

Priliminary report on REEs in apatite from Esfordi iron-apatite ore deposit

Valizadeh, M. V.

Department of Geology Faculty of Sciences University of Tehran

Sharifi, A.

**Department of Non-living Resourses, Iranian National
Center for Oceanography**

Key Words: *Apatite, Rare Earth Elements, Bafq, Esfordi*

Abstract: The Esfordi iron - apatite ore in Central Iran is located in Bafq metallogenic province. Stratigraphically most of the rock units belong to Precambrian and Cambrian sequenses which the sedimentary and volcanic series are the most spreading rock types and mineralization took place just within the volcanic-sedimentary unit of the mentioned series. Study of REE contents of apatite in Esfordi iron-apatite ore shows high concentration of these elements. Zonal distribution of some REEs, e.g. La, is identified which varies from center to the rim of apatite single crystal. Absence of negative Eu anomaly makes the Esfordi apatite distinctive from the igneous types and may indicate a hydrothermal origin for Esfordi apatites.

پژوهشی

بررسی مقدماتی عناصر خاکی نادر (REEs) در آپاتیت‌های کانسار آهن - آپاتیت اسفوردی

محمدولی ولی‌زاده

دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

آرش شریفی

مرکز ملی اقیانوس‌شناسی، گروه منابع غیرزستی، بخش زمین‌شناسی

چکیده: کانسار آهن - آپاتیت اسفوردی در ناحیه ایران مرکزی و در حوزه متالورژی بافق واقع شده است. از نظر چینه‌شناسی، اغلب سنگهای این ناحیه به پرکامبرین و کامبرین تعلق داشته و از این میان، مجموعه‌های رسوبی - آتشفشانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، چراکه علاوه بر گستردگی بیشتر ذخایر آهن و فسفات منطقه نیز در واحد آتشفشانی - رسوبی این مجموعه جای گرفته‌اند. بررسی عناصر خاکی نادر در آپاتیت‌های کانسار اسفوردی، بیانگر تمرکز بالای این عناصر در آپاتیت‌هاست و مطالعات مقدماتی نشان می‌دهد که برخی از این عناصر (La) در بلورهای آپاتیت از یک منطقه‌بندی تبعیت می‌کنند و مقادیر آنها از مرکز به حاشیه بلور تغییر می‌کند، عدم وجود آنومالی منفی Eu در این آپاتیت‌ها، آن را از انواع آذرین متفاوت می‌سازد و احتمال منشأ گرمابی را برای آن قوت می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: آپاتیت، عناصر خاکی نادر، اسفوردی، بافق

مقدمه

کانسار آهن - آپاتیت اسفوردی در حوزه معدنی بافق و در ۳۶ کیلومتری شمال شرقی بافق واقع شده است. مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ۵۵°۳۸' طول شرقی و

۴۷' و ۳۱° عرض شمالی است. برای نخستین بار ویلیامز و هوشمندزاده [۱] به وجود آپاتیت به عنوان کانی همراه کانسار آهن اشاره کردند و برومندی [۲] در چارچوب مطالعات خویش علاوه بر معرفی سازند اسفوردی در منطقه، رگه ضخیمی از آپاتیت را در محل کانسار کشف و به وجود عناصر خاکی نادر در این آپاتیتها اشاره کرد. پس از اجرای برنامه‌های اکتشافی و تعیین سه منطقه معدنی، ذخیره‌ای معادل ۵/۶ میلیون تن سنگ فسفات با عیار متوسط ۱۴/۳۵ درصد P_2O_5 به عنوان ذخیره قطعی و قابل بهره‌برداری برای این کانسار اعلام شد (هلالات و بلورچی، [۳]) که بخش عمده آن در منطقه اصلی ماده معدنی تمرکز یافته است و با ماگنتیت، هماتیت، ترمولیت و کلسیت همراه است. مطالعات درویش‌زاده [۴] و دلیران [۵] وجود مقادیر قابل توجهی از عناصر خاکی نادر را در کانسار آپاتیت اسفوردی نشان می‌دهد؛ به‌طوری که حدود یک درصد از تراکم این کانسار را عناصر خاکی نادر تشکیل می‌دهند. هلالات و بلورچی [۳] تراکم این عناصر را در آپاتیت با نفوذ موناژیت و زینوتیم مربوط می‌دانند. در ناحیه معدنی بافق اصولاً آپاتیتها (و نیز کانسار آهن) به شکل دودکشهای کانی ساز دیده می‌شوند (فورستر و جعفرزاده، [۵]). بخشهای محتوی آپاتیت این دودکشها که در بین معدنکاران اسفوردی به دایکهای آپاتیته معروف است به شکل مجموعه‌های بنفش رنگ قابل تشخیص‌اند و در آن بلورهای آپاتیت به قطر ۲ تا ۱۰۰ میلی متریافت می‌شوند.

موقعیت زمین‌شناسی

حوزه معدنی بافق بخشی از بلوک لوت (خرده قاره شرق و مرکز ایران) از پی سنگ کامبرین است که با سنگهای کامبرین تا تریاس پوشیده شده است. مطالعه دیرین مغناطیسی سنگها و کانسارهای آهن دوران پرکامبرین تا کامبرین پایینی، موقعیت قطب مغناطیسی را در $\varphi = 357^{\circ}S$ و $\lambda = 265^{\circ}E$ نشان می‌دهد و براساس وجود هماهنگی بسیار خوب بین سنگهای این منطقه و سنگهای هم سن در هند و پاکستان، تصور می‌شود که ایران مرکزی مانند هند، بخشی از قطعه گندوانا بوده است (بکر و همکاران، [۷]). در این حوزه، سنگهای پرکامبرین - کامبرین گسترش زیادی دارند. این سنگها بین بافق و آریز، اطراف چاه گز، چادر ملو، میشدوان، اسفوردی، کوشک، سه چاهون، و ناریگان یافت می‌شوند، به‌طور کلی از نظر چینه‌شناسی، سنگهای موجود در آن را

می توان به سه گروه مهم تقسیم کرد:

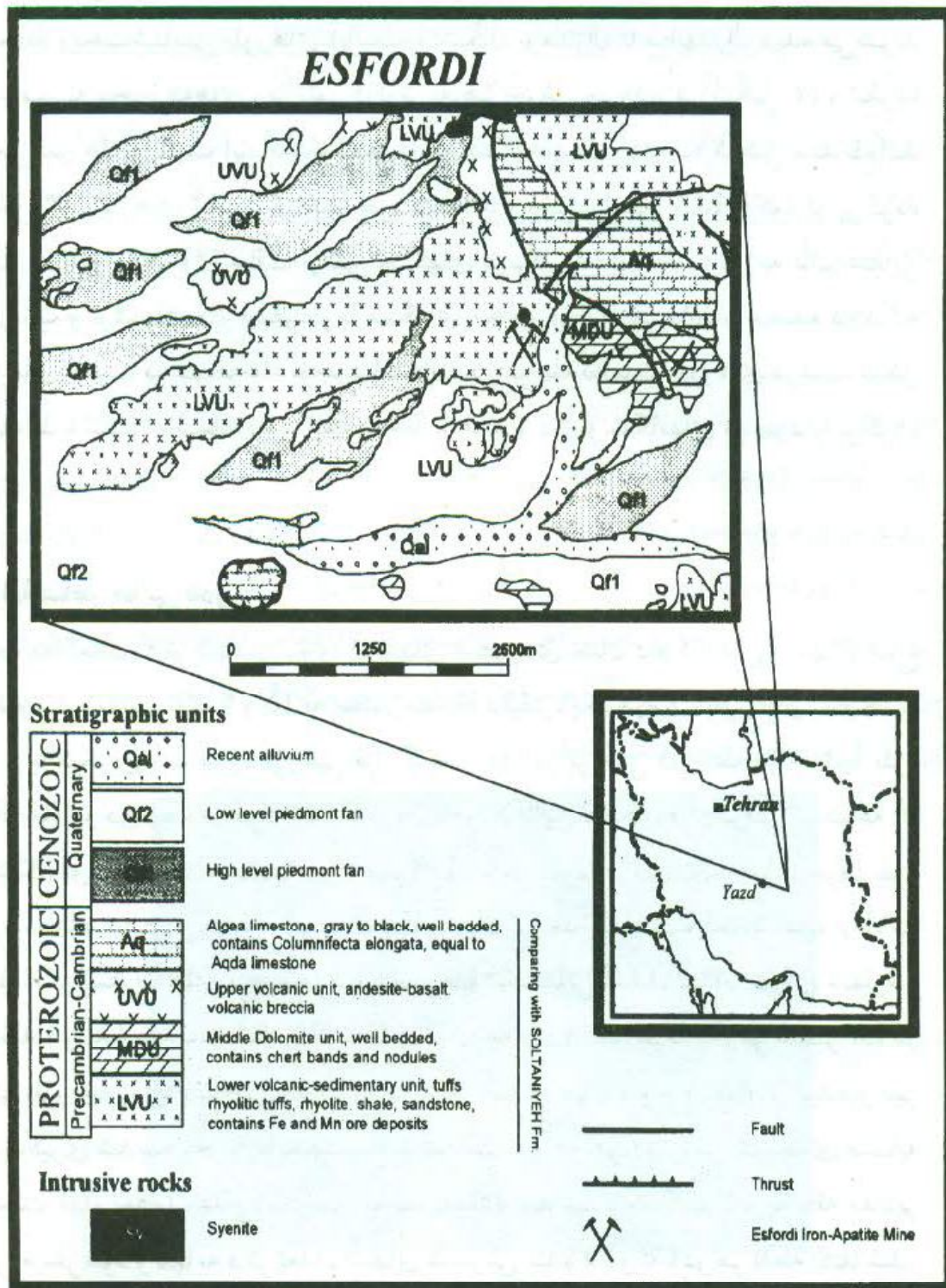
۱- سنگهای آذرین، رسوبی و دگرگونی پرکامبرین - کامبرین

۲- سنگهای رسوبی مزوزوئیک

۳- سنگهای رسوبی سنوزوئیک

کانسار آهن - آپاتیت اسفوردی به طور مشخص در میان سنگهای گروه اول قرار گرفته است (شکل ۱) و به دلیل ارتباط موضوع این پژوهش با سنگهای این گروه تنها به تشریح سنگهای آذرین، رسوبی و دگرگونی پرکامبرین - کامبرین پرداخته خواهد شد. مجموعه های رسوبی و آتشفشانی پرکامبرین - کامبرین بخش عمده ییرون زدگیهای ناحیه مورد مطالعه را تشکیل می دهند. به دلیل وجود ارتباط تنگاتنگ چینه ای بین سنگهای رسوبی و آتشفشانی در منطقه، این سنگها در قالب یک مجموعه واحد معرفی و مورد بررسی قرار گرفتند (حیدری، [۸]؛ شریفی، [۹]). مجموعه های رسوبی و آتشفشانی از قدیم به جدید شامل واحد دولومیت زیرین، واحد آتشفشانی - رسوبی زیرین، واحد دولومیت میانی، واحد آتشفشانی بالایی و آهک عقدا است (شکل ۱). با توجه به خصوصیات بخشهای کربناتی و نیز فسیلهای یافت شده می توان این مجموعه را با سازند سلطانیه مقایسه کرد که در این حالت مرز بین پرکامبرین - کامبرین در قاعده واحد دولومیت میانی قرار خواهد گرفت [۸ و ۹]. به طور کلی کانی سازی و جایگیری کانسارهای آهن - آپاتیت در واحد آتشفشانی - رسوبی زیرین از مجموعه بالا صورت گرفته است. این واحد از نظر سنگ شناسی شامل توالی از ریولیت، ماسه سنگ، شیل و دولومیت چرت دار است که از این میان ریولیتها میزبان تقریباً تمامی کانسارهای آهن - آپاتیت منطقه هستند.

تنها توده نفوذی در محدوده کانسار توده سینیتی آرش است [۹]، که در شمال غربی کانسار اسفوردی واقع شده است. مجموعه های دگرگونی در محدوده کانسار قابل مشاهده نیستند ولی در مناطق کمربوده به صورت توالی شیست و گنیس، و در میشدوان به صورت مجموعه ای درهم از کوارتزیت، شیست و مرمر دیده می شوند. در این جا یادآور می شود که به وجود مجموعه آپاتیت - پیروکسنیت اشاره شده است [۲] ولی به دلیل به هم ریختگی محدوده کانسار در طول برنامه های اکتشافی و تأسیس کارخانه، این مجموعه در زمان انجام این پژوهش در روی زمین قابل مشاهده و پیگیری نبود.



شکل ۱ - نقشه زمین‌شناسی حوزه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و موقعیت کانسار آهن - آپاتیت اسفوردی.

ریخت‌شناسی آپاتیتها

از لحاظ ریخت‌شناسی بلورهای آپاتیت با اشکال یوهدرال تا سابهدرال دیده می‌شوند که به وسیله مجموعه‌های ریز بلور کوارتز به هم جوش خورده‌اند (شکل ۲) و تقریباً تمامی بلورهای آپاتیت این مجموعه‌ها دارای دسته‌های نفوذی به شکل متقاطع‌اند (شکل ۳). بلورهای آپاتیت شدیداً خرد شده‌اند و فضای ایجاد شده را کوارتز پر کرده است. درویش زاده [۴] حالت برشی سنگهای دربرگیرنده این بلورها را به تأثیر متقابل بخار آب و ترکیبهای گاز فسفردار با سنگهای مجاور مربوط می‌داند و عقیده دارد که بلورهای آپاتیت در دو مرحله بوجود آمده‌اند. در مرحله نخست بلورهای درشت شکل گرفته‌اند و سپس باقیمانده فاز آبگون خلل و فرج و درز و شکافهای موجود را پر کرده است.

مطالعه عناصر خاکی نادر

نتیجه مطالعات کانی‌شناسی روی آپاتیت‌های اسفوردی نشان داد که کانی آنها از نوع فلوئورآپاتیت است [۲، ۴ و ۵]. به منظور مطالعه دقیقتر، یک درشت بلور آپاتیت انتخاب شد و با میکروپروب مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی دو نقطه در حاشیه بلور (R_1 , R_2) و دو نقطه در مرکز آن (C_1 , C_2) مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت که نتیجه آن در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است. همان طور که دیده می‌شود تمرکز عنصر La در مرکز بلور مورد مطالعه بیشتر از حاشیه آن است به طوری که در منحنی‌های به دست آمده از آنالیز نقاط C_1 و C_2 ، قله‌های مربوط به این عنصر قابل شناسایی است. تعداد اتمهای شمارش شده La و Ce در نقاط C_1 , R_2 , R_1 و C_2 (جدول ۱) نیز مؤید تمرکز عنصر La در مرکز بلور است. این بررسی به دو روش اندازه‌گیری طول موج پرتو بازتابیده و نیز اندازه‌گیری شدت پرتو بازتابیده انجام شده است، و در هر دو روش نتیجه‌ای مشابه به دست آمد. به دلیل عدم دسترسی به نمونه‌های استاندارد سنگ و کانی، ارائه مقادیر کمی میسر نبود و تنها به ذکر تعداد اتمهای شمارش شده La و Ce در هر نقطه اکتفا شد.

جدول ۱ - تعداد اتمهای شمارش شده La و Ce در آپاتیت اسفوردی
(طول زمان شمارش ۵۰ ثانیه برای هر نقطه)

	*R1	R2	**C1	C2
Ce	۵۵۰	۵۹۹	۵۷۳	۵۸۰
La	—	—	۴۹۹	۴۶۷

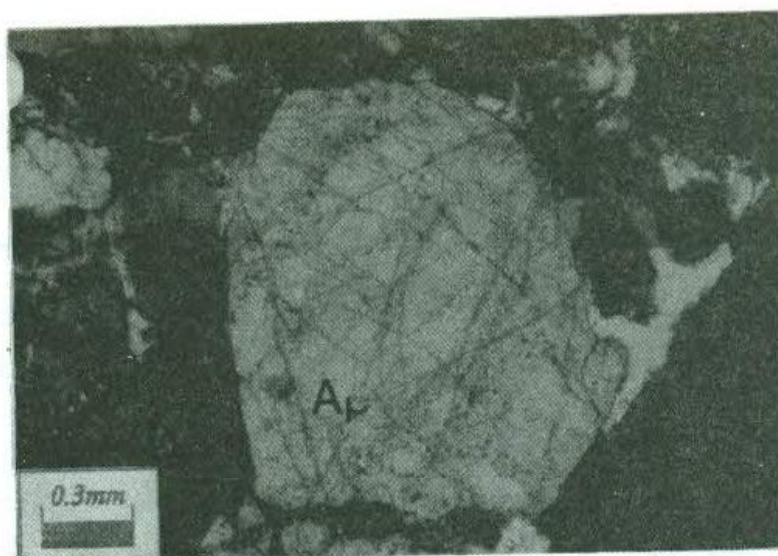
* حاشیه بلور

** مرکز بلور

به منظور بررسی رفتار عناصر خاکی نادر در آپاتیتهای کانسار اسفوردی، یک نمونه از تک بلور آپاتیت (مربوط به ذخیره اصلی کانسار) و یک نمونه آپاتیت جدا شده از ریولیت‌های مربوط به محدوده معدن انتخاب و به روش ICP-AES تجزیه شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده‌ایم. نمودار عنکبوتی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های بالا رسم شد و برای مقایسه، داده‌های کانسار آهن - آپاتیت نوادا* (اقتباس از جانسون، بارتون و حسن زاده [۱۰]) و آپاتیت ولیور** هند (داده‌ها از هویس، ۱۹۹۶، ارتباط شخصی) نیز روی نمودار مشخص شده است (شکل ۶).



شکل ۲ - بلورهای سابه‌درال آپاتیت که به وسیله مجموعه‌های ریز بلور و کوارتز به هم جوش خورده‌اند. تصویر در نور قطبیده.



شکل ۳- درشت بلور آپاتیت با حاشیه گرد شده که به وسیله ریز بلورهای آپاتیت و رگچه‌های کوارتز احاطه شده است. به دسته‌های متقاطع نفوذ در بلور آپاتیت توجه کنید. تصویر در نور قطبیده.

جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه عناصر خاکی نادر بر روی آپاتیت‌های اسفوردی، نوادا و ولیور

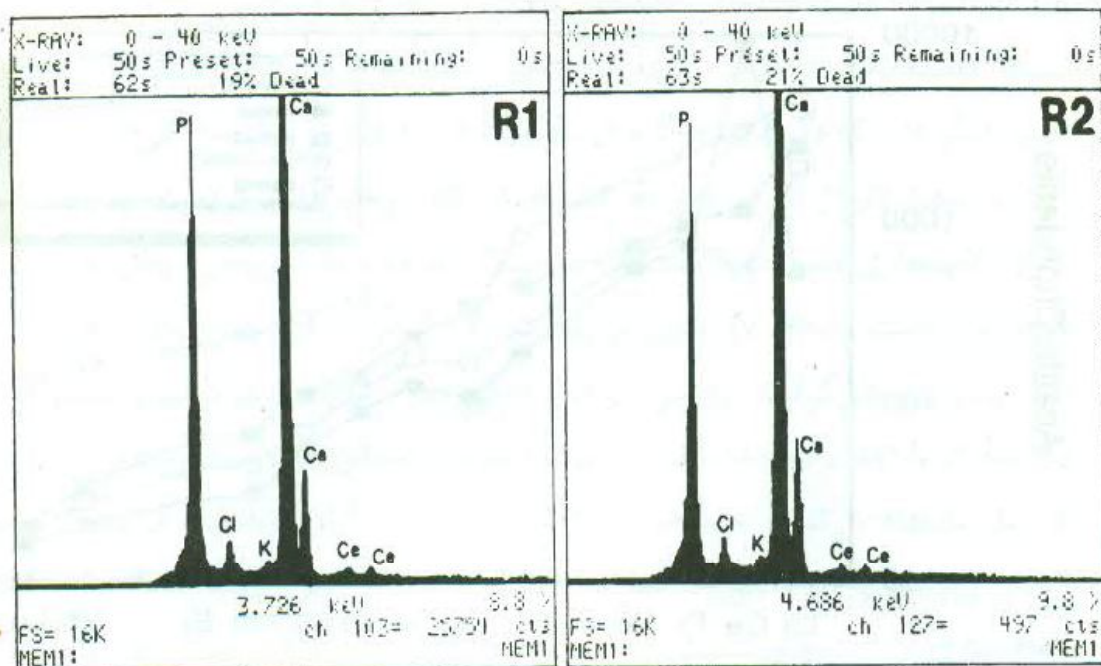
شماره نمونه	L74-2b*	ESGI*	CM90-1Da◆	182❖
La(ppm)	۷۸۳/۸	۶۲۱/۵	۱۳۰۴۹/۰۰	۵۶۶/۳۸
Ce	۹۴۱/۶	۴۳۴/۵	۲۲۳۷۰/۰۰	۶۱۱/۷۸
Pr	۱۰۲/۴	۸۶/۴	—	۷۱/۵۳
Nd	۴۳۲/۸	۳۸۹/۳	۷۵۵۸/۰۰	۲۹۷/۵۷
Sm	۸۵/۴	۵۱/۴	۸۳۷/۰۰	۶۰/۱۱
Eu	۲۴/۴	۱۱/۹	۳۳/۹۰	۱۵/۵۳
Gd	۶۱/۶	۵۴/۴	—	۳۳/۳۱
Tb	۶/۴۲	۵/۰	۶۴/۴۰	۵/۲۶
Dy	۳۵/۷	۲۱/۸	۲۶۱/۰۰	۲۵/۶۷
Ho	۴/۳۱	۲/۹۳	۷۱/۹۰	۳/۴۰
Er	۱۲/۹	۸/۹۴	—	۹/۳۰
Yb	۶/۷۷	۵/۸۳	۱۰۳/۰۰	۶/۲۱
Lu	۰/۶۱	۰/۵۷	۱۲/۲۰	۰/۴۸

* نمونه مربوط به تک بلور آپاتیت اسفوردی

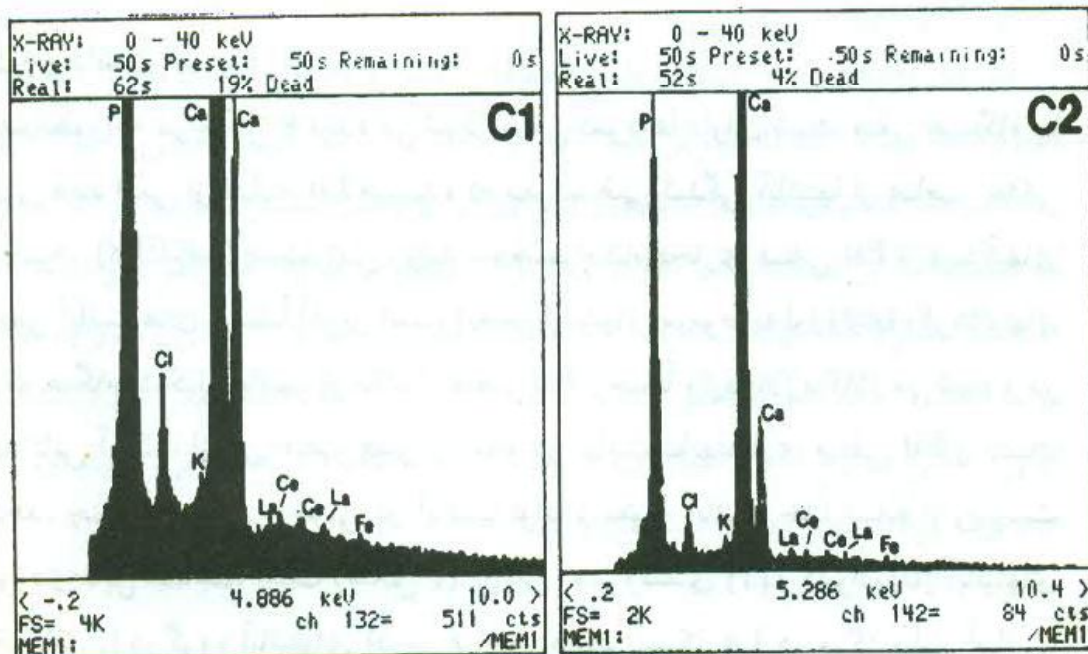
* نمونه مربوط به آپاتیت جدا شده از ریولیت

◆ نمونه آپاتیت، مربوط به کانسار آهن - آپاتیت نوادا

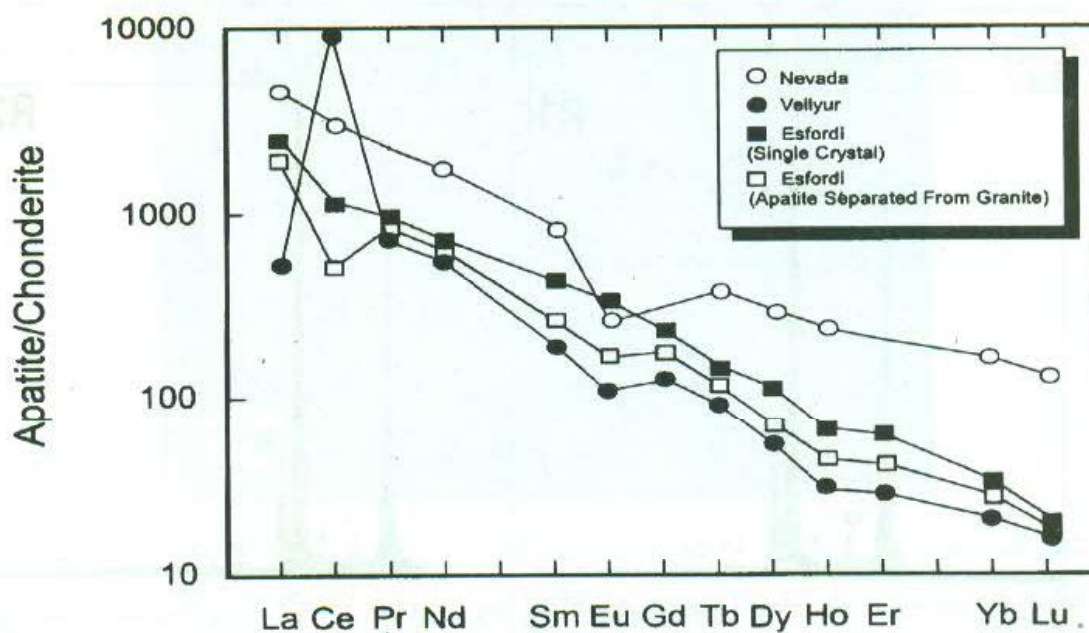
❖ نمونه مربوط به آپاتیت ولیور هند



شکل ۴- نتایج حاصل از تجزیه نقاط R1 و R2 در حاشیه بلور آپاتیت. همانطور که دیده می شود عنصر Ce در منحنی های بالا شناسایی شده است.



شکل ۵- نتایج حاصل از تجزیه نقاط C1 و C2 در مرکز بلور آپاتیت. همانطور که دیده می شود عنصر Ce عناصر La و Fe در منحنی های بالا شناسایی شده است.



شکل ۶- نمودار عنکبوتی بهنجار شده به کندریت برای نمونه‌های آپاتیت اسفوردی، آپاتیت ولیور هند و آپاتیت کانسار آهن - آپاتیت نوادا. به عدم وجود نابهنجاری منفی Eu در نمونه آپاتیت اسفوردی توجه کنید.

بحث و برداشت

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود تمامی نمونه‌ها دارای شیب منفی همگام با افزایش عدد اتمی از La به Lu هستند، که معرف غنی شدگی آپاتیتهای از عناصر خاکی نادر سبک (LREEs) است. این روند به همراه نابهنجاری منفی Eu از ویژگیهای شاخص آپاتیتهای با منشأ آذرین است (به جز آپاتیتهای مربوط به لرزولیتها و کربناتیتها)، زیرا که هنگام تشکیل آپاتیت از ماگما، عنصر Eu ترجیحاً وارد پلاژیوکلاز می‌شود و در نتیجه کانی آپاتیت از این عنصر فقیر شده، و در نهایت نابهنجاری منفی Eu را نشان می‌دهد. چنین وضعیتی به خوبی در آپاتیت نوادا و نمونه آپاتیت جدا شده از ریولیت اسفوردی قابل مشاهده است (شکل ۷). از این رو برومندی [۲] و دلیران [۵] آپاتیتهای منطقه بافق را در گروه آپاتیتهای آذرین قرار می‌دهند. تمرکز La در مرکز بلور آپاتیت اسفوردی و نیز عدم وجود نابهنجاری منفی Eu در این آپاتیتهای، منشأ آذرین را برای آنها پیشنهاد نمی‌کند؛ چرا که در این صورت La به عنوان یک عنصر ناسازگار در مراحل

انتهایی تبلور آپاتیت از مذاب ماگمایی جذب این کانی شده و نمی‌تواند در مرکز بلور تمرکز داشته باشد. از طرفی نمونه آپاتیت ولیور هند که از یک کالک سیلیکات جدا شده است (نمونه‌ای که دگرگونی در گرمای بالا و فشار ۱۰ کیلو بار را تحمل می‌کند) نسبت به آپاتیت اسفوردی از تمرکز پایین عناصر خاکی نادر برخوردار بود (بیشتر از نصف) و دارای نابهنجاری مثبت Ce است که احتمالاً منشأ دریایی آپاتیت (به شکل فسفریت) است (شکل ۷). بدین ترتیب منشأ دریایی را نیز نمی‌توان برای آپاتیت اسفوردی در نظر گرفت. بررسی عناصر خاکی نادر در آپاتیتهای کانسار اسفوردی و مقایسه آن با آپاتیتهای جدا شده از ریولیت معدن اسفوردی، منشأ متفاوتی را برای کانسار پیشنهاد می‌کند و نحوه استقرار کانسارهای آهن - آپاتیت ناحیه بافق نشان می‌دهد که این ریولیتها به عنوان میزبان عمل کرده‌اند و نقشی در ایجاد کانسار نداشته‌اند. وجود منطقه‌بندی در آپاتیتهای کانسار اسفوردی و تمرکز عنصر La در مرکز بلور و نیز عدم وجود نابهنجاری منفی Eu در آن، احتمال منشأ گرمایی را برای این کانسار قوت می‌بخشد.

تشکر و قدردانی

این کار پژوهشی در راستای طرح تحقیقاتی شماره ۵۱۲/۱/۳۱۹ مصوب ۷۵/۵/۶ انجام شده است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند تا از شورای پژوهشی دانشگاه تهران به خاطر مساعدتهای فراوان به منظور اجرای این پژوهش تشکر نمایند. از آقای دکتر هوشمندزاده نیز به خاطر هم فکریهای فراوان تشکر می‌نماید. همراهی ارزشمند دکتر جمشید حسن‌زاده، مهندس فرهاد اصفهانی و مهندس مهرداد حیدری همواره موجب نهایت امتنان بوده است. خانم دکتر ثریا هویس دستگاه ICP انستیتو سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی مونیخ را در اختیار این پژوهشگران قرار دادند و اطلاعاتی آپاتیتهای ولیور هند ارائه کردند که از ایشان سپاسگزاریم.

مراجع

1. Williams, G.J. and Hushmazndzadeh, A. (1966) *A petrographical and genetic of the Chogart iron ore body and sourrounding rocks*. Geol. Surv. Iran, Unpub. Internal Report, 18 p.
2. Borumandi, H., (1973) *Petrographische und lagerstätten kundliche Untersuchungen der Esfordi-Formation zwisch Mishdovan und Kushk bei Bafq*. Unpub. Ph. D. disser., Aachen, Germany, RWTH, 174p.
۳. هلالات، ه. و بلورچی، م.ح. (۱۳۷۳) فسفات. طرح تدوین کتاب زمین شناسی ایران، کتاب شماره ۱۹، صفحات ۱۷۶-۱۹۶.
۴. درویش زاده، ع. (۱۳۶۲) بررسی فسفات بافق "اسفوردی". نشریه دانشکده علوم، دانشگاه تهران، جلد سیزدهم، شماره اول و دوم، صفحات ۲-۲۴.
5. Daliran, F. (1990) *The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, east central Iran. rhyolite hosted Kiruna type occurrence in the Infracambrian Bafq metallotect (Mineralogic, Petrographic and Geochemical study of the ores and the host rock)*. Ph. D. Thesis, Heidelberger Geowisseuschaftliche Abhandlungen, Band 37, VIII+284 S.
6. Forster, H and Jafarzadeh, A. (1994) *The Bafq mining district in Central Iran- a highly mineralized Infracambrian volcanic field*. Economic Geology, vol. 87, pp. 1697-1721.
7. Becker, H.; Forster, H.; Soffel, H. (1973) *Central Iran, a former part of Gondwanaland? Palaeomagnetic evidence from Infra Cambrian rocks and iron ores of the Bafq area, Central Iran*. Zeitschrift fur Geophysik, Band 39, Seit 953-963.
۸. حیدری، م. (۱۳۷۵) بررسی ولکانیسم مناطق اسفوردی و زیریگان (ایران مرکزی). دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۲۱ صفحه.
۹. شریفی آ. (۱۳۷۶) بررسی گرانیتوئیدهای ایران مرکزی (نواحی اسفوردی - زیریگان). گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۲۰۳ صفحه.
10. Johnson, D.A.; Barton, M.D.; Hassanzadeh, J. (1993) *Mafic and felsic hosted Fe-Apatite-(REE-Cu) mineralization in Nevada*. Geol. Soc. America, Abstract with programs. 89th Annual Cordilleran Section, 46th Annual Rocky Mountain Section, Reno Nevada, vol. 25, no. 5, abs. no. 4953.