



## ژئوشیمی اورانیم و عناصر نادر خاکی در کانسار فسفات دلیر، زون البرز مرکزی

خالق خشنودی<sup>\*</sup>، سمانه ضیاپور

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران- ایران

\*Email: khoshnoodi78@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۱۴

### چکیده

کانسار فسفات دلیر در ۵۷ کیلومتری جنوب غربی شهر چالوس در استان مازندران و زون البرز مرکزی دارد. میزبان این ذخیره سازند سلطانیه است که یکی از مهم‌ترین سازندهای میزبان فسفات رسوبی در ایران است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی بر روی نمونه‌های فسفات کانسار دلیر نشان داد که آپاتیت، کلسیت، کوارتز و دولومیت کانی‌های اصلی و کانی‌های فرعی شامل مونت‌موریلونیت، پیریت و باریت در مقادیر فرعی به همراه مقادیر جزئی سیدریت، روتیل، ایلیت و گوتیت هستند. میزان  $P_2O_5$ ، U و REE در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ۵ تا ۱۶/۱ درصد، ۱/۹ تا ۵/۵ و ۴۵/۹ تا ۱۳۶/۹ پی ام متغیر است. نمونه‌های مورد مطالعه دارای بی‌هنجاری منفی Ce است که نشان‌دهنده وجود یک محیط فاقد اکسیژن در زمان نهشت فسفات دلیر می‌باشد. براساس فاکتورهای کنترل‌کننده تمرکز اورانیم در فسفریت‌ها، افق فسفات سازند سلطانیه به دلیل شرایط آب و هوای گرم تا نیمه‌گرم مرطوب و pH خنثی تا اسیدی آب دریا در زمان تشکیل فسفات، پتانسیل غنی‌شدگی اورانیم را ندارد. در نهایت، با توجه به این‌که نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های فسفات کانسار دلیر غنی‌شدگی اورانیم نشان نمی‌دهد و همچنین با در نظر گرفتن فاکتورهای کنترل‌کننده تمرکز اورانیم در فسفریت‌ها می‌توان پیش‌بینی کرد احتمالاً سایر ذخایر فسفات سازند سلطانیه فاقد غنی‌شدگی اورانیم هستند.

**کلیدواژه‌ها:** کانسار دلیر، سازند سلطانیه، اورانیم، بی‌هنجاری Ce

## Geochemistry of uranium and REEs in Dalir phosphate deposit, Central Alborz zone

K. Khoshnoodi\*, S. Ziapour

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

Research Article

Received 2.1.2022 Accepted 3.4.2022

### Abstract

The Dalir phosphate deposit is located 57 km southwest of Chalus city in Mazandaran province, the Central Alborz zone. This deposit is hosted by Soltanieh Formation, one of Iran's important hosts of sedimentary phosphates. The results of X-ray diffraction (XRD) analysis and optical and electron microscopy studies on the phosphate samples indicate that the main minerals include apatite, calcite, quartz, and dolomite accompanied by montmorillonite, pyrite, and barite in minor amounts; siderite, rutile, illite, and goethite in trace amounts. The concentration of  $P_2O_5$ , U, and REEs in the studied samples ranged from 5 to 16.1%, 1.9 to 5.5, and 45.9 to 136.9 ppm, respectively. The studied samples have negative Ce anomaly, indicating an anoxic environment during the Dalir phosphate deposition. Based on the factors controlling uranium concentration in phosphorites, the phosphate horizon of Soltanieh Formation does not have uranium enrichment potential due to warm to semi-warm humid paleoclimate with neutral to acidic pH of the seawater during the Dalir phosphate deposition in lower Cambrian. Finally, considering the results of the chemical analysis of phosphate samples of the Dalir deposit (lack of uranium enrichment) and also the factors controlling uranium concentration in phosphorites, it can be predicted that the other phosphate deposits of Soltanieh Formation probably not be uranium enriched.

**Keywords:** Dalir deposit, Soltanieh formation, Uranium, Ce anomaly



## ۱. مقدمه

سنگ‌های فسفات رسوبی دریایی یکی از مهم‌ترین منابع تولید فسفر در جهان به شمار می‌آیند که عموماً حاوی مقادیر قابل توجهی اورانیم، عناصر نادر خاکی، وانادیم، سرب، کادمیم و آرسنیک در مقایسه با کربنات‌ها و شیل‌ها هستند. ذخایر فسفات رسوبی در جهان از دوره پرکامبرین تا عهد حاضر گسترش دارند و عمدتاً از کانی فلئور آپاتیت با ترکیب شیمیایی  $(F, Cl, OH)_2Ca_3(PO_4)_2$  تشکیل شده‌اند. جریان‌های بالارونده از مهم‌ترین عوامل در رسوب فسفات‌های دریایی عهد حاضر در عرض‌های جغرافیایی کمتر از ۴۰ درجه هستند [۱-۴]. تمرکز اورانیم در فسفات‌های نهشته شده بر روی قاره‌ها و کف دریاهای امروزی از چند دهه تا چند صد پی‌پی‌ام (به‌طور متوسط ۷۵ پی‌پی‌ام) متغیر است. متوسط تمرکز اورانیم در نهشته‌های پرکامبرین و کامبرین ۴۸-۴ پی‌پی‌ام، در نهشته‌های پالئوزوئیک و ژوراسیک ۹۰-۲۰ پی‌پی‌ام، در نهشته‌های کرتاسه فوقانی-پالئوژن ۱۳۰-۴۰ پی‌پی‌ام، در نهشته‌های نئوژن ۱۳۰-۳۰ پی‌پی‌ام و در نهشته‌های کواترنری (شامل هولوسن) ۱۱۰-۳۰ پی‌پی‌ام می‌باشد [۵]. در نیمه دوم قرن بیستم، فسفات‌ها به‌عنوان یک منبع غیرمرسوم مواد رادیواکتیو مورد توجه قرار گرفتند و رفتار اورانیم در آن‌ها در تحقیقات متعددی مورد بحث قرار گرفت [۵-۸]. منابع فسفات جهان دارای بیش از ۱۹ میلیون تن اورانیم هستند. تمرکز اورانیم در فسفات‌ها به صورت جانشینی به جای کلسیم در شبکه فرانکولیت، جذب سطحی و تشکیل کانی‌های اورانیم مانند اورانینیت است. تمرکز عناصر نادر خاکی در فسفات‌ها نیز به صورت جانشینی به جای کلسیم در شبکه فرانکولیت می‌باشد [۵]. تمرکز اورانیم و عناصر نادر خاکی در فسفات‌های رسوبی سبب شده است که این عناصر به عنوان محصول جانبی در صنایع تولید کود استحصال شوند تا از آلودگی زیست محیطی نیز جلوگیری شود [۹، ۱۰].

فسفات‌های رسوبی در ایران در زون ایران مرکزی، البرز مرکزی و زاگرس در دوره‌های زمانی مختلف تشکیل شده‌اند. فسفات‌های سازند سلطانیه به سن اینفراکامبرین-کامبرین زیرین در ایران مرکزی و البرز مرکزی، فسفات‌های سازند جیروود به سن دونین بالایی-کربونیفر در البرز مرکزی و فسفات‌های سازند پابده و گورپی به سن پالئوسن-الیگوسن در زون زاگرس در جنوب غربی ایران گسترش دارند [۱۱]. کانسار فسفات دلیر با ۲۳ میلیون تن ذخیره با عیار متوسط ۱۲ درصد  $P_2O_5$  یکی از مهم‌ترین ذخایر فسفات در سازند سلطانیه است. کانسار دلیر در فاصله ۵۷ کیلومتری جنوب غربی چالوس در استان مازندران

با مختصات جغرافیایی بین طول‌های "۳۹'۰۱" و "۴۰'۰۵" و عرض‌های "۵۵'۱۷" و "۵۲'۱۹" شرقی و شمالی واقع شده است. این کانسار بخشی از کمربند فسفاتی مردند-دماند محسوب می‌شود که به صورت یک افق چینه سان در شیل‌های بالایی سازند سلطانیه توسعه و تکامل یافته است [۱۱، ۱۲]. کشورهای مختلف از جمله چین به دلیل ارزش اقتصادی بالای و استراتژیک بودن اورانیم و عناصر نادر خاکی به دنبال استحصال این عناصر از ذخایر تیپ فسفات هستند. در این پژوهش با تکیه بر فاکتورهای کنترل‌کننده تمرکز اورانیم در فسفات‌های رسوبی و براساس نتایج حاصل از مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی به بررسی تمرکز اورانیم و عناصر نادر خاکی در طی فسفات‌زایی در کانسار دلیر پرداخته شده است.

## ۲. زمین‌شناسی

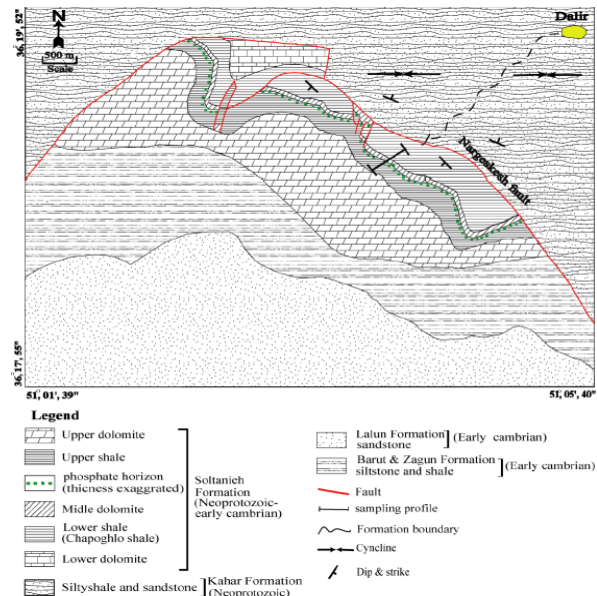
افق فسفات در کانسار دلیر حدود ۵ کیلومتر با میانگین ضخامت ۳/۵۴ متر گسترش دارد. این افق بر روی عضو دولومیت میانی سازند سلطانیه واقع شده است. مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه دلیر به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازند کهر به سن نئوپروتروزوئیک، سازند سلطانیه (نئوپروتروزوئیک-کامبرین زیرین)، سازندهای باروت، زاگون و لالون به سن کامبرین زیرین هستند. سازند سلطانیه در منطقه دلیر به صورت صخره‌ساز بخشی از ارتفاعات را تشکیل داده و یک مجموعه رسوبی به ضخامت تقریبی ۷۰۰ متر است که از پایین به بالا شامل پنج عضو (۱) دولومیت خاکستری تیره زیرین (به ضخامت ۳۰ متر)، (۲) شیل سیلتی میکادار خاکستری سبز زیرین (به ضخامت ۱۳۵ متر)، (۳) دولومیت میانی با میان لایه‌هایی از سنگ آهک و شیل (به ضخامت ۱۱۵ متر)، (۴) شیل سیلتی میکادار خاکستری-سیاه بالایی (به ضخامت ۱۲۰ متر) و (۵) دولومیت بلورین خاکستری بالایی (به ضخامت ۲۸۰ متر) است. اولین تظاهر فسفات به صورت لایه‌های چند سانتی‌متری در مرز تدریجی عضو دولومیت زیرین و شیل زیرین پدیدار می‌گردد. افق فسفات‌دار اصلی در بخش زیرین عضو شیل میانی واقع شده است که شامل ۳ تا ۵ متر آهک دولومیتی سیاه حاوی پلت‌های فسفات است [۱۲-۱۴].



روش‌های طیفسنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) و طیفسنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی، جزئی و نادر خاکی توسط آزمایشگاه شیمی مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور آنالیز شدند. نتایج آنالیزهای شیمیایی انجام شده در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.



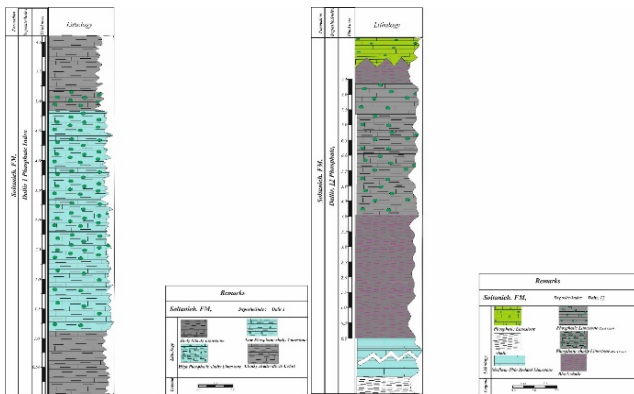
شکل ۲. نمایی نزدیک از افق فسفات در کانسار دلیر، دید به سمت شمال.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه دلیر و موقعیت کانسار دلیر [۱۵، ۱۶].

### ۳. روش پژوهش

نمونه‌برداری از کانسنگ در کانسار دلیر به فاصله یک متری در ۲ پروفیل از رخنمون‌های افق فسفات انجام شد (شکل‌های ۲ و ۳). تعداد ۱۰ مقطع نازک-صیقلی به منظور مطالعات میکروسکوپی تهیه شد. سپس ۲ نمونه کانسنگ فسفات به منظور تعیین کانی‌ها برای آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) به آزمایشگاه زرآما در تهران ارسال شد. بررسی‌های کانی‌شناسی دقیق در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور توسط میکروسکوپ الکترونی مدل FESEM SIGMA/VP-ZEISS انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در زمان شمارش ۲۰-۱۵ ثانیه و ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰-۱۵ keV انجام شده است. در نهایت جهت بررسی‌های ژئوشیمیایی تعداد ۱۱ نمونه سنگ فسفات به



شکل ۳. توالی‌های چینه‌شناسی از دو پروفیل برداشت شده در منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های افق فسفاتی کانسار دلیر (عناصر اصلی برحسب درصد و عناصر فرعی برحسب پی‌پی‌ام)

Sample	D-۰۱	D-۰۲	D-۰۳	D-۰۴	D-۰۵	D-۰۶	D-۰۷	D-۰۸	D-۰۹	D-۱۰	D-۱۱
MgO	۱۴٫۹	۱٫۴	۶	۳٫۶	۵٫۵	۱٫۸	۴٫۲	۳٫۵	۲٫۶	۱۰٫۶	۱٫۷
Na <sub>۲</sub> O	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱
K <sub>۲</sub> O	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۳	۱٫۳	۱	۰٫۲	۰٫۴	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۴
FeO	۲	۰٫۳	۱٫۵	۲٫۴	۲٫۸	۱٫۳	۱٫۶	۱٫۵	۱٫۶	۴٫۴	۱٫۳
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۰٫۸	۰٫۳	۱٫۱	۴٫۵	۳٫۸	۰٫۶	۱٫۴	۱٫۹	۱٫۹	۱٫۶	۱٫۲
CaO	۳۳٫۳	۵۲٫۱	۴۱٫۲	۲۱٫۸	۳۱٫۱	۴۴	۴۱٫۴	۳۸٫۶	۳۵	۴۹٫۴	۶۳٫۹
P <sub>۲</sub> O <sub>۵</sub>	۷٫۵	۸٫۷	۱۴٫۱	۷٫۱	۶٫۵	۹٫۸	۱۲٫۴	۸٫۶	۹٫۹	۵	۱۶٫۱
TiO <sub>۲</sub>	۰٫۱	۰	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
U	۱٫۹	۲٫۲	۵٫۵	۵٫۵	۴٫۳	۲٫۳	۳٫۷	۳٫۴	۳٫۱	۲٫۱	۳٫۳
Th	۰٫۷	۰٫۲	۰٫۸	۳٫۲	۲٫۶	۰٫۶	۱٫۱	۱٫۹	۱٫۳	۱٫۴	۱٫۱
Y	۴۰٫۴	۳۸٫۳	۷۰٫۷	۷۸٫۳	۹۵٫۴	۴۶٫۷	۶۴٫۲	۶۵٫۵	۸۳٫۳	۵۶٫۸	۶۹
Sc	۱٫۷	۰٫۸	۱٫۸	۴٫۶	۳٫۸	۱٫۴	۲	۲٫۱	۲٫۲	۱٫۸	۱٫۸
Cr	۷٫۶	۴٫۶	۱۲٫۲	۳۶٫۹	۲۹٫۵	۱۰	۱۴٫۸	۱۲٫۷	۲۰٫۳	۲۲	۲۳٫۲
Zn	۸۷٫۳	۹۹٫۱	۳۸٫۳	۲۷	۴۳٫۲	۱۲۲٫۴	۳۰٫۵	۲۶٫۲	۵۴٫۷	۵۳۳	۱۶۵٫۷
Sr	۲۹۹٫۱	۵۴۹٫۴	۵۴۲٫۴	۳۶۰	۵۹۶٫۳	۵۷۵٫۸	۶۳۸٫۷	۵۶۷٫۳	۶۹۶٫۴	۴۲۰٫۷	۶۳۴٫۴



جدول ۲. مقادیر عناصر خاکی نادر برحسب پی‌پی‌ام در نمونه‌های افق فسفاتی کانسار دلیر به همراه برخی نسبت‌های عنصری

Sample	PAAS	D-۰۱	D-۰۲	D-۰۳	D-۰۴	D-۰۵	D-۰۶	D-۰۷	D-۰۸	D-۰۹	D-۱۰	D-۱۱
La	۳۸	۱۹,۶	۱۹	۲۸	۴۱,۸	۴۲,۶	۲۶,۸	۳۰,۲	۳۲	۳۶,۷	۲۸,۴	۳۴,۸
Ce	۸۰	۱۷,۱	۶,۳	۱۲,۲	۲۸,۴	۲۲,۵	۱۲,۷	۱۳,۷	۱۶,۴	۱۴,۸	۱۴,۲	۱۵,۳
Pr	۸۸	۳,۷	۲,۲	۴,۲	۷,۲	۶,۸	۴,۲	۵,۱	۵,۲	۵,۹	۴,۵	۵,۲
Nd	۳۲	۱۴,۴	۸,۹	۱۷,۲	۳۰,۲	۲۸,۹	۱۵,۹	۱۹,۷	۲۰,۲	۲۳,۶	۱۸,۱	۲۰,۹
Sm	۵۶	۲,۲	۱,۲	۲,۷	۴,۶	۴,۳	۲,۷	۳,۵	۳,۶	۴	۳	۳,۶
Eu	۱,۱	۰,۴	۰,۴	۰,۷	۱,۲	۱,۱	۰,۷	۰,۷	۰,۸	۰,۸	۰,۶	۰,۸
Gd	۴,۷	۱,۷	۱,۴	۳,۳	۵,۳	۵,۱	۲,۴	۳,۳	۳,۱	۳,۷	۲,۹	۳,۴
Tb	۰,۷۷	۰,۵	۰,۳	۰,۷	۱	۱,۱	۰,۵	۰,۸	۰,۸	۰,۹	۰,۷	۰,۸
Dy	۴,۴	۲,۷	۲,۱	۴,۶	۶,۳	۶,۷	۳,۳	۴,۷	۴,۸	۶	۴,۴	۴,۹
Ho	۱	۰,۹	۰,۶	۱,۴	۱,۷	۲	۱	۱,۴	۱,۴	۱,۸	۱,۳	۱,۵
Er	۲,۹	۲	۱,۶	۳,۶	۴,۴	۵,۳	۲,۳	۳,۴	۳,۵	۴,۵	۳,۲	۳,۶
Tm	۰,۴	۰,۴	۰,۳	۰,۷	۰,۸	۱	۰,۴	۰,۶	۰,۶	۰,۸	۰,۶	۰,۶
Yb	۲,۸	۲	۱,۳	۳,۲	۳,۸	۴,۷	۲	۳,۲	۳,۴	۳,۹	۳,۱	۳,۲
Lu	۰,۴	۰,۲	۰,۱	۰,۳	۰,۳	۰,۴	۰,۲	۰,۳	۰,۳	۰,۴	۰,۳	۰,۳
ΣREE	۱۸۳	۶۷,۹	۴۵,۹	۸۲,۸	۱۳۶,۹	۱۳۲,۵	۷۵,۱	۹۰,۷	۹۶,۳	۱۰۷,۹	۸۵,۵	۹۸,۹
LREE	۱۷۰	۵۹,۱	۳۹,۴	۶۸,۳	۱۱۸,۷	۱۱۱,۳	۶۵,۴	۷۶,۲	۸۱,۴	۸۹,۵	۷۱,۷	۸۴
HREE	۱۲,۷	۸,۷	۶,۳	۱۴,۵	۱۸,۲	۲۱,۲	۹,۷	۱۴,۴	۱۴,۸	۱۸,۲	۱۳,۶	۱۴,۹
LREE/HREE	۱۳,۴	۶,۸	۶,۲	۴,۷	۶,۵	۵,۳	۶,۷	۵,۳	۵,۵	۴,۹	۵,۳	۵,۶
(La/Yb) <sub>N</sub>		۰,۷	۱	۰,۷	۰,۸	۰,۷	۱	۰,۷	۰,۷	۰,۷	۰,۷	۰,۸
Eu/Eu*		۱	۱,۳	۱,۲	۱,۱	۱,۱	۱,۲	۱	۱,۱	۱	۰,۹	۱
Ce/Ce*		۰,۵	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۲	۰,۳	۰,۳

## ۴. نتایج و بحث

## ۱۰۴ بررسی فاکتورهای کنترل‌کننده غنی‌شدگی اورانیم در فسفات سازند سلطانیه

فاکتورهای مختلفی نظیر محیط تشکیل، کانی‌شناسی، میزان مواد آلی، میزان فسفر، شرایط اکسیداسیون و احیا، pH، شرایط آب و هوایی دیرینه و فرایندهای هوازگی در فسفریت‌ها در تمرکز اورانیم در فسفات‌های رسوبی دریایی نقش دارند [۱۷].

فسفریت‌های دریایی با منشأ فلات قاره‌ای دارای پتانسیل غنی‌شدگی اورانیم هستند که براساس محیط تشکیل متشکل از دو زیررده هستند: (۱) فسفریت‌های دریایی لایه‌ای که بر روی حاشیه فلات قاره نهشته شده‌اند و به زیررده فسفریا معروفند و (۲) فسفریت‌های ندولی که در محیط پلاتفرم دریایی کم‌عمق نزدیک ساحل نهشته شده‌اند و به طور محلی در معرض جابه‌جایی مجدد قرار گرفته‌اند و زیررده لندپیل نامیده می‌شوند. فسفریت‌های لایه‌ای دارای مقادیر اورانیم بیشتری نسبت به فسفریت‌های ندولی می‌باشند [۱۸]. وجود ماده آلی در فسفریت‌ها نقشی مهم در تجمع اورانیم دارد. همراهی مواد آلی و فسفات کلسیم یک شرط لازم برای تمرکز اورانیم در فسفریت‌ها و شیل‌های سیاه می‌باشد. در فسفات‌های رسوبی اورانیم‌دار، یک همبستگی مثبت مشخصی بین میزان  $P_2O_5$  و

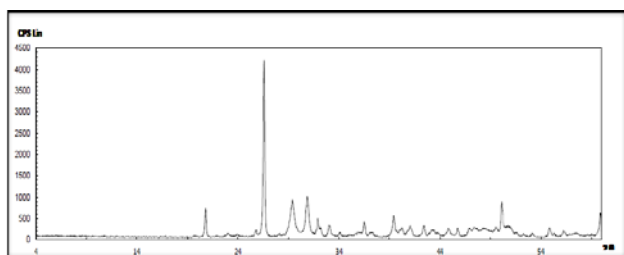
مواد آلی با محتوای اورانیم گزارش شده است [۶، ۱۹-۲۰]. تمرکز اورانیم در سنگ‌های فسفات رسوبی از سه مکانیسم پیروی می‌کند: (۱) جانشینی  $U^{+۴}$  به جای  $Ca^{+۲}$  در شبکه فرانکولیت، (۲) جذب سطحی  $U^{+۶}$  بر سطح بلور آپاتیت و (۳) تشکیل کانی‌های مستقل اورانیم (مانند اورانینیت و نینگوئیت) [۵]. اورانیم نمی‌تواند در ساختار کانی‌های فسفات آلومینیم و کلسیم‌دار مانند کراندالیت و ویولیت که در شرایط هوازگی تشکیل می‌شوند، وارد شود [۱۸]. تمرکز اورانیم در فسفات‌های رسوبی در ارتباط با محیط‌های احیایی می‌باشد که در این محیط‌ها، U(IV) در ساختار آپاتیت یا فرانکولیت جانشین  $Ca^{+۲}$  می‌شود. حضور مقادیر بالای پیریت و مواد آلی در فسفریت‌ها از شاخص‌های رسوبات در حوضه‌های فاقد اکسیژن می‌باشد [۶، ۷، ۹، ۲۱]. فسفات کلسیم دارای توانایی بالایی در جذب اورانیم از محلول‌های قلیایی ضعیف نظیر آب دریا می‌باشد [۲۲].

در آب و هوای گرم و خشک، آب رودخانه‌ها با محتوای کربنات بالا و حالت قلیایی ( $pH \geq 8$ ) به سرعت اورانیم را از سنگ‌ها شسته و به صورت کمپلکس‌های کربناته به آب دریا منتقل می‌کند. در آب و هوای گرم و خشک، رسوبات دریایی دارای غلظت‌های بالایی از اورانیم هستند که به دلیل مقدار نسبتاً



## ۲.۴ کانی‌شناسی

نتایج آنالیز XRD (شکل ۴) و مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی بر روی فسفات‌های دلیر نشان می‌دهد که این افق‌ها از کانی‌شناسی ساده‌ای برخوردارند. نتایج XRD مشخص کرد که کانی اصلی فسفات در افق‌های مورد مطالعه، فلئورآپاتیت با فرمول  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  بوده و کانی‌های کلسیت، کوارتز و دولومیت نیز کانی‌های اصلی باطله در کانسنگ هستند. همچنین مقادیر فرعی از مونتموریلونیت، پیریت و باریت به همراه مقادیر جزئی سیدریت، روتیل، ایلیت و گوتیت نیز به عنوان کانی‌های باطله در کانسنگ فسفات دلیر شناسایی شدند (شکل‌های ۵ و ۶). آپاتیت یک کانی بی‌رنگ است که در صورت حضور اکسید آهن، رنگ آن به قهوه‌ای تغییر می‌کند. با توجه به این‌که آهن نمی‌تواند وارد شبکه بلوری آپاتیت شود، در سطح کانی قرار گرفته و سبب تغییر رنگ کانی می‌شود [۳۰]. کلسیت و دولومیت از مهم‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده سنگ‌های فسفریتی در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد که در ابعاد میلی‌متری زمینه اکثر مقاطع مطالعه شده را تشکیل داده است (شکل ۵ الف). در اکثر نمونه‌ها، کلسیت و دولومیت سیمان سنگ را تشکیل داده‌اند (شکل ۶ الف). پیریت فراوان‌ترین کانی آهن‌دار در سنگ فسفات دلیر است که هم در سنگ‌های هوازده و هم در سنگ‌های غیرهوازده به صورت دانه‌های منفرد و یا تجمعات به مقدار قابل توجهی یافت می‌شود و عمدتاً بر اثر هوازدهی در حاشیه به گوتیت تبدیل شده است (شکل ۵ ب و ۶ ب). وجود پیریت در بین کانی‌های فسفات حاکی از احیایی بودن محیط تشکیل فسفریت‌ها است [۳۱].



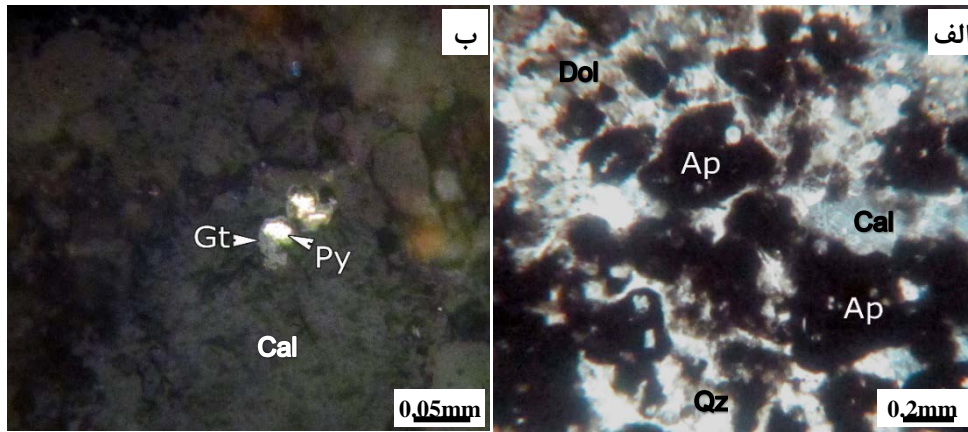
Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)	Trace Phase(s)
XRD-30	Quartz (33-1161)	Montmorillonite (13-0136)	--
Az: 70772	SiO2	Ca0.2(Al,Mg)2S4O10(OH)2 .xH2O	
Date: 08/08/2017	Calcite (05-0586)		
kV = 40	CaCO3		
mA = 30	Dolomite (36-0426)		
Ka = Cu	CaMg(CO3)2		
Fl = Ni	Fluorapatite (15-0878)		
	Ca5(PO4)3F		

شکل ۴. گراف پراش پرتو ایکس کانسنگ فسفات کانسار دلیر.

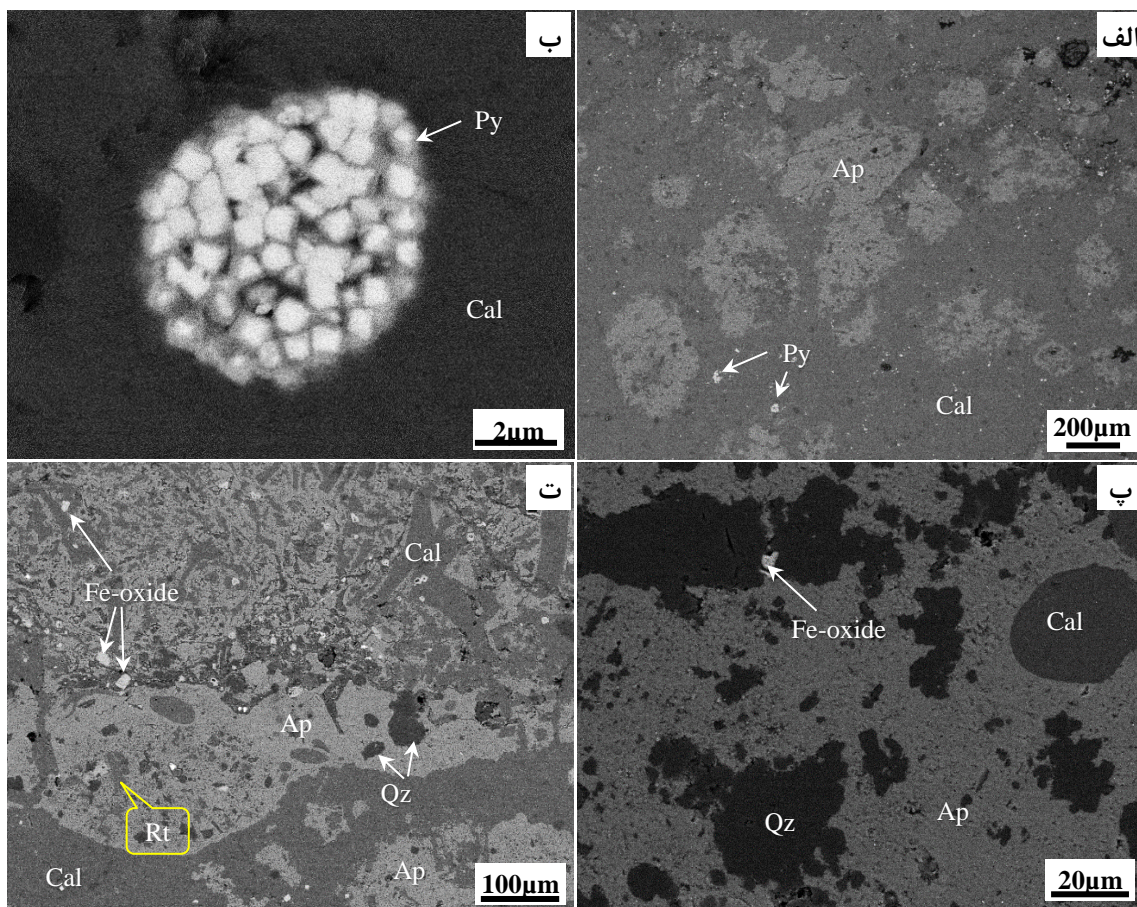
بالای اورانیم در آب و نرخ بالای تبخیر می‌باشد. در آب و هوای مرطوب با نرخ تبخیر پایین، آب رودخانه‌ها عمدتاً حاوی کربنات‌های هیدروژن و مقادیر pH نزدیک به خنثی است و نمی‌تواند اورانیم را به خوبی آب‌شویی نماید [۲۱، ۲۳]. اورانیم به راحتی طی هوازدهی در بخش‌های نزدیک به سطح زمین از آپاتیت شسته می‌شود و مجدداً در سطوح عمیق‌تر وارد شبکه آپاتیت می‌شود. در نتیجه هوازدهی، آپاتیت در بخش‌های عمیق‌تر از اورانیم غنی می‌شود و کانی‌های ثانویه فسفات (مانند ویولیت) در بخش‌های سطحی از اورانیم تهی می‌شوند [۸، ۱۸]. محیط تشکیل سازند سلطانیه در نقاط مختلف ایران متفاوت است، به طوری که کانسنگ فسفات دلیر به صورت شیمیایی و بیوشیمیایی در محیط دریایی کم‌عمق کربناته به وجود آمده است. ضخامت و عیار فسفات در سازند سلطانیه در مناطق مختلف متغیر است، به طوری که عیار متوسط فسفات در منطقه دلیر ۱۱ درصد و در منطقه ولی‌آباد ۸ درصد  $\text{P}_2\text{O}_5$  می‌باشد. سازند سلطانیه در منطقه دلیر در محیطی با pH اسیدی ضعیف تا قلیایی و Eh احیایی تا اکسیدی ضعیف تشکیل شده است. در نتیجه کافتش قاره‌ای در مرز پروتروزوئیک- کامبرین، نهشته‌های پلاتفرمی در بخش جنوبی اقیانوس پروتوتتیس در حاشیه غیرفعال شمالی قاره گندوانا (البرز فعلی) در کامبرین آغازین در دریایی نسبتاً کم‌عمق در آب‌های گرم نزدیک استوا و در آب و هوای گرم و مرطوب رسوب کرده‌اند. بنابراین، شرایط اقلیمی گرم و مرطوب استوایی در زمان تشکیل فسفات‌های سازند سلطانیه در منطقه حاکم بوده است. فلئورآپاتیت، کانی اصلی فسفات در سازند سلطانیه است. محتوای متوسط مواد آلی در سازند سلطانیه، ۱/۶۶ درصد است. آثاری از فرسایش در پلت‌های فسفات در منطقه دلیر گزارش شده است و فرایند دیازن و تخریب مواد ارگانیکی منجر به افزایش تمرکز عناصر جزئی شده است [۱۱، ۱۴، ۲۴-۲۹].

با توجه به این‌که یکی از فاکتورهای مهم برای تمرکز اورانیم در فسفریت‌ها، وجود آب و هوای خشک و pH قلیایی ضعیف در زمان تشکیل می‌باشد و آب و هوای زمان تشکیل سازند سلطانیه، گرم تا نیمه‌گرم مرطوب با pH اسیدی ضعیف تا قلیایی است، فسفریت‌های سازند سلطانیه از جمله کانسار دلیر پتانسیل غنی‌شدگی اورانیم را ندارند.





شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری (PPL) از، الف) دانه‌های آپاتیت، کلسیت، دولومیت و کوارتز، ب) دگرسانی پیریت به گوتیت در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر (Ap: آپاتیت؛ Cal: کلسیت؛ Dol: دولومیت؛ Gt: گوتیت؛ Py: پیریت؛ Qz: کوارتز).



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از، الف) پلت‌های آپاتیت در سیمان کلسیتی، ب) پیریت با بافت فرامبوئیدال در کلسیت، پ) حضور کوارتز و کلسیت در سیمان آپاتیتی، ت) تبلور هم‌زمان کلسیت و آپاتیت (Ap: آپاتیت؛ Cal: کلسیت؛ Py: پیریت؛ Qz: کوارتز؛ Rt: روتیل).

نسبتاً ریزدانه بوده و دارای بافت تخریبی (آواری) است (شکل ۵ الف). پلت‌های فسفات در اندازه‌های ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر در زمینه کربناته یافت می‌شوند (شکل ۶ الف). اما در برخی موارد، پلت‌های فسفات قابل تشخیص نبوده و فسفات زمینه سنگ را تشکیل می‌دهد (شکل ۶ پ و ت). در چنین مواردی به نظر می‌رسد که کربنات و فسفات به طور هم‌زمان در

از نظر ساخت و بافت، کانسنگ فسفریت کانسار دلیر حاوی قطعات فسفاتی، قطعات غیرفسفاتی و سیمان است که قطعات فسفاتی بیش از ۵۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده‌اند. در کانسنگ فسفات دلیر، فلوئورآپاتیت نهان بلور و سیاه رنگ عمدتاً به شکل پلت، الیت و اینتراکلاست در داخل سیمان کلسیتی-دولومیتی حضور دارد (شکل ۵ الف، ۶ الف). سنگ فسفات دلیر



فسفریت‌های دریایی براساس زمان نهشت می‌توانند الگوی توزیع متفاوتی از عناصر نادر خاکی (REE) را نشان دهند. فسفریت‌های جوان‌تر از میوسن در پرو و آفریقا عموماً دارای الگوی رفتاری مسطح مشابه با شیل‌ها برای عناصر نادر خاکی هستند. برخی فسفریت‌های ژوراسیک دارای الگوهای REE مشابه با آب دریا هستند و دارای ناهنجاری منفی Ce و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سبک (LREE) هستند. الگوی REE ناهنجاری منفی Ce و تهی‌شدگی HREE از شاخص‌های فسفریت‌های کهن‌تر از مزوزوئیک هستند که علت این پدیده تغییر توزیع عناصر نادر خاکی در طول زمان در آب دریا و توزیع مجدد آن‌ها پس از نهشت است [۳۵].

الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده به PAAS یک الگوی محدب همراه با ناهنجاری منفی مشخص Ce را نشان می‌دهد که بیانگر محیط‌های دیاژنتیکی و جذب ترجیحی REEها توسط مواد آلی و آپاتیت توسط آب‌های منفذی در مراحل اولیه دیاژنز [۳۵] است (شکل ۷). ناهنجاری Ce در نمونه‌های مورد مطالعه از ۰/۲ تا ۰/۵ تغییر می‌کند (جدول ۲). قرار گرفتن نمونه‌ها در محدوده IIIb در نمودار  $(Ce/Ce^*)_N$  مقابل  $(Pr/Pr^*)_N$  [۳۶] نشان می‌دهد که ناهنجاری منفی Ce واقعی است (شکل ۸). بنابراین، ناهنجاری منفی شدید Ce نشان‌دهنده محیط فاقد اکسیژن در طی نهشت زون فسفات دلیر می‌باشد. ناهنجاری منفی واضح Ce از مشخصه‌های اصلی الگوی رفتاری REE در آب‌های بدون اکسیژن اقیانوس اطلس است [۳۷]. ناهنجاری Eu در نمونه‌های مورد مطالعه از ۰/۹ تا ۱/۳ متغیر است و اغلب نمونه‌ها فاقد ناهنجاری هستند که می‌تواند شاهدهی برای محیط تشکیل خنثی تا اندکی اسیدی در زمان رسوب‌گذاری در منطقه باشد [۳۱، ۳۸، ۳۹]. به‌طور کلی الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی در تمامی نمونه‌های فسفات کانسار دلیر، تهی‌شدگی از این عناصر را با میانگین فاکتور تهی‌شدگی ۰/۵ برای  $\Sigma REE$  نسبت به PAAS را نشان می‌دهند. نسبت  $(Dy/Sm)_N$  برای بررسی غنی‌شدگی MREE به‌کار می‌رود و در صورتی که این نسبت کم‌تر از ۱ باشد، غنی‌شدگی در MREE رخ داده است و یکی از ویژگی‌های فسفات‌های غیردریایی وجود غنی‌شدگی MREE می‌باشد [۳۵]. نسبت  $(Dy/Sm)_N$  در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر از ۱/۵ تا ۲/۲ متغیر است که نشان می‌دهد که غنی‌شدگی MREE اتفاق نیفتاده است و کانسنگ فسفات دلیر دارای منشأ غیردریایی نمی‌باشد.

محیط ته‌نشین شده‌اند (شکل ۶ ت). براساس مطالعات کانی‌شناسی، هیچ نوع کانی اورانیم و عناصر نادر خاکی در نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده نشد.

#### ۳.۴ ژئوشیمی

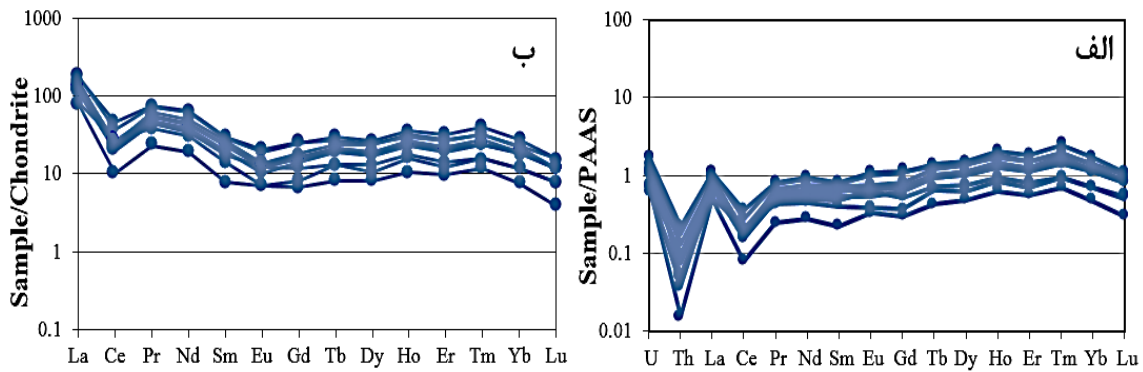
مهم‌ترین عناصر نادر موجود در فسفریت‌ها شامل Ba, Sr, Y, Cr, V, Ni, Zn, Mo, U, Pb و عناصر نادر خاکی هستند [۳۲، ۷]. ساختار بلوری کانی آپاتیت به گونه‌ای است که امکان یک سری جانشینی‌ها را فراهم می‌نماید. یون‌هایی مانند  $U^{4+}$ ,  $Th^{4+}$ ,  $REE^{3+}$ ,  $Sc^{3+}$ ,  $Y^{3+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ag^+$  و  $Mn^{2+}$  و  $Zn^{2+}$  طبق قوانین دیادوکی (تشابه شعاع یونی و بار الکتریکی) می‌توانند جانشین یون  $Ca^{2+}$  در شبکه بلوری آپاتیت شوند و سنگ فسفریتی از این عناصر غنی شود [۳۳]. عناصر اصلی شامل  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $FeO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  و  $K_2O$  و همچنین عناصر فرعی شامل  $Th$ ,  $U$ ,  $Sc$ ,  $Y$  و  $Cr$  و  $Sr$  مورد آنالیز قرار گرفته است (جدول ۱). همچنین ترکیب عناصر نادر خاکی در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر و برخی نسبت‌های عنصری در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌های کانسنگ فسفات دلیر مورد مطالعه، غلظت‌های نسبی بالایی از برخی عناصر مانند کلسیم، منیزیم، استرانسیم و ایتیریم نسبت به ترکیب شیل آرکنن پسین استرالیا (PAAS) [۳۴] نشان می‌دهند. محتوای  $P_2O_5$  و  $CaO$  در کانسنگ فسفات دلیر به ترتیب از ۵ تا ۱۶/۱ درصد و ۲۱/۸ تا ۶۳/۹ درصد با میانگین ۹/۶ و ۴۱/۱ درصد متغیر است.

میزان  $U$  و  $Th$  در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب در بازه ۱/۹ تا ۵/۵ و ۰/۲ تا ۳/۲ پی‌پی‌ام تغییر می‌کنند. کانسنگ فسفات دلیر دارای تهی‌شدگی  $Th$  هستند و غنی‌شدگی در  $U$  را نشان می‌دهند. مقدار کل عناصر نادر خاکی از حدود ۴۵/۹ تا ۱۳۶/۹ پی‌پی‌ام متغیر و میانگین آن در حدود ۹۲/۸ پی‌پی‌ام است که از میانگین عناصر نادر خاکی در فسفات‌ها (۴۶۲ پی‌پی‌ام) [۷] کم‌تر است. مقدار میانگین LREE نمونه‌های مورد مطالعه ۷۸/۶ پی‌پی‌ام و مقدار میانگین HREE آن‌ها ۱۴/۱ پی‌پی‌ام است. محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون برای عناصر نادر خاکی در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر نشان می‌دهد که میان عناصر نادر خاکی همبستگی‌های مثبت بسیار بالایی وجود دارد (جدول ۳). میانگین نسبت LREE/HREE در نمونه‌های مورد مطالعه ۵/۷ است. همچنین نسبت  $(La/Yb)_N$  در نمونه‌های مورد مطالعه از ۰/۷ تا ۱ با میانگین ۰/۸ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده تفریق و غنی‌شدگی تقریبی HREEها نسبت به LREEها در محیط تشکیل کانسنگ فسفات دلیر است.



جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون برای عناصر نادر خاکی در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
La	۱,۰۰۰												
Ce	۰,۷۵۴	۱,۰۰۰											
Pr	۰,۹۶۳	۰,۸۶۳	۱,۰۰۰										
Nd	۰,۹۶۹	۰,۸۷۷	۰,۹۹۴	۱,۰۰۰									
Sm	۰,۹۵۷	۰,۷۹۷	۰,۹۸۷	۰,۹۶۹	۱,۰۰۰								
Eu	۰,۹۵۹	۰,۸۱۸	۰,۹۳۸	۰,۹۵۰	۰,۹۰۸	۱,۰۰۰							
Gd	۰,۹۶۶	۰,۸۱۳	۰,۹۵۳	۰,۹۷۲	۰,۹۲۴	۰,۹۶۶	۱,۰۰۰						
Tb	۰,۹۵۵	۰,۷۶۶	۰,۹۶۳	۰,۹۶۴	۰,۹۶۴	۰,۸۸۹	۰,۹۵۰	۱,۰۰۰					
Dy	۰,۹۷۱	۰,۷۱۸	۰,۹۵۲	۰,۹۵۷	۰,۹۵۳	۰,۹۰۳	۰,۹۵۹	۰,۹۸۵	۱,۰۰۰				
Ho	۰,۹۴۵	۰,۶۷۳	۰,۹۲۸	۰,۹۲۹	۰,۹۳۵	۰,۸۵۳	۰,۹۲۳	۰,۹۸۱	۰,۹۸۹	۱,۰۰۰			
Er	۰,۹۴۷	۰,۶۶۸	۰,۹۱۳	۰,۹۲۶	۰,۹۰۹	۰,۸۶۹	۰,۹۳۹	۰,۹۷۴	۰,۹۹۰	۰,۹۹۲	۱,۰۰۰		
Tm	۰,۹۰۵	۰,۶۷۳	۰,۸۷۹	۰,۹۰۲	۰,۸۵۷	۰,۸۳۷	۰,۹۲۸	۰,۹۵۰	۰,۹۶۵	۰,۹۶۹	۰,۹۸۷	۱,۰۰۰	
Yb	۰,۹۲۰	۰,۶۷۲	۰,۹۰۷	۰,۹۱۳	۰,۹۱۳	۰,۸۳۲	۰,۹۱۲	۰,۹۸۲	۰,۹۷۸	۰,۹۸۷	۰,۹۸۸	۰,۹۷۵	۱,۰۰۰
Lu	۰,۸۳۳	۰,۵۳۰	۰,۸۳۰	۰,۸۱۸	۰,۸۶۲	۰,۶۹۲	۰,۷۹۴	۰,۹۱۸	۰,۹۲۳	۰,۹۶۱	۰,۹۳۷	۰,۹۱۸	۰,۹۵۸



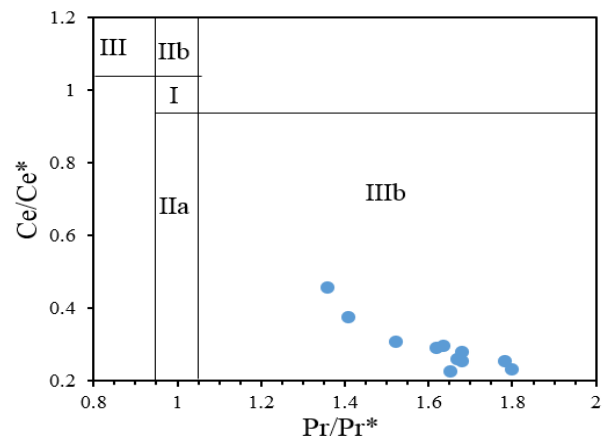
شکل ۷. الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نمونه‌های فسفات کانسار دلیر نسبت به الف) شیل پسا آرگن (PAAS) و ب) کندریت.

الگوی رفتاری نمونه‌های فسفات کانسار دلیر (شکل ۷)، ناهنجاری منفی Eu را نشان می‌دهد که حاکی از تبدیل Eu(III) به Eu(II) و انحلال آن در شرایط احیایی بستر دریا در حین رسوب‌گذاری فسفات در منطقه است [۳۱، ۴۰].

نسبت‌های La/Sm و La/Yb به ترتیب در بازه ۸/۸ تا ۱۴/۶ و ۸/۶ تا ۱۵/۸ تغییر می‌کند، در حالی که این نسبت‌ها در آب‌های اقیانوسی عهد حاضر بین ۰/۲ تا ۰/۵ و ۰/۶ تا ۱/۶ است [۴۱]. مقادیر بالاتر این نسبت‌ها در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر نشان‌دهنده غنی‌شدگی بیش‌تر این عناصر در مقایسه با آب‌های اقیانوسی عهد حاضر و در نتیجه جذب ترجیحی LREEها بر آپاتیت‌ها یا دیاژنز بعدی فسفات‌های دلیر است [۴۱].

### ۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی نشان دادند که افق‌های فسفاتی کانسار دلیر دارای کانی‌شناسی ساده‌ای هستند. فلئورآپاتیت، کلسیت، کوارتز و دولومیت کانی‌های اصلی سازنده



شکل ۸. نمودار تعیین نوع ناهنجاری Ce براساس تغییرات  $Ce/Ce^*$  مقابل  $Pr/Pr^*$  از [۳۶]. محدوده I: بدون ناهنجاری، IIa: ناهنجاری مثبت La سبب ناهنجاری منفی ظاهر شده، IIIa: ناهنجاری مثبت Ce واقعی، IIIb: ناهنجاری منفی Ce واقعی.

الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی نسبت به کندریت در نمونه‌های فسفات کانسار غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و تفریق شدید LREE را نشان می‌دهد (شکل ۷). همچنین





## تشکر و قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی در به ثمر رسیدن پژوهش حاضر تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## مراجع

1. A. Aksoy, et al., *Gamma-ray spectroscopic and PIXE analysis of selected samples from the phosphorite deposits of northwestern Saudi Arabia*, *J. Radioanal Nucl. Chem.*, **253**(3), 517 (2002).
2. G.H. McClellan, J.R. Lehr, *Crystal chemical investigation of natural apatites*, *Am. Miner.*, **54**, 1374 (1969).
3. P.J. Cook, M.W. Mc Elhinny, *A reevaluation of the spatial and temporal distribution of sedimentary phosphate deposits in the light of plate tectonics*, *Econ. Geol.*, **74**, 315 (1979).
4. J.M. Guilbert, C.F. Park, *The geology of ore deposits*, 1st ed. (Waveland Press, Inc, New York, 1986).
5. G.N. Baturin, A.V. Kochenov, *Uranium in phosphorites*, *Lithol. Miner. Resour.*, **36**(4), 303 (2001).
6. A.V. Kochenov, G.N. Baturin, *The paragenesis of organic matter, phosphorus, and uranium in marine sediments*, *Lithol. Miner. Resour.*, **37**(2), 107 (2002).
7. Z.S. Altschuler, *The geochemistry of trace elements in marine phosphorites: Part 1, characteristic abundances and enrichment*, *Spec. Publ. SEPM.*, **29**, 19 (1980).
8. J.B. Cathcart, *Uranium in phosphate rock*, 1st ed. (Geological Survey Professional Paper 988-A, U.S. Geological Survey, Washington, 1978).
9. A.M. Abed, R.M. Sadaqah, *Enrichment of uranium in the uppermost Al-Hisa Phosphorite Formation, Eshidiyya Basin, Southern Jordan*, *J. Afr. Earth. Sci.*, **77**, 31 (2013).
10. E. Schnug, N. Haneklaus, *Uranium, the hidden treasure in phosphates*, *Procedia Eng.*, **83**, 265 (2014).
11. H. Halalat, M.H. Bolourchi, *Geology of Iran: Phosphate*, 1st ed. (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 1994) (in Persian).
12. A. Namadmalian, L. Malekzadeh, *Exploration of phosphate in Dalir deposit (Report of Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 1984)* (In Persian).
13. M. Cheshmehsari, *M.S. Thesis, University of Urmia*, (2012) (In Persian).
14. M. Cheshmehsari, et al., *Mineralogy and geochemistry of rare earth elements at the Dalir phosphatic horizon (SW of Chalous, Mazandaran province)*, *J. Econ. Geol.*, **4**, 319 (2013) (In Persian).

افق فسفاتی به همراه مقادیر فرعی از مونتموریلونیت، پیریت و باریت و مقادیر جزئی از سیدریت، روتیل، ایلیت و گوتیت هستند. میانگین مجموع عناصر نادر خاکی نمونه‌های فسفات کانسار دلیر (۹۲/۸ پی‌پی‌ام) از میانگین  $\Sigma\text{REE}$  در فسفات‌ها بسیار کم‌تر است. بررسی میانگین نسبت  $\text{LREE/HREE}$  (۵/۷) و همچنین نسبت  $(\text{La/Yb})_N$  (۰/۷-۱) در نمونه‌های فسفات کانسار دلیر بیانگر تفریق و غنی‌شدگی تقریبی HREEها نسبت به LREEها در محیط تشکیل کانسنگ فسفات دلیر است. بررسی ناهنجاری  $\text{Ce}$  (۰/۲-۰/۵) و موقعیت نمونه‌های کانسنگ دلیر در نمودار  $\text{Ce/Ce}^*$  در مقابل  $\text{Pr/Pr}^*$  در محدوده IIIb نشان داد که کانسنگ فسفات دلیر دارای ناهنجاری منفی شدید واقعی  $\text{Ce}$  است که حاکی از وجود محیط فاقد اکسیژن در حین نهشت افق فسفات دلیر است. الگوی عناصر نادر خاکی به‌نحار شده نسبت به PAAS در نمونه‌های مورد مطالعه، یک الگوی محذب همراه با ناهنجاری منفی مشخص  $\text{Ce}$  است که نشان‌دهنده محیط‌های دیاژنتیکی و جذب ترجیحی REEها توسط مواد آلی و آپاتیت توسط آب‌های منفذی در مراحل اولیه دیاژنز [۳۵] مشابه با نهشته‌های فسفات سازند جیرود [۴۲] است. بررسی ناهنجاری  $\text{Eu}$  نشان داد که محیط نهشت فسفات‌های دلیر خنثی تا اندکی اسیدی بوده است.

بر اساس فاکتورهای کنترل‌کننده تمرکز اورانیم در فسفات‌های رسوبی به ۲ دلیل زیر فسفات‌های سازند سلطانیه دارای پتانسیل غنی‌شدگی اورانیم نیستند:

۱- آب و هوای گرم و مرطوب زمان تشکیل فسفات‌های سازند سلطانیه. با توجه به این‌که منشأ اورانیم آب دریا خشکی است برای انتقال مؤثر اورانیم از خشکی به دریا نیاز به آب و هوای گرم و خشک است تا آب رودخانه‌ها با محتوای کربنات بالا و حالت قلیایی ( $\text{pH} \geq 8$ ) به سرعت اورانیم را از سنگ‌ها آب‌شویی کند و به صورت کمپلکس‌های کربناته به آب دریا منتقل نماید.

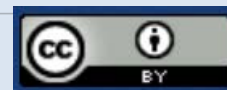
۲-  $\text{pH}$  خنثی تا اندکی اسیدی در هنگام تشکیل افق‌های فسفات سازند سلطانیه، زیرا جذب اورانیم توسط فسفات کلسیم (آپاتیت رسوبی) در  $\text{pH}$  قلیایی ضعیف اتفاق می‌افتد. بررسی فاکتورهای غنی‌شدگی اورانیم در فسفات‌ها و نتایج آنالیز شیمیایی اورانیم (۰/۲ تا ۳/۲ پی‌پی‌ام) و عناصر نادر خاکی (۴۵ تا ۱۳۶ پی‌پی‌ام) در کانسار فسفات دلیر نشان می‌دهد که کانسنگ فسفات دلیر فاقد غنی‌شدگی اورانیم و عناصر نادر خاکی است و به تبع آن پیش‌بینی می‌شود که دیگر ذخایر فسفات سازند سلطانیه، غنی‌شدگی اورانیم نشان ندهند و در نهایت از لحاظ استحصال این عناصر به عنوان محصول جانبی از فسفات دارای اهمیت نیستند.



15. A. Namadmalian, L. Malekzadeh, K. Sadeghi, K., *Exploration Programme of Phosphate: Detailed studies of Dalir and 1:2000 map (Report of Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 1362)* (In Persian).
16. M. Cheshmehsari, A. Abedini, A. Alizadeh, *In: 31<sup>th</sup> Conference of Geoscience, Factors controlling U distribution in Dalir phosphates, southwest Chalus, Mazandaran (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran), 1-7* (2012) (In Persian).
17. K. Khoshnoodi, S. Ziapour, *In: Geochemical and Mineralogical Characterization of Uranium and Thorium Deposits, Edited by IAEA (IAEA, Vienna), 93-124* (2020).
18. F.J. Dahlkamp, *Uranium ore deposits, 1st ed. (Springer- Verlag, Berlin, 1993)*.
19. J. Lucas, M. Abbas, *Uranium in natural phosphorites: Syrian example, Bull. Sci. Geol. Strasbourg, 42, 223* (1989).
20. J.M. Bremner, *Brief Description of a West-Coast Phosphorite Deposit (Report of Geological Survey of South Africa, 0100, South Africa, 1992)*.
21. N.A. Titayeva, *Nuclear geochemistry, 1st ed. (CRC Press, Florida, 1994)*.
22. A.V. Kochenov, V.T. Dubinchuk, E.V. Germogenova, *The form of uranium occurrence in phosphate remains of fossil fishes, Sov. Geol., 3, 60* (1973).
23. G.Y. Ostrovskaya, *Uranium in rocks of phosphorite-bearing formations, Sov. At. Energy, 36, 189* (1974).
24. H. Kimura, et al., *The Vendian-Cambrian  $\delta^{13}C$  record, north Iran: Evidence for overturning of the ocean before the Cambrian explosion, Earth and Planet. Sci. Lett., 147, 1* (1997).
25. J. Sharifi, *Ph.D Thesis, Ankara University, (2002)*.
26. N. Abedian, *Phosphate Prospecting in Gilan Province (Report of Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 2008)* (In Persian).
27. M. Kazemi, et al., *In: 31<sup>th</sup> Conference of Geoscience, Explaining Mineralization related to Genesis and Evolution of Proto- and Paleo- Tethys in Alborz Zone (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran), 1-8* (2012) (In Persian).
28. M. Cheshmehsari, et al., *In: 4<sup>th</sup> Conference of Economic Geology of Iran, Trace Element Geochemistry of the Dalir Phosphate Deposit, Southwest of Chalous, Mazandaran (Islamic Azad University of Isfahan, Isfahan), 255-260* (2012) (In Persian).
29. H. Mousavi, et al., *In: 33<sup>th</sup> National Geosciences Symposium, Geochemical Investigation of Rare Earth Elements (REE) in Soltanieh Formation Phosphatic Horizon, Seyed Kandi Section, Southwest Zanjan. Iran, (Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran), 1-19* (2015) (In Persian).
30. M. Slansky, *Geology of sedimentary phosphates, 1st ed. (North Oxford Academic, London, 1986)*.
31. G.S. Awadalla, *Geochemistry and microprobe investigations of Abu Tartur REE-bearing phosphorite, Western Desert, Egypt, Afr. Earth Sci., 57, 431* (2010).
32. G.J. Simandl, S. Paradis, R. Fajber, *Sedimentary Phosphate Deposits, 1st ed. (British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 2012)*.
33. J.O. Nriagu, P.B. Moore, *Phosphate minerals, 1st ed. (Springer, Berlin, 1984)*.
34. S.R. Taylor, S.M. McLennan, *The continental crust: Its composition and evolution, 1st ed. (Blackwell, Oxford, 1985)*.
35. G. Shields, P. Stille, *Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites, Chem. Geol., 175, 29* (2001).
36. M. Bau, P. Dulski, *Distribution of yttrium and rare earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa, Precambrian Res., 79, 37* (1996).
37. H. Elderfield, M.J. Greaves, *The rare earth elements in seawater, Nature, 296, 214* (1982).
38. K.F. Khan, S.A. Dar, S.A. Khan, *Rare earth element (REE) geochemistry of phosphorites of the sonrai area of Paleoproterozoic Bijawar Basin, Uttar Pradesh, India, J. Rare Earths, 30(5), 507* (2012).
39. H. Rollinson, *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, 2nd ed. (Cambridge University Press, London, 2021)*.
40. C.R. German, H. Elderfield, *Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: the ground rule, Paleoceanography., 5, 823* (1990).
41. B. Reynard, C. Lecuyer, P. Grandjean, *Crystal-chemical controls on rare earth element concentrations in fossil biogenic apatites and implications for paleoenvironmental reconstructions, Chem. Geol., 155, 233* (1999).
42. S.J. Moghaddasi, *Mineralogy and rare earth elements geochemistry of Jeirud phosphate deposit in Shemshak valley, North Tehran, Geosciences, 26, 313-324* (2017) (In Persian).

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

خالق خشنودی، سمانه ضیاپور (۱۴۰۲)، ژئوشیمی اورانیم و عناصر نادر خاکی در کانسار فسفات دلیر، زون البرز مرکزی، ۱۰۴، ۱۴۸-۱۵۷

DOI: 10.24200/nst.2023.1400

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1400.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1400.html)

