فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی
سال ۷ (۱۳۹۰)، شماره۳: ۲۷۹-۲۶۹
www.appliedgeology.ir

کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه افق بوکسیتی پرمو-تریاس خوش‌ییلاق، جنوب شرق آزادشهر

مریم کیااشکوریان، غلامحسین شمعانیان* و بهنام شفیعی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، shamanian@yahoo.com

*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۰/۳/ ۳۰؛ دریافت اصلاح شده: ۹۰/۶/ ۵؛ پذیرش: ۹۰/۸/ ۸؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۱۱/۲۰

چکیده

افق بوکسیتی پرمو-تریاس خوش‌ییلاق در۵۰ کیلومتری جنوب شرقی آزادشهر قرار دارد و بخشی از زون البرز شرقی محسوب می‌شود. این افق با وسعتی در حدود ۳ کیلومتر و ضخامت متوسط ۳۰ متر، در بین سنگ آهک‌های پرمین و سنگ آهک‌های دولومیتی تریاس قرار دارد. مرز زیرین این افق به طور عمده موج‌سان و مرز بالایی آن با سنگ‌آهک‌های دولومیتی فرادیواره هم‌ساز می‌باشد. تجزیه و تحلیل‌های بافتی، خاستگاه برجازا و نابرجازا را برای افق بوکسیت نشان داد. براساس بررسی‌های کانی‌شناسی، کانی‌های اصلی این افق کائولینیت، گوتیت، هماتیت، کوارتز و آناتاز و کانی‌های فرعی آن بوهمیت، دیاسپور، روتیل، کلسیت و سوانبرژیت می‌باشند. تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی، نشان داد که افق بوکسیتی خوش‌ییلاق از دگرسانی و هوازدگی سنگ‌های بازالتی حاصل شده است. فراوانی زیاد کانی‌های سیلیکاتی بیانگر نارس بودن و زهکشی ضعیف این نهشته است.

واژه‌های کلیدی: افق بوکسیت، کائولینیت، برجازا، نابرجازا، خوش‌ییلاق.

۱- مقدمه

بوکسیت به سنگ‌های رسوبی برونزاد و غنی از آلومینیوم که از کانی های ریز بلور گیبسیت، دیاسپور و بوهمیت حاصل شده گفته می‌شود (Bardossy 1982). کانسارهای بوکسیت به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آلومینیوم، گالیم و عناصر نادر خاکی در جهان شناخته شده اند (Laskou et al. 2005) و بر مبنای نحوه تشکیل و رخداد به سه نوع لاتریتی، رسوبی و کارستی قابل تقسیم‌اند (Bogatyrev et al. 2009). در این میان، کانسارهای بوکسیت کارستی، به دلیل پیچیدگی در فرآیندهای تشکیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. این کانسارها از نظر زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و پیدایش، توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Temur & Kansun 2006, Calagari & Abedini 2007, Merino & Banerjee 2008, Muzaffer Karadag et al. 2009, Liu et al. 2010, Retallack 2010).

یکی از پیچیدگی‌های مطرح در کانسارهای بوکسیت کارستی، تشخیص برجا یا نابرجا بودن افق‌های بوکسیتی بر پایه روابط صحرایی و بافتی مورد مطالعه است. بر این مبنا، بوکسیت های کارستی به چهار گروه برجا، نابرجا، شبه برجا و شبه نابرجا تقسیم شده‌اند (Combes et al. 1993). تعیین سنگ منشاء کانسارهای بوکسیت کارستی از دیگر پیچیدگی‌های این دسته از کانسارها است. سنگ‌های کربناته غنی از کانی‌های رسی (Maclean et al. 1997)، خاکسترهای آتشفشانی (lyew-Ayee 1986)، بادرفت‌ها (Merino & Banerjee 2008) و سنگ‌های آذرین مافیک (Calagari & Abedini 2007) از مهم‌ترین موارد پیشنهاد شده به عنوان سنگ منشاء این کانسارها

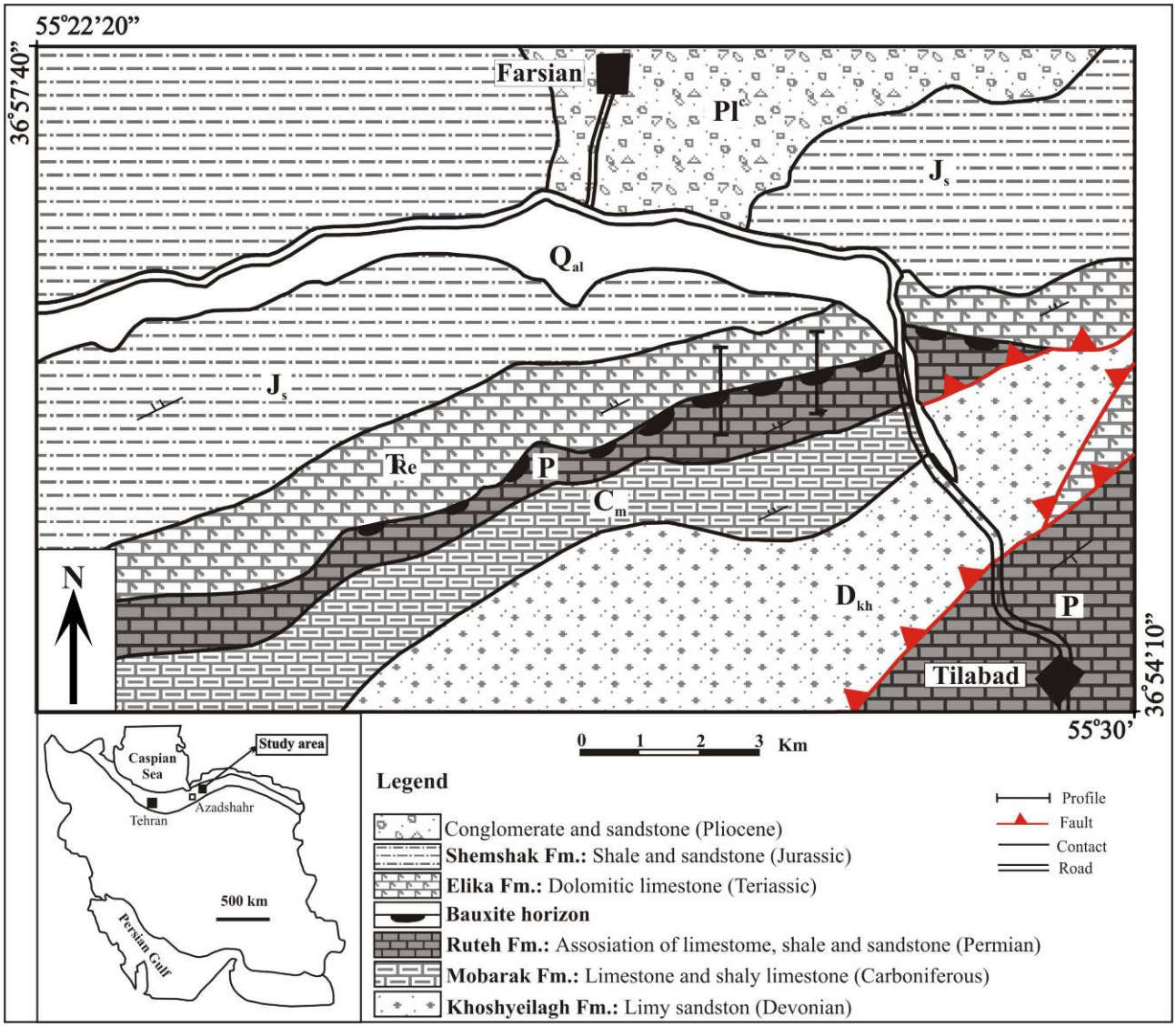
می‌باشند. افق بوکسیتی پرموتریاس منطقه خوش‌ییلاق با موقعیت جغرافیایی ´۵۰ °۳۶ عرض شمالی و ´۲۳ °۵۰ طول شرقی در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان آزادشهرقرار دارد. این منطقه در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است (تصویر ۱). مطالعات قبلی در این منطقه شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (جعفریان و جلالی ۱۳۸۳) می‌باشد و تاکنون مطالعات دقیق و جامعی بر روی افق بوکسیتی انجام نشده است. در این مقاله سعی بر آن است تا ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و ژئو شیمیایی این افق بررسی شده و درباره محیط تشکیل و سنگ منشاء آن اظهارنظر شود.

۲- روش مطالعه

به منظور بررسی ماهیت کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی افق بوکسیتی، مطالعات در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در مطالعات صحرایی، کلیه ویژگی‌های ساختی و بافتی افق بوکسیتی و چگونگی ارتباط آن با طبقات بستر و سنگ پوشش در امتداد دو نیمرخ عمود بر لایه‌بندی (تصویر ۱) بررسی گردید و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف انجام شد.

مطالعات آزمایشگاهی شامل مطالعات بافتی، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی بر روی نمونه‌ها می‌باشد. مطالعات بافتی و کانی‌شناسی بر روی ۱۵ مقطع نازک انجام شد.

برای شناسایی کانی‌های مجهول، ۱۲ نمونه‌ها به روش ایکس آر دی(XRD) توسط شرکت کانساران بینالود مطالعه شد و فراوانی نیمه کمی کانی‌ها به روش جانز و همکاران (Johns et al. 1954) تعیین گردید (جدول ۱).



تصویر ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه با تغییرات (جعفریان و جلالی ۱۳۸۳). موقعیت زون زمین ساختی- رسوبی البرز در بخش شمالی نقشه ایران و موقعیت نیمرخ‌های مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است

جدول ۱- فراوانی نیمه کمی کانی‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه (مقادیر بر حسب درصد وزنی)

شماره نمونه	هماتیت	کائولینیت	گوتیت	آناتاز	روتیل	کوارتز
P_2	–	۰/۵	۹۹	۰/۲۵	–	۰/۲۵
P_3	۳۸	۰/۵	٦۱	۰/۲۵	۰/۲۵	–
P_4	۹۸	–	–	۱/۵	۰/۵	–
P_5	۲٤	۲۰	۵۲	٤	–	–
P_6	۱٤	۸٦	–	–	–	–
P_7	٦۵/۸	۳۰	–	٤	۰/۲	–
P_8	–	۹۸	–	۲	–	–
P_9	۱	۰/۰۰۳	–	–	–	۹۷/۹۹
P_{10}	۸۱/٦٤	۱۷/٤۹	–	۰/۰۱	۰/۰۰۲	–
P_{11}	۵۰	٤۹	–	۱	–	–
P_{12}	٤	۲٦	٦۹	–	۱	–

برای بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی، ۸ نمونه به روش ایکس آر اف (XRF) توسط شرکت کانساران بینالود مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت و غلظت اکسیدهای اصلی و عناصر جزیی Zr، Cu،Cr، Co،V، Ga، Nb، Ni و Pb تعیین گردید (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از افق بوکسیتی به روش ایکس آر اف (XRF)

شماره نمونه	P_1	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
SiO_2 (Wt%)	۳۲/۲۲	۱۹/٦۰	٤۲/۸۲	۲۷/٦٤	۱۸/۲٦	۳۳/۸۷
TiO_2	۱/۵۹	۱/۵۸	۳/۳۱	۲/۱۱	۱/۸۵	۱/۵۹
Al_2O_3	۱٦/٤۵	۱٦/۲۰	۳۸/۵۹	۲۳/۳۸	۱۸/۱۷	۲۷/۳۱
Fe_2O_3	۸/۱۲	٤۹/۰۷	۱/۱٤	۳٤/۵٦	٤۸/۱۳	۲۵/۹۱
MnO	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۰٤	۰/۲۸	۰/۰۲
MgO	۱/۳۹	۱/۰٤	۰/۲۷	۰/٤۱	۱/۳٤	۰/۲۵
CaO	۱۷/۲۵	۰/٦۱	۰/۱۸	۰/٤۳	۰/٤۵	۰/۲٦
Na_2O	۰/۰۵	۰/۰٦	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳
K_2O	۲/۹٦	۰/۰٦	۰/۰۱	۰/۳٤	۰/۰۱	۰/۲۲
P_2O_5	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۰٦	۰/۱٦	۰/۰۷	۰/۰۹
L.O.I	۱۸/٤۹	۱۱/۰۸	۱۳/٦۷	۱۰/٦۳	۱۰/۸۸	۹/۹٦
Zr (ppm)	۱۷٦	٦۲	۱۰۵٦	۱٤۳	۷۵	۲٤۰
Cu	۳۳	٤٤	۳۵	۱۸	۹	۱٦
Cr	۱۸٦	٦۳۲	۳٦۳	۳٦۵	٤۳۲	۲۰٦
Co	۸	٦	۱٤	۹	۱۱	۱۲
V	۱۹۳	٦۳۲	۳٦۳	۳٦۵	٤۳۲	۲۰٦
Ga	۱٦	۱٤۰	۵۰	۱۸	۱۱۲	۱۸
Nb	۱۲	۱۵	۵۲	۳۳	۲۷	۱٤
Ni	۱۳۰	۳٦۳	۱٤٦	۱۳٦	۱۷۷	٤٤
Pb	۱۸	٤	٤۰	۱۲	۷	۱٤

۳- زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی به زون زمین‌ساختی- رسوبی البرز تعلق دارد (تصویر ۱). زون البرز با پهنای ۱۰۰ کیلومتر و طول ۹۰۰ کیلومتر، با راستای شرقی- غربی در شمال ایران قرار گرفته و بر اثر برخورد گندوانا و اورازیا در اواخر تریاس تشکیل شده است (Lasemi 2001). ویژگی‌های رسوبی و چینه‌شناسی در سرتاسر این زون یکنواخت نبوده و از این‌رو به سه زیر زون البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی تقسیم شده است. در زیر زون البرز شرقی که منطقه مورد مطالعه بخشی از آن محسوب می‌شود، مجموعه‌ای از واحدهای سنگ‌چینه‌ای با سن سیلورین تا سنوزوییک رخنمون دارد. قدیمی‌ترین واحدهای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه شامل بازالت‌ها، آندزیت‌ها و توف‌های سازند سلطان میدان با سن سیلورین است که با ناپیوستگی فرسایشی توسط سازندهای پادها و خوش‌ییلاق با سن دونین پوشیده شده است (تصویر ۲-A). بر روی سازند خوش-ییلاق، سنگ آهک‌های سازند مبارک با سن کربونیفر و سازندهای درود و روته با سن پرمین قرار دارند. در بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه، واحدهای سنگ‌چینه‌ای پرمین از یکدیگر قابل تفکیک نبوده و توسط استمپفیل(Stampfli 1978)، سازند قشلاق نامیده شده‌اند که متشکل از سنگ آهک‌های خاکستری با میان لایه‌های ماسه سنگی و شیلی می‌باشد (Gaetani et al. 2009). در ادامه ستون چینه‌شناسی، سنگ آهک‌های سازند روته توسط یک افق بوکسیتی پوشیده شده که در طی نبود چینه‌ای و پسروی دریا در پرمین بالایی تشکیل شده است. سازند الیکا از سنگ آهک‌های نازک لایه حاوی آثار کرمی شکل، سنگ آهک‌های مارنی و میان‌لایه‌های دولومیتی تشکیل شده و به طور هم‌شیب بر روی افق بوکسیتی قرا گرفته و توسط شیل و ماسه سنگ-های سازند شمشک با سن ژوراسیک پوشیده شده است.

۴- مشخصات ماده معدنی

افق بوکسیتی منطقه مورد مطالعه با وسعتی در حدود ۳ کیلومتر و ضخامت متوسط ۳۰ متر، به صورت لایه‌ای در بین سنگ آهک‌های سازند روته و سنگ آهک‌های دولومیتی سازند الیکا قرار دارد. مرز زیرین این افق با سنگ آهک‌های سازند روته موجی و با سازند الیکا منظم و تند است. بر اساس یافته‌های این تحقیق، افق بوکسیتی مورد مطالعه، دارای منطقه‌بندی بوده و از پایین به بالا به سه واحد لاتریت بوکسیتی پایینی (LBL)، رس بوکسیتی (CB) و لاتریت بوکسیتی بالایی (UBL) قابل تقسیم است (تصویر ۲-B).

واحد لاتریت بوکسیتی پایینی با ضخامت ۱۷ تا ۲۰ متر در پایین‌ترین بخش افق بوکسیتی قرار داشته و شامل شیل‌های قرمز رنگی است. این واحد به طور عمده از کانی‌های هماتیت، گوتیت و کائولینیت تشکیل شده است. یکی از مشخصات صحرایی این واحد، وجود میان لایه‌های توده‌ای و سخت به رنگ‌های قرمز و سبز است. بخش‌های قرمز رنگ به طور عمده از کانی‌های هماتیت و گوتیت و بخش‌های سبز رنگ از قطعات نسبتاً گرد شده کائولینیتی در زمینه‌ای با بافت پلیتومورفیک تشکیل شده‌اند.

در قسمت میانی این واحد، پالئوسل‌های قرمز تا قهوه ای رنگ حاوی قطعات خوب جورشده کوارتز در زمینه ریز دانه از اکسیدهای آهن قابل مشاهده است. بالاترین قسمت این واحد حاوی قطعات هماتیتی، گاه مگنتیتی (تصویر ۳-A) و اووئیدهایی (تصویر ۳-B) است که در زمینه ریزدانه از کائولینیت قرار گرفته‌اند. واحد رس بوکسیتی با ضخامت متوسط ۵۰ سانتی‌متر به رنگ سفید تا خاکستری در بخش میانی افق بوکسیتی قرار گرفته است. این واحد دارای بافت پلیتومورفیک (تصویر ۳-C) بوده و به طور عمده از کانی‌های کائولینیت، روتیل و آناتاز تشکیل شده است. در بالاترین بخش این واحد یک لایه ماسه‌سنگی با ضخامت ۱ متر که توسط رگچه‌های متعدد هماتیتی و گوتیتی قطع گردیده، قابل مشاهده است.

واحد لاتریت بوکسیتی بالایی دارای ضخامت متوسط ۱۵ متر است که از شیل‌های قرمز تا زرد رنگ متشکل از کانی‌های کائولینیت، هماتیت و گوتیت تشکیل شده است. بالاترین بخش این واحد دارای بافت میکروکنگلومرایی است و حاوی قطعات گرد شده واحدهای زیرین و سیمانی از کلسیت می‌باشد (تصویر ۳-D).

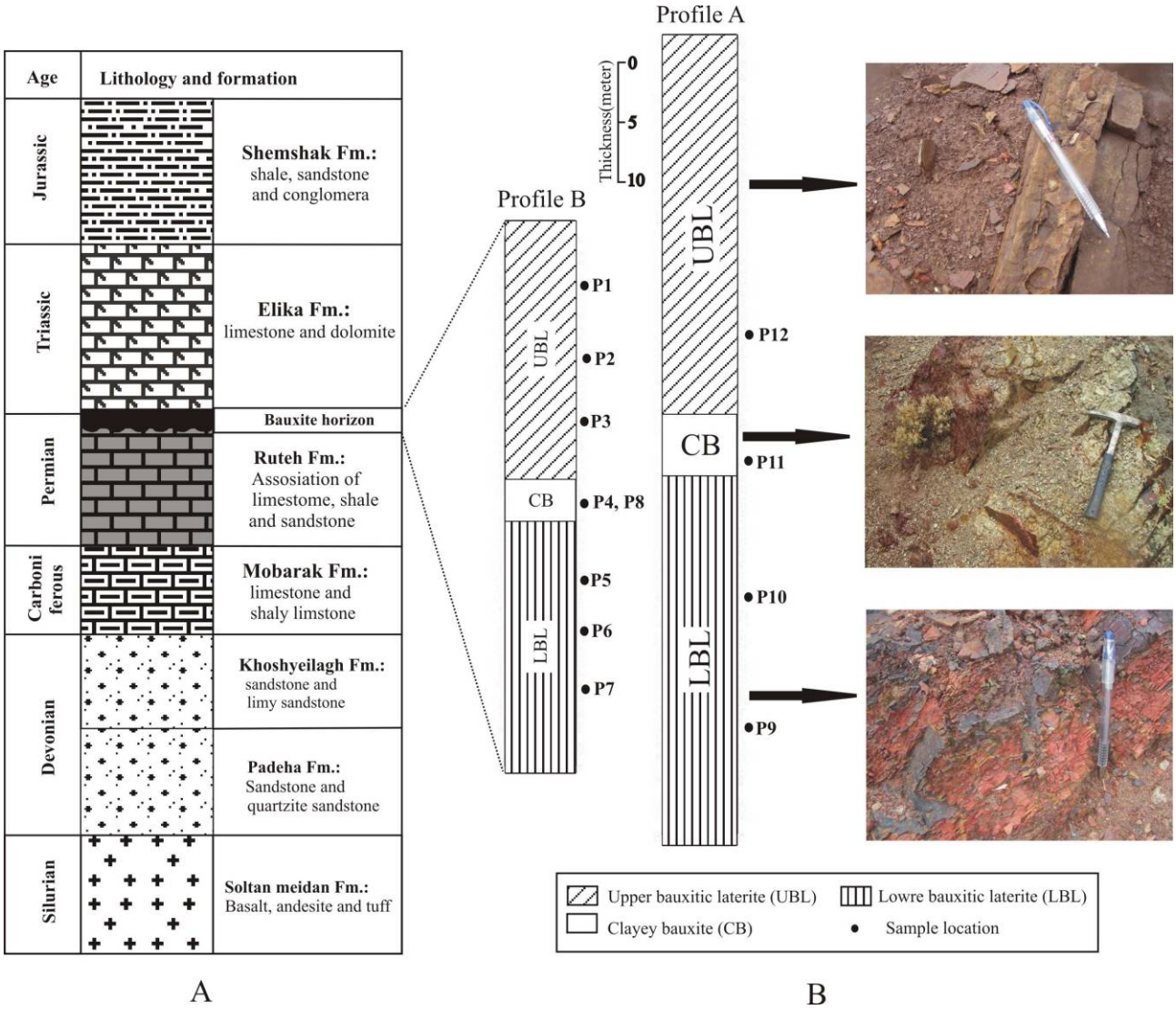
با توجه به مجموعه کانیایی و توالی طبقات لاتریتی قرمز تا قهوه‌ای و طبقات خاکستری تا سبز رنگ، می‌توان شرایط محیطی اکسیدان-اسیدی تا بازی- قلیایی (Garrels & Christ 1965) را برای تشکیل این طبقات پیشنهاد کرد.

۵- مشخصات بافتی و کانی‌شناسی

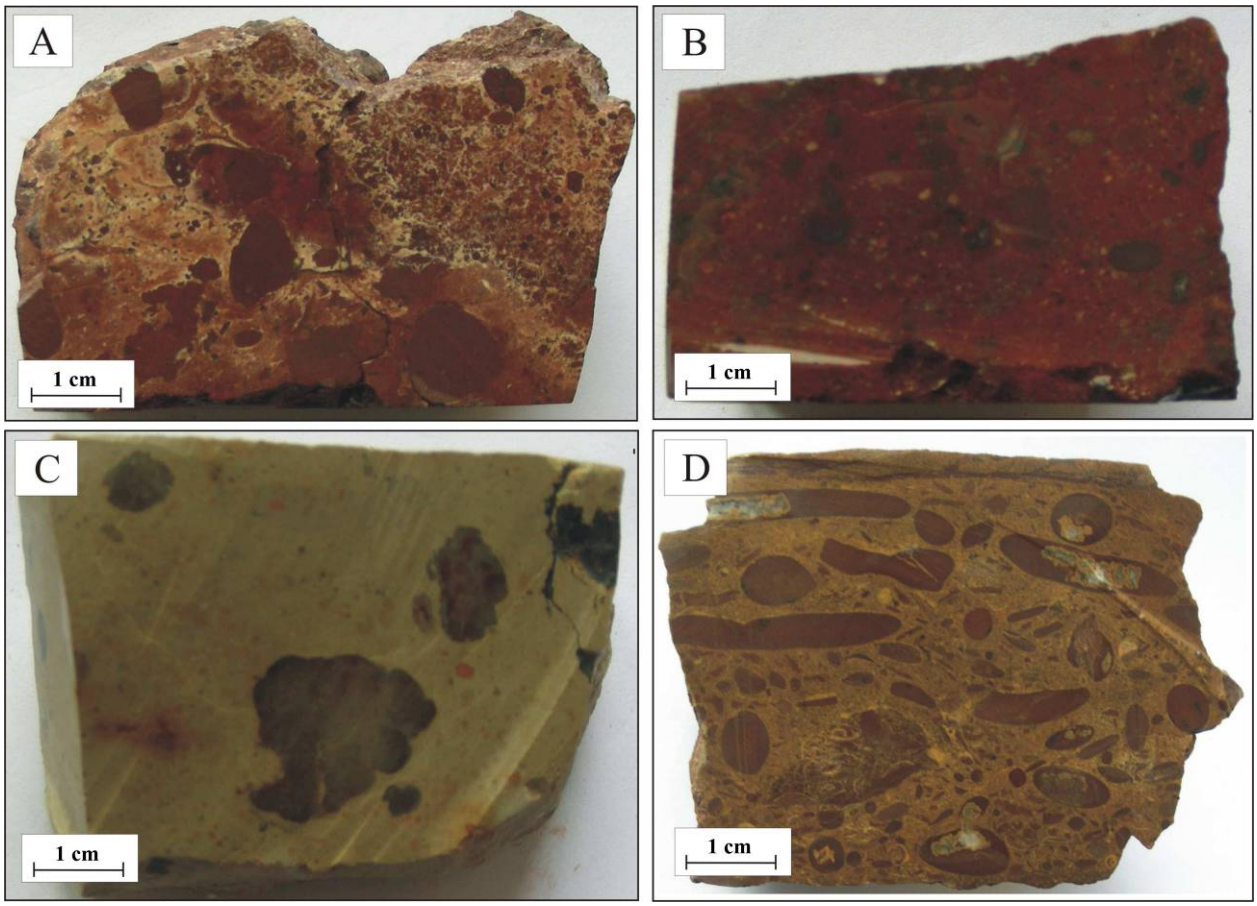
بررسی‌های بافتی، نشان‌دهنده خاستگاه برجازا و نابرجازای افق بوکسیتی مورد مطالعه است. بافت‌های برشی دروغین (تصویر ٤-A)، کلوفورمی (تصویر ٤-B)، پلیتومورفیک (تصویر ٤-C) و اووئیدی (تصویر ۳-B)، از شواهد برجازا بودن و وجود قطعات سنگی و گرد شده با اندازه‌های چند میکرون تا ۲ سانتی‌متر (تصویر ٤-D، E) و بافت اسفنجی (تصویر ٤-F) که دلالت بر شستشوی عناصر محلول و به جای ماندن کانی‌های مقاوم دارد، از شواهد نابرجازا بودن نهشته بوکسیتی است (Bardossy 1982) که در نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شد. بافت برشی دروغین بر اثر نیروهای فشارشی، آبگیری-آبزدایی و تبلور دوباره ژل اولیه آلومینوسیلیکاتی (کلاگری و عابدینی

۱۳۸۳) و بافت کلوفورمی بر اثر جدایش ریتمیک کانی‌های آهن‌دار از ژل اولیه (Bardossy 1982) تشکیل می‌شوند. بافت‌های اووئیدی و پیزوییدی در بوکسیت‌های منطقه از فراوانی کمی برخوردار می‌باشند که می‌توان آن را به همگن بودن کلویید اولیه، نبود هسته‌های مناسب و انرژی پایین محیط تشکیل نسبت داد.

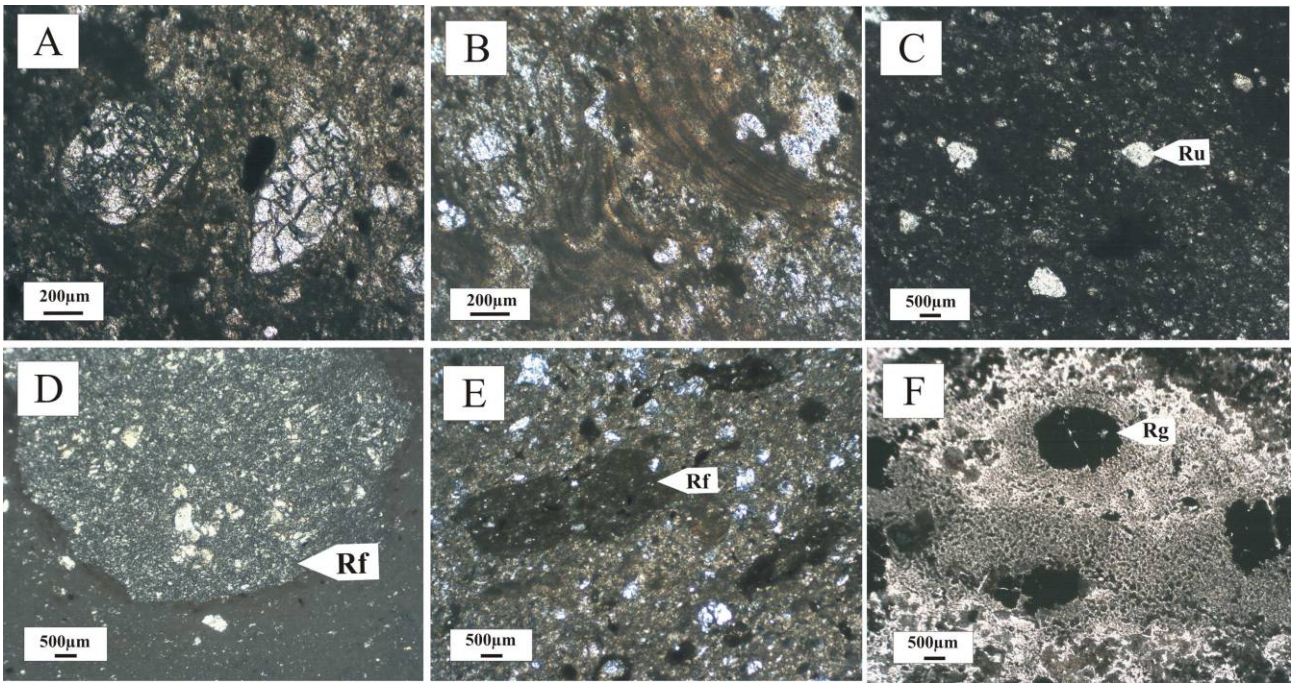
براساس بررسی‌های کانی‌شناسی، کائولینیت، گوتیت، هماتیت، کوارتز و آناتاز کانی‌های اصلی و بوهمیت، دیاسپور، روتیل، کلسیت، سوانبرژیت و ارتوز از کانی‌های فرعی نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشند (جدول ۱). کائولینیت در کانسارهای بوکسیتی دارای سه منشاء بازماندی، همزاد و دیرزاد است و تشکیل آن به pH محیط، غلظت مؤثر آلومینیوم و سیلیکای موجود در محلول، میزان بارش و شرایط زهکشی منطقه بستگی دارد (Dangić 1985). این کانی از یک سو در محیط‌های رسوبی کم‌انرژی و از سوی دیگر محصول هوازدگی بازالت‌ها در شرایط آب و هوایی مناسب است (Galán 2006). یافته‌های صحرایی و بافتی در منطقه مورد مطالعه هر سه منشاء بازماندی، همزاد و دیرزاد رابرای کائولینیت‌های این منطقه نشان داد. کائولینیت‌های بازماندی اغلب به صورت قطعات خرد شده در زمینه‌ای از هماتیت و کائولینیت ریز دانه دیده می‌شوند. وجود ارتوز در نمونه های مورد مطالعه از یکسو پیشنهاد کننده تشکیل کائولینیت‌های بازماندی بر اثر هوازدگی این کانی (Bates 1960) و از سوی دیگر بیانگر زهکشی ضعیف، کند بودن فرآیندهای بوکسیتی‌شدن و تکوین نارس افق بوکسیتی است.



تصویر ۲-A- ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه، اقتباس از (جعفریان و جلالی ۱۳۸۳)، B- ستون چینه‌ای نیمرخ‌های مورد مطالعه



تصویر ۳- تصاویرماکروسکوپی از واحدهای مختلف افق بوکسیتی، A- قطعات هماتیتی در زمینه ریز دانه از کائولینیت در واحد لاتریت بوکسیتی پایینی، B- بافت اووئیدی در واحد لاتریت بوکسیتی پایینی، C- رس بوکسیتی سفید تا خاکستری با بافت پلیتومورفیک، D- میان لایه میکروکنگلومرایی در واحد لاتریت بوکسیتی بالایی



تصویر ٤- تصاویر میکروسکوپی از بافت‌های شناسایی شده در افق بوکسیتی، A- بافت برشی دروغین، B- بافت کلوفورمی، C- بافت پلیتومورفیک، D و E- قطعات میکروکنگلومرا و سنگی، F- بافت اسفنجی و قطعات گرد شده هماتیتی. (Rf= قطعات سنگی، Ru= روتیل، Rg= قطعات گرد شده). تصویر F در نور عبوری عادی و بقیه تصاویر در نور عبوری پلاریزه گرفته شده‌اند

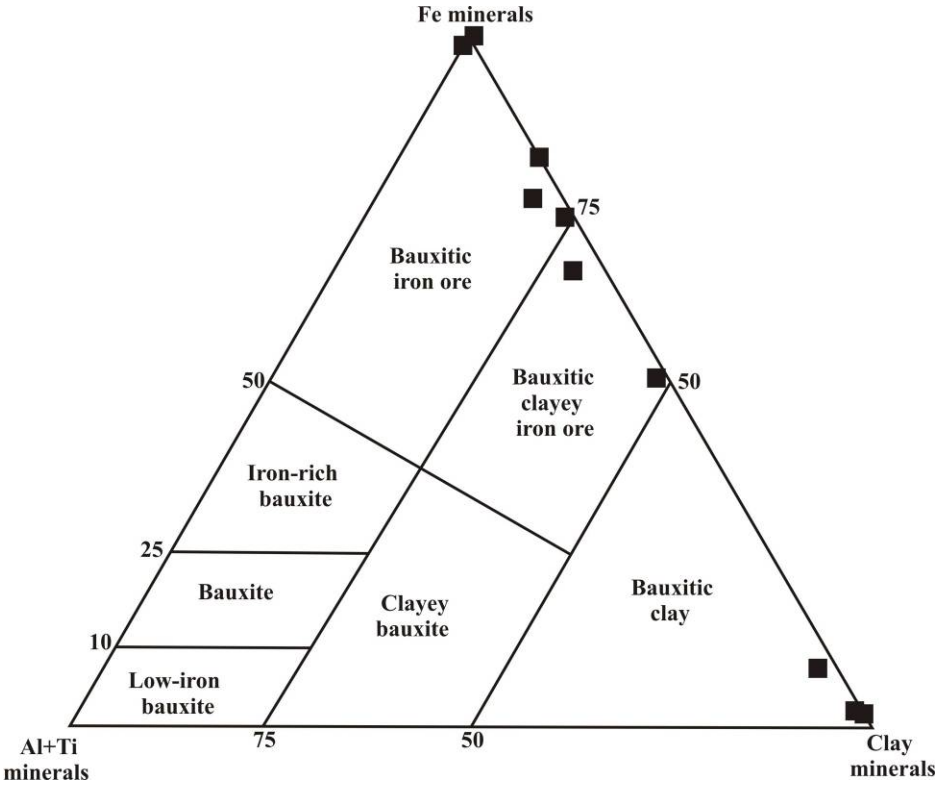
در منطقه مورد مطالعه کائولینیت‌های همزاد به صورت لایه‌ای در واحد رس بوکسیتی و نیز به صورت زمینه در سایر واحدها دیده می‌شود. کائولینیت‌های دیرزاد به صورت پرکننده فضاهای خالی و گاه درون درزه‌ها و ترک‌های بسیار نازک قابل مشاهده است. کانی‌های هماتیت و گوتیت به فراوانی در نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده شدند که بیانگر شرایط pH بالاتر از ۷ و Eh بیش از ۰/۲ می‌باشد (Temur & Kansun 2006). به نظر می‌رسد، آهن مورد نیاز برای تشکیل این کانی‌ها از هوازدگی سنگ منشاء تأمین شده و در شرایط قلیایی حاصل از سنگ بستر کربناتی (Mameli et al. 2007) به جای گذاشته شده است.

آناتاز و روتیل در اغلب نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شدند. از آنجا که آناتاز در غلظت‌های پایین عناصر قلیایی و در دماهای سطحی، فاز پایدار دارد (Bardossy 1982)، به نظر می‌رسد که در طی فرآیندهای بوکسیتی‌شدن تشکیل شده باشد. این کانی بر اثر تغییر رده بلورشناختی ناشی از عملکرد نیروهای زمین‌ساختی، فرآیندهای دیاژنتیک و دگرگونی به روتیل تبدیل می‌شود (Bardossy 1982). اگرچه ممکن است در منطقه مورد مطالعه، بخشی از کانی‌های روتیل ناشی از تغییر رده بلورشناختی آناتاز باشد، اما حضور نسبتاً فراوان این کانی به ویژه به صورت ذرات آواری نشان‌دهنده جدایش آن از سنگ منشاء به عنوان یک کانی مقاوم است.

سوانبرژیت $SrAl_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6$ یکی از کانی‌های شناخته شده در برخی از کانسارهای بوکسیتی است که در منطقه مورد مطالعه به روش ایکس آر دی (XRD) شناسایی شد. این کانی در مراحل ابتدایی هوازدگی در شرایط فقر آلومینیوم، از هوازدگی فلدسپات‌ها و کربنات‌ها تشکیل می‌شود (Gilg 2003). محاسبه فراوانی نیمه کمی کانی‌های آلومینیوم- تیتانیم دار، کانی‌های رسی و کانی‌های آهندار و پیاده کردن نتایج آن بر روی نمودار سه گوش این کانی‌ها (Bardossy 1982)، نشان‌دهنده قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی رخساره‌های رس بوکسیتی، کانسنگ آهن بوکسیتی و کانسنگ آهن رسی بوکسیتی است (تصویر ۵).

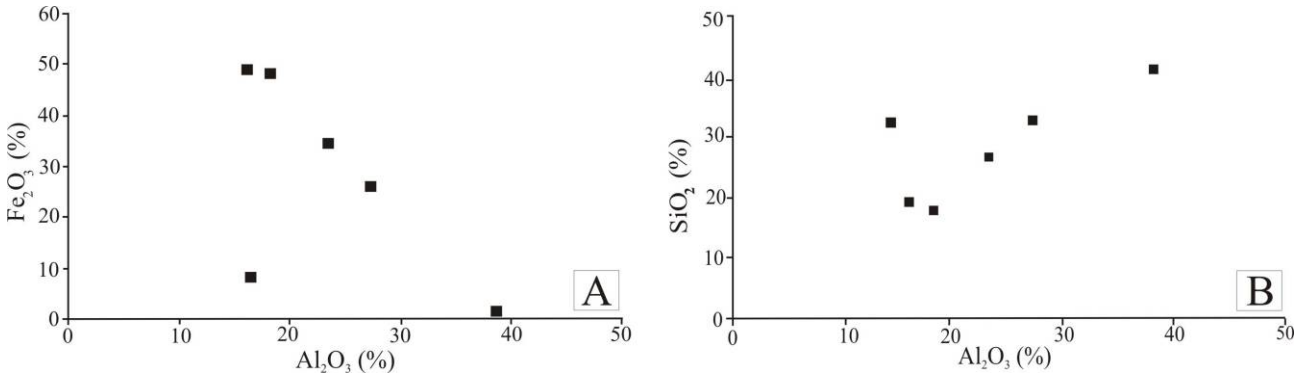
۶- نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی

براساس نتایج تجزیه شیمیایی، در نمونه‌های مورد مطالعه، اکسیدهای Al_2O_3 wt% (۱۶/۲۰-۳۸/۵۹)، Fe_2O_3 wt% (۱/۱٤-٤۹/۰۷)، SiO_2 (۱۸/۲٦-٤۲/۸۲wt%) و TiO_2wt% (۱/۵۸-۳/۳۱) دارای بیشترین مقدار می‌باشند (جدول ۲). غلظت بسیارپایین عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در نمونه‌های مورد مطالعه، بیانگر شستشوی این عناصر در طی فرآیندهای بوکسیتی شدن است. برای بررسی چگونگی تغییرات اکسیدهای Al_2O_3، Fe_2O_3 و SiO_2، نمودارهای دوتایی این اکسیدها مورد بررسی قرار گرفت.



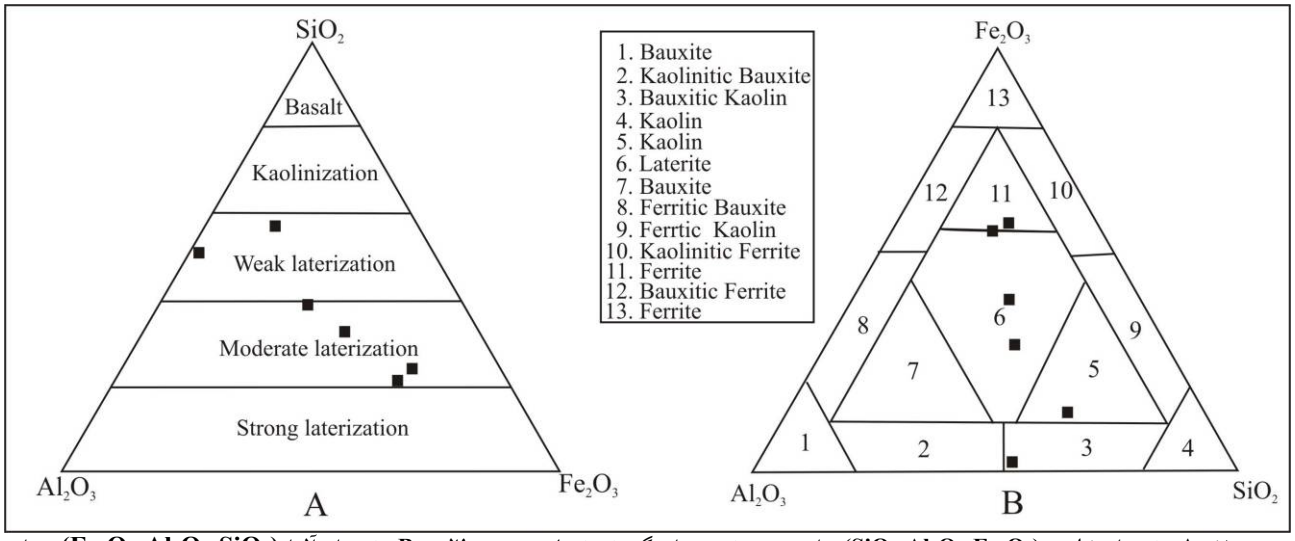
تصویر ۵- موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار سه گوش کانی‌های آلومینیوم- تیتانیم‌دار، کانی‌های رسی و کانی‌های آهن‌دار. نمودار پایه از (Bardossy 1982)

براساس این نمودارها، تغییرات Fe_2O_3در مقابل Al_2O_3 همبستگی منفی معنی‌داری را نشان داد (تصویر ٦-A) که بیانگر جدایش این دو عنصر در طی فرآیندهای بوکسیتی شدن و رویدادهای پس از آن است. بررسی تغییرات SiO_2 در مقابل Al_2O_3 بر خلاف سایر کانسارهای بوکسیتی، نشان‌دهنده‌ی همبستگی مثبت میان آن‌ها است (تصویر ٦-B). این رابطه پیشنهاددهنده عدم جدایش این دو عنصر در طی فرآیندهای بوکسیتی‌شدن و تشکیل فازهای آلومینوسیلیکاتی است که با حضور فراوان کائولینیت همخوانی دارد.



تصویر ٦- بررسی همبستگی Al_2O_3 با Fe_2O_3 (A) و SiO_2 (B)

برای تعیین نوع هوازدگی و تعیین رخساره‌های بوکسیتی در منطقه مورد مطالعه، به ترتیب از نمودارهای سه‌گوش شلمن (Schellmann 1986) و آلوا (Aleva 1994) استفاده شد. براساس نمودار شلمن، نوع هوازدگی لاتریتی‌شدن ضعیف تا متوسط (تصویر ٧-A) و براساس نمودار آلوا، رخساره‌های کائولینیت، کائولینیت بوکسیتی، لاتریت و فریت (تصویر٧-B) برای نمونه‌های مورد مطالعه تعیین شد.

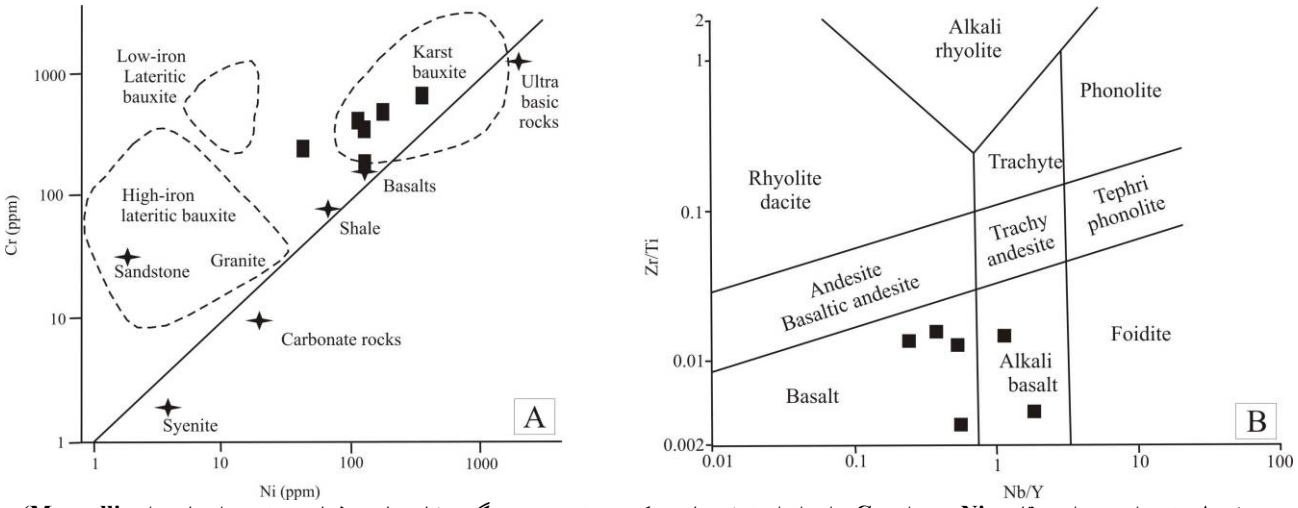


تصویر ٧- A- نمودار شلمن (SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3) برای تعیین نوع هوازدگی نمونه‌های مورد مطالعه، B- نمودار آلوا (Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2) بـرای تعیین نوع رخساره نمونه‌های مورد مطالعه

٧- خاستگاه

تعیین خاستگاه کانسارهای بوکسیت کارستی به دلیل پیچیدگی رویدادهای بوکسیتی‌شدن، حمل و نقل مواد بوکسیتی و گاه عدم برونزد سنگ منشاء در اطراف کانسار با چالش‌های فراوانی روبرو است. در اغلب مطالعات، با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و به کارگیری نمودارهایی از قبیل نمودار دوتایی Ni در مقابل Cr(Mongelli 1997)، Zr/Ti در مقابل Nb/Y(Winchester & Floyd 1977)، نمودار سه گوش Ga، Zr و Cr(Özlü 1983)، نسبت تجمع عناصر جزئی (Özlü 1983) و تلفیق این نتایج با یافته های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و بافتی، درباره سنگ منشاء کانسار اظهارنظر

شده است. در این مطالعه از نمودارهای Ni در مقابل Cr و Zr/Ti در مقابل Nb/Y برای تعیین سنگ منشاء افق بوکسیتی استفاده شد. براساس نمودار دوتایی Cr-Ni نمونه‌های مورد مطالعه در قلمرو بوکسیت‌های کارستی با سنگ منشاء بازالت قرار می‌گیرند (تصویر ۸-A). نمودار دوتایی Zr/Ti-Nb/Y نیز پیشنهاد کننده سنگ منشاء بازالت تا بازالت آلکالی برای این بوکسیت‌ها است که با نتایج کانی‌شناسی و حضور فراوان روتیل همخوانی دارد (تصویر ۸-B). لایه‌ای بودن این نهشته و تجمع فراوان اکسیدهای آهن مؤید این است که افق بوکسیتی مورد مطالعه از نوع مدیترانه‌ای است. مقایسه این نهشته با تعدادی از کانسارهای بوکسیت کارستی نوع مدیترانه‌ای ایران و جهان (جدول ۳)بیانگر شباهت‌های عمده میان آن‌ها می‌باشد. با این حال، فراوانی زیاد کانی‌های سیلیکاتی در افق بوکسیتی مورد مطالعه، بیانگر نارس بودن و زهکشی ضعیف آن در مقایسه با سایر کانسارهای بوکسیتی است.



تصویر ۸- A- نمودار تغییرات مقادیر Ni در برابر Cr برای انواع نهشته‌های بوکسیتی نسبت به سنگ منشاءهای متفاوت، نمودار پایه از (Mongelli 1997). B- نمودار تغییرات Zr/Ti در برابر Nb/Y، نمودار پایه از (Winchester & Floyd 1977). نمونه‌های منطقه مورد مطالعه با مربع توپر نشان داده شده‌اند

جدول ۳- مقایسه افق بوکسیتی خوش‌ییلاق با تعدادی از کانسارهای بوکسیت کارستی ایران و جهان

نام کانسار / (مرجع) / ویژگی‌ها	خوش‌ییلاق (ایران) این مقاله	قپی (ایران) (کلاگری و عابدینی ۱۳۸۳)	سقز (ایران) (عابدینی و کلاگری ۱۳۸۸)	ماستداقی (ترکیه) (Temur & Kansun 2006)	نورا (ایتالیا) (Mameli et al. 2007)
کانی‌های اصلی	کائولینیت، هماتیت، گوتیت	دیاسپور، بوهمیت، هماتیت	دیاسپور، هماتیت، کائولینیت	دیاسپور، بوهمیت، گیبسیت	بوهمیت، کائولینیت، گوتیت
Al_2O_3(Wt%)	۱۶/۲۰-۳۸/۵۹	۱۹/۶-۴۳/۱	۱۵/۶۱-۴۳/۷۵	۳۷/۹۳-۶۴/۳۳	۲۱/۸۹-۷۵/۷۳
نحوه تظاهر	لایه‌ای	لایه‌ای	لایه‌ای- عدسی	عدسی	لایه‌ای- کیسه‌ای
سنگ بستر	سنگ آهک	سنگ آهک	سنگ آهک	سنگ آهک	سنگ آهک
سنگ پوشش	سنگ آهک	سنگ آهک و شیل	سنگ آهک	سنگ آهک وشیست	سنگ آهک
سن	پرمین بالایی	پرمین بالایی	پرمین	پرمین بالایی	کرتاسه بالایی
سنگ منشاء	بازالت	دیاباز	بازالت- آندزیت	سنگ‌های پلیتی و شیست	سنگ‌های مافیک

۸-نتیجه گیری

افق بوکسیتی منطقه خوش‌ییلاق به صورت چینه‌سان در بین سنگ آهک‌های پرمین و سنگ‌آهک‌های دولومیتی تریاس قرار گرفته است. قرارگیری افق بوکسیتی مورد مطالعه بر روی سنگ بستر کربناتی، بیانگر تعلق آن به گروه کانسارهای بوکسیت کارستی است که با نتایج حاصل از نمودار Cr-Ni نیز همخوانی دارد. لایه‌ای بودن افق بوکسیتی و تجمع فراوان اکسیدهای آهن، بیانگر آن است که این نهشته به انواع مدیترانه‌ای تعلق دارد.

شواهد ژئوشیمیایی و نتایج حاصل از نمودارهای Cr-Ni و Nb/Y-Zr/Ti، پیشنهاد کننده سنگ منشاء بازالتی برای افق بوکسیتی مورد مطالعه می باشد. براساس بررسی‌های صحرایی، بازالت‌های آلکالن تا ساب‌آلکالن سازند سلطان میدان در منطقه مورد مطالعه برونزد دارند (جعفریان و همکاران ۱۳۸۸) و می‌توان آن‌ها را به عنوان سنگ منشاء این افق در نظر گرفت.

فراوانی روتیل آواری در افق بوکسیتی و قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه در قلمرو بازالت آلکالن نیز مؤید این موضوع است. براساس شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی در منطقه مورد مطالعه، ابتدا هوازدگی شدید شیمیایی تحت شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب استوایی باعث تجزیه و دگرسانی سنگ مادر بازالتی و تشکیل کانی‌های کائولینیت، هماتیت، گوتیت، آناتاز و رهاسازی کانی‌های مقاوم شده است.

در طی رویداد هوازدگی، عناصر Al، Fe، Ti و Si غنی شدگی یافته و عناصر قلیایی و قلیایی خاکی تهی‌شدگی یافته‌اند. کانی‌های تشکیل شده به همراه کانی‌های آواری کوارتز، روتیل و قطعات سنگی توسط آب‌های جاری به نواحی ساحلی حوضه رسوبی انتقال و رسوبگذاری یافته‌اند. وجود بافت کنگلومرایی، قطعات سنگی و قطعات گرد شده هماتیت و گوتیت از شواهد بافت نابرجا و موید انتقال کانی‌های تشکیل‌دهنده کانسنگ به حوضه رسوبی است.

از طرفی، شواهد بافتی مانند برشی دروغین، کلوفورمی، پلیتومورفیک نشانگر درجازا بودن نهشته است. طبقات لاتریتی قرمز تا قهوه‌ای و طبقات خاکستری تا سبز رنگ، نشان‌دهنده‌ی محیط اکسیدان- اسیدی تا بازی- قلیایی برای تشکیل این طبقات است. در اغلب کانسارهای بوکسیتی، فرآیندهای شستشو و تفکیک عناصر و سیلیکات زدایی کائولینیت می‌تواند موجب تشکیل کانی‌های آلومینیوم‌دار و بهبود کیفیت ماده معدنی گردد.

در حالی که در منطقه مورد مطالعه، هوازدگی لاتریتی‌شدن ضعیف تا متوسط، و همبستگی مثبت بین SiO_2 و Al_2O_3 نشان دهنده توسعه ضعیف رویدادهای بوکسیتی شدن است.

مراجع

جعفریان، ع.، امامی، م. ه. و وثوقی عابدینی، م.، ۱۳۸۸، "پترولوژی و ژئوشیمی عناصر اصلی مجموعه بازالتی سلطان میدان"، *فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، زمستان ۱۳۸۸، سال ۵ (٤): ۲۸٤-۲٦٦.*

جعفریان، م. و جلالی، ا.، ۱۳۸۳، "نقشه زمین‌شناسی خوش‌ییلاق به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰"، *انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.*

عابدینی، ع. و کلاگری، ع. ا.، ۱۳۸۸، "کانی‌شناسی و خاستگاه نهشته‌های بوکسیتی پرمین در شمال سقز، استان کردستان"، *فصلنامه بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، زمستان ۱۳۸۸، سال ۱۷ (٤): ۵۱۸-۵۰۳.*

کلاگری، ع. و عابدینی، ع.، ۱۳۸۳، "سنگ‌های دیاباز منشاء عمده افق بوکسیتی پرمو-تریاس در قپی، غرب میاندوآب، آذربایجان غربی"، *نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، سال ٤ (۲-۱): ٤۰۰-۳۸۷.*

Aleva, G. J. J., 1994, "Laterites: concepts, geology, morphology, and chemistry", *In: Aleva, G. J. J., (compiled) & Creutzberg, D. (ed.), Wageningen, The Netherlands, International Soil Reference and Information Center, 169 pp.*

Bardossy, G., 1982, "Karst bauxites: Bauxite deposits on carbonate rocks", *Developments in Economic Geology, Elsevier Science Ltd, 442 pp.*

Bates, T. F., 1960, "Halloysite and gibbsite formation in Hawaii", *Clays and Clay Minerals, Vol. 9 (1): 315-328.*

Bogatyrev, B. A., Zhukov, V. V. & Tsekhovsky, Yu. G., 2009, "Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits", *Lithology and Mineral Resources, Vol. 44 (2): 135-151.*

Calagari, A. 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 (1-3): 1-18.*

Combes, P. J., Oggiano, G. & Temussi, I., 1993, "Geodynamics of the Sardinian bauxites: typology, genesis and paleotectonic control", *Comptes Rendus de L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule A-Sciences de La Terre et Des Planetes, Vol. 316 (3): 403–409.*

Dangić, A., 1985, "Kaolinization of bauxite: A study in the Vlasenica bauxite area, Yugoslavia. I. Alteration of Matrix", *Clays and Clay Minerals, Vol. 33 (6): 517-524.*

Galán, E., 2006, "genesis of clay minerals", *Developments in Clay Science, Vol. 1: 1129-1162.*

Garrels, R. M. & Christ, C. I., 1965, "Solutions, minerals, and equilibria", *Harper & Row, 1nd Edition, 450 pp.*

Gaetani, M., Angiolini, L., Ueno, K., Nicara, A., Stephenson, M., Sciunnach, D., Rettori, R., Price, G. D. & Sabouri, J., 2009, "Pennsylvanian-Early Triassic stratigraphy in the Alborz mountains (Iran)", *In: Brunet,*

Survey of India, Memoir 120: I1-I7.

Stampfli, G. M. 1978, "Etude géologique generale de l'Elbotn'z ori- ental au sud de Gonbad-e-Qabus (Iran NE)", *Ph.D. Thesis, 1868, Université Genèvc, 329 pp.*

Temur, S. & Kansun, G., 2006, "Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 27: 512–522.*

Winchester, J. A. & Floyd, P. A. 1977, "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chemical Geology, Vol. 20: 325–343.*

M.-F., Wilmsen, M. & Granath, J. W., (eds.), South Caspian to Central Iran Basins, London, UK, Geological Society of London: 79-128.

Gilg, H. A., 2003, "Isotopic tools of dating paleoweathering in Europe", *Géologie de France, No.1: 49-51.*

Johns, W. D., Grim, R. E. & Bradley, F., 1954, "Quantitative estimation of clay minerals by diffraction methods", *Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 24: 242-251*

Lasemi, Y., 2001, "Facies Analysis, depositional environments and sequence stratigraphy of the upper Pre-Cambrian and Paleozoic rocks of Iran", *Geological Survey of Iran, 180 pp.*

Laskou, M., Margomenou-Leonidopoulou, G. & Balek, V., 2005, "Thermal characterization of bauxite samples", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 84 (1): 141-146.*

Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q,. Sun, S. & Meng, J., 2010, "Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China", *Journal of Geochemical Exploration, Vol. 105 (2010) 137–152.*

Lyew-Ayee, P. A., 1986, "A case for the volcanic origin of Jamaican bauxites", *Proceedings of the VI Bauxite Symposium 1986, Journal of Geological Society, Vol. 1: 9–39.*

Maclean, W. 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, Vol. 32: 607-616.*

Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G. & Dinelli, E., 2007, "Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity", *International Journal of Earth Sciences, Vol. 96 (5): 887-902.*

Merino, E. & Banerjee, A., 2008, "Terra rossa Genesis, Implications for karst, and eolian dust: A geodynamic thread", *The Journal of Geology, Vol. 116 (1): 62-75.*

Mongelli, G., 1997, "Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (Southern Italy)", *Chemical Geology, Vol. 140: 69–79*

Muzaffer Karadag, M., Kupeli, S., Aryk, F., Ayhan, A., Zedef, V. & Doyen, A., 2009, "Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit (Seydisehir/Konya - Southern Turkey)", *Chemie der Erde - Geochemistry, Vol. 69 (2): 143-159.*

Özlü, N., 1983, "Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt", *Mineralium Deposita, Vol. 18: 469–476.*

Retallack, G. J., 2010, "Lateritization and Bauxitization Events", *Economic Geology, Vol. 105 (3): 655-667.*

Schellmann, W., 1986, "A new definition of laterite", In: Banerji, P. K. (ed.), Laterization processes, *Geological*