

بررسی‌های ژئوشیمی و رادیوایزوتوپی برای تعیین خاستگاه آپاتیت در ذخایر آهن و آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق

فرهاد محمدتراب*

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله: ۸۸/۸/۲، نسخه نهایی: ۸۸/۱۲/۲۵)

چکیده: ذخایر آهن-آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق حاوی مقادیر بالایی از عناصر نادر خاکی بوده و همراه با دگرسانی گسترده در سنگ دیواره‌ی ناشی از فرآیندهای گسترده‌ی گرمایی در کامبرین زیرین شکل گرفته است. ژئوشیمی آپاتیت و عناصر نادر خاکی همراه با بررسی‌های ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd در این ذخایر نشان می‌دهد که آپاتیت موجود در این ذخایر در اثر فرآیندهای گرمایی و شسته شدن فسفریت‌های رسوبی هم عصر و یا قدیمی‌تر و نهشته شدن دوباره‌ی آن‌ها به صورت رگه‌های مختلف به همراه ذخایر آهن شکل گرفته است. این فرآیندهای گرمایی گسترده در منطقه‌ی بافق در اثر نفوذ توده‌های آذرین گرانیته و به صورت محلی دیوریتی در زمان کامبرین زیرین رخ داده است که باعث کانی‌سازی‌های گسترده‌ای از آهن-آپاتیت و برخی کانی‌های نادر خاکی همراه با آپاتیت و تشکیل هاله‌های گسترده‌ی دگرسانی (سدیک-پتاسیک) ناشی از برهم‌کنش گرمایی‌ها و سنگ در برگیرنده شده است.

واژه‌های کلیدی: کانسارهای آهن-آپاتیت، منطقه‌ی معدنی بافق، ژئوشیمی، عناصر نادر خاکی، بررسی‌های رادیوایزوتوپی.

مقدمه

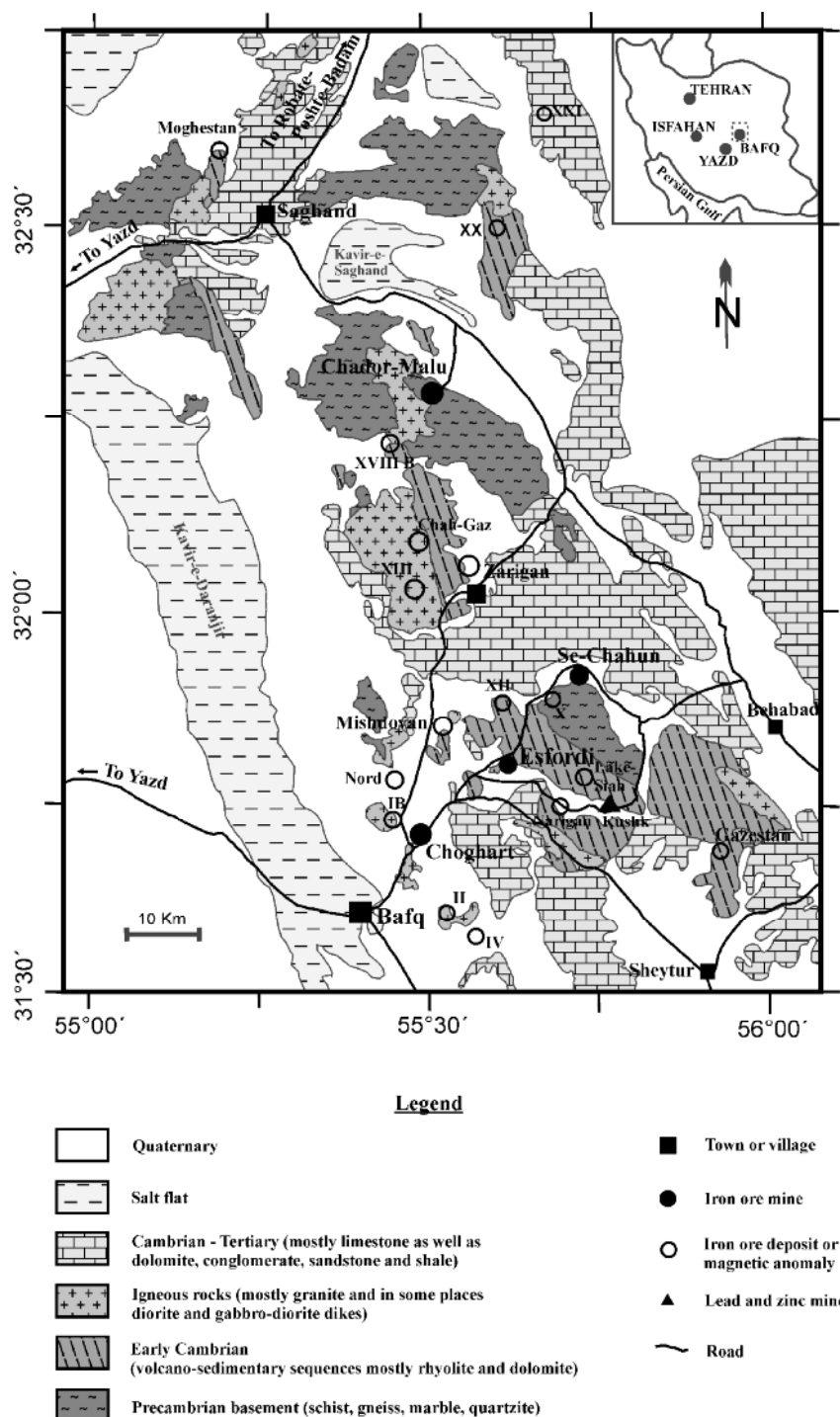
محلی با ترکیب گابرو-دیوریت نیز در منطقه مشاهده می‌شوند. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه بافق و موقعیت کانسارها و بی‌هنجاری‌های اصلی را نشان می‌دهد [۲، ۱]. در اغلب کانسارهای آهن و آپاتیت منطقه بافق، دگرسانی شدید سنگ دیواره مشاهده می‌شود. شدت دگرسانی در بعضی از نقاط به حدی است که ترکیب سنگ‌شناسی اولیه کاملاً محو شده است به گونه‌ای که این سنگ‌های محلی را دگرنهادی^۱ نامیده‌اند. نوع و شدت دگرسانی بستگی به ترکیب اولیه سنگ دیواره، ترکیب محلول کانه‌ساز و عمق قرارگیری دارد. ویژگی دگرسانی همراه با کانسارهای آهن موجود، نشانه‌ای بر نقش فرآیندهای گرمایی و جان‌شینی‌های دگرنهادی در تشکیل ذخایر این منطقه

منطقه‌ی معدنی بافق حاوی ذخایر غنی از آهن و آپاتیت با مجموع بیش از ۱/۵ میلیارد تن ذخیره‌ی زمین‌شناسی است. واحدهای سنگی دربرگیرنده‌ی کانی‌سازی همزمانی‌های آتشفشانی-رسوبی به سن کامبرین زیرین است. سنگ‌های آتشفشانی موجود اساساً ریولیتی، ریوداسیتی بوده و در بخش-هایی از منطقه به صورت بازالت‌های اسپیلیتی محلی نیز دیده می‌شوند. جنس واحدهای رسوبی این همزمانی بیشتر دولومیتی است. در بعضی از مناطق واحدهای آتشفشانی-رسوبی با نفوذی‌های کامبرین زیرین قطع شده‌اند. این سنگ‌های نفوذی بیشتر ترکیبی گرانیته داشته ولی برخی توده‌های نفوذی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۸۱۲۲۵۲۱ (۰۳۵۱)، نمابر: ۸۲۱۰۹۹۵ (۰۳۵۱)، پست الکترونیکی: fmtorab@yazduni.ac.ir

دگرسانی پتاسی (تشکیل فلدسپات پتاسیم و سریسیت) و اغلب در مناطق سطحی‌تر، و دگرسانی ترمولیت- آکتینولیت نیز ناشی از دگرنهادی سنگ‌های دولومیتی محلی در منطقه دیده می‌شوند [۳].

است. دگرسانی سنگ دیواره در این کانسارها از یک الگوی خاص پیروی می‌کند به گونه‌ای که دگرسانی‌های مشاهده شده در مقیاس ناحیه‌ای به شکل دگرسانی سدیک (تشکیل آلبیت) و اغلب در اعماق بیشتر بوده و دگرسانی‌های مشاهده شده در مقیاس محلی و در ارتباط نزدیک با منطقه‌ی کانی‌سازی از نوع



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی بافق و موقعیت کانسارها و بی‌هنجاری‌های اصلی [۲،۱].

گرمایی گسترده، سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه را تا کیلومترها تحت تأثیر دگرسانی قرار داده است به گونه‌ای که ترکیب اصلی سنگ‌های در برگیرنده به ویژه نزدیک به مناطق اصلی کانی‌سازی به کلی دستخوش تغییر شده است، لذا یکسان بودن نوع الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در کانه و سنگ‌های آتشفشانی در برگیرنده که دگرسانی آن‌ها حتی تا کیلومترها دورتر از زون کانی‌سازی گسترش یافته، امری عادی است و قادر نخواهد بود به‌عنوان یک روش منطقی در تعیین خاستگاه این ذخایر قلمداد شود.

امروزه با استفاده از آنالیز ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd و با علم به اینکه با وجود متحرک بودن عناصر نادر خاکی در محیط‌های گرمایی، ایزوتوپ‌های آن‌ها دستخوش تغییر نمی‌شوند، به راحتی می‌توان به خاستگاه این ذخایر دست یافت [۱۰]. در این مقاله سعی شده است تا با بهره‌گیری از روش‌های ژئوشیمیایی و بررسی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو Sm-Nd به ردگیری خاستگاه آپاتیت‌های موجود به‌عنوان اصلی‌ترین کانی در برگیرنده‌ی عناصر نادر خاکی در منطقه پرداخته شود.

روش بررسی

بیش از ۱۰۰ نمونه‌ی سطحی و عمیق (مغزه‌های حفاری) از کانسنگ (مگنتیت-آپاتیت) و سنگ‌های آذرین در برگیرنده از سه معدن چغارت، چادرملو و اسفوردی طی چند مرحله کار صحرایی برداشت شدند. با تهیه‌ی بیش از ۴۰ مقطع نازک و صیقلی در دانشگاه فنی کلاستفال آلمان، نمونه‌ها مورد بررسی دقیق سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری قرار گرفتند. برای بررسی‌های ژئوشیمیایی، آنالیز دستگاهی با پرتو X فلئوئورسان (XRF) برای شناسایی اجزای اصلی سازنده‌ی نمونه‌ها در سازمان زمین‌شناسی آلمان (هانوفر) و آنالیزهای ICP و INAA برای شناسایی عناصر فرعی، و نادرخاکی در آزمایشگاه Actlabs کانادا انجام گرفت [۳]. تعدادی از نمونه‌ها برای آنالیز روی کانی آپاتیت انتخاب شده و با دستگاه ریزپردازنده‌ی الکترونی (EMPA) در دانشگاه فنی کلاستفال آلمان تجزیه شدند. تجزیه‌های ایزوتوپی Sm-Nd روی ۸ نمونه در آزمایشگاه Isotope Geochronology and Geochemistry انستیتو Precambrian Geology and Geochronology آکادمی علوم سنپترزبورگ روسیه صورت گرفت.

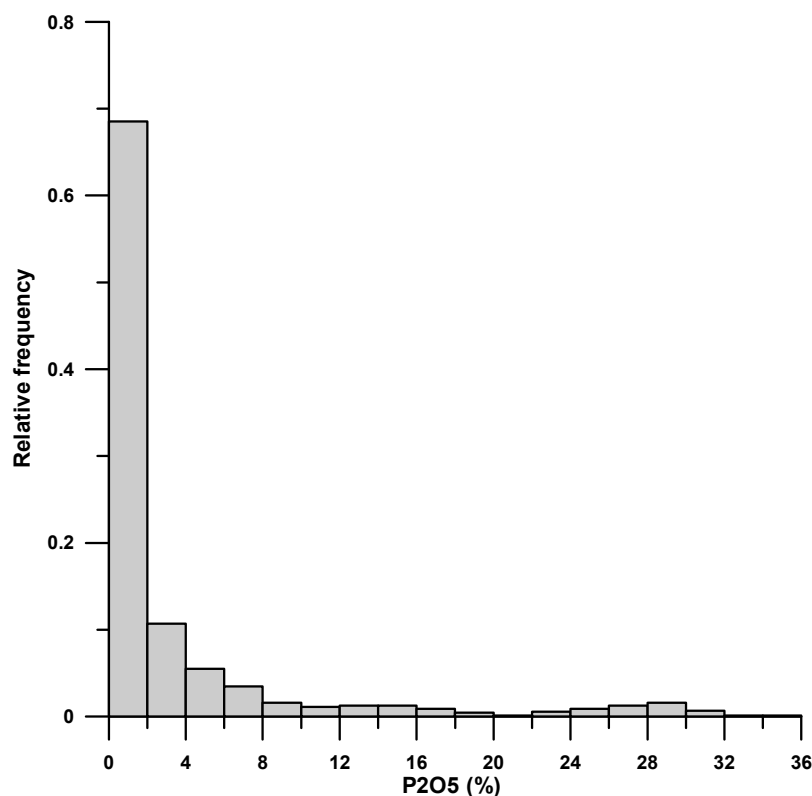
کانه‌ی اصلی آهن در این ذخایر به شکل مگنتیت و گاهی هماتیت (هماتیت اولیه و یا ثانویه به شکل مارتیت) بوده و آپاتیت به‌عنوان کانی فرعی در اغلب ذخایر مشاهده می‌شود. کانه‌های سولفیدی در این ذخایر یا وجود نداشته‌اند و یا کم‌ابند که می‌تواند دلیلی بر تشکیل این ذخایر در شرایط کاملاً اکسایشی باشد. میزان آپاتیت در این ذخایر بسیار متنوع است بگونه‌ای که معدن چغارت با میانگین عیار آهن ۶۰ درصد حاوی ۰/۹۲ درصد P_2O_5 بوده و معدن چادرملو با ۵۵ درصد آهن حاوی ۲/۱۵ درصد P_2O_5 است. این در حالی است که میزان P_2O_5 در برخی ذخایر از جمله کانسار اسفوردی به‌طور متوسط به ۱۳/۹ درصد می‌رسد، بگونه‌ای که در این معدن و کانسار گزستان رگه‌های خالصی از آپاتیت با بیش از ۳۵ درصد P_2O_5 یافت می‌شود [۳]. اولین سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که چرا توزیع آپاتیت در ذخایر مختلف این منطقه متفاوت است و فسفر در این ذخایر از عیار نسبتاً ثابتی برخوردار نیست؟

درخصوص چگونگی تشکیل این ذخایر نظرهای متفاوتی از جمله ماگمایی و آتشفشانی [۴،۲]، با خاستگاه ماگمایی کربناتیتی [۵،۲]، گرمایی [۷،۶،۳] و بالاخره خاستگاه BIF [۸] ارائه شده‌اند، ولی تاکنون خاستگاه دقیقی برای عناصر اصلی سازنده، یعنی Fe و P، مشخص نشده است. در سال‌های گذشته با فرض نامتحرک بودن عناصر نادر خاکی از الگوی توزیع این عناصر در کانسنگ و یا کانی آپاتیت برای ردیابی خاستگاه ذخایر مگنتیت-آپاتیت استفاده شده است [۹،۶]. برخی از پژوهشگران از تشابه الگوی توزیع این عناصر و سنگ‌های آتشفشانی در برگیرنده استفاده کرده و آن را دلیلی بر ماگمایی بودن این نوع ذخایر دانسته‌اند [۹]، حال آنکه این عناصر می‌توانند در بسیاری از محیط‌ها به خصوص محیط‌های گرمایی کاملاً متحرک باشند. از طرف دیگر وجود هاله‌های گسترده‌ی دگرسانی در این ذخایر از جمله دگرسانی سدیک (آلبیتی شدن) در مقیاس ناحیه‌ای و دگرسانی پتاسی و سربستی، و اکتینولیتی شدن در مقیاس محلی و وجود ساختارهای رگه‌ای مگنتیت و آپاتیت در پیرامون توده‌های معدنی موجود، مؤید نقش فرآیندهای گرمایی و جانیشینی‌های دگرزه‌ای در تشکیل این ذخایر است [۳]. این فرآیندهای

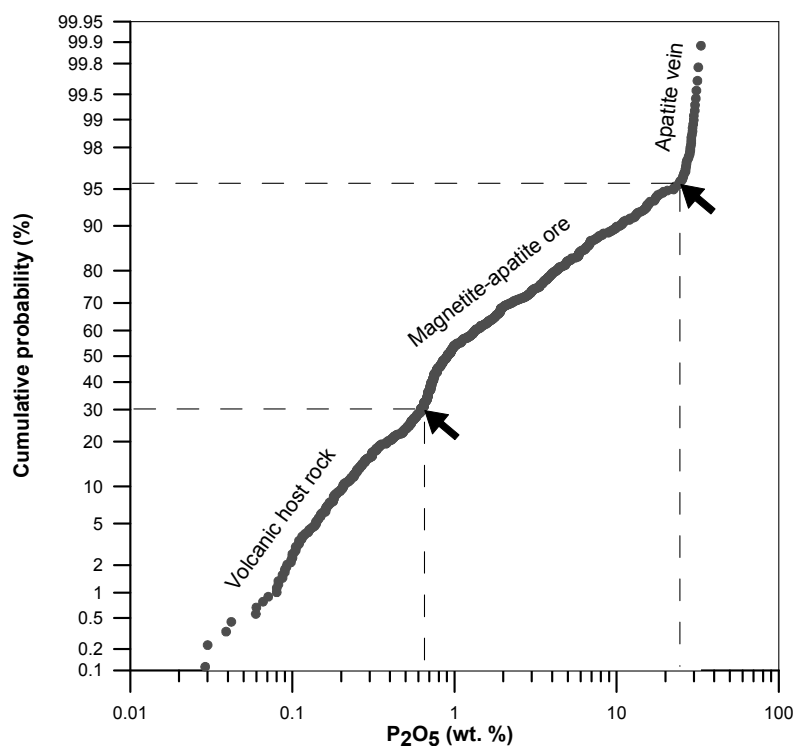
بررسی‌های ژئوشیمی

توزیع فسفر در ذخایر آهن منطقه‌ی بافق نشان می‌دهد که این عنصر از پراکندگی یکسان پیروی نمی‌کند و حتی توزیع آن در درون یک کانسار نیز موید وجود انبوهه‌های ژئوشیمیایی است. به‌عنوان نمونه، توزیع فراوانی P_2O_5 در معدن فسفات اسفوردی، به‌عنوان یکی از معادن با میزان فسفر بالا در منطقه، مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ نمودار توزیع فراوانی P_2O_5 را در ۸۹۰ نمونه از مغزه‌های حفاری این معدن نشان می‌دهد. این نمودار دلالت بر نمایی بودن مدل توزیع و چند مجموعه‌ای بودن اطلاعات دارد. برای شناخت بهتر چگونگی انبوهه‌ای آماری، توزیع [انبوهی] مقادیر در مقیاس لگاریتمی رسم شد (شکل ۳). این نمودار نشان می‌دهد که میزان فسفر در سنگ‌های مختلف به‌صورت گسترده‌ای از کمتر از ۰.۶۵ درصد P_2O_5 در سنگ‌های دربرگیرنده (سنگ‌های آتشفشانی) تا بیش از ۲۵ درصد (حداکثر تا ۳۵ درصد P_2O_5) در رگه‌های آپاتیت تغییر می‌کند و سه مجموعه‌ی ژئوشیمیایی را نمایان می‌سازد. این نمودار نشان می‌دهد که توزیع فسفر در کانسنگ، به ویژه در

رگه‌های خالص آپاتیت با توزیع فسفر موجود در سنگ‌های آذرین (سنگ‌های آتشفشانی دربرگیرنده) اساساً متفاوت است. آنالیز ژئوشیمیایی آپاتیت‌ها با ریزپردازنده‌ی الکترونی (EMPA) (جدول ۱) نشان داد که آپاتیت‌های یاد شده از نوع فلورآپاتیت با مقدار جزئی یون کلر و هیدروکسیل است. با توجه به جدول ۱ میزان عناصر نادر خاکی (La_2O_3 و Ce_2O_3) در آپاتیت‌ها نسبتاً بالا است. میزان Sr در این آپاتیت‌ها کمتر از ۷۰۰ ppm (۰.۰۷٪) است لذا تشکیل آن‌ها را از یک ماگمای کربناتیته نفی می‌کند، زیرا بررسی‌های متعددی نشان داد که آپاتیت‌های وابسته به ذخایر کربناتیته بیش از ۲۰۰۰ ppm Sr دارند [۱۲]. از طرف دیگر شکل ۴ نشان می‌دهد که با توجه به نمودار مرجع از منبع [۱۳] و آنالیزهای انجام شده EMPA، آپاتیت‌های منطقه بافق شباهت زیادی به فسفریت-های رسوبی از نظر محتوای Mn-Sr دارند و می‌توانند از فسفریت‌های رسوبی هم عصر و یا قدیمی‌تر ریشه گرفته باشند. این مسئله با بررسی‌های ایزوتوپی که در پی می‌آید به اثبات رسیده است.



شکل ۲ نمودار ستونی فراوانی P_2O_5 در ۸۹۰ نمونه از مغزه‌های حفاری در معدن اسفوردی (داده‌ها از آنالیزهای قبلی انجام شده روی مغزه‌های حفاری معدن گرفته شده است).

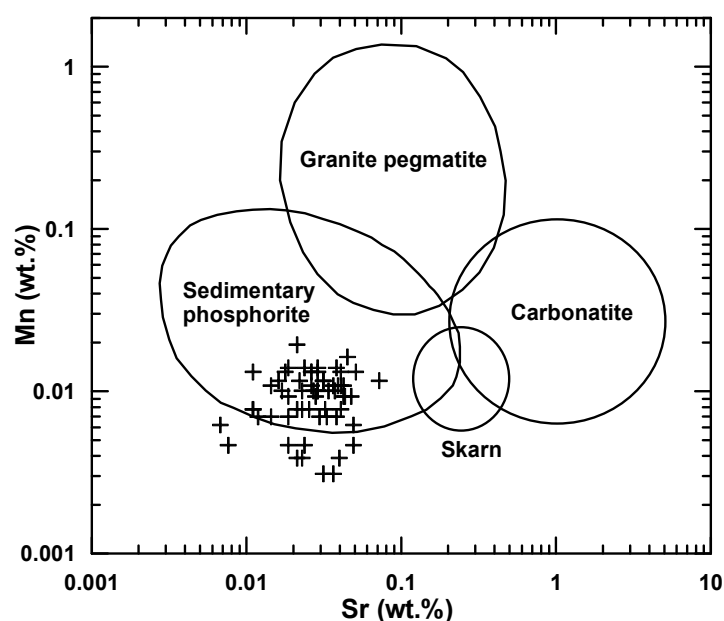


شکل ۳ نمودار فراوانی انبوهی توزیع P_2O_5 در مقیاس لگاریتمی از نمونه‌های مغزه‌های حفاری معدن اسفوردی.

جدول ۱ نمونه ای از نتیجه آنالیز شیمیایی آپاتیت‌های منطقه بافق با ریزپردازنده ی الکترونی (EMPA) (تمامی غلظت ها بر حسب درصد است).

Sample	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
CaO	۵۵٫۲۲	۵۳٫۹۷	۵۵٫۰۷	۵۴٫۶۵	۵۴٫۲۶	۵۴٫۸۲	۵۴٫۷۶	۵۴٫۶۴	۵۴٫۷۱	۵۴٫۷۶
P_2O_5	۴۱٫۴۹	۴۱٫۲۳	۴۱٫۵۷	۴۱٫۶۵	۴۰٫۲۴	۴۰٫۹۲	۴۱٫۰۰	۴۰٫۸۰	۴۰٫۸۰	۴۱٫۰۴
Na_2O	۰٫۲۴	۰٫۳۹	۰٫۲۸	۰٫۲۷	۰٫۴۱	۰٫۳۱	۰٫۴۰	۰٫۳۳	۰٫۳۰	۰٫۲۵
MgO	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۱۳
SiO_2	۰٫۱۳	۰٫۲۴	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۲۹	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۳	۰٫۲۶	۰٫۲۳
SrO	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۳
Nb_2O_3	۰٫۰۲	nd	۰٫۰۲	nd	۰٫۰۳	nd	۰٫۰۲	nd	nd	۰٫۰۴
Y_2O_3	۰٫۱۴	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۱۳	۰٫۲۵	۰٫۲۴	۰٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۱۵	۰٫۱۶
La_2O_3	۰٫۲۵	۰٫۴۰	۰٫۲۴	۰٫۳۱	۰٫۴۵	۰٫۳۸	۰٫۳۱	۰٫۳۷	۰٫۳۵	۰٫۳۱
MnO	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	nd	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Ce_2O_3	۰٫۵۸	۰٫۹۵	۰٫۵۵	۰٫۷۰	۱٫۰۱	۰٫۸۹	۰٫۷۷	۰٫۹۶	۰٫۸۳	۰٫۷۵
F	۲٫۵۱	۲٫۶۸	۲٫۷۰	۲٫۵۷	۲٫۶۶	۲٫۲۵	۲٫۵۱	۲٫۶۸	۲٫۶۱	۳٫۲۱
Cl	۰٫۶۲	۰٫۵۳	۰٫۴۶	۰٫۶۰	۰٫۵۰	۰٫۶۰	۰٫۵۲	۰٫۷۰	۰٫۷۸	۰٫۶۸
Sum	۱۰۱٫۳۰	۱۰۰٫۶۶	۱۰۱٫۳۲	۱۰۱٫۱۶	۱۰۰٫۱۴	۱۰۰٫۷۵	۱۰۰٫۷۸	۱۰۱٫۰۳	۱۰۰٫۸۹	۱۰۱٫۵۹
- O $\equiv$ F+Cl	۱٫۲۰	۱٫۲۵	۱٫۲۴	۱٫۲۱	۱٫۲۳	۱٫۰۸	۱٫۱۷	۱٫۲۹	۱٫۲۷	۱٫۵۰
Total	۱۰۰٫۱۰	۹۹٫۴۱	۱۰۰٫۰۸	۹۹٫۹۵	۹۸٫۹۱	۹۹٫۶۷	۹۹٫۶۱	۹۹٫۷۴	۹۹٫۶۲	۱۰۰٫۰۹

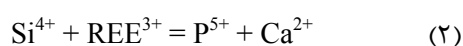
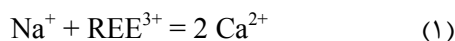
nd = ثبت نشده است



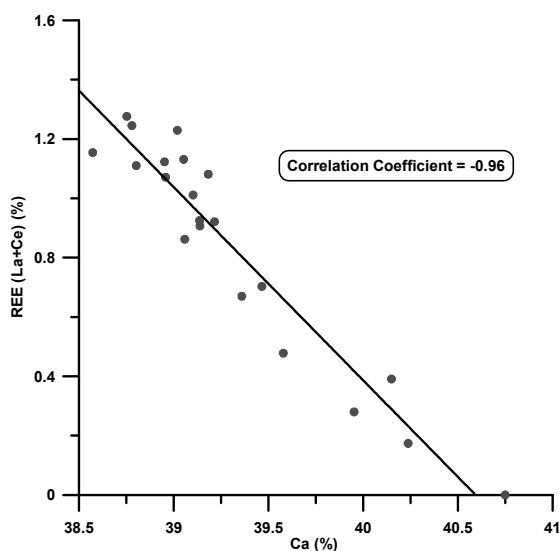
شکل ۴ تعیین خاستگاه آپاتیت‌های منطقه‌ی بافق با استفاده از آنالیز Mn و Sr در آپاتیت‌ها با بهره‌گیری از سیستم EMPA، نمودار مرجع از Hogarth [۱۳].

بخش بزرگی از عناصر نادر خاکی از فسفریت‌های رسوبی هم عصر تامین شده است و بی‌هنجاری منفی Eu در کانسنگ نیز از این فسفریت‌ها به ارث رسیده است (شکل ۷)، ولی بخش دیگری از عناصر نادر خاکی می‌تواند در اثر شستشوی این عناصر از توده‌های نفوذی آذرین (به خصوص گرانیت‌ها) در اثر فعالیت‌های گرمایی و تمرکز آن در شبکه‌ی آپاتیت در حین نهشته شدن آن باشد [۳]. این سنگ‌های نفوذی گرانیتی عامل اصلی و موتور گرمایی فعالیت‌های گرمایی عظیم در منطقه بوده و خود دستخوش دگرسانی شدید سدیک شده‌اند. این دگرسانی بخش مهمی از عناصر نادر خاکی را از ترکیب گرانیت‌ها شسته به گونه‌ای که نسبت به این عناصر تهی‌شدگی نسبی یافته‌اند. بر عکس، سنگ‌های نفوذی گرانیتی بی‌هنجاری مثبت Eu نشان می‌دهند که نشان دهنده‌ی جانشینی Eu بجای Ca در شبکه‌ی پلاژیوکلاز حین آلبیتی شدن این گرانیت‌هاست [۳]. بدین شکل بی‌هنجاری منفی Eu در کانسنگ به‌طور منطقی توجیه‌پذیر خواهد بود. در بسیاری از آپاتیت‌های موجود در منطقه، کانی مونازیت به‌صورت انکلوژیون و یا به شکل کانی مستقل مشاهده می‌شود (شکل ۶). سال سنجی کانسار با استفاده از روش Th-U-Pb روی مونازیت‌های یاد شده، سن 515 ± 21 میلیون سال را برای کانی‌سازی در منطقه نشان داده است [۱۱] که نشان دهنده‌ی تشکیل کانسار در کامبرین زیرین است.

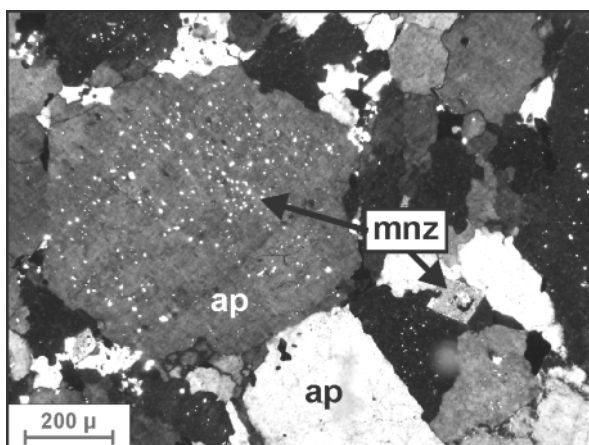
آپاتیت‌های منطقه‌ی معدنی بافق از نظر محتوای عناصر نادرخاکی (REE) نسبتاً غنی هستند. در شکل ۵ همبستگی بین میزان Ca و مجموع REE در این آپاتیت‌ها نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، افزایش میزان REE در شبکه‌ی آپاتیت با کاهش میزان Ca در آن همخوان است. در واقع عناصر نادر خاکی جانشین کلسیم در شبکه‌ی آپاتیت شده‌اند. جانشینی عناصر نادر خاکی به جای Ca در شبکه‌ی آپاتیت می‌تواند بر اساس واکنش‌های دوگانه زیر بیان شود. در این واکنش‌های جانشینی، توازن بار الکتریکی در شبکه‌ی آپاتیت با یون‌های Na^+ و Si^{4+} برقرار می‌شود [۱۵، ۱۴].



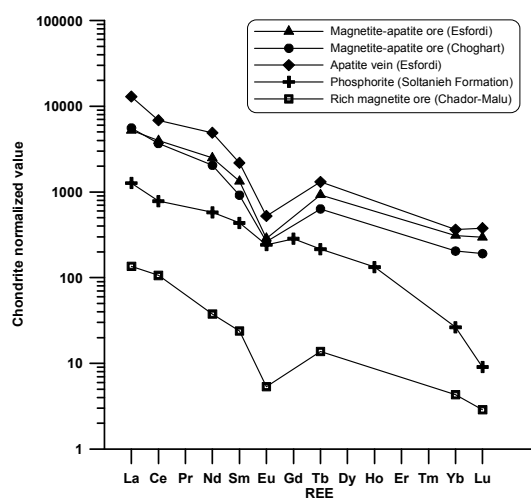
علاوه بر آن عناصر نادر خاکی به شکل کانی مستقل یعنی مونازیت (Monazite) که آن هم یک کانی فسفاتی است نیز تبلور یافته‌اند (شکل ۶). در شکل ۷ نمودار عنکبوتی ترسیمی، چگونگی الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های مختلف مگنتیت-آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق در مقایسه با یک نمونه از فسفریت از سازند سلطانیه را نشان می‌دهد. تمامی نمونه‌ها یک بی‌هنجاری روشن منفی در Eu نشان می‌دهند. با افزایش میزان فسفر (آپاتیت) در نمونه‌ها، میزان کل REE بیشتر ولی بی‌هنجاری منفی در Eu تشدید می‌شود. اگر چه



شکل ۵ نمودار همبستگی میزان Ca و مجموع REE در آپاتیت‌های منطقه بافق (همبستگی منفی بالا ناشی از جانشین شدن عناصر نادر خاکی به جای کلسیم در شبکه‌ی آپاتیت است).



شکل ۶ بلورهای ریز موناژیت (mnz) به شکل درونگیر در آپاتیت (ap) و رشد بلور خود شکل آن همراه با آپاتیت (نور XPL).



شکل ۷ نمودار عنکبوتی نشان دهنده‌ی تغییرات عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های مختلف مگنتیت-آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق در مقایسه با یک نمونه از فسفریت سازند سلطانیه.

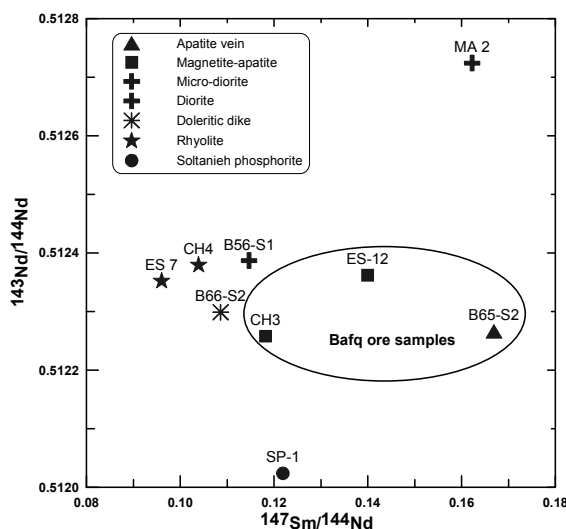
بررسی‌های ایزوتوپی Sm-Nd

تعداد ۸ نمونه از کانسنگ و سنگ در برگرفته‌ی تعدادی از ذخایر، انتخاب و برای ایزوتوپ‌های Sm و Nd آنالیز شدند. مشخصات نمونه‌ها و نتیجه‌ی آنالیزهای انجام شده در جدول ۲ آمده‌اند. نمودار شکل ۸ مقدار $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ را نسبت به $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ نشان می‌دهد. پراکندگی مقادیر نشان می‌دهد که نمونه‌ها از نظر ترکیب ایزوتوپ‌های یاد شده کاملاً متفاوتند. با در نظر گرفتن سن یکسان برای نمونه‌ها، پراکندگی موجود تنها می‌تواند ناشی از نسبت ایزوتوپی اولیه Nd می‌تفاوت برای سنگ‌های یاد شده در اثر ناهمجنسی و عدم ارتباط زایشی آن-ها باشد. محاسبه‌ی مقدار ϵ_{Nd} نشان می‌دهد که اغلب سنگ‌های آذرین در برگرفته‌ی کانی‌سازی، مقدار ϵ_{Nd} مثبت ولی کانسنگ موجود (مگنتیت-آپاتیت) به‌خصوص رگه‌ی خالص آپاتیت، ϵ_{Nd} منفی از خود نشان می‌دهد که در شکل ۹ این مقدار نسبت به میزان P_2O_5 نمونه‌ها دیده می‌شود. این بررسی

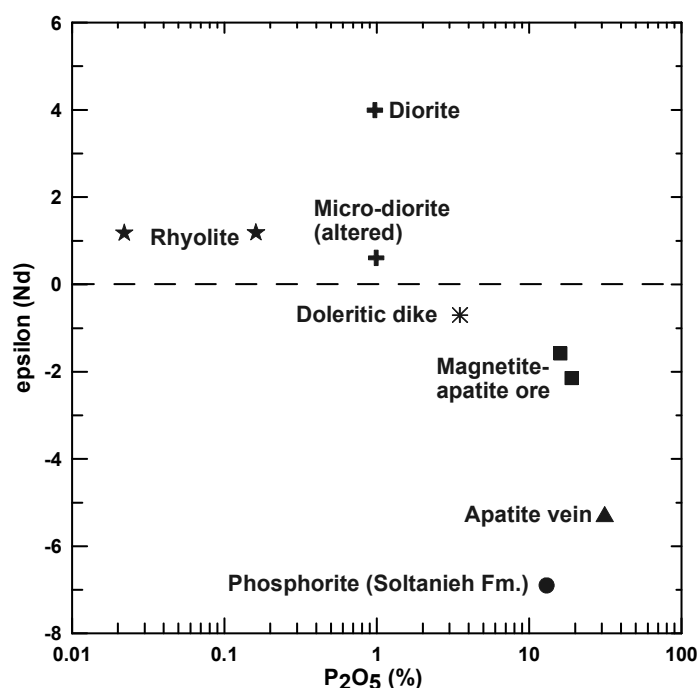
آشکارا نشان دهنده‌ی آن است که هیچ ارتباط زایشی مشخصی از نظر خاستگاه عناصر کانسار ساز با سنگ‌های آذرین موجود در منطقه به‌خصوص برای رگه آپاتیتی وجود ندارد. برای بررسی بیشتر، میزان ϵ_{Nd} در کانسنگ آپاتیتی منطقه-ی بافق با فسفریت موجود در سازند سلطانیه (هم عصر کانی-سازی) مقایسه شدند. تشابه نزدیک در میزان ϵ_{Nd} می‌تواند مؤید این باشد که آپاتیت‌های منطقه‌ی معدنی بافق می‌تواند از فسفریت‌های هم عصر و یا قدیمی‌تر خود در اثر فرآیندهای گرمایی ریشه گرفته باشد. با اضافه شدن جزء آهن موجود در کانسنگ (مگنتیت-آپاتیت)، میزان ϵ_{Nd} افزایش یافته و حالت بینابینی بین آپاتیت خالص (با خاستگاه سنگ‌های پوسته‌ای) و سنگ‌های آذرین با ϵ_{Nd} مثبت (با خاستگاه سنگ‌های گوشته-ای) پیدا می‌کند که می‌تواند نشانه‌ای بر احتمال خاستگاه آهن از سنگ‌های آذرین باشد.

جدول ۲ مشخصات و نتایج آنالیز تعداد ۸ نمونه از کانسنگ و سنگ‌های در برگرفته‌ی تعدادی از ذخایر منطقه‌ی بافق انتخاب شده برای آنالیز ایزوتوپ‌های Sm و Nd (اطلاعات ایزوتوپی فسفریت سلطانیه از منبع شماره [۱۷] گرفته شده است).

Sample No.	Deposit	Rock Type	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	± 2 sigma	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{t})$
MA2	Chador-Malu	Diorite	۱۳,۳۳	۵۰,۳۹	۰,۱۶۲۲۳	۰,۵۱۲۷۲۴	۵	۴,۰۰
CH4	Choghart	Rhyolite	۶۹۸۶	۴۰,۶۴	۰,۱۰۳۹۱	۰,۵۱۲۳۸۰	۳	۱,۱۸
ES7	Esfordi	Rhyolite	۳,۶۴۲	۲۲,۹۳	۰,۰۹۶۰۰	۰,۵۱۲۳۵۲	۳	۱,۱۸
B56-S1	Esfordi	Micro-diorite	۱۳,۹۱	۷۳,۳۳	۰,۱۱۴۶۵	۰,۵۲۳۸۷	۴	۰,۶۱
B66-S2	Esfordi	Doleritic dyke	۵۹,۶۲	۳۳۱,۸	۰,۱۰۸۵۹	۰,۵۱۲۲۹۹	۴	-۰,۷۰
ES-12	Esfordi	Magnetite-apatite	۱۱۵,۰	۴۹۶,۷	۰,۱۳۹۹۴	۰,۵۱۲۳۶۲	۴	-۱,۵۸
CH3	Choghart	Magnetite-apatite	۱۷۴,۴	۸۹۲,۲	۰,۱۱۸۱۴	۰,۵۱۲۲۵۸	۳	-۲,۱۴
B65-S2	Esfordi	Apatite vein	۳۸۱,۲	۱۳۸۰	۰,۱۶۶۸۹	۰,۵۱۲۲۶۶	۶	-۵,۲۶
SP-1	Soltanieh Fm.	Phosphorite	۷۱,۰۶	۳۵۲,۷	۰,۱۲۱۸۷	۰,۵۱۲۰۲۴	۱۱	-۶,۹۰



شکل ۸ نمودار تغییرات نسبت ایزوتوپی $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ نسبت به $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ برای نمونه‌های مختلف از منطقه‌ی بافق (اطلاعات ایزوتوپی فسفریت سلطانیه از منبع شماره [۱۷] گرفته شده است).



شکل ۹ تغییرات ϵ_{Nd} نسبت به محتوای P_2O_5 در سنگ‌ها و کانسنگ‌های مختلف منطقه‌ی بافق.

برداشت

کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه‌ی معدنی بافق از عناصر نادر خاکی به‌خصوص نادر خاکی سبک (LREE) غنی هستند. سنگ‌های در برگرفته‌ی این ذخایر در مقیاس ناحیه‌ای دگرسانی سدیک (آلبیتی شدن)، و در مقیاس محلی با توجه به ترکیب سنگ دیواره، دگرسانی‌های پتاسی (فلدسپار پتاسیم و سریسیتی شدن) و یا اکتینولیتی شدن از خود نشان می‌دهند. نحوه‌ی شکل‌گیری ذخایر، ارتباط آن‌ها با سنگ دیواره و دگرسانی‌های موجود دلالت بر فعالیت‌های گرمایی در این ذخایر دارد. برخی پژوهشگران نقش شاره‌های شور حاصل از رسوب‌های تبخیری را به‌عنوان شاره‌ی حامل در شکل‌گیری این ذخایر دخیل دانسته‌اند [۱۱،۳]. بررسی‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی Sm-Nd در این پژوهش نشان می‌دهد که خاستگاه آپاتیت در این ذخایر می‌تواند از رسوب‌های پوسته‌ای به خصوص فسفریت‌های موجود در افق‌های رسوبی نئوپروتروزوئیک - کامبرین زیرین باشد. گرچه فسفریت‌های رسوبی با این سن در منطقه‌ی بافق کمیابند ولی وجود ذخایر عظیم فسفریت در این سن در نقاط دیگر ایران و در بسیاری از کشورهای حاشیه‌ی گندوانا تأیید شده است [۱۶، ۱۷]. کما اینکه ذخایری از این نوع در سازند سلطانیه (معادل سازندهای

کامبرین زیرین در بافق) مشاهده شده است [۱۷] و به نظر می‌رسد بخش عظیمی از فسفریت‌های رسوبی منطقه‌ی بافق طی فرآیندهای گرمایی در کامبرین زیرین انحلال دوباره یافته و از افق‌های رسوبی شسته شده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که آپاتیت‌های منطقه‌ی بافق می‌تواند در اثر شستشوی گرمایی گسترده‌ی فسفریت‌های رسوبی، ناشی از القای گرمایی توده‌های نفوذی کامبرین زیرین و نهشته شدن آن‌ها به‌صورت رگه‌های گرمایی به همراه با ذخایر عظیم آهن در منطقه به‌وجود آمده باشند. با بهره‌گیری از این مدل، تنوع در توزیع و پراکندگی آپاتیت در منطقه به‌طور منطقی توجیه‌پذیر است. به گونه‌ای که در نواحی که نهشته‌های فسفریت رسوبی با گسترش و ذخیره بیشتر وجود داشته، در اثر فعالیت‌های گرمایی شرایط برای تشکیل رگه‌های پر عیار آپاتیت (اسفوردی، گزستان) همراه با توده‌های آهن‌دار مهیا بوده است و در ذخایر دیگر شاید به دلیل گسترش و ذخیره‌ی کمتر فسفریت‌ها یا عدم وجود آن‌ها، کانسارهای آهن با میزان فسفر کمتری (چغارت، چادرملو) شکل گرفته‌اند.

قدردانی

لازم است تا از مدیریت و کارشناسان شرکت‌های معدنی سنگ آهن مرکزی بافق (معدن چغارت)، معادن چادرملو و اسفوردی

- [9] Frietsch R., Perdahl J.A., "Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types", *Ore Geology Reviews* 9 (1995) 489-510.
- [10] Gleason J.D., Marikos M.A., Barton M.D., Johnson D.A., "Neodymium isotopic study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) systems", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2000) 1059-1068.
- [11] Torab F.M., Lehmann B., "Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology", *Mineralogical Magazine* 71 (2007) 347-363.
- [12] Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I., "Apatite as an indicator mineral for mineral exploration : trace-element compositions and their relationship to host rock type", *Journal of Geochemical Exploration* 76 (2002) 45-69.
- [13] Hogarth D.D., "Pyrochlore, apatite and amphibole: distinctive minerals in carbonatite, in Bell, K. ed., *Carbonatites: genesis and evolution*", Unwin Hyman, London, (1989) 105-148.
- [14] Harlov D.E., Andersson U.B., Forster H.J., Nystrom J.O., Dulski P., Broman C., "Apatite-monzite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden", *Chemical Geology* 191 (2002) 47-72.
- [15] Roeder P.L., MacArthur D., Ma X.P., Palmer G.R., Mariano A.N., "Cathodoluminescence and microprobe study of rare-earth elements in apatite", *American Mineralogist* 72 (1987) 801-811.
- [16] Holland H.D., "Sedimentary mineral deposits and the evolution of earth's near-surface environment", *Economic Geology* 100 (2005) 1489-1509.
- [17] Felitsyn S.B., Gubanov A.P., "Nd isotope composition of early Cambrian discrete basins", *Geological Magazine* 139 (2002) 159-169.

به خاطر همکاری لازم و فراهم آوردن امکان برداشت های صحرایی و نمونه برداری از معادن، تشکر و قدردانی شود. از پروفسور برند لهن (Bernd Lehmann) از انستیتو کانی شناسی و منابع معدنی دانشگاه فنی کلاستفال آلمان به خاطر همکاری در به ثمر رسیدن این طرح و پشتیبانی مالی در زمینه آنالیز نمونه ها سپاسگزاری شود. دکتر بوریس بلیاتسکی (Boris Belyatsky) از آکادمی علوم روسیه عهده دار آنالیز رادیو ایزوتوپی Sm-Nd بوده که بدینوسیله از وی قدردانی می شود.

مراجع

- [1] Haghipour A., "Geological map of the Biabanak-Bafq area (scale 1:500,000)", Geological Survey of Iran (1977).
- [2] Forster H., Jafarzadeh A., "The Bafq mining district in Central Iran - a highly mineralized Infracambrian volcanic field", *Economic Geology* 89 (1994) 1697-1721.
- [3] Torab F.M., "Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran", PhD thesis, Technical University of Clausthal (2008) 131p.
- [4] Daliran F., "The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, East Central Iran. An alkali rhyolite hosted, Kiruna type occurrence in the Infracambrian Bafq metallotect (mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks)", Ph.D. thesis, Heidelberg, Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen 37 (1990) 248 p.
- [5] Samani B.A., "Metallogeny of the Precambrian in Iran", *Precambrian Research* 39 (1988) 85-106.
- [6] Daliran F., "Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites", in Porter, T.M. ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, PGC Publishing, Adelaide, v.2 (2002) 303-320.
- [7] Jami M., Dunlop A.C., Cohen D.R., "Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran", *Economic Geology* 102 (2007) 1111-1128.
- [8] Aftabi A., Mohseni S., Babeki A., Azaraien H., "Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran- A discussion", *Economic Geology* 104 (2009) 137 - 139.