



## کانسار مگنتیت - آپاتیت خاقلق، شمال غربی نیشابور: کانی شناسی، ساخت و بافت، دگرسانی و تعیین مدل

آرزو زارعی، آزاده ملک زاده شفارودی\*، محمدحسن کریم پور

گروه پژوهشی اکتشافات ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۴/۳/۱، نسخه نهایی: ۹۴/۵/۱۸)

**چکیده:** کانسار مگنتیت-آپاتیت خاقلق در شمال غربی نیشابور قرار دارد. این گستره جزء منطقه‌ی ساختاری بینالود است و در شرق کمان ماگمایی ترشیاری قوچان-سبزوار واقع شده است. زمین شناسی منطقه شامل واحد آتشفشانی داسیتی است که مورد نفوذ توده‌های نیمه عمیق با ترکیب کوارتز موزودیوریت و گرانودیوریت الیگوسن در آن نفوذ کرده است. واحدهای رسوبی میوسن نیز روی آن‌ها رورانده شده‌اند. ماگماتیسم منطقه ویژگی گرانیتوئیدهای نوع I را نشان می‌دهد و در منطقه‌ی فرورانش تشکیل شده است. کانه‌زایی بیشتر به شکل رگه و رگچه در توده‌های نفوذی نیمه عمیق تشکیل شده است. ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، برشی، توده‌ای، پرکننده‌ی فضای خالی و رشته‌ای دیده می‌شود. مگنتیت (با Ti، V و S کم) و هیدروکسی آپاتیت همراه با باطله‌های کلسیت، اپیدوت، کوارتز، پیروکسن و کلریت، مهم‌ترین کانی‌های کانسار هستند و پیریت و کالکوپیریت به مقدار ناچیز آن‌ها را همراهی می‌کنند. هماتیت و مالاکیت مهم‌ترین کانی ثانویه هستند. مهم‌ترین دگرسانی‌های منطقه عبارتند از: پروپلیتیک، کربناتی، سیلیسی و آرژیلیک که منطقه‌ی پروپلیتیک و کربناتی بیشترین گسترش را دارند. بررسی موقعیت زمین ساختی، سنگ میزبان، کانی شناسی، دگرسانی و ساخت و بافت نشان می‌دهند که کانسار خاقلق بیشترین شباهت را با ذخایر نوع کایرونا دارد.

**واژه‌های کلیدی:** کانی شناسی؛ دگرسانی؛ نوع کایرونا؛ خاقلق؛ کمر بند آتشفشانی - نفوذی قوچان - سبزوار.

### مقدمه

از مهم‌ترین آن‌ها هستند [۷-۱۰]. کانسار خاقلق اولین ذخیره‌ی اکسید آهن-آپاتیت در شمال شرقی ایران است که برای اولین بار در این مقاله معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ذخیره در ۳۵ کیلومتری شمال غربی نیشابور در استان خراسان رضوی، در فاصله طول‌های ۵۵' ۳۴° تا ۵۸' ۵۴° تا ۳۷' ۵۸° و عرض‌های ۵۶' ۲۳° تا ۵۲' ۲۴° و در مجاورت روستایی به همین نام قرار دارد. براساس تقسیمات ساختاری این منطقه در زون بینالود واقع شده است (شکل ۱) و جزئی از کمر بند آتشفشانی-نفوذی سنوزوئیک قوچان-سبزوار محسوب می‌شود. این کمان ماگمایی با روند شمال غربی-جنوب شرقی در افیولیت سبزوار و پیرامون آن

کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت ایران بیشتر در بلوک پشت بادام در ایران مرکزی و همراه با سازندهای ساغند، سری ریزو و هم‌ارزهای آن‌ها به سن پرکامبرین شناسایی شده‌اند [۱-۶] که از آن جمله می‌توان به ذخایر بزرگی مانند چغارت، چادرملو، اسفوردی، سه چاهون و غیره اشاره کرد. همچنین پتانسیل‌های مناسبی در منطقه‌ی طارم زنجان در شمال غربی ایران در کمر بند ماگماتیکی ترشیاری البرز-آذربایجان کشف شده‌اند که به توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب کوارتز موزونیت تا گرانیت (ائوسن فوقانی-الیگوسن) وابسته‌اند که در منطقه‌ی فرورانش تشکیل شده‌اند. سرخه دیزج، علی آباد، مروارید و ذاکر

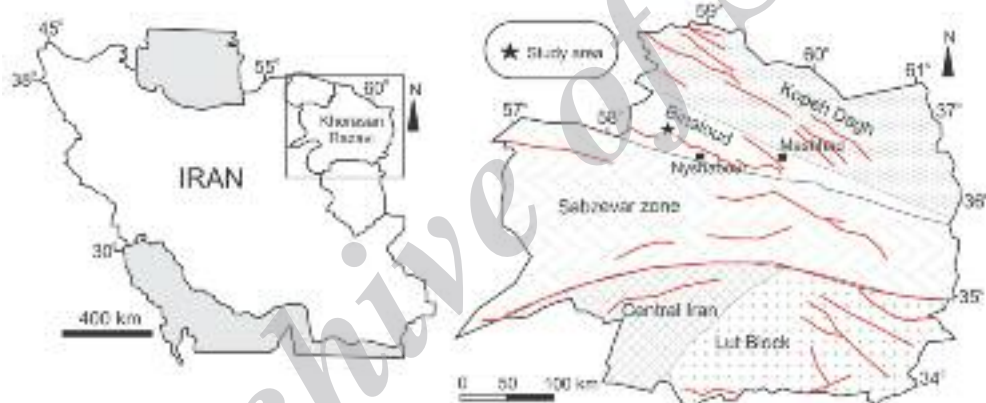
\* نویسنده مسئول، تلفن و نمابر: ۰۵۱۳۸۷۹۷۲۷۵، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

## زمین‌شناسی

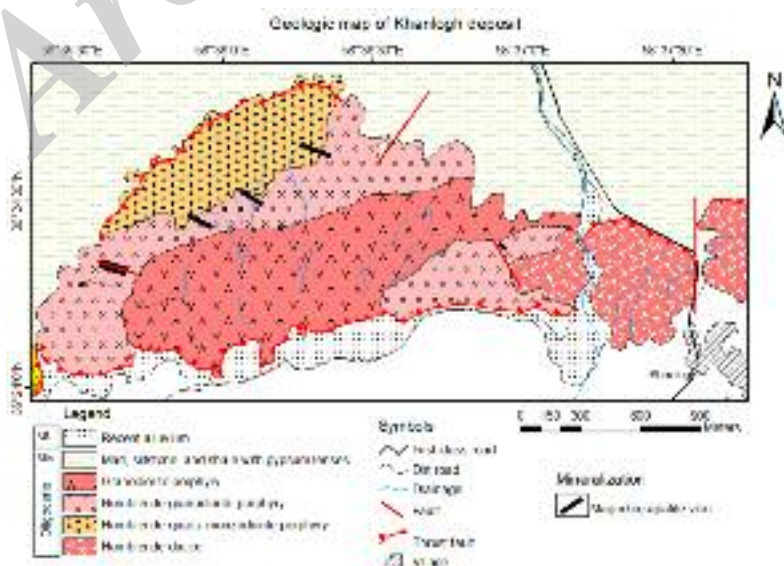
فعالیت‌های ماگمایی کمان آتشفشانی- نفوذی قوچان- سبزوار از ائوسن (حدود ۴۰ میلیون سال قبل) شروع شده و تا پلیو- پلیستوسن (حدود ۲ میلیون سال قبل) ادامه داشته است [۱۲]. سن سنگ‌های آذرین این کمان از ائوسن در جنوب (در نزدیکی افیولیت سبزوار) تا پلیو- پلیستوسن به سمت شمال (جنوب قوچان) تغییر می‌کند. منطقه‌ی مورد بررسی که در جنوب شرقی این کمان ماگمایی قرار دارد، در شمال غربی نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نیشابور [۱۷] واقع شده است. براساس این نقشه، واحدهای آذرین این گستره همگی آندزیت تا داسیت معرفی شده‌اند. اما بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی نشان داد که بخش بزرگ سنگ‌های آذرین منطقه را توده‌های نفوذی نیمه عمیقی با ترکیب اسیدی- حدواسط تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

نفوذ کرده و به سمت شمال تا کوه‌های البرز ادامه دارد [۱۱]. تشکیل این کمان وابسته به زون فرورانش ورقه‌ی اقیانوسی نئوتتیس سبزوار در زیر صفحه توران است [۱۲ و ۱۳]. وجود تعداد زیادی شاخص‌های آهن و مس همراه با کانسارهای شناخته شده‌ی مانند معدن مس- طلا- اورانیوم- عناصر نادرخاکی سبک نوع مس- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) معدن فیروزه نیشابور [۱۴]، مگنتیت± مس شترسنگ [۱۵] و مس- طلا پورفیری جلمبادان [۱۶] نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای این کمان ماگمایی برای کانی‌سازی‌های مختلف است.

هدف از این مقاله بررسی ویژگی‌های کانی‌شناختی، ساختی و بافتی، بررسی‌های دگرسانی و سرانجام تعیین نوع کانی‌سازی کانسار مگنتیت- آپاتیت خانلق است. بدون شک شناسایی دقیق ویژگی‌های خانلق، گام مهمی برای پی‌جویی چنین ذخایری که از نظر آهن، آپاتیت و عناصر نادرخاکی ارزشمند هستند، در شمال شرقی ایران است.



شکل ۱ موقعیت کانسار خانلق در شمال شرقی ایران و نقشه تقسیمات ساختاری در گستره استان خراسان رضوی.



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی- کانی‌سازی کانسار خانلق.

شمال منطقه دیده می‌شوند (شکل ۲). قائمی و همکاران [۱۷] عقیده دارند که این رسوب‌ها در یک محیط کولابی ته نشین شده‌اند. ریخت شناسی پست و تپه‌ماهوری و رنگ ویژه این واحد بین سنگ‌های آذرین خاکستری رنگ که ارتفاعات خشن منطقه را به وجود آورده‌اند، آن‌ها را به طور کامل از یکدیگر جدا می‌کند. نهشته‌های کواترنر جوان‌ترین واحد زمین‌شناسی منطقه است که این رسوب‌ها در مسیر رودخانه‌های فصلی و کانال‌های سیلابی رسوب کرده‌اند.

#### روش بررسی

بررسی‌های انجام شده شامل بررسی‌های صحرایی-آزمایشگاهی به منظور تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰، بررسی بیش از ۱۲۰ مقطع نازک برای بررسی سنگ نگاری و دگرسانی و ۵۰ مقطع نازک صیقلی و بلوک صیقلی برای بررسی‌های کانه‌نگاری و تعیین چگونگی روابط پاراژنزی، آنالیز دستگاهی به روش XRD برای شناسایی کانی‌های مجهول (۴ نمونه)، ریزپردازش الکترونی (EPMA) برای تشخیص ترکیب شیمیایی آپاتیت (۲ نمونه و ۱۰ نقطه) و ICP-MS برای تعیین ترکیب شیمیایی مگنتیت (۵ نمونه) بوده‌اند. مگنتیت‌ها از ۵ رگچه مجزا انتخاب شدند و پس از خردایش، در زیر میکروسکوپ بینوکلار از کانی‌های مجاور به ویژه آپاتیت جداسازی شدند. آنالیز XRD در شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمتیس شرق، ریزپردازش الکترونی در شرکت تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران و ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا انجام گرفته است. دستگاه ریزپردازنده الکترونی مدل SX100 ساخت شرکت Cameca فرانسه بوده، و پردازش در شرایط ۲۰ میلی‌آمپر با ولتاژ ۱۵ تا ۲۰ کیلوولت انجام گرفت.

#### دگرسانی

برپایه بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی ۴ منطقه‌ی دگرسان پروپلیتیک، کربناتی، سیلیسی و آرژلیک در پیرامون منطقه-های کانه‌دار و با شدت بسیار کمتر در سنگ میزبان و واحدهای اطراف دیده می‌شوند. دگرسانی غالب در کانسار خاقلق پروپلیتیک و کربناتی متوسط است که بخش زیادی از منطقه را تحت تاثیر قرار داده است، به طوری که در اطراف رگه و رگچه-های کانی‌سازی شدت آن گاهی به حدود ۴۰ درصد حجمی سنگ می‌رسد، ولی با دور شدن از محل کانی‌سازی، کانی‌های ثانویه این منطقه‌ها به کمتر از ۵ درصد کل سنگ رسیده است. واحد هورنبلند داسیت که با فاصله از کانی‌سازی قرار دارد، دارای دگرسانی پروپلیتیک ضعیف است.

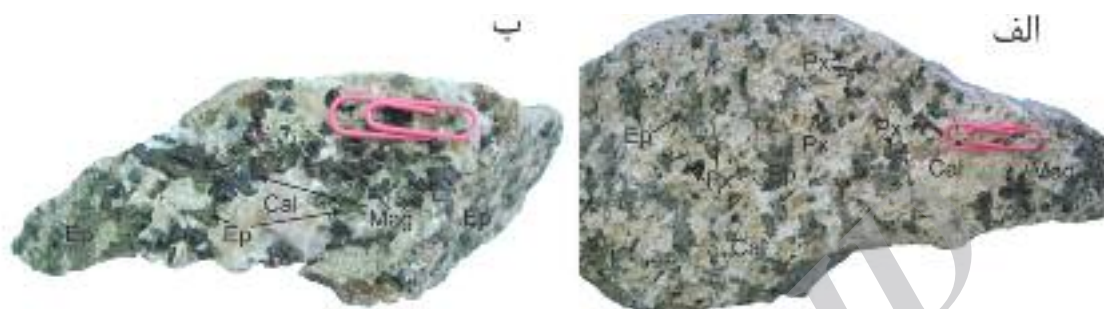
کانی‌های شاخص منطقه‌ی پروپلیتیک اپیدوت و کلریت است که فراوانی آن بیشتر از کانی اپیدوت است. اپیدوت‌ها در

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه واحد آتشفشانی هورنبلند داسیت در شمال روستای خاقلق و شرق گستره‌ی پی جویی است که مرز آن بیشتر گسله است (شکل ۲)، هرچند که در برخی نقاط (خارج از گستره) به طور عادی روی واحدهای کنگلومرایی و ماسه سنگ‌های ائوسن قرار دارد و لذا سن نسبی آن در نقشه‌ی نیشابور الیگوسن است [۱۷]. بافت این واحد پورفیری با زمینه ریزدانه است که درشت بلورهایی از فلدسپات، کوارتز و هورنبلند در آن دیده می‌شوند. توده‌های نفوذی نیمه عمیق به شکل استوک که در سنگ آتشفشانی نفوذ کرده‌اند، بیشتر واحدهای سنگی منطقه را تشکیل می‌دهند. روند آن‌ها شرقی-غربی بوده و مرز آن‌ها با واحدهای رسوبی اطراف گسلی است. این توده‌ها به سه نوع هورنبلند کوارتز مونوزودیوریت پورفیری، هورنبلند گرانودیوریت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری قابل تقسیم‌اند که مرز آن‌ها نسبت به یکدیگر تدریجی است (شکل ۲). هورنبلند کوارتز مونوزودیوریت پورفیری در شمال غربی گستره رخنمون دارد و میزبان بخشی از رگه و رگچه‌های کانی‌سازی است. بافت آن پورفیری بوده و درشت بلورهای فلدسپات، کوارتز و هورنبلند در آن مشاهده می‌شوند. زیرکن و مگنتیت مهم‌ترین کانی‌های فرعی سنگ‌اند. هاله دگرسانی در پیرامون محل‌های کانی‌سازی در این توده‌ی دیده می‌شود. هورنبلند گرانودیوریت پورفیری بزرگترین رخنمون توده نفوذی با رنگ خاکستری روشن را در منطقه تشکیل می‌دهد. این واحد میزبان اصلی رگه و رگچه‌های کانی‌سازی مگنتیت-آپاتیت است. بافت آن پورفیری با زمینه‌ی درشت بلور است، به طوری که در نمونه‌ی دستی مانند بافت دانه‌ای تداعی می‌کند. درشت بلورهایی از فلدسپات و هورنبلند در آن دیده می‌شوند. زیرکن، آپاتیت و مگنتیت مهم‌ترین کانی‌های فرعی سنگ را تشکیل می‌دهند. این توده تحت تاثیر محلول کانه‌دار، دستخوش دگرسانی بیشتر پروپلیتیک و کمتر آرژلیک، کربناتی و سیلیسی به ویژه در مجاورت رگه‌های کانی‌سازی شده است. گرانودیوریت پورفیری در مرکز منطقه رخنمون دارد و از نظر کانی‌شناسی تنها تفاوت آن با واحد قبلی، عدم وجود کانی هورنبلند است. اگرچه این توده تحت تاثیر شاره‌ی کانه‌دار، دگرسان شده است ولی کانی‌سازی در آن دیده نشده است. ماگماتیسیم منطقه خاقلق همچون دیگر بخش‌های کمربند آتشفشانی-نفوذی قوچان-سبزوار، ویژگی گرانیتوئیدهای اکسایشی نوع I را از خود نشان می‌دهد و وابسته به کمان ماگمایی منطقه‌ی فرورانش است [۱۸].

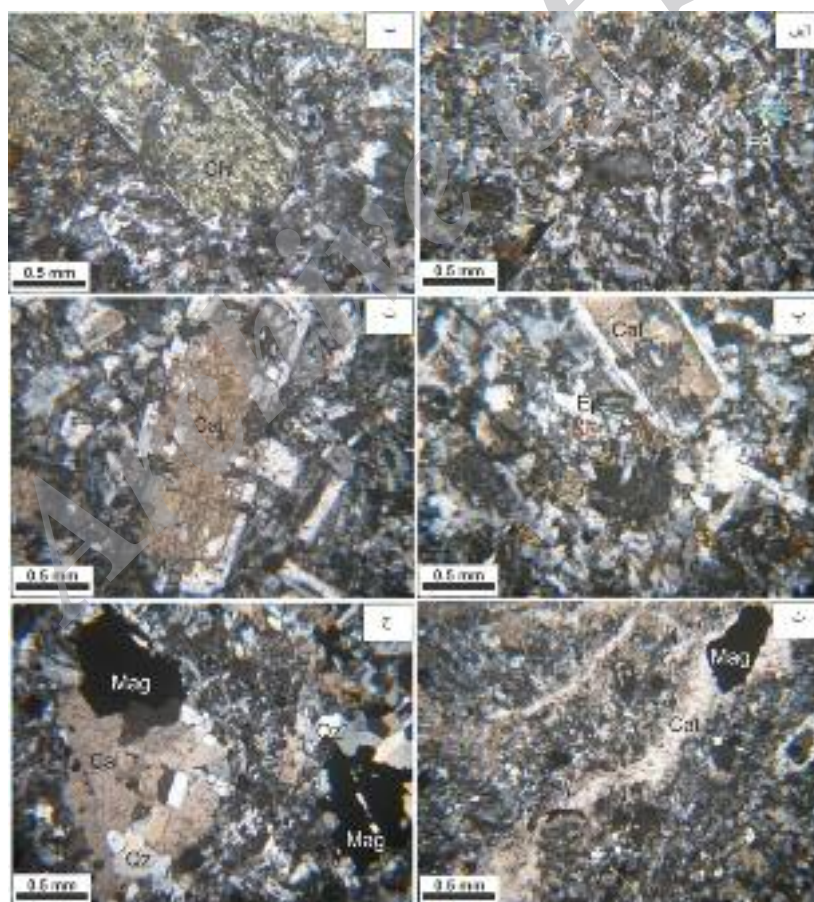
مارن، سیلت استون و شیل‌های سرخ رنگ با عدسی‌هایی از ژیبس به سن میوسن و به ضخامت ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر روی سنگ‌های آذرین الیگوسن رورانده شده‌اند. این مجموعه در

هورنبلند و یا پلاژیوکلاز به‌وجود آمده‌اند که این پدیده بیشتر در حاشیه رگه و رگچه‌ها رخ داده است. پلاژیوکلاز و هورنبلند از ۱۰۰ درصد در برخی نقاط تا ۱۰ درصد به کلریت و اپیدوت تبدیل شده‌اند (شکل‌های ۴ الف تا پ).

برخی قسمت‌ها بسیار درشت شده و تا اندازه یک سانتیمتر می‌رسند. بیشتر این کانی در سطوح درزها و شکستگی‌ها و منطقه‌های گسلی همراه با بلورهای مگنتیت، پیروکسن، کلسیت و گاهی آپاتیت مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۳ الف و ب). در سنگ‌های میزبان نیز کلریت و اپیدوت از جانشینی



شکل ۳ الف) نمونه دستی رگچه کلسیت- اپیدوت- مگنتیت- پیروکسن تشکیل شده در سطح درزه سنگ میزبان، ب) نمونه دستی رگچه مگنتیت- کلسیت- اپیدوت (Mag=مگنتیت، Cal=کلسیت، Ep=اپیدوت، Px=پیروکسن [۱۹]).



شکل ۴ الف) اپیدوت پراکنده در سنگ میزبان گرانودیوریتی، ب) جانشینی کلریت در پلاژیوکلاز در زون پروپلیتیک، پ) جانشینی کلسیت در پلاژیوکلاز و اپیدوت پراکنده در متن سنگ در منطقه پروپلیتیک، ت) جانشینی کلسیت در مرکز پلاژیوکلاز در منطقه کربناته، ث) رگچه کلسیت- مگنتیت در سنگ میزبان گرانودیوریتی در منطقه کربناته، ج) کلسیت، کوارتز ثانویه و مگنتیت در سنگ میزبان (Mag=مگنتیت، Cal=کلسیت، Ep=اپیدوت، Chl=کلریت، Qz=کوارتز [۱۹]).

کلریت تشکیل می‌شود که در آن فلدسپات‌های قلیایی و کانی-های مافیک دگرسان می‌شوند [۲۲،۲۱]. در اعماق بالاتر نسبت به زون سدی، دگرسانی پتاسی و سرسیتیکی نیز تشکیل می‌شود [۲۱،۲۰،۳]. بنابراین انتظار می‌رود که این دگرسانی‌ها در نقاط بسیار عمیق‌تر کانسار خاقلق مشاهده شوند.

#### کانی‌سازی

کانی‌سازی مگنتیت- آپاتیت خاقلق به شکل رگه و رگچه در زون‌های گسلی و سطوح درز و شکستگی‌ها، واحدهای نیمه عمیق هورنبلند گرانودیوریت پورفیری و کمتر هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری تشکیل شده‌اند. روند عمومی رگه و رگچه‌ها شمال غربی- جنوب شرقی با شیب بین ۲۵ تا ۴۵ درجه به سمت شمال شرقی است (شکل ۲). نکته قابل توجه در منطقه وجود درز و شکستگی‌های موازی هستند که به وسیله مگنتیت پر شده‌اند (شکل ۵ الف). بزرگترین منطقه‌ی کانه‌دار در غرب گستره قرار دارد که ترانشه‌هایی روی آن حفر شده و سینه کاری باز شده است. طول این رگه حدود ۱۵۰ متر با ضخامت واقعی ۵ الی ۱۰ متر است (شکل ۵ ب). کانی‌سازی رگچه‌ای وسیعی در اطراف این رگه دیده می‌شود که تراکم آن گاهی به ۵۰ رگچه در مترمربع می‌رسد. در بقیه قسمت‌ها ضخامت رگه و رگچه‌ها از چند میلیمتر تا حداکثر ۳۰ سانتیمتر متغیر است. کانی‌شناسی کانسار ساده و در همه بخشها مشابه است با این تفاوت که مقدار آپاتیت در رگه و رگچه‌های مختلف بسیار متغیر بوده و بخش بیشتر آن در گستره‌ی همان منطقه-ی کانه‌دار اصلی دیده می‌شود. کانی‌های مهم موجود در کانسار خاقلق مگنتیت و آپاتیت است که با باطله‌های کلسیت، کوارتز، اپیدوت، پیروکسن و کلریت همراهی می‌شود. همراهی آپاتیت و مگنتیت در تمام کانسار وجود دارد. کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپریت تنها در یک نمونه و به صورت بسیار ریز شناسایی شد. کانی‌های ثانویه نیز دارای هماتیت و بسیار کمتر ملاکیت است.

#### ساخت و بافت

براساس بررسی‌های صحرایی، ۵ نوع ساخت و بافت شامل رگچه‌ای، برشی، توده‌ای، پرکننده‌ی فضای خالی و رشته‌ای در منطقه‌های کانه‌دار دیده می‌شوند که نوع رگچه‌ای و برشی از فراوان‌ترین آن‌ها هستند.

الف- ساخت و بافت رگچه‌ای: این نوع ساخت و بافت فراوانترین شکل کانی‌سازی در کانسار خاقلق است. رگچه‌ها در سطوح درز و شکستگی‌های سنگ میزبان تشکیل شده‌اند و کاملاً کنترل ساختاری دارند. روند عمومی آن‌ها شمال غربی- جنوب شرقی

دگرسانی کربناتی با مقدار بالای کلسیت در حاشیه‌ی منطقه‌های کانه‌دار مشخص می‌شود، هرچند که این کانی به عنوان کانی فرعی در منطقه‌ی پروپلیتیک نیز حضور دارد (شکل ۴ پ). کلسیت همراه با اپیدوت، پیروکسن، مگنتیت و کمتر آپاتیت در سطوح درزو شکستگی‌ها و منطقه‌های گسلی کانه‌دار دیده می‌شوند (شکل‌های ۳ الف و ب). در سنگ‌های نفوذی میزبان و اطراف نیز این کانی به شکل جانیشینی در پلاژیوکلاز و یا رگچه‌های کلسیت- مگنتیت حضور دارد (شکل-های ۴ ت و ث).

دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی از گسترش بسیار کمتری در اطراف رگه و رگچه‌های کانی‌سازی برخوردارند. دگرسانی آرژیلیک با حضور حداکثر ۲۰ درصد کانی رسی در توده‌های نفوذی اسیدی- حدواسط منطقه مشاهده می‌شود. در این منطقه فلدسپات‌ها به کانی رسی تبدیل شده‌اند. برپایه‌ی بررسی‌های XRD کانی‌های رسی از نوع ایلیت، مونت‌موریونیت و نانترونیت تشخیص داده شدند. دگرسانی سیلیسی نیز با حضور کوارتز ثانویه به شکل رگچه همراه با مگنتیت و آپاتیت و یا حالت رگچه و انباشت در متن سنگ دربرگیرنده، مشخص می‌شود (شکل ۴ ج).

دگرسانی اکتینولیتی یکی از دگرسانی‌های مهم در کانسارهای مگنتیت- آپاتیت است که بیشتر در اثر تاثیر گرماب‌ها بر بلورهای پیروکسن و تبدیل آن به اکتینولیت به وجود می‌آید. اما در کانسار خاقلق این کانی مشاهده نشد. بلورهای پیروکسن درشت گاهی تا اندازه ۱/۵ سانتیمتر همراه با مگنتیت، آپاتیت و کلسیت در رگچه‌های تشکیل شده در سطوح درز و شکستگی سنگ دیده می‌شود (شکل ۳ الف). [۲۰] کانسارهای مگنتیت- آپاتیت شیلی و سوئد را بررسی و حضور کانی پیروکسن را گزارش کرده‌اند. آن‌ها معتقدند که اکتینولیت شبه ریختی از پیروکسن بوده و جانشین پیروکسن در این ذخایر می‌شود. به طوری که با آنالیز ریزپردازشی، تکه-های بازمانده از کانی پیروکسن را در آن اثبات کردند. بنابراین می‌توان گفت که جانیشینی اکتینولیت به جای پیروکسن در خاقلق در سطح دیده نمی‌شود. لازم به یادآوری است که هیچگونه حفاری عمقی در این منطقه صورت نگرفته و مشاهدات فقط سطحی هستند. لذا امکان اینکه در سطوح پایین‌تر و مشاهده حجم بیشتر کانی‌سازی، اکتینولیت نیز یافت شود، وجود دارد.

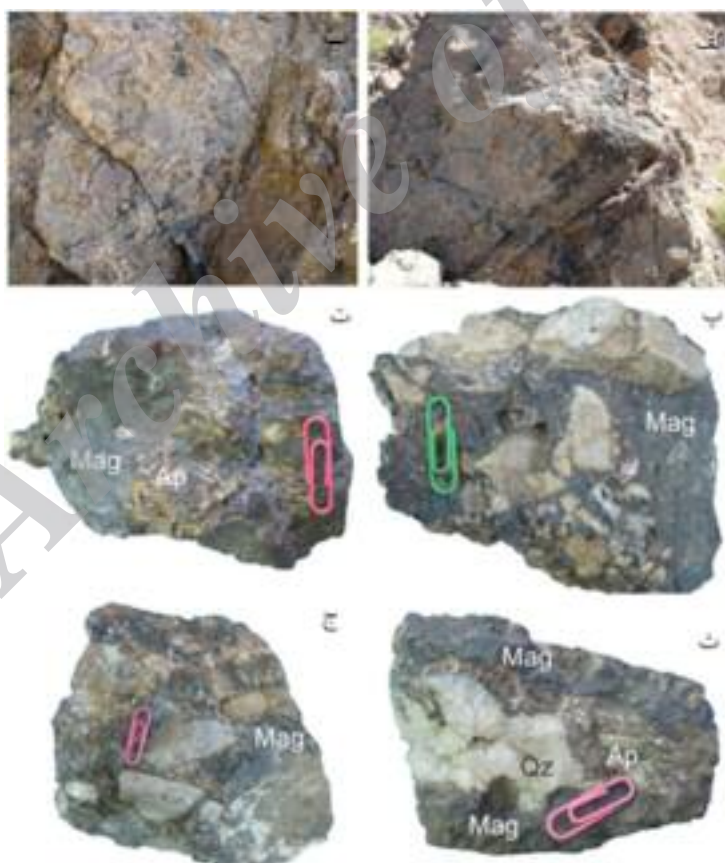
همچنین در کانسارهای مگنتیت- آپاتیت در بخش‌های عمیق دگرسانی سدی شامل آل‌بیت + مگنتیت ± اکتینولیت یا

به انواع مگنتیت، مگنتیت-آپاتیت، مگنتیت-اپیدوت-کلسیت، مگنتیت-اپیدوت، مگنتیت-اپیدوت-کلسیت-پروکسن، مگنتیت-کلسیت-آپاتیت  $\pm$  کوارتز رده‌بندی کرد. از این میان رگچه مگنتیت و مگنتیت-اپیدوت-کلسیت از همه فراوانترند. گاهی بافت پرکننده فضای خالی در رگچه‌ها مشاهده می‌شود.

است و بیشتر در دسته‌های موازی قرار گرفته‌اند (شکل ۵ الف). در اطراف منطقه‌ی کانهدار اصلی در غرب گستره، تعداد زیادی رگچه دیده می‌شوند که به شکستگی‌های پیرامون منطقه‌ی گسلی وابسته‌اند. این بخش تداعی‌کننده‌ی بافت داربستی است (شکل ۶ الف). رگچه‌ها را براساس ترکیب کانی‌شناسی می‌توان



شکل ۵ الف) درزه‌های موازی در واحد گرانودیوریتی که به وسیله مگنتیت پر شده‌اند، ب) منطقه کانهدار اصلی در غرب منطقه که به وسیله ترانشه و سینه‌کار باز شده است (دید به شمال شرقی).



شکل ۶ الف) ساخت و بافت رگچه‌ای در پیرامون منطقه رگه‌ای کانهدار، ب) ساخت و بافت برشی که قطعات زاویه‌دار سنگ میزبان در سیمانی از مگنتیت قرار گرفته است، پ) بافت برشی در نمونه دستی و از نزدیک، ت) ساخت و بافت توده‌ای مگنتیت و بلورهای شکل‌دار آپاتیت، ث) بافت پرکننده فضای خالی که در حاشیه آپاتیت و مگنتیت و در وسط کوارتزهای درشت بلور شانه‌ای قرار دارند، ج) بافت رشته‌ای مگنتیت داخل بافت برشی (Mag = مگنتیت، Ap = آپاتیت، Qz = کوارتز [۱۹]).

بیشتر موارد شامل کوارتزهای کریپتوکریستالین تاخیری است. همچنین به ندرت این بافت با رشد مگنتیت، کلسیت ریزبلور، کلسیت درشت بلور و شکل‌دار و آپاتیت منشوری و دوهرمی به ترتیب از حاشیه به میانه‌ی رگچه مشاهده می‌شود. اندازه‌ی کانی‌ها در این حالت از حاشیه به میانه در حال درشت شدن است، به‌نحوی که آپاتیت وسط رگچه با بلورهای شکل‌دار و تا اندازه‌ی یک سانتیمتر است.

ث- بافت رشته‌ای: این بافت در بخش‌هایی از منطقه‌های کانه-دار و فقط در کانی مگنتیت دیده می‌شود. این بافت در داخل ساخت و بافت برشی و در مگنتیت‌هایی که سیمان برش‌ها را تشکیل می‌دهند نیز مشاهده می‌شود (شکل ۶ ج). در این بافت، مگنتیت به شکل رشته‌ها و سوزن‌های ظریفی با ضخامت یک میلی‌متر در کنار یکدیگر قرار گرفته و منظره زیبایی را تشکیل داده‌اند.

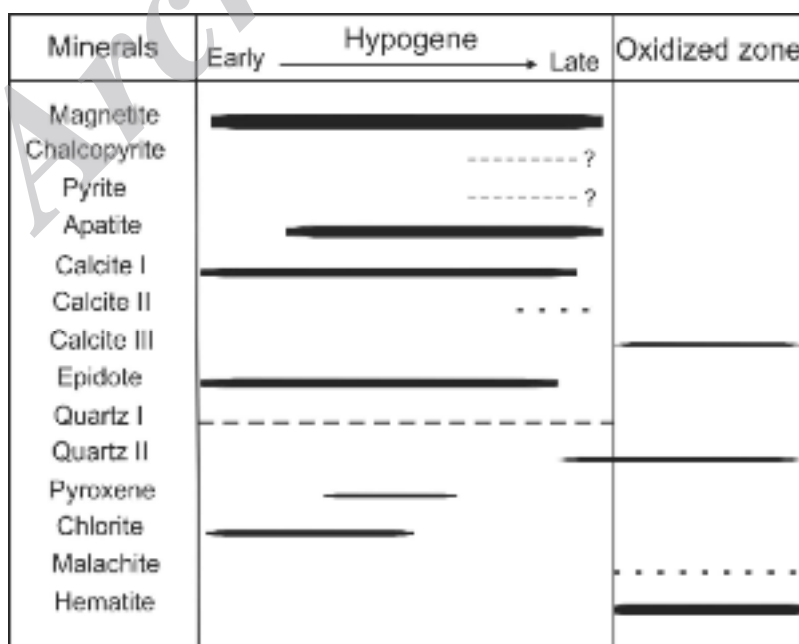
#### کانی‌شناسی

براساس بررسی‌های میکروسکوپی، آنالیز XRD، ریزپردازنده‌ی الکترونی و ICP-MS، کانی و ترکیب شیمیایی کانی‌های مهم کانسار خاقلق شناسایی شدند. مگنتیت و آپاتیت مهم‌ترین کانی‌های منطقه خاقلق هستند که همراه با کانی‌های باطله کلسیت، کوارتز، اپیدوت، پیروکسن، و کلریت و کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت به صورت بسیار جزئی دیده شدند. هماتیت و بسیار محدودتر مالاکیت، کانی‌های ثانویه هستند (شکل ۷).

ب- ساخت و بافت برشی: ساخت و بافت برشی در منطقه‌های گسلی دیده می‌شود. در این نوع کانی‌سازی، قطعاتی از سنگ هورنبلند گرانودیوریت پورفیری به شکل زاویه‌دار و دگرسان شده در سیمانی از مگنتیت  $\pm$  آپاتیت  $\pm$  کلسیت قرار گرفته‌اند. اندازه‌ی قطعات از یک تا ۲۰ سانتیمتر متغیرند و بیشتر به وسیله دگرسانی‌های پروپلیتیک و کمتر آرژیلیک و سیلیسی تحت تاثیر قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۶ ب و پ). به نظر می‌رسد این برش‌ها از نوع گسلی باشند، به طوری که بر اثر فعالیت زمین ساختی، سنگ میزبان برشی شده و بعد محلول حمل-کننده‌ی آهن فضای خالی بین قطعات را پر کرده است.

پ- ساخت و بافت توده‌ای: در بخش‌های محدودی از کانسار ساخت و بافت توده‌ای دیده می‌شود. کانی غالب این بافت مگنتیت است که بلورهای آپاتیت در اندازه‌های ریز و درشت به رنگ کرم تا کمی مایل به سبز در آن پراکنده‌اند. مگنتیت‌ها در این نوع ساخت و بافت بیشتر بی‌شکل هستند. آپاتیت‌ها به شکل منشوری، دوهرمی و سوزنی و تا اندازه با بیشینه‌ی یک سانتیمتر مشاهده می‌شود (شکل ۶ ت).

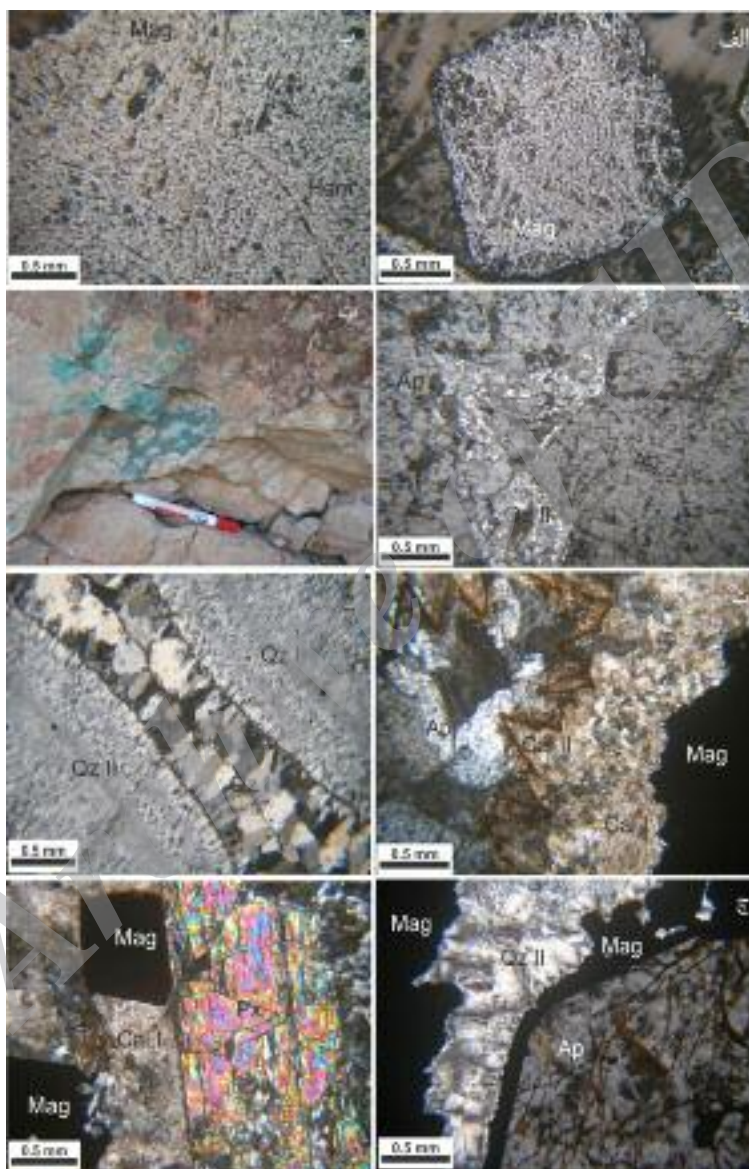
ت- ساخت و بافت پرکننده‌ی فضای خالی: بافت پرکننده‌ی فضای خالی در کانسارهایی که کنترل ساختاری دارند، بسیار معمول است. این بافت با تقارن کانی‌ها در دو سمت رگچه مشخص می‌شود و بیشتر با قرار گرفتن کانی مگنتیت  $\pm$  آپاتیت در دو طرف رگچه و کوارتز در وسط آن مشخص می‌شود (شکل ۶ ث). کوارتز وسط رگچه در برخی موارد درشت دانه و کاملاً رشد کرده است و تداعی کننده‌ی بافت شانه‌ای است، اما در



شکل ۷ دنباله‌ی پارازنز کانی‌های فلزی و غیرفلزی کانسار خاقلق.

یا گاهی به‌طور کامل به هماتیت (مارتیت) تبدیل شده است (شکل ۸ الف و ب). نتایج آنالیز بلورهای مگنتیت نشان می‌دهد که مقدار آهن از ۴۵ تا ۶۰ درصد متغیر است. همچنین مقدار Ti کمتر از ۱، گوگرد کمتر از ۰.۰۷ و میزان فسفر کمتر از ۰.۱ درصد است که از این لحاظ جزء مگنتیت‌های کم تیتان، کم گوگرد و کم فسفر محسوب می‌شوند (جدول ۱).

مگنتیت: مگنتیت مهم‌ترین کانه کانسار خانلق به شمار می‌رود که در قالب ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، برشی، توده‌ای، پرکننده فضای خالی و رشته‌ای دیده می‌شود. مگنتیت در بیشتر موارد به صورت کاملاً شکل‌دار (شکل ۸ الف) و در اندازه‌های چند میلیمتر تا حداکثر ۷ سانتیمتر مشاهده می‌شوند. این کانی به صورت بخشی و در راستای مرز بلورها و شکستگی‌ها و



**شکل ۸ الف)** بلور شکل‌دار مگنتیت که کاملاً به هماتیت تبدیل شده است (مارتیت، ب) بافت مارتیتیزاسیون در مگنتیت، پ) بلورهای شکل‌دار آپاتیت که فضای خالی بین آن‌ها با سیلیس کریپتوکریستالین پر شده است، ت) آثار ملاکیت در درز و شکستگی‌های توده میزبان در صحرا، ث) بافت پرکننده فضای خالی که از حاشیه به طرف مرکز به ترتیب مگنتیت، کلسیت ریزبلور مرحله اول، کلسیت درشت بلور و شکل‌دار مرحله دوم و آپاتیت قرار گرفته است، ج) کوارتز درشت بلور مرحله اول و سیلیس کریپتوکریستالین مرحله دوم، چ) هم‌رشدی مگنتیت و آپاتیت و حفره وسط آنها که به وسیله سیلیس کریپتوکریستالین تاخیری پر شده است، ح) رگچه شامل مگنتیت، کلسیت مرحله اول و پیروکسن (Mag = مگنتیت، Ap = آپاتیت، Qz I = کوارتز مرحله اول، Qz II = سیلیس کریپتوکریستالین تاخیری، Cal I = کلسیت مرحله اول، Cal II = کلسیت درشت بلور و شکل‌دار مرحله دوم، Hem = هماتیت، Px = پیروکسن [۱۹]).



جدول ۱ نتایج آنالیز ICP-MS برخی از عناصر مهم در کانی مگنتیت.

| درصد | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fe   | ۴۵٫۲۲ | ۵۲٫۸۰ | ۵۱٫۰۱ | ۵۳٫۴۱ | ۶۰    |
| V    | ۰٫۲   | ۰٫۳   | ۰٫۳   | ۰٫۳   | ۰٫۴   |
| Mg   | ۰٫۰۶  | ۰٫۱۹  | ۰٫۱   | ۰٫۱   | ۰٫۱۹  |
| Ti   | ۰٫۵۶  | ۰٫۲۸  | ۰٫۷۲  | ۰٫۵۷  | ۰٫۵۳  |
| S    | ۰٫۰۶  | <۰٫۰۴ | ۰٫۰۶  | ۰٫۰۷  | ۰٫۰۴  |
| P    | ۰٫۰۰۴ | ۰٫۰۸۲ | ۰٫۰۲۶ | ۰٫۱۸۱ | ۰٫۰۲۲ |

این کانی همراه با مگنتیت در بافت‌های رگچه‌ای، توده‌ای، پرکننده‌ی فضای خالی و برشی حضور دارد (شکل ۸ پ و چ). در برخی قسمت‌ها آپاتیت به‌طور کامل به وسیله کوارتز یا کلسیت‌های تاخیری جانشین شده است. پیریت و کالکوپیریت: مقدار این دو کانی بسیار ناچیز است، به طوری که تنها در یک نمونه، دانه‌های ریزی شناسایی شدند و قابل مقطع گرفتن نبودند. به طور کلی می‌توان گفت که مقدار کانی‌های سولفیدی (بر پایه اطلاعات سطحی) بسیار اندک است. اثرات کانی‌سازی مس فقط به شکل حضور کانی ملاکیت در سطوح درز و شکستگی سنگ میزبان در دو نقطه از گستره‌ی همراه با آپاتیت دیده شده است (شکل ۸ ت). در مجموع شواهد سطحی حاکی از مقدار کم مس در شاره کانه‌دار است.

آپاتیت: مهم‌ترین کانی کانسار خانلق پس از مگنتیت است. این کانی به رنگ کرم تا سبز روشن با اندازه ۱ میلی‌متر تا ۱۰ سانتیمتر همراه با مگنتیت دیده می‌شود. کانی آپاتیت کاملاً شکل‌دار است (شکل ۶ ت و ث)، ولی کانی مگنتیت هم به صورت بی‌شکل و هم به صورت شکل‌دار مشاهده شد که علت آن می‌تواند بالاتر بودن شاخص فشردگی یا قدرت هسته‌بندی آپاتیت نسبت به مگنتیت باشد. آپاتیت معمولاً با شکل شش-گوشی منظم متبلور می‌شود. آنالیز ریزپردازنده الکترونی (جدول ۲) نشان می‌دهد که ترکیب آن از نوع هیدروکسی آپاتیت  $(Ca_5(PO_4)_3(OH, F))$  است. این نتیجه با آنالیز XRD نیز تایید شده است. هم‌رشدی آپاتیت و مگنتیت نشان دهنده هم‌خاستگاه بودن و هم‌زمانی تشکیل آن‌هاست.

جدول ۲ نتایج آنالیز ریزپردازنده الکترونی در کانی آپاتیت.

| درصد  | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CaO   | ۵۲٫۲۷  | ۵۲٫۳۹ | ۵۱٫۳۶ | ۵۱٫۷۲ | ۵۱٫۸  | ۵۲٫۴۴ | ۵۲٫۷۴ | ۵۱٫۹۲ | ۵۲٫۸۷ | ۵۲٫۱۲ |
| P2O5  | ۴۴٫۵۲  | ۴۳٫۱۹ | ۴۲٫۹۱ | ۴۱٫۹۸ | ۴۳٫۵۵ | ۴۳٫۴۲ | ۴۲٫۹۴ | ۴۲٫۸۷ | ۴۱٫۹۹ | ۴۲٫۷۳ |
| SiO2  | ۰      | ۰     | ۰٫۰۸  | ۰٫۱   | ۰٫۰۳  | ۰٫۰۸  | ۰٫۱۱  | ۰٫۰۹  | ۰٫۰۱  | ۰٫۰۸  |
| Al2O3 | ۰٫۰۳   | ۰٫۰۲  | ۰٫۰۱  | ۰٫۰۱  | ۰     | ۰٫۲   | ۰     | ۰٫۰۲  | ۰٫۰۳  | ۰٫۰۱  |
| FeO   | ۰٫۱۹   | ۰٫۱۴  | ۰٫۱۵  | ۰٫۱۶  | ۰٫۱۲  | ۰٫۰۳  | ۰٫۱۹  | ۰٫۱۳  | ۰٫۱۶  | ۰٫۱۷  |
| MnO   | ۰٫۰۴   | ۰٫۰۴  | ۰٫۰۳  | ۰٫۰۲  | ۰٫۰۴  | ۰     | ۰٫۰۵  | ۰٫۰۳  | ۰٫۰۲  | ۰٫۰۴  |
| MgO   | ۰٫۱۶   | ۰٫۱۵  | ۰٫۱۴  | ۰٫۱   | ۰٫۱۸  | ۰٫۱۵  | ۰٫۱۲  | ۰٫۰۹  | ۰٫۱۴  | ۰٫۱۹  |
| K2O   | ۰      | ۰     | ۰٫۰۱  | ۰٫۰۱  | ۰     | ۰     | ۰     | ۰     | ۰     | ۰٫۰۱  |
| Na2O  | ۰٫۳    | ۰٫۲۲  | ۰٫۳   | ۰٫۳   | ۰٫۳۲  | ۰٫۲۷  | ۰٫۳۳  | ۰٫۳۶  | ۰٫۳۴  | ۰٫۳۳  |
| SrO   | ۰٫۰۹   | ۱۶    | ۰٫۱   | ۰٫۱۳  | ۰٫۰۱  | ۰٫۰۱  | ۰٫۱   | ۰٫۰۹  | ۰٫۰۷  | ۰٫۰۸  |
| H2O   | ۱٫۸۹   | ۱٫۸۵  | ۱٫۸۱  | ۱٫۸۱  | ۱٫۸۵  | ۱٫۹۳  | ۱٫۶۵  | ۱٫۶۹  | ۱٫۶۶  | ۱٫۸۴  |
| F     | ۰٫۹۲   | ۰٫۰۶  | ۰٫۰۴  | ۰٫۲۹  | ۰٫۸۱  | ۰٫۶۹  | ۰٫۰۴  | ۰٫۸۱  | ۰٫۶۸  | ۰٫۷   |
| Total | ۱۰۰٫۴۱ | ۹۸٫۲۲ | ۹۶٫۹۴ | ۹۶٫۶۳ | ۹۸٫۷۱ | ۹۹٫۲۲ | ۹۸٫۲۷ | ۹۸٫۱  | ۹۷٫۹۷ | ۹۸٫۳  |

که در حاشیه‌ی رگه و رگچه‌ها دیده می‌شود. اندازه‌ی این کانی از چند صدم میلی‌متر تا یک سانتیمتر تغییر می‌کند. پیروکسن: در کانسار خانلق، کانی پیروکسن با ترکیب دیوپسید و اوژیت (براساس اندازه‌گیری زاویه‌ی خاموشی 2V و XRD) همراه با مگنتیت، کلسیت و اپیدوت در رگچه‌ها شناسایی شد (شکل ۷ ح). اندازه‌ی بلورهای پیروکسن تا ۱/۵ سانتیمتر می‌رسد و گاهی شکل بادبزی و شعاعی دارند. لازم به یادآوری است که در کانسارهای مگنتیت-آپاتیت شیلی و سوئد، پیروکسن به شکل دندریتی و شبیه بادبزن همراه با آپاتیت مخروطی و مگنتیت‌های ستونی گزارش شده است که می‌تواند از نوع کلینوپیروکسن (دیوپسید) یا ارتوپیروکسن (انستاتیت) باشد [۲۰].

شاره‌ی ماگمایی-گرماپی سرشار از مواد فرار، آهن، فسفر، کلسیم و منیزیم باعث تشکیل فاز اصلی کانی‌سازی مگنتیت-آپاتیت به همراه کانی‌های باطله مانند اپیدوت، کلسیت ریز بلور مرحله اول، کلریت، پیروکسن و کوارتز درشت بلور در درز و شکستگی‌های توده‌ی نفوذی نیمه عمیق میزبان و زون‌های گسلی منطقه شده است. در این میان سنگ میزبان نیز در اطراف رگه و رگچه‌ها به شدت دگرسان شده و دگرسانی پروپلیتیک و کربناتی همراه با کمی سیلیسی را به وجود آورده است. به نظر می‌رسد که کلسیت درشت بلور مرحله دوم در مراحل نهایی‌تر فاز اصلی کانی‌سازی و پس از کلسیت مرحله اول شکل گرفته باشد. رابطه‌ی زمانی کانی‌های سولفیدی به علت مقدار اندک، دقیقاً مشخص نیست، اما با توجه به دیگر کانسارهای مگنتیت-آپاتیت مشابه به نظر می‌رسد که این کانی‌ها در مراحل نهایی و به وسیله محلول‌های حاوی مس که دارای دمای کمتر هستند، تشکیل شده‌اند. سیلیسی کربیتوکریستالین در مراحل نهایی فاز اصلی کانی‌سازی و نیز زون اکسایش، حفره‌ها و فضاهای خالی را پر کرده است. آپاتیت به وسیله کلسیت تاخیری و گاهی کوارتز در منطقه‌ی اکسایش، اکسیدان جانشین شده و رگچه‌های کلسیت عقیم مرحله سوم، کانی‌سازی قبلی را قطع کرده‌اند. هماتیت حاصل از اکسایش مگنتیت مهم‌ترین کانی مرحله هوازدگی است (شکل ۷).

#### تعیین مدل کانی‌سازی

برپایه‌ی خاستگاه، چگونگی تشکیل و نوع ماگمای وابسته به کانی‌سازی، کانسارهای آهن آپاتیت‌دار را به دو گروه اصلی تقسیم کرده‌اند [۲۳]: ۱- نلسونیت‌ها (کانسارهای مگنتیت-

کلسیت: کلسیت یکی از مهم‌ترین کانی‌های باطله در کانسار خانلق محسوب می‌شود که در ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، برشی و پرکننده‌ی فضای خالی، مگنتیت و آپاتیت را همراهی می‌کند. این کانی را می‌توان به سه نسل تقسیم کرد: ۱- کلسیت‌های ریزبلور که فراوان‌تر از بقیه انواع آن هستند و همراه با مگنتیت، آپاتیت و اپیدوت در رگچه‌ها دیده می‌شوند (شکل ۸ ث و ج). علاوه بر آن در توده‌های نفوذی منطقه به صورت جانشینی در پلاژیوکلاز و هورنبلند به فراوانی مشاهده می‌شوند، ۲- کلسیت درشت بلور شکل‌دار با اندازه‌ی حداکثر تا ۰/۴ میلی‌متر که به ندرت در بافت پرکننده‌ی فضای خالی در کنار کلسیت ریزبلور نوع اول وجود دارند (شکل ۸ ث) و ۳- کلسیت‌های تاخیری که شامل رگچه‌های عقیمی هستند که در مرحله‌ی هوازدگی تشکیل شده و کانی‌سازی اولیه‌ی منطقه را قطع می‌کنند و یا به طور کامل یا بخشی، جانشین آپاتیت شده‌اند.

کوارتز: کوارتز نیز پس از کلسیت و اپیدوت، سومین باطله‌ی کانسار خانلق است. این کانی به دو شکل قابل مشاهده است: ۱- کوارتزهای درشت بلور تا اندازه‌ی حداکثر ۰/۵ سانتیمتر که از فراوانی کمی برخوردار بوده و در قالب رگچه همراه با کانی‌های اصلی و یا به شکل بافت پرکننده‌ی فضای خالی در میان آن دیده می‌شود (شکل ۸ ج). علاوه بر منطقه‌های کانه‌دار، منطقه سیلیسی در اطراف رگه و رگچه‌ها، توده‌های نفوذی را تحت تاثیر قرار داده است و ۲- کوارتزهای کریپتوکریستالین تاخیری که فراوان‌ترین نوع سیلیسی در کانسار هستند. این سیلیسی‌ها بیشتر در قالب بافت پرکننده فضای خالی در میان رگچه‌ها قرار گرفته‌اند و یا حفره‌ها و فضاهای خالی بین مگنتیت و آپاتیت را پر کرده‌اند (شکل‌های ۸ ج، چ و پ). گاهی کوارتز تاخیری به صورت بخشی جانشین آپاتیت شده است. بافت کلوform در کوارتزهای کریپتوکریستالین تاخیری بسیار فراوان است که نشانگر تهنشست سیلیسی در محیط آرام و دمای پایین است.

اپیدوت: این کانی همراه با کلسیت فراوان‌ترین کانی باطله کانسار خانلق محسوب می‌شود. اپیدوت در رگچه‌ها همراه با مگنتیت، کلسیت و گاهی کوارتز و پیروکسن دیده می‌شود (شکل ۳). همچنین این کانی در ساخت و بافت برشی به عنوان سیمان مشاهده می‌گردد. علاوه بر منطقه‌های کانه‌دار، اپیدوت فراوان‌ترین کانی ثانویه حاصل دگرسانی در سنگ میزبان است

زمین ساختی کافتی درون قاره‌ای و منطقه‌های فرورانش حاشیه‌ی قاره تشکیل می‌شوند. کانسار خاقلق در کمر بند ماگمایی قوچان- سبزوار واقع شده است که مرتبط با زون فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس سبزوار به زیر صفحه توران است. ماگماتیسیم این کمر بند از آهکی- قلیایی تا قلیایی و از کم پتاسیم تا شوشونیتی متغیر است و واحدهای آذرین آن از نوع گرانیتوئیدهای نوع I محسوب می‌شوند [۱۳، ۱۲]. ذخایر نوع کایرونا نیز وابسته به ماگماتیسیم آهکی- قلیایی بوده و بسته به محیط تشکیل در گدازه‌های آندزیتی تا تراکیتی و توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب سینیت پورفیری، مونزونیت و دیوریت تشکیل می‌شوند [۳۷، ۳۱]. سنگ‌های تراکیتی قلیایی میزبان کانسار کایرونا در مناطق کششی هستند [۳۴]. سنگ میزبان کانسار خاقلق توده‌های نفوذی نیمه عمیق هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری و هورنبلند گرانودیوریت پورفیری به سن الیگوسن است. ذخایر نوع کایرونا دارای هندسه‌ی متفاوتی هستند. توده‌ی معدنی به شکل عدسی هم شیب تا ناهم شیب، رگه‌های دایکی شکل، داربستی و توده‌های صفحه- ای دیده می‌شود [۳۸]. بافت‌های توده‌ای، لایه‌ای بین مگنتیت و آپاتیت، جانشین، حفره‌ای، برشی و رگه‌ای نیز متداول است [۳۹، ۳۳].

آپاتیت- ایلمنیت با Ti و P (بالا) که همراه با آنورتوزیت‌ها هستند و ۲- کانسارهای نوع کایرونا (کانسارهای مگنتیت- آپاتیت با Ti و P پایین) که بیشتر با ماگماهای آهکی- قلیایی تا قلیایی همراهند. ذخایر نوع کایرونا زیرمجموعه‌ای از کانسارهای مس- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) محسوب می‌شوند. کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت فاقد مس با علامت اختصاری IOA معرفی می‌شوند [۲۴]. در مورد خاستگاه ذخایر کایرونا تاکنون نظریات مختلفی ارائه شده‌اند. نخستین مدل ارائه شده خاستگاه رسوبی [۲۵] بود که بعدها توسط [۲۶] به صورت متصاعدی- رسوبی که به صورت رسوب‌های شیمیایی در یک محیط آتشفشانی- دریایی ته‌نشین می‌شوند، تغییر یافت. مدل‌های دیگر شامل ماگمایی [۲۷]، گرمایی آتشفشان‌زاد [۲۸]، دگرزهدادی [۲۱]، گرمایی [۳۱]، تبخیری [۲۹] و مدل شاره ماگمایی و غیرماگمایی [۳۰] است. بنا به نظر [۳۱] فرآیندهای تشکیل این کانسارها بر اساس فعالیت‌های گرمایی و جدایش ماگمایی است که شاره‌های جوی نیز در مراحل پایانی وارد سیستم کانی‌سازی می‌شوند. کانی‌سازی در این نوع از کانسارها در سنگ میزبان آتشفشانی و نفوذی روی می‌دهد و بیشتر فلزات خاستگاه ماگمایی دارند.

جدول (۳) ویژگی‌های ذخایر کایرونا را با کانسار خاقلق مقایسه می‌کند. به عقیده‌ی [۳۶] ذخایر کایرونا در محیط‌های

جدول ۳ مقایسه ویژگی‌های کانسار خاقلق و کانسارهای آهن نوع کایرونا [۳۲ - ۳۵].

| ویژگی‌ها          | کانسار نوع کایرونا   | کانسار مگنتیت- آپاتیت خاقلق   |
|-------------------|--|---|
| محیط زمین ساختی   | حاشیه قاره، محیط‌های فرورانش وابسته به کمر بند آتشفشانی، رژیم‌های کششی                                     | کمر بند ماگمایی زون فرورانش   |
| سن                | پالئوپروتروزوئیک تا پلیوسن و پلیستوسن  | پس از الیگوسن   |
| سنگ میزبان        | سنگ‌های آتشفشانی آهکی- قلیایی تا قلیایی و توده‌های پلوتونیک  | توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب کوارتز مونزودیوریت و گرانودیوریت  |
| ماهیت ماگماتیسیم  | آهکی- قلیایی تا قلیایی نوع I   | آهکی- قلیایی، متالومین نوع I  |
| کانی‌شناسی        | مگنتیت با مقدار Ti و V پایین، همتایت، آپاتیت، پیریت، کالکوپیریت (جزیی)، اکتینولیت، دیوپسید، کلسیت و کوارتز | مگنتیت با مقدار Ti و V پایین، آپاتیت، جزیی پیریت و کالکوپیریت، کلسیت، اپیدوت، اوژیت، دیوپسید، کوارتز، کلریت |
| دگرسانی           | سدیک، سدیک- کلسیک، مگنتیت- آپاتیت- اکتینولیت، سرسیت، سیلیسی، پتاسیک، تورمالینی شدن                         | پروپلیتیک، کربناته و کمتر سیلیسی، آرژلیک  |
| ساخت و بافت       | رگه‌ای، نواری، توده‌ای، جانشین   | رگچه‌ای، توده‌ای، برشی، پرکننده فضای خالی   |
| عوامل کنترل کننده | مناطق برشی، شکستگی‌ها  | زون‌های گسلی، درزه‌ها و شکستگی‌ها   |

بوده‌اند و شاره غنی از آهن و فسفر می‌بایست از توده‌های نفوذی دیگری در عمق نشات گرفته باشد. این شاره در بخش‌های گسلی و سطوح شکستگی توده‌های مونوزودیوریتی و گرانودیوریتی نفوذ کرده و ذخیره غنی از آهن را موجب شده است. شاره‌های جوی نیز قطعاً در مراحل نهایی تشکیل کانی‌سازی وارد سیستم کانسارسازی شده‌اند. عدم رخنمون توده‌های خاستگاه، دلیل دیگری بر آن است که هم‌اکنون در بخش‌های بالای کانسار قرار گرفته‌ایم و منطقه نیاز به بررسی‌های تفصیلی‌تر عمقی دارد.

بررسی ویژگی‌های مختلف کانسار خاقل به عنوان اولین ذخیره‌ی کشف شده نوع کایرونا در شمال شرق ایران، گام امیدبخشی برای پی‌جویی این نوع ذخایر که علاوه بر آهن حاوی مقادیر بالایی از عناصر نادرخاکی هستند، در این بخش از کشور است. علاوه بر آن کمر بند ماگمایی قوچان-سبزوار نیز برای این نوع ذخایر و ذخایر IOCG می‌بایست مورد بررسی بیشتری قرار بگیرد.

#### قدردانی

این پروژه با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲۸۰۰۵۰۳ مورخ ۱۳۹۲/۴/۳۰ انجام شده است.

#### مراجع

- [1] Daliran F., "Kiruna type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of the their apatites", in Porter, T. M. (eds.), Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: a global perspective, PGC Publishing, Adelaide 2 (2002) 303-320.
- [2] Daliran F., Stosch H. -G., Williams P., "Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and apatites of the Bafq District, Central-East Iran", in Andrew, C.J. et al. (eds), Digging deeper, Proceeding of the 9<sup>th</sup> Biennial SGA Meeting, Dublin (2007) 1501- 1504.
- [3] Jami M., Dunlop A. C., Cohen D. R., "Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran", Economic Geology 102 (2007) 1111-1128.
- [4] Daliran F., Stosch H. G., Williams P., "Lower Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-Central Iran", in Corriveau, L. and Mumin, H. (eds.) Exploring for iron-oxide

در کانسار خاقل نیز ساخت و بافت رگه- رگچه‌ای، برشی، توده‌ای و پرکننده فضای خالی مشاهده می‌شود. کانی‌شناسی بیشتر کانسارهای کایرونا مگنتیت و آپاتیت و نیز اکتینولیت است. این درحالیست که به جای اکتینولیت در خاقل مقدار اپیدوت بسیار زیاد است و پیروکسن‌ها از نوع اوژیت و دیوپسید به شکل غیر دگرسان مشاهده می‌شوند. مقدار تیتان به اضافه وانادیوم در مگنتیت‌های ذخایر نوع کایرونا بین ۰/۱۵ تا ۱ درصد است [۴۰]. این مقدار در مگنتیت‌های کانسار خاقل بین ۰/۲۷ تا ۱/۱ درصد است. گوگرد و فسفر مگنتیت نیز کمتر از ۰/۱ درصد است که از این نظر نیز همخوانی خوبی با مگنتیت‌های کانسارهای کایرونا دارد. نوع آپاتیت در کایرونا بیشتر غنی از فلئوئر است و کمی هیدروکسیل و کلر دارند [۲۰]، در حالی که آپاتیت خاقل بیشتر هیدروکسیل‌دار است. مقداری از کانی‌های سولفیدی خاقل نیز در سطح مشاهده شده بسیار کمتر از ذخایر کایرونا می‌باشد. دگرسانی در کانسارهای نوع کایرونا از عمق به سطح شامل دگرسانی سدی، پتاسی، سرسیتیک و سیلیسی تاخیری است [۲۱]. در کانسار خاقل دگرسانی پروپلیتیک و کربناته با کانی‌های شاخص اپیدوت، کلریت و کلسیت بیشترین گسترش را داشته و سیلیسی و آرژیلیک گسترش کمتری دارند.

#### برداشت

کانسار مگنتیت- آپاتیت خاقل از نظر جایگاه زمین‌ساختی، ماهیت ماگماتیک منطقه‌ی، نوع سنگ میزبان، ساخت و بافت، پاراژنز کانیایی، ترکیب کانی‌شناسی و دگرسانی شباهت زیادی با ذخایر نوع اکسید آهن- آپاتیت کایرونا (IOA) دارد؛ هرچند تفاوت‌های اندکی به لحاظ نبود اکتینولیت در زون‌های دگرسانی و بالاتر بودن اپیدوت و کلسیت در آن دیده می‌شود. اگرچه بخش زیادی از این اختلافات را می‌توان به سطح فرسایشی کانسار و نبود اطلاعات عمقی نسبت داد. با توجه به مشاهده‌ی رگه و رگچه‌های نسبتاً باریکی از کانی‌سازی در سطوح درز و شکستگی سنگ میزبان، می‌توان ادعا کرد که سطوح فوقانی کانسار در حال حاضر مورد بررسی قرار گرفته است و برای دستیابی به زون‌بندی دگرسانی از عمق به سطح نیازمند حفاری‌های نسبتاً عمیق در منطقه هستیم. از طرف دیگر با توجه به شکل و حالت کانی‌سازی و موقعیت قرارگیری رگه و رگچه‌ها نسبت به سنگ دربرگیرنده، مشخص است که توده‌های حدواسط- اسیدی منطقه فقط به عنوان سنگ میزبان

*NE Iran*", in Almassi A. (eds.), Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, (1983) 267-276.

[۱۴] کریم‌پور م. ح.، ملک‌زاده شفارودی الف.، اسفندیارپور الف.، محمدنژاد ح.، "معدن فیروزه نیشابور: اولین نوع *IOCG* مس-طلا-اورانیوم-عناصر نادرخاکی سبک در ایران"، مجله زمین-شناسی اقتصادی، شماره ۳ (۱۳۹۱) ۱۹۳-۲۱۶.

[۱۵] غلامی س.، "زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مغناطیس‌سنجی کانسار آهن شترسنگ، شمال شرقی سبزوار"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۸) ۲۴۰ ص.

[۱۶] فاتحی ح.، "زمین‌شناسی، کانی‌سازی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی جلمبادان، شمال غربی سبزوار"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲) ۲۴۰ ص.

[۱۷] قائمی ف.، قائمی ف.، حسینی ک.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نیشابور"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۸).

[۱۸] ملک‌زاده شفارودی الف.، کریم‌پور م. ح.، زارعی الف.، "سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه تکتونیکی سنگهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی ترشیاری شمال شهر فیروزه، شمال شرقی ایران"، مجله پترولوژی، در دست داوری.

[19] Whitney D. L., Evans B. W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187.

[20] Nystrom J. O., Henriquwz F., "Magmatic features of iron ore of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry", *Economic Geology* 89 (1994) 820-839.

[21] Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T., "Geological characteristics and tectonic setting of Perotrozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits", *Precambrian Research* 58 (1992) 241-287.

[22] Daliran F., Stosch H. -G., Williams P., "Lower Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposites of thr Bafq district, east-Central Iran", in Corriveau, L. and Mumin. A.H. (eds.), Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division Short Course, x (2008) 143-155.

[23] Naslund H. R., Aguirre R., Dobbs F. M., Henriquez F., Nystrom J. O., "The origin emplacement and eruption of ore magmas", internet (2000).

copper-gold deposits: Canada and global analogues. Published in partnership by Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada and Geological Survey of Canada, Geol. Assoc. Can. short course notes, 20, Québec (2010) 143-155.

[5] Bonyadi Z., Davidson G. J., Mehrabi B., Meffre S., Ghazban, F., "Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se-Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran, insights from paragenesis and geochemistry", *Chemical Geology* 281 (2011) 253-269.

[6] Mokhtary M. A. A., Hossienzadeh G., Emami M. H., "Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry", *Journal of Earth System and Science* 122 (2013) 795-807.

[۷] نباتیان ق.، قادری م.، رشیدنژاد عمران ن.، دلیران ف.، "ژئوشیمی و ژنز کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار سرخه دیزج، جنوب خاوری زنجان"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱ (۱۳۸۸) ۴۶-۱۹ ص.

[8] Azizi H., Mehrabi B., Akbarpour A., "Genesis of Tertiary magnetit-apatite deposits, southeast of Zanjan, Iran", *Resource Geology* 59 (2008) 330-341.

[۹] نباتیان ق.، قادری م.، رشیدنژاد عمران ن.، دلیران ف.، "کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار سرخه دیزج به عنوان نوع کایرونا: کانی‌شناسی، ساخت و بافت، دگرسانی و بررسی‌های مقایسه‌ای"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۴ (۱۳۹۰) ۶۸۶-۶۶۵ ص.

[10] Nabatian G., Ghaderi M., Daliran F., Rashidnejad-Omran N., "Sorkhe-Dizaj iron oxide-apatite ore deposit in the Cenozoic Alborz-Azarbaijan magmatic belt, NW Iran", *Resource Geology* 63 (2012) 42-56.

[11] Alavi M. "Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran", *Geological Society of American Bullitan* 103 (1991) 983-992.

[12] Spies O., Lensch G., Mihem A., "Chemisrty of the post-ophiolitic tertiary volcanic between Sabzevar and Quchan, NE Iran", in Almassi A. (eds.), Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, (1983) 247-266.

[13] Bauman A., Spies O., Lensch G., "Strontium isotopic composition of post-ophiolitic tertiary volcanics between Kashmar, Sabzevar and Quchan

- Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits*," Precambrian Research 58 (1992) 241-287.
- [34] Frietsch R., Perdahl J. A., "Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types", Ore Geology Reviews 9 (1995) 489-510.
- [35] Yu J., Chen Y., Mao J., Pirajno F., Duan C., "Review of geology, alteration, and origin of iron oxide-apatite deposits in the Cretaceous Ningwu basin, lower Yangtze river valley, eastern china: implication for ore genesis and geodynamic setting", Ore Geology Reviews 43 (2011) 170-181.
- [36] Williams P. J., Barton M. D., Johnson D. A., Fontbote L., De Haller A., Mark G., Oliver N. H. S., Marschik R., "Iron Oxide copper-gold Deposits: geology, space-time distribution and possible modes of origin", (2005).
- [37] Hildebrand R. S., "Kiruna type deposits: their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, northwest Canada", Economic Geology 81 (1986) 640-659.
- [38] Ray G. E., Lefebure D. V., "A synopsis of iron oxide  $\pm$  Cu  $\pm$  Au  $\pm$  P  $\pm$  REE deposits of the Candelaria-Kiruna-Olympic Dan family", Geological Fieldwork (2001) 267-272.
- [39] Naslund H. R., Henriquez F., Nystrom J. O., Vivallo W., Dobbs F. M., "Magmatic iron ores and associated mineralization: examples from the Chilean high Andes and coastal cordillera", in Porter, T. M. (eds.), Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits, A global perspective, PGC Publishing, Adelaide 2 (2002) 303-320.
- [40] Dupuis C., Beaudoin G., "Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types", Mineralium Deposita 46 (2011) 319-335.
- [24] Williams P., "Classifying IOCG deposits", in Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues, (2008) 11-19.
- [25] Fredholm K., "Bergarter och malmer I Lousavaara och Kirunavaara {Rock} and ores at Lousavaara and Kirunavaara", Geologiska Feroninges I Stockholm Forhanandlingar, 13 (1981) 266-270.
- [26] Parak T., "Posphorus in different types of ore, sulfides in the iron deposits, and the type and origin of ores at Kiruna", Economic Geology 80 (1985) 646-665.
- [27] Frietsch R., "On the chemical composition of the ore breccia at Luoassavaara, northern Sweden", Mineralium Deposita 17 (1982) 239-243.
- [28] Lundbohm H., Backstrom H., "Geology of the Kirunavaara district", Geologisks Foreningensi Stockholm Forhandlingar 20 (1989) 63-74.
- [29] Barton M. D., Johnson D. A., "An evaporitic source model for igneous-related Fe oxide (Cu-Au-U-REE) mineralization", Geology 24 (1996) 259-262.
- [30] Barton M., Johnson D. A., "Footprints of Fe oxide (-Cu-Au) system", SEG 2004: Predictive Mineral Discovery under Cover. Center for Global Metallogeny, Spec. Pub. 33, University of Western Australia, (2004) 112-116.
- [31] Gandhi S. S., Bell R. T., "Kiruna,Olympic Dam-type iron, copper, uranium, gold, silver", in Geology of Canadian mineral deposit types (eds.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair, and R.I. Thorpe, Geological Survey of Canada, Geology of Canada, 8 (1996) 513- 522 (also Geological Survey of America, The geology of North America).
- [32] Hitzman M. W., "Iron oxides Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why", In porter, T. M. (eds.), Hydrothermal Iron oxide copper-gold and related deposits: A Global perspective, Australian mineral foundation, Adelaide (2001) 9-25.
- [33] Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T., "Geological characteristics and tectonic setting of