

## روابط بافتی - شیمیایی کانی‌های آپاتیت - مونازیت - زنوتیم در کانسار آهن ± آپاتیت لکه - سیاه (شمال شرق بافق): شواهدی از تکوین یک سامانه گرمابی

میثم قلی‌پور<sup>۱</sup>، مهرداد براتی<sup>\*۱</sup>، ابراهیم طالع‌فاضل<sup>۱</sup>، وراتیسلاو هورای<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعالی‌سینا، همدان، ایران

۲- موسسه علوم زمین‌اسلاوکی، براتیسلاو، اسلواکی

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۴، نسخه نهایی: ۹۸/۳/۱۸)

**چکیده:** کانسار آهن ± آپاتیت لکه‌سیاه در ایالت فلزرازی بافق- ساغند (ایران مرکزی) و در سنگ‌های میزان ریولیتی قرار گرفته است. کانی‌های اصلی در این کانسار مگنتیت و آپاتیت هستند که کانی‌های مونازیت و زنوتیم به صورت میانبار درون بلور و شکستگی‌های این دو کانی تشکیل شده‌اند. کانی‌ها با استفاده از روش‌های میکروسکوپی و تجزیه ریزکاوالکترونی بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که بلور آپاتیت اولیه بوده و احتمالاً از ماقمای نخستین با ماهیت مافیک تا فرامافیک نهشته شده است. بلورهای آپاتیت دارای منطقه‌بندی نامنظم از فازهای تیره و روشن هستند، به‌طوری که بخش‌های تیره آپاتیت غنی از میانبارهای مونازیت و زنوتیم ثانویه است. این نتایج با فرآیند انحلال- تنهشینی مجدد سازگار است. طی این فرآیند، بلورهای آپاتیت با سیال‌های گرمابی تأخیری که در راستای مرزهای بلوری در حال مهاجرت بوده‌اند واکنش داده و تهی از عناصر خاکی نادر (REE) شده‌اند. همچنین عناصر خاکی نادر دستخوش جدایش ترجیحی شده‌اند، به‌طوری که اغلب عناصر خاکی نادر سیک (LREE) در مونازیت و عناصر نادر سنگین (HREE) در زنوتیم غنی شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** کانسارهای اکسید آهن ± آپاتیت؛ کانی‌های عناصر خاکی نادر؛ دگرزنی‌های؛ فرآیند انحلال- تنهشینی مجدد.

مهمترین منابع اقتصادی کانی‌های خاکی نادر دارای خاستگاه ماقمایی (کربناتیت‌ها) و رسوبی (پلاسراها) هستند. این موضوع باعث شده است که توجه پژوهشگران از فرآیندهای گرمابی که می‌تواند باعث تشکیل کانی‌های خاکی نادر شوند دور شود. دلیل دیگر برای نادیده گرفتن عناصر خاکی نادر در فرآیندهای گرمابی این واقعیت است که مدت‌ها تصور می‌شد که این عناصر نامتحرك هستند [۷]. در اغلب مناطق، کانی‌های کمیاب عناصر خاکی نادر با آپاتیت و فلئوریت که به طور معمول هر دو غنی از عناصر خاکی نادر هستند همراه‌اند. آپاتیت در بسیاری از ذخایر، کانی باطله با اهمیتی است که ممکن است نقش کلیدی در تشکیل کانی‌های خاکی نادر داشته باشد [۸]. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده است که این کانی از طریق واکنش با

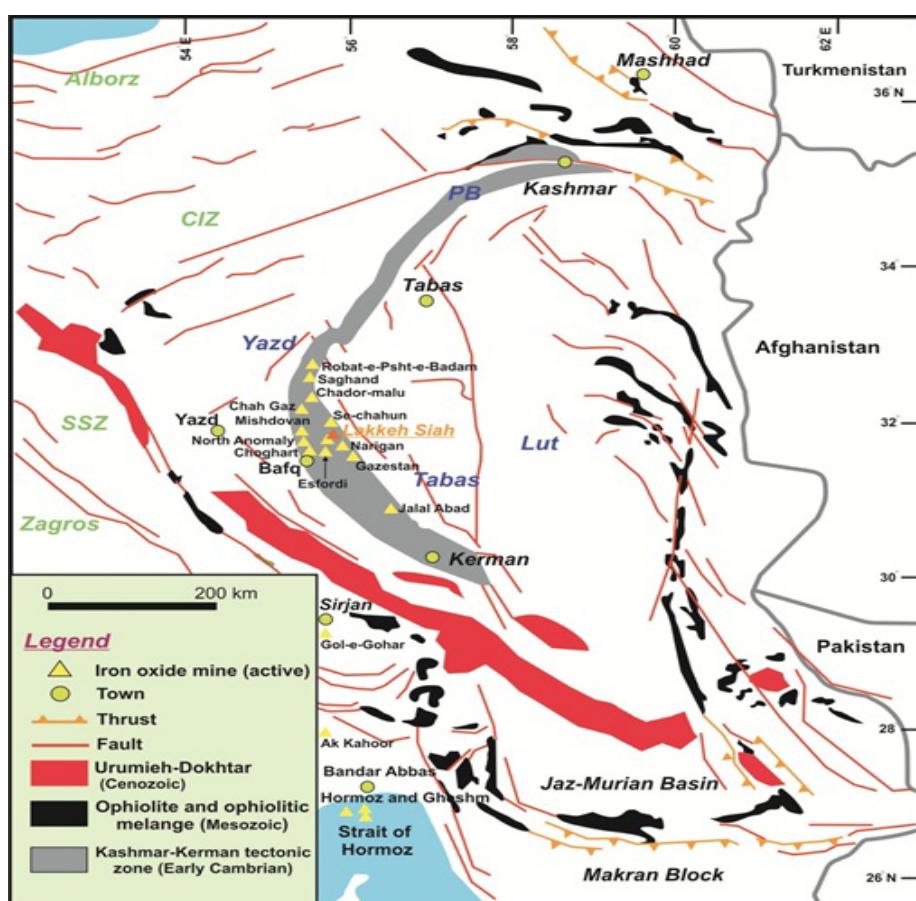
مقدمه کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت (IOA) و اکسید آهن- مس- طلا (IOCG) از مهمترین کانسارهای غنی از اکسید آهن در جهان هستند که اهمیت اقتصادی بالایی به عنوان منابع آهن، مس، طلا، اورانیوم و عناصر خاکی نادر دارند [۱]. این کانسارها از نظر زمانی در گستره آرکئن [۵] تا پلیوسن [۴-۲] تشکیل شده‌اند. برخی کانسارهای IOA را به عنوان عضو پایانی خانواده IOCG در نظر می‌گیرند [۶]. آپاتیت یکی از مهمترین کانی‌های دربردارنده عناصر خاکی نادر است و می‌تواند به عنوان یک شناساگر مفید برای کانسارهای IOA و IOCG مورد استفاده قرار گیرد و خاستگاه و ماهیت سنگ‌های میزان و مقدار عناصر فرار گیرد کانه‌ساز را در خود ثبت نماید [۷]. از نظر تاریخی،

که می‌توانند جنبه اقتصادی داشته باشند نسبت به اکتشاف و گسترش فعالیت‌های زیرساختی وابسته به حوزه عناصر خاکی نادر اقدام شود. وجود تعدادی کانسار و نهشته IOA موجب پتانسیل بسیار بالای منطقه لکه‌سیاه برای پژوهش شده است. از این رو با توجه به مطالب بیان شده و اینکه کانی آپاتیت می‌تواند به عنوان یک منبع اولیه برای تشکیل کانی‌های خاکی نادر عمل کند، در این پژوهش حضور و سازوکار تشکیل کانی‌های خاکی نادر در کانسار لکه‌سیاه بررسی شد.

#### جایگاه زمین‌شناسی

خرد قاره ایران مرکزی بخشی از سامانه کوه‌زایی آلپ-هیمالیا محسوب می‌شود که از غرب به شرق به سه پهنه ساختاری اصلی لوت، طبس و یزد با مرزهای گسله تقسیم می‌شود [۱۲]. در این ناحیه، منطقه‌ای کمانی شکل با ابعاد  $80 \times 1000$  کیلومتر به نام کمان زمین ساختی کاشمر- کرمان (KKTZ) وجود دارد [۱۳] (شکل ۱).

شورابه‌ها، آب خالص و سیال‌های اسیدی در گستره دمایی ۳۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد و فشار ۰.۵ GPa تا ۱ دگرسان می‌شود. طی این فرآیند، کانی‌های خاکی نادر می‌توانند به صورت میانبار در کانی آپاتیت تشکیل شوند [۸]. خردقاره ایران مرکزی میزبان بسیاری از کانسارها به‌ویژه کانسارهای IOA است و از این رو، یکی از ایالت‌های فلزیابی مهم در ایران محسوب می‌شود [۹، ۱۰]. بررسی کانسارهای IOA در این ناحیه نشان می‌دهد که این کانسارها با مقادیر قابل توجهی از کانی‌های میزبان عناصر خاکی نادر همراهی می‌شوند [۱۱]، بنابراین لزوم بررسی و اکتشاف این نوع ذخایر با توجه به کاربرد گستردگی این عناصر در صنایع مختلف کاملاً محسوس است. اکتشافات و شناسایی بی‌هنجری‌های این عناصر بیانگر وجود پتانسیل‌های نهفته عناصر خاکی نادر در کشور است. از سویی، رشد شتاب گرفته مصرف و ارزش راهبردی این عناصر، فضای را جهت توجه بیشتر به منابع موجود آماده نموده و لازم است تا با استفاده از دانش روز دنیا و انجام بررسی‌ها و شناسایی منابعی



شکل ۱ نقشه ساختاری بخش شرقی- مرکزی ایران و جایگاه پهنه زمین ساختی کاشمر- کرمان و کانسار لکه‌سیاه بر آن [۱۳]. (SSZ: پهنه سنندج- سیرجان، CIZ: پهنه ایران مرکزی و PB: قطعه پشت بادام).

انجام بررسی‌های کانی‌شناسی، تعداد ۱۵ مقطع نازک- صیقلی کربن اندود شده (به ضخامت ۵۰ آنگستروم) و برای بررسی شیمی‌کانی‌ها به روش تجزیه ریزکاوالکترونی (EPMA) انتخاب شدند. این بررسی‌ها در موسسه علوم زمین اسلواکی با استفاده از ریزکاوال مدل CAMECA SX-100 توسط بلورهای آشکارساز LLIF و LPET و مقایسه با استانداردهای PET و TAP انجام شد. ولتاژ شتاب‌دهنده دستگاه برای کانی‌های سیلیکاتی، اکسیدی و کربنات ۱۵ کیلوولت، جریان ۴۰ تا ۴۰۰ نانوآمپر است و قطر پرتوی تابشی نیز ۲ تا ۵ میکرون بود. حد تشخیص دستگاه برای عناصر Y, Th, REE و U ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ پی‌بی‌ام و برای سایر عناصر کمتر از ۱۰۰ پی‌بی‌ام بود.

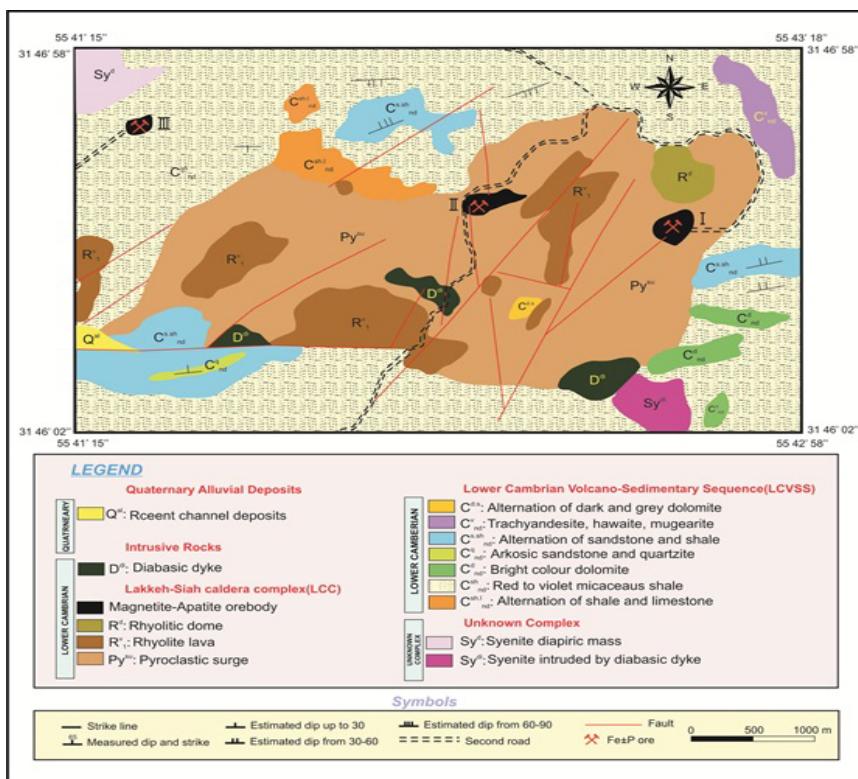
#### زمین‌شناسی و کانه‌زایی

منطقه لکه‌سیاه در ۴۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق در استان یزد واقع است. بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰ علی‌آباد، اغلب رخمنون‌های این منطقه وابسته به کامبرین پیشین بوده و بیشتر شامل ریولیت، توف ریولیتی، دولومیت، ماسه سنگ و دایک‌های دیابازی هستند. واحدهای ریولیتی اغلب به صورت جریان‌های آذرآواری، گدازه و گنبد دیده می‌شوند که میزبان اصلی کانه‌زایی هستند (شکل ۲).

KKTZ میزبان ناحیه بافق و سنگ‌های آتشفشاری و آذرین نفوذی کامبرین پیشین در ایران مرکزی است و به دلایل مختلف به عنوان یک منطقه مجازا در حوزه ایران مرکزی در نظر گرفته می‌شود [۱۴] که مهم‌ترین این دلایل عبارتند از: ۱) برخلاف قطعه‌های همسایه، یعنی طبس و یزد، سنگ‌های نئوپروتزوژنیک پسین و پالئوزوئیک پیشین در راستای آن بیرون‌زدگی دارند و ۲) سنگ‌های آذرین نفوذی گرانیت-تونالیت تریاس پسین KKTZ با وابستگی کمانی و تصادفی در قطعه‌های یزد و طبس وجود ندارد [۱۳]. کانسار لکه‌سیاه نیز که یکی از مناطق آهن‌دار در ناحیه بافق محسوب می‌شود در KKTZ واقع است. ناحیه بافق میزبان مهم‌ترین کانسارهای آهن-منگنز و کانسارهای سرب و روی روسوبی-بروندمی (نوع سدکس) در ایران است [۱۵]. این ذخایر بیشتر در توالی آتشفشاری- روسوبی کامبرین پیشین جایگزین شده‌اند که شامل مجموعه پیچیده‌ای از ریولیت‌های آهکی قلایی، ریوداسیت، بازالت و مقادیر جزیی سنگ‌های روسوبی تبخیری، دولومیت، سنگ آهک، گل‌سنگ و ماسه سنگ است [۱۵].

#### روش بررسی

به منظور بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمی‌کانی‌ها، تعداد ۴۵ مقطع نازک- صیقلی از کانسنگ آهن±آپاتیت تهیه شد. پس از



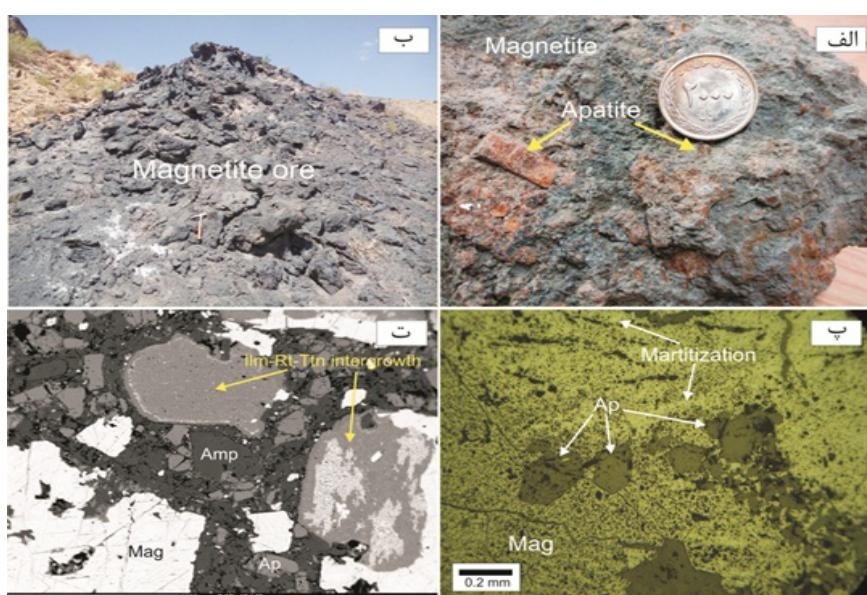
شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده منطقه لکه‌سیاه و جایگاه نهشته‌های مورد بررسی [۱۶].

زدگی‌های کانساری با ساخت توده‌ای و به رنگ سیاه دیده می‌شود (شکل ۳ ب). در مقاطع صیقلی، مگنتیت به رنگ سفید تا صورتی چرک و قهوه‌ای با مقدار کمی بروون رست و کانی هماتیت ناشی از پدیده مارتیتی شدن دیده می‌شود (شکل ۳ پ). بلورها بی‌شکل تا نیمه‌خودشکل و به ندرت خودشکل هستند که بلورهای آپاتیت خود شکل در اثر پدیده همرشدی در آن با بافت دانه پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۳ پ). نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی مگنتیت در همه نهشته‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار  $\text{FeO}$  در مگنتیت‌های لکه‌سیاه  $82.75\%$  درصد وزنی است. مقداد  $\text{TiO}_2$  بین  $0.080$  تا  $0.238\%$  درصد وزنی می‌باشد، مقداد  $\text{SiO}_2$  از  $0.007$  تا  $3.606\%$  درصد وزنی،  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  بین  $0.005$  تا  $0.215\%$  درصد وزنی،  $\text{MnO}$  بین  $0.013$  تا  $0.048\%$  درصد وزنی،  $\text{CaO}$  بین  $0.002$  تا  $0.150\%$  درصد وزنی،  $\text{NiO}$  بین  $0.003$  تا  $0.019\%$  درصد وزنی،  $\text{V}_2\text{O}_3$  بین  $0.000$  تا  $0.010\%$  درصد وزنی،  $\text{MgO}$  بین  $0.002$  تا  $0.062\%$  درصد وزنی،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  بین  $0.001$  تا  $0.063\%$  درصد وزنی است. در برخی از مگنتیت‌های نهشته‌های ۲ و ۳، بافت رایج، درهم‌رشدی با سایر کانی‌های آهن‌دار و غیر آهن‌دار است (شکل ۳ ت). جایگیری ماغما در بخش‌های بالایی پوسته ممکن است باعث افزایش گریزندگی اکسیژن به علت گاززادایی از مذاب، حذف آهن دو ظرفیتی و تشکیل کانی‌های آهن‌دار به صورت درهم‌رشدی با مگنتیت شود [۲۲، ۲۳].

این سنگ‌ها بسیار ریز بلور بوده و به صورت سنگ‌های غنی از سیلیس بدون کانی‌های مافیک دیده می‌شوند. با توجه به جایگاه ساختاری منطقه در ایران مرکزی و گسل‌های موجود در این ناحیه، فرآیندهای دگرنهادی و دگرسانی در آن به خوبی شبیه به سایر مناطق ناحیه بافق رخ داده است [۱۷]. در برخی نقاط، شدت دگرسانی به حدی است که در اثر تشکیل کانی‌های ترمولیت-اکتینولیت، کلریت و اپیدوت، سنگ سبز رنگ شده است [۱۸، ۱۵]. ماده معدنی اغلب به صورت توده‌های عدسی شکل مگنتیت در میزان ریولیت و محل بدون فاصله آن تشکیل شده است. در قسمت‌های سطحی نیز هماتیت، لیمونیت و گوتیت در اثر پدیده‌های هوازدگی ایجاد شده‌اند. کانه‌زایی آهن در ۳ منطقه بررسی شد که بر اساس موقعیت جایگیری و با توجه به ابعاد آن‌ها به ترتیب با نام نهشته‌های ۱، ۲ و ۳ معرفی شده‌اند (شکل ۲) [۱۶].

### شیمی کانی‌ها مگنتیت

مگنتیت یک کانی اکسیدی معمول در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوی است و به طور گسترده در انواع کانسنگ-های آهن مانند سازند آهن نواری IOCG، IOA، BIF، Fe-Ti ماگمایی و اسکارن [۱۹، ۲۰] وجود دارد. اکسیدهای ایمینیت با اصلی همه نهشته‌های ذخیره لکه‌سیاه است و ماده زمینه در برگیرنده کانی‌های خاکی نادر چون آپاتیت محسوب می‌شود (شکل ۳ الف) [۲۱]. این کانی در بیرون



شکل ۳ تصاویری از کانسنگ آهن  $\pm$  آپاتیت لکه‌سیاه: (الف) نمونه دستی از کانسنگ مگنتیت  $\pm$  آپاتیت، (ب) رخمنون توده‌ای کانسنگ آهن در منطقه مورد بررسی (دید به سمت شرق)، (پ) تصویر میکروسکوپی بازتابی از آپاتیت‌های خوش‌وجه در زمینه مگنتیت مارتیتی شده (PPL) و (ت) تصویر BSE از درهم‌رشدی مگنتیت با ایلمینیت-روتیل-تیتانیت در کانسنگ مگنتیت  $\pm$  آپاتیت. (Ap: آپاتیت، Mag: مگنتیت، Amp: آمفیبول، ilm: ایلمینیت، Rt: روتیل، Ttn: تیتانیت. علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۲۱] هستند).

جدول ۱ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی مگنتیت در کانسار لکه‌سیاه (بر حسب درصد وزنی).

کانی / شماره نهشته	مگنتیت ۱													
SiO <sub>2</sub>	۰/۰۰	۰/۳۹۵	۰/۰۱۱	۰/۰۵۱	۰/۰۰۷	۰/۰۷۷	۰/۲۵۴	۰/۰۴۰	۱/۸۵۲	۰/۰۲۴	۰/۱۳۸			
TiO <sub>2</sub>	۰/۹۹۲	۰/۰۰	۰/۰۱۹	۰/۰۷۱	۰/۶۰۰	۰/۰۹۸	۰/۱۶۹	۰/۰۸۰	۰/۰۷	۰/۱۳۲	۰/۰۵۷			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۰	۰/۰۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲۸	۰/۰۵۳	۰/۰۵۸			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۳۱	۰/۰۵۴	۰/۰۳۰	۰/۰۰	۰/۰۰۵	۰/۱۱۴			
FeO	۱۹/۳۱	۱۹/۶۷	۹۰/۳۶	۸۷/۸۳	۸۷/۰۹	۹۰/۰۲۶	۹۰/۳۴	۹۰/۰۳۹	۸۳/۷۸	۸۹/۸۶	۸۵/۸۷			
MnO	۰/۰۱۴	۰/۰۲۳	۰/۰۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸۱	۰/۰۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲			
MgO	۰/۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۵۲	۰/۰۰	۰/۰۳۷	۰/۰۰	۰/۰۶۰	۰/۰۲۰	۰/۰۲۲			
CaO	۰/۰۰۲	۰/۰۵۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۵	۰/۱۰۳	۰/۰۴۳	۰/۲۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰			
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۷۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۱۴۱	۰/۰۰	۰/۱۳۵	۰/۱۲۱	۰/۱۶۳	۰/۲۷۹	۰/۳۶۲	۰/۱۰۴			
NiO	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۰	۰/۰۱۸			
ZnO	۰/۰۳۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰			
مجموع	۹۰/۰۵۸	۹۰/۰۲۲	۹۰/۰۴۵	۹۰/۰۱۷	۸۹/۸۲	۹۰/۰۷۵	۹۱/۰۰	۹۰/۰۷۶	۸۹/۹۴۳	۹۰/۰۴۸	۹۰/۰۸۶			
Al	۰/۰۰	۰/۰۲۴	۰/۰۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶۸	۰/۰۲۸	۰/۰۳۰			
Mn	۰/۰۸۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶۳	۰/۰۷۰	۰/۰۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷				
Ti	۰/۵۹۵	۰/۰۰	۰/۰۱۱	۰/۰۴۲	۰/۳۵۹	۰/۰۵۸	۰/۱۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۰۷۹	۰/۳۰۴			
V	۰/۱۱۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰	۰/۰۹۶	۰/۰۰	۰/۰۹۲	۰/۰۸۲	۰/۱۱۱	۰/۱۸۹	۰/۲۴۶	۰/۰۷۰			
Ni	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷			

ادامہ جدول ۱

کانی شماره نهشته	۲ مگنتیت	۳ مگنتیت	۳ مگنتیت	۳ مگنتیت	۳ مگنتیت						
<chem>SiO2</chem>	۰.۰۰۸	۰.۰۰	۰.۸۰۸	۰.۰۰	۰.۷۷۱	۰.۰۰	۳۶.۰	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۰.۴۴۱	۰.۱۰
<chem>TiO2</chem>	۰.۰۱۶	۰.۶۳۵	۰.۸۲۴	۰.۰۰۳	۰.۶۴۵	۰.۰۰	۰.۰۱۷	۰.۲۳۰	۲۵۴۷	۱۷۲۲	۰.۶۹۷
<chem>Al2O3</chem>	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰۲۴	۰.۰۶۳	۰.۰۲۰	۰.۰۰۵	۰.۰۵۲	۰.۰۰	۰.۰۲۸	۰.۰۰
<chem>Cr2O3</chem>	۰.۰۱۲	۰.۰۱۰	۰.۰۱۵	۰.۰۱۴	۰.۰۰	۰.۰۱۶	۰.۰۰۹	۰.۰۶۱	۰.۱۳۳	۰.۲۱۵	۰.۰۰
<chem>FeO</chem>	۸۷.۸۴	۸۶.۶۰	۸۲.۷۵	۸۷.۶۲	۸۳.۹۸	۹۲.۳۸	۸۸.۶۰	۹۰.۱۲	۸۸.۵۹	۸۵.۲۹	۸۹.۲۱
<chem>MnO</chem>	۰.۰۰	۰.۰۰۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱۳	۰.۰۳۵	۰.۰۰	۰.۰۱۴	۰.۰۲۶	۰.۰۲۹
<chem>MgO</chem>	۰.۰۰	۰.۰۲۴	۰.۰۲۰	۰.۰۲۳	۰.۰۲۷	۰.۰۰۴	۰.۹۰۷	۰.۰۰	۰.۰۰۲	۰.۲۶۷	۰.۰۶۶
<chem>CaO</chem>	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۱۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۹۸	۰.۰۲۲	۰.۶۶۰	۰.۰۱۱	۰.۰۲۵	۰.۳۴۳	۰.۱۵۰
<chem>V2O3</chem>	۰.۰۲۵	۰.۱۵۱	۰.۰۶۰	۰.۱۲۳	۰.۱۱۱	۰.۱۴۰	۰.۰۶۰	۰.۳۵۲	۰.۱۵۵	۰.۱۰۰	۰.۲۱۰
<chem>NiO</chem>	۰.۰۱۶	۰.۰۱۵	۰.۰۱۳	۰.۰۱۵	۰.۰۱۶	۰.۰۱۲	۰.۰۱۶	۰.۰۱۵	۰.۱۱	۰.۰۱۴	۰.۰۱۸
<chem>ZnO</chem>	۰.۰۱۶	۰.۰۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲۷	۰.۰۰	۰.۰۰۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
مجموع	۱۹.۹۲	۱۹.۴۵	۹۰.۶۰	۹۰.۸۳	۱۹.۷۱	۹۲.۶۱	۹۳.۹۹	۹۰.۸۹	۹۱.۵۰	۹۱.۴۴	۹۰.۳۹
<chem>Al</chem>	۰.۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱۳	۰.۰۳۳	۰.۰۱	۰.۰۱۳	۰.۰۲۷	۰.۰۰	۰.۰۱۵	۰.۰۰
<chem>Mn</chem>	۰.۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲۷	۰.۰۰	۰.۱۱	۰.۰۲۰	۰.۰۲۲
<chem>Ti</chem>	۰.۰۱۰	۰.۳۸۰	۰.۴۹۴	۰.۰۰۲	۰.۳۸۷	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۱۳۸	۱.۵۲۷	۱.۰۳۲	۰.۴۱۸
<chem>V</chem>	۰.۰۱۷	۰.۱۰۲	۰.۰۴۱	۰.۰۸۳	۰.۰۷۵	۰.۰۹۵	۰.۰۴۱	۰.۲۳۹	۰.۱۰۵	۰.۰۶۸	۰.۱۴۲
<chem>Ni</chem>	۰.۰۱۸	۰.۰۱۶	۰.۰۲۱	۰.۰۱۶	۰.۰۱۵	۰.۰۱۲	۰.۰۱۹	۰.۰۱۴	۰.۰۱۳	۰.۰۱۸	۰.۰۱۴

آلات

مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۳ الف). ترکیب شیمیایی کانی آپاتیت با استفاده از روش ریزکاو الکترونی اندازه‌گیری و در جدول ۲ ارائه شده است. تصاویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از مقاطع نازک- صیقلی جزئیات بیشتری را در مورد توزیع فازها، ترکیبات شیمیایی و پستی و بلندی نمونه در اختیار قرار می‌دهند. این تصاویر دو بعدی هستند و تفاوت‌های عدد اتمی در یک نمونه را نشان می‌دهند. تفاوت بین دو فاز بیشتر ناشی از غلظت‌های متفاوت عناصر در آن‌هاست، به طوریکه مناطق روشن‌تر جرم اتمی سنگین‌تری نسبت به مناطق تیره دارند. REE‌ها وزن اتمی بالایی دارند و الکترون‌های برگشتی بیشتری تولید می‌کنند، بنابراین آبیاتست ما مقادیر بالای REE<sub>d</sub> تصویر

آپاتیت دارای فرمول عمومی  $A_5(XO_4)_3Z$  است که جایگاه توسط REE، جایگاه X توسط  $P^{+5}$  به صورت  $PO_4^{+5}$  و  $Si^{+4}$ ،  $As^{+5}$ ،  $V^{+5}$ ،  $Mn^{+2}$ ،  $Cd^{+2}$ ،  $Fe^{+2}$ ،  $Mg^{+2}$ ،  $Ba^{+2}$ ،  $Sr^{+2}$  و  $Y^{+3}$  است. جایگاه Z توسط  $OH^-$  و  $Cl^-$  و  $F^-$  اشغال می‌شود [۸]. این کانی مهم‌ترین کانی میزبان عناصر خاکی نادر و شاخص-ترین کانی غیرفلزی در کانسار لکه‌سیاه است. در نمونه‌های دستی، آپاتیت با رنگ سبز تا زیتونی اغلب همراه با پوششی از اکسید آهن قرمز رنگ به صورت نیمه شکل دار تا خوشوجه، شفاف تا نیمه شفاف و گاهی دارای میانبارهایی از کانی‌های دیگر با ابعاد بیشینه حند سانتیمتر (تا ۵ سانتیمتر) در زمینه

مجله بلوورشناسی و کانی شناسی ایران

کند. مقدار  $\text{SrO}$  بین ۰/۰۲۶ تا ۰/۰۷۲ درصد وزنی،  $\text{FeO}$  بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۹۵ درصد وزنی،  $\text{ThO}_2$  بین ۱/۰۰۰ تا ۰/۰۲۵ درصد وزنی و  $\text{TiO}_2$  از ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۰۴ درصد وزنی تغییر می‌کند.  $\sum\text{REE}$  در آپاتیت‌های لکه‌سیاه غلظتی بین ۱/۶۵ تا ۳/۲۷۱ درصد وزنی دارد، به طوری که مقدار  $\sum\text{LREE}$  بین ۱/۴۰ تا ۱/۱۴ درصد وزنی دارد، و  $\sum\text{HREE}$  بین ۰/۲۵ تا ۰/۰۷۶ درصد وزنی است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار فلئور در آپاتیت از ۰/۰۷۵ تا ۰/۰۲۵ درصد وزنی متغیر است.

روشن تر ظاهر می شود، در حالی که قسمت های تیره تهی از REE هستند. در تصاویر BSE تهیه شده نیز آپاتیت ها الگوی منطقه بندی نامنظمی از فاز های تیره و روشن نشان می دهند که در آن، قسمت های تیره نسبت به قسمت های روشن میابارهای بیشتری از کانی مونازیت دارند. در این کانی، مقدار CaO بین ۵۲/۶۸ تا ۵۷/۰۲ درصد وزنی، P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> بین ۴۱/۱۹ تا ۴۲/۸۳ درصد وزنی و Na<sub>2</sub>O بین ۰/۰۶ تا ۰/۵۱ درصد وزنی در تغییر است. Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> فراوان ترین اکسید فلزی ویژه در آپاتیت-هاست که مقدار آن بین ۰/۰۷ تا ۱/۳۳ درصد وزنی تغییر می-

**جدول ۲** نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی آپاتیت در کانسار لکه‌سیاه (بر حسب درصد وزنی).

کانی	نیتری															
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۴۱,۲۲	۴۲,۹	۴۱,۷	۴۱,۲۶	۴۲,۹۱	۴۱,۳۵	۴۲,۳۲	۴۱,۹۱	۴۱,۳۲	۴۲,۸۳	۴۱,۸۶	۴۱,۶۶	۴۱,۱۹	۴۲,۰۴	۴۲,۲۲	۴۱,۳۰
TiO <sub>2</sub>	۰,۰۱۰	۰,۰۴۰	۰,۰۱۲	۰,۰۰۷	۰,۰۱۸	۰,۰۰۷	۰,۰۰	۰,۰۰۳۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۵	۰,۰۱۲	۰,۰۲۱	۰,۰۳۷	۰,۰۲۱	۰,۰۰
MnO	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲۰	۰,۰۱۶	۰,۰۰	۰,۰۶۷	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۳	۰,۰۴۶	۰,۰۱۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۱۰	۰,۰۴۷	۰,۲۱	۰,۱۹۰	۰,۲۰۰	۰,۱۷۰	۰,۱۲۰	۰,۱۴۰	۰,۱۹۰	۰,۱۷۰	۰,۱۳۰	۰,۱۸۰	۰,۱۹۰	۰,۱۵۰	۰,۱۹۰	۰,۱۷۰
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۱۷	۰,۰۴۷	۰,۰۴۰	۰,۰۷۰	۰,۰۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۹۰	۰,۰۴۰	۰,۰۶۰	۰,۰۷۰	۰,۰۴۰	۰,۰۳۸۰	۰,۰۳۴۰	۰,۰۱۹۰	۰,۰۳۵۰	۰,۰۴۰۰
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱,۱۲۴	۰,۰۷۳	۱,۳۳۰	۱,۲۹۰	۱,۲۷۰	۱,۲۲۰	۰,۰۴۰	۱,۳۱۰	۱,۴۶۰	۰,۰۳۰	۰,۰۹۰	۰,۰۷۰	۰,۰۸۰	۰,۰۷۱۰	۰,۰۹۹۰	۱,۰۶۰
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۸۸	۰,۱۰۳	۰,۱۸	۰,۰۲۴	۰,۲۶۲	۰,۰۷۷	۰,۱۵۹	۰,۰۴۹	۰,۰۲۶	۰,۱۸۷	۰,۱۶	۰,۱۹۹	۰,۱۷۲	۰,۱۱۹	۰,۲۴۶	۰,۱۷۹
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۴۶	۰,۰۴۸	۰,۴۱۸	۰,۰۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۲۹	۰,۰۴۰	۰,۰۱۹	۰,۰۱۸۰	۰,۰۳۰	۰,۰۳۵۸	۰,۰۲۶۶	۰,۰۳۵۵	۰,۰۳۹۴	۰,۰۳۹۴
SmO	۰,۰۴۷	۰,۰۳۷	۰,۰۷۳	۰,۰۳۶	۰,۰۷۳	۰,۰۴۳	۰,۰۰	۰,۰۰۸۴	۰,۰۱۷	۰,۰۰۵۲	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰۴۱	۰,۰۱۵	۰,۰۰۵۶	۰,۰۳۶	۰,۰۷۸
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۵۸	۰,۰۱۹	۰,۰۵۸	۰,۰۲۷	۰,۰۰	۰,۰۰۸۹	۰,۰۰۹۱	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۳۶	۰,۰۰۲۷	۰,۰۰۴	۰,۰۴۸	۰,۰۲۳	۰,۰۶۶
EuO	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴۷	۰,۱۰	۰,۰۲۰	۰,۰۴۵	۰,۰۶۸	۰,۰۹۸	۰,۰۰۵	۰,۱۴۷	۰,۰۰۸	۰,۱۴۶	۰,۱۰۰	۰,۲۱۰	۰,۱۳۲	۰,۰۶۶
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۷۵	۰,۰۰۴	۰,۰۷۴	۰,۰۴۹	۰,۰۱۶	۰,۰۳۵	۰,۰۷۹	۰,۰۰۸	۰,۰۶۴	۰,۰۳۵	۰,۰۰۵	۰,۰۲۳	۰,۰۰۱	۰,۰۹۲	۰,۰۷۲	۰,۰۹۳
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۳۳	۰,۰۰	۰,۰۱۷	۰,۰۲۴	۰,۰۲۲	۰,۰۳۲	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۸۶	۰,۰۰۴۹	۰,۰۰۴۰	۰,۰۰	۰,۰۱۷	۰,۰۰	۰,۰۰
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۱۶	۰,۱۱۷	۰,۰۷۳	۰,۰۰	۰,۱۱۱	۰,۰۰۵	۰,۰۰۸۹	۰,۰۱۳	۰,۰۰۶۳	۰,۰۰	۰,۱۴۵	۰,۰۰۶۵	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۱۴۵	۰,۰۰
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰۸	۰,۰۰	۰,۰۷۴	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۰	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۶۴	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۲۷	۰,۰۰۲۲	۰,۰۱۰	۰,۰۹۴	۰,۰۰۷۵
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۲۵۰	۰,۰۸۰	۰,۳۳۷	۰,۰۵۵	۰,۲۶۹	۰,۰۹۷	۰,۰۲۵۶	۰,۰۱۶۳	۰,۰۱۲۵	۰,۰۰۶۶	۰,۰۷۷۷	۰,۰۱۴۴	۰,۰۲۹۹	۰,۰۰	۰,۲۶۱	۰,۱۸۶
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۱۶	۰,۰۲۱	۰,۰۴۱	۰,۰۷۵	۰,۰۲۱	۰,۰۴۲	۰,۰۱۶	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰	۰,۱۰۵	۰,۰۰۶۱	۰,۰۰۷۰	۰,۱۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۴۷	۰,۰۳۱
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۹۱	۰,۰۰۸	۰,۰۳۵	۰,۰۶۸	۰,۱۲۲	۰,۰۰۵۹	۰,۰۰۷۷	۰,۰۰۷۲	۰,۰۰۹۹	۰,۰۰	۰,۱۰۴	۰,۰۰۴۵	۰,۰۱۰	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۶۵	۰,۰۰۸۴
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۹۳	۰,۱۱۴	۰,۰۷۵	۰,۰۰	۰,۱۰۱	۰,۰۰	۰,۱۳۸	۰,۰۷۲	۰,۰۰۹۵	۰,۱۲۰	۰,۱۸۵	۰,۰۳۷۴	۰,۱۸۲	۰,۱۳۶	۰,۱۴۲	۰,۱۸۳
SrO	۰,۰۵۲	۰,۰۴۷	۰,۰۴۷	۰,۰۵۲	۰,۰۳۱	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴۴	۰,۰۰۵۱	۰,۰۰۷۱	۰,۰۰۲۶	۰,۰۰۵۲	۰,۰۰۵۲	۰,۰۰۴۵	۰,۰۰۴۲	۰,۰۰۵۵	۰,۰۰
ThO <sub>2</sub>	۰,۰۱۲	۰,۰۰۳	۰,۰۱۰	۰,۰۲۴	۰,۰۴۱	۰,۰۱۹	۰,۰۰	۰,۰۰۰۹	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۷	۰,۰۰	۰,۰۱۲
CaO	۰,۳۴۵	۰,۷۱۲	۰,۲۷۷	۰,۲۹۳	۰,۳۰۹	۰,۳۱۵	۰,۴۵۱	۰,۲۶۸	۰,۲۶۸	۰,۵۲۷	۰,۳۳۵	۰,۳۷۶	۰,۳۰۴	۰,۴۵۲	۰,۳۶۵	۰,۲۹۳
FeO	۰,۰۷۶	۰,۰۴۵	۰,۱۱۷	۰,۰۶۴	۰,۰۹۴	۰,۰۵۰	۰,۰۰	۰,۱۱۹	۰,۰۰۸۶	۰,۰۱۶	۰,۰۱۳	۰,۰۹۲	۰,۰۲۳	۰,۰۰۷	۰,۱۱۹	۰,۰۰۸
Na <sub>2</sub> O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰۴۴	۰,۱۳۳	۰,۰۷۴	۰,۰۱۸	۰,۰۶۶	۰,۰۲۸۴	۰,۰۳۵۹	۰,۰۰	۰,۱۰۲	۰,۰۴۰۷
F	۳,۳۵۵	۳,۷۸۱	۳,۱۸۹	۳,۲۱۸	۳,۱۹۶	۳,۳۶۴	۳,۷۸۲	۳,۵۱۲	۳,۰۳۹	۳,۴۲۳	۳,۲۷۳	۳,۰۸۵	۳,۱۷۰	۲,۷۵۸	۲,۷۸۸	۳,۱۲۰
Cl	۱,۰۲۱	۰,۱۲۷	۰,۷۹۵	۰,۹۰۰	۰,۸۵۳	۰,۸۱۹	۰,۶۲۷	۰,۰۰۴	۰,۹۹۶	۰,۰۲۵۴	۰,۰۳۲	۰,۶۹۱	۰,۰۷۲۷	۰,۰۴۰۵	۰,۶۳۸	۰,۶۱۵
OH*	۰,۱۱۸	۰,۱۰۶	۰,۹۲۸	۰,۸۸۴	۰,۹۳۱	۰,۸۷۷	۰,۰۰۴۶	۰,۰۰۴۴	۰,۰۰۰۲	۰,۱۰۵۷	۰,۰۷۷۴	۰,۰۹۹۳	۰,۰۹۸۲	۰,۱۱۶۰	۰,۱۰۹۳	۰,۰۹۹۴
مجموع	۱-۰,۱,۸	۱-۰,۴,۷	۱-۰,۲,۱	۱-۰,۱,۰	۱-۰,۳,۷	۱-۰,۲,۶	۱-۰,۳,۰	۱-۰,۲,۹	۱-۰,۲,۳	۱-۰,۳,۲	۱-۰,۲,۵	۱-۰,۲,۸	۱-۰,۱,۸	۱-۰,۲,۸	۱-۰,۲,۹	۱-۰,۱,۰
-O=F	۱,۴۱۲	۱,۰۹۲	۱,۳۴۲	۱,۳۵۵	۱,۳۴۶	۱,۴۱۶	۱,۰۹۲	۱,۴۷۹	۱,۲۷۹	۱,۴۴۱	۱,۴۲۰	۱,۲۹۹	۱,۳۳۵	۱,۱۶۱	۱,۱۷۳	۱,۳۱۳
-O=Cl	۰,۳۲۰	۰,۰۲۸	۰,۱۷۹	۰,۰۲۳	۰,۱۹۲	۰,۱۸۴	۰,۰۱۴	۰,۱۸۱	۰,۰۲۲۴	۰,۰۰۵۷	۰,۱۸۷	۰,۱۵۵	۰,۱۴۱	۰,۱۰۲	۰,۱۴۴	۰,۱۳۸
مجموع(F,Cl)	۱۰۰,۶	۱۰۳,۱	۱۰۰,۷	۱۰۰,۲	۱۰۲,۳	۱۰۱,۱	۱۰۱,۰	۱۰۱,۵	۱۰۰,۹	۱۰۲,۱	۱۰۱,۰	۱۰۱,۷	۱۰۰,۶	۱۰۲,۰	۱۰۱,۹	۱۰۰,۲

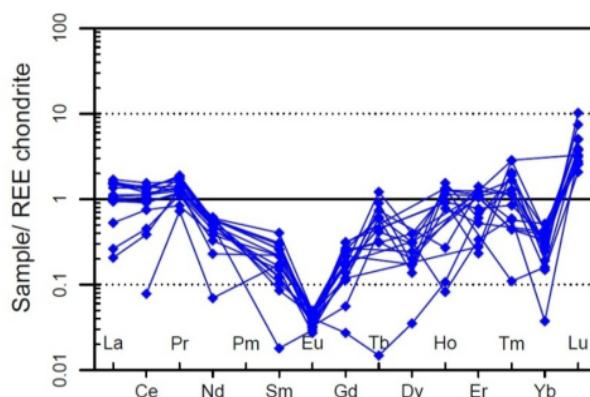
**OH\*=Calculated**

منطقه‌بندی نمایانی در بلورهای مونازیت دیده می‌شود. تجزیه ریزکالوکترونی نشان داده است که قسمت‌های تیره مقادیر  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  و  $\text{SrO}$  بیشتری نسبت به قسمت‌های روشن دارند (شکل‌های ۵ پ و ت). نتایج تجزیه ریزکالوکترونی این کانی در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار  $\text{P}_2\text{O}_5$  در این کانی بین ۲۸/۲۵ تا ۴۶/۳۰ با میانگین ۲۹/۵۸ است.  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  با مقدار ۳۲/۲۱ تا ۳۵/۳۶ و میانگین ۳۳/۸۲ درصدوزنی فراوان‌ترین اکسید فلزی کمیاب در این کانی است، به طوریکه می‌توان مونازیت‌های این منطقه را مونازیت‌های سریم‌دار نامید.  $\text{La}_2\text{O}_3$  با مقدادر ۱۷/۰۱ تا ۲۴/۷۱ و میانگین ۱۹/۸۳ و  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  با گستره ۵/۳۲ تا ۱۸/۱۳ و میانگین ۸/۰۶ درصد وزنی، سپس از  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  به ترتیب فراوان‌ترین اکسیدهای عناصر خاکی نادر در مونازیت‌ها هستند.  $\text{ThO}_2$  تغییراتی بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۶ و میانگینی برابر با ۰/۱۸ درصد وزنی دارد. مونازیت با  $\text{ThO}_2$  کمتر از ۱ درصد وزنی دارای خاستگاه گرمابی و با ۵  $<$   $\text{ThO}_2$   $<$  ۳ درصد وزنی دارای خاستگاه ماگمایی است [۲۶]. با توجه به مقدار Th در مونازیت‌های لکه‌سیاه، خاستگاه آن‌ها گرمابی است. عناصر La, Pr, Ce, Sm, Eu در ساختار مونازیت و عناصر Ho, Er, Tm, Yb, Y, Lu و  $\text{Ho}$  در زنوتیم غنی می‌شوند [۲۷]. براساس نمودارهای سه‌تایی La-Ce-Nd و HREE+Y-LREE-Th+U [۲۸]، ترکیب شیمیایی آن‌ها بررسی شد. در نمودار سه‌تایی La-Ce-Nd (شکل ۶ الف)، نمونه‌های مونازیت بیشتر به قطب Ce نزدیک هستند و این نشان دهنده غلظت بیشتر عنصر Ce در این کانی است. در نمودار HREE+Y-LREE-Th+U (شکل ۶ ب)، همه مونازیت‌های مورد بررسی در قطب LREE جمع شده‌اند که نشانه پیروی این نمونه‌ها از فرمول عمومی مونازیت است. الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت [۲۹] در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس این شکل، مونازیت‌های لکه‌سیاه دارای تهی‌شدگی در عناصر Yb, Dy و Eu و غنی‌شدگی در Tm و  $\text{La/Ce}_{\text{cn}}$  هاستند. نسبت‌های بالای  $(\text{La/Nd})_{\text{cn}}$  (۰/۸۶ تا ۱/۹۱)،  $(\text{La/Ce})_{\text{cn}}$  (۱/۰۱ تا ۸/۴۵) و  $(\text{La/Sm})_{\text{cn}}$  (۲/۶۳ تا ۴۳/۸۵) نشان دهنده درجه بالای جدایش LREE در مونازیت‌های کانسار لکه‌سیاه است.

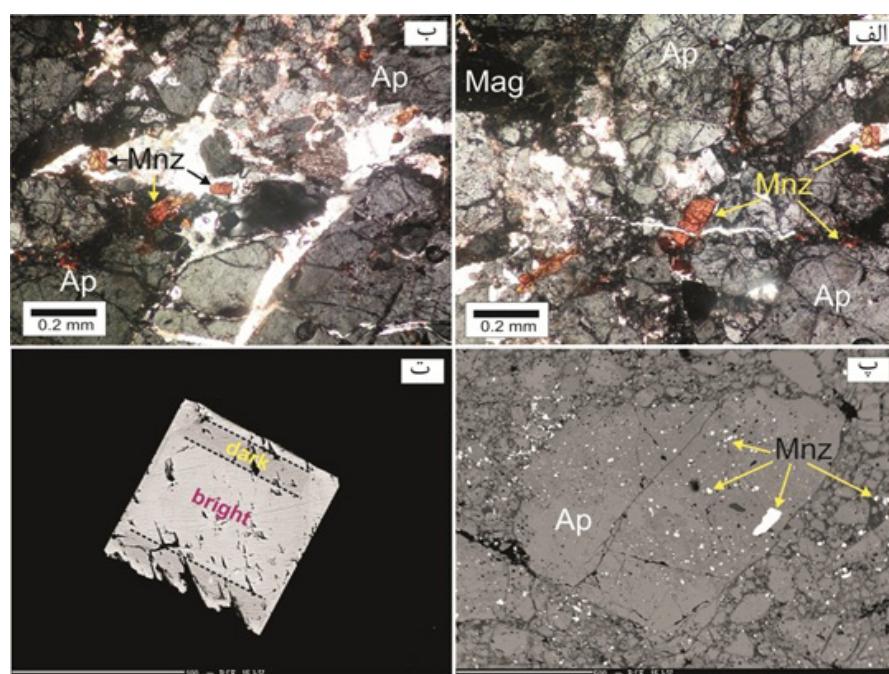
فلئور به دلیل ضریب جدایش بالا در مذاب غنی از آهن متمرکز شده [۲۴]، سپس وارد سیال‌های گرمابی شده و به صورت آپاتیت غنی از F (فلئورآپاتیت) تهنشین می‌شود. بنابراین غلظت به نسبت بالای فلئور در آپاتیت‌های لکه‌سیاه می‌تواند ناشی از دخالت و درگیری فعالیت‌های گرمابی-ماگمایی در این ناحیه باشد. شکل‌گیری آپاتیت‌های غنی از فلئور تنها به مقدار کمی از فلئور در فاز سیال نیاز دارد ( $a_{\text{HF}}/a_{\text{H}_2\text{O}} < 10^{-4}$ )، در حالی که سیال‌های با فعالیت مشابه برای کلر ( $a_{\text{HCl}}/a_{\text{H}_2\text{O}} < 10^{-5}$ ) آپاتیت غنی از کلر نمی‌سازد. این امر توضیح می‌دهد که چرا بیشتر آپاتیت‌ها در محیط‌های گرمابی غنی از فلئور هستند، حتی اگر فعالیت کلر در سیال نسبت به فلئور بیشتر باشد. مقدار Sr در آپاتیت‌های لکه‌سیاه بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۲ درصد وزنی است که در مقایسه با آپاتیت‌های وابسته به ذخایر کربناتیتی با مقدار Sr بیش از ۰/۲۵ درصد وزنی بسیار کم است و این امر می‌تواند دلیلی بر عدم وابستگی این کانی به ماگماهای کربناتیتی باشد [۲۵]. همچنین غلظت پایین Sr در آپاتیت می‌تواند ناشی از فرآیند جدایش پلازیوکلаз از ماگما باشد [۲۵]. در شکل ۴ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر کانی آپاتیت ارائه شده است. چنان که دیده می‌شود الگوی توزیع REE بدون غنی‌شدگی مشخص از LREE و HREE است.

### مونازیت

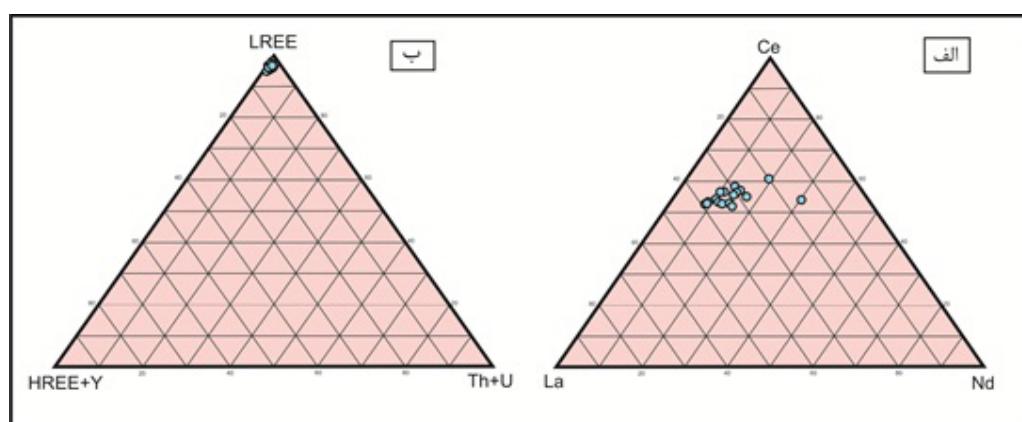
مونازیت دارای ترکیب اسمی (LREE)(PO<sub>4</sub>) است که LREE‌ها (بیشتر La+Ce+Nd) معمولاً ۷۵ درصد از کل نسبت‌های کاتیونی را در ساختار آن تشکیل می‌دهند. در بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده، مونازیت به صورت میانبار در بلورهای آپاتیت و به رنگ قرمز اخراجی تا خرمایی رنگ با ابعاد ۵۰ تا ۲۵۰ میکرون در کانی یا در شکستگی‌های ثانویه آن به همراه کلسیت ته نشست شده‌اند. بلورها نیمه خودشکل تا خوش‌وجه و بدون جهت‌یابی هستند و بلورهایی که در شکستگی‌ها رشد کرده‌اند دچار خرد شدگی شده‌اند (شکل‌های ۵ الف و ب) در تصاویر BSE، بلور مونازیت سفید رنگ درون آپاتیت خاکستری رنگ دیده می‌شود که در محل تلاقی شکستگی‌ها به طورقابل ملاحظه‌ای رشد کرده است و این پدیده نقش شکستگی‌ها را در عبور محلول‌های سازنده این کانی نشان می‌دهد. در برخی از تصاویر با بزرگنمایی بالا،



شکل ۴ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در کانی آپاتیت، بهنجار شده با کدریت [۲۹].



شکل ۵ الف و ب) تصاویر میکروسکوپی نور عبوری از مونازیت‌های خرمایی رنگ در شکستگی‌های آپاتیت (XPL)، پ) تصویر BSE از میانبارهای پراکنده مونازیت با ابعاد مختلف در بلور آپاتیت و ت) تصویر BSE نزدیک از منطقه‌بندی تیره و روشن در بلور مونازیت با ابعاد تقریبی ۱۰۰ میکرون. (آپاتیت، Ap؛ مگنتیت، Mag؛ مونازیت، Mnz).



شکل ۶ ترکیب مونازیت‌های لکه‌سیاه در الف) نمودار La-Ce-Nd و ب) نمودار HREE+Y-LREE+Th+U [۲۸].

جدول ۳ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی مونازیت در کانسار لکه‌سیاه (بر حسب درصد وزنی).

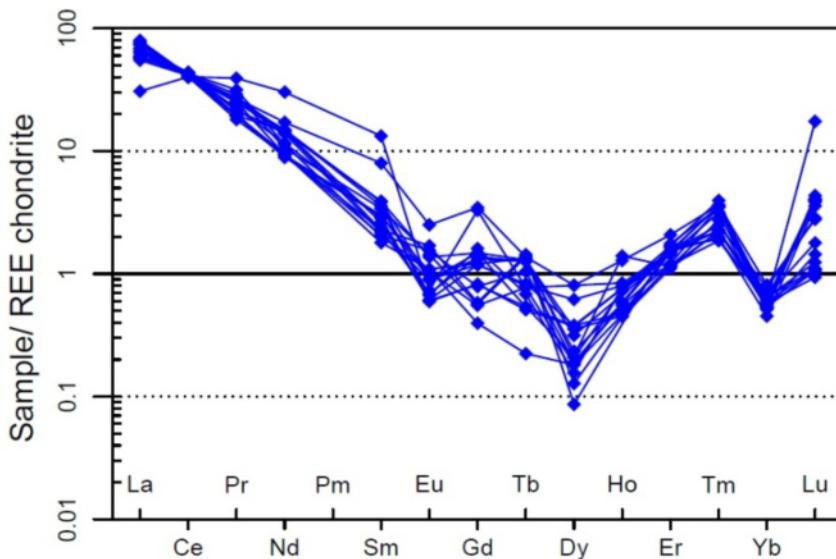
مونازیت کانی	بخش / روش	مونازیت تیره	مونازیت تیره	مونازیت روش	مونازیت روش	مونازیت روش	تیره مونازیت	روشن مونازیت	مونازیت	مونازیت	مونازیت
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۳۰,۲۶	۲۹,۲۳	۲۹,۵۳	۲۹,۷۱	۲۸,۸۴	۲۹,۲۷	۲۹,۰۱	۲۰,۲۴	۲۸,۲۵	۲۸,۲۵	۲۸,۲۵
PbO	۰,۰۰۹	۰,۰۰۸	۰,۰۰۹	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	۰,۰۰۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷
ThO <sub>2</sub>	۰,۰۷۰	۰,۰۶۵	۰,۰۱۸	۰,۰۷۲	۰,۱۴۰	۰,۲۸۱	۰,۰۵۱	۰,۲۸۱	۰,۱۹۲	۰,۱۹۲	۰,۱۹۲
UO <sub>2</sub>	۰,۰۲۳	۰,۰۳۰	۰,۰۱۹	۰,۰۰	۰,۰۱۵	۰,۰۲۱	۰,۰۲۱	۰,۰۲۳	۰,۰۲۰	۰,۰۲۰	۰,۰۲۰
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۲۴۴	۰,۲۸۰	۰,۲۸۸	۰,۴۲۰	۰,۷۱۰	۰,۳۰۰	۰,۶۸۱	۰,۶۳۲	۰,۲۹۸	۰,۲۹۸	۰,۲۹۸
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۴,۷۱	۲۳,۱۵	۱۹,۷۰	۱۷,۶۴	۱۸,۱۳	۱۷,۸۶	۲۲,۷۴	۲۱,۳۶	۲۲,۹۸	۲۲,۹۸	۲۲,۹۸
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۳,۵۵	۳۲,۷۳	۳۴,۳۸	۳۵,۳۰	۳۳,۲۹	۳۴,۸۰	۳۴,۲۵	۳۵,۳۶	۳۳,۲۳	۳۳,۲۳	۳۳,۲۳
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲,۴۱۴	۲,۳۴۳	۲,۷۱۱	۳,۱۰۰	۳,۰۳۲	۳,۰۶۳	۳,۵۱۴	۲,۳۶۵	۳,۰۸۵	۳,۰۸۵	۳,۰۸۵
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵,۶۲۹	۵,۶۴۶	۶,۹۶۵	۸,۹۴۰	۸,۵۲۳	۸,۹۰۶	۶,۳۲۱	۵,۳۲۶	۵,۰۹۹	۵,۰۹۹	۵,۰۹۹
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۴۹	۰,۴۴۴	۰,۵۵۴	۰,۶۹۰	۰,۷۶۰	۰,۷۵۱	۰,۶۶۳	۰,۵۷۳	۰,۴۰۲	۰,۴۰۲	۰,۴۰۲
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۷۹	۰,۱۲۴	۰,۰۴۴	۰,۰۴۹	۰,۱۰۰	۰,۰۶۶	۰,۱۰۵	۰,۰۷۶	۰,۱۱۳	۰,۱۱۳	۰,۱۱۳
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۰۲	۰,۱۵۰	۰,۲۱۰	۰,۴۱۰	۰,۳۸۲	۰,۳۰۵	۰,۱۴۶	۰,۱۴۳	۰,۲۰۳	۰,۲۰۳	۰,۲۰۳
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۱۰	۰,۰۶۸	۰,۰۲۵	۰,۰۳۰	۰,۰۶۱	۰,۰۳۹	۰,۰۶۵	۰,۰۳۶	۰,۰۴۹	۰,۰۴۹	۰,۰۴۹
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۵۸	۰,۰۲۷	۰,۰۶۸	۰,۰۵۰	۰,۱۱۴	۰,۱۲۲	۰,۰۴۱	۰,۰۵۸	۰,۰۸۱	۰,۰۸۱	۰,۰۸۱
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۱۰۰	۰,۰۵۰	۰,۰۳۲	۰,۰۰	۰,۰۳۲	۰,۰۴۲	۰,۰۳۹	۰,۰۴۲	۰,۰۳۹
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۲۴۶	۰,۳۶۸	۰,۲۳۹	۰,۳۵۰	۰,۳۱۶	۰,۳۱۹	۰,۲۳۲	۰,۳۵۳	۰,۲۵۳	۰,۲۵۳	۰,۲۵۳
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۶۰	۰,۱۱۲	۰,۰۸۸	۰,۰۷۰	۰,۱۱۷	۰,۰۸۴	۰,۰۷۲	۰,۱۲۸	۰,۱۱۴	۰,۱۱۴	۰,۱۱۴
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۲۳	۰,۱۱۱	۰,۱۰۷	۰,۱۳۰	۰,۱۳۳	۰,۰۹۴	۰,۱۲۱	۰,۱۱۲	۰,۱۲۵	۰,۱۲۵	۰,۱۲۵
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۳۴	۰,۱۲۷	۰,۱۳۹	۰,۰۵۰	۰,۰۳۹	۰,۱۱۴	۰,۰۳۰	۰,۰۳۴	۰,۰۶۱	۰,۰۶۱	۰,۰۶۱
SO <sub>3</sub>	۰,۴۱۴	۱,۲۸۶	۰,۹۳۶	۰,۴۵۰	۱,۴۶۵	۰,۷۲۸	۰,۴۰۱	۰,۵۰۲	۰,۴۳۱	۰,۴۳۱	۰,۴۳۱
CaO	۰,۴۰۰	۱,۰۵۶	۱,۰۴۳	۰,۵۶۰	۱,۰۵۸	۰,۶۰۶	۰,۵۱۲	۰,۵۷۵	۰,۴۲۲	۰,۴۲۲	۰,۴۲۲
SrO	۰,۰۰۱	۰,۰۳۱	۰,۰۲۲	۰,۰۱۰	۰,۰۷۱	۰,۰۲۴	۰,۰۲۱	۰,۰۱۸	۰,۰۲۰	۰,۰۲۰	۰,۰۲۰
SiO <sub>2</sub>	۰,۲۹۰	۰,۴۰۰	۰,۴۷۰	۰,۷۴۰	۰,۶۸۰	۱,۰۴۰	۰,۲۱۰	۰,۲۶۰	۰,۴۶۰	۰,۴۶۰	۰,۴۶۰
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲۰	۰,۰۰	۰,۰۴۱	۰,۱۷۳	۰,۰۵۱	۰,۰۲۱	۰,۱۶۳	۰,۱۶۳	۰,۱۶۳
K <sub>2</sub> O	۰,۰۰۹	۰,۰۰۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۸	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۰۳	۰,۰۰۸	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳
مجموع	۹۹,۱۱	۹۸,۳۱	۹۸,۱۹	۹۸,۹۲	۹۸,۷۰	۹۸,۹۷	۹۹,۳۱	۹۸,۵۴	۹۸,۲۰	۹۸,۲۰	۹۸,۲۰

ادامه جدول ۳

کانی	مونازیت							
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۳۰,۳۹	۲۹,۱۳	۲۹,۴۳	۲۰,۴۶	۳۰,۲۸	۲۹,۷۶	۲۹,۱۳	۲۹,۹۷
PbO	۰,۰۰۸	۰,۰۰۵	۰,۰۰۸	۰,۰۰۹	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۱۸	۰,۰۰
ThO <sub>2</sub>	۰,۲۵۳	۰,۲۰۹	۰,۱۵۲	۰,۲۴۹	۰,۲۴۳	۰,۰۸۷	۰,۳۶۹	۰,۲۴۰
UO <sub>2</sub>	۰,۰۲۳	۰,۰۳۰	۰,۰۱۸	۰,۱۹۶	۰,۱۹۱	۰,۱۲۰	۰,۰۱۶	۰,۰۰۲
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۲۳۹	۰,۳۴۸	۰,۷۰۰	۰,۶۰۹	۰,۲۷۲	۰,۳۲۱	۱,۰۴۱	۰,۵۲۹
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۱,۲۳	۲۰,۳۶	۲۳,۹۸	۱۸,۴۱	۱۷,۸۹	۱۹,۶۰	۱۷,۰۱	۹,۵۲
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۲,۲۱	۳۴,۵۶	۲۲,۵۴	۳۴,۶۸	۳۵,۰۱	۳۳,۲۳	۳۳,۳۹	۳۲,۴۸
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲,۳۶۸	۲,۵۹۸	۲,۲۰۱	۳,۸۴۱	۲,۶۲۲	۳,۳۲۱	۳,۲۷۷	۴,۷۸۳
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۸,۷۹۵	۸,۶۳۲	۵,۵۶۳	۶,۷۹۶	۸,۳۳۱	۸,۷۱۲	۱۰,۲۷۹	۱۸,۱۳۰
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۴۴۳	۰,۷۵۳	۰,۵۸۲	۰,۳۹۲	۰,۴۲۱	۰,۵۱۲	۱,۵۵۴	۲,۵۸۵
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۵۰	۰,۰۴۳	۰,۰۶۷	۰,۰۸۰	۰,۰۶۵	۰,۰۴۵	۰,۱۸۳	۰,۰۵۳
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۵۶	۰,۲۱۳	۰,۳۴۳	۰,۳۱۳	۰,۳۸۳	۰,۳۰۶	۰,۸۹۴	۰,۸۵۱
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۵۹	۰,۰۲۴	۰,۰۵۹	۰,۰۶۳	۰,۰۲۵	۰,۰۳۷	۰,۰۸۵	۰,۰۳۶
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۰۱	۰,۱۲۰	۰,۰۷۵	۰,۰۸۷	۰,۱۲۱	۰,۱۹۸	۰,۲۵۹	۰,۲۵۹
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴۱	۰,۰۵۲	۰,۰۳۴	۰,۰۵۷	۰,۰۶۰	۰,۰۹۲
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۰۳	۰,۳۲۳	۰,۳۴۳	۰,۳۱۱	۰,۳۱۳	۰,۲۴۳	۰,۳۱۴	۰,۴۳۶
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۰۲	۰,۱۱۵	۰,۰۶۱	۰,۰۷۳	۰,۰۷۲	۰,۰۷۱	۰,۰۸۰	۰,۱۱۷
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۱۱۰	۰,۱۳۴	۰,۱۲۰	۰,۱۰۹	۰,۱۲۹	۰,۱۱۶	۰,۱۶۱	۰,۱۶۹

## ادامه جدول ۳

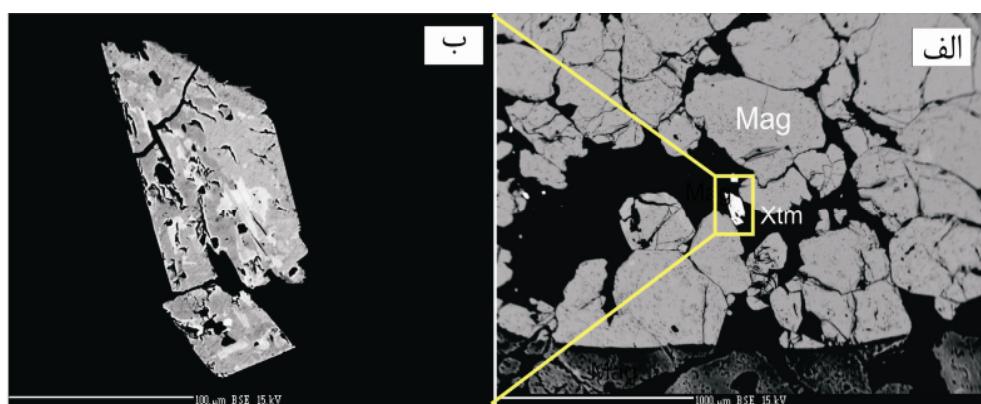
$\text{Lu}_2\text{O}_3$	۰,۰۴۶	۰,۰۳۵	۰,۱۲۴	۰,۱۳۱	۰,۱۲۹	۰,۱۲۴	۰,۰۹۱	۰,۰۸۹
$\text{SO}_3$	۰,۴۰۰	۰,۳۷۱	۰,۴۳۵	۰,۴۷۰	۰,۸۹۲	۰,۸۱۲	۰,۵۲۰	۰,۲۰۶
$\text{CaO}$	۰,۶۰۱	۰,۵۴۱	۰,۴۱۵	۰,۵۰۱	۰,۵۵۱	۰,۴۳۱	۰,۷۲۶	۰,۵۱۲
$\text{SrO}$	۰,۰۳۰	۰,۰۳۲	۰,۲۰۲	۰,۲۴۳	۰,۳۰۰	۰,۲۰۵	۰,۰۳۵	۰,۰۲۹
$\text{SiO}_2$	۰,۲۸۰	۰,۰۰۱	۰,۶۵۰	۰,۴۵۰	۰,۴۰۰	۰,۲۲۰	۰,۴۸۰	۰,۲۰۰
$\text{As}_2\text{O}_5$	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱۹	۰,۱۶۹	۰,۰۲۰	۰,۰۱۳	۰,۰۳۸	۱,۰۵۲
$\text{K}_2\text{O}$	۰,۰۰۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۸	۰,۰۰۷	۰,۰۰۴	۰,۰۳۴
مجموع	۹۸,۴۳	۹۸,۶۰	۹۸,۱۵	۹۸,۷۰	۹۸,۷۳	۹۸,۵۶	۱۰۰,۰۳	۱۰۲,۴۰



شکل ۷ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در مونازیت‌های منطقه، بهنجار شده با کندریت [۲۹].

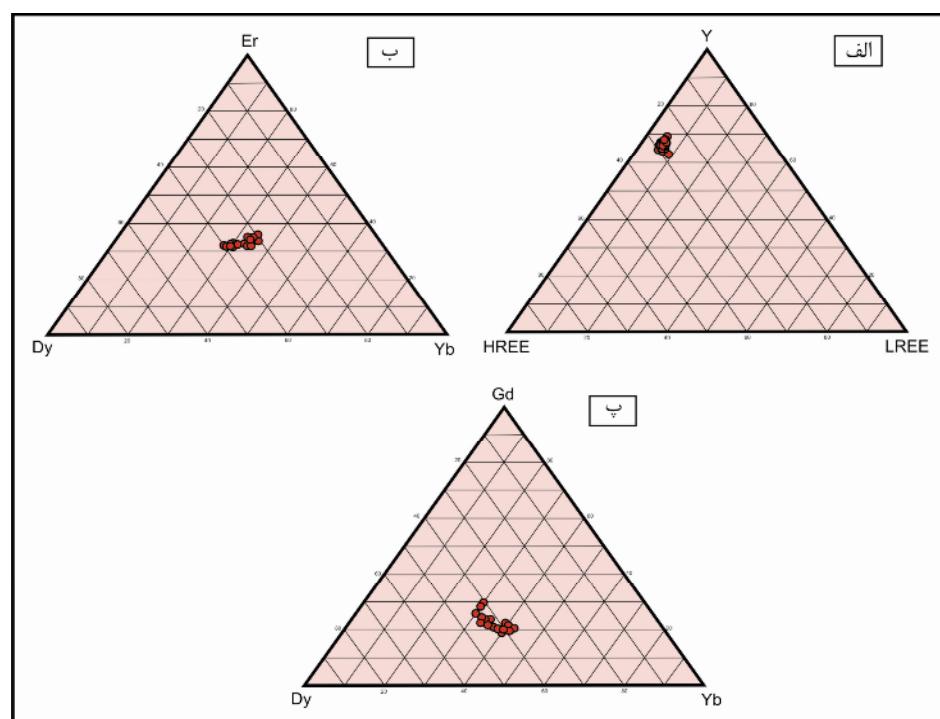
ترکیب اسمی زنوتیم  $\text{YPO}_4$  است که ایتریوم ۷۵ تا ۸۵ درصد از کل آن و سایر HREE‌ها ۱۵ تا ۲۵ درصد کانی را تشکیل می‌دهند. HREE‌ها در ترکیب زنوتیم اغلب Gd، Er، Dy و Yb هستند و بر این اساس می‌توان ترکیب این کانی را در نمودارهای سه‌تایی این عناصر رسم کرد [۲۸]. در نمودار سه‌تایی HREE-Y-LREE، زنوتیم‌های لکه‌سیاه در نزدیکی قطب Y قرار دارند (شکل ۹ الف)، در حالی که در نمودارهای سه‌تایی Dy-Er-Yb و Dy-Gd-Yb، زنوتیم‌های مورد بررسی اغلب در نزدیکی مرکز نمودار هستند (شکل‌های ۹ ب و پ) که نشان دهنده غلطت‌های نسبتاً یکسان این عناصر در ساختار کانی است. رسم الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت [۲۹] در کانی زنوتیم نشان دهنده غنی‌شدگی این کانی از HREE‌ها نسبت به LREE‌هاست (شکل ۱۰). همچنین غنی‌شدگی کمتری در عناصر Sm و Pr و تهی‌شدگی در عناصر Eu و Nd دیده می‌شود.

**زنوتیم**  
پس از مونازیت؛ زنوتیم فراوان‌ترین کانی خاکی نادر در کانسار لکه‌سیاه است. زنوتیم اغلب به صورت میانبارهای کوچک با ابعاد ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون، به صورت بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار همراه و درون کانسنگ مگنتیت-آپاتیت (شکل‌های ۸ الف و ب) تشکیل شده است. در شکل ۸ ب که با بزرگنمایی بالاتری تهیه شده است، دیده می‌شود که این کانی دارای منطقه‌بندی نامنظم به صورت قسمت‌های تیره و روشن است. در قسمت‌های Tирه، مقادیر  $\text{P}_2\text{O}_5$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{CaO}$ ،  $\text{ThO}_2$ ،  $\text{Y}_2\text{O}_3$  و  $\text{SO}_3$  در قسمت‌های روشن نسبت به قسمت‌های تیره بیشتر است. مقادیر  $\text{FeO}$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{UO}_2$  در دو قسمت تیره و روشن تقریباً مشابه است و اختلاف قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. نتایج مربوط به تجزیه ریزکاوالکترونی کانی زنوتیم در جدول ۴ ارائه شده است.

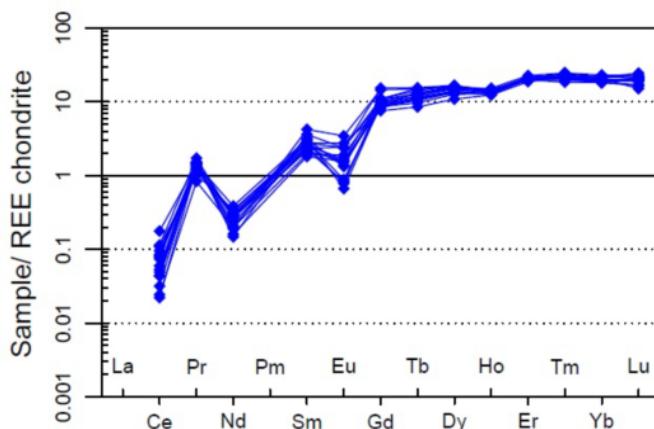


شکل ۸ تصاویر BSE از الف) میانوارهای زنوتیم در کانه مگنتیت. ب) منطقه‌بندی نامنظم بلور زنوتیم به صورت قسمت‌های تیره و روشن. Mag: مگنتیت؛ Xtm: زنوتیم.

**جدول ۴** نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی کانی زنوتیم در کانسار لکه‌سیاه (بر حسب درصد وزنی).



شکل ۹ ترکیب زنوتیم‌های لکه‌سیاه در (الف) نمودار Y-HREE-LREE، (ب) نمودار Dy-Er-Yb و (پ) نمودار Dy-Gd-Yb [۲۸].



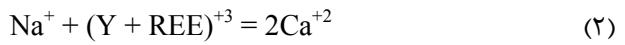
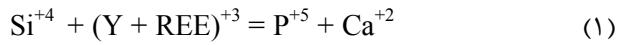
شکل ۱۰ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر در کانی زنوتیم، بهنجار شده با کندریت [۲۹].

اساس شواهد میانبارهای سیال، بافت‌های جانشینی و پهنه‌های دگرنزهاده خاستگاه گرمابی را برای آن‌ها ارائه کرده‌اند [۳۲]. در پژوهش‌های اخیر، خاستگاه ماقمایی-گرمابی برای این نوع از کانسارها پیشنهاد می‌شود [۳۰، ۳۳] و همچنین ارتباط زیشی بین کانسارهای IOCG و IOA که در آن کانسارهای IOCG به عنوان ریشه‌های عمیق‌تر سیستم‌های IOCG در نظر گرفته می‌شوند تایید می‌گردد. در سال‌های اخیر، تقاضای جهانی برای عناصر خاکی نادر و عنصر Y رشد فراوانی داشته و این امر منجر به پژوهش‌های جدیدی پیرامون ذخایر IOCG و IOA و رفتار انتقال زمین‌شیمیایی و فرآیندهای غنی‌شدنی این

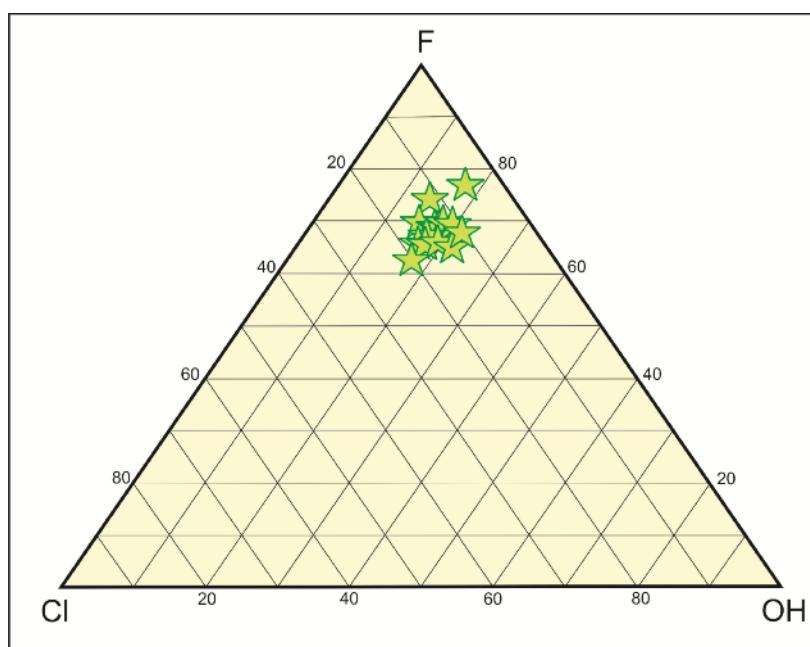
**بحث**  
کانسارهای اکسید-آهن آپاتیت از مهم‌ترین منابع آهن، فسفر و سایر عناصر راهبردی (مانند عناصر خاکی نادر، اورانیوم، نقره و کبات) برای پیشبرد اهداف صنعتی مدرن هستند. این نوع کانسارها دارای ویژگی‌های کانی‌شناسی معمولی شامل مگنتیت با مقدار Ti پایین و مقدار متغیری آپاتیت و نبود یا فراوانی کم کوارتز است [۳۰]. منشا کانسارهای IOA هنوز مورد بحث است. برخی مدل ماقمایی را برای آن‌ها در نظر گرفته‌اند که دلایل آن ارتباط زیشی نزدیک کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت این نوع با سنگ‌های آذرین است [۳۱]، در حالی که برخی دیگر بر

HREEها وارد ترکیب زنوتیم می‌شوند. شکل‌گیری و رشد میانبارهای مونازیت و زنوتیم یا دانه‌ها در راستای لبه و ترک‌ها در آپاتیت در اثر فرآیندهای دوتایی اتحاد- تهنشینی به هنگام دگرسانی و دگرنهادی رخ می‌دهد [۴۳]. فرآیند اتحاد- ته- نشینی یک فرآیند معمول در بسیاری از سیستم‌های گرمایی است که طی آن یک فاز کانیایی در حضور یک سیال واکنشی به طور کامل توسط یک فاز مشابه با ترکیبی جدید و یا توسط یک فاز دیگر جانشین می‌شود که این فرآیند به منظور کاهش انرژی آزاد سیستم رخ می‌دهد [۴۴، ۴۳]. اتحاد به صورت نامنظم است و باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری بیشتر می- شود که این پدیده خود باعث اتحاد بیشتر خواهد شد. گرچه آپاتیت حلالیت نسبتاً کم دارد، اتحاد و تهنشینی طبیعی آن در نمونه‌ها دیده شده است [۴۵]. افزایش نفوذپذیری (تخلخل) یک ویژگی معمول فرآیند اتحاد- تهنشینی است که برای گسترش بیشتر اتحاد درون کانی ضروری است [۴۶]. در آپاتیت‌های لکه‌سیاه، کانی‌های مونازیت و زنوتیم بیشتر در شکستگی‌های آپاتیت و مگنتیت دیده می‌شوند که این امر با فرآیند اتحاد- تهنشینی سازگار است و می‌توان گفت که شکل‌گیری و رشد میانبارهای مونازیت و زنوتیم در راستای ریزشکستگی‌ها در آپاتیت نتیجه فرآیندهای دوتایی اتحاد- تهنشینی مجدد به علت دگرسانی و دگرنهادی آپاتیت رخ داده است. بلورهای آپاتیت در لکه‌سیاه دربردارنده مقادیر بسیاری مونازیت و زنوتیم هستند که بیشتر در بخش‌های تیره و داخلی آپاتیت تشکیل شده‌اند، در حالی که در قسمت‌های روشن و خارجی کمتر دیده می‌شوند. این امر نشان می‌دهد که لبه بلورهای بلوری یا دانه‌ای در حال مهاجرت بوده‌اند واکنش داده، مرزهای بلوری یا دانه‌ای در آن مونازیت دیده می- شسته و تهی از REE شده‌اند. در تصاویر BSE تهیه شده در برخی از قسمت‌ها، بلورهای درشت‌تری از مونازیت دیده می- شود که می‌تواند ناشی از پدیده عمل آوری استوالد باشد. عمل آوری استوالد نوعی باز تبلور است که در آن مونازیت‌های درشت‌تر در اثر انباشت مونازیت‌های کوچکتر رشد می‌کنند [۴۷، ۴۹]. این فرآیند باعث کاهش تعداد کل میانبارها و افزایش اندازه میانبارهای باقی مانده می‌شود. همچنین این فرآیند می‌تواند منجر به حرکت REE به خارج از آپاتیت و تشکیل مونازیت و زنوتیم به صورت دانه‌ای در راستای و لبه بلور آپاتیت شود.

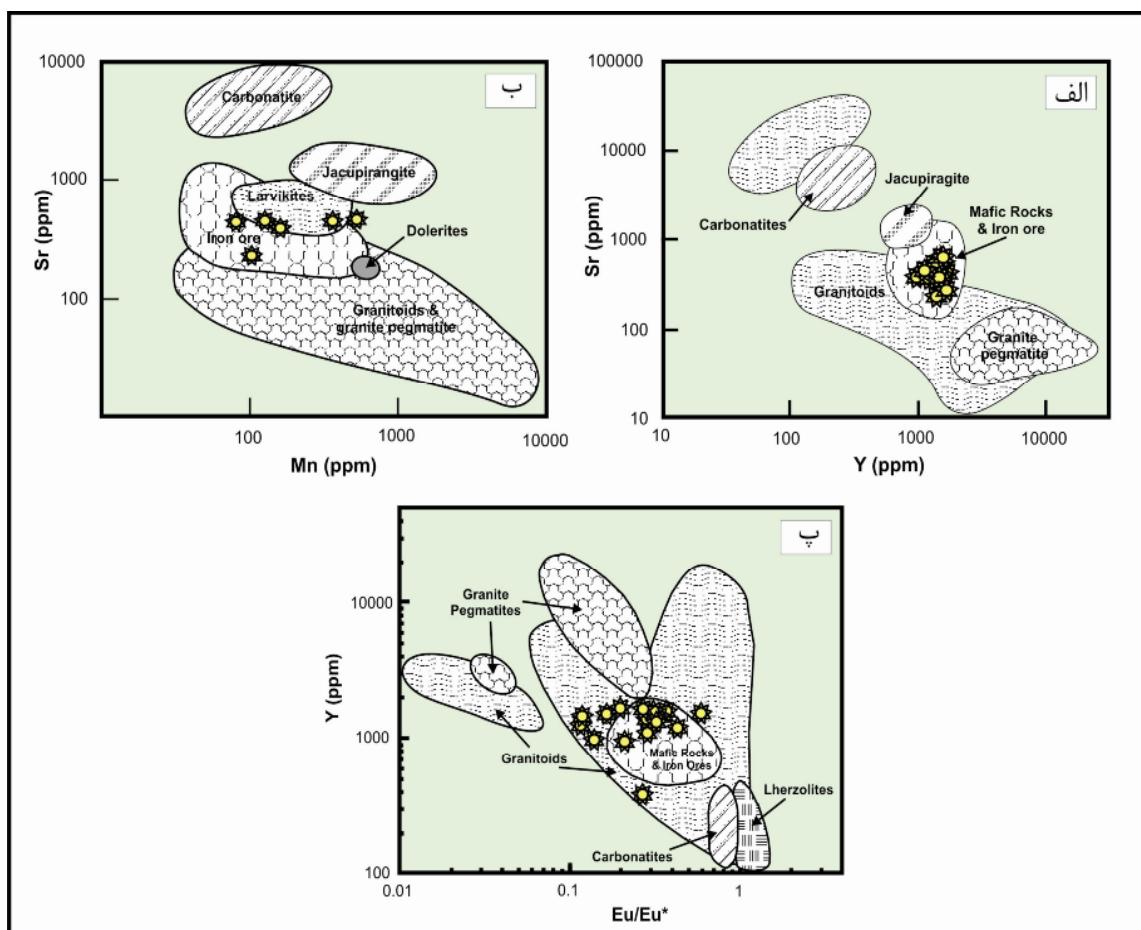
عناصر در این کانسارها شده است. عناصر خاکی نادر بیشتر طی فرآیندهای زمین‌شناسی اولیه و ثانویه رفتار غیر متحرک از خود نشان می‌دهند. با این حال، این عناصر ممکن است در شرایط زمین‌شیمیایی و ترمودینامیکی ویژه متحرک شوند [۳۴، ۳۵]. فرآیندهای زمین‌شناسی ثانویه مانند کانه‌زایی‌های چند مرحله‌ای، دگرسانی و هوازدگی باعث تغییر عناصر اصلی، باز توزیع عناصر خاکی نادر در کانسارها و در نتیجه تشکیل کانی- های خاکی نادر می‌شود [۳۶، ۳۷]؛ از این‌رو، کانی آپاتیت ممکن است دربردارنده میانبارهای فراوانی از مونازیت و زنوتیم شود. آپاتیت‌های آذرین اغلب دارای غلظت‌های بالایی از F نسبت به Cl هستند. آپاتیت‌های دارای بیش از ۳/۵ درصد وزنی کلر در سنگ‌های آذرین بسیار کمیاب هستند که علت آن شعاع کوچکتر و قابلیت سازگاری بالاتر F در آپاتیت است [۳۸]. این در حالی است که آئیون بزرگتر Cl ترجیحاً وارد فاز سیال می‌شود؛ در نتیجه طی این فرآیند آپاتیت ماقمایی غنی از F و فقیر از Cl می‌شود. ماهیت غنی از آپاتیت می‌تواند نشان دهنده خاستگاه ماقمایی غنی از مواد فرار باشد. در نمودار مثلثی Cl-F-OH (شکل ۱۱) دیده می‌شود که نمونه‌های آپاتیت لکه‌سیاه اغلب از نوع فلثوروآپاتیت هستند که می- تواند نشان دهنده خاستگاه ماقمایی آن‌ها باشد. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی Sr و Y می‌تواند گستره ترکیبی آپاتیت مربوط به سنگ‌های مختلف را نشان دهد [۲۵]. بر اساس نمودارهای Eu/Eu<sup>\*</sup> - Y - Sr، Y - Sr و REE - Mn می‌گیرند (شکل ۱۲). بر اساس بررسی‌های لکه‌سیاه در گستره مربوط به سنگ‌های مافیک و کانسنگ‌های آهن قرار می‌گیرند (شکل ۱۲). بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی [۳۹]، Na<sup>+</sup> دگرسانی دگرنهادی منجر به حذف ترجیحی یون‌های Si<sup>+4</sup> و REE<sup>+3</sup> از آپاتیت‌های اولیه می‌شود. نبود سدیم و سیلیس در آپاتیت با هسته‌بندی و رشد مونازیت و زنوتیم در ارتباط است. طی این فرایند، انتقال جرم اصلی به واسطه واکنش‌های زیر رخ می‌دهد [۴۰] :



در شرایط گرمایی، REE‌ها با غلظت بالا می‌توانند در محیط اسیدی در سیال‌های غنی از کلرید-فلشورید انتقال یابند [۴۱]. مقدار F سیال مهم است، زیرا با تشکیل لیگاند-فلز بسیار پایدار فلز-فلشورید حل‌پذیری عناصر REE را بهبود می‌بخشد [۴۲]. طی این فرآیند، LREE‌ها ترجیحاً وارد ترکیب مونازیت و



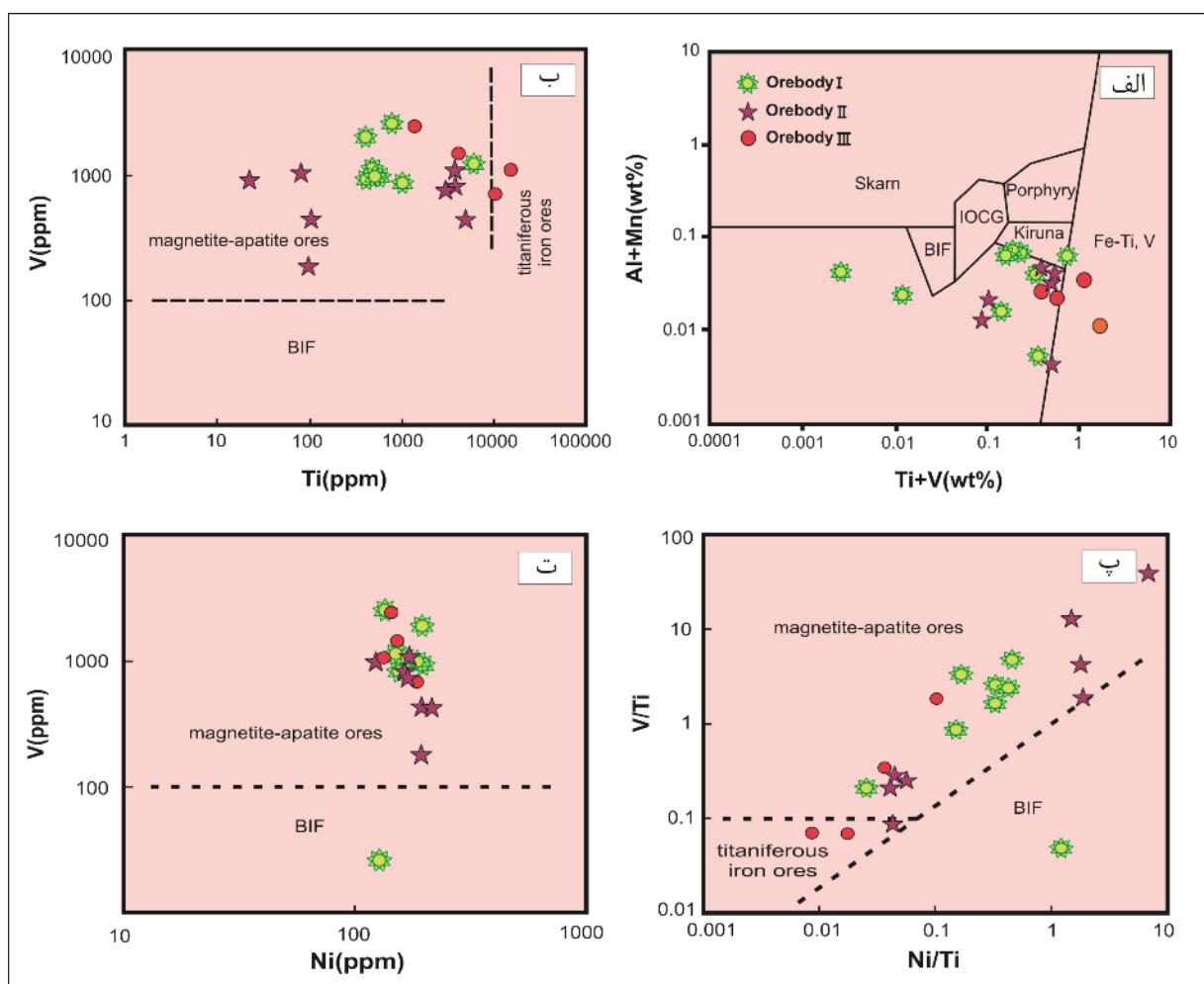
شکل ۱۱ جایگاه نمونه‌های آپاتیت لکه‌سیاه در نمودار Cl-F-OH و قرارگیری آن‌ها در نزدیکی قطب فلئور که نشان دهنده ترکیب فلئورآپاتیت برای نمونه‌های این منطقه است.



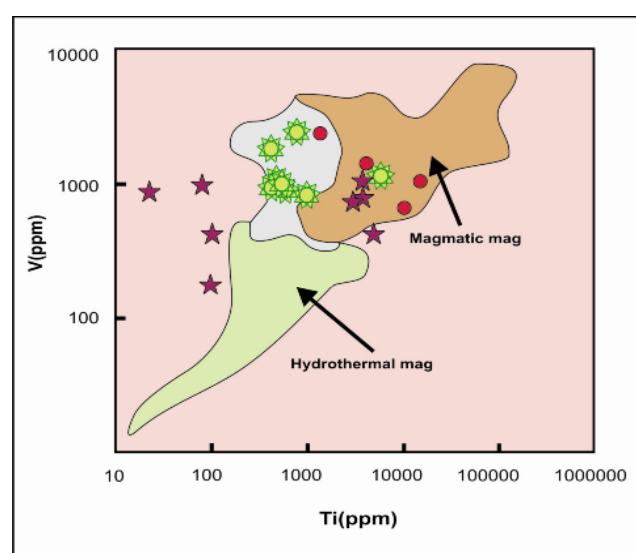
شکل ۱۲ جایگاه نمونه‌های آپاتیت لکه‌سیاه در نمودار (الف)  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  -  $\text{Y}$  -  $\text{Sr}$ ، (ب)  $\text{Mn}$  -  $\text{Sr}$  و (ج)  $\text{Y}$  (ppm) -  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ . در همه نمودارها، نمونه‌های مورد بررسی اغلب در گستره مربوط به کانسنگ‌های آهن و سنگ‌های مافیک قرار دارند.

کلی در مگنتیت سازگار است، اما غلظت کم آن در مگنتیت می‌تواند نشان دهنده این باشد که سیالی که مگنتیت از آن ته‌نشین شده است فقیر از تیتانیوم بوده است. مگنتیت‌های گرمابی غلظت‌های پایینی از وانادیوم دارند (کمتر از ۱۰۰۰ پی-پی-ام) [۵۴]. در مگنتیت‌های منطقه، مقدار وانادیوم ۵/۲۲ تا ۲۴۶۶,۹۷ پی-پی-ام (با میانگین ۹۶۳ پی-پی-ام) است که این مقدار نزدیک به مقدار وانادیوم در کانسارهای آهن ماقمایی است. حضور وانادیوم و تیتانیوم در مگنتیت به شدت وابسته به گریزندگی اکسیژن است، در حالی که عناصری مانند کلسیم، نیکل، کبالت و منیزیوم ارتباطی با گریزندگی اکسیژن ندارند [۵۵]. مقادیر بالای Ti و V نشان می‌دهد که مگنتیت از یک سیال ماقمایی متبلور شده است [۱۹]. نبود این عناصر در مگنتیت‌های گرمابی با فعالیت کم این عناصر در سیال‌های برآمده از ماقما سازگار است، زیرا Ti و V به نسبت نامتحرك هستند و در سیستم‌های گرمابی اغلب غلظت‌های پایینی دارند [۵۶]. کانسارهای IOCG نیز براساس حضور مگنتیت‌های با مقدار کم Ti از کانسارهای ماقمایی اکسیدآهن- تیتانیوم تفکیک می‌شوند [۶]. مقدار کروم در مگنتیت‌های لکه‌سیاه سیال ۴۰,۴۹ تا ۱۴۷۷ پی-پی-ام (با میانگین ۳۲۱ پی-پی-ام) است. مقدار کم کروم در مگنتیت‌های کانسارهای IOA ممکن است نشان دهنده تحرك بالای Cr<sup>+6</sup> در سیال‌های گرمابی دما بالا [۵۷] یا جزء به جزء شدگی اوژیت در ماقمای خاستگاه برای یک سیال گرمابی- ماقمایی باشد که مذاب را از کروم تهی می‌کند. مجموعه نتایج به دست آمده از نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که آهن احتمالاً برآمده از نفوذی‌های مافیک بوده و سپس به وسیله سیال‌های گرمابی با خاستگاه آذرین منتقل شده است. بر اساس نمودار Al+Mn نسبت به Ti+V (شکل ۱۳ الف) مگنتیت‌های کانسارهای نوع کایرون‌هاستند، در حالی که در نمودارهای ارائه شده بر پایه عناصر وانادیوم، نیکل و تیتانیوم، نمونه‌ها در گستره مربوط به کانسنگ آهن-آپاتیت رسم می-شوند [۵۸] (شکل‌های ۱۳ ب، پ و ت). همچنین در نمودار Ti نسبت به V (شکل ۱۴) ترکیب نمونه‌ها هم‌پوشی بین گستره گرمابی دما بالا و گستره ماقمایی نشان می‌دهند که می‌تواند بیانگر حضور دو نوع سیال ماقمایی و گرمابی در تشکیل کانسارهای آهن لکه‌سیاه باشد [۳۳].

تعیین خاستگاه کانسار آهن لکه‌سیاه با استفاده از مگنتیت ترکیب مگنتیت می‌تواند شرایط فیزیکی و شیمیایی که در آن شکل گرفته است را نشان دهد. مگنتیت اغلب میزان برخی از عناصر اصلی و کمیاب مانند آلومینیوم، تیتانیوم، وانادیوم، کبالت، منگنز و منیزیم است [۲۰]. نوع و غلظت عناصر کمیاب در این کانی به عوامل فیزیک‌شیمیایی سیستم تشکیل دهنده مگنتیت مانند دما، گریزندگی اکسیژن، گریزندگی گوگرد، فعالیت سیلیس، شباهت‌های شاعع یونی و ظرفیت‌های کاتیونی، ترکیب سیال/مذاب، بازدارندگی سنگ میزان و فرآیندهای بازتعادل بستگی دارد [۴۸، ۴۹]. بر این اساس، به تازگی چند نمودار ترکیبی از عناصر کمیاب و فرعی مگنتیت به منظور تفکیک انواع کانسارهای مختلف پیشنهاد شده است که نقش مهمی در دستیابی به خاستگاه کانسارهای اکسید آهن در انواع سیستم‌های کانه‌زایی دارد [۴۹، ۴۸، ۱۹]. مگنتیت‌های ماقمایی و گرمابی ویژگی‌های بافتی و شیمیایی متفاوتی دارند [۵۰]. نادول و همکاران [۴۸] برای مگنتیت از کانسارهای مختلف با خاستگاه آذرین و گرمابی استفاده کردند که نشان دهنده گستره‌های مشخصی برای عناصر ویژه است. آنها نشان دادند که مقدار بالای منیزیم (بیش از ۱ درصد وزنی یا ۱۰۰ پی-پی-ام) و منگنز (۵۰ تا ۴۰۰ پی-پی-ام) شاخص مگنتیت‌های گرمابی است که علت آن واکنش‌های گستره سیال-سنگ است [۵۱]؛ و غلظت‌های کم منیزیم (کمتر از ۳۹۴۰ پی-پی-ام) و منگنز بین ۱۰۲ تا ۱۲۵۰۰ پی-پی-ام از Mg و ویژگی‌های مگنتیت ماقمایی (آذرین) است. مقدار Mn در مگنتیت‌های لکه‌سیاه به ترتیب ۱۱۵ تا ۷۰۲ (با میانگین ۲۹۹ پی-پی-ام و ۱۶۱۱ تا ۱۶۱۱ (با میانگین ۲۷۵) پی-پی-ام بوده که با خاستگاه ماقمایی مگنتیت سازگار است. غلظت‌های پایین تیتانیوم، آلومینیوم، زیرکونیوم، هافنیوم، نیوبیوم و تانتالیوم با تمرکزهای بالای نیکل، وانادیوم، کبالت، روی و منگنز نیز تایید کننده خاستگاه گرمابی مگنتیت است. اغلب مگنتیت‌های گرمابی دارای تیتانیوم کمتر از ۲ درصد وزنی و آلومینیوم کمتر از ۱ درصد وزنی هستند [۵۲]. مقدار Al در مگنتیت‌های لکه‌سیاه به ترتیب ۲۳ تا ۱۰۳۲۵ (با میانگین ۲۸۸۳ پی-پی-ام) و ۱۰ تا ۶۸۰ پی-پی-ام (با میانگین ۲۰۸,۸۵) است که این مقادیر نزدیک به مگنتیت‌های ماقمایی است. غلظت کم این عناصر در مگنتیت گرمابی نشان دهنده غیرمتحرک بودن آن‌ها طی فرایند دگرسانی گرمابی است [۵۳]. تیتانیوم به طور



شکل ۱۳ جایگاه نمونه‌های مگنتیت لکه‌سیاه در نمودار (الف)  $\text{Ti} + \text{V} - \text{Al} + \text{Mn}$ ، (ب)  $\text{Ni} / \text{Ti} - \text{V} / \text{Ti}$ ، (ج)  $\text{V} / \text{Ti} - \text{Ni} / \text{Ti}$  و (د)  $\text{V}(\text{ppm}) - \text{Ti}(\text{ppm})$ . در همه نمودارها، نمونه‌های مورد بررسی در نزدیکی یا در گستره مربوط به کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت (نوع کایبرونا) قرار دارند.



شکل ۱۴ جایگاه نمونه‌های مگنتیت لکه‌سیاه در نمودار  $\text{V} - \text{Ti}$  (مشابه شکل ۱۳). نمونه‌های مگنتیت لکه‌سیاه اغلب در گستره ماقمایی یا در گستره همپوشی ماقمایی-گرمایی قرار دارند.

*hydrothermal alteration and U-Pb geochronology", Mineralium Deposita 52 (2017) 709–732.*

[3] Westhues A., Hanchar J.M., LeMessurier M., Whitehouse M.J., 2017., "Evidence for hydrothermal alteration and source regions for the Kiruna iron oxide-apatite ore (northern Sweden) from zircon Hf and O isotopes", *Geology* 45 (2017) 571–574.

[4] Childress T.M., Simon A.C., Day W.C., Lundstrom C.C., Bindeman I.N., "Iron and oxygen isotope signatures of the Pea Ridge and Pilot Knob magnetite-apatite deposits, Southeast Missouri, USA", *Economic Geology* 111(2016) 2033–2044.

[5] Naranjo J.A., Henríquez F., Nyström J. O., "Subvolcanic contact metasomatism at El Laco Volcanic complex, Central Andes", *Andean Geology* 37 (2010) 110–120.

[6] Williams-Jones A.E., Heinrich C.A., "Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits", *Economic Geology* 100 (2005) 1287–1312.

[7] Boyce J.W., Hervig R.L., "Apatite as a Monitor of Late-Stage Magmatic Processes at Volcán Irazú, Costa Rica", *Contrib, Mineralogy and Petrology*, 157 (2009) 135–145.

[8] Harlov D.E. ,Forster H.J., "Fluid-induced nucleation of (YbREE)-phosphate minerals within fluorapatite. Nature and experiment. Part II. Fluorapatite", *American Mineralogist* 88 (2003) 1209–1229.

[9] Forster H., Jafarzadeh A., "The Bafq mining district in Central Iran- a Highly Mineralized Infracambrian Volcanic Field", *Economic geology* 89 (1994) 1697–1721.

[10] Samani B., "Metallogeny of the Precambrian in Iran ", *Precambrian Reserch* 39 (1988) 85–106.

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

[12] Alavi M., "Tectonic map of the Middle East (scale 1:5,000,000)", *Geological Survey of Iran* (1991).

[13] Ramezani J., Tucker R.D., "The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana

### برداشت

کانسار آهن لکه‌سیاه بیشتر از مگنتیت اولیه به همراه مقادیری آپاتیت تشکیل شده است. بلورهای آپاتیت نیمه خودشکل تا خودشکل و به رنگ سبز و درشت بلور هستند، به طوری که این کانسار را می‌توان در گسترده کانسارهای آهن-آپاتیت رده-بندی کرد. آپاتیت به همراه مگنتیت از سیال ماقمایی اولیه تشکیل شده است؛ سپس در اثر محلول‌های ثانویه دستخوش دگرنهادی و فرایندهای وابسته به آن چون اتحلال و تهشیینی شده است. طی این فرآیند، پدیده منطقه‌بندی نامنظم در این کانی رخ داده است. افزون بر آن، سبب شده است تا جدایش در عناصر خاکی نادر و تعداد دیگری از عناصر نادر به وجود آید. در نتیجه، ترکیب شیمیایی نوارهای تیره و روشن در منطقه‌بندی این کانی متفاوت است. همچنین کانی‌های جدیدی مانند مونازیت و زنوتیم نیز در اثر این فرآیند شکل گرفته‌اند. مونازیتها بیشتر در قسمت‌های تیره تشکیل شده‌اند. مونازیت کانی غنی از LREE بوده که نخست بیشتر در محل شکستگی‌های آپاتیت و درون آن تشکیل شده و سپس در اثر پدیده عمل آوری استوالد به درشت بلورهایی غنی از LREE تبدیل شده است. همچنین مونازیت خود در اثر محلول‌های ثانویه قرار گرفته و دارای منطقه‌بندی مشخص تیره و روشن در تصاویر BSE شده است. زنوتیم به مقدار کمتری و طی فرآیند مکمل سازنده بلورهای مونازیت تشکیل شده است در نتیجه این کانی غنی از HREE و Y شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مونازیت و زنوتیم تحت تاثیر فرآیند دگرنهادی بین مولکولی در مرحله ثانویه تشکیل شده‌اند. نمودارهای استفاده شده نشان دهنده غنی بودن آپاتیت از فلوئور است، همچنین این نمودارها سازگاری مونازیت و زنوتیم را با ترکیب عنصرسنگی این دو کانی نشان می‌دهد.

### مراجع

- [1] Barton M.D., "Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems", Elsevier Inc, 13(2014) 515–541.
- [2] De Melo G.H.C., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Moreto C.P.N., Santiago E. S. B., Dufrane S.A., Aires B., Santos A.F.F., "Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of

- [24] Hou T., Zhang Z., Kusky, T., "Gushan magnetite-apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna-type?" *Ore Geology Review*, 43 (2011), 333-346.
- [25] Belousova, E., Griffin,W., O'Reilly., S.Y., Fisher N., "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.
- [26] Schandl E.S., Gorton M.P., "A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits", *Economic Geology* 99 (2004) 1027-1035.
- [27] Rappaz M, Abraham MM, Ramey JO and Boatner LA., "EPR spectroscopic characterization of  $Gd$  in the monazite-type REE orthophosphates:  $LaPO_4$ ,  $CePO_4$ ,  $PrPO_4$ ,  $NdPO_4$ ,  $SmPO_4$  and  $EuPO_4$ ", *Physical Review Journals*, 23 (1981) 1012-30.
- [28] Spear S. F., Pyle J .M., "Apatite, Monazite, and Xenotime in Metamorphic Rocks", *Mineralogy and Geochemistry* (2002) 1-63.
- [29] Boynton W.V., "Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*", Elsevier, New York, (1984) 63-114.
- [30] Tornos F., Velasco F., Hanchar J.M., Astrobiología C.D., Torrejón C.C., Ardoz T.D., "Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile", *Geology* 44 (2016) 427–430.
- [31] Naslund H.R., Dobbs F.M., Henriquez F.J., Nystrom J.O., "Evidence for iron-oxide magmas at El Laco, Chile", *Geological Society of America Abstracts with Programs* 30 (1998) 91.
- [32] Dare S.A.S., Barnes S., Beaudoin,G., "Did the massive magnetite "lava flows" of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS", *Mineralium Deposita*, 50 (2015) 607–617.
- [33] Knipping J.L., Bilenker L.D., Simon A.C., Reich,M., Barra F., Deditius A.P., Lundstrom C., Bindeman I., Munizaga R., "Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic tectonics", *American Journal of Sciences* 303 (2003) 622–665.
- [14] Masoodi M., Yassaghi A., Nogol-Sadat M.A.A., Neubauer F., Bernroider M., Friedl G., Genser J., Houshmandzadeh, A., "Cimmerian evolution of the Central Iranian basement: evidence from metamorphic units of the Kashmar-Kerman Tectonic Zone", *Tectonophysics* 588 (2013) 189–208.
- [15] 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 and Related Deposits: A Global Perspective*" 2. PGC Publishing, Adelaide, Australia, (2002) 303–320.
- [16] "Geological map of Ali Abad, 1:25000", Parskani Co, 2014 (in Persian).
- [17] Jami M., "Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq area, central Iran", Unpublished PhD thesis, The university of New South Wales, Australia (2005).
- [18] Mokhtari M.A.A., "Posht-e-Badam metallogenetic block (central Iran): A suitable zone for REE mineralization", *Journal of central European geology* 58 (2016) 199-216.
- [19] Dupuis C., Beaudoin G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types", *Mineral Deposita* 46 (2011) 319–335.
- [20] Nadoll P, Mauk J.L, Hayes T.S, Koenig A.E, Box S.E ., "Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt supergroup, United States", *Economic Geology* 107 (2012) 1275–1292.
- [21] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95(2010): 185–187.
- [22] Bell A. S., Simon A., "Experimental evidence for the alteration of the  $Fe^{3+}/Fe$  of silicate melt caused by the degassing of chlorine-bearing aqueous volatiles", *Geology* 39(2011) 499-502.
- [23] Dilles J. H., Kent A. J., Wooden J. L., Tosdal R. M., Koleszar A., Lee R. G., Farmer L. P., "Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas", *Economic Geology* 110 (2015) 241-251.

- fluid interfaces", Chemical Geology 383 (2014) 132–146.*
- [45] Ayers, J.C., Watson E.B., "Solubility of apatite, monazite, zircon, and rutile in supercritical aqueous fluids with implications for subduction zone geochemistry", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Physical and Engineering Sciences, 335(1991) 365–375.
- [46] Putnis C.V., Ruiz-Agudo E., "The mineral–water interface: where minerals react with the environment", Elements, 9 (2013) 177–182.
- [47] Jonssen E., Harlov D. E., Majka J., Hogdahl K., person-Nilsson K., "Fluorapatite-monazite-allanite relations in the Grängesberg apatite-iron oxide ore district, Bergslagen, Sweden", American Mineralogist 101 (2016) 1769–1782.
- [48] Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D., Walshe J., "The chemistry of hydrothermal magnetite: a review", Ore Geology Review 61 (2014) 1–32.
- [49] Dare S.A.S., Barnes S.J., Beaudoin G., Meric J., Boutroy E., Potvin-Doucet C., "Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators", Mineralium Deposita 49 (2014) 785–796.
- [50] Singoyi B., Danyushevsky L., Davidson G.J., Large R., Zaw K., 2006., "Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA-ICP-MS technique", Abstracts of Oral and Poster Presentations from the SEG Conference Society of Economic Geologists (2006) 367–368.
- [51] Meinert L.D., "Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog Mine, Central mining district, New Mexico", Economic Geology 82 (1987) 523–545.
- [52] Hu H., Lentz D., Li J.W., McCarron T., Zhao X.F., Hall D., "Reequilibration processes in magnetite from iron skarn deposits", Economic Geology 110 (2015) 1–8.
- [53] Van Baalen M.R., "Titanium mobility in metamorphic systems: a review", Chemical Geology 110 (1993) 233–249.
- [54] Rusk B., Oliver N., Brown A., Lilly R., Jungmann D., "Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia: comparisons to IOCG deposits, In: Proceedings of the 10th Biennial Meeting of the the SGA ", (2009) 656–658.
- magnetite suspensions", Geology 43 (2015) 591–594.*
- [34] Foley N.K., Ayuso R.A., "Rare earth element mobility in high-alumina altered metavolcanic deposits, South Carolina, USA", Journal of Geochemical Exploration 133 (2013) 50–67.
- [35] Cole C.S., James R.H., Connelly D.P., Hathorne E.C., "Rare earth elements as indicators of hydrothermal processes within the East Scotia subduction zone system", Geochimica et Cosmochimica Acta 140 (2014) 20–38.
- [36] Yao T., Li H. M., Li W. J., Li L. X., Zhao C., "Origin of the disseminated magnetite pyroxenite in the Tieshanmiao-type iron deposits in the Wuyang region of Henan Province, China", Journal of Asian Earth Sciences 113 (2015) 1235–1252.
- [37] Brueckner S.M., Piercy S.J., Pilote J. L., Layne G.D., Sylvester P.J., "Mineralogy and mineral chemistry of the metamorphosed and precious metal-bearing Ming deposit, Canada", Ore Geology Reviews 72 (2016) 914–939.
- [38] Webster J.D., Piccoli P.M., "Magmatic apatite: a powerful, yet deceptive mineral", Elements 11(2015) 177–182.
- [39] Harlov D.E., "Apatite: A fingerprint for metasomatic processes", Elements 11(2015) 171–176.
- [40] Hughes J.M, Rakovan J.F., "Structurally robust, chemically diverse: apatite and apatite supergroup minerals", Elements", 11 (2015) 165–170.
- [41] Tropper P., Manning C.E., Harlov D.E., "Experimental determination of CePO<sub>4</sub> and YPO<sub>4</sub> solubilities in H<sub>2</sub>O–NaF at 800°C and 1 GPa: implications for rare earth element transport in high-grade metamorphic fluids. Geofluids", 13 (2013) 372–380.
- [42] Timofeev A., "An experimental study of the solubility and speciation of tantalum in fluoride-bearing aqueous solutions at elevated temperature", Geochimica et Cosmochimica Acta 197 (2017) 294–304.
- [43] Putnis A., "Mineral replacement reactions", Reviews in Mineralogy and Geochemistry 70 (2009) 87–124.
- [44] Ruiz-Agudo E., Putnis C.V., Putnis A., "Coupled dissolution and precipitation at mineral–

- south-central British Columbia", Exploration and Mining Geology 16 (2007) 159–186.
- [57] James B.R., "Chromium. In: Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), *Encyclopedia of Water Science*", Marcel Dekker Inc, (2003) 75–79.
- [58] Loberg B.E.H., Horndahl A.K., "Ferride geochemistry of Swedish Precambrian iron ores", Mineralium Deposita 18 (1983) 487–504.
- [55] Toplis, M.J., Corgne, A., "An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium", Contributions to Mineralogy and Petrology 144 (2002) 22–37.
- [56] Ray G., webster I., "Geology and chemistry of the low Ti magnetite-bearing Heff Cu-Au skarn and its associated plutonic rocks, Heffley Lake,