

کانی‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های کربناتی میزبان کانسار سرب - روی نخلک، پهنه ایران مرکزی

پرستو قلی‌زاده^۱، علی عابدینی^{۱*}، فرهنگ علی‌یاری^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۶/۲۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۸/۱۲)

چکیده: کانسار سرب - روی نخلک در ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک، استان اصفهان، در پهنه ایران مرکزی واقع است. این کانسار با سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین میزبانی می‌شود. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهند که کلسیت و دولومیت در این سنگ‌های کربناتی با کانی‌هایی چون کوارتز، پلاژیوکلاز، کائولینیت، اسمکتیت، ایلیت و همتایت همراهی می‌شوند. بر اساس مقادیر نسبت CaO/MgO (۵۱/۲۹-۱۱۸)، سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از آهک دولومیتی و دولومیت کلسیتی تشکیل شده‌اند. مقادیر عناصر خاکی نادر (REE) در این سنگ‌ها در گستره ۸/۶۷ تا ۲۱/۳۰ گرم در تن متغیر بوده که بیشتر از مقادیر کربنات‌های دریایی (۱۴-۰/۴ گرم در تن) است. الگوی توزیع REE به‌نجار شده به شیل پس از آرکئن استرالیا (PAAS)، تهی‌شدگی عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) و رخداد بی‌هنجاری منفی Ce ($\text{Ce/Ce}^* = ۰/۷۲ - ۰/۸۹$) و بی‌هنجاری منفی تا مثبت Eu ($\text{Eu/Eu}^* = ۰/۹۶ - ۱/۶۸$) را در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهند. خاستگاه آواری لانتانیدها در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از همبستگی‌های مثبت بین LREE با Th، Y و Nb ($r = ۰/۷۶ - ۰/۸۶$) و مثبت بین HREE با Al_2O_3 ، SiO_2 ، TiO_2 ، Ga، Nb، Y، V و Cu ($r = ۰/۶۰ - ۰/۹۵$) به همراه همبستگی‌های منفی بین CaO با LREE ($r = -۰/۳۲$) و HREE ($r = -۰/۷۷$) برداشت می‌شود. تغییر در نسبت‌های زمین‌شیمیایی چون Y/Ho (۴۷/۱۴ - ۲۳/۱۶) و Er/Nd (۰/۱۱ - ۰/۲۸) این تفسیر را تأیید می‌کنند. شواهد کانی‌شناسی و نتایج مطالعات زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند که تغییرات بی‌هنجاری Ce و رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu به ترتیب با مقدار ورود مواد آواری و حضور پلاژیوکلاز در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی ارتباط دارند. ضرایب همبستگی بین REE با P_2O_5 و Ce/Ce^* ، Eu/Eu^* با Ce/Ce^* ، Nb، Th، Y و Zr، همچنین Mn با Sr نشانگر اثر نداشتن فرآیندهای پس از نهشت در تغییر مقادیر لانتانیدها در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی هستند.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی؛ زمین‌شیمی؛ سنگ‌های کربناتی میزبان؛ کانسار سرب - روی؛ نخلک؛ ایران مرکزی.

مقدمه

گوهران به صورت زیرزمینی در سه افق ۷۵، ۱۲۰ و ۲۰۰ متری استخراج و بهره برداری می‌شود. ویژگی‌های زمین‌شناسی این کانسار از دیرباز مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساختی، بافتی و زمین‌شیمیایی این کانسار توسط جزی و شهاب‌پور [۱] بررسی گردیده است. افزون بر این، جزی و همکاران [۲] ویژگی‌های بلورشناسی و

کانسار سرب - روی نخلک در ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک، استان اصفهان واقع است. این کانسار به صورت دیرزاد درون سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین گسترش یافته و از مهم‌ترین کانسارهای سرب - روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی در ایران است. ماده معدنی این ذخیره توسط شرکت کیمیا

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴)۳۳۸۷۸۰۳۹، پست الکترونیکی: abedini2020@yahoo.com

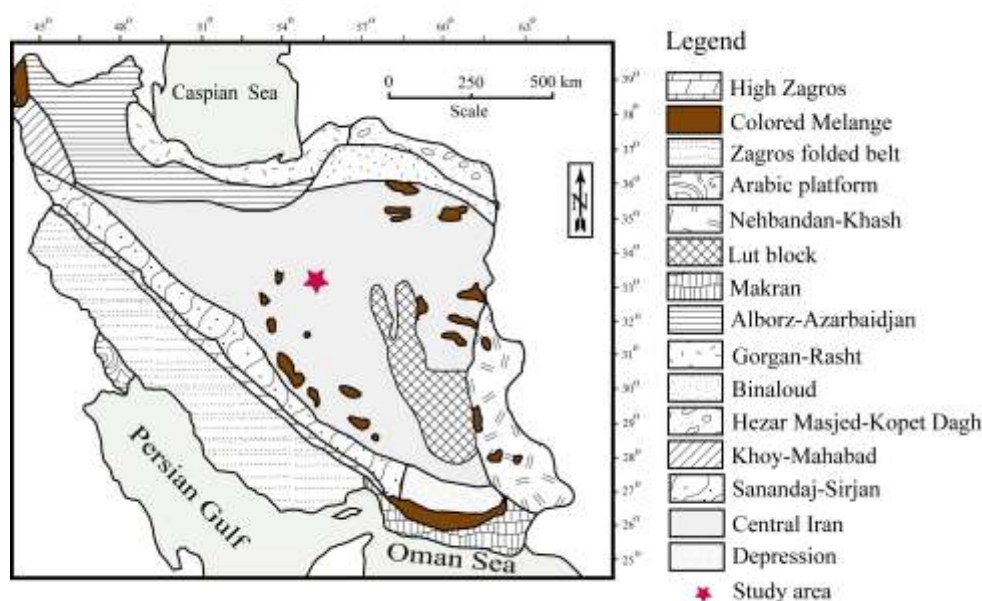
(گروه نخلک)، کرتاسه پسین (واحد صدر)، پالئوسن و رسوب-های آبرفتی کواترنری هستند (شکل ۲). سنگ‌های آذرین مافیک و اولترامافیک پیش از تریاس قدیمی‌ترین برونزدهای منطقه مورد بررسی هستند که به عنوان بقایای افیولیتی نوع نخلک (سرپانتینیت، پریدوتیت سرپانتینیتی، بازالت و متاگابرو) شناخته می‌شوند [۷-۱۴]. سن مطلق این واحدها بطور دقیق تعیین نشده است، اما با توجه به قرارگیری آنها در زیر سنگ‌های تریاس، سن آنها به پیش از تریاس نسبت داده شده است [۱۵]. گروه نخلک به صورت روراندگی بر این واحدهای سنگی رانده شده است [۱۱، ۱۴]. گروه نخلک در جنوب معدن نخلک (کوه قلعه بزرگ) با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق توالی آمیخته‌ای از سنگ‌های سیلیسی - آواری و کربناتی است. این توالی از نظر سنگ‌شناسی شبیه توالی آق‌دربند در کپه‌داغ است. شباهت‌های سنگ‌شناسی و زیست‌چینه‌نگاری این دو توالی توسط زمین‌شناسان متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۷-۱۱]. این پژوهشگران بر این باورند که تهنشینی این دو توالی در یک محیط رسوبی مشابه در کرانه جنوبی اوراسیا در دوره تریاس روی داده است. آنها همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که جایگاه امروزی گروه نخلک به احتمال بسیار در معرض چرخش خردقاره ایران مرکزی در خلاف حرکت عقربه-های ساعت قرار گرفته و حرکت جانبی آن از کرانه جنوبی اوراسیا از زمان تریاس انجام شده است [۷-۱۱].

زمین‌شیمیایی کانه گالن از این کانسار را به تفصیل بررسی نموده‌اند.

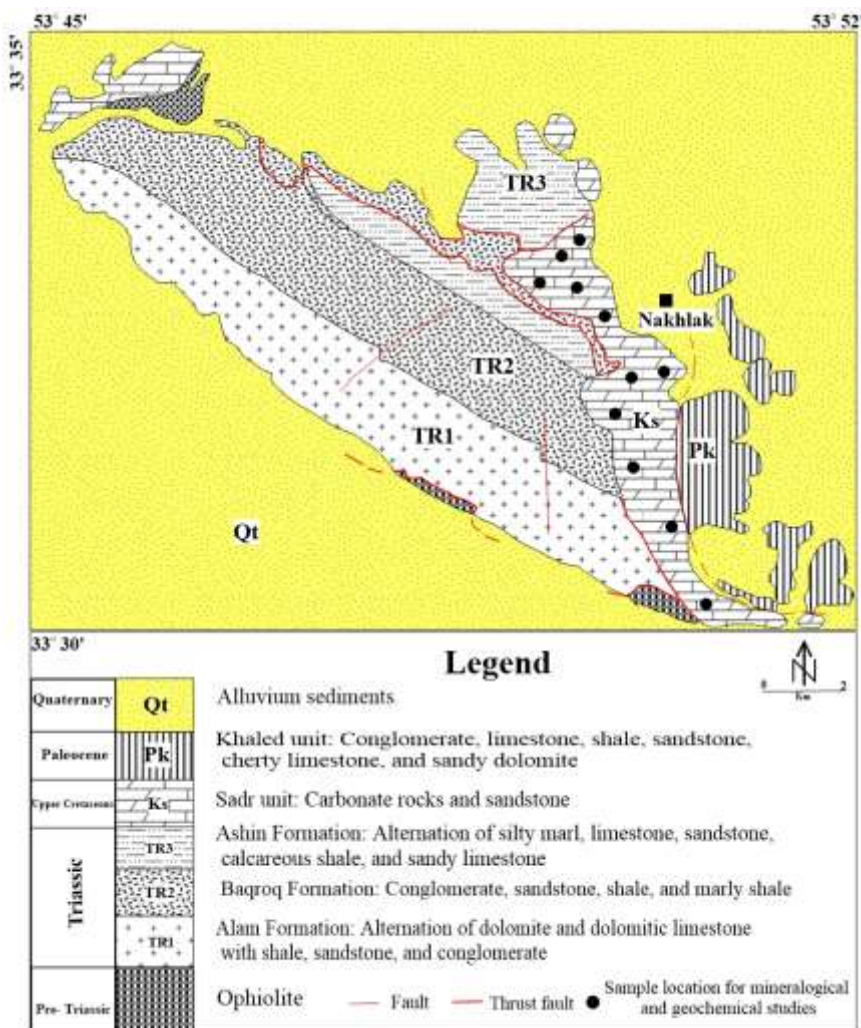
ویژگی‌های چینه‌نگاری سنگی و محیط رسوبی سنگ‌های تریاس ناحیه نخلک توسط وزیری [۳] بررسی شده است. سنگ‌های کربناتی - آواری کرتاسه پسین در منطقه معدنی نخلک نخستین بار توسط وزیری و همکاران [۴] واحد صدر نامگذاری شده‌اند. بر اساس این پژوهش، واحد سنگی صدر از تناوب سنگ‌های کربناتی و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. بررسی رخساره‌ای سنگ‌های کرتاسه پسین (واحد صدر) در منطقه نخلک توسط وزیری و همکاران [۵] انجام شده است. تاکنون پژوهش جامعی پیرامون کانی‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین (واحد صدر) میزبان کانسار سرب - روی نخلک انجام نشده است. از اینرو، در این پژوهش بر پایه بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر اصلی، جزئی و خاکی نادر (REE) اطلاعات جامعی از خاستگاه لانتانیدها، شرایط تشکیل، عوامل کنترل‌کننده توزیع REE و دلایل رخداد بی‌هنجاری‌های Eu و Ce در سنگ‌های کربناتی میزبان کانسار سرب - روی نخلک ارائه شده است.

زمین‌شناسی

بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۶]، کانسار سرب- روی نخلک در پهنه ایران مرکزی (شکل ۱) و در قطعه یزد- انارک قرار دارد. واحدهای زمین‌شناسی نخلک شامل افیولیت‌های پیش از تریاس، سنگ‌های رسوبی تریاس



شکل ۱ نقشه پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۶] که بر اساس آن منطقه مورد بررسی در پهنه ایران مرکزی قرار می‌گیرد.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی نخلک [۲] که در آن، موقعیت نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین منطقه با دوائر توپر نشان داده شده است.

واحدهای پالئوسن (واحد سنگی خالد) پوشیده شده است [۱۷]. البته همبریه‌های یاد شده در حال حاضر به صورت گسل‌خوردگی دیده می‌شوند. این گسل‌خوردگی‌ها نشان می‌دهند که همبریه‌های توالی‌های کرتاسه و پالئوسن با توالی‌های زیرین خود، پس از تشکیل دستخوش حرکت و جابه‌جایی شده‌اند. سرانجام، رسوب‌های آبرفتی به سن کواترنری جوان‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی را تشکیل می‌دهند.

روش بررسی

در این پژوهش، پس از پیمایش‌های صحرایی، در مجموع ۳۰ نمونه از سنگ‌های کربناتی از محل بروزدهای واحد صدر برداشت گردید و ویژگی‌های سنگ‌نگاری مقاطع نازک آنها با

در این منطقه، واحدهای سنگی ژوراسیک با نبود چینه‌ای و فرسایش کامل همراه بوده‌اند. از اینرو، درست پس از ساختار سنگی تریاس، سنگ‌های رسوبی کرتاسه با ضخامت تقریبی ۳۵۰ متر با یک دگرشیبی دیده می‌شوند. بخش بالایی گروه نخلک (واحد صدر) با آهک‌های کرتاسه با دگرشیبی زاویه‌دار پوشیده شده است [۱۶، ۱۲]. واحد صدر با ضخامت بیش از ۲۵۸ متر از سنگ‌های کربناتی و آواری تشکیل شده است. این واحد در مرزهای زیرین و بالایی خود بین دو ناپیوستگی محدود است. واحد صدر به عنوان میزبان کانسار سرب - روی نخلک در مرز زیرین با یک ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی سنگ های تریاس گروه نخلک (سازندهای علم، باقرق و عشین) قرار دارد و در مرز بالایی به واسطه یک ناپیوستگی فرسایشی توسط

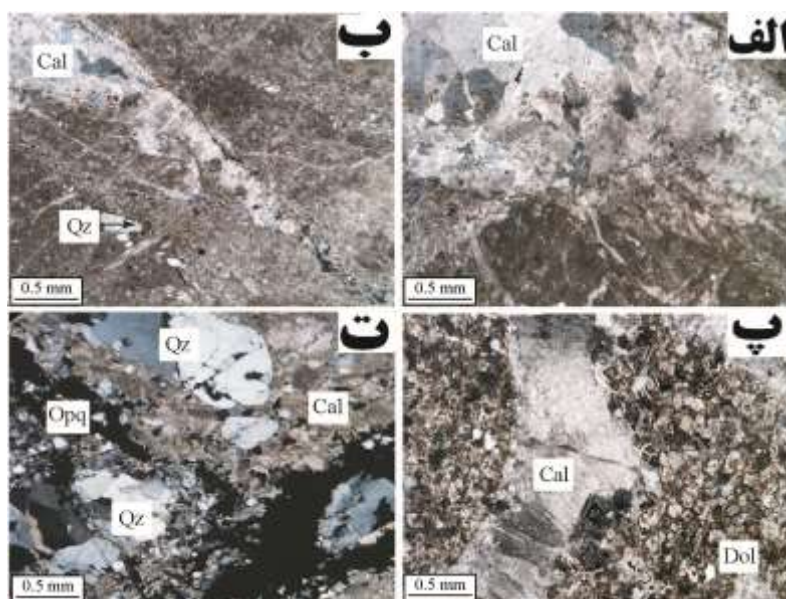
آشکارسازی برای اکسیدها حدود ۰/۰۱ در صد وزنی، برای عناصر جزئی ۰/۰۴ تا ۱۰ گرم در تن و برای عناصر خاکی نادر ۰/۰۱ تا ۰/۵ گرم در تن بوده است.

بحث و بررسی

سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، سنگ‌های کربناتی دارای بافت‌های تخریبی و زیست آواری-میکریتی هستند. کلسیت و دولومیت کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این سنگ‌ها هستند. کانی‌های کلسیت به صورت بلورهای ریز و درشت در مقاطع دیده می‌شوند. کلسیت‌های ریزبلور به صورت میکریت و سیمان اسپاری بیشتر زمینه سنگ را تشکیل می‌دهند. این در حالی است که کلسیت‌های درشت بلور اغلب در درز و شکاف‌های سنگ گسترش یافته‌اند (شکل‌های ۳ الف و ب). کانی‌های دولومیت اغلب به صورت بلورهای لوزی رخ دیده می‌شوند (شکل ۳ پ). در بیشتر این بلورهای شکل‌دار، منطقه‌بندی آشکاری دیده می‌شود. کانی‌های کدر در این سنگ‌ها در بین بلورهای کلسیت و دولومیت گسترش یافته‌اند (شکل ۳ ت). کوارتز به دو شکل ریز منفرد و انباشتی در زمینه سنگ حضور دارد (شکل ۳ ت). کوارتزهای دانه ریز زاویه‌دار هستند، ولی کوارتزهای دانه‌درشت به شکل نیمه‌زاویه‌دار تا گرد شده با خاموشی موجی دیده می‌شوند.

میکروسکوپ در گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه بررسی شدند. برای شناسایی فازهای کانیایی نامشخص، ۱۱ نمونه از بین نمونه‌های برداشت شده انتخاب و با پراش‌سنگ پرتوی X (XRD) زیمنس مدل D-5000 (با پرتوی $\text{Cu } \alpha$)، تکفام سازه‌های گرافیت ثابت شده، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت، جریان ۴۰ میلی آمپر، سرعت روبش ۲ درجه در دقیقه و گستره روبش (2θ) ۲ تا ۷۰ درجه در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تجزیه شدند. هر ۱۱ نمونه انتخابی نخست برای حذف آلودگی با آب مقطر شسته و خشک شده و سپس آسیاب گردیدند. نمونه‌های آسیاب شده با مش ۲۰۰ الک شدند و برای تعیین مقادیر عناصر اصلی، جزئی و خاکی نادر به روش‌های طیف‌سنجی فلوئورسانس پرتو X (XRF) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تجزیه شیمیایی گردیدند. در روش ICP-MS، برای تعیین عناصر جزئی و REE، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه به ترکیب لیتیم متابورات/ترابورات اضافه شدند و در کوره‌ای با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب گردیدند. سپس این مذاب سرد شده و در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۴ درصد/اسید کلریدریک ۲ درصد حل شدند. سرانجام، این محلول‌ها به روش ICP-MS تجزیه گردیدند. مقدار مواد فرار (LOI) این نمونه‌ها بر پایه کاهش وزن یک گرم نمونه پس از گرمادهی در ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. حد



شکل ۳ تصاویر سنگ‌نگاری از سنگ‌های کربناتی مورد بررسی. (الف و ب) گسترش کلسیت‌های درشت در درز و شکاف‌های سنگ. (پ) حضور بلورهای درشت کلسیت در بین دولومیت‌های ریز بلور. (ت) همراهی کلسیت توسط کانی‌های کوارتز و اوپک. کلیه تصاویر در نور انکساری و به صورت xpl تهیه شده‌اند. علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: Cal = کلسیت، Dol = دولومیت، Qz = کوارتز و Opq = اوپک.

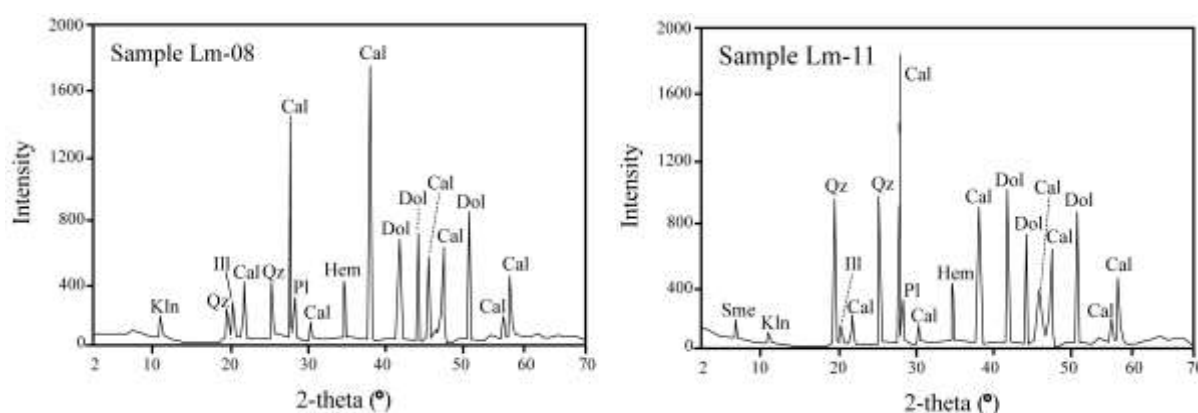
ترتیب گستره تغییرات ۴/۴۶ تا ۲۹/۹۲ درصد وزنی (به طور میانگین ۱۴/۳۴ درصد وزنی) و ۲/۷۴ تا ۱۷/۱۶ درصد وزنی (به طور میانگین ۷/۰۵ درصد وزنی) را نشان می‌دهند. مقدار Al_2O_3 در سنگ‌های کربناتی در گستره ۰/۶۸ تا ۳/۲۵ درصد وزنی (به طور میانگین ۲/۰۴ درصد وزنی) است. Al_2O_3 به عنوان نشانگری برای تعیین مقدار رس در سنگ‌های کربناتی استفاده می‌شود [۱۸، ۱۹]. مقدار بالای Al_2O_3 در نمونه‌های مورد بررسی نسبت به کربنات‌های آلوده شده به شیل (۰/۴۲ درصد وزنی) [۲۰] گویای فراوانی بیشتر رس‌ها در سنگ‌های کربناتی منطقه نخلک است. Fe_2O_3 در نمونه‌ها مقداری از ۱/۴۴ تا ۴/۳۳ درصد وزنی (به طور میانگین ۲/۶۷ درصد وزنی) دارد. سایر اکسیدها شامل K_2O ، Na_2O ، MnO ، TiO_2 و P_2O_5 دارای فراوانی کمی هستند و در مجموع ۰/۲۲ تا ۱/۲۸ درصد وزنی ترکیب شیمیایی سنگ‌های کربناتی مورد بررسی را تشکیل می‌دهند. مقدار LOI در نمونه‌ها در گستره ۲۷/۵۵ تا ۳۹/۸۵ درصد وزنی در تغییر است.

الگوهای XRD نشان می‌دهند که سنگ‌های کربناتی میزبان کانسار سرب و روی نخلک کانی‌شناسی به نسبت ساده‌ای دارند. بر اساس نتایج به دست آمده، کلسیت و دولومیت دو فاز کانیایی اصلی در این سنگ‌ها هستند. کانی‌هایی چون پلاژیوکلاز، کائولینیت، ایلیت، اسمکتیت و هماتیت از دیگر فازهای کانیایی در سنگ‌های کربناتی هستند که در مقادیر فرعی حضور دارند. کوارتز تنها کانی در این سنگ‌ها بوده که در تعدادی از نمونه‌ها فاز کانیایی اصلی و در برخی دیگر فاز کانیایی فرعی است (شکل ۴، جدول ۱).

زمین‌شیمی

زمین‌شیمی عناصر اصلی

مقادیر عناصر اصلی در سنگ‌های کربناتی میزبان کانسار سرب - روی نخلک در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، CaO ، SiO_2 و MgO نسبت به سایر اکسیدهای تشکیل دهنده فراوانی بیشتری دارند. مقدار CaO در نمونه‌های مورد بررسی در گستره ۲۵/۹۶ تا ۵۰/۱۲ درصد وزنی (به طور میانگین ۳۸/۰۴ درصد وزنی) است. SiO_2 و MgO نیز به



شکل ۴ الگوی XRD برای دو نمونه انتخابی از سنگ‌های کربناتی کرتاسه بالایی از محدوده کانسار نخلک. علائم اختصاری عبارتند از: Cal = کلسیت، Dol = دولومیت، Kln = کائولینیت، Hem = هماتیت، Sme = اسمکتیت، Pl = پلاژیوکلاز، Ill = ایلیت و Qz = کوارتز.

جدول ۱ نتایج XRD سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از منطقه کانسار نخلک.

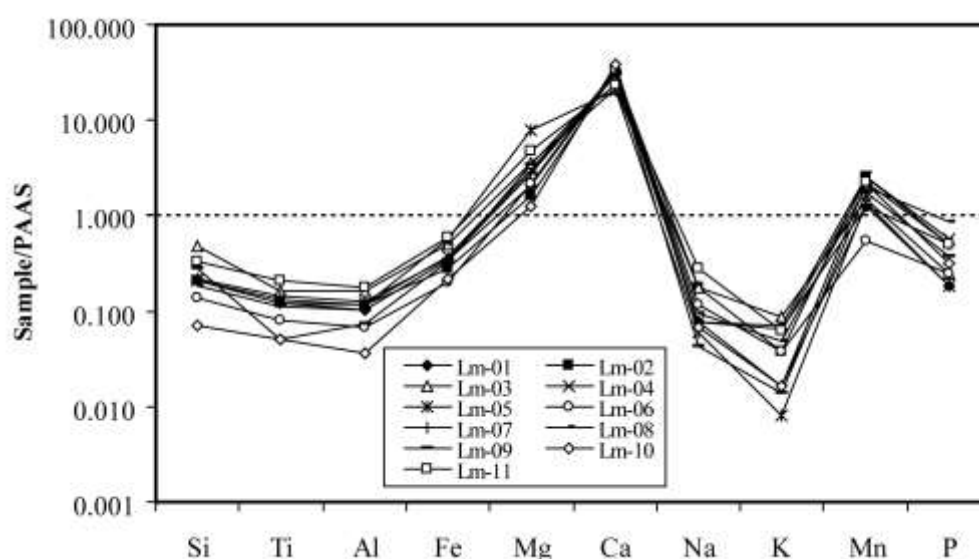
شماره نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
Lm-01	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، هماتیت
Lm-02	کلسیت، دولومیت	کوارتز، پلاژیوکلاز، کائولینیت، هماتیت
Lm-03	کلسیت، کوارتز، دولومیت	پلاژیوکلاز، کائولینیت، ایلیت، هماتیت
Lm-04	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، هماتیت
Lm-05	دولومیت، کلسیت	کوارتز، کائولینیت، هماتیت
Lm-06	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، اسمکتیت، هماتیت
Lm-07	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، ایلیت
Lm-08	کلسیت، دولومیت	کوارتز، پلاژیوکلاز، کائولینیت، ایلیت، هماتیت
Lm-09	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، اسمکتیت، هماتیت
Lm-10	کلسیت، دولومیت	کوارتز، کائولینیت، اسمکتیت، هماتیت
Lm-11	دولومیت، کلسیت، کوارتز	پلاژیوکلاز، کائولینیت، اسمکتیت، ایلیت، هماتیت

جدول ۲ مقادیر عناصر اصلی و LOI (بر حسب درصد وزنی) به همراه نسبت CaO/MgO در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از منطقه کانسار نخلک.

	Lm-01	Lm-02	Lm-03	Lm-04	Lm-05	Lm-06	Lm-07	Lm-08	Lm-09	Lm-10	Lm-11
SiO ₂ (wt.%)	۱۲٫۹۳	۱۳٫۱۹	۲۹٫۹۲	۱۲٫۸۴	۱۳٫۱۲	۸٫۵۲	۱۳٫۷۲	۱۱٫۳۶	۱۷٫۴۸	۴٫۴۶	۲۰٫۲۲
Al ₂ O ₃	۱٫۹۶	۲٫۲۱	۲٫۹۹	۲٫۱۹	۲٫۲۲	۱٫۲۶	۲٫۳۹	۱٫۹۳	۱٫۳۷	۰٫۶۸	۳٫۲۵
Fe ₂ O ₃	۲٫۴۲	۲٫۰۳	۳٫۵۸	۲٫۶۵	۳٫۹۹	۱٫۴۴	۲٫۵۵	۲٫۴۵	۲٫۴۱	۱٫۵۶	۴٫۳۳
CaO	۴۱٫۴۸	۴۱٫۵۹	۲۷٫۳۳	۳۹٫۱۲	۲۵٫۹۶	۴۴٫۲۱	۳۸٫۷۴	۴۱٫۷۷	۳۸٫۰۳	۵۰٫۱۲	۳۰٫۱۲
Na ₂ O	۰٫۰۹	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۱۴	۰٫۰۹	۰٫۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۳۳
K ₂ O	۰٫۰۶	۰٫۱۴	۰٫۳۲	۰٫۲۶	۰٫۰۳	۰٫۱۴	۰٫۲۴	۰٫۱۸	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۲۳
MgO	۴٫۶۱	۳٫۵۵	۷٫۷۳	۶٫۶۵	۱۷٫۱۶	۴٫۷۸	۶٫۰۸	۶٫۱۵	۷٫۵۴	۲٫۷۴	۱۰٫۵۶
TiO ₂	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۸	۰٫۱۴	۰٫۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۲۱
MnO	۰٫۱۴	۰٫۲۸	۰٫۱۶	۰٫۲۸	۰٫۱۵	۰٫۰۶	۰٫۱۴	۰٫۲۲	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۲۵
P ₂ O ₅	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۸	۰٫۱۴	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۸
LOI	۳۶٫۱۳	۳۶٫۴۳	۲۷٫۵۵	۳۵٫۶۹	۳۷٫۰۵	۳۹٫۳۱	۳۵٫۸۱	۳۵٫۵۴	۳۲٫۷۲	۳۹٫۸۵	۳۰٫۲۱
مجموع	۹۹٫۹۷	۹۹٫۸۳	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۱	۹۹٫۹۸	۹۹٫۹۸	۹۹٫۹۶	۹۹٫۹۷	۹۹٫۸۹	۹۹٫۷۹
CaO/MgO	۹٫۰۰	۱۱٫۷۲	۳٫۵۴	۵٫۸۸	۱٫۵۱	۹٫۲۵	۶٫۳۷	۶٫۷۹	۵٫۰۴	۱۸٫۲۹	۲٫۸۵

($r = -0.36$) با فرآیند دولومیتی‌شدن در ارتباط است. همبستگی مثبت قوی بین Al_2O_3 - Fe_2O_3 ($r = 0.82$) پیشنهاد می‌کند که افزون بر تشکیل هماتیت در نمونه‌های مورد بررسی، آهن اضافی توسط کانی‌های رسی در سامانه تثبیت شده است [۲۳]. همبستگی مثبت متوسط تا قوی بین SiO_2 با K_2O و Na_2O ، Al_2O_3 ، TiO_2 ($r = 0.60 - 0.76$) نشان می‌دهد که این اکسیدها به ورود مواد تخریبی به محیط نهشت وابسته هستند و به عنوان ناخالصی به سنگ‌های کربناتی مورد بررسی وارد شده‌اند. این برداشت با همبستگی منفی بین SiO_2 و CaO ($r = -0.79$) شکل ۶ ب) تایید می‌شود.

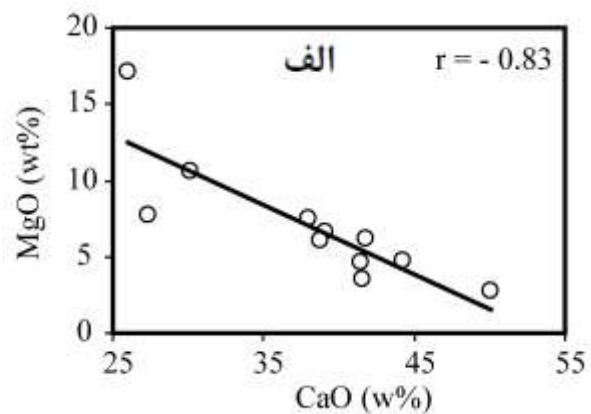
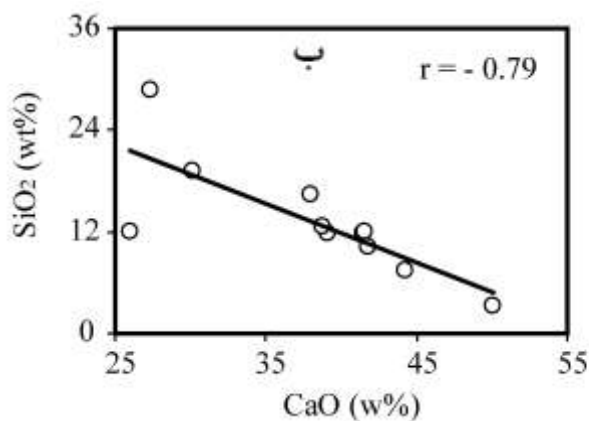
الگوی توزیع عناصر اصلی بهنجار شده به شیل پس از آرکنن استرالیا (PAAS) [۲۱] تهی‌شدگی اجزایی چون Na_2O ، K_2O ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، SiO_2 ، P_2O_5 و غنی‌شدگی CaO ، MgO و MnO (در بیشتر نمونه‌ها) را نشان می‌دهد (شکل ۵). تهی‌شدگی K_2O و غنی‌شدگی CaO نسبت به سایر اکسیدها شدیدتر می‌باشد (شکل ۵). بر اساس رده‌بندی ترکیب شیمیایی سنگ‌های کربناتی [۲۲]، نمونه‌های مورد بررسی مقدار CaO/MgO در دو گستره $9.00 - 5.04$ و $3.54 - 1.51$ و به ترتیب ترکیبی در حد آهک دولومیتی و دولومیت کلسیتی دارند. وجود همبستگی منفی قوی بین CaO - MgO ($r = -0.83$) و شکل ۶ الف) و منفی ضعیف بین CaO - Na_2O



شکل ۵ الگوی توزیع عناصر اصلی بهنجار شده به PAAS [۲۱] برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از منطقه کانسار نخلک.

جدول ۳ ضریب همبستگی بین عناصر اصلی در بین سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از منطقه کانسار نخلک.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
SiO ₂	۱٫۰۰									
Al ₂ O ₃	۰٫۷۶	۱٫۰۰								
Fe ₂ O ₃	۰٫۶۸	۰٫۸۲	۱٫۰۰							
CaO	-۰٫۷۹	-۰٫۷۸	-۰٫۹۳	۱٫۰۰						
Na ₂ O	۰٫۶۰	۰٫۶۷	۰٫۴۶	-۰٫۳۶	۱٫۰۰					
K ₂ O	۰٫۶۲	۰٫۶۶	۰٫۳۰	-۰٫۳۰	۰٫۵۲	۱٫۰۰				
MgO	۰٫۳۳	۰٫۴۵	۰٫۸۲	-۰٫۸۳	۰٫۰۶	-۰٫۰۹	۱٫۰۰			
TiO ₂	۰٫۶۰	۰٫۹۶	۰٫۷۹	-۰٫۶۹	۰٫۷۲	۰٫۶۴	۰٫۴۲	۱٫۰۰		
MnO	-۰٫۰۱	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۰۹	۰٫۲۶	۰٫۱۶	-۰٫۱۲	۰٫۱۶	۱٫۰۰	
P ₂ O ₅	-۰٫۱۰	۰٫۱۵	-۰٫۰۵	۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۳۹	-۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۵۴	۱٫۰۰

شکل ۶ نمودارهای دو متغیره CaO-MgO (الف) و CaO-SiO₂ (ب) برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از منطقه کانسار نخلک.

زمین‌شیمی عناصر جزئی

مقادیر عناصر جزئی در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است. بر اساس این یافته‌ها، Sr (۲۰۱ تا ۸۵۰ گرم در تن، به طور میانگین ۴۲۳ گرم در تن)، Ni (۱۲۱ تا ۵۷۸ گرم در تن، به طور میانگین ۳۲۱ گرم در تن)، Cr (۱۱ تا ۹۵ گرم در تن، به طور میانگین ۴۸ گرم در تن) و V (۱۷/۴ تا ۷۵/۹ گرم در تن، به طور میانگین ۴۱/۵ گرم در تن) بیشترین فراوانی را در بین عناصر جزئی دارند. Co, Ba, Zn, Zr, Sc و Y از نظر فراوانی در ردیف‌های بعدی قرار دارند. کمترین تمرکز عناصر جزئی در سنگ‌های کربناتی مربوط به Rb, Nb, U و Th است. الگوی توزیع عناصر جزئی بهنجار شده به PAAS [۲۱] بیانگر غنی‌شدگی از Ni و تهی‌شدگی از Ba, Rb, Th, U, Nb, Zr, Cr, Cu و Zn است. عناصری چون Sc, V و Sr رفتار دوگانه کاهشی و افزایشی نشان می‌دهند که می‌تواند با مقدار متفاوت ورود مواد آواری به

محیط نهشت سنگ‌های کربناتی مورد بررسی در ارتباط باشد (شکل ۷).

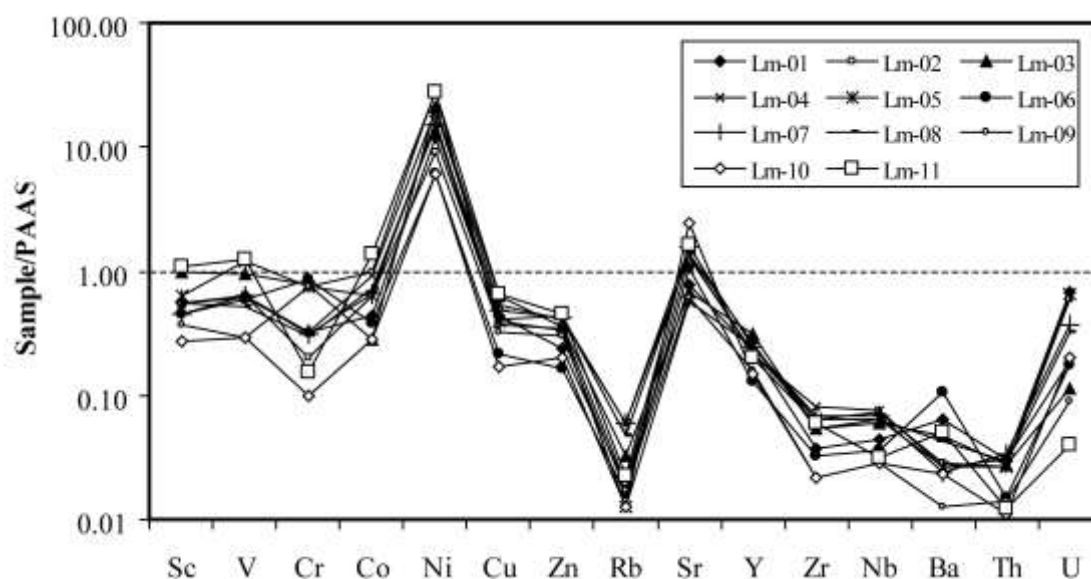
بر اساس نتایج به دست آمده، میانگین غلظت Sr در سنگ‌های آهکی مورد بررسی کمتر از میانگین کربنات سنگ کره [۲۴] (Sr=۶۱۰ گرم در تن) است. مقادیر نسبت Sr/Ba در سنگ آهک‌ها دارای گستره تغییرات ۶/۳۷ تا ۶۷/۴۶ است (جدول ۱)، که یک محیط دریایی ($Sr/Ba > 1$) را برای نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همبستگی مثبت و متوسط تا قوی بین Al₂O₃ با Sc, V, Y, Zr و Cu و Zn ($r \geq 0.70$) بیانگر بر نقش کنترلی کانی‌های رسی در تمرکز این عناصر است (جدول ۵) [۲۵، ۲۶]. همبستگی مثبت و متوسط بین K₂O-Rb ($r = 0.70$) و SiO₂-Ni ($r = 0.70$) به ترتیب به نقش کنترلی ایلیت و کانی‌های سیلیکاتی در تمرکز Rb و Ni اشاره دارد. همبستگی مثبت بسیار ضعیف ($r < 0.6$) بین Sr و CaO ($r = 0.58$) نشان می‌دهد که به احتمال بسیار

امر به خوبی نشان می‌دهد که سنگ‌های آهکی مورد بررسی تغییرات دیاژنتیک عمده‌ای را تجربه نکرده‌اند. تمرکز پایین U (0.11 تا 1.87 گرم در تن، به طور میانگین 0.87 گرم در تن) بیانگر تشکیل سنگ‌های کربناتی در یک محیط کم عمق و غنی از اکسیژن است [۲۶، ۲۷].

Sr و CaO از نظر زایشی با هم در ارتباط نیستند و توزیع و تمرکز Sr ممکن است در اثر ورود مواد آواری به محیط ترسیب سنگ آهک‌ها صورت گرفته باشد. بررسی‌ها نشان داده است که همبستگی Mn-Sr برای بررسی آثار فرآیندهای دیاژنتیک در سنگ‌های آهکی به کار می‌رود [۲۷]. در این پژوهش، ارتباط مثبت بسیار ضعیفی بین Mn و Sr ($r = 0.44$) وجود دارد. این

جدول ۴ مقادیر عناصر جزئی به همراه نسبت Sr/Ba در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از محدوده کانسار نخلک.

	Lm-01	Lm-02	Lm-03	Lm-04	Lm-05	Lm-06	Lm-07	Lm-08	Lm-09	Lm-10	Lm-11
Ba (ppm)	۳۴۶	۱۵۶	۲۵۶	۱۴۶	۱۴۶	۵۸۷	۱۳۲	۲۳۵	۶۹	۱۲۶	۲۷۵
Rb	۲۱	۲۲	۳۷	۶۶	۱۴	۱۸	۶۸	۵۳	۱۹	۱۴	۲۵
Sr	۲۷۰	۴۵۱	۲۳۹	۴۶۶	۲۰۱	۳۷۴	۵۵۵	۴۷۵	۲۱۵	۸۵۰	۵۶۳
Th	۰.۳۳	۰.۲۸	۰.۲۹	۰.۳۳	۰.۲۸	۰.۱۶	۰.۳۶	۰.۳۲	۰.۱۵	۰.۱۲	۰.۱۳
U	۱.۸۷	۱.۶۵	۰.۳۲	۰.۵۲	۱.۸۵	۰.۴۹	۱.۰۲	۰.۸۹	۰.۲۵	۰.۵۷	۰.۱۱
Y	۵.۱	۴.۹	۶.۸	۴.۷	۵.۴	۲.۹	۵.۵	۵.۸	۳.۵	۳.۳	۴.۴
Zr	۷.۱	۱۲.۲	۱۰.۲	۱۵.۵	۱۲.۲	۶.۱	۱۳.۲	۱۰.۳	۴.۱	۴.۱	۱۱.۲
Nb	۱.۱	۱.۸	۱.۵	۱.۹	۱.۶	۰.۹	۱.۷	۱.۶	۰.۷	۰.۷	۰.۸
Sc	۶	۶	۱۱	۶	۷	۵	۵	۶	۴	۳	۱۲
V	۳۷.۷	۳۸.۱	۵۶.۱	۳۶.۸	۷۳.۱	۳۵.۴	۳۸.۲	۳۰.۶	۱۷.۴	۱۷.۸	۷۵.۹
Cr	۳۶	۲۲	۸۴	۳۶	۸۲	۹۵	۳۴	۳۳	۸۳	۱۱	۱۷
Co	۱۰.۱	۱۴.۵	۶.۵	۲۱.۳	۱۴.۸	۸.۸	۱۵.۲	۱۶.۵	۲۲.۳	۶.۴	۳۲.۱
Ni	۲۳.۵	۱۸.۵	۴۲.۶	۴۰.۱	۳۲.۱	۱۲۲	۳۰.۲	۲۹.۶	۵۷.۸	۱۲.۱	۵۵.۴
Cu	۱۱.۱	۹.۳	۱۵.۹	۱۳.۲	۹.۹	۵.۴	۱۲.۲	۱۰.۱	۸.۱	۴.۲	۱۶.۲
Zn	۱۷.۲	۲۴.۲	۲۵.۶	۲۸.۸	۲۴.۱	۱۱.۶	۲۹.۹	۳۱.۲	۲۱.۳	۱۴.۴	۳۱.۶
Sr/Ba	۷۸۰	۲۸۹۱	۹۳۴	۳۱۹۲	۱۳۷۷	۶۳۷	۴۲۰۵	۲۰۲۱	۳۱۱۶	۶۷۴۶	۲۰۴۷



شکل ۷ الگوی توزیع عناصر جزئی به هنجار شده به PAAS [۲۱] برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از محدوده کانسار نخلک.

جدول ۵ ضریب همبستگی بین عناصر اصلی با برخی از عناصر جزئی از سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از منطقه کانسار نخلک.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Ba	-۰٫۰۷	-۰٫۰۳	-۰٫۲۰	۰٫۱۲	۰٫۲۸	۰٫۰۹	-۰٫۱۸	۰٫۰۸	-۰٫۶۱	-۰٫۲۵
Rb	۰٫۱۲	۰٫۳۴	۰٫۰۵	-۰٫۰۱	-۰٫۱۰	۰٫۷۰	-۰٫۱۳	۰٫۳۱	۰٫۱۸	۰٫۶۳
Sr	-۰٫۵۱	-۰٫۲۷	-۰٫۳۳	۰٫۵۸	۰٫۱۳	۰٫۱۱	-۰٫۴۷	-۰٫۰۹	۰٫۴۴	۰٫۳۶
Th	۰٫۱۴	۰٫۲۸	۰٫۱۰	-۰٫۱۷	-۰٫۲۵	۰٫۳۳	۰٫۰۳	۰٫۳۱	-۰٫۰۳	۰٫۲۵
U	-۰٫۳۰	-۰٫۰۲	-۰٫۰۴	۰٫۰۰	-۰٫۳۰	-۰٫۴۷	۰٫۱۴	-۰٫۰۱	-۰٫۱۲	-۰٫۲۰
Y	۰٫۶۰	۰٫۷۰	۰٫۵۴	-۰٫۵۸	۰٫۱۶	۰٫۵۰	۰٫۲۹	۰٫۵۹	۰٫۰۶	۰٫۱۹
Zr	۰٫۲۴	۰٫۷۰	۰٫۴۷	-۰٫۴۵	۰٫۲۵	۰٫۵۹	۰٫۳۴	۰٫۷۰	۰٫۳۴	۰٫۴۰
Nb	۰٫۱۳	۰٫۴۳	۰٫۱۵	-۰٫۲۴	-۰٫۰۷	۰٫۴۴	۰٫۱۳	۰٫۳۶	۰٫۲۲	۰٫۳۷
Sc	۰٫۷۹	۰٫۸۹	۰٫۸۳	-۰٫۷۷	۰٫۸۱	۰٫۵۸	۰٫۴۶	۰٫۸۹	۰٫۱۰	-۰٫۰۱
V	۰٫۵۰	۰٫۷۹	۰٫۸۸	-۰٫۸۴	۰٫۵۹	۰٫۲۸	۰٫۷۶	۰٫۸۴	-۰٫۰۵	-۰٫۱۹
Cr	۰٫۵۱	۰٫۵۰	۰٫۶۵	-۰٫۶۲	۰٫۶۳	۰٫۱۹	۰٫۵۵	۰٫۵۲	-۰٫۱۸	-۰٫۱۷
Co	۰٫۲۱	۰٫۴۴	۰٫۵۱	-۰٫۳۳	۰٫۳۷	۰٫۱۶	۰٫۳۸	۰٫۴۴	۰٫۴۶	۰٫۴۶
Ni	۰٫۷۰	۰٫۵۴	۰٫۶۸	-۰٫۶۴	۰٫۲۵	۰٫۳۰	۰٫۴۹	۰٫۴۱	۰٫۲۴	۰٫۱۶
Cu	۰٫۷۹	۰٫۹۵	۰٫۷۹	-۰٫۷۲	۰٫۵۵	۰٫۷۲	۰٫۳۶	۰٫۹۰	۰٫۲۱	۰٫۱۸
Zn	۰٫۴۵	۰٫۷۵	۰٫۶۳	-۰٫۵۱	۰٫۳۴	۰٫۶۰	۰٫۳۶	۰٫۶۹	۰٫۴۸	۰٫۶۸

زمین‌شیمی عناصر خاکی نادر

خاستگاه REE و الگوی توزیع

مقادیر لانتانیدها در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی به همراه برخی از پارامترهای زمین‌شیمیایی محاسبه شده مربوط به آنها در جدول ۶ آورده شده است. بر این اساس، مقادیر (La-Lu) REE در نمونه‌های کربناتی در گستره ۸٫۶۷ تا ۲۱٫۳ گرم در تن (میانگین ۱۵٫۰۹ گرم در تن) است. این مقادیر کمتر از مقادیر REE شیل پس از آرکن استرالیا (PAAS)، ۲۱۰ گرم در تن، و بالاتر از کربنات‌های دریایی (۰٫۴ تا ۱۴ گرم در تن) [۲۴] است. مقادیر LREE (La-Eu) و HREE (Gd-Lu) در سنگ‌های کربناتی به ترتیب دارای گستره تغییرات ۶٫۶۲ تا ۱۱٫۵۲ گرم در تن و ۱٫۵۴ تا ۳٫۷۸ گرم در تن هستند (جدول ۶). الگوی توزیع REE بهنجار شده به PAAS [۲۱] نمونه‌های مورد بررسی تهی‌شدگی از REE و رخداد بی‌هنجاری منفی Ce و مثبت Eu را نشان می‌دهد، به طوری که تهی‌شدگی از LREE نسبت به HREE شدیدتر بوده است (شکل ۸). این الگو کمابیش شبیه الگوی توزیع لانتانیدها در آب دریاست [۲۸]، البته، مقادیر بی‌هنجاری‌های منفی Ce و درجه جدایش LREE نسبت به HREE در نمونه‌های کربناتی مورد بررسی ضعیف‌تر از آب دریا و مقادیر بی‌هنجاری‌های مثبت Eu در نمونه‌های کربناتی بیشتر از آب دریاست. این تفاوت‌ها در الگوی توزیع REE در سنگ‌های کربناتی با آب دریا می‌تواند به عواملی چون (۱) سنگ‌شناسی و دیاژنز (۲) مقدار مواد آواری و

(۳) فرآیندهای روبش توسط اکسیدهای آهن و منگنز وابسته باشد [۲۹-۳۲]. همبستگی‌های مثبت ناچیز ($r < ۰٫۶$) بین REE با Fe₂O₃ ($r = ۰٫۲۷$) و عدم همبستگی بین REE با MnO ($r = ۰٫۰۱$) احتمال ایجاد آلودگی‌های مهم و قابل توجه توسط هماتیت و اکسیدهای منگنز در سنگ‌های کربناتی منطقه نخلک را رد می‌کند [۳۳]. افزون بر این، همبستگی مثبت ناچیز ($r < ۰٫۶$) بین REE با P₂O₅ ($r = ۰٫۱۵$) نقش نداشتن سیال‌های دیاژنتیک در تامین REE در سنگ‌های کربناتی را نشان می‌دهد [۳۴، ۳۵]. خاستگاه آواری لانتانیدها در سنگ‌های کربناتی کوتاه‌سین در نخلک از همبستگی‌های مثبت متوسط تا قوی بین LREE با Y، Th و Nb ($r = ۰٫۷۶ - ۰٫۸۶$) و مثبت متوسط تا قوی بین HREE با Cu ($۰٫۹۵ - ۰٫۶۰$) و V، Nb، Y، Th، TiO₂، Al₂O₃، SiO₂ ($r = -۰٫۳۲$) و همبستگی‌های منفی CaO-LREE ($r = -۰٫۳۲$) و CaO-HREE ($r = -۰٫۷۷$) برداشت می‌شود [۲۶، ۲۵].

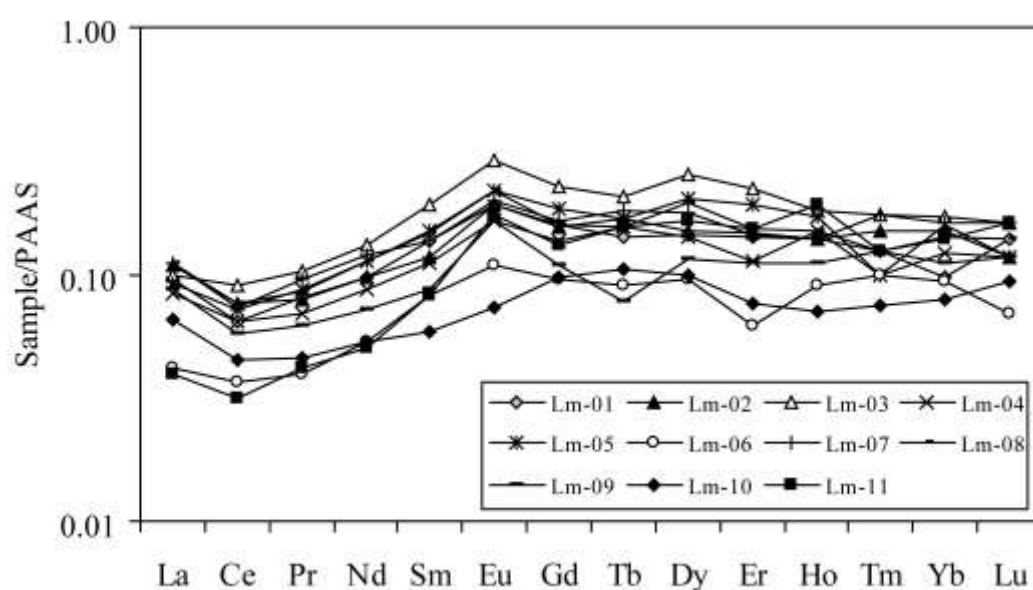
نسبت‌های Y/Ho و Er/Nd در سنگ کربناتی

نسبت Y/Ho یک شاخص زمین‌شیمیایی بسیار مفید برای تشخیص وجود مواد آواری در سنگ‌های کربناتی است. آب دریا و رسوب‌های شیمیایی دریایی بدون آلودگی دارای نسبت Y/Ho بین ۴۴ تا ۷۴ هستند. این در حالی است که نسبت Y/Ho در خاکستر آتشفشانی و مواد آواری حدود ۲۸ است [۳۶، ۳۳]. بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش آلودگی توسط ورود مواد آواری، نسبت Y/Ho آب دریا و رسوب‌های

شیمیایی دریایی کاهش می‌یابد [۳۷]. در این پژوهش، نسبت Y/Ho در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی در گستره ۲۳/۱۶ تا ۴۷/۱۴ (میانگین ۳۴/۹۶) است (جدول ۶). این مقادیر آشکارا نشان می‌دهند که سنگ‌های کربناتی مورد بررسی به احتمال بسیار با مواد تخریبی دچار آلودگی شده‌اند.

جدول ۶ مقادیر عناصر خاکی نادر (REE) به همراه برخی از پارامترهای زمین‌شیمیایی محاسبه شده برای سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از نخلک.

	Lm-01	Lm-02	Lm-03	Lm-04	Lm-05	Lm-06	Lm-07	Lm-08	Lm-09	Lm-10	Lm-11
La (ppm)	۳٫۶	۴٫۱	۳٫۸	۳٫۲	۳٫۵	۱٫۶	۴٫۲	۴٫۲	۳٫۳	۲٫۵	۱٫۵
Ce	۵٫۱	۶٫۱	۷٫۲	۵٫۱	۵٫۸	۲٫۹	۵٫۹	۶٫۱	۴٫۶	۳٫۶	۲٫۵
Pr	۰٫۷۲	۰٫۷۱	۰٫۹۲	۰٫۶۲	۰٫۷۸	۰٫۳۵	۰٫۸۵	۰٫۷۶	۰٫۵۵	۰٫۴۱	۰٫۳۷
Nd	۳٫۱	۳٫۱	۴٫۲	۲٫۸	۳٫۶	۱٫۷	۳٫۸	۳٫۶	۲٫۳	۱٫۷	۱٫۶
Sm	۰٫۷۶	۰٫۶۶	۱٫۰۸	۰٫۶۲	۰٫۸۴	۰٫۴۶	۰٫۷۷	۰٫۸۲	۰٫۴۹	۰٫۳۳	۰٫۴۶
Eu	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۳۲	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۱۲	۰٫۲۲	۰٫۲۴	۰٫۱۸	۰٫۰۸	۰٫۱۹
Gd	۰٫۷۴	۰٫۷۳	۱٫۰۷	۰٫۶۴	۰٫۸۷	۰٫۴۵	۰٫۷۸	۰٫۷۵	۰٫۵۱	۰٫۴۶	۰٫۶۲
Tb	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۰۷	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۰۸	۰٫۱۲
Dy	۰٫۶۴	۰٫۶۶	۱٫۱۱	۰٫۶۲	۰٫۸۹	۰٫۴۲	۰٫۷۸	۰٫۸۵	۰٫۵۱	۰٫۴۴	۰٫۷۲
Er	۰٫۴۱	۰٫۴۳	۰٫۶۴	۰٫۳۳	۰٫۵۵	۰٫۱۸	۰٫۴۲	۰٫۴۴	۰٫۳۲	۰٫۲۲	۰٫۴۴
Ho	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۰٫۱۵	۰٫۱۷	۰٫۰۹	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۱۹
Tm	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۵
Yb	۰٫۲۷	۰٫۴۲	۰٫۴۸	۰٫۳۴	۰٫۴۴	۰٫۲۶	۰٫۴۵	۰٫۴	۰٫۳۱	۰٫۲۲	۰٫۳۹
Lu	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۷
REE (ppm)	۱۵٫۹۱	۱۷٫۵	۲۱٫۳	۱۴٫۸۱	۱۷٫۹	۸٫۶۷	۱۸٫۵۹	۱۸٫۵۴	۱۳٫۳۴	۱۰٫۱۸	۹٫۲۲
LREE (ppm)	۱۳٫۴۹	۱۴٫۸۸	۱۷٫۵۲	۱۲٫۵۲	۱۴٫۷۶	۷٫۱۳	۱۵٫۷۴	۱۵٫۷۲	۱۱٫۴۲	۸٫۶۲	۶٫۶۲
HREE (ppm)	۲٫۴۲	۲٫۶۲	۳٫۷۸	۲٫۲۹	۳٫۱۴	۱٫۵۴	۲٫۸۵	۲٫۸۲	۱٫۹۲	۱٫۵۶	۲٫۶۰
Er/Nd	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۱۲	۰٫۱۵	۰٫۱۱	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۲۸
Y/Ho	۳۶٫۴۳	۳۵	۳۷٫۷۸	۳۱٫۳۳	۳۱٫۷۶	۳۲٫۲۲	۳۹٫۲۹	۳۸٫۶۷	۳۱٫۸۲	۴۷٫۱۴	۲۳
Ce/Ce*	۰٫۷۳	۰٫۸۱	۰٫۸۹	۰٫۸۳	۰٫۸۱	۰٫۸۹	۰٫۷۲	۰٫۷۸	۰٫۷۷	۰٫۸۰	۰٫۷۷
Eu/Eu*	۱٫۳۱	۱٫۴۱	۱٫۳۹	۱٫۳۳	۱٫۳۱	۱٫۲۳	۱٫۳۲	۱٫۴۳	۱٫۶۸	۰٫۹۶	۱٫۶۶



شکل ۸ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر به هنجار شده به PAAS [۲۱] برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از محدوده کانسار نخلک.

مقدار نسبت Er/Nd در آب دریای عادی حدود ۰/۲۷ است [۳۸]. نسبت Er/Nd در سنگ‌های کربناتی به طور موثری می‌تواند سیماهای زمین‌شیمیایی به ارث رسیده از آب دریا به آهک‌های دریایی را آشکار نماید. مواد تخریبی می‌توانند به دلیل تمرکز ترجیحی Nd نسبت به Er ، مقدار Er/Nd را به کمتر از ۰/۱ کاهش دهند [۳۹، ۲۸]. نسبت Er/Nd در نمونه‌های مورد بررسی گستره تغییراتی از ۰/۱۱ تا ۰/۲۸ (با متوسط ۰/۱۴) را نشان می‌دهد (جدول ۶). این مقادیر بیانگر نقش موثر و مهم مواد تخریبی در توزیع Er و Nd در سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین منطقه نخلک هستند.

تفسیر بی‌هنجاری Eu در سنگ‌های کربناتی

مقادیر بی‌هنجاری‌های Eu کمک شایانی به درک و فهم شرایط فیزیکوشیمیایی سامانه‌های مختلف زمین‌شیمیایی چون محیط تشکیل سنگ‌های کربناتی می‌نماید [۴۰]. در این پژوهش، برای محاسبه مقادیر بی‌هنجاری Eu در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از رابطه زیر استفاده گردید [۲۱].

$$Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)} \quad (۱)$$

در این رابطه، حرف N بهنجار شدن مقادیر Eu ، Sm و Gd نسبت به $PAAS$ [۲۱] را نشان می‌دهد. مقادیر Eu ، Sm و Gd در $PAAS$ به ترتیب ۱/۰۸، ۵/۵۵ و ۴/۶۶ گرم در تن هستند [۲۱]. بر این اساس، مقدار Eu/Eu^* در نمونه‌های مورد بررسی در گستره ۰/۹۶ تا ۱/۶۸ (به طور میانگین ۱/۳۴) متغیر است (جدول ۶). به طور معمول، بی‌هنجاری‌های مثبت Eu (بهنجار شده به $PAAS$) در سنگ‌های کربناتی در معرض فرایندهای گرمایی [۴۱، ۴۲] ایجاد می‌شوند. افزون بر این، دیازنز شدید [۲۳، ۴۳]، تغییر در مقدار کانی‌های فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز [۴۳] و ورود توسط باد [۴۴] از جمله عوامل دیگری هستند که می‌توانند سبب ایجاد بی‌هنجاری‌های مثبت در سنگ‌های کربناتی شوند. همبستگی منفی بین Eu/Eu^*-Ba ($r = -0.14$) نقش فعالیت‌های گرمایی در رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی را رد می‌کند [۴۵] (شکل ۹ الف). تا به حال، مواد بادی از سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین نخلک گزارش نشده است. نقش فرایندهای دیازنتیک در رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت Eu در سنگ‌های کربناتی می‌تواند بر پایه همبستگی مثبت بین Eu/Eu^* با عناصر کم‌حرکی چون Y ، Zr ، Th و Nb ارزیابی شود [۴۲]. نبود همبستگی‌های مثبت قوی Eu/Eu^*-Zr

تفسیر بی‌هنجاری Ce در سنگ‌های کربناتی

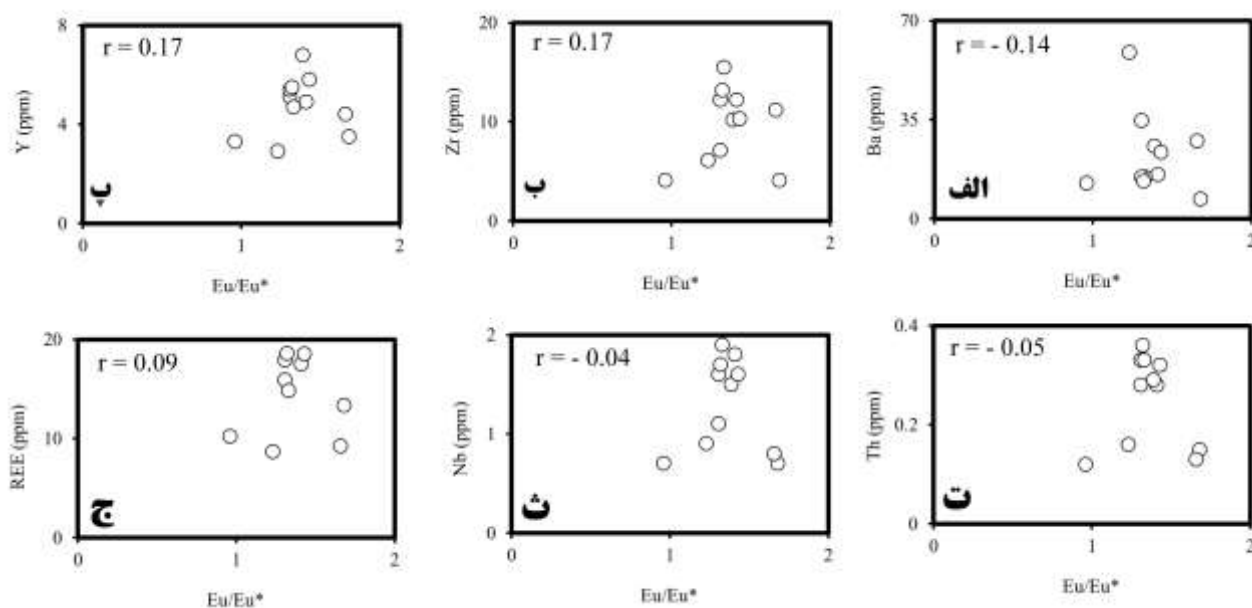
در این پژوهش، برای محاسبه مقدار بی‌هنجاری Ce در نمونه‌های کربناتی مورد بررسی از رابطه زیر استفاده گردید [۲۱].

$$Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N) \quad (۲)$$

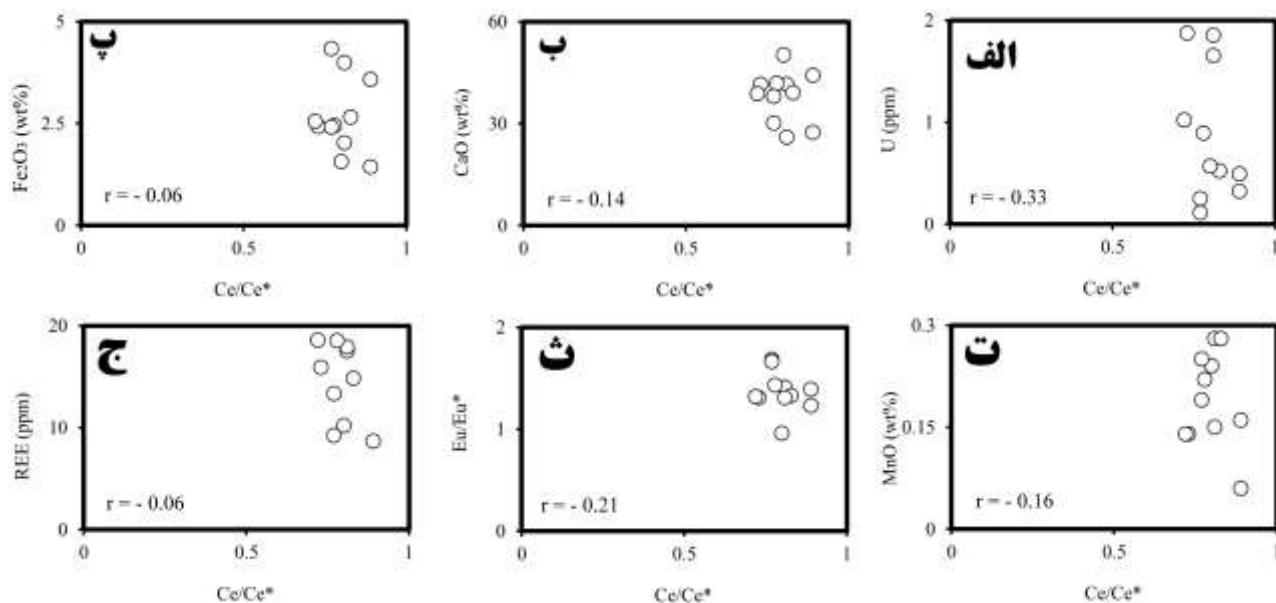
در این رابطه، حرف N بهنجار شدن مقادیر Ce ، La و Pr نسبت به $PAAS$ [۲۱] را نشان می‌دهد. مقادیر Ce ، La و Pr در $PAAS$ به ترتیب ۷۹/۶، ۳۸/۲ و ۸/۸۳ گرم در تن هستند [۲۱]. بر این اساس، مقدار Ce/Ce^* در نمونه‌های مورد بررسی در گستره ۰/۷۲ تا ۰/۸۹ (میانگین ۰/۸۰) است (جدول ۶). در آب‌های اقیانوسی، مقدار Ce/Ce^* دارای گستره تغییراتی از کمتر از ۰/۱ تا ۰/۴ است [۴۷]. در شیل‌ها، مقدار متوسط Ce/Ce^* حدود ۱ است [۴۲، ۴۸]. از اینرو، به نظر می‌رسد که مقدار Ce/Ce^* در سنگ‌های کربناتی وابسته به نسبت ترسیب از آب دریای خالص و آلودگی با مواد آواری باشد [۲۳]. نبود همبستگی‌های مثبت Ce/Ce^*-U ($r = -0.33$)، شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تغییر مقدار بی‌هنجاری Ce به شرایط احیایی محیط تشکیل سنگ‌های کربناتی ارتباطی ندارد [۳۴]. نبود همبستگی مثبت Ce/Ce^* با Fe_2O_3 ($r = -0.06$)، شکل ۱۰ پ) و MnO ($r = -0.16$)، شکل ۱۰ ت) نشان می‌دهند که سنگ‌های کربناتی مورد بررسی در یک محیط دریایی کم‌عمق نهشته شده‌اند. به طور معمول، در این نوع محیط‌ها، نقش فرایندهای روبش توسط اکسیدهای آهن و منگنز در مقایسه با محیط‌های دریایی عمیق بسیار ناچیز می‌باشد [۳۰، ۳۱].

می‌کند [۳۲، ۵۲]. نبود همبستگی مثبت بین Ce/Ce^*-REE (شکل ۱۰ ج) بیانگر اثر نداشتن فرآیندهای پس از نهشت بر تغییر مقدار بی‌هنجاری Ce است. از این بحث‌ها می‌توان برداشت نمود که مقدار و تغییرات بی‌هنجاری Ce در سنگ‌های کربناتی میزبان کانسار سرب و روی نخلک با مقدار ورود مواد تخریبی به محیط نهشت کنترل شده است.

فقدان همبستگی مثبت بین $Ce/Ce^*-Eu/Eu^*$ ($r = -0.21$) (شکل ۱۰ ث) پیشنهاد می‌کند که تغییرات پس از نهشت (دیاژنز) تأثیری بر روی مقادیر بی‌هنجاری Ce در سنگ آهک‌های مورد بررسی نداشته است [۴۹-۵۱]. بررسی‌های قبلی نشان داده است که جذب REE در طی تغییرات پس از نهشت همبستگی مثبتی بین بی‌هنجاری Ce و REE ایجاد



شکل ۹ نمودارهای دو متغیره Eu/Eu^*-Ba (الف)، Eu/Eu^*-Zr (ب)، Eu/Eu^*-Y (پ)، Eu/Eu^*-Th (ت)، Eu/Eu^*-Nb (ث) و Eu/Eu^*-REE (ج) برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از منطقه کانسار نخلک.



شکل ۱۰ نمودارهای دو متغیره Ce/Ce^*-U (الف)، Ce/Ce^*-CaO (ب)، $Ce/Ce^*-Fe_2O_3$ (پ)، Ce/Ce^*-MnO (ت)، $Ce/Ce^*-Eu/Eu^*$ (ث) و Ce/Ce^*-REE (ج) برای سنگ‌های کربناتی بررسی شده از منطقه کانسار نخلک.

برداشت

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی سنگ‌های کربناتی کرتاسه پسین میزبان کانسار سرب - روی نخلک عبارتند از:

۱- سنگ‌های کربناتی شامل کلسیت، دولومیت، کوارتز، پلاژیوکلاز، کائولینیت، اسمکتیت، ایلیت، و هماتیت هستند و از آهک دولومیتی و دولومیت کلسیتی تشکیل شده‌اند.

۲- بر اساس نسبت Sr/Ba و نبود همبستگی مثبت Ce/Ce^* با Fe_2O_3 و MnO سنگ‌های کربناتی در یک محیط دریایی کم عمق گسترش و تکامل یافته‌اند.

۳- مقادیر نسبت‌های زمین‌شیمیایی چون Y/Ho و Er/Nd نشان می‌دهند که توزیع REE در سنگ‌های کربناتی با مقدار ورود مواد تخریبی به محل نهشت کنترل شده است.

۴- همبستگی‌های مثبت لانتانیدها با اجزایی چون SiO_2 ، Al_2O_3 ، TiO_2 ، Ga ، Th ، Y ، Nb و V و Cu و همبستگی‌های منفی آنها با CaO آشکار می‌کنند که REE در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی خاستگاه آواری دارند.

۵- نقش نداشتن فرآیندهای دیاژنتیک بر توزیع و مقدار REE در سنگ‌های کربناتی مورد بررسی از همبستگی‌های منفی و یا مثبت بسیار ضعیف $REE-P_2O_5$ ، $Mn-Sr$ ، $REE-Ce/Ce^*$ و $Eu/Eu^*Ce/Ce^*$ برداشت می‌شود.

۶- همبستگی‌های منفی Ce/Ce^* با U ، CaO ، Fe_2O_3 ، MnO و REE نشان می‌دهند که سنگ‌های کربناتی در یک محیط کم عمق تشکیل شده‌اند و تغییر مقدار بی‌هنجاری Ce به شرایط پتانسیل اکسایش - کاهش محیط تشکیل ارتباطی ندارد. این پژوهش نشان می‌دهد که فرآیندهای پس از نهشت اثری بر تغییر بی‌هنجاری Ce نداشته‌اند و تغییر این بی‌هنجاری به احتمال بسیار با مقدار ورود مواد تخریبی به محیط نهشت کنترل شده است.

۷- این پژوهش نشان می‌دهد که فرآیندهای روبش، - فعالیت‌های گرمایی و دیاژنز نقشی در رخداد بی‌هنجاری مثبت Eu نداشته‌اند و این بی‌هنجاری مثبت ایجاد شده با ورود پلاژیوکلازهای تخریبی به محیط نهشت سنگ‌های کربناتی در ارتباط است.

قدردانی

این پژوهش از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده است، که نگارندگان به این وسیله سپاس و قدردانی خود را از همه مسئولین اعلام می‌دارند. نگارندگان همچنین، از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Jazi M. A., Shahabpour J., "Investigating mineralogical, structural, textural and geochemical characteristics of Nakhlak lead mine, Isfahan", Iranian Journal of Economic Geology 2 (2010) 131-151.
- [2] Jazi M. A., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Galena crystallography, mineralogy and geochemistry, Nakhlak lead deposit (Isfahan)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 3-18.
- [3] Vaziri S. H., "Lithostratigraphy, biostratigraphy and sedimentary environments of Triassic rocks of the Nakhlak area in N.E. Anarak (Central Iran) and preparing geological map of the studied area with scale of 1:20.000", Islamic Azad University., Science and Research Branch, Tehran, Ph.D. thesis, (1996) 344p.
- [5] Vaziri S. H., Senowbari-Daryan B., Kohansal Ghadimvand N., "Lithofacies and microbiofacies of the Upper Cretaceous rocks (Sadr unit) of Nakhlak area in northeastern Nain, Central Iran", Journal of Geosciences 4 (2005) 71-80.
- [6] Nabavi M. H., "An Introduction to the Geology of Iran", Geological Survey of Iran Publication (1976) 1-105.
- [7] Seyed-Emami K., Brants A., Bozorgnia F., "Stratigraphy of the Cretaceous rocks south east of Esfahan", Geology Survey of Iran, Rep. No 20 (1971) 5-27.
- [8] Davoudzadeh M., Soffel H., Schmidt K., "On the rotation of Central-East-Iran microplate", Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen 3 (1981) 180-192.
- [9] Soffel H. C., Forster H. G., "Polar wander path of the central Iran microplate including new results, Geodynamic project (Geotraverse) in Iran", Geological Survey of Iran (Final Report), Rep. No. 51 (1983) 13-26.

- [19] Nothdurft L. D., Webb G. E., Kamber B. S., "Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: Confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68 (2004) 263–283.
- [20] Veizer J., "Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates", In: Reeder, R.J. (Ed.), *Carbonates: Mineralogy and Chemistry*, Mineralogical Society of America 11 (1983) 265–299.
- [21] Taylor S. R., McLennan S. M., "The continental crust: Its composition and evolution", Blackwell, Oxford, (1985) 349p.
- [22] Frolova E. K., "On classification of carbonate rocks of limestone-dolomite-magnesite series: NovostiNeft", *Geology* 3 (1959) 34–35.
- [23] Murray R. W., Buchholtz M. R., Brumsack H. J., "Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce*, results from ODP leg 127", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55 (1991) 2453–2466.
- [24] Turekian K. K., Wedepohl K. H., "Distribution of elements in some major units of earth's crust", *Geological Society of American Bulletin* 72 (1961) 175–192.
- [25] Nagarajan R., Madhavaraju J., Armstrong-Altrin J. S., Nagendra R., "Geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima Basin, Karnataka, southern India", *Geoscience Journal* 15 (2011) 9–25.
- [26] Madhavaraju J., Ramasamy S., "Rare earth elements in limestones of Kallankurichchi Formation of Ariyalur Group, Tiruchirappalli Cretaceous, Tamil Nadu", *Geological Society of India* 54 (1999) 291–301.
- [27] Brand U., Veizer J., "Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system: I. Trace elements", *Journal of Sedimentary Petrology* 50 (1980) 1219–1236.
- [28] Bellanca A., Masetti D., Neri R., "Rare earth elements in limestone-marlstone couplets from the Albian–Cenomanian Cismon section (Venetian region, northern Italy): Assessing REE sensitivity to environmental changes", *Chemical Geology* 141 (1997) 141–152.
- [29] Elderfield H., Upstill-Goddard R., Sholkovitz E. R., "The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the
- [10] Rutenr A. W., "Geology of the Aghdarband area (kopet Dag, NE-Iran)", *Geologie Abhandlungen B.A.* 38 (1991) 7–79.
- [11] Alavi M., Vaziri H., Seyed-Emami K., Lasemi Y., "The Triassic and associated rocks of the Nakhlak and Aghdarband areas in central and Northeastern Iran as remnants of the Southern Turanian continental margin", *Geological Society of America Bulletin* 109 (1997) 1563–1575.
- [12] Balini M., Nicora A., Berra F., Garzanti E., Levera M., Mattei M., Muttoni G., Zahchi A., Bollati I., Larghi C., Zanchetta S., Salamati R., Mossavvari F., "The Triassic stratigraphic succession of Nakhlak (Central Iran), a record from an active margin. South Caspian to Central Iran Basins", *Geological Society of London, Special Publications* 312 (2009) 287–321.
- [13] Zanchi A., Zanchetta S., Garzanti E., Balini M., Berra F., Mattei M., Muttoni G., "The Cimmerian evolution of the Nakhlak-Anarak area (Central Iran) and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin, South Caspian to Central Iran Basins", *Geological Society of London, Special Publications* 312 (2009) 261–286.
- [14] Holzer H. F., Ghassemipour R., "Geology of the Nakhlak lead mine area (Anarak district, Central Iran)", *Geological Survey of Iran* (1969) 44 p.
- [15] Vaziri S. H., "The Triassic Nakhlak Group, an exotic succession in Central Iran", *The fourth International Symposium on Eastern Mediterranean Geology*, Isparta, Turkey (2001) 53–68.
- [16] Davoudzadeh M., Seyed-Emami K., Amidi S. M., "Stratigraphy of the Triassic Nakhlak Group, Anarak Region, Central Iran", *Geological Survey of Iran, Rep. no. 28* (1972) 5–28, Tehran.
- [17] Vaziri S. H., Fursich F. T., Kohansalghadimvand N., "Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 29 (2012) 384–397.
- [18] Song C., Herong G., Linhua S., "Geochemical characteristics of REE in the Late Neo-Proterozoic limestone from northern Anhui Province, China", *Chinese Journal of Geochemistry* 33 (2014) 187–193.

- ground rules", *Paleoceanography* 5 (1990) 823–833.
- [40] Derry L. A., Jacobsen S. B., "The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (1990) 2965–2977.
- [41] Siby K., Nath B. N., Ramaswamy V., Naman D., Rao T., Raju K. K., Selvaraj K., Chen C. T. A., "Possible detrital, diagenetic and hydrothermal sources for Holocene sediments of the Andaman backarc basin", *Marine Geology* 247 (2008) 178–193.
- [42] Madhavaraju J., Lee Y. I., "Geochemistry of the Dalmiapuram Formation of the Uttatur Group (Early Cretaceous), Cauvery basin, southeastern India: Implications on provenance and paleo-redox conditions", *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas* 26 (2009) 380–394.
- [43] Nath B. N., Bau M., Ramalingeswara R. B., Rao C. M., "Trace and rare earth elemental variation in Arabian Sea sediments through a transect across the oxygen minimum zone", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (1997) 2375–2388.
- [44] Elderfield H., Greaves M. J., "The rare earth elements in seawater", *Nature* 296 (1982) 214–219.
- [45] Hu M., Ngia N. R., Gao D., "Dolomitization and hydrotectonic model of burial dolomitization of the Furongian-lower Ordovician carbonates in the Tazhong Uplift, central Tarim Basin, NW China: Implications from petrography and geochemistry", *Marine Petroleum Geology* 106 (2019) 88–115.
- [46] Shields G. A., Webb G. E., "Has the REE composition of seawater changed over geologic time", *Chemical Geology* 204 (2004) 103–115.
- [47] Allwood A. C., Kamber B. S., Walter M. R., Burch I. W., Kanik I., "Trace elements record depositional history of an Early Archean stromatolitic carbonate platform", *Chemical Geology* 270 (2010) 148–163.
- [48] Piepgras D. J., Jacobsen S. B., "The behavior of rare earth elements in seawater: Precise determination of variations in the North Pacific water column", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56 (1992) 1851–1862.
- [49] Alibo D. S., Nozaki Y., "Rare earth elements in seawater: Particle association, shale-composition of ocean waters", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (1990) 971–991.
- [30] Madhavaraju J., González-León C. M., Lee Y. I., Armstrong-Altrin J. S., Reyes-Campero L. M., "Geochemistry of the Mural Formation (Aptian–Albian) of the Bisbee Group, Northern Sonora, Mexico", *Cretaceous Research* 31 (2010) 400–414.
- [31] Armstrong-Altrin J. S., Verma S. P., Madhavaraju J., Lee Y. I., Ramasamy S., "Geochemistry of Late Miocene Kudankulam Limestones, South India", *International Geology Review* 45 (2003) 16–26.
- [32] Alexander B. W., Bau M., Andersson P., Dulski P., "Continently derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (2008) 378–394.
- [33] Bau M., "Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 123 (1996) 323–333.
- [34] Özyurt M., Kirmaci M. Z., Al-Aasm I., Hollis C., Tash K., Kandemir R., "REE characteristics of lower cretaceous limestone succession in Gumushane, NE Turkey: Implications for ocean paleoredox conditions and diagenetic alteration", *Minerals* 10 (2020) 683.
- [35] Tobia F. H., "Stable isotope and rare earth element geochemistry of the Baluti carbonates (Upper Triassic), Northern Iraq", *Geoscience Journal* 22 (2018) 975–987.
- [36] Nozaki Y., Zhang J., Amakawa H., "The fractionation between Y and Ho in the marine environment", *Earth and Planetary Science Letters* 148 (1997) 329–340.
- [37] Webb G. E., Kamber B. S., "Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A shallow seawater proxy", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2000) 1557–1565.
- [38] De Baar H. J., German C. R., Elderfield H., Van Gaans P., "Rare earth element distributions in anoxic waters of the Cariaco Trench", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52 (1988) 1203–1219.
- [39] German C. R., Elderfield H., "Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: the

P. K., "Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 248 (2019) 25–42.

[52] Shields G., Stille P., "Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites", *Chemical Geology* 175 (2001) 29–48.

normalization, and Ce oxidation", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (1999) 363–372.

[50] Bau M., Alexander B., "Preservation of primary REE patterns without Ce anomaly during dolomitization of Mid-Paleoproterozoic limestone and the potential re-establishment of marine anoxia immediately after the "Great Oxidation Event", *South African Journal of Geology* 109 (2006) 81–86.

[51] Liu X. M., Hardisty D. S., Lyons T. W., Swart