



## کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر جزئی و خاکی نادر کانسنگ‌های فریتی برهان، جنوب شرق مهاباد، شمال غرب ایران

علی عابدینی\*، مسعود حبیبی مهر

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۹/۲۲، نسخه نهایی: ۹۶/۱/۱۹)

**چکیده:** لایه‌ها و عدسی‌های بازماندی منطقه برهان (جنوب شرق مهاباد، شمال غرب ایران) دربردارنده حجم قابل ملاحظه‌ای کانسنگ‌های فریتی هستند که توسط سنگ‌های کربناته سازند روته به سن پرمین محصور شده‌اند. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهند که این کانسنگ‌ها طبیعت چند چرخه‌ای و خاستگاه نابرجا داشته و تکامل آنها تا حد زیادی تحت تاثیر فرآیندهای دیرزاد و برونزاد تحت تاثیر قرار گرفته است. بررسی‌های کانی‌شناسی آشکار می‌کنند که هماتیت و گوتیت فازهای کانیایی اصلی این کانسنگ‌ها هستند که با فازهای فرعی نظیر کائولینیت، ایلیت، بوهمیت، روتیل، کلسیت، پیرولوسیت و کراندالیت همراهی می‌شوند. بر اساس مقادیر نیمه کمی کانی‌ها، فریت‌های مورد بررسی ترکیبی معادل کانسنگ آهن و کانسنگ آهن غنی از سیلیس دارند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی پیشنهاد می‌کنند که توزیع بیشتر عناصر جزئی در کانسنگ‌ها توسط درجه جدایش Fe-Al کنترل شده است. مقادیر REE در کانسنگ‌های فریتی دارای گستره ۱۰۸۰ تا ۱۴۵۰۷ ppm است. مقادیر La/Y، Eu/Eu\* و Ce/Ce\* در کانسنگ‌ها به ترتیب دارای گستره ۱۰/۴۲-۱۰۰، ۱/۰۶۵-۵/۲۹ و ۳/۶۳-۵/۲۲ هستند. ترکیب نتایج کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی بدست آمده نشان می‌دهد که شرایط محیطی (اکسیدان-قلیایی) و کنترل کانیایی نقش مهمی در تثبیت و تحرک عناصر جزئی در کانسنگ‌های فریتی ایفا نموده‌اند. ضرایب همبستگی بین عناصر نشان می‌دهند که فازهای کانیایی فرعی نظیر رس‌ها، بوهمیت، پیرولوسیت، روتیل و کراندالیت میزبانان احتمالی REE در کانسنگ‌ها هستند.

**واژه‌های کلیدی:** عناصر جزئی؛ کنترل کانیایی؛ محیط اکسیدان-قلیایی؛ برهان؛ مهاباد

### مقدمه

آلومینیوم از هم طی پیشرفت فرآیندهای هوازگی دارد. کانسنگ‌هایی از این دسته که بر روی سنگ‌های کربناتی تشکیل می‌شوند، دارای دو خاستگاه برج و نابرجا هستند که از بین آنها، نوع نابرجا از فراوانی بیشتری برخوردار است [۱]. در شمال غرب ایران، به ویژه در جنوب استان آذربایجان-غربی پتانسیل‌های بسیار مناسبی از نهشته‌های وابسته به فرآیندهای هوازگی در سنگ‌های کربناتی سازند روته به سن پرمین شناسایی شده‌اند [۲-۴]. این ذخایر اغلب دربردارنده کانسنگ‌هایی از نوع بوکسیت، لاتریت و کائولینیت هستند. ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی این ذخایر به تفصیل

در کانسارهای وابسته به فرآیندهای هوازگی شیمیایی و تشکیل نهشته‌های بازماندی، اصطلاح فریت به کانسنگ‌هایی گفته می‌شود که بالغ بر ۶۰ درصد ترکیب شیمیایی آن‌ها را  $Fe_2O_3$  تشکیل می‌دهد [۱]. بر اساس مقادیر اکسیدهای آهن، آلومینیوم و سیلیس موجود در یک سیستم هوازده بازماندی اصطلاحاتی نظیر فریت، فریت کائولینیتی، فریت بوکسیتی، بوکسیت فریتی، و کائولن فریتی برای کانسنگ‌های بازماندی تعریف شده است [۱]. تشکیل این نوع کانسنگ‌های بازماندی یاد شده بستگی به درجه جدایش عناصر آهن، سیلیسیوم و

مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است [۵-۸]. منطقه برهان یکی از مناطق نادر در شمال غرب ایران است که لایه‌های هوازده بازماندی آن دربردارنده حجم قابل ملاحظه‌ای از کانسنگ‌های فریتی هستند. این منطقه از نظر جغرافیایی، در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مهاباد، جنوب استان آذربایجان غربی واقع است. با وجود بررسی‌های جامع بر تعداد زیادی از ذخایر هوازده بازماندی شامل کانسنگ‌های بوکسیتی، لاتریتی و کائولینیتی پرمین در شمال غرب ایران توسط پژوهشگران مختلف، تاکنون هیچ بررسی بر کانسنگ‌های فریتی منطقه برهان از نظر کانی‌شناسی و زمین‌شیمی انجام نشده است. در این پژوهش سعی شده است که اطلاعات نسبتاً جامعی از ویژگی‌های کانی‌شناسی، شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل، عوامل زمین‌شیمیایی موثر در توزیع و تثبیت عناصر جزئی و خاکی نادر، کانی‌های میزبان لانتانیدها و دلایل رخداد بی‌هنجاری‌های Eu و Ce در کانسنگ‌های فریتی لایه‌های بازماندی منطقه برهان ارائه گردد.

#### روش بررسی

این بررسی در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفت. در بخش صحرایی، پیمایش‌هایی برای شناخت واحدهای سنگ-شناختی منطقه، هندسه ماده معدنی و ارتباط آن با سنگ‌های درونگیر و مشخصات ماکروسکوپیکی کانسنگ‌های فریتی انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده از مشاهدات صحرایی، تعداد ۵۰ نمونه از کانسنگ‌های فریتی به همراه سنگ‌های درونگیر آنها از بخش‌های زیرین لایه‌ها و عدسی‌های بازماندی برداشت شدند. تعداد نمونه‌های فریتی برداشت شده از بخش‌های زیرین هر یک از لایه‌ها و یا عدسی‌های بازماندی موجود در منطقه ۸ تا ۱۲ نمونه بوده است. بعد از بررسی‌های مزوسکوپیکی، از بین

نمونه‌های برداشت شده بر اساس تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و بافت، تعداد ۱۱ نمونه از کانسنگ‌های فریتی جهت بررسی‌های آزمایشگاهی انتخاب شدند. سپس، از هر ۱۱ نمونه، مقطع صیقلی تهیه و با استفاده از میکروسکوپ بررسی شدند. از بین این نمونه‌ها، به صورت یک در میان تعداد ۶ نمونه انتخاب و جهت تعیین فازهای کانیایی نامشخص و مقادیر نیمه کمی آنها به روش پراش پرتو X (XRD) (با استفاده از پراش-سنج SIMENS مدل D-5000) در شرکت معدنی کانساران بینالود بررسی شدند. برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، هر ۱۱ نمونه کانسنگ فریتی به روش‌های طیف‌سنجی انتشار اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-AES) با کد آنالیزی ICP-06 و طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) با کد آنالیزی ME-MS81 به ترتیب برای تعیین مقادیر عناصر اصلی و فرعی، و عناصر جزئی و خاکی نادر توسط آزمایشگاه شرکت ALS Chemex کشور کانادا تجزیه شدند. برای تعیین مقادیر عناصر خاکی نادر حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه با متابورات و تترابورات لیتیم ترکیب و در اسید نیتریک حل شدند. مقادیر LOI نمونه‌های یاد شده توسط اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها قبل و بعد از گرمادهی (۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت) بوسیله شرکت نام برده تعیین شدند. در این پژوهش به منظور تفسیرهای زمین‌شیمیایی ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۱۶ محاسبه شد. نتایج مقادیر نیمه کمی کانی‌ها و تجزیه‌های شیمیایی انجام شده به همراه محدوده آشکارسازی عناصر به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و برخی از نسبت‌های زمین‌شیمیایی حاصل از تجزیه‌های شیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱ مقادیر نیمه کمی کانی‌ها در کانسنگ‌های فریتی منطقه برهان.

	S-1	S-3	S-5	S-7	S-9	S-11
Hematite	۸۰٫۳	۶۷٫۳	۷۹٫۶	۷۲٫۸	۶۷٫۹	۶۳٫۱
Goethite	۱۳٫۳	۲۷٫۶	۱۲٫۵	۱۹٫۷	۱۶٫۹	۲۴٫۸
Kaolinite	۲٫۶	۵٫۱	۳٫۲	۷٫۵	۷٫۹	۳٫۷
Calcite	۱٫۵	-	۴٫۷	-	-	۰٫۸
Pyrolusite	۲٫۳	-	-	-	۱٫۷	۱٫۳
Rutile	-	-	-	-	۲٫۷	۲٫۵
Crandalite	-	-	-	-	۱٫۸	۱٫۸
Illite	-	-	-	-	-	۱٫۲
Boehmite	-	-	-	-	۱٫۱	۰٫۸

جدول ۲ نتایج تجزیه‌های شیمیایی ICP-AES و ICP-MS نمونه‌های کانسنگ فریتی برهان به همراه محدوده آشکارسازی عناصر.

	Detection limit	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11
SiO <sub>2</sub>	۰٫۰۱	۳٫۷۲	۱٫۶۷	۱٫۸۵	۲٫۸۱	۱٫۴۷	۱٫۸۸	۲٫۳۳	۴٫۶۸	۸٫۱۵	۱۴٫۴۲	۱٫۸۸
TiO <sub>2</sub>	۰٫۰۱	۰٫۶۴	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۴۱	۰٫۰۸	۰٫۲۵	۰٫۰۸	۱٫۶۱	۱٫۵۷	۲٫۶۵	۰٫۴۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰٫۰۱	۱٫۶۸	۰٫۳۲	۰٫۳۶	۱٫۰۲	۰٫۲۷	۰٫۷۴	۰٫۷۵	۲٫۷۱	۴٫۶۲	۸٫۱۲	۱٫۱۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3(T)</sub>	۰٫۰۱	۸۲٫۹۹	۸۹٫۹۳	۸۸٫۷۴	۸۵٫۸۷	۹۱٫۱۲	۸۶٫۸۱	۸۸٫۱۴	۷۹٫۴۵	۷۲٫۸۹	۶۰٫۹	۸۴٫۸۷
MnO	۰٫۰۱	۰٫۷۱	۰٫۵۲	۰٫۶۲	۰٫۶۷	۰٫۴۱	۰٫۷۷	۰٫۵۹	۱٫۰۲	۰٫۹۶	۱٫۰۹	۰٫۹۱
MgO	۰٫۰۱	۰٫۲۳	۰٫۱۸	۰٫۲۲	۰٫۲۳	۰٫۱۳	۰٫۲۰	۰٫۱۴	۰٫۲۲	۰٫۵۴	۰٫۹۱	۰٫۱۷
CaO	۰٫۰۱	۱٫۹۷	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۱٫۱۲	۰٫۱۸	۱٫۰۷	۰٫۳۳	۰٫۶۶	۱٫۱۲	۰٫۳۶	۱٫۸۸
Na <sub>2</sub> O	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱
K <sub>2</sub> O	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۰۶	۰٫۱۹	۰٫۰۹	۰٫۱۹	۰٫۳۲
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰٫۰۱	۰٫۶۱	۰٫۲۶	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۰٫۲۱	۰٫۹۲	۰٫۳۲	۱٫۰۲	۱٫۳۵	۱٫۲۳	۱٫۲۲
L.O.I	۰٫۰۱	۷٫۳۵	۶٫۷۷	۷٫۵۲	۷٫۴۵	۶٫۰۳	۷٫۲۱	۷٫۲۱	۸٫۳۵	۸٫۶۵	۱۰٫۰۲	۷٫۱۶
Sum	-	۹۹٫۹۸	۹۹٫۹۷	۹۹٫۹۸	۹۹٫۹۴	۹۹٫۹۲	۹۹٫۹۵	۹۹٫۹۶	۹۹٫۹۳	۹۹٫۹۶	۹۹٫۹۱	۹۹٫۹۴
U	۰٫۰۵	۸٫۲۴	۶٫۶۹	۶٫۱۱	۵٫۶۷	۶٫۲۸	۸٫۷۵	۷٫۰۵	۹٫۶۰	۱۳٫۸۲	۱۸٫۲۶	۱۰٫۳۹
Th	۰٫۰۵	۰٫۷۸	۰٫۱۰	۰٫۱۲	۰٫۴۴	۰٫۱۱	۰٫۳۴	۰٫۱۹	۱٫۰۷	۲٫۴۳	۴٫۲۷	۰٫۵۸
Ba	۰٫۵	۲۱۴٫۴	۷۹٫۵	۹۶٫۱	۱۵۵٫۲	۶۳٫۰	۱۹۱٫۱	۱۴۰٫۶	۲۱۵٫۳	۲۰۳٫۲	۱۲۰٫۳	۲۸۶٫۱
Hf	۰٫۲	۲٫۱	۰٫۵	۰٫۸	۱٫۴	۰٫۲	۰٫۸	۱٫۲	۳٫۱	۳٫۷	۶٫۶	۰٫۸
Cr	۱۰	۱۰۱۰	۹۴۰	۹۲۰	۹۸۰	۹۱۰	۸۸۰	۹۶۰	۸۷۰	۵۸۰	۴۷۰	۸۵۰
Co	۰٫۵	۲۶٫۳	۲۹٫۴	۲۸٫۶	۲۷٫۳	۳۰٫۳	۳۱٫۶	۳۲٫۱	۲۷٫۱	۲۴٫۵	۱۴٫۶	۳۴٫۵
Nb	۰٫۲	۱٫۶	۰٫۷	۰٫۷	۱٫۱	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۷	۳٫۹	۳٫۶	۶٫۲	۱٫۱
Cs	۰٫۰۱	۰٫۲۹	۰٫۱۳	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۰٫۰۵	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۶۸	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۸۲
Rb	۰٫۲	۱٫۳	۰٫۳	۰٫۲	۱٫۰	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۶	۲٫۴	۱٫۶	۲٫۶	۳٫۶
V	۵	۱۴۹	۹۹	۱۰۵	۱۲۷	۹۳	۸۰	۱۰۲	۱۳۸	۱۸۳	۳۱۲	۸۴
Ga	۰٫۱	۵	۳٫۲	۳٫۳	۴٫۱	۳٫۲	۳٫۲	۲٫۶	۳٫۴	۵٫۲	۷٫۵	۳
Sn	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۲	۳	۱
Sr	۰٫۱	۲۲۷٫۹	۱۰۲٫۱	۱۲۴٫۸	۱۷۶٫۴	۷۹٫۳	۱۹۵٫۱	۱۳۳٫۱	۱۷۳٫۸	۱۷۰٫۸	۷۶٫۳	۲۶۵٫۴
W	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۵	۵	۶	۲
Y	۰٫۵	۱٫۶	۰٫۶	۰٫۷	۱٫۱	۰٫۶	۲٫۱	۲٫۳	۱٫۲	۳٫۸	۹٫۷	۱٫۸
Ta	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۶	۰٫۱
Zr	۲	۱۱	۴	۴	۸	۴	۷	۷	۲۴	۴۱	۷۱	۱۰
Pb	۵	۷۱	۷۴	۷۴	۷۰	۴۶	۱۰۹	۶۵	۱۲۴	۱۱۶	۱۵۲	۱۱۰
Ni	۵	۷۱	۱۰۲	۹۵	۷۸	۱۰۹	۹۲	۸۳	۷۹	۷۰	۴۲	۸۸
La	۰٫۵	۶٫۱	۱٫۷	۲٫۶	۴٫۴	۰٫۹	۴٫۹	۲٫۳	۱۲٫۵	۱۰٫۹	۱۴٫۶	۷٫۳
Ce	۰٫۵	۴۲٫۳	۱۶٫۵	۱۹٫۶	۳۲٫۵	۷٫۱	۴۹٫۸	۲۱٫۳	۹۴٫۳	۹۴٫۲	۹۹٫۶	۷۴٫۲
Pr	۰٫۰۳	۱٫۲۵	۰٫۳۳	۰٫۴۹	۰٫۸۷	۰٫۱۷	۱٫۶۱	۰٫۸۴	۲٫۴۷	۲٫۷۵	۲٫۷۸	۲٫۷۲
Nd	۰٫۱	۴٫۱	۱٫۳	۱٫۵	۲٫۸	۱٫۱	۷٫۳	۵٫۶	۱۰٫۷	۱۲٫۵	۱۱٫۸	۱۳٫۱
Sm	۰٫۰۳	۱٫۱۸	۰٫۲۴	۰٫۳۳	۰٫۷۶	۰٫۱۵	۲٫۵۴	۱٫۸۱	۱٫۸۶	۳٫۳۷	۱٫۹۸	۴٫۷۵
Eu	۰٫۰۳	۱٫۲۳	۰٫۶۲	۰٫۶۲	۰٫۷۴	۰٫۲۹	۳٫۰۲	۱٫۸۷	۱٫۶۲	۳٫۶۵	۱٫۸۵	۵٫۱۲
Gd	۰٫۰۵	۱٫۵۷	۰٫۴۵	۰٫۶۰	۱٫۰۹	۰٫۲۹	۴٫۸۱	۲٫۳۷	۱٫۱۴	۵٫۹۶	۲٫۹۰	۹٫۰۱
Tb	۰٫۰۱	۰٫۲۰	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۰۴	۰٫۷۳	۰٫۳۲	۰٫۲۹	۰٫۹۳	۰٫۴۷	۱٫۳۹
Dy	۰٫۰۵	۱٫۳۲	۰٫۴۷	۰٫۵۷	۰٫۹۵	۰٫۳۶	۴٫۲۰	۱٫۹۸	۱٫۵۶	۵٫۶۵	۳٫۴۵	۷٫۸۴
Ho	۰٫۰۱	۰٫۲۰	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۱۷	۰٫۰۷	۰٫۸۰	۰٫۳۱	۰٫۳۴	۱٫۰۲	۰٫۵۸	۱٫۴۶
Er	۰٫۰۳	۰٫۴۴	۰٫۲۴	۰٫۳۵	۰٫۳۹	۰٫۱۳	۱٫۵۱	۰٫۹۹	۰٫۹۰	۲٫۲۳	۱٫۷۹	۲٫۶۷
Tm	۰٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۱۶	۰٫۱۰	۰٫۱۴	۰٫۲۸	۰٫۲۴	۰٫۳۱
Yb	۰٫۰۳	۰٫۴۳	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۳۳	۰٫۱۵	۰٫۸۴	۰٫۵۷	۰٫۷۳	۱٫۳۹	۱٫۳۴	۱٫۴۵
Lu	۰٫۰۱	۰٫۱۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۲۴	۰٫۲۶	۰٫۲۲

جدول ۳ مقادیر REEs, LREEs, HREEs, LREEs/HREEs, Eu/Eu\*, Ce/Ce\* و La/Y در کانسنگ‌های فریتی برهان.

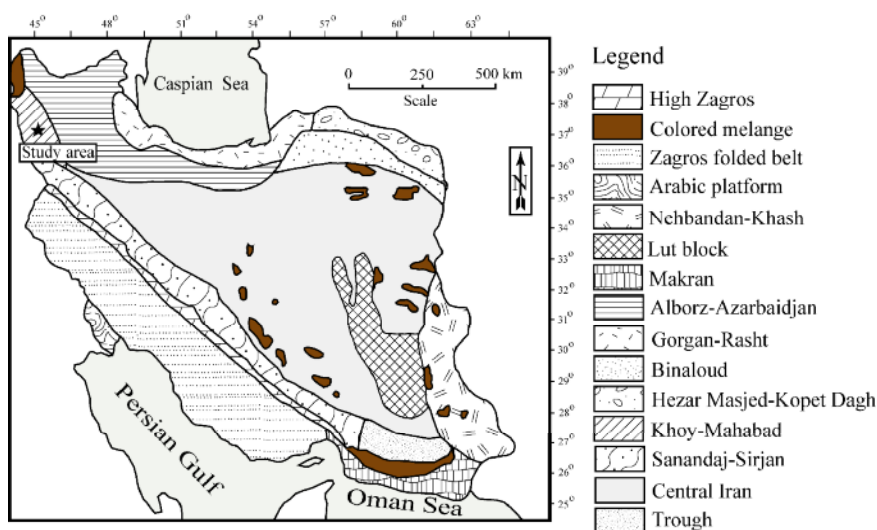
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11
REEs	۶۰٫۵۲	۲۲٫۲۴	۲۷٫۱۶	۴۵٫۲۵	۱۰٫۸۰	۸۲٫۳۴	۴۰٫۴۸	۱۲۸٫۶۷	۱۴۵٫۰۷	۱۴۳٫۶۴	۱۳۱٫۵۴
LREEs	۵۶٫۱۶	۲۰٫۶۹	۲۵٫۱۴	۴۲٫۰۷	۹٫۷۱	۶۹٫۱۷	۳۳٫۷۲	۱۲۳٫۴۵	۱۲۷٫۳۷	۱۳۲٫۶۱	۱۰۷٫۱۹
HREEs	۴٫۳۶	۱٫۵۵	۲٫۰۲	۳٫۱۸	۱٫۰۹	۱۳٫۱۷	۶٫۷۶	۵٫۲۲	۱۷٫۷۰	۱۱٫۰۳	۲۴٫۳۵
LREEs/HREEs	۱۲٫۸۸	۱۳٫۳۵	۱۲٫۴۵	۱۳٫۲۳	۸٫۹۱	۵٫۲۵	۴٫۹۹	۲۳٫۶۵	۷٫۲۰	۱۲٫۰۲	۴٫۴۰
Eu/Eu*	۲٫۶۹	۵٫۶۵	۴٫۱۵	۲٫۴۱	۴٫۱۳	۲٫۵۶	۲٫۶۸	۳٫۳۱	۲٫۴۲	۲٫۲۹	۲٫۳۲
Ce/Ce*	۳٫۶۳	۵٫۲۲	۴٫۱۴	۳٫۹۴	۴٫۳۳	۴٫۲۰	۳٫۶۳	۴٫۰۲	۴٫۰۸	۳٫۷۱	۳٫۹۵
La/Y	۳٫۸۱	۲٫۸۳	۳٫۷۱	۴٫۰۰	۱٫۵۰	۲٫۳۳	۱٫۰۰	۱۰٫۴۲	۲٫۸۷	۱٫۵۱	۴٫۰۶

## زمین‌شناسی

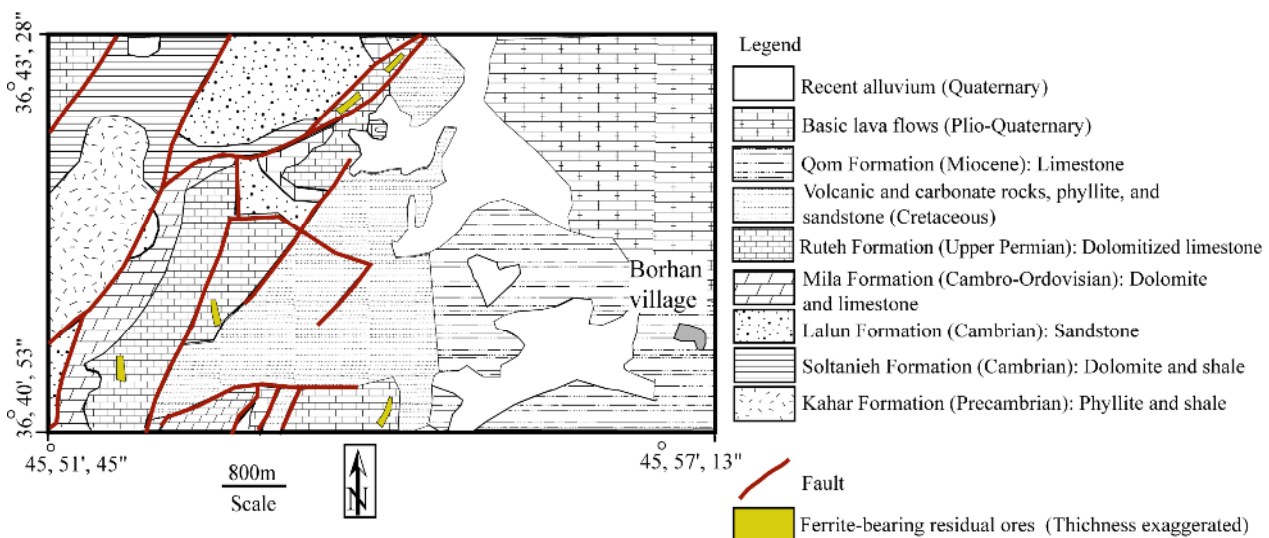
منطقه برهان براساس تقسیمات پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۹] بخشی از پهنه زمین‌ساختی خوی-مه‌آباد محسوب می‌شود (شکل ۱). واحدهای سنگی حاضر در این منطقه از شمال غرب ایران به ترتیب از قدیم به جدید شامل شیل‌ها و فیلیت‌های سازند کهر (پرکامبرین)، دولومیت‌ها و شیل‌های سازند سلطانیه (کامبرین)، ماسه‌سنگ‌های سازند لالون (کامبرین)، آهک‌های دولومیتی شده سازند روته (پریمین)، سنگ‌های آتشفشانی و کربناتی همراه با فیلیت‌ها و ماسه‌سنگ‌های کرتاسه، سنگ‌های آهکی سازند قم (میوسن)، گدازه‌های آتشفشانی قلیایی پلیوکواترنری، و رسوبات آبرفتی عهد حاضر هستند [۱۰] (شکل ۲).

نهشته‌های هوازده بازماندی حاضر در این منطقه دارای ۵ رخنمون مجزا هستند که به صورت لایه‌ها و عدسی‌های گسسته چینه‌سان در سنگ‌های آهکی دولومیتی شده خاکستری تیره سازند روته توسعه یافته‌اند. روند کلی لایه‌ها و عدسی‌های یاد شده NE-SW و NW-SE است. آنها در

مجموع طولی بالغ بر ۱٫۴ کیلومتر و ضخامتی متغیر از ۸ تا ۱۸ متر دارند و به طور عمده در گودی‌ها و فرورفتگی‌ها گسترش یافته‌اند. با توجه به مشاهدات صحرایی، کانسنگ‌های این ۵ لایه و عدسی بازماندی دارای رنگ‌های متنوع قرمز، قرمز قهوه‌ای، قرمز آجری، خاکستری، سبز، و کرم مایل به سبز هستند. کانسنگ‌های با رنگ سبز، کرم مایل به سبز، و خاکستری با ترکیب بوکسیت و رس بوکسیتی بیشتر در بخش‌های بالایی لایه‌ها و عدسی‌های هوازده قرار دارند. این در حالی است که کانسنگ‌های قرمز، قرمز قهوه‌ای، و قرمز آجری که بیشتر ترکیب فریتی دارند [۱۱]، بیشترین گسترش را در بخش‌های پایین عدسی‌ها و لایه‌های هوازده بازماندی نشان می‌دهند. کانسنگ‌های فریتی دارای چگالی و سختی بالا بوده و حالت توده‌ای دارند. لیمونیت‌زایی، وجود شکل‌های ماکروپیزوئیدی، اوئوئیدی، پیزوئیدی، و گرهکی در سطح و آثاری از دندریت‌های منگنز از مهمترین ویژگی‌های مزوسکوپیکی این کانسنگ‌ها محسوب می‌شوند.



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه پهنه‌های زمین‌ساختی ایران [۹].



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی [۱۰] که در آن موقعیت لایه‌های دربردارنده فریت در سنگ‌های کربناتی سازند روته نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

### کانه‌نگاری و بافت کانسنگ‌های فریتی

مربوط به انقباض ژل طی تشکیل و توسعه این کانسنگ‌ها قابل مشاهده می‌باشد [۱۳]. وجود بافت دانه مدور استدلال محکمی بر خاستگاه نابرجای کانسنگ‌هاست (شکل ۳ پ) [۱۳]. کشیدگی اجزای بافت‌ساز و وجود اووئیدهای پهن شده با هسته هماتیتهی مربوط به عملکرد فرایندهای زمین‌ساختی و تاثیر فشار طبقات روباره بر کانسنگ‌ها هستند (شکل ۳ ت). پوشش‌های ثانویه دور کانی هماتیت به احتمال قوی طی عملکرد فرایندهای دیرزاد انتهایی و یا برونزاد بر کانسنگ‌ها ایجاد شده‌اند (شکل ۳ ت) [۱۴]. افزون بر موارد یاد شده، وجود کلاست‌ها (قطعات تخریبی بیشتر از نوع کانی هماتیت) و پیروئیدهای شکسته نشان‌دهنده خاستگاه نابرجای کانسنگ‌های مورد بررسی است (شکل ۳ ج).

### کانی‌شناسی کانسنگ‌های فریتی

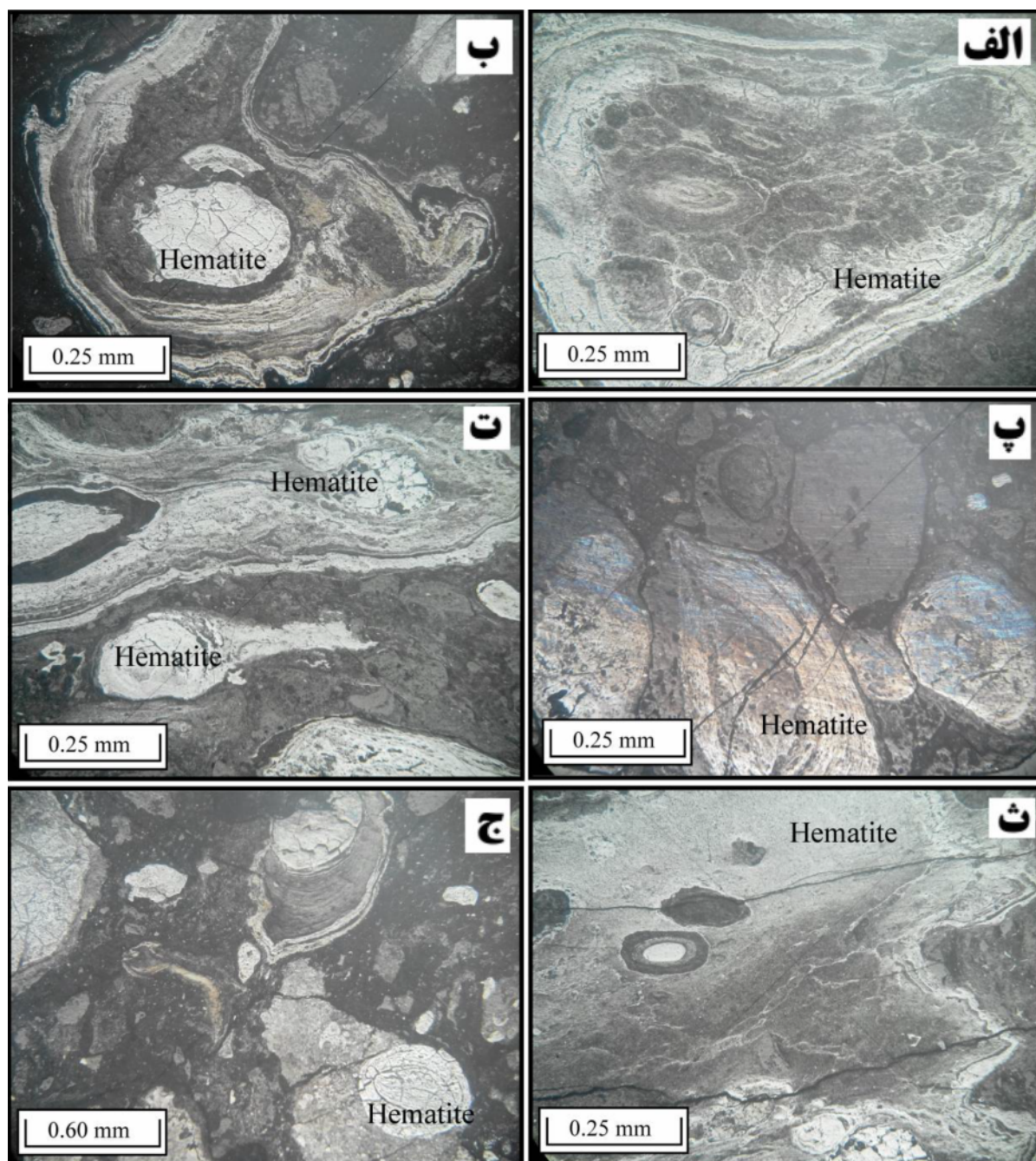
طیف‌های XRD نشان می‌دهند که هماتیت و گوتیت فازهای کانیایی اصلی و کائولینیت، ایلیت، بوهمیت، روتیل، کلسیت، پیرولوستیت و کراندالیت فازهای کانیایی فرعی کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی هستند (شکل ۴). براساس مقادیر نیمه کمی کانی‌ها، هماتیت (۸۰/۳-۶۳/۱ درصد) و گوتیت (۲۷/۶-۱۲/۵ درصد) در هر شش نمونه مورد بررسی وجود دارند (جدول ۱). کائولینیت تنها فاز کانیایی فرعی است که با فراوانی ۲/۶ تا ۷/۹ درصد در همه نمونه‌های فریتی مشخص شده است.

واحدهای بافت‌ساز در کانسنگ‌های فریتی شامل اجزای با اشکال هم‌مرکز شامل میکرواووئیدها (با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرون)، اووئیدها (با قطری بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرون)، پیروئیدها (با قطری بین ۱ تا ۵ میلیمتر) و ماکروپیروئیدها (با قطری بیش از ۵ میلیمتر)، لایه‌ها و پوشش‌های ثانویه، گرهک‌ها، سخت‌دانه‌ها، کلاست‌ها (قطعات آواری)، و شکاف‌های پر شده هستند (شکل‌های ۳ الف - ج). در مقاطع صیقلی هماتیت تنها کانی قابل تشخیص در هسته اووئیدها، پیروئیدها (شکل ۳ ب)، اسپاستوئیدها، و ماکروپیروئیدها است. برخی از واحدهای بافت‌ساز سخت‌دانه و هم‌مرکز در اثر فشارهای زمین‌ساختی پهن‌شدگی نشان داده (شکل ۳ ت) و شکل‌های بیضوی به خود گرفته‌اند. کانی هماتیت در کانسنگ‌های فریتی به پنج صورت گرهک، دانه‌ای، کروی، بیضوی، و رگچه‌ای دیده می‌شود. گرهک‌ها اندازه‌های متغیر از ۳ تا ۸ میلیمتر، کم و بیش شکل کروی تا بیضوی دارند و برخی جهت‌گیری‌های ضعیف را در متن کانسنگ‌ها نشان می‌دهند.

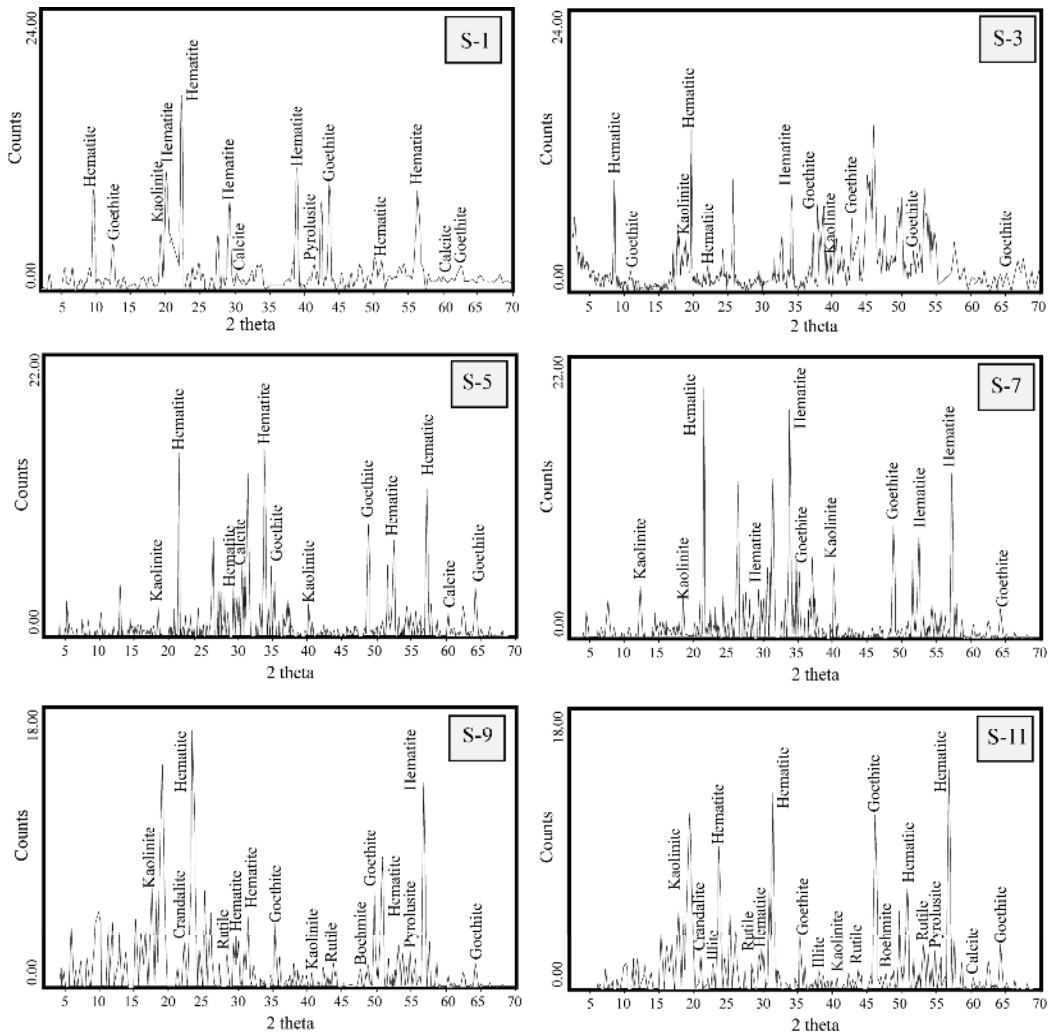
در هسته برخی پیروئیدها میکرواووئیدها و اووئیدهایی دیده می‌شود (شکل ۳ الف) که دلالت بر طبیعت چند چرخه‌ای محیط تشکیل کانسنگ‌های فریتی دارند [۱۲]. افزون بر این، شکستگی‌های نامنظم و یا شعاعی در هسته‌های هماتیتهی

در ارتباط باشد [۱۳]. ترسیم مقادیر کانی‌ها در نمودار سه متغیره کانی‌های رسی-کانی‌های آلومینیوم‌دار-کانی‌های آهن-دار [۱۵] نشان می‌دهد که فریت‌ها ترکیبی در حد کانسنگ آهن و کانسنگ آهن غنی از سیلیس دارند (شکل ۵).

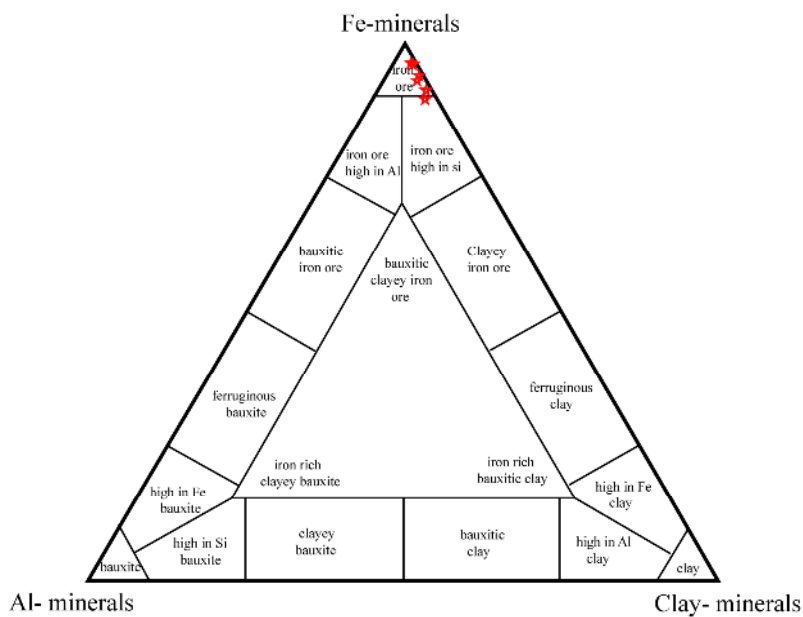
پیرولوسیت و کلسیت در سه نمونه، روتیل، کراندالیت و بوهمیت در دو نمونه، و ایلیت فقط در یک نمونه به عنوان کانی فرعی شناسایی شده‌اند (شکل ۴، جدول ۱). تشکیل بوهمیت و روتیل در کانسنگ‌ها می‌تواند با فرایندهای دیرزاد (فشار دفنی)



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانسنگ‌های فریتی منطقه برهان. (الف) وجود میکرواووئیدها و اووئیدها در هسته یک پیروئید که نشان دهنده طبیعت چند چرخه‌ای تشکیل کانسنگ‌هاست. (ب) شکل‌های سخت‌دانه‌ای با هسته هماتیته که در اثر انقباض ژل در آن شکستگی‌هایی به صورت نامنظم ایجاد شده است. (پ) بافت دانه مدور. (ت) کشیدگی و جهت یافتگی در شکل‌های سخت‌دانه‌ای. (ث) وجود اووئیدهای بیضوی شکل با هسته هماتیته. (ج) وجود کلاست‌ها و پیروئیدهای شکسته ناشی از حمل و جابه‌جایی. همه تصاویر در نور بازتابی و به صورت xpl تهیه شده‌اند.



شکل ۴ طیف‌های XRD کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی.



شکل ۵ موقعیت نمونه‌های مورد بررسی در نمودار سه متغیره کانی‌های رسی - کانی‌های آهن‌دار - کانی‌های آلومینیوم‌دار [۱۵].

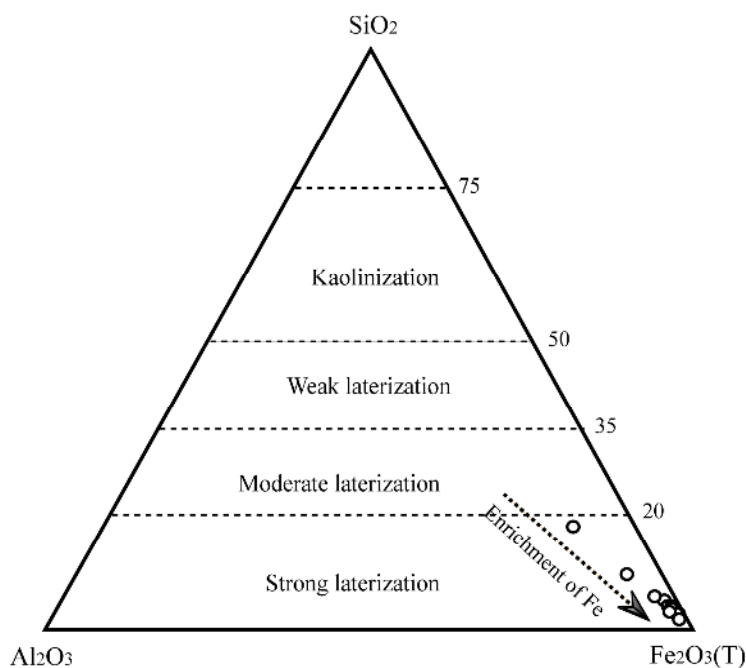
Ti ( $r = 0.83 - 0.99$ ) (جدول ۴) دلیل محکمی بر نقش کانی-های رسی، بوهمیت و روتیل در تثبیت عناصر جزئی یاد شده است. افزون بر این، همبستگی‌های مثبت قوی بین Cs, Ba و Rb با K ( $r = 0.71 - 0.96$ ) (جدول ۴) دلالت بر نقش کنترلی ایلیت در تمرکز این عناصر جزئی دارد. همبستگی مثبت قوی بین Ca-Sr ( $r = 0.92$ ) نشان می‌دهد که توزیع Sr در کانسنگ‌ها وابسته به کانی کلسیت است. همچنین، همبستگی-های مثبت قوی بین W و Sn با Ti ( $r = 0.93 - 0.96$ ) بیانگر نقش کلیدی کانی روتیل در تثبیت این دو عنصر جزئی در کانسنگ‌های فریتی است [۱۸]. در نهایت، همبستگی مثبت قوی بین Pb با Mn ( $r = 0.96$ ) نشان می‌دهد که پیرولوسیت در سطوح بین لایه‌ای خود Pb را تثبیت نموده است [۱۹]. با توجه به موارد یاد شده، به نظر می‌رسد که عناصر جزئی در کانسنگ‌های فریتی منطقه برهان در ارتباط با سازوکارهایی مانند روبش، جذب سطحی، جانشینی هم‌ریختی و شیمی محلول‌های کانسنگ‌ساز در سیستم تثبیت شده‌اند. همبستگی مثبت بین روند تغییرات Fe/Al با Ni ( $> 0.6$ ) و همبستگی منفی بین Fe/Al با U, Th, Ba, Hf, Nb, Cs, Rb, Zr و ( $< -0.6$ ) (شکل ۷) نشان می‌دهد که درجه جدایش Fe از Al مهمترین عامل در توزیع و جدایش بیشتر عناصر جزئی طی تکوین کانسنگ‌ها بوده است.

### زمین‌شیمی عناصر اصلی و فرعی و ارتباط بین شدت فرآیند لاتریت‌زایی با جدایش عناصر اصلی

نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر اصلی و فرعی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها،  $Fe_2O_3$  با گستره تغییرات ۶۰/۹۰ تا ۸۹/۹۳ درصد وزنی فراوان‌ترین اکسید تشکیل دهنده کانسنگ‌های فریتی برهان است.  $SiO_2$  (۱۴/۴۲-۱۴/۴۷ درصد وزنی) و  $Al_2O_3$  (۸/۱۲-۰/۲۷ درصد وزنی) از نظر فراوانی پس از آن قرار دارند. ترسیم داده‌های تجزیه‌ای در نمودار سه متغیره  $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$  [۱۶] (شکل ۶) نشان می‌دهد که کانسنگ‌های فریتی برهان طی تکوین خود دچار فرآیندهای لاتریت‌زایی قوی شده‌اند. این نمودار همچنین آشکار می‌کند که با پیشرفت فرآیند لاتریت‌زایی به موازات افزایش تمرکز Fe در کانسنگ‌ها از مقدار عناصر Si و Al کاسته می‌شود (شکل ۶).

### عوامل کنترل‌کننده توزیع عناصر جزئی در کانسنگ‌های فریتی

ضرایب همبستگی مثبت قوی بین Cr, Co, Ni با Fe ( $r = 0.87 - 0.92$ ) (جدول ۴) نشان می‌دهند که توزیع این عناصر جزئی در ارتباط با pH محیط نهشت بوده و روبش توسط هماتیت و گوتیت عامل اصلی تمرکز آنها در کانسنگ-های فریتی بوده است [۱۷]. وجود ضرایب همبستگی مثبت قوی بین U, Th, Hf, Nb, V, Ga, Y, Ta و Zr با Al, Si و

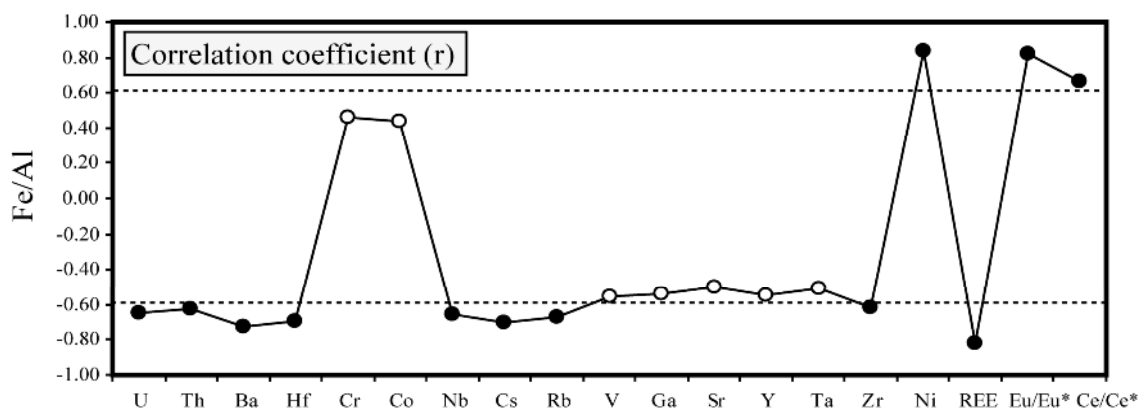


شکل ۶ موقعیت کانسنگ‌های فریتی برهان در نمودار سه متغیره  $Al_2O_3-SiO_2-Fe_2O_3$  [۱۶].



جدول ۴ ضرایب همبستگی پیرسون بین برخی از عناصر انتخابی در کانسنگ‌های فریتی برهان.

	Si	Al	Fe	Ca	Na	Mg	K	Ti	Mn	P
U	۰٫۹۳	۰٫۹۵	-۰٫۹۶	۰٫۱۳	۰٫۳۷	۰٫۹۲	۰٫۵۶	۰٫۹۱	۰٫۸۵	۰٫۴۹
Th	۰٫۹۹	۰٫۹۹	-۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۴۹	۰٫۹۸	۰٫۴۰	۰٫۹۵	۰٫۷۹	۰٫۲۹
Ba	۰٫۰۸	۰٫۱۶	-۰٫۲۵	۰٫۸۶	۰٫۳۶	۰٫۰۲	۰٫۷۱	۰٫۲۵	۰٫۶۳	۰٫۷۱
Hf	۰٫۹۸	۰٫۹۸	-۰٫۹۸	۰٫۰۱	۰٫۵۹	۰٫۹۴	۰٫۳۸	۰٫۹۸	۰٫۸۰	۰٫۱۴
Cr	-۰٫۹۱	-۰٫۹۲	۰٫۹۰	۰٫۰۸	-۰٫۲۱	-۰٫۹۲	-۰٫۴۲	-۰٫۸۵	-۰٫۷۳	-۰٫۴۴
Co	-۰٫۹۳	-۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۱۵	-۰٫۶۰	-۰٫۹۲	-۰٫۰۶	-۰٫۸۶	-۰٫۵۵	۰٫۱۳
Nb	۰٫۹۵	۰٫۹۷	-۰٫۹۷	-۰٫۰۲	۰٫۵۴	۰٫۸۹	۰٫۴۵	۰٫۹۹	۰٫۸۳	۰٫۱۶
Cs	۰٫۴۶	۰٫۵۳	-۰٫۵۹	۰٫۵۰	۰٫۳۱	۰٫۳۸	۰٫۹۲	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۶۵
Rb	۰٫۴۵	۰٫۵۲	-۰٫۵۷	۰٫۵۱	۰٫۲۷	۰٫۳۹	۰٫۹۶	۰٫۶۰	۰٫۷۵	۰٫۶۲
V	۰٫۹۸	۰٫۹۶	-۰٫۹۵	-۰٫۰۶	۰٫۵۷	۰٫۹۶	۰٫۲۴	۰٫۹۱	۰٫۶۶	۰٫۰۳
Ga	۰٫۹۳	۰٫۹۱	-۰٫۹۱	۰٫۱۲	۰٫۶۶	۰٫۹۴	۰٫۱۸	۰٫۸۵	۰٫۶۲	۰٫۱۱
Sn	۰٫۸۱	۰٫۸۳	-۰٫۸۳	-۰٫۱۶	۰٫۴۳	۰٫۷۲	۰٫۴۶	۰٫۹۳	۰٫۷۸	۰٫۰۴
Sr	-۰٫۲۶	-۰٫۱۹	۰٫۰۹	۰٫۹۲	۰٫۲۸	-۰٫۲۸	۰٫۴۸	-۰٫۱۱	۰٫۳۱	۰٫۶۰
W	۰٫۸۹	۰٫۹۱	-۰٫۹۱	-۰٫۱۲	۰٫۴۴	۰٫۸۳	۰٫۴۱	۰٫۹۶	۰٫۸۰	۰٫۱۵
Y	۰٫۹۳	۰٫۹۲	-۰٫۹۱	-۰٫۰۶	۰٫۳۱	۰٫۹۴	۰٫۳۹	۰٫۸۳	۰٫۶۵	۰٫۲۵
Ta	۰٫۹۸	۰٫۹۸	-۰٫۹۶	-۰٫۱۶	۰٫۳۷	۰٫۹۷	۰٫۳۶	۰٫۹۳	۰٫۷۱	۰٫۱۷
Zr	۰٫۹۹	۰٫۹۹	-۰٫۹۹	-۰٫۰۳	۰٫۴۶	۰٫۹۷	۰٫۴۱	۰٫۹۶	۰٫۸۰	۰٫۲۶
Pb	۰٫۷۶	۰٫۸۱	-۰٫۸۳	۰٫۱۹	۰٫۳۰	۰٫۷۵	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۹۶	۰٫۵۷
Ni	-۰٫۹۰	-۰٫۹۰	۰٫۹۲	-۰٫۲۵	-۰٫۶۹	-۰٫۸۶	-۰٫۳۹	-۰٫۸۷	-۰٫۷۹	-۰٫۲۱
REEs	۰٫۷۱	۰٫۷۷	-۰٫۸۲	۰٫۴۱	۰٫۴۰	۰٫۶۷	۰٫۷۶	۰٫۸۲	۰٫۹۷	۰٫۶۹



شکل ۷ ضرایب همبستگی بین عناصر جزئی و بی‌هنجاری‌های Eu و Ce برحسب نسبت Fe/Al در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی.

شیمی و الگوهای توزیع REEها در کانسنگ‌های فریتی  
مقدار عناصر خاکی نادر در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، مقدار REEها در کانسنگ‌ها دارای گستره تغییراتی از ۱۰٫۸۰ تا ۱۴۵٫۰۷ ppm است (جدول ۳). گستره تغییرات برای  $La-Gd$  LREEها وسیع

شیمی و الگوهای توزیع REEها در کانسنگ‌های فریتی  
مقدار عناصر خاکی نادر در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، مقدار REEها در کانسنگ‌ها دارای گستره تغییراتی از ۱۰٫۸۰ تا ۱۴۵٫۰۷ ppm است (جدول ۳). گستره تغییرات برای  $La-Gd$  LREEها وسیع

شیمی و الگوهای توزیع REEها در کانسنگ‌های فریتی  
مقدار عناصر خاکی نادر در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، مقدار REEها در کانسنگ‌ها دارای گستره تغییراتی از ۱۰٫۸۰ تا ۱۴۵٫۰۷ ppm است (جدول ۳). گستره تغییرات برای  $La-Gd$  LREEها وسیع

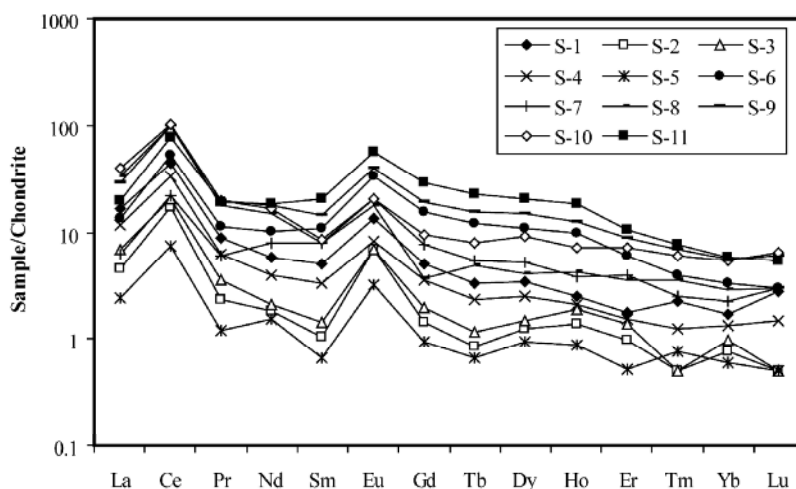
شیمی و الگوهای توزیع REEها در کانسنگ‌های فریتی  
مقدار عناصر خاکی نادر در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، مقدار REEها در کانسنگ‌ها دارای گستره تغییراتی از ۱۰٫۸۰ تا ۱۴۵٫۰۷ ppm است (جدول ۳). گستره تغییرات برای  $La-Gd$  LREEها وسیع

HREEها آشکار می کند که این عناصر در مقایسه با LREE توسط فازهای کانیایی مشابهی در کانسنگها تثبیت شده اند. الگوی توزیع REEهای بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت [۲۰] برای کانسنگهای فریتی (شکل ۸) نشان از غنی شدگی نسبتاً ضعیف  $LREE_{La-Gd}$ ها نسبت به  $HREE_{Tb-Lu}$ ها دارد. این جدایش با رخداد بی هنجاری های مثبت Eu و Ce همراه بوده است (شکل ۸). این نوع الگوها در کانسنگهای هوازده بازماندی مشاهده می شود که همراه با تغییرات در پتانسیل اکسایش محیط، pH محیط نیز در تغییر است [۸]. با توجه به وجود گرھکهای آهن دار در نمونه ها چنین به نظر می رسد که توسعه کانسنگهای فریتی برهان مربوط به نوسان ها و بالا آمدن سطح سفره آبهای زیرزمینی بوده است. بررسی های انجام شده نشان داده است که نوسان-

های سطح سفره آبهای زیرزمینی می توانند موجب شکل گیری و توسعه گرھکهای آهن دار در کانسارهای هوازده بازماندی شوند [۱۵]. با توجه به مطالب یاد شده می توان چنین نتیجه گرفت که توسعه و تکامل کانسنگهای فریتی وابسته به شیمی آبهای زیر زمینی است. به عبارت دیگر، انحلال بخشی سنگهای بستر کربناتی توسط آبهای زیرزمینی سبب افزایش pH این آبها شده و شرایط لازم برای ترسیب آهن و تشکیل کانسنگهای فریتی مهیا شده است. وجود اختلاف در میزان انحلال سنگهای بستر کربناتی توسط آبهای زیرزمینی و نوسان pH محیط از روی گستره تغییرات LREEs/HREEs که این نسبت با افزایش pH محیط روند صعودی به خود می گیرد [۲۱].

جدول ۵ ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر خاکی نادر در کانسنگهای فریتی برهان.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	۱,۰۰													
Ce	۰,۹۸	۱,۰۰												
Pr	۰,۹۲	۰,۹۸	۱,۰۰											
Nd	۰,۸۶	۰,۹۴	۰,۹۸	۱,۰۰										
Sm	۰,۵۹	۰,۷۴	۰,۸۵	۰,۹۰	۱,۰۰									
Eu	۰,۴۸	۰,۶۵	۰,۷۸	۰,۸۴	۰,۹۸	۱,۰۰								
Gd	۰,۴۲	۰,۵۹	۰,۷۳	۰,۷۹	۰,۹۶	۰,۹۹	۱,۰۰							
Tb	۰,۵۱	۰,۶۷	۰,۷۹	۰,۸۴	۰,۹۸	۰,۹۹	۰,۹۹	۱,۰۰						
Dy	۰,۵۴	۰,۶۹	۰,۸۱	۰,۸۶	۰,۹۸	۰,۹۸	۰,۹۹	۰,۹۹	۱,۰۰					
Ho	۰,۵۳	۰,۶۹	۰,۸۱	۰,۸۵	۰,۹۸	۰,۹۸	۰,۹۸	۰,۹۹	۰,۹۹	۱,۰۰				
Er	۰,۶۶	۰,۷۹	۰,۸۸	۰,۹۳	۰,۹۷	۰,۹۵	۰,۹۴	۰,۹۶	۰,۹۸	۰,۹۷	۱,۰۰			
Tm	۰,۷۷	۰,۸۷	۰,۹۴	۰,۹۶	۰,۹۵	۰,۹۱	۰,۸۹	۰,۹۳	۰,۹۵	۰,۹۴	۰,۹۸	۱,۰۰		
Yb	۰,۸۰	۰,۸۸	۰,۹۵	۰,۹۷	۰,۹۲	۰,۸۸	۰,۸۶	۰,۹۰	۰,۹۲	۰,۹۱	۰,۹۸	۰,۹۹	۱,۰۰	
Lu	۰,۸۳	۰,۸۸	۰,۹۳	۰,۹۴	۰,۸۴	۰,۷۹	۰,۷۷	۰,۸۰	۰,۸۴	۰,۸۱	۰,۹۱	۰,۹۵	۰,۹۷	۱,۰۰



شکل ۸ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر بهنجار شده نسبت به کندریت [۲۰] برای کانسنگهای فریتی برهان.

Gd به کندریت [۲۰] را نشان می‌دهد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که مقادیر  $Ce/Ce^*$  و  $Eu/Eu^*$  در کانسنگ‌های فریتی به ترتیب دارای گستره تغییرات ۳/۶۳-۵/۲۲ و ۲/۲۹-۵/۶۵ است. رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت قوی Ce در کانسنگ‌ها نشان‌دهنده شرایط به شدت اکسیدان محیط تشکیل و تبدیل  $Ce^{3+}$  به  $Ce^{4+}$  بواسطه افزایش اکسایش است [۲۲]. رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت قوی Eu اشاره به شرایط قلیایی محیط تشکیل کانسنگ‌ها دارد. به نظر می‌رسد که شرایط قلیایی طی توسعه و تکامل کانسنگ‌های فریتی بواسطه افزایش pH آب‌های زهکشی توسط سنگ‌های بستر کربناتی رخ داده باشد [۲۳]. افزون بر این، وجود شرایط قلیایی طی توسعه کانسنگ‌های فریتی با توجه به نسبت  $La/Y$  قابل توضیح است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نسبت یاد شده در محیط‌های کانسنگ‌ساز اسیدی و قلیایی به ترتیب کمتر و بیشتر از ۱ است [۲۴]. مقادیر این نسبت در فریت‌ها در گستره‌ای از ۱/۰۰ تا ۱۰/۴۲ متغیر است. این گستره تغییرات بزرگتر از ۱ به نوعی نشان‌دهنده بافر شدن محلول‌های مسؤل هوازگی توسط سنگ‌های بستر کربناتی را طی توسعه کانسنگ‌هاست. ترسیم نمودار دو متغیره  $Eu/Eu^*-Ce/Ce^*$  (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که همبستگی مثبت بسیار خوبی بین دو بی‌هنجاری وجود دارد ( $r = 0.84$ ). این همبستگی مثبت آشکار می‌کند که شرایط اکسیدان-قلیایی همزمان سبب غنی-شدگی Fe در محیط و تشکیل کانسنگ‌های فریتی شده‌اند. افزون بر موارد یاد شده، با توجه به همبستگی‌های مثبت متوسط بین روند تغییرات  $Fe/Al$  با  $Eu/Eu^*$  ( $r = 0.80$ ) و  $Ce/Ce^*$  ( $r = 0.62$ ) (شکل ۷) می‌توان گفت که افزون بر شرایط محیطی یاد شده، درجه جدایش Fe از Al از دیگر عوامل کنترل‌کننده تغییرات بی‌هنجاری Eu و Ce در کانسنگ‌های مورد بررسی بوده است.

### کنترل کانی روی توزیع REEها در کانسنگ‌های فریتی

ضرایب همبستگی بین REEها با عناصر اصلی و فرعی اطلاعات نسبتاً جامعی در مورد نقش کانی‌ها در توزیع و تمرکز لانتانیدها در کانسنگ‌های فریتی فراهم می‌کنند (جدول ۴). همبستگی منفی قوی بین Fe با REEها ( $r = -0.82$ ) نشان می‌دهد که هماتیت و گوتیت با وجود اینکه بدنه اصلی کانسنگ‌ها را تشکیل داده‌اند، نقشی در تمرکز لانتانیدها نداشته‌اند. وجود همبستگی‌های مثبت و متوسط بین Si با REEها ( $r = 0.71$ )، Al با REEها ( $r = 0.77$ ) و K با REEها ( $r = 0.76$ ) نشان می‌دهد که فازهای رسی حاضر در کانسنگ‌ها از میزبانان اصلی لانتانیدها هستند. افزون بر موارد یاد شده، ضرایب همبستگی مثبت بین MnO با REEها ( $r = 0.97$ ) (شکل ۹ الف) و  $P_2O_5$  با REEها ( $r = 0.69$ ) (شکل ۹ ب) پیشنهاد می‌کنند که پیرولوسیت و کراندالیت نیز نقش موثری در توزیع و تمرکز لانتانیدها در کانسنگ‌های مورد بررسی ایفا دانسته‌اند. به این ترتیب نتیجه می‌شود که طیف گسترده‌ای از فازهایی کانیایی فرعی میزبان لانتانیدها در کانسنگ‌ها بوده و عملکرد فرایندهای جذب سطحی توسط کانی‌های رسی با توجه به حضور آنها به عنوان کانی فرعی در همه نمونه‌ها به مراتب سازوکار موثرتر و قوی‌تری نسبت به فرایندهای روبش و تمرکز توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) در تثبیت REEها در کانسنگ‌های فریتی مورد بررسی بوده است.

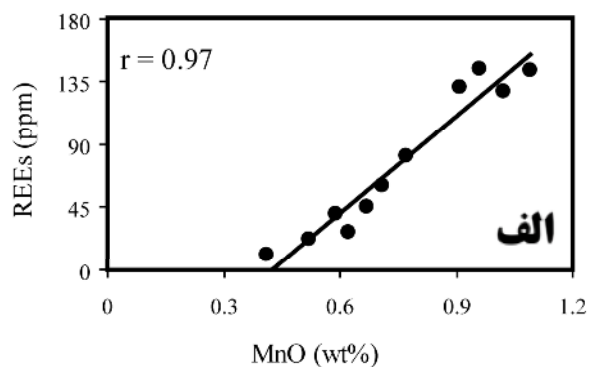
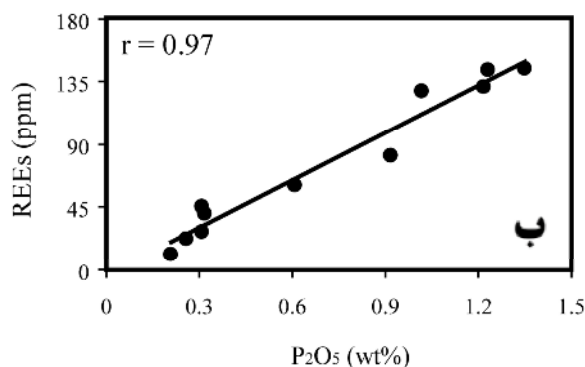
### رخداد بی‌هنجاری‌های Eu و Ce در کانسنگ‌های فریتی

در این پژوهش، برای محاسبه مقدار بی‌هنجاری‌های Eu و Ce در کانسنگ‌های فریتی به ترتیب از روابط زیر استفاده شد [۲۰]:

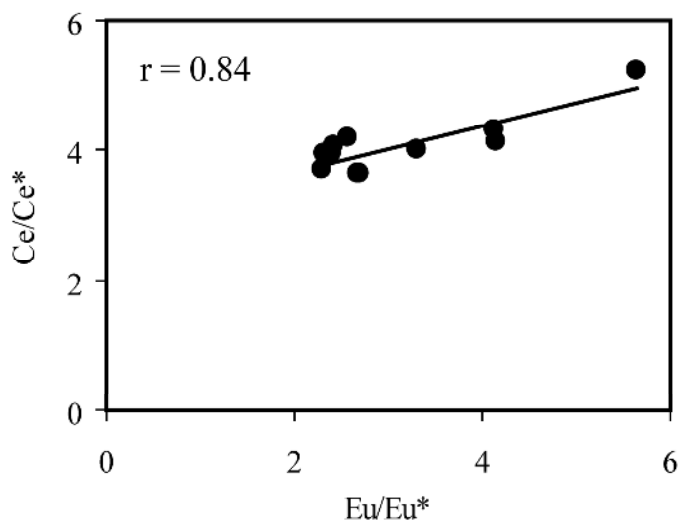
$$Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N),$$

$$Eu/Eu^* = Eu_N / [(Sm_N \times Gd_N)]^{1/2}$$

در این رابطه‌ها، N بهنجار شدن مقادیر عناصر La, Pr, Sm و



شکل ۹ نمودارهای دو متغیره MnO-REEs (الف) و P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-REEs (ب) برای کانسنگ‌های فریتی برهان.



شکل ۱۰ نمودار دو متغیره  $Eu/Eu^*-Ce/Ce^*$  برای کانسنگ‌های فریتی برهان.

#### برداشت

مهمترین نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین-شیمیایی عناصر جزئی و خاکی نادر کانسنگ‌های فریتی منطقه برهان (جنوب شرق مهاباد، شمال غرب ایران) عبارتند از:

۱- بررسی‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده خاستگاه نابرجا و طبیعت چند چرخه‌ای کانسنگ‌ها و نقش موثر فرآیندهای دیرزاد و برونزاد در توسعه الگوهای بافتی آنهاست.

۲- هماتیت و گوتیت فازهای کانیاپی اصلی کانسنگ‌های فریتی هستند که بوسیله کانی‌هایی چون کائولینیت، ایلیت، بوهمیت، روتیل، کلسیت، پیرولوسیت و کراندالیت در مقادیر کمتر همراهی می‌شوند.

۳- هماتیت و گوتیت با وجود اینکه فازهای کانیاپی اصلی کانسنگ‌ها هستند ولی فقط در توزیع عناصر جزئی  $Co$ ،  $Cr$  و  $Ni$  نقش داشته‌اند. توزیع سایر عناصر جزئی در کانسنگ‌ها با سازوکارهایی مثل روبش، جذب سطحی، جانشینی هم‌ریختی توسط فازهای کانیاپی فرعی، و شیمی محلول‌های کانسنگ‌ساز انجام شده است.

۴- کانی‌های رسی، بوهمیت، پیرولوسیت، روتیل و کراندالیت میزبانان اصلی لاتناید‌ها در کانسنگ‌ها هستند که در این میان

نقش کانی‌های رسی، چشمگیرتر است.

۵- شیمی، الگوی توزیع REE‌ها و نسبت‌های لاتناید‌ها نشان‌دهنده نقش موثر شیمی آب‌های زیرزمینی در توسعه کانسنگ‌های فریتی هستند.

۶- نقش فرایندهای جذب سطحی توسط کانی‌های رسی نسبت به روبش توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در تثبیت REE‌ها در کانسنگ‌ها مهم‌تر بوده است.

۷- تغییرات بی‌هنجاری‌های  $Eu$  و  $Ce$  در کانسنگ‌ها در ارتباط با درجه جدایش  $Fe$  از  $Al$  است.

۸- رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت  $Eu$  و  $Ce$  به ترتیب دلیلی بر افزایش پتانسیل اکسایش محیط تشکیل و افزایش  $pH$  آب‌های زهکشی توسط سنگ‌های بستر کربناتی در طی توسعه و تشکیل کانسنگ‌های فریتی هستند.

#### قدردانی

نگارندگان این مقاله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند، لذا بدینوسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین مربوطه اعلام می‌دارند. نگارندگان، همچنین از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

## مراجع

- [۱۰] افتخارنژاد ج.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ مهاباد"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۵).
- [۱۱] عابدینی ع.، "بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز نهشته‌های بوکسیتی-لاتریتی پرمین تا تریاس در شمال‌غرب ایران"، رساله دکتری گروه زمین‌شناسی دانشگاه تبریز (۱۳۸۷)، ص ۱-۱۸۴.
- [12] Mutakyahwa M. K. D., Ikingura J. R., Mruma A. H., "Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto district, Usambara Mountains, Tanzania", *Journal of African Earth Sciences* 36 (2003) 357-369.
- [13] Bardossy G. Y., "Karst Bauxites", Elsevier Scientific, Amsterdam (1982) 1-441.
- [14] Bardossy G. Y., Aleva G. Y. Y., "Lateritic bauxites", Akademia, Kiado Budapest (1990) 1-646.
- [15] Valetton I., "Bauxites", Elsevier Scientific, Amsterdam (1972) 1-226.
- [16] Schellmann W., "On the geochemistry of laterite", *Chemie der Erde* 45 (1986) 139-158.
- [17] Schwertmann U., Pfab G., "Structural V and Cr in lateritic iron oxides: Genetic implications", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60 (1996) 4279-4283.
- [18] Meinhold G., "Rutile and its applications in earth science", *Earth Science Reviews* 102 (2010) 1-28.
- [19] Ndjigui P. D., Bilong P., Bitom D., Dia A., "Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon", *Journal of African Earth Sciences* 50 (2008) 305-328.
- [20] Taylor Y., McLennan S. M., "The continental crust: Its composition and evolution", 1st ed. Oxford, UK: Blackwell.
- [21] Patino L. C., Velbel M. A., Price J. R., Wade, J. A., "Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and
- [1] Aleva G. J. J., "Laterites: Concepts, geology, morphology and chemistry", ISIRC, Wageningen (1994) 1-165.
- [2] Abedini A., Calagari A. A., "REE geochemical characteristics of titanium-rich bauxites: the Permian Kanigorgeh horizon, NW Iran", *Turkish Journal of Earth Sciences* 23 (2014) 513-532.
- [3] Abedini A., Calagari A. A., "Mobilization and redistribution of major and trace elements in a lateritic profile: the Sheikh-Marut deposit, NW Iran", *Arabian Journal of Geosciences* 8 (2015) 10871-10882.
- [4] Abedini A., Calagari A. A., "Geochemical characteristics of bauxites: the Permian Shahindezh horizon, NW Iran", *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 270 (2013) 301-324.
- [5] Abedini A., Calagari A. A., "Petrography, and mineralogical and geochemical control on distribution of major, minor, and trace elements in bauxitic-lateritic deposit of the NE Malekan, East-Azarbaidjan province, NW Iran", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 20 (2013) 89-100.
- [6] Abedini A., Calagari A. A., "The mineralogy and geochemistry of Permian lateritic ores in east of Shahindezh, West-Azarbaidjan province", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 20 (2012) 59-72.
- [7] Abedini A., Calagari A. A., "Geochemical characteristics of Kanigorgeh ferruginous bauxite horizon, West-Azarbaidjan province, NW Iran", *Periodico di Mineralogia* 82 (2013) 1-23.
- [8] Abedini A., Calagari A. A., "Rare earth elements geochemistry of Sheikh-Marut laterite deposit, NW Mahabad, West-Azarbaidjan province, Iran", *Acta Geologica Sinica-English Edition* 87 (2013) 176-185.
- [۹] نبوی م.ح.، "دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۵۵) ص ۱-۱۰۹.

- [23] Braun J. J., Viers J., Dupre M., Ndam J., Muller J. J., "Solid/ liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: The implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62 (1998) 273-299.
- [24] Crinci J., Jurkovic I., "Rare earth elements in Triassic bauxites of Croatia, Yugoslavia", *Travaux* 19 (1990) 239-248.

*Guatemala*", *Chemical Geology* 202 (2003) 343-364.

- [22] Ma J., Wei G., Xu Y., Long W., Sun W., "Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (2007) 3223-3237.