

## کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و خاستگاه نهشته بوکسیت قشلاق، جنوب‌شرق گرگان

رزگار فرامرزی، غلامحسین شمعانیان\*، بهنام شفیع

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، کدپستی ۱۵۷۳۹-۴۹۱۳۸

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۸/۲، پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۹

### چکیده

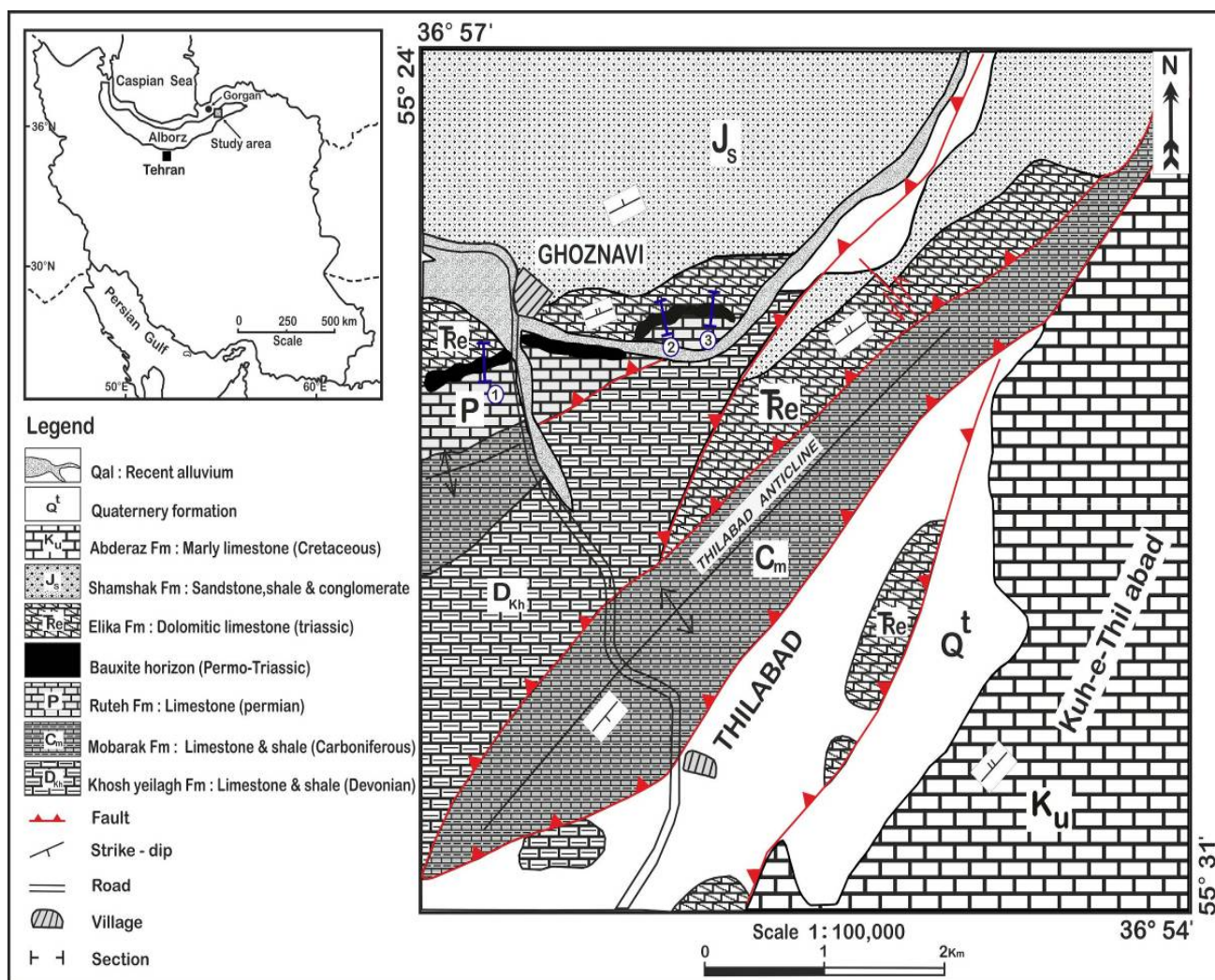
نهشته بوکسیت قشلاق در ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌شرقی گرگان واقع شده است. این نهشته به صورت یک افق چینه‌سان با طول بیش از ۲ کیلومتر و ضخامت حدود ۲۵ متر در بین کربنات‌های سازنده‌های روتی و الیکا تشکیل شده است. تجزیه و تحلیل‌های بافتی، هر دو خاستگاه برج‌ها و نابر‌ها را برای این نهشته نشان می‌دهد. بوهمیت، دیاسپور، آناز، روتیل، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، سوانبرگیت، پیریت و کوارتز در پارازنز کانسنگ شناسایی شد. براساس شواهد بافتی و کانی‌شناسی، این نهشته به پنج واحد مجزا شامل بوکسیت بالایی، کائولینیت بالایی، بوکسیت سخت، کائولینیت پایینی و بوکسیت پایینی قابل تقسیم است. ضریب تجمع عناصر جزئی و شاخص‌های ژئوشیمیایی مانند  $Zr/Ti$ ,  $TiO_2/Al_2O_3$ ,  $Ti/Cr$  و  $Nb/Y$ ، همراه با شواهد زمین‌شناسی، پیشنهاد کننده بازالت‌های سازنده سلطان‌میدان به عنوان منشأ اصلی مواد بوکسیتی است. تلفیق داده‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که این نهشته در طی دو مرحله اصلی تشکیل شده است. ابتدا، مواد بوکسیتی، اکسیدهای  $Fe$  و  $Ti$ ، و کانی‌های رسی بر اثر فرآیندهای بوکسیتی‌شدن در جازا از بازالت‌ها تشکیل شده‌اند. سپس، این مواد به حفرات کارستی انتقال و به صورت یک افق بوکسیتی نهشته شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بوکسیت، بوهمیت، عناصر جزئی، شاخص‌های زمین‌شیمیایی، قشلاق.

### مقدمه

چگونگی توزیع عناصر نامتحرک از قبیل  $Ga$ ,  $Be$ ,  $Y$ ,  $Ni$ ,  $Cr$ ،  $Zr$ ,  $Cr$  [۶ و ۷] که رابطه معنی داری را با سنگ منشأ نشان می‌دهند [۸]، برای تعیین سنگ منشأ بوکسیت‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نهشته بوکسیت قشلاق با مختصات جغرافیایی  $28^{\circ} 55'$  طول شرقی و  $36^{\circ} 56'$  عرض شمالی در فاصله ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌شرقی گرگان واقع شده است (شکل ۱). بررسی‌های انجام شده بر روی این نهشته و مناطق پیرامون آن تنها شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خوش‌بیلاق [۹] و طرح اکتشاف مقدماتی بوکسیت قشلاق [۱۰] است و اطلاعات جامع و دقیقی درباره آن وجود ندارد. در این مقاله، ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی این نهشته مورد بحث قرار گرفته و با بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و چگونگی رفتار و توزیع عناصر اصلی و جزئی، درباره سنگ منشأ و خاستگاه آن اظهار نظر شده است.

کانسارهای بوکسیتی یکی از مهمترین منابع تأمین کننده آلومینیم هستند که بر مبنای لیتولوژی سنگ بستر به دو دسته اصلی شامل بوکسیت‌های واقع بر روی سنگ‌های کربناتی موسوم به بوکسیت‌های کارستی و بوکسیت‌های واقع بر روی سنگ‌های آلومینوسیلیکاتی موسوم به بوکسیت‌های لاتریتی و رسوبی تقسیم می‌شوند [۱]. بر خلاف بوکسیت‌های لاتریتی که از نظر بافتی و زمین‌شیمیایی در ارتباط مستقیم با سنگ منشأ خود می‌باشند [۲]، بوکسیت‌های کارستی ارتباط آشکاری را با سنگ منشأ خود نشان نمی‌دهند و از این رو بررسی شرایط تشکیل و تعیین خاستگاه آنها از پیچیدگی زیادی برخوردار است. در این ارتباط، بررسی‌های زمین‌شناسی، بافتی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی اطلاعات سودمندی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد [۳]، که در این میان تعبیر و تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی از اهمیتی ویژه برخوردار است. در مطالعات زمین‌شیمیایی، بررسی نسبت‌های  $Al_2O_3/TiO_2$  [۴]،  $Ti/Cr$ ,  $TiO_2/Al_2O_3$  [۱]،  $Zr/Ti$  و  $Nb/Y$  [۵] و نیز

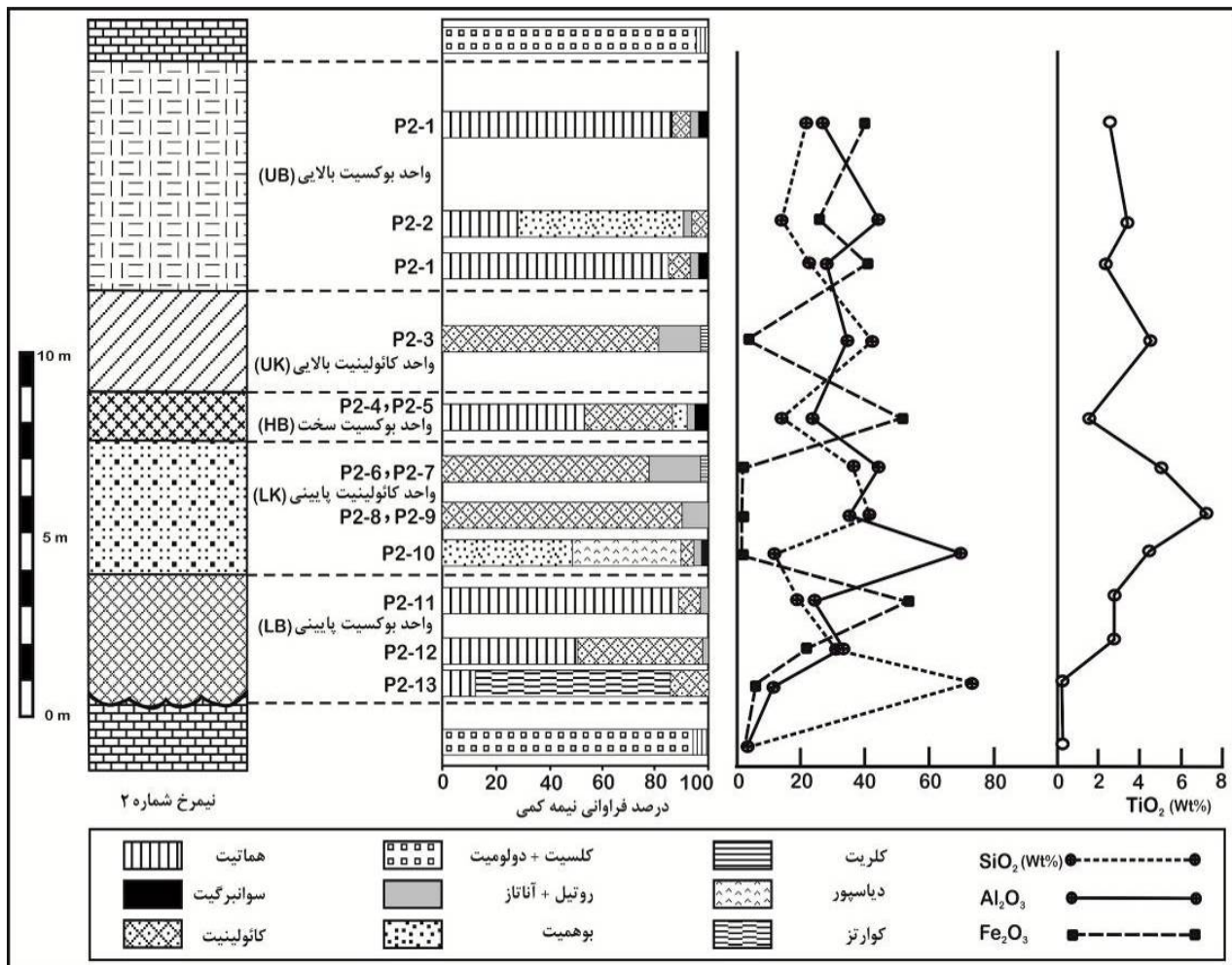


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده نهشته بوکسیت قشلاق. نقشه زمین‌شناسی پایه از [۹]. موقعیت محدوده و نیمرخ‌های مورد مطالعه به ترتیب بر روی نقشه ایران و نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است.

### روش کار

نازک و صیقلی انجام گرفت. کانیهای مجهول در تعداد ۱۴ عدد نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دیفراکتومتر ساخت شرکت فیلیپس مدل PW 1800 شناسایی و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها به روش فلورسانس پرتو ایکس با استفاده از دستگاه XRF ساخت شرکت فیلیپس مدل PW 1480 متعلق به شرکت کانساران بینالود تعیین شد که نتایج آن به ترتیب در شکل (۲) و جدول (۱) آورده شده است. حد تشخیص روش XRF برای اندازه‌گیری اکسیدهای  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{MnO}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  ۰/۰۰۱ درصد، برای سایر اکسیدها ۰/۰۱ درصد و برای عناصر جزئی ppm ۱ بوده است.

برای بررسی ماهیت کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نهشته بوکسیت قشلاق، بررسی در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش صحرایی، با انتخاب سه نیمرخ زمین‌شناسی تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و نحوه ارتباط نهشته با سنگهای بستر و پوشش مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، تعداد ۳۸ عدد نمونه از بخشهای مختلف افق بوکسیتی برای مطالعات بافتی و کانی‌شناسی و تعداد ۱۵ عدد نمونه به روش لبری برای تجزیه شیمیایی جمع‌آوری شد. بررسیهای آزمایشگاهی شامل مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی است. مطالعات بافتی و کانی‌شناسی به روشهای مرسوم میکروسکوپی بر روی مقاطع



شکل ۲. منطقه بندی افق بوکسیتی و تغییرات فراوانی نیمه کمی کانیها و عناصر اصلی ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) در نیمرخ شماره ۲.

### زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه بخشی از زون ساختاری- رسوبی البرز شرقی است. این زون، از نظر زمین‌ساختی بسیار پرتکاپو بوده و با تظاهر فعالیت‌های ماگمایی، چین‌ها و گسل‌های متعدد با ساز و کار امتدادی و تراستی مشخص می‌شود [۱۱]. بر اساس نقشه زمین‌شناسی خوش‌یلاق [۹]، قدیمی‌ترین واحد سنگ‌چینه‌ای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه بازالت‌های بالشی سازند سلطان میدان با سن سیلورین است که توسط سازند پادها با سن دونین زیرین متشکل از کنگلومرا، ماسه سنگ و سیلت سنگ پوشیده شده است. بر روی این سازند طبقات نازک تا متوسط لایه سنگ‌آهکی با میان لایه‌های مارنی، دولومیتی، ماسه سنگی، شیلی و عدسیه‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیتی- بازالتی متعلق به سازند خوش‌یلاق با سن دونین قرار دارد که توسط سنگ‌های کربناته سازند مبارک با سن کربونیفر پوشیده شده است.

نهشته‌های پرمین که به صورت موازی و همشیب بر روی سازند مبارک قرار دارد از گسترش زیادی در منطقه برخوردار است و به دو سازند ماسه‌سنگی، شیلی و سنگ‌آهکی دورود در پایین و سنگ‌آهک‌های روته در بالا قابل تقسیم است. نهشته بوکسیتی مورد مطالعه به صورت لایه‌ای و با مرز تند و نامنظم بر روی سنگ‌های کربناته سازند روته و با مرز تند و منظم در زیر کربنات‌های سازند الیکا با سن تریاس قرار دارد (شکل ۱). بخش پایینی سازند الیکا با سن تریاس زیرین شامل تناوبی از شیل، سنگ آهک نازک تا متوسط لایه و کنگلومرای درون سازندی و بخش بالایی آن شامل تناوبی از شیل، سنگ آهک دولومیتی و دولومیت است [۱۲]. این نهشته‌ها با ناپیوستگی همشیب توسط رسوبات قاره‌ای گروه شمشک با سن ژوراسیک پوشیده شده‌اند [۱۱].

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی در نمونه‌های مورد مطالعه در نهشته بوکسیت قشلاق.

شماره نمونه	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P2-6	P2-7	P2-8	P2-9	P2-10	P2-11	P2-12	P2-13
واحدهای بوکسیتی	UB	UB	UK	HB	HB	LK	LK	LK	LK	LK	LB	LB	LB
(wt%)													
SiO <sub>2</sub>	۱۵/۵۰	۲۲/۴۸	۴۲/۳۵	۹/۰۹	۱۹/۴۸	۳۶/۹۵	۴۲/۳۱	۴۰/۹۷	۴۱/۴۸	۱۰/۲۸	۱۹/۴۰	۳۱/۸۳	۷۴/۱۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴۲/۳۵	۲۴/۸۵	۳۷/۹۳	۱۶/۴۰	۳۰/۰۲	۴۲/۵۵	۲۸/۲۷	۳۶/۱۲	۳۷/۲۲	۶۹/۰۱	۲۰/۳۴	۳۲/۷۳	۱۰/۹۶
TFeo	۲۵/۲۱	۴۰/۱۲	۱/۵۷	۶۳/۲۴	۳۳/۴۹	-/۰۱	-/۸۷	۱/۲۴	۱/۸۲	-/۷۵	۴۸/۳۹	۲۱/۰۶	۹/۳۸
CaO	-/۰۸	-/۱۸	-/۲۰	-/۱۸	-/۲۴	-/۳۲	-/۱۳	-/۲۶	-/۱۲	-/۰۲	-/۱۷	-/۱۴	-/۰۹
Na <sub>2</sub> O	-/۰۱	-/۰۱	-/۰۳	۱/۰۱	-/۰۱	-/۱۱	-/۰۱	-/۰۷	-/۰۳	-/۰۱	-/۰۱	-/۰۳	-/۰۴
MgO	-/۵۱	-/۱۹	-/۲۹	-/۶۵	۱/۱۵	-/۶۶	-/۱۳	-/۱۵	-/۵۱	-/۲۳	-/۱۶	-/۰۲	-/۰۴
K <sub>2</sub> O	-/۲۴	-/۴۸	-/۱۹	-/۱۱	-/۲۰	۱/۴۰	-/۰۳	-/۰۸	-/۶۱	-/۰۳	-/۲۵	-/۰۱	-/۰۵
TiO <sub>2</sub>	۲/۴۴۸	۲/۶۸۲	۴/۵۸۹	۱/۴۷۲	۱/۶۹۹	۴/۰۷۷	۵/۹۲۷	۶/۹۴۱	۴/۸۷۷	۴/۴۱۶	۲/۷۸۳	۲/۷۲۱	-/۸۲۰
MnO	-/۰۱۲	-/۰۲۶	-/۰۰۵	-/۰۱۷	-/۰۴۵	-/۰۰۷	-/۰۰۵	-/۰۰۲	-/۰۰۸	-/۰۰۴	-/۰۹۹	-/۰۱۷	-/۰۱۵
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-/۰۷۴	-/۱۴۵	-/۱۰۱	-/۹۰۷	-/۷۶۰	-/۰۲۵	-/۰۵۱	-/۲۴۳	-/۰۶۳	-/۱۶۰	-/۰۰۶	-/۰۴۷	-/۰۴۱
SO <sub>3</sub>	-/۰۱۳	-/۰۲۵	-/۱۰۸	-/۳۶۵	-/۲۰۹	-/۱۲۸	-/۱۴۴	-/۳۷۶	-/۰۷۸	-/۰۴۰	-/۰۴۲	-/۱۶۰	-/۱۳۲
L.O.I	۱۱/۰۶	۸/۴۸	۱۲/۲۴	۶/۸۷	۱۱/۷۴	۱۳/۴۱	۱۱/۵۹	۱۳/۰۸	۱۲/۸۱	۱۴/۴۶	۷/۹۷	۱۰/۷۴	۳/۹۹
Total	۹۹/۵۰	۹۹/۶۶	۹۹/۴۹	۹۸/۳۰	۹۹/۰۳	۹۹/۶۴	۹۹/۵۷	۹۹/۵۲	۹۹/۶۱	۹۹/۴	۹۹/۶۱	۹۹/۵	۹۹/۷۳
(ppm)													
Ba	۲۱۰	۱۷۸	۲۵۵	۲۵۳	۱۴۸	۲۹۴	۱۸۲	۲۲۳	۲۷۴	۱۶۸	۲۰۵	۲۷۶	۱۱۶
Sr	۲۵۷	۵۷۹	۷۷۹	۳۲۴۴	۳۴۴۶	۲۸۵	۳۰۵	۵۴۴	۳۵۶	۲۱۷۳	۲۸	۱۹	۸۸
Cu	۲۹	۵۸	۳۵	۸۸	۲۰	۴۵	۲۰	۲۰	۱۶	۱۳	۵۳	۲	۱۷
Zn	۶۸	۲۹	۶۰	۴۰	۶۵	۵۳	۲۴	۴۰	۶۹	۲۸	۳۴	۱۴	۵۶
Pb	۷	۱۰	۲۵	۱	۹	۳۲	۲۴	۱۵	۲۷	۳۲	۴	۱۲	۱۲
Ni	۴۵۵	۱۷۷	۵۴۰	۲۲۶	۲۵۶	۷۷۶	۲۲۵	۲۹۹	۵۷۶	۸۱	۲۵۲	۱۳۲	۶۵
Cr	۸۹۵	۶۸۷	۷۱۹	۴۰۲	۴۹۰	۳۷۷	۵۸۸	۶۴۹	۷۸۹	۵۹۶	۵۰۶	۱۶۴	۱۰۷
V	۶۳۱	۵۴۵	۵۲۷	۴۶۰	۵۷۲	۵۴۳	۷۸۱	۷۹۵	۶۱۰	۵۵۶	۴۹۸	۳۹۱	۱۶۹
Ce	۶۳	۳۷	۲۰۳	۵۳	۹۰	۲۲۴	۹۲	۷۳	۱۸۵	۷۰	۳۴	۲۷۵	۱۶۹
La	۳۲	۱۷	۱۰۱	۲۶	۴۶	۱۱۴	۴۷	۳۴	۱۲۱	۳۴	۱۶	۱۴۳	۷۳
Mo	۴	۷	۱	۱	۴	۶	۲	۸	۳	۲	۱	۳	۵
Nb	۳۲	۱۰	۸۷	۱۶	۱۰	۱۵۷	۲۲۳	۲۲۶	۱۱۹	۱۸۰	۱۴	۹۱	۴۳
Zr	۲۳۵	۱۴۶	۵۵۷	۳۳۹	۴۰۷	۵۳۸	۸۹۱	۹۹۶	۵۴۰	۱۴۶۴	۱۰۵	۴۲۲	۴۷۱
Y	۳۸	۱۹	۴۹	۹	۱۲	۶۱	۸۰	۱۳۱	۶۳	۶۵	۲۷	۲۹	۳۱
Rb	۱۳	۱۷	۱۳	۸	۸	۳۲	۱۰	۱۱	۱۹	۹	۱۶	۱۵	۱۴
Co	۱	۳	۳۱	۱	۱۴	۲	۱	۴۴	۴۰	۳	۱	۵	۱
As	۱	۸۳	۵۵	۶۲	۸۱	۱	۲۱۵	۴۹	۳	۱	۴۴	۶۶	۱۲۶
Th	۶	۵	۹	۶	۳	۹	۴	۳	۸	۲	۷	۲	۴
Ga	۳۳	۱۵	۴۲	۱۶	۸	۴۹	۴۸	۵۸	۴۳	۶۸	۱۴	۲۴	۱۴

**مطالعات کانی‌شناسی، بافتی و زمین‌شیمیایی**

ماده معدنی در نهشته بوکسیت قشلاق شامل یک افق بوکسیتی با ضخامت ۱۵ تا ۲۵ متر و گسترش طولی بالغ بر ۲ کیلومتر است که در راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در بین سنگ‌آهکهای سازند روته و سنگ‌آهکهای دولومیتی سازند الیکا قرار دارد. مرز پایینی این افق با سازند روته تند و نامنظم و مرز بالایی آن با سنگ‌آهکهای دولومیتی الیکا که با یک افق میکروکنگومرایی شروع می‌شود، تند و منظم است. بر اساس بررسیهای صحرایی، بافتی و کانی‌شناسی این افق دارای منطقه‌بندی داخلی است و از بالا به پایین به ۵ واحد شامل بوکسیت بالایی، کائولینیت بالایی، بوکسیت سخت، کائولینیت پائینی و بوکسیت پائینی قابل تفکیک است (شکل ۲).

**واحد بوکسیت بالایی**

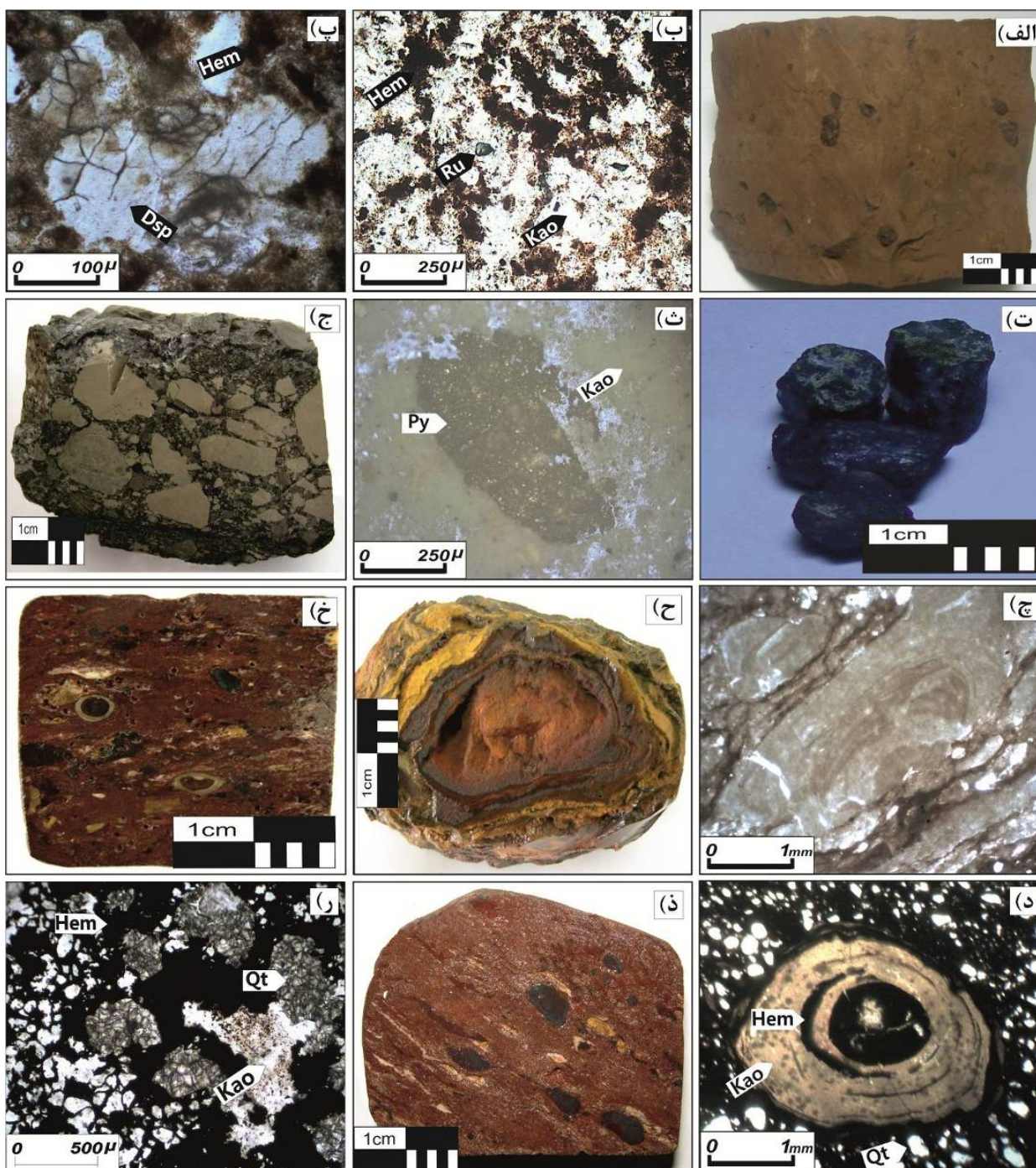
واحد بوکسیت بالایی دارای رخنمون لایه‌ای و ضخامت متوسط ۵ متر است که با رنگ ظاهری قرمز تا قهوه‌ای مشخص می‌شود. بافت‌های پلیتومورفیک، نودولی، ورمیکولار و حاوی فسیل‌های گاستروپود و نبود کنکرسین‌های ائولیتی و پیژولیتی از مشخصات بافتی این واحد است (شکل ۳ الف). کانیهای هماتیت، بوهمیت، کائولینیت، روتیل، آناتاز و سوانبرگیت  $[SrAl_3(PO_4)(SO_4)]$  از مهمترین کانیهای این واحد است. بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی جدول (۱)، مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  در این واحد، به ترتیب از ۲۴/۸۵ تا ۴۳/۳۵ درصد برای  $Al_2O_3$ ، ۱۵/۵۰ تا ۲۲/۴۸ درصد برای  $SiO_2$  و ۲۵/۲۱ تا ۴۰/۱۲ درصد برای  $Fe_2O_3$  تغییر می‌کند. برای تعیین رخساره بوکسیتی و نوع هوازدهی به ترتیب از نمودارهای سه‌تایی آلو [۱۳] و شلمن [۱۴] استفاده شد. براساس نمودار آلو، رخساره‌های لاتریتی و بوکسیتی شکل (۴ الف) و براساس نمودار شلمن، نوع هوازدهی لاتریتی شدن متوسط تا شدید برای این واحد تعیین شد (شکل ۴ ب). بررسی تغییرات نسبت  $La/Y$  در نیمرخ‌های بوکسیتی معیار مناسبی برای تعیین pH محیط تشکیل این نوع نهشته‌هاست، به طوری که مقادیر کمتر و بیشتر از ۱ به ترتیب بیانگر شرایط اسیدی و قلیایی است [۱۵]. مطابق با نسبت  $La/Y$  در واحد بوکسیت بالایی که از ۰/۸۲ تا ۰/۸۹ در تغییر است، شرایط کم و بیش اسیدی برای تشکیل این واحد پیشنهاد می‌شود (شکل ۵).

**واحد کائولینیت بالایی**

واحد کائولینیت بالایی دارای ضخامت ۲ تا ۳ متر و تنوع رنگ خاکستری، زرد، قرمز و قهوه‌ای است. این واحد، به طور عمده دارای بافت پلیتومورفیک بوده و از کانیهای کائولینیت، آناتاز، روتیل و کلریت تشکیل یافته است. بر اساس شواهد میکروسکوپی، کانیهای روتیل و آناتاز به صورت دانه‌های آواری با جورشدگی و گردشدگی ضعیف در زمینه‌ای از کائولینیت قرار گرفته‌اند (شکل ۳ ب). واحد کائولینیت بالایی به علت مقادیر بالای  $SiO_2$  (۴۲/۳۵ درصد) و  $Al_2O_3$  (۳۷/۹۳ درصد) و پایین بودن مقدار  $Fe_2O_3$  (۱/۵۷ درصد) در قلمرو رخساره کائولینیت بوکسیتی (شکل ۴ الف) قرار گرفته و هوازدهی نوع کائولینیتی شدن را نشان می‌دهد (شکل ۴ ب). فراوانی کائولینیت در این واحد نشان دهنده شرایط اسیدی در هنگام تشکیل آن می‌باشد. این در حالی است که بالا بودن نسبت  $La/Y$  در یکی از نمونه‌های این واحد (۲/۰۶ درصد) نشانگر حاکم بودن شرایط قلیایی در بخشی از سرگذشت تشکیل آن است (شکل ۵).

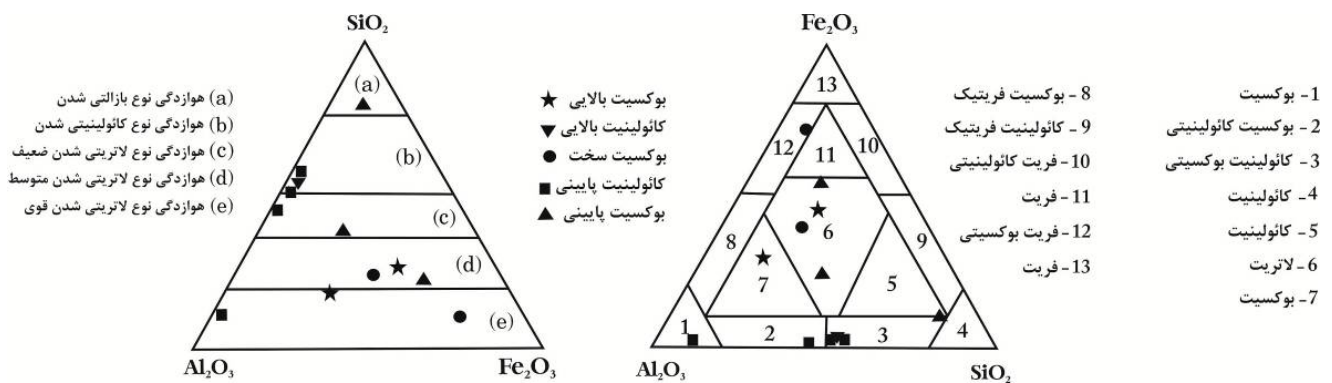
**واحد بوکسیت سخت**

واحد بوکسیت سخت با ضخامت متوسط ۱/۵ متر و تنوع رنگ خاکستری، قرمز و سبز در بخش میانی افق بوکسیتی واقع شده و دارای مرز مشخص با واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی است. این واحد که به طور عمده از کانیهای هماتیت، کائولینیت، بوهمیت، دیاسپور، آناتاز و سوانبرگیت تشکیل یافته دارای حالت توده‌ای بوده و با توجه به چگالی و سختی زیاد از سایر واحدها قابل تفکیک است. بررسیهای بافتی بر روی این واحد نشان دهنده بافت برشی دروغین برای کانیهای دیاسپور و بوهمیت است (شکل ۳ پ). واحد بوکسیت سخت دارای بیشترین مقدار  $Fe_2O_3$  (۳۳/۴۹ تا ۶۳/۲۴ درصد) است. مقدار  $Al_2O_3$  در این افق از ۱۶/۴۰ تا ۳۰/۰۲ درصد و مقدار  $SiO_2$  از ۹/۰۹ تا ۱۹/۸۴ درصد تغییر می‌کند. نمونه‌های مورد مطالعه در این واحد نشان دهنده رخساره‌های لاتریت و فریت (شکل ۴ الف) و هوازدهی نوع لاتریتی شدن متوسط تا شدید (شکل ۴ ب) می‌باشند. دامنه تغییرات  $La/Y$  در این نمونه‌ها (۲/۸۸ تا ۳/۸۸ درصد) بیانگر وجود شرایط قلیایی در زمان تشکیل است (شکل ۵). با این حال، حضور کائولینیت در مجموعه کانی‌شناسی این نمونه‌ها حکایت از تغییرات pH در زمان تشکیل واحد بوکسیت سخت دارد.

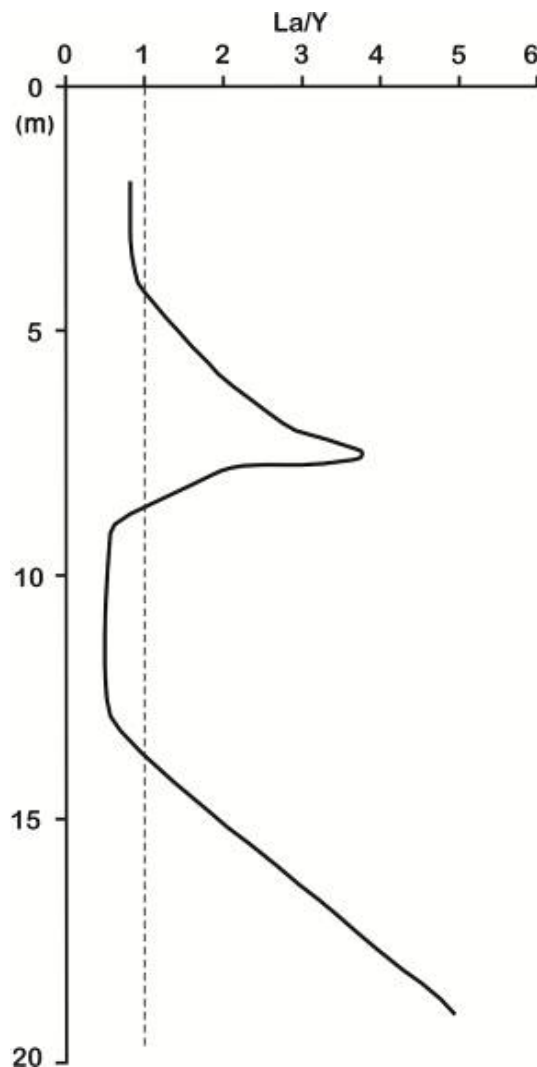


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی و میکروسکوپی از واحدهای مختلف بوکسیتی در منطقه مورد مطالعه، (الف) بافت پلیتومورفیک- نودولی در واحد بوکسیت بالایی، (ب) ذرات آواری روتیل و آناتاز در واحد کائولینیت بالایی، (پ) بافت برشی دروغین محدود به کانیهای دیاسپور در واحد بوکسیت سخت، (ت) گرهکهای استوانه‌ای شکل پیریتی در واحد کائولینیت پایینی، (ث) گرهکهای پیریتی در واحد کائولینیت پایینی، (ج) بافت کاتاکلاستیک، (چ) بافت کلوپورمی- جریانی، (ح) بافت کنکرسونی، (خ) بافت نودولی و پیزوئیدی، (د) بافت پیزوئیدی، (ذ) بافت نودولی- جریانی، (ز) بافت اسفنجی هماتیت و پرشدگی حفرات توسط کوارتز و کائولینیت ثانویه. تصویر ث، در نور انعکاسی عادی و تصاویر (ب، پ، چ، د، ر) در نور عبوری عادی گرفته شده‌اند.

Dsp= دیاسپور، Hem= هماتیت، Kao= کائولینیت، Qtz= کوارتز، Py= پیریت، Ru= روتیل.



شکل ۴. الف) نمودار سه متغیره آلو [۱۳] ( $SiO_2-Fe_2O_3-Al_2O_3$ ) برای تعیین نوع رخساره و ب) نمودار سه متغیره شلمن [۱۴] ( $SiO_2-Fe_2O_3-Al_2O_3$ ) برای تعیین نوع هوازدهی نمونه‌های مورد مطالعه.



شکل ۵. تغییرات نسبت La/Y در نیمرخ شماره ۲.

#### واحد کائولینیت پایینی

واحد کائولینیت پایینی دارای ضخامت ۱ تا ۴ متر است که به طور عمده از کانیهای کائولینیت، بوهمیت، دیاسپور، پیریت،

آناز، روتیل، کلریت و سوانبرگیت تشکیل شده است. وجود گره‌کهای استوانه‌ای شکل پیریتی به طول ۱ تا ۲ سانتی‌متر شکل (۳ ت، ۳ ث)، بافت کاتاکلاستیک شکل (۳ ج) و میان

لاتریتی‌شدن ضعیف تا متوسط شکل (۴ ب) و بالا بودن نسبت La/Y برای این واحد است (شکل ۵).

#### ویژگی‌های زمین‌شیمیایی

تعیین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و چگونگی توزیع عناصر اصلی و جزئی در بررسی‌های اکتشافی و تعیین خاستگاه کانسارهای بوکسیتی دارای اهمیت به‌سزایی است. علی‌رغم مطالعات فراوان انجام شده در این زمینه، ارائه یک الگوی عمومی و روشن از نحوه توزیع عناصر در نیمرخ‌های بوکسیتی با ابهامات زیادی روبرو است [۱۹]. تیتانیوم یکی از مهمترین عناصر غیر متحرک در طی فرآیندهای هوازدهی و دگرسانی است [۲۰] که با بررسی تغییرات آن در افق‌های بوکسیتی می‌توان درباره چگونگی تأثیر فرآیندهای هوازدهی و دگرسانی اظهار نظر کرد. بررسی روند تغییرات  $TiO_2$  در نیمرخ‌های مورد مطالعه که نمونه‌ای از آن در شکل (۲) نشان داده شده است، بیانگر بیشترین مقدار آن در واحدهای کائولینیت بالایی (۴/۰۷ درصد) و پایینی (۶/۹۴ درصد) است که با حضور کانیهای آاناتاز و روتیل مشخص می‌شود. واحد بوکسیت سخت، در مقایسه با سایر واحدها از کمترین مقدار این اکسید (۱/۶۹ درصد) برخوردار است. این اکسید دارای بیشترین همبستگی با  $SiO_2$  ( $r = 0/40$ )،  $Al_2O_3$  ( $r = 0/48$ ) و  $Na_2O$  ( $r = 0/40$ ) است (=) که با تشکیل کائولینیت، بوهمیت، دیاسپور، آاناتاز و روتیل در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی همخوانی دارد. این اکسید دارای کمترین همبستگی با  $Fe_2O_3$  ( $r = -0/82$ )،  $P_2O_5$  ( $r = -0/52$ )،  $MnO$  ( $r = -0/50$ ) و  $MgO$  ( $r = 0/45$ ) است که با تشکیل هماتیت، لیمونیت و سوانبرگیت در واحدهای بوکسیت سخت، بوکسیت بالایی و پایینی مشخص می‌شود. بررسی نمودارهای دوتایی  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  در مقابل  $Al_2O_3$  و وجود همبستگی مثبت معنی دار بین  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  که با حضور فراوان کائولینیت و مقادیر کمتر بوهمیت و دیاسپور مشخص می‌شود، پیشنهاد کننده عدم توسعه فرآیندهای بوکسیتی شدن و نارس بودن نهشته مورد مطالعه است. توزیع عناصر جزئی در نهشته بوکسیت قشلاق دارای منطقه‌بندی قائم است و بر مبنای توزیع عناصر در واحدهای بوکسیتی به ۵ گروه تقسیم می‌شوند (جدول ۲).

لایه‌های نازک زغالی از مهمترین ویژگی‌های کائولینیت پایینی در مقایسه با واحد کائولینیت بالایی است. میان لایه‌های نازک زغالی بیانگر محیط‌های باتلاقی غنی از مواد گیاهی و اسیدهای هیومیک است که شرایط مناسب را برای تشکیل کائولینیت نسبت به بوهمیت فراهم می‌آورند [۱۶]. قسمت‌های زیرین واحد کائولینیت پایینی از بوکسیت‌های سفید رنگ با بافت کلوفرمی-جریانی شکل (۳ چ) تشکیل یافته و حاوی بیش از ۹۰ درصد بوهمیت و دیاسپور است. واحد کائولینیت پایینی دارای بیشترین مقدار  $Al_2O_3$  (۳۶/۱۲ تا ۶۹/۰۱ درصد) و کمترین مقدار  $Fe_2O_3$  (۰/۰۱ تا ۱/۸۲ درصد) است. مقدار  $SiO_2$  در این واحد از ۹/۰۹ تا ۱۹/۸۴ درصد در تغییر است. نسبت  $SiO_2/Al_2O_3$  در این واحد (۱/۰۴) و کائولینیت بالایی (۱/۱۱)، به مقدار آن (۱/۲) در ترکیب نورماتیو کائولینیت خالص [۱۷] نزدیک می‌باشد که می‌تواند بیانگر کافی نبودن شدت هوازدهی شیمیایی در شکستن کانیهای سیلیکاتی باشد [۱۸]. این واحد دارای رخساره‌های بوکسیت، بوکسیت کائولینیتی و کائولینیت بوکسیتی بوده شکل (۴ الف) و در قلمرو هوازدهی نوع کائولینیتی شدن و لاتریتی‌شدن ضعیف تا شدید قرار می‌گیرند (شکل ۴ ب). پایین بودن نسبت La/Y در این واحد (۰/۵۲ تا ۰/۵۸ درصد)، نشان دهنده وجود شرایط اسیدی در شکل‌گیری این واحد است (شکل ۵).

#### واحد بوکسیت پایینی

واحد بوکسیت پایینی دارای ضخامت ۴ تا ۸ متر بوده و به طور عمده از کانیهای هماتیت، کوارتز، کائولینیت، روتیل و آاناتاز تشکیل شده است. این واحد بر مبنای ویژگی‌های بافتی به سه زیر واحد فریت بالایی با بافت کنکرسونی (شکل ۳ ح)، فریت میانی با بافتهای پیژوئیدی شکل (۳ خ، ۳ د)، نودولی-جریانی شکل (۳ ذ) و اسفنجی شکل (۳ ر) و فریت پایینی با میان لایه‌های ماسه‌ای قابل تفکیک است. بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی، مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  به ترتیب از ۲۰/۳۴ تا ۳۲/۷۳ درصد برای  $Al_2O_3$ ، ۱۹/۴۰ تا ۳۱/۸۳ درصد برای  $SiO_2$  و ۲۱/۰۶ تا ۴۸/۳۹ درصد برای  $Fe_2O_3$  در تغییر است. این نتایج نشان دهنده رخساره لاتریت شکل (۴ الف)، هوازدهی نوع



جدول ۲. کانیهای تشکیل دهنده واحدهای بوکسیتی و همبستگی مثبت عناصر جزئی با این واحدها در نیمرخ شماره ۲.

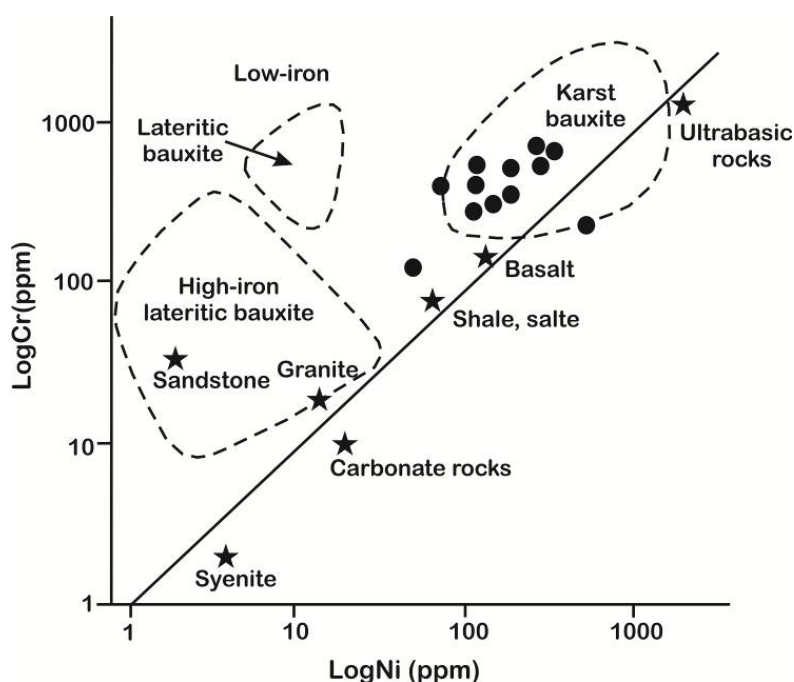
واحد های بوکسیتی	کانی ها	Sr	La	Nb	Ce	Ga	Zr	Th	Y	Pb	Cu	Co	Ni
بوکسیت بالایی (UB)	هماتیت، کائولینیت، بوهمیت دیاسپور، آناز، روتیل										+		
کائولینیت بالایی (UK)	کائولینیت، کلریت، آناز روتیل		+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
بوکسیت سخت (HB)	هماتیت، کائولینیت، بوهمیت دیاسپور، آناز، سوانبرگیت	+									+		
کائولینیت پایینی (LK)	کائولینیت، کلریت، آناز روتیل، بوهمیت، دیاسپور سوانبرگیت	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
بوکسیت پایینی (LB)	هماتیت، کائولینیت، آناز روتیل، کوارتز		+		+						+		

آن با یافته‌های صحرایی، کانی‌شناسی و بافتی تلفیق شد. بر اساس نمودار دو متغیره Cr در برابر Ni نهشته بوکسیتی مورد مطالعه از نوع کارستی بوده و دارای سنگ منشأ بازالتی است (شکل ۶). پیاده‌سازی داده‌های زمین‌شیمیایی بر روی نمودار سه گوش Ga، Zr و Cr [۶] نیز محدوده سنگ منشأ بازی تا فوق بازی را برای این نهشته نشان می‌دهد (شکل ۷). از طرفی، بررسی روند تغییرات  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  در نیمرخ‌های مورد مطالعه شکل (۲)، نشانگر تفریق خوب این اکسیدها در طی فرآیندهای دگرسانی و هوازگی است که بر مبنای شلمن [۲۲] مؤید سنگ منشأ مافیک برای بوکسیت‌های مورد مطالعه است. این نتایج با نسبت  $Al_2O_3/TiO_2$  در نمونه‌های مورد مطالعه که از ۵/۲۰ تا ۱۷/۷۶ در تغییر است و پیشنهاد کننده سنگ منشأ مافیک [۴] است، همخوانی دارد. برای کنترل این نتایج، از ضریب انباشتگی عناصر Zr, V, Cr, Ni, Cu, Pb،  $R = 1/n \sum_{i=1}^n Ki/Kl$  که با استفاده از فرمول محاسبه می‌گردد [۲۳]، استفاده شد. در این فرمول R ضریب انباشتگی، i عنصر جزئی، n تعداد عناصر جزئی، Ki غلظت عنصر جزئی در نمونه و Kl غلظت عنصر جزئی در لیتوسفر است.

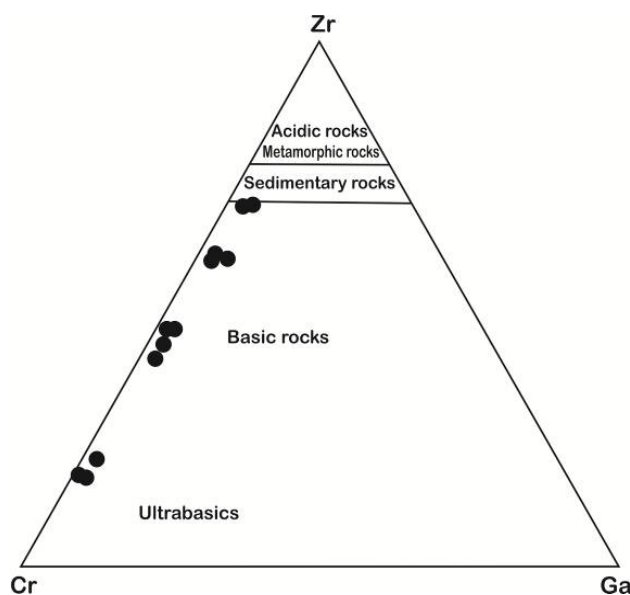
گروه اول شامل عناصر Ga, Zr, Th, Nb, Y, Co, Ni و Pb بوده و در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی بیشترین تمرکز را دارند. گروه دوم تنها شامل مس است که در واحدهای بوکسیت بالایی، بوکسیت پایینی و بوکسیت سخت بیشترین تمرکز را دارد. گروه سوم در بردارنده عناصری مانند Ce و La است که در واحدهای کائولینیتی و به ویژه در واحد بوکسیت پایینی تمرکز بالایی داشته و با نتایج مطالعات کانی‌شناسی و حضور هماتیت در این واحد همخوانی دارد. عناصر گروه چهارم (Sr و P) در واحد بوکسیت سخت و کائولینیت پایینی تمرکز بالایی دارند. سرانجام، عناصر گروه پنجم شامل عناصر Ba, V, Rb, Cr, Mo و As است که وابستگی خاصی را به واحدهای بوکسیتی نشان نمی‌دهند و توزیع نامنظمی در کلیه واحدهای بوکسیتی دارند.

#### خاستگاه

تعیین سنگ منشأ و خاستگاه کانسارهای بوکسیتی، یکی از موضوعات اساسی در بررسی این کانسارهاست که در بوکسیت کارستی به دلیل نابرجا بودن مواد بوکسیتی و عدم رخنمون سنگ منشأ در پیرامون کانسار [۲۱]، از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. برای انجام این مطالعات در منطقه مورد مطالعه، از نمودارهای مختلف زمین‌شیمیایی استفاده و نتایج



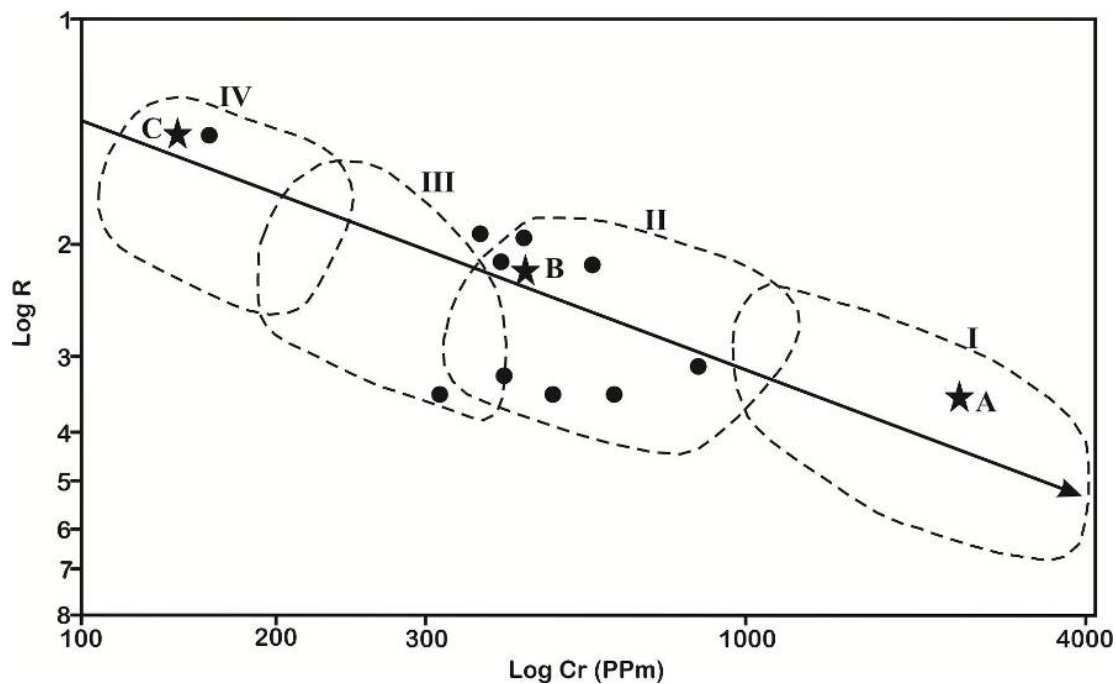
شکل ۶. نمودار تغییرات غلظت Ni در برابر Cr برای انواع نهشته‌های بوکسیتی نسبت به سنگ منشأهای متفاوت، اقتباس از [۴۱]. نمونه‌های مورد مطالعه (دایره توپر)، به‌طور عمده در محدوده بوکسیت‌های کارستی با سنگ منشأ بازالتی قرار گرفته‌اند.



شکل ۷. موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه (دایره توپر) بر روی نمودار سه متغیره Zr- Cr- Ga [۲۲].

است که با سایر نتایج زمین‌شیمیایی همخوانی دارد. تلفیق این نتایج با یافته‌های زمین‌شناسی که مؤید رخنمون بازالت‌های سازند سلطان‌میدان در بخش جنوب‌غربی بوکسیت‌های قشلاق است، پیشنهاد کننده نقش این بازالت‌ها به عنوان سنگ منشأ بوکسیت‌های منطقه مورد مطالعه است.

از آن جا که مقدار محاسبه شده R را نمی‌توان به تنهایی در تعیین خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ منشأ بوکسیت‌های کارستی مورد استفاده قرار داد، بنابراین کلیه مقادیر محاسبه شده نسبت به غلظت Cr به عنوان یک عنصر کم و بیش پایدار [۶] عادی سازی شد (شکل ۸). نتایج حاصل از این روش نشان دهنده سنگ منشأ مافیک برای نهشته بوکسیت قشلاق



شکل ۸. تغییرات ضریب انباشتگی (R) عناصر کمیاب در نهشته بوکسیت قشلاق (دایره توپر). قلمروهای I، II، III و IV به ترتیب محدوده‌های سنگ مادر فوق بازیک، بازیک، حدواسط و اسیدی را نشان می‌دهد. A، B و C (ستاره‌های توپر) به ترتیب مربوط به لائیت‌های حاصل از آمفیبولیت، بازالت و گرانیت است [۲۳].

#### محیط تشکیل

یافته‌های زمین‌شناسی و شواهد بافتی بیانگر دو منشأ، برج‌ازا و نابرجازا برای نهشته بوکسیتی قشلاق است. تظاهر لایه‌ای شکل این نهشته و مرزهای مشخص و واضح آن با سنگ بستر کربناتی سازند روته و سنگ‌آهک‌های دولومیتی سازند الیکا علی‌رغم درجه ضعیف کارستی شدن [۱]، مؤید تعلق آن به گروه بوکسیت‌های کارستی و نابرجا بودن مواد و انتقال آنها به محیط رسوب‌گذاری [۲۴] است. تغییر در وضعیت رسوب‌گذاری باعث بروز تغییرات کانی‌شناسی و بافتی [۲۵] و تظاهر منطقه‌بندی داخلی در این نهشته شده است. بافت‌های نودولی، پیزولیتی، پلیتومورفیک، برشی دروغین، کلوفرمی-جریانی و کنکرسیونی از شواهد برج‌ازا بودن نهشته است [۲۶] که در نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شد. از طرفی، وجود بافت‌هایی مانند بافت آرنایتی ناشی از حضور کوارتزهای زاویه‌دار و تورمالین [۲۷]، پیزوئیدهای پهن و کشیده [۲۸] و پیزوئیدهای با اندازه و شکل متفاوت، از شواهد آواری و نابرجا بودن این نهشته است. بر اساس شواهد میکروسکوپی، حضور بافت‌های برشی دروغین، کلوفرمی-جریانی، کاتاکلاستیک، نودول‌ها و پیزوئیدهای بادامی شکل در برخی از نمونه‌های مورد مطالعه نشان دهنده تأثیر فشارهای زمین

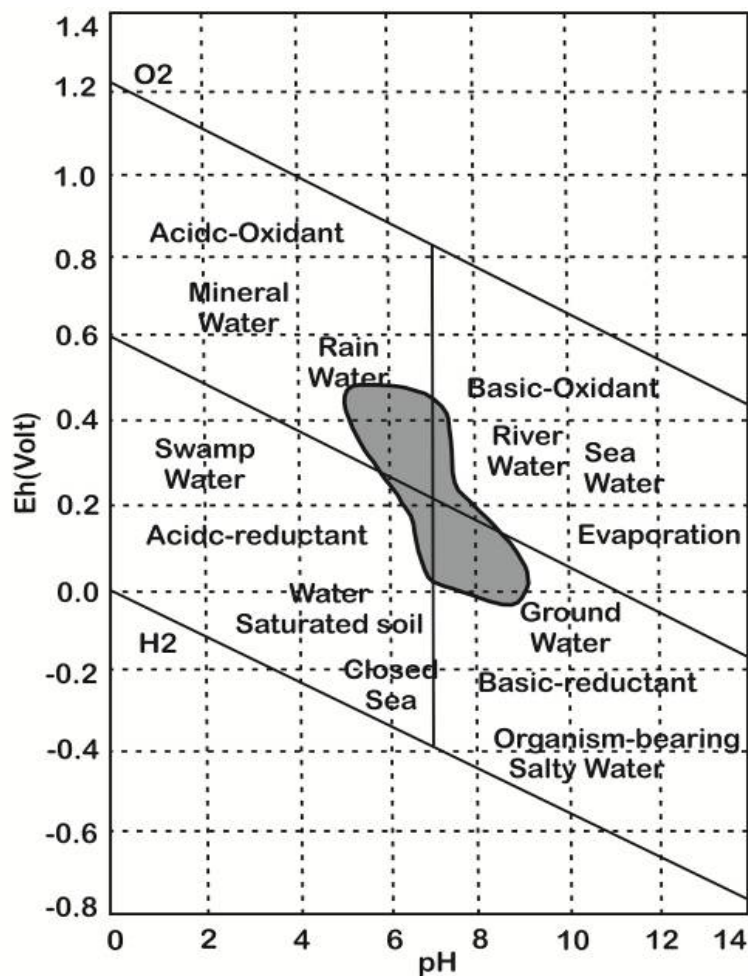
ساختی [۲۹] در منطقه مورد مطالعه است. حضور مقادیر قابل ملاحظه مواد آلی به صورت گرهک‌های پیریتی و زغال سنگ [۲۶] در واحد کائولینیت پایینی، بافت ورمیکولار ناشی از فون‌های ساحلی و گاستروپودهای دریایی [۲۷] در واحد بوکسیت بالایی، نواربندی هماتیت، گوتیت و کائولینیت [۳۰] در پیزولیت‌ها و کنکرسیون‌ها و فراوانی بافت‌های گرهکی [۲۷] و عدم گسترش شدید بافت پیزولیتی از نظر کمی، بیانگر انتقال مواد بوکسیتی به صورت ژل‌های غنی از آهن، سیلیکا و آلومینیوم توسط آب‌های جاری به یک محیط مردابی-ساحلی و نهشت این مواد در طی نوسانات سطح ایستابی است. بوهمیت و دیاسپور مهمترین کانیهای آلومینیم‌دار در نهشته بوکسیت قشلاق است. بوهمیت در نهشته‌های بوکسیتی هم به صورت اولیه و هم در نتیجه فشردگی و آب زدایی گیبسیت گزارش شده است [۳۱ و ۳۲]. از طرفی، دیاسپور در این گونه نهشته‌ها به صورت دگرگونی و غیر دگرگونی تشکیل می‌شود [۳۳]. بر اساس [۳۴]، دیاسپورهای غیر دگرگونی در شرایط pH ۷ تا ۹ و Eh نزدیک و یا کمتر از صفر تشکیل می‌شوند. با توجه به یافته‌های کانی‌شناسی و نبود گیبسیت در نهشته بوکسیت قشلاق، به نظر می‌رسد که فرآیند بوکسیتی شدن در این نهشته با تشکیل بوهمیت آغاز شده است. نبود شواهد

پایین عناصر قلیایی یک فاز کانیاپی پایدار در گستره دماهای سطحی است [۶] که بر اثر تغییر رده بلورشناسی ناشی از فرآیندهای دیاژنتیک و یا رویدادهای دگرگونی به روتیل تبدیل می‌شود [۲۶]. حضور فراوان روتیل به ویژه روتیل‌های آواری در نهشته بوکسیت قشلاق و نبود شواهد دگرگونی در این نهشته بیانگر منشأ بازماندی این کانی است. این نتایج با محتوی بالای روتیل در بازالت‌های سازند سلطان میدان که به عنوان سنگ منشأ بوکسیت‌های قشلاق در نظر گرفته شده، همخوانی دارد. سوانبرگیت میزبانی مناسب برای استرانسیوم، فسفر و گوگرد است که در مراحل ابتدایی هوازگی در شرایط فقیر از آلومینیوم تشکیل می‌شود [۳۹]. با پیشرفت هوازگی و افزایش مقدار آلومینیوم و کاهش مقادیر فسفات و سولفات، دیاسپور به جای آن تشکیل می‌شود. بر اساس یافته‌های بافتی و کانی‌شناسی سه رخساره کانیاپی اکسیدان، نیمه اکسیدان و احیایی در نهشته بوکسیت قشلاق قابل شناسایی است. رخساره اکسیدان که با حضور هماتیت، کائولینیت، بوهمیت و دیاسپور مشخص می‌شود، در واحد بوکسیت سخت شناسایی شد. رخساره نیمه اکسیدان به واحدهای بوکسیت بالایی و پایینی تعلق دارد و شامل کانیه‌های هماتیت، بوهمیت، کائولینیت و کوارتز است. سرانجام، رخساره احیایی مربوط به واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی است و شامل کائولینیت، بوهمیت، دیاسپور، پیریت و کلریت است. فراوانی این کانیه‌ها در افق بوکسیتی قشلاق و قلمرو پایداری آنها بر روی نمودار Eh-pH پیشنهاد کننده تشکیل این افق در محدوده فعالیت آبهای سطحی اسیدی و اکسیدی تا آبهای زیر زمینی بازی و احیایی است (شکل ۹).

#### شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل

پراکندگی شدید اکسیدهای اصلی در واحدهای بوکسیتی منطقه مورد مطالعه نشان دهنده تغییرات رخساره‌ای در این نهشته است. بررسی داده‌های زمین‌شیمیایی و مقایسه دامنه تغییرات اکسیدهای اصلی نشان می‌دهد که مقادیر متوسط اکسیدهای  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  از رخساره اکسیدان به سمت رخساره احیایی افزایش یافته و از مقدار  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  کاسته می‌شود (جدول ۳).

دگرگونی و حضور دیاسپور در بخش زیرین کائولینیت پایینی نیز بیانگر تشکیل دیاسپور در نتیجه شسته شدن سیلیکا از کائولینیت در طی فرآیندهای دیاژنتیکی و در شرایط احیایی است [۳۵]. کائولینیت مهمترین و فراوانترین کانی رسی در نهشته مورد مطالعه است که به صورت بازماندی، سین‌ژنتیک، دیاژنتیک و اپی‌ژنتیک قابل مشاهده است. کائولینیت‌های بازماندی از هوازگی و دگرسانی سنگهای آلومینوسیلیکاتی در شرایط به شدت اسیدی تشکیل شده‌اند که باعث شست و شوی اکسید آهن و ته نشینی کائولینیت از محلول اسید سیلیسیک می‌شود [۳۶]. این نوع کائولینیت، به صورت قطعات خرد شده در زمینه‌ای از هماتیت و کائولینیت ریز دانه قابل مشاهده است. کائولینیت‌های همزاد دارای رخنمون لایه‌ای بوده که در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی و گاه به صورت زمینه سنگ، در سایر واحدها قابل مشاهده است. کائولینیت‌های دیاژنتیک در نتیجه جاننشینی دیاژنتیکی کانیه‌های آلومینیوم‌دار توسط سیلیکا و یا آب‌زدایی کانیه‌های آلومینیوم‌دار تشکیل شده‌اند [۳]. در مرحله اپی‌ژنتیک، کائولینیت‌های حاصل از انحلال کائولینیت‌های اولیه به صورت تجمعات ریزبلور فضاهای خالی سنگ در واحد بوکسیت سخت و بوکسیت پایینی را پر کرده‌اند. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مهمترین گروه کانیاپی در واحدهای بوکسیت بالایی و پایینی است که در سه مرحله هوازگی، دیاژنتیک و اپی ژنتیک تشکیل شده‌اند. تشکیل این کانیه‌ها نیازمند محیط قلیایی با pH بالاتر از ۷ و Eh بیشتر از ۰/۲ است [۳۳]. به طور کلی، فراوانی این گروه از کانیه‌ها تابع شرایط Eh و pH محیط در طی فرآیندهای هوازگی است [۳]. آهن مورد نیاز برای تشکیل این کانیه‌ها احتمالاً از اکسیداسیون پیریت و یا هوازگی کانیه‌های آهن‌دار در سنگ مادر تأمین شده است. پیریت کانی معمول در نهشته‌های بوکسیت کارستی است [۳۰]. تشکیل پیریت در این نهشته‌ها ناشی از حضور مواد آلی، اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن ثانویه به ویژه گوتیت و نفوذ آبهای سطحی و آب دریا در این نهشته‌هاست [۳۷]. بر اساس [۳۸]، به نظر می‌رسد گوگرد مورد نیاز برای تشکیل این کانی از تجزیه ناقص مواد آلی یا احیای باکتریایی سولفات‌های آب دریا تأمین شده‌است. آاناتاز و روتیل از کانیه‌های مهم در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی است. آاناتاز معمولاً در شرایط اسیدی و احیایی در حضور غلظت‌های



شکل ۹. نمودار Eh-pH محیطهای طبیعی. موقعیت افق بوکسیتی قشلاق (محدوده خاکستری) با توجه به قلمرو پایداری کانیاها اقتباس از [۳۳] بر روی شکل نشان داده شده است.

سوانبرگیت در واحدهای بوکسیت سخت و کائولینیت پایینی شده است. از طرفی، توزیع یکسان Ti, La, Ce, Th در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی و نبود کانیهای گروه باستانزیت و پاراسیت در این واحدها نشان دهنده جانشینی این عناصر در شبکه بلوری کانیهای آناز و روتیل [۴۲]، یا جذب سطحی به وسیله کائولینیت است [۴۳]. بررسی تغییرات عناصر La و Ce در واحد بوکسیت پایینی نیز نشانگر روند افزایشی این عناصر از بالا به طرف سنگ بستر کربناتی است. این عناصر، در شرایط اسیدی شسته شده و با افزایش pH به وسیله سنگ بستر کربناتی تمرکز می‌یابند. با افزایش pH، عنصر La توسط هماتیت و کانیهای رسی جذب سطحی می‌شود [۴۴] و عنصر Ce از حالت سه ظرفیتی به چهار ظرفیتی تغییر یافته و تمرکز می‌یابد [۴۵].

بررسی میزان هوازدگی که با استفاده از فرمول  $(rw = SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3)$  [۴۰] تعیین گردید بیانگر فرآیندهای هوازدگی مشابه در تشکیل سه واحد بوکسیت بالایی (۲۸۶ درصد)، بوکسیت سخت (۲۱۳ درصد) و بوکسیت پایینی (۴۳۷ درصد) و دو واحد کائولینیت بالایی (۱۰۷ درصد) و کائولینیت پایینی (۸۵۱ درصد) است. فراوانی و چگونگی توزیع عناصر جزئی در نهشته‌های بوکسیتی به عوامل گوناگونی از قبیل مجموعه کانی‌شناسی، ضریب شرکت پذیری عناصر و ویژگیهای زمین‌شیمیایی عناصر بستگی دارد [۴۱]. در منطقه مورد مطالعه، این عناصر گاه باعث تشکیل کانیهای خاص و گاه با ورود به شبکه بلوری کانیهای اصلی، جانشین سایر عناصر شده‌اند. برای مثال، حضور فسفر باعث تجمع استرانسیم و تشکیل کانی

جدول ۳. میانگین و دامنه تغییرات اکسیدهای اصلی در رخساره‌های مختلف نهشته بوکسیت قشلاق.

اکسید	رخساره	اکسیدان	نیمه اکسیدان	احیا
		(HB)	(LB) و (UB)	(UK) و (LK)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	دامنه تغییرات	۱۶/۴۰ – ۳۰/۰۲	۱۰/۹۶ – ۴۳/۳۵	۳۶/۱۲ – ۶۹/۰۱
	میانگین	۲۳/۲۱	۲۷/۱۵	۵۲/۵۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	دامنه تغییرات	۳۳/۴۹ – ۶۳/۲۴	۹/۳۸ – ۴۸/۳۹	۰/۷۵ – ۱/۸۲
	میانگین	۴۸/۳۶	۲۸/۸۸	۱/۲۸
SiO <sub>2</sub>	دامنه تغییرات	۹/۰۹ – ۱۹/۴۸	۱۵/۵۰ – ۳۱/۸۳	۱۰/۲۸ – ۴۲/۳۵
	میانگین	۱۴/۲۸	۲۳/۶۶	۲۶/۳۱
TiO <sub>2</sub>	دامنه تغییرات	۱/۴۷۲ – ۱/۶۹۹	۰/۸۲۰ – ۳/۴۴۸	۴/۰۷۷ – ۶/۹۴۱
	میانگین	۱/۵۸	۲/۱۳	۵/۵۰

می‌شوند. بر اساس نتایج کانی‌شناسی، بوکسیت‌های قشلاق در بردارنده شواهدی از هر دو گروه وادوز و فراتیک است.

#### نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی، نهشته بوکسیت قشلاق از نوع کارستی بوده که با توجه به حضور کانیهای هماتیت، گوتیت، کائولینیت، بوهمیت و دیاسپور، غالب بودن بافتهای پلیتومورفیک، نودولی، پیزولیتی و آرنایتی و حضور مواد آلی به صورت لایه‌های نازک زغالی و گرهکهای پیریت می‌توان آن را به عنوان کانسار بوکسیت کارستی نوع مدیترانه‌ای در نظر گرفت. بر اساس یافته‌های زمین‌شیمیایی، بوکسیت‌های منطقه مورد مطالعه دارای سنگ منشأ بازالتی است. با توجه به رخنمون گسترده بازالت‌های سلطان میدان در منطقه مورد مطالعه می‌توان این سنگها را به عنوان سنگ منشأ نهشته بوکسیتی قشلاق در نظر گرفت. تلفیق داده‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که این نهشته در طی دو مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول، مواد بوکسیتی، اکسیدهای Fe و Ti و کانیهای رسی بر اثر فرآیندهای بوکسیتی‌شدن درجا از بازالت‌های سازند سلطان میدان تشکیل شده‌اند. در مرحله دوم، این مواد به صورت زل‌های غنی از آهن، سیلیکا و

شباهت الگوی توزیع عناصر Zr, Nb, Y, Co, Ni, Pb, Ga و کانیهای کائولینیت، آناز و روتیل در واحدهای کائولینیت بالایی و پایینی پیشنهاد کننده جذب سطحی این عناصر توسط ژل آلومینوسیلیکاتی در کائولینیت [۴۶] و یا کنترل توزیع آنها توسط آناز و روتیل است [۴۷]. از آن جا که زیرکونیم در محیط تشکیل لاتریت‌ها پایدار نیست [۴۸]، وجود زیرکن در واحدهای بوکسیتی را می‌توان به منشأ آواری آن [۲۲] نسبت داد. غلظت Cu در بخشهای غنی از هماتیت از مقدار بالایی برخوردار است و می‌تواند جذب سطحی اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن شود [۴۹]. عناصر Cr, Ni, V, Co که از نظر تمایلات زمین‌شیمیایی به عناصر مافیک دوست موسوم می‌باشند، در نهشته بوکسیت قشلاق از مقادیر بالایی برخوردارند که نشان دهنده سنگ منشأ آتشفشانی تحت اشباع [۳۶] برای این نهشته است. محققانی مانند والتون [۲۶] و باردوسی [۲۷] نهشته‌های بوکسیتی را بر اساس محیط زمین‌شیمیایی به دو گروه وادوز (واقع در بالای سطح ایستابی) و فراتیک (واقع در زیر سطح ایستابی) تقسیم‌بندی نموده‌اند. بوکسیت‌های وادوز با فراوانی هماتیت و گوتیت و بوکسیت‌های فراتیک با فراوانی ضعیف این کانیها و حضور سیدریت، پیریت، کائولینیت، کلریت و شاموزیت مشخص

[۱۱] آقائباتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافی معدنی کشور (۱۳۸۳) ۵۸۶ ص.

[۱۲] لاسمی ی.، داود ج.، نادر ک.، "بررسی سازند الیکا در غرب البرز شرقی، ناحیه غزنوی"، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تبریز (۱۳۷۹) ص ۱۹۸-۲۰۲.

[13] Aleva G. J. J., "Laterites: concept, geology, morphology and chemistry", International Soil Reference and Information Center (ISRIC). Wageningen, The Netherlands. (1994) 169.

[14] Schellmann W., "A new definition of laterite. In: Banerji, P.K. (Ed.), Laterization processes", Geological Survey of India. Memoir 120 (1986) 11-17.

[15] Maksimovic Z., Panto Gy., "Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Geoderma 51 (1991) 93-109.

[16] Ogglano G., Marneli P., "The bauxite of North-Western Sardinia", Rendiconti Seminario Facolta Scienze Universita Cagliari Supplemento Vlo 71 Fasc 2 (2001) 60-73.

[17] Aleva G. J. J., "The Corlat Handbook Draft Version 1.1", (1991) 69.

[18] Valetton I., Stutze B., Goldbery R., "Geochemical and mineralogical investigation of the lower Jurassic flint-clay bearing Mishhor and Ardon formation. Makhtesh Ramon, Israel", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Printed in the Netherlands, Sedimentary Geology 35 (1983) 105-152.

[19] Wang Q., et al., "Orebody vertical structure and implications for ore-forming processes in the Xinxu bauxite deposit, Western Guangxi, China", Ore Geology Reviews 39 (2011) 230-244.

[20] Loughnan F. C., "Chemical weathering of silicate mineral", Elsevier, New-York (1969) 145p.

[21] Petrascheck W. E., "The genesis of allochthonous karst-type bauxite deposits of southern Europe", Mineralum deposita journal 24 (1989) 77-81.

[22] Schellmann W., "Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation", Catena 21 (1994) 131-143.

[23] Shaw D. M., "Interpretation geochimique des elements en traces dans les roches cristallines", Masson et cie, paris (1964).

[24] Herrmann L., Anongrak N., Zarei M., Schuler U., Spohrer K., "Factor and processes of

آلومینیوم توسط آبهای جاری به حفرات کارستی انتقال و نهشت یافته‌اند.

#### منابع

[1] Marneli P., Mongelli G., "Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on condition of formation and parental affinity", International Journal of Earth Sciences 96 (2007) 887-902.

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

[3] 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.

[4] Hayashi K., Fujisawa H., Holland H. D., Ohmoto H., "Geochemistry of sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada", Geochimica et Cosmochimica Acta 61 (1997) 4115-1437.

[5] Winchester J. A., Floyd P. A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", Chemical Geology 20 (1977) 325-343.

[6] Özlo N., "Trace-element content Karst Bauxites and their parent rock in the Mediterranean belt", Mineralum deposita 18 (1983) 469-476.

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

[8] Boulange B., Carvalho A., Melfi A., "Geochemical characteristics of African and Brazilian Bauxite deposits: SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system and Ti, Cr, V and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> relations", Geochemistry of the early surface and of mineral formation 2nd international symposium, July, Aix en Provence, France (1990) 30-32.

[۹] جعفریان م. ب.، جلالی ع.، "نقشه زمین‌شناسی خوش‌بیلاق با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۳).

[۱۰] شرکت تهیه و تولید مواد نسوز کشور، گزارش طرح بهره برداری معدن بوکسیت قشلاق، منتشر نشده (۱۳۷۶) ۳۰ ص.

- variation during geological time", Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam-Printed in the Netherlands, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 28 (1979) 205-239.
- [37] Kalaitzidis S., et al., "Late Cretaceous coal overlying karst bauxite deposits in the Parnassus-Ghiona Unit, Central Greece: coal characteristics and depositional environment", International Journal of Coal Geology 81 (2010) 211-226.
- [38] German-Heins J., "Iron-rich encrustation on the footwall of the Gant bauxite (Vertes Hills, Hungary) – evidence for preservation of organic matter under exceptional conditions", Sedimentary Geology 94 (1994) 73-83.
- [39] 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.
- [40] Schorin H., Puchelt H., "Geochemistry of a ferruginous bauxite profile from Southeast Venezuela", Chemical Geology 46 (1987) 127-142.
- [41] Mordberg L. E., "Geochemistry of trace element in Paleozoic bauxite profiles in northern Russia", Geochemical Exploration journal 57 (1996) 187-199.
- [42] Gamaletsos P., Godelitsas A., Mertzimekis T. J., "Thorium partitioning in Greek industrial bauxite investigated by Synchrotron-radiation and laser-ablation techniques", Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section B, 14 (2011) 3067-3073.
- [43] Liu X., et al., "Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, Western Guangxi, China", Journal of Geochemical Exploration 105 (2010) 137-152.
- [44] Calagari A. A., Abedini A., "Geochemical investigation on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran", Geochemical Exploration journal 94 (2007) 1-18.
- [45] Mongelli G., "Ce-anomalies in textural components of Uppet Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate Platform (Southern Italy)", Chemical Geology 140 (1998) 69-79.
- [46] 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) 412-433.
- gibbsite formation in Northern Thailand", Catena 71 (2007) 279-291.
- [۲۵] کلاگری ع. ا.، عابدینی ع.، مؤذن م.، "سنگهای دیاباز منشأ عمدۀ واحد بوکسیتی پرمو-تریاس در قی، غرب میاندوآب، آذربایجان غربی، ایران"، نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، جلد ۴ شماره ۲ (۱۳۸۳) ص ۳۸۷-۴۰۰.
- [26] Bardossy G., "Karst Bauxites–Bauxite deposits on carbonate rocks", Developments in Economic Geology, Elsevier, Amsterdam 14 (1982) 441.
- [27] Valetton I., "Bauxite", Elsevier (1972) 226.
- [28] Marcello F., et al., "Li, B-rich Rhaetian metabauxite, Tuscany, Italy: reworking of older bauxites and igneous rocks", Chemical Geology 144 (1998) 221-242.
- [۲۹] عابدینی ع.، کلاگری ع. ا.، حاج علیلو ب.، "ویژگیهای زمین‌شناسی-کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر کمیاب در نهشته بوکسیت آغاچری، جنوب شاهین‌دژ، شمال غرب ایران"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۷) ص ۳۴۱-۳۵۶.
- [30] 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.
- [31] Theo Kloprogge J., et al., "XPS study of the major minerals in bauxite: Gibbsite, bayerite and (pseudo-)boehmite" Journal of Colloid and Interface Science 296 (2006) 572-576.
- [32] Bogatyrev B. A., Zhukov V. V., Tsekhovskiy Yu. G., "Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits", Lithology and Mineral Resources 44 (2009) 135-151.
- [33] Temur S., Kansun G., "Geology and petrography of the Mastadagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey", Journal of Asian Earth Sciences 27 (2006) 512-522.
- [34] Dangic A., "Kaolinization of bauxite: a study in the Vlasenic bauxite area, Yugoslavia", Clays and Clay Mineral 36 (1988) 439-447.
- [35] Nia R., "Geologische, geochemische untersuchungen zum problem der bohemit-diaspora genese in griechischen Oberkeide-bauxite der Parnass- Kiado- zone", Ph.D Thesis. University of Hamburg (1968) 133.
- [36] Nicolas J., Bildgen P., "Relation between the location of the karst bauxite in the northern hemisphere, the global tectonics and the climatic



- [48] Carroll D., "Weatherability of Zircon", Journal Sediment Petrol 23 (1953) 106-116.
- [49] Krauskopf K. B., "Sedimentary deposits of rare metals", Economic Geology 50 (1955) 411-463.
- [47] Calagari A. A., Kangarani F., Abedini A., "Geochemistry of Major, Trace, and Rare Earth Element in Biglar Permo-Triassic Bauxite Deposit, Northwest of Abgarm, Ghazvin Province, Iran ", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran 21 (2010) 225-236.