دوره ششم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۱۱۵ تا ۱۳۸
Vol. 6, No. 3, Autumn 2021, pp. 115-138

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/JMRE.2020.12498.1383

علمی-پژوهشی

ارزیابی اولیه وضعیت عناصر نادر خاکی معدن فسفات اسفوردی با روش ضریب چشم انداز

مجتبی شمس‌الدین میگونی[1]، محمد لطفی[2*]، پیمان افضل[3]، نیما نظافتی[4]، مریم کارگر راضی[5]

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
۲- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
۳- دانشیار، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
۴- دانشیار، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
۵- استادیار، گروه شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۰۵/۰۲)

چکیده

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، معدن فسفات اسفوردی در ایالت فلززایی بافق است که آپاتیت، مگنتیت و هماتیت کانی‌سازی اصلی آن هستند. این معدن به عنوان یکی از معادن آهن- آپاتیت با میزان فسفر بالا در منطقه، محتوی کانی‌سازی قابل توجهی از عناصر نادر خاکی با بیشینه و میانگین عیار ۱٫۷ و ۰٫۵ درصد (به صورت کانی‌های مونازیت، زیرکن و آلانیت در آپاتیت) و دارای غنی‌شدگی LREE و آنومالی منفی Eu است. برای ارزیابی مقدماتی ناحیه مورد مطالعه از نظر وضعیت عیار REEs، روش ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی (K_{outl}) که بر پایه طبقه‌بندی REEs به وسیله سطح تقاضای صنعت استوار است مورد استفاده قرار گرفت. این ضریب نسبتی از مقدار عناصر نادر خاکی بحرانی (Dy، Tb، Nd، Y، Er و Eu) به مقدار عناصر نادر خاکی مازاد (Ce، Ho، Tm، Yb و Lu) است که برای بررسی کانی‌سازی مربوط به تیپ‌های مختلف در کانسارهای تازه کشف شده و معادن فعال قابل استفاده است. نتایج نشانگر بیشترین ضریب چشم‌انداز (K_{outl}=0.67) برای واحد میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول (زون متاسوماتیک) و همچنین ضریب چشم‌انداز میانگین امیدبخش ۰٫۵۳ است. معدن اسفوردی در مقایسه با معدن بایان اوبو چین (K_{outl}=0.2) به رغم عیار پایین‌تر، ترکیب نزدیک‌تری به حالت ایده‌آل دارد. از این‌رو در صورت تمرکز بر روی اکتشاف REEs و بررسی‌های بیشتر ژئوشیمی و کانی‌شناسی، می‌توان آینده روشنی را برای این عناصر در این معدن متصور بود.

کلمات کلیدی

عناصر نادر خاکی (REEs)، ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی (K_{outl})، معدن اسفوردی، ایالت متالوژنی بافق.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: mo_lotfi@iau-tnb.ac.ir

CC BY

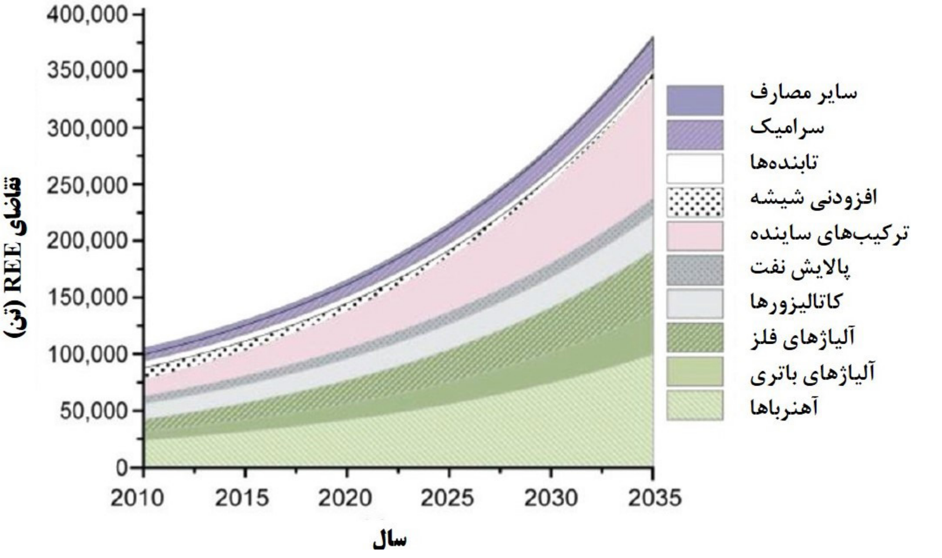
۱- مقدمه

مصرف عناصر نادر خاکی آن‌چنان با رشد تکنولوژی همگام است که این عناصر به عنوان فلزات راهبردی عصر حاضر قلمداد می‌شوند و سوددهی کلان این صنعت مزید بر آن خواهد بود، از این‌رو چنین تصور می‌شود که اقتصادهای نوظهور ناگزیر به استفاده هرچه بیشتر این عناصر خواهند بود؛ به طوری که میزان مصرف این عناصر را می‌توان به عنوان شاخص رشد صنعتی کشورها در نظر داشت [۱]. با توجه به گرمایش روزافزون کره زمین و لزوم کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، توجهات به سوی استفاده از منابع جدید انرژی مانند سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی که گرمایش و آلایندگی کمتری به همراه دارند معطوف شده است. در این میان استفاده از مواد اولیه جدید و متناسب با فناوری‌های نوین به ویژه عناصر نادر خاکی گریزناپذیر است [۵-۲]. همزمان با رشد فزاینده تقاضا در زمینه صنایع خودرو، الکترونیک، مخابرات، کامپیوتر و تجهیزات قابل حمل، کاربرد عناصر نادر خاکی نیز به ویژه در زمینه‌های ساخت کاتالیست‌های آلایندگی اتومبیل‌ها، آهنرباهای دایمی و باتری‌های قابل شارژ گسترش می‌یابد که نمودار تقاضای بلندمدت مصرف این عناصر در شکل ۱ نشان داده شده است [۷،۶،۱].

عناصر نادر خاکی به ۱۵ عنصر فلزی سری لانتانیدها، همراه با ایتریم و گاهی اسکاندیم اطلاق می‌شود که عموما به دو گروه سبک (La، Ce، Pr، Nd، Pm، Sm، Eu و Gd) و سنگین (Y، Tb، Dy، Ho، Er، Tm، Yb و Lu) تقسیم می‌شوند [۱۱-۸]. این عناصر بر خلاف نامشان، نادر یا کمیاب نیستند و در پوسته زمین در مقایسه با فلزات نقره، طلا و یا گروه پلاتین فراوان‌تر هستند، اما به ندرت به صورت فلزی تشکیل ماده معدنی قابل استخراج می‌دهند و عمدتا در ترکیب سنگ‌های مختلف بدون تمرکز اقتصادی بروز می‌کنند [۱۳،۱۲].

چین با حدود ۲۳٪ ذخایر REEs جهان دارای بیشترین ذخایر اثبات شده و بزرگترین صادرکننده و مصرف‌کننده این عناصر در جهان است. همچنین چین بیش از ۹۰٪ تقاضای جهان را برای ده‌ها سال برآورده کرده است [۱۴]. سایر کشورهای جهان از جمله ایالات متحده آمریکا، ژاپن و اتحادیه اروپا به انحصار صادرات مواد اولیه تولید چین تکیه جدی کرده‌اند. این موضوع با توجه به موقعیت غالب چین در بازار جهانی REEs به ویژه بعد از اینکه در سال ۲۰۰۹ تصمیم به اجرای یک سیاست صادرات سخت‌گیرانه گرفت که مستقیما به افزایش قیمت و بحران در بازار منجر شد، موجب نگرانی این کشورها از خطر تامین این محصول استراتژیک شده است [۱۵،۲].

استخراج و استحصال عناصر نادر خاکی می‌تواند ارزش افزوده بسیار بالایی برای این معادن به همراه داشته باشد، به نحوی که در سپتامبر سال ۲۰۱۹ قیمت تقریبی هر تن (بر اساس دلار آمریکا) اکسید سریم ۱۷۳۰، اکسید نئودیمیم ۴۶۹۶۵، اکسید لانتانیم ۱۷۳۰، اکسید ساماریم ۱۷۶۵ و



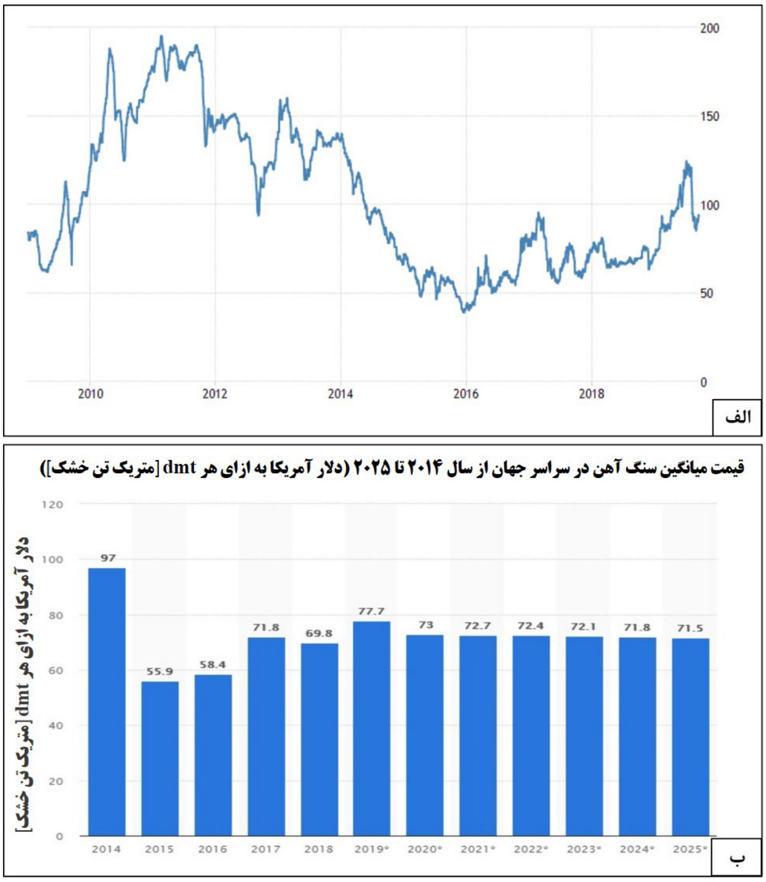
شکل ۱: نمودار تقاضای بلندمدت مصرف عناصر نادر خاکی تا سال ۲۰۳۵ (بر اساس [۱])

اکسید گادولینیم ۲۵۶۳۶ بوده ولی هر تن سنگ آهن در همان زمان با قیمت حدودی ۷۰ دلار آمریکا معامله شده است [۱۶]. با توجه به پایین آمدن قیمت سنگ آهن در سال‌های اخیر (شکل ۲-الف) و پیش‌بینی تداوم قیمت آهن در سال‌های آتی (شکل ۲-ب)، در شرایط کنونی می‌توان بخشی از این عدم سودآوری را با بهره‌برداری از عناصر نادر خاکی به عنوان محصول جانبی معادن جبران کرد.

در ایران کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در محیط‌های زمین‌شناسی متنوعی یافت می‌شود (شکل ۳) که از مستعدترین مناطق کانه‌زایی مرتبط با این عناصر در ایران می‌توان به مجموعه کانسارهای آهن- آپاتیت (ایران مرکزی و زنجان)، سنگ‌های آذرین آلکالن (به ویژه منطقه آذربایجان)، انواع رخنمون‌های کانی‌سازی اکسید آهن هیدروترمالی، آهن اسکارنی، ذخایر دگرگونی، کانسارهای لاتریتی، رگه‌های پگماتیتی، کانسارهای همراه با ذخایر اورانیم، ذخایر مرتبط با کانسارهای سرب و فلورین، کانسارهای همراه با ذخایر زغال و کانسارهای پلاسری اشاره داشت [۲۱-۱۹]. از میان تیپ‌های مستعد کانی‌سازی REE در ایران، تیپ آهن– آپاتیت در ایران مرکزی، بر اساس چند عامل اصلی؛ از جمله نوع کانی‌سازی، میزان پشتوانه تولید، حجم و توان عملیات معادن، میزان حجم باطله (Dump) و توان عملیات فرآوری، به عنوان تیپ با اولویت بالا از سوی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور معرفی شده است [۱۹].

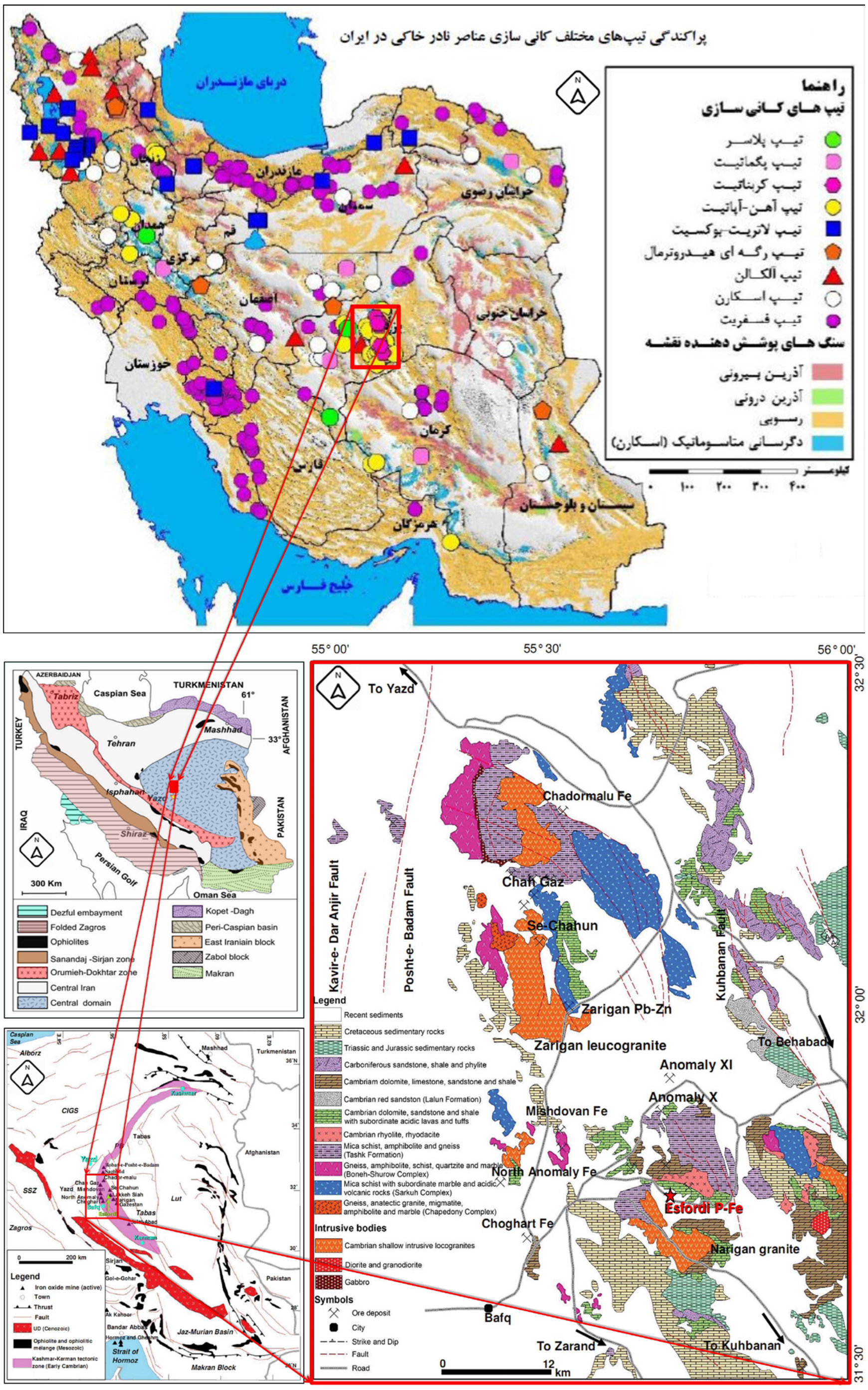
منطقه بافق در ایران مرکزی دربردارنده بیش از ۳۴ ذخیره آهن و آپاتیت از تیپ کایرونا [۲۶-۲۲] با سن کامبرین زیرین است که می‌توانند میزبان مناسبی برای منابع و ذخایر اقتصادی عناصر نادر خاکی باشند [۲۲،۲۵،۲۹-۲۷]. بررسی‌های محققان در مورد کانسارهای مگنتیت- آپاتیت تیپ کایرونا بیانگر غنی‌شدگی آنها نسبت به REEs است که می‌توانند درون کانی آپاتیت تمرکز یابند و کانی‌های فرعی این عناصر را تشکیل دهند [۳۳-۳۰].

تاکنون مطالعات مختلفی روی معادن و کانسارهای منطقه



شکل ۲: الف) روند تغییرات قیمت سنگ آهن از سال ۲۰۱۰ تاکنون [۱۷]. ب) پیش‌بینی قیمت سنگ آهن از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ (بر اساس [۱۸])

بافق انجام گرفته که علاوه بر بحث در مورد ژنز این کانسارها، در مورد پتانسیل بالای عناصر نادر خاکی و نیز تشکیل آنها بحث شده است [۲۵-۲۲،۲۹،۴۶-۳۴]. از معادن حاوی کانی‌زایی REEs در این منطقه می‌توان به اسفوردی، گزستان، لکه سیاه، چاه گز، میشدوان، چغارت، چادرملو، زریگان و موارد دیگر اشاره کرد (شکل ۴). به طور کلی عیار میانگین مجموع عناصر نادر خاکی در این ذخایر حدود ۱ درصد و عیار میانگین این عناصر در بلورهای آپاتیت حدود ۲/۲ درصد گزارش شده



شکل ۳: موقعیت منطقه بافق روی نقشه پراکندگی محدوده‌های شناخته شده عناصر نادر خاکی در ایران [۱۹] و نقشه زون‌های ساختاری ایران و همچنین جایگاه معدن اسفوردی در نقشه زمین‌شناسی ایالت معدنی بافق (بر اساس [۲۲])

است [۴۸،۴۷،۳۷،۲۴]. در این کانسارها به طور عمده بلورهای آپاتیت میزبان اصلی REEs هستند اما برخی کانی‌های دیگر مانند مونازیت، باستنزیت، آلانیت، توریت و دیگر کانی‌ها به صورت ادخال در آپاتیت و همچنین رگه- رگچه‌های کربنات، هماتیت- کربنات و کوارتز نیز می‌توانند میزبان این عناصر باشند [۳۷].

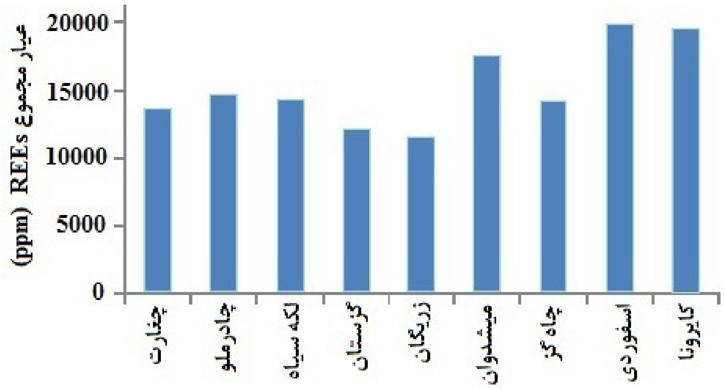
معدن اسفوردی با میانگین Fe حدود ۱۷٫۲ درصد و میانگین P_2O_5 حدود ۱۴٪ و نیز دارا بودن رگه‌های پر عیار آپاتیت (P_2O_5 بیش از ۳۵٪) یکی از معادن با فسفر بالا در منطقه محسوب می‌شود [۴۳،۳۵]. میزان عناصر نادر خاکی در این معدن با ∑REEs که به ۲٪ نیز می‌رسد [۴۵،۲۵] دارای غنی‌شدگی نسبت به LREEs و همبستگی مثبت بسیار بالا با فسفر است [۲۵].

بر اساس موارد یاد شده، منطقه بافق و معدن اسفوردی پتانسیل شایان توجهی از کانی‌سازی REEs دارد، اما با توجه به بالا بودن هزینه‌ها و ریسک عملیات اکتشافی، در بسیاری از نواحی دارای پتانسیل و یا معادنی که وجود پتانسیل عناصر نادر خاکی در آنها محتمل است، توجه قابل قبولی به اکتشاف این عناصر نمی‌شود. این امر سبب مغفول ماندن منابعی ارزشمند و استراتژیک می‌شود که می‌تواند به عنوان محصول جانبی (به مراتب گران‌تر از ماده معدنی اصلی) به فروش برسد. از این‌رو به کارگیری روشی که بتواند در مراحل اولیه و با حجم کم داده‌ها، چشم‌اندازی از وضعیت نسبی عیار و ترکیب محتوی REEs منطقه مورد مطالعه فراهم آورد تا در صورت نامطلوب بودن چشم‌انداز از اتلاف هزینه جلوگیری شود، بسیار راهگشا است. در این راستا روش «ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی» [۵۰] که بر پایه تقاضای صنعت، وضعیت بازار، ترکیب و نوع REEs موجود، این عناصر را دسته‌بندی می‌کند می‌تواند مفید باشد. این روش که در مطالعات مختلفی [۵۴،۱۵،۷-۵۰] مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است، ملاکی برای بررسی منطقه یا معدن مورد مطالعه در قیاس با سایر معادن و کانسارهای شناخته شده جهانی فراهم می‌آورد.

در این پژوهش ضمن مطالعات صحرایی، آماری، ژئوشیمیایی و میکروسکوپی، ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی با استفاده از نمونه‌های سطحی برداشت شده از محدوده معدن اسفوردی محاسبه و با معادن شناخته شده مقایسه می‌شود تا در صورت امیدبخش بودن نتیجه، با اطمینان بیشتر، نمونه‌برداری با تراکم بالاتر و با روش‌های دقیق‌تر در مراحل آتی اکتشاف انجام پذیرد.

۲- منطقه مورد مطالعه

معدن فسفات اسفوردی در ۱۵۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان یزد و ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق قرار گرفته است. این معدن به عنوان یکی از مهم‌ترین کانی‌سازی‌های آهن و آپاتیت در منطقه بافق و همچنین ایران، دارای پتانسیل بالا و قابل توجهی از عناصر نادر خاکی است [۴۸،۲۵،۲۴]. همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است محدوده مورد نظر از لحاظ تقسیمات زمین‌شناسی در زون ایران مرکزی، زیر زون بلوک بافق- پشت‌بادام و از نظر فلززایی، در ایالت فلززایی بافق قرار گرفته است [۵۶،۵۵،۲۹،۲۵]. ایالت بافق دربردارنده یک زون ریفتی باریک با امتداد شمالی- جنوبی بین ساختارهای گسلی اصلی کوهبنان و کوه دویران و همچنین میزبان کانسارها و معادن بزرگ آهن و آپاتیت است که در توف‌های فلسیک ریولیتی تا ریوداسیتی متامورف



شکل ۴: محتوای عناصر نادر خاکی در کانسارهای آهن- آپاتیت ایران و همچنین کایرونا در سوئد [۴۹]

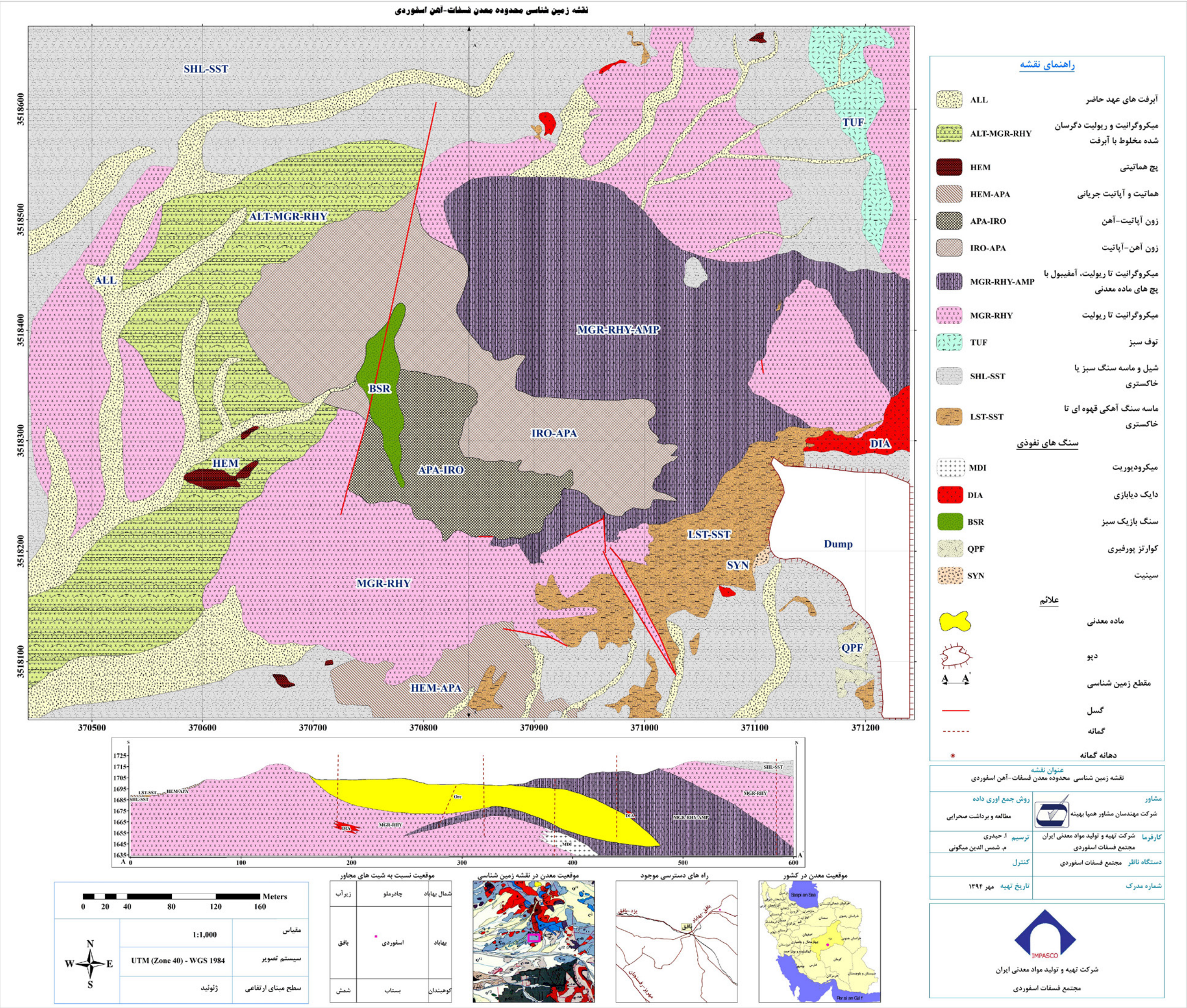
نشده کامبرین پیشین و همچنین واحدهای آذرآواری تشکیل شده‌اند [۵۷،۲۳].

معدن اسفوردی از یک سری سنگ‌های رسوبی تا رسوبی آتشفشانی و آذرین درونی تا بیرونی تشکیل شده است و مناطق پیرامونی و سنگ‌های دربرگیرنده معدن به طور عمده سنگ‌های رسوبی (که قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه‌اند) شامل دولومیت و آهک سری ریزو در کنار سنگ‌های ولکانیک و ساب‌ولکانیک مانند گرانیت، کوارتز پورفیر تا ریولیت، دیاباز، سینیت، گابرو تا دیوریت و تا حدی بازالت‌اند.

بر اساس شواهد موجود، برداشت‌های انجام شده و نقشه تهیه شده (شکل ۵ و شکل ۶)، زون‌های معدنی و کانه‌زایی قابل توجه در معدن اسفوردی شامل زون آپاتیت– آهن (آپاتیت + هماتیت + مگنتیت + اکتینولیت و ترمولیت)، زون آهن– آپاتیت (هماتیت + مگنتیت + آپاتیت + اکتینولیت و ترمولیت)، زون میکروگرانیت تا ریولیت همراه با آمفیبول (پچها، لنزها و رگچه‌های آپاتیت + هماتیت) که در منطقه تحت عنوان «سنگ سبز» شناخته می‌شوند و زون آهن- آپاتیت جریانی (جریانی از ماده معدنی هماتیت + آپاتیت) هستند.

۳- روش انجام پژوهش

در راستای مطالعه وضعیت عناصر نادر خاکی در محدوده معدن اسفوردی، ابتدا طی چندین مرحله پیمایش، واحدهای



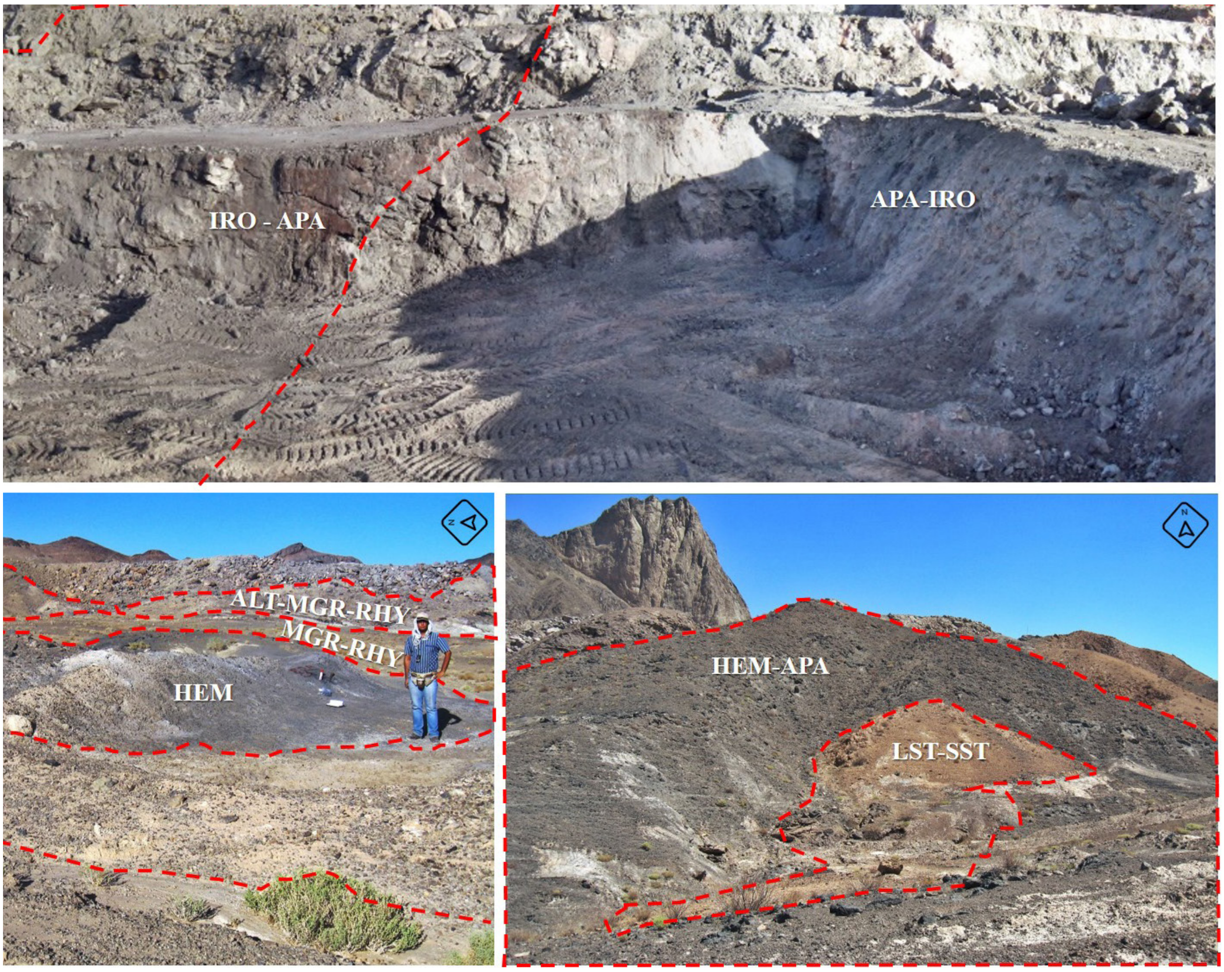
شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱،۰۰۰ تهیه شده از معدن اسفوردی

سنگی و معدنی داخل و حاشیه پیت استخراجی شناسایی و تفکیک شدند. سپس برای اینکه بتوان بررسی جامعی از وضعیت عیار این عناصر در تمام بخش‌های معدن انجام داد، ۴۰ نمونه از همه واحدهای شناسایی شده (کانسنگ و سایر سنگ‌های محدوده) برداشت و با رویکرد بررسی REEs با دستگاه ICP-MS در مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران آنالیز شدند.

برای شناخت وضعیت و روند کلی توزیع عیار، بررسی‌های آماری و ژئوشیمیایی بر روی داده‌ها انجام شد و در گام بعد برای بررسی و شناخت ارزش و دورنمای اقتصادی کانی‌سازی REEs و ارزیابی مقدماتی عیار این عناصر در معدن اسفوردی، از روش ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی استفاده شد. سپس در راستای حصول اطمینان از نتایج محاسبه ضرایب چشم‌انداز و ایجاد دیدگاه مقایسه‌ای، این ضرایب طبقه‌بندی و با ضرایب چشم‌انداز چند معدن شناخته شده جهان مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین ضمن مقایسه با واحدهای سنگی و معدنی محدوده و مطالعه مقاطع میکروسکوپی، واحدهای دارای پتانسیل (با ضریب چشم‌انداز امیدبخش) تفکیک و معرفی شدند.

۳-۱- ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی

ارزیابی وضعیت ماده معدنی عناصر نادر خاکی به دلایل تنوع بسیار زیاد تیپ‌های ژنتیکی ماده معدنی، دارا بودن خصوصیات تکنولوژیکی متفاوت، لزوم بررسی عیار این عناصر به صورت جداگانه (۱۴ عنصر گروه لانتانیدها و ایتریم)، مقدار و مصرف که با سفارشات و قدرت بازار تعیین می‌شود امری پیچیده است. از این‌رو معیارهای به ظاهر غیرقابل تغییر برای ارزیابی ماده معدنی مانند منابع و عیار، معیارهای

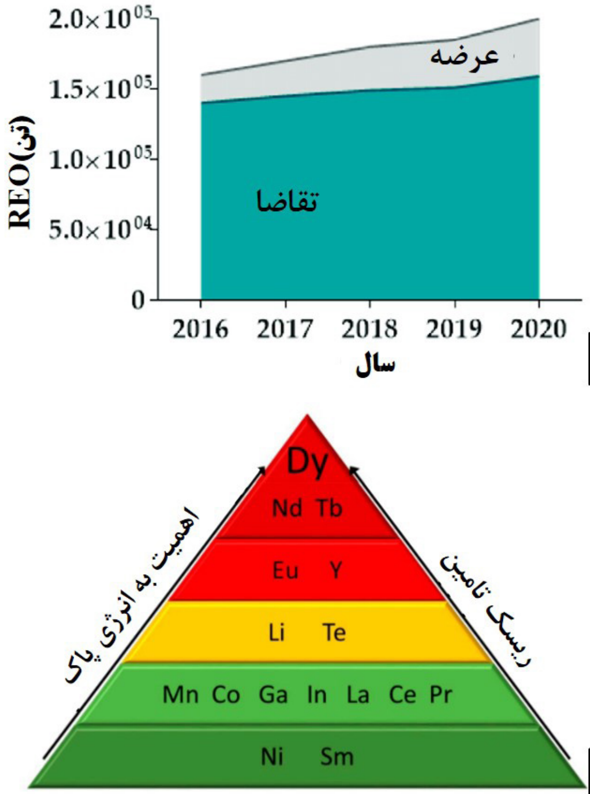


شکل ۶: تصاویر صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی

ثانویه محسوب می‌شوند [۵۰،۱۱]؛ اما در مطالعات مختلفی برای برآورد اهمیت اقتصادی سنگ معدن REEs، از مقدار HREE+Y به عنوان درصد مقدار کل همه عناصر نادر خاکی استفاده شده است. چنین رویکردی به دلیل وابستگی به تغییر قیمت هر یک از HREEs و به تبع آن افزایش عدم قطعیت، با موفقیت چشمگیری روبه‌رو نیست. علاوه بر این، بخش قابل توجهی از HREEs هنوز کاربرد گسترده‌ای ندارد و ارزش بالای این عناصر منتج از تولید ناچیز آنها است، بنابراین ضرورت به کارگیری روشی جامع و با دقت بیشتر، به ویژه بعد از بحران به وجود آمده برای بازار عناصر نادر خاکی در سال ۲۰۰۹، بیش از پیش مشخص شده است [۵۰،۱۵،۲].

از این‌رو استفاده از میزان تقاضای صنعتی برای REEs مختلف به عنوان معیار ارزیابی سودآوری سنگ معدن این عناصر پیشنهاد شد [۵۸،۵۰]. از آنجایی که نتایج آزمایش‌های تکنولوژیکی دیرتر از اطلاعات مربوط به عیار به دست می‌آیند این معیار می‌تواند عاملی مهم در ارزیابی چشم‌انداز ماده معدنی باشد. روش ارزیابی اولیه ماده معدنی این عناصر بر اساس طبقه‌بندی عناصر نادر خاکی منفرد و برای استفاده مستقیم مطالبه صنایع، مطابق با تقاضای فعلی و پیش‌بینی شده است. این روش علاوه بر کاربرد در مطالعه اولیه کانسارهای تازه کشف شده، در تخمین سود احتمالی معادن شناخته شده‌ای که به صورت اجاره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند نیز می‌تواند راهگشا باشد [۵۰].

با توجه به روند فعلی و پیش‌بینی‌های عرضه و تقاضای مصرف عناصر نادر خاکی (شکل ۷-الف)، در نگاه اول دلیلی برای صحبت درباره بحران این عناصر وجود ندارد، اما بر اساس شکل ۷-ب و با نگاه دقیق به بازار این عناصر، می‌توان آنها را در سه گروه بحرانی، مازاد و غیربحرانی طبقه‌بندی کرد [۵۴،۵۰،۷]. بر این اساس مشخص می‌شود که تقاضای عناصر Dy، Tb، Nd و Y از میزان تولید آن فراتر است و با در نظر گرفتن ضریب دقت پیش‌بینی، می‌توان این ۴ عنصر به علاوه Er و Eu را به عنوان عناصر نادر خاکی بحرانی یا بالقوه بحرانی قلمداد کرد [۶۰،۵۹،۵۴،۵۰،۷]. در واقع این بحران احتمالی می‌تواند به دلیل عرضه نامطلوب و برهم خوردن موازنه عرضه و تقاضا ایجاد شود. در مقابل، عناصر Ce، Ho، Tm، Yb و



الف
ب

شکل ۷: الف) پیش‌بینی عرضه و تقاضای عناصر نادر خاکی تا سال ۲۰۲۰ میلادی (بر اساس [۶۲،۶۱])، ب) هرم ارزیابی میان مدت (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵) بحرانی بودن عرضه عناصر نادر خاکی و برخی عناصر دیگر (بر اساس [۶۱])

Lu دارای تولید (عرضه) چندین برابر بیش از مصرف صنایع (تقاضا) هستند که در گروه عناصر مازاد طبقه‌بندی می‌شوند. سایر عناصر نادر خاکی شامل La، Pr، Sm و Gd به دلیل دارا بودن تعادل نسبی بین عرضه و تقاضا جزو عناصر غیربحرانی به حساب می‌آیند [۷، ۵۰، ۵۴، ۶۰].

بر اساس موارد یاد شده و با در نظر گرفتن روند فعلی بازار و پیش‌بینی‌های انجام شده، سنگ معدن دارای عناصر نادر خاکی باید دارای ترکیب ایده‌آل بیشترین میزان ممکن REEs بحرانی و کمترین میزان ممکن REEs مازاد باشد. از این‌رو نسبت REEs بحرانی در مجموع همه عناصر نادر خاکی، به میزان REEs مازاد در مجموع همه عناصر نادر خاکی به صورت شاخصی برای تخمین اولیه کیفیت ماده معدنی و درجه‌بندی اولیه نسبتا ساده و سریع هر نوع کانسار REEs قابل استفاده است که تحت عنوان ضریب چشم‌انداز عناصر نادر خاکی و با رابطه ۱ تعریف می‌شود [۷، ۱۵، ۵۰، ۵۲، ۵۴].

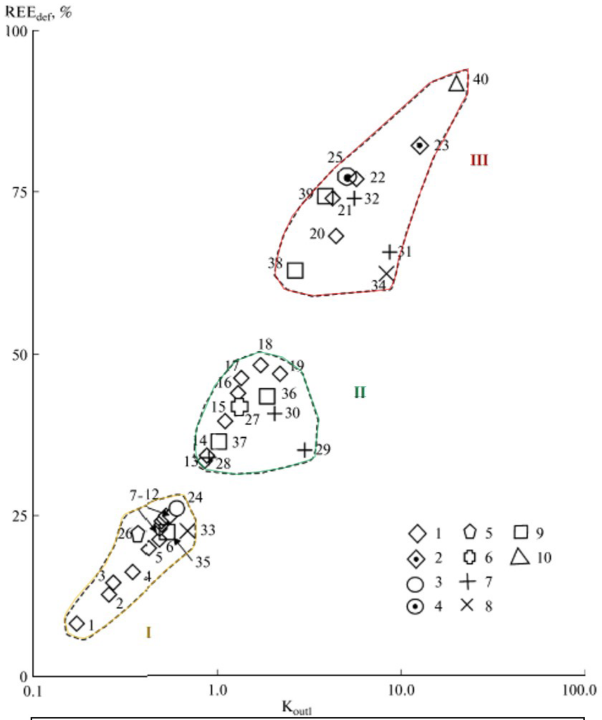
$$K_{outl} = \frac{\dfrac{Nd+Eu+Tb+DY+Er+Y}{\Sigma REE}}{\dfrac{Ce+Ho+Tm+Yb+Lu}{\Sigma REE}} \qquad (۱)$$

هرچه این ضریب مقدار بالاتری داشته باشد سنگ معدن REEs نسبت به ارزش بالقوه صنعتی بیشتر امیدوارکننده است.

۳-۲- طبقه‌بندی ضریب چشم‌انداز

برای طبقه‌بندی ضرایب چشم‌انداز و ارزیابی مقایسه‌ای ترکیب کانسارهای REEs مربوط به تیپ‌های ژنتیکی مختلف، از نموداری استفاده می‌شود که در آن درصد عناصر بحرانی در کل REEs (REE_{def}) در محور Y و ضریب چشم‌انداز (K_{outl}) در محور X قرار می‌گیرد (شکل ۸). روی این نمودار، کانسارها و معادن با تیپ‌های مختلف ژنتیکی از جهان در سه جامعه غیرامیدبخش (I)، امیدبخش (II) و بسیار امیدبخش (III) طبقه‌بندی شده‌اند [۵۰].

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است این سه جامعه از ۱۰ تیپ ژنتیکی تشکیل شده‌اند که هریک از آنها به شرح زیر است: ۱- مربوط به کانسارهای هیدروترمال و ماگماتیک مرتبط با تشکیلات کربناتیت‌ها، آلکالی و آلکالی گرانیت‌ها، ۲- کانسار هیدروترمال احتمالا مرتبط با ماگماتیسم مافیک، ۳- کانسارهای پلاسر (مونازیت)، ۴-کانسارهای پلاسر (زنوتایم)، ۵- کانسارهای رسوبی شیمیایی (ندول‌های فرومغناطیس و پوسته اقیانوسی)، ۶- کانسارهای رسوبی شیمیایی (آپاتیت



1.Bayan Obo, China; 2.Mountain Pass, USA; 3.Lovozero (loparite ore), Russia; 4.Bear Lodge, USA; 5.Mount Weld, Australia; 6.Kukisvumchorr, Russia; 7.Steenkampskraal, South Africa; 8.Hoidas Lake, Canada; 9.Nolans, Australia; 10.Thor Lake (upper ore zone), Canada; 11.Maoniuping, China; 12.Tomtor, Russia; 13.Dubbo, Australia; 14.Thor Lake (lower ore zone), Canada; 15.Benjamin River, Canada; 16.Lovozero (eudialyte ore), Russia; 17.Vergenoeg (apatite–magnetite ore), South Africa; 18.Kutessay II, Kyrgyzstan; 19.Lemhi Pass, USA; 20.Kichera, Russia; 21.Brockman, Australia; 22.Vergenoeg (fluorite ore); 23.Abramovka (kimuraite–lanthanite ore), Russia; 24.Deep Sands, USA; 25.Placers of Malaysia; 26.Northwestern Pacific Ocean; 27.Russia; 28.Huashan; 29.Guposhan; 30.Heling; 31.Longnan, China; 32.Tenyakovo, Russia; 33.Dolna Ves, Slovakia; 34.Abramovka, Russia; 35.Zhijin, China; 36.Aduun Chuluun, Mongolia; 37.Rakovskoe, 38.Pav Lovskoe; 39.Vanchinskoe, Russia; 40.Douglas River (xenotime ore), Canada

شکل ۸: طبقه‌بندی عناصر نادر خاکی بر اساس شاخص چشم‌انداز REEs [۷، ۱۵، ۵۰]

جایگزین شده با بافت ارگانیک)، ۷- کانسارهای رس سوپرژنیک در زون هوازده، ۸- کانسارهای رس هیدروترمال تشکیل شده در آلتراسیون آرژیلیک، ۹- زغال‌های متالوفروس پلیژنیک و ۱۰- موارد کلی از REEs.

۴- بحث

۴-۱- بررسی داده‌های مورد استفاده

برای بررسی اولیه وضعیت عناصر نادر خاکی در معدن اسفوردی، ۴۰ نمونه لیتوژئوشیمیایی برداشت شد (شکل ۹) که فهرست عناصر و حد تشخیص دستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

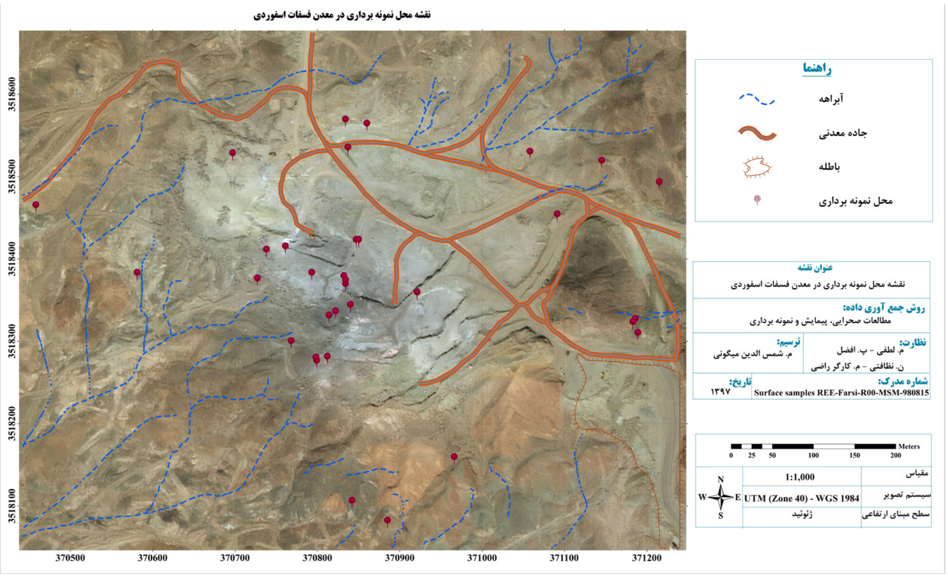
برای ارزیابی کیفیت داده‌های ژئوشیمیایی حاصل از نمونه‌برداری و تشخیص خطاهای سیستماتیک احتمالی در داده‌ها، ۸ نمونه تکراری تصادفی، آنالیز و دقت نتایج بر اساس روش گرافیکی تامسون و هوارث [۶۳] و محاسباتی فیشر [۶۴] سنجیده شد. بر اساس توزیع نقاط رسم شده در نمودار تامپسون هوارث (شکل ۱۰)، خطای نتایج حدود ۱۰٪ برآورد شد. در ادامه، آزمون فیشر که طبق رابطه ۲ برای تعیین برابری واریانس‌های نمونه‌های تکراری تصادفی استفاده می‌شود به کار رفت.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad , \quad S1 \geq S2 \qquad (۲)$$

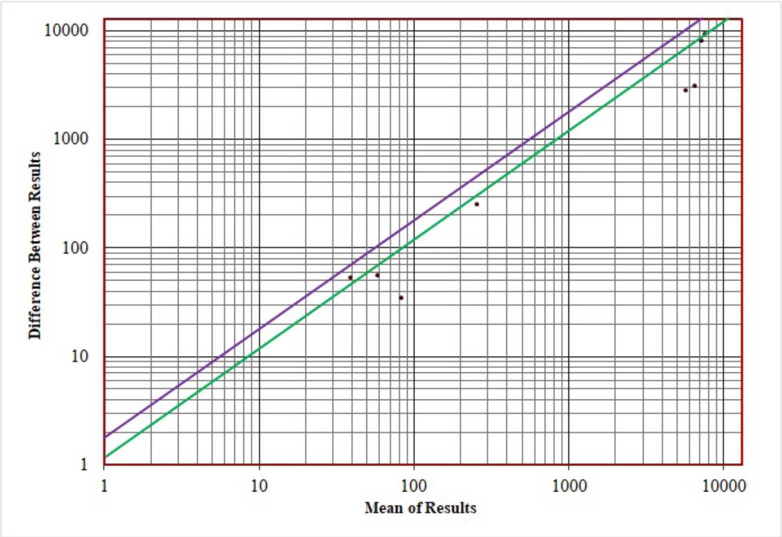
که در آن:

F، S_1 و S_2 : به ترتیب معرف توزیع F (فیشر)، واریانس جامعه اول و جامعه دوم نمونه‌های تکراری هستند.

بر اساس رابطه ۲ مقدار F=۳٫۲۳ است که این مقدار در سطح اعتماد ۹۵٪ از F بحرانی کمتر است (F بحرانی استخراج شده از جدول فیشر برابر با ۴٫۹۹) و می‌توان اختلاف‌ها را ناشی



شکل ۹: محل نمونه‌برداری در معدن اسفوردی روی تصویر ماهواره‌ای



شکل ۱۰: نمودار تامسون هوارث برای تخمین دقت آنالیز نمونه‌های تکراری عناصر نادر خاکی [۶۳]

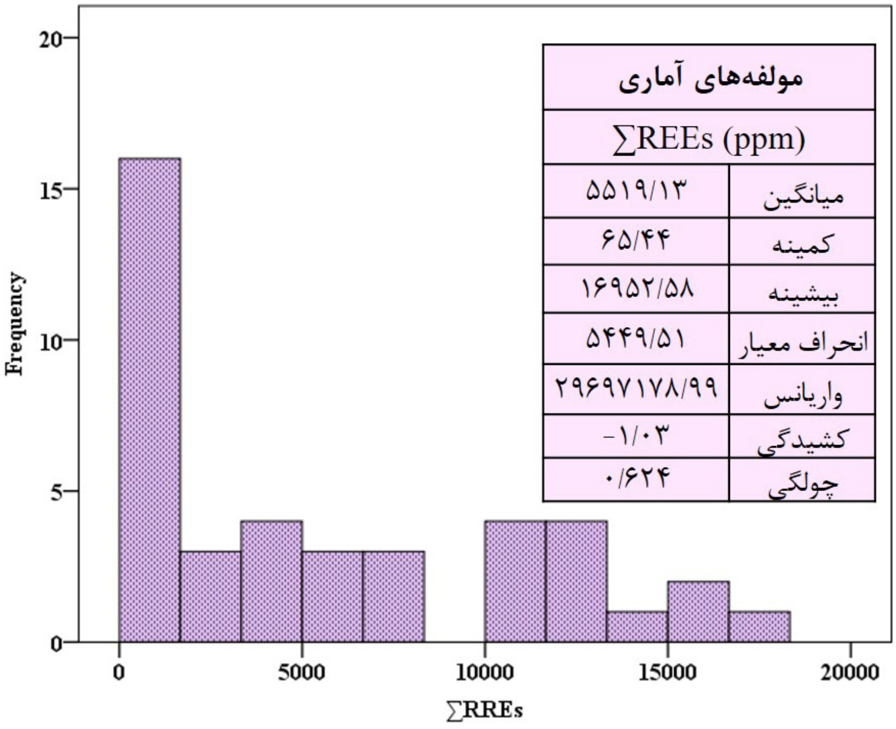
از خطاهای تصادفی و بی‌اهمیت تلقی کرد [۶۶-۶۴].

پس از آماده‌سازی داده‌های خام حاصل از آنالیز نمونه‌ها، این داده‌ها از نظر مقادیر سنسورد بررسی و با روش «جایگزینی ساده» جایگزین شدند [۶۷].

از آنجا که بخش مهمی از اطلاعات مورد استفاده در بررسی‌های ژئوشیمیایی و مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی از نمونه‌های برداشت شده منتج می‌شود، برای کسب اطلاعات از وضعیت و روند کلی پراکندگی داده‌ها، بررسی‌های آماری تک و دو متغیره روی داده انجام شد. با توجه به تعداد زیاد عناصر نادر خاکی، برای اجتناب از انجام محاسبات و پردازش‌ها برای هر یک از آنها، از مجموع عناصر نادر خاکی (∑REEs) استفاده گردید. نتایج بررسی‌های آماری تک متغیره انجام شده بر روی داده‌ها در شکل ۱۱ قابل ملاحظه است. همان‌طور که از این شکل استنباط می‌شود، میانگین و بیشینه عیار عناصر

جدول ۱: فهرست عناصر نادر خاکی آنالیز شده و حد تشخیص دستگاه برای هر یک از آنها

مقادیر جایگزینی		حد تشخیص		عنصر	مقادیر جایگزینی		حد تشخیص		عنصر
بالایی	پایینی	بالایی	پایینی	(ppm)	بالایی	پایینی	بالایی	پایینی	(ppm)
-	-	۶۵۰۰	۱	Nd	۸۶۶۷	-	۶۵۰۰	۱	Ce
-	۷/۵	۵۰۰	۱۰	Pr	۱۶۰	۳/۷۵	۱۲۰	۵	Dy
-	-	۱۰۰۰	۵	Sc	۱۳/۳۳	۳/۷۵	۱۰۰	۵	Er
-	۷۵	۱۰۰	۱	Tb	-	۳/۷۵	۱۰۰	۵	Eu
-	۷۵	۱۰۰	۱	Tm	-	۳/۷۵	۵۰۰	۵	Gd
-	۳/۷۵	۶۵۰۰	۵	Y	-	۷۵	۱۰۰	۱	Ho
۵۳/۳۳	۳/۷۵	۴۰	۵	Yb	-	۷/۵	۶۵۰۰	۱۰	La
					-	-	۱۰۰	۳	Lu



شکل ۱۱: هیستوگرام و پارامترهای آماری داده‌ها

نادر خاکی در معدن اسفوردی به ترتیب بیش از ۰٫۵ درصد و ۱٫۷ درصد است. همچنین بررسی ضرایب همبستگی (جدول ۲) نشانگر همبستگی بسیار قوی میان عناصر نادر خاکی و فسفر (آپاتیت) است که این موضوع می‌تواند کلید مناسبی برای اکتشاف REEs باشد.

جدول ۲: ضرایب همبستگی بین عناصر آهن، فسفر و ∑REEs

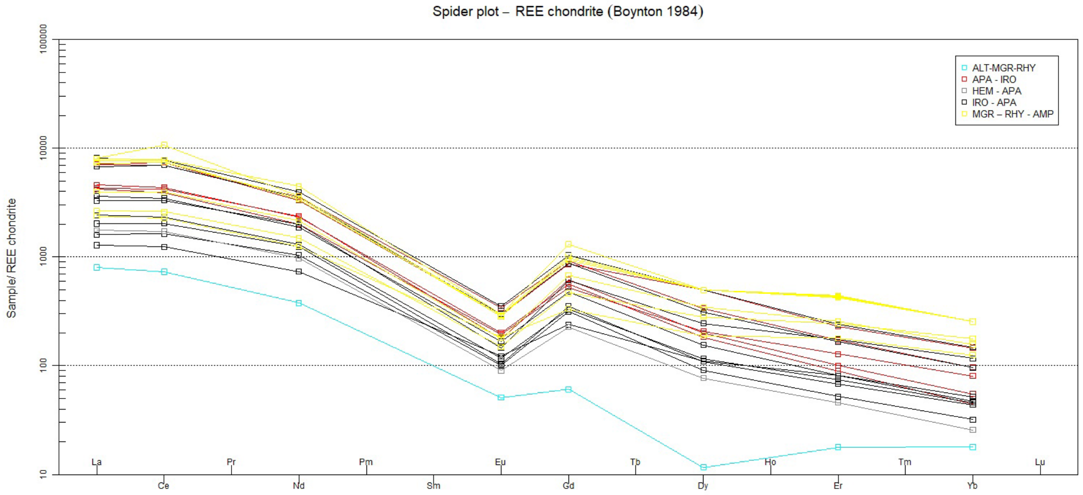
	∑REEs	P	Fe
∑REEs	۱	۰٫۹۴	۰٫۰۵
P	۰٫۹۴	۱	۰٫۱۷
Fe	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۱

پس از بررسی آماری داده‌ها، برای بررسی الگوی توزیع REEs در واحدهای دربردارنده ماده معدنی، نمودار عنکبوتی نرمالایز شده نسبت به کندریت [۶۸] ترسیم شد (شکل ۱۲). این نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌های کانسنگی معدن اسفوردی محتوی بالای عناصر نادر خاکی دارند و شیب منفی در آن حاکی از غنی‌شدگی نسبت به LRRE است. میزان REEs در نمونه‌های پرفسفر (آپاتیت) معمولا بیشتر از بخش‌های با آهن بالا است. روند به طور تقریبی موازی نمودار همه نمونه‌ها (به جز نمونه‌های زون آلتره) می‌تواند نشانگر ماهیت مشابه این عناصر در بخش‌های مختلف باشد [۶۹].

در این نمونه‌ها آنومالی منفی Eu به خوبی قابل تشخیص است که می‌تواند در ارتباط با فرآیندهای ماگمایی در شرایط فوگاسیته پایین اکسیژن و تبلور تفکیکی پلاژیوکلاز ایجاد شود [۷۰-۷۲]. این موضوع و همچنین غنی‌شدگی LREE می‌توانند نشانه‌هایی بر کانه‌زایی تیپ کایرونا [۷۳-۷۵] و شباهت به آپاتیت‌های موجود در گرانیت‌های تیپ I [۷۴،۷۶] باشند.

۴-۲- محاسبه، بررسی و طبقه‌بندی ضرایب چشم‌انداز

در این پژوهش برای هر یک از نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های مختلف معدن، ضریب چشم‌انداز محاسبه و در نهایت برای بررسی جامع‌تر و جلوگیری از تمرکز صرف بر نمونه‌های پرعیار، از مقادیر محاسبه شده ضریب چشم‌انداز و همچنین عیار ∑REEs میانگین‌گیری شد. بر اساس نتایج آنالیزها، محاسبه ضرایب چشم‌انداز و انطباق آنها با اطلاعات زمین‌شناسی، پنج بخش دربردارنده مقادیر قابل توجه REEs در معدن اسفوردی قابل بحث است (جدول ۳) و سایر واحدهای سنگی موجود در معدن عیار و چشم‌انداز قابل توجهی ندارند. همان‌طور که در جدول ۳ مشهود است؛ بیشترین عیار REEs مربوط به زون آپاتیت- آهن و بعد از آن با اختلاف اندک زون آهن- آپاتیت و در رتبه‌های بعدی به ترتیب مربوط به واحدهای میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول، هماتیت و آپاتیت جریانی و بخش دگرسان شده است، در صورتی که بیشترین ضریب چشم‌انداز (K_{out}=0.67) مربوط به واحد میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول است. ضریب چشم‌انداز در زون‌های IRO - APA، HEM - APA و APA - IRO تقریبا مشابه‌اند و این



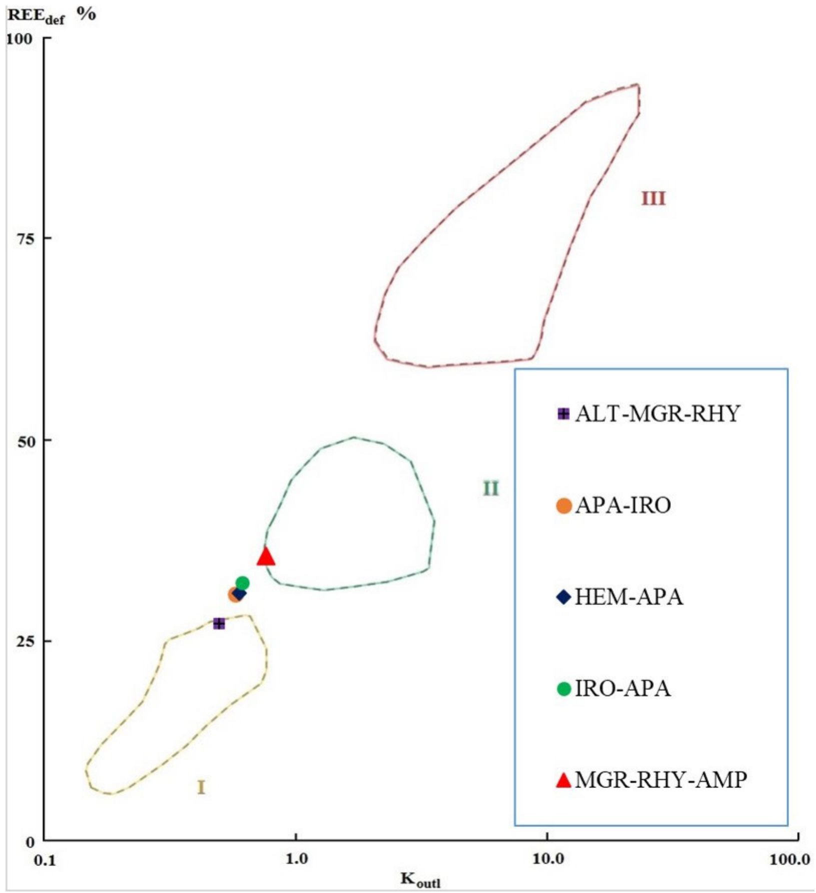
شکل ۱۲: نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی نرمالایز شده با کندریت [۶۸]

ضریب در بخش متشکل از میکروگرانیت و ریولیت دگرسان شده مخلوط با آبرفت، با K_{out}=0.43 کمترین میزان در معدن را دارا است که می‌تواند با اولویت کمتر مورد توجه قرار گیرد.

برای اعتبارسنجی مقایسه‌ای و طبقه‌بندی چشم‌انداز REEs در معدن اسفوردی، از نمودار نشان داده شده در شکل ۸ استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشهود است بعد از ترسیم داده‌ها روی نمودار؛ نمونه‌های همه بخش‌های بررسی شده نزدیک به گروه امیدبخش و تیپ کانی‌سازی احتمالی هیدروترمال و ماگماتیک‌اند.

جدول ۳: واحدهای دربردارنده مقادیر قابل توجه REE به همراه میانگین عیار ∑REEs و میانگین ضرایب چشم‌انداز آنها

واحدهای زمین‌شناسی	میانگین ∑REEs (ppm)	میانگین ضرایب چشم‌انداز
میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول (زون متاسوماتیک) (MGR – RHY - AMP)	۶۹۹۳/۵۶	۰/۶۷
آهن - آپاتیت (IRO - APA)	۸۱۹۹/۸۵	۰/۵۳
هماتیت و آپاتیت جریانی (HEM - APA)	۲۸۹۵/۲۳	۰/۵۲
آپاتیت - آهن (APA - IRO)	۸۶۳۵/۹۲	۰/۵۰
بخش دگرسان شده (ALT-MGR-RHY)	۱۱۸۸/۳۵	۰/۴۳



شکل ۱۳: طبقه‌بندی عناصر نادر خاکی معدن اسفوردی بر اساس ضریب چشم‌انداز REEs

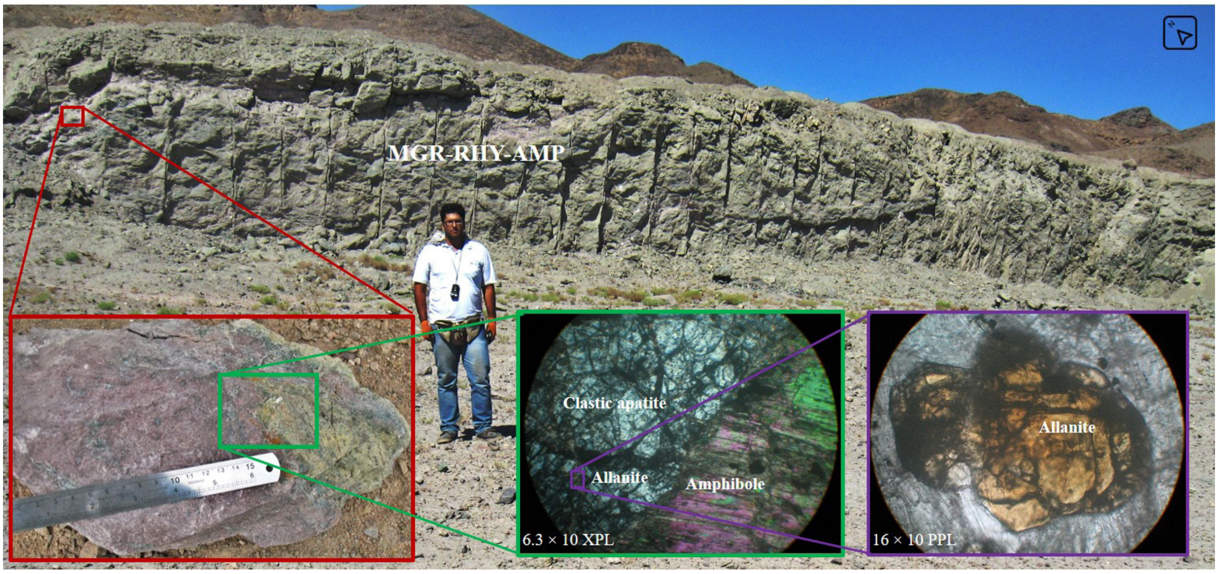
بر این اساس زون میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول که در حاشیه شمالی پیت معدن و مجاورت زون‌های دربردارنده آهن و آپاتیت قرار دارد و بخش‌های متاسوماتیک معدن را تشکیل می‌دهد، به دلیل وجود کریستال‌های آپاتیت و دارا بودن مقادیر بیشتر عناصر نادر خاکی بحرانی نسبت به بخش‌های دیگر، دارای چشم‌انداز حایز اهمیت‌تری است. این بخش وسیع که به عنوان میزبان مناسبی برای REEs معرفی می‌شود [۷۷] نشانگر پدیده متاسوماتیسم، اختلاط و رشد رشته‌های ترمولیت- اکتینولیت است که در معدن تحت عنوان «سنگ سبز» شناخته می‌شود و به عنوان باطله دپو می‌گردد، در صورتی که استحصال عناصر نادر خاکی از این بخش در کنار بخش‌های مستعد دیگر باید مورد توجه قرار گیرد. شکل ۱۴ نشانگر تصاویر صحرایی و مقاطع میکروسکوپی مربوط به نمونه برداشت شده از این بخش است که موید وجود کانی‌سازی REEs به صورت کانی آلانیت در کنار آپاتیت‌های کلاستیک هستند. در این نمونه طی پدیده اورالیتی شدن، کانی‌های آمفیبول و پیروکسن سنگ میزبان آهن و آپاتیت به ترمولیت و اکتینولیت تبدیل و آلانیت و کانی‌های متاسوماتیسم تشکیل شده‌اند.

بررسی نمونه‌های برداشت شده از قسمت‌های نمایش داده شده در شکل ۱۵ مربوط به بخش‌های IRO – APA و APA – IRO حاکی از تاثیر شدید پدیده میلونیتی شدن و خردشدگی آپاتیت و آهن است، که این آپاتیت‌ها دربردارنده بلورهای میله‌ای یا بی‌شکل مونازیت و زیرکن‌اند.

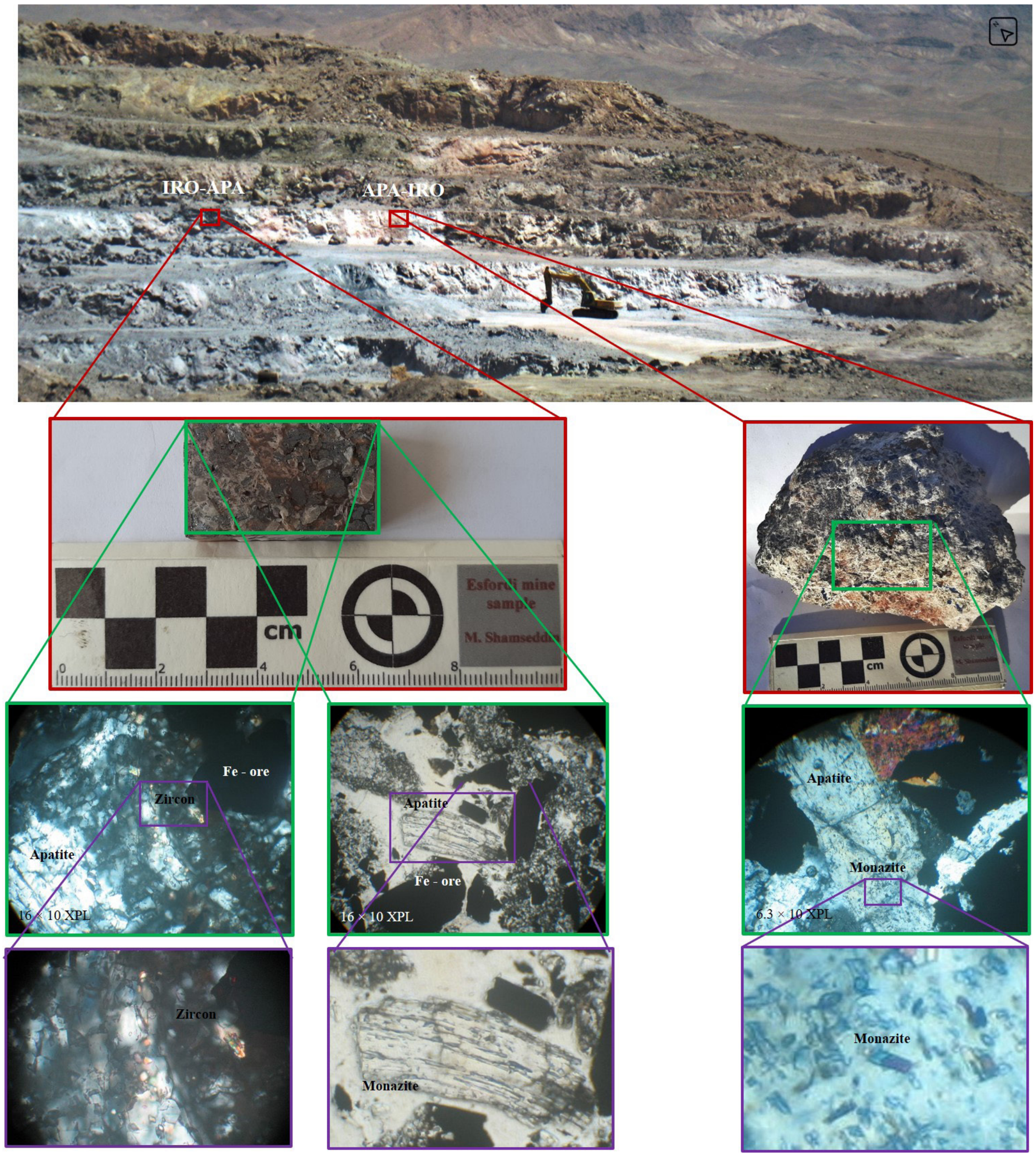
پس از مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها، برای بررسی وضعیت و شمای کلی ضریب چشم‌انداز محاسبه شده برای معدن اسفوردی و اعتبارسنجی آن، مقایسه‌ای با معادن شناخته شده Bayan Obo در چین، Tomtor در روسیه و Dubbo در استرالیا انجام شد (شکل ۱۶) [۷۹،۷۸،۵۰]. از این مقایسه به خوبی مشخص است که معدن اسفوردی در قیاس با معادن بایان اوبو و تامتور ضریب چشم‌انداز بالاتری دارد و همچنین اختلاف نسبتا کمی با معدن دابو دارد که این امر وضعیت درخور توجهی از کانه‌زایی REEs در معدن اسفوردی در تیپ کانه‌زایی نزدیک به خود را متصور می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

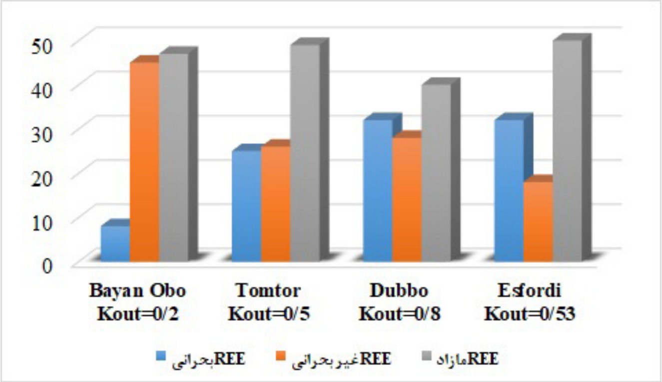
با توجه به سودآوری بالای بازار عناصر نادر خاکی و نیز جایگاه بی‌بدیل این عناصر در تکنولوژی آینده و مهم‌تر از آن نقش کنترل‌کننده چین در بازار جهانی به عنوان اصلی‌ترین تولیدکننده REEs، لزوم توجه سایر کشورها به ویژه ایران در دستیابی به منابع این عناصر بیش از پیش احساس می‌شود. وضعیت زمین‌شناسی ایران و به ویژه ایالت متالوژنی بافق موقعیت بسیار مناسبی برای جایگیری ذخایر قابل توجهی از عناصر نادر خاکی را فراهم آورده است. این ایالت با میزبانی



شکل ۱۴: تصویر صحرایی، نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی نمونه مربوط به زون میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول (زون متاسوماتیک) در معدن اسفوردی



شکل ۱۵: تصویر صحرایی، نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی نمونه مربوط به زون‌های APA – IRO و IRO – APA در معدن اسفوردی



شکل ۱۶: مقایسه درصد عناصر بحرانی، مازاد و غیربحرانی در معادن اسفوردی، بایان اوبو، تامتور و دابو

بیش از ۳۴ ذخیره آهن- آپاتیت به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق برای شناسایی، اکتشاف و در نهایت استخراج REEs شایان توجه است. به دلیل هزینه‌های بالای اکتشاف و تمرکز این معادن عموما بر استخراج محصول اصلی (آهن و آپاتیت)، این محصول ارزشمند مغفول واقع می‌شود و در فرآیند فرآوری و همچنین در هنگام استخراج به عنوان باطله دپو می‌گردد. از این‌رو به کارگیری روشی که بتواند در مراحل اولیه و با حجم کم داده‌ها چشم‌اندازی از وضعیت کلی منطقه مورد مطالعه فراهم آورد که در صورت قابل توجه بودن چشم‌انداز، عملیات سیستماتیک دقیق‌تری طراحی و با ریسک کمتر اجرا شود، بسیار راهگشا است.

عوامل جانبی بسیاری مانند نحوه تشکیل، مشخصات، میزان ذخیره و عیار ماده معدنی، سادگی فرآوری و درجه بازیابی هیدرومتالورژی، سایر عناصر همراه (چه مزاحم و چه ارزشمند) و مباحث زیست‌محیطی در ارزیابی چشم‌انداز و قابلیت توسعه یک کانسار یا معدن موثراند. اما روش ارزیابی ضریب چشم‌انداز REEs که بر پایه روابط بین عرضه و تقاضا استوار است می‌تواند ضمن ایجاد دیدگاه مقایسه‌ای با کانسارها و معادن شناخته شده جهانی، در بررسی‌های مقدماتی و با صرف هزینه‌های به نسبت کمتر نتایج قابل قبولی ارایه دهد.

بررسی و نمونه‌برداری از معدن فسفات اسفوردی– به عنوان یکی از معادن شاخص دارای پتانسیل عناصر نادر خاکی- نشانگر میانگین عیار ۰/۵ درصد و همچنین بیشینه عیار ۱/۷ درصد REEs در نمونه‌های سطحی مربوط به زون آپاتیت- آهن در مجاورت بخش متاسوماتیک است که این مقادیر وضعیت قابل توجهی را متصور می‌کند. مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و آماری موید نقش تبلور آپاتیت در تمرکز عناصر نادر خاکی است. الگوی نمودار عنکبوتی نرمالایز شده نسبت به کندریت، موید غنی‌شدگی نسبت به LREE و آنومالی منفی در Eu است که این موارد نشان از فوگاسیته پایین اکسیژن و تبلور همزمان آپاتیت و پلاژیوکلاز دارد که بر این اساس می‌توان معدن اسفوردی را در دامنه معادن تیپ کایرونا در نظر گرفت.

میزان ضریب چشم‌انداز برای معدن اسفوردی به طور متوسط برای همه نمونه‌های برداشت شده از نقاط مختلف معدن برابر با ۰/۵۳ و در محدوده امیدبخش است که به رغم عیار و ذخیره کمتر نسبت به معدن بزرگ و شناخته شده بایان اوبو چین ($K_{outl=0.2}$)، به دلیل دارا بودن محتوی عناصر بحرانی بیشتر ترکیب نزدیک‌تری به حالت ایده‌آل دارد که این امر موید چشم‌انداز مناسب و امیدوارکننده برای این معدن است.

بررسی ضریب چشم‌انداز و تطابق با واحدهای زمین‌شناسی و معدنی نشانگر آن است که بیشترین چشم‌انداز (با میانگین ضریب چشم‌انداز ۰/۶۷) مربوط به واحدهای سنگی میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول (زون متاسوماتیک) است که در مجاورت زون دربردارنده آهن و آپاتیت و عمدتا در حاشیه شمالی پیت معدن قرار دارند. بعد از آن زون‌های HEM - IRO - APA، APA، APA - IRO و همچنین ALT – MGR - RHY با اختلاف اندک وضعیت مطلوبی دارند.

نکته حایز اهمیت مشخص شده از بررسی‌ها آن است که علاوه بر پتانسیل بالای REEs به عنوان محصول جانبی در واحدهای اصلی معدنی در معدن اسفوردی (آپاتیت و آهن) به دلیل وجود کانی‌های مونازیت و زیرکن، واحدهای حاشیه پیت (به ویژه بخش میکروگرانیت تا ریولیت با آمفیبول) نیز به دلیل دارا بودن کانی آلانیت پتانسیل بسیار بالا و درخور توجهی دارند. از این‌رو بررسی‌های تفصیلی با حجم نمونه‌برداری بیشتر در این معدن با توجه به وجود دپوی باطله، باقی بودن بخش قابل توجهی از ذخیره، کم بودن گستردگی پیت استخراجی و قابلیت در نظر گرفتن طراحی جدید برای پیت و برنامه‌ریزی تولید با رویکرد عناصر نادر خاکی، می‌تواند چشم‌انداز مناسبی را برای این معدن به عنوان یک ذخیره امیدبخش قابل بهره‌برداری اقتصادی متصور کند.

۶- مراجع

[1] Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., and Kirchain, R. E. (2012). *"Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies"*. Environmental Science & Technology, 46(6): 3406-3414.

[2] Chen, Y., and Zheng, B. (2019). *"What Happens after the Rare Earth Crisis: A Systematic Literature Review"*. Sustainability, 11(5): 1288.

[3] Smith, M., Moore, K., Kavecsánszki, D., Finch, A. A., Kynicky, J., and Wall, F. (2016). *"From mantle to critical zone: A review of large and giant sized deposits of the rare earth elements"*. Geoscience Frontiers, 7(3): 315-334.

[4] Goodenough, K. M., Wall, F., and Merriman, D. (2018). *"The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations"*. Natural Resources Research, 27(2): 201-

216.

[5] Hoenderdaal, S., Espinoza, L. T., Marscheider-Weidemann, F., and Graus, W. (2013). *"Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?"*. Energy, 49: 344-355.

[6] Klyucharev, D. S., Volkova, N. M., and Comyn, M. F. (2013). *"The problems associated with using non-conventional rare-earth minerals"*. Journal of Geochemical Exploration, 133: 138-148.

[7] Seredin, V. V., and Dai, S. (2012). *"Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium"*. International Journal of Coal Geology, 94: 67-93.

[8] Krishnamurthy, N., and Gupta, C. K. (2015). *"Extractive metallurgy of rare earths"*. CRC press, Florida, pp. 808.

[9] Moldoveanu, G. A., and Papangelakis, V. G. (2012). *"Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. Desorption mechanism"*. Hydrometallurgy, 117: 71-78.

[10] Jaireth, S., Hoatson, D. M., and Miezitis, Y. (2014). *"Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia"*. Ore Geology Reviews, 62: 72-128.

[11] Balaram, V., (2019). *"Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact"*. Geoscience Frontiers, 10: 1285-1303.

[12] Cotton, S. (2013). *"Lanthanide and actinide chemistry"*. John Wiley & Sons, pp. 272.

[13] Jordens, A., Cheng, Y. P., and Waters, K. E. (2013). *"A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals"*. Minerals Engineering, 41: 97-114.

[14] Han, A., Ge, J., and Lei, Y. (2015). *"An adjustment in regulation policies and its effects on market supply: Game analysis for China's rare earths"*. Resources Policy, 46: 30-42.

[15] Tatar, A., and Alipour-Asll, M. (2020). *"Geochemistry of major, trace and rare earth elements in coals from the Tazareh mine, eastern Alborz coalfield, NE Iran"*. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. DOI: https://doi.org/10.1144/geochem2019-079.

[16] MetalPricesWebsite, (2019). *"Metals price"*. On the www.mineralprices.com.

[17] MarketsINsiderWebsite, (2019). *"Trend of iron ore price"*. On the https://markets.businessinsider.com/commodities/iron-ore-price.

[18] StatistaWebsite, (2019). *"Prediction of iron ore prices"*. On the https://www.statista.com/statistics/675857/average-prices-iron-ore-worldwide/.

[۱۹] مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۹۵؛ "**مناطق با توان کانه‌زایی عناصر نادر خاکی در ایران**". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[۲۰] نباتیان، ق.، قادری، ا.؛ ۱۳۹۱؛ "**کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ناحیه زنجان**". علوم زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۳، ص ۱۷۰-۱۵۷.

[21] Ghorbani, M. (2016). *"The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources"*. Society of Economic Geologists, pp. 572.

[22] 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, 281(3-4): 253-269.

[23] Daliran, F. (2002). *"Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatitites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites"*. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: a global perspective, 2: 303-320.

[24] Jami, M., Dunlop, A. C., and Cohen, D. R. (2007). *"Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran"*. Economic Geology, 102(6): 1111-1128.

[25] Torab, F., and Lehmann, B. (2007). *"Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology"*. Mineralogical Magazine, 71(3): 347-363.

[26] Williams, G., and Houshmand Zadeh, A. (1966). *"A petrological and genetic study of the Choghart iron ore body and the surrounding rocks"*. Geological Survey of Iran, pp. 18.

[27] Daliran, F., Stosch, H., Williams, P., Jamali, H., Dorri, M., Corriveau, L., and Mumin, A. (2010). *"Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran"*. Exploring for Iron oxide copper-gold deposits: Canada and Global analogues (L. Corriveau & H. Mumin, eds.). Geological Association of Canada Short Course Notes, 20: 143-155.

[28] Krneta, S., Ciobanu, C.L., Cook, N. J., Ehrig, K., and Kontonikas-Charos, A. (2017). *"Rare earth element behaviour in apatite from the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia"*. Minerals, 7(8): 135.

[29] Foerster, H., and Jafarzadeh, A. (1994). *"The Bafq mining district in central Iran; a highly mineralized*

Infracambrian volcanic field". Economic Geology, 89(8): 1697-1721.

[30] Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., and Fisher, N. (2002). *"Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type"*. Journal of Geochemical Exploration, 76(1): 45-69.

[31] Frietsch, R., and Perdahl, J.-A. (1995). *"Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types"*. Ore Geology Reviews, 9(6): 489-510.

[32] Goodenough, K., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E., Sadeghi, M., Schiellerup, H., and Müller, A. (2016). *"Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting"*. Ore Geology Reviews, 72: 838-856.

[33] Zhou, B., Li, Z., and Chen, C. (2017). *"Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies"*. Minerals, 7(11): 203.

[۳۴] سامانی، ب.؛ ۱۳۷۸؛ "**فلززائی عناصر نادر خاکی در پرکامبرین ایران مرکزی**". نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، دوره ۲۰، ص ۲۱-۱۵.

[۳۵] محمد تراب، ف.؛ ۱۳۸۹؛ "**بررسی‌های ژئوشیمی و رادیوایزوتوپی برای تعیین خاستگاه آپاتیت در ذخایر آهن و آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق**". بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دوره ۱۸، شماره سوم، ص ۴۱۸-۴۰۹.

[۳۶] مجیدی، س.ا.، لطفی، م.، امامی، م.ه.، نظافتی، ن.؛ ۱۳۹۶؛ "**ژنز کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت**: بر پایه مطالعه **آپاتیت های پهنه بافق-ساغند، ایران مرکزی**". فصلنامه علوم زمین، دوره ۱۰۵، ص ۲۴۴-۲۳۳.

[37] Mokhtari, M. A. A. (2015). *"Posht-e-Badam metallogenic block (central Iran): A suitable zone for REE mineralization"*. Central European Geology, 58(3): 199-216.

[38] Eslamizadeh, A., and Samanirad, S. (2016). *"Petrography and Geochemistry of the REE-bearing Fe-Oxide-Apatite Assemblages from the Sheytour Deposit East Central Iran"*. in 3rd International Conference on Recearch in Engineering, Science and Technology, Batumi, Georgia.

[39] Kryvdik, S., and Mykhaylov, V. (2001). *"The potential of the rare earth mineralization of Islamic republic Iran"*. GeologicalSurvayofIran.

[۴۰] دهقانزاده بافقی، ع.ا.، کوهساری، ا.، محمدتراب، ف.؛ ۱۳۹۷؛ "**بررسی زمین‌شیمی و کانه‌زایی آهن و آپاتیت برای شناخت عناصر خاکی نادر در کانسار گزستان منطقه بافق (استان یزد)**". بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۲۶، شماره چهارم، ص ۹۰۰-۸۸۵.

[41] Khoshnoodi, K., Behzadi, M., Gannadi-Maragheh, M., and Yazdi, M. (2017). *"Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran"*. Geologia Croatica, 70(1): 53-69.

[۴۲] ولی‌زاده، م.، شریفی، آ.؛ ۱۳۷۷؛ "**بررسی مقدماتی عناصر خاکی نادر (*REEs*) در آپاتیهای کانسار آهن-آپاتیت اسفوردی**". بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دوره ۶، شماره دوم، ص ۸۴-۷۳.

[43] Torab, F. M. (2008). *"Geochemistry and metallogeny of magnetite apatite deposits of the Bafq mining district, Central Iran"*. Clausthal University of Technology, pp. 131.

[44] Moore, F., and Modabberi, S. (2003). *"Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence"*. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 14(3): 259-269.

[۴۵] ایرانمنش، س.، طالع‌فاضل، ا.، هزاره، م.، مجیدی، ا.؛ ۱۳۹۸؛ "**بررسی رشد بلورهای مونازیت و تامین عناصر خاکی نادر از کانی آپاتیت**: مطالعه موردی **در کانسار آهن-آپاتیت اسفوردی (شمال شرق بافق)**". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دوره ۲۷، شماره سوم، ص ۷۰۶-۶۹۵.

[46] Khalajmasoumi, M., Sadeghi, B., Carranza, E. J. M., and Sadeghi, M. (2017). *"Geochemical anomaly recognition of rare earth elements using multi-fractal modeling correlated with geological features, Central Iran"*. Journal of Geochemical Exploration, 181: 318-332.

[47] Daliran, F., Stosch, H.-G., and Williams, P. J. (2009). *"A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apetite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran"*. In 10th Biennial Meeting of the the SGA, Townsville, QLD, Australia, 623-625.

[48] Taghipour, S., Kananian, A., Mackizadeh, M. A., and K Somarin, A. (2015). *"Skarn mineral assemblages in the Esfordi iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Central Iran"*. Arabian Journal of Geosciences, 8(5): 2967-2981.

[۴۹] محمدی‌زاده، م.، کوهساری، ا.؛ ۱۳۹۴؛ "**مطالعه منابع عناصر نادر خاکی با هدف امکان سنجی استخراج این عناصر در ایران**". دومین همایش ملی زمین شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.

[50] Seredin, V. (2010). *"A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores"*. Geology of Ore Deposits, 52(5): 428-433.

[51] Pan, J., Zhou, C., Liu, C., Tang, M., Cao, S., Hu, T., Ji, W., Luo, Y., Wen, M., and Zhang, N. (2018). *"Modes of occurrence of rare earth elements in coal fly ash: a case study"*. Energy & Fuels, 32(9): 9738-9743.

[52] Manurung, H., Rosita, W., Anggara, F., Petrus, H., and Bendiyasa, I. (2020). *"Leaching of REY from Non-magnetic Coal Fly Ash with Acetic Acid"*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 778(1): 012005.

[۵۳] شکاریان، ی.، هزارخانی، ا.، شهریور قوزوللو، ج.، نجفی انارکی، ن.؛ ۱۳۹۳؛ **"بررسی ذخایر عناصر نادر خاکی در دنیا** و **ایران، با نگاهی** ویژه **به معدن سنگ آهن چغارت"**. سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین، تهران، ایران.

[54] Li, Z., Li, X., Zhang, L., Li, S., Chen, J., Feng, X., Zhao, D., Wang, Q., Gao, Z., and Xiong, B. (2019).*"Partitioning of rare earth elements and yttrium (REY) in five coal-fired power plants in Guizhou, Southwest China"*. Journal of Rare Earths.

[55] Haghipour, A. (1964).*"Iron ore deposits in Central Iran, in relation to structural geology and metamorphism, scapolitization and albitization"*. Journal of Iranian Petroleum Institute, 76: 1-9.

[56] Jami, M. (2006). *"Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, Central Iran"*. University of New South Wales.

[57] Stosch, H.-G., Romer, R.L., Daliran, F., and Rhede, D. (2011).*"Uranium–lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran"*. Mineralium Deposita, 46(1): 9-21.

[58] Kremenetsky, A. A., Shaderman, F. I., Kopneva, L. A., and Levchenko, E. N. (2004).*"Criteria of Online Evaluation of Profit? ability of REE?Bearing Mantles of Weathering, Razvod. Okhr"*. Nedr, 3: 19-24.

[59] García, M. V. R., Krzemień, A., del Campo, M. Á. M., Álvarez, M. M., and Gent, M. R. (2017).*"Rare earth elements mining investment: It is not all about China"*. Resources Policy, 53: 66-76.

[60] Hower, J. C., Groppo, J. G., Joshi, P., Preda, D. V., Gamliel, D. P., Mohler, D. T., Wiseman, J. D., Hopps, S. D., Morgan, T. D., and Beers, T. (2020).*"Distribution of Lanthanides, Yttrium, and Scandium in the Pilot-Scale Beneficiation of Fly Ashes Derived from Eastern Kentucky Coals"*. Minerals, 10(2): 105.

[61] Cardoso, C. E., Almeida, J. C., Lopes, C. B., Trindade, T., Vale, C., and Pereira, E. (2019).*"Recovery of rare earth elements by carbon-based nanomaterials—a review"*. Nanomaterials, 9(6): 814.

[62] Dutta, T., Kim, K.-H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B.-H., Deep, A., and Yun, S.-T. (2016).*"Global demand for rare earth resources and strategies for green mining"*. Environmental Research, 150: 182-190.

[63] Thompson, M., and Howarth, R. J. (1978).*"A new approach to the estimation of analytical precision"*. Journal of Geochemical Exploration, 9(1): 23-30.

[64] Fisher, R. A., and Tippett, L. H. C. (1928).*"Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample"*. Cambridge University Press, 180-190.

[65] Davis, J. C. (2002). *"Statistics and data analysis in geology"*. John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 638.

[66] Deutsch, and Journel, (1998). *"GSLIB:* Geostatistical Software Library and Users Guide"*. Oxford University Press, pp. 369.

[67] Hawkes, H. E., and Webb, J. S. (1979). *"Geochemistry in mineral exploration"*. Academic Press, New York, pp. 657.

[68] Boynton, W. V. (1984). *"Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies"*. Developments in Geochemistry, Elsevier, 63-114.

[69] Thompson, R. (1982).*"Magmatism of the British Tertiary volcanic province"*. Scottish Journal of Geology, 18(1): 49-107.

[70] Sverjensky, D. A. (1984).*"Europium redox equilibria in aqueous solution"*. Earth and Planetary Science Letters, 67(1): 70-78.

[71] Wood, S. A. (1990).*"The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium: 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters"*. Chemical Geology, 82: 159-186.

[72] Rollinson, H. R. (1993).*"Using geochemical data: evaluation"*. Presentation, Interpretation, pp. 352.

[73] Edfelt, Å. (2007). *"The Tjårrojåkka apatite-iron and Cu (-Au) deposits, northern Sweden: products of one ore forming event"*. Luleå Tekniska Universitet, pp. 164.

[74] Koeppenkastrop, D., and De Carlo, E. H. (1993).*"Uptake of rare earth elements from solution by metal oxides"*. Environmental Science & Technology, 27(9): 1796-1802.

[75] Jinjie, Y., Qi, Z., Jingwen, M., and Shenghao, Y. (2007).*"Geochemistry of Apatite from the Apatite-rich Iron Deposits in the Ningwu Region, East Central China"*. Acta Geologica Sinica-English Edition, 81(4): 637-648.

[76] Sha, L.-K., and Chappell, B. W. (1999).*"Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis"*.

Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(22): 3861-3881.

[77] Samani, B. A. (1988). *"Metallogeny of the Precambrian in Iran"*. Precambrian Research, 39(1-2): 85-106.

[78] USGS, (2019). *"Rare earth element mines, deposits, and occurrences"*. On the https://mrdata.usgs.gov/ree/.

[79] Zepf, V. (2013). *"Rare earth elements: a new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets"*. Springer, pp. 172.

Imam Khomeini International University
Vol. 6, No. 3, Autumn 2021, pp. 24-27

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/JMRE.2020.12498.1383
Research Paper

Primary Evaluation of Rare Earth Elements Status of Esfordi Phosphate Mine Using Outlook Coefficient Method

Shamseddin Meigooni M.[1], Lotfi M.[2*], Afzal P.[3], Nezafati N.[4], Kargar Razi M.[5]

1- Ph.D student, Dept. of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
d3msme@gmail.com

2- Associate Professor, Dept. of Geology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mo_lotfi@iau-tnb.ac.ir

3- Associate Professor, Dept. of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
peymanafzal@gmail.com

4- Associate Professor, Dept. of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
nima.nezafati@gmail.com

5- Assistant Professor, Dept. of Chemistry, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
mkargarrazi@yahoo.com

(Received: 14 Feb. 2020, Accepted: 23 Jul. 2020)

Abstract: The studied area in this research is the Esfordi phosphate mine in the Bafq metallogenic state, which apatite, magnetite and hematite are its main mineralization. As one of the high phosphorus iron – apatite mine in the region, this mine contains significant mineralization of rare earth elements with a maximum and average grade of 1.7% and 0.5% (as monazite, zircon and allanite minerals in apatite), and has LREE enrichment and Eu negative anomaly. In order to primary assessment of REEs concentration status in study area, the outlook coefficient of REEs (K_{outl}), which is based on the classification of REEs by the level of industry demand, was used. This coefficient is the ratio of the amount of critical REEs (Dy, Tb, Nd, Y, Er and Eu) to the amount of surplus REEs (Ce, Ho, Tm, Yb and Lu), which can be used to investigate mineralization of different types in newly discovered deposits and active mines. The results indicate the highest outlook coefficient (K_{outl}=0.67) for microgranite to rhyolite with amphibole unit, and also promising average outlook coefficient of 0.53. The Esfordi mine despite the lower grade, it is closer to the ideal composition compared to China's Bayan Obo mine (K_{outl}=0.2). Thus, can portend a bright future for REEs in this mine, if focus on exploration of these elements and further geochemical and mineralogical investigations are carried out.

Keywords: Rare Earth Elements (REEs), Outlook coefficient of REEs (K_{outl}), Esfordi mine, Bafq metallogenic state.

CC BY

INTRODUCTION

Consumption of rare earth elements is increasing alongside with the growth of technology so they are considered as strategic metals of the present age and in this way, the huge profitability of this industry will be effective, too. In Iran, mineralization of rare earth elements is found in various geological environments, among which the iron-apatite type in Central Iran, has been introduced as a type with high potential based on several main factors including the type of mineralization, the amount of production support, the volume and capacity of mining operations, the amount of dump volume and the capacity of processing operations [1].

Due to the high costs and risk of exploration of rare earth elements, in many areas with potential, the enough attention is not paid to the exploration of these elements and this leads to the neglect of valuable and strategic resources. Therefore, it is very useful to use a method that can provide an overview of the relative status of the concentration and the content composition of REEs in the study area in the early stages with a small amount of data. In this regard, the "Outlook coefficient of Rare Earth Elements" method [2], which classifies these elements based on industry demand, market situation, composition and type of available REEs can be useful.

Esfordi phosphate mine, as one of the most important iron and apatite mineralization in Bafq region as well as in Iran, has a high and significant potential of rare earth elements [3-5]. In this research, in addition to field, statistical, geochemical and microscopic studies, the Outlook coefficient of Rare Earth Elements is calculated using surface samples taken from the Esfordi mine area and compared with known mines.

METHODOLOGY AND APPROACH

In order to evaluate the concentration of REEs in all parts of the studied mine, 40 samples were taken from all identified units (ore and other rocks in the area) and analyzed by the approach of studying REEs by ICP-MS. With the aim of understanding the status and general trend of grade distribution, statistical and geochemical studies were performed on the data and in the next step, to evaluate and recognize the economic value and prospects of REEs mineralization and preliminary evaluation of the concentration of these elements in Esfordi mine, the outlook coefficient of Rare Earth Elements method was used.

According to the current market trends and forecasts of supply and demand for the use of rare earth elements, these elements can be classified into three groups: critical, excess and uncritical [2,6,7]. Based on this, it is clear that the demand for Dy, Tb, Nd, Y, Er and Eu exceeds its production and these 6 elements can be considered as critical or potentially critical rare earth elements [2,6-9]. Indeed, this probable crisis can be caused because of inappropriate supply and imbalance of supply and demand. In contrast, the elements Ce, Ho, Tm, Yb and Lu have production (supply) several times more than industry consumption (demand), which are classified in the group of excess elements. Other rare earth elements including La, Pr, Sm and Gd are considered as uncritical elements due to their relative balance between supply and demand [2,6,7,9].

Based on the mentioned points and considering the current market trends and forecasts, ore with rare earth elements should have the ideal combination of the maximum possible critical REEs and the lowest possible excess REEs. Therefore, the ratio of critical REEs in total of all rare earth elements to the amount of excess REEs in total of all rare earth elements can be used as an indicator for initial estimation of mineral quality and relatively simple and fast initial grading of each type of REEs deposit which is defined as REEs outlook coefficient with relation 1. The higher the coefficient, the more promising the REEs ore is compared to the industrial potential value [2,6,7,10,11].

$$K_{outl} = \frac{\frac{Nd+Eu+Tb+DY+Er+Y}{\Sigma REE}}{\frac{Ce+Ho+Tm+Yb+Lu}{\Sigma REE}} \quad (1)$$

In order to classify the outlook coefficients and to provide a comparative evaluation of the composition of REEs deposits related to different genetic types, a graph is used in which the percentage of critical elements in the total REEs (REEdef) is on the Y axis and the outlook coefficient (Koutl) is on the X axis (Figure 1). On this chart, deposits and mines with different genetic types of the world are classified into three communities: non-promising (I), promising (II) and very promising (III) [2].

FINDINGS AND CONCLUSIONS

In order to obtain information about the status and general trend of data distribution, univariate statistical studies were performed on the data and the outlook coefficient was calculated based on Equation 1. For a more comprehensive study and to avoid focusing only on high-grade samples, the calculated values of the outlook coefficient besides the concentration of ∑REEs were averaged (Table 1). The study of outlook coefficient and adoption with geological and mineral units shows that the highest prospect (with average prospect coefficient of 0.67) is related to microgranite to rhyolite with amphibole (metasomatic zone) units (MGR-RHY-AMP) which is adjacent to the zone containing iron and apatite which is mainly located in the northern margin of the pit. After that, the iron-apatite (IRO-APA), hematite and apatite (HEM-APA), apatite-iron (APA-IRO) and altered zone (ALT-MGR-RHY) zones are in a suitable situation with a small difference. The average outlook coefficient for the Esfordi mine for all samples taken from different parts of the mine is 0.53, in the promising range (according to Figure 1), which despite the lower concentration and reserves than Bayan Obo, the large and well-known mine of China (Koutl = 0.2), due to having more critical element content, has a closer composition to the ideal state, which confirms a suitable and promising prospect for this mine.

Table 1. Units containing REEs along with the average concentration of ∑REEs and their average outlook coefficients

Geological units	Average ∑REEs (ppm)	Average outlook coefficients
(MGR – RHY - AMP)	6993.56	0.67
(IRO - APA)	8199.85	0.53
(HEM - APA)	2895.23	0.52
(APA - IRO)	8635.92	0.50
(ALT-MGR-RHY)	1188.35	0.43

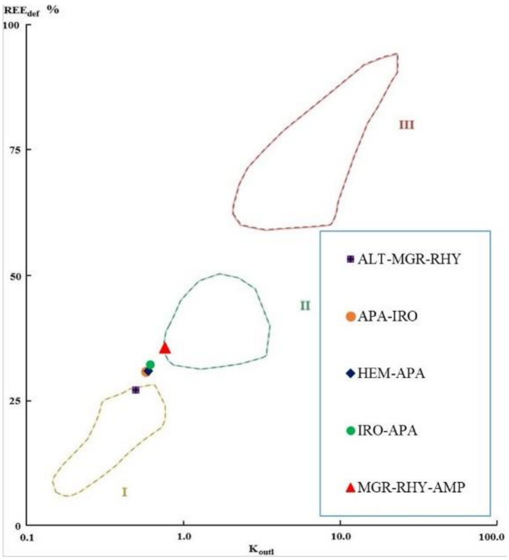


Figure 1. Classification of rare earth elements of Esfordi mine based on REEs outlook coefficient

According to studies, the important point is that in addition to the high potential of REEs as a by-product in the apatite and iron bearing units in the Esfordi mine due to the presence of monazite and zircon minerals, also the pit margin units (especially microgranite to rhyolite with amphibole) based on having allanite minerals, have a very high and significant potential. Thus, detailed studies with more sampling volume in

this mine due to the existence of tailings dump, remaining a significant part of the reserve, small expansion pit and the ability of considering a new design for the pit and production planning with the approach of rare earth elements, can provide a good prospect for this mine as a promising economically exploitable reserve.

REFERENCES

[1] Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI), (2016). Areas with potential of rare earth elements mineralization in Iran.

[2] Seredin, V., (2010). *"A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores"*. Geology of Ore Deposits, 5(525): 428-433.

[3] Jami, M., Dunlop, A.C., and Cohen, D.R., (2007). *"Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran"*. Economic Geology, 102(6): 1111-1128.

[4] Taghipour, S., Kananian, A., Mackizadeh, M.A., and K Somarin, A., (2015). *"Skarn mineral assemblages in the Esfordi iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Central Iran"*. Arabian Journal of Geosciences, 8(5): 2967-2981.

[5] Torab, F., and Lehmann, B., (2007). *"Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology"*. Mineralogical Magazine, 71(3): 347-363.

[6] Li, Z., Li, X., Zhang, L., Li, S., Chen, J., Feng, X., Zhao, D., Wang, Q., Gao, Z., and Xiong, B., (2019). *"Partitioning of rare earth elements and yttrium (REY) in five coal-fired power plants in Guizhou, Southwest China"*. Journal of Rare Earths, https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.12.013.

[7] Seredin, V.V., and Dai, S., (2012). *"Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium"*. International Journal of Coal Geology, 94: 67-93.

[8] García, M.V.R., Krzemień, A., del Campo, M.Á.M., Álvarez, M.M., and Gent, M.R., (2017). *"Rare earth elements mining investment: It is not all about China"*. Resources Policy, 53: 66-76.

[9] Hower, J.C., Groppo, J.G., Joshi, P., Preda, D.V., Gamliel, D.P., Mohler, D.T., Wiseman, J.D., Hopps, S.D., Morgan, T.D., and Beers, T., (2020). *"Distribution of Lanthanides, Yttrium, and Scandium in the Pilot-Scale Beneficiation of Fly Ashes Derived from Eastern Kentucky Coals"*. Minerals, https://doi.org/10.3390/min10020105.

[10] Tatar, A., and Alipour-Asll, M., (2020). *"Geochemistry of major, trace and rare earth elements in coals from the Tazareh mine, eastern Alborz coalfield, NE Iran"*. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, https://doi.org/10.1144/geochem2019-079.

[11] Manurung, H., Rosita, W., Anggara, F., Petrus, H., and Bendiyasa, I., (2020). *"Leaching of REY from Non-magnetic Coal Fly Ash with Acetic Acid"*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 778(1): 012005.