

کانی‌شناسی و شیمی مگنتیت در کانسار آهن شهرک، ناحیه فلززایی تکاب: گستره‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲

مجید قاسمی سیانی*^۱، امیر پناهی^۱، حامد ابراهیمی‌فرد^۱، بهروز کریمی شهرکی^۲

۱- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ایران

۲- مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۴/۹، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۵/۱۵)

چکیده: کانسار آهن کورکورا ۲ و شهرک ۲ از کانسارهای گستره اسکارنی شهرک هستند که در پهنه تکاب قرار دارند. جایگیری توده‌های نفوذی دیوریتی تا گرانودیوریتی و کوارتزیدیوریتی در سنگ‌های آتشفشانی و کربناتی، موجب دگرگونی همبری و اسکارن‌زایی آهن شده است. مگنتیت توده‌ای کانه اکسیدی غالب در اسکارن آهن کورکورا ۲ و شهرک ۲ است. کانی‌های باطله اسکارنی به ترتیب فراوانی، شامل فلگوپیت، کلسیت، کانی‌های رسی، اکتینولیت و کلریت هستند. پیریت و به مقدار کمتر پیروتیت کانه‌های سولفیدی اصلی در کانسارهای مورد بررسی را تشکیل می‌دهند. بررسی شیمی کانی مگنتیت در کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲ نشان داد که این مگنتیت‌ها در گستره گرمایی و اسکارن قرار دارند. این بررسی همچنین، نقش فرآیندهای گرمایی و نسبت بالای سیال/سنگ در کانه‌زایی مگنتیت کورکورا ۲ و شهرک ۲ را در مقایسه با کورکورا ۱ و سراب ۳ نشان می‌دهد. شواهد کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی کانسنگ، گویای خاستگاه اسکارنی کانه‌زایی آهن در کانسار کورکورا ۲ و شهرک ۲ هستند.

واژه‌های کلیدی: شیمی کانی؛ کانی‌شناسی؛ اسکارن؛ مگنتیت؛ شهرک؛ کورکورا؛ پهنه تکاب.

مقدمه

آهن‌شناسایی نمود و تمهیدات لازم را برای بررسی‌های زیست‌محیطی اندیشید. یکی از روش‌های بررسی خاستگاه و خاستگاه انواع مختلف سنگ آهن در دنیا بررسی شیمی مگنتیت است، که برپایه نمودارها و الگوهای موجود امکان تفکیک کانسارهای نوع اسکارنی، رسوبی، IOCG و ماگمایی وجود دارد و برای مدل‌سازی اکتشافی نیز قابل استفاده است [۶].

در ناحیه فلززایی تکاب، کانسارها و نشانه‌های معدنی متعددی وجود دارند، که کانسار انگوران از مهم‌ترین آنها بوده که پژوهش‌های بسیاری پیرامون آن انجام شده است [برای مثال ۷-۱۰]. از دیگر کانسارهای سرب و روی می‌توان به منابع معدنی بایچه‌باغ، علم‌کندی، پشت کوه، ملا و آی‌قلعه‌سی اشاره

مگنتیت سازنده اصلی ذخایر متنوع آهن از جمله اسکارن آهن، اکسید آهن-مس-طلا (IOCG)، نوع کایرونا، ذخایر آهن نواری (BIF) و ذخایر ماگمایی آهن-تیتانیوم است [۱-۴]. بررسی‌های کانی‌نگاری و سنگ‌نگاری اطلاعات مفیدی از کانه‌های ارزشمند و باطله‌های موجود در کانسنگ ارائه می‌دهند و اندازه کانه‌ها در فرآوری و پُریارسازی و درجه آزادی آنها اهمیت زیادی دارد [۵]. شیمی مگنتیت در تولید آهن و فولاد مهم بوده و اندازه‌گیری عناصر منیزیم، وانادیوم، تیتانیوم و سایر عناصر موجود در شبکه بلوری مگنتیت ضروری است. عوامل زیان‌آور زیست‌محیطی در سنگ آهن از جمله گوگرد و فلزهای سنگین را می‌توان با بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی سنگ

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۸۹۲۹۹۴۷، پست الکترونیکی: m.ghasemi@khu.ac.ir



کرد. کانی‌سازی آهن شامل شهرک، میرجان، قالیچه‌بلاغ، چهارتاق، کوه‌بابا و ظفرآباد اشاره کرد [۱۱-۱۵]. کانسارهای آهن-منگنز دبلکو و امیرآباد و کانسارها و نشانه‌های معدنی طلای نوع کارلین، شامل زرشوران، آق‌دره، عربشاه، زرین‌آباد و قوزلو و کانسارها و نشانه‌های معدنی آرسنیک-آنتیموان-جیوه، چون مغانلو، آق‌دره، قیزقپان، زرشوران و عربشاه در ناحیه فلززایی تکاب تشکیل شده‌اند [۱۶، ۱۷].

کانسار شهرک در ۶۰ کیلومتری شرق تکاب قرار دارد و از ۱۰ توده مشخص آهن شامل شهرک ۱، شهرک ۲، شهرک ۳، گل رز، کورکورا ۱، کورکورا ۲، چشمه، سراب ۱، سراب ۲ و سراب ۳ تشکیل شده است. معانی‌جو و سالمی [۱۱] بر پایه شیمی مگنتیت آهن کورکورا ۱، نشان دادند که مقدار عناصر Ti و V کم (به ترتیب با میانگین ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۲ درصد وزنی) و Mn و Al بالا (به ترتیب با میانگین ۰/۳۳ و ۵/۳۲ درصد وزنی) بوده و در رده کانسارهای اسکارنی قرار دارند. کانسار سراب ۳ در ناحیه شهرک نیز توسط معانی‌جو و خدایی [۱۳] بررسی شد که تجزیه نقطه‌ای الکترونی کانی مگنتیت نشان دهنده مقادیر بالا تا متوسط MnO (۰/۰۹ درصد وزنی) و Al_2O_3 (۱/۵۹ درصد وزنی) و مقادیر پایین تا متوسط TiO_2 (۰/۰۳ درصد وزنی) و V_2O_5 (۰/۰۱ درصد وزنی) و خاستگاه اسکارنی برای کانسار آهن سراب ۳ بود. همچنین شیمی مگنتیت و دیگر کانی‌های اسکارنی برای تعیین خاستگاه کانسار در دیگر کانسارهای اسکارنی ایران نیز استفاده شده است [۱۸-۲۱]. از آنجا که نقش فرآیندهای گرمایی-ماگمایی در کانسارهای اسکارنی مشخص شده [۲۲] ولی برای کانسار شهرک بررسی نشده است، در این پژوهش، افزون بر بررسی شیمی مگنتیت در کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲ و تعیین خاستگاه آن و همچنین مقایسه داده‌ها با نتایج شیمی مگنتیت در کانسارهای کورکورا ۱ و سراب ۳، نقش فعالیت‌های گرمایی-ماگمایی در تشکیل مگنتیت کانسار شهرک مشخص شد.

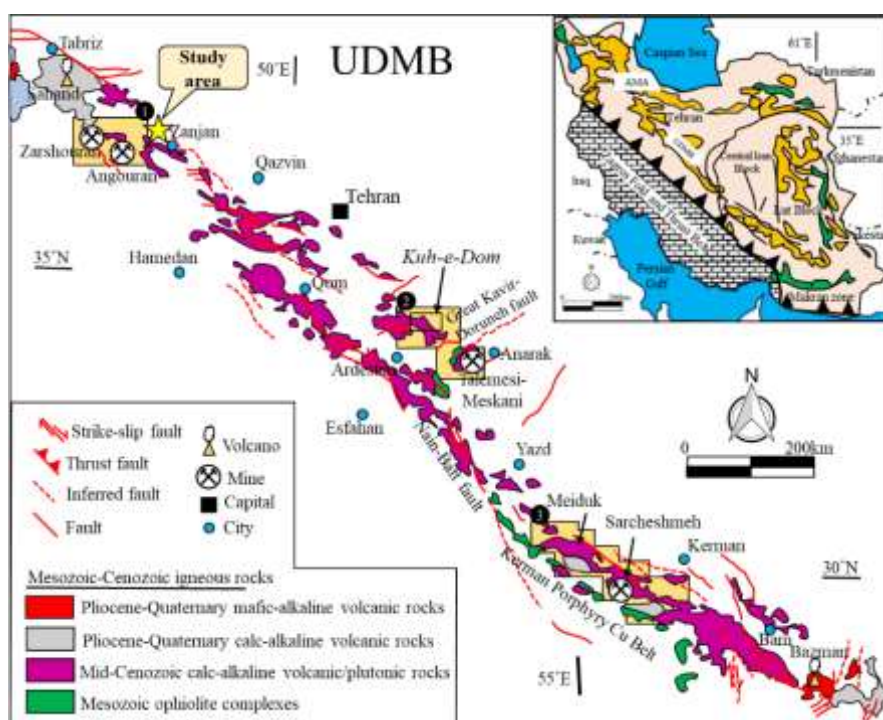
زمین‌شناسی

کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر به عنوان مهم‌ترین پهنه ماگمایی ایران میزبان بزرگترین ذخایر فلزی مس، طلا، نقره و آهن است (شکل ۱ الف). کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر شامل سه ایالت فلززایی از شمال به جنوب ایالت فلززایی تکاب [۱۶]،

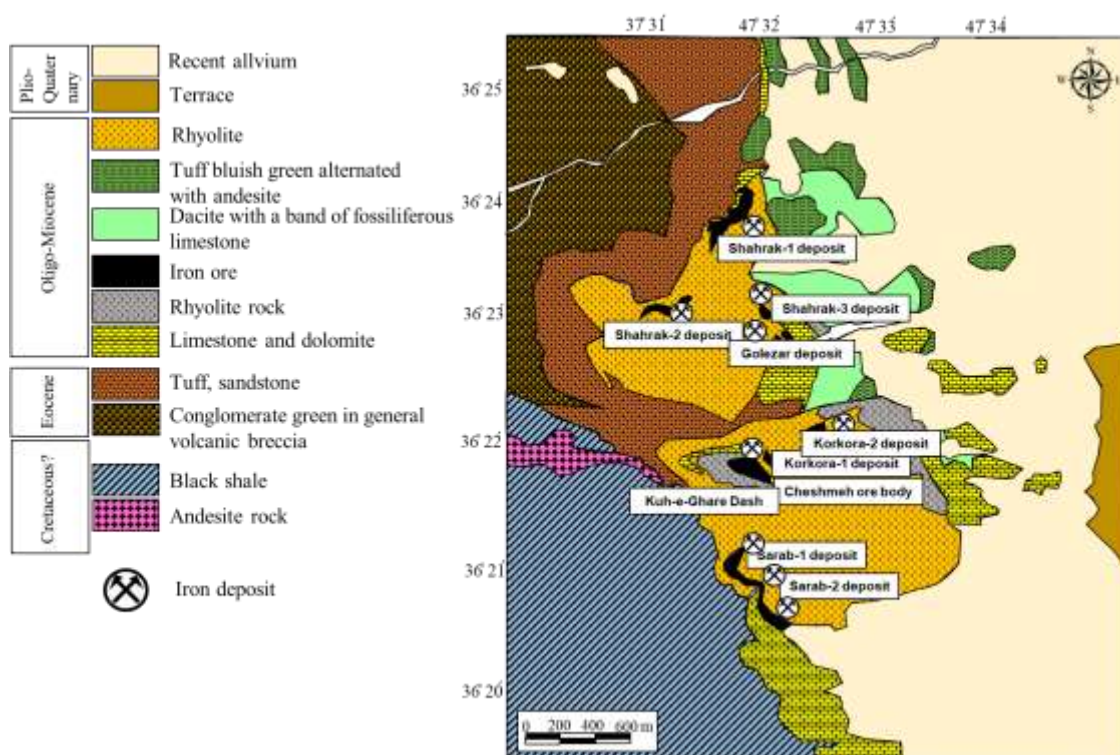
مجموعه فلززایی انارک [۲۳] و کمر بند مس پورفیری کرمان [۲۴] است (شکل ۱ ب). کانسار شهرک از ۱۰ توده مشخص آهن شامل شهرک ۱، شهرک ۲، شهرک ۳، گل رز، کورکورا ۱، کورکورا ۲، چشمه، سراب ۱، سراب ۲ و سراب ۳ تشکیل شده است (شکل ۲). عمده‌ترین واحدهای سنگی کانسار شهرک، واحد کنگلومرای و آهک ماسه‌ای، توف‌سنگی، واحد سنگ‌آهک خاکستری فسیل‌دار و افق آهن‌دار هستند که ماده‌ی معدنی شامل کانسنگ مگنتیتی، مگنتیتی-مارتیتی و مگنتیتی پیریت‌دار، به همراه سنگ‌های اسکارنی، روی سنگ‌های آهکی مرمری شده وابسته به الیگومیوسن تشکیل شده‌اند [۲۵، ۲۶].

اسکارن‌زایی در منطقه به دو صورت با سنگ مادر اولیه کربناتی و با سنگ مادر آتشفشان آواری چون توف، توف سنگی بلورین وجود دارد و دگرسانی‌های پروپیلیتی، سیلیسی و آرژیلیک رایج‌ترین نوع دگرسانی در منطقه هستند. مگنتیت و فرآورده‌های برونزادی-اکسیدی آهن‌دار چون لیمونیت، گوتیت، هماتیت، اولیژیت و مارتیت به همراه کانی‌های سولفیدی-اکسیدی مالاکیت، آزوریت، پیریت، پروتیت، اسفالریت و کالکوپیریت کانی‌های همراه کانسنگ مگنتیتی هستند که با بافت رگه-رگچه‌ای شکافه‌پرکن، جانیشینی و ساخت کارستی دیده می‌شوند. فعالیت‌های گسترده در این پهنه که در اصل مربوط به دوره‌ی زمانی سنوزوئیک هستند باعث شکل‌گیری و تزریق توده‌های نفوذی متعددی در راستای این کمر بند و در نتیجه کانسارسازی در مناطق بسیاری شده‌اند.

سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط دارای ترکیب سنگ‌شناسی آندزیت، داسیت و ریولیت و به مقدار کمتر بازالت آندزیتی، تراکی‌آندزیت و سنگ‌های آذرآواری چون توف هستند [۲۷]. سنگ‌های نفوذی در منطقه مورد بررسی بیشتر به صورت دایک، آذرین لایه یا استوک‌های کوچک دیده می‌شوند. این توده‌ها درون سنگ‌های کربناتی و سنگ‌های آتشفشانی منطقه تزریق شده‌اند و از این رو از نظر سنی جوان‌تر از آنها هستند. کانسار آهن کورکورا ۲ به شکل عدسی تا لایه‌ای بوده که بیشتر به صورت جانیشینی و پرکننده شکستگی‌های ناشی از انحلال شکل گرفته است و طولی حدود ۱۴۰ متر دارد. کانه اصلی این کانسار مگنتیت بوده، که در اصل به صورت مگنتیت توده‌ای به همراه مقادیر بالای سولفید (بیشتر پیریت) است.



شکل ۱ الف) نمایش پهنه‌های ماگمایی ایران در نقشه زمین‌شناسی ایران (برگرفته از مرجع [۲۵] با تغییرات) و ب) کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر (UDMB) با راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی که در آن سه ایالت فلززایی اصلی شمال ایالت فلززایی تکاب (۱)، مجموعه فلززایی انارک (۲) و کمر بند مس پورفیری کرمان (۳) به همراه مهمترین معادن این مناطق فلززایی نشان داده شده است (برگرفته از مراجع [۲۶، ۲۳] با تغییرات). IEMA: مجموعه ماگمایی شرق ایران؛ AMA: کمان ماگمایی البرز؛ UDMB: کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ناحیه شهرک که موقعیت کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲ همراه با دیگر کانسارهای ناحیه شهرک بر آن نشان داده شده است (برگرفته از مرجع [۲۷]).

کانه‌زایی و کانی‌نگاری

کانی‌سازی آهن در معدن سنگ آهن شهرک بیشتر به شکل لایه‌ای بوده که موقعیت چینه‌نگاری آن تا حد زیادی مشخص بوده و بخش بالایی واحد سنگی ریولیتی را دربر گرفته است. بخش بالایی واحد ریولیتی در کانسار شهرک ۲ با توف و ماسه‌سنگ و در کانسار کورکورا ۲ به طور متناوب با داسیت، توف و سنگ‌آهک پوشیده شده است. در این محل‌ها، توده‌ی آهن درون واحد ریولیتی قرار دارد. مرز توده‌ی آهن با سنگ‌های کمر پایین خود اغلب تدریجی است، به طوری که لامینه‌های آهن‌دار در سنگ‌های توفی یا کربناتی زیر توده آهن آشکارا قابل تشخیص هستند و این سنگ‌ها بیشتر اسکارنی شده‌اند. پدیده اسکارنی‌شدن در سنگ‌های توفی بیشتر از سنگ‌های کربناتی دیده می‌شود، به طوری که از جنوب توده آهن شهرک ۱ تا پیرامون توده‌های آهن شهرک ۲ و ۳ در گستره بسیار سنگ‌های توفی اسکارنی شده و دربردارنده کانی‌های اسکارنی از جمله اپیدوت، فلوگوپیت، گارنت و پیروکسن با فراوانی‌های متفاوت در هر ذخیره دیده می‌شوند.

کانسنگ مگنتیت در گستره کورکورا ۲ با فلوگوپیت به-عنوان کانی باطله همراه شده و بیشتر به‌صورت توده‌ای دیده شده است. در برخی از نمونه‌ها، فلوگوپیت و کلسیت فراوانی کمی دارند و بیشتر کانسنگ از مگنتیت است (شکل ۳ الف). پیریت نیز به‌صورت پراکنده همراه با مگنتیت دیده شده است. در نمونه‌های با مقدار پیریت بیشتر، مقدار فلوگوپیت کمتر شده و باطله کانسنگ بیشتر از نوع کلسیت و کمی کوارتز است (شکل ۳ ب). فلوگوپیت‌های ورقه‌ای و پولکی در نمونه دستی همراه با کانسنگ کورکورا ۲ بسیار دیده شده‌اند و گاهی نمونه کانسنگ از ۸۰ درصد فلوگوپیت همراه با پیریت (۵ درصد) و مگنتیت (۱۰ درصد) تشکیل شده است. نمونه‌های بخش‌های سطحی کانسار کورکورا ۲ به شدت اکسید شده و هماتیت، گوتیت و لیمونیت در اثر اکسایش شکل گرفته‌اند. کانه‌زایی در شهرک ۲ نیز بیشتر دارای بافت توده‌ای و به مقدار کمتر با بافت پراکنده است. مقدار سولفید (کانی پیریت) در شهرک ۲ نسبت به کورکورا ۲ بیشتر است و گاهی سولفید به‌صورت توده‌ای در کانسنگ مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۳ پ). برخی از نمونه‌های کانسنگ مگنتیت نیز دارای کانی‌سازی سولفیدی پیریت به‌صورت پراکنده و یا رگچه‌ای هستند (شکل ۳ ت). در شهرک ۲، فلوگوپیت بسیار کم است و کلسیت مهمترین باطله کانسار محسوب می‌شود و گاهی کلسیت و پیریت به‌صورت رگچه‌ای کانی‌سازی مگنتیت توده‌ای را قطع کرده‌اند که نشان-

گسترش رخمون‌های آهن در کانسار آهن شهرک ۲ به حدود ۷ هکتار می‌رسد و بخشی از توده آهن نیز با لایه نازکی از اسکارن پوشیده شده است. این توده از دو بخش تشکیل شده که با گسلی با روند تقریباً شمالی- جنوبی از هم جدا شده است. بخش غربی توده به طول حدود ۳۰۰ متر در راستای شمالی- جنوبی و عرض حدود ۲۲۰ متر و بخش شرقی به طول حدود ۳۰۰ متر در راستای شرقی- غربی و عرض متوسط کمتر از ۵۰ متر رخمون دارند. کمر پایین آهن از دو واحد سنگی توفی و دیوریت- لوکودیوریت تشکیل شده است که البته در همبری با آهن به شدت اسکارنی شده‌اند. توده‌ی آهن کورکورا ۲ شامل یک رخمون است که در راستای تقریبی شرقی- غربی گسترش دارد. طول این رخمون به حدود ۴۰۰ متر و عرض آن به طور متوسط به ۵۰ تا ۶۰ متر می‌رسد. بخش‌هایی از توده آهن در جنوب رخمون آن در زیر لایه‌ای از اسکارن قرار دارد. شیب توده آهن حدود ۲۵ تا ۱۵ درجه و به سوی جنوب‌شرق در بخش غربی توده بوده و در بخش شرقی توده، شیب آهن به طرف جنوب است. توده آهن کورکورا ۲ درون پهنه اسکارنی شده قرار دارد، به طوری که شمال (کمر بالا) و جنوب (کمر پایین) افق آهن را پهنه اسکارنی تشکیل داده‌اند.

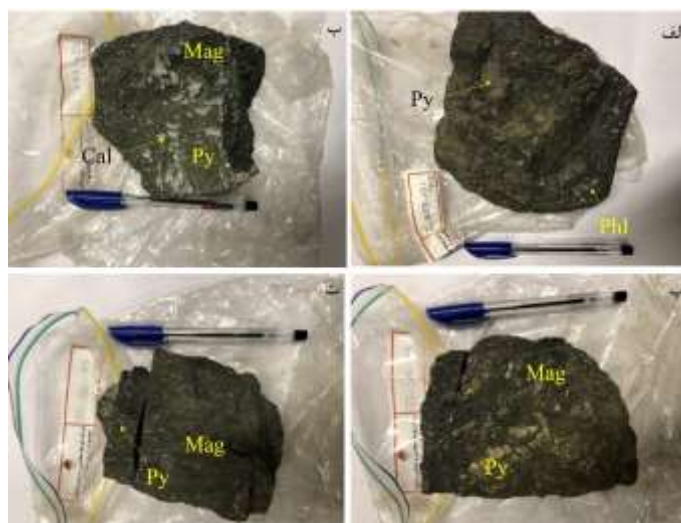
روش بررسی

برای بررسی‌های کانی نگاری، تعداد ۲۵ مقطع نازک‌صیقلی از نمونه‌های کانسنگی شهرک ۲ و کورکورا ۲ از ناحیه معدنی شهرک تهیه و با میکروسکوپ نوری-بازتابی زایس مدل Axioplan 2 در دانشگاه خوارزمی و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران بررسی شدند. همچنین پس از بررسی‌های میکروسکوپی، تعداد ۲ مقطع نازک‌صیقلی از کانسنگ مگنتیتی انتخاب و با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دانشگاه خوارزمی تهران بررسی گردیدند. از تعداد ۱۱ نمونه کانسنگ مگنتیت پس از خردایش، کانی مگنتیت خالص (با کمترین آغشتگی به کانی‌های دیگر) زیر میکروسکوپ دوچشمی جدا شد و سپس برای سنجش عناصر در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، تجزیه شیمیایی شدند. برای این منظور، نخست نمونه‌ها با خردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خرد شده و سپس با آگات به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. سپس ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین مقدار عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر با طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه شیمی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه شد.

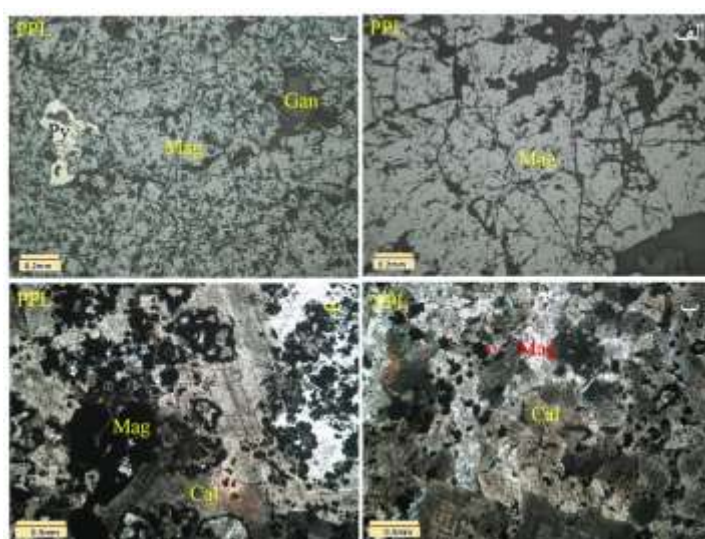
نیز دارای فراوانی ۱۰ تا ۱۲ درصد بوده و بیشتر در فضای بین بلورهای مگنتیت تشکیل شده است. بلورهای خودشکل، نیمه-خودشکل و بی‌شکل مگنتیت در اندازه‌های ۵ تا ۴۰۰ میکرون دیده می‌شوند (شکل ۴ الف). بلورها دارای شکستگی بوده و اغلب حفره‌دار هستند. برخی از این حفره‌ها با کانی‌های باطله پر شده‌اند. در گستره شهرک ۲ نیز، بافت توده‌ای مگنتیت با بلورهای خودشکل و نیمه خودشکل مگنتیت در اندازه‌های ۵ تا ۵۰۰ میکرون در متن نمونه دیده می‌شود (شکل ۴ ب).

دهنده تاخیری بودن فاز سولفیدی نسبت به فاز اکسیدی در کانسار است.

در کانسار کورکورا ۲، مگنتیت کانی‌سازی اصلی نمونه بوده و تقریباً ۷۰ تا ۹۰ درصد مقاطع تهیه شده را تشکیل داده است. کانی‌سازی باطله به ترتیب فراوانی شامل فلوگوپیت، کلسیت، کانی‌های رسی، اکتینولیت و کلریت است. در شهرک ۲، کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی، فلوگوپیت و کلریت کانی‌های باطله همراه با کانسنگ آهن هستند. مگنتیت دارای بافت توده-ای بوده و ۶۵ تا ۷۰ درصد مقاطع را تشکیل داده است. پیریت



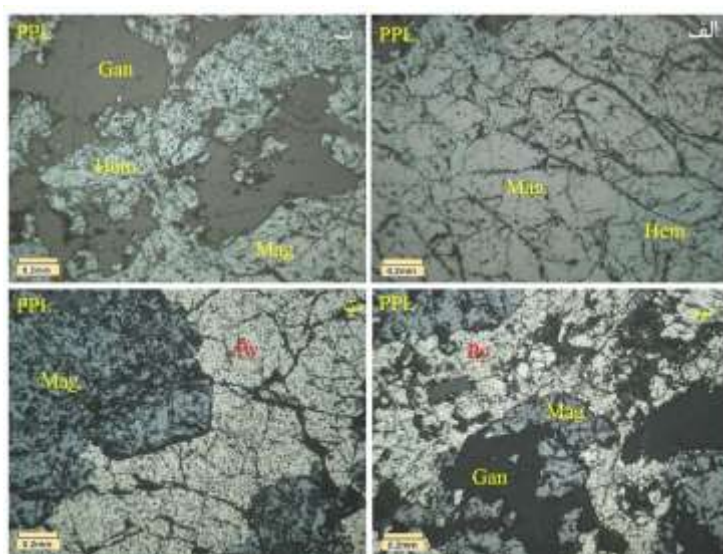
شکل ۳ تصاویر نمونه دستی کانسنگ مگنتیت در ناحیه معدنی شهرک. الف) کانسنگ مگنتیت به صورت توده‌ای با فراوانی کم پیریت در کانسار کورکورا ۲؛ ب) کلسیت و پیریت که با کاهش مقدار فلوگوپیت کانسنگ، در کانسار کورکورا ۲ افزایش یافته‌اند، پ) پیریت توده‌ای همراه با مگنتیت توده‌ای در کانسار شهرک ۲ و ت) پیریت با بافت پراکنده و رگچه‌ای در کانسنگ مگنتیتی در کانسار شهرک ۲.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی الف) ریزبلورهای مگنتیت در بافت توده‌ای در گستره کانسار کورکورا ۲؛ ب) میانبار پیریت در مگنتیت توده‌ای در گستره کانسار شهرک ۲، پ و ت) از کانی‌سازی مگنتیت پراکنده ریزبلور در زمینه کربناتی در گستره‌های کورکورا ۲ (پ) و شهرک ۲ (ت). (ت). (Mag): مگنتیت، Gan: کانی باطله، Cal: کلسیت [۲۸].

در برخی از نمونه‌ها، میانبارهایی از پیریت نیز وجود دارند. افزون بر بافت توده‌ای، مگنتیت ریزبلور در هر دو گستره کورکورا ۲ و شهرک ۲ به صورت پراکنده (با اندازه تا حدود ۱۰۰ میکرون) و بلورهای خودشکل تا بی‌شکل در زمینه کربناتی دیده شده‌اند (شکل‌های ۴ پ و ت). اگرچه مقداری کوارتز و فلوگوپیت نیز در نمونه‌های مورد بررسی وجود دارد، ولی مگنتیت‌ها بیشتر به صورت میانبار در کلسیت هستند. فراوانی این بافت در گستره شهرک ۲ بیشتر از کورکورا ۲ بوده و از سویی، مقادیری از کانی‌های رسی نیز در شهرک ۲ همراه با کلسیت دیده شده است. در اثر پدیده‌های اکسایش سطحی در راستای شکستگی‌ها و درزه‌ها، مگنتیت مارتیتی شده است (شکل ۵ الف). طی مارتیتی شدن، مگنتیت از لبه و در محل شکستگی‌ها، به مارتیت تبدیل می‌شود. این فرآیند در بخش‌های سطحی کانسار دیده شده است و نمونه‌های عمقی مارتیتی نشده‌اند که به دلیل مقدار بالای گریزندگی اکسیژن در بخش‌های بالایی کانسار است که به احتمال بسیار در اثر نفوذ آب‌های جوی به بخش بالایی کانسار و چرخش آب در سطح بالایی، گریزندگی اکسیژن افزایش یافته و شرایط اکسایشی ایجاد شده است. شدت مارتیتی شدن در پهنه‌های اکسیدی و سطحی کانسار شهرک ۲ گسترده‌تر بوده (شکل ۵ ب) و گاهی کامل به هماتیت مارتیت تبدیل شده‌اند. در کانسار شهرک ۲، هماتیت اولیه به مقدار کمی دیده شده است. گوتیت و لیمونیت از انواع آبدار اکسیدهای آهن در گستره شهرک و

فراورده اکسایش مگنتیت در بخش‌های سطحی کانسار هستند. پیریت فراوان‌ترین و اصلی‌ترین کانی سولفیدی گستره آهن شهرک است. اگرچه کالکوپیریت و پیروتیت نیز در برخی از گستره‌های شهرک به‌ویژه در کورکورا ۱ گزارش شده‌اند، ولی در مقاطع میکروسکوپی مورد بررسی به مقدار بسیار کم دیده شده‌اند. در گستره کورکورا ۲، پیریت‌های خودشکل در زمینه مگنتیت و یا به صورت توده‌ای و یا پرکننده فضای خالی در مگنتیت‌ها (به صورت رگچه) تشکیل شده‌اند (شکل ۵ پ). از آنجا که رگچه‌های پیریتی کانسنگ مگنتیتی را قطع کرده‌اند، به احتمال بسیار پیریت پس از مگنتیت تشکیل شده است. گاهی پیریت و پیروتیت همراه با کانسار مگنتیتی در کورکورا ۲ دیده می‌شوند. در کانسار شهرک ۲، فراوانی پیریت بیشتر بوده و در برخی از مقاطع به ۲۰ درصد نیز رسیده است. پیریت بیشتر با مگنتیت به صورت توده‌ای دیده شده است (شکل ۵ ت). بافت غربالی در این پیریت‌ها نیز وجود دارد. در بخش‌هایی از کانسار، پیریت به صورت توده‌ای تشکیل شده و مگنتیت با فراوانی جزئی و به صورت میانبارهای ریز تا متوسط در آن شکل گرفته است. در مقطعی، بلورهای خودشکل و نیمه خودشکل مگنتیت به صورت انباشت در دو سوی رگچه پیریتی دیده می‌شوند. افزون بر آن، تک بلورهای به نسبت درشتی از این کانی به فاصله بین بلورهای پیریت قرار دارند. پیروتیت نیز در کانسار شهرک ۲ دیده شده که اغلب با مگنتیت است.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از مارتیتی شدن مگنتیت در گستره‌های کورکورا (الف) و شهرک (ب؛ پ) پیریت که فضای بین بلورهای مگنتیت را در کانسار کورکورا ۲ پر کرده است؛ ت) همراهی پیریت و مگنتیت در کانسار شهرک ۲. Gan: کانی باطله، Mag: مگنتیت، Hem: هماتیت، Py: پیریت (۲۸).

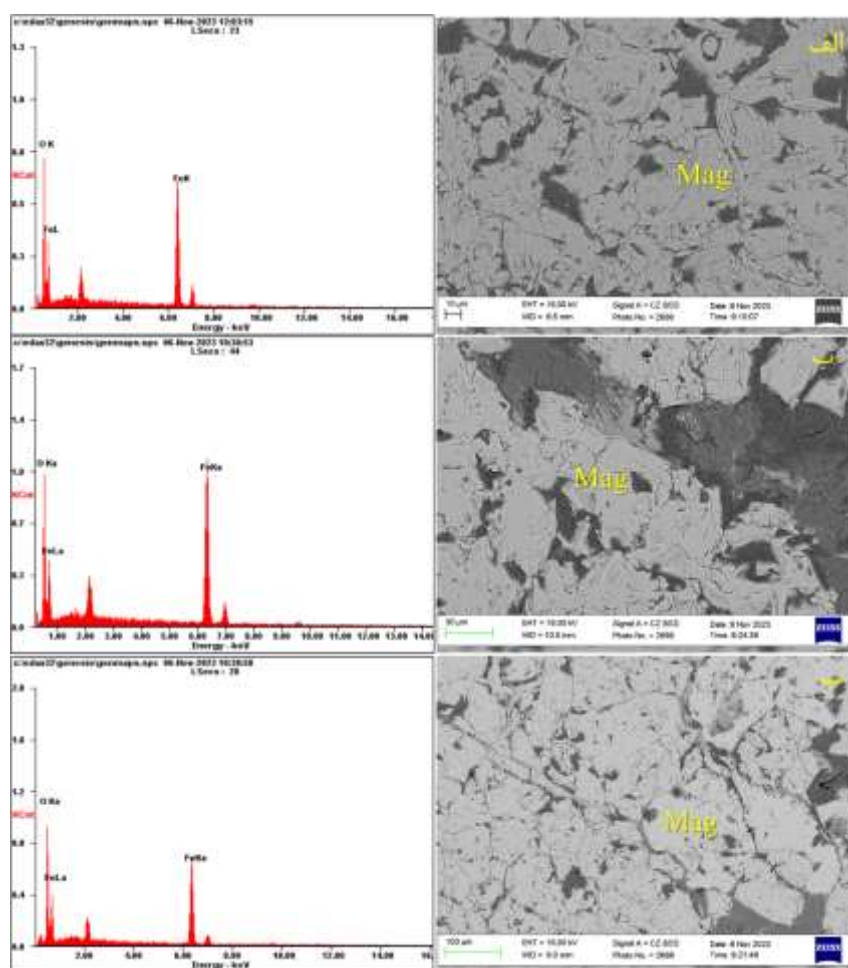
شیمی کانی

بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که مگنتیت ظاهری یکنواخت دارد و منطقه‌بندی در آن دیده نشد. میانبراهایی از کانی‌های سولفیدی (پیریت) همراه با کانی‌های باطله در آن وجود دارند. نتایج تجزیه شیمیایی مگنتیت‌های جداسده در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار MnO در مگنتیت شهرک ۲، از ۰/۰۶ تا ۰/۲۷ با میانگین ۰/۱۶ درصد وزنی بوده و

این مقدار در مگنتیت کورکورا ۲ از ۰/۰۵ تا ۰/۱۷ با میانگین ۰/۰۹ درصد وزنی است که برای کورکورا ۱ از ۰/۰۱ تا ۰/۴۶ با میانگین ۰/۳۳ درصد وزنی [۱۱] و برای سراب ۳ از ۰/۰۰ تا ۰/۵۹ با میانگین ۰/۰۷ درصد وزنی [۱۳] است. در بررسی‌های میکروسکوپی و میکروسکوپ الکترونی روبشی کانی مستقل منگنز در نمونه‌های کانسنگ دیده نشد (شکل ۶).

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های مگنتیت کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲ به روش‌های ICP-MS و طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی X (XRF).

نمونه	SH-1	SH-2	SH-3	SH-4	SH-5	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	KK-5	KK-6
SiO ₂ (wt%)	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۱
Al ₂ O ₃	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۲	۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۴
TiO ₂	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۱
MnO	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۲	۰.۱	۰.۲	۰.۳	۰.۲	۰.۱	۰.۱
MgO	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۲	۰.۵	۰.۵	۰.۴	۰.۷	۰.۸	۰.۳	۰.۴
CaO	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۵	۰.۴
Na ₂ O	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
K ₂ O	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
SO ₃	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
P ₂ O ₅	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
As (ppm)	۴۶۰	۶۰	۴۵۰	۶۰	۲۲۰	۴۰۰	۳۱۰	۱۶۰	۳۲۰	۴۸۰	۲۲۰
Ba	۱۵۰	۱۲۰	۱۹۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۷۰	۷۰	۹۰	۲۰۰	۱۰۰
Be	۰.۴	۰.۳	۰.۷	۰.۱	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۶	۰.۵
Bi	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Cd	۰.۵	۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۶	۰.۴	۰.۵	۰.۳	۰.۳	۰.۰
Ce	۴۳	۰.۳	۳۶	۰.۱	۲۶	۲۷	۱۹	۱۳	۲۲	۳۴	۳۰
Co	۲۲۰	۱۶۰	۲۱۰	۱۳۰	۱۷۰	۲۱۰	۱۹۰	۱۷۰	۱۸۰	۲۳۰	۱۶۰
Cr	۱۹۰	۱۹۰	۱۵۰	۲۲۰	۲۴۰	۱۷۰	۲۱۰	۲۰۰	۱۸۰	۱۴۰	۲۳۰
Cs	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Cu	۳۳۰	۱۴۰	۲۴۰	۲۲۰	۳۴۰	۳۲۰	۳۲۰	۴۰۰	۲۹۰	۲۲۰	۲۳۰
Dv	۰.۲	۰.۱	۰.۲	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Er	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Eu	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Ga	۵۳۰	۶۷۰	۵۲۰	۶۲۰	۵۰۰	۵۲۰	۴۷۰	۴۹۰	۵۳۰	۵۱۰	۵۵۰
Gd	۰.۳	۰.۲	۰.۳	۰.۲	۰.۳	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۳	۰.۳
Hf	۰.۲	۰.۱	۰.۱	۰.۳	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۱	۰.۲
Hg	۰.۵	۰.۴	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۴
Ho	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
In	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۱
La	۳۰	۰.۹	۴۸	۰.۸	۱.۲	۴.۱	۱.۲	۱.۱	۱.۹	۳.۱	۲.۵
Li	۵۰	۴۰	۴۰	۳.۴	۳.۴	۴.۲	۳.۹	۳.۷	۳.۹	۴.۵	۴.۰
Lu	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Mo	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۵	۰.۰	۰.۰
Nb	۰.۷	۰.۶	۰.۶	۱.۰	۰.۸	۰.۷	۰.۹	۱.۰	۰.۸	۰.۷	۰.۷
Nd	۱۰	۰.۴	۱۰	۰.۳	۰.۵	۰.۵	۰.۶	۰.۴	۰.۷	۱.۰	۰.۹
Ni	۱۹۰	۲۷۰	۱۴۰	۲۶۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۱۰	۱۳۰	۱۴۰	۲۰۰
Pb	۲۴۰	۲۵۰	۲۷۰	۳۱۰	۲۹۰	۳۱۰	۲۵۰	۲۶۰	۲۰۰	۲۶۰	۲۶۰
Pr	۰.۳	۰.۱	۰.۲	۰.۱	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۲	۰.۳	۰.۲
Rb	۱.۸	۳.۷	۱.۰	۴.۲	۱.۰	۰.۸	۰.۸	۱.۲	۱.۳	۱.۳	۱.۷
Sb	۱.۴	۱.۱	۴.۵	۱.۵	۵.۱	۴.۶	۶.۲	۶.۹	۵.۳	۳.۴	۳.۵
Sc	۱.۰	۰.۸	۰.۸	۱.۰	۰.۸	۰.۷	۰.۵	۰.۷	۰.۸	۱.۰	۰.۹
Sm	۰.۲	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Sn	۲.۸	۲.۳	۲.۲	۶.۱	۱.۲	۱.۴	۱.۴	۱.۴	۱.۷	۴.۰	۳.۶
Sr	۲۷۰	۱۵۰	۳۸۰	۱۳۰	۱۷۰	۱۹۰	۱۲۰	۱۸۰	۱۸۰	۲۷۰	۱۹۰
Tb	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Te	۰.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۰	۰.۱	۰.۳	۰.۱	۰.۳	۰.۱	۰.۰	۰.۱
Th	۰.۴	۰.۴	۰.۵	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۲	۰.۳	۰.۴	۰.۴
Tl	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Tm	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
U	۰.۶	۰.۱	۰.۶	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۵	۰.۲	۰.۴	۰.۷	۰.۳
V	۹۰۰	۳۸۶۰	۷۲۰	۳۷۹۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۱۸۱۰	۲۴۰۰	۱۷۵۰	۶۴۰	۱۶۳۰
W	۲.۵	۲.۷	۲.۰	۱.۷	۲.۳	۱.۴	۳.۰	۱.۱	۱.۷	۱.۹	۱.۲
Y	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Yb	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۱	۰.۰
Zn	۳۲۰	۲۶۰	۳۲۰	۲۶۰	۵۷۰	۵۲۰	۵۸۰	۸۴۰	۵۸۰	۳۲۰	۵۹۰
Zr	۴۰	۲۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۳۰	۳۰	۳۰	۴۰	۳۰



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مگنتیت کورکورا ۲ (الف) و مگنتیت‌های شهرک ۲ (ب و پ).

است. همچنین وجود کلسیم نیز در مگنتیت به احتمال بسیار به دلیل میانبارهای کربناتی در مگنتیت باشد.

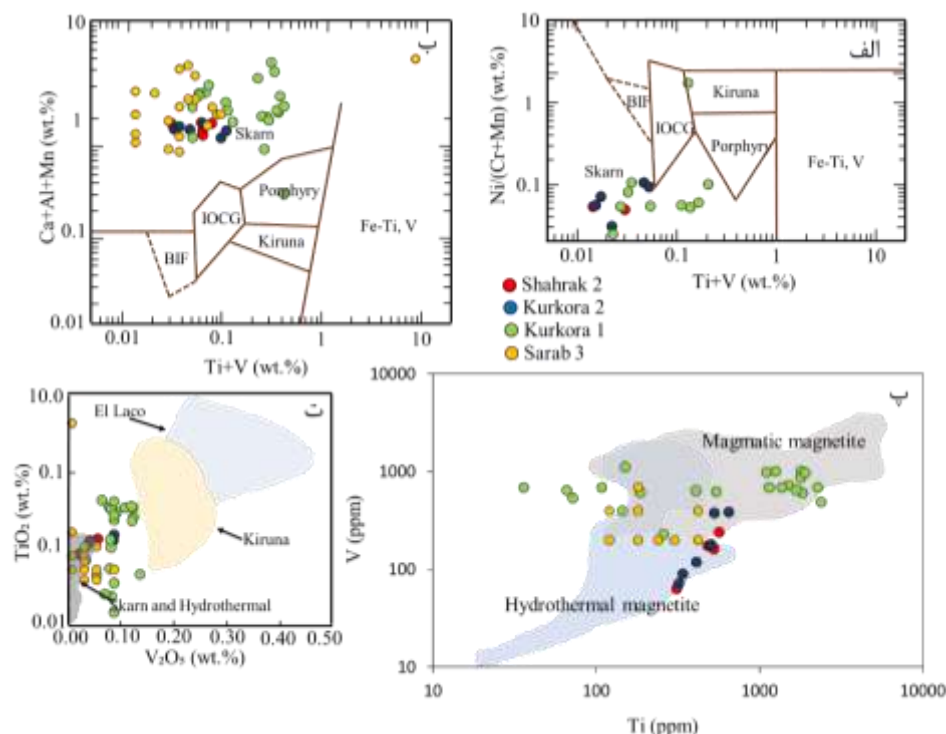
بحث

انواع ذخایر آهن بر پایه تجزیه شیمیایی و با استفاده از نمودارهای ارائه شده [۱، ۶، ۲۹-۳۲]، از هم قابل تفکیک هستند. بر این اساس، به منظور رده‌بندی کانه‌زایی مگنتیت در شهرک ۲ و کورکورا ۲ از نمودارهای $Ti+V$ نسبت به $Ca+Al+Mn$ و $Ni/(Cr+Mn)$ نسبت به $Ti+V$ که برای تفکیک کانسارهای اسکارن، IOCG، BIF، کایرونا، مس پورفیری و ذخایر آهن-تیتان-وانادیوم کاربرد دارد [۳۱]، استفاده شد که داده‌های این پژوهش در گستره کانسارهای اسکارنی واقع شده (شکل ۷ الف و ب) که شبیه به داده‌های مگنتیت ارائه شده از سراب ۳ و کورکورا ۱ هستند [۱۱، ۱۳]. در کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲، سه عنصر Ca ، Al و Mg غنی‌شدگی نشان می‌دهند که با کانسارهای آهن نوع اسکارنی همخوانی خوبی دارد.

مقادیر NiO از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۳ درصد در شهرک ۲ و ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ درصد وزنی در کورکورا ۲، Al_2O_3 از ۰/۲۲ تا ۰/۴۴ درصد در شهرک ۲ و ۰/۳۳ تا ۰/۴۴ درصد وزنی در کورکورا ۲، MgO از ۰/۳۳ تا ۰/۸۰ درصد در شهرک ۲ و ۰/۲۳ تا ۰/۷۷ درصد وزنی در کورکورا ۲، TiO_2 از ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ درصد در شهرک ۲ و از ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ درصد وزنی در کورکورا ۲، V_2O_5 از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ درصد در شهرک ۲ و ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ درصد در کورکورا ۲، SiO_2 از ۰/۰۰ تا ۰/۱۰ درصد در شهرک ۲ و ۰/۰۱ تا ۰/۱۰ درصد وزنی در کورکورا ۲، CaO از ۰/۳۴ تا ۰/۴۶ درصد در شهرک ۲ و ۰/۲۶ تا ۰/۴۳ درصد وزنی در کورکورا ۲ و Cr_2O_3 از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ درصد در شهرک ۲ و ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۴ درصد وزنی در کورکورا ۲ هستند (جدول ۱). گستره مقادیر آن اکسیدها نزدیک به مقادیر آنها در مگنتیت-های کورکورا ۱ و سراب ۳ است (جدول ۲؛ [۱۱، ۱۳]). عناصری چون Cr ، Ni و V در ساختار مگنتیت دیده شده

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های مگنتیت در چند کانسار گستره شهرک [۱۱، ۱۳] همراه با انواع دیگر کانسارهای آهن اندازه‌گیری نشده [۳۳].

نوع نشانه		Si (Wt%)	Al (Wt%)	Mg (Wt%)	Ti (Wt%)	Mn (Wt%)	Ca (Wt%)	K (Wt%)	Cr (Wt%)	Zn (Wt%)	Cu (Wt%)	Ni (Wt%)	V (Wt%)
IOCG (n-II)	Mean	۰.۱۶۳	۰.۱۰۹	۰.۱۷۱	۰.۰۴۲	۰.۰۴۵	۰.۰۲۵	۰.۰۰۹	۰.۰۱۳	۰.۰۴۳	۰.۰۴۴	۰.۰۲۵	۰.۰۳۹
	Min	۰.۰۰۸	۰.۰۲۵	۰.۰۰۷	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۳۳	۰.۰۲۴	۰.۰۱۸	۰.۰۰۸
	Max	۰.۵۵۵	۰.۲۴۷	۱.۱۷۵	۰.۱۳۱	۰.۱۲۸	۰.۱۱۹	۰.۰۲۸	۰.۰۷۷	۰.۰۵۴	۰.۰۹۳	۰.۰۳۱	۰.۱۱۶
Kiruna (n=7)	Mean	۰.۰۴۷	۰.۰۵۳	۰.۰۵۷	۰.۱۵۴	۰.۰۳۷	۰.۰۱۴	۰.۰۰۵	۰.۰۱۲	۰.۰۴۷	۰.۰۳۴	۰.۰۴۸	۰.۰۲۸
	Min	۰.۰۰۱	۰.۰۱۸	۰.۰۰۵	۰.۰۰۹	۰.۰۱۴	۰.۰۱۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۸	۰.۰۰۴	۰.۰۲۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶۲
	Max	۰.۱۱۹	۰.۰۰۱	۰.۱۹۱	۰.۴۳۱	۰.۱۰۱	۰.۰۲۲	۰.۰۰۱	۰.۰۱۸	۰.۰۶۵	۰.۰۶۴	۰.۱۱۶	۰.۴۷۹
BIF (n=4)	Mean	۰.۱۳۸	۰.۰۳۶	۰.۰۱۳	۰.۰۱۴	۰.۰۱۸	۰.۰۰۹	۰.۰۰۳	۰.۰۲۱	۰.۰۶۱	۰.۰۳۱	۰.۰۲۹	۰.۰۰۵
	Min	۰.۰۰۲	۰.۰۱۴	۰.۰۰۷	۰.۰۰۹	۰.۰۱۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۱۴	۰.۰۳۴	۰.۰۲۴	۰.۰۲۵	۰.۰۱۱
	Max	۰.۲۹۶	۰.۰۵۶	۰.۰۱۸	۰.۰۲۲	۰.۰۳۲	۰.۰۱۵	۰.۰۰۵	۰.۰۴۱	۰.۰۸۴	۰.۰۴۷	۰.۰۳۹	۰.۰۲۲
Skarn (n=15)	Mean	۰.۲۰	۰.۱۸	۰.۴۳۱	۰.۰۳۵	۰.۱۴۳	۰.۰۶۱	۰.۰۰۸	۰.۰۰۳	۰.۰۶۴	۰.۰۵۸	۰.۰۲۸	۰.۰۰۶
	Min	۰.۰۰۹	۰.۰۲۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۴	۰.۰۴۲	۰.۰۳۴	۰.۰۲۱	۰.۰۰۸
	Max	۰.۶۲۸	۰.۶۹۲	۲.۶۲۳	۰.۱۷۱	۰.۴۴۵	۰.۳۰۸	۰.۰۲۳	۰.۳۶۷	۰.۱۱۲	۰.۳۳۵	۰.۰۶۹	۰.۰۰۸
Korkora 1	Mean	۰.۰۲۳	۵.۲۲	۰.۰۲۳	۰.۰۰۴۹	۰.۰۱۳	۰.۰۰۹۴	NA*	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۶	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۴	۰.۰۰۲
	Min	۰.۰۰۱	۳.۲۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴	NA*	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۲
	Max	۰.۱۱	۵.۹۱	۰.۴۶	۰.۱۱	۰.۰۲	۰.۰۲۵	NA*	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴۴
Sarab 3	Mean	۰.۳۲۸	۰.۸۴	۰.۵۵۱	۰.۰۰۷	۰.۰۷۶	۰.۰۰۳	NA*	۰.۰۰۲	NA*	۰.۰۰۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۹
	Min	۰.۰۰۱	۰.۲۵	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	NA*	۰.۰۰	NA*	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
	Max	۲.۶۶	۲.۱۶	۲.۶۷	۰.۰۰۷	۰.۵۶	۰.۸۸	NA*	۰.۰۰۱	NA*	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴
Korkora 2	Mean	۰.۱۰۰	۰.۳۸۷	۰.۳۹۶	۰.۰۴۶	۰.۰۹۰	۰.۳۷۳	۰.۰۴۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۲۷
	Min	۰.۰۰۰	۰.۳۳۳	۰.۲۳۸	۰.۰۲۲	۰.۰۵۵	۰.۲۶۸	۰.۰۲۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۱۳
	Max	۰.۱۰۰	۰.۴۴۲	۰.۷۷۶	۰.۰۶۵	۰.۱۷۷	۰.۴۳۶	۰.۰۴۹	۰.۰۰۴	۰.۰۰۷	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۶۹
Shahrak 2	Mean	۰.۰۸۰	۰.۳۳۲	۰.۵۱۴	۰.۰۴۸	۰.۱۶۲	۰.۴۰۴	۰.۰۳۹	۰.۰۰۳	۰.۰۰۷	۰.۰۰۴	۰.۰۰۲	۰.۰۲۹
	Min	۰.۰۰۰	۰.۲۲۲	۰.۲۳۳	۰.۰۳۱	۰.۰۶۵	۰.۳۴۹	۰.۰۲۵	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۱۱
	Max	۰.۱۰۰	۰.۴۴۳	۰.۸۰۲	۰.۰۵۶	۰.۲۷۸	۰.۴۶۰	۰.۰۴۸	۰.۰۰۳	۰.۰۱۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳	۰.۰۴۳

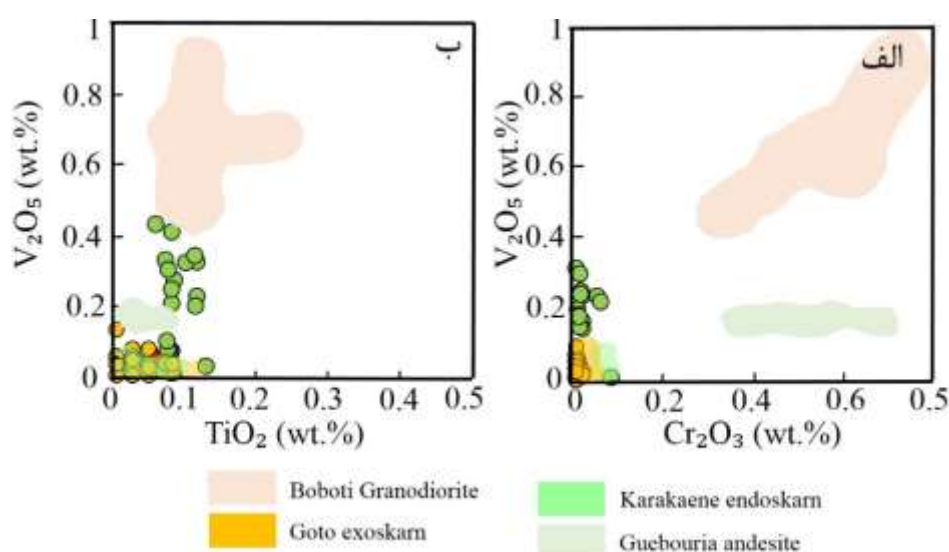


شکل ۷ الف) نمودار تغییرات $Ti+V$ نسبت به $Ni/(Cr+Mn)$ [۱]؛ ب) نمودار تغییرات $Ti+V$ نسبت به $Ca+Al+Mn$ ؛ پ) نمودار تغییرات مقادیر Ti نسبت به V برای مگنتیت، نواحی آبی و قرمز به ترتیب مربوط به مگنتیت‌های آذرین و گرمایی هستند [۳]؛ و ت) نمودار تغییرات اکسیدهای Ti و V در مگنتیت‌های کانسارهای کایرونای سوئد و ال‌لاکوی شیلی [۳۱]. مقادیر نتایج برای مگنتیت کورکورا ۱ برگرفته از مرجع [۱۱] و سراب ۳ برگرفته از مرجع [۱۳] هستند.

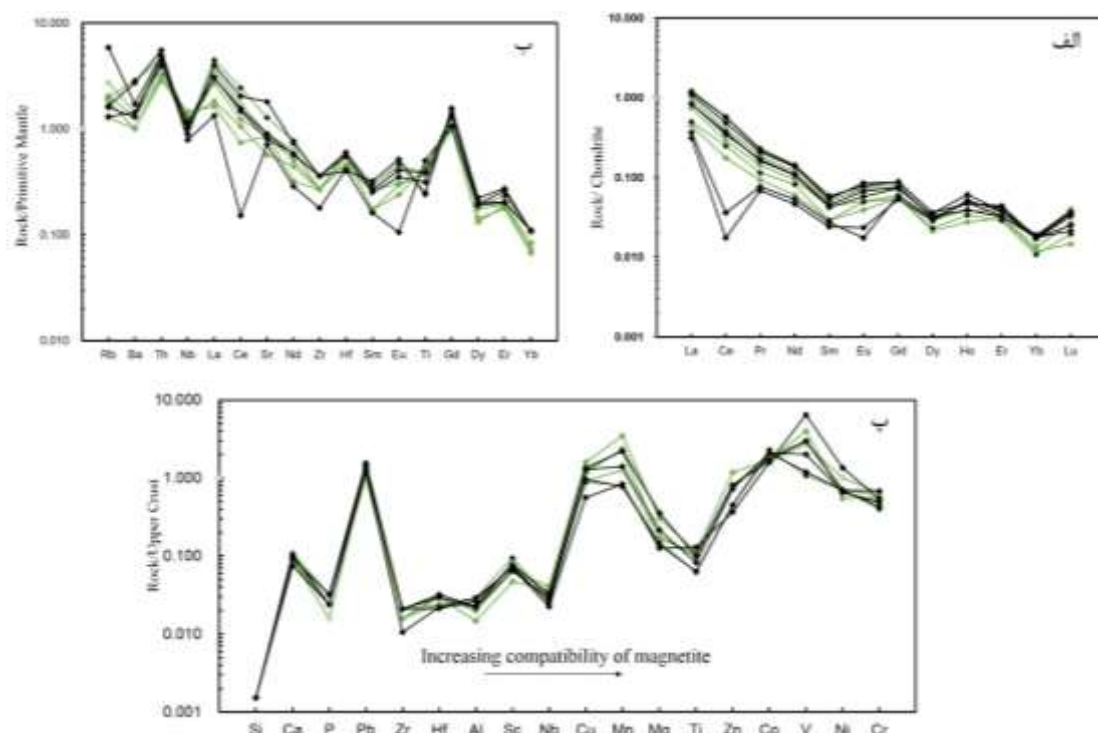
سنگ‌های با درجه دگرگونی کم است [۳۷]. مقادیر Cr_2O_3 ، TiO_2 ، V_2O_5 در مگنتیت آذرین از گرانودیوریت کانسار بوبوتی و آندزیت کانسار گوبوریا با خاستگاه آذرین بالاتر است [۳۷]. با توجه به شکل ۸، دیده می‌شود که غلظت V_2O_5 در مگنتیت‌های مورد بررسی بسیار نزدیک به مگنتیت‌های کانسارهای با خاستگاه اسکارنی است. البته مگنتیت‌های کورکورا ۱ [۱۱] تمایل به گستره مگنتیت‌های آذرین نشان می‌دهند.

برای بررسی الگوی تغییرات عناصر کمیاب و غنی‌شدگی و تهی‌شدگی، نتایج مگنتیت کورکورا ۲ و شهرک ۲ نسبت به کندریت (شکل ۹ الف) و گوشته اولیه (شکل ۹ ب)، بهنجار شده است [۳۸]. عناصر توریم، روبیدیوم و لانتانیم غنی‌شدگی و عنصر زیرکنیوم تهی‌شدگی نشان می‌دهند. مگنتیت‌ها نسبت به عناصر خاکی نادر سبک (LREE) غنی‌شدگی و نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) تهی‌شدگی نشان می‌دهند که با مگنتیت‌های گرمابی در اسکارن‌های آهن همخوانی دارند. از آنجا که غلظت برخی از عناصر خاکی نادر در مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲ کمتر از حد تشخیص است، تعدادی از این عناصر با غلظت‌های میانگین به نسبت بالا برای سنجش سازگاری عناصر در مگنتیت انتخاب شدند؛ سپس مقادیر عناصر خاکی نادر نسبت به پوسته بالایی بهنجار شد [۳۹] (شکل ۹ پ).

با توجه به شکل ۷ پ [۳۴]، مگنتیت‌های کانسارهای کورکورا ۱ و ۲، شهرک ۲ و سراب ۳ در هر دو گستره کانسارهای ماگمایی و گرمابی قرار می‌گیرند. مگنتیت‌های کانسارهای ماگمایی دارای مقادیر Ti و V بیشتر از مگنتیت گرمابی هستند [۳۱]. این امر، نشان‌دهنده فراوانی این عناصر در ماگما و ضرایب توزیع بالای آنها در مگنتیت متبلور شده از ماگماست [۳۱]. نقش فعالیت‌های ماگمایی و در پی آنها، گرمابی در بسیاری از کانسارهای ماگمایی چون اسکارنی، اکسید آهن-آپاتیت (IAO) و IOCG بیشتر بررسی شده است [۲۲]. از این رو می‌توان گفت که کانی‌سازی اسکارنی در شهرک در ارتباط با فرآیندهای ماگمایی-گرمابی است. نموداری برای مگنتیت‌های کانسارهای کایرونای سوئد و ال‌لاکوی شیلی توسط نیستروم و هنریکز [۳۵] ارائه شده (شکل ۷ ت) که براساس آن، مگنتیت‌های مورد بررسی در گستره گرمابی و اسکارن قرار دارند. برخی از نمونه‌ها تمایل به گستره ماگمایی نوع کایرون نشان می‌دهند که گویای فعالیت‌های ماگمایی-گرمابی در کانسار شهرک است. شوارتز و ملچر [۳۶] با بررسی گسترده بر شیمی مگنتیت کانسارهای آهن گوتی، بوبوتی، گوبوریا و کاراکان در فلام سنگال به این نتیجه رسیدند که مگنتیت در کانسارهای اسکارن، در مقایسه با مگنتیت در گرانودیوریت و آندزیت، غلظت V و Cr کمی دارد (شکل ۸). با بررسی مگنتیت‌های اندواسکارن کاراکانه دیده شد که مقدار Cr_2O_3 ، TiO_2 ، V_2O_5 در مگنتیت کم است که این شاخص مگنتیت‌های اسکارن و



شکل ۸. نمودارهای تغییرات مقادیر V_2O_5 نسبت به الف) Cr_2O_3 و ب) TiO_2 برای مگنتیت‌های گستره شهرک [۳۶]. نشانه‌ها شبیه به شکل ۶ هستند.



شکل ۹ بهنجارشدن مگنتیت‌های کورکورا ۲ (خطوط سیاه‌رنگ) و شهرک ۲ (خطوط سبزرنگ) نسبت به کندریت (الف) و گوشته اولیه [۳۸] (ب) و (پ) ترکیب پوسته بالایی [۳۹].

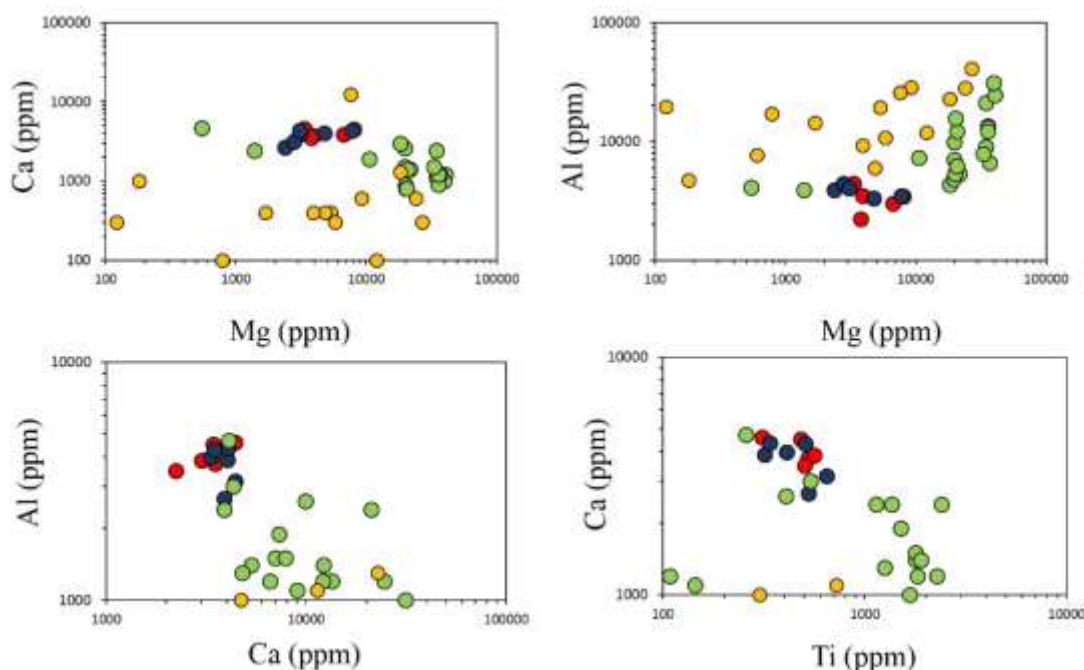
برای گالیوم، آلومینیوم و تیتانیوم در برابر وانادیوم دیده شد. همبستگی مثبت بین Ca و Sr نشان می‌دهد که این عناصر دارای میل زمین شیمیایی یکسانی هستند، که با این واقعیت که Sr اغلب در مواد معدنی کربناتی چون کلسیت، سیدریت و منیزیت غنی می‌شود، همخوانی دارد.

در سامانه‌های اسکارن، برهمکنش سیال/سنگ یا بافر سنگ میزبان به عنوان کنترل کننده اصلی عناصر کمیاب در مگنتیت در نظر گرفته می‌شود [۳۴]. بررسی‌های شیمی مگنتیت نشان داده است که عناصری چون منیزیم و منگنز می‌توانند به طور متوالی در سیال‌های گرمایی با برهمکنش‌های گسترده سیال/سنگ غنی شوند [۴۰]. سیال‌های ماگمایی به طور کلی از Si, Al, Na, K, Fe, F و Cl [۴۱] و سنگ‌های کربناتی از Ca, Mg و Mn غنی شده‌اند. این عناصر طی تبلور مگنتیت در اسکارن‌ها رفتار مشابهی دارند به طوری که نمودار Mg+Mn نسبت به Si+Al/Mg+Mn می‌تواند درجه برهمکنش سیال/سنگ را نشان دهد [۴۲]. برای مثال، مگنتیت کورکورا ۲ و شهرک ۲ به نسبت غنی از Si و Al است. کاهش مقادیر

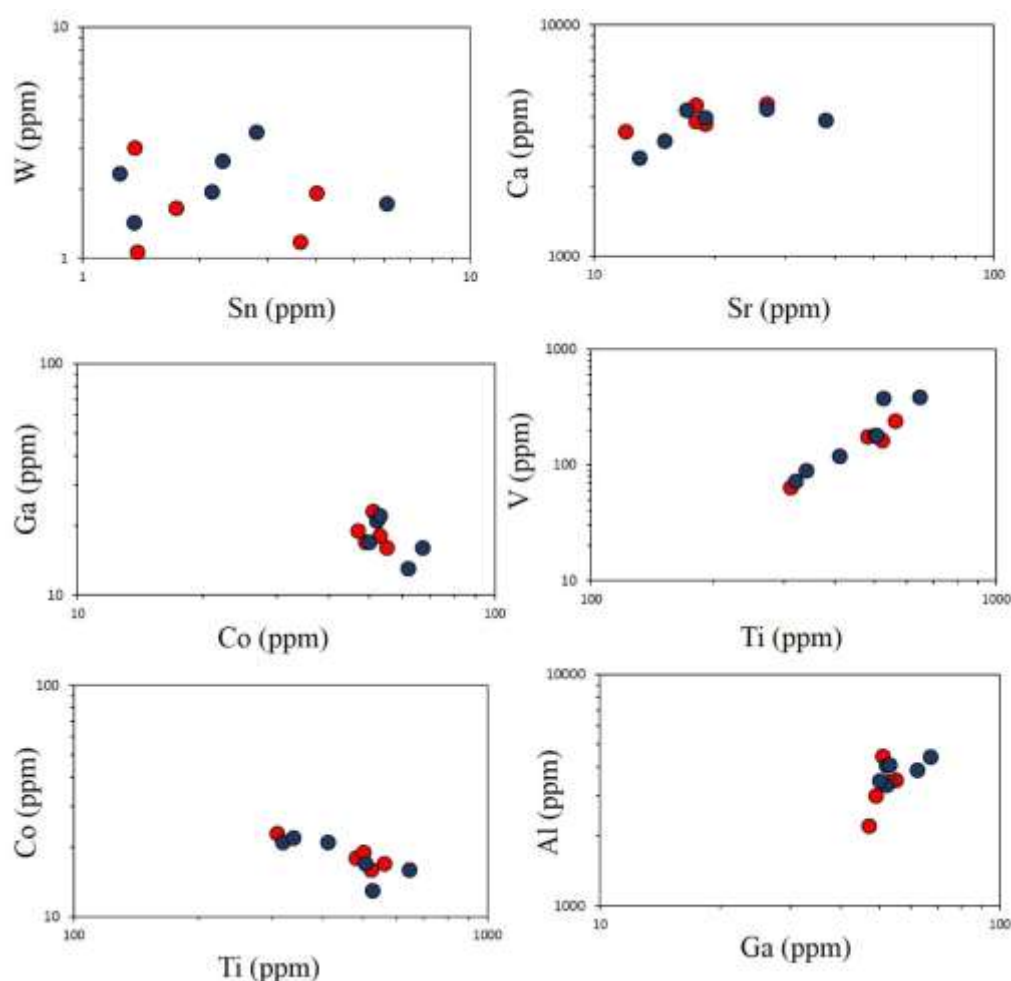
نتایج نشان داد که مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲ به طور تقریبی ویژگی‌های زمین شیمیایی مشابهی دارند. این تشابه زمین شیمیایی، با افزایش سازگاری عناصر در مگنتیت همخوانی دارد. تیتانیوم کاهش نشان می‌دهد که در ذخایر نوع اسکارنی معمول و شاخص است (شکل ۹ پ). عناصر سرب، منگنز، مس و نیکل در مگنتیت غنی‌شدگی نشان می‌دهد که بیانگر جانشینی این عناصر در ترکیب مگنتیت است و غنی‌شدگی کلسیم نیز به دلیل سنگ میزبان کربناتی است. بسیاری از عناصر اصلی همبستگی نشان می‌دهند؛ منیزیم همبستگی مثبتی با Al و Ca دارد و کلسیم یک همبستگی منفی با Ti و Ca نشان داده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). کلسیم یک همبستگی مثبت با Si دارد. نکته جالب این است که مگنتیت‌های کورکورا ۱ و سراب ۳ از نمونه‌های مگنتیت کورکورا ۲ و شهرک ۲ متمایز شده و خوشه متفاوتی را نشان داده‌اند. قلع همبستگی مثبت ضعیفی را با تنگستن نشان می‌دهد. یک همبستگی مثبت نیز برای کلسیم و استرانسیوم وجود دارد. همچنین همبستگی‌های منفی برای گالیوم در برابر کبالت و تیتانیوم در برابر کبالت وجود دارد. یک همبستگی بسیار خوب

می‌شوند [۴۴]. در مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲، یک همبستگی مثبت بین وانادیوم با تیتانیوم دیده می‌شود و همچنین یک همبستگی ضعیف مثبت کروم با تیتانیوم، که مشخصه مگنتیت گرمابی است وجود دارد. نیکل و کروم نیز در سامانه‌های ماگمایی و گرمابی رفتار متفاوتی دارند. در فرآیندهای ماگمایی سیلیکات، رفتار آن‌ها جفت می‌شود و نسبت‌های Ni/Cr مگنتیت اغلب بیشتر از ۱ نیست؛ با این حال، رفتار آنها در سامانه‌های گرمابی با $Ni/Cr \geq 1$ جدا می‌شود [۴۳]. نسبت Ni/Cr در مگنتیت‌های مورد بررسی از ۰/۶ تا ۱/۴ متغیر بوده که نشان دهنده از نقش فرایندهای ماگمایی-گرمابی در تشکیل مگنتیت است. رفتار عناصر در مگنتیت طی فرآیند تشکیل اسکارن به دلیل نقش فرایندهای گرمابی به خوبی قابل تفسیر نیست. با این حال همبستگی مثبت Mg در برابر Ca و Al و Ca در برابر Si نشان می‌دهد که عناصر سنگ دوست، Mg ، Al ، Ca و Si رفتارهای مشابهی را طی تشکیل مگنتیت در سامانه‌های اسکارن نشان می‌دهند.

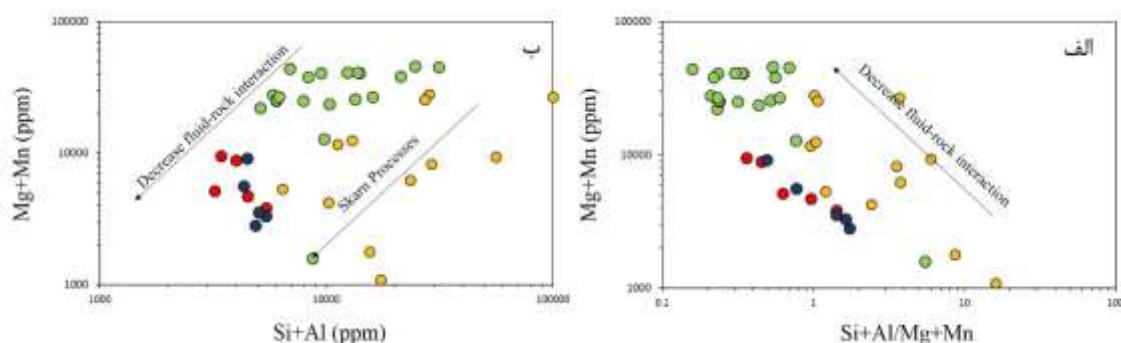
$Si+Al/Mg+Mn$ و افزایش مقدار $Mg+Mn$ برای مگنتیت نشان‌دهنده کاهش نسبت‌های سنگ-سیال/کربنات است [۴۲]. این کاهش نسبت‌های سنگ-سیال/کربنات در مگنتیت-های کورکورا ۱ بسیار کمتر بوده و نشانگر نقش فعالیت بیشتر ماگمایی نسبت به گرمابی است (شکل ۱۲ الف). همچنین دانه‌های مگنتیت شهرک ۲ و کورکورا ۲، مقادیر $Mg + Mn$ و $Si + Al$ بالاتری نسبت به بلورهای موجود در کورکورا ۱ و سراب ۳ دارند (شکل ۱۲ ب)، که نشان‌دهنده کاهش درجه برهمکنش سیال/سنگ است. همبستگی مثبت خوب بین Al و Ga که رفتارهای زمین شیمیایی مشابه طی فرآیند تشکیل اسکارن نشان می‌دهند، وجود دارد که مقدار کمتر Ga در مگنتیت شهرک ۲ نسبت به کورکورا ۲ نشانگر درجه پایین‌تر برهمکنش سیال و سنگ است. جفت‌ها یا گروه‌های عناصر کمیاب در مگنتیت رفتار متفاوتی از خود در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی نشان می‌دهند؛ برای مثال، V و Cr با افزایش Ti طی جدایش بلوری سیلیکات کاهش می‌یابند [۴۳]، در حالی که V و Ti بدون تغییر اصولی کروم طی تکامل گرمابی کم



شکل ۱۰ نمودارهای دوتایی عناصر اصلی در مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲. نشانه‌ها شبیه به شکل ۶ هستند.



شکل ۱۱ نمودارهای دوتایی عناصر کمیاب و اصلی در مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲. نشانه‌ها شبیه به شکل ۶ هستند.



شکل ۱۲ الف) نمودار Si+Al/Mg+Mn نسبت به Mg+Mn و ب) نمودار Si+Al نسبت به Mg+Mn [۴۲] برای مگنتیت‌های گستره شهرک که نشان‌دهنده کاهش برهمکنش سیال-سنگ در کورکورا ۲ و شهرک ۲ نسبت به کورکورا ۱ و سراب ۳ است. نشانه‌ها شبیه به شکل ۶ هستند.

برداشت

همراه سنگ‌های اسکارنی بوده، که روی سنگ‌های آهکی متبلور وابسته به الیگومیوسن تشکیل شده است. بررسی‌های شیمی مگنتیت نشان داد، که مگنتیت‌های کانسارهای کورکورا ۲ و شهرک ۲ دربردارنده مقادیر کم تیتانیوم و دارای خاستگاه اسکارنی هستند. همچنین، مگنتیت‌های کورکورا ۲ و شهرک ۲

عمده‌ترین واحدهای سنگی کانسار شهرک شامل واحد کنگلومرایی و آهک ماسه‌ای، توف سنگی، واحد سنگ‌آهک خاکستری فسیل‌دار و افق آهن‌دار هستند. ماده‌ی معدنی شامل کانسنگ مگنتیتی، مگنتیتی-مارتیتی و مگنتیتی پیریت‌دار، به

Ores and Their Influence on the Choice of Processing Technology", (2021).
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00129>

[6] She H.D., Fan H.R., Yang K.F., Li X.C., Wang Q.W., Zhang L.F., Liu Sh., Li X.H., Cai Z.H., "In situ trace elements of magnetite in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: Implications for the genesis of mesoproterozoic iron mineralization", *Ore Geology Reviews* 139 (2021) 104574.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104574>

[7] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran", *Mineralium Deposita* 42 (2007) 799–820.
<https://doi.org/10.1007/s00126-007-0144-4>

[8] Borg G., Daliran F., "Hypogene and supergene formation of sulphides and non-sulphides at the Angouran high-grade zinc deposit, NW-Iran. In: *Abstract volume of geoscience Africa*", University of the Witwatersrand, Johannesburg (2004) 69–70.
https://www.academia.edu/14380990/Hypogene_Zn_carbonate_ores_in_the_Angouran_deposit_NW_Iran

[9] Gilg H.A., Boni M., "Stable isotope studies on Zn and Pb carbonates: Could they play a role in mineral exploration?", *Proceedings of ICAM* (2004b) 4 p.
<https://scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2082163>

[10] Gilg H.A., Boni M., Balassone G., Allen C.R., Banks D., Moore F., "Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex", *Mineralium Deposita* 31 (2006) 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0035-5>

[11] Maanijou M., Salemi R., "Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran (in persian)", *Journal of Economic Geology* 6 (2014) 355–374.
<https://doi.org/10.22067/econg.v6i2.22650>

[12] Maanijou M., Khodaei L., "Petrology and geochemistry of intrusive body of iron deposit of Sarab-3, east of Takab-north west of Iran (in persian)", *Petrological Journal* 7 (2016) 171–190.
<https://doi.org/10.22108/ijp.2016.21023>

[13] Maanijou M., Khodaei L., "Mineralogy and electron microprobe studies of magnetite in the Sarab-3 iron Ore deposit, southwest of the Shahrak mining region (East Takab) (in persian)", *Journal*

نسبت به مگنتیت‌های کورکورا ۱ و سراب ۳ مقادیر بالاتری از Al, Si, Mg دارند که نشان‌دهنده افزایش برهمکنش سیال/سنگ و به بیانی، افزایش دخالت سیال‌های گرمایی در تشکیل مگنتیت این ذخایر است. مگنتیت‌های مورد بررسی، با انواع موجود در کانسارهای سراب ۳ و کورکورا ۱ نزدیکی زمین‌شیمیایی دارند. همچنین، بر اساس این شواهد می‌توان گفت که اسکارن‌زایی آهن کورکورا ۲ و شهرک ۲ را با فرآیندهای ماگمایی-گرمایی در ارتباط است. بر پایه‌ی الگوی عناصر خاکی نادر، مگنتیت‌های مورد بررسی نسبت به LREEها غنی‌شدگی و نسبت به HREEها تهی‌شدگی نشان می‌دهند، که بیانگر ارتباط این مگنتیت‌ها با سامانه‌های کانه‌زایی ماگمایی-گرمایی (اسکارنی) است.

قدردانی

نویسندگان از داوران محترم مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران برای ارائه نظرهای مفید و سازنده، صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Beaudoin G., Dupuis C., "Iron-oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. In: *Corriveau*", L., Mumin, H. (Eds.), *Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global Analogues, Short Course Volume. Geological Association of Canada Annual Meeting* (2009) 107–121.
- [2] Huberty J.M., Konishi H., Heck P.R., Fournelle J.H., Valley J.W., Xu H., "Silician magnetite from the Dales Gorge Member of the Brockman Iron Formation, Hamersley Group, Western Australia", *American Mineralogist* 97 (2012) 26–37.
<https://doi.org/10.2138/am.2012.3864>
- [3] Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D., Walshe J., "The chemistry of hydrothermal magnetite: A review", *Ore Geology Reviews* 61 (2014) 1–32.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>
- [4] Dare S.A.S., Barnes S.J., Beaudoin G., "Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: Implications for provenance discrimination", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 88 (2012) 27–50.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.04.032>
- [5] Nikolaeva N.V., Aleksandrova T.N., Chanturiya E.L., Afanasova A., "Mineral and Technological Features of Magnetite-Hematite

- (IOA) and Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) deposits formed by a combination of igneous and magmatic-hydrothermal processes: Evidence from the Chilean Iron Belt", SEG Special Publication 21 (2018) 89–114. <https://doi.org/10.5382/SP.21.06>
- [23] Technoexport, "Detail geology prospecting in the Anarak Area Central Iran (in persian)", Geological Survey of Iran Report No. 9 (1981).
- [24] Richards J.P., "Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen. From subduction to collision", Ore Geology Review 70 (2015) 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>
- [25] Alavi M., "Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations", Tectonophysics 229 (1994) 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- [26] Haghipour A., "Étude géologique de la région de Biabanak-Bafq (Iran Central); pétrologie et tectonique du socle Precambrien et de sa couverture", (1974).
- [27] Pournik P., "Report of mineral geology and assessment of iron reserve of Shahrak iron ore deposit (in persian)", Mineral Exploration and Drilling Engineering Company (2016) 350p.
- [28] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American mineralogist, 95 (2010) 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- [29] Beaudoin G., Dupuis C., Gosselin P., Jebrak M., "Mineral chemistry of iron oxides: application to mineral exploration", In: C.J. Andrew (Editor), Ninth Biennial SGA meeting, SGA, Dublin (2007) 497–500 pp. <https://doi.org/10.22067/econg.v6i2.22650>
- [30] Nadoll P., Mauk J.L., Hayes T.S., Koenig A.E., Box S.E., "Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States", Economic Geology 107 (2012) 1275–1292. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.6.1275>
- [31] Nadoll P., "Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks - Case studies from the Proterozoic Belt Supergroup, Cu-Mo-porphyry + skarn and Climax-Mo deposits in the western United States", PhD thesis in University of Auckland (2011).
- [32] Nadoll P., Mauk J.L., Leveille R.A., Koenig A.E., "Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States" Mineralium Deposita 50 (2014) 493–515. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0539-y>
- of Economic Geology 10 (2018) 267–293. <https://doi.org/10.22067/econg.v10i1.56522>
- [14] Maanijou M., Ferdowsi Rashed M., "Fluid inclusions and sulfur stable isotopes of the Sarab 3 iron ore deposit (the Shahrak mining area-north Bijar) (in persian)", Journal of Economic Geology 12 (2021) 531–561. <https://doi.org/10.22067/econg.v12i4.78330>
- [15] Masoumi A., Ansari A.H., Aslani E., "A study on inverse modelling of magnetic data for Korkora 1, Shahrak iron mine in Kurdistan province (in persian)", Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE) 2 (2017) 37–47. <https://doi.org/10.30479/jmre.2017.1067>
- [16] Daliran F., Pride K., Walther J., Berner Z. A., Bakker R.J., "The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: Evidence for a two stage, hypogene zinc-sulfide–zinc carbonate mineralization", Ore Geology Reviews 53 (2013) 373–402. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.02.002>
- [17] Ghorbani M., "Economic Geology of Mineral Deposits and Natural Resources of Iran", 1st edition, Arian Zamin Publishers (2007) 492p.
- [18] Amirian A., Siahcheshm K., "Magnetite geochemistry an approach to determining the physicochemical conditions of Alam-Kandy iron skarn formation, West Mahnesan, Zanzan province (in persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 30 (2022) 6–6. <http://dx.doi.org/10.52547/ijcm.30.4.653>
- [19] Sadat Mazhari M., Saadat S., Mazaheri S. A., Homam S. M., "Magnetite Chemistry: Evidence of Skarn Fe Mineralization in the Ahangaran Range, Eastern Iran (in persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 31 (2023) 455–466. <http://dx.doi.org/10.61186/ijcm.31.3.455>
- [20] Ghasemi Siani M., Mehrabi B., "Mineralogy and mineral chemistry of silicate mineral of Dardvay Fe skarn ore deposit (Sangan mining area, NE Iran) (in persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 26 (2019) 871–884. <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.26.4.871>
- [21] Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., "Skarn geochemistry-mineralogy and petrology of source rock Sangan Iron mine, Khorasan Razavi, Iran (in persian)", Scientific Quarterly Journal of Geosciences 17 (2007) 108–125. <https://doi.org/10.22071/gsj.2008.58191>
- [22] Simon A.C., Knipping J., Reich M., Barra F., Deditius A.P., "Kiruna-type Iron Oxide-Apatite

- [39] Rudnick R.L., Gao S., "Composition of the continental crust", *Treatise on Geochemistry* 3 (2003) 1–64.
- [40] Meinert L.D., "Skarn and skarn deposits", *Geoscience Canada* 19 (1992) 145–162.
<https://journals.lib.unb.ca/index.php/gc/article/view/3773>
- [41] Tosdal R.M., Dilles J.H., Cooke D.R., "From source to sinks in auriferous magmatic-hydrothermal porphyry and epithermal deposits", *Elements* 5 (2009) 289–295.
<https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.289>
- [42] Hu H., Li J.W., Lentz D., Ren Z., Zhao X.-F., Deng X.D., Hall D., "Dissolution–reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite", *Ore Geology Review* 57 (2014) 393–405.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.07.008>
- [43] Dare S.A., Barnes S.-J., Beaudoin G., Méric J., Boutroy E., Potvin Doucet C., "Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators", *Mineralium Deposita* 49 (2014) 785–796.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2014MinDe..49..785D/doi:10.1007/s00126-014-0529-0
- [44] Huang X.W., Gao J.F., Qi L., Zhou M.F., "In-situ LA–ICP–MS trace elemental analyses of magnetite and Re–Os dating of pyrite: the Tianhu hydrothermally remobilized sedimentary Fe deposit, NW China", *Ore Geology Review* 65 (2015) 900–916.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.020>
- [33] Dupuis C., Beaudoin G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types", *Mineralium Deposita*, 46 (2011) 319–335.
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0334-y>
- [34] Angerer T., Hagemann S.G., Danyushevsky L.V., "Geochemical evolution of the banded iron formation-hosted high-grade iron ore system in the Koolyanobbing Greenstone Belt, Western Australian", *Economic Geology* 107 (2012) 599–644. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.4.599>
- [35] Nystroem J. O., Henriquez F., "Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry", *Economic Geology* 90 (1995) 473–475.
- [36] Schwartz M. O., Melcher F., "The Falémé iron district, Senegal", *Economic Geology* 99 (2004) 917–939.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.917>
- [37] Frost B. R., "Magnetic petrology; factors that control the occurrence of magnetite in crustal rocks", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 25 (1991) 489–509.
- [38] Sun S.S., McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes", *Geological Society, London, Special Publications* 42 (1989) 313–345.