



## بررسی های سنگ شناسی و میانبارهای شاری در کانسار مس پورفیری کهنگ

مهدی آزادی<sup>۱\*</sup>، میر صالح میر محمدی<sup>۱</sup>، اردشیر هزارخانی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشکده مهندسی معدن، نفت و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

(دریافت مقاله: ۹۱/۶/۱۱، نسخه نهایی: ۹۱/۱۰/۱۵)

**چکیده:** کانسار مس پورفیری کهنگ در استان اصفهان و در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر واقع شده است. بنا بر بررسی صحرایی و سنگ نگاری مقاطع نازک و مغزه ها، سنگ های آذرین بخش شرقی، این کانسار از نظر ارتباط با کانی سازی به سه دسته درونگیر، کنترل کننده کانی سازی و دایک های عقیم پس از کانی سازی تقسیم می شوند. کوارتز دیوریت ها بیش از ۷۰ درصد از بدنه اصلی توده آذرین کنترل کننده کانی سازی را تشکیل داده اند. زمین شیمی سنگ های خروجی و نفوذی نشان می دهد که این سنگ ها از یک ماگمای آهکی - قلیایی واحد تشکیل شده اند که در نتیجه تبلور جدایشی، تنوع سنگی مشاهده شده در سنگ های آذرین را به وجود آورده اند. میزان  $\text{SiO}_2$  در سنگ های مورد بررسی بین ۴۹ تا ۶۷ درصد تغییر می کند و با افزایش آن در سنگ ها مقدار  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  به طور خطی افزایش و میزان  $\text{CaO}$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  به طور خطی کاهش می یابند. عناصر  $\text{Ba}$ ،  $\text{Th}$ ،  $\text{Rb}$  و  $\text{La}$  نیز با افزایش  $\text{SiO}_2$  به صورت خطی افزایش و  $\text{Ni}$ ،  $\text{Yb}$ ،  $\text{Sc}$  و  $\text{Y}$  کاهش می یابند. دگرسانی های مشاهده شده به بیشتر پتاسیک، فلیک، کوارتز - سریست، پروپیلیتیک و آرژیلیک هستند. دگرسانی پتاسی مشاهده شده در اعماق کمتر از ۷۳۰ متر به صورت بیوتیتی بوده و فاقد فلدسپار قلیایی است؛ در حالی که، دگرسانی پتاسی نوعی برای اولین بار در عمق ۷۳۰ متری در گمانه ی ۶۶ مشاهده شد و حاوی کوارتز، فلدسپار قلیایی و بیوتیت ثانویه است. بررسی میانبارهای شاری بر روی رگه های کوارتزی کانه دار در زون پتاسی ثابت می کند که شاره های شور حاوی همبافت های کلریدی، عامل حمل فلز مس و کانی سازی پورفیری در حداقل دمای ۴۱۵ درجه ی سانتیگراد، فشار ۳۴۰ بار و عمق ۱/۳ کیلومتر است. سرد شدن شاره ها علاوه بر فرایند جوشش که در رگه های  $\text{A}_2$  و  $\text{B}$  مشاهده می شود، عوامل اصلی کننده کنترل ته نشست کالکوپیریت در کانسار مس پورفیری کهنگ هستند.

**واژه های کلیدی:** ارومیه دختر؛ مس پورفیری؛ کهنگ؛ سنگ شناسی؛ میانبارهای شاری.

### مقدمه

بیشتر اطلاعات موجود از این کانسار به حفاری های اخیر توسط شرکت ملی صنایع مس ایران به دست آمده است. در این مرحله ۷۹ گمانه به طول تقریبی ۴۰۰۰۰ متر حفاری شد که با توجه به اینکه این اطلاعات برای اولین بار در این بررسی استفاده شده است، سعی بر آن بوده تا ابهامات موجود در بررسی های

کانسار کهنگ در استان اصفهان، در ۱۰ کیلومتری شرقی روستای زفره و ۲ کیلومتری جنوب غربی روستای کهنگ قرار گرفته است. این کانسار اولین کانسار پورفیری شناخته شده در بخش میانی این کمربند محسوب می شود (شکل ۱). بخش

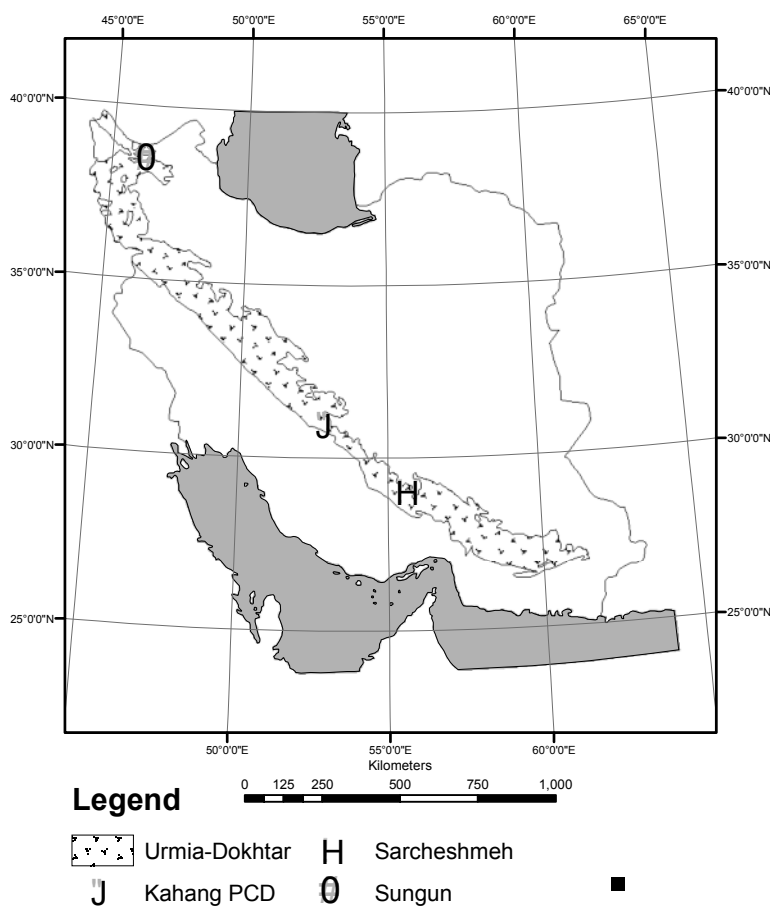
\* نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۰۲۱۸۲۰۸۴۵۵۹، پست الکترونیکی: mehdiazadi@ut.ac.ir

میانبارهای شاره انجام گرفته است. ۱۵۰ مقطع نازک برای سنگ‌نگاری و بررسی دگرسانی‌های موجود و ۵۰ مقطع صیقلی برای بررسی کانی‌سازی تهیه و بررسی شدند. برای بررسی زمین‌شیمی سنگ‌های آذرین نفوذی و خروجی منطقه، تعداد ۱۰ نمونه‌ی نسبتاً سالم برای XRF و ICP به یکی از آزمایشگاه‌های خصوصی کشور ارسال و از نتایج آن‌ها استفاده شد. دسته‌بندی رگه‌ها و برش‌های موجود در کانسار با بررسی بیش از ۱۰۰ نمونه‌ی سطحی و عمقی انجام و از بین آن‌ها ۲۰ نمونه شاخص از رگه‌های نوع A و B موجود در زون دگرسانی پتاسی برای تهیه مقاطع دو بر صیقل و بررسی میانبارهای شاری انتخاب شدند. نهایتاً با بررسی مقاطع تهیه شده، ۴ مقطع که حاوی میانبارهای شاخص و مناسب بودند انتخاب و تعداد ۷۲ میانبار شاری مورد بررسی قرار گرفتند.

پیشین در مورد سنگ‌شناسی، دگرسانی و مدل کانی‌سازی این کانسار تا حد امکان رفع شود. فرمپینی فراهانی (۱۳۸۷) و هراتی (۱۳۹۰) کهنک را یک سیستم پورفیری کلاسیک معرفی کرده و معتقدند مدل دگرسانی و کانی‌سازی این کانسار شبیه به مدل‌های شناخته شده جهانی است [۲،۱]. خداپرست (۱۳۸۹) فرایندهای موثر بر تشکیل سنگ‌های آذرین کانسار پورفیری کهنک را شامل سه دسته تبلور جدایشی، تاثیرهای فعالیت‌های شدید دگرسانی بر آن‌ها، و خرد شدگی و برشی شدن سنگ‌های آذرین معرفی کرده است [۳]. آگاهی از چگونگی تشکیل این کانسار می‌تواند کلیدی برای پی‌جویی کانسارهای مشابه در مناطق همجوار یا مشابه باشد.

### روش بررسی

در این پژوهش، بازدیدهای صحرایی از منطقه و مغزه‌ها به منظور بررسی کانی‌سازی، سنگ‌شناسی، دگرسانی و بررسی



شکل ۱ محل قرارگیری کانسار مس پورفیری کهنک در کمربند ارومیه - دختر.

## زمین‌شناسی منطقه

کانسار مس پورفیری کهنک در میانه‌ی کمربند ماگمایی ارومیه - دختر قرار گرفته است. این کمربند در نتیجه فرورانش صفحه عربستان به زیر صفحه‌ی ایران مرکزی طی کوهزایی آلپی تشکیل شده است [۴-۶]. بیشترین فعالیت ماگمایی این کمربند توسط محققان، ائوسن در نظر گرفته می‌شود [۷]. توده‌های نفوذی با سن میوسن بالایی و ترکیب دیوریتی تا گرانودیوریتی به درون واحدهای خروجی ائوسن و میوسن نفوذ کرده‌اند (شکل ۲). سنگ‌های خروجی واحد ائوسن از جمله آندزیت، بیشتر در حاشیه کانسار دیده می‌شوند. سنگ‌های آندزیت پورفیری و داسیت پورفیری در قسمت‌های داخلی‌تر کانسار واقع شده و در مواردی به وسیله آبرفت‌ها پوشیده شده‌اند. آندزیت‌ها و داسیت‌ها در گستره به دو صورت توده‌ای و دایک مشاهده می‌شوند. در گستره کهنک چندین گسل اصلی با روند شمال غربی - جنوب شرقی وجود دارند که کانی‌سازی در منطقه به وسیله این عوامل ساختاری کنترل می‌شود. مهم‌ترین گسل موجود به طول ۷۰۰ متر با روند شمال شرقی - جنوب غربی از بخش مرکزی گستره‌ی مورد بررسی می‌گذرد. در مرکز سیستم دگرسانی موجود در منطقه چندین ساختار حلقوی کوچک وجود دارند که در ایجاد کانی‌سازی و دگرسان کردن واحدهای مختلف سنگی موجود در منطقه نقش موثری داشته‌اند. روند قرارگیری توده‌های آذرین مشاهده شده در منطقه نیز با روند ساختاری یاد شده موازی است که بیانگر اهمیت نقش

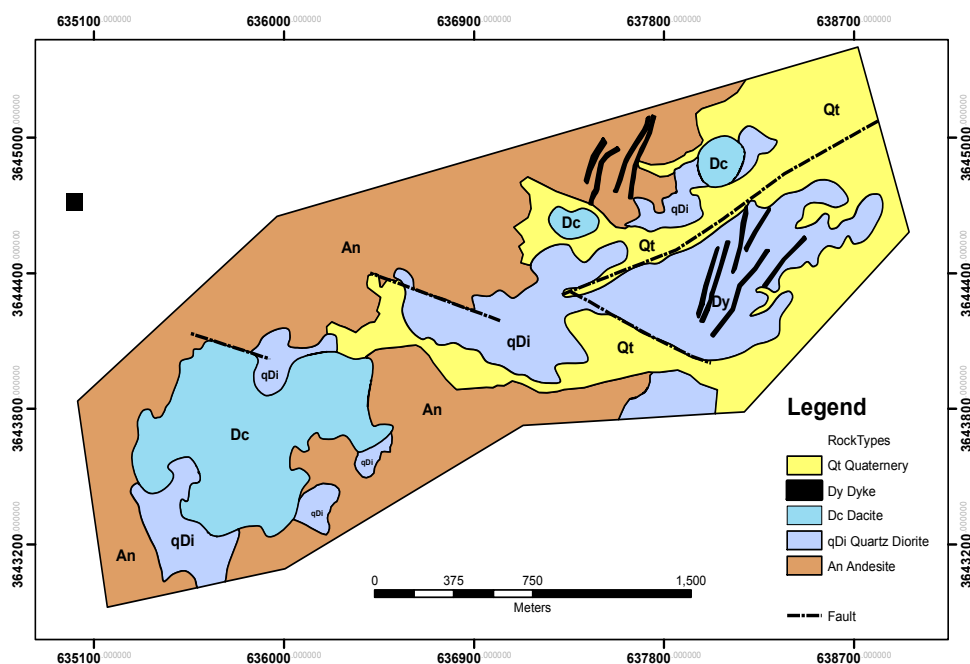
گسل‌ها در جایگیری سنگ‌های آذرین و تشکیل کانسار در منطقه دارد [۸].

## سنگ‌نگاری سنگ‌های آذرین

بر اساس بررسی‌های صحرایی، مغزه‌ها و مقاطع میکروسکوپی، سنگ‌های آذرین موجود در گستره از نظر ارتباط با کانی‌سازی به سه دسته درونگیر، کنترل‌کننده‌ی کانی‌سازی و دایک‌های عقیم پس از کانی‌سازی تقسیم می‌شوند.

## سنگ‌های درونگیر کانی‌سازی

ترکیب غالب سنگ‌های درونگیر کانی‌سازی آندزیتی به رنگ عمومی سبز تا خاکستری تیره است. این سنگ‌ها که عموماً به سن ائوسن هستند، در میوسن بالایی به وسیله توده‌های کوارتز دیوریتی - گرانودیوریتی و کمتر داسیتی قطع شده‌اند. بافت آندزیت‌ها بیشتر ریزبلور تا ریزپورفیری بوده و به ترتیب فراوانی پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی آن‌ها هستند. در مواردی ۱۰ درصد از حجم سنگ را کانی‌های فلزی شامل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت تشکیل داده‌اند. آندزیت‌ها در بخش‌هایی از گستره‌ی کانی‌سازی تحت تاثیر دگرسانی پتاسیک بیوتیتی ضعیف تا شدید واقع شده‌اند. این نوع دگرسانی به صورت فراگیر تا انتخابی است. در بخش‌هایی تراکی آندزیت، توف، بازالت و کوارتز آندزیت نیز سنگ‌های درونگیر کانی‌سازی هستند.

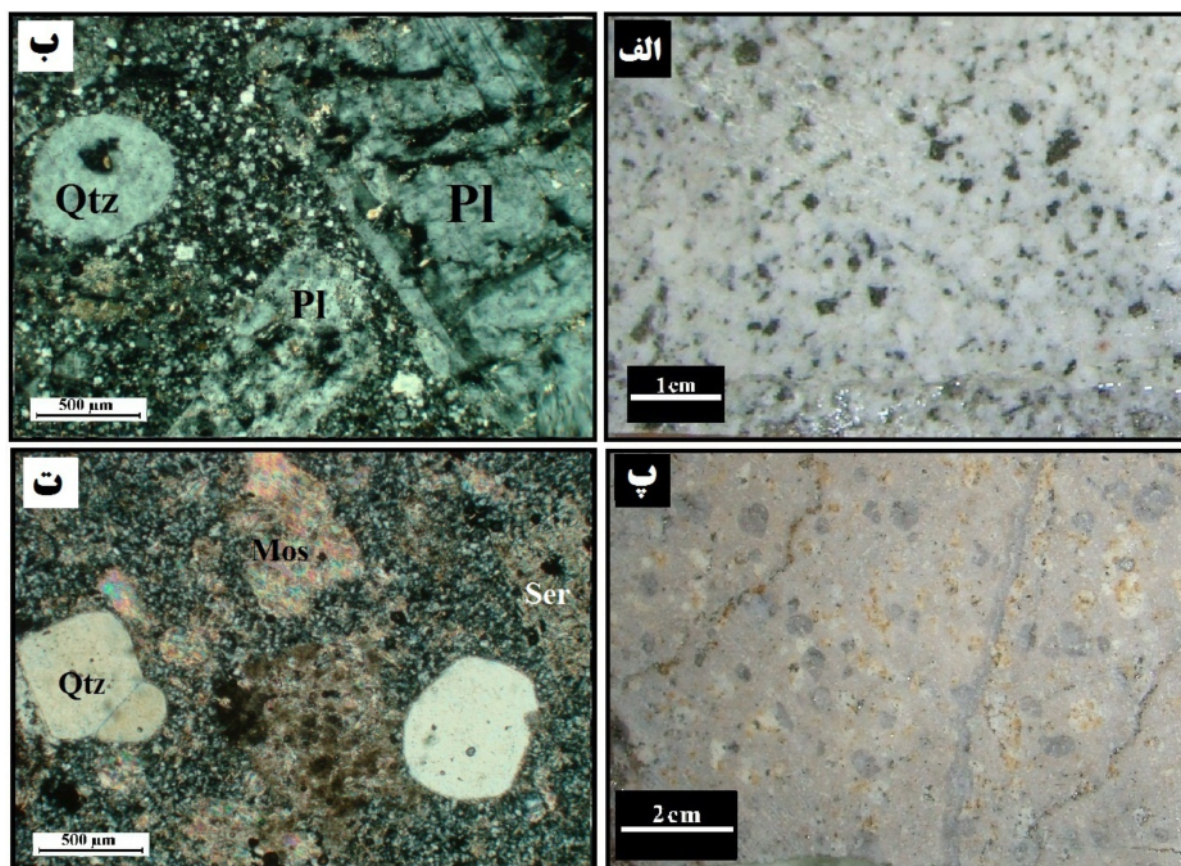


شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی کانسار مس پورفیری کهنک (مقیاس ۱:۱۰۰۰؛ اقتباس از [۹]).

## سنگ‌های کنترل‌کننده و مسئول کانی‌سازی

سنگ‌های کنترل‌کننده و در عین حال درونگیر اصلی کانی‌سازی بیشتر از نوع کوارتز دیوریتی بوده که بیش از ۷۰ درصد از توده‌ی اصلی را شامل می‌شوند. کوارتز دیوریت‌ها غالباً دارای بافت پورفیری بوده و از نظر بافتی به تدریج با افزایش کوارتز و دانه‌ای شدن فنوکریسیت‌ها به گرانودیوریت نیز ختم می‌شوند. بررسی مغزه‌ها نشان می‌دهد که یک نوع داسیت تاخیری با اندک تفاوت سنی، آخرین توده‌ی کنترل‌کننده‌ی کانی‌سازی است و واحدهای نامبرده را قطع می‌کند. درشت‌بلورهای سنگ‌های کوارتز دیوریتی پورفیری به ترتیب فراوانی، پلاژیوکلاز، بیوتیت و نیز کوارتزهای گردشده (ولی با فراوانی بسیار کمتر نسبت به داسیت‌ها) هستند که بین آنها با پلاژیوکلاز و کوارتز بین دانه‌ای پر شده است (شکل ۳- الف و ب). حضور کوارتزها و فلدسپارهای کمی گردشده که تنها در سنگ‌های پورفیری کانسار مشاهده می‌شوند، می‌تواند دلیلی بر تاثیر شاره‌های داغ

ماگمایی به هنگام صعود سریع ماگما به نزدیک سطح باشد. کانی‌های فلزی که گاه تا حدود ۱۰ درصد از حجم سنگ را تشکیل می‌دهند شامل مگنتیت و سولفیدهای آهن و مس هستند. داسیت تاخیری حجم قابل ملاحظه‌ای از استوک اصلی را تشکیل می‌دهد (بیش از ۲۰ درصد) و دارای بافت ریزپورفیری است (شکل ۳- پ و ت). این سنگ غالباً به رنگ-های کرم تا خاکستری روشن دیده می‌شود و دارای کوارتز گردشده بیشتر و پلاژیوکلاز کمتری هستند. پیریت اصلی‌ترین کانی فلزی مشاهده شده در داسیت‌ها است. حفره‌ها و شکستگی‌های این سنگ‌ها را انباشتی از بلورهای شعاعی تورمالین، ژیپس، انیدریت و گاه کلسیت پر می‌کنند. به‌طور کلی سنگ‌های کنترل‌کننده‌ی کانی‌سازی، به‌ویژه داسیت‌ها، تحت تاثیر دگرسانی‌های کوارتز - سریسیتی و فلیک با شدت‌های متوسط تا خیلی شدید واقع شده‌اند.



شکل ۳ الف) تصویر ماکروسکوپی یک کوارتز دیوریت پورفیری (KAG27-576؛ ب) تصویر میکروسکوپی یک کوارتز دیوریت پورفیری دارای کوارتزهای گردشده (KAG06-245؛ پ) تصویر ماکروسکوپی یک داسیت پورفیری با کوارتزهای چشمی فراوان (KAG62-104) (وت) تصویر میکروسکوپی یک داسیت که شدیداً کوارتز - سریسیتی شده است (KAG33-118). Qtz: کوارتز؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Ser: سریسیت؛ Mos: مسکویت.

## سنگ‌های پس از کانی‌سازی

این سنگ‌ها که جزو جوان‌ترین واحدهای آذرین در کانسار، محسوب می‌شوند، در بخش‌های مختلفی از کانسار سنگ‌های میزبان و کنترل‌کننده کانی‌سازی را قطع کرده و عموماً فاقد کانی‌سازی هستند. این واحدهای آندزیتی و داسیتی غالباً سالم بوده ولی دستخوش دگرسانی‌های خفیفی نیز شده‌اند. در دایک‌های آندزیتی در اغلب موارد نسبت زمینه به فنوکریست در حدود ۶۰ به ۴۰ است. زمینه را بیشتر کانی‌های بسیار ریز شامل میکرولیت‌های تیغه‌ای پلاژیوکلاز و بیوتیت تشکیل می‌دهند. فنوکریست‌های این سنگ‌ها پلاژیوکلاز و بیوتیت بوده و علاوه بر اینها در مواردی به‌صورت نادر فنوکریست‌های کوارتزی نیمه شکلدار تا گرد شده نیز مشاهده می‌شود. در دایک‌های داسیتی نسبت فنوکریست به زمینه تقریباً ۷۰ به ۳۰ است و مشابه داسیت‌های موجود در سیستم کانی‌سازی به ترتیب فراوانی شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و کوارتز هستند. کانی‌های زمینه‌ای این سنگ‌ها غالباً پلاژیوکلاز بوده که به مقدار کمی بیوتیت نیز آن را همراهی می‌کند.

## ژئوشیمی سنگ‌های آذرین

به منظور بررسی ژئوشیمی سنگ‌های آذرین کانسار پورفیری کهنک، از نتایج آنالیز ۱۰ نمونه از سنگ‌های نفوذی و خروجی استفاده شد. جدول ۱ نتایج آنالیز کلی سنگ را نمایش می‌دهد. با توجه به گستردگی دگرسانی در سنگ‌های این گستره، یافتن نمونه‌های سالم و دگرسان نشده در مرکز کانی‌سازی ناممکن است. نمونه‌های وابسته به سنگ‌های خروجی درونگیر کانسار در محلهایی دورتر از مرکز کانی‌سازی برداشت شده‌اند ولی به مقدار جزئی تحت تاثیر دگرسانی پروپیلیتیک واقع شده‌اند. در برداشت نمونه‌های وابسته به سنگ‌های کنترل‌کننده کانی‌سازی نیز تا حد امکان سعی بر آن بوده است تا از نمونه‌های کمتر دگرسان شده در اعماق بسیار بالا برداشت شوند، هر چند این نمونه‌ها نیز به مقدار جزئی تحت تاثیر دگرسانی فلیک و کمتر پتاسی قرار گرفته‌اند.

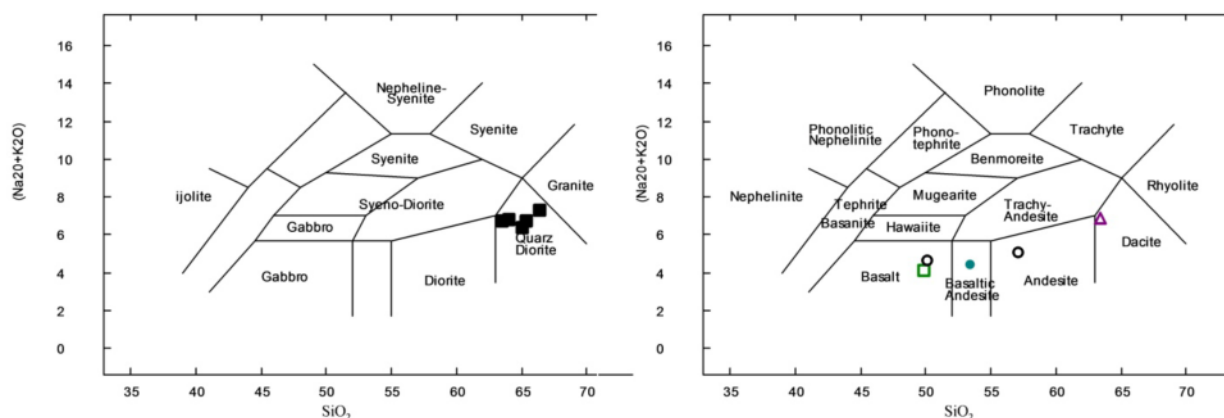
## ژئوشیمی عناصر اصلی

رده‌بندی سنگ‌های آذرین منطقه بر اساس بررسی‌های کاکس و همکاران<sup>۱</sup> [۱۰] نشان می‌دهد که سنگ‌های آذرین کانسار

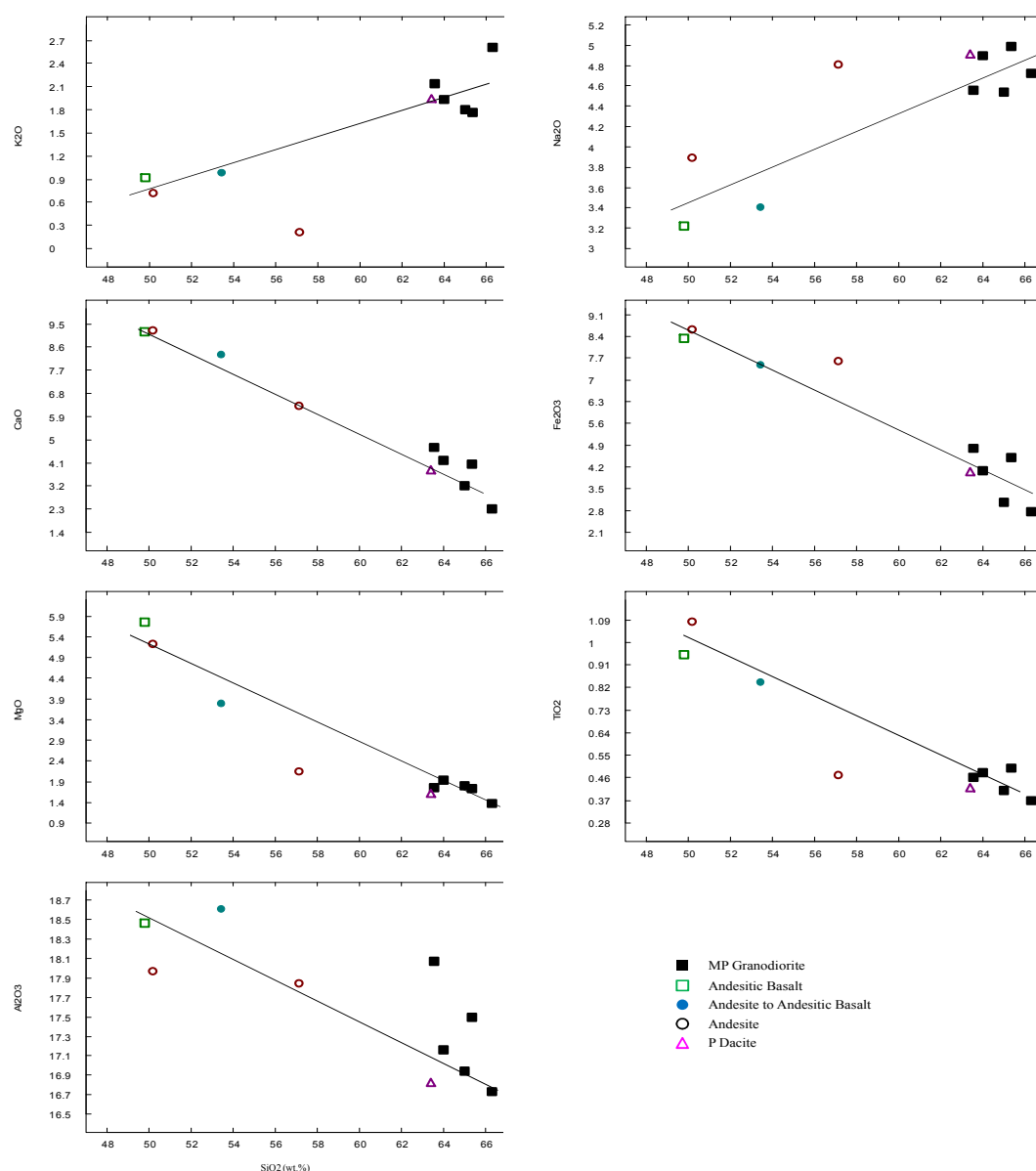
مس پورفیری کهنک غالباً در گستره آندزیت بازالت تا داسیت و کوارتزدیوریت هستند (شکل ۴ و ۵). دو نمونه از سنگ‌های آتشفشانی (نمونه‌های KAF-129 و KAF-157) در گستره‌ی بازالت واقع شده‌اند، در حالیکه بر اساس بررسی‌های سنگ نگاری این دو نمونه در واحد آندزیت تا آندزیت بازالت قرار می‌گیرند. وجود کانی‌های ثانویه کلسیم‌دار همچون کلسیت و اپیدوت در این نمونه‌ها دلیل تمایل نمونه‌های یاد شده به سمت بازالت است. با افزایش میزان  $\text{SiO}_2$  در سنگ‌ها مقدار  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  به طور خطی افزایش و میزان  $\text{CaO}$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{FeO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{P}_2\text{O}_5$  و  $\text{TiO}_2$  به طور خطی کاهش می‌یابد (شکل ۴). این تغییرات بیانگر هم‌خاستگاه بودن نمونه‌ها و تاثیر روند جدایش بر آنهاست [۱۱]. روند خطی نمونه‌ها در نمودار AFM (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد که ماگمای سازنده‌ی سنگ‌های آذرین کانسار پورفیری کهنک به طور همزمان از آهن و منیزیم فقیر و به مقدار عناصر قلیایی آن افزوده شده است. بنا بر این نمودار، ماگمای یاد شده جزو سری آهکی - قلیایی است [۱۲]. در کهنک سنگ‌های آذرین نفوذی از سنگ‌های آتشفشانی جواتر (الیگومیوسن در برابر میوسن بالایی) هستند و به همین دلیل روند تکامل و تبلور جدایشی ماگما در نمودارهای هارکر و AFM مشاهده می‌شود. نمودار A/NK نسبت به A/CNK (شکل ۶-ب) بیانگر این است که توده‌ی گرانیتوئیدی مورد بررسی در گستره‌ی سنگ‌های پرآلومین و پتاسیم متوسط تا بالا قرار می‌گیرد [۱۳]. برداشت خدایپرست (۱۳۸۹) نیز پیش از این مؤید این ادعا بوده است [۳]. پرآلومین این سنگ‌ها می‌تواند نتیجه‌ی حضور کانی‌هایی همچون تورمالین، مسکویت و بیوتیت در این سنگ‌ها باشد. در نتیجه می‌توان سرچشمه‌ی این سنگ‌ها را تیغه گوشته‌ای با مشارکت پوسته‌ی قاره‌ای دانست. به عبارتی، سنگ‌های یاد شده در نتیجه فرورانش یک تیغه گوشته‌ای به زیر پوسته‌ی قاره‌ای تشکیل شده‌اند. وجود چنین روندهایی در سایر کانسارهای مس پورفیری ایران واقع در کمربند ارومیه - دختر [۶، ۱۴] و سایر نقاط جهان [۱۵-۱۷] نیز گزارش شده است.

جدول ۱ نتایج آنالیز XRF و ICP سنگ‌های درونگیر کانسار.

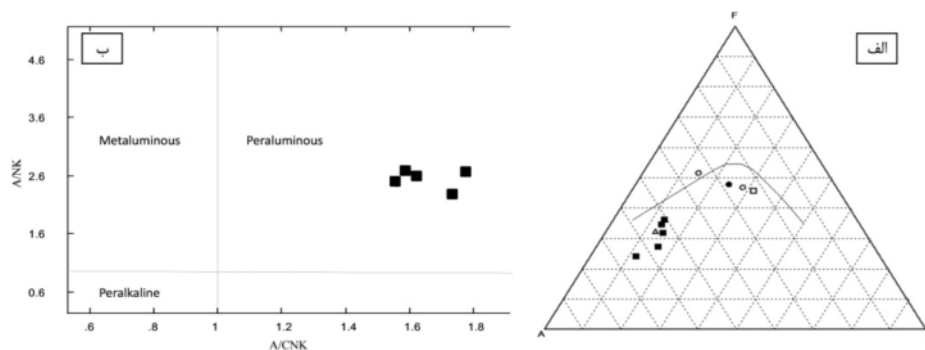
| نمونه                            |     | KAF-022 | KAF-042 | KAF-143 | KAF-188 | KAF-206 | KAF-157 | KAF-116 | KAF-094 | KAF-129 | KAF-047 |
|----------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| واحد سنگی                        |     | M P GD  | M P GD  | M P GD  | M P GD  | M P GD  | AB      | A to AB | A       | A       | PD      |
| SiO <sub>2</sub>                 | wt% | ۶۶٫۳۳   | ۶۴٫۰۱   | ۶۵٫۳۳   | ۶۳٫۵۳   | ۶۵٫۰۲   | ۴۹٫۸۲   | ۵۳٫۶۴   | ۵۷٫۱۵   | ۵۰٫۱۹   | ۶۳٫۴۰   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | wt% | ۱۶٫۷۳   | ۱۷٫۱۶   | ۱۷٫۵۰   | ۱۸٫۰۷   | ۱۶٫۹۴   | ۱۸٫۴۶   | ۱۸٫۶۱   | ۱۷٫۸۴   | ۱۷٫۹۷   | ۱۶٫۸۳   |
| Na <sub>2</sub> O                | wt% | ۴٫۷۲    | ۴٫۹     | ۴٫۹۹    | ۴٫۵۶    | ۴٫۵۴    | ۳٫۲۲    | ۳٫۴     | ۴٫۸۱    | ۳٫۸۹    | ۴٫۹۲    |
| T.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | wt% | ۲٫۷۷    | ۴٫۰۷    | ۴٫۴۹    | ۴٫۸     | ۳٫۰۶    | ۸٫۳۳    | ۷٫۴۶    | ۷٫۶     | ۸٫۶۲    | ۴٫۰۵    |
| K <sub>2</sub> O                 | wt% | ۲٫۶۱    | ۱٫۹۳    | ۱٫۷۶    | ۲٫۱۴    | ۱٫۸     | ۰٫۹۲    | ۰٫۹۸    | ۰٫۲     | ۰٫۷۱    | ۱٫۹۵    |
| CaO                              | wt% | ۲٫۳۱    | ۴٫۱۹    | ۴٫۰۴    | ۴٫۶۹    | ۳٫۲     | ۹٫۲۱    | ۸٫۳     | ۶٫۲۸    | ۹٫۲۴    | ۳٫۸۲    |
| MgO                              | wt% | ۱٫۳۷    | ۱٫۹۳    | ۱٫۷۴    | ۱٫۷۶    | ۱٫۸۱    | ۵٫۷۶    | ۳٫۷۹    | ۲٫۱۳    | ۵٫۲۱    | ۱٫۶۱    |
| MnO                              | wt% | ۰٫۰۳    | ۰٫۰۹    | ۰٫۰۶    | ۰٫۰۷    | ۰٫۰۴    | ۰٫۱۵    | ۰٫۲     | ۰٫۱۹    | ۰٫۱۵    | ۰٫۰۵    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | wt% | ۰٫۱۵    | ۰٫۲۷    | ۰٫۳۳    | ۰٫۲۳    | ۰٫۱۹    | ۰٫۳۳    | ۰٫۵     | ۰٫۲۲    | ۰٫۳۹    | ۰٫۲۱    |
| SO <sub>3</sub>                  | wt% | ۰٫۰۸    | ۰٫۰۸    | ۰٫۰۴    | ۰٫۰۴    | ۰٫۰۴    | ۰٫۰۷    | ۰٫۰۸    | ۰٫۰۷    | ۰٫۰۴    | ۰٫۰۵    |
| TiO <sub>2</sub>                 | wt% | ۰٫۳۷    | ۰٫۴۸    | ۰٫۵     | ۰٫۴۶    | ۰٫۴۱    | ۰٫۹۵    | ۰٫۸۴    | ۰٫۴۷    | ۱٫۰۸    | ۰٫۴۲    |
| LOI                              | wt% | ۲٫۷۳    | ۱٫۶۹    | ۱٫۲۶    | ۱٫۱۸    | ۲٫۴۲    | ۲٫۸۸    | ۲٫۱۷    | ۲٫۸۷    | ۲٫۳     | ۲٫۳۴    |
| Ba                               | ppm | ۸۴۱     | ۷۶۴     | ۶۸۲     | ۷۶۱     | ۱۰۱۵    | ۵۴۳     | ۶۰۰     | ۱۴۶     | ۶۰۴     | ۷۲۹     |
| Cd                               | ppm | ۰٫۲۶    | ۰٫۲۶    | ۰٫۲۵    | ۰٫۲۵    | ۰٫۲۶    | ۰٫۲۴    | ۰٫۲۵    | ۰٫۲۶    | ۰٫۲۵    | ۰٫۲۴    |
| Ce                               | ppm | ۴۰      | ۵۵      | ۵۹      | ۴۷      | ۵۸      | ۵۸      | ۷۵      | ۲۴      | ۸۶      | ۳۹      |
| Co                               | ppm | ۸       | ۱۰      | ۱۳      | ۱۵      | ۸       | ۳۲      | ۲۳      | ۱۸      | ۲۹      | ۱۰      |
| Cr                               | ppm | ۸       | ۱۵      | ۲۲      | ۱۲      | ۱۴      | ۱۷۱     | ۷۰      | ۲۱      | ۱۳۲     | ۱۳      |
| Cs                               | ppm | ۱٫۷     | ۱٫۸     | ۲       | ۱٫۸     | ۱٫۹     | ۱٫۹     | ۲٫۱     | ۱٫۸     | ۱٫۹     | ۱٫۷     |
| La                               | ppm | ۲۶      | ۲۴      | ۲۸      | ۳۰      | ۳۲      | ۱۵      | ۲۹      | ۸       | ۲۰      | ۲۱      |
| Nb                               | ppm | ۱۹      | ۲۱      | ۱۵      | ۱۲      | ۱۶      | ۱۶      | ۱۶      | ۱۹      | ۱۴      | ۱۶      |
| Ni                               | ppm | ۸       | ۱۶      | ۱۴      | ۱۰      | ۱۰      | ۸۴      | ۳۵      | ۴       | ۶۶      | ۱۰      |
| Pb                               | ppm | ۳۳      | ۱۷      | ۹       | ۱۴      | ۸       | ۱۱      | ۸       | ۸       | ۷       | ۸       |
| Rb                               | ppm | ۱۰۹     | ۸۷      | ۸۹      | ۸۶      | ۸۶      | ۳۹      | ۵۱      | ۳۸      | ۵۳      | ۸۴      |
| Sc                               | ppm | ۴٫۹     | ۷       | ۷٫۴     | ۷٫۹     | ۶٫۸     | ۲۲٫۹    | ۲۱٫۶    | ۱۰٫۵    | ۲۳٫۱    | ۵٫۷     |
| Sr                               | ppm | ۳۳۶     | ۴۹۷     | ۴۹۴     | ۴۹۹     | ۴۶۹     | ۳۳۸     | ۳۹۸     | ۳۶۳     | ۳۶۳     | ۴۲۲     |
| Th                               | ppm | ۱۶٫۲    | ۱۵٫۸    | ۱۵٫۳    | ۱۵٫۴۴   | ۱۸٫۴    | ۸٫۷     | ۹       | ۳٫۷     | ۲٫۹     | ۱۴٫۲    |
| Tl                               | ppm | ۱٫۱۷    | ۱٫۱۸    | ۱٫۲۴    | ۱٫۱۳    | ۱٫۳۵    | ۰٫۹۴    | ۱٫۰۲    | ۱٫۱     | ۰٫۸۹    | ۱٫۱۸    |
| U                                | ppm | ۴٫۳     | ۴٫۴     | ۴٫۴     | ۴٫۴     | ۴٫۲     | ۴       | ۳٫۷     | ۴٫۵     | ۴٫۵     | ۴٫۴     |
| V                                | ppm | ۵۰      | ۷۱      | ۸۴      | ۸۱      | ۶۸      | ۱۷۷     | ۱۷۳     | ۵۲      | ۱۹۹     | ۶۰      |
| Y                                | ppm | ۷       | ۸       | ۱۰      | ۱۰      | ۸       | ۲۲      | ۲۷      | ۲۰      | ۲۵      | ۶       |
| Yb                               | ppm | ۰٫۸     | ۱       | ۱       | ۱٫۱     | ۰٫۹     | ۲٫۴     | ۲٫۴     | ۲٫۱     | ۲٫۷     | ۰٫۸     |
| Zr                               | ppm | ۹۲      | ۱۹      | ۲۵      | ۱۵      | ۲۱      | ۹۹      | ۸۰      | ۵۷      | ۱۱۷     | ۲۶      |

T.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Total Iron; MP GD: Micro Porphyritic Granodiorite; A: Andesite; B: Basalt; P: Porphyritic, D: Dacite

شکل ۴ نمودار سیلیس در برابر مجموع قلیایی (TAS) سنگ‌های نفوذی و خروجی کهنک [۹]. نمادها مشابه شکل ۴ هستند.



شکل ۵. نمودارهای تغییرات اکسید عناصر اصلی بر حسب تغییرات اکسید سیلیس در سنگ‌های آذرین کانسار پورفیری کهنک. فراوانی عناصر در محور قائم بر حسب درصد وزنی است.

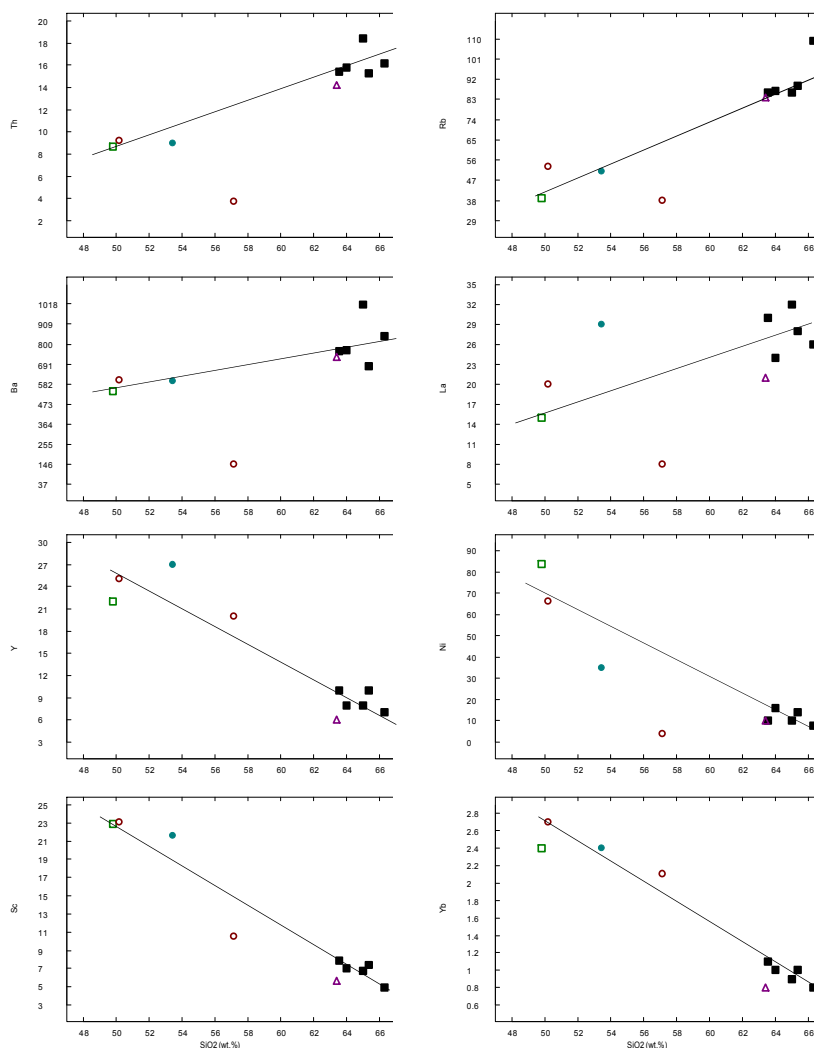


شکل ۶. الف) نمودار AFM سنگ‌های آذرین کانسار کهنک [۱۱]. ب) نمودار دسته‌بندی سنگ‌های آذرین بر اساس درصد اکسیدهای آلومینیوم، کلسیم، سدیم و پتاسیم [۱۲]. نمادها مشابه شکل ۴ هستند.

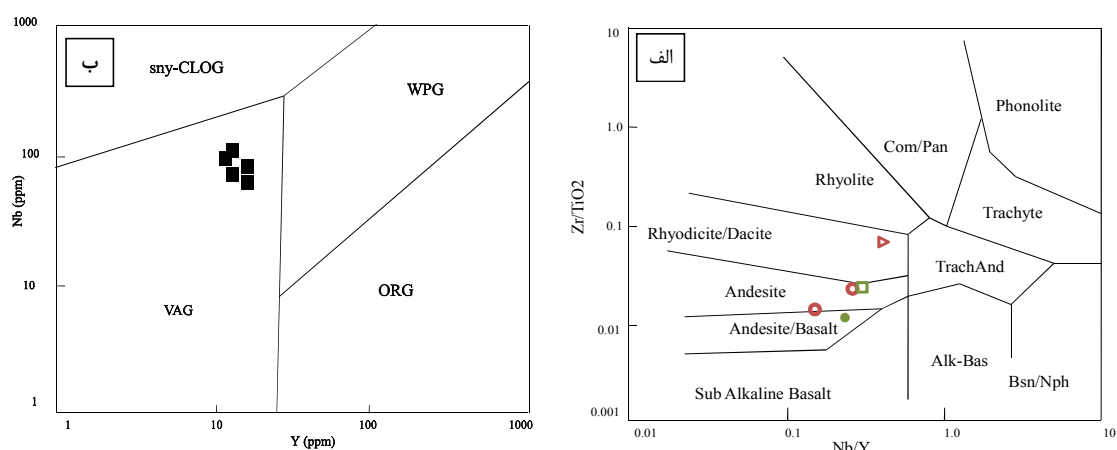
## ژئوشیمی عناصر جزئی و نادر

مشابه عناصر اصلی، عناصر Rb، Th، Ba و La نیز با افزایش  $\text{SiO}_2$  به صورت خطی افزایش Sc، Yb، Ni و Y کاهش یافته و عنصر Ce روند ثابتی از خود نشان می‌دهد (شکل ۷). این بدین معنی است که تبلور جدایشی نقش مهمی در تکامل ماگما و به‌وجود آوردن گونه‌های مختلف سنگی در کانسار شده است. روندهای تقریباً هم شیب مشاهده شده در تغییرات عناصر اصلی و جزئی بر حسب میزان  $\text{SiO}_2$  ثابت می‌کند که خاستگاه این دو دسته یک ماگمای مادر (یا ماگمای بسیار مشابه) بوده است. در رده‌بندی سنگ‌های خروجی منطقه بر اساس عناصر فرعی، این سنگ‌ها در مجموعه نمودارهای Nb بر حسب Y نشان می‌دهد که سنگ‌های آذرین کهنک در گستره-ی سنگ‌های فلسیک در قوس‌های آتشفشانی قرار می‌گیرند

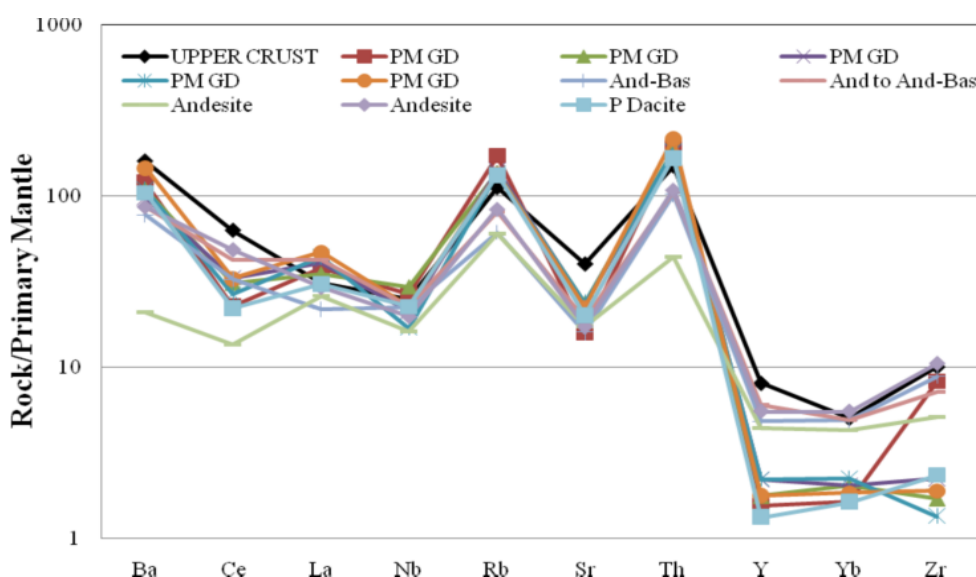
(شکل ۸، [۱۸]) که مشابه سایر کانسارهای مس پورفیری شناخته شده‌ی دیگر روی کمربند ارومیه - دختر هستند [۱۳، ۶]. نمودارهای REE عمود بر به گوشته‌ی اولیه برای سنگ‌های آذرین کهنک (شکل ۹) نشان می‌دهد که این سنگ‌ها هم در عناصر سازگار و هم در عناصر ناسازگار غنی‌تر از گوشته‌ی اولیه هستند. روندهای کاهش‌ی مشاهده شده در عناصر یاد شده نشانه‌ی ذوب بخشی سنگ‌های آذرین پوسته‌ای باشد که یکی از سرشتی‌های مهم سنگ‌های آذرین سری آهکی - قلیایی است [۱۹]. در نمودار عنکبوتی سنگ‌های خروجی و نفوذی، روندی مشابه‌ی پوسته‌ی بالایی دارند (شکل ۹، [۲۰]). به طور خلاصه پدیده‌های یاد شده در مورد توده‌های آذرین کهنک شواهد تشکیل ماگما در مناطق فرورانش و تاثیر آلیش پوسته‌ای را تایید می‌کند.



شکل ۷ نمودارهای تغییر عناصر فرعی و نادر بر حسب تغییر اکسید سیلیس در سنگ‌های آذرین کانسار پورفیری کهنک. فراوانی عناصر در محور قائم بر حسب ppm است. نمادها مشابه شکل ۴ هستند.



شکل ۸ الف) نمودار  $Zr/TiO_2$  نسبت به  $Nb/Y$  برای دسته‌بندی سنگ‌های آذرین کانسار مس پورفیری کهنک [۱۷]. ب) نمودار تمایز محیط - های زمین ساختی [۱۸]. در این نمودار VAG گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی، syn-COLG گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد، WPG، گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای و ORG گرانیتوئیدهای پشته‌ای اقیانوسی هستند. نمادها مشابه شکل ۴ هستند.



شکل ۹ نمودار عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی و درونی گستره که نسبت به گوشته‌ی اولیه بهنجار شده‌اند [۱۸] و در عین حال مورد مقایسه با پوسته‌ی بالایی [۱۹] قرار گرفته‌اند.

### دگرسانی پتاسی

اولین مرحله دگرسانی در کانسار مس پورفیری کهنک زون دگرسانی پتاسی است. مهم‌ترین کانی‌های محصول دگرسانی در این زون عبارتند از: بیوتیت، انیدریت و مگنتیت. در این کانسار، زون دگرسانی پتاسی بیشتر به واسطه حضور کانی بیوتیت مشخص می‌شود و شاهد اندکی مبنی بر حضور فلدسپار قلیایی گرمابی تنها در اعماق بسیار بالا وجود دارد (در اعماق ۷۳۰ متری در تنها دو گمانه‌ی عمیق ۵۰ و ۶۶ کانسار، شکل ۱۰-).

### دگرسانی و کانی‌سازی

بررسی‌های دقیق میکروسکوپی و زمین‌شناسی سطحی در بخش‌های مختلف کانسار مس پورفیری کهنک ثابت کرد که مهم‌ترین منطقه‌های دگرسانی در کهنک به ترتیب عبارتند از: فیلیک (کوارتز- سریسیتی)، پتاسیک (بیوتیتی)، پروپیلیتیک (کلسیتی و کلریتی) و آرژلیک. این منطقه‌های دگرسان گاه روی یکدیگر بازنهشت<sup>۲</sup> شده‌اند.

انتخابی پلاژیوکلازهای کلسیک موجود در آندزیت‌ها را تحت تاثیر قرار داده و جانشین آن‌ها می‌شود. کانی سولفیدی این زون پیریت است و کانه‌های مس در آن به ندرت حضور داشته و یا مشاهده نمی‌شوند.

#### دگرسانی فیلیک

شاخص‌ترین و گسترده‌ترین زون دگرسانی موجود در کانسار کهنک زون دگرسانی فیلیک و کوارتز - سریسیتی است که بخش‌های زیادی از این کانسار (غالباً داسیت‌های کنترل‌کننده کانی‌سازی) را از اعماق بسیار زیاد تا سطح زمین با شدت‌های متفاوت تحت تاثیر قرار داده است. بیش‌ترین کانی‌های شاخص دگرسانی فیلیک حاضر در کانسار به ترتیب فراوانی عبارتند از: کوارتز، سریسیت، تورمالین، موسکویت، پیریت و انیدریت (شکل ۱۰-پ). در بخش‌هایی از کانسار، دگرسانی فیلیک مشتمل بر مجموعه کانیایی کوارتز و سریسیت (و تقریباً فاقد پیریت) است، که در این حالت می‌توان از آن به عنوان دگرسانی کوارتز - سریسیتی یاد کرد. در این دگرسانی کانی‌های مافیک و پلاژیوکلازها به‌طور جزئی تا کامل توسط سریسیت و کوارتز جانشین می‌شوند. تورمالین با نسل‌های مختلف به مقدار قابل ملاحظه‌ای در این زون حضور دارد (زون کوارتز - تورمالین) که غالباً به صورت رگه - رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و به‌صورت هاله در اطراف رگه‌های کوارتزی - انیدریتی در سنگ مشاهده می‌شود. پیریت بیش‌ترین سولفیدی است که زون فیلیک را همراهی می‌کند.

#### دگرسانی آرژیلیک

گسترش این زون در کانسار مس پوفیری کهنک ناچیز بوده و از اعماق کمتر از ۱۵۰ متر تا سطح زمین حضور دارد. کانی‌های محصول این دگرسانی کائولینیت و در مواردی مونت‌موریلونیت هستند. کائولینیت در اثر دگرسانی ریزبلورهای زمینه و فنوکریست‌های پلاژیوکلازی سنگ به‌وجود می‌آید. در بخش‌های سطحی و کم عمق کانسار (کمتر از ۳۰ متر) پوشش نازکی از ژاروسیت سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار داده است که احتمالاً طی فرایندهای برونزایی تشکیل شده است و با افزایش عمق، حضور کانی‌های رسی ناشی از دگرسانی آرژیلیک درونزا بیشتر می‌شود (شکل ۱۰-ت).

الف). این دگرسانی غالباً به سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانی‌سازی محدود می‌شود. ظاهراً بیوتیتی شدن آندزیت‌ها و تراکی آندزیت‌های میزبان کانی‌سازی اغلب در مراحل اولیه صورت گرفته و به نوعی با فرایند هورنفلسی شدن معادل است. به عبارتی، توسعه بیوتیتی شدن به شدت تابع سنگ شناسی سنگ‌های تاثیر پذیرفته است. این پدیده در سنگ‌های کنترل‌کننده کانی‌سازی به مراتب کمتر مشاهده می‌شود. این زون با شدت‌های مختلف از سطح زمین تا اعماق بسیار بالا قابل تعقیب است. بیوتیت‌های گرمابی به دو صورت ریزدانه‌ی پراکنده یا انباشتی، و رگچه‌های بیوتیتی دیده می‌شوند و دارای رنگ قهوه‌ای روشن و سبز روشن هستند. تفاوت ترکیبی این بیوتیت‌ها شاهدهی بر این است که دگرسانی پتاسی در کانسار پورفیری کهنک دارای حداقل دو تپ بوده است. حضور این دگرسانی در سطوح مختلفی از کانسار (از اعماق زیاد تا حتی سطح زمین) نیز می‌تواند موید این مطلب باشد. علاوه بر بیوتیت، کانی‌های سولفیدی - سولفات‌ها نیز در این زون به فراوانی حضور دارند که می‌توان به انیدریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت، پیریت و به ندرت ژپس اشاره کرد. زون پتاسی در مراحل بعدی در اثر دگرسانی‌های فیلیک، کلریتی و آرژیلیک تحت تاثیر واقع شده و در مواردی تقریباً از بین رفته است و تنها آثار جزئی از بیوتیت‌های گرمابی آن دیده می‌شود.

#### دگرسانی پروپیلیتیک

گسترش این دگرسانی اغلب در سنگ‌های دورتر از گستره‌ی حفاری دیده می‌شود و از مرکز سیستم به حاشیه یا سقف کانسار به شدت آن افزوده می‌شود. بیش‌ترین کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک حاضر در کانسار به ترتیب فراوانی عبارتند از: کلریت، کلسیت، سریسیت، کمی اکتینولیت و به طور جزئی اپیدوت (شکل ۱۰-ب). در اعماق زیاد دگرسانی پروپیلیتیک بیشتر از نوع کلریتی - سریسیتی است که در نزدیکی دگرسانی فیلیک واقع شده است. نسل‌های مختلفی از کلریت اغلب به‌طور انتخابی جانشین بیوتیت‌های اولیه و ثانویه و سایر کانی‌های دیگر مافیک همچون پیروکسن و آمفیبول می‌شود. در سطوح بالاتر کانسار، دگرسانی پروپیلیتیک به سریسیتی - کلسیتی متمایل شده و در مواردی سنگ کاملاً توسط سریسیت و کلسیت جانشین می‌شود. کلسیت به طور

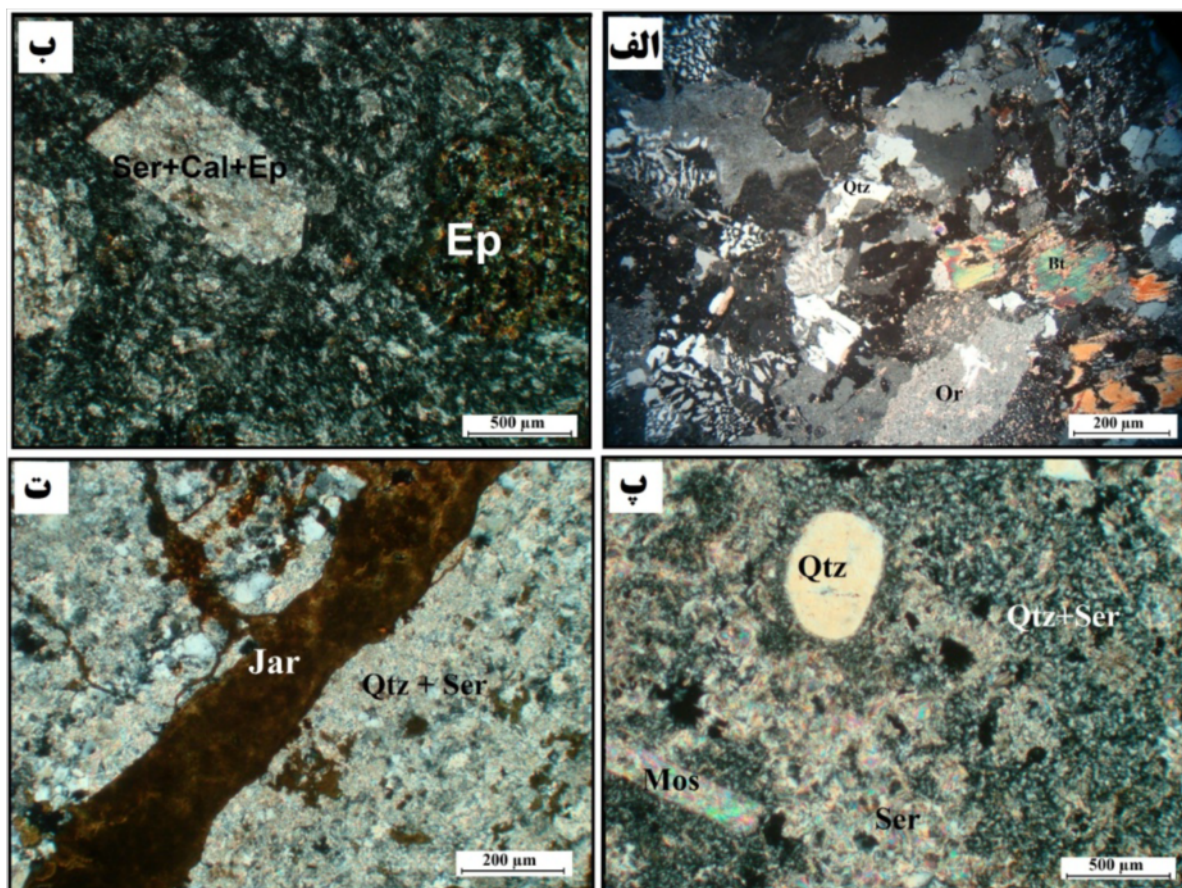
## کانی‌سازی

برخلاف بسیاری از کانسارهای پورفیری شناخته شده در جهان، کانی‌سازی در کانسار کهنک به شکل پراکنده (افشان) و داربستی از حجم کمی برخوردار بوده و بیشتر در زون‌های برشی و رگه - رگچه‌های پراکنده و در عین حال پر شیب دیده می‌شود. گاه زون‌های کانی‌سازی پرشیب و پیوسته تا ۱۰۰ متر، به شکل تنوره‌های برشی دیده می‌شود. گسترش و پیوستگی جانبی این زون‌های پرعیار برخلاف گسترش عمقی آن‌ها معمولاً محدود و نامنظم است و به همین دلیل عیار میانگین کاهش می‌یابد. در این کانسار زون شسته شده (لیچ) و برونزا بسیار کم ضخامت بوده و به شکل پوششی نازک تا عمق حداکثری ۳۰ متری و تنها در تعداد کمی از گمانه‌ها قابل مشاهده است. در کانسار مس پورفیری کهنک، کانی‌سازی

مولیدن و طلا با عیار و گسترش پایین وجود دارند که می‌توان کانسار را در گروه کانسارهای مس پورفیری غیر کلاسیک جای داد.

## رده‌بندی رگه - رگچه‌ها و برش‌ها

نفوذ پی‌درپی توده‌های آذرین باعث تشکیل نسل‌های مختلفی از رگه‌های کوارتز می‌شود که سرشتی شاری کانه‌ساز و دگرسانی هستند [۲۱]. از ۷۹ گمانه حفر شده در کانسار مس پورفیری کهنک، بیش از ۱۰۰ نمونه برای بررسی رگه - رگچه - ها و برش‌ها برداشت شدند. مراحل متعدد فعالیت ماگما در این کانسار موجب تشکیل ۶ خانواده اصلی رگه - رگچه و برشی متعدد شده است که خلاصه‌ی ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۰ الف) تصویر میکروسکوپی رگه‌ی کوارتز - اورتوز (دگرسانی پتاسی نوعی) در یک نمونه بسیار عمیق (KAG66-734؛ ب) دگرسانی پروپلیتیک و تخریب پلاژیوکلازها به اپیدوت، سریسیت و کلسیت. پ) دگرسانی فلیک شدید. ملاحظه می‌شود که پلاژیوکلازهای زمینه و فنوکریست‌ها به سریسیت دگرسان شده‌اند. بیوتیت نیز به موسکویت شبه ریخت شده است. ت) رگچه ژاروسیتی که در عمق ۲۴ متری سطح زمین روی دگرسانی کوارتز - سریسیت بازنهشت شده است. Ep: اپیدوت؛ Cal: کلسیت؛ Ser: سریسیت؛ Qtz: کوارتز؛ Or: اورتوز؛ Bt: بیوتیت؛ Mos: موسکویت.

جدول ۲ ویژگی های اصلی انواع رگه-رگچه ها و برش های موجود در کانسار مس پورفیری کهنک.

| نوع رگچه | ساختار                                                                                                     | پیشروی رگچه                        |                                                 |                                                   | هاله رگچه         |                        |              |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------|------------------------|--------------|
|          |                                                                                                            | ضخامت                              | کانی باطله                                      | کانی فلزی                                         | ضخامت             | کانی باطله             | کانی سولفیدی |
| EB       | رگچه های نازک                                                                                              | کمتر از ۱ میلیمتر                  | بیوتیت                                          | —                                                 | —                 | —                      | —            |
| M        | رگه های تا توده ای و گاه خمیره در برش ها                                                                   | از ۲ میلیمتر تا بیش از ۲۰ سانتیمتر | در مواردی کوارتز و غالباً فاقد پرکننده غیر فلزی | مگنتیت                                            | از ۱ تا ۳ میلیمتر | کلریت، سریسیت و کوارتز | پیریت        |
| A1       | رگه های با دیواره های سینوسی                                                                               | ۱ تا ۳ میلیمتر                     | کوارتز                                          | مگنتیت $\pm$ کالکوپیریت                           | ناچیز             | کلریت                  | —            |
| A2       | رگه های با دیواره های سینوسی و صاف، گاه ریتمیک                                                             | ۲ میلیمتر تا ۵ سانتیمتر            | کوارتز                                          | کالکوپیریت $\pm$ پیریت                            | —                 | —                      | —            |
| B        | رگه های با دیواره های نامنظم (عمق زیاد) تا صاف و دانه ای آپلیتیک (عمق کم) و غالباً به صورت خمیره در برش ها | به طور متوسط ۳ میلیمتر             | کوارتز                                          | کالکوپیریت (عمق زیاد)، مولیبدنیت - پیریت (عمق کم) | —                 | —                      | —            |
| P        | غالباً به صورت خمیره در برش ها و گاه رگه ای                                                                | در رگه ها کمتر از ۱ سانتیمتر       | انیدریت صورتی                                   | کالکوپیریت $\pm$ پیریت                            | —                 | —                      | —            |
| D        | رگه های با دیواره های صاف                                                                                  | ۱ تا ۳ میلیمتر                     | کوارتز                                          | پیریت                                             | از ۲ تا ۵ میلیمتر | کوارتز و سریسیت        | پیریت        |
| T        | رگه های با دیواره های صاف و گاه خمیره برش ها                                                               | ۳ تا ۱۰ میلیمتر                    | تورمالین                                        | $\pm$ کالکوپیریت $\pm$ پیریت                      | —                 | —                      | —            |
| L        | رگه های با دیواره های صاف                                                                                  | کمتر از ۱۰ میلیمتر                 | کلسیت                                           | پیریت $\pm$ کالکوپیریت                            | —                 | —                      | —            |

A1, A2, B, D: Quartz Veins Sequences; EB: Early Biotite; M: Magnetite; P: Pinkish Anhydrite; T: Tourmaline; L: Late.

## بررسی میانبارهای شاره

## نمونه برداری و دسته بندی میانبارها

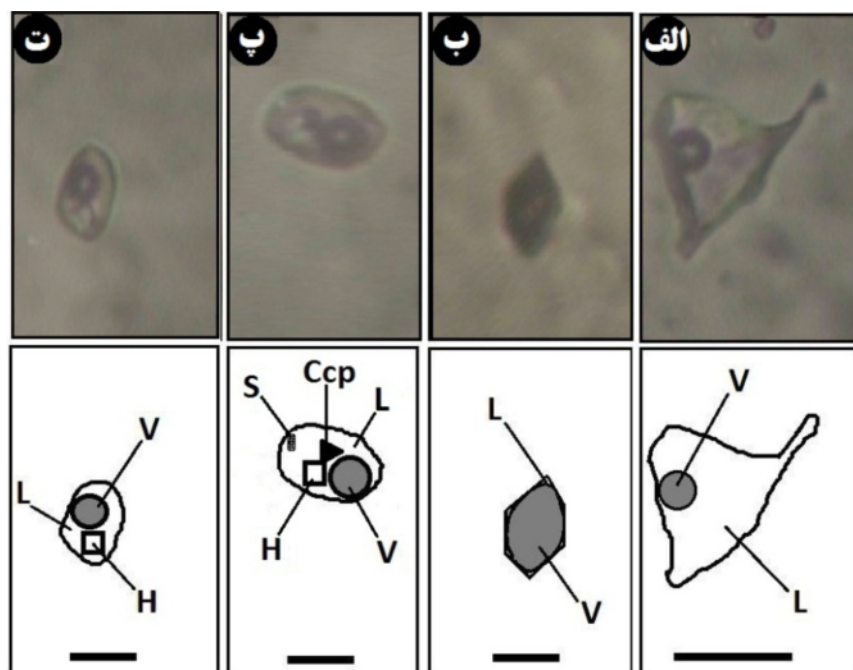
به منظور بررسی میانبارهای شاری تعداد ۴ نمونه از رگه های کوارتزدار نوع A<sub>2</sub> و B موجود در زون دگرسانی پتاسی انتخاب شدند. در تمامی رگه های انتخاب شده، میانبارهای شاری به فراوانی حضور دارند. اندازه میانبارها از ۳ تا ۲۰ میکرومتر تغییر می کند و برای سهولت در اندازه گیری ها، غالباً میانبارهای شاری نوع اولیه و ثانویه کاذبی که با اندازه های میانگین بیش از ۶ میکرومتر انتخاب و مورد استفاده قرار گرفتند. سه دسته ای اصلی میانبار شاری بر اساس تعداد، طبیعت و نسبت فازها در دمای اتاق تعیین شدند (شکل ۱۱) که ویژگی های آن ها در جدول ۳ آمده اند. در جدول ۴ نتایج بررسی میانبارهای شاری در کانسار مس پورفیری کهنک ارائه شده اند.

## ریز دماسنجی میانبارهای شاری

دماهای یوتکتیک میانبارهای LVHS در رگه های گروه A<sub>2</sub> و B از ۲۶- تا ۵۶ °C تغییر می کند و بیانگر غلظت بالای کاتیون های آهن، منیزیم و کلسیم علاوه بر سدیم و پتاسیم در این نوع میانبارها است. در میانبارهای زیرگروه LVHS<sub>1</sub> و زیرگروه LVHS<sub>2</sub> که در رگه های گروه A<sub>2</sub> حضور دارند، دمای یوتکتیک به ترتیب از ۳۹- تا ۵۰/۱- (با میانگین ۴۵ °C-) و ۵۱- تا ۵۵- (با میانگین ۵۳ °C-) تغییر می کند. این دماها به ترتیب معادل ۴۱/۳ تا ۴۷/۱ (با میانگین ۴۴/۴) و ۴۲/۱ تا ۴۱/۴ (با میانگین ۴۶/۷) درصد نمک طعام معادل است. میانگین شوری محاسبه شده بر اساس دمای انحلال آخرین جامد در رگه های B به ترتیب برای میانبارهای VL، LVHS<sub>1</sub>، LVHS<sub>2</sub> و LVHS<sub>3</sub> برابر با ۶/۲، ۴۳/۱، ۴۳/۵ و ۳۵/۵ درصد نمک طعام

برخی با انحلال هالیت و برخی دیگر با ناپدید شدن تقریباً همزمان بخار و بلور هالیت همگن می‌شوند. میانگین دمای ناپدید شدن بخار و انحلال هالیت در میانبارهای LVHS<sub>2</sub> رگه-های گروه A<sub>2</sub> به ترتیب ۳۸۹ و ۳۹۸°C است. دمای انحلال هالیت در میانبارهای LVHS<sub>1</sub> و LVHS<sub>3</sub> در رگه‌های گروه A<sub>2</sub> بیشتر از دمای همگن شدن مایع - بخار است. این دما بین ۳۵۴ تا ۴۱۰°C است که متناظر با شوری بین ۴۱/۳ تا ۴۷/۱ درصد وزنی نمک طعام معادل با میانگین ۴۴/۶ درصد است. میانبارهای LVHS<sub>3</sub> در رگه‌های B در دمایی بین ۲۱۳ تا ۲۱۷°C با ناپدید شدن بخار همگن می‌شوند. میانگین دمای همگن شدن و شوری رگه‌های A<sub>2</sub> از رگه‌های B بیشتر است.

معادل است. دماهای یوتکتیک برای سیستم‌های MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O، FeCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O و NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O به ترتیب برابرند با ۳۳/۸-، ۳۵- و ۵۵°C که می‌توانند دماهای پایین مشاهده شده اولین ذوب برای میانبارهای LVHS را توضیح دهد. تمامی میانبارهای VL در رگه‌های گروه A<sub>2</sub> در دمایی بین ۳۷۱ تا ۵۸۶°C به بخار همگن می‌شوند. این دما در رگه‌های گروه B بین ۲۸۹ تا ۳۴۲°C تغییر می‌کند. در برخی از خوشه‌ها این میانبارها به همراه میانبارهای LVHS<sub>1</sub> و LVHS<sub>3</sub> مشاهده می‌شوند که بیانگر پدیده جوشش‌اند. میانبارهای LVHS از نظر همگن شدن رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. برخی از میانبارها با ناپدید شدن بخار،



شکل ۱۱ انواع مختلف میانبارهای شاره‌ی مشاهده شده در کانسار. الف) میانبارهای ثانویه غنی از مایع و بی شکل؛ ب) میانبارهای اولیه غنی از بخار با شکل منفی؛ پ) و ت) میانبارهای اولیه چند فاز. اختصارها: V: بخار، L: مایع، H: هالیت، S: سیلویت، Ccp: کالکوپیریت.

جدول ۳ رده‌بندی میانبارهای مشاهده شده در کانسار مس پورفیری کهنک.

| نوع دسته       | فازهای مشاهده شده                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| غنی از بخار VL | بخار + مایع ± فازهای جامد                                         |
| غنی از مایع LV | مایع + بخار                                                       |
| LVHS1          | مایع + بخار + هالیت + کالکوپیریت ± جامد نامشخص                    |
| LVHS2 LVHS     | مایع + بخار + هالیت + سیلویت + کالکوپیریت ± انیدریت ± جامد نامشخص |
| LVHS3          | مایع + بخار + هالیت + جامد نامشخص                                 |

جدول ۴ نتایج ریزدماسنجی میانبارهای شاره در کانسار مس پورفیری کهنک.

| نوع رگه و شماره نمونه | منشاء | نوع   | Te(°C)            |         | Tm(°C) ice        |         | Th(°C) Halite     |                   | Th(°C) L-V        |                 | شوری |
|-----------------------|-------|-------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------|
|                       |       |       | گستره             | میانگین | گستره             | میانگین | گستره             | میانگین           | گستره             | میانگین         |      |
| A2 50-464             | p     | VL    | تا -۲۹٫۳<br>-۲۳٫۵ | -۲۵٫۵   | تا -۱۷٫۳<br>-۲٫۲  | -۹٫۹    |                   | تا ۳۷٫۱<br>۵۸۶٫۲  | ۴۵۴٫۴             | تا ۲٫۱<br>۱۴٫۱  | ۱۲   |
| A3 50-464             | s     | LV    | تا -۲۶٫۳<br>-۲۳٫۱ | -۲۴٫۴   | تا ۵٫۲<br>-۲٫۶    | -۳٫۹    |                   | تا ۲۴۹٫۶<br>۲۹۸٫۳ | ۲۷۰٫۹             | تا ۳٫۵<br>۸٫۷   | ۶٫۱  |
| A2 50-464             | p     | LVHS2 | تا -۵۴٫۳<br>-۵۱   | -۵۲٫۴   | تا -۲۲<br>-۱۵٫۱   | -۱۷٫۸   | تا ۴۱۵٫۲<br>۴۳۱٫۴ | ۴۲۴٫۱             | ۳۹۶٫۳             | تا ۴۹٫۶<br>۵۱٫۴ | ۵۰٫۶ |
| A2 50-464             | p     | LVHS1 | تا ۴۹٫۱<br>-۳۹    | -۴۳٫۳   | تا -۲۳٫۴<br>-۱۲٫۳ | -۱۶٫۷   | تا ۳۶۹<br>۴۱۰     | ۳۸۸٫۶             | ۳۵۲٫۱             | تا ۴۱٫۳<br>۴۷٫۱ | ۴۴٫۴ |
| A2 41-425.42          | p     | VL    | تا ۲۸٫۱<br>-۲۱٫۴  | -۲۵٫۸   | تا -۷٫۲<br>-۳٫۵   | -۵٫۸    |                   | تا ۴۰٫۳<br>۵۷۳٫۷  | ۴۹۱               | تا ۴٫۸<br>۱۲٫۸  | ۱۰٫۱ |
| A2 41-425.42          | p     | LVHS3 | تا -۵۳٫۱<br>-۵۳٫۱ | -۵۳٫۱   | تا -۱۳٫۱<br>-۱۳٫۱ | -۱۳٫۱   | تا ۳۹۸٫۱<br>۳۹۸٫۱ | ۳۹۸٫۱             | ۴۰۱٫۸             | ۴۶٫۹            | ۴۶٫۹ |
| A2 41-425.42          | p     | LVHS2 | تا -۵۵<br>-۵۴     | -۵۴٫۵   | تا -۱۶<br>-۱۳     | -۱۴٫۵   | تا ۳۴۲٫۸<br>۳۷۶٫۵ | ۳۶۰               | تا ۳۳۳٫۳<br>۴۲۳٫۷ | ۳۷۸٫۵           | ۴۲٫۹ |
| A2 41-425.42          | p     | LVHS1 | تا -۵۰٫۱<br>-۴۱٫۸ | -۴۶     | تا -۱۳<br>-۸٫۴    | -۷٫۱۰   | تا ۳۵۳٫۶<br>۳۸۳٫۹ | ۳۶۸٫۷             | ۳۲۶٫۲             | تا ۴۲<br>۴۵٫۵   | ۴۳٫۵ |
| B 78-313              | p     | VL    | تا -۲۹٫۲<br>-۲۱٫۹ | -۲۴٫۵   | تا -۷٫۵<br>-۳٫۳   | -۴٫۴    |                   | تا ۳۲۳<br>۳۴۲     | ۳۳۲               | تا ۴٫۹<br>۶     | ۵٫۵  |
| B 78-313              | p     | LVHS2 | تا -۵۴٫۲<br>-۴۷٫۱ | -۵۰٫۶   | تا -۱۵٫۳<br>-۱۵٫۳ | -۱۵٫۳   | تا ۳۴۴٫۹<br>۳۶۳٫۱ | ۳۵۴               | تا ۳۲۷٫۶<br>۴۰۰٫۷ | ۳۶۴٫۱           | ۴۳٫۱ |
| B 78-313              | p     | LVHS3 | تا -۵۴٫۲<br>-۴۷٫۱ | -۳۶٫۹   | تا -۱۱٫۲<br>-۱٫۱  | -۱۵٫۳   | تا ۲۱۱<br>۳۲۱٫۴   | ۲۴۴٫۲             | تا ۲۱۵<br>۳۳۷     | ۲۸۱٫۷           | ۳۴٫۸ |
| B 27-381.70           | p     | VL    | تا -۲۶٫۴<br>-۲۱٫۳ | -۲۴٫۰   | تا -۷٫۶<br>-۳٫۰   | -۵٫۰    |                   | تا ۲۸۹٫۱<br>۳۵۶٫۹ | ۳۱۶٫۷             | تا ۵<br>۱۱٫۲    | ۷٫۸  |
| B 27-381.70           | p     | LVHS1 | تا -۵۰٫۱<br>-۳۷٫۵ | -۴۳٫۸   | تا -۱۸٫۴<br>-۱۱٫۰ | -۱۴٫۰   | تا ۲۶۵٫۷<br>۴۱۳٫۱ | ۳۴۴٫۶             | تا ۳۱۱٫۴<br>۳۳۸٫۹ | ۳۲۵             | ۴۳٫۱ |
| B 27-381.70           | p     | LVHS2 | تا -۵۲٫۵<br>-۳۴٫۸ | -۴۳٫۶   | تا -۱۳٫۱<br>-۵٫۷  | -۹٫۴    | تا ۳۴۸٫۹<br>۳۷۰٫۳ | ۳۵۹٫۶             | تا ۳۰۱٫۵<br>۳۴۱٫۶ | ۳۲۱٫۵           | ۴۴٫۳ |
| B 27-381.70           | p     | LVHS3 | تا -۵۶<br>-۲۹     | -۳۷٫۷   | تا -۲۸<br>-۲      | -۸٫۰    | تا ۲۱۱<br>۴۳۰     | ۲۸۷               | تا ۲۱۳<br>۲۹۳     | ۲۴۹٫۶           | ۳۶٫۳ |

## برآورد فشار شاره‌ها با شوری بالا

مشابه کانسارهای دیگر پورفیری کشف شده در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، شاره‌های بسیار شور LVHS در عمیق‌ترین بخش‌های استوک و در رگه‌های A<sub>2</sub> و B حضور دارند [۲۲، ۱۳]. شاره‌های اولیه‌ای که در فشار پایین تا متوسط از ماگما جدا می‌شوند، شوری پایینی دارند و با افزایش فرایند تبلور شورتر می‌شوند. این پدیده در برخی از کانسارهای مس پورفیری مشاهده شده است (e.g., Bajo de la Alumbrera, Argentina) و شاره‌های با شوری نسبتاً بالا (۵۰ تا ۶۰٪ وزنی نمک طعام معادل) به عنوان شاره‌های کانه‌ساز مادر در نظر

گرفته شده‌اند. بنابراین، حضور کانی‌های نوزاد سیلویت و کالکوپیریت در میانبارهای LVHS<sub>2</sub> مؤید آن است که این میانبارها اولین شاره‌های کانه‌ساز در کانسار مس پورفیری کهنک هستند. به اعتقاد بکر<sup>۱</sup> در یک خوشه از میانبارهای شاری که با انحلال هالیت همگن می‌شوند و دمای ناپدید شدن بخار در آن‌ها تقریباً یکسان است، میانبارهایی که کمترین دمای انحلال هالیت را دارند معرف شرایط واقعی به دام افتادن شاره هستند [۲۳]. در یک خوشه از میانبارهای LVHS<sub>2</sub> دمای همگن شدن مایع - بخار تقریباً ۳۹۶°C و کمترین دمای

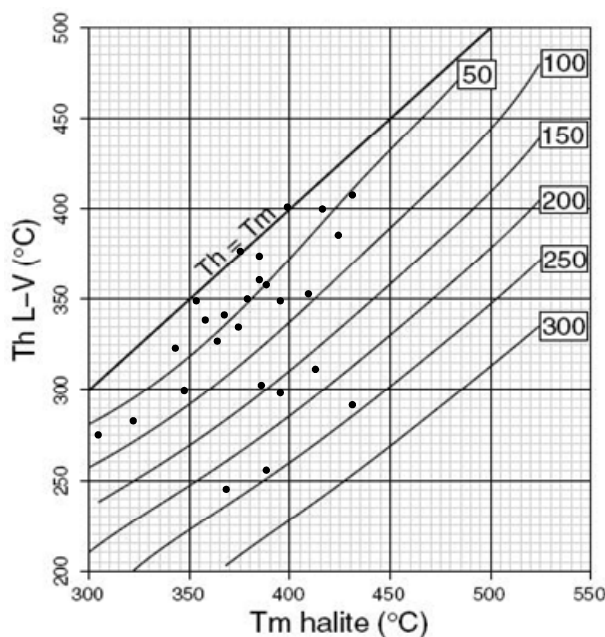
1- Becker

شده است، عدم آمیخته شدن آبگو - بخار و نیز ابر اشباع‌شدگی شاره‌های گرمایی در حجم محدودی از سنگ است.

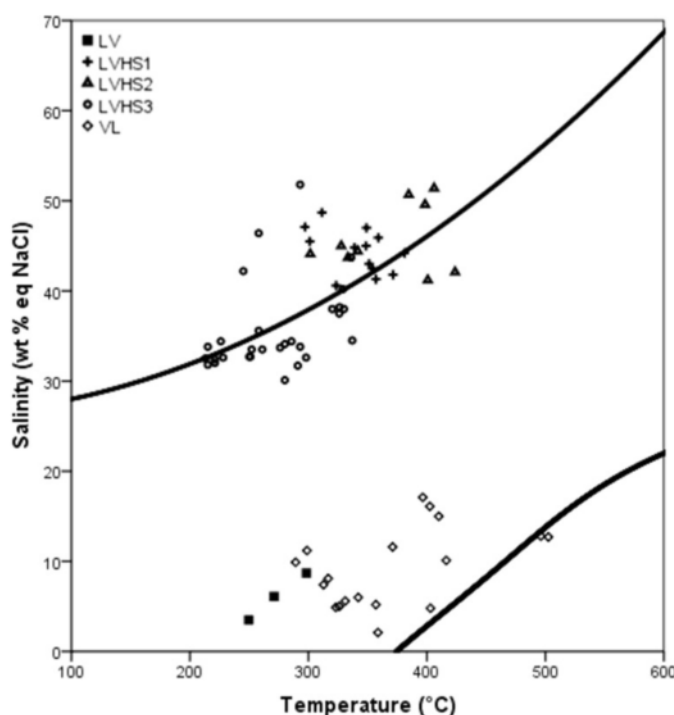
#### تکامل سیستم گرمایی

دمای بالای به دام افتادن شاره‌های غنی از گاز، حضور کانی کالکوپیریت نوزاد در میانبارهای هالیت‌دار و حضور انیدریت در رگه‌ها و برش‌های موجود در توده‌های کنترل‌کننده‌ی کانی-سازی، شاهده‌ی بر حضور یک شاره‌ی کانه‌ساز داغ با گریزندگی بالای  $O_2$  و  $SO_2$  است. خاستگاه این شاره که مسئول اصلی حمل فلز مس در کانسار است، ماگمای کوارتزیدیوریتی - داسیتی بوده که در دمایی کمتر از ۶۰۰ درجه‌ی سانتیگراد شروع به تبلور نموده و حداقل ۲/۷ درصد آب داشته است [۲۵]. کاهش دما و فشار به ترتیب تا  $415^\circ C$  و ۳۴۰ بار منجر به جدا شدن اولین شاره‌های ماگمایی شور و تشکیل رگه‌های  $A_2$  و زون دگرسانی پتاسی شده است. مشاهده‌ی مقادیر پراکنده و جزیی مولیبدنیت در حاشیه‌ی رگه‌های B بیانگر آن است که به علت پایین بودن فراوانی مولیبدن در محلول گرمایی، این عنصر تا پیش از این به‌صورت عنصری ناسازگار عمل کرده و با کاهش دما از  $415^\circ C$  به  $340^\circ C$  و فشار از ۳۴۰ به حدود ۱۰۰ بار در بخش‌های بالایی کانسار نهشته شده است.

انحلال هالیت  $415^\circ C$  است که فشار به دام افتادن این شاره‌ها در حدود ۳۳۶ بار است. با در نظر گرفتن چگالی متوسط  $2.7 \text{ gr/cm}^3$  برای سنگهای منطقه، این فشار معادل عمق ۱/۳ کیلومتر است (شکل ۱۲). بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی وجود پدیده‌ی جوشش را نیز ثابت می‌کند. میانبارهای شاری LV و هالیت‌دار نوع  $LVHS_1$  و  $LVHS_3$  در بخش‌های مختلف کانسار به همراه هم مشاهده شدند که در دمایی تقریباً برابر همگن می‌شوند. بنابراین دما و فشار همگن شدن این میانبارها برابر با دما و فشار به دام افتادن شاره‌ها و عمق تشکیل رگه‌ها مختلف است. با استفاده از روش باندن و ویتایک و برنامه‌های SoWat فشار به دام افتادن شاره‌هایی که با از بین رفتن حباب بخار همگن می‌شوند به دست آمد [۲۴]. شکل ۱۳ (نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدن مایع - بخار) بیانگر آن است که شاره‌هایی که موجب تشکیل رگه‌های کوارتز - سولفید شده‌اند، در نتیجه کاهش فشار سیستم در دمای تقریبی  $430^\circ C$  شروع به جوشش کرده‌اند. در نتیجه یک فاز بخار از شاره‌های آبگون با شوری تقریبی ۴۵ wt% جدا شده است. این فرایند به صورت نامتناوب تا کاهش دما به حدود  $230^\circ C$  رخ داده است. بر همین اساس، اصلی‌ترین فرایندی که نهایتاً باعث کانی‌سازی در کانسار پورفیری کهنک



شکل ۱۲ برآورد فشار میانبارهای شاری که با انحلال هالیت همگن می‌شوند از روی منحنی‌های هم‌فشار بکر. مشاهده می‌شود که فشار غالب در کانسار در اطراف منحنی ۵۰ مگاپاسکال (۵۰۰ بار) واقع شده است. میانگین فشار اندازه‌گیری شده بنا بر این منحنی ۱۱۵۰ بار است که با کانسار شناخته شده سونگون (۱۰۰۰ بار) همخوانی خوبی دارد [۲۲].



شکل ۱۳ دمای همگن شدن مایع - بخار نسبت به شوری برای میانبرهای LV، LVHS1، LVHS2، LVHS3 و VL.

#### برداشت

نتیجه نوسانهای محلی دما - فشار حین تکامل سیستم گرمایی کهنک رخ داده است. میانبرهای LVHS<sub>2</sub> شاره‌های بسیار شور و داغی را که مستقیماً از ماگمای در حال تبلور جدا شده‌اند، را در فشار نسبتاً پایینی به دام انداخته‌اند. این امر باعث اشباع شدگی شاره‌ها از هالیت و منجر به تهی شدگی مس در ماگمای در حال تبلور و انتقال آن به سیستم گرمایی شده است. سرد شدن شاره‌ها علاوه بر فرایند جوشش که در رگه‌های A<sub>2</sub> و B مشاهده می‌شود، عوامل اصلی کنترل کننده ته‌نشست کالکوپیریت در کانسار مس پورفیری کهنک هستند. بررسی مجموعه میانبرهایی که بیانگر رخداد پدیده جوشش اند، نشان می‌دهد که حداقل عمق تشکیل کانی‌سازی در حدود ۱/۳ کیلومتر است که مشابه کانسارهای دیگر مس پورفیری ایران روی کمر بند ماگمایی ارومیه - دختر است [۲۸، ۲۲، ۳].

#### مراجع

- [۱] فرمehینی فراهانی م، "مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمی و کانی‌شناسی محدوده اکتشافی کهنک". رساله دکتری رشته زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، (۱۳۸۷) ۲۴۹ ص.
- [۲] هراتی ح، "بررسی زمین‌شناسی اقتصادی، آلتراسیون، کانی‌شناسی و ژئوشیمی توده کانسار مس پورفیری کهنک

کوارتز دیوریت‌ها بیش از ۷۰ درصد از بدنه اصلی توده‌ی آذرین کنترل‌کننده کانی‌سازی را تشکیل داده و پس از آن داسیت‌ها مهم‌ترین واحدهای آذرین همزمان با کانی‌سازی محسوب می‌شوند. ژئوشیمی سنگ‌های آذرین نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از یک ماگمای آهکی - قلیایی در اثر تبلور جدایشی تشکیل شده و طی چند مرحله تقریباً نزدیک به هم به بالا صعود کرده‌اند. تشکیل رگه‌های نوع A که بیشتر دارای دیواره‌هایی با ظاهر ناصاف و سینوسی هستند در دمایی بالاتر از ۴۰۰°C رخ داده است [۲۶]. رگه‌های نوع A<sub>2</sub> در نتیجه عملکرد واحد داسیتی تشکیل شده‌اند. حضور کوارتزهای گردشده و خلیجی موجود در واحد داسیتی که در نتیجه تاثیر شاره‌های داغ تشکیل می‌شوند نیز بیانگر این است که کنترل‌کننده‌ی اصلی کانی‌سازی مس پورفیری در کهنک، همین واحد بوده است. این واحد اندکی پس از صعود واحدهای کوارتز دیوریتی - گرانودیوریتی به نزدیکی سطح زمین، به درون آن‌ها نفوذ کرده است. تکامل دما، ترکیب شیمیایی و فشار شاره‌های کانسار مس پورفیری کهنک مشابه کانسارهای دیگر گزارش شده، روی کمر بند ماگمایی - ارومیه دختر است [۲۷-۲۵، ۱۳، ۲۲]. با این وجود، تفاوت‌هایی نیز در رفتارهای همگن شدن میانبرها ملاحظه می‌شود که در

- from fluid inclusions and stable isotopes", *Eco. Geol.*, 93 (1998) 651–670.
- [15] Mason D. R., "Compositional variations in ferromagnesian minerals from porphyry copper-generating and barren intrusions of the Western Highlands, Papua New Guinea", *Eco. Geol.* 73 (1978) 878–890.
- [16] Mason D. R., McDonald J. A., "Intrusive rocks and porphyry copper occurrences of the Papua New Guinea-Solomon Islands region", *Eco. Geol.* 73 (1978) 857–877.
- [17] Dilles J. H., "Petrology of the Yerington Batholith", Nevada: evidence for evolution of porphyry copper ore fluids. *Eco. Geol.* Vol. 82, No. 7, (1987) pp. 1750–1789.
- [18] Winchester J. A., Floyd P. A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chemical Geology* 20 (1977) 325–343.
- [19] Sun S. S., McDonough W. F., "Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes", in Saunders, A. D., and Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins: Geological Society Special Publication 42*: Oxford, Blackwell Scientific Publications (1989) 313–345.
- [20] Rollinson H. R., "Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation", Longman, UK (1993) 352 p.
- [21] Gruen G., Heirich C. A., Schroeder K., "The Bingham Canyon Porphyry Cu-Mo-Au Deposit. II. Vein Geometry and Ore Shell Formation by Pressure-Driven Rock Extension", *Eco. Geol.* 105 (2010) 69–90.
- [22] Hezarkhani A., "Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions", *Journal of Asian Earth Sciences* 28 (2006) 409–422.
- [23] Becker S. P., Fall A., Bodnar R. J., "Synthetic fluid inclusions. XVII. PVTX properties of high salinity H<sub>2</sub>O-NaCl solutions (>30 wt% NaCl): application to fluid inclusions that homogenize by halite disappearance from porphyry copper and other hydrothermal ore deposits", *Econ. Geol.* 103 (2008) 539–554.
- [24] Bodnar R. J., Vityke M., O., "Interpretation of microthermometry data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions", in *Fluid inclusions in Minerals, Methods and Applications*, B. De Vivo and M. L. Frezzotti, eds., pub. By Virginia Tech, Blacksburg, VA, (1994) 117–130.
- (شمال شرق اصفهان)، رساله دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، (۱۳۹۰) ۲۱۱ ص.
- [۳] خداپرست م، "بررسی پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های پلوتونیک محدود اکتشافی کهنک (شمال شرق اصفهان)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، (۱۳۸۹) ۱۵۲ ص.
- [4] Berberian M., King G.C., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (1981) 210–265.
- [5] Pourhosseini F., "Petrogenesis of Iranian plutons: a study of the Natanz and Bazman intrusive complexes", PhD Thesis, University of Cambridge, (1982) 315 p.
- [6] Hezarkhani A., "Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2006) 326–340.
- [7] Shahabpour J., "Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz", *Journal of Asian Earth Sciences* 24 (2005) 405–417.
- [۸] مهرداد آ، "بررسی پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های ولکانیکی میزبان کانسار مس پورفیری کهنک (شمال شرق اصفهان)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، (۱۳۹۰) ۱۲۷ ص.
- [۹] شرکت ملی صنایع مس ایران، "گزارش مطالعات زمین‌شناسی و آلتراسون محدوده کهنک شرقی در مقیاس ۱:۱۰۰۰". مهندسین مشاور زرناپ اکتشاف (۱۳۹۰).
- [10] Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R. J., "The Interpretation of Igneous Rocks", George Allen & Unwin, London (1979) 450 p.
- [11] Rickwood P. C., "Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements", *Lithos* 22 (1989) 247–263.
- [12] Irvine, T. N., Baragar W. R. A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences* 8 (1971) 523–548.
- [13] Shand S. J., "Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore-Deposits", 3rd edition, J. Wiley & Sons, New York, (1947) 488 p.
- [14] Hezarkhani A., Williams-Jones A. E., "Controls of alteration and mineralization in the Sungun Porphyry Copper Deposit, Iran": evidence

- [27] Etminan E., "*Le porphyre cuprifere de Sarcheshmeh (Iran): Role des phases fluides dans les mecanismes d'alteration et demineralization GSI*", Rept. No. 48 (1977)249p.
- [28] Hezarkhani A., "*Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions*", JGE 101 (2009) 254-264.
- [25] Burnham C., W., "*Magma and hydrothermal fluids*", in Barnes, H., L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edition: WileyInterscience, New York, (1979) 71-136.
- [26] Fournier R. O., "*Hydrothermal Processes Related to Movement of Fluid From Plastic into Brittle Rock in the Magmatic-Epithermal Environment*", *Eco. Geol.* 94 (1999) 1193-1211.