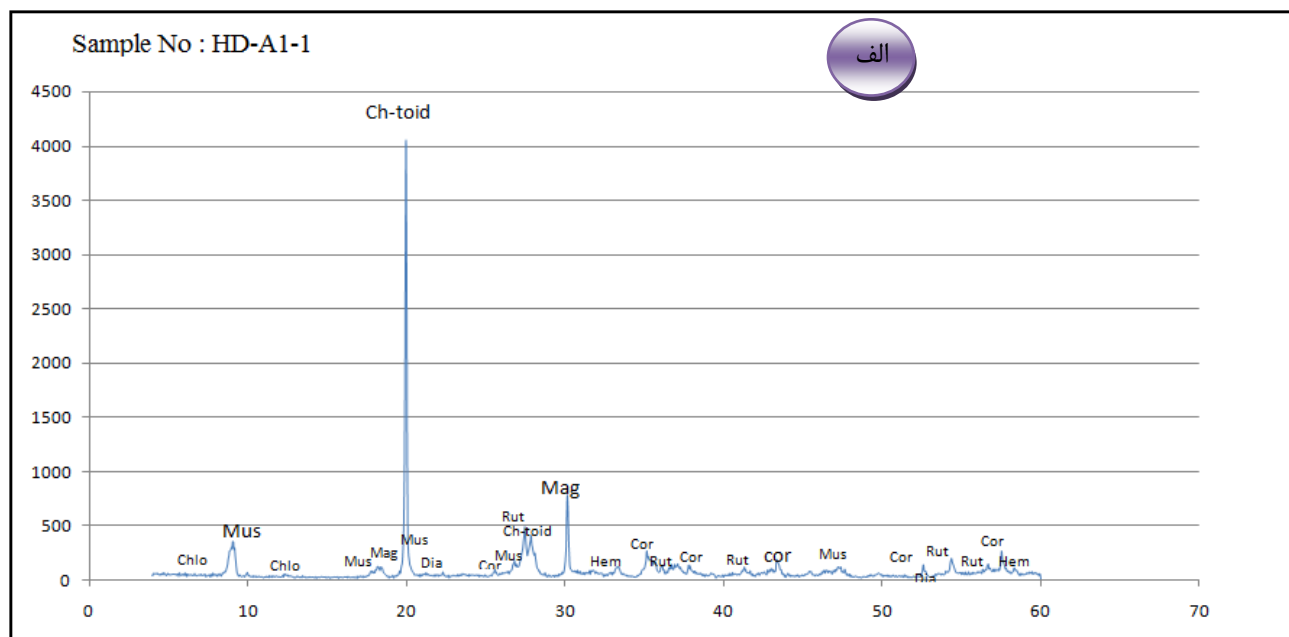
از نظر ژئوشیمیایی، بوکسیت - لاتریت‌های حیدر آباد اغلب با مقادیر بالا ولی متغیر اکسیدهای Fe_2O_3 (۴۵/۱۷ wt%) - Al_2O_3 (۱۲/۹۰ - ۳۳/۹۰ wt%) و SiO_2 (۲۱/۸۴ - ۳۵/۹۰ wt%) مشخص شده و علاوه بر این سازنده‌های اصلی مقادیر کمتری نیز TiO_2 (۶/۶۰ - ۲/۷۶) دارند (جدول ۲). بیشترین مقدار SiO_2 به بوکسیت کرم رنگ (نمونه HD-A3-3) وابسته است که در آن موسکویت/ایلیت، کلریت و کلریتوئید در مقایسه با نمونه‌های دیگر افزونتر است. تمرکز عناصر قلیایی و قلیایی خاکی اندک و در طیف باریکی است (جدول ۲) که به احتمال زیاد به ویژگی شدیداً پویای این عناصر طی هوازگی شیمیایی بستگی دارد، زیرا آن‌ها در این فرآیند و بوکسیتی شدن پیامد آن به راحتی شسته و به محیط‌های مجاور حمل شده‌اند. با توجه به بررسی‌های کانی‌شناسی و مقایسه‌ی آن با نتایج آنالیز شیمیایی (جدول ۲) آشکار می‌شود که Al_2O_3 در کانی‌های متعددی شامل کَرندوم، دیاسپور، کلریتوئید و کمتر کلریت و موسکویت/ایلیت (نمونه HD-A3-3 و T1-02) مشارکت داشته و تنها کانی حاوی TiO_2

کلریتوئید کانی نسبتاً فراوان غالب نمونه‌ها بوده و به‌صورت بلورهای شکل‌دار در اندازه‌های متفاوت (حداکثر تا ۱/۵ میلیمتر) و گاهی به‌صورت ماکل ساعت شنی دیده می‌شود (شکل ۳). برخی بلورهای درشت این کانی حتی در نمونه‌ی دستی نیز به رنگ سبز تیره قابل شناسایی است.

کانی‌های آلومینیم‌دار اصلی شامل کَرندوم و دیاسپور بوده و بخش بزرگی از آن‌ها در خمیره تمرکز سنگ قرار دارند. بلورهای کانی کَرندوم در اغلب نمونه‌های بررسی شده دارای اندازه‌های بسیار ریز بوده (حدود ۲۵ - ۱۰ میکرون) و در بزرگنمایی بالا ($\times 200$) قابل شناسایی است. این بلورها با داشتن برجستگی زیاد و ته رنگ آبی - صورتی (در PPL)، رنگ تداخلی سری یک و ناهمسانگردی (در XPL) در بررسی میکروسکوپی از سایر کانی‌ها تمیز داده می‌شود (شکل ۳-ب). مهم‌ترین تغییر قابل ذکر در مجموعه کانی‌شناسی نمونه‌های مختلف، تفاوت در فراوانی آکسیدهای آهن است که از نمونه‌ای به نمونه‌ی دیگر مقدار آن‌ها متفاوت است.

کانی‌شناسی

برای بررسی ترکیب کانی‌شناسی افق بوکسیتی - لاتریتی حیدرآباد پس از نمونه‌برداری سیستماتیک از بخش‌های مختلف کانسار با توجه به تغییرات رنگ و بافت تعداد، شش نمونه معرف به روش XRD مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی‌های علاوه بر شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده اصلی و فرعی، کانی‌شناسی به روش نیمه کمی با خطای $\pm 10\%$ درصد نیز انجام گرفت. بر این اساس کانی‌های اصلی آلومینیم‌دار در غالب نمونه‌ها شامل کَرندوم و دیاسپور (حداکثر ۱۵ درصد) بوده و هماتیت کانه‌ی آهن دار فراوان (۴ تا ۴۰ درصد) است. کانی‌های دیگر با فراوانی متغیر شامل کلریتوئید، کلریت، روتیل، مگنتیت، موسکویت - ایلیت شناسایی شدند. در جدول ۱ نتایج آنالیز XRD کمی شش نمونه‌ی معرف از افق بوکسیتی حیدر آباد و در شکل ۴ نیز الگوی پراش XRD برای دو نمونه انتخابی نشان داده شده‌اند. چنانکه در جدول ۱ دیده می‌شود موسکویت و ایلیت تنها در یک نمونه، بوکسیت کرم رنگ و متراکم (شماره HD-A2-2)، کانی اصلی بوده و در نمونه‌ها دیگر گزارش نشده است ولی شواهدی از وجود آن‌ها با مقادیر متغیر در بررسی‌های سنگ‌نگاری میکروسکوپی وجود دارند (مثل HD-OM-2, HD-OM-3).



شکل ۴ نمودارهای پراش پرتو X وابسته به نمونه‌های شماره HD-A1-1 (الف) و HD-A3-3 (ب) از کانسار حیدرآباد، علائم اختصاری: کلریت (Chlo)، موسکویت (Mus)، دیاسپور (Dia)، روتیل (Rut)، هماتیت (Hem)، کلریتوئید (Ch-toid).

مثبت Al_2O_3 در غالب نمونه‌ها با اکسیدهای آهن و تیتانیوم دیده می‌شود که حاکی از تمرکز بالای کانی‌های تیتانیوم و آهن‌دار در نمونه‌های غنی از Al_2O_3 است. این موضوع نشان می‌دهد که در افاق‌های بیشتر هوازده، Al_2O_3 و TiO_2 با توجه به ماهیت نامتحرک آن‌ها تمرکز بیشتری دارند. با توجه به روند منفی آشکار بین اکسیدهای SiO_2 و Fe_2O_3 نیز مشخص می‌شود که تمرکز کانی‌های آهن‌دار در بخش تیره‌ی

در نمونه‌ها روتیل است. در شکل ۵ نمودارهای دوتایی نشان دهنده تغییرات Al_2O_3 نسبت به اکسیدهای دیگر مانند TiO_2 ، SiO_2 ، Fe_2O_3 ترسیم شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهد که اکسید آلومینیم با SiO_2 روند منفی نسبی داشته و دلیل آن نیز عدم مشارکت Al_2O_3 در ساختار کانی‌های رسی مانند کائولینیت، با Al_2O_3 و SiO_2 بالا، به دلیل ناچیز بودن آن در نمونه‌های مورد بررسی است. از طرف دیگر روند نسبی

اینکه مقدار آب با مقدار Al_2O_3 تناسبی ندارد و قلمروهای متفاوتی را اشغال می‌کنند، باید گفت که کانی‌های آلومینیم‌دار با عامل OH بالا مانند گیبسیت در نمونه‌ها حضور ندارند.

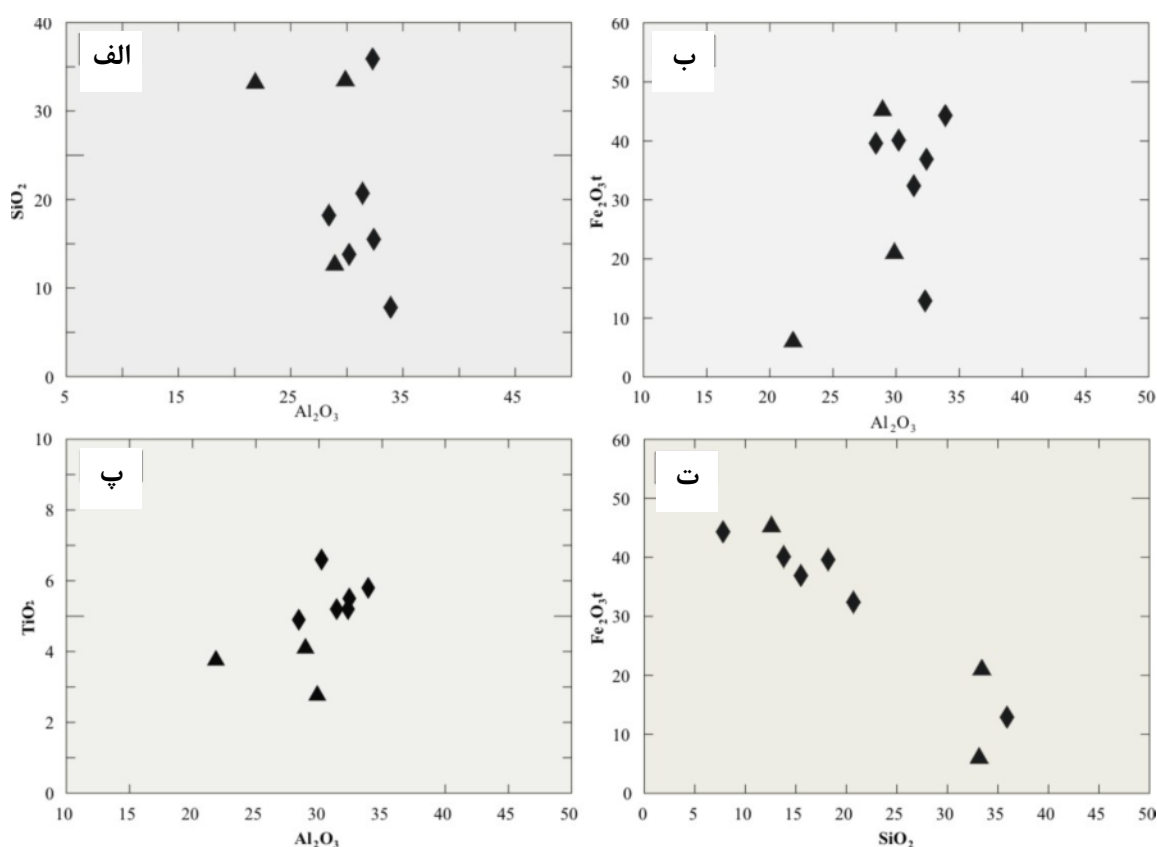
بحث و برداشت

شرایط تشکیل و ژنز احتمالی

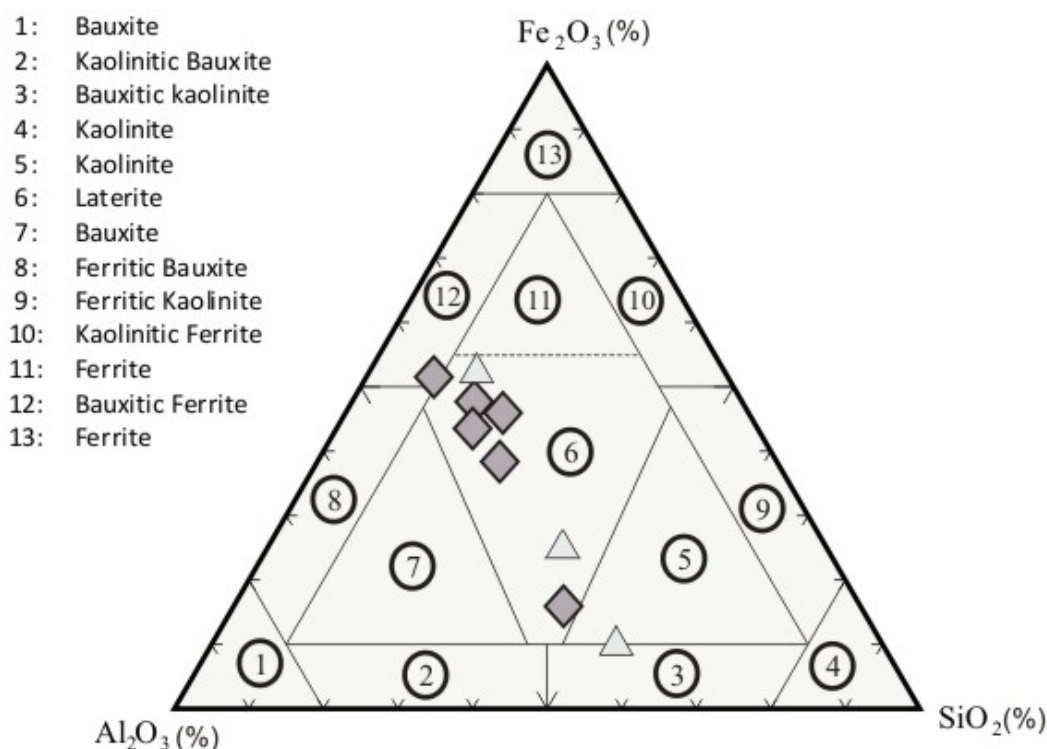
نبود چینه‌شناسی طی پرمین بالایی-تریاس پایینی در بخش-های گسترده‌ای از جنوب استان آذربایجان غربی و کردستان به‌وسیله تشکیل افق بوکسیت-لاتریت آشکار شده است. این کانسار را می‌توان از نوع کارستی با بستر کربناتی (آهکی-دولومیتی) محسوب داشت که در بیشتر مناطق مورد بررسی با واحدهای سنگی به سن تریاس بالایی پوشانده شده است. شکل کانسار لایه‌ای پیوسته تا نیمه پیوسته (چینه‌ای) بوده و همبری آن به ویژه با سنگ‌های کمر پایین تیز (شارپ) است. افق معدنی حیدرآباد از مجموعه کانی‌های هماتیت، دیاسپور، کلریتوئید، کزندوم، کلریت و به مقدار کمتر روتیل، مگنتیت و پیریت تشکیل یافته و ایلیت/موسکویت نیز تنها در یک نمونه گزارش شده است (جدول ۱).

لاتریتی و در مقابل آلومینو سیلیکات‌ها در بخش روشن بیشتر است. علاوه بر اکسیدهای اصلی تعدادی از عناصر کمیاب شامل عناصر نامتحرک مثل Zr و Cr نیز برای نمونه‌های معرف حیدرآباد آنالیز شدند (جدول ۲). با توجه به این جدول روند سیستماتیک و معنی‌داری بین عناصر کمیاب با اکسیدهای اصلی در نمونه‌های مختلف دیده نمی‌شود. عناصر Cr, Zr در مقادیر نسبتاً قابل توجهی در مقایسه با بوکسیت‌های مناطق مختلف جهان [۷] تمرکز دارند به طوری که Zr از ۱۶۰۰-۱۱۰۰ ppm و Cr از ۱۲۳۰-۱۷۰۰ ppm در نوسانند.

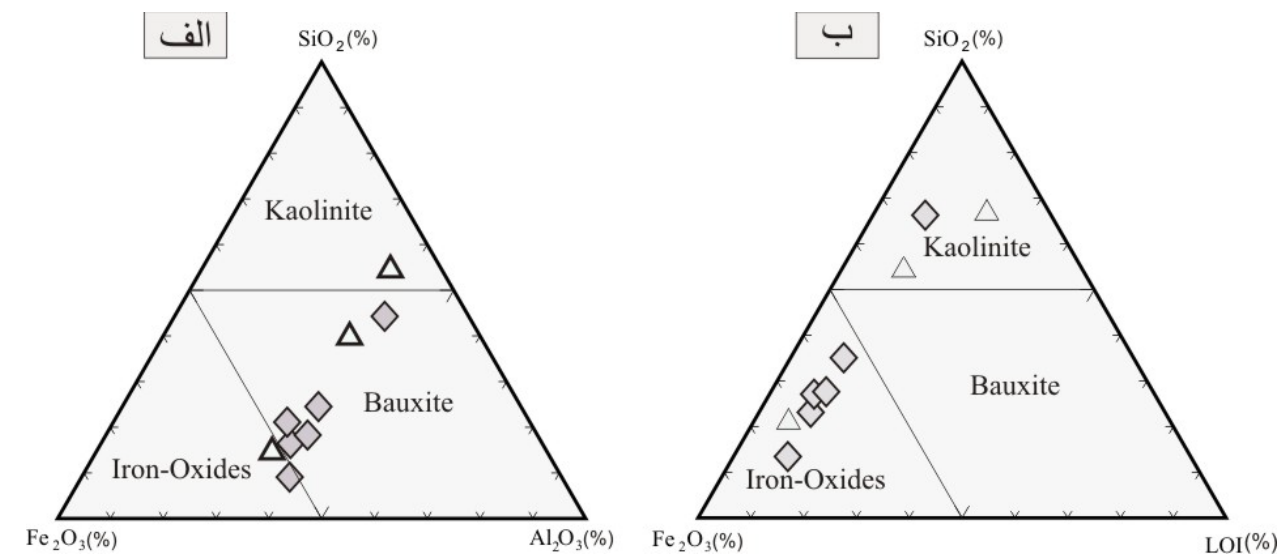
بر اساس تقسیم‌بندی کانی‌شناسی آلیوا [۱۲] اغلب نمونه‌های مورد بررسی از کانسار حیدرآباد در گستره‌ی لاتریت و کمتر در گستره‌های فریت بوکسیتی و کائولینیت بوکسیتی قرار می‌گیرند (شکل ۶). با وجود بر این بنا بر نمودار سه تایی SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 (شکل ۷-الف) شرایط زمین‌شناسی-آب و هوایی دیرین در منطقه‌ی مورد بررسی فرایند لاتریتی شدن فرایند بوکسیتی شدن را یاری کرده است که این می‌تواند سبب تحرک و تمرکز آلومینیم شود [۱۳]. شکل ۷-ب نیز با توجه به



شکل ۵. نمودارهای دوتایی تغییرات Al_2O_3 نسبت به اکسیدهای SiO_2 (الف)، TiO_2 (ب) و Fe_2O_3 (پ) و SiO_2 نسبت به Fe_2O_3 (ت)؛ نمونه‌های با نماد مثلثی از کانسار حیدرآباد است و بر گرفته از [۸] است.



شکل ۶ نمودار سه تایی $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [۱۲] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی از کانسار حیدر آباد در آن؛ نمونه‌های با نماد مثلثی بر گرفته از [۸].



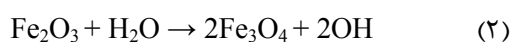
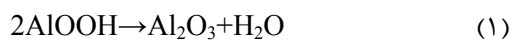
شکل ۷ نمودارهای سه تایی $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (الف) و $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-LOI}$ (ب) و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی از کانسار حیدر آباد در آن؛ نمونه‌های با نماد مثلثی بر گرفته از [۸]، نمودارها از [۱۳].

آهن‌دار (هماتیت) با تبدیل و گذر تدریجی قابل تفکیک است. وجود کانی‌های دگرگون شامل کلدوم، کلریتوئید و کلریت از یک طرف و آثار تبلور دوباره در سنگ‌های کربناتی کمر بالا و پایین، چگالی بالا و فشردگی ماده معدنی و نبود دگرشکلی

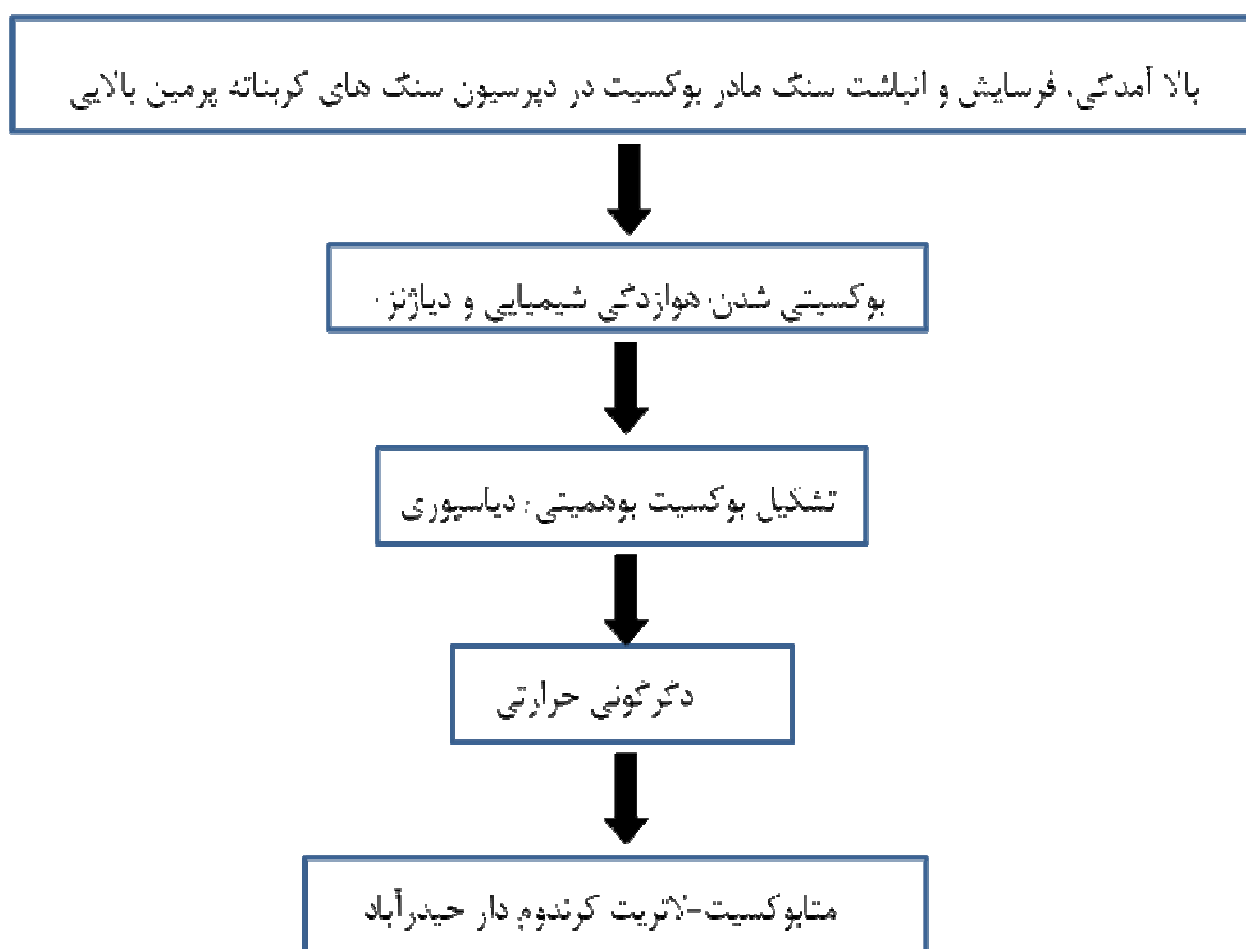
بر اساس بافت، رنگ و کانی‌شناسی، افق معدنی مورد بررسی به دو افق تیره رنگ غنی از کانی‌های آهن‌دار و کلدوم (افق بالایی) و کرم تا کرم-سبز رنگ غنی از آلومینوسیلیکات‌های ورقه‌ای مانند ایلیت-موسکویت و فقیر از کلدوم و ترکیبات

قابل توجه در تشکیل دهنده‌هایی همچون گرهک‌ها و پیزولیت‌ها حاکی از تاثیر گرمای توده‌های آذرین در دوره‌ی پس از تشکیل بوکسیت - لاتریت دارد. رخنمونی از این توده-های آذرین در منطقه‌ی بالستان به سن کرتاسه بالایی-پالئوسن وابسته به فاز لارامید [۱۴] پدیدار شده است. در واقع بوکسیت-لاتریت حیدرآباد را می‌توان ارتوبوکسیتی در نظر گرفت که نخست در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب تشکیل شده و سپس علاوه بر تحمل فرایندهای دیاژنتیکی، دستخوش دگرگونی گرمایی آزدایی شده و مجموعه کانیایی جدید با ماهیت دگرگونی پدیدار شده است. فقدان گیبسیت، گوتیت، کائولینیت و فراوانی کلریتوئید، کزندوم و پیدایش مگنتیت در برخی نمونه‌ها ویژگی‌های شاخص کانی‌شناسی بوکسیت-لاتریت حیدرآباد در مقایسه با کانسارهای بوکسیتی دیگر شمال غربی ایران است.

طی دگرگونی و در نتیجه واکنش‌های زیر، بخشی از بوهمیت یا دیاسپور و هماتیت می‌تواند به کزندوم و مگنتیت تبدیل شود:



طی این نوع دگرگونی ترکیب شیمیایی کلی و ژئوشیمی عناصر کمیاب بوکسیت تغییر محسوسی نداشته و فرآیند ایزوشیمیایی است. این فرآیند بدون تاثیر موثر آگون‌های گرمایی صورت گرفته است و اندک کانی‌های آبدار تشکیل شده در برخی رگچه‌های میکروسکوپیکی با مقدار محدودی از آب موجود در سیستم که در نتیجه‌ی تبدیل کانی‌های آلومینیم آبدار (بوهمیت/دیاسپور) به کزندوم آزاد شکل گرفته‌اند، به‌وجود آمده‌اند. خلاصه‌ای از فرایندهای موثر در شکل‌گیری کانسار حیدرآباد در نمودار شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸ خلاصه‌ای از فرایندهای موثر در تشکیل و شکل‌گیری کانسار بوکسیت-لاتریت حیدرآباد به‌صورت شماتیک.

(آرژیلیتی) هستند، از نظر بافت و ترکیب به سنگ‌های در زیر قرار گرفته (بستر) به‌عنوان خاستگاه احتمالی، وابستگی خاصی نشان نمی‌دهند. به‌عبارت دیگر سنگ‌های خاستگاه احتمالی آن‌ها را بایستی از محیط اطراف، مانند خاکسترهای آشفشانی، سنگ‌های مافیک یا قطعات ناشی از پی سنگ و اجزای آرژیلیت سنگ‌های کربناتی [۱۸، ۱۷، ۱].

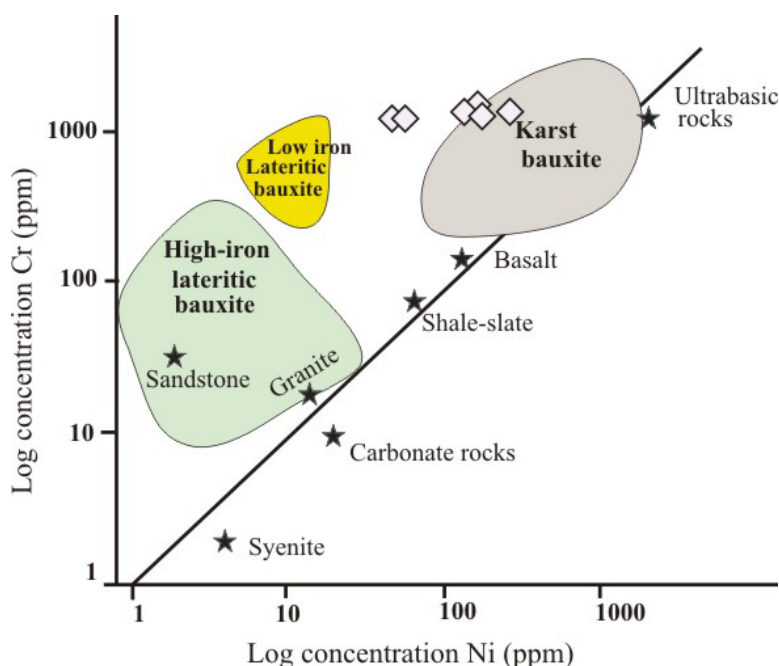
با هدف کنترل سنگ خاستگاه احتمالی کانسار مورد بررسی از تمرکز عناصر Cr و Ni در نمودار دوتایی [۱۹] استفاده شده است (شکل ۹). چنانکه در این شکل دیده می‌شود، اغلب نمونه‌های معرف کانسار حیدرآباد در گستره‌ی بوکسیت‌های کارستی با سنگ مادر احتمالی واقع در ترکیبات اولترا بازیک و بازیک (مثل بازالت) واقع شده‌اند. وجود رخنمونی از دایک و سیل‌های مافیک (دیابازی) در ناحیه‌ی حیدرآباد- قبی علی بابا را شاید بتوان از این دیدگاه، یک پتانسیل احتمالی سنگ مادر برای بوکسیت- لاتریت پیشنهاد کرد. مقادیر اندکی از کانی‌های باقیمانده مانند پلاژیوکلاز در برخی نمونه‌ها در این خصوص قابل توجه است. چنین سنگ خاستگاه احتمالی برای بوکسیت منطقه‌ی "کانی شیشه" بوکان [۷] و منطقه‌ی "علی بالتالوی" شاهین دژ [۲۰] نیز قبلاً پیشنهاد شده است.

یک توافق کلی در مورد کانی‌شناسی بوکسیت‌ها وجود دارد و آن این است که اغلب بوکسیت‌های کارستی (به جز بوکسیت‌های جامائیکا) بوهمیتی یا دیاسپوری هستند. همچنین توافق بر این است که بوکسیت‌های قدیمی معمولاً بوهمیتی و بوکسیت‌های جدید گیبسیتی‌اند. به باور برخی از پژوهشگران، گیبسیت اولین کانی است که در بوکسیت پدیدار می‌شود و دگرگونی ضعیف و شدید نیز به نوبه خود این کانی را به‌ترتیب به دیاسپور و کروندوم تبدیل می‌کند [۲].

در رابطه با انواع بافت‌های نهشته‌های بوکسیتی، ظهور بافت‌های گرهکی همراه با تجمع ترکیبات Fe در طی بوکسیتی شدن کارستی در شرایط آب و هوایی گرمسیری در مناطق مدیترانه‌ای به‌خوبی شناخته شده است [۱۵]. وجود اوئیدهای آهن‌دار مانند آنچه در حیدرآباد مشاهده می‌شود را می‌توان از هوازدگی تحت شرایط آب و هوایی گرمسیری از طریق یک فرآیند خاکزایی (Pedogenic) دانست [۱۵].

ماهیت سنگ مادر احتمالی

بوکسیت‌های لاتریتی با بستر کربناتی آهکی- دولومیتی خالص (مانند نهشته‌ی حیدرآباد) که بدون تشکیل دهنده‌های رسی



شکل ۹ نمودار دوتایی تغییرات عناصر Cr و Ni (لگاریتمی) [۱۹] و موقعیت نمونه‌های مورد بررسی از کانسار حیدرآباد در آن؛ موقعیت سنگ‌های خاستگاه احتمالی به نام و با علامت ستاره مشخص شده و قلمرو انواع بوکسیت نیز در نمودار نشان داده شده است.

- [۸] شرکت منطقه‌ای معادن آذربایجان غربی، "گزارش اکتشافی بوکسیت حیدرآباد ارومیه"، ۱۳۷۴، ۴۰ صفحه.
- [۹] امامعلی پور ع، "بررسی منابع اولیه کانی‌های ساینده در استان آذربایجان غربی و امکان کاربرد آن‌ها در صنعت، گزارش طرح پژوهشی"، سازمان صنایع و معادن آذربایجان غربی، ۱۳۸۶، ۱۴۷ صفحه.
- [۱۰] امامعلی پور ع، "بررسی فراوانی کانی‌های تیتانیوم دار در نهشته‌های بوکسیتی استان آذربایجان غربی و امکان فرآوری آن‌ها"، سازمان صنایع و معادن آذربایجان غربی، ۱۳۸۳، ۱۹۲ صفحه.
- [۱۱] امامعلی پور ع، "بررسی فلزهای ذخایر معدنی در گستره استان آذربایجان غربی"، گزارش طرح پژوهشی داخلی دانشگاه ارومیه، ۱۳۷۸، ۶۱ صفحه.
- [12] Aleva G.J.J., "Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)", Wageningen, The Netherlands, 1994, 169 pp.
- [13] Mutakyahwa M.K.D., Ikingura J.R., Mruma A.H., "Geology and geochemistry of bauxite deposits, Lushoto District, Usambara Mountains", Tanzania, Journal of African Earth Sciences, Vol. 36, 2003, pp. 357-369.
- [۱۴] امامعلی پور ع، "بررسی ژئوشیمیایی توده‌های گرانیتوئیدی و ارائه مدل ژئودینامیکی جای‌گیری آن‌ها در ناحیه شمال و جنوب شهرستان ارومیه"، گزارش طرح پژوهشی داخلی دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۳، ۴۳ صفحه.
- [15] Mongelli G., "Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxite from the Apulian carbonate platform (southern Italy)", Chemical Geology, Vol. 140, 1997, pp. 69-79.
- [16] Nahon D., Carozzi A.V., Parron C., "Lateritic weathering as a mechanism for the generation of ferruginous ooids", J Sediment Petrol, Vol. 50, 1980, pp. 1287-1298.
- [17] 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", Mineralium Deposita, Vol. 32, 1997, pp. 607-616.

بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی، بافتی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، افق بوکسیتی-لاتریتی حیدرآباد را می‌توان بوکسیتی کارستی دانست که پس از فرایند دیاژنز و بوکسیتی شدن در شرایط معمول این نوع کانسارها، دگرگونی‌های بافتی و کانی‌شناسی بعدی ناشی از دگرگونی گرمایی را پشت سر گذاشته است. از این رو بوکسیت اولیه می‌تواند ترکیب گیبسیتی داشته و طی فشردن، دیاژنز و خروج یا کاهش آب به بوهمیت و سپس دیاسپور (تغییرات ساختار بلوری) و در ادامه با عملکرد دگرگونی به کردوم تبدیل شود. تبدیل و گذر از بافت‌های پیژولیتی و اوئیدی (محیط نهشته شدن پرانرژی) به انواع توده‌های مختلف را نیز می‌توان حاکی از تغییرات ناگهانی در شرایط نهشته شدن دانست.

مراجع

- [1] Harben P. W., "The industrial minerals handybook", 4th Edition, 2003, 296 pp.
- [2] Bardossy G., Karst Bauxites, "Elsevier Scientific Publication", Amsterdam, 1982, 441 pp.
- [3] Combes P.J., "Les différentes types de bauxites sur substratum carbonate dans le Languedoc et l'Arie'ge. Remarques sur la notion d'allochtonie et d'autochtonie", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 274, 1972, pp. 1613-1616.
- [4] Laville P., "La formation bauxitique provenc,ale (France). Se'quence des facie' s chimiques et pale'omorphologie cre' tace'e, Chronique de la Recherche Minie're", Vol. 461, 1981, pp. 51-68.
- [5] Oggiano G., Sanna G., Temussi I., "Caracte' res geologiques, gitologiques et geochemiques de la bauxite de la Nurra", In: Cherchi A (eds) Livret-Guide excursion en Sardaigne, Vol. 24-29, 1987, pp. 72-124.
- [6] Combes P.J., "Typologie, cadre ge'odynamique et gene'se des bauxites franc",aises, Geodinamica Acta, Vol. 4, 1990, pp. 91-109.
- [7] Calagari A.A., Abedini A., "Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran", Journal of Geochemical Exploration, Vol. 94, 2007, pp. 1-18.

Molibdan in Bauxitischen gestermen und problem der stofflichen herkunft des Aluminiums", Travaux de ICSOBA, Vol. 5, 1968, pp, 83–96.

[۲۰] خواجه محمدلو ن.، رساء ا.، امامعلی پور ع.، "بررسی ژئوشیمیایی و زایش کانسار کائولینیتی- بوکسیتی علی بالتالوی شاهین دژ"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۲، تابستان ۱۳۸۸.

[18] Brimhall G.H., Lewis C.J., Ague J.J., Dietrich W.E., Hampel J., Rix P., "Metal enrichment in bauxites by deposition of chemically mature aeolian dust", Nature, Vol. 333, 1988, pp. 819–824.

[19] Schroll E., Sauer D., "Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom, Nikel, Cobalt, Vanadium und