

## چینه‌شناسی، زمین‌شیمی و ژنز افق لاتریتی - بوکسیتی قانلی، جنوب‌خاوری زنجان

علی رفیعی<sup>۱</sup>، قاسم نباتیان<sup>۲\*</sup>، جواد ربانی<sup>۳</sup> و افشین زهدی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲ و ۴- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

نویسنده مسئول: gh.nabatian@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱

نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

افق لاتریت-بوکسیت قانلی در پهنه ایران مرکزی و در فاصله ۸۰ کیلومتری زنجان واقع شده است. واحدهای مورد مطالعه در این منطقه شامل سازند روته و سازند شمشک است. با بررسی رخساره‌های رسوبی و توزیع آلوکم‌های اسکلتی و غیراسکلتی در سازند روته، می‌توان نتیجه گرفت که محیط‌رسوبی این سازند در خاور زنجان به صورت یک پلت‌فرم کربناته از نوع رمپ است. براساس مطالعات صحرایی، افق لاتریت-بوکسیت قانلی به شکل چینه‌سان و با مرز فرسایشی در انتهای‌ترین بخش سازند روته و زیر سازند شمشک قرار دارد. مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد این افق متشکل از کانی‌های هماتیت، گوتیت، بوهمیت، کائولینیت همراه با مقادیر کمتری لپیدوکروسیت، کلریت، روتیل و ایلمنیت است. از مهم‌ترین بافت‌های موجود در افق بوکسیت-لاتریت قانلی می‌توان به بافت‌های پلیتومورفیک، کلوفرمی-جریانی، پیژویدی، اوویدی، پلویدی و اکستراکلاست اشاره نمود. نمودارهای مختلف شیمیایی نشان می‌دهد که افق لاتریت-بوکسیت قانلی در محدوده بوکسیت، رس بوکسیتی و لاتریت قرار گرفته است. با توجه به نتایج مطالعات کانی‌شناسی، به نظر می‌رسد تشکیل افق لاتریتی-بوکسیتی قانلی در pH بین ۳/۵ تا ۶ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۷ رخ داده است و درجات متوسطی از فرایند لاتریتی شدن را متحمل شده است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که افق لاتریت-بوکسیت قانلی بیشترین شباهت را با کانسارهای بوکسیت کارستی دارد. با توجه به گسترش واحدهای پرمین و ژوراسیک در این منطقه و مناطق مجاور، مطالعه و بررسی افق لاتریت-بوکسیت قانلی می‌تواند به عنوان کلید اکتشافی برای مناطق مشابه در پهنه ایران مرکزی به شمار آید.

واژگان کلیدی: لاتریت-بوکسیت، سازند روته، پهنه ایران مرکزی، قانلی، زنجان

## ۱- پیشگفتار

میلا، پرمین (سازندهای درود و روته) و ژوراسیک (سازندهای شمشک و لار) است (شکل ۱). کانه‌زایی لاتریت-بوکسیت در این منطقه در بخش بالایی سازند روته واقع شده است و توسط سازند شمشک پوشیده شده است. مطالعات اکتشافی انجام شده در محور سلطانیه-ماه‌نشان نشان دهنده وجود رخنمون‌های متعددی از ذخایر بوکسیتی (همانند: قانلی، قارخوتلو، اوغولبیک، قالیچه‌بلاغی و میرجان) در این بخش از ایران است (عشق آبادی، ۲۰۱۵). در پژوهش حاضر، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و چگونگی رفتار و توزیع عناصر اصلی و فرعی در نهشته لاتریت-بوکسیت قانلی بررسی شده است. از مطالعات متعددی که بر روی بوکسیت‌های محور پرموتریاس، شمال‌باختری کشور انجام

کانه‌زایی لاتریت - بوکسیت قانلی در فاصله حدود ۸۰ کیلومتری جنوب‌خاوری زنجان (منطقه خدابنده) و با مختصات طول‌های جغرافیایی "۵۱/۷' ۱۲' ۳۶° تا "۵۴/۵' ۱۲' ۳۶° و عرض‌های جغرافیایی "۱۶/۸' ۵۲' ۴۸° تا "۲۳/۶' ۵۲' ۴۸° قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه در تقسیمات پهنه‌های ساختاری-رسوبی ایران زمین (علوی، ۱۹۹۱)، در پهنه ایران مرکزی واقع شده و بخش کوچکی از ورقه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطانیه-خدابنده (علوی نائینی، ۱۹۹۴) را در بخش‌های مرکزی تا خاوری آن تشکیل داده است. از نظر زمین‌شناسی واحدهای سنگی موجود در این منطقه شامل واحدهای پیرکامبرین و کامبرین (سازندهای سلطانیه، باروت، لالون و

ماده معدنی تهیه شد. مقاطع تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان دومانظوره مدل GX مطالعه گردید. برای تفکیک بافت‌های زمینه‌ساز و واحدهای بافت‌ساز از طبقه‌بندی باردوسی (۱۹۸۲) استفاده شده است. نام‌گذاری سنگ‌های آهکی سازند روته بر اساس رده‌بندی متداول سنگ‌های کربناته نظیر فولک (۱۹۶۲) انجام شد. در مطالعات سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک از رده‌بندی فولک (۱۹۸۰)، برای نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌ها استفاده شد. تجزیه شیمیایی ۹ نمونه به روش XRF برای مشخص شدن مقدار دقیق اکسیدهای اصلی و تعداد ۴ نمونه به روش XRD در آزمایشگاه زرآما زنجان آنالیز شد.

### ۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی- ساختمانی ایران توسط علوی (۱۹۹۱)، منطقه مورد مطالعه در پهنه ایران مرکزی واقع شده و قسمت کوچکی از ورقه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ خدابنده- سلطانیه (علوی نائینی، ۱۹۹۴) را در بخش‌های مرکزی تا خاوری آن تشکیل داده است. در منطقه سلطانیه- خدابنده انواع واحدهای سنگی از زمان پرکامبرین تا عهد حاضر را می‌توان مشاهده نمود (شکل ۱). ناحیه مورد بررسی، بخشی از کوه‌های سلطانیه با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری به طول ۱۵۰ و عرض ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر است، که از دیدگاه تکتونیک، ادامه بخش‌های شمال‌باختری واحد زمین‌ساختی ایران مرکزی به شمار می‌آید. ساختارها و گسل‌های موجود در این ناحیه، بر اثر رخدادهای کوهزایی آلپی که در کرتاسه پسین و ترشیری روی داده، شکل کنونی خود را یافته‌اند (علوی نائینی، ۱۹۹۴). قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در این ناحیه، مربوط به سازند کهر است که متشکل از ردیف‌هایی از شیل‌های آرژلیکی و سیلیسی شده، توف، سنگ‌های آتشفشانی، دولومیت و آهک‌های آهن‌دار است. سازند بایندور با مرز گسلی بر روی این سازند قرار داشته و سازندهای سلطانیه، باروت، زایگون، لالون و میلا به ترتیب بر روی واحدهای قدیمی قرار گرفته‌اند. مشابه با اکثر بخش‌های ایران، از زمان کامبرین بالایی تا پرمین، در این ناحیه نبود رسوب‌گذاری وجود داشته و سازندهای درود و روته با مرز ناپیوسته بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. در زمان مزوزویک، عمده واحدهایی که تشکیل شده‌اند شامل واحدهای تخریبی و شیمیایی مربوط به

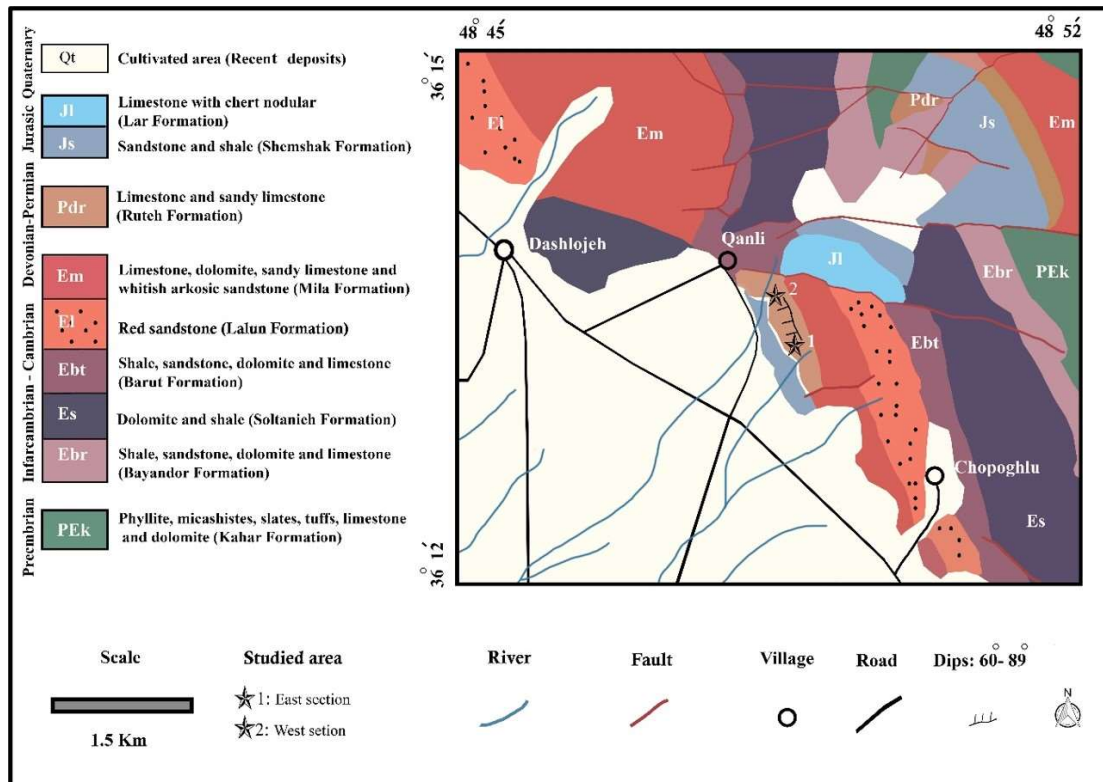
شده می‌توان به مطالعات (خواجه محمودلو، ۲۰۰۴) اشاره نمود که به بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز نهشته‌های بوکسیتی جنوب استان آذربایجان باختری پرداخته و منجر به شناسایی سنگ‌های دیاباز نفوذی داخل سازند درود به عنوان سنگ منشأ شده است. در پژوهشی دیگر توسط (انتظاری، ۲۰۰۶) کانی‌شناسی و ژنز نهشته‌های بوکسیتی جنوب‌خاوری مراغه بطور کامل بررسی شده و بر اساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی سنگ منشأ آن را یک سنگ بازیک معرفی کرده‌اند. از دیگر نواحی بوکسیتی مربوط به پرمو- تریاس ایران می‌توان به البرز خاوری اشاره نمود، از جمله مطالعاتی که بر روی این محور صورت گرفته می‌توان به (کیاشکوریان و همکاران، ۲۰۱۱) اشاره نمود که به مطالعه کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه افق بوکسیت پرمو- تریاس جنوب‌خاوری آزادشهر پرداخته و سنگ منشأ بوکسیت‌ها را سنگ‌های بازالتی معرفی کرده است. با توجه به پتانسیل بالای لاتریت- بوکسیت‌زایی در پهنه ایران مرکزی که محدوده مورد مطالعه نیز بخشی از آن به شمار می‌آید، همچنین با توجه به اینکه تاکنون مطالعه علمی دقیقی بر روی این کانه‌زایی در این منطقه صورت نگرفته است، موضوع مطالعه چینه‌شناسی، زمین‌شیمی و بررسی چگونگی تشکیل افق بوکسیت- لاتریت قانلی برای پژوهش حاضر انتخاب گردید. مطالعه و بررسی ویژگی‌های مختلف کانه‌زایی افق لاتریت- بوکسیت قانلی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در این زمینه بدهد که از اطلاعات به دست آمده می‌توان به عنوان کلیدهای اکتشافی مکانی و زمانی بهره برد.

### ۲- روش مطالعه

در ابتدا بازدیدهای صحرایی از منطقه به جهت مطالعات زمین‌شناسی صحرایی و نمونه‌برداری انجام شد که منجر به شناسایی واحدهای سنگی منطقه، رسم ستون چینه‌شناسی و ارتباط واحدهای سنگی موجود در محدوده کانه‌زایی، با یکدیگر شد. همچنین مطالعه ساخت و بافت‌های موجود در سنگ میزبان و کانه‌زایی در مقیاس صحرایی و نمونه‌دستی در طی بازدیدهای صحرایی صورت گرفت. با توجه به نمونه‌های برداشته شده از بخش‌های مختلف واحدهای سنگی و ماده معدنی موجود در محدوده، تعداد ۸ مقطع نازک و ۹ مقطع نازک- صیقلی از نمونه‌های برداشت شده جهت مطالعات کانی‌شناسی سنگ میزبان و

است که به طور ناپیوسته بر روی واحدهای سازند کرج قرار گرفته و به صورت پیوسته در زیر توالی‌های ماسه‌سنگی و کنگلومرایی سازند قرمز بالایی قرار گرفته است. از فعالیت‌های آذرین در این منطقه می‌توان به گرانیت دوران به سن پرکامبرین و گرانیت خرم‌درق به سن ائوسن اشاره کرد. فعالیت‌های ماگماتیسم در دوران پالئوزوئیک در این ناحیه مشاهده نمی‌شود و سنگ‌های دگرگون شده سازند کهر، بر اثر دگرگونی مجاورتی و نفوذ گرانیت دوران در درون این سازند، تشکیل شده است (علوی نائینی، ۱۹۹۴). با توجه به شواهد موجود در این ناحیه می‌توان ذکر کرد که شدیدترین فاز تکتونیکی و کوهزایی شناخته شده در این ناحیه، کوهزایی آلپی است (علوی نائینی، ۱۹۹۴).

سازندهای شمشک، دلیچای، لار و واحدهای کربناته و شیلی کرتاسه است. با شروع پالئوسن و پیشروی دریا، سازندهای فجن و زیارت در این ناحیه ته‌نشست پیدا کرده و در ادامه، در زمان ائوسن، سازند کرج که عمدتاً متشکل از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی در این ناحیه تشکیل شده است. سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی نیز در این منطقه از گسترش خوبی برخوردار هستند. این واحدها بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند و توسط رسوبات پلیوسن که شامل مارن و رس‌های سیلتی و گچ‌دار هستند پوشیده می‌شوند. براساس مطالعات ربانی و همکاران (۲۰۲۳) سازند قم در این ناحیه با ضخامت ۱۶۱ متر، متشکل از توالی‌های کربناتی و کانال‌های تخریبی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از اشتوکلین و افتخارنژاد، ۱۹۶۹، با تغییرات جزئی). برش‌های مورد مطالعه با علامت ستاره در روی نقشه مشخص شده است.

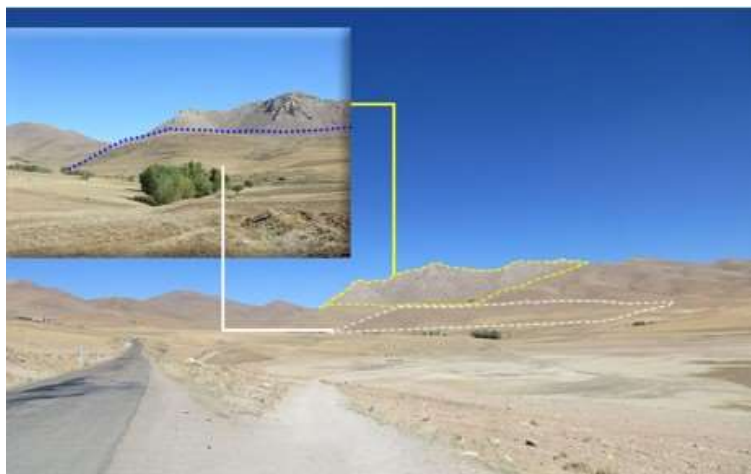
Fig. 1. Geological map of the study area (after Stoklin and Efteharnzhad, 1969 with minor changes). Studied section is marked with a star on the map.

کم عمق، عمدتاً از روزنبران کفزی کوچک و بزرگ تشکیل شده‌اند. شناسایی انواع مختلف روزنبران کفزی به همراه دیگر آلوکم‌های اسکلتی و غیراسکلتی غالب و در نتیجه معرفی رخساره‌های رسوبی در این زمان یک ابزار با ارزش برای تعیین عمق نسبی محیط رسوبی و رسم منحنی

واحدهای سنگی اصلی مورد بررسی در این پژوهش شامل سازند روته به سن پرمین، افق لاتریت-بوکسیت و سازند شمشک است (شکل ۲). سازند روته اولین بار توسط آسرتو (۱۹۶۳) معرفی و سن آن پرمین میانی تعیین گردید. در زمان پرمین رسوبات کربناته متعلق به محیط‌های دریایی

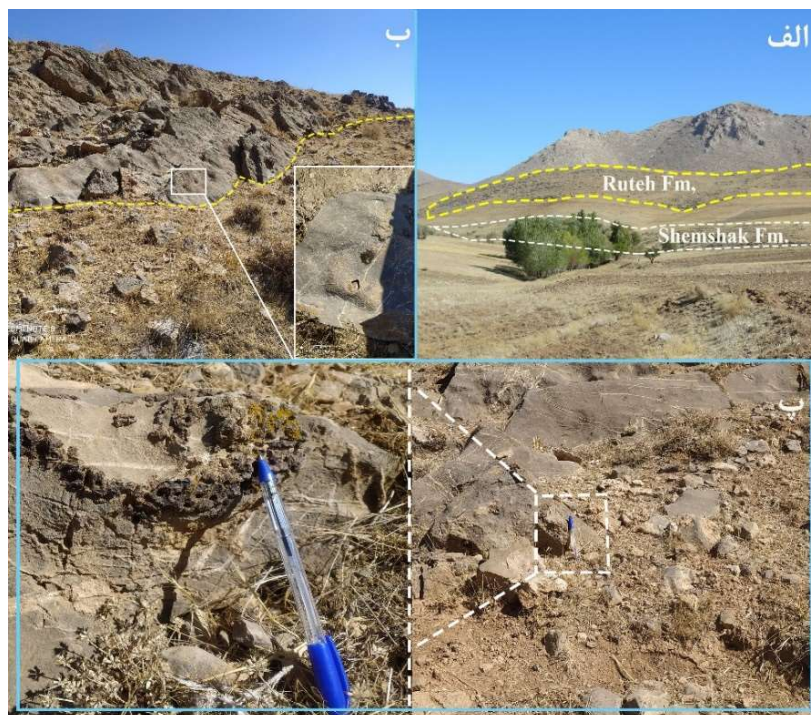
غیر اسکلتی (نظیر اوویدها، اینتراکلیست و پلویید) موجود در سازند، می‌توان نوع محیط رسوبی دیرینه این سازند را بازسازی نمود.

تغییرات نسبی سطح آب دریا است. سازند روته در منطقه قانلی به عنوان یک سازند کربناته سرشار از فسیل روزنبران کفزی و به سن پرمین میانی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این محتوای فسیلی و دیگر اجزای اسکلتی و



شکل ۲. قسمت‌های مشخص شده با خط چین سفید، پروفیل انتخاب شده جهت نمونه‌برداری است. قسمت‌های مشخص شده با خط چین زرد رنگ، ارتفاعات کربناته‌ی سازند لار در منطقه هستند (دید به سمت شمال تا شمال‌باختر).

Fig. 2 . The parts marked with a white dashed line are the profile selected for sampling. The areas marked with a yellow dotted line are the carbonate cliff of the Lar Formation in the region (view to the north to northwest).

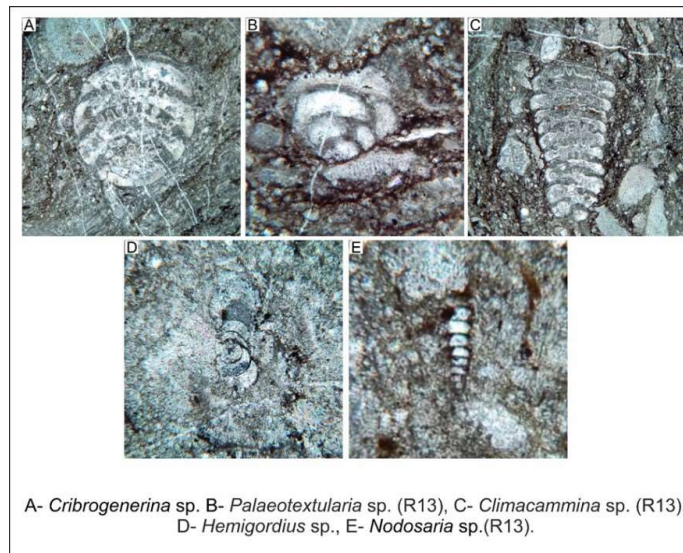


شکل ۳. الف) نمای نزدیک از سازند روته در منطقه مورد مطالعه، ب) نمایی از سازند روته در منطقه و موقعیت آن نسبت به سازند شمشک (دید به سمت شمال تا شمال‌باختر) و ب) نمایی از کلونی مرجانی بر روی آهک‌های سازند روته.

Fig. 3. a) A close-up view of the Ruteh Formation in the studied area, b- A view of the Ruteh Formation in the study area and its position in relation to the Shamshek Formation (view to the north to northwest), c- A view of the coral colony in the limestones of the Ruteh Formation.

دولومیتی شدن در امتداد شکستگی‌ها و استیلولیت‌ها (شکل ۲) تا ۳ درصد) اشاره نمود. نمونه‌های کربناته بر اساس تقسیم‌بندی فولک (۱۹۶۲)، بیومیکرودايت نامتراکم نام‌گذاری می‌شوند. بررسی رخساره‌های رسوبی و توزیع آلوکوم‌های اسکلتی و غیراسکلتی در سازند روته نشان می‌دهد که محیط رسوبی این سازند در خاور زنجان به صورت یک سکوی کربناته از نوع رمپ است (رفیعی، ۱۴۰۲). مطالعات انجام شده بر روی مقاطع نازک میکروسکوپی مربوط به آخرین توالی‌های کربناته سازند روته در این ناحیه، منجر به شناسایی ۵ جنس از روزنبران (شکل ۴) گردید به طوری که محدوده سنی پرمین میانی (مدادی و همکاران، ۲۰۱۷) را برای این توالی‌ها مشخص می‌کنند (اساتوقلو، ۲۰۱۱؛ یاراحمدزاهی و واچارد، ۲۰۱۷؛ فیلیمونووا و ایساکووا، ۲۰۱۹).

لیتولوژی غالب سازند روته را آهک‌های بیوژنیک به رنگ خاکستری و تیره تشکیل می‌دهد (شکل ۳ الف و ب). از جمله فسیل‌های شناسایی شده در سازند روته می‌توان به روزنبران کفزی، قطعات خارپوست، کلونی مرجانی و جلبک سبز اشاره نمود (شکل ۳ پ). مطالعات میکروسکوپی صورت گرفته از سنگ میزبان منطقه نشان می‌دهد که زمینه نمونه‌ها را گل کربناته (میکرایت) تشکیل می‌دهد که بر روی آن مقادیر قابل‌توجهی از روزنبران کفزی (۴۰ تا ۵۰ درصد)، فسیل‌های خرد شده دوکفه‌ای، خارپوست و جلبک سبز (۱۰ تا ۲۰ درصد)، کانی‌های تیره (۲ تا ۳ درصد) قرار گرفته است. در بعضی از نمونه‌های برداشت شده می‌توان ذرات غیراسکلتی از نوع اووید و پلویید (۵ درصد) را نیز مشاهده نمود. از فرآیندهای دیاژنزی تأثیر گذار بر روی سنگ‌های کربناته سازند روته در برش مورد مطالعه می‌توان به سیلیسی شدن و



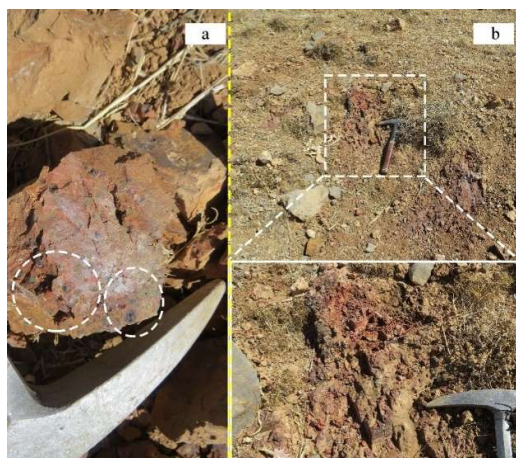
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از فسیل روزنبران شناسایی شده در برش مورد مطالعه  
Fig. 4. Microphotographs (transmitted cross-polarized light, XPL) of identified foraminifera fossils in the studied area

بافت پیرویدی و اوویدی می‌باشد (شکل ۵ a). سازند شمشک عمدتاً دارای ترکیبات ماسه‌سنگی و شیلی است که با مرز پوشیده بر روی توالی‌های لاتریتی-بوکسیتی انتهای سازند روته واقع شده است (شکل‌های ۷ و ۸). ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه سبز رنگ بوده و دارای لایه‌بندی موازی هم به صورت نازک تا متوسط لایه است (شکل ۷). مرز بالایی سازند شمشک در محدوده مطالعاتی به دلیل پوشیده شده آن توسط واریزه‌ها قابل تشخیص نیست. ماسه‌سنگ‌های سبز رنگ این سازند

افق لاتریت-بوکسیتی در منطقه قانلی در انتهای‌ترین واحدهای سنگی سازند روته تشکیل شده است (شکل ۵ a و b و شکل ۶)، که با توجه به مطالعات صحرائی و نمونه‌های برداشت شده، نشان دهنده نوسان شرایط اکسایش و احیایی طی تشکیل این افق است. شرایط اکسایش با حضور بوکسیت قرمز رنگ مشخص می‌شود (شکل ۵). براساس مطالعات انجام گرفته و ستون چینه‌شناسی منطقه (شکل ۶)، افق لاتریت-بوکسیت در این محدوده دارای ضخامت تقریبی ۴ متر بوده و دارای

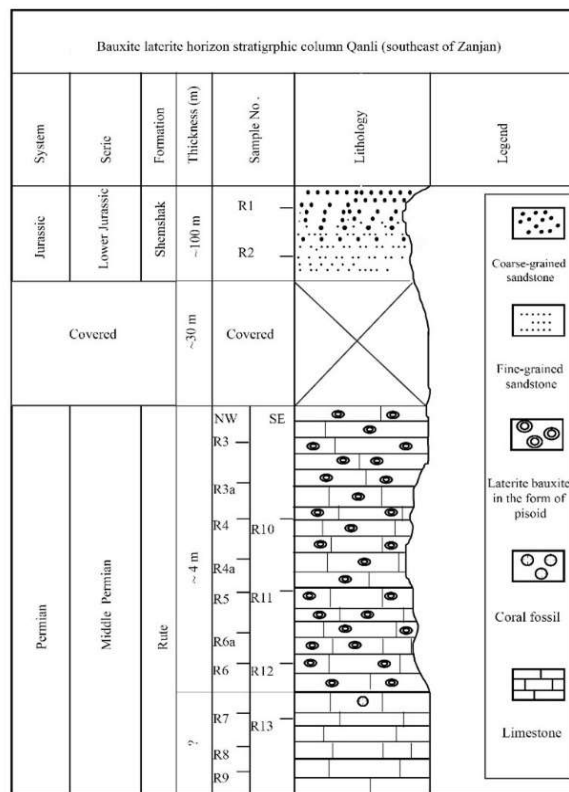
(۱۳٪) است. کانی‌های فرعی مسکویت و پیروکسن (۱٪)، کانی‌های اپک و اکسید آهن (۵٪) نیز قابل مشاهده است. زمینه این ماسه‌سنگ‌ها از سیمان سیلیسی (۱٪) و گل (۶٪) می‌باشد. از نظر گردشگری، ذرات نیمه زاویه‌دار تا نیمه گرد شده هستند و به لحاظ جورشدگی متوسط‌اند. نام ماسه‌سنگ‌ها بر اساس مطالعات میکروسکوپی و تقسیم‌بندی فولک (۱۹۸۰) لیت‌آرنایت است.

در بخش‌های زیرین آن، دانه ریز بوده که به تدریج به سمت مرز بالایی، دانه درشت‌تر می‌شود که در برش مورد مطالعه به دو صورت دانه درشت و دانه ریز قابل مشاهده است (شکل ۸). کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این ماسه‌سنگ‌ها شامل: کوارتز (۴۰٪) عمدتاً بصورت تک‌بلور با خاموشی موجی، ارتوکلاز (۱۱٪)، پلاژیوکلاز (۲٪)، چرت (۱۰٪)، خرده‌سنگ آهکی (۹٪) و خرده‌سنگ ماسه‌سنگی و شیلی



شکل ۵. (a) نمایی از پیزویدهای موجود در نمونه دستی و (b) نمایی از رخنمون لاتریت-بوکسیت در منطقه مورد مطالعه

Fig. 5. a) a view of the pisoids in the hand sample, b) a view of the laterite-bauxite outcrop in the studied area.



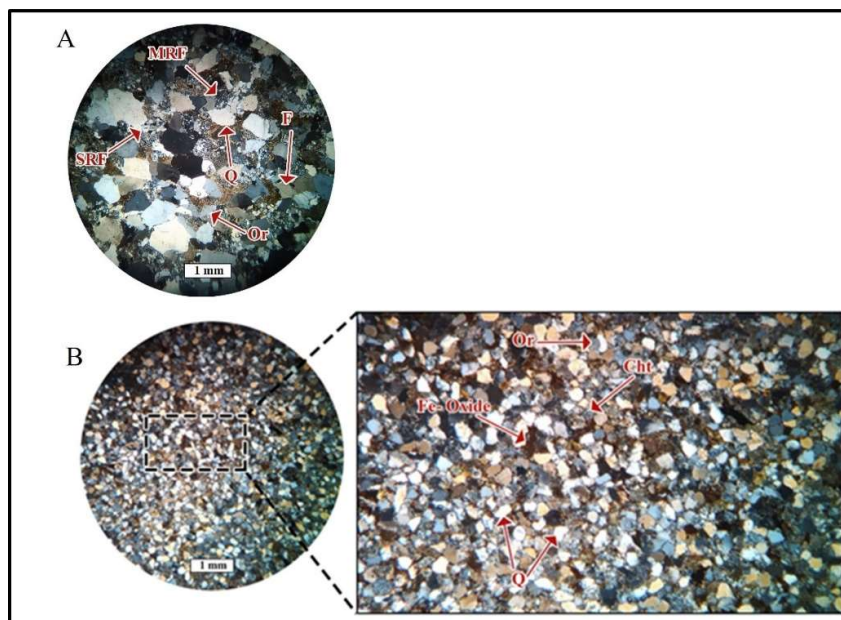
شکل ۶. ستون چینه‌شناسی تهیه شده از منطقه قانلی و موقعیت افق لاتریت-بوکسیت منطقه

Fig. 6. The stratigraphic column of the Qanli area and the position of the laterite-bauxite horizon of the region



شکل ۷. نمایی از سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه

Fig. 7. A view of the Shamshek Formation in the study area.



شکل ۸. A و B: تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از اجزای تشکیل دهنده ماسه سنگ دانه درشت و ریز سازند شمشک در منطقه قانلی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Q: کوارتز، Or: ارتوز، F: فلدسپات، MRF: خرده سنگ دگرگونی، SRF: خرده سنگ رسوبی، Opq: کانی اپک، Fe-Oxide: اکسید آهن و Cht: چرت

Fig. 8. Microscopic images (transmitted cross-polarized light, XPL) of the constituents of the coarse and fine-grain sandstone of the Shamshek formation in the Qanli area. Abbreviations are adapted from (Whitney and Evans, 2010). (Q: quartz, Or: orthoclase, F: feldspar, MRF: metamorphic rock fragments, SRF: sedimentary rock fragments, Opq: opaque mineral, Fe-Oxide: iron oxide and Cht: chert.

حدود ۲۰۰ متر است (شکل ۹ a). افق لاتریتی-بوکسیت قانلی احتمالاً بعد از تشکیل در بخش‌هایی متحمل جابجایی و ته‌نشست مجدد شده است. این افق دارای بافت‌های پیروبییدی است که در شکل (۹ b تا e) قابل مشاهده است.

#### ۴-۲- کانی‌شناسی

براساس مطالعه انجام شده بر روی افق لاتریتی-بوکسیتی قانلی، کانی‌های هماتیت، گوتیت، لیپدوکروسیت، بوهمیت، کائولینیت، ایلمنیت، روتیل و کلریت اشاره کرد. از

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- ویژگی‌های ماکروسکوپی افق لاتریتی-بوکسیتی

با توجه به نقشه زمین‌شناسی و ستون چینه‌شناسی ترسیم شده از منطقه قانلی و براساس مطالعات صحرایی، افق لاتریت-بوکسیت قانلی به صورت لایه‌ای و با مرزهای فرسایشی در انتهای‌ترین واحدهای سنگی سازند روته (پرمین میانی) و در زیر سازند شمشک (ژوراسیک) قرار گرفته است. ضخامت افق بوکسیت-لاتریت در منطقه مورد مطالعه به طور تقریبی ۴ متر و گسترش جانبی آن در

بوهمیت بیشتر در بخش مرکزی ذرات پیرویدی و اوویدی، حاشیه پیرویدها و در زمینه رسی به صورت قطعات کروی شکل و بی‌شکل و به مقدار کم، به صورت رگه-رگچه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-C). اصلی‌ترین کانی رسی موجود در افق لاتریت-بوکسیت قانلی، کائولینیت است که در مشاهدات میکروسکوپی، این کانی‌ها به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای روشن دیده شده و عمده‌ی بخش‌های زمینه‌ای سنگ را به خود اختصاص داده است (شکل ۱۰-D). یکی از کانی‌های آهن‌دار و البته فرعی مشاهده شده در افق لاتریت-بوکسیت قانلی، لپیدوکروسیت است. این کانی نیز مانند گوتیت محصول فرایندهای دگرسانی و هوازدگی هماتیت بوده و به مقدار جزئی، به صورت نوارهای روشن رنگ در داخل پیرویدها مشاهده می‌شود (شکل ۱۱-A).

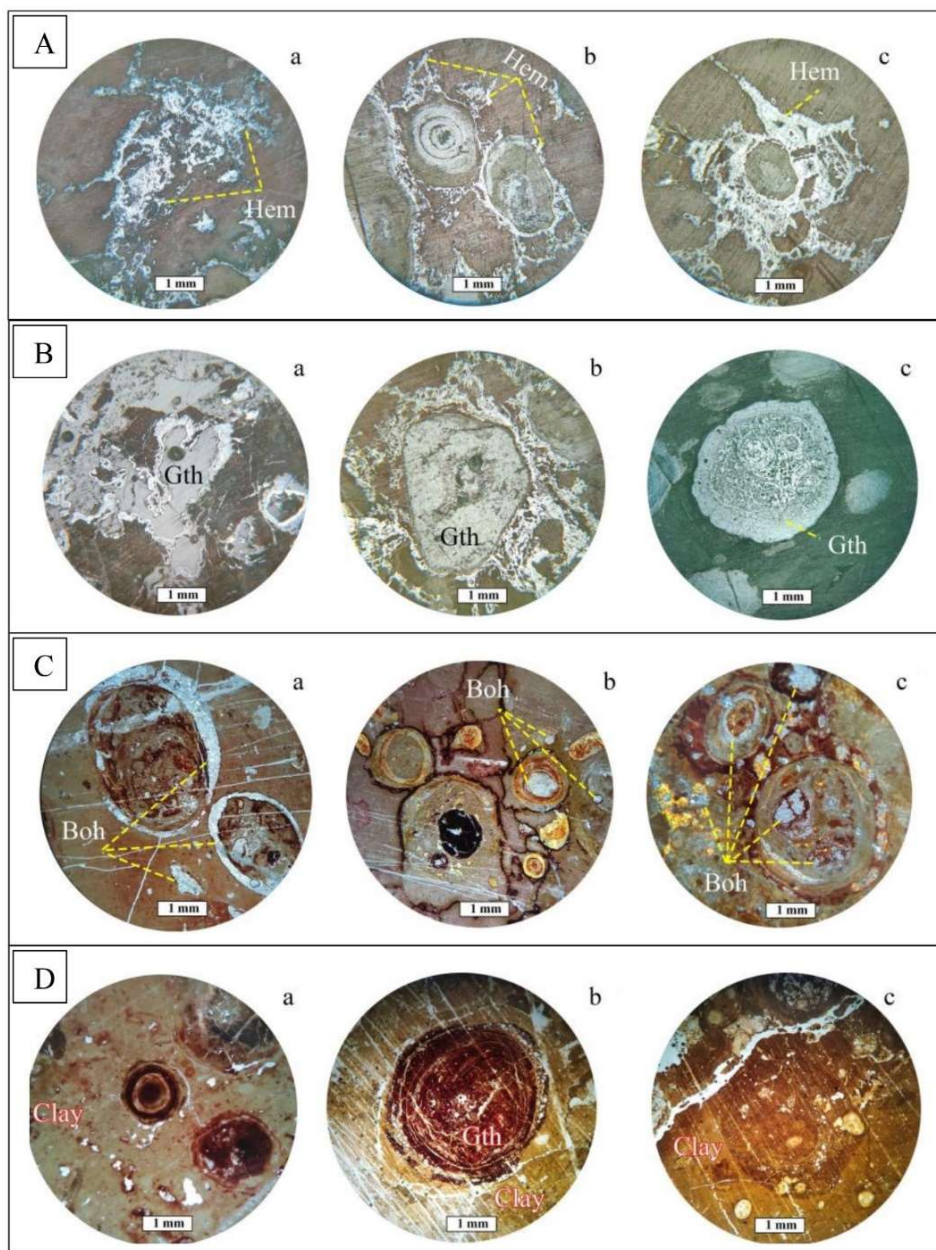
کانی‌های آهن‌دار اصلی ماده معدنی در افق لاتریتی-بوکسیتی قانلی، هماتیت است. در مطالعات میکروسکوپی، این کانی در اطراف و حاشیه پیرویدها و حتی به صورت پرکننده‌ی داخل پیرویدها مشاهده شده و گاهی نیز به صورت بافت رگچه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱۰-A). از دیگر کانی‌های آهن‌دار مشاهده شده در این افق، گوتیت است. این کانی محصول هوازدگی کانی‌های اکسید آهن از جمله هماتیت و یا سایر کانی‌های سنگ‌ساز در منطقه است. گوتیت بیشتر در بخش‌های مرکزی (هسته) پیرویدها و اوویدها، به صورت رگه-رگچه‌ای و همچنین به مقدار کم به صورت بلورهای ریز پراکنده در داخل سنگ قابل مشاهده است (شکل ۱۰-B). تنها کانی آلومینیوم‌دار و یکی از اصلی‌ترین کانی تشکیل دهنده در افق لاتریتی-بوکسیتی قانلی، بوهمیت است. در مقاطع میکروسکوپی



شکل ۹. a) نمای صحرایی از افق لاتریت-بوکسیت قانلی (دید به سمت شمال). b تا e) نمایی نزدیک از افق لاتریت-بوکسیت بخش مورد مطالعه که دارای بافت پیرویدی است.

Fig. 9. a) Field view of laterite-bauxite horizon of the Qanli (view to the north). (b) to (e) A closed view of pisoids texture of the laterite-bauxite horizon in the studied section.



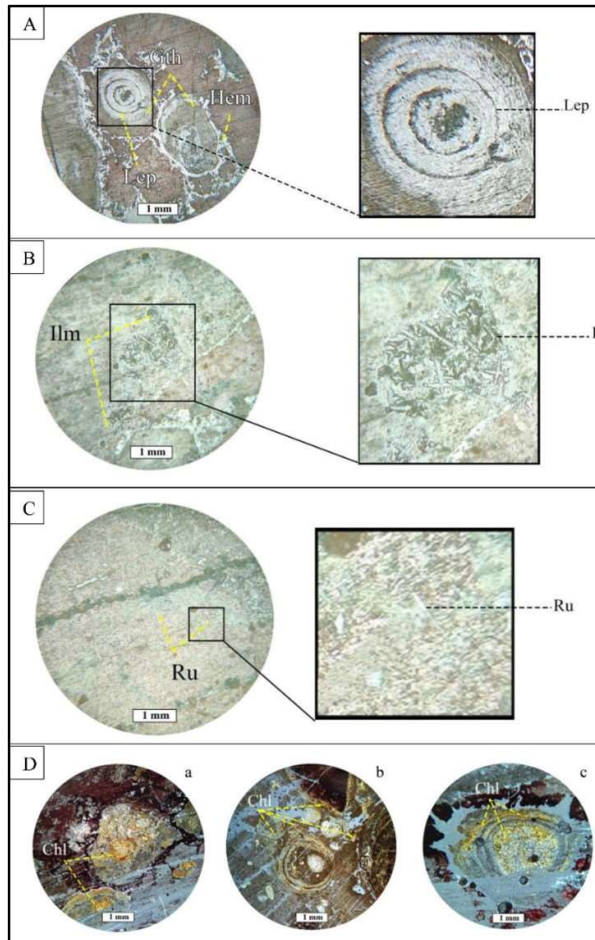


شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از کانی‌ها و بافت‌های موجود در افق لاتریت-بوکسیت قانلی، A- کانی هماتیت افق لاتریت-بوکسیت منطقه قانلی. a) بافت رگچه‌ای هماتیت که زمینه را قطع و برشی کرده است، b و c) حضور هماتیت در اطراف پیژویدها و اوویدها، تصویر B- کانی گوتیت افق لاتریت-بوکسیت منطقه قانلی. a) تشکیل گوتیت به صورت رگچه‌ای که زمینه سنگ را برشی کرده است. b و c) گوتیت در بخش مرکزی پیژویدها قابل مشاهده است. همانطور که در تصویر c مشاهده می‌شود بافت گل کلمی نیز در داخل پیژوید تشکیل شده است. تصویر C- کانی بوهمیت افق لاتریت-بوکسیت منطقه قانلی. a) بوهمیت در حاشیه پیژویدها و همچنین به صورت بی‌شکل و گروی در زمینه دیده می‌شود b و c) بوهمیت در بخش مرکزی پیژویدها و اوویدها قابل مشاهده است. تصویر D- کانی‌های رسی افق لاتریت-بوکسیت منطقه قانلی. همانطور که در این تصاویر قابل مشاهده است، کانی‌های رسی در مقاطع مورد مطالعه بیشتر به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای روشن مشاهده می‌شوند. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است (Hem: هماتیت، Ght: گوتیت، Boh: بوهمیت، Clay: کانی رسی، Lep: لیپیدوکروسیت، Ilm: ایلمنیت، Ru: روتیل، Chl: کلریت).

**Fig. 10. Photomicrographs (transmitted plan-polarized light, PPL) of minerals and different types of textures in the Qanly laterite-bauxite horizon, A-** The hematite mineral of the laterite-bauxite horizon in the Qanli area. a) Vein texture of hematite that cut and brecciate the groundmass, b and c) Presence of hematite around pisoids and ooids. Image B- The goethite mineral of the laterite-bauxite horizon in the Qanli area. a) Goethite is formed in form of veinlet which cut and brecciate the groundmass. b and c) Goethite can be seen in the central part of the pisoids. As seen in the photo c, botryoidal texture is also formed inside the pisoid. Image C- The boehmite mineral of the laterite-bauxite horizon in the Qanli area. a) Boehmite can be seen on the edge of pisoids and also in form of amorphous and spherical-shape in the groundmass, b and c) Boehmite can be seen in the central part of piezoids and ooids. Image D- Clay minerals of laterite-bauxite horizon in the Qanli area. As can be seen in these pictures, the clay minerals in the studied sections are mostly seen in light brownish yellow color. Abbreviations are adapted from Whitney and Evans (2010), (Hem: hematite, Ght: goethite, Boh: boehmite, Clay: clay mineral, Lep: lipidocrocite, Ilm: ilmenite, Ru: rutile, Chl: chlorite).

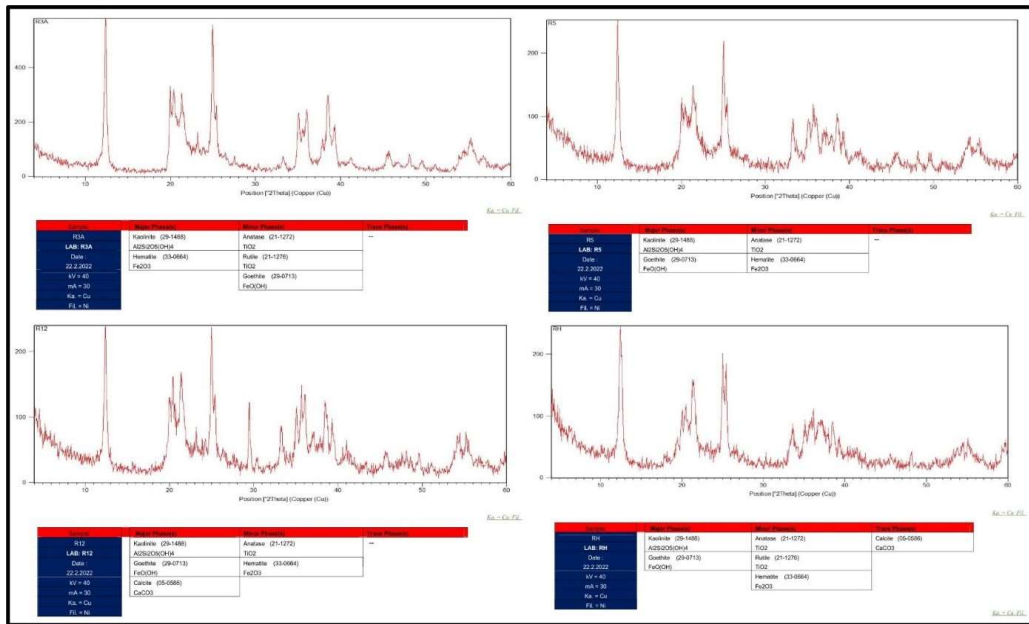
(شکل ۱۱- C). کانی کلریت، یکی دیگر از کانی‌های فرعی موجود در افق لاتریت- بوکسیت قانلی است. این کانی در مقاطع میکروسکوپی، به صورت دانه پراکنده، حاشیه پیزویدها و همچنین داخل پیزویدها و اوویدها و به رنگ سبز کم رنگ مایل به زرد دیده می‌شود (شکل ۱۱- D). نتایج آنالیز XRD نیز وجود کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) و کانی‌های تیتان‌دار از جمله ایلمنیت و روتیل در افق لاتریت- بوکسیت قانلی را نشان می‌دهد (شکل ۱۲).

از کانی‌های تیتان‌دار و فرعی موجود در افق لاتریت- بوکسیت قانلی، می‌توان به ایلمنیت و روتیل اشاره نمود که ایلمنیت به صورت ناچیز همراه با کانی‌های اکسید آهن همانند گوتیت دیده می‌شود و احتمالاً همزمان با اکسیدهای آهن تشکیل شده است (شکل ۱۱- B). از پلی‌مورف دما بالا و فشار بالای کانی روتیل، می‌توان به آناز اشاره کرد. روتیل در مقاطع میکروسکوپی غالباً به صورت دانه ریز و دانه پراکنده در زمینه سنگ دیده می‌شود. حضور روتیل در زمینه دیگر کانی‌ها نشان دهنده شرایط احيائی و pH پایین طی فرایند بوکسیتی شدن است

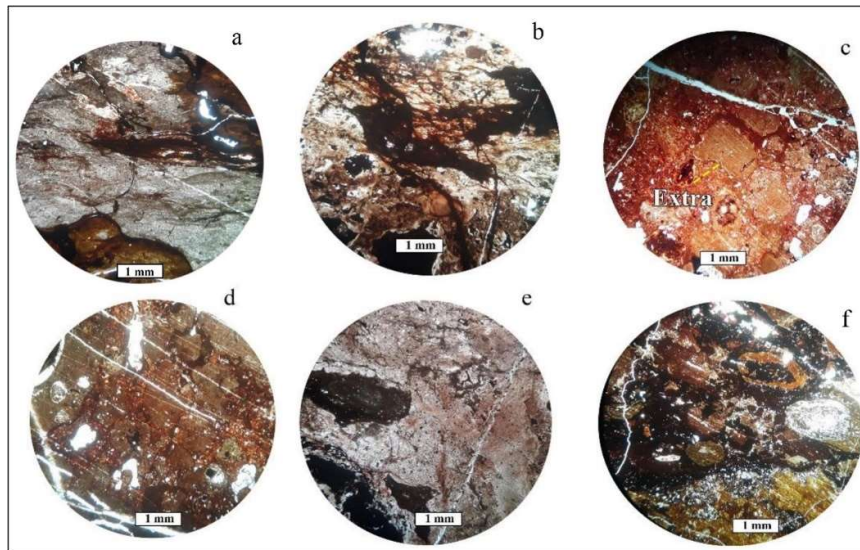


شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی، PPL) از کانی‌ها و بافت‌های موجود در افق لاتریت- بوکسیت قانلی، تصویر A- تصاویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از کانی لیپیدوکروسیت افق لاتریت- بوکسیت منطقه قانلی. تصویر B- کانی ایلمنیت افق لاتریت- بوکسیت منطقه قانلی. تصویر C- کانی روتیل افق لاتریت- بوکسیت منطقه قانلی. تصویر D- کانی کلریت افق لاتریت- بوکسیت منطقه قانلی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است (Hem: ههماتیت، Ght: گوتیت، Bhm: بوهمیت، Clay: کانی رسی، Lep: لیپیدوکروسیت، Ilm: ایلمنیت، Ru: روتیل، Chl: کلریت).

Fig. 11. Photomicrographs (Reflected light, PPL) of minerals and different types of textures in the Qanli laterite-bauxite horizon, Image A- Microscopic images (reflected light) of the lepidocrocite mineral of the laterite-bauxite horizon of the Qanli area. Image B- Ilmenite mineral of laterite-bauxite horizon in the Qanli area. Image C- Rutile mineral of laterite-bauxite horizon in Qanli area (transmitted plan-polarized light, PPL). Abbreviations are adapted from Whitney and Evans (2010), (Hem: hematite, Ght: goethite, Bhm: boehmite, Clay: clay mineral, Lep: lepidocrocite, Ilm: ilmenite, Ru: rutile, Chl: chlorite).



شکل ۱۲. طیف‌های XRD مربوط به نمونه‌های مورد مطالعه در منطقه قانلی  
 Fig. 12. XRD spectra of investigated samples in the Qanly area



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از عناصر بافت ساز زمینه‌ای در افق لاتریت- بوکسیت منطقه قانلی. a و b) بافت کلوفرمی - جریان‌ی که بخش‌های قهوه‌ای رنگ اکسید آهن است، c) بافت پان‌ایدیومورفیک شامل قطعات درشت اکستراکلاست در زمینه‌ای دانه‌ریز از کانی رسی، d) بافت برشی، e) بافت پلیتومورفیک، f) بافت پیژویدی در زمینه‌ای دانه ریز متشکل از کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن.

Fig. 13. Microscopic images (transmitted plan-polarized light, PPL) of groundmass texture-forming elements in laterite-bauxite horizon of Qanly area. a and b) flow-clloform texture which the brown parts are iron oxide, c) pan-idiomorphic texture including coarse extraclast fragments in a fine-grain clay mineral groundmass, d) breccia texture, e) pletomorphic texture, f) pisoid texture in a fine-grain groundmass consisting of clay minerals and iron oxides.

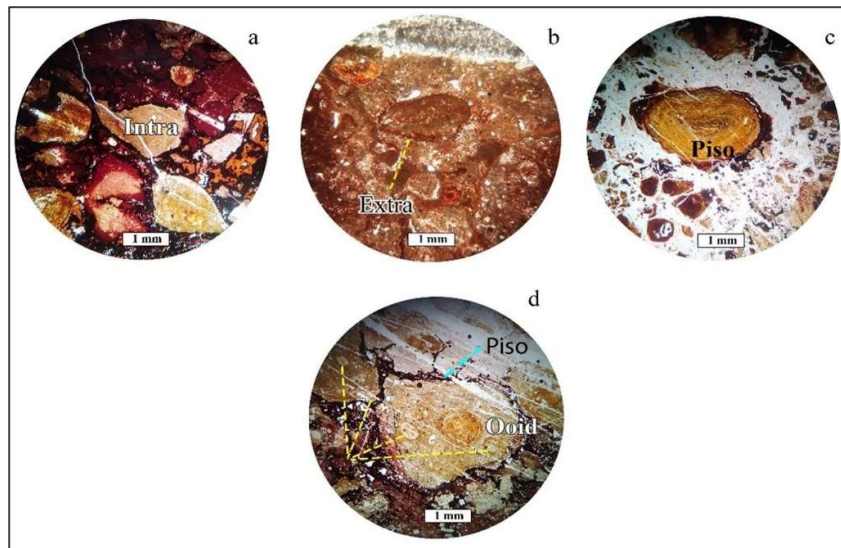
که از ذرات بسیار ریز و یکنواخت غنی از  $Al_2O_3$  و سیلیس تشکیل شده‌اند، دارای منشأ همزاد تا دیاژنتیک بوده و از شواهد برجزا بودن بوکسیت محسوب می‌شوند (ناصری، ۲۰۰۳). از مهم‌ترین عناصر بافت‌ساز زمینه در نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت- بوکسیت قانلی، بافت‌های

#### ۳-۴- بافت‌های زمینه‌ساز (ماتریکس)

براساس باردوسی (۱۹۸۲) عناصر بافتی زمینه شامل تجمعی از کانی‌های یا بلورهای نسبتاً ریز با اندازه‌های کم و بیش یکسان است که مانند سیمانی، عناصر بافتی تمایز یافته در سنگ را احاطه کرده است (شکل ۱۳). این اجزاء

همانند بافت اوویدی بیانگر دانه‌های پوشش‌دار هستند که دارای ساختمان مشابه بوده، با این تفاوت که پیرویدها بزرگ‌تر و تعداد قشرها در آن‌ها بیشتر است (باردوسی، ۱۹۸۲). باتوجه به مطالعات میدانی صورت گرفته و شواهد بافتی، دو مرحله بوکسیت‌زایی برای افق لاتریت-بوکسیت قانلی می‌توان در نظر گرفت، به این صورت که افق لاتریت-بوکسیت به صورت برجا و در اثر فرایندهای لاتریت‌زایی و بوکسیت از سنگ منشأ تشکیل شده است و سپس در داخل محیط رسوبی دچار حمل و جابجایی شده‌اند. خردشدگی و شکستگی‌های کوچک در لایه‌های متحدالمرکز پیرویدها بیانگر حمل و جابجایی آن‌ها است. در نتیجه این جابجایی و ته‌نشست مجدد ذرات، جورشدگی ضعیف در نمونه‌های مورد مطالعه ایجاد شده است.

کلورمی-جریانی (شکل ۱۳ a و b)، برشی و پلیتومورفیک (شکل ۱۳ c, d, e) و پیرویدی (شکل ۱۳ f) هستند. بافت پلیتومورفیک هنگامی تشکیل می‌شود که شرایط محیطی و تکتونیک در طی دیاژنز، بدون تغییر مانده و رسوب‌گذاری مجدد رخ ندهد (زرأسوندی و همکاران، ۲۰۱۲). در این بافت، اندازه بلورهای ماتریکس یا زمینه، بسیار ریزبلور بوده و با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نبوده و اندازه بلورهای زمینه در این بافت، به طور متوسط کمتر از یک میکرومتر (اندازه کانی‌های رسی) است (باردوسی، ۱۹۸۲). معمولاً بافت‌های پلیتومورفیک، پان‌ایدیومورفیک، پیرویدی و اوویدی از شواهد درجازاد بودن (پتراسچک، ۱۹۸۹) و قطعات پلویدها و آواری از شواهد نابرجازاد بودن نهشته‌های لاتریتی بوکسیتی هستند. بافت پیرویدی



شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از عناصر بافت ساز متمایز در افق لاتریت-بوکسیت قانلی. (a و b) به ترتیب قطعات آواری اینتراکلس و اکستراکلس را در زمینه رسی و اکسیدهای آهن نشان می‌دهد. (c) تصویری از یک پیروید که پوسته آن در اثر فرایندهای تکتونیک خرد شده است. (d) تصویری از پیروید که در داخل آن‌ها تجمعی از اووید و پلوید مشاهده می‌شود. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Extra: اکستراکلس، Intra: اینتراکلس، Piso: پیروید، Ooid: اووید).

**Fig. 14. Microscopic images (transmitted plan-polarized light, PPL) of distinct textural elements in laterite-bauxite horizon of the Qanli. a and b) shows intraclast and extraclast fragments, respectively, in the context of clay and iron oxides, c) Pisoid which is crushed due to tectonic processes, d) An image of a pisoid in which an accumulation of ooid and ploid can be seen. Abbreviations are adapted from Whitney and Evans (2010). (Extra: Extraclast, Intra: Intraclast, Piso: Piezoid, Ooid: Ooid).**

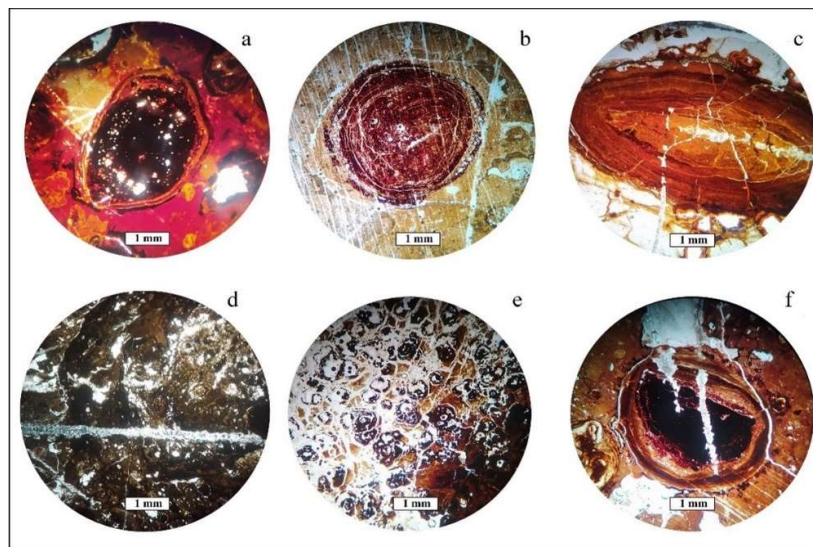
۳۰ درصد پیروید عمدتاً سالم و به میزان کمتر خرد شده هستند، از دیگر ذرات تشکیل دهنده می‌توان به حضور ۵ تا ۱۰ درصد اینتراکلس و ۵ درصد پلوید اشاره نمود (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). اصولاً پیرویدها از هسته و لایه‌های متحدالمرکز در نتیجه تغییرات آب و هوایی طی چند مرحله به وجود می‌آیند و ژئوشیمی محیط نهشت را ثبت می‌کنند. با انجام مطالعات میکروسکوپ نوری بر روی

#### ۴-۴- واحدهای بافت‌ساز متمایز

این واحدها با توجه به مورفولوژی و اندازه آن‌ها، کاملاً از ماتریکس قابل تشخیص هستند. عناصر بافتی متمایز به طور عمده شامل سه دسته عناصر بافتی هم مرکز، کانی‌ها و قطعات آواری می‌باشند. نتایج میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت-بوکسیت قانلی بیانگر آن است که نمونه‌های برداشت شده به صورت تقریبی دارای ۱۵ تا

(لونی و همکاران، ۲۰۱۰؛ شکل ۱۵ c)، ۳- پیژویدهایی با هسته اوویدی که هسته آن‌ها از اوویدهای کروی کوچک‌تر تشکیل شده است. این پیژویدها دلالت بر انتقال مواد بوکسیتی دارند (تایلور و اگلتون، ۲۰۰۴؛ شکل ۱۵ d)، ۴- اجتماع پیژویدهای به رنگ روشن که نشانه‌ای از فرایند آهن‌شویی در منطقه است (وایت، ۱۹۷۶؛ شکل ۱۵ a-d)، و ۵- پیژویدهای خرد شده و بدون پوشش‌های لایه‌ای و با شکل‌های متفاوت که نشان دهنده شرایط محیطی انرژی بالا، حمل و انتقال هستند (اوزتورک و همکاران، ۲۰۰۲؛ شکل ۱۵ e).

پیژویدها تا حدودی می‌توان علت تشکیل لایه‌های لاتریت- بوکسیت و عوامل دخیل در به جود آمدن آن‌ها پی‌برد. مطالعات انجام شده نشانگر حضور ۵ نوع پیژوید در افق لاتریت- بوکسیت این منطقه دارد: ۱- ماکروپیژویدهای سالم و کاملاً گرد با پوسته حفظ شده که اغلب پوشش‌های لایه‌ای آن‌ها از کانی‌های رسی، گوتیت و هماتیت تشکیل شده است. گردشگری پیژویدها اغلب نشانگر حمل و نقل قطعات قبل از نهشته شدن در ماتریکس نرم می‌باشد (دلویگن و مارتین، ۱۹۹۸؛ شکل ۱۵ a-b-f)، ۲- پیژویدهای کشیده و دمبلی شکل که بیانگر تغییر شکل در طی فعالیت‌های تکتونیکی و فشردگی‌اند



شکل ۱۵. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از انواع پیژویدها در افق لاتریت- بوکسیت قانلی. (a- b- f) ماکروپیژویدهای کاملاً گرد شده با پوسته حفظ شده، (c) پیژوید درشت کشیده و دمبلی شکل، (d) پیژویدهای با هسته اوویدی، (e) پیژویدهای خرد شده و بدون پوشش لایه‌ای.

**Fig. 15. Microscopic images (transmitted plan-polarized light, PPL) of various pisoids in laterite-bauxite horizon of the Qanli. a-b-f) rounded macropisoids with preserved crust, c) elongated and dumbbell-shaped pisoids, d) pisoids with an ovoid core, e) crushed pisoids without layered coating.**

استفاده نمود. در این مطالعه از نمودار سه متغیره  $Al_2O_3$ - $Fe_2O_3$ - $SiO_2$  (موتاکیاوا و همکاران، ۲۰۰۳)، برای تعیین نوع لاتریت- بوکسیت مورد مطالعه در منطقه قانلی واقع در جنوب‌خاور زنجان استفاده شده است (شکل ۱۶). طبق این نمودار، افق لاتریت- بوکسیت قانلی در محدوده کانسنگ بوکسیتی قرار گرفته است. در نمودار سه متغیره  $Al_2O_3$ - $Fe_2O_3$ - $SiO_2$  (آلوا، ۱۹۹۴) نیز نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت- بوکسیت قانلی در محدوده لاتریتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۷ a).

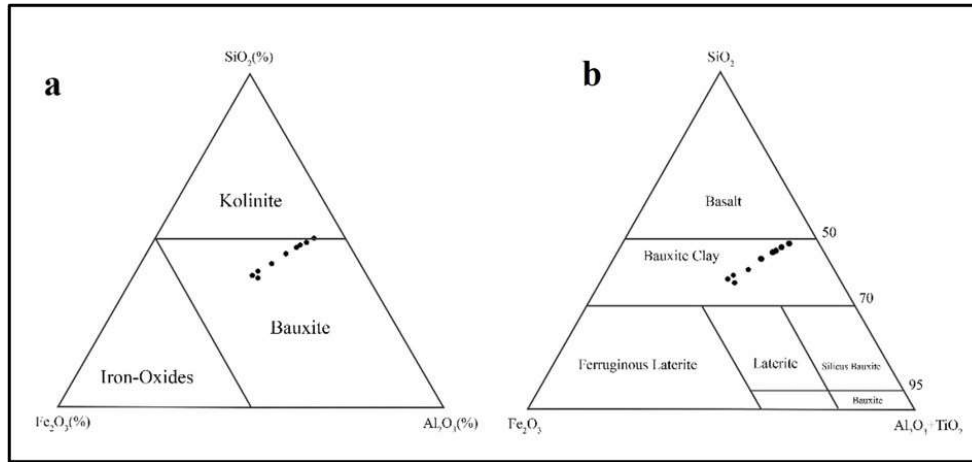
#### ۴-۵- زمین شیمی

تعداد ۹ نمونه از بخش‌های مختلف افق لاتریت- بوکسیت قانلی، جهت تعیین مقدار اکسیدهای عناصر اصلی، به روش‌های XRF در آزمایشگاه شرکت زرازا در تهران آنالیز شد و نتایج این آنالیز در جدول ۱ ارائه شده است.

#### ۵- بحث

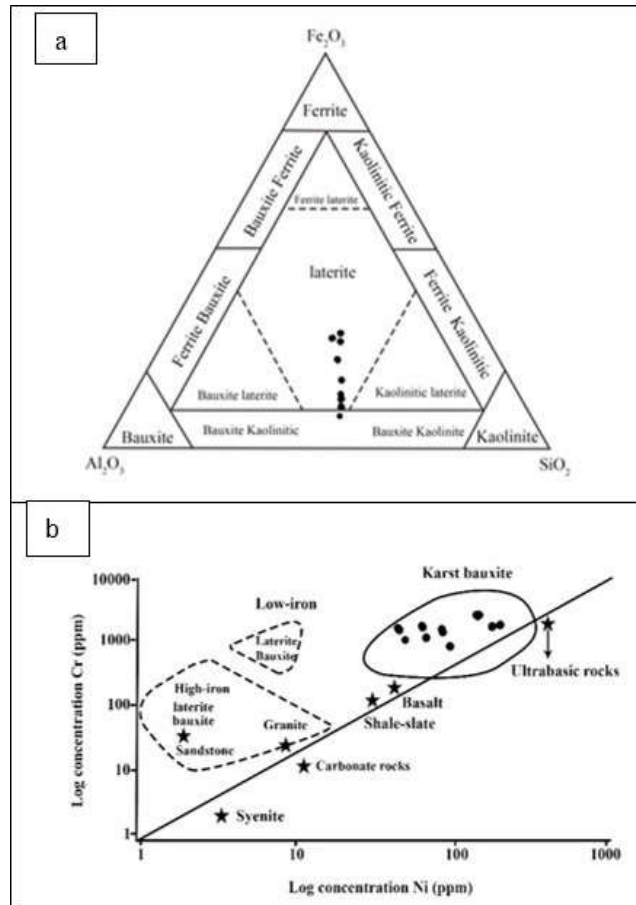
##### ۱-۱- تعیین نوع بوکسیت

با توجه به دامنه تغییرات اکسیدهای اصلی می‌توان از نمودارهای مختلفی برای تعیین نوع افق لاتریت- بوکسیتی



شکل ۱۶. (a) موقعیت نمونه‌های مربوط به افق لاتریت-بوکسیت قانلی بر روی نمودار سه متغیره  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  (موتاکیاوا، ۲۰۰۳) و (b) موقعیت نمونه‌های مربوط به افق لاتریت-بوکسیت قانلی بر روی نمودار سه متغیره  $Al_2O_3+TiO_2-Fe_2O_3-SiO_2$  (موتاکیاوا، ۲۰۰۳).

Fig. 16. a) The position of laterite-bauxite horizon samples on the  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  three-variable diagram (Mutakyahwa, 2003), b) The position of laterite-bauxite horizon samples on the  $Al_2O_3+TiO_2-Fe_2O_3-SiO_2$  three-variable diagram (Mutakyahwa, 2003).



شکل ۱۷. (a) موقعیت نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت-بوکسیت قانلی بر روی نمودار سه متغیره  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  (آلوا، ۱۹۹۴)، (b) نمودار لگاریتمی غلظت Cr در برابر Ni برای انواع نهشته‌های بوکسیتی با سنگ منشأهای مختلف (شورل و سائور، ۱۹۶۸؛ مک‌لتن و همکاران، ۱۹۹۷) و موقعیت نمونه‌های افق لاتریت-بوکسیت قانلی بر روی آن (رفیعی، ۲۰۲۳) (دایره‌های مشکی رنگ).

Fig. 17. a) The position of the samples taken from the laterite-bauxite horizon of Qanli on the  $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$  three-variable diagram (Aleva, 1994), b) the logarithmic diagram of Cr concentration versus Ni for various bauxite deposits with rock origins different (Schroll and Sauer, 1968; Maclean et al., 1997) and the location of the Qanli laterite-bauxite horizon samples on it (Rafiei, 2023) (black circles).

جدول ۱. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های افق لاتریت- بوکسیت قانلی. تمامی داده‌ها برحسب درصد وزنی (wt.%) است.

Table 1. Geochemical analyses results of laterite-bauxite samples in the Qanli area. All data are in weight percent (wt.%).

Element	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
DL	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
CO													
R3A	41.42	33.58	<0.05	0.31	7.15	0.13	0.17	<0.05	0.10	0.13	<0.05	2.95	13.80
R4	31.77	26.70	<0.05	0.46	23.81	0.07	0.99	<0.05	0.11	0.20	<0.05	2.89	12.58
R4A	39.29	31.18	<0.05	0.33	11.95	0.10	0.12	0.09	0.10	0.05	<0.05	2.91	13.53
R5	33.31	25.87	0.05	0.66	22.94	0.28	1.02	<0.05	0.15	0.08	<0.05	2.31	12.92
R6	37.91	29.81	<0.05	0.50	15.04	0.11	0.25	0.08	0.15	0.07	<0.05	2.68	13.04
R6A	41.26	33.28	<0.05	0.14	9.46	0.10	0.08	<0.05	0.13	<0.05	<0.05	2.82	12.55
R10	30.20	23.51	0.05	4.94	23.08	0.26	0.17	0.20	0.12	0.05	<0.05	2.01	15.17
R11	31.24	24.80	<0.05	12.58	8.54	0.22	0.22	<0.05	0.14	0.13	<0.05	2.38	19.50
R12	34.96	27.80	<0.05	0.56	19.09	0.26	0.66	<0.05	0.06	0.15	<0.05	3.08	12.50

#### ۵-۲- نوع کانسار لاتریت بوکسیت

یکی از موضوعات اساسی در بررسی کانسارهای بوکسیتی، تعیین نوع کانسار می‌باشد. بدلیل پیچیدگی فرآیندهای بوکسیتی شدن، تعیین نوع کانسار معمولاً مشکل است (پتراسچک، ۱۹۸۹). به منظور تعیین نوع کانسار افق لاتریت- بوکسیت قانلی از نمودار دو متغیره Cr در مقابل Ni (شورل و سائور، ۱۹۶۸؛ مک‌لتن و همکاران، ۱۹۹۷)، استفاده شده است (شکل ۱۷ b). براساس این نمودار، تمام نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت- بوکسیت قانلی در محدوده بوکسیت‌های کارستی (زیردسته مدیترانه‌ای) قرار گرفته‌اند. براساس باردوسی (۱۹۸۲)؛ لیو و همکاران (۲۰۱۲)؛ لانگ و همکاران (۲۰۱۷) بوکسیت‌های کارستی دارای کانی‌های بوهمیت و دیاسپور (کانی‌های غنی از Al) هستند که بر روی سطوح فرسایشی سنگ‌های کربناته و یا کارستی تشکیل می‌شوند. براساس بونی و همکاران (۲۰۱۳) این نوع از کانسارها در داخل کربنات‌هایی که محدود به خشکی‌ها بوده و به طور محلی یا ناحیه‌ای شواهد ناپیوستگی را نشان می‌دهند، تشکیل می‌شوند. بوکسیت‌های کارستی نوع مدیترانه‌ای دارای سنگ بستر کربناته کم‌عمق بوده که سنگ‌هایی از جمله رس و تناوب رس با سنگ‌آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل آن‌ها را می‌پوشاند.

#### ۵-۳- محدوده تغییرات Eh-pH محیط طی فرایند

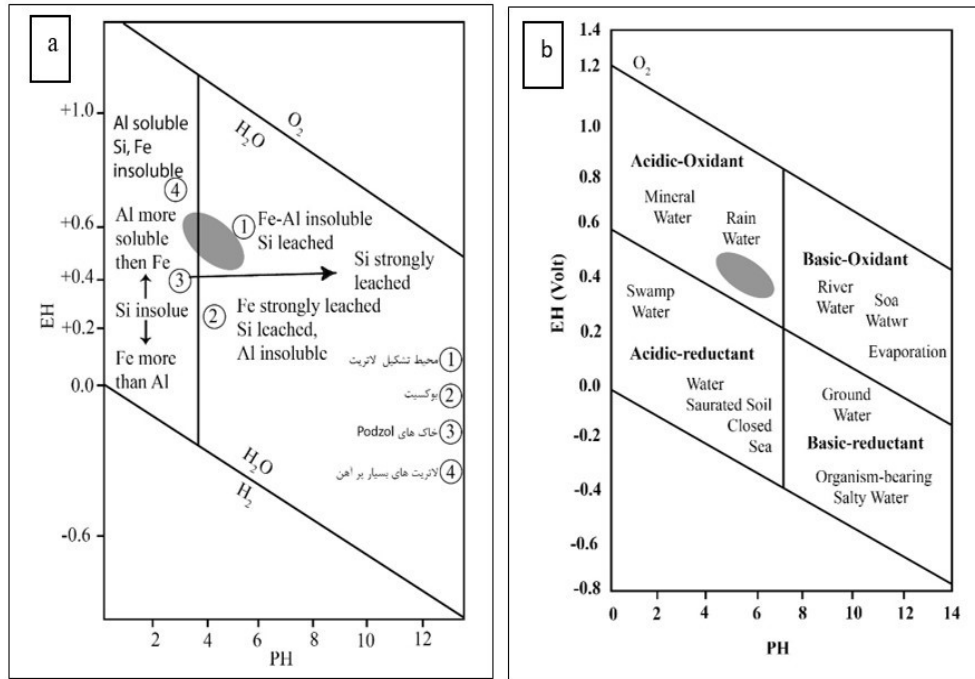
##### بوکسیت‌زایی

انحلال‌پذیری یون‌های آلومینیم و آهن در محدوده pH ۶ تا ۹، به صفر می‌رسد و این یون‌ها به‌صورت کانی‌های

اکسید و هیدروکسید نهشته می‌شوند (کوملوسی، ۱۹۷۶). انحلال سیلیسیم در محدوده pH بین ۵ تا ۹، به میزان ده تا بیست برابر انحلال آلومینیم و آهن است. در این شرایط، بعد از گذشت زمان زیادی از هوازدگی، انحلال مشخصی از سیلیسیم رخ خواهد داد اما آلومینیم و آهن بدون تغییر باقی می‌مانند. در یک محیط با pH ثابت، انحلال آهن در مقایسه با آلومینیم در نتیجه کاهش Eh می‌تواند، افزایش یابد (پترسون، ۱۹۷۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به نتایج مطالعات کانی‌شناسی، به نظر می‌رسد تشکیل افق لاتریتی- بوکسیتی قانلی در pH بین ۳/۵ تا ۶ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۷ رخ داده است (شکل ۱۸ a). شرایط اکسیدان و احیاء نه تنها در تشکیل ترکیبات آهن، بلکه در تشکیل ترکیبات آلومینیم نیز تأثیر می‌گذارد. بر این اساس، گیبسیت و گوتیت در شرایط اکسیدان قوی و محیط اسیدی ضعیف، بوهمیت و هماتیت در شرایط اکسیدان ضعیف و محیط اسیدی ضعیف‌تر، دیاسپور و هماتیت در Eh حدود صفر و در یک محیط خنثی و دیاسپور و شاموزیت در محیط بازی و احیایی تشکیل می‌شوند (کوملوسی، ۱۹۷۶). تشکیل گوتیت در بوکسیت‌ها ممکن است در نتیجه تأثیر آب‌های زیرزمینی حاوی یون‌های فرو بر کانی هیدروکسید فریک باشد. هیدروکسید فریک با فرمول  $2/5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4/5\text{H}_2\text{O}$  هنگام هوازدگی بیوژنتیک کانی‌های حاوی آهن، تحت تأثیر گروهی از باکتری‌ها به‌وجود می‌آید. شرایط تشکیل لپیدوکروسیت نیز شبیه به گوتیت است با این تفاوت که لپیدوکروسیت فاز ناپایدار بوده و با افزایش دما به گوتیت تبدیل می‌شود. ته‌نشینی هم‌زمان هماتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت نیاز به pH بالاتر

گوتیت، بوهمیت، کائولینیت)، ترسیم میدان پایداری کانی‌های مزبور در نمودار Eh-pH محیط‌های طبیعی (شکل ۱۸ b) مشخص می‌شود که محدوده آب‌های سطحی طی تکوین افق لاتریت-بوکسیت قانلی بایستی در حد اکسیدی-اسیدی بوده است.

از ۷ و Eh بیشتر از ۰/۲ دارد (تمور و خانسون، ۲۰۰۶). دیاسپور در Eh پایین‌تر از صفر و محدوده pH بین ۷ تا ۹ تشکیل می‌شود (کوملوسی، ۱۹۷۶). کائولینیت در محیط اسیدی ضعیف و در pH حدود ۶/۵ به وجود می‌آید (گلدکووسکی و اوشاتینسکی، ۱۹۶۴). باتوجه به کانی‌های شناسایی شده در افق لاتریت-بوکسیت قانلی (هماتیت،



شکل ۱۸. a) نمودار Eh-pH و شرایط تشکیل بوکسیت و فرآیند آهن‌شویی و انحلال سیلیس (نورتون، ۱۹۷۳). موقعیت افق لاتریت-بوکسیت قانلی با بیضی خاکستری مشخص شده است. b) نمودار Eh-pH در محیط‌های طبیعی مختلف با توجه به میزان پایداری کانی‌ها (گرلس و چیریس، ۱۹۶۵)، که موقعیت افق لاتریت-بوکسیت قانلی با بیضی خاکستری رنگ مشخص شده است.

Fig. 18. a) Eh-pH diagram and bauxite formation conditions and iron washing and silica dissolution process (Norton, 1973). The position of the Qanli laterite-bauxite horizon is marked with a gray oval. b) Eh-pH diagram in different natural environments according to the stability of minerals (Garrels and Christ, 1965), which the position of the Qanli laterite-bauxite horizon is marked with a gray oval.

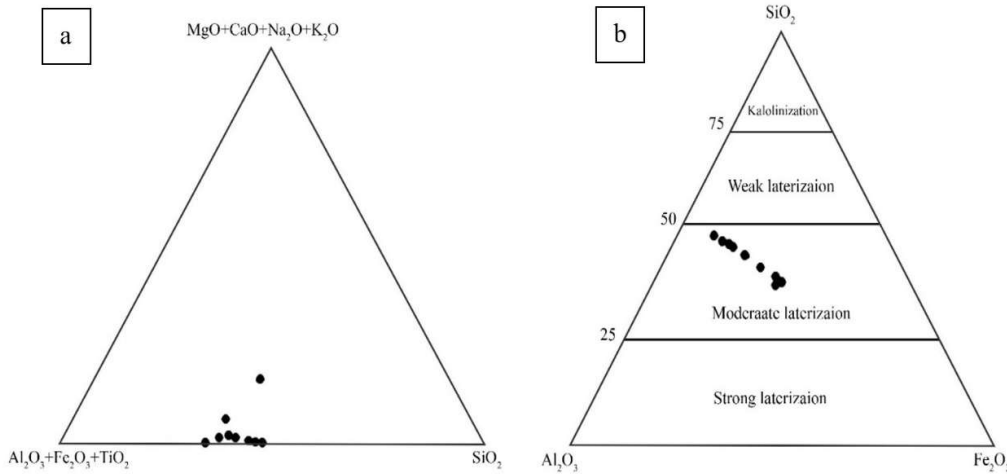
۴-۵- شدت فرآیند هوازدگی  
مسیر هوازدگی طی تشکیل افق لاتریت-بوکسیت قانلی تهی‌شدگی سیلیس و عناصر قلیایی و قلیایی خاکی را نسبت به غنی‌شدگی آهن، تیتانیم و آلومینیم نشان می‌دهد (شکل ۱۹ a). در این افق، طی فرآیند هوازدگی، با کاهش عناصر منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم و افزایش عناصر آلومینیم، آهن و تیتانیم همراه است. طبق تقسیم‌بندی شلمن (۱۹۸۲)، شدت فرآیند هوازدگی و تغییرات شیمیایی ناشی از آن با درجات متفاوتی از لاتریتی شدن توصیف می‌شود. ترسیم نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت-بوکسیت قانلی بر روی نمودار سه متغیره

۵-۵- تغییرات عناصر اصلی  
نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی برای نمونه‌های لاتریت-بوکسیت در منطقه قانلی در امتداد دو پروفیل نمونه‌برداری در شکل ۲۰، نشان داده شده است. براساس این شکل، در پروفیل شماره ۱، از بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی به سمت بخش‌های فوقانی آن، روند تغییرات بیشتر حالت نوسانی داشته و همراه با افزایش و بلافاصله با



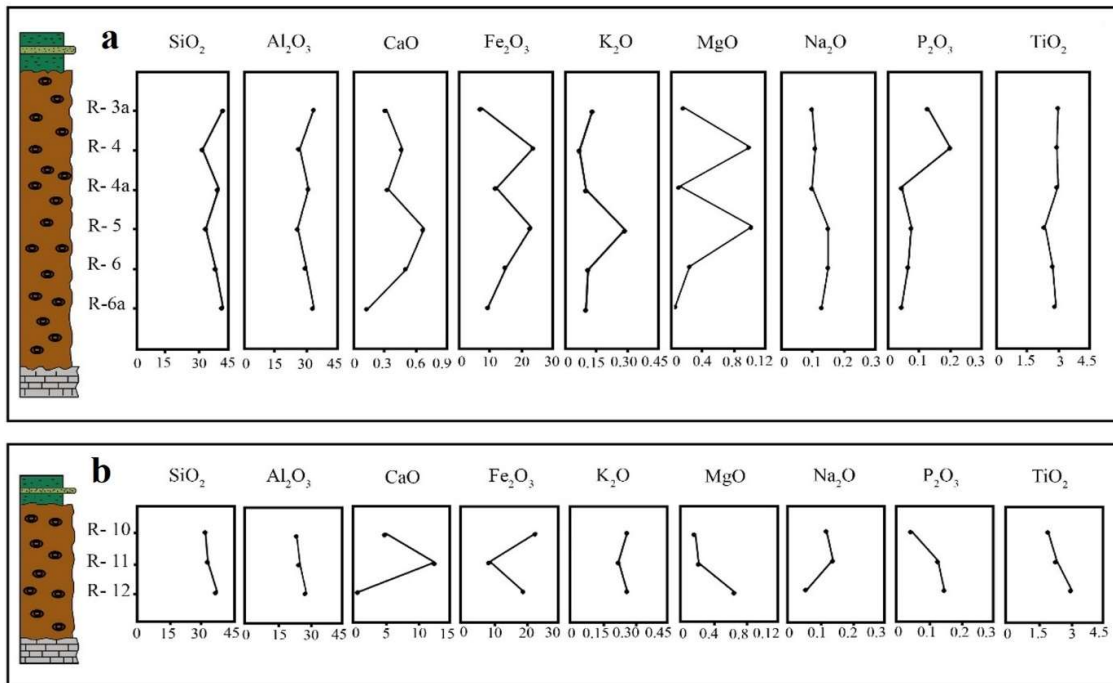
(a) در پروفیل شماره ۲، نیز روند تغییرات  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  تا حدودی مشابه بوده و میزان آن‌ها افزایش پیدا کرده است (شکل ۲۰ b).

کاهش مقادیر بوده است، اما می‌توان اظهار داشت که روند تغییرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  تا حدودی هم‌خوان بوده و میزان آن‌ها افزایش نسبی یافته است، در حالی که میزان  $\text{MgO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  با کاهش نسبی همراه بوده است (شکل ۲۰



شکل ۱۹. a) مسیر هوازدگی طی تشکیل افق لاتریت- بوکسیت قانلی (هیل و همکاران، ۲۰۰۰)، b) موقعیت نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت- بوکسیت قانلی بر روی نمودار سه متغیره  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (شلمن، ۱۹۸۲).

Fig. 19. a) The weathering path during the formation of the Qanli laterite-bauxite horizon (Hill et al., 2000), b) The position of the samples taken from the Qanli laterite-bauxite horizon on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  three-variable diagram (Schellmann, 1982).



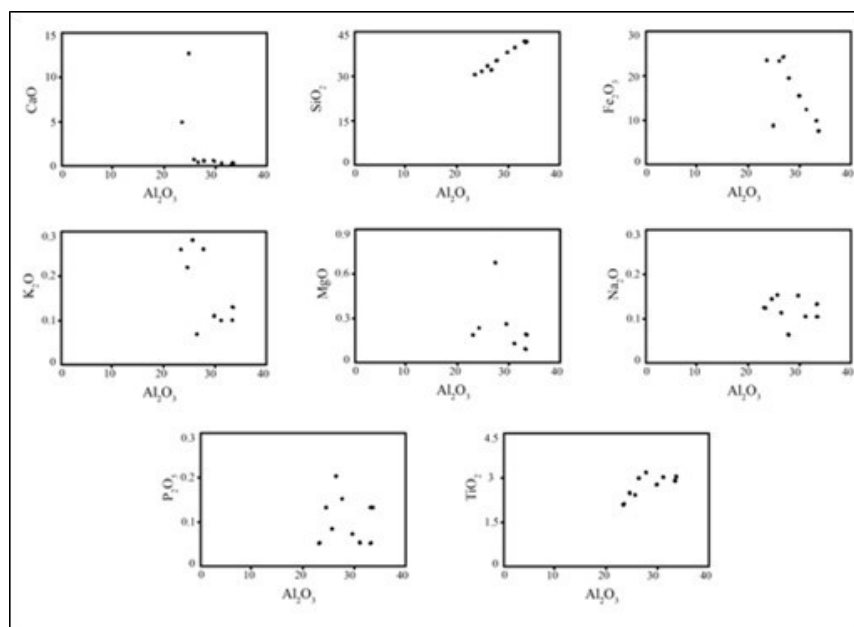
شکل ۲۰. نمودار تغییرات اکسیدهای اصلی در بخش‌های مختلف افق لاتریت- بوکسیت قانلی. a) برش باختری، b) برش خاوری

Fig. 20. The diagram of the main oxides variations in different parts of the Qanli laterite-bauxite horizon, a) western section, b) eastern section.

## ۵-۶- نمودارهای دو متغیره

عناصر مختلف در یک محیط بوکسیتی به سبب داشتن خصوصیات شیمیایی مختلف، رفتارهای زمین‌شناسی متفاوتی را نشان می‌دهند. این در حالی است که برخی عناصر به دلیل ویژگی‌های شیمیایی مشابه، رفتار نسبتاً یکسانی را در حین بوکسیت‌زایی داشته و معمولاً الگوی توزیع مشابهی را نشان می‌دهند. محاسبه ضرایب همبستگی عناصر با استفاده از نتایج آنالیزهای شیمیایی، یکی از راه‌های معمول جهت بررسی روند تغییرات عناصر و نحوه توزیع و پراکندگی آن‌ها است. با این عمل می‌توان نحوه تغییرات فراوانی دو یا چند عنصر را یکدیگر را مشخص نمود. نمودارهای دو متغیره تغییرات  $Al_2O_3$  نسبت به دیگر اکسیدهای عناصر اصلی برای نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت-بوکسیت قانلی در شکل ۲۱، نشان داده شده

است. براساس این نمودارها، اکسید آلومینیم با اکسیدهای عناصر کلسیم، آهن و پتاسیم همبستگی منفی نشان می‌دهند. همبستگی منفی این عناصر با آلومینیم را می‌توان به تحرک این عناصر حین فرآیندهای هوازدگی تحت شرایط Eh و pH ویژه مرتبط دانست که طی آن، آلومینیم در محیط باقی مانده و سایر عناصر از محیط خارج شده‌اند. در pH بین ۴/۵ تا ۸، ژل‌های آلومینیم‌دار دارای کمترین قابلیت انحلال هستند (یاریو و کراس، ۲۰۰۱). در شرایط قلیایی، آلومینیم به صورت محلول از محیط خارج می‌شود ولی آهن بسته به شرایط Eh به صورت ترکیبات مختلفی ممکن است، رسوب کند. این مسئله باعث ایجاد همبستگی منفی بین  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  می‌شود. عناصر منیزیم، سدیم، فسفر و تیتانیم دارای یک روند ثابت تا پراکنده با آلومینیم بوده و همبستگی مثبت و یا منفی شاخصی را نشان نمی‌دهند.



شکل ۲۱. نمودار همبستگی اکسید عناصر اصلی در برابر اکسید آلومینیم برای نمونه‌های برداشت شده از افق لاتریت-بوکسیت قانلی  
Fig. 21. Correlation diagram of main oxide elements against aluminum oxide for samples taken from Qanli laterite-bauxite horizon.

آلومینوسیلیکاته حاصل می‌شوند (باردوسی، ۱۹۸۲). بوکسیت‌های نوع تیخون، نهشته‌های تخریبی و حمل شده‌ای هستند که سنگ‌های آلومینوسیلیکاته فرسایش یافته را می‌پوشانند، اما هیچ ارتباط زایشی با این سنگ‌ها ندارند (عابدینی و کلاگری، ۲۰۱۴). این ذخایر محصول فرسایش نهشته‌های بوکسیت-لاتریتی هستند. بوکسیت‌های کارستی حاوی بوهمیت و یا دیاسپور به

بر اساس ترکیب کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و جنس سنگ میزبان، نهشته‌های بوکسیتی به سه نوع اصلی لاتریتی، کارستی و تیخون تقسیم‌بندی می‌شوند (به عنوان مثال: باردوسی، ۱۹۸۲؛ رزاسوندی و همکاران، ۲۰۱۲). بوکسیت‌های نوع لاتریتی حاوی گیبسیت به عنوان کانی اصلی اکسید آلومینیم آبدار بوده و عموماً به صورت نهشته‌های برجا از لاتریتی شدن مستقیم سنگ‌های

زون ساختاری- زمین‌شناسی البرز، ایران مرکزی و زاگرس تشکیل شده است (شریفی و همکاران، ۱۹۹۱). کانه‌زایی بوکسیت در زون البرز محدود به زمان پرمین- ژوراسیک بوده و در زون ایران مرکزی محدود به زمان تریاس- ژوراسیک زیرین و در زون زاگری محدود به زمان کرتاسه بالایی است. در جدول ۲، ویژگی‌های این افق با انواع کانسارهای لاتریت- بوکسیت کارستی دیگر مناطق ایران مرکزی و البرز در زمان پرمو- تریاس مقایسه شده است.

عنوان کانی‌های اصلی غنی از آلومینیوم می‌باشند. این بوکسیت‌ها بر روی سطوح کارستی و یا فرسایشی سنگ‌های کربناته تشکیل می‌شوند (باردوسی، ۱۹۸۲). با توجه به شواهد صحرایی، ساخت، بررسی بافتی و ویژگی‌های انواع کانسارهای بوکسیتی، افق لاتریت- بوکسیت قانلی بیشترین شباهت را با کانسارهای بوکسیت کارستی (زیر تیپ مدیترانه‌ای) در طبقه‌بندی باردوسی (باردوسی، ۱۹۸۲) دارد. کانه‌زایی بوکسیت در ایران در سه

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های اصلی افق لاتریت- بوکسیت قانلی با برخی از کانسارهای لاتریت- بوکسیت کارستی پرمو- تریاس در ایران.  
Table 2. Comparison of the main features of the Qanli laterite-bauxite horizon with karst-type laterite-bauxite deposits of Permo-Triassic in Iran.

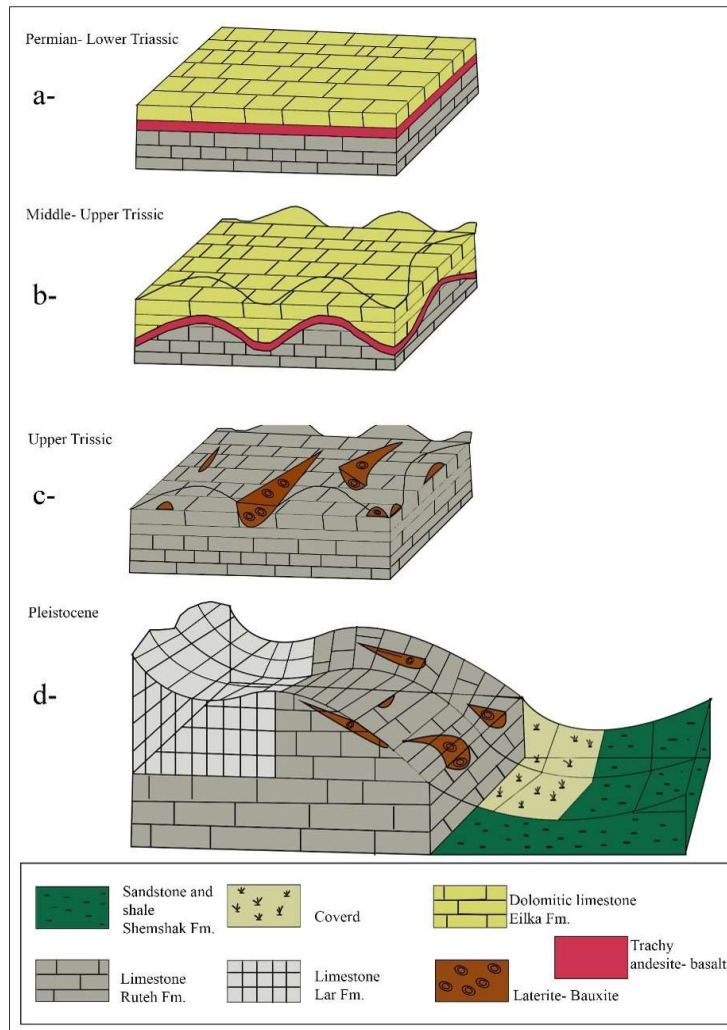
	Qanli	Biglar	Qarkhotlou	Heydarabad	Qoppi
Location	SE Zanjan	SW Qazvin	SW Zanjan	SE Urmia	SE Urmia
Host rock	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.
Cap rock	Shemshak Fm.	Elika Fm.	Shemshak Fm.	Mila Fm.	Mila Fm.
Mineralogy	Hem, Kln, Bhm, GTH	Dsp, Hem, Ant, Kln	Hem, Kln, Bhm, Dsp, Prl	Hem, Dsp, Cld, Crn	Hem, Dsp, Cld, Cr
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt.%)	23-34	19-65	17-41	21-51	21-51
Age	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic
Geometry	Layering	Layering	Layering	Layering	Layering
Texture	Pelitimorphic, flow, breccia, pseudoporphyry, oolitic, pisolitic	Pseudobreccia, pseudoporphyry, collomorphic, nodular, skeletal	Pelitimorphic, microgranular, flow, breccia, pseudoporphyry, oolitic, pisolitic	Microgranular, pseudoporphyry, oolitic, pisolitic, flow	Microgranular, pseudoporphyry, oolitic, pisolitic, flow
Origin	Autochthonous, allochthonous	Autochthonous	Autochthonous, allochthonous	Autochthonous	Autochthonous
Precursor rock	Trachyandesite basalt	Andesite	Trachyandesite basalt	Diabase	Diabase
Type of bauxite	Mediterranean	Mediterranean	Mediterranean	Mediterranean	Mediterranean
karst bauxite	karst bauxite	karst bauxite	karst bauxite	karst bauxite	karst bauxite

الیکا (تریاس زیرین) در این منطقه تشکیل شده است (زه‌دی و ربانی، ۲۰۲۰) (شکل ۲۲ a). سازند الیکا نیز در منطقه مورد مطالعه رخنمون ندارد اما در مطالعات (زه‌دی، ۲۰۱۸) در برش آقی‌بلاغ واقع در باختر زنجان، توالی‌های سازند الیکا شناسایی شده که از آهک‌های ورمیکوله‌دار و دولومیت‌های نازک لایه تشکیل شده است (زه‌دی، ۲۰۱۸). مرحله دوم، طی فاز کوهزایی سیمین پیشین (تریاس میانی- بالایی)، واحدهای سنگی منطقه دچار چین‌خوردگی و بالآمدگی شده و این چین‌خوردگی سبب خارج شدن منطقه از آب می‌گردد. بعد از خروج از آب، منطقه تحت شرایط آب و هوای گرم حاره‌ای (زه‌دی، ۲۰۱۸؛ هوو و همکاران، ۲۰۱۷؛ آمل و همکاران، ۲۰۱۵؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۵؛ نوری‌ناو، ۲۰۱۵) قرار گرفته

۵-۷- الگوی تشکیل افق لاتریت- بوکسیت قانلی  
با توجه به نتایج حاصل از مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌شیمیایی و آنالیزهای XRF، مراحل تشکیل و تکامل افق لاتریت- بوکسیت قانلی را می‌توان به صورت توالی در مراحل زیر خلاصه نمود (شکل ۲۲). مرحله اول که با ته‌نشست توالی‌های آهکی سازند روته به سن پرمین میانی و واحدهای گدازه‌ای زیردریایی تراکی- آندزیتی بازالتی شروع می‌شود، لازم به توضیح است که واحدهای گدازه‌ای تراکی- آندزیتی بازالت در منطقه قانلی رخنمون ندارد، اما در جنوب‌باختر منطقه قانلی (منطقه قارخاتلو) واحد گدازه‌ای تراکی آندزیتی بازالت شناسایی شده است (نوری‌ناو، ۲۰۱۵). در ادامه توالی‌های کربناتی و دولومیتی به همراه لایه‌های کم ضخامت کنگلومرایی سازند

نامتحرک از جمله، Al, Fe و Ti در بخش‌های سطحی باقی مانده و غنی شده‌اند (Gu et al., 2013; Yu et al., 2014). مرحله چهارم، نهشته‌های آواری سازند شمشک (تریاس بالایی - ژوراسیک زیرین) و سازند لار با پیشروی آب دریای ژوراسیک بر روی افق لاتریت- بوکسیت نهشته می‌شود، که سبب محفوظ ماندن افق لاتریت- بوکسیت از فرسایش شده است. در نهایت با بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش، ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۲۲ d).

است (شکل ۲۲ b). مرحله سوم، سازند الیکا به طور کامل در منطقه مورد مطالعه، در اثر فرایندهای شدید هوازدگی و فرسایش از بین رفته و گدازه‌های زیردریایی تراکی- آندزیتی‌بازالتی که در زیر سازند الیکا قرار داشت، بدون هیچ پوششی در مقابل فرایندهای هوازدگی قرار گرفته و هوازده شده‌اند (شکل ۲۲ c). در طی این مرحله و تحت چنین شرایطی، با پیشرفت فرایندهای هوازدگی، عناصر قلبایی به همراه سیلیس از سنگ منشأ تراکی- آندزیتی‌بازالتی شسته شده و از محیط خارج شده‌اند. در اثر این فرایند عناصر



شکل ۲۲. نمایی شماتیک از مراحل تشکیل و تکامل افق لاتریت- بوکسیت قانلی. a- رسوب‌گذاری توالی‌های رسوبی سازند روت، گدازه تراکی آندزیت- بازالتی و سازند الیکا در منطقه. b- چین‌خوردگی و خروج از آب توالی‌های رسوبی منطقه طی فاز کوهزایی سیمیرین پیشین. c- فرسایش سازند الیکا و هوازدگی گدازه تراکی آندزیتی تحت شرایط آب و هوای گرم حاره‌ای و رسوب این گدازه تراکی آندزیتی، به صورت افق لاتریت- بوکسیت در حفره‌های انحلالی (کارست) سازند روت. d- رسوبات سازند شمشک و لار و محفوظ ماندن افق لاتریت- بوکسیت از فرسایش و شکل‌گیری فرم کنونی منطقه قانلی.  
 Fig. 22. Schematic view showing the formation and evolution of Qanli laterite-bauxite horizon. A- Sedimentation of sedimentary sequences of Ruteh Formation, trachy andesite-basalt lava and Eilka Formation in the region. B- Folding and subaerial exposure of the sedimentary sequences during the early Cimmerian orogeny phase. C- The erosion of Eilka formation and the weathering of trachy-andesite lava under the warm tropical climate conditions and the deposition of this trachy-andesite lava in the form of laterite-bauxite horizon in the dissolution cavities (karst) of Ruteh Formation. D- The sedimentation of Shemshak and Lar formations and the protection of the laterite-bauxite horizon from erosion and the formation of the recent form of the Qanli region.

- Journal of Crystallography and Mineralogy, 4: 503 - 518 (In Persian).
- Alavi, M (1991) Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnant in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103 (8): 983- 992.
- Alavi-Naini, M (1994) Geological Map Iran 1:100.000 Series Khodabandeh Map, Geological Survey of Iran.
- Aleva, G. J. J (1994) Laterites: Concepts, geology, morphology and chemistry. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Clay Minerals, 31 (3): 440-441.
- Amel, H., Jafarian, A., Husinec, A., Koeshidayatullah, A., and Swennen, R (2015) Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish Gas Field, Zagros Basin. Marine and Petroleum Geology, 67: 57-71.
- Assereto, R (1963) The Paleozoic formations in central Elburz (Iran), (preliminary note). Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia, 69 (4): 503-543.
- Bardossy, G. Y (1982) Karst Bauxites. Bauxite deposition on carbonate rocks. Joint edition with Elsevier scientific publishing company Amsterdam. 441p.
- Boni, M., Rollinson, G., Mondillo, N., Balassone, G., and Santoro, L (2013) Quantitative mineralogical characterization of karst bauxite deposits in the southern Apennines, Italy. Economic Geology, 108 (4): 813-833.
- Delvigne, J. E., and Martin, R. F (1998) Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering. Journal of Petrology, 41 (3): 475-476.
- Esatoglu, A. H (2011) Foraminiferal paleontology, biostratigraphy and sequence stratigraphy of the permian-triassic boundary beds of the bolkar dağı unit (Central Taurides, Turkey) (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Eshghabadi, M (2015) Final exploration report of laterite in Qarkhotlou area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, p 86 (In Persian).
- Filimonova, T. V., and Isakova, T. N (2019) Dynamics of development of the small foraminiferal biota during early Kungurian (Permian) as evidenced from the Chikali section, Middle Urals, Russia. Revue de Micropaléontologie, 63: 45-63.
- Folk, R. L (1962) Practical classification of limestones. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 43(1): 1-38.
- Folk, R. L (1980) Petrology of sedimentary rocks. Austin, Texas, Hemphill, 159 p.
- Garrels, R. M., and Christ, C. L (1965) Solution, Minerals and Equilibria. Harper and Row, New York, p.450.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام شده هماتیت، گوتیت، بوهمیت، کائولینیت کانی‌های اصلی موجود در نهشته بوکسیت قانلی هستند که با ایلمنیت، روتیل، لیبیدوکروسیت و کلریت همراهی می‌شوند. وجود بافت‌های پان‌ایدیومورفیک، پلیتومورفیک، پیزویدی و اوویدی در نهشته بوکسیت قانلی بیانگر تشکیل برجای این نهشته بر روی سنگ منشأ خود است. با این وجود، حضور قطعات اکستراکستی و آواری و همچنین ساخت‌های جریان‌ی و برشی نشان دهنده حمل و جابه‌جایی کوتاه مواد بوکسیتی از محیط اولیه تشکیل و ته‌نشست مجدد در محیط‌های رسوبی کارستی و یا سطوح فرسایشی است. نهشته بوکسیت قانلی از نوع بوکسیت و رس- بوکسیتی بوده و دارای سنگ منشأ تراکی آندزی بازالتی است. این افق احتمالاً در pH بین ۳/۵ تا ۶ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۷ تشکیل شده و درجات متوسطی از فرایند لاتریتی شدن را متحمل شده‌اند. توالی مورد مطالعه در منطقه قانلی، یک نهشته بوکسیت کارستی (زیرتیپ مدیترانه‌ای) است که از هوازدگی گدازه‌های تراکی آندزی- بازالتی بر روی سطوح کارستی و یا فرسایشی سازند روته تشکیل شده است. این نهشته، یکی از ذخایر بوکسیتی موجود در محور سلطانیه- ماهشان است که بیانگر نبود چینه‌ای بین پرمین و تریاس زیرین در شمال باختر ایران می‌باشد. بررسی این مرز فرسایشی می‌تواند به اکتشاف ذخایر دیگری از بوکسیت در محور سلطانیه- ماهشان و شمال باختر ایران منجر گردد.

## ۷- قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از سردبیر محترم و داوران محترم مجله رسوب‌شناسی کاربردی به خاطر راهنمایی‌های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر می‌نمایند.

## References

- Abedini, A (2002) Economic geological survey of bauxite-laterite deposits in western Midandawab (around Qapi Baba Ali village). Master's thesis, Tabriz University, 130 pages (In Persian).
- Abedini, A., and Kalagiri, A. A (2009) Mineralogy and origin of Permian bauxite deposits in northern Saqqez, Kurdistan province. Iranian

- Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Feng, Y., and Cai, S (2012) Mineralogical characteristics of the super-large Quaternary bauxite deposits in Jingxi and Debao counties, western Guangxi, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 53-62.
- Long, Y., Chi, G., Liu, J., Jin, Z., and Dai, T (2017) Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen-Qingzhen area, Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 91: 404-418.
- Maclean, W., Bonavia, F., and Sanna, G (1997) Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: Evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia. *Mineralium Deposite*, 32 (6): 607-616.
- Medadi, M., Mosaddegh, H., Aleali, S. M., and Majidifard, M. R (2017) Estimation of species richness of Permian foraminifera in non-parametric methods and investigation of its change trend in Central Alborz, Western Tethys. *Open Journal of Geology*, 7 (05): 666.
- Mehrabi, H., HossainRahimpour-Bonab, H., Enayati-Bidgoli, A. H., and Esrafil-Dizaji, B (2015) Impact of contrasting paleoclimate on carbonate reservoir architecture: Cases from arid Permo-Triassic and humid Cretaceous platforms in the south and southwestern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126: 262-283.
- Mutakyahwa, M., Ikingura, J., and Mruma, A (2003) Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto district, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, 36 (4): 357-369.
- Naseri, M (2003) Investigating the geochemistry of Jajarm bauxite deposit with a perspective on its capabilities and limitations in industrial application. Master's thesis, Faculty of Science, Ferdasi University of Mashhad, 126 p (In Persian).
- Norton, S. A (1973) Laterite and bauxite formation. *Economic Geology*, 68 (3): 353-361.
- Nouri-Nav, F (2018) Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of karstic bauxite deposit of Qarkhotlo, southwest of Zanjan. Master's thesis, Zanjan University, 101 pages (In Persian).
- Öztürk, H. S., Hein, J. R., and Hanilçi, N (2002) Genesis of the Dogankuzu and Mortas bauxite deposits, Taurides, Turkey: Separation of Al, Fe, and Mn and implications for passive margin metallogeny. *Economic Geology*, 97 (5): 1063-1077.
- Patterson, S. H (1967) Bauxite reserves and potential aluminium resources of the world. Report, USGS Numbered Series Bulletin, 1228, 176 p.
- Petrascheck, W (1989) The genesis of allochthonous karst-tyoe bauxite deposits of Gladkovsky, A., and Ushatinsky, I (1964) On the mineralogical composition of the largest bauxite deposits of the world, Their origin and alumina minerals and bauxites. Regularities of mineral deposition and distribution in the Urals. Tr. Inst. Geol., Ural. Fil., Akad. Nauk. SSSR, 64 (3): 5-40.
- Gu, J., Huang, Z., Fan, H., Jin, Z., Yan, Z., and Zhang, J (2013) Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 44-59.
- Hill, I., Worden, R., and Meighan, I (2000) Geochemical evolution of a palaeolaterite: The Interbasaltic Formation, Northern Ireland. *Chemical Geology*, 166 (1-2): 65-84.
- Hou, Y. L., Zhong, Y. T., Xu, Y. G., and He, B (2017) The provenance of late Permian karstic bauxite deposits in SW China, constrained by the geochemistry of interbedded clastic rocks, and U-Pb-Hf-O isotopes of detrital zircons. *Lithos*, 278-281: 240-254.
- Imamalipour, A., and Mirmohammadi, M (2011) Mineralogy and geochemistry of corundum-bearing metabauxitelaterite from Heydarabad, SE Urmia, NW Iran. *Iranian journal of Crystallography and Mineralogy*, 19 (1): 59- 72 (In Persian).
- Intezari, A (2006) Economic geological survey of bauxite laterite deposits in Mandil-Basr, southeast of Maragheh. Master's Thesis, Faculty of Science, Tabriz University, 123 p (In Persian).
- Kangarani, F (2008) Consideration of geochemistry and mineralogy in Biglar bauxitic horizon (northwest of Abgarm, Gazvin province). M.Sc. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, p. 100 (In Persian).
- Khajeh Mohammadlou, N (2004) Mineralogy, geochemistry and genesis of bauxite deposits in the south of West Azerbaijan Province and determining their use. Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, 134 p (In Persian).
- Kia-Ashkorian, M., Shamanian, Gh., and Shafiei, B (2011) Mineralogy, geochemistry and origin of Permo-Triassic bauxite horizon Khosh Yilaq, southeast of Azadshahr. *Applied Geology Quarterly*, 3: 269-279 (In Persian).
- Komlóssy, G (1976) Mineralogie, geochimie et genetique des bauxites du Vietnam du Nord. *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 20 (3-4): 199-244.
- Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q., Sun, S., and Meng, J (2010) Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 105 (3): 137-152.

- Deh-now bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 48: 125-138.
- Zohdi, A (2018) Sedimentary environment and sequence stratigraphy of the Ruteh Formation in the west of Zanjan (Agh-Bolagh section). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 27 (108): 133–144 (In Persian).
- Zohdi, A., Rabbani, J (2019) Formation mechanisms of intraformational conglomerate: Case study in Triassic and Jurassic of the Zanjan area. *Applied Sedimentology*, 7(14): 57-70. doi: 10.22084/psj.2019.3404.
- southern Europe. *Mineralium Deposita*, 24 (2): 77-81.
- Rabbani, J., Mirzaie Ataabadi, M., and Zohdi, A (2023) Depositional system and paleogeography of Miocene strata in the Northeast of Mahneshan (Zanjan). *Applied Sedimentology*, 11(21): 228-242. doi: 10.22084/psj.2022.26540.1360.
- Rafiei, A (2023) Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Qanly laterit-bauxite horizon, SE Zanjan. Master's thesis, University of Zanjan (In Persian).
- Schellmann, W (1982) Eine neue Laterit definition. *Geologisches Jahrbuch - Reihe D*, 58: 31-47.
- Schroll, E., and Sauer, D (1968) Beitrage zur geochemie von titan, chrom, nickel, cobalt, vanadium and molybdan in bauxitischen gesteinen und das problem der stofflichen Herkunft des Aluminiums. *Travaux ICSOBA*, 5: 83-96.
- Sharifi, M., Rahimzadeh, F., and Ehsanbakhsh, M (1991) Bauxite deposits related to the Tethyan Basins in Iran. *Journal of Acta Geologica Hungaria*, 413-425.
- Stoklin, J., and Efteharnzhad, J (1969) Geological Map of Iran 1:100.000 Series Zanjan map.
- Taylor, G., Eggleton, T (2004) Little balls: The origin of the Weipa bauxite. *Regolith 2004*, 350-254.
- Temur, S., Kansun, G (2006) Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27 (4): 512-522.
- White, A (1976) Genesis of low iron bauxite, northeastern Cape York, Queensland, Australia. *Economic Geology*, 71(8): 1526-1532.
- Whitney, D. L., and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185-187.
- Yarahmadzahi, H., and Vachard, D (2017) The uppermost Carboniferous (Gzhelian) - Lower Permian (Asselian- Sakmarian) stratigraphy and smaller foraminifers of the Ozbak-Kuh region (Tabas Block, east central Iran). *Geological journal*, 53 (2): 510-526.
- Yariv, S., and Cross, H (2001) Structure and surface acidity of clay minerals. *Organo-clay complexes and interactions* (p. 13-50).
- Yu, W., Ruihu, W., Qilian, Z., Yuansheng, D., Yue, C., and Yuping, L (2014) Mineralogical and geochemical evolution of the Fusui bauxite deposit in Guangxi, south China: From the original Permian orebody to a Quarternary Salento-type deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 146: 75-88.
- Zarasvandi, A., Carranza, E. J. M., Ellahi, S. S (2012) Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and

## Stratigraphy, geochemistry and genesis of Qanli laterite-bauxite horizon, southeast of Zanjan

A. Rafiei<sup>1</sup>, G. Nabatian<sup>2\*</sup>, J. Rabbani<sup>3</sup> and A. Zohdi<sup>4</sup>

1- M. Sc. (graduated), Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2, 4- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

\* gh.nabatian@znu.ac.ir

Received: 2024.2.16 Accepted: 2024.5.21

### Abstract

The Qanli laterite-bauxite horizon is located in the Central Iranian Zone, at a distance of 80 km from Zanjan city. The studied units at this area include sequences of the Ruteh and the Shemshak Formations. Based on sedimentary facies analysis and study of skeletal and non-skeletal allochems, it can be concluded that the sedimentary environment of this formation is a ramp-type carbonate platform. According to the fieldwork studies, the Qanli laterite-bauxite horizon is stratiform and located at the final section of the Ruteh and below the Shemshak Formation. Mineralogical studies show that the laterite-bauxite horizon consists of hematite, goethite, boehmite and kaolinite with a few amounts of lipdocrosite, rutile, chlorite and ilmenite. Microgranular, pletiomorphic, flow-colloform, pisoidic, ooidic, peloidic and extraclast are the most important textures in these strata. Different chemical diagrams show that the laterite-bauxite horizon of Qanli deposit is located in the range of bauxite, bauxite clay and laterite. According to the mineralogical studies, it seems that the formation of laterite-bauxite horizon of Qanli occurred at pH between 3.5 to 6 and Eh about 0.4 to 0.7 and it has undergone moderate degrees of lateritization process. Current research indicate that the laterite-bauxite horizon of Qanli is the most similar to the karst bauxite deposits. Due to the expansion of Permian and Jurassic units in this area and nearby areas, the study and investigation of the Qanli laterite-bauxite horizon can be considered as an exploration key for similar areas in the Central Iranian zone.

**Keywords:** Laterit-bauxite, Ruteh Formation, Central Iranian Zone, Qanli, Zanjan

### Introduction

The laterite bauxite horizon deposits of the Qanli is located in the southeast of Zanjan province. This horizon was formed during the Permian geological time at the top of the Ruteh Formation (the Ruteh Formation in this area is composed of foraminifera fossil bearing carbonate strata). Oxidized red layers in this horizon show that this horizon is formed during the oxidation and reduction fluctuation conditions. The presence of boehmite and hematite indicates the weak acidity and oxidation conditions of the environment during that time.

### Materials and Methods

The laterite-bauxite deposits of the Qanli area and also the uppermost layers of the Ruteh and lower parts of the Shemshak Formations were investigated in this research. Sandstone layers of the Shemshak formation were classified using Fulk (1962). Age determination of the

uppermost layers of the Ruteh Formation has been carried out according to the index foraminifera fossils. Also, the types of the most important minerals and textures forming the laterite bauxite horizon of Qanli were identified. Finally, the type of this horizon was determined using the integrated information. It should be noted that all rock samples and thin sections are documented in the Department of Geology, University of Zanjan.

### Discussion and Results

According to the mineral studies, hematite and the goethite are the most important iron-bearing minerals of this horizon, and goethite mineral is the weathering product of iron oxide minerals, including hematite. Goethite and hematite minerals are mostly observed in the center and margins of pisoids and ooids, well as and also in the veins of the rock samples. The most important aluminum-bearing mineral that has been observed in this horizon is



boehmite, which is placed in the center and margins of pisoid and ooid grains, as well as in the form of amorphous grains in the clay texture. Idiomorphic, microgranular, pletiomorphic, and flow-colloform are the most important textures in the samples. Other distinctive textures such as pisoidic, ooidic, peloidic, and extraclast, have been observed in the studied samples

### **Conclusions**

The laterite bauxite horizon in the Qanli area is four meters thick and has hundred meters of lateral continuity. The most important minerals in this horizon include hematite, goethite, boehmite, and kaolinite, with a few amounts of lipdocrosite, rutile, chlorite, and ilmenite. Idiomorphic,

microgranular, and pletiomorphic textures, besides the extraclasts, crushed fragments, and flow-colloform textures, show the short distance transport of the sediments from the source and redeposited in the karst sedimentary environments or erosion surface. This horizon can be classified as bauxite and clay-bauxite types that formed from trachy andesite basalt rock. This sequence was formed by the weathering of trachy andesite basalt rocks on the uppermost layers of the Ruteh Formaition.