

# پراکندگی و فراوانی عناصر خاکی کمیاب در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر سیرجان، کرمان

یلدا بیاتیراد<sup>۱</sup>، حسن میرنژاد<sup>۲\*</sup> و جلیل قلمقاش<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۸

## چکیده

مجموعه معدنی گل‌گهر در جنوب باختری شهرستان سیرجان (استان کرمان) و در پهنه سندج- سیرجان قرار دارد و با داشتن معادن غنی از سنگ آهن حدود ۳۰ درصد از نیاز صنعت فولاد کشور را تأمین می‌کند. ماده معدنی اصلی در این کانسار مگنتیت است که افزون بر آن مقادیر کمتری هماتیت و کانه‌های سولفیدی شامل پیریت و کالکوپیریت در کانسنگ معدنی گل‌گهر وجود دارد. مقایسه الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب (REE) در مگنتیت گل‌گهر با مگنتیت کانسارهای ماگمایی (نوع کایرونا) و نیز مگنتیت همراه با سنگ‌های گرانیتی و بازالتی نشان‌دهنده شباهت آنها از دید غنی‌شدگی نسبی عناصر خاکی کمیاب (LREE) نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) و بی‌هنجاری منفی Eu است. چنین ویژگی‌هایی در REE آپاتیت‌های کانسارهای آهن کایرونا، چغارت، اسفوردی و آبرون اسپرینگ نیز دیده می‌شود که به دلیل نداشتن الگوی پراکندگی REE همانند فسفریت‌ها، منشأ ماگمایی برای آنها پیشنهاد شده است. همچنین REE مگنتیت گل‌گهر در مقایسه با کانسارهای آهن رسوبی، الگوی پراکندگی متفاوتی را به‌ویژه از دید بی‌هنجاری Eu آشکار می‌سازد. بر پایه این ویژگی‌ها، به نظر می‌رسد مگنتیت در کانسار آهن گل‌گهر از سیال‌های با منشأ ماگمایی سرچشمه گرفته است.

**کلیدواژه‌ها:** کانسار آهن، منشأ، عناصر خاکی کمیاب، گل‌گهر، سیرجان.

\*نویسنده مسئول: حسن میرنژاد

E-mail: hmirnejad@ut.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

مجموعه معدنی گل‌گهر در بردارنده ۶ منطقه معدنی است که ناحیه‌ای به گستره ۴۰ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. ذخیره سنگ آهن گل‌گهر در حدود ۱۱۳۵ میلیون تن برآورد شده و توده شماره ۱ از این مجموعه با ۱۸۵ میلیون تن ذخیره، در حال بهره‌برداری است. کهن‌ترین واحد سنگی در منطقه، مجموعه دگرگونی گل‌گهر است که از مرمر دولومیتی، میکاشیست، گنایس، آمفیبولیت، گارنت آمفیبولیت و کوارتزیت تشکیل شده است. تمرکز کانی‌های سولفیدی و روند عملکرد هوازدگی در توده شماره ۱ این کانسار به صورت یکنواخت دیده نمی‌شود به گونه‌ای که بخش مگنتیت بالایی تقریباً بدون کانی‌های سولفیدی، بخش اکسیدان دارای مگنتیت و هماتیت و بخش مگنتیت زیرین دارای مقادیر فراوانی از کانی‌های سولفیدی است. پهنه سندج- سیرجان یکی از فعال‌ترین پهنه‌های ساختاری ایران به‌شمار می‌رود و تا سنوزویک فازهای کوهزایی بسیاری را پشت سر گذاشته است. به‌علت پیچیدگی‌های فراوان سرگذشت زمین‌شناسی پهنه سندج- سیرجان، تا کنون نظریات مختلفی پیرامون تکوین و منشأ کانسار آهن گل‌گهر ارائه شده است که از آن میان می‌توان به نظریه آهن‌نواری نوع راپیتان (بابکی، ۱۳۸۳)، ماگمایی (Mucke & Golestaneh, 1982)، رسوبی- شیمیایی (Ljung, 1976)، رسوبی- آتشفشانی نوع آلگوما (خلیلی میرهن، ۱۳۷۲) و اسکارنی (حلاجی، ۱۳۷۰؛ عسگری، ۱۳۸۶؛ تریان، ۱۳۸۶) اشاره کرد. از آنجایی که بیشتر فرضیه‌های یادشده بر پایه مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی و شمار محدودی از عناصر اصلی و کمیاب بنا شده‌اند، این پژوهش با استفاده از عناصر خاکی کمیاب (REE) که کارآیی مهمی در جدایش منشأ انواع کانسارهای آهن دارند، به بررسی چگونگی تشکیل و منشأ کانسار آهن گل‌گهر می‌پردازد.

پهنه سندج- سیرجان قرار گرفته است. این ناحیه در لبه گودافتادگی بزرگ نمک‌زار کفه خیرآباد سیرجان قرار دارد که خود در فاصله میان پهنه سندج- سیرجان و پهنه آتشفشانی ارومیه- دختر به‌وجود آمده است. از ویژگی‌های اصلی این منطقه فراوانی مجموعه‌های دگرگونی به سن ژوراسیک (قلمقاش و میرنژاد، ۱۳۸۷)، در بردارنده مجموعه (کمپلکس) گل‌گهر (تناوب گنایس، میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتز شایست در بخش زیرین و گنایس و کوارتز شایست در بخش‌های بالایی) و مجموعه کرسفید (بیشتر در بردارنده تناوب مرمر و شیست) است. سنگ‌های رسوبی مزوزویک و سنوزویک در بردارنده کنگلومرا، آهک ریفی، ماسه‌سنگ آهکی، شیل و توریدایت و آبرفت‌های کواترن در بردارنده پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های کهن و جوان هستند (گزارش نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ گل‌گهر). نقش عوامل ساختاری در تشکیل کانسار با وجود گسل‌های فراوان در محل توده شماره ۱ معدن مشخص است. شکل ۱ موقعیت ناحیه مورد مطالعه و زمین‌شناسی آن را نشان می‌دهد.

## ۲- روش تجزیه

برای بررسی الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر ۴ نمونه دستی و ۸ نمونه مغزه حفاری از بخش‌های مختلف توده شماره ۱ معدن انتخاب و غلظت عناصر خاکی کمیاب آنها به روش ICP-MS در آزمایشگاه ژئوشیمیایی دانشگاه اتاوا کانادا اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ ویژگی‌های و محل نمونه‌ها و در جدول ۲ میزان فراوانی عناصر خاکی کمیاب در این نمونه‌ها بر حسب گرم در تن (ppm) آورده است.

## ۳- ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر

پراکندگی REE در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر، بهنجار شده نسبت به کندریت‌های نوع C1 (McDonough & Sun, 1995) و شیل آمریکای شمالی (Gromet et al., 1984) به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ به نمایش درآمده است. مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر مقادیر بالاتری REE (به جز Eu) نسبت به

## ۴- زمین‌شناسی

کانسار سنگ آهن گل‌گهر در ۵۰ کیلومتری جنوب باختری شهرستان سیرجان در استان کرمان، میان طول‌های جغرافیایی ۱۵° ۵۵' تا ۲۴' ۵۵° و عرض‌های جغرافیایی ۲۹° ۰۳' تا ۲۹° ۰۷' شمالی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در کناره خاوری

## ۵-۲. مقایسه الگوی عناصر خاکی کمیاب مگنتیت گل‌گهر با شماری از کانسارهای آهن ایران در ناحیه بافق

شکل ۹ الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب مگنتیت در کانسار آهن گل‌گهر و شماری از کانسارهای آهن ایران را در ناحیه بافق (اسفوردی، بی‌هنجاری شمالی و چاه‌گزر) بهنجار شده نسبت به کندریت نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشخص است الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر همانندی بسیار زیادی با این الگو در مگنتیت‌های کانسار آپاتیت-مگنتیت اسفوردی (که بر پایه مطالعات Jami et al. (2007) جزو کانسارهای آهن آپاتیتهای نوع کاپرونا و توسط آفتابی و بابکی (۱۳۸۵) جزو کانسارهای آهن نواری راپتان معرفی شده است)، کانسار آهن بی‌هنجاری شمالی (که بر پایه مطالعات صادقی (۱۳۸۶) و سپهری‌راد (۱۳۷۹) جزو کانسارهای آهن اکسیدی گرمابی و ماگمایی قرار داده شده است) و کانسار آهن چاه‌گزر (که بر پایه بررسی‌های رنجبر بافقی (۱۳۸۱) دارای منشأ ماگمایی است) دارد. نسبت‌های  $(La/Yb)_{NC}$  در کانسارهای اسفوردی، بی‌هنجاری شمالی و چاه‌گزر به ترتیب  $۷/۳۴$ ،  $۱۰/۶۲$  و  $۱۲/۵$  است که از این دید کانسار گل‌گهر با میانگین نسبت  $(La/Yb)_{NC} = ۲۳/۸۶$  غنی‌شدگی بیشتری را در LREE خود نسبت به HREE در مقایسه با دیگر کانسارها نشان می‌دهد. نسبت  $(Eu/Eu^*)_{NC}$  برای کانسار اسفوردی، بی‌هنجاری شمالی و چاه‌گزر به ترتیب  $۰/۰۸$ ،  $۰/۰۶$  و  $۰/۱$  است که نشان‌دهنده بی‌هنجاری منفی یورپیم است. دو ویژگی اصلی این الگو یعنی وجود بی‌هنجاری منفی Eu و غنی‌شدگی نسبی LREE نسبت به HREE در آپاتیت‌های کانسارهای آهن کاپرونا (Frietsch & Perdahl, 1995)، چگارت (صادقی دعوتی، ۱۳۸۷) و آپرون اسپرینگ (Barker, 1995) نیز دیده می‌شود (شکل ۱۰). آپاتیت در این نوع کانسارها به دلیل نداشتن الگوی پراکندگی REE همانند فسفریت‌ها (بی‌هنجاری منفی Ce، Frietsch & Perdahl, 1995) از نوع ماگمایی به شمار می‌آید. الگوی REE مگنتیت در بی‌هنجاری‌های شماره ۱، ۲ و ۳ کانسار آهن گل‌گهر از روند یکسانی پیروی کرده است و با کانسارهای آهن یادشده همانندی فراوانی دارد (شکل ۱۱).

## ۵-۳. مقایسه الگوی پراکندگی REE مگنتیت گل‌گهر با این الگو در انواع مختلف آب‌ها

حضور و تمرکز REE در سیال‌های گرمابی به‌طور کلی توسط دما، فشار و ترکیب فاز سیال کنترل می‌شود. اگرچه در سامانه‌های گرمابی کهن تعیین منشأ سیال‌های REE بیشتر با مشکلاتی روبه‌رو است، ولی مقایسه با الگوی REE سیال‌های امروزی می‌تواند تا حدودی به تعیین منشأ سیال کمک کند (Barnes, 1997). شکل ۲۱ الگوی پراکندگی REE را در انواع آب‌های مختلف نشان می‌دهد. REE در آب دریا تمرکز بسیار ناچیزی دارد و با بی‌هنجاری منفی Eu و Ce مشخص می‌شود (شکل ۱۲-الف). رسوبات دارای آهن و منگنز که در کف دریا ته‌نشین می‌شوند نیز الگوی پراکندگی REE، همانند آب دریا دارند و آپاتیت‌های رسوبات دریایی و فسفریت‌ها اگرچه محتوای REE زیادی دارند ولی معمولاً از عنصر Ce تهی شده‌اند که این تأثیر آب دریا را نشان می‌دهد (Lottermoser, 1992).

سیال‌های مجاری گرمابی زیردریایی (شکل ۱۲-ب) غنی‌شدگی ویژه‌ای را از LREE و Eu نشان می‌دهند (Michard, 1989) و کانسارهای سولفید توده‌ای مرتبط با این سیال‌ها نیز بی‌هنجاری‌های مثبتی از Eu در الگوی پراکندگی REE دارند. به نظر می‌رسد که سیال‌های گرمابی به وسیله کمپلکس‌های کلریدی سبب تحرک REE و به‌ویژه تحرک Eu از واحدهای آتشفشانی-رسوبی و نهشت دوباره آن در بخش‌های کانسارسازی شده است. از سوی دیگر مطالعه سیال‌های بیرون‌آمده از دودخان‌های آتشفشانی در جزایر کماتی Aeolian ایتالیا (شکل ۱۲-ج) و سیال‌های درگیر Capton Pluton (شکل ۱۲-د) نشان می‌دهد که سیال‌های برآمده از ماگما بی‌هنجاری منفی Eu و غنی‌شدگی از LREE دارند (Banks et al, 1994).

کندریت دارند و عناصر خاکی کمیاب سبک (LREE) آنها نسبت به عناصر خاکی کمیاب سنگین (HREE) غنی‌شدگی نشان می‌دهند. از دیگر سیماهای آشکار در این نمودار بی‌هنجار منفی عنصر Eu است. دامنه تغییرات نسبت  $(La/Yb)_{NC}$  (Normalized Chondrite) از  $۶/۷۹$  تا  $۵۰/۸۳$  و نسبت  $(Eu/Eu^*)_{NC}$  از  $۰/۰۰۳$  تا  $۰/۱۲۲$  تغییر می‌کند. در الگوی پراکندگی REE مگنتیت بهنجار شده نسبت به شیل، نمونه‌های BH83 و 195-1 غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و نمونه‌های 1-1189، 1177-2، G17 و G16 دارای غنی‌شدگی HREE نسبت به LREE و کمی بی‌هنجاری منفی در محل Ce هستند. بقیه نمونه‌ها الگوی تقریبی V شکل دارند. دامنه تغییرات نسبت  $(La/Yb)_{NN}$  (Normalized NASC) از  $۱$  تا  $۷/۴۸$  و نسبت  $(Eu/Eu^*)_{NN}$  از  $۰/۰۷$  تا  $۰/۱۶$  در نمونه‌ها متغیر است.

## ۵-۴. بحث

### ۵-۱-۱. مقایسه الگوی پراکندگی REE در مگنتیت‌های ماگمایی و رسوبی

بررسی تغییرات REE در مگنتیت سنگ‌های آذرین مختلف (Frietsch & Perdahl, 1995) نشان می‌دهد که در بازالت‌های کف دریای مدیترانه، مگنتیت یک الگوی تفریق‌یافته از REE و بی‌هنجاری منفی در Eu دارد (شکل ۴-الف). الگوی پراکندگی REE در مگنتیت‌های سنگ‌های آتشفشانی میانه و فلسیک به صورت غنی‌شدگی آشکار عناصر LREE نسبت به HREE و بدون بی‌هنجاری منفی Eu است (شکل ۴-الف). پراکندگی REE در مگنتیت‌های گرانیت-آپلیت از ناحیه Arjeplog (شمال سوئد) الگویی مسطح دارد و بی‌هنجاری منفی آشکاری از Eu نشان می‌دهد. الگوی پراکندگی REE در مگنتیت‌های گابرو اسکارگاد دارای غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و بدون هیچ‌گونه بی‌هنجاری Eu است (شکل ۴-ب). مگنتیت در کانسارهای نوع کاپرونا دارای محتوای REE بالا ( $>100\text{ppm}$ ) و جدایش زیاد LREE در برابر HREE ( $La/Yb = 61$ ) است و منحنی آن شیب رو به پایین دارد (شکل‌های ۵-الف و ب). (Frietsch & Perdahl, 1995) بر این باورند که سیمای کلی پراکندگی REE در مگنتیت کانسارهای نوع کاپرونا، الگوی جدایش یافته‌تری دارند در حالی که کانسارهای آهن لایه‌ای و اسکارنی الگوی جدایش ضعیفی نشان می‌دهند (شکل ۶). در کانسارهایی که توسط فرایندهای گرمابی تشکیل شده‌اند، تهی‌شدگی LREE به‌طور بخشی در اثر شستشو توسط فرایندهای گرمابی کانسار ساز دیده می‌شود. این پژوهشگران همچنین تهی‌شدگی عنصر Ce در مگنتیت را نشانه‌ای از دخالت یک عامل رسوبی (آب دریا) در طول شرایط اکسایشی می‌دانند. الگوی پراکندگی REE در آپاتیت‌های کانسارهای آهن ماگمایی نوع کاپرونا (کاپروناوارا و الالاکو) با غنی‌شدگی LREE در برابر HREE و بی‌هنجاری آشکاری منفی Eu مشخص می‌شود (شکل ۷).

الگوی REE بهنجار شده نسبت به NASC در ۳ نوع مهم از تشکیلات آهن رسوبی (BIF) یعنی آلتگوما، سوپریور و راپتان نشان می‌دهد که هر ۳ کانسار در HREE نسبت به LREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند و بی‌هنجاری‌های مثبتی از Eu دارند. این بی‌هنجاری‌ها در کانسارهای نوع آلتگوما به سن آرکنن با شدت بیشتر و در کانسارهای آهن راپتان به سن نوپروتروزوییک با شدت کمتری نمایان شده است (شکل‌های ۸-الف و ج). تشکیلات آهنی سوپریور به سن پالئوپروتروزوییک از دید شدت بی‌هنجاری Eu میان این دو نوع از BIF قرار می‌گیرند (شکل ۸-ب). (Pecoits et al. (2009) وجود بی‌هنجاری مثبت Eu در BIF‌های آرکنن را به فعالیت‌های گرمابی نسبت می‌دهند؛ رسوباتی که دور از رگه‌های گرمابی ته‌نشین شده‌اند (BIF‌های نوپروتروزوییک) توسط بی‌هنجاری‌های مثبت Eu با شدت خیلی کمتر مشخص می‌شوند. به باور این پژوهشگران کاهش شدت بی‌هنجاری Eu نمودی از کاهش فعالیت گرمابی از زمان آرکنن تا نوپروتروزوییک است.

کانسار آهن گل‌گهر، به نسبت از روند یکسانی پیروی می‌کند. نسبت بالای  $(La/Yb)_N = 23/86$  در نمونه‌های مگنتیتی کانسار آهن گل‌گهر نشانگر غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE است. مقایسه الگوی پراکندگی REE در مگنتیتی گل‌گهر با مگنتیتی در کانسارهای ماگمایی (نوع کایرونا) نشان‌دهنده همانندی آنها از دید غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و مقایسه این الگو با الگوی پراکندگی REE در مگنتیتی در سنگ‌های گرانیتی و بازالتی نشان‌دهنده شباهت آنها از دید وجود بی‌هنجاری منفی Eu است. الگوی پراکندگی REE همچنین همانند مگنتیتی‌های کانسار آپاتیت- مگنتیتی اسفوردی، کانسار آهن بی‌هنجاری شمالی و کانسار آهن چاه‌گز است. دو ویژگی اصلی این الگو یعنی وجود بی‌هنجاری منفی Eu و غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در آپاتیت‌های کانسارهای آهن کایرونا، چغارت و آبرون اسپرینگ نیز دیده می‌شود. آپاتیت در کانسارهای یادشده به دلیل نداشتن الگوی پراکندگی همانند فسفریت‌ها (بی‌هنجاری منفی Ce) از نوع ماگمایی به شمار می‌آید. همچنین مقایسه الگوی پراکندگی REE مگنتیتی گل‌گهر با کانسارهای آهن رسوبی، اختلاف این کانسارها را از دید بی‌هنجاری مثبت Eu آشکار می‌سازد. سیال‌های مسئول ته‌نشینی مگنتیتی در کانسار آهن گل‌گهر سیرجان از نوع ماگمایی هستند که تأثیر خود را در بی‌هنجاری منفی Eu و غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در بازتاب داده‌اند.

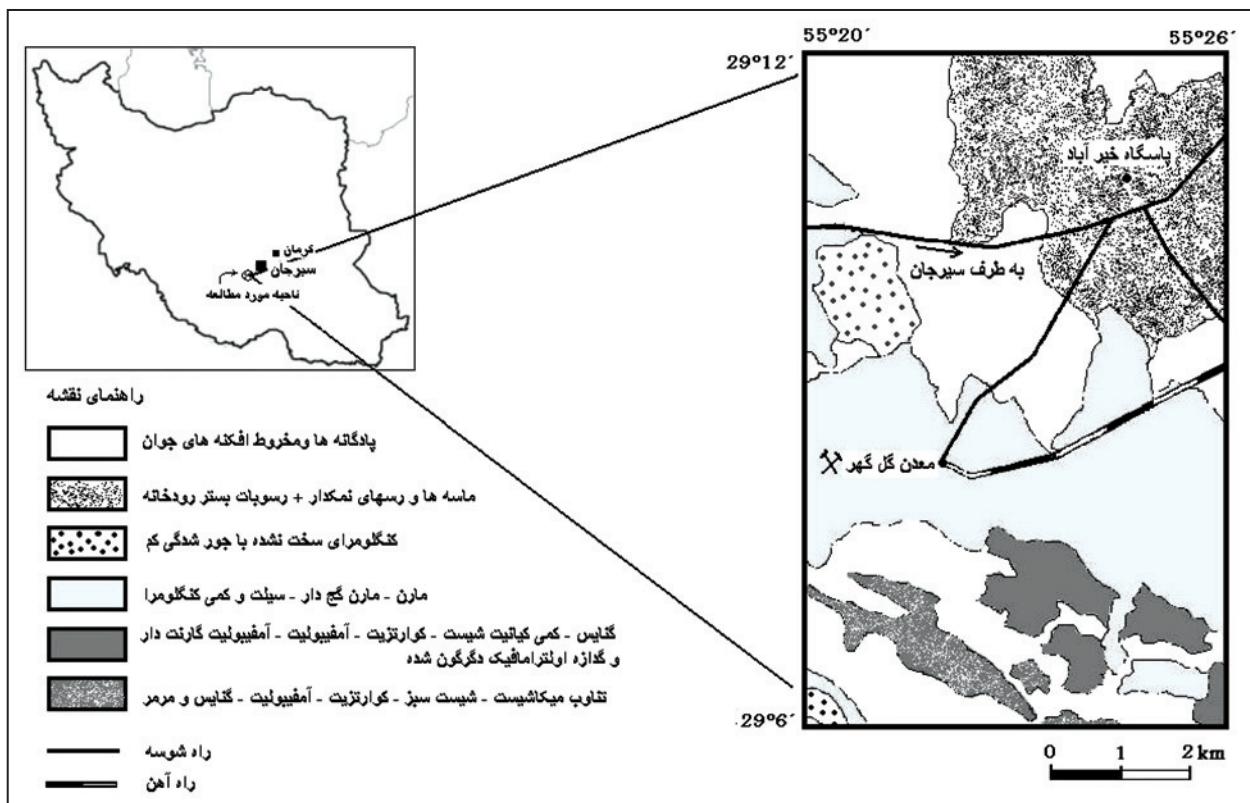
### سیاسگزار

از مدیران و مسئولان محترم مجتمع معدنی گل‌گهر، همچون آقایان مهندس مکنونی، مهندس اکبری، مهندس عسگری، و مهندس رفیعی‌زاده سپاسگزاریم.

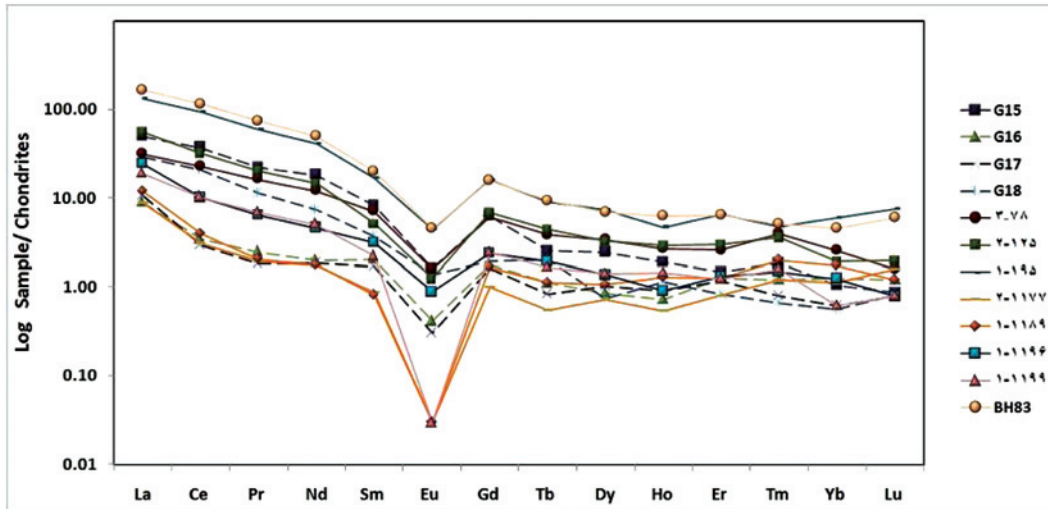
1999 (Fulignati et al.) که با الگوی REE در مگنتیتی کانسار آهن گل‌گهر و مگنتیتی و آپاتیت در دیگر کانسارهای آهن ناحیه بافق همانندی فراوانی دارد. مقایسه کلی الگوی پراکندگی عناصر خاکی کمیاب مگنتیتی در کانسار آهن گل‌گهر با این الگو در مگنتیتی موجود سنگ‌های مختلف و انواع مختلف کانسارهای آهن نشان می‌دهد که الگوی پراکندگی REE در مگنتیتی گل‌گهر از دید غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE همانند با این الگو در مگنتیتی‌های کانسارهای آهن ماگمایی نوع کایرونا و از دید بی‌هنجاری منفی Eu همانند مگنتیتی موجود در سنگ‌های گرانیتی و بازالتی است. از سوی دیگر مقایسه الگوی پراکندگی REE در مگنتیتی گل‌گهر با انواع آب‌ها نشان‌دهنده تفاوت آن به ویژه در بی‌هنجاری منفی Ce است. در پایان مقایسه الگوی پراکندگی REE مگنتیتی گل‌گهر با کانسارهای آهن رسوبی، اختلاف این کانسارها را از دید بی‌هنجاری مثبت Eu آشکار می‌سازد. بنابراین نتیجه می‌شود که مگنتیتی در کانسار آهن گل‌گهر سیرجان از سیال‌های با منشأ ماگمایی سرچشمه گرفته باشد که تأثیر خود را توسط غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE در مگنتیتی‌های گل‌گهر نشان داده است. با توجه به حضور ۲ توده گرانیتی در ۱۵ و ۷۵ کیلومتری معدن و نیز فاز گرانیت‌زایی گسترده در هنگام تکامل نوار دگرگونی سندیج - سیرجان، در طول فرورانش پوسته اقیانوسی نوتیس به زیر بلوک ایران مرکزی در تریاس پسین و ژوراسیک، احتمال شرکت داشتن سیال‌های ماگمایی در کانسارسازی آهن گل‌گهر وجود دارد.

### ۶- نتیجه‌گیری

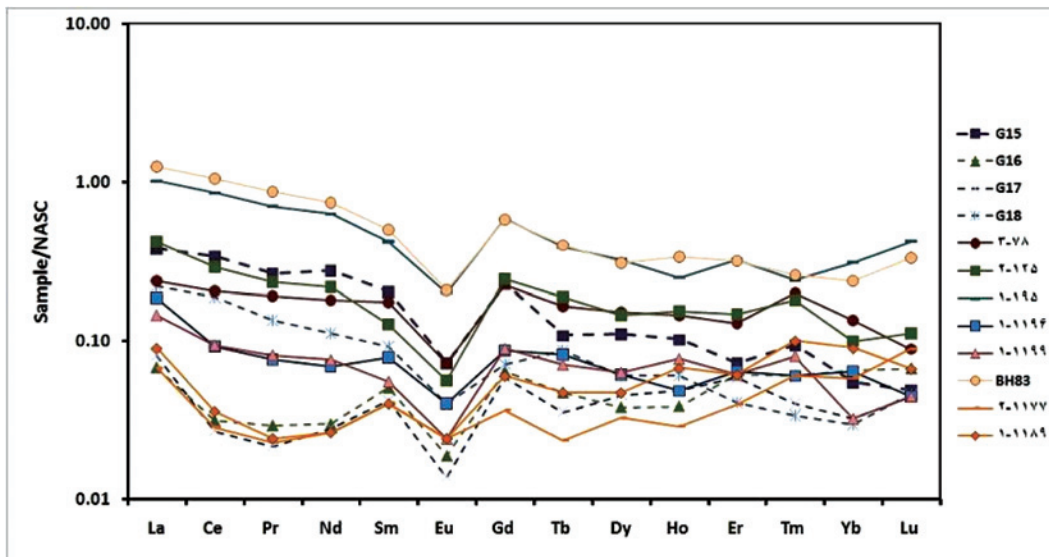
الگوی عناصر خاکی کمیاب مگنتیتی در بی‌هنجاری‌های شماره ۱، ۲ و ۳



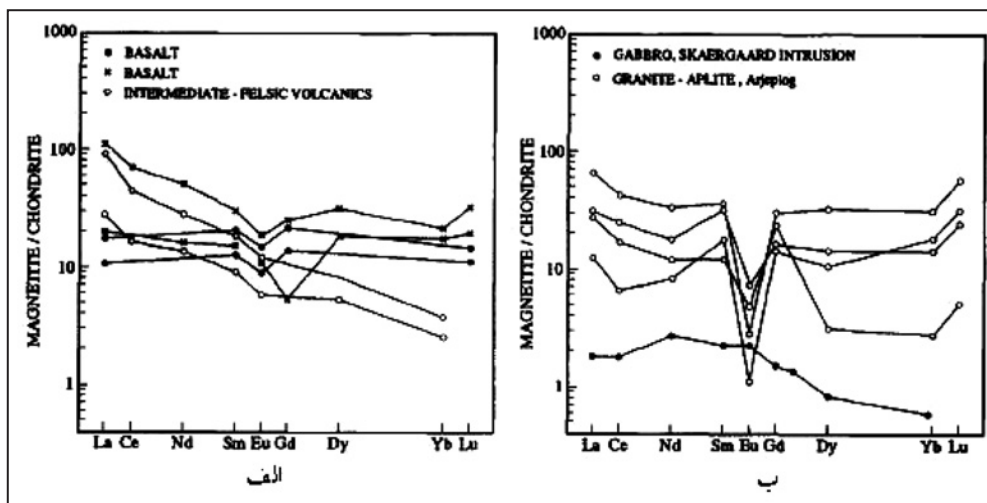
شکل ۱- موقعیت ناحیه مورد مطالعه روی نقشه ایران و زمین‌شناسی واحدهای سنگی موجود در منطقه، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ گل‌گهر (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۷۸).



شکل ۲- الگوی پراکندگی REE در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر بهنجار شده نسبت به کندریت.

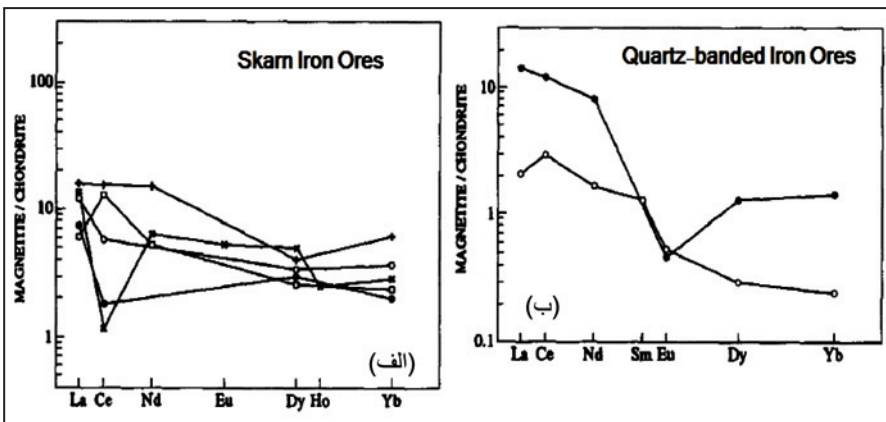
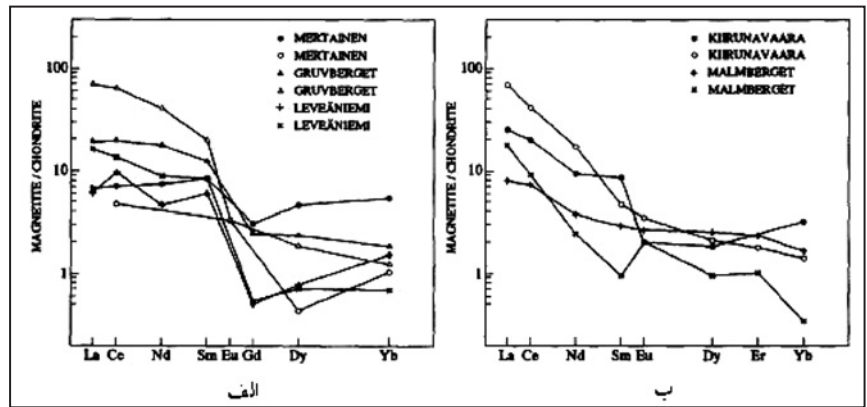


شکل ۳- الگوی پراکندگی REE در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر بهنجار شده نسبت به شیل آمریکای شمالی (NAC).



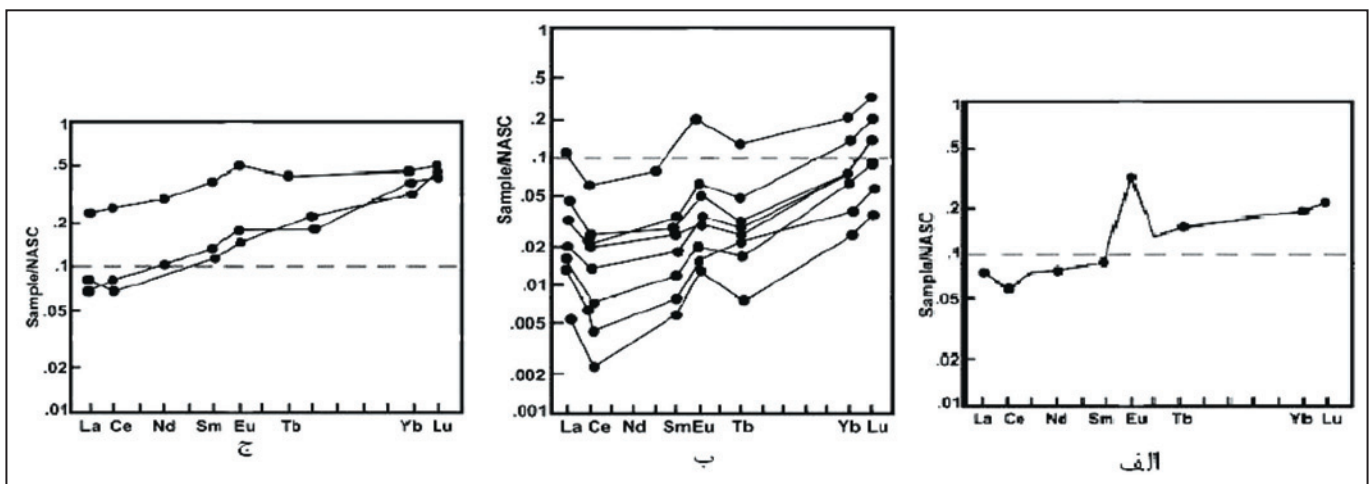
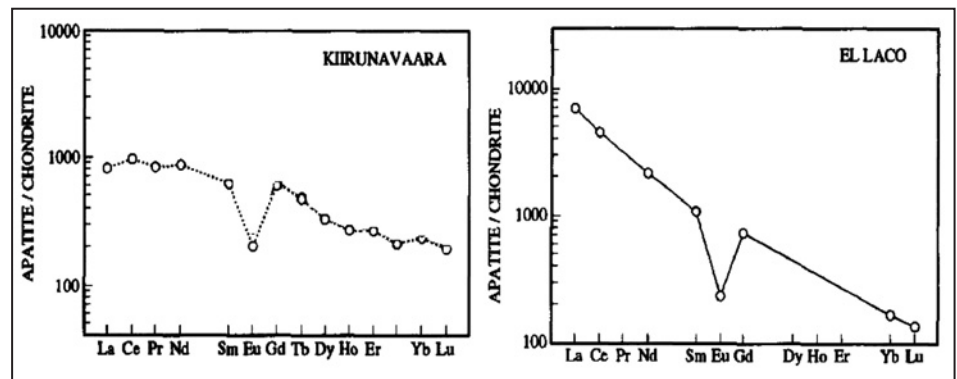
شکل ۴- الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت برای مگنتیت در سنگ‌های آذرین، الف) بازالت‌های کف دریای مدیترانه (Schock, 1979) و سنگ‌های آتشفشانی حدواسط-فلسیک، ب) گابرو از توده نفوذی گابرو اسکارگاد و گرانیت-آپلیت از ناحیه Arjeplog (Frietsch & Perdahl, 1995).

شکل ۵- الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت برای مگنتیت کانسارهای نوع کایرونا (Frietsch & Perdahl, 1995).



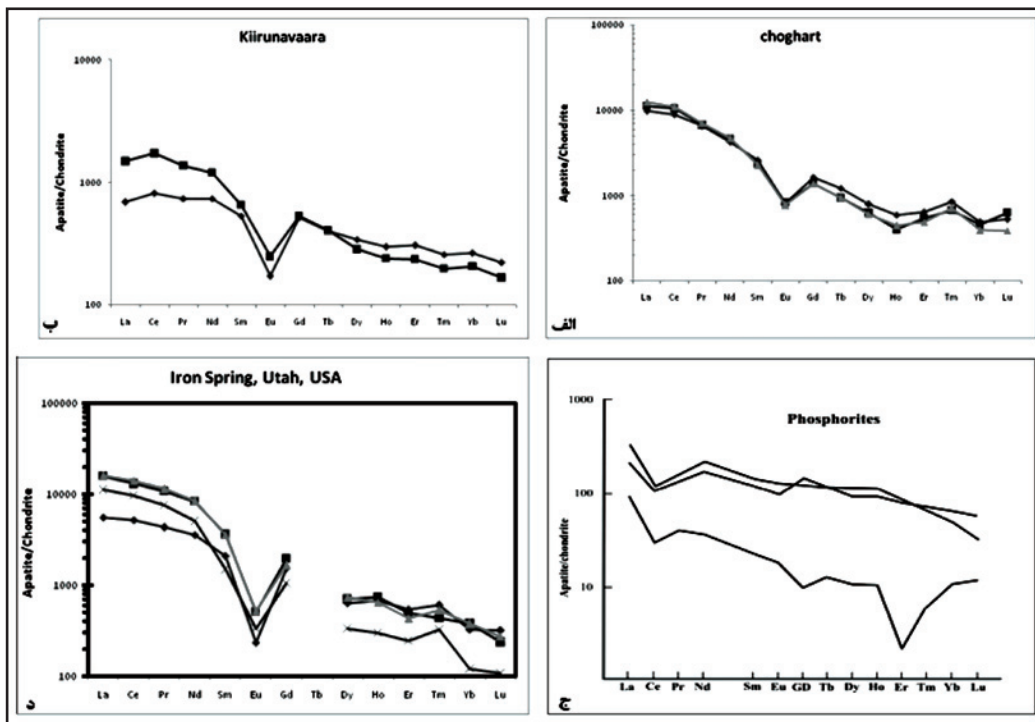
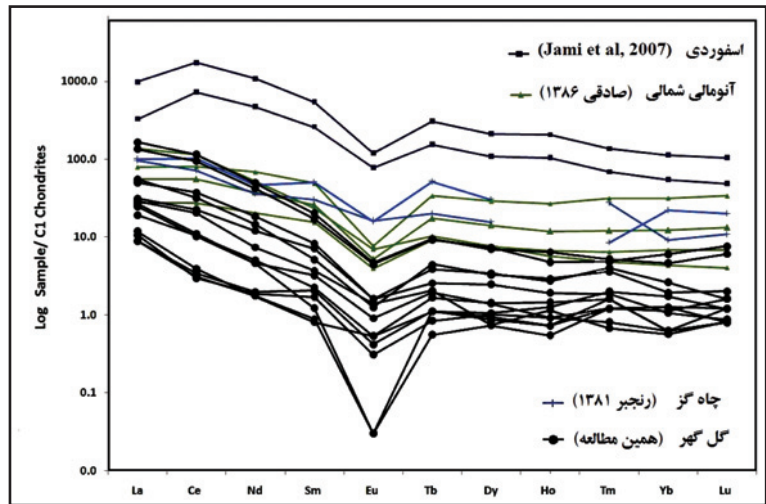
شکل ۶ - الگوی پراکندگی بهنجار شده نسبت به کندریت. الف) در مگنتیت‌های اسکارنی و ب) در آهن لایه‌ای کوارتز دار (Frietsch & Perdahl, 1995).

شکل ۷ - الگوی پراکندگی REE بهنجار شده نسبت به کندریت در آپاتیت‌های کانسارهای آهن نوع کایرونا (ال لاکو و کایروناوارا) (Frietsch & Perdahl, 1995).

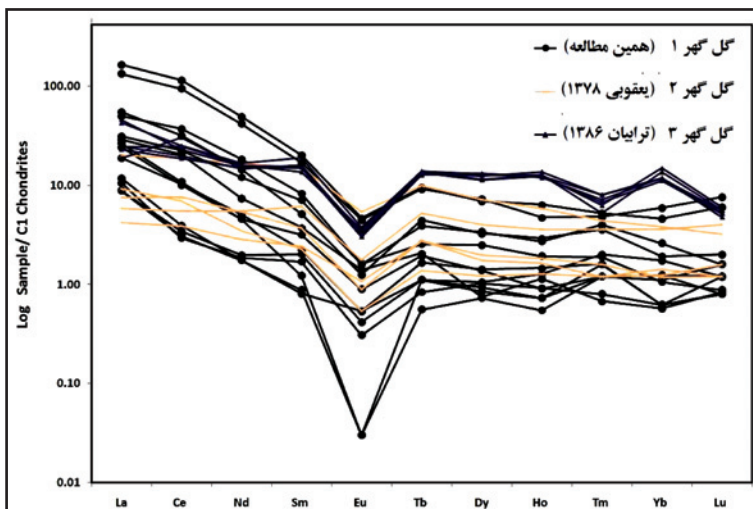


شکل ۸ - الگوی پراکندگی REE بهنجار شده نسبت به شیل آمریکای شمالی در الف) تشکیلات آهنی نوع آنگوما به سن آرکنن، ب) تشکیلات آهنی نوع سوپریور به سن پالئوپروتروزویک و ج) تشکیلات آهنی تیپ راپیتان به سن نئوپروتروزویک (Pecoites et al., 2009).

شکل ۹ - مقایسه الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت در مگنتیت کانسار آهن گل‌گهر و شماری از کانسارهای آهن ایران در ناحیه بافق.

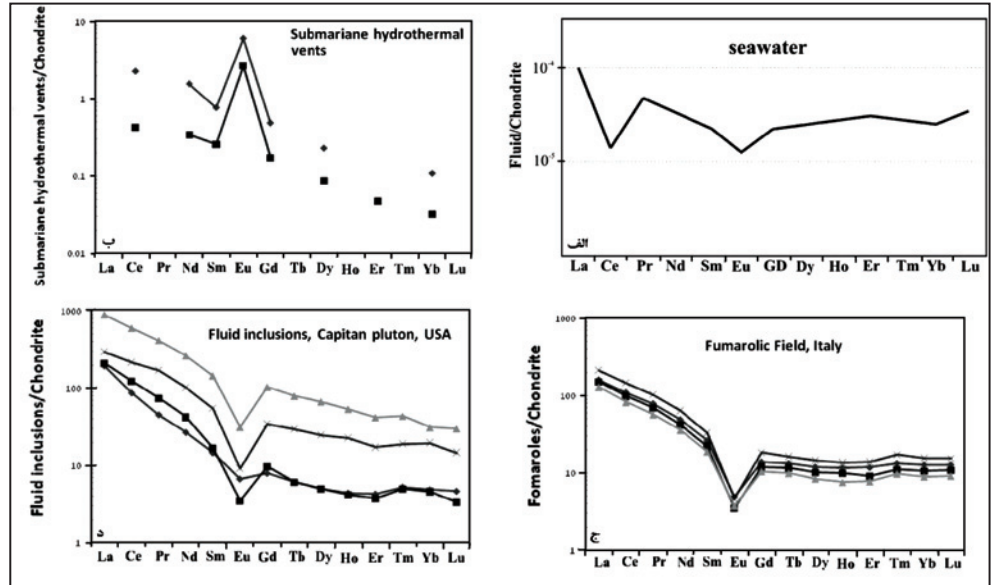


شکل ۱۰ - مقایسه الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت در آپاتیت کانسارهای الف) چغارت (صادقی دعوتی، ۱۳۸۷)، ب) کیرونواورا (Frietsch & Perdahl, 1995)، ج) فسفریت‌ها (Frietsch & Perdahl, 1995) و د) آبرون اسپرینگ (Barker, 1995).



شکل ۱۱ - مقایسه الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت در مگنتیت بی‌هنجاری‌های شماره ۱، ۲ و ۳ کانسار آهن گل‌گهر.

شکل ۱۲- الگوی پراکندگی REE بهنجار شده نسبت به کندریت در انواع آب‌های مختلف.



جدول ۱- ویژگی نمونه‌های مگنتیت از کانسار آهن گل‌گهر که غلظت‌های REE در آنها اندازه‌گیری شده است.

شماره نمونه	نوع	موقعیت	ژرفا (متر)
G15	نمونه دس‌تی	مرکز پیت	سطحی
G16	نمونه دستی	مرکز پیت	سطحی
G17	نمونه دستی	مرکز پیت	سطحی
G18	نمونه دستی	مرکز پیت	سطحی
78-3	مغزه حفاری	مرکز پیت	۹۳/۵-۹۹/۵
125-2	مغزه حفاری	مرکز پیت	۱۱۹/۵-۱۲۵/۵
195-1	مغزه حفاری	خاور پیت	۳۱۳-۳۱۹
1177-2	مغزه حفاری	خاور پیت	۲۷۵-۲۸۱
1189-1	مغزه حفاری	شمال پیت	۲۱۵/۴-۲۲۰/۸
1196-1	مغزه حفاری	باختر پیت	۱۷۳/۳-۱۸۰
1199-1	مغزه حفاری	جنوب پیت	۳۰۵-۳۱۲
BH83	مغزه حفاری	مرکز پیت	۲۸۰-۲۸۶

جدول ۲- غلظت عناصر خاکی کمیاب در مگنتیت‌های کانسار آهن گل‌گهر بر حسب ppm.

شماره نمونه	G15	G16	G17	G18	78-3	125-2	195-1	1177-2	1189-1	1196-1	1199-1	BH83
La	۱۱/۸۴	۲/۱۰	۲/۵۰	۶/۸۵	۷/۴	۱۳/۱	۳۱/۷	۲/۱	۲/۸	۵/۸	۴/۵	۳۹/۱
Ce	۲۲/۷۵	۲/۱۰	۱/۸۰	۱۲/۵۶	۱۳/۸	۱۹/۶	۵۷/۷	۱/۹	۲/۴	۶/۲	۳/۶	۷۰/۴
Pr	۲/۰۸	۰/۹	۰/۱۷	۱/۰۶	۱/۵۱	۱/۸۶	۵/۵۵	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۶	۰/۶۴	۶/۸۸
Nd	۸/۳۶	۰/۹	۰/۸۵	۳/۳۶	۵/۵	۶/۶	۱۹/۱	۰/۸	۰/۸	۲/۱	۲/۳	۲۲/۶
Sm	۱/۲۲	۰/۳	۰/۲۵	۰/۵۵	۱/۰۵	۰/۷۶	۲/۵۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۴۷	۰/۳۳	۲/۹۸
Eu	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۲۶
Gd	۱/۲۶	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۹	۱/۲۴	۱/۳۵	۳/۲۲	۰/۲	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۴۹	۳/۱۷
Tb	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۳۴
Dy	۰/۶۱	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۸۴	۰/۸	۱/۸	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۳۵	۱/۷۱
Ho	۰/۱۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۳۵
Er	۰/۲۴	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۴۸	۱/۰۶	۰/۱۳	۰/۲	۰/۲۱	۰/۲	۱/۰۴
Tm	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۳
Yb	۰/۱۷	۰/۲	۰/۱	۰/۰۹	۰/۴۲	۰/۳۱	۰/۹۶	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۲	۰/۱	۰/۷۴
Lu	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۵

## کتابکاری

- آفتابی، ع. و بابکی، آ.، ۱۳۸۵- بررسی الگوی کانسارسازی آهن در کانسار گل‌گهر سیرجان، کرمان، علوم‌زمین، جلد ۱۶، شماره ۶۲: ۵۹-۴۰.
- بابکی، آ.، ۱۳۸۳- بررسی الگوی کانسارسازی آهن در کانسار گل‌گهر سیرجان، کرمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ترابیان، س.، ۱۳۸۶- کانی‌زایی و ژنز آنومالی معدن سه گل‌گهر سیرجان با تکیه بر پراکنندگی عناصر جزئی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- حلاجی، ا.، ۱۳۷۰- مطالعه کانی‌شناسی، عناصر کمیاب و زمین‌شناسی کانسار گل‌گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- خلیلی‌میرهن، ش.، ۱۳۷۲- پیدایش کانسار سنگ‌آهن گل‌گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- رنجرباقفی، م.، ۱۳۸۱- بررسی ژئوشیمی و منشأ کانسار آهن چاه‌گز، منطقه بافق استان یزد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.
- سبزه‌ای، م.، اشراقی، ص.ع. و روشن‌روان، م.س.، ۱۳۷۸- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ناحیه گل‌گهر، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- سپهری‌راد، ر.، ۱۳۷۹- زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آهن آنومالی شمالی-چغارت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- صادقی، ر.، ۱۳۸۶- بررسی ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن آنومالی شمالی (شمال بافق) ایران مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
- صادقی‌دعوتی، و.، ۱۳۸۷- بررسی توزیع ابعادی، نوع درگیری و خصوصیات کانی‌شناسی کانسنگ و باطله در معدن شماره یک مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.
- عسگری، م.، ۱۳۸۶- بررسی توزیع ابعادی، نوع درگیری و خصوصیات کانی‌شناسی کانسنگ و باطله در معدن شماره یک مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.
- قلمقاش، ج. و میرزاد، ح.، ۱۳۸۷- گزارش سن‌سنجی مجموعه دگرگونی گل‌گهر، شرکت مهندسان مشاور تهران پادیر.

## References

- Banks, D. A., Yardley, B. W. D., Campbell, A. R. & Jarvis, K. E., 1994- REE comparison of an aqueous magmatic fluid: A fluid inclusion study from the Capiran Pluton, New Mexico, U.S.A, *Chemical Geology*, 113: 259-272.
- Barker, D. S., 1995- Crystallization and alteration of quartz monzonite, Iron Springs mining district, Utah; relation to associated iron deposits, *Economic Geology*, 90: 2197-2217.
- Barnes, H. L., 1997- *Geochemistry of hydrothermal deposits*, 3th edition, Wiley Interscience, New York, 517.
- Frietsch, R. & Perdahl, J. A., 1995- Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ore and some other iron type, *Ore Geology Review*, 9: 489-510.
- Fulginiti, P., Gioncada, A. & Sbrana, A., 1999- Rare-earth element (REE) behavior in the alteration facies of the active magmatic-hydrothermal system of Vulcano (Aeolian Islands, Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88: 325-342.
- Gromet, L. P., Dymek, R. F., Haskin, L. A. & Korotev, R. L., 1984- The North American shale composite, its compilation, major and trace element characteristics, *Geochem. Cosmochim. Acta*, 48: 2469-2482.
- Jami, M., Alistair, C. D. & Cohen, D. R., 2007- Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite- magnetite deposit, central Iran, *Economic Geology*, 102: 1111-1128.
- Ljung, S., 1976- Geological report of Gol-Gohar iron ore project: Int.Rep., NISCOGEG.
- Lottermoser, B. G., 1992- Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes, *Ore Geology Review*, 7: 25-41.
- McDonough, W. F. & Sun, S. S., 1995- Composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120: 223-253.
- Michard, A., 1989- Rare earth elements systematic in hydrothermal fluids, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 745-750.
- Mucke, A. G. & Golestaneh, F., 1982- Kiruna type Mammouth deposits of Gol-Gohar, Province of Kerman, Iran: 3Th Symposium of mining, Iran.
- Pecoits, E., Gingras, M. K., Barley, M. E., Kappler, A., Posth, N. R. & Konhauser, K. O., 2009- Petrography and geochemistry of the Dales Gorge banded iron formation: paragenetic sequence, source and implication for Palaeo-ocean chemistry", *Precambrian Research*, 172: 163-187.
- Schock, H. H., 1979- Distribution of rare-earth and other trace element in magnetites, *Chem Geol*, 26: 119-133.



# Distribution and Abundance of Rare Earth Elements in Magnetite from Gol-Gohar Iron Ore Deposit, Sirjan, Kerman

Y. Bayati-Rad <sup>1</sup>, H. Mirnejad <sup>2\*</sup> & J. Ghalamghash <sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Faculty of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Geology, College of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2012 January 18

Accepted: 2012 June 17

## Abstract

Gol-Gohar mining complex, located southwest of Sirjan (Kerman Province) and within the Sanandaj-Sirjan structural zone, has a number of iron-rich deposits that provides 30% of steel demand in the country. The main ore in this deposit is magnetite with subordinate amounts of hematite and accessory pyrite and chalcopyrite phases. Comparison of rare earth element (REE) distribution patterns of Gol-Gohar magnetite with those of magmatic magnetite (Kiruna) and also magnetite associated with granite and basalts show similar enrichment in light REE relative to the heavy REE and negative Eu anomaly. Such features can also be observed in apatite from Kiruna, Iron Spring, Choghar and Esfordi Fe ore deposits, the origin of all of which have been ascribed as magmatic due to a lack REE distribution patterns similar to phosphorites. Based on these characteristics, it seems that the magnetite in Gol-Gohar Fe deposit has dominantly originated from a magmatic fluid.

**Keywords:** Fe deposit, Source, Rare Earth Elements, Gol-Gohar, Sirjan.

For Persian Version see pages 217 to 224

\*Corresponding author: H. Mirnejad; Email: hmirnejad@ut.ac.ir