

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی آنومالی فرومگنز فرزنه، شرق مجموعه معدنی سنگان خواف

نازی مظهري¹، آزاده ملکزاده شفارودی^{1*} و مجید قادری²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(2) گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: 1393/10/6، پذیرش: 1394/2/23

چکیده

محدوده اکتشافی فرزنه از آنومالی‌های انتهاالیه شرقی مجموعه معدنی سنگان خواف است، که در جنوب‌شرق مشهد قرار دارد. زمین‌شناسی این منطقه شامل شیل، ماسه‌سنگ و واحدهای کربناته به سن ژوراسیک و توده‌های نفوذی ترشیری با ترکیب گرانیتی است. ورود سیالات گرمایی موجب تبلور دوباره سنگهای کربناتی و دگرسانی پروپیلیتیک در آنها و کانه‌زایی آهن و منگنز به شکل توده‌ای، استراتاباند و به‌صورت دیرزاد شده است که رخداد کانی‌سازی از الگوی تکتونیک منطقه پیروی می‌کند. کانی‌سازی در منطقه اکتشافی فرزنه محدود به اکسیدهای آهن و منگنز شامل گوتیت، همتیت، پیرولوسیت، پسیلوملان و به میزان کمتر کریپتوملان است. انجام آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) نیز کانی‌زایی فرومگنز و رخداد اکسیدهای آهن و منگنز را تأیید می‌کند. نتایج آنالیزهای ژئوشیمی (XRF و ICP-MS) نشان می‌دهد که تغییرات آهن از 43/5 تا 68 درصد، منگنز از 1/9 تا 4/8 درصد، مس از 20 تا 1063 گرم در تن و دامنه تغییرات برای آرسنیک از 20 تا 1269 پی‌پی‌ام است. نسبت Fe/Mn در نمونه‌های این منطقه از 15 تا 25 و نسبت LREE/HREE از 2/58 تا 13/78 در تغییر می‌باشد. غنی‌شدگی ملایمی از LREE و آنومالی مثبت Eu در داده‌های ژئوشیمی مشاهده می‌شود. براساس مقادیر اکسیدهای اصلی Fe، Mn، Si و همچنین عناصر فرعی Cu، Ni، Co، Zn، Pb، Mo، V، As کانی‌سازی محدوده اکتشافی فرزنه دارای منشأ گرمایی است. مدل کانی‌سازی و رخداد آنومالی فرومگنز فرزنه، هیچ ارتباط و شباهتی با کانی‌زایی اسکارن آهن در بخش اصلی مجموعه معادن سنگان ندارد و این آنومالی مرتبط با فعالیت سیالات گرمایی (کانی‌سازی سولفیدی شسته شده) که احتمالاً جوانتر از کانی‌سازی اسکارن در منطقه هستند و از طریق زون گسلی به اعماق کمتر و سطح زمین راه پیدا کرده‌اند، می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی، فرومگنز، فرزنه، آنومالی‌های شرقی، معدن سنگان، کمر بند خواف - کاشمر - بردسکن.

مقدمه

محدوده اکتشافی فرزنه، از آنومالی‌های شرقی مجموعه معادن سنگ‌آهن سنگان است. مجموعه معادن سنگ‌آهن سنگان خواف در 300 کیلومتری جنوب‌شرقی مشهد و 40 کیلومتری جنوب‌شرقی خواف در استان خراسان رضوی واقع می‌باشد. این مجموعه معادن مهم و ارزشمند اسکارن آهن، با ذخیره بیش از هزار میلیون تن و عیار آهن 54 درصد، یکی از بزرگ‌ترین معادن آهن غرب آسیا به‌شمار می‌رود

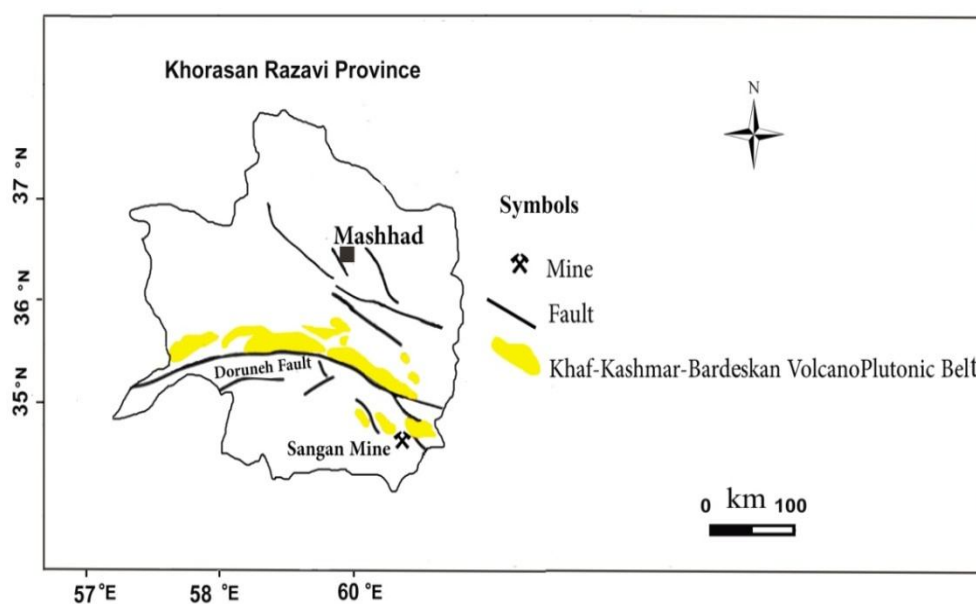
(Golmohammadi et al., 2015). کریم‌پور و همکاران (Karimpour, 2004; Karimpour et al., 2006)، مجموعه معادن سنگ‌آهن سنگان خواف را جزئی از کمر بند ولکانیکی - پلوتونیک خواف - کاشمر - بردسکن معرفی کرده‌اند (شکل 1). این کمر بند خاستگاه کانی‌سازی تیپ اکسید آهن در ایران شناخته شده است و از جمله کانسارهای اکسید آهن موجود در این ناحیه می‌توان به طلا - اسپکیولاریت کوه‌زر، تنورچه و معدن سنگان خواف اشاره کرد (Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2006).

جنوب غربی روستای فرزنه بین طولهای جغرافیایی $34^{\circ} 27' 34''$ - $60^{\circ} 36' 6''$ و عرضهای جغرافیایی $34^{\circ} 29' 46''$ - $34^{\circ} 30' 47''$ واقع شده است. در این منطقه تنها آثاری از چند ترانسه قدیمی مشاهده می‌شود. هدف این پژوهش، تهیه نقشه زمین‌شناسی به منظور تفکیک و شناسایی توده‌های نفوذی و بررسی ارتباط آنها با کانی‌سازی، بررسی نوع کانی‌سازی، کانی‌شناسی ماده معدنی و ژئوشیمی آن و در نهایت تعیین ارتباط آن با دیگر کانسارها در بخش اصلی مجموعه معادن سنگان می‌باشد.

روش مطالعه

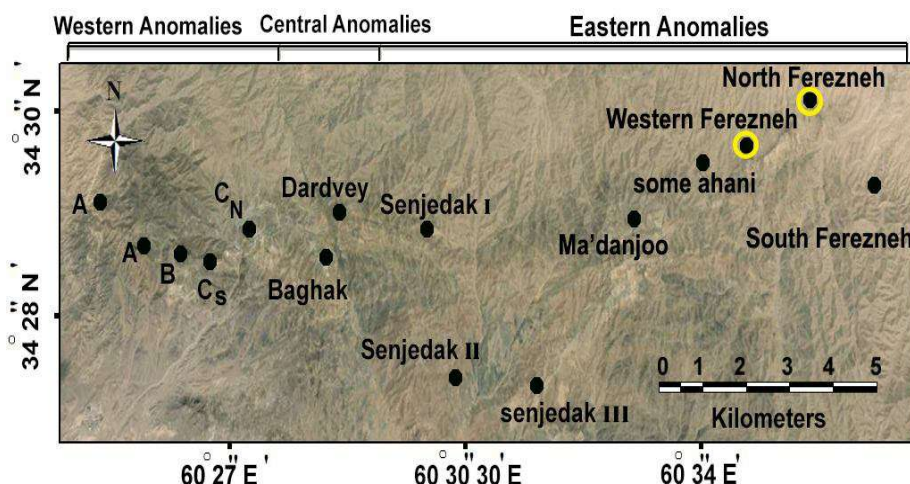
به منظور دستیابی به اهداف مطالعه، عملیات نمونه‌برداری از بخشهای مختلف شامل توده‌های نفوذی، سنگ آهک (میزبان کانی‌زایی) و کانی‌سازی آهن و منگنز انجام و در مجموع 300 نمونه در منطقه‌ای به وسعت $9/5$ کیلومتر مربع برداشت شد. 140 مقطع نازک از توده نفوذی، سنگهای آهکی مرمری و دولومیتی و 40 مقطع بلوک صیقلی از کانه‌ها جهت مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناختی و کانی‌سازی تهیه گردید که مطالعات آن در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

مجموعه کانسارهای معدن سنگ‌آهن سنگان در محدوده‌ای مستطیل شکل به طول 26 کیلومتر و عرض 8 کیلومتر از غرب به شرق بین طولهای جغرافیایی $60^{\circ} 24' - 60^{\circ} 45'$ و عرضهای جغرافیایی $34^{\circ} 26' - 34^{\circ} 33'$ قرار دارد (شکل 2). این مجموعه به سه ناحیه شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده است و هر ناحیه خود شامل چند کانسار می‌شود. در ناحیه غربی 5 کانسار A, A', B, C شمالی و C جنوبی، در ناحیه مرکزی، دو کانسار مهم به نامهای دردوی و باغک و در بخش شرقی نیز 6 آنومالی رخنمون‌دار سنجدک 1، سنجدک 2، سنجدک 3، معدن جو، سم آهنی و فرزنه (فرزنه شمالی، غربی و جنوبی) به چشم می‌خورد. ناحیه مرکزی و غربی معدن هم اکنون فعال بوده و مطالعات گسترده‌ای در بخش کانی‌شناسی اسکارن، ژئوشیمی کانی‌سازی مگنتیت و اسکارن، ژئوشیمی سنگ منشأ و پترولوژی و سن‌سنجی توده‌های نفوذی صورت گرفته است اما آنومالی‌های بخش شرقی، مراحل اکتشاف مقدماتی را می‌گذرانند و اطلاعات بسیار اندکی از زمین‌شناسی و کانه‌زایی آنها موجود است. در این پژوهش محدوده اکتشافی فرزنه (شمالی و غربی) که از آنومالی‌های شرقی مجموعه معادن سنگ‌آهن سنگان است، مورد بحث قرار گرفته است. آنومالی فرزنه در 35 کیلومتری جنوب شهرستان تایباد و در 10 کیلومتری جنوب شرقی کرات و $1/5$ کیلومتری



شکل 1. کمربند ولکانیکی - پلوتونیک خواف - کاشمر - بردسکن، گسل درونه و موقعیت معدن سنگان.

Fig. 1. Khaf-Kashmar-Bardaskan volcano-plutonic belt, Dorouneh fault and location of Sangan mine.



شکل 2. موقعیت کانسارهای سه‌گانه مجموعه معادن سنگان (غربی، مرکزی و شرقی) که محدوده مطالعاتی فرزنه در آن مشخص شده است.

Fig. 2. Location of the three deposits of Sangan mines complex (western, central and eastern) and Ferezneh study area.

به‌طرف شرق به‌صورت آهک بلورین یافت می‌شوند. سن این سنگها به ژوراسیک فوقانی و کرتاسه زیرین نسبت داده می‌شود و کانی‌سازی در آنها به‌صورت انواع اسکارن رخ داده است. فعالیت‌های آتشفشانی در این منطقه مربوط به کرتاسه تا اوایل ائوسن هستند (Karimpour, 1991). مجموعه سنگهای ولکانیکی در منطقه شامل داسیت، ریوداسیت، تراکیت، پیروکلاست‌های آندزیتی و سنگهای ولکانوکلاستیک می‌باشد. در قسمت شمالی معدن، گرانیت سرنوسر با سن ائوسن پسین - الیگوسن پیشین نفوذ کرده است. رخنمونهای کوچکی از سنگ منشأ کانی‌سازی به‌صورت دایک و سیل در بخش غربی در مجاورت اسکارن حرارت بالای گارنت‌دار شناسایی شد. این توده حدواسط، نیمه‌عمیق و از نوع سینیت پورفیری است (Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2008). توده‌های نیمه‌ژرف دیگری نیز به‌صورت دایک و سیل در منطقه نفوذ کرده و در برخی قسمت‌ها کانسنگ مگنتیتی را قطع کرده‌اند. منطقه مورد نظر در این مطالعه آنومالی فرزنه است که در منتهالیه شرقی مجموعه معادن سنگان، در مجاورت روستای فرزنه از توابع تایباد قرار دارد. شیل‌ها و ماسه‌سنگهای رسوبی قدیمی‌ترین سازندهای موجود در این منطقه هستند که به ژوراسیک نسبت داده شده‌اند (شکل 3). واحدهای کربناته شامل سنگهای آهکی و در بعضی مناطق و به‌صورت خیلی محدود دولومیتی تیره‌رنگ هستند که ورود سیالات گرمایی سبب دگرگونی خفیف و تبلور دوباره سنگهای کربناتی، تبدیل آنها به مرمر و دولومیت، دگرسانی پروپیلیتیک

پس از مطالعه مقاطع بلوک صیقلی، 4 نمونه به‌منظور شناسایی دقیق و حصول اطمینان از مطالعات کانی‌شناختی انتخاب و در آزمایشگاه کانساران بینالود تهران، مورد تجزیه پراش اشعه ایکس قرار گرفت. همچنین به‌منظور مطالعه ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی کانه‌ها نیز، 10 نمونه برای آنالیزهای XRF به آزمایشگاه آمیتیس شرق و آنالیز ICP-MS به آزمایشگاه S.G.S کانادا ارسال شد.

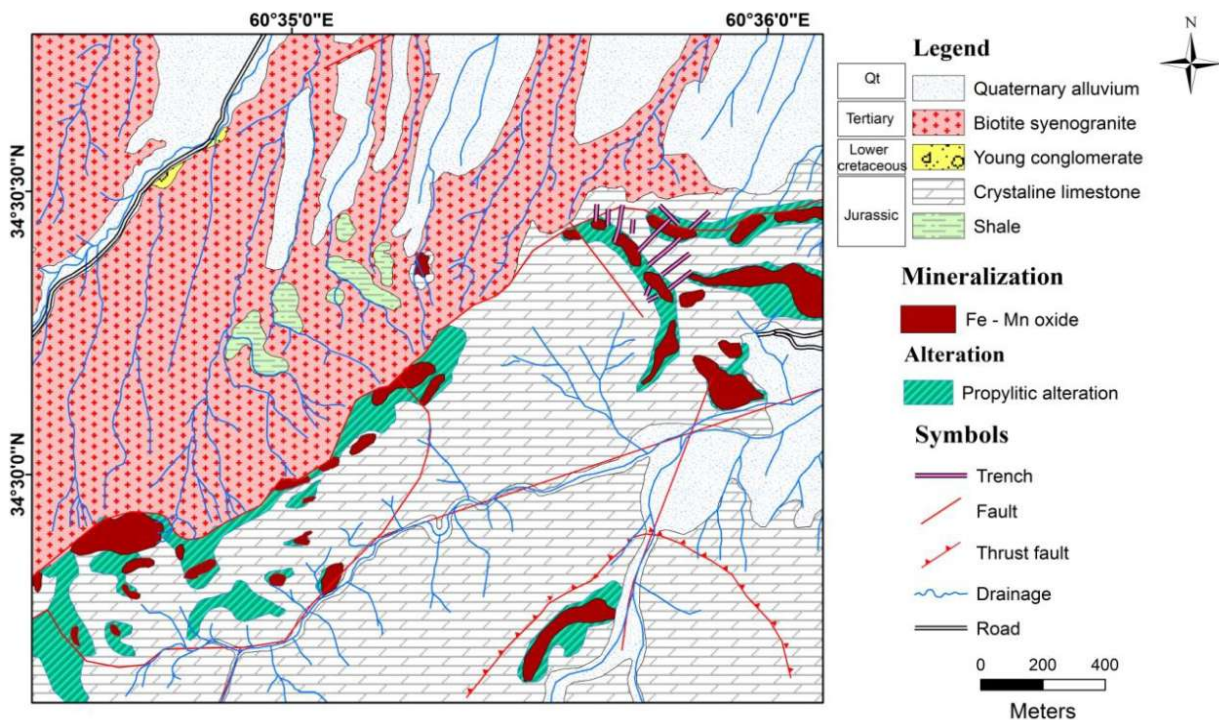
زمین‌شناسی

مجموعه معادن سنگان یک ذخیره بزرگ و با ارزش اسکارن آهن در کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن است (شکل 1). این کمربند با طول بیش از 350 کیلومتر، پهنای متغیر از 15 تا 80 کیلومتر و امتداد شرقی-غربی در شمال گسل درونه قرار دارد و تا کشور افغانستان ادامه می‌یابد. این کمربند به‌طور عمده از سنگهای آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاه مافیک شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت - بازالت، لاتیت، تراکی آندزیت، توف، لاپیلی توف و آگلومرا با سن ترشیاری تشکیل شده است. توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت فلدسپار قلیایی در این سنگهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند.

قدیمی‌ترین سازندهای موجود در منطقه معدنی سنگان شامل چرت، شیل‌های سیلیسی، سیلستون و آهک بلورین است. سنگهای کربناته بیشتر به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند و

درصد و بیوتیت 5 تا 8 درصد می‌باشد. کانیهای فرعی زیرکن و اسفن و همچنین کانیهای کدر تا 5 درصد در زمینه سنگ قابل مشاهده است. عملکرد سیالهای گرمابی، موجب دگرسانی ارتوکلاز و پلاژیوکلاز به کانیهای رسی (10 درصد) و تشکیل کلسیت و کوارتز شده است. توده‌های نفوذی دارای آلتراسیون ضعیف تا متوسط سرسیتی، آرژیلیکی، و به میزان کمتر سیلیسی و کربناته هستند. در بعضی نقاط به صورت محدود بیوتیت‌ها به کلریت و اپیدوت تبدیل می‌شوند. مرز واحدهای کربناته با توده‌های نفوذی از الگوی گسل‌ها و تکتونیک منطقه پیروی می‌کند (شکل 3).

ضعیف و ظهور کانیهای اپیدوت و کلریت در آنها و کانه‌زایی آهن و منگنز به صورت دیرزاد شده است که این رخداد اکثراً منطبق بر مناطق گسلی می‌باشد. این واحد در جنوب منطقه قابل مشاهده است (شکل 3). رخداد سنگهای آذرین در این محدوده مربوط به ماگماتیسم ترشیاری است که موجب نفوذ توده‌های با ترکیب بیوتیت سینوگرانیت در منطقه شده است. بافت این توده غالباً گرانولار بوده و بعضاً بافت‌های پرتیتی و گرافیکی نیز قابل مشاهده است. کانی‌شناسی آن شامل آلکالی‌فلدسپار به میزان 50 تا 55 درصد، پلاژیوکلاز (الیگوکلاز-آلبیت) به میزان 5 تا 10 درصد، کوارتز 20 تا 22



شکل 3. نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌زایی محدوده اکتشافی فرزانه.

Fig. 3. Geological, alteration and mineralization map of Ferezneh prospect area.

متر در تغییر است و شیب آنها از 20 تا 70 درجه به سمت جنوب‌شرقی و یا جنوب غربی تغییر می‌کند. امتداد اکثر توده‌ها منطبق بر روند گسل اصلی منطقه شمال شرقی- جنوب غربی است و بعضی از روند گسل کوچکتر با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی تبعیت می‌کنند.

گسل اصلی منطقه در مرز توده سینوگرانیت و واحد آهنی تبلور مجدد یافته واقع شده است. در اطراف توده‌های کانی‌سازی، دگرسانی پروپلیتیک ضعیف مشاهده و با حضور

کانی‌سازی

کانی‌سازی در محدوده اکتشافی فرزانه محدود به اکسیدهای آهن و منگنز است که به صورت توده‌ای و استراتی باند در سنگ میزبان آهنی تبلور مجدد یافته، که در مواردی به دولوستون تبدیل شده است، مشاهده می‌شود. کانی‌سازی منطبق بر گسلها و دارای کنتزل ساختاری است. توده‌ها امتداد شمال شرقی- جنوب غربی و بعضی امتداد شمال غربی- جنوب شرقی نشان می‌دهند. عرض کانی‌سازیها از 10 تا 15

شده در این آنالیز کلسیت، کوارتز، هماتیت، گوتیت و پیرولوسیت می‌باشند که طیف آنها در شکل 5 ارائه شده است.

ژئوشیمی

از آن‌جا که هدف انجام آنالیزهای ژئوشیمی کانه بود، نمونه‌برداری از محل‌های کانی‌زایی که دارای بیشترین مقدار ماده معدنی در سطح است، انجام شد. نمونه‌ها به روش‌های ICP-MS و آنالیز XRF برای عناصر اصلی و فرعی آنالیز شدند که از این میان عناصری که اهمیت بیشتری داشته‌اند مورد بحث قرار می‌گیرند.

اکسید آهن: تغییرات اکسید آهن از 43/5 تا 68 درصد است (جدول 1). تغییرات اکسید آهن (TFeO) برای همه 10 نمونه، در سه دامنه از مقدار کمتر از 43/5، 43/6 تا 58/8 و 58/9 تا 68 درصد متغیر است (شکل 6) که 8 نمونه دارای مقادیر بیشتر از 63 درصد هستند و تنها دو نمونه در دو دامنه دیگر قرار می‌گیرند. مقدار بالای آهن به حضور اکسیدهای آهن ثانویه هماتیت و گوتیت در منطقه برمی‌گردد.

اکسید منگنز: مقدار اکسید منگنز از 1/9 تا 4/8 درصد در تغییر است (جدول 1). تغییرات در سه دامنه 1/9 تا 2/2، 2/3 تا 3/7 و 3/8 تا 4/8 درصد بررسی می‌شود (شکل 7) که 7 نمونه در دامنه مقادیر 2/3 تا 3/7 درصد قرار می‌گیرند و دو نمونه در دامنه 1/9 تا 2/2 درصد و یک نمونه در دامنه 3/8 تا 4/8 درصد دسته‌بندی می‌شوند. حضور کانیهای اکسید منگنز پیرولوسیت و پسیوملان و همچنین اکسیدهای آبدار منگنز همراه با اکسیدهای آهن مقادیر این عنصر را در منطقه توجیه می‌کند. آهن و منگنز دارای همبستگی هستند و رفتار ژئوشیمی مشابهی را نشان می‌دهند.

مس: تغییرات مس از 20 تا 1063 گرم در تن است (جدول 1). این تغییرات در سه دامنه 20 تا 40، 41-209 و 210 تا 1063 بررسی شده است که اکثر نمونه‌ها تغییراتی از 20 تا 40 گرم در تن نشان می‌دهند و تنها دو نمونه دارای مقدار 209 و 1063 گرم در تن هستند و دو دامنه دیگر قرار می‌گیرند (شکل 8). در بررسی و مطالعه مقاطع، هیچ کانی مرتبط با کانی‌سازی مس در منطقه مشاهده نشد و مقدار بالای این عنصر می‌تواند به‌صورت آنکلوزیون باقی‌مانده از سولفیدها در ساختمان دیگر اکسیدهای آهن و منگنز، مربوط

کانیهای کلریت و اپیدوت تأیید می‌شود. اکسیدهای آهن اغلب گوتیت و هماتیت و اکسیدهای منگنز شامل پیرولوسیت، پسیوملان و به میزان کمتر کریپتوملان است. به‌ندرت لکه‌های کوچکی از روتیل نیز مشاهده می‌شود و کانی اصلی گانگ کلسیت و در مواردی دولومیت و کوارتز کریپتوکریستالین می‌باشد. در نمونه‌برداری‌های صحرایی مقدار بسیار اندک و سطحی از مالاکیت نیز مشاهده شد. اکسید منگنز به‌صورت ادخال در بین کانیهای اکسید آهن و یا بافت‌های پرکنندگی فضای خالی و همین‌طور به‌صورت لکه‌های بی‌شکل در بین کانیهای آهن‌دار در اندازه‌های مختلف قرار می‌گیرد. در ادامه به توصیف کانیها می‌پردازیم.

گوتیت: فراوان‌ترین اکسید آهن در منطقه است که میزان آن به 50 درصد می‌رسد. اغلب دارای بافت گل کلمی و بعضاً پرکننده فضای خالی است (شکل 4- A, B, D و E).

هماتیت: حداکثر مقدار آن به 15 تا 20 درصد می‌رسد. هماتیت‌ها همگی ثانویه بوده و آثاری از مگنتیت و آلتراسیون و تبدیل آن به هماتیت و یا دیگر اکسیدهای آهن ثانویه مشاهده نمی‌شود. شواهدی از پرشدگی کانی‌های اتومورف غیر فلزی و یا فلزی مثل پیریت و کوارتز، توسط اکسیدهای ثانویه آهن به چشم می‌خورد. بافت هماتیت‌ها به‌صورت پرکنندگی و لکه‌ای است (شکل 4- C).

پسیوملان: بلورهای ریز پسیوملان و گاهی کریپتوملان در حال تبلور و تبدیل به پیرولوسیت دیده می‌شوند. میزان آن در مقاطع به 4-5 درصد می‌رسد و بافت غالب آنها شکافه پرکن است و در مواردی شواهدی از پرشدگی کانیهای اتومورف غیر فلزی و یا فلزی مثل پیریت و قالب آن دیده می‌شود (شکل 4- B, D و E).

پیرولوزیت: بلورهای آن به شکل سوزنی و دوکی شکل فضای بین اکسیدهای آهن را پر می‌کند و غالباً از تبلور پسیوملان تشکیل می‌شوند و ثانویه هستند (شکل 4- B, D, E و F). حداکثر مقدار آن به 3 درصد می‌رسد.

روتیل: لکه‌های بسیار کوچکی از روتیل در میان اکسیدهای آهن ثانویه دیده شده که مقدار آن به یک درصد هم نمی‌رسد. به‌منظور حصول اطمینان از مطالعات میکروسکوپی و شناخت دقیق کانیها، آنالیز پراش پرتو ایکس بر روی 4 نمونه از کانه‌ها انجام شد. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که اکسیدهای آهن و منگنز تنها کانیهای فلزی موجود هستند. کانیهای شناسایی

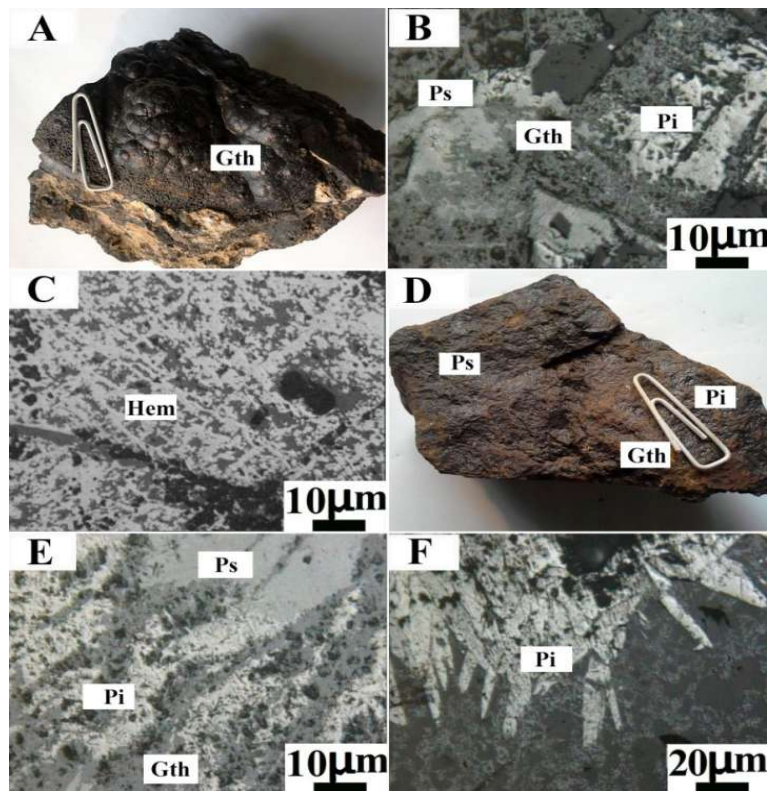
آنتیموان: مقدار تغییرات این عنصر از 3 تا 49 گرم در تن است (جدول 1) کانی مرتبط با این عنصر در منطقه مشاهده نشد. آرسنیک و آنتیموان رفتار مشابهی دارند و همبستگی مثبتی نشان می‌دهند.

سرب: تغییرات مقدار سرب از 10 تا 30 گرم در تن (جدول 1) و بیشتر نمونه‌ها دارای مقادیر متغیری از 21 تا 30 گرم در تن هستند اثری از کانیهای حاوی عنصر سرب در منطقه مشاهده نشد.

روی: میزان تغییرات از 5 تا 248 گرم در تن است (جدول 1). کانی مرتبط با این عنصر در منطقه مشاهده نشد.

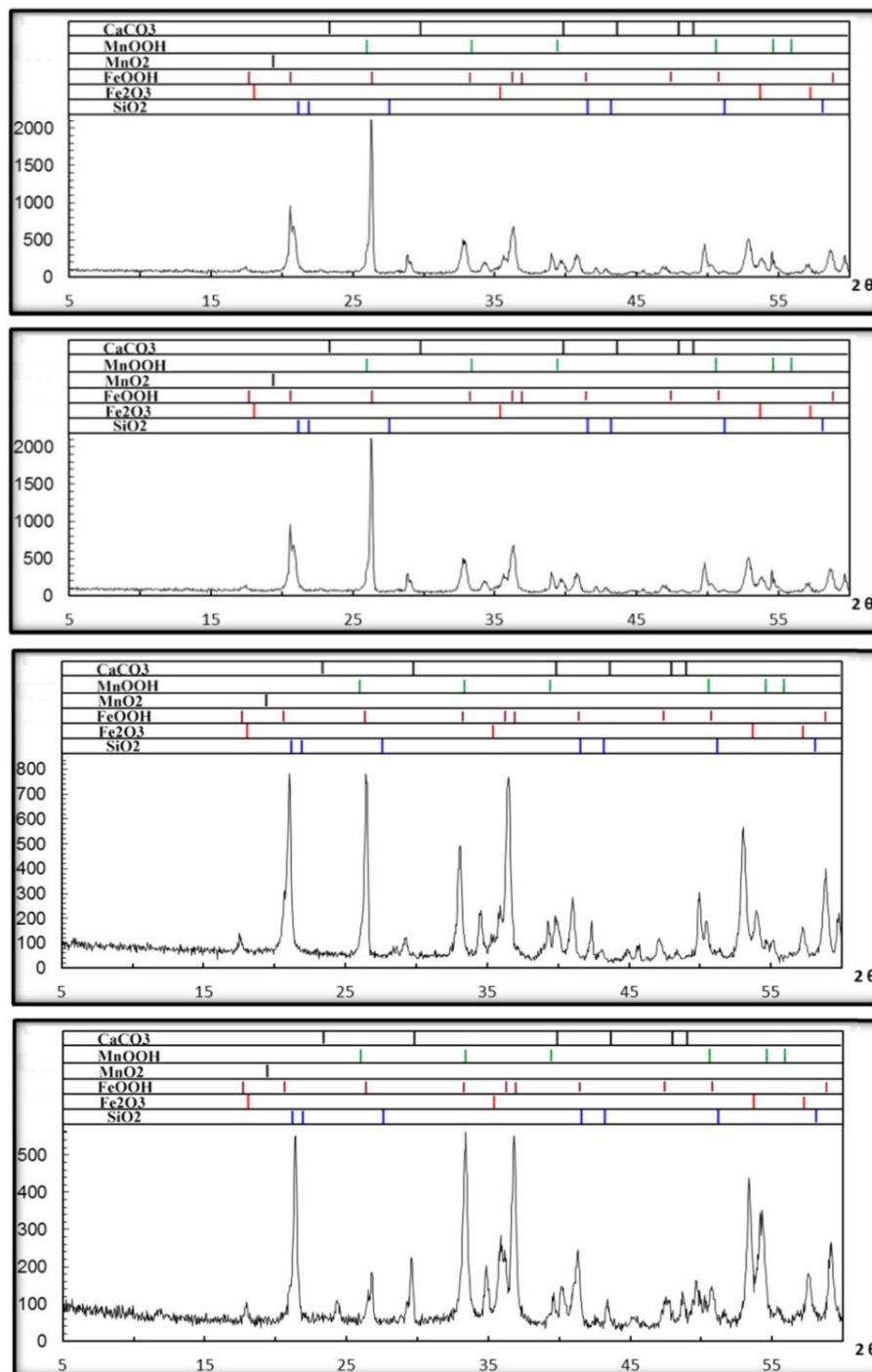
باشد. در مطالعات صحرایی مقادیری مالاکیت سطحی مشاهده شد.

آرسنیک: دامنه تغییرات برای آرسنیک از 20 تا 1269 گرم در تن است (جدول 1) که در سه دامنه 20 تا 245، 245 تا 682 و 683 تا 1269 پی‌پی‌ام طبقه‌بندی می‌شوند. فقط 2 نمونه دارای مقدار 1269 و 682 گرم در تن هستند و بقیه نمونه‌ها در دامنه 20 تا 245 قرار می‌گیرند (شکل 9). علی‌رغم آنومالی قابل توجه، کانی مرتبط با این عنصر در منطقه مشاهده نشد. از آنجا که اکسیدهای آهن و منگنز قدرت بالایی برای جذب عناصر کمیاب دارند، این‌گونه عناصر می‌توانند در ساختار اکسیدهای آهن و منگنز مشارکت نمایند.



شکل 4. تصاویر نمونه دستی و میکروسکوپی (PPL) از کانی‌زاییها در منطقه اکتشافی فرزنه. A: تصویر نمونه دستی از گوتیت‌های گل‌کلمی. B: کانیهای گوتیت، پیرولوسیت و پسیلوملان. کانیهای پسیلوملان در حال تبلور و تبدیل به پیرولوسیت‌های ثانویه هستند. قالب یک کانی اتومورف در شکل دیده می‌شود که با پسیلوملان پر شده‌است. C: هماتیت‌های ثانویه که در قالب یک کانی اتومورف تشکیل شده‌اند. D: تصویر نمونه دستی از گوتیت، پیرولوسیت و پسیلوملان. E: کانیهای گوتیت، پیرولوسیت و پسیلوملان. کانیهای پیرولوسیت از تبلور پسیلوملان‌ها به‌وجود می‌آیند. F: بلورهای دوکی شکل پیرولوسیت. Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Pi: پیرولوسیت، Ps: پسیلوملان (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 4. Image of hand and microscopic samples (PPL) from Ferezneh. A: Hand specimen image of cauliflower goethite. B: Goethite, pyrolusite, and psilomelane. Psilomelane crystallizes to secondary pyrolusite. A form of automorph mineral filled with psilomelane. C: Secondary hematite crystallizes in a form of automorph mineral. D: A hand specimen of goethite, pyrolusite, and psilomelane. E: Goethite, pyrolusite, and psilomelane. Psilomelane crystallizes and forms pyrolusite. F: Spindle pyrolusite crystals. Gth: Goethite, Hem: Hematite, Pi: Pyrolusite, Ps: Psilomelane (Whitney and Evans, 2010).



شکل 5. الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه‌های منطقه اکتشافی فرزنه. کانیهای کلسیت، کوارتز، هماتیت، گوئیت، پیرولوسیت و اکسید آبدار منگنز شناسایی شده‌اند.

Fig. 5. XRD pattern of Ferezne samples. Calcite, quartz, hematite, goethite, pyrolusite, psilomelane and Mn hydroxides were identified.

ردیابی ژئوشیمیایی و توضیح محیط نهشت کانسار مورد استفاده قرار گیرد (Owen et al., 1999; Chen et al., 2006).

تفسیر داده‌های ژئوشیمی

مقادیر اکسیدهای اصلی و تغییرات مقدار عناصر فرعی و کمیاب و همچنین نسبت عناصر نادر خاکی، می‌تواند به‌منظور

اشاره دارد (Nicholson et al., 1997). هرچند که این نسبت به‌طور مطلق نمی‌تواند بازگو کننده ژنز کانسار باشد به‌طور مثال کانسارهای جدید دیاژنزی منگنز، نسبت‌های بالایی از Mn/Fe را نشان می‌دهند (Jach and Dudek, 2005).

از نسبت Mn/Fe برای طبقه‌بندی ژنزی کانسارها استفاده می‌شود به طوری که ($Mn/Fe < 1$) به کانسارهای دریاچه‌ای، ($Mn/Fe = 1$) به کانسارهای هیپدروژنوس، ($0.1 < Mn/Fe < 10$) به کانسارهای سدکس و نسبت بسیار بالای Mn/Fe به کانسارهای گرمابی و یا گرمابی-هیدروژنوس

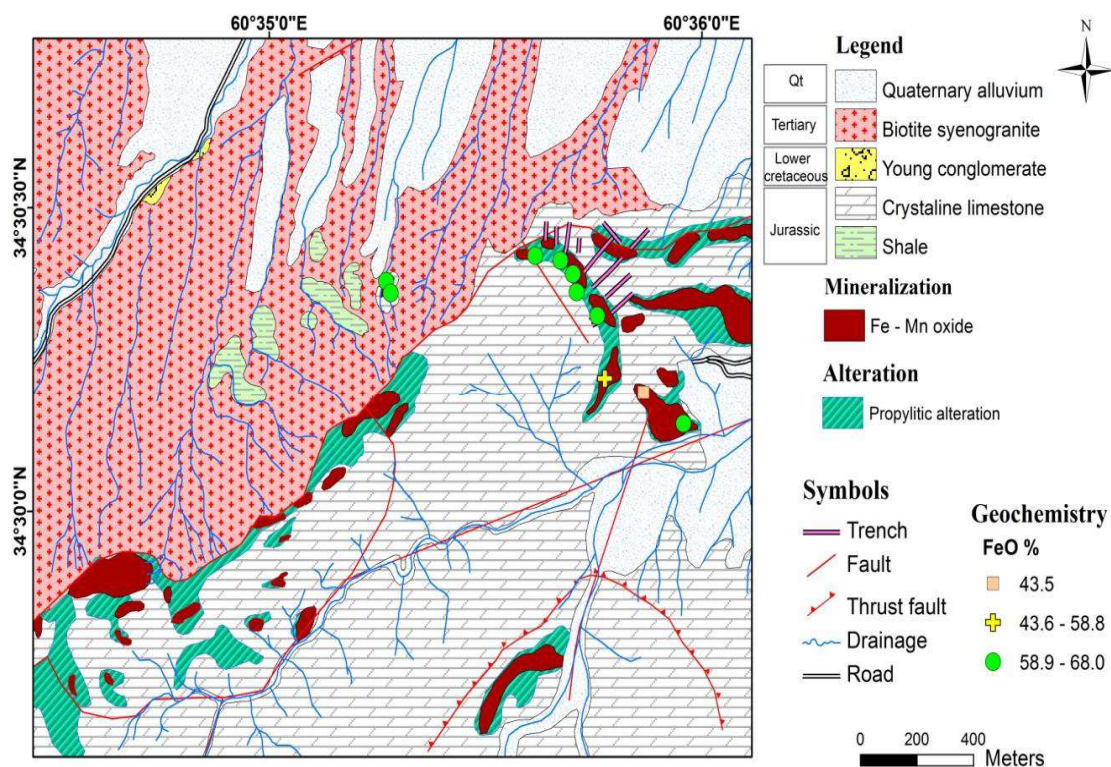
جدول 1. مقادیر اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی زون‌های کانی‌سازی محدوده اکتشافی فرزنه.

Table 1. Major oxides and trace elements of mineralization zones of Ferezneh prospect area.

Element (wt.%)	F-26	F-23	F-22	F-30	F-29	F-28	F-42	F-37	F-31	F-34
SiO ₂	10.6	6.21	3.8	11.34	5.89	5.23	37.45	6.36	6.52	19.69
TiO ₂	0.04	0.06	0.03	0.04	0.04	0.05	0.09	0.05	0.04	0.04
Al ₂ O ₃	0.21	0.42	0.16	0.19	0.22	0.51	0.63	0.38	0.41	0.33
TFeO	66.21	67.64	66.55	64.72	68.03	67.29	43.53	65.28	64.87	58.81
MnO	3.59	2.99	3.25	1.86	4.81	2.97	3.12	3.67	2.18	2.98
MgO	0.25	0.39	0.23	0.04	0.38	0.21	0.17	0.57	0.2	0.12
CaO	2.47	3.75	6.49	4.67	3.04	5.04	3.01	4.03	7.37	2.89
Na ₂ O	0.02	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.08	0.06	0.06	0.04
K ₂ O	0.07	0.14	0.04	0.04	0.11	0.16	0.21	0.16	0.13	0.09
P ₂ O ₅	0.03	0.2	0.05	0.03	0.04	0.05	0.16	0.11	0.04	0.07
L.O.I	10.19	14.91	12	11.02	11.89	11.54	11	12.93	11.77	12.32
Total	93.7	96.8	92.7	94	94.5	93.1	99.4	93.6	93.6	97.4
Element (ppm)	F-26	F-23	F-22	F-30	F-29	F-28	F-42	F-37	F-31	F-34
Ba	803	530	384	45.1	221	582	672	1201	88.6	59.2
Rb	4.3	3.2	3.1	3.5	5.6	6.7	5.6	4.6	3.2	2.1
Sr	166	1054	144	313	192	356	180	111	337	405
Cu	25	150	1063	20	209	24	31	40	23	26
As	245	682	216	30	26	102	129	1269	20	33
Sb	18.2	18.5	49	11.9	7.4	5.4	4	18.5	5.3	3.4
Zn	87	5	42	17	52	5	10	248	5	5
Nb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Co	7.1	9	6.6	4.2	9.2	5.2	8.6	9	7.1	8.1
Cr	10	10	10	10	10	10	10	10	10	31
Y	7.7	6.1	7.2	4.9	10.6	3.7	5.7	6.1	3	4
Cs	0.6	0.2	0.2	0.6	0.6	1.2	0.6	0.8	0.6	0.4
Ta	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Hf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mo	34	12	11	3	4	20	5	16	2	8
Pb	28	13	10	20	28	30	25	25	10	17
Sn	1	1	1	1	1	7	7	2	6	1
V	29	57	37	27	35	37	34	56	30	25

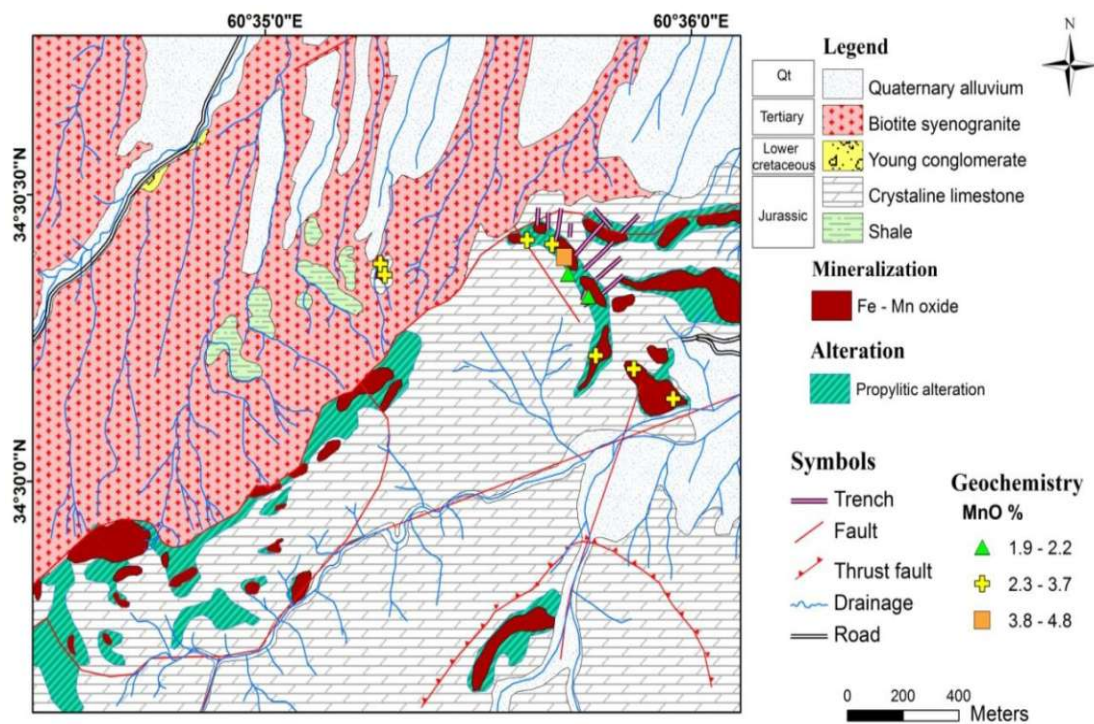
گرفت. میانگین مقدار FeO، 63/29 و بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب 63/08 و 43/53 درصد است. همچنین مقدار میانگین MnO 3/1 و بیشترین مقدار آن 4/8 و کمترین مقدار 1/86 درصد می‌باشد. نسبت Fe/Mn در نمونه‌های این منطقه از 25 تا 15 در تغییر است.

مقادیر اکسیدهای اصلی و همچنین عناصر فرعی برای نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده‌است. از میان مقادیر اکسیدهای اصلی می‌توان از Fe، Mn و Si برای ترسیم نمونه‌ها در نمودار سه‌تایی طبقه‌بندی کانسارهای آهن - منگنز (Toth, 1980, Canet et al., 2008, Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010)



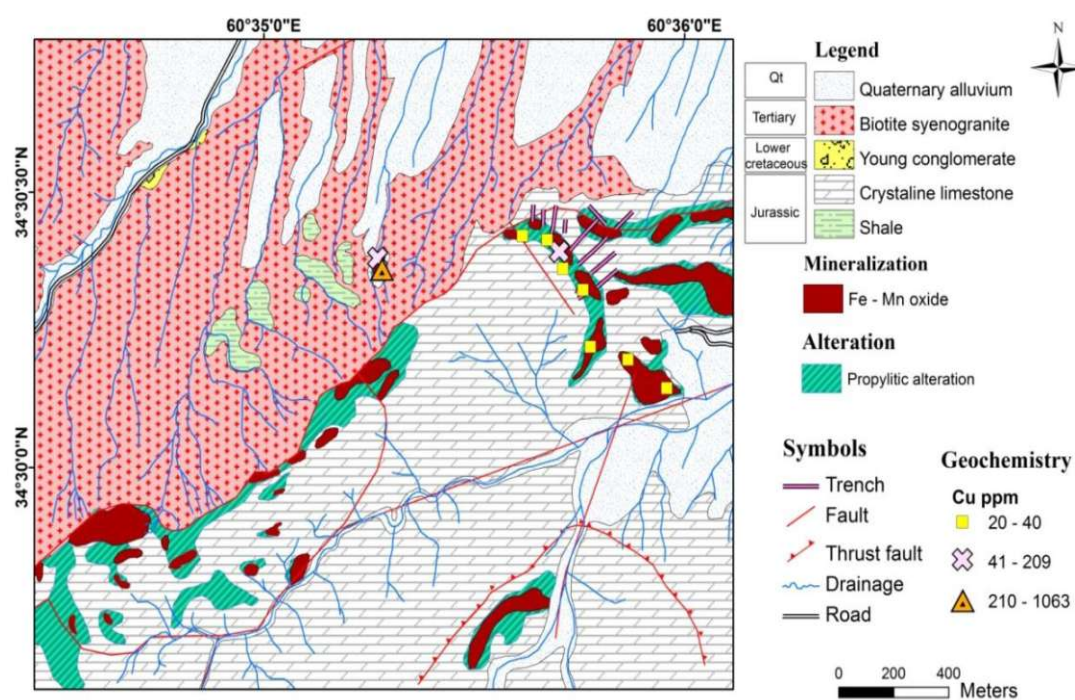
شکل 6. نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی آهن منطقه اکتشافی فرزنه.

Fig. 6. Geological, alteration, mineralization and Fe geochemical map of Ferezneh prospect area.



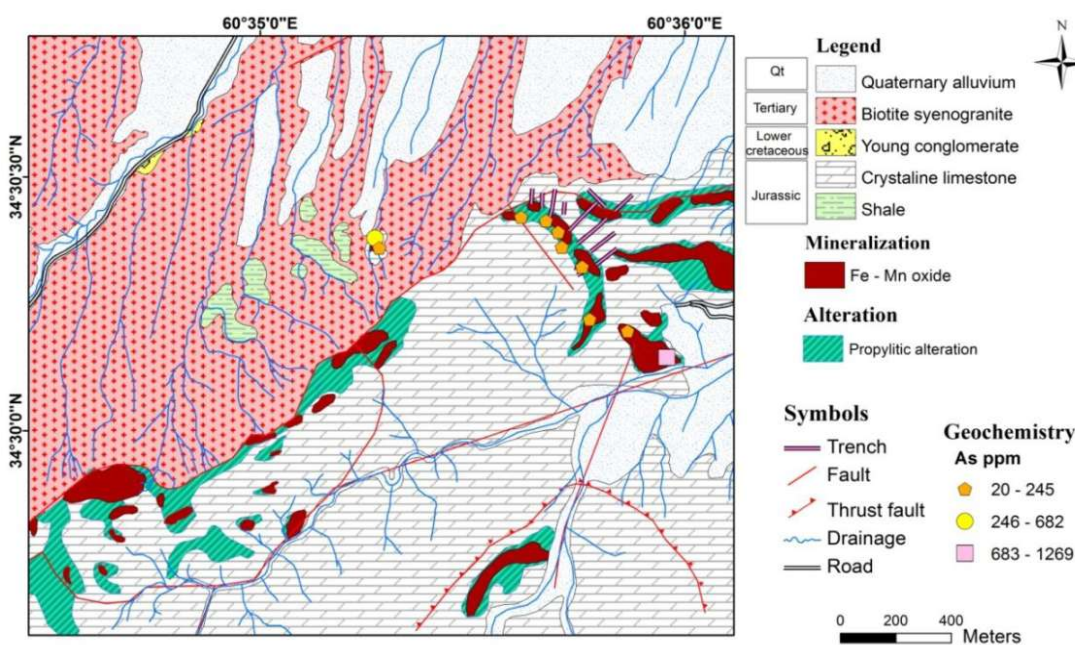
شکل 7. نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی منگنز منطقه اکتشافی فرزنه.

Fig. 7. Geological, alteration, mineralization and Mn geochemical map of Ferezneh prospect area.



شکل 8. نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی مس منطقه اکتشافی فرزنه.

Fig. 8. Geological, alteration, mineralization and Cu geochemical map of Ferezneh prospect area.



شکل 9. نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون، کانی‌سازی و ژئوشیمی آرسنیک منطقه اکتشافی فرزنه.

Fig. 9. Geological, alteration, mineralization and As geochemical map of Ferezneh prospect area.

فرومنگز فرزنه را در محدوده کانسارهای گرمابی غنی از آهن نشان می‌دهد (شکل 10 - A). اکسیدهای منگنز توانایی بسیار

میانگین مقدار SiO_2 ، $11/3$ و دامنه تغییرات از $38/45$ تا $3/8$ می‌باشد. ترسیم نمونه‌ها در این مثلث سه‌تایی، کانسار

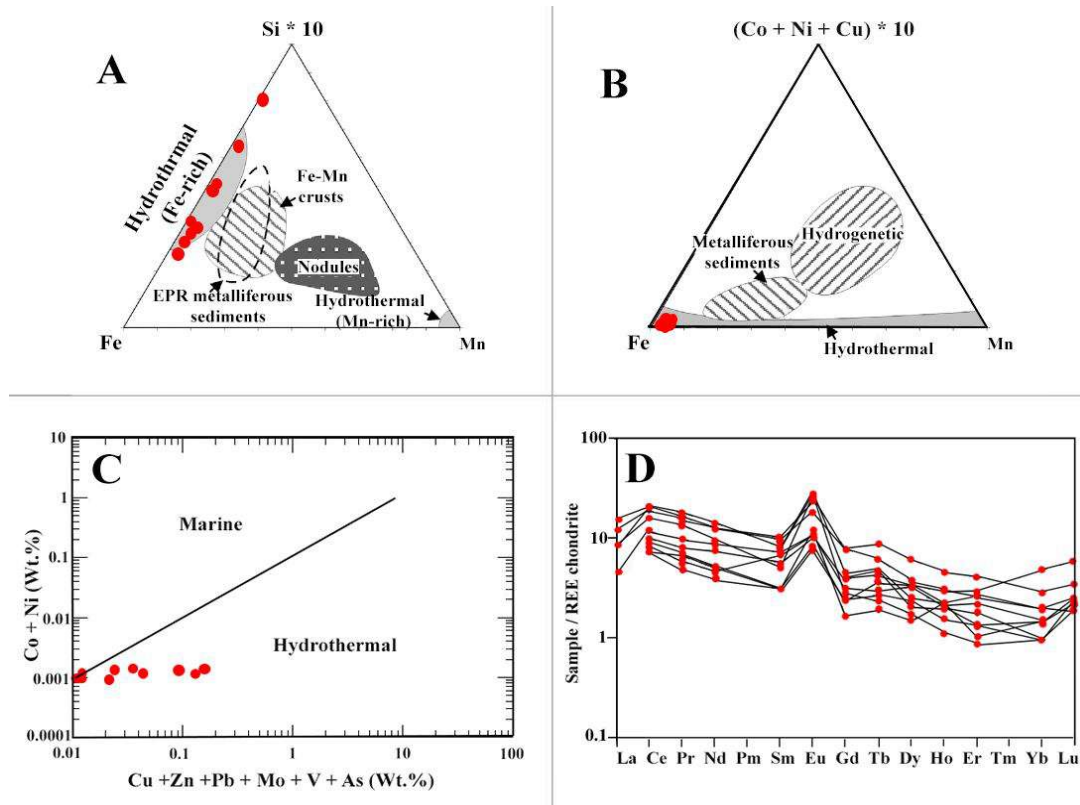
الگوی عناصر نادر خاکی (شکل 10-D) نشان می‌دهد که Eu دارای آنومالی مثبت است و نسبت Eu/Eu^* از 2 تا 7 در تغییر است. همچنین میانگین مقدار La_N/Ce_N 0/25 و میانگین مقدار La_N/Yb_N 10/8 است. مقدار La_N/Yb_N نیز از 3/5 تا 24 تغییر می‌کند. میانگین ΣREE برای منطقه مورد مطالعه 24/18 و مقدار آن از 13/36 تا 39/47 گرم در تن در تغییر است (جدول 2). نسبت $LREE/HREE$ از 2/25 تا 13/78 در تغییر است و میانگین آن 6/94 است. بررسی مقادیر عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند که الگوی تفریق نسبتاً کم تا متوسط بوده، $LREE$ ها تغییراتی بیشتری داشته و مقادیر $HREE$ ثابت‌تر بوده‌اند (جدول 2 و شکل 10-D). غنی‌شدگی $LREE$ نسبت به $HREE$ و آنومالی مثبت Eu ، نشانه منشأ گرمابی در کانسار می‌باشد (Hongo and Nozaki, 2001). و پایین بودن مقادیر $HREE$ از خصوصیات کانسارهای گرمابی است (Xu Bao et al., 2008). Eu نسبت به REE های سه ظرفیتی، در محلولهای گرمابی متحرک‌تر بوده و می‌تواند در نهایت به جای Sr ، در ترکیب کلسیت شرکت کند و به همین دلیل آنومالی مثبت Eu و آنومالی منفی REE های سنگین را در این نوع کانسارها سبب شود (Hongo and Nozaki, 2001).

بالایی برای جذب عناصر فرعی دارند (Stumm and Morgan, 1996; Anschutz et al., 2005) و کانسارهای منگنز هیدروژنوس دارای مقادیر بسیار بالایی از Ni ، Co و Cu هستند (Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010) و در عوض کانسارهای هیدروترمال دارای مقادیر بسیار پایینی از این عناصر ($Co + Ni + Cu < 0.01$ wt.%) هستند (Jachand Dudek, 2005). این مقدار برای منطقه مورد مطالعه از 0/1 تا 0/002 درصد در تغییر و میانگین آن 0/017 درصد وزنی است. نمودار سه تایی $(Cu + Ni + Co)$ *10-Fe-Mn (Bonatti et al., 1972; Crerar et al., 1982) به طور گسترده برای مطالعه منشأ کانسارهای فرومنگنز مورد استفاده قرار گرفته است (Shah and Khan, 1999; Jach and Dudek, 2005; Shah and Moon, 2004, 2007; Heshmatbehzadi and Shahabpour, 2010; Karakus et al., 2010; Oksuz, 2011; Polgári et al., 2012, Zarasvandi et al., 2013, Canet et al., 2008). از ترسیم نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، فرزانه در محدوده کانسارهای گرمابی قرار می‌گیرد (شکل 10-B). ترسیم عناصر فرعی و کمیاب نیز در نمودار دوتایی $Ni+Co$ در مقابل $Cu+Zn+Pb+Mo+V+As$ (Crerar et al., 1982) نمونه‌های منطقه مورد مطالعه را در محدوده کانسارهای گرمابی قرار می‌دهد (شکل 10-C).

جدول 2. مقادیر عناصر نادر خاکی زون‌های کانی سازی محدوده اکتشافی فرزانه.

Table 2. REE contents of mineralization zones of Ferezneh prospect area

Element (ppm)	F-26	F-23	F-22	F-30	F-29	F-28	F-42	F-37	F-31	F-34
La	1.4	-	3.9	4.8	2.6	-	-	-	2.7	-
Ce	9.6	8	15.6	16.9	17.1	7.4	5.8	6.5	12.9	6.1
Pr	1.21	0.98	1.88	2.2	2.01	0.85	0.58	0.71	1.66	0.8
Nd	5.3	4.5	7.7	8.6	7.7	3.1	2.3	2.8	5.7	3
Sm	1.4	1.1	1.9	1.6	2	0.6	0.6	1.3	1	0.6
Eu	0.78	0.77	1.37	2.09	1.75	0.89	0.56	0.79	1.94	0.62
Gd	1.02	1.01	2.03	1.15	2.04	0.43	0.61	0.82	0.7	0.62
Tb	0.22	0.2	0.29	0.23	0.41	0.09	0.17	0.14	0.11	0.13
Dy	0.82	1.04	1.19	0.66	1.97	0.48	1.07	1.03	0.55	0.74
Ho	0.16	0.15	0.22	0.14	0.33	0.16	0.21	0.14	0.08	0.11
Er	0.54	0.46	0.56	0.28	0.85	0.21	0.61	0.37	0.18	0.27
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	0.4	0.3	0.4	0.2	0.6	0.3	1	0.2	0.2	0.3
Lu	0.08	0.07	0.06	0.06	0.11	0.08	0.19	0.08	0.06	0.07
ΣREE	22.93	18.58	37.1	38.91	39.47	14.59	13.7	14.88	27.78	13.36
$LREE/HREE$	6.08	4.75	6.81	13.3	5.25	7.34	2.55	4.35	13.78	4.96
La_N/Ce_N	0.15	-	0.25	0.28	0.43	0.15	-	-	-	0.21
La_N/Yb_N	3.5	-	9.75	24	9.8	4.33	-	-	-	13.5
Eu/Eu^*	2	2.23	2.13	4.71	2.65	5.36	2.83	2.34	7.09	3.11



شکل 10. A: نمودار سه‌تایی Fe-Mn-(Si*10) طبقه‌بندی کنسارهای آهن - منگنز (Toth, 1980; Nath et al. 1997). B: نمودار سه‌تایی (Co + Ni + Cu)*10-Fe-Mn طبقه‌بندی کنسارهای آهن - منگنز (Bonatti et al., 1972; Toth 1980). C: نمودار دوتایی Ni+Co در مقابل Cu+Zn+Pb+Mo+V+As طبقه‌بندی کنسارهای آهن - منگنز (Crerar et al., 1982). D: نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی محدوده اکتشافی فرزانه نرمالیزه شده به کندریت (Boynton 1984).

Fig. 10. A: Fe-Mn-(Si*10) for Fe-Mn ternary classification diagrams (Toth, 1980; Nath et al. 1997). B: Fe-Mn-(Cu + Ni + Co)*10 ternary classification diagrams for Fe-Mn deposits (Bonatti et al., 1972; Toth 1980). C: Ni+Co vs. Cu+Zn+Pb+Mo+V+As binary classification diagram for Fe-Mn deposits (Crerar et al., 1982). D: REE spider diagram of Ferezneh prospect area, normalized to chondrite (Boynton 1984).

است (Baïoumy et al., 2013) که در منطقه اکتشافی فرزانه نسبت آهن به منگنز حکایت از این دارد که حالت اول اتفاق افتاده است و تجمع آهن و منگنز باید مربوط به سیالات فرو (سوپرژن) باشد.

مجموعه کانیهای منگنز توسط پژوهشگران مختلفی برای تعیین ژنر کنسارهای منگنز استفاده شده‌اند. اگر چه یک کانی مشخص می‌تواند مربوط به هوازدگی از کنسار اولیه باشد یا تنوع کانی‌شناسی در دو کنسار مختلف با محیط تشکیل مشابه وجود داشته باشد (Nicholson, 1992; Ostwald, 1992; Fan and Yang, 1978). فن و یانگ (1992; Rona, 1978) 1999 کنسارهای منگنز را به 6 نوع رسوبی، رسوبی آتشفشانی، دگرگونی، تغییر یافته گرمایی (اندوژنیک)، گرمایی و سوپرژن تقسیم‌بندی کردند. کنسارهای رسوبی با

نتیجه‌گیری

نسبت آهن به منگنز در این منطقه بالاست و همان‌طور که نتایج XRF نشان می‌دهد همبستگی مثبتی بین این دو عنصر مشاهده می‌شود. تجمع کانیهای اکسید آهن و منگنز در کنار یکدیگر، که اکسید منگنز به صورت ادخال در بین کانیهای اکسید آهن و یا بافتهای پرکنندگی فضای خالی و همین‌طور به صورت لکه‌های بی‌شکل در بین کانیهای آهن‌دار در اندازه‌های مختلف قرار دارد، نشان می‌دهد که آهن و منگنز هر دو دارای یک منشأ هستند. در صورتی که تجمع آهن و منگنز مربوط به آبهای فرو (سوپرژن) باشد، در نتیجه انحلال بیشتر منگنز نسبت به آهن، آهن در قسمت‌های بالایی و منگنز در بخش‌های پایینی متمرکز می‌شود و در آبهای بالارونده عکس این موضوع رخ می‌دهد و آهن نزدیکتر به منشأ فلز

این عناصر به عنوان عناصر ردیاب فوق کانساری، اهمیت به‌سزایی در دست‌یابی به کانسار نهان اپی‌ترمال یا هیدروترمال سولفیدی در عمق دارند. با توجه این‌که تیپ کانی‌سازی در بخش‌های اصلی معدن سنگان از نوع اسکارن است و انواع کالک سیلیکات‌های آبدار و بی‌آب در آن حضور دارد (Boomeri, 1998; Karimpour, 1991; Karimpour, 1995; Karimpour, 1999; Karimpour, 2004; Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2006, 2008; Karimpour et al., 2006; Golmohammadi et al., 2015). در منطقه اکتشافی فرزنه شاهدی از اسکارنی شدن واحد آهکی، کانیهای اسکارنی و کانی‌زایی مگنتیت مشاهده نمی‌شود. نتایج ارائه شده در این پژوهش (از جمله بالا بودن نسبت آهن به منگنز و بالا بودن مقدار مس و آرسنیک) حاکی از این است که این آنومالی مرتبط با فعالیت سیالات فرو است و ناشی از شسته شدن کانی‌سازی اولیه سولفیدی گرمایی دیگری می‌باشد که احتمالاً جوانتر از کانی‌سازی اصلی اسکارن آهن در منطقه است و از طریق زون گسلی به اعماق کمتر و سطح زمین راه پیدا کرده‌اند. بر همین اساس و با تکیه بر داده‌ها و برداشت‌ها می‌توان گفت مدل کانی‌سازی و رخداد آنومالی فرومگنز فرزنه با کانی‌زایی اصلی اسکارن آهن در مجموعه معادن سنگان هیچ‌گونه شباهت و ارتباطی ندارد.

کربنات‌های منگنز و به مقدار کمتر اکسید و هیدروکسید منگنز شناخته می‌شوند. کانسارهای رسوبی آتشفشانی، دگرگونی، اندوژنیک و گرمایی اکثراً حاوی سیلیکات و اکسید منگنز هستند. تنها کانسارهای سوپرژن هستند که با حضور مقادیر فراوان پیرولوسیت و پسیلوملان شناخته می‌شوند. مطالعات اخیر در مورد کانسارهای فرومگنز نشان می‌دهند که ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی، راهنمای بسیار خوبی برای حل معمای منشأ کانسار می‌تواند باشد (Shah and Khan, 1999; Polgári et al., 2012). مقادیر این عناصر و ترسیم آنها در نمودارهای مربوطه نیز، ما را به حل معمای منشأ کانی‌سازی فرومگنز در این منطقه رهنمون ساخت. همچنین غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE، نشانه منشأ گرمایی در کانسار بوده (Hongo and Nozaki, 2001) و پایین بودن مقادیر REE از خصوصیات کانسارهای هیدروترمال است (Xu, Bao et al., 2008).

حالت و شکل قرارگیری کانه در سنگ میزبان نیز نکته‌ای قابل توجه است. کانی‌سازی در سنگهای آهکی تبلور مجدد یافته، شکل استراتی‌بند و توده‌ای دارد و از الگوی تکتونیکی منطقه پیروی می‌کند که دلالت بر منشأ گرمایی است و همچنین آثار پرشدگی قالب کانیهای اتومورف (پیریت) توسط اکسیدهای منگنز و آهن مشاهده می‌شود.

از طرف دیگر ناهنجاری بالای عناصر آنتیموان و مس، و همچنین آنومالی سرب، روی و آرسنیک، قابل توجه هستند.

References

- Anschutz, P., Dedieu, K., Desmazes, F. and Chaillou, G., 2005. Speciation, oxidation state, and reactivity of particulate manganese in marine sediments. *Chemical Geology*, 218(3): 265–327.
- Baioumy, H.M., Khedr, M.Z. and Ahmed, A.H., 2013. Mineralogy, geochemistry and origin of Mn in the high-Mn iron ores, Bahariya Oasis, Egypt. *Ore Geology Reviews*, 53(2013): 63–76.
- Boomeri, M., 1998. Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran. Unpublished Ph.D. thesis, Akita University, Japan, 226 pp.
- Boynnton, W.V., 1984. Geochemistry of the rare-earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.
- Canet, C., Bandy, W.L., Prol-Ledesma, R.M., Schaaf, P., Linares, C., Tauler, E. and Mortera-Gutiérrez, C., 2008. Mineralogical and geochemical constraints on the origin of ferromanganese crusts from the Rivera Plate (western margin of Mexico). *Marine Geology*, 251(1-2):47–59.
- Chen, D., Qing, H., Yan, X. and Li, H., 2006. Hydrothermal venting and basin evolution (Devonian, South China): Constraints from rare earth element geochemistry of chert. *Sedimentary Geology*, 183(3-4): 203–216.
- Crerar, D.A., Namson, J., Chyi, M.S., Williams, L. and Feigenson, M.D., 1982. Manganiferous

- cherts of the Franciscan Assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers. *Economic Geology*, 77(3): 519-540.
- Fan, D. and Yang, P., 1999. Introduction to and classification of manganese deposits of China. *Ore Geology Reviews*, 15(1): 1-13.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 545-563.
- Heshmatbehzadi, K. and Shahabpour, J., 2010. Metallogeny of manganese and ferromanganese ores in Baft ophiolitic Mélange, Kerman, Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2): 302-313.
- Hongo, Y. and Nozaki, Y., 2001. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits and Calyptogena shell from the Iheya Ridge vent field, Okinawa Trough. *Geochemical Journal*, 35(5): 347-354.
- Jach, R. and Dudek, T., 2005. Origin of a Toarcian manganese carbonate/silicate deposit from the Krížna unit, Tatra Mountains, Poland. *Chemical Geology*, 224(1-3): 136-152.
- Karakus, A., Yavuz, B. and Koc, S., 2010. Mineralogy and major trace element geochemistry of the Haymana manganese mineralizations, Ankara, Turkey. *Geochemistry International*, 48(10): 1014-1027.
- Karimpour, M.H., 1991. Source and formation of Sangan iron mine. Iron Stone Conference, Department of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Karimpour, M.H., 1995. Geochemistry and mineralogy of Sangan iron mine, Khorasan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 2(2): 145-156. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., 1999. Temperature, formation, and magnetite paragenesis in different places of Sangan iron mine. 17th Symposium of the Geological Society of Iran, Tehran, Iran.
- Karimpour, M.H., 2004. Mineralogy, alteration, source rock, and tectonic setting of iron-oxides Cu-Au deposits and examples of Iran. 11th Conference of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, University of Yazd, Yazd, Iran.
- Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2006. Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite and Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 13(1): 3-26. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2008. Skarn geochemistry – mineralogy and petrology of source rock, Sangan iron mine, Khorasan Razavi, Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 17(65), 108-125. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Saadat, S. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2006. Geochemistry, petrology and mineralization of Tannurjeh porphyry gold-copper. *Journal of Sciences, University of Tehran*, 32: 175-189. (in Persian with English abstract)
- Nath, B.N., Plüger, W.L. and Roelandts, I., 1997. Geochemical constraints on the hydrothermal origin of ferromanganese encrustation from the Rodriguez Triple Junction, Indian Ocean. K. Nicholson, J.R. Hein, B. Bühn and S. Dasgupta (Editors), *Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits*. Geological Society Special Publication 119, pp. 199-211.
- Nicholson, K., 1992. Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides: guides to metallogenesis. *Economic Geology*, 87(5): 1253-1264.
- Nicholson, K., Nayak, V.K. and Nanda, J.K., 1997. Manganese ores of the Ghoriajhor-Monmunda area, Sundergarh District, Orissa, India: geochemical evidence for a mixed Mn source. *Geological Society of London Special Publication*, 119: 117-121.
- Oksuz, N., 2011. Geochemical characteristics of the Eymir (Sorgun-Yozgat) manganese deposit. *Journal of Rare Earths*, 29(2-3): 287-296.
- Ostwald, J., 1992. Genesis and paragenesis of the tetravalent manganese oxides of the Australian continent. *Economic Geology*, 87(5): 1237-1252.
- Owen, A.W., Armstrong, H.A. and Floyd, J.D., 1999. Rare earth elements in chert clasts as provenance indicators in the Ordovician and Silurian of the Southern Uplands of Scotland. *Sedimentary Geology*, 124(1): 185-195.

- Polgári, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabó-Drubina, M., Fórizs, I., Bíró, L., Müller, A. and Tóth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Úrkút manganese deposit, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 47: 87–109.
- Rona, P.A., 1978. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in Oceanic crust. *Economic Geology*, 73(2): 135–160.
- Shah, M.T. and Khan, A., 1999. Geochemistry and origin of Mn-deposits in the Waziristan ophiolite complex, north Waziristan, Pakistan. *Mineralium Deposita*, 34(7): 697–704.
- Shah, M.T. and Moon, C.J., 2004. Mineralogy, geochemistry and genesis of the ferromanganese ores from the Hazara area, NW Himalayas, northern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(1), 1–15.
- Shah, M.T. and Moon, C.J., 2007. Manganese and ferromanganese ores from different tectonic settings in the NW Himalayas, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2-3): 455–465.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons, New York, 1040 pp.
- Toth, J.R., 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, 91(1): 44–54.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Xu Bao, S., Yang Zhou, H., Tong Peng, X., Wu Ji, F. and Qiang Yao, H., 2008. Geochemistry of REE and yttrium in hydrothermal fluids from the Endeavour segment. *Juande Fuca Ridge. Geochemical Journal*, 42(4): 359–370.
- Zarasvandi, A., Lentz, D., Rezaei, M. and Pourkaseb, H., 2013. Genesis of the Nasirabad manganese occurrence, Fars province, Iran: Geochemical evidences. *Chemie der Erde*, 73(4):495– 508.



Geology, mineralogy and geochemistry of Ferezneh ferromanganese anomaly, east of Sangan mines complex, NE Iran

Nazi Mazhari¹, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi^{1*} and Majid Ghaderi²

1) Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Submitted: Dec. 27, 2014

Accepted: May 13, 2015

Keywords: *Geochemistry, Ferezneh ferromanganese, eastern anomalies, Sangan mine, Khaf-Kashmar-Bardaskan belt.*

Introduction

The Ferezneh prospect area is one of the eastern anomalies of Khaf's Sangan iron mine. The Sangan mines complex is located within the Khaf-Kashmar-Bardaskan volcano-plutonic and metallogenic belt in northeastern Iran.

The Sangan mine is the largest Fe skarn in western Asia, having a proven reserve of over 1000 Mt iron ore @ 53% Fe (Golmohammadi et al., 2015) and consisting of three parts; western, central and eastern Sangan, each part including several anomalies. In this study, Ferezneh (North and West) prospect area which is an eastern anomaly of the Sangan iron ore is discussed. Ferezneh anomaly is located in 60°36'7" - 60°34'27"E and 34°30'47" - 34°29'46"N, 35 km south of the city of Taybad, 10 km southeast of Karat and 1.5 km southwest of Ferezneh village. The purpose of this study was to prepare a geologic map for separation and identification of the intrusions, determining their relationships with mineralization, distinguishing the type of mineralization, mineralogy, petrology and geochemistry of the mineral deposits, and finally their relationship with other major Sangan's deposits.

Materials and methods

In order to achieve the objectives of the study: 1- 140 thin sections of the intrusive rocks, marble limestone and dolomite, as well as 40 polished sections of ore were taken in an area of 9.5 km². Mineralogy and mineralization studies were performed in the Economic Geology Laboratory of Ferdowsi University of Mashhad. 2- A few

samples were selected for X-ray diffraction analysis in order to ensure accuracy of mineralogical studies and were sent to Binalood Laboratory in Tehran. 3- In addition to major and minor elements geochemistry study of the ores, 10 samples were sent to East Amittis Laboratory in Mashhad for XRF analysis and also to Canada S.G.S Laboratory for ICP-MS analysis.

Discussion and results

Mineralization in the Ferezneh prospect area was limited to iron and manganese oxides in the form of massive and stratabound in recrystallized limestone that followed the structure pattern.

Iron oxides often include goethite and hematite; while manganese oxides are pyrolusite, psilomelane and lesser amounts of cryptomelane. Small spots of rutile are rarely seen. The gangue minerals are dolomite, calcite and cryptocrystalline quartz. XRD analysis shows that iron and manganese oxides are the only metallic minerals.

The geochemistry of mineralization was studied by ICP-MS and XRF analysis for major oxides, trace elements and REE. The range of Fe anomaly changes from 43.5 to 68% and Mn anomalies vary between 1.9 and 4.8 %. The range of Cu varies from 20 to 1063 ppm and the range of As differs between 20 and 1269 ppm, no Cu and As mineralization has been observed. Mn and Fe oxides uptake trace elements.

In the Fe:Mn:Si ternary diagram, ten of the analyzed samples were plotted in the characteristic compositional field for Fe-rich hydrothermal. In the Fe:Mn:(Co+Ni+Cu)×10

*Corresponding authors Email: shafaroudi@um.ac.ir

ternary diagram, data were also plotted in hydrothermal fields. Minor and trace elements in the binary diagram of Ni+Co vs. Cu+Zn+Pb+Mo+V+As (Crerar et al., 1982) show samples within the field for hydrothermal deposits.

REE pattern shows positive Eu anomaly and the Eu/Eu* ratio changes from 2 to 7, LREE/HREE ratio varies between 2.25 and 13.78, the mean being 6.94.

Rare earth element contents show relatively low to moderate subtraction pattern. LREE have more variations than HREE values that have been fixed. Enrichment of LREE over HREE and positive Eu anomaly, are the key indications of hydrothermal origin for the ore deposits and low amounts of REE are the characteristic for hydrothermal deposits (Xu Bao et al., 2008).

As, Cu, Pb, Zn and Sb act as trace indicator elements in reaching the hidden epithermal or hydrothermal sulfide deposit in depth. Although the type of mineralization in the main parts of Sangan is skarn (Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2006; Karimpour and Malekzadeh Shafaroudi, 2008; Golmohammadi et al., 2015), there is no evidence of limestone skarnification, skarn minerals and magnetite mineralization in the Ferezneh prospect area. Based on the listed data and interpretations, there is no relationship and similarity between Sangan mineralization and Ferezneh ferromanganese anomaly. This anomaly may be related to a younger mineralization and might be associated with the function of supersation

fluid by leaching the sulfide hydrothermal deposits that form in the fault zones.

References

- Crerar, D.A., Namson, J., Chyi, M.S., Williams, L. and Feigenson, M.D., 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan Assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers. *Economic Geology*, 77(3): 519-540.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 545-563.
- Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2006. Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite and Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 13(1): 3–26. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2008. Skarn geochemistry – mineralogy and petrology of source rock, Sangan iron mine, Khorasan Razavi, Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 17(65), 108–125. (in Persian with English abstract)
- Xu Bao, S., Yang Zhou, H., Tong Peng, X., Wu Ji, F. and Qiang Yao, H., 2008. Geochemistry of REE and yttrium in hydrothermal fluids from the Endeavour segment. Juande Fuca Ridge. *Geochemical Journal*, 42(4): 359–370.