



اکتشاف عناصر خاکی نادر با استفاده از پرتوزایی؛ مطالعه موردی: معدن باغک، سنگان

سیدسعید قنادپور*^۱، اردشیر هزارخانی^۱، شاهید نوریان^۲، عباس گلمحمدی^۳

۱. گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

۲. گروه اکتشاف، شرکت اسکام، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۱۵، تهران - ایران

۳. دانشگاه جامع علمی کاربردی، مجتمع سنگ آهن سنگان، کدپستی: ۹۵۶۴۱۳۴۶۵۶، خراسان رضوی - ایران

چکیده: با تکیه بر پرتوزایی و با کمک روش پرتوسنجی، نمونه برداری از معدن باغک در معادن سنگان به انجام رسید. در اکثر موقعیت‌های پی جویی اورانیم انجام شده در ایران، به ویژه در پهنه‌ی ایران مرکزی، همراهی و غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر از عوارض معمول شناخته شده است. مشاهده‌ی ارتباط بین عناصر خاکی نادر و پرتوزا سبب شده است که بررسی ارتباط آن‌ها در انواع دیگری از کانی‌سازی نیز مدنظر قرار گیرد و در صورت وجود چنین ارتباطی، در اکتشاف این عناصر از خاصیت پرتوزایی بهره گرفته شود. در واقع هدف مطالعه، بررسی وجود یا عدم وجود چنین ارتباطی در یک معدن اسکارنی به عنوان یک مطالعه‌ی موردی متفاوت با کانی‌سازی‌های ایران مرکزی و در صورت وجود آن، آرایه‌ی یک روش اکتشافی و الگوی نمونه برداری بهینه برای کشف این عناصر است. یافته‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر وجود چنین ارتباطی در برخی کانی‌سازی‌های مربوط به ایران مرکزی، ارتباط و همبستگی بسیار قابل قبولی بین این عناصر در یک معدن دیگر با کانی‌سازی نوع آهن - اسکارن در سنگان نیز وجود دارد. در نهایت می‌توان اذعان داشت که با توجه به مشاهده‌ی چنین ارتباطی بین این دو دسته از عناصر در چندین کانی‌سازی متفاوت و وجود شباهت‌هایی از نظر ژئوشیمی، ضرورت مطالعه‌ی بیش‌تر و دقیق‌تر در آن به منظور معرفی روش‌های پرتوسنجی به عنوان روش‌هایی مؤثر در اکتشاف عناصر خاکی نادر، کاملاً احساس می‌شود. فکر و روش معرفی شده در این پژوهش برای کشف عناصر خاکی نادر، می‌تواند به کمک بررسی‌های تکمیلی در این مورد، دیدگاه مناسبی را در پیش روی تصمیم‌گیران این صنعت قرار دهد.

کلیدواژه‌ها: روش‌های پرتوسنجی، عناصر خاکی نادر، عناصر پرتوزا، معدن باغک، سنگان

Exploration of REE Using Radioactivity; Case Study: Baghak Mine, Sangan

S.S. Ghannadpour*¹, A. Hezarkhani¹, Sh. Noorian², A. Golmohammadi³

1. Exploration Group, Department of Mining & Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

2. Exploration Group, Skam Company, P.O.Box: 14115-1339, Tehran - Iran

3. University of Applied Science and Technology, Sangan Iron Ore Complex, Postcode: 9564134656, Razavi Khorasan - Iran

Abstract: In current study, sampling from Baghak mine in Sangan mines has been carried out based on radioactivity and radiation measurement method. In most projects that have been carried out in Iran for the uranium prospecting, especially in the central part of Iran, enrichment of rare earth elements (REEs) are known in keeping with uranium as a common feature. The association of these elements with U has caused to investigate their connections with other types of mineralizations. In fact the goal of this study is to survey the presence or absence of such a connection in a skarn mine which is a different case study from the central part of Iran. In case of their presence, this will lead to a new exploration method and sampling pattern for REEs. The results show that in addition to existence of this connection in some mineralizations of the Central Iran, an acceptable correlation is also observed between the REEs and radioactive elements in another iron skarn deposit. Finally, it can be explained that according to existence of such a connection between rare earth and radioactive elements in several different types of mineralizations, and based on the geochemical similarities, the need for more accurate studies is completely felt in order to introduce radiation measurement methods as effective approaches to explore REEs. The idea and the introduced method for the exploration of REEs in this study can provide a new viewpoint for the decision makers in this industry upon using further studies in this respect.

Keywords: Radiation measurement methods, Rare earth elements, Radioactive elements, Baghak mine, Sangan

*Email: s.ghannadpour@aut.ac.ir



۱. مقدمه

به کمک زیرتجزیه‌ی ردیاب الکترونی (EPMA)^(۴) و سایش لیزری- طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (LA-ICPMS)^(۵) بر روی چند نمونه، مقادیر عناصر خاکی نادر در آپاتیت و موناژیت اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری نشان داد که عناصر خاکی نادر عمدتاً در آپاتیت و تا اندازه‌ای در موناژیت متمرکز شده‌اند. آن‌ها، کانسار سه‌چاهون را از نوع آهن اکسید-آپاتیت نوع کایرونا برشمردند [۵]؛ در حالی که محسنی و آفتابی [۶] تأکید دارند که این کانسار از نوع آهن نواری (BIF)^(۶) راپیتان^(۷) (همراه با رسوبات یخچالی) است. از جمله‌ی دیگر مطالعه‌های انجام شده در ایران مرکزی می‌توان به مطالعه‌های خشنودی و همکاران [۷، ۸] و میرزابابایی و همکاران [۹] اشاره کرد.

اما از جمله‌ی مطالعات انجام شده در مورد عناصر خاکی نادر در معدن سنگ آهن سنگان می‌توان به مطالعه‌ی بومری [۱۰] اشاره کرد که در آن مقادیر عناصر خاکی نادر در گارنت‌های موجود در کانسار آهن سنگان که به وسیله‌ی LA-ICP-MS در دانشگاه آکیتای ژاپن تعیین شده بود، گزارش شده است. در مطالعه‌های دیگری توسط مظهری و همکاران [۱۱، ۱۲] در آنومالی‌های شرقی فرزانه و سنجدک ۱ انجام شد مشاهده شد که نسبت LREE به HREE در محدوده‌ی فرزانه از ۵۸٫۲ تا ۷۸٫۱۳ در تغییر است. هم‌چنین غنی‌شدگی ملایمی از LREE و آنومالی مثبتی از Eu در داده‌های ژئوشیمی محدوده‌ی فرزانه مشاهده شد. در محدوده‌ی سنجدک ۱ نیز مقدارهای REE نشان‌دهنده‌ی آنومالی منفی Eu، غنی‌شدگی ملایمی از LREE، الگوی مثبت با شیب مناسب از HREE و در نهایت ناهنجاری منفی Ba، Sr، La، Ce، Ti و Eu بوده‌اند. پژوهش گل‌محمدی و همکاران [۱۳] نیز نشان داد که غنی‌شدگی نسبی عناصر LREE نسبت به HREE در الگوی بهنجار شده به کندریت و غنی‌شدگی عناصر سنگ‌دوست بزرگ یون (LILE)^(۸) نسبت به عناصر با قدرت میزان بالا (HFSE)^(۹) در الگوی بهنجار شده به گوشته‌ی اولیه در توده‌های نفوذی نشان‌دهنده‌ی تشکیل ماگما در منطقه‌ی فرورانش است.

در اکثر موقعیت‌های پی‌جویی اورانیم، انجام شده در سازمان انرژی اتمی ایران، به‌ویژه در پهنه‌ی ایران مرکزی از جمله معدن‌های ساغند و ناریگان، نیز همراهی و غنی‌شدگی عناصر خاکی نادر از عارضه‌های معمول شناخته شده است. همراهی این عناصر با اورانیم گاه به مقدار بسیار بالاتر از حد اقتصادی (عیار در آنومالی‌های

عناصر خاکی نادر از لحاظ فراوانی نسبت به خیلی از فلزهای معدنی دیگر دارای حد زمینه‌ی بیش‌تری در پوسته‌ی قاره‌ای هستند. اما به علت ویژگی‌های شیمیایی خاص، طی فرایندهای زمین‌شناسی در کانی‌های مختلف پراکنده شده‌اند و تنها در شرایط محدودی قابلیت تمرکز معدنی پیدا می‌کنند. از همین رو، اکتشاف و بازیابی اقتصادی عناصر خاکی نادر در مقیاس صنعتی نسبت به سایر عناصر، بسیار مشکل‌تر است. تحلیل ژئوشیمیایی این عناصر از دیرباز مورد توجه دانشمندان بوده است چرا که با تعیین میزان تمرکز عناصر خاکی نادر در سنگ و کانی‌ها، اشارات مستقیمی از ژئوشیمی و شرایط تشکیل زمین‌شناختی به دست می‌آید. امروزه دقیق‌ترین معیار شناخت منشأ و شرایط تشکیل سنگ‌ها و کانی‌ها در محیط‌های مختلف تحلیل الگوی پراکندگی عناصر خاکی نادر است [۱، ۲].

در ایران و در مجموعه‌ی معدن‌های سنگ آهن سنگان مطالعات گوناگونی در مورد عناصر خاکی نادر صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. مهدیلو و علی‌نیا [۳] مقدار عناصر خاکی نادر را در کانسار آهن چغارت، در کان‌سنگ آهن و باطله‌های مربوط به کارخانه‌ی فراوری، اندازه‌گیری کردند. نتایج اندازه‌گیری آن‌ها نشان داد که پس از منیتیت و هماتیت، آپاتیت و موناژیت از دیگر کانی‌های با ارزش هستند. هم‌چنین مشاهده شد که مقدار خاکی‌های نادر با مقدار فسفر رابطه‌ی مستقیم دارد و حدود ۷۵ درصد عناصر خاکی نادر موجود در نمونه‌ها خاکی‌های نادر سبک^(۱۱) (LREE) هستند و از گروه خاکی‌های نادر سنگین^(۱۲) (HREE) تنها مقدار ایتريم (Y) بالا است. بخش عمده‌ی عناصر خاکی نادر به صورت کانی مستقل موناژیت و یا به صورت پیراگیرشده^(۱۳) در داخل آپاتیت است. کمی از عناصر خاکی نادر نیز در شبکه‌ی کانی آپاتیت جای‌گزین کلسیم شده است. از دیگر مطالعه‌های انجام شده در ایران می‌توان به مطالعه‌ی ثابت و همکاران [۴] اشاره کرد که در آن بررسی‌های ژئوشیمیایی و میکروسکوپی عناصر خاکی نادر در تعدادی نمونه از آپاتیت، منیتیت، سنگ میزبان، خوراک کارخانه‌ی کنسانتره و باطله‌ی معدن آهن چادرملو انجام شده است.

بنیادی و همکاران [۵]، کانسار سه‌چاهون را به لحاظ زمین‌شناسی و ژنز کانسار مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه



۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی سنگان در استان خراسان رضوی و نزدیک مرز افغانستان قرار دارد [۱۴، ۱۵]. محدوده، دربردارنده‌ی کانساری به شکل مستطیل و به طول و عرض تقریبی به ترتیب، ۲۲ و ۱۰ کیلومتر است که شامل کانسارهای غربی (پنج کانسار A، A'، B، C شمالی و C جنوبی)، کانسارهای مرکزی (دو کانسار باغک و دردوی) (شکل ۱) و کانسارهای شرقی است.

نمای دیگری از آنومالی‌های غربی و مرکزی که شامل هفت کانسار A، A'، B، C شمالی، C جنوبی، باغک و دردوی می‌شود را می‌توان به همراه گسل‌های اصلی منطقه به ترتیب، در شکل ۲ الف و ب مشاهده کرد [۱۶].

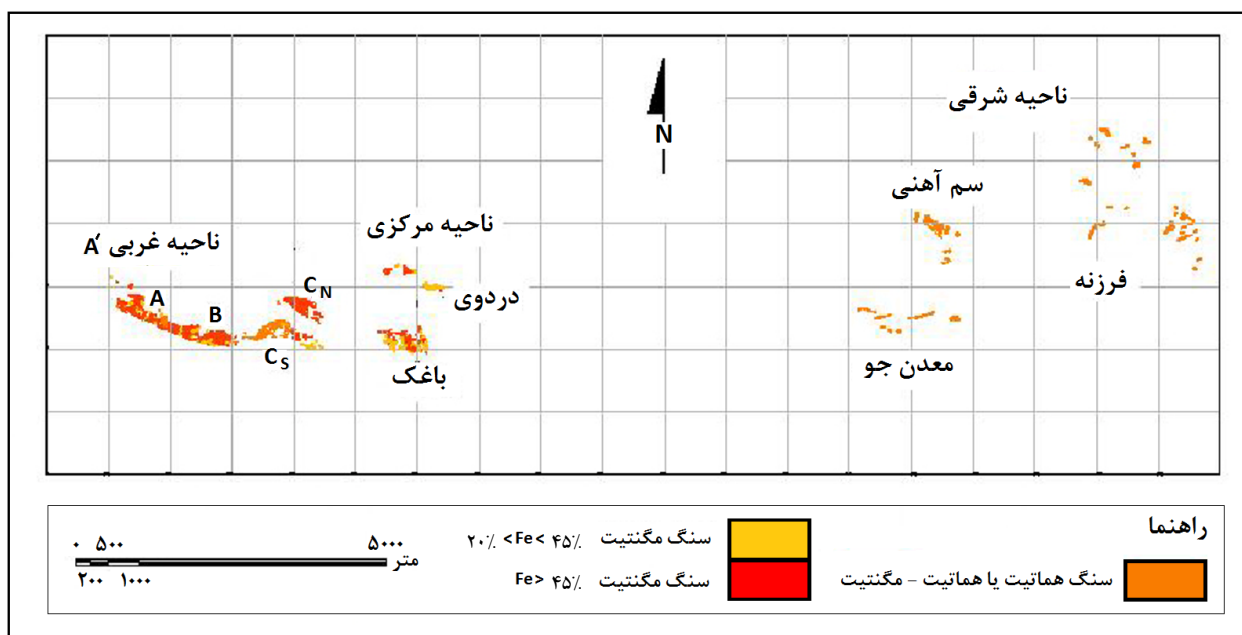
محدوده‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، آنومالی باغک است که در قسمت مرکزی معدن سنگان قرار دارد. کانسار باغک در مرز شرقی آنومالی C و در ۲۵۰ متری جنوب کانسار دردوی قرار دارد. طول جغرافیایی این آنومالی مابین ۲۶۶۴۰۰ تا ۲۶۸۳۰۰ متر شرقی و عرض جغرافیایی آن مابین ۳۸۱۷۲۰۰ تا ۳۸۱۸۷۰۰ متر شمالی است و وسعتی در حدود ۲۸۵ هکتار دارد. تعداد گمانه‌های حفر شده از ابتدای اکتشاف در این کانسار ۲۳۹ حلقه با مترآژ کلی ۶۲۹۹۷ متر است. گمانه‌ها به روش مغزه‌گیری حفاری شده و در تعداد ۶۶۴۱ نمونه مورد تجزیه‌ی عنصری قرار گرفته است.

مختلف برحسب ژنز و متالورژی تشکیل آن‌ها، متفاوت است و در برخی از آنومالی‌ها به بیش از ۵۰۰ ppm می‌رسد) سبب شده است که مدل‌سازی ژنتیکی تشکیل کانسار اورانیم-عناصر خاکی نادر، تحلیل‌های ژئوشیمی اکتشافی و مطالعات فراوری این عناصر در فاز نیمه‌صنعتی در کنار اورانیم و در تمام مرحله‌ها به صورت موازی در دستور کار قرار گیرد [۱].

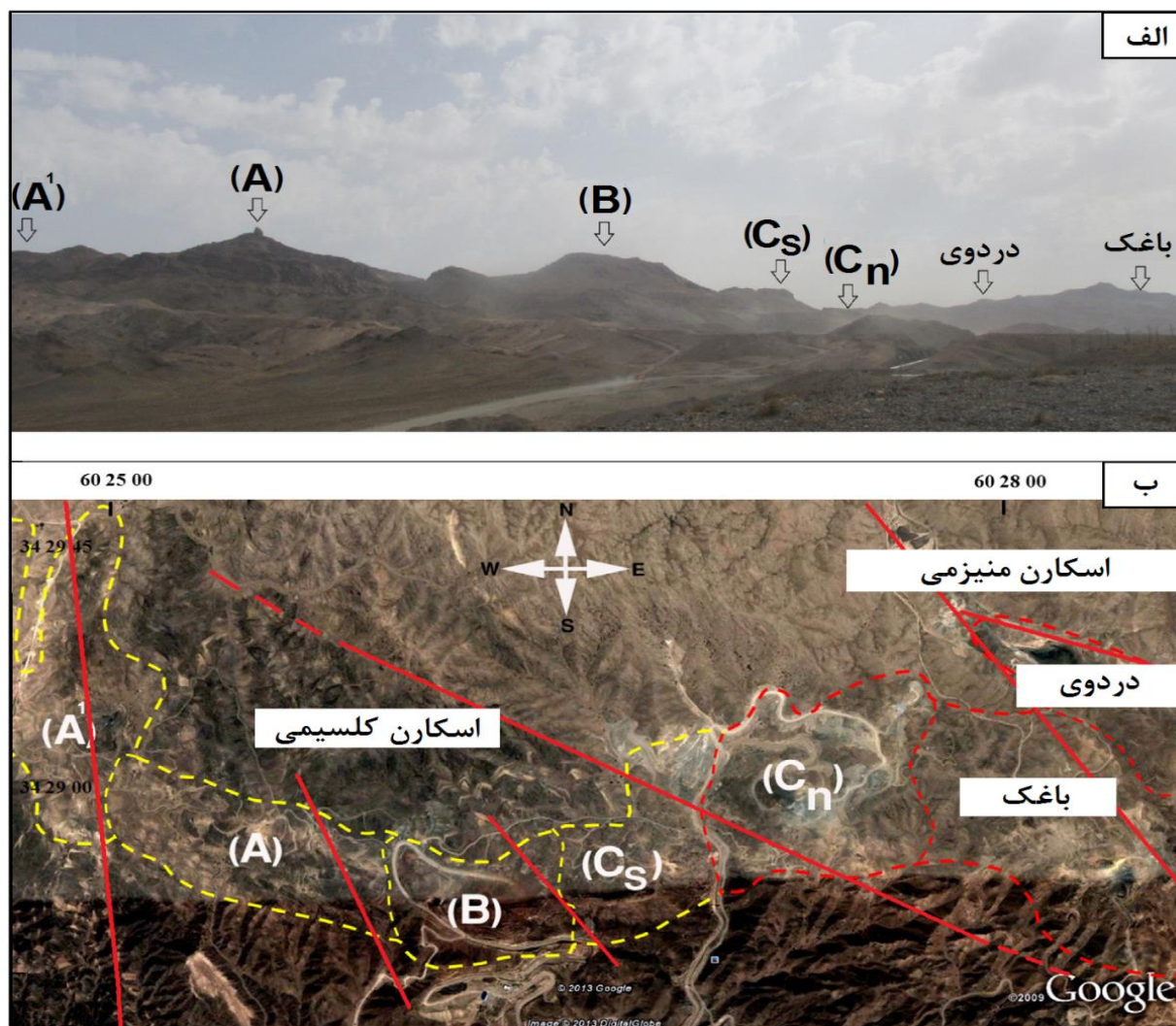
بنابراین در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت عناصر خاکی نادر و با توجه به وجود رابطه‌ی دیده شده در بسیاری از مطالعه‌های انجام شده در سازمان انرژی اتمی ایران، بین این عناصر و عناصر پرتوزا در ایران مرکزی، به مطالعه و بررسی دقیق‌تر این موضوع در نوع دیگری از کانی‌سازی یعنی کانی‌سازی آهن-اسکارن در معدن باغک در مجموعه معدن‌های سنگ آهن سنگان پرداخته شده است. در واقع در مطالعه‌ی حاضر، به منظور دسترسی به یک نمونه‌برداری بهینه و کم‌هزینه و در نهایت کشف عناصر خاکی نادر، از خاصیت پرتوزایی بهره گرفته شده و نمونه‌برداری بر اساس خاصیت پرتوزایی نمونه‌ها و به کمک طیف‌سنجی انجام شده است.

۲. زمین‌شناسی منطقه

مجموعه کانسارهای سنگ آهن سنگان در فاصله‌ی حدود ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب غربی تایباد،



شکل ۱. موقعیت آنومالی‌های غربی و مرکزی معدن سنگان.



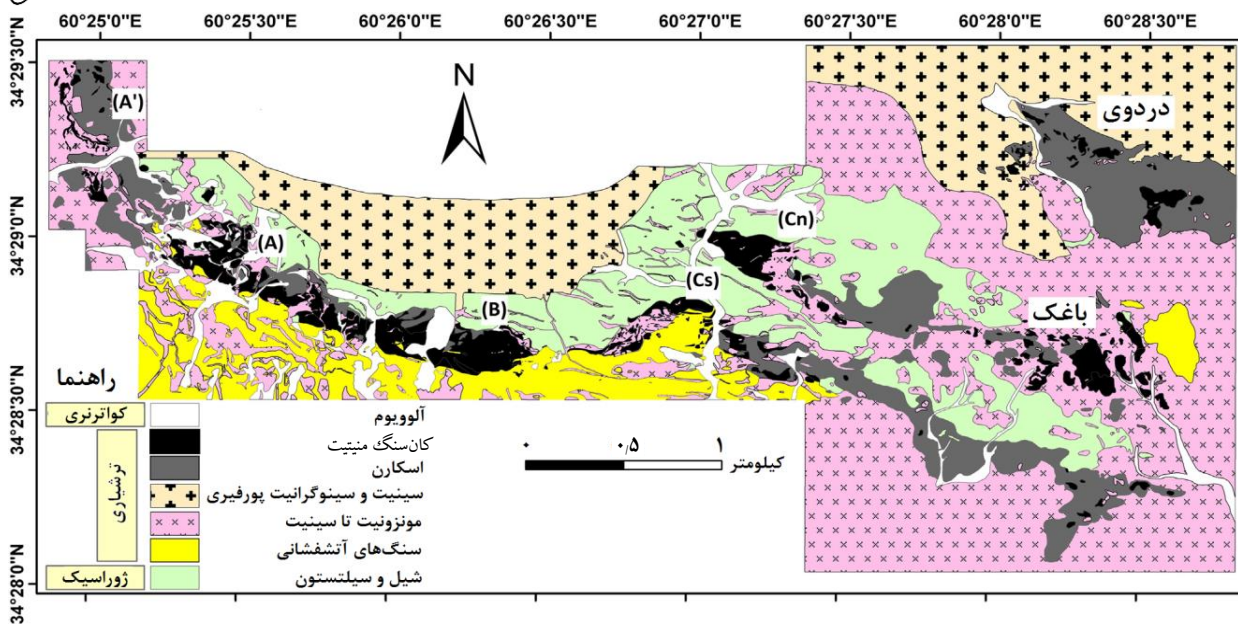
شکل ۲. موقعیت آنومالی‌های معدن سنگان. الف: دید به شمال منطقه، ب: دید از بالا به همراه نمایش گسل‌ها [۱۶].

سنگان از غرب به شرق شامل A' ، A ، B ، C شمالی، C جنوبی، باغک و دردوی در شکل ۳ نشان داده شده است.

قدیمی‌ترین سازندهای موجود در منطقه‌ی معدن شامل چرت، شیل‌های سیلیسی، سیلتستون و آهک بلورین است (مربوط به سازند شمشک و دوره‌ی ژوراسیک). رخنمون‌های زیادی از آن‌ها در بخش شمالی توده‌های معدنی با روند شرقی- غربی مشاهده می‌شود. مجموعه‌ی عظیمی از سنگ‌های آتشفشانی در منطقه دیده می‌شود که بیش‌تر آن‌ها مربوط به فعالیت آتشفشانی در بازه‌ی زمانی کرتاسه تا اوایل ائوسن هستند.

سنگ‌های آتشفشانی شامل داسیت، ریوداسیت، تراکیت، آذرآواری‌های آندزیتی و سنگ‌های آتشفشانی آواری است. سنگ‌های کربناته بیش‌تر به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند و به طرف شرق به صورت آهک بلورین یافت می‌شود [۱۷].

کانسار سنگ آهن سنگان خواف بخشی از کمربند آتشفشانی- پلوتونیک خواف - کاشمر- بردسکن است. چنانچه ادامه‌ی کمربند ماگمایی خواف- درونه را تا افغانستان از یک سو و تا بیارجمند از سوی دیگر در نظر بگیریم، طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر و پهنای متغیر از ۱۵ تا ۸۰ کیلومتر را بر دارد. این کمربند ماگمایی با گسترش شرقی- غربی و خمیدگی به سوی شمال، در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) واقع است. این کمربند به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حد واسط و گاه مافیک با سن ترشیری تشکیل شده است. این سنگ‌ها شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت- بازالت، لاتیت، تراکی آندزیت، توف، لاپیلی توف و آگلومر است. توده‌های گرانیتویدی با ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت فلدسپار قلیایی در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند [۱۴، ۱۵]. نقشه‌ی زمین‌شناسی و توده‌های آهن در معدن



شکل ۳. نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده‌ی معدن سنگان همراه با موقعیت توده‌های منیتیت در آنومالی‌های غربی و مرکزی [۱۶].

قسمت دوم: عملیات طیف‌سنجی مستقیم مغزه‌های حفاری شده و انتخاب نمونه‌های پرتوزا به کمک دستگاه طیف‌سنجی مدل RS 230 (ساخت کشور کانادا).

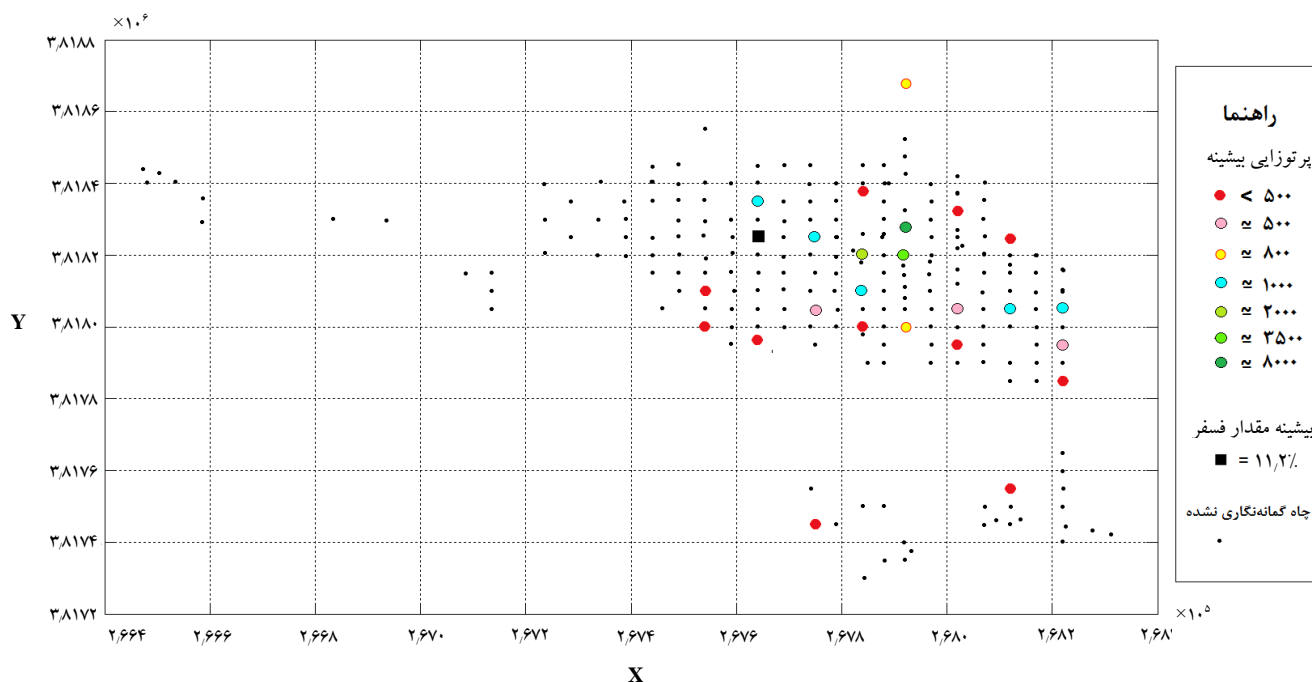
ابتدا به کمک نمودارهای گمانه‌نگاری هر گمانه، بیشینه مقدار پرتوزایی (شمارش در ثانیه) گمانه‌های موجود تعیین و مقادیر بالای آن به منظور برداشت نمونه مشخص شدند (شکل ۴). سپس در قسمت اول از عملیات نمونه‌برداری در انبار مغزه، به گمانه‌های مشخص شده از قبل مراجعه و در مترهای مورد نظر و بعضاً در کل گمانه طیف‌سنجی مغزه‌ها انجام شد. پس از بررسی اولیه مغزه‌های حفاری در گمانه‌های از قبل تعیین شده، اطلاعات اولیه از قبیل مقدار زمینه و هم‌چنین مقدار پرتوزایی مطلوب منطقه مورد مطالعه، تعیین شد (جدول ۱).

در مرحله‌ی بعد با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه، به پرتوسنجی دقیق و منظم مغزه‌ها و نمونه‌برداری از آن‌ها پرداخته شد. ابتدا گمانه‌های گمانه‌نگاری شده با پرتوزایی بیش از ۱۰۰۰ شمارش در ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند. سپس گمانه‌های گمانه‌نگاری نشده در دستور کار قرار گرفتند و از هر نقطه با پرتوزایی نسبی بالاتر، نمونه‌برداری شد. در نهایت به منظور نمایش هر چه بهتر وجود یا عدم وجود رابطه بین عناصر خاکی نادر و عناصر پرتوزا چند نمونه از مغزه‌های فسفردار مناطقی که کم‌ترین پرتوزایی را داشتند، انتخاب شد. لازم به ذکر است که نمونه‌برداری به صورت غیرنقطه‌ای انجام و جمعاً تعداد ۱۵۱ نمونه در بازه‌های متفاوتی از واحد طول (با مرکزیت پرتوزایی بیش‌تر) برداشت شد (از ۱۰ سانتی‌متر تا ۳ متر).

در قسمت شمالی معدن، گرانیت سرنوسر با سن احتمالی ائوسن بالایی- الیگوسن پایینی نفوذ کرده است. بومری [۱۸] گرانیت سرنوسر را به‌عنوان منشأ اسکارن معرفی کرده است؛ اما کریم‌پور و ملکزاده شفارودی [۱۴] مشخص نمودند که وجود کانی‌های غنی از پتاسیم همانند آمفیبول خاص موجود در توده A' یا وجود کانی‌های پتاسیم‌داری مثل فلوگوپیت در توده‌های باغک و C، حکایت از محلول‌ماگمایی آهن‌دار غنی از پتاسیم دارد که با نفوذ در سنگ‌های کربناته به طریق جانشینی متاسوماتیسم، اسکارن منیتیت غنی از کانی‌های پتاسیم‌دار را موجب شده است.

۳. نمونه‌برداری و روش پژوهش

عملیات نمونه‌برداری بر مبنای ارتباط عناصر خاکی نادر با عناصر پرتوزا از مغزه‌های حفاری به انجام رسیده است. به این صورت که مبنای برداشت نمونه‌ها، فضاهای مستعد پرتوزایی و مغزه‌های حاوی مقدار قابل‌توجهی از فسفر (براساس نتایج تجزیه‌ی ژئوشیمیایی مغزه‌های حفاری) قرار گرفته است. به این ترتیب عملیات نمونه‌برداری به دو قسمت تقسیم‌بندی شده است. قسمت اول: استفاده از نمودار گمانه‌نگاری موجود از برخی گمانه‌ها. لازم به ذکر است که عملیات گمانه‌نگاری، تنها بر روی ۲۴ گمانه از مجموعه گمانه‌های اکتشافی در معدن باغک صورت گرفته است. به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر ارتباط بین خاصیت پرتوزایی و عناصر خاکی نادر، امری بسیار ضروری بود.



شکل ۴. نقشه‌ی نمایش بیشینه مقدار پرتوزایی گمانه‌ها بر روی دهانه‌ی آن‌ها.

سپس با انتخاب نمونه‌ها از بین ۵۰ نمونه‌ی کاندیدا براساس پرتوزایی، برای تهیه‌ی مقاطع نازک، صیقلی و انجام مطالعه‌های میکروسکوپی و با استفاده از دستگاه سوسوزنی سنچ (مدل SPP2، ساخت کشور فرانسه)، سنگی که دارای بیش‌ترین پرتوزایی در هر کیسه‌ی نمونه بود، انتخاب شد. قبل از تهیه‌ی مقطع از نمونه‌های انتخابی، نمونه‌ها مورد مطالعه ماکروسکوپی قرار گرفتند که نتیجه‌های آن را در جدول ۲ درج شده است.

۲.۴ مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی

از نمونه‌های انتخاب شده در قسمت پیشین، تعداد ۲۴ مقطع صیقلی و ۲۷ مقطع نازک تهیه شد، نوع مقطع‌های انتخابی برای هر نمونه در جدول ۲ درج شده است. اما با توجه به شباهت بسیار زیاد در مقطع‌ها و در نتایج تحلیل و بررسی به‌دست آمده از آن‌ها و هم‌چنین محدودیت در تعداد صفحات مقاله، در این قسمت و در ادامه، به شرح مختصری از یافته‌های مطالعه و بررسی‌های انجام شده روی آن‌ها پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که پوشش روی نمونه‌ها در مورد مقطع‌های نازک برای مطالعه‌ی میکروسکوپی الکترون پوششی با میکروسکوپ نوری (مدل LEITZ ساخت کشور آلمان)، با شیشه‌ی لامل و در مورد مقطع‌های نازک و صیقلی برای مطالعه‌های میکروسکوپی الکترون پوششی^(۱۰) (SEM)، با طلا، صورت گرفته است.

جدول ۱. اطلاعات اولیه‌ی محدوده‌ی مورد مطالعه

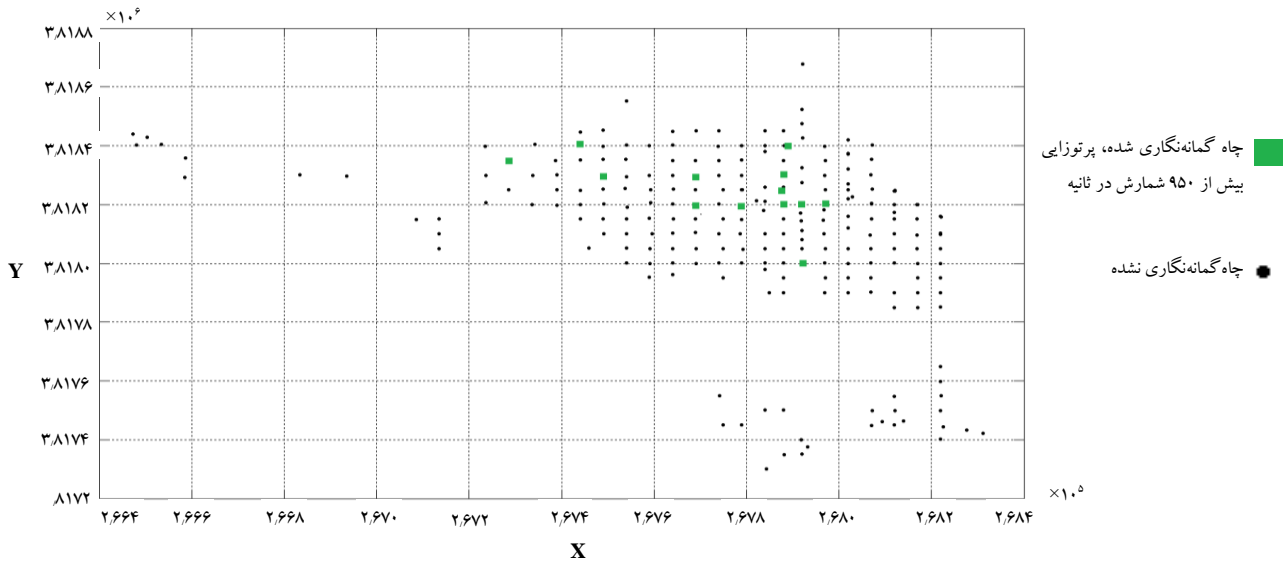
مقدار پرتوزایی زمینه (شمارش در ثانیه)	مقدار پرتوزایی در انبار مغزه (شمارش در ثانیه)	حد آستانه‌ی پرتوزایی مطلوب (شمارش در ثانیه)
۲۵۰-۲۰۰	۲۵۰-۳۰۰	۸۰۰

۴. یافته‌ها و بحث

۱.۴ بررسی‌های مقدماتی

به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر ارتباط بین عناصر خاکی نادر و عناصر پرتوزا، نمونه‌ها براساس مقدار پرتوزایی (برحسب شمارش در ثانیه) از بزرگ به کوچک مرتب شده و ۴۷ نمونه‌ی اول به همراه ۳ نمونه از گمانه‌ی ۲۵ که مقدار زیادی فسفر در بر داشت، برای مطالعات میکروسکوپی به عنوان نمونه‌های کاندیدا از بقیه‌ی نمونه‌ها جدا شدند. شکل ۵، گمانه‌های مربوط به ۴۷ نمونه‌ی پیش‌گفته (مقدار پرتوزایی بالاتر از ۹۵۰ شمارش در ثانیه) را نشان می‌دهد.

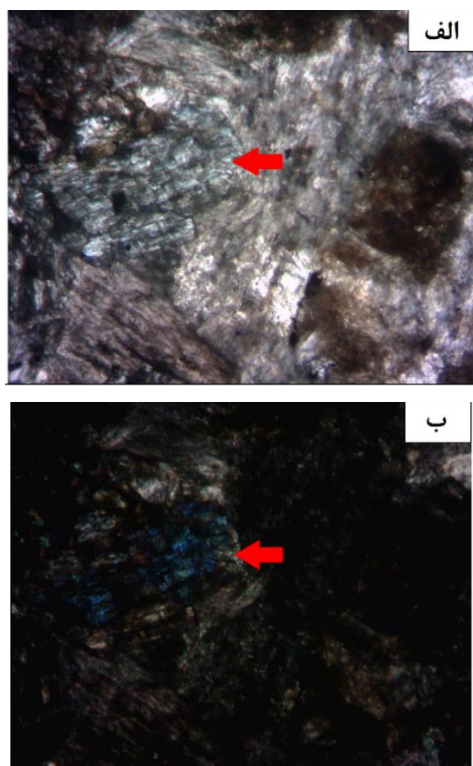
همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، گمانه‌های پرتوزا و به پیروی از آن‌ها، پرتوزایی در معدن باغک دارای روند جنوب‌شرقی- شمال‌غربی است. در حقیقت روند پرتوزایی محدوده‌ی مورد مطالعه از روند گسل‌های منطقه به خصوص گسل موجود در آنومالی C شمالی، پیروی کرده و با آن هم‌سویی دارد (شکل ۲-ب). این موضوع احتمال کانی‌زایی عناصر پرتوزا در امتداد گسل‌های منطقه را قوت می‌بخشد.



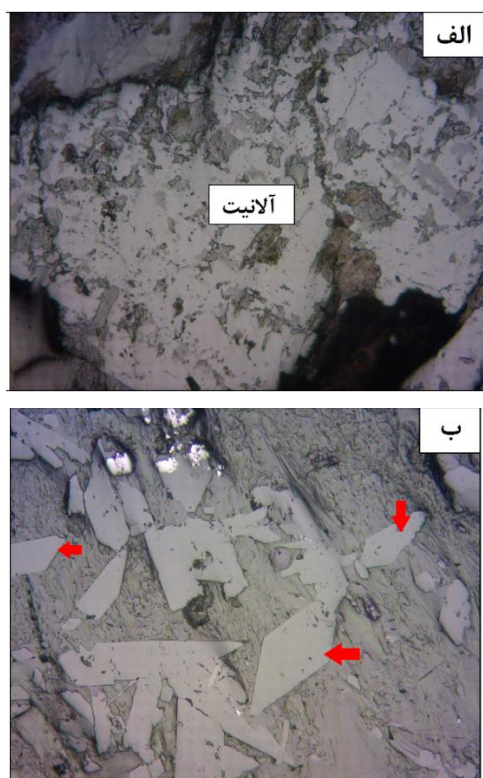
شکل ۵. نمایش گمانه‌های با پرتوزایی بالای ۹۵۰ شمارش در ثانیه (خط قرمز: روند پرتوزایی در منطقه).

جدول ۲. کانی‌شناسی و مقدار پرتوزایی نمونه‌های انتخاب شده برای تهیه‌ی مقطع

شماره‌ی نمونه	کانی‌شناسی نمونه	شمارش در ثانیه	نوع مقطع انتخابی	
			صیقلی	نازک
94-EXP-SN-01-01	منیتیت - پیریت - آمفیبول؟	۳۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-08-02	پیریت - آمفیبول؟	۱۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-09-03	منیتیت - پیریت	۱۰۰-۸۰	✓	✓
94-EXP-SN-10-04	کربنات	۱۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-11-05	منیتیت - آمفیبول؟	۲۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-14-06	کلسیت - پیریت - آمفیبول - پروکسن - منیتیت	۳۰۰	✓	-
94-EXP-SN-15-07	فلوگوپیت - بیوتیت - پیریت - فلدسپات	۳۰۰-۲۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-17-08	پروتیت؟ - آمفیبول؟	۳۰۰-۲۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-22-09	منیتیت - پیریت - فلدسپات - آمفیبول؟	۳۰۰-۲۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-24-10	پیریت - سیلیس - بیوتیت	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-25-11	پیریت - آمفیبول - پروکسن	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-30-12	پیریت - منیتیت - کربنات	۲۳۰-۲۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-31-13	منیتیت	۲۲۰	✓	-
94-EXP-SN-32-14	کربنات - کلریت - آمفیبول	۲۰۰	-	✓
94-EXP-SN-33-15	منیتیت - پیریت - آمفیبول - پروکسن	۱۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-34-16	پیریت - منیتیت - کلسیت	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-36-17	منیتیت - پیریت	۳۲۰	✓	✓
94-EXP-SN-37-18	آمفیبول - کلریت - منیتیت	۱۵۰	-	✓
94-EXP-SN-40-19	منیتیت - پیریت	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-43-20	منیتیت - پیریت - کانی‌های آمفیبول؟	۱۰۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-45-21	منیتیت - پیریت - کانی‌های آمفیبول؟	۴۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-46-22	منیتیت - کانی‌های آمفیبول؟	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-49-23	کربنات - سیلیس - فلوگوپیت	۲۰۰	-	✓
94-EXP-SN-50-24	فلوگوپیت - بیوتیت - کربنات - پیریت	۲۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-22-25	کربنات - آمفیبول	۳۰۰-۲۵۰	✓	✓
94-EXP-SN-25-26	پیریت - کربنات - کانی‌های آمفیبول	۳۰۰	✓	✓
94-EXP-SN-17-27	پیریت - کربنات - سیلیس	۳۰۰-۲۵۰	✓	-
94-EXP-SN-17-28	فلوگوپیت - بیوتیت - آمفیبول - پیریت	۳۰۰-۲۵۰	-	✓
94-EXP-SN-15-29	فلوگوپیت - بیوتیت - کربنات	۳۰۰-۲۵۰	-	✓
94-EXP-SN-50-30	فلوگوپیت - منیتیت - آمفیبول	۲۰۰	-	✓



شکل ۶. کانی آلانیت در مقطع‌های نازک. الف: نور عادی، ب: نور قطبیده (بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر).

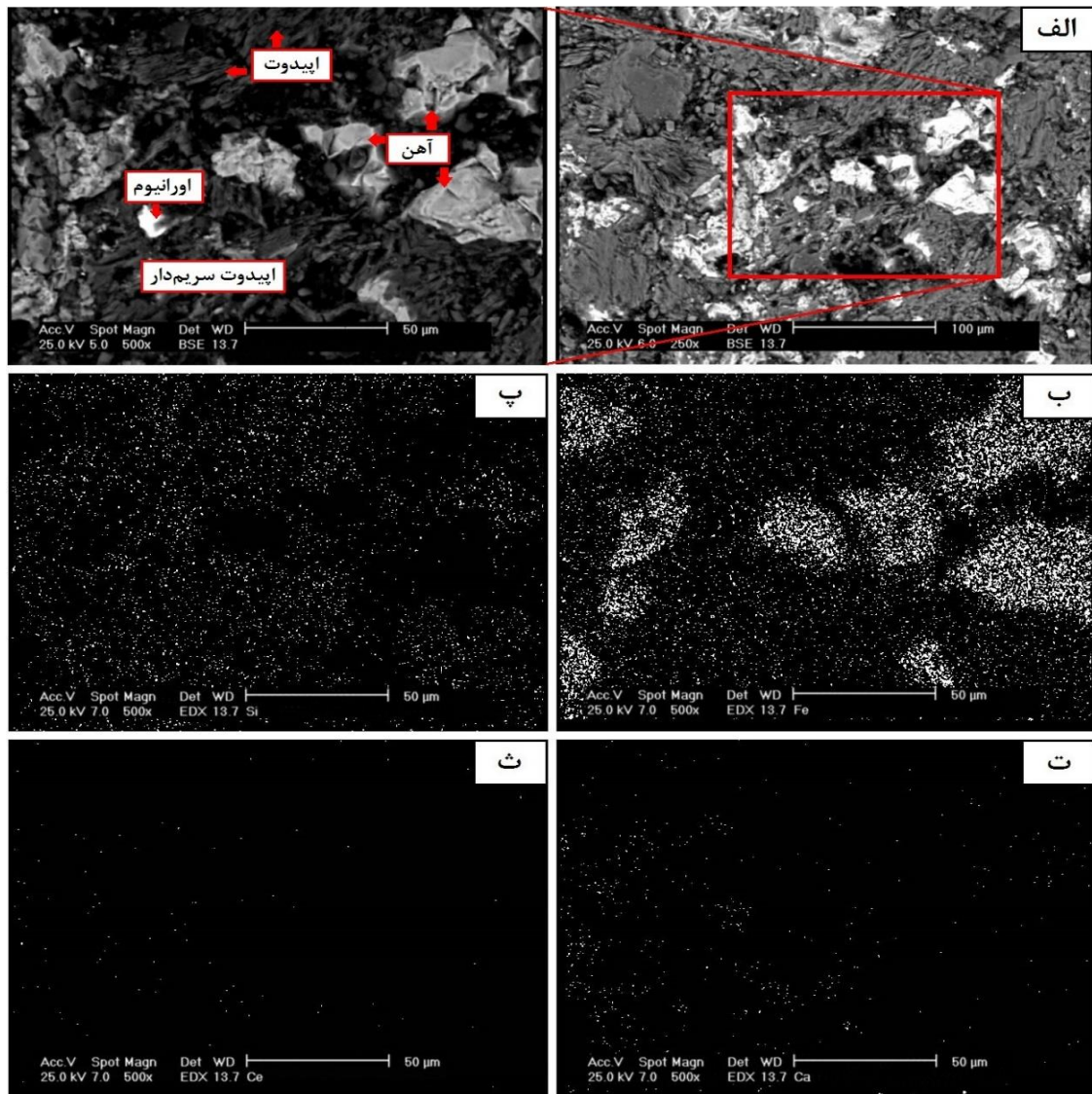


شکل ۷. کانی آلانیت و اسفن در مقطع‌های صیقلی. الف: نمایش کانی‌های آلانیت (بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر)، ب: کانی‌های اسفن با سطح مقطع لوزی و مثلثی شکل (بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر).

بر اساس مطالعه‌های انجام شده بر روی مقاطع نازک و صیقلی، شواهدی مبنی بر وجود کانی‌های مربوط به عناصر خاکی نادر نظیر موناژیت، باستانزیت، آپاتیت یا زنونتیم مشاهده نشد. هم‌چنین در مطالعه‌ها و بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که امکان شناسایی و تشخیص کانی‌های مربوط به عناصر پرتوزا نظیر اورانینیت و ... با میکروسکوپ نوری میسر نیست. اما نکته‌ی قابل توجه در اکثر مقطع‌های تحت بررسی، وجود مقدار قابل توجهی از کانی‌های اسفن و آلانیت به صورت شبکه‌ای از کانی‌های کوچک تا درشت است (شکل‌های ۶ الف و ب، ۷- الف و ب).

با توجه به مقدار زیاد اسفن و آلانیت مشاهده شده به وفور در سنگ شناسی مقطع‌ها، احتمال وجود عناصر خاکی نادر در اسفن و آلانیت یکی از فرضیات مهم در نظر گرفته شد. کانی آلانیت از خانواده‌ی گروه اپیدوت است. فرمول عمومی کانی‌های اپیدوت $Ca_2(Al,Fe)_2(OH)(SiO_4)_3$ است. تحت شرایط خاص، عناصر آهن، سریم و آلومینیم به صورت محلول جامد وارد ترکیب مذکور شده و کانی آلانیت با ترکیب $(Al, Fe^{+3})_2(OH)(SiO_4)_3$ را به وجود می‌آورند. پس می‌توان احتمال داد که کانی آلانیت دربرگیرنده‌ی عناصر خاکی نادر مانند سریم و ... در منطقه‌ی مورد مطالعه است. به همین منظور مطالعه‌های میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) به کمک میکروسکوپ الکترونی (مدل XL30 جزو سری‌های XL ساخت شرکت فیلیپس) موجود در دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام، و در نتیجه‌های به دست آمده، کانی‌های حاوی عناصر خاکی نادر (اپیدوت سریم‌دار)، اورانیم و آهن مشاهده شد (شکل ۸).

در تصویر شکل ۸ الف، پس از انجام اسکن عنصر اورانیم توسط میکروسکوپ، مشخص شد که نقطه‌ی روشن در تصویرهای بزرگ‌نمایی شده، کانی حاوی عنصر اورانیم است. همان‌طور که دیده می‌شود، اورانیم به صورت مجزا بوده و به صورت محلول جامد در کانی‌های آهن‌دار یا کانی‌های حاوی عناصر خاکی نادر وجود ندارد. کانی‌های حاوی عنصر آهن (منیتیت) نیز در اسکن به دست آمده برای آهن در شکل ۸ ب به وضوح قابل مشاهده هستند. کانی‌های تیره رنگ نیز با مقدار قابل توجهی از سیلیسیم (شکل ۸ پ)، کلسیم (شکل ۸ ت) و در نهایت مقدار کمی سریم (جانشین عنصر کلسیم شده) (شکل ۸ ث)، کانی اپیدوت سریم‌دار (آلانیت) تشخیص داده شدند.



شکل ۸. الف) نمایش کانی اپیدوت (آلانیت)، کانی آهن‌دار و پیراگیرشده‌ی اورانیم به همراه بک بزرگ‌نمایی از آن، (ب) نتیجه‌ی اسکن برای Fe، (پ) نتیجه‌ی اسکن برای Si، (ت) نتیجه‌ی اسکن برای Ca، (ث) نتیجه‌ی اسکن برای Ce.

کانی آلانیت با تجمع‌های زیاد در نمونه‌های مطالعه شده به چشم می‌خورد و مقدار بالای عناصر خاکی نادر در تجزیه‌های عنصری نیز مربوط به همین کانی است [۱۹].

با توجه به مشاهده‌ی مقدار زیادی از کانی‌های اسفن در مقطع‌های تحت بررسی، ممکن است کانی اسفن نیز میزبان عناصر خاکی نادر باشد.

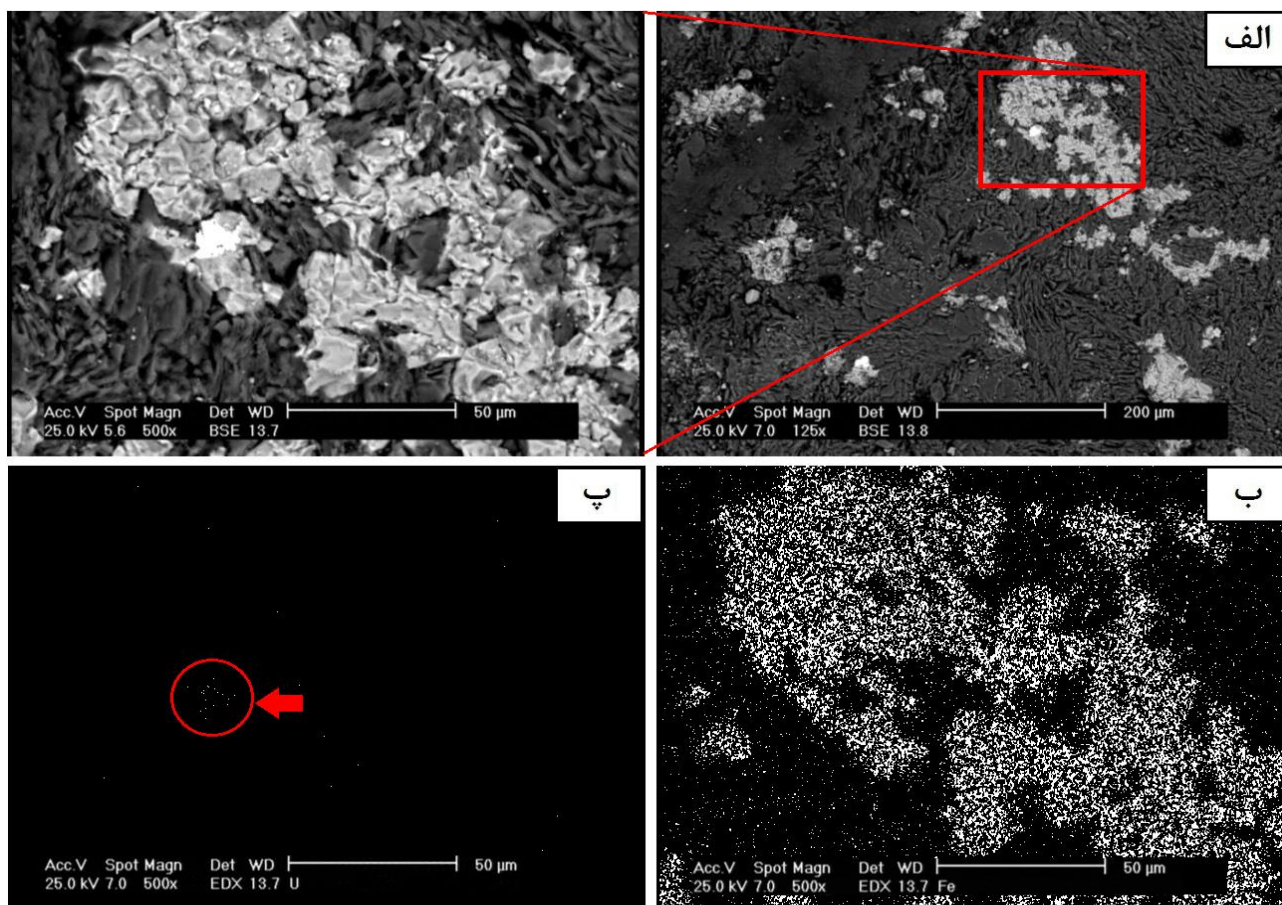
عناصر خاکی نادر در شبکه‌ی سایر کانی‌ها به‌خصوص کانی‌های آهن‌دار (منیتیت) مشاهده نمی‌شوند.

اورانیم به صورت کانی‌های مستقل از آلانیت یا به عبارتی بیرون از شبکه‌ی سیلیکاته‌ی آلانیت شکل گرفته است. در واقع اورانیم عموماً به صورت پیراگیرشده در فضا‌های خالی آلانیت‌ها (یا ممکن است در کانی اسفن) و همین‌طور کانی‌های آهن‌دار گیر افتاده است.

در تصویر شکل ۸ الف، به دلیل چگالی بیش‌تر عنصر اورانیم نسبت به عناصر دیگری چون آهن و غیره، عنصر اورانیم نسبت به دیگر عناصر بسیار روشن‌تر ظاهر شده است. این قضیه در مورد آهن و دیگر عناصر و کانی‌های موجود نیز قابل مشاهده است. در شکل ۹ نیز نمونه‌ای از حضور اورانیم در کانی‌های آهن‌دار (شکل ۹ الف) به همراه دو اسکن آهن (شکل ۹ ب) و اورانیم (شکل ۹ پ) نشان داده شده است.

در حقیقت براساس مطالعه‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شده بر روی مقطع‌های صیقلی و نازک، مشاهده شد که:

- عناصر خاکی نادر به ویژه عنصر سریم در نمونه‌های مورد بررسی وجود دارند (لانتانیم و نئودیمیم نیز در یک مقطع مشاهده شدند).
- عناصر خاکی نادر در آلانیت جانشین کلسیم شده‌اند.



شکل ۹. الف) نمایش کانی‌های حاوی اورانیم و آهن در یک مقطع نازک به همراه یک بزرگ‌نمایی از آن، (ب) نتیجه‌ی اسکن برای Fe، (پ) نتیجه‌ی اسکن برای U.

موضوع در بررسی‌های اولیه، ذهنیت ارتباط این عناصر با خاصیت پرتوزایی را تحکم می‌بخشد.

۴.۴ تجزیه و تحلیل‌های آماری نتایج تجزیه‌ی عنصری

برای تجزیه و تحلیل نتایج تجزیه‌ی عنصری، بررسی وجود و عدم وجود ارتباط بین عناصر خاکی نادر و خاصیت پرتوزایی و در نتیجه، با عناصر پرتوزا، داده‌های حاصل از تجزیه‌ی ژئوشیمیایی مورد پردازش قرار گرفت. به این صورت که در ابتدا پیش‌پردازش‌های آماری بر روی آن‌ها انجام و پس از تعیین مشخصه‌های آماری اولیه (بررسی آماری تک متغیره)، وجود و عدم وجود رابطه‌ی مطرح شده بین پرتوزایی و عناصر خاکی نادر، مورد بررسی قرار گرفت.

۱.۴.۴ پیش‌پردازش داده‌های ژئوشیمیایی

برای پردازش آماری عناصر مورد بررسی در محدوده‌ی مطالعاتی باغک (۱۵۱ نمونه)، ابتدا موارد نادرست (اعم از احتمال وجود

۳.۴ تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ها

تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی-پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-MS) با حد آشکارسازی (تشخیص) $(DL)^{(11)}$ متفاوت برای تعداد ۵۶ عنصر انجام شد (جدول ۳). در ادامه، ابتدا به آماده‌سازی داده‌ها و سپس به تجزیه و تحلیل‌های اولیه‌ی آماری آن‌ها، پرداخته می‌شود (به منظور بررسی ارتباط بین عناصر خاکی نادر و عناصر پرتوزا به شکل محاسباتی). نکته‌ی قابل توجهی که قبل از آماده‌سازی و پردازش داده‌ها به چشم می‌خورد، کاهش ناگهانی عیار عناصر خاکی نادر در انتهای جدول تجزیه‌ی داده‌ها است. همان‌طور که پیش از این نیز مطرح شد، در انتهای فعالیت نمونه‌برداری به منظور بررسی و مشاهده هر چه بیش‌تر ارتباط بین عناصر خاکی نادر و خاصیت پرتوزایی، تعداد ۱۰ عدد نمونه از توده‌های نفوذی و صرفاً از مناطق غیرپرتوزا برداشت شد. از کاهش عیار این عناصر با کاهش مقدار پرتوزایی در مجموعه‌ی جدول داده‌ها به وضوح دیده می‌شود که این



از ۱۵ درصد از تعداد کل داده‌ها)، مقدار ۰٫۷۵ حد حساسیت دستگاه، جای‌گزین مقادیر سنسورد و در غیر این صورت، به دلیل اثرات نامطلوب این عناصر در نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری، عناصر مذکور حذف شدند. در جدول ۴ گزارش کاملی از حذف و جای‌گزینی داده‌های سنسورد آورده شده است.

کاراکتر اضافی، مقادیر فوق‌العاده بزرگ و هرگونه اشتباه نوشتاری که موجب بروز مشکلاتی در محاسبات می‌شوند) در فایل داده‌ها تصحیح، و سپس (با توجه به حد حساسیت پایین گزارش شده در جدول ۳) داده‌های سنسورد^(۱۲) حذف و با مقادیر مناسب جای‌گزین شدند. یعنی با توجه به تعداد کم مقادیر سنسورد (کم‌تر

جدول ۳. عناصر تجزیه شده با ICP-MS و حد حساسیت دستگاه

عنصر	حد حساسیت	عنصر	حد حساسیت	عنصر	حد حساسیت	عنصر	حد حساسیت
Ag	۰٫۱	Er	۰٫۰۵	Nb	۱	Ta	۰٫۱
Al	۱۰۰	Eu	۰٫۱	Nd	۰٫۵	Tb	۰٫۱
As	۰٫۱	Fe	۱۰۰	Ni	۱	Te	۰٫۱
Ba	۱	Gd	۰٫۰۵	P	۱۰	Th	۰٫۱
Be	۰٫۲	Hf	۰٫۵	Pb	۱	Ti	۱۰
Bi	۰٫۱	In	۰٫۵	Pr	۰٫۰۵	Tl	۰٫۱
Ca	۱۰۰	K	۱۰۰	Rb	۱	Tm	۰٫۱
Cd	۰٫۱	La	۱	S	۵۰	U	۰٫۱
Ce	۰٫۵	Li	۱	Sb	۰٫۵	V	۱
Co	۱	Lu	۰٫۱	Sc	۰٫۵	W	۱
Cr	۱	Mg	۱۰۰	Se	۰٫۵	Y	۰٫۵
Cs	۰٫۵	Mn	۵	Sm	۰٫۰۲	Yb	۰٫۰۵
Cu	۱	Mo	۰٫۱	Sn	۰٫۱	Zn	۱

جدول ۴. مشخصات داده‌های سنسورد عناصر مورد بررسی در معدن باغک سنگان

عنصر	حد ثبت دستگاه	میزان حساسیت	تعداد داده‌های سنسورد	درصد داده‌های سنسورد	وضعیت جای‌گزینی	مقدار جای‌گزین شده یا حذف شده
U	۰٫۱	پایین	۰	۰	بله	۰٫۰۷۵
Th	۰٫۱	پایین	۰	۰	بله	۰٫۰۷۵
K	۱۰۰	پایین	۱	۰٫۶۶	بله	۷۵
Fe	۱۰۰۰۰۰	بالا	۱۲۳	۸۱٫۴۶	خیر	حذف عنصر
Sc	۰٫۵	پایین	۴۱	۲۷٫۱۵	خیر	حذف عنصر
Y	۰٫۵	پایین	۰	۰	بله	۰٫۳۷۵
La	۱	پایین	۰	۰	بله	۰٫۷۵
Ce	۰٫۵	پایین	۰	۰	بله	۰٫۳۷۵
Pr	۰٫۰۵	پایین	۵	۳٫۳۱	بله	۰٫۰۳۷۵
Nd	۰٫۵	پایین	۰	۰	بله	۰٫۳۷۵
Sm	۰٫۰۲	پایین	۳	۱٫۹۷	بله	۰٫۰۱۵
Eu	۰٫۱	پایین	۷	۴٫۶۴	بله	۰٫۰۷۵
Gd	۰٫۰۵	پایین	۰	۰	بله	۰٫۰۳۷۵
Tb	۰٫۱	پایین	۷	۴٫۶۴	بله	۰٫۰۷۵
Dy	۰٫۰۲	پایین	۰	۰	بله	۰٫۰۱۵
Er	۰٫۰۵	پایین	۰	۰	بله	۰٫۰۳۷۵
Tm	۰٫۱	پایین	۵	۳٫۳۱	بله	۰٫۰۷۵
Yb	۰٫۰۵	پایین	۶	۳٫۹۷	بله	۰٫۰۳۷۵
Lu	۰٫۱	پایین	۱۴	۹٫۲۷	بله	۰٫۰۷۵



مقسوم علیه مشترک متراژ نمونه‌ها به عنوان طول معیار در نظر گرفته شد و نمونه‌ها به ترکیب‌های ۵ سانتی‌متری بسط داده شدند. نتیجه‌ی این کار تولید ۲۲۵۷ نمونه با طول ۵ سانتی‌متر است.

بررسی‌های صورت گرفته در مورد توزیع داده‌ها، نمایان‌گر آن است که عیارهای مربوط به ۱۹ پارامتر مورد بررسی، از توزیع بهنجار پیروی نمی‌کنند. تبدیل‌های لگاریتمی دو متغیره، لگاریتمی سه متغیره، معکوس، باکس-کاکس و جانسون نیز برای بهنجارسازی آن‌ها مؤثر واقع نشد. زیرا نه تنها نتیجه‌های حاصل از محاسبه‌ی شاخص $W [20, 21]$ برای داده‌های تبدیل یافته به عدد صفر خیلی نزدیک نشد بلکه کاهش چشمگیری را نیز در بر نداشت و در مواردی شاهد افزایش آن نیز بودیم (شکل ۱۰). در این مورد نتایج حاصل از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز مبنی بر عدم پیروی از توزیع بهنجار بعد از به کارگیری تبدیل‌های مذکور هستند. به همین دلیل با وجود کارایی بیش‌تر همبستگی پیرسون، می‌باید از همبستگی اسپیرمن به منظور محاسبه‌ی همبستگی استفاده کرد. زیرا محاسبه‌ی ضریب همبستگی اسپیرمن نیاز به پیش‌فرض‌های کم‌تری نسبت به ضریب همبستگی پیرسون دارد (شرط توزیع بهنجار برای داده‌ها).

۳.۴.۴ همبستگی عناصر

در این قسمت به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر ارتباط بین متغیرهای مدنظر (یعنی عیار عناصر خاکی نادر و مقدار پرتوزایی و در نتیجه مقدار عیار عناصر اورانیم، توریم و پتاسیم)، به محاسبه‌ی ضریب همبستگی بین آن‌ها پرداخته شد. همان‌طور که در قسمت قبل نیز گفته شد، برای محاسبه‌ی همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی (داده‌های تبدیل نیافته) در محدوده‌ی باغک از معیار ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد که مقادیر آن در جدول ۶ درج شده است. اما در پژوهش حاضر علاوه بر محاسبه‌ی ضریب همبستگی اسپیرمن، با توجه به کم‌ترین مقادیر شاخص W گزارش شده برای مقادیر تبدیل یافته توسط تبدیل باکس-کاکس (جدول ۶)، توزیع این داده‌ها را در حالت خیلی آرمانی تقریباً نرمال فرض کرده و ضریب همبستگی پیرسون برای داده‌های تبدیل یافته توسط تبدیل باکس-کاکس محاسبه شد که نتایج آن نیز در جدول ۶ درج شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو عنصر اسکاندیم و آهن به رغم در برداشتن بیش از ۱۵ درصد از مقادیر سنسورد، از گردونه‌ی محاسبات آماری آینده حذف شدند. بنابراین، در ادامه به مطالعه و بررسی دیگر عناصر پرداخته شد.

سپس مقادیر غیرمعمول به عنوان مقادیر خارج از رده، مورد بررسی قرار گرفتند. اما به منظور از دست ندادن مقادیر غیرمعمول با ارزش (با توجه به حساسیت از دست دادن مقادیر غیرمعمول با ارزش به عنوان مقادیر خارج از رده)، از حذف مقادیر خارج از رده پرهیز به عمل آمد. زیرا مقادیر شناسایی شده به عنوان مقادیر خارج از رده، به نظر، مقادیر غیرمعقولی نبوده و می‌توان آن‌ها را مقادیری از عیار بالای عناصر در نظر گرفت.

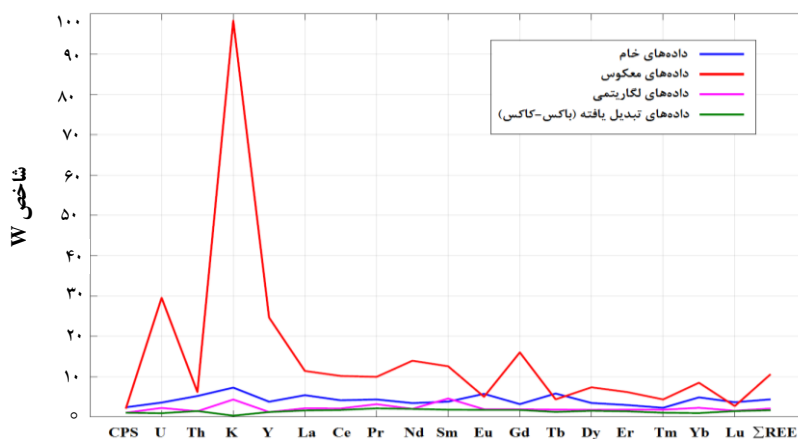
۲.۴.۴ بررسی آماری تک‌متغیره

پس از تصحیح و آماده‌سازی داده‌های ژئوشیمیایی، میانگین وزن‌دار عیار برای ۱۵۱ نمونه‌ی مورد بررسی (بدون صرف‌نظر از نمونه‌های کانی‌سازی نشده که برای بررسی ارتباط بین عناصر خاکی نادر و خاصیت پرتوزایی، برداشته شدند) و هم‌چنین برای نمونه‌های کانی‌سازی شده، محاسبه و در جدول ۵ آورده شد. با توجه به مقادیر گزارش شده در جدول ۵، می‌توان کشف عناصر خاکی نادر در این آنومالی را به روش اکتشافی پرتوسنجی وابسته دانست. نکته‌ی دیگر قابل برداشت از جدول ۵، این است که پرتوزایی منطقه‌ی مورد مطالعه تحت تأثیر عمدتاً اورانیم و تا حدودی توریم و پتاسیم است و با توجه به مقدار بالای عناصر خاکی نادر، ارتباط بین آن‌ها و عنصر اورانیم تا حدودی نمایان‌تر می‌شود. البته این ارتباط در ادامه و پس از تجزیه و تحلیل‌های تک‌متغیره، از طریق محاسبه‌ی مقدار همبستگی، دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور محاسبه‌ی همبستگی عیار عناصر مورد مطالعه، ابتدا نوع توزیع تمام عناصر مورد بررسی قرار گرفت. سپس در صورت عدم برخورداری داده‌ها از یک توزیع بهنجار، راهکارها و تبدیل‌های مختلفی برای بهنجارسازی توزیع آن‌ها به کار گرفته شد. در نهایت با توجه به توزیع داده‌های مورد نظر، روش همبستگی انتخاب و سپس مقادیر آن محاسبه شد. برای این منظور می‌باید ترکیب‌های یکسانی برای طول نمونه‌های تحت بررسی در نظر گرفت و پس از یکسان‌سازی طول نمونه‌ها به تجزیه و تحلیل دقیق آن‌ها پرداخت. در همین راستا، بزرگ‌ترین



جدول ۵. مشخصات اولیه‌ی آماری عناصر مورد بررسی در محدوده‌ی باغک

عنصر	میانگین عیار کل نمونه‌ها (ppm)	میانگین عیار نمونه‌های کانی‌سازی شده (ppm)	عیار بیشینه (ppm)
U	۱۸۵,۶۲	۲۵۹,۸۴	۹۲۳,۸
Th	۲۵,۹۳	۳۳,۳۶	۱۳۸,۴۲
K	۱۴۴۵۴,۱۴	۱۵۸۴۱	۵۰۲۸۴
Y	۳۵,۳۴	۴۳,۹۲	۱۴۵,۷
La	۹۵۸,۷۶	۱۲۷۶,۶۸	۶۳۰,۸
Ce	۱۱۲۵,۸۶	۱۵۱۲,۰۳	۶۵۶۶
Pr	۹۹,۹۱	۱۳۵,۹۵	۶۰۵,۸۷
Nd	۲۶۲,۴۸	۳۵۶,۲۳	۱۳۹۴,۲
Sm	۲۳,۳۶	۳۱,۴۳	۱۲۶
Eu	۴,۳۹	۵,۸۷	۲۹,۱۶
Gd	۱۸,۷۵	۲۵,۰۹	۹۱,۱۶
Tb	۲,۱۶	۲,۸۵	۱۲,۳۷
Dy	۸,۸۲	۱۱,۳۸	۴۰,۹۶
Er	۴,۲۷	۵,۳۵	۱۸,۱۵
Tm	۰,۵۳	۰,۶۵	۲
Yb	۳,۲۸	۴,۲۲	۱۶,۷
Lu	۰,۴۴	۰,۵۶	۱,۹
Σ REE	۲۵۴۸,۳۷	۳۴۱۲,۲	۱۵۳۱۲,۲۳



شکل ۱۰. شاخص W برای داده‌های تبدیل یافته.

جدول ۶. مقادیر همبستگی اسپیرمن و پیرسون بین عناصر خاکی نادر و پرتوزایی عناصر پرتوزا

عنصر	ضریب همبستگی اسپیرمن			ضریب همبستگی پیرسون		
	U	Th	K	U	Th	K
Y	۰,۷۰	۰,۸۳	۰,۵۰	۰,۶۸	۰,۸۶	۰,۴۹
La	۰,۷۱	۰,۸۳	۰,۴۵	۰,۷۳	۰,۸۲	۰,۳۹
Ce	۰,۷۲	۰,۸۶	۰,۴۶	۰,۷۳	۰,۸۳	۰,۳۸
Pr	۰,۷۱	۰,۸۸	۰,۴۶	۰,۶۸	۰,۹۰	۰,۴۷
Nd	۰,۷۱	۰,۸۹	۰,۴۸	۰,۶۶	۰,۹۱	۰,۵۰
Sm	۰,۷۱	۰,۹۰	۰,۴۹	۰,۶۹	۰,۹۲	۰,۵۱
Eu	۰,۶۳	۰,۸۶	۰,۴۵	۰,۶۵	۰,۸۵	۰,۳۸
Gd	۰,۷۱	۰,۸۹	۰,۴۸	۰,۶۹	۰,۹۱	۰,۴۹
Tb	۰,۷۲	۰,۸۷	۰,۵۱	۰,۷۲	۰,۸۹	۰,۴۹
Dy	۰,۷۱	۰,۸۷	۰,۵۲	۰,۷۰	۰,۹۱	۰,۵۲
Er	۰,۷۱	۰,۸۵	۰,۵۴	۰,۶۹	۰,۸۸	۰,۵۴
Tm	۰,۶۶	۰,۸۴	۰,۵۷	۰,۶۶	۰,۸۶	۰,۵۵
Yb	۰,۷۱	۰,۸۲	۰,۵۹	۰,۷۱	۰,۸۵	۰,۵۷
Lu	۰,۷۳	۰,۸۱	۰,۶۰	۰,۷۳	۰,۸۲	۰,۵۶
Σ REE	۰,۷۱	۰,۸۶	۰,۴۷	۰,۷۳	۰,۸۴	۰,۳۹



قابل توجه دیگر وجود اورانیم در شبکه‌ی آلانیت و حتی کانی‌های آهن‌دار است که به صورت پیراگیر شده در فضای خالی مربوط به این کانی‌ها حضور دارد. مطالعات آماری نشان داد که معدن باغک در بردارنده‌ی مقدار مناسبی از عناصر سربیم و لانتانیم و در نتیجه مقدار زیادی از مجموعه‌ی عناصر خاکی نادر است. مشاهده شد که پرتوزایی در این منطقه تحت تأثیر عمدتاً اورانیم و تا حد کم تری پتاسیم است و عناصر خاکی نادر با پرتوزایی منطقه و در نتیجه با عنصر اورانیم، همبستگی بسیار قابل قبولی دارند. هم‌چنین نشان داده شد که عنصر توریم با وجود این که مقداری در حد زمینه را شامل می‌شود در ارتباط و همبستگی بسیار مناسبی با عناصر خاکی نادر است. این موضوع به آن دلیل است که عناصر خاکی نادر از نظر ژئوشیمی نیز رفتاری مشابه به اورانیم و توریم دارند و جزو عناصر لیتوفیل (سنگدوست) یون- بزرگ و شبیه فلزات لیتوفیل با قابلیت واکنش شدید مثل توریم، اورانیم، فسفر و ... هستند. براساس یافته‌های این پژوهش مبنی بر وجود چنین ارتباطی در یک معدن آهن اسکارنی و با توجه به مشاهده‌ی آن در برخی کانی‌زایی‌های دیگر ایران مرکزی و هم‌چنین وجود شباهت‌هایی در رفتار ژئوشیمیایی آن‌ها، ضرورت مطالعه و بررسی هر چه بیشتر چنین ارتباطی به منظور معرفی روش‌های پرتوسنجی به عنوان روش‌هایی مؤثر در اکتشاف عناصر خاکی نادر، کاملاً احساس می‌شود. فکر و روش معرفی شده در این تحقیق برای کشف عناصر خاکی نادر، می‌تواند به کمک مطالعات تکمیلی در این مورد، دیدگاه مناسبی را در پیش‌روی تصمیم‌گیران این صنعت قرار دهد.

قدردانی

بدین‌وسیله از مجتمع سنگ آهن سنگان که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند صمیمانه تشکر می‌نماییم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی مقادیر عیار عناصر خاکی نادر با مقادیر پرتوزایی برابر با ۰/۶ و ضریب همبستگی مقادیر عیار عناصر خاکی نادر با دو عنصر اورانیم و توریم به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۸۵ گزارش شده است که مقادیر بسیار قابل قبولی هستند. این موضوع نشان می‌دهد که در مطالعات آماری انجام شده در مورد نتایج تجزیه‌ی ژئوشیمیایی نمونه‌های باغک نیز بین مجموعه عناصر خاکی نادر و خاصیت پرتوزایی به خصوص در مورد دو عنصر اورانیم و توریم ارتباط وجود دارد. مقدار عنصر توریم در نتایج تجزیه (جدول ۵) در حد زمینه گزارش شده است ولی در جدول‌های فوق مشاهده می‌شود که این عنصر با وجود مقدار کم آن در منطقه‌ی باغک، در ارتباط بسیار مناسبی با عناصر خاکی نادر است.

هم‌چنین ضریب همبستگی اسپیرمن گزارش شده بین مقدار پرتوزایی محاسبه شده توسط دستگاه طیف‌سنج و سه عنصر اورانیم، توریم و پتاسیم به ترتیب برابر با، ۰/۹۰۸، ۰/۵۲۰ و ۰/۴۶۱ است. همین ضریب با توجه به معیار پیرسون برای سه عنصر مذکور به ترتیب برابر با ۰/۹۰۴، ۰/۵۳۷ و ۰/۳۹۴ است که نشان می‌دهد منشأ اصلی پرتوزایی منطقه، عنصر اورانیم بوده و پرتوزایی بیش‌تر تحت تأثیر آن است و عناصر پتاسیم و توریم سهم بسیار کم‌تری در پرتوزایی دارند. به همین دلیل همان‌طور که در جدول ۶ نیز مشاهده می‌شود، مقدار همبستگی عنصر پتاسیم به مراتب کم‌تر از دو عنصر اورانیم و پتاسیم بوده و مقادیر مناسبی را شامل نمی‌شود. قابل ذکر است که پایین بودن مقدار همبستگی بین عناصر خاکی نادر و مقادیر پرتوزایی (شمارش در ثانیه) نسبت به ضرایب همبستگی بین عناصر خاکی نادر و دو عنصر اورانیم و توریم نیز به دلیل تأثیر عنصر پتاسیم در مقدار پرتوزایی محاسبه شده به وسیله‌ی دستگاه طیف‌سنج است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای بررسی یک روش بهینه‌ی نمونه‌برداری و اکتشاف عناصر خاکی نادر، به بررسی و مطالعه‌ی ارتباط آن‌ها با عناصر پرتوزا در معدن باغک پرداخته شد. در مطالعه‌های اولیه مشخص شد که عناصر خاکی نادر نظیر لانتانیم، نئودیمیم و به ویژه عنصر سربیم، در کانی آلانیت جانشین کلسیم شده‌اند (این اتفاق ممکن است در مورد اسفن نیز صادق باشد). نکته‌ی



پی‌نوشت‌ها

1. LREE: Light rare earth elements
2. HREE: Heavy rare earth elements
3. Inclusion
4. EPMA: Electron probe micro analysis
5. LA-ICPMS: The laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry
6. BIF: Banded iron formation
7. Rapitan
8. LILE: Large ion lithophile elements
9. HFSE: High field strength elements
10. SEM: Scanning electron microscopy
11. Detection limit
12. Sensor data

مرجع‌ها

- [1] S.S. Ghannadpour, Geochemical and metallurgical studies of rare earth elements and evaluating their potential in Bafq-Robat-e-Posht-e-Badam belt. I.R.IRAN National Elites Foundation, Tehran, Report, (2014) 162 (in Persian with English abstract).
- [2] D.M. Hoatson, S. Jaireth, Y. Mieztis, The major rare-earth-element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources. *Geoscience Australia*, (2011) 204.
- [3] A. Mehdilo, F. Alinia, Identification and determination of rare earth elements in iron ore processing plant and tailings Choghart, 4th Mining Engineering Conference, Tehran University, Tehran, Iran, (2012) (in Persian with English abstract).
- [4] A. Sabet-Mobarhan-Talab, F. Alinia, S.S. Ghannadpour, A. Hezarkhani, Geology, geochemistry, and some genetic discussion of the Chador-Malu iron oxide-apatite deposit, Bafq District, Central Iran, *Arabian Journal of Geoscience*, **8**(10) (2015) 8399–8418.
- [5] Z. Bonyadi, G.J. Davidson, B. Mehrabi, S. Meffre, F. Ghazban, Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, **281** (2011) 253–269.
- [6] S. Mohseni, A. Aftabi, Comment on Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Sehchahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry (by Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S., Ghazban, F.), *Chemical Geology*, **334** (2012) 378–381.
- [7] K. Khoshnoodi, M. Yazdi, M. Behzadishirkala, Using of ASTER ETM and Gamma Spectrometry Airborne Data to Find the Relationship Between the Distribution of Alkali Metasomatism and REE Mineralization in the Bafq Area Central Iran. *Journal of Science University of Tehran*, **27** (2016) 65-77.
- [8] K. Khoshnoodi, M. Behzadishirkala, M. Ghanadimaragheh, M. Yazdi, Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghartdeposit Bafgh district Central Iran. *Geologia Croatica*, **70** (2017) 701-739.
- [9] G. Mirzababaei, M. Behzadishirkala, M. Yazdi, M. Rezvanianzadeh, M. Ghanadimaragheh, Application of spectral remote sensing techniques for detection and reconnaissance mapping of the altered secondary minerals in mineral exploration a case study Bafq mining district central Iran. *International Geoinformatics Research and Development Journal*, **8** (2017) 1-18.
- [10] M. Boomeri, Rare earth elements (REE) in garnet of Sangan iron ore deposit. The 9th Geological conference of Iran, Geological Society of Iran, Tehran Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, (2006) (in Persian).
- [11] N. Mazhari, A. Malekzadeh Shafaroudi, M. Ghaderi, Geology, mineralogy and geochemistry of Ferezhneh ferromanganese anomaly, east of Sangan mines complex, NE Iran. *Journal of Economic Geology*, **7**(1) (2015) 23-37 (in Persian with English abstract).
- [12] N. Mazhari, A. Malekzadeh Shafaroudi, M. Ghaderi, Geochemistry of intrusive rocks, petrology of skarn, and mineralogy and chemistry of orebodies in Senjedak-I area, east of Sangan mine, Khaf, NE Iran. *Scientific Quaterly Journal, GEOSCIENCES*, **25**(100) (2016) 235-246 (in Persian with English abstract).



- [13] A. Golmohammadi, M.H. Karimpour, A. Malekzadeh Shafaroudi, S.A. Mazaheri, Petrology and U-Pb zircon dating of intrusive rocks from A, C-south, and Dardvay districts, Sangan iron mine, Khaf. *Journal of Economic Geology*, **2**(5) (2013) 157-174 (in Persian with English abstract).
- [14] M.H. Karimpour, A. Malekzadeh Shafaroudi, Skarn Geochemistry - Mineralogy and Petrology of Source Rock Sangan Iron Mine, Khorasan Razavi, Iran. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, **17**(65) (2007) 108-125 (in Persian with English abstract).
- [15] A. Golmohammadi, S.A. Mazaheri, M.H. Karimpour, A. Malekzadeh Shafaroudi, Zircon U-Pb dating and geochemistry of Sarkhar and Bermani granitic rocks, East of Sangan iron mine, Khaf. *Journal of Petrology*, **5**(17) (2014) 83-102 (in Persian with English abstract).
- [16] A. Golmohammadi, M.H. Karimpour, A. Malekzadeh Shafaroudi, S.A. Mazaheri, Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, **65**(2) (2015) 545-563.
- [17] A. Malekzadeh Shafaroudi, M.H. Karimpour, A. Golmohammadi, Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, **64** (2013) 256-271.
- [18] M. Boomeri, Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran. PhD thesis, Akita University, Japan, (1998) 226.
- [19] M. Yazdi, Gold mineralization in the granitoid rocks of voltus area Rozmital block Czech Republic. PhD Thesis, Charles University (1987).
- [20] S.S. Ghannadpour, A. Hezarkhani, A developed software to calculate the additive constant number of average in three-variable normal logarithm. *Global Journal of Computer Science*, **2**(1) (2012) 1-6.
- [21] S.S. Ghannadpour, A. Hezarkhani, A. Sabetmobarhan, Some statistical analyses of Cu and Mo variates and geological interpretations for Parkam porphyry copper system, Kerman, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, **8** (2015) 345-355.