

## معادن باغک (بخش مرکزی معادن سنگان): ارتباط متالورژی کانی‌های حاوی عناصر نادر خاکی با پرتوزایی

سید سعید قنادپور<sup>۱\*</sup>، اردشیر هزارخانی<sup>۲</sup>، شاهید نوریان<sup>۳</sup>، عباس گلمحمدی<sup>۴</sup>

۱-دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۲-استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۳-کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴-دکتری، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مجتمع سنگ آهن سنگان، مشهد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۴/۱۱

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

### چکیده

با توجه به وجود شواهدی مبنی بر ارتباط بین عناصر نادر خاکی و خاصیت پرتوزایی در برخی از کانی‌سازی‌های ایران مرکزی، در تحقیق حاضر به کمک روش‌های پرتوسنجی و براساس خاصیت پرتوزایی، به نمونه‌برداری از معدن باغک در معادن سنگان (شمال شرق کشور، در استان خراسان رضوی و در نزدیکی مرز افغانستان) پرداخته شد. در واقع هدف از این مطالعه، علاوه بر بررسی وجود یا عدم وجود چنین ارتباطی در یک معدن اسکارنی و ارائه یک روش اکتشافی و الگوی نمونه‌برداری بهینه، مطالعه و بررسی توزیع این عناصر در معدن باغک است. نتایج حاصله از مطالعات میکروسکوپی و بررسی‌های آماری مبنی بر وجود چنین ارتباطی به صورت خیلی واضح در معدن باغک به عنوان یک معدن اسکارنی و متفاوت با کانی‌سازی‌های ایران مرکزی می‌باشد. نتایج حاصله از الگوی هنجار شده به کندریت‌ها نیز نشان دهنده غنی‌شدگی از LREE نسبت به روند نزولی و نزدیک به مسطحی از HREE می‌باشد که دلیل آن ورود یون‌های LREE به داخل شبکه آلانیت‌هاست که توسط مطالعات SEM نیز به تایید رسیده است. تهی‌شدگی در عنصر Eu نیز در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در الگوی هنجار شده نسبت به گوشته اولیه در مورد برخی از عناصر فرعی و نادر خاکی نیز غنی‌شدگی از LREE (La, Ce, Pr و Nd)، LILE (Cs, Ba, Rb و K) و عناصر پرتوزا (U و Th) نسبت به تهی‌شدگی HFSE (Y, Zr, Ta, Nb و Ti) و HREE (Lu و Yb) مشاهده می‌گردد که اشاره به تشکیل ماگما در زون فرورانش دارد.

**واژه‌های کلیدی:** پرتوزایی، ژئوشیمی، عناصر نادر خاکی، معادن سنگان، معدن باغک.

## مقدمه

اکتشاف عناصر نادر خاکی در دنیا نسبت به فلزاتی چون: طلا، قلع، آهن و فلزات پایه (مس، سرب، روی و نیکل) بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اما در سال‌های اخیر با افزایش تصاعدی قیمت این فلزات، افزایش تقاضا برای عناصر نادر خاکی، پیشرفت تکنولوژی و تولید انحصاری توسط چین، محرک لازم را برای توسعه هرگونه منابع جدید عناصر نادر خاکی فراهم آورده است و اکتشاف این عناصر نیز امروزه مورد توجه خاص قرار گرفته است. در سال‌های اخیر بخش وسیعی از انواع سنگ‌های آلکالن‌ها، رس‌ها، فسفریت‌ها در محیط‌های زمین‌شناسی متفاوت برای اکتشاف عناصر کمیاب خاکی مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین محیط‌های مستعد زمین‌شناسی برای ذخایر پلی‌متال پرعیار با تناژ بالای عیار عناصر نادر خاکی، ذخایر سوپرژن و نیمرخ‌های هوازده قسمت فوقانی کربناتیت‌ها و کمپلکس‌های آذرین است (قنادپور، ۱۳۹۳). کانی‌های معدنی حاوی عناصر نادر خاکی تقریباً در تمام تیپ‌های سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی تشکیل می‌شوند. معتبرترین طبقه‌بندی‌های ارائه شده در سطح جهان برای تیپ‌های کانساری عناصر نادر خاکی به وسیله والترز و همکاران (۲۰۱۰) ارائه گردیده است. در تقسیم‌بندی دیگری در استرالیا (هواستون و همکاران، ۲۰۱۱)، انواع تیپ‌های عناصر نادر خاکی با توجه خاص به منابع زمین‌شناسی و ذخایر معدنی استرالیا، به چهار رده کلی تقسیم شده‌اند، که در اینجا فقط به ذکر نام کانسارهای دربرگیرنده آنها اکتفا می‌گردد:

الف) مرتبط با سنگپوش، ب) مرتبط با حوضه‌های رسوبی، پ) مرتبط با دگرگونی و ت) مرتبط با ماگماتیسم. اما تقسیم‌بندی جهانی واحدی برای REE از نظر کانی‌زایی توسط اوریس و گراوچ

(۲۰۰۲) مطرح شده است که یک تقسیم‌بندی تقریباً جامع می‌باشد. براساس این تقسیم‌بندی‌ها، ذخایر اسکارن به عنوان یکی از ذخایر اولیه در نظر گرفته شده است. ذخایر اسکارن، ذخایر اپی‌ژنتیک و متاسوماتیکی هستند که در سنگ‌های غنی از کربنات در هاله‌های کنتاکت توده‌های نفوذی تشکیل می‌شوند. از ذخایر اسکارن همراه با کربناتیت‌هایی که اصولاً منبع اصلی عناصر نادر خاکی دنیا می‌باشند، ۲۰۰۰۰۰ تن اکسید عناصر نادر خاکی (به‌خصوص عناصر نادر خاکی سبک) در اسکارن U-REE-Th ماری کاتلین استرالیا تاکنون برداشت شده است. این ذخیره حاوی ۹/۵ میلیون تن کانسنگ با عیار ۰/۱۳ درصد  $U_3O_8$  می‌باشد. این اسکارن در سنگ‌های کالک سیلیکات گارنت‌دار نزدیک به توده نفوذی آلکالی اورانینیت است و عناصر نادر خاکی در اورانینیت، آپاتیت و آلونیت قرار دارند. در ایران مطالعات گوناگونی در مورد عناصر نادر خاکی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. مهدیلو و علی‌نیا در سال ۱۳۹۱ مقدار عناصر نادر خاکی را در کانسار متالوژنیک چغارت، در کانسنگ آهن و باطله‌های کارخانه فرآوری اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصله از این مطالعه نشان داد که پس از مگنتیت و هماتیت، آپاتیت و موناژیت از دیگر کانی‌های با ارزش هستند. هم‌چنین مشاهده گردید که میزان عناصر نادر شدیداً با مقدار فسفر رابطه مستقیم دارد. حدود ۷۵ درصد عناصر نادر، موجود در نمونه‌ها LREE هستند و از گروه HREE تنها مقدار ایتريوم (Y) بالاست. بخش عمده عناصر نادر خاکی به صورت کانی مستقل موناژیت و یا اداخل‌ها یا اینکلوزن‌هایی در داخل آپاتیت است. کمی از عناصر نادر خاکی نیز در شبکه کانی آپاتیت به

نشان‌دهنده آنومالی منفی Eu، غنی‌شدگی ملایمی از LREE، الگوی مثبت تا نزدیک مسطح از HREE و در نهایت ناهنجاری منفی La، Sr، Ba، Ce، Ti و Eu بوده‌اند. در تحقیق گلمحمدی و همکاران در سال ۱۳۹۲ نیز نشان داده شد که در معادن A، C جنوبی و دردوی، غنی‌شدگی نسبی عناصر LREE نسبت به HREE در الگوی هنجار شده به کندریت و غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به HFSE در الگوی هنجار شده به گوشته اولیه در توده‌های نفوذی وجود دارد (گل‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۲). در اکثر موقعیت‌های پی‌جویی اورانیوم انجام شده در سازمان انرژی اتمی ایران نیز، به‌ویژه پهنه ایران مرکزی از جمله معادن ساغند و نارینگان، همراهی و غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی از عوارض معمول شناخته شده است. همراهی این عناصر با اورانیوم گاه به میزان بسیار بالاتر از حد اقتصادی سبب شده است که مدل‌سازی ژنتیکی تشکیل کانسار اورانیوم-عناصر نادر خاکی، تحلیل‌های ژئوشیمی اکتشافی و مطالعات فرآوری این عناصر در فاز نیمه صنعتی، همراه اورانیوم در تمام مراحل به‌صورت موازی در دستور کار قرار گیرد (قنادپور، ۱۳۹۳). هر چند که در سال‌های اخیر به‌واسطه هم‌آیندی عناصر نادر خاکی با اورانیوم در پهنه ایران مرکزی مطالعاتی جانبی بر روی پتانسیل معدنی و استحصال این عناصر در کنار اورانیوم انجام گرفته است. اما متأسفانه به غیر از مطالعه و نمونه‌برداری هدفمند به منظور بررسی پتانسیل عناصر نادر خاکی در چغارت توسط هزارخانی و همکاران در سال ۱۳۹۳، تاکنون برنامه جامعی با نگاه شناخت تخصصی منابع عناصر نادر خاکی در ایران به صورت جدی و با دید معدنی و اقتصادی صورت نگرفته است.

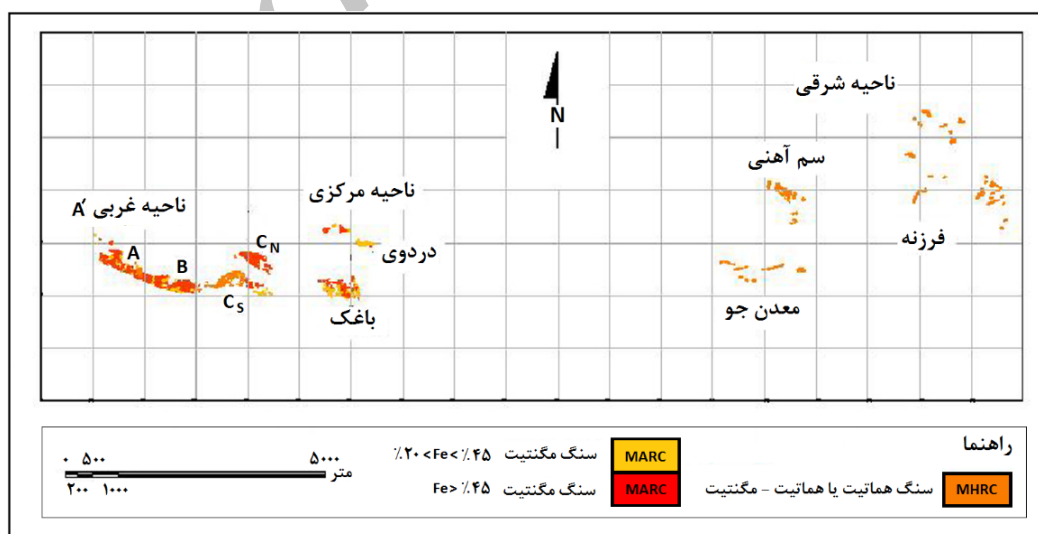
جای کلسیم جایگزین شده است (مهدیلو و علی‌نیا، ۱۳۹۱). از دیگر مطالعات انجام شده در ایران می‌توان به مطالعه ثابت و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد که در آن بررسی‌های ژئوشیمیایی و میکروسکوپی عناصر نادر خاکی در تعدادی نمونه از آپاتیت، مگنتیت، سنگ میزبان، خوراک کارخانه کنسانتره و باطله معدن آهن چادرمو انجام گرفته است. بنیادی و همکاران در سال ۲۰۱۱، کانسار سه‌چاهون را به لحاظ زمین‌شناسی و ژنز کانسار مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به کمک آنالیز EPMA و LA-ICPMS بر روی چند نمونه، مقادیر عناصر نادر خاکی در آپاتیت و مونازیت اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عناصر نادر خاکی عمدتاً در آپاتیت و مقادیر کمی در مونازیت وجود دارد. آن‌ها، کانسار سه‌چاهون را از نوع اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) برشمرده‌اند؛ در حالی که محسنی و آفتابی (۲۰۱۲) تأکید دارند که این کانسار از نوع آهن نواری<sup>۱</sup> (BIF) راپیتان<sup>۲</sup> (همراه با رسوبات یخچالی) است. اما از جمله مطالعات صورت گرفته در مورد عناصر نادر خاکی در معدن سنگ آهن سنگان می‌توان به مطالعه بومری در سال ۱۳۸۴ اشاره کرد که در آن مقادیر عناصر خاکی نادر در گارنت‌های موجود در کانسار آهن سنگان که به وسیله LA-ICP-MS در دانشگاه آکیتای ژاپن تعیین شده بود، گزارش شده است (بومری، ۱۳۸۴). در مطالعات دیگری توسط مظهری و همکاران در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ و در آنومالی‌های شرقی فرزانه و سنجدک ۱ مشاهده شد که نسبت LREE به HREE در محدوده فرزانه از ۵۸/۲ تا ۷۸/۱۳ در تغییر است. هم‌چنین غنی‌شدگی ملایمی از LREE و آنومالی مثبتی از Eu در داده‌های ژئوشیمی محدوده فرزانه مشاهده گردید. در محدوده سنجدک ۱ نیز مقادیر REE

۱۳۸۶؛ گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). محدوده در بر دارنده، کانساری به شکل مستطیل به طول تقریبی ۲۲ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر می‌باشد 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 می‌باشد. گسل‌های اصلی در قسمت غربی و مرکزی معدن سنگان نیز در شکل ۲ قابل مشاهده است (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۵). محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، معدن باغک می‌باشد که در قسمت مرکزی معدن سنگان قرار گرفته است. معدن باغک در مرز شرقی آنومالی C و در ۲۵۰ متری جنوب کانسار دردوی قرار دارد. طول جغرافیایی این آنومالی مابین  $23^{\circ} 27' 60''$  و  $28^{\circ} 37' 44''$  و عرض جغرافیایی آن مابین  $34^{\circ} 28' 34''$  و  $34^{\circ} 29' 02''$  است و وسعتی حدود ۲۸۵ هکتار دارد. تعداد گمانه‌های حفر شده از ابتدای اکتشاف در این معدن ۲۳۹ حلقه با متر از کلی ۶۲۹۹۷ متر می‌باشد. گمانه‌های مذکور به روش مغزه‌گیری حفاری شده و در نهایت ۶۶۴۱ نمونه آنالیز شده است.

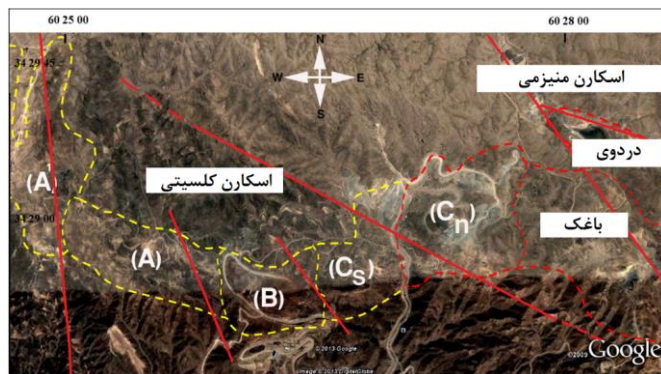
لذا در تحقیق حاضر با توجه به توضیحات مطرح شده در بالا مبنی بر اهمیت عناصر نادر خاکی و با توجه به وجود رابطه بین این عناصر و عناصر پرتوزا، به مطالعه بررسی این عناصر در کانی‌سازی آهن-اسکارن در آنومالی باغک در مجموعه معادن سنگ آهن سنگان پرداخته می‌شود. در واقع در مطالعه پیش‌رو، برای اولین بار به منظور دسترسی به یک نمونه‌برداری بهینه و کم هزینه و در نهایت کشف عناصر نادر خاکی، از خاصیت پرتوزایی بهره گرفته می‌شود و نمونه‌برداری براساس خاصیت پرتوزایی نمونه‌ها و به کمک روش اسپکترومتری انجام خواهد شد. در نهایت نیز توزیع عناصر نادر خاکی مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

#### محدوده مورد مطالعه

مجموعه معادن سنگ آهن سنگان در فاصله حدود ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب غربی تایباد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی سنگان در استان خراسان رضوی و نزدیک مرز افغانستان قرار دارد (کریم‌پور و ملکزاده شفارودی،



شکل ۱: موقعیت آنومالی‌های غربی و مرکزی معدن سنگان.

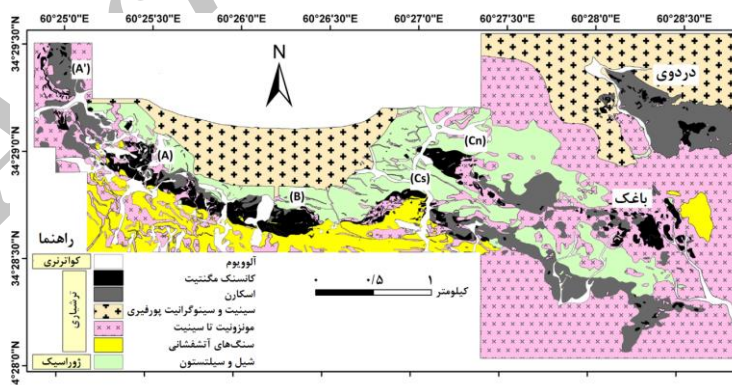


شکل ۲: نمایش گسل‌های اصلی در قسمت غربی و مرکزی معدن سنگان (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۵).

این سنگ‌ها شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت-بازالت، لاتیت، تراکی آندزیت، توف، لاپیلی توف و آگلومراست. توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت فلدسپار قلیایی در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (کریم‌پور و ملکزاده شفارودی، ۱۳۸۶؛ گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). نقشه زمین‌شناسی و توده‌های آهن در معدن سنگان از غرب به شرق شامل A، A'، B، C شمالی، C جنوبی، باغک و دردوی در شکل ۳ نشان داده شده است.

### زمین‌شناسی معدن سنگان

معدن سنگ آهن سنگان خواف بخشی از کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن است. چنانچه ادامه کمربند ماگمایی خواف-درونه را تا افغانستان از یک سو و بیارجمند را 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 کوپر) واقع است. این کمربند به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حد واسط و گاه مافیک با سن ترشیری تشکیل شده است.



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی ساده شده معدن سنگان همراه با موقعیت توده‌های مگنتیت در آنومالی‌های غربی و مرکزی (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۵).

آهک بلورین است (مربوط به سازند شمشک و دوره ژوراسیک). رخنمون‌های زیادی از آن‌ها در

قدیمی‌ترین سازندهای موجود در منطقه معدن شامل چرت، شیل‌های سیلیسی، سیلتستون و

### مواد و روش‌ها

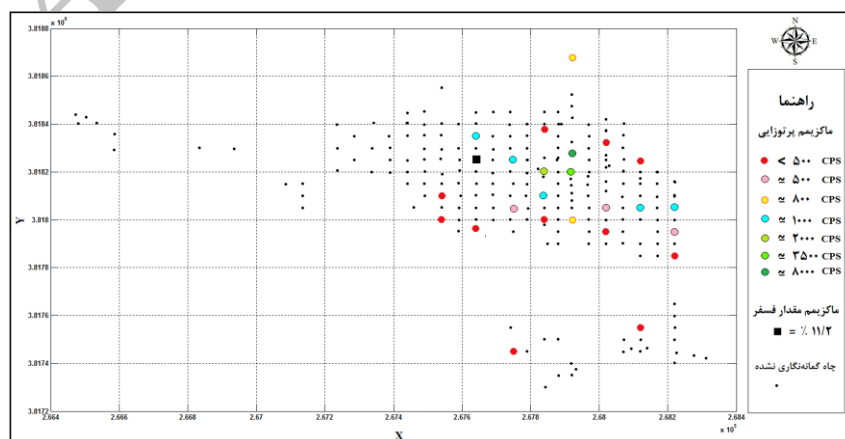
عملیات نمونه‌برداری در مطالعه حاضر با دیدگاه ارتباط عناصر نادر خاکی با عناصر پرتوزا از مغزه‌های حفاری صورت پذیرفته است. به این صورت که مبنای برداشت نمونه‌ها، فضاهای مستعد پرتوزایی و مغزه‌های حاوی مقدار قابل توجهی از فسفر (براساس نتایج آنالیز ژئوشیمیایی مغزه‌های حفاری) قرار گرفته است. به این ترتیب عملیات نمونه‌برداری به دو قسمت تقسیم‌بندی می‌شود.

قسمت اول: استفاده از نمودار گمانه‌نگاری موجود از برخی گمانه‌ها.

لازم به ذکر است که از ۲۳۹ حلقه گمانه حفاری شده در معدن باغک، تنها ۲۴ گمانه مورد گمانه‌نگاری واقع شده است. به همین دلیل عملیات رادیومتری مستقیم گمانه‌ها به‌منظور بررسی هر چه دقیق‌تر ارتباط بین خاصیت پرتوزایی و عناصر نادر خاکی ضروری است.

قسمت دوم: عملیات اسپکترومتری مستقیم مغزه‌های حفاری شده و انتخاب نمونه‌های پرتوزا. در ابتدا به کمک نمودارهای گمانه‌نگاری هر گمانه، مقدار ماکزیمم CPS گمانه‌های موجود تعیین و مقادیر بالای آن به‌منظور برداشت نمونه مشخص گردیدند (شکل ۴).

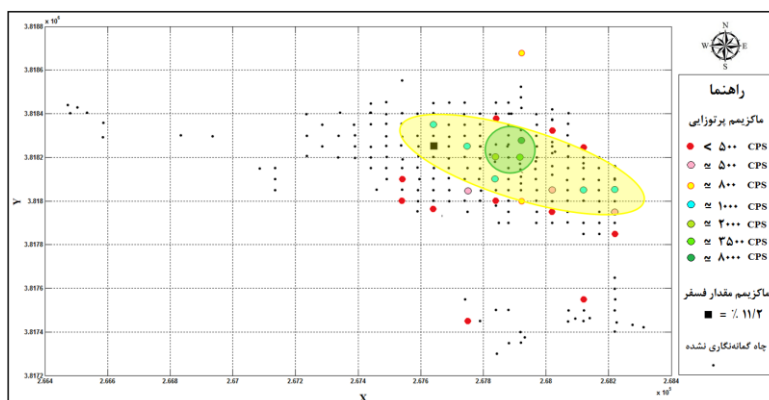
بخش شمالی توده‌های معدنی با روند شرقی-غربی مشاهده می‌شود. مجموعه عظیمی از سنگ‌های آتشفشانی در منطقه دیده می‌شوند که بیشتر آنها مربوط به فعالیت آتشفشانی در محدوده زمانی کرتاسه تا اوایل ائوسن هستند. سنگ‌های آتشفشانی شامل داسیت، ریوداسیت، تراکیت، آذرآوری‌های آندزیتی و سنگ‌های آتشفشانی آواری است. سنگ‌های کربناتی بیشتر به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند و به طرف شرق به‌صورت آهک بلورین یافت می‌شوند (ملکزاده شفارودی و همکاران، ۱۳۹۲). در قسمت شمالی معدن، گرانیته سرنوسر با سن احتمالی ائوسن بالایی-الیگوسن پایینی نفوذ کرده است. بومری (۱۳۸۹) گرانیته سرنوسر را به‌عنوان منشأ اسکارن معرفی کرده است؛ اما کریم‌پور و ملکزاده شفارودی (کریم‌پور و ملکزاده شفارودی، ۱۳۸۶) 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 محلول ماگمایی آهن‌دار غنی از پتاسیم دارد که با نفوذ در سنگ‌های کربناته به طریق جاننشینی متاسوماتیسم، اسکارن مگنتیت غنی از کانی‌های پتاسیم‌دار را پدید آورده است.



شکل ۴: نقشه نمایش ماکزیمم مقدار پرتوزایی گمانه‌ها بر روی دهانه آنها.

۱۰۰۰، در اولویت اول اسپکترومتری دستی قرار گرفته و مابقی گمانه‌ها، در اولویت دوم بررسی قرار گرفتند. با توجه به موقعیت قرارگیری گمانه‌های بالای ۱۰۰۰ CPS، مناطق چگال از نظر پرتوایی بر روی نقشه شکل ۴ به نمایش درآورده شده است (شکل ۵).

پس از تعیین مقدار ماکزیمم پرتوایی هر چاه، گمانه‌هایی که قرار است مورد بررسی بیشتر قرار گیرند به همراه مترژهای مربوط به بیشترین پرتوایی از آنها، مشخص شدند. سپس به منظور صحت‌سنجی نتایج نمودار گمانه‌نگاری، به‌دست آوردن اطلاعات اولیه از منطقه و شروع عملیات نمونه‌برداری، گمانه‌ها با پرتوایی بیش از CPS



شکل ۵: محدوده‌های چگال از نظر پرتوایی (محدوده سبز رنگ: اولویت اول بررسی و محدوده زرد رنگ: اولویت دوم بررسی).

قرار گرفتند. پس از بررسی اولیه مغزه‌های حفاری در گمانه‌های از قبل تعیین شده، اطلاعات اولیه از قبیل مقدار زمینه و همچنین مقدار پرتوایی مطلوب منطقه مورد مطالعه، تعیین گردید که مقادیر مذکور در جدول ۱ قابل مشاهده هستند.

سپس در مرحله بعد، با توجه به محدوده‌های مشخص شده در شکل ۵ و براساس مقادیر پرتوایی مشخص شده در گمانه‌ها (براساس نتایج گمانه‌نگاری)، مغزه‌های مربوط به مترژهای مشخص شده و بعضاً کل مغزه‌های مربوط به یک گمانه به کمک دستگاه اسپکترومتر، مورد بررسی

جدول ۱: اطلاعات اولیه در مورد محدوده مورد مطالعه.

| مقدار پرتوایی زمینه (CPS) | مقدار پرتوایی در انبار مغزه (CPS) | حد آستانه پرتوایی مطلوب (CPS) |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| ۲۵۰-۲۰۰                   | ۳۰۰-۲۵۰                           | ۸۰۰                           |

نقطه با پرتوایی نسبی بالاتر، نمونه برداشت شد. در نهایت نیز به منظور بررسی هر چه بهتر وجود یا عدم وجود رابطه بین عناصر پرتوزا و نادر خاکی، از مناطق دارای کمترین پرتوایی نیز نمونه برداشت شد. شایان ذکر است که نمونه‌برداری به صورت نقطه‌ای و برداشت نمونه از نقطه پرتوزا

پس از مشخص شدن اطلاعات اولیه در محدوده مورد مطالعه، به رادیومتری منظم مغزه‌ها و برداشت نمونه از آنها پرداخته شد. در ابتدا گمانه‌های گمانه‌نگاری شده با پرتوایی بیشتر از CPS ۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. سپس به اسپکترومتری گمانه‌های دیگر پرداخته و از هر

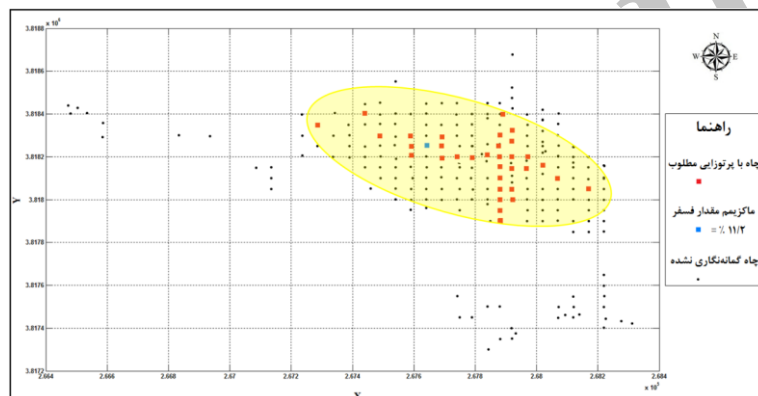
گمانه‌هایی که حاوی پرتوزایی مناسب بوده یا مقدار قابل توجهی فسفر در آنالیز آنها وجود دارد، تعیین و در نقشه موقعیت قرارگیری دهانه گمانه‌ها نشان داده شده‌اند (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، محدوده مشخص شده برای نمونه‌های پرتوزا (گمانه‌های پرتوزا)، مشابه محدوده‌ای است که قبل از عملیات نمونه‌برداری با استفاده از نمودارهای گمانه‌نگاری مربوط به ۲۴ گمانه گمانه‌نگاری شده، به صورت تقریبی تعیین شده بود (شکل ۵).

نموده و جمعاً تعداد ۱۵۱ نمونه به طول ۱۰ سانتی‌متر تا ۳ متر از نقاط پرتوزای مغزه‌های حفاری برداشت شده است.

## بحث و نتایج

### بررسی‌های مقدماتی

در این قسمت داده‌های حاصل از عملیات اسپکترومتری (رادئومتری) مورد بررسی اولیه قرار گرفته و سپس در قسمت بعد، به آماده‌سازی و مطالعه دقیق نمونه‌ها پرداخته می‌شود. در ابتدا



شکل ۶: نمایش گمانه‌هایی که پرتوزایی مطلوبی داشته‌اند (با توجه به عملیات اسپکترومتری).

پرتوزایی در میان سنگ‌های مربوط به هر نمونه (پلاستیک مربوط به هر نمونه حاوی تعدادی سنگ به دلیل برداشت نوع نمونه‌برداری به صورت غیر نقطه‌ای است) برای تهیه مقاطع نازک یا صیقلی انتخاب شدند. قبل از تهیه مقاطع از نمونه‌های انتخابی، نمونه‌ها مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفته که می‌توان نتایج این مطالعات را در جدول ۲ مشاهده کرد.

نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی

از نمونه‌های انتخاب شده در قسمت قبل، تعداد ۲۴ مقطع صیقلی و ۲۷ مقطع نازک تهیه گردید که نوع مقاطع انتخابی برای هر نمونه در جدول ۲ قابل مشاهده است. براساس مطالعات جامعی که

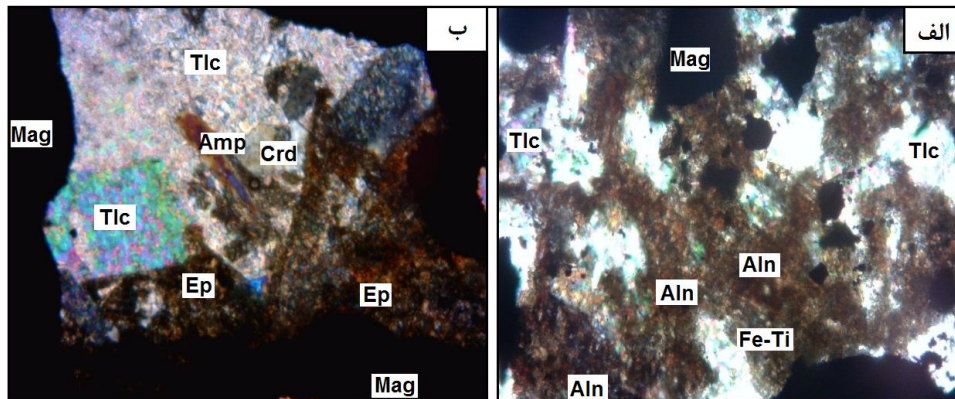
سپس به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر ارتباط بین عناصر نادر خاکی و عناصر پرتوزا، نمونه‌ها براساس مقدار پرتوزایی بر حسب CPS (اندازه‌گیری شده براساس دستگاه اسپکترومتری) از بزرگترین مقدار به کوچکترین مقدار، مرتب شده و ۴۷ نمونه اول (بیشترین پرتوزایی) به همراه ۳ نمونه از گمانه ۲۵ که حاوی مقدار بالایی از فسفر هست (با توجه به نتایج آنالیز آرسنیو معدن باغک)، جهت انجام مطالعات میکروسکوپی به عنوان نمونه‌های انتخابی، تعیین شدند. سپس مقدار پرتوزایی نمونه‌ها، اساس انتخاب آنها جهت تهیه مقاطع و مطالعات میکروسکوپی (از بین ۵۰ نمونه انتخابی)، قرار گرفت. به همین منظور با استفاده از دستگاه سنتیلومتر، سنگی‌های دربردارنده بیشترین مقدار



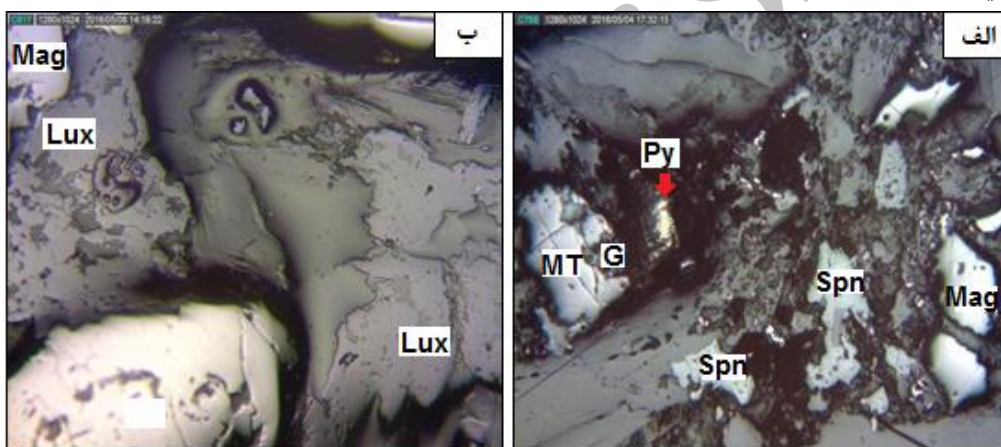
بر روی مقاطع نازک و صیقلی صورت گرفت، شواهدی مبنی بر وجود کانی‌های مربوط به عناصر نادر خاکی نظیر مونازیت، باستانزیت، آپاتیت یا زنونتیم مشاهده نگردید. اما براساس مطالعات میکروسکوپی نوری، وجود مقداری قابل توجهی از کانی‌های اسفن و آلانیت به صورت شبکه‌ای از کانی‌های کوچک تا درشت، تقریباً در اکثر مقاطع مورد بررسی، تأیید گردید (شکل ۷ و ۸).

جدول ۲: کانی‌شناسی و مقدار پرتوزایی نمونه‌های انتخاب شده جهت مقطع گیری.

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



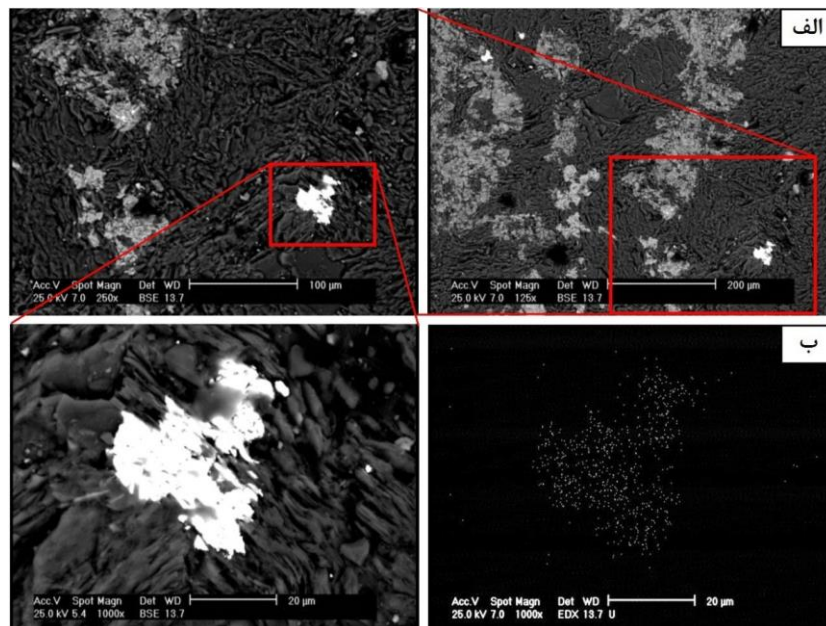
شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی نوری مقطع نازک 94-EXP-SN-11-05. الف: همراهی کانی‌های کوچک آلانیت با اکسید آهن-تیتانیوم بی‌شکل و همراهی این مجموعه با تالک در کنار مگنتیت‌ها. ب: کانی‌های نسبتاً درشت تالک در کنار تالک ریزدانه (حاصل از سیلیکاته شدن کربنات) و حضور کانی‌های بی‌شکل اپیدوت که ظاهراً از سیلیکاته شدن اکسید آهن-تیتانیوم در حضور کربنات در کنار مگنتیت شکل گرفته‌اند. آمفیبول از نوع هاستینگزیت نیز قابل مشاهده است. (Amp = آمفیبول، Crd = کوردیریت، Mag = مگنتیت، Tlc = تالک، Ep = اپیدوت، Fe-Ti = اکسید آهن-تیتانیوم، Aln = آلانیت)



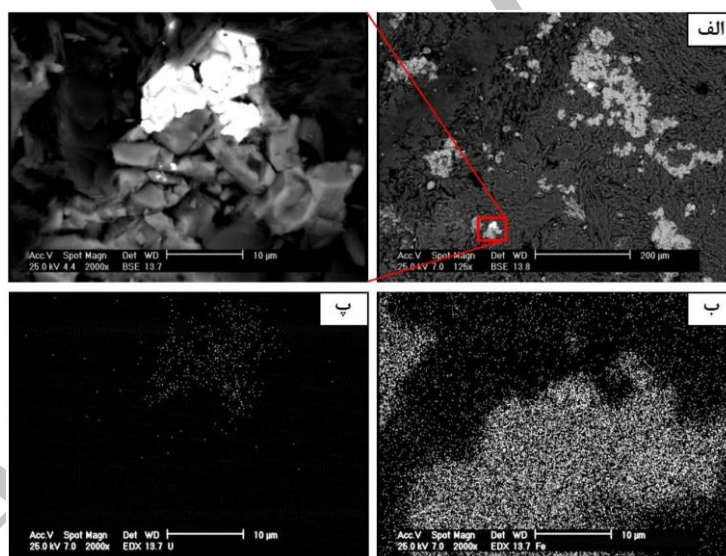
شکل ۸: تصاویر میکروسکوپی نوری مقاطع صیقلی. الف: کانی‌های بی‌شکل و کوچک مگنتیت و پیریت با بافت خوردگی شدید در کنار مگنتیت تیتانیوم‌دار (به صورت لکه‌ای گوتیتی شده) و حضور اسفن بی‌شکل در همراهی با گانگ و مگنتیت. (مقطع 94-EXP-SN-15-07). ب: کانی‌های منفرد مگنتیت در کنار تجمعاتی از لوکوکسن که می‌تواند نشانگر وجود آلانیت باشد (مقطع 94-EXP-SN-33-15). (G = گانگ، Mag = مگنتیت، MT = مگنتیت تیتانیوم‌دار، Spn = اسفن، Lux = لوکوکسن، Py = پیریت)

میکروسکوپ (شکل ۹ ب)، مشخص گردید که نقطه روشن در تصاویر تهیه شده، انکلوژین عنصر اورانیوم می‌باشد. همان‌طور که در تصویر ۹ دیده می‌شود، اورانیوم به صورت مجزا بوده و به صورت محلول جامد در کانی‌های آهن‌دار یا کانی‌های حاوی عناصر نادر خاکی قرار نگرفته است.

سپس برخی مقاطع که در آنها کانی آلانیت و اسفن مشاهده شده بود، مجدداً به کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که برخی از تصاویر حاصله در اشکال ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده هستند. در تصویر ۹، پس از انجام اسکن عنصر اورانیوم توسط



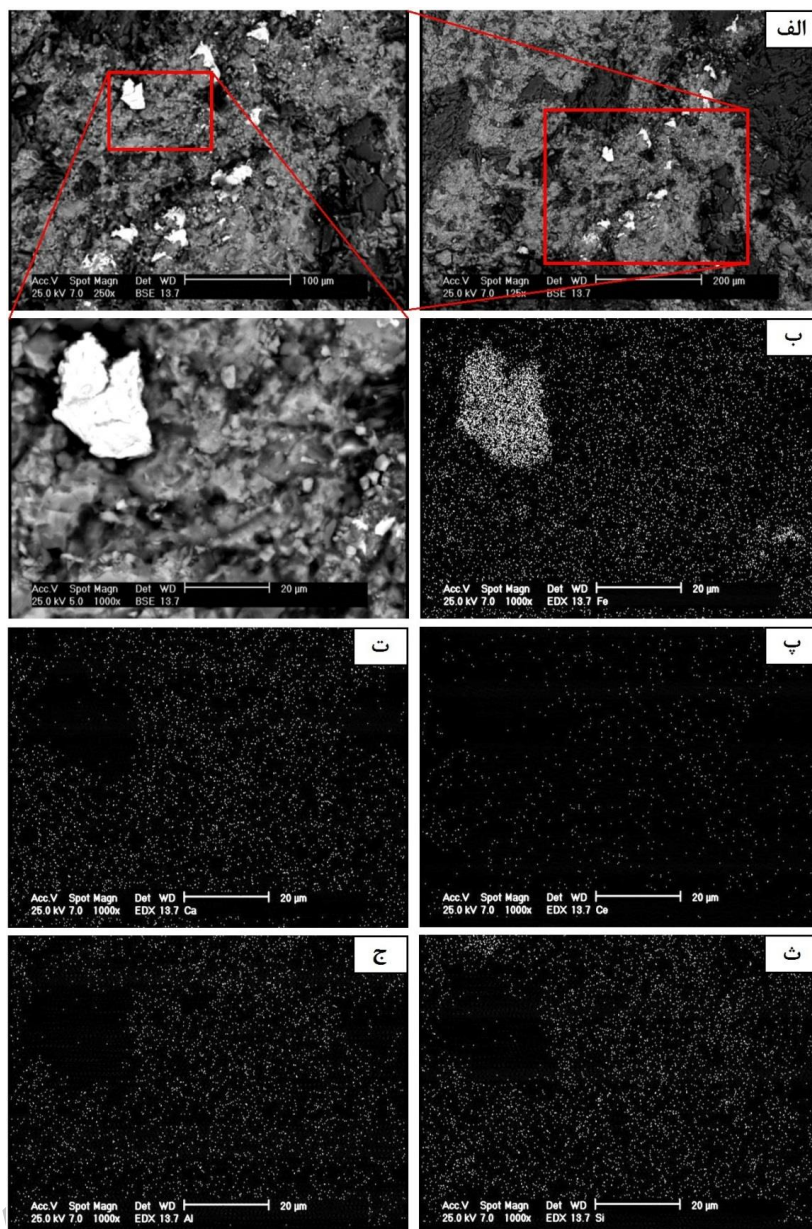
شکل ۹: الف: نمایش آنکلوژیون اورانیوم در مقطع نازک 94-EXP-SN-01-01 به همراه دو بزرگنمایی از آن. ب: نقشه عنصری اورانیوم در مقیاس ۲۰ میکرومتر.



شکل ۱۰: الف: نمایش کانی‌های حاوی اورانیوم و آهن در مقطع نازک 94-EXP-SN-01-01 به همراه یک بزرگنمایی از آن. ب: نقشه عنصری اورانیوم. ب: نقشه عنصری آهن.

نسبت به عناصر دیگری چون آهن و غیره در تصاویر، عنصر اورانیوم نسبت به دیگر عناصر بسیار روشن‌تر است. این قضیه در مورد آهن و دیگر عناصر و کانی‌های موجود نیز صادق است. در شکل ۱۱ می‌توان نمونه دیگری از آن در مورد آهن و کانی آلانیت را مشاهده کرد.

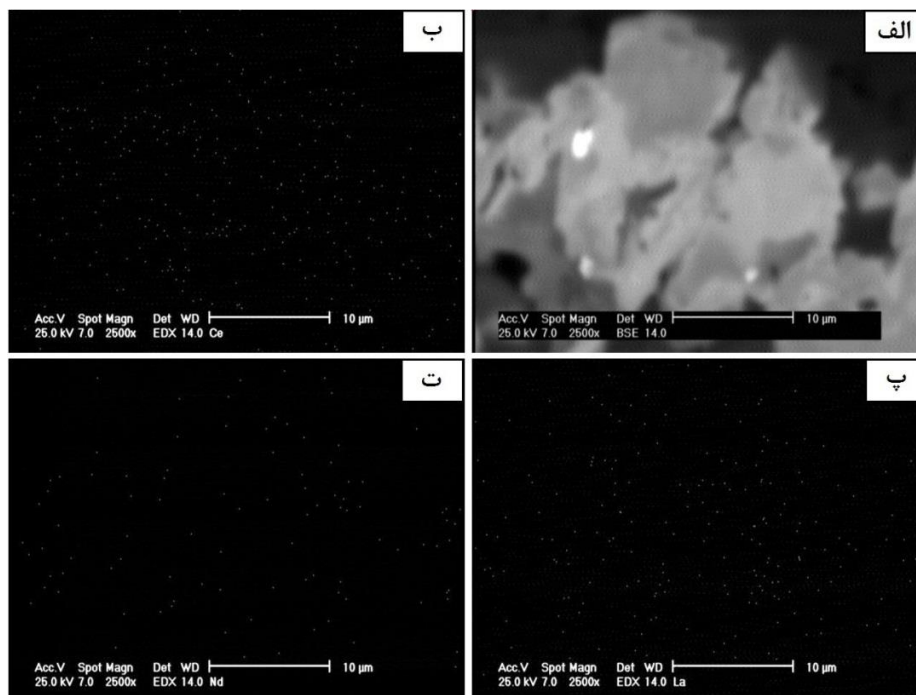
در شکل فوق پس از اسکن انجام شده برای دو عنصر اورانیوم و آهن در مقیاس ۱۰ میکرومتر، مشاهده می‌شود که اورانیوم دقیقاً در کنار آهن قرار گرفته است. همان‌طور که در تصاویر نمایش داده شده در دو شکل ۹ و شکل ۱۰ دیده می‌شود، به دلیل وزن مخصوص بیشتر عنصر اورانیوم



شکل ۱۱: الف: نمایش کانی آلانیت و کانی آهن‌دار در مقطع نازک 94-EXP-SN-01-01 به همراه دو بزرگنمایی از آن. ب: نقشه عنصری آهن. پ: نقشه عنصری سریم. ت: نقشه عنصری کلسیم. ث: نقشه عنصری سیلیسیوم. ج: نقشه عنصری آلومینیوم.

کانی اپیدوت است. قابل ذکر است که سریم در این بررسی‌ها، در شبکه کانی‌های اپیدوت (آلانیت) می‌باشد. نمونه‌هایی از نتایج وجود لانتانیوم و نئودیمیوم نیز براساس اسکن صورت گرفته برای آنها، در شکل ۱۲ آورده شده است.

با توجه به اسکن‌های صورت گرفته در تصاویر فوق، مشاهده می‌شود که کانی روشن‌تر مربوط به کانی‌های عنصر آهن بوده (مگنتیت) و کانی احاطه کننده آن (کانی تیره رنگ) با توجه به وجود مقدار قابل توجهی از سیلیسیوم، کلسیم و آلومینیوم،



شکل ۱۲: الف: نمایش کانی آلانیت در مقطع صیقلی شماره 94-EXP-SN-34-16. ب: نقشه عنصری سریم. پ: نقشه عنصری لانتانیم. ت: نقشه عنصری نئودیمیم.

-عناصر نادر خاکی در شبکه سایر کانی‌ها به‌خصوص کانی‌های آهن‌دار (مگنتیت) مشاهده نمی‌شوند.

-اورانیوم به‌صورت کانی‌های مستقل از آلانیت یا به عبارتی بیرون از شبکه سیلیکات آلانیت شکل گرفته است. در واقع اورانیوم عموماً به‌صورت انکلزیون در فضاهای خالی آلانیت‌ها و همین‌طور کانی‌های آهن‌دار گیر افتاده است.

#### آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌ها

بعد از تهیه مقاطع و مطالعات آنها، کل نمونه‌ها (تعداد ۱۵۱ نمونه) به‌منظور آنالیز ICP-MS مجدداً بسته‌بندی و به آزمایشگاه زرآما ارسال شدند. آزمایش نمونه‌ها با دستگاه ICP-MS با حد حساسیت‌های  $3(DL)$  متفاوت برای عناصر مختلف انجام شده و در طی این آزمایش تعداد ۵۶ عنصر برای هر نمونه گزارش شده است. عناصر مذکور به همراه حد حساسیت اندازه‌گیریشان در جدول ۳ قابل مشاهده هستند.

همان‌طور که در شکل ۱۲ الف مشاهده می‌شود، کانی خاکستری تیره و روشن (که تقریباً کل قسمت الف از شکل را در بر گرفته است)، کانی آلانیت است که دلیل تیره و روشن آن، به دلیل افزایش مقدار سریم به‌صورت محلول جامد در آلانیت‌هاست. در حقیقت براساس مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی صورت گرفته بر روی مقاطع صیقلی و نازک، مشاهده می‌شود که:

-عناصر نادر خاکی به‌خصوص عنصر سریم در نمونه‌های مورد بررسی وجود دارند (لانتانیم و نئودیمیم نیز در یک مقطع مشاهده شده‌اند).

-عناصر نادر خاکی به‌صورت محلول جامد، در کانی‌های آلانیت تجمع یافته‌اند.

-کانی آلانیت با تجمعات زیاد در نمونه‌های مطالعه شده به چشم می‌خورد و مقدار بالای عناصر نادر خاکی در آنالیزهای عنصری نیز مربوط به همین کانی است.

جدول ۳: عناصر آنالیز شده در آزمایش ICP-MS و حد حساسیت دستگاه اندازه گیری.

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

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

| عنصر (ppm) | حد ثبت دستگاه | نوع حد حساسیت | تعداد داده‌های سنسورد | درصد داده‌های سنسورد | وضعیت جایگزینی | مقدار جایگزین شده یا حذف |
|------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------|----------------|--------------------------|
| 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         | ۱۰۰۰۰         | 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            | ۰/۰۲۷۵                   |
| 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            | ۰/۰۲۷۵                   |
| 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            | ۰/۰۲۷۵                   |
| Tm         | ۰/۱           | پایین         | ۵                     | ۳/۳۱                 | بله            | ۰/۰۷۵                    |
| Yb         | ۰/۰۵          | پایین         | ۶                     | ۳/۹۷                 | بله            | ۰/۰۲۷۵                   |
| Lu         | ۰/۱           | پایین         | ۱۴                    | ۹/۲۷                 | بله            | ۰/۰۷۵                    |

## آماده‌سازی و پردازش داده‌های ژئوشیمیایی

به‌منظور پردازش‌های آماری در مورد عناصر مورد بررسی در محدوده مطالعاتی باغک (در مورد ۱۵۱ نمونه مذکور)، در ابتدا موارد نادرست (اعم از احتمال وجود کاراکتر اضافی، مقادیر فوق‌العاده بزرگ و هرگونه اشتباه نوشتاری که موجب بروز مشکلاتی در محاسبات می‌شوند) در فایل داده‌ها تصحیح شد. سپس داده‌های سنسورد حذف و با مقادیر مناسب جایگزین شدند (با توجه به حد حساسیت پایین گزارش شده در جدول ۳). یعنی با توجه به تعداد کم مقادیر سنسورد (کمتر از ۱۵ درصد از تعداد کل داده‌ها)، مقدار ۰/۷۵ حد حساسیت دستگاه، جایگزین مقادیر سنسورد شده و در غیر این صورت، به دلیل اثرات نامطلوب این عناصر در نتایج حاصل از آنالیزهای آماری، عناصر مذکور حذف شده‌اند. در جدول ۴ گزارش کاملی در مورد حذف و جایگزینی داده‌های سنسورد آورده شده است. همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، دو عنصر اسکاندیم و آهن به دلیل برداشتن بیش از ۱۵ درصد از مقادیر سنسورد، از گردانه محاسبات آماری آینده حذف شدند. لذا در ادامه به مطالعه و بررسی دیگر عناصر پرداخته می‌شود. سپس مقادیر آنومال به‌عنوان مقادیر خارج از رده، مورد بررسی قرار گرفتند. اما به‌منظور از دست ندادن مقادیر آنومال با ارزش (با توجه به حساسیت از دست دادن مقادیر آنومال با ارزش به‌عنوان مقادیر خارج از رده)، از حذف مقادیر خارج از رده اجتناب گردید. زیرا موارد مشخص شده به عنوان مقادیر خارج از رده، مقادیر غیر معقولی نبوده و می‌توان آنها را به عنوان عیار بالا برای عناصر تحت بررسی در نظر گرفت. پس از تصحیح و آماده‌سازی داده‌های ژئوشیمیایی، میانگین وزن‌دار عیار برای ۱۵۱ نمونه مورد بررسی (بدون صرف نظر از نمونه‌های

غیر مینرالیزه که جهت بررسی ارتباط بین REE و خاصیت پرتوزایی، برداشته شدند) و هم‌چنین برای نمونه‌های مینرالیزه، محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به نتایج حاصله، آنومالی باغک به دلیل داشتن مقدار بالایی از عناصر سربیم و لانتانیم و به تبع آنها مقدار بالایی از جمع عناصر نادر خاکی، می‌تواند با بررسی‌های بیشتر به عنوان یکی از معادن مهم عناصر نادر خاکی کشور معرفی شود. پردازش‌های آماری به منظور بررسی دقیق رابطه میان عناصر نادر خاکی و خاصیت پرتوزایی و به تبع آن با عناصر اورانیوم، توریم و پتاسیم در مطالعه قنادپور و همکاران (۱۳۹۷) مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاصله عبارتند از:

-ضرایب همبستگی گزارش شده بین مقادیر عیار عناصر نادر خاکی با مقادیر پرتوزایی، عیار عنصر اورانیوم و عنصر توریم به ترتیب و تقریباً برابر با ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸۵ هستند که مقادیر بسیار قابل قبولی می‌باشند.

-منشأ اصلی پرتوزایی منطقه، عنصر اورانیوم بوده و پرتوزایی بیشتر تحت‌تأثیر عنصر اورانیوم می‌باشد و عنصر پتاسیم سهم بسیار کمتری از پرتوزایی را شامل می‌شود.

-کاهش مقدار ضرایب همبستگی بین عناصر نادر خاکی و مقادیر پرتوزایی (CPS) نسبت به ضرایب همبستگی بین عناصر نادر خاکی و دو عنصر اورانیوم و توریم نیز به دلیل تأثیر عنصر پتاسیم در مقدار پرتوزایی محاسبه شده توسط دستگاه اسپکترومتر است.

لذا در مطالعات آماری صورت گرفته در مورد نتایج آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های باغک نیز مشاهده گردید که بین مجموعه عناصر نادر خاکی و خاصیت پرتوزایی به‌خصوص در مورد دو عنصر اورانیوم و توریم، ارتباط وجود دارد. مقدار عنصر توریم در نتایج آنالیز (جدول ۵) در حد زمینه

مرحله اول، ۱۵۱ نمونه مورد بررسی را به ترتیب شماره نمونه‌ها به پنج گروه ۲۵ تایی و یک گروه ۲۶ تایی تقسیم‌بندی کرده و میانگین هر دسته را به عنوان یک نمونه در نظر می‌گیریم. در حقیقت با این کار با شش نمونه مواجه هستیم که معرف ۱۵۱ نمونه از نقاط مختلف گمانه‌ها می‌باشند. سپس در مرحله بعد، نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی هنجار شده به کندریت‌ها در مورد شش نمونه مذکور (شکل ۱۳ الف) و یک نمونه که میانگین ۱۵۱ نمونه مورد بررسی می‌باشد (شکل ۱۳ ب)، رسم شده است (شکل ۱۳). مشابه این نمودار برای نمونه‌های مینرالیزه اورانیوم نیز رسم شده است. به این صورت که ۱۲۵ نمونه مینرالیزه به پنج گروه ۲۵ تایی تقسیم‌بندی شده و میانگین هر گروه به عنوان یک نمونه در نظر گرفته شده است. در نهایت نیز الگوی هنجار شده پنج نمونه معرف به همراه یک نمونه که میانگین کل نمونه‌های مینرالیزه می‌باشد نسبت به کندریت‌ها رسم شده است (شکل ۱۴).

گزارش شده است ولی نتایج مطالعه فنادپور و همکاران (۱۳۹۷) نشان می‌دهد که این عنصر با وجود مقدار کم آن در منطقه باغک، در ارتباط بسیار مناسبی با عناصر نادر خاکی است و غنی‌شدگی اندکی که به همراه عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد، بیانگر تشکیل این عنصر با عناصر نادر خاکی از لحاظ متالوژنی و ژئوشیمی است. از نظر ترمودینامیکی نیز، عناصر نادر خاکی رفتاری مشابه به اورانیوم و توریم دارند و در شرایط احیایی عمق زیاد و فوکاسیته پایین اکسیژن به صورت کمپلکس‌های مختلف، به طور عمده  $REECl_3$  یا  $REEF_3$ ، انحلال و تحرک یافته و در شرایط اکسیدی به صورت  $REEO_2$  یا  $REE_2O_3$  در شبکه بلوری کانی‌های انتهایی سری باون<sup>۴</sup> جای می‌گیرند.

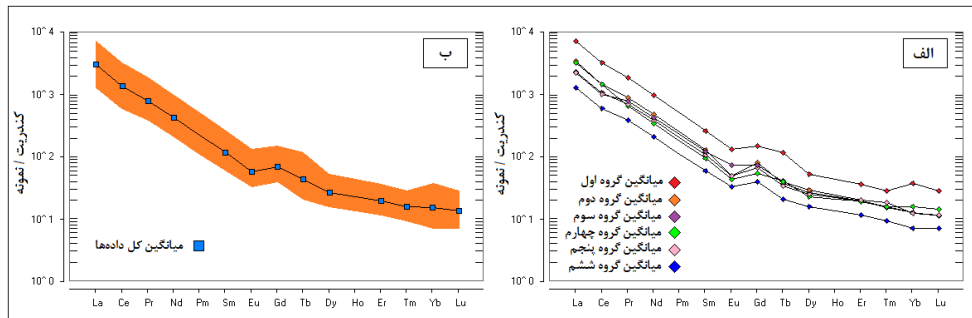
#### تحلیل نمودارهای عنکبوتی

در این قسمت نیز در ابتدا به رسم نمودارهای عنکبوتی و در نهایت به تحلیل آنها پرداخته می‌شود. بدین منظور و جهت جلوگیری از زیاد شدن تعداد خطوط رسم شده در دیاگرام، در

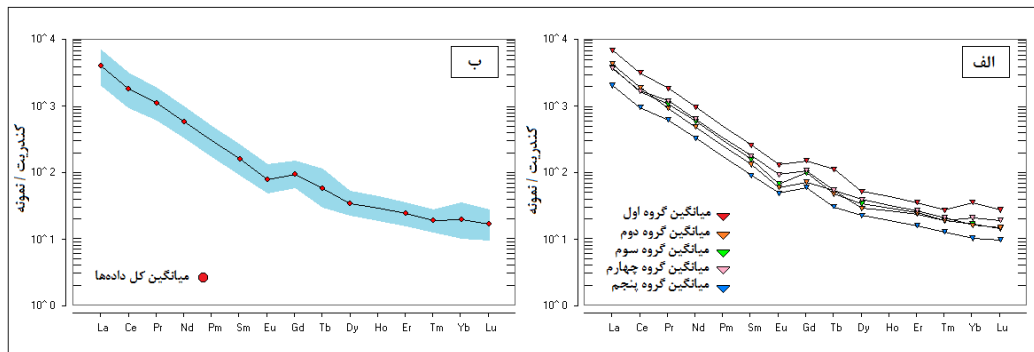
جدول ۵: مشخصات اولیه آماری عناصر مورد بررسی در محدوده باغک.

| عنصر  | میانگین عیار کل نمونه‌ها (ppm) | میانگین عیار نمونه‌های مینرالیزه (ppm) | ماکزیمم عیار (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                                | ۶۳۰۸               |
| 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           |





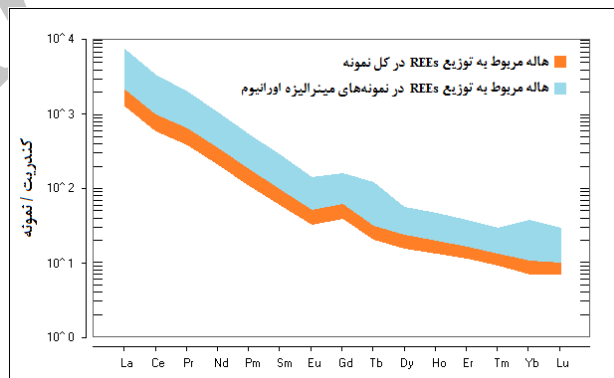
شکل ۱۳: الف: الگوی توزیع REE هنجار شده برای نمونه‌های میانگین معرف شش گروه از کل نمونه‌ها. ب: الگوی توزیع REE هنجار شده برای نمونه میانگین معرف تمام نمونه‌ها در هاله مربوط به قسمت الف. (به منظور هنجارسازی، از مقادیر کندریت مطالعه (بوینتون، ۱۹۸۴) استفاده شده است).



شکل ۱۴: الگوی توزیع REE هنجار شده برای نمونه‌های میانگین معرف پنج گروه از کل نمونه‌های مینرالیزه. ب: الگوی توزیع REE هنجار شده برای نمونه میانگین معرف تمام نمونه‌های مینرالیزه در هاله مربوط به قسمت الف. (به منظور هنجارسازی، از مقادیر کندریت مطالعه (بوینتون، ۱۹۸۴) استفاده شده است).

مینرالیزه اورانیوم به مراتب نسبت به ضخامت هاله الگوی هنجار شده در مورد تمام نمونه‌ها (۱۵۱ نمونه)، کاهش یافته است (شکل ۱۵).

از مقایسه دو شکل ۱۳ و ۱۴ نیز می‌توان به ارتباط بین عناصر نادر خاکی و عنصر اورانیوم پی برد. زیرا ضخامت هاله مربوط به الگوی توزیع عناصر نادر خاکی هنجار شده مربوط به ۱۲۵ نمونه



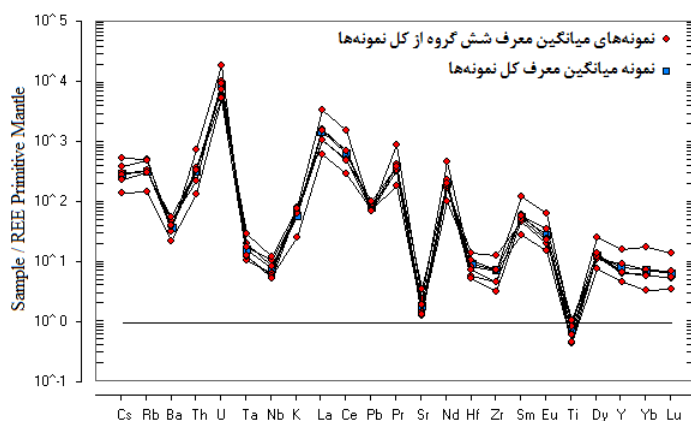
شکل ۱۵: هاله مربوط به توزیع REE هنجار شده برای کل نمونه‌ها و نمونه‌های مینرالیزه اورانیوم (تصویر ترکیبی از هاله‌های مربوط به دو شکل ۱۳ و ۱۴).

یونی قابل مقایسه با Ca هستند نیز به داخل شبکه مگنتیت وجود دارد. آنها همچنین اذعان داشتند از آن جایی که LREE دارای شعاع یونی نزدیکتری به Ca می‌باشند، امکان قرارگرفتن آنها در شبکه مگنتیت و در نتیجه غنی‌شدگی آنها نسبت به HREE بیشتر است (براتی و قلی‌پور، ۱۳۹۲). اما مطالعات میکروسکوپ الکترونی صورت گرفته در معدن باغک، این احتمال را در مورد مگنتیت‌های معدن باغک رد می‌نماید. زیرا نتایج حاصله از مطالعات میکروسکوپ الکترونی (SEM) در محدوده باغک نشان می‌دهد که عناصر نادر خاکی در هیچ یک از نمونه‌ها در شبکه کانی‌های آهن‌دار و مگنتیت قرار نگرفته و عناصر نادر خاکی مشاهده شده در میکروسکوپ (سریم، لاتانیوم و نئودیم) با توجه به نتایج اسکن الکترونی و به خصوص عنصر سریم، صرفاً در شبکه کانی‌های آلانیت هستند. کانی آلانیت از خانواده گروه اپیدوت می‌باشد و فرمول عمومی کانی‌های اپیدوت  $Ca_2(Al,Fe)_3(OH)(SiO_4)_3$  است (رابادجیوا و همکاران، ۲۰۰۹). تحت شرایط خاص عناصر آهن، سریم (یا دیگر عناصر نادر خاکی) وارد ترکیب مذکور شده و کانی آلانیت با ترکیب  $(Ca,Fe^{2+})_2(Al,Ce,Fe^{3+})_2(OH)(SiO_4)_3$  را به وجود می‌آورد (یزدی، ۱۹۸۷؛ ازکیت، ۲۰۰۲؛ گریگوری و همکاران، ۲۰۰۷). در واقع در اپیدوت‌هایی که حاوی سریم هستند یعنی در آلانیت‌ها، مقداری از اتم‌های کمیاب La، Ce و Y جایگزین Ca می‌گردد و برای آنکه تعادل ظرفیت برقرار شود، جانشینی  $Fe^{2+}$  به جای  $Fe^{3+}$ ،  $Mn^{3+}$  یا Al صورت می‌گیرد (فرقانی، ۱۳۶۷). لذا با توجه به توضیحات فوق، می‌توان اذعان داشت که یون‌های REE که از لحاظ شعاع یونی قابل مقایسه با Ca هستند، به داخل شبکه آلانیت وارد شده (به‌صورت محلول جامد) و از آن جایی که

یعنی در حقیقت با کاهش بازه عیار مربوط به عنصر اورانیوم (حذف مقادیر عیار پایین)، مقادیر عیار عناصر نادر خاکی نیز کاهش می‌یابد به‌طوری که این کاهش در الگوی هنجار شده توزیع عناصر نادر خاکی در شکل ۱۵ به وضوح قابل مشاهده است. در واقع این موضوع بدین معنیست که با کاهش مقادیر عیار پایین عناصر نادر خاکی، تمرکز آنها و به تبع میانگین عیار آنها در هاله شکل جدید افزایش یافته است. نکته دیگری که از نمودارهای فوق قابل برداشت است، غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به روند تقریباً نزولی نزدیک به مسطح از عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) است که این موضوع مؤید تشکیل ماگما در زون فرورانش می‌باشد (گلمحمدی و همکاران، ۱۳۹۲، ۲۰۱۵؛ ویلسون، ۲۰۰۷؛ رولینسون، ۱۹۹۳؛ پیرس، ۱۹۸۳؛ گیل، ۱۹۸۱). در حقیقت از آنجایی که عناصر نادر خاکی سنگین طی فرآیند تفریق ماگما تمایل به باقی ماندن در مذاب باقی مانده در ماگما دارند؛ در نمودار هنجار شده با کندریت، تهی‌شدگی نشان می‌دهند. علاوه بر این، وجود حجم بالای سیال غنی از OH و رخ داد دگرسانی‌هایی ناشی از آن نیز می‌تواند موجب افزایش نسبت LREE/HREE در نمودارهای عنکبوتی شده باشد (طالع فاضل و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین ممکن است که ماگمای اولیه ذاتاً از نظر عناصر نادر خاکی سنگین، فقیر بوده باشد. در مطالعه‌ای درباره نمونه‌های مگنتیتی ظفرآباد، براتی و قلی‌پور (۱۳۹۲) ورود LREE در شبکه مگنتیت را دلیل غنی‌شدگی LREE نسبت HREE دانستند. آنها بیان کردند که اگر کاتیون بزرگی مانند Ca بتواند به مقدار زیادی وارد شبکه مگنتیت شود (مگنتیت می‌تواند تا ۶/۶۷ درصد وزنی Ca داشته باشد)، پس امکان ورود یون‌های REE که از لحاظ شعاع

تبلور بخشی پلاژیوکلاز از ماگمای مرتبط به کانی‌زایی باشد (ملک‌زاده سفارودی و همکاران، ۲۰۱۳) البته شدت نسبتاً کم این آنومالی می‌تواند دلیلی بر تفریق و آلیایش پوسته‌ای نیز باشد (سیمونز و همکاران، ۱۳۸۹). نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و برخی از عناصر نادر خاکی هنجار شده نسبت به گوشته اولیه برای شش نمونه میانگین معرف شش گروه گفته شده در بالا و هم-چنین نمونه میانگین معرف همه نمونه‌ها، نیز در شکل ۱۶ آورده شده است.

LREE دارای شعاع یونی نزدیکتری به Ca می‌باشند، امکان قرارگرفتن آنها در شبکه آلانیت بیشتر بوده و در نتیجه غنی‌شدگی آنها نسبت به HREE را باعث شده است. فرضیه فوق را به صورت خیلی قوی می‌توان محتمل دانست زیرا نتایج میکروسکوپ الکترونی نیز دال بر جایگزینی عناصر نادر به خصوص عنصر سریم به جای Ca در شبکه آلانیت‌هاست. در نمودارهای فوق، هم‌چنین تهی‌شدگی عنصر Eu نسبت به سایر عناصر مشاهده می‌شود که این موضوع نیز می‌تواند به دلیل فقر ماگمای اولیه از عنصر Eu یا مرتبط به



شکل ۱۶: نمودار نرمالیز شده برخی عناصر فرعی و نادر خاکی در نمونه‌های مورد بررسی معدن باغک نسبت به گوشته اولیه (به منظور هنجارسازی، از مقادیر مطالعه (مک‌دوناو و سان، ۱۹۹۵) استفاده شده است).

در همه نمونه‌ها نسبت دیده می‌شود (Lu) (تهی‌شدگی عنصر Ti نسبت به گوشته اولیه است). در بعضی مواقع که با چند نمونه مجزا مواجه هستیم، تغییری در روند دیگرام‌های عنکبوتی به واسطه تغییراتی که در ترکیب کلی سنگ وجود دارد پیش می‌آید و مشاهده می‌شود که روند دیگرام مربوط به چند نمونه مختلف کاملاً مشابه نیست. در این مطالعه به دلیل اینکه نمونه‌ها هر یک معرف ۲۵ با ۲۶ نمونه می‌باشند، تغییری در روندها مشاهده نمی‌شود و همان‌طور که در شکل نیز نمایان است، روند مربوط به تمام نمودارها کاملاً مشابه هستند. غنی‌شدگی عناصر

در نمودار نرمالیز شده برخی از عناصر فرعی و نادر خاکی به گوشته اولیه، غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) مانند La, Ce, Pr و Nd و عنصر پرتوزای U به وضوح مشهود است. این موضوع نیز می‌تواند به دلیل شباهت‌هایی باشد که در قسمت قبل و در مطالعه قنادپور و همکاران (۱۳۹۷)، مطرح شده است. هم‌چنین غنی‌شدگی از عناصر با شعاع یونی بزرگ<sup>۵</sup> (LILE) مثل Cs, Ba, Rb و K و عناصر ناسازگاری که رفتاری شبیه به آنها دارند مثل U و Th، نسبت به تهی‌شدگی نسبی عناصر با شدت میدان بالا<sup>۶</sup> (HFSE) مثل Y, Zr, Ta, Nb و Ti و نادر خاکی مانند Yb و

می‌توان کشف عناصر نادر خاکی در این آنومالی را به روش اکتشافی پرتوسنجی ارائه شده در این تحقیق وابسته دانست. در ادامه و براساس نمودارهای عنکبوتی REE هنجار شده نسبت به کندریت‌ها مشاهده گردید که با در نظر گرفتن تنها نمونه‌های مینرالیزه (یعنی کاهش بازه عیار اورانیوم از پایین)، پهنای الگوی عناصر نادر خاکی نیز کاهش یافته است که این موضوع در کنار شواهد دیگر، به وجود رابطه بین این دسته عناصر با عناصر پرتوزا، اشاره دارد. در الگوی مذکور، غنی‌شدگی از LREE نسبت به روند نزولی و نزدیک به مسطحی از HREE دیده شد که دلیل این موضوع، ورود یون‌های LREE به داخل شبکه آلانیت‌ها قلمداد گردید (با توجه به مشاهده LREE در شبکه آلانیت‌ها به کمک مطالعات SEM و تشابه بیشتر شعاع یونی آنها با Ca). آنومالی منفی Eu موجود در الگوی فوق‌الذکر نیز با توجه به شرایط حاکم بر منطقه احتمالاً به تبلور بخشی پلاژیوکلاز از ماگمای مرتبط به کانی‌زایی بر می‌گردد. در الگوی هنجار شده نسبت به گوشته اولیه در مورد برخی از عناصر فرعی و نادر خاکی نیز غنی‌شدگی از LREE (Ce, La, Pr و Nd)، LILE (Cs, Ba, Rb و K) و عناصر پرتوزا (U و Th) نسبت به تهی‌شدگی HFSE (Zr, Y)، Ta، Nb و Ti) و HREE (Lu و Yb) مشاهده گردید که اشاره به تشکیل ماگما در زون فرورانش دارد.

#### سپاسگزاری

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

فوق‌الذکر نسبت به تهی‌شدگی موارد مذکور، نشان‌دهنده ماگمای مرتبط با مناطق فرورانش در قوس‌های آتشفشانی کالک‌آلکان حاشیه فعال قاره‌ای است (گل‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵). احتمال این که عناصر HFSE در فازهایی مانند روتیل یا ایلمینیت وارد شوند بسیار زیاد است که این مطلب به وجود ورقه فرورانده شده اشاره می‌کند. مقادیر Nb و Ta می‌تواند منعکس کننده تهی‌شدگی رخ داده قبلی در سنگ‌های مخزن گوشته باشد. مقادیر پایین Ta، Nb و Ti احتمال دارد نتیجه وجود اکسیدهای Fe-Ti یا کانی‌های Nb-Ti دار در منشأ مذاب باشد (گل‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۵؛ گل‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۲).

#### نتیجه‌گیری

در مطالعه انجام شده، براساس اهمیت و کاربردهای گوناگون عناصر نادر خاکی و به منظور ارائه یک روش بهینه نمونه‌برداری و اکتشافی جهت کشف این عناصر، به بررسی و مطالعه پتانسیل عناصر نادر خاکی و ارتباط آنها با عناصر پرتوزا در آنومالی باغک معدن سنگان پرداخته شد. در مطالعات اولیه مشخص شد که عناصر نادر خاکی نظیر لانتانیم، نئودیمیم و به‌ویژه عنصر سریم به صورت محلول جامد در کانی‌های آلانیت که به وفور در مقاطع مشاهده می‌شود، وارد شده‌اند. نتایج حاصله از مطالعات آماری نیز نشان داد که آنومالی باغک به رغم داشتن مقدار مناسبی از عناصر سریم و لانتانیم و به تبع آنها مقدار بالایی از مجموعه عناصر نادر خاکی، می‌تواند با بررسی‌های بیشتر به‌عنوان یکی از معادن مهم عناصر نادر خاکی کشور معرفی گردد. با توجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آنالیز عنصری،

## پانوش

1-Banded Iron Formation  
2-Rapitan  
3-Detection Limit

4-Bowen  
5-large ion lithophile  
6-high field strength elements

## منابع

- خراسان، فصلنامه علوم زمین، سال ۱۷، شماره ۶۵، ص ۱۰۸-۱۲۵.
- گل محمدی، ع.، کریم پور، م.ح.، ملک زاده سفارودی، آ. و مظاهری، ا.، ۱۳۹۲. پترولوژی و سن شناسی زیرکن به روش U-Pb در توده های نفوذی مناطق A، C جنوبی و درودی، معدن سنگ آهن سنگان خواف، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۲(۵)، ص ۱۵۵-۱۷۴.
- گل محمدی، ع.، مظاهری، ا.، ملک زاده سفارودی، آ. و کریم پور، م.ح.، ۱۳۹۳. سن سنجی زیرکن با روش U-Pb و ژئوشیمی توده های گرانیتی سرخر و برمانی شرق معدن سنگ آهن سنگان خواف، پترولوژی، دوره ۵، شماره ۱۷، ص ۸۳-۱۰۲.
- مظهری، ن.، ملک زاده سفارودی، آ. و قادری، م.، ۱۳۹۴. زمین شناسی، کانی شناسی و ژئوشیمی آنومالی فرومگنیز فرزنه، شرق مجموعه معدنی سنگان خواف، مجله زمین شناسی اقتصادی، دوره ۷، شماره ۱، ص ۲۳-۳۷.
- مظهری، ن.، ملک زاده سفارودی، آ. و قادری، م.، ۱۳۹۵. ژئوشیمی توده های نفوذی، سنگ شناسی اسکارن، کانی شناسی و شیمی در آنومالی سنجدک I، خاور مجموعه معدنی سنگان خواف، فصلنامه علوم زمین، سال ۲۵، شماره ۱۰۰، ص ۲۳۵-۲۴۶.
- مهدیلو، ا. و علی نیا، ف.، ۱۳۹۱. شناسایی و تعیین میزان عناصر نادر موجود در کانسنگ آهن و باطله های کارخانه فرآوری چغارت، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- براتی، م. و قلی پور، م.، ۱۳۹۲. کانی شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسار آهن ظفرآباد کردستان با استفاده از داده های عناصر جزئی و نادر خاکی کانی مگنتیت، مجله زمین شناسی اقتصادی، دوره ۵، شماره ۲، ص ۲۳۵-۲۵۴.
- بومری، م.، ۱۳۸۴. عناصر نادر خاکی (REE) در گارنت از کانسار آهن سنگان، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران، نهمین همایش -سیمونز، و.، کلاگری، ع.ا.، موید، م. و جهانگیری، ا.، ۱۳۸۹. بررسی سنگ شناسی و سنگ زایی استوک کوارتز مونزونیت پورفیری کیکال (شمال ورزقان، آذربایجان شرقی)، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال ۴، شماره ۱۳، ص ۴۷-۶۰.
- قنادپور، س.س.، ۱۳۹۳. مطالعات ژئوشیمی و متالوژی عناصر نادر خاکی و ارزیابی پتانسیل این عناصر در کمر بند بافق-رباط پشت بادام، سازمان انرژی اتمی ایران (تحت نظارت بنیاد ملی نخبگان)، تهران، گزارش کار، ۱۶۲ ص.
- قنادپور، س.س.، هزارخانی، ا.، نوریان، ش. و گل محمدی، ع.، ۱۳۹۷. اکتشاف عناصر نادر خاکی به کمک پرتوسنجی؛ مطالعه موردی: معدن باغک، سنگان، مجله علوم و فنون هسته ای، دوره ۱۷، شماره ۸۳، ص ۳۰-۴۵.
- فرقانی، ع.، ۱۳۶۷. کانی شناسی جلد اول نروسیلیکاتها تا اینوسیلیکاتها، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.
- کریم پور، م.ح. و ملک زاده سفارودی، آ.، ۱۳۸۶. ژئوشیمی و کانی شناسی زون های اسکارنی و سنگ شناسی سنگ منشأ کانسار آهن سنگان

- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S. and Ghazban, F., 2011. 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*, v. 281, p. 253-269.
- Boomerly, M., 1998. Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran, PhD thesis, Akita University, Japan, 226 p.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies, In: Henderson P. (ed.), *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, p. 63-114.
- Ercit, T.S., 2002. The mess that is 'allanite', *The Canadian Mineralogist*, v. 40, p. 1411-1419.
- Ghannadpour, S.S. and Hezarkhani, A., 2012. A developed software to calculate the additive constant number of average in three-variable normal logarithm: *Global Journal of Computer Science*, v. 2(1), p. 1-6.
- Gill, J.B., 1989. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Springer-Verlag, Berlin, 390 p.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran: *Ore Geology Reviews*, v. 65(2), p. 545-563.
- Gregory, C.J., Rubatto, D., Allen, C., Williams, I.S., Hermann, J. and Ireland, T.R., 2007. Allanite micro-geochronology: a SHRIMP and LA-ICP-MS study, *Chemical Geology*, v. 245, p. 162-182.
- Hoatson, D.M., Jaireth, S. and Mieziotis, Y., 2011. The major rare-earth-element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources: *Geoscience Australia*, 204 p.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Golmohammadi, A., 2013. 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*, v. 64, p. 256-271.
- McDonough, W.F. and Sun, S., 1995. The composition of the Earth: *Chemical Geology*, v. 120, p. 223-253
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2012. 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*, v. 334, p. 378-381
- Orris, G.J. and Grauch, R.I., 2002. *Rare Earth Element Mines, Deposits and Occurrences*, Open-File Report 02-189, Reston, VA: USGS.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, in: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva, Nantwich, p. 230-249.
- Rabadjieva, D., Tepavitcharova, S., Todorov, T., Dassenakis, M., Paraskevopoulou, V. and Petrov, M., 2009. Chemical speciation in mining affected waters: the case study of Asarel-Medet mine, *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 159, p. 353-366.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data, Evaluation, Presentation, Interpretation*, Harlow, UK, Longman, 352 p.
- Sabet-Mobarhan-Talab, A., Alinia, F., Ghannadpour, S.S. and Hezarkhani, A., 2015. Geology, geochemistry, and some genetic discussion of the Chador-Malu

iron oxide-apatite deposit, Bafq District, Central Iran: Arabian Journal of Geoscience, v. 8(10), p. 8399-8418.

-Yazdi, M., 1987. Gold mineralization in the granitoid rocks of voltus area Rozmital block Czech Republic, PhD Thesis, Charles University.

-Walters, A., Lusty, P., Chetwyn, C. and Hill, A., 2010. Rare earth elements,

Mineral Profile Series British Geological Survey, United Kingdom, 45 p.

-Wilson, M., 2007. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach, Springer (Originally published by Chapman & Hall), Netherlands, 466 p.

Archive of SID