

Behaviour, geochemical distribution, and mode of occurrence of gold and silver in the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran

Shafiei, B., and Shahabpour, J.

Department of Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, IRAN

Key Words: *Sar Cheshmeh, Porphyry Copper, Gold and Silver*

Abstract: Based on this study, the average gold and silver grades in the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit are 0.06 and 1.22 g/t respectively which are very different from the ones reported previously. In the biotitic andesite and altered phyllitic/potassic samples from the stock, the high positive correlation between the hypogene copper and gold grades ($r=0.81$), and gold and silver grades ($r=0.61$), and gold and silver with the hypogene copper grade ($r \geq 0.72$), indicate:(1) the contemporaneous deposition of copper, gold and silver, and (2) gold is probably present in the form of exsolution, invisible solid solution and native or electrum within the chalcopyrite grains.

Within the secondary sulfide enrichment zone, the gold grade is two times more than the hypogene grade. Silver also indicates the highest concentration within the leached/oxide and secondary sulfide enrichment zones.

This study indicates that the Sar Cheshmeh deposit is a gold and silver poor porphyry copper - molybdenum deposit.

پژوهشی

مطالعه رفتار پراکندگی ژئوشیمیایی و چگونگی پیدایش طلا و نقره در کانسار مس پورفیری سرچشممه کرمان

بهنام شفیعی و جمشید شهابپور

بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده: براساس این مطالعه عیار میانگین طلا و نقره کانسار مس پورفیری سرچشممه به ترتیب 0.06 g/t و 1.22 g/t است که اختلاف زیادی با عیارهای گزارش شده قبلی دارد. در آندزیت بیوتیتی و نمونه‌هایی از استوک سرچشممه با دگرسانی فیلیک/پتاسیک، همبستگی مثبت بالایی بین عیارهای طلا و مس ($r=0.81$)، طلا و نقره ($r=0.61$) و طلا و نقره با مس ($r=0.72$) وجود دارد که نشان‌دهنده (۱) تنشیینی همزمان طلا و نقره با مس و (۲) حضور احتمالی طلا بصورت محلول جامد غیرقابل رویت و نیز طلای خالص یا الکتروم داخل دانه‌های کالکوپیریت است.

عیار طلا در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه بیش از ۲ برابر عیار طلای درونزad است. نقره نیز غنی شدگی بیشینه‌ای را در منطقه فروشست - اکسید و غنی شده سولفیدی ثانویه نشان می‌دهد.

این مطالعه نشان داد که کانسار سرچشممه یک کانسار مس - مولیبدن پورفیری فقیر از طلا و نقره است.

واژه‌های کلیدی: سرچشممه، مس پورفیری، طلا و نقره

مقدمه

طلا و نقره از محصولات جانبی^۱ ارزشمند کانسارهای مس پورفیری هستند که با مقادیر متفاوت در رده‌های مختلف این کانسارها حضور دارند. مقدار این عناصر از کمتر از ۰,۰۵ تا بیشتر از ۱ گرم در تن طلا [۱۲] و از ۰,۱ تا ۰,۵ گرم در تن نقره [۳] متغیر است. کانسار مس پورفیری سرچشمه به عنوان بزرگترین معدن مس ایران و یکی از مهمترین ذخایر مس پورفیری دنیا محسوب می‌شود. این کانسار همانند دیگر کانسارهای مس پورفیری از محصولات جانبی ارزشمندی چون طلا، نقره و مولیبدن برخوردار است. اطلاعات موجود در خصوص وضعیت زمین‌شناسی اقتصادی طلا و نقره در معدن مس سرچشمه محدود به گزارش منتشر نشده شرکت سلکشن‌تراست^۲ [۱۵] است که عیار میانگین طلا و نقره کانسار را براساس تجزیه شیمیایی ۱۲ نمونه کانسنگ، به ترتیب ۰,۲۷ گرم در تن طلا و ۳,۹ گرم در تن نقره تعیین کرده است و هیچگونه اطلاعات دیگری به خصوص در ارتباط با ماهیت، رفتار و پراکندگی ژئوشیمیایی این عناصر در کانسار سرچشمه وجود ندارد.

براساس ارقام موجود و مصرف سالیانه حدود ۱۴ میلیون تن کانسنگ مس تصور می‌شده که در حدود ۴۰۰۰ کیلوگرم طلا و ۵۰ تن نقره از این مقدار ماده معدنی به دست آید، اما واقعیت‌های بهره‌برداری، بازیابی و پالایش در طول سالهای متمادی ثابت کرده است که مقدار طلا و نقره استحصالی همواره بسیار کمتر از این مقادیر بوده است و حداقل به حدود ۴۰۰ کیلوگرم طلا و ۱۱ تن نقره در سال رسیده است. بنابراین ارقام مذکور در تناقض با مقادیر مورد انتظار طبق عیارهای گزارش شده قبلی می‌باشند. در نتیجه به نظر می‌رسد عیار ۰,۲۷g/t طلا و ۳,۹g/t نقره به عنوان عیار میانگین برای این عناصر در کانسار سرچشمه غیرواقعی باشد.

مقاله حاضر به منظور مشخص کردن جایگاه راستین زمین‌شناسی اقتصادی و صنعتی طلا و نقره در معدن سرچشمه و در راستای یاری رساندن به زمین‌شناسان صنعتی و مهندسین معدن برای بازیابی این عناصر ارزشمند توشه شده است.

روش مطالعه

تعداد ۷۰ نمونه کانسنگ از سنگ‌های دیواره‌ای آندزیتی و استوک سرچشمه، از

حفاری الماسی و نیز جبهه‌های استخراجی معدن با توجه به مناطق مختلف کانی‌سازی (درونزاد - برونزاد) و دگرسانی (پتاسیک، بیوتیک، فیلیک، پروپیلیتیک) از سطح تا ژرفای ۱ کیلومتری کانسار برداشت شدند. پس از انجام مراحل آماده‌سازی، نمونه‌ها برای ۱۲ عنصر طلا، نقره، مس، مولیبدن، ارسنیک، آنتیموان، سرب، روی، آهن، گوگرد، پتاسیم و سیلیسیم مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. برای تعیین میزان بازیابی و هدر رفتگی طلا و نقره در مسیر تولید مس، تعداد ۳۶ نمونه از محصولات کارخانه تغليظ (خوراک کارخانه^۱ - ماده معدنی تغليظ شده^۲ - باطله نهایی^۳) به مدت یک سال (مهر ۷۷ - مهر ۷۸) برداشت شدند و برای عناصر طلا، نقره، مس و مولیبدن مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. به منظور آگاهی از نحوه پیدايش طلا و نقره، مطالعات میکروآنالیز الکترون پروب^۴ در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور نیز انجام گردید.

زمین‌شناسی و الگوی دگرسانی - کانی‌سازی کانسار سرچشمه
 کانسار مس پورفیری سرچشمه در انتهای جنوب شرقی کمربند تکتونو-ماگماتی ایران مرکزی و در بخش شمالی کمپلکس آتش‌فشانی رسوبی بند ممتاز - پاریز در کمربند دهچ - ساردوئیه استان کرمان جای گرفته است (شکل ۱). این کانسار به صورت بیضی شکل به طول ۲۰۰۰ متر (WSW-ENE) و عرض ۹۰۰ متر با ذخیره‌ای در حدود ۱۲۰۰ میلیون تن کانستنگ با عیار ۷٪ مس و ۰.۳٪ مولیبدن بزرگترین کانسار مس ایران و قابل مقایسه با کانساراتی بزرگی چون چوکی کاماتا (شیلی) و بینگهام (آمریکا) است.

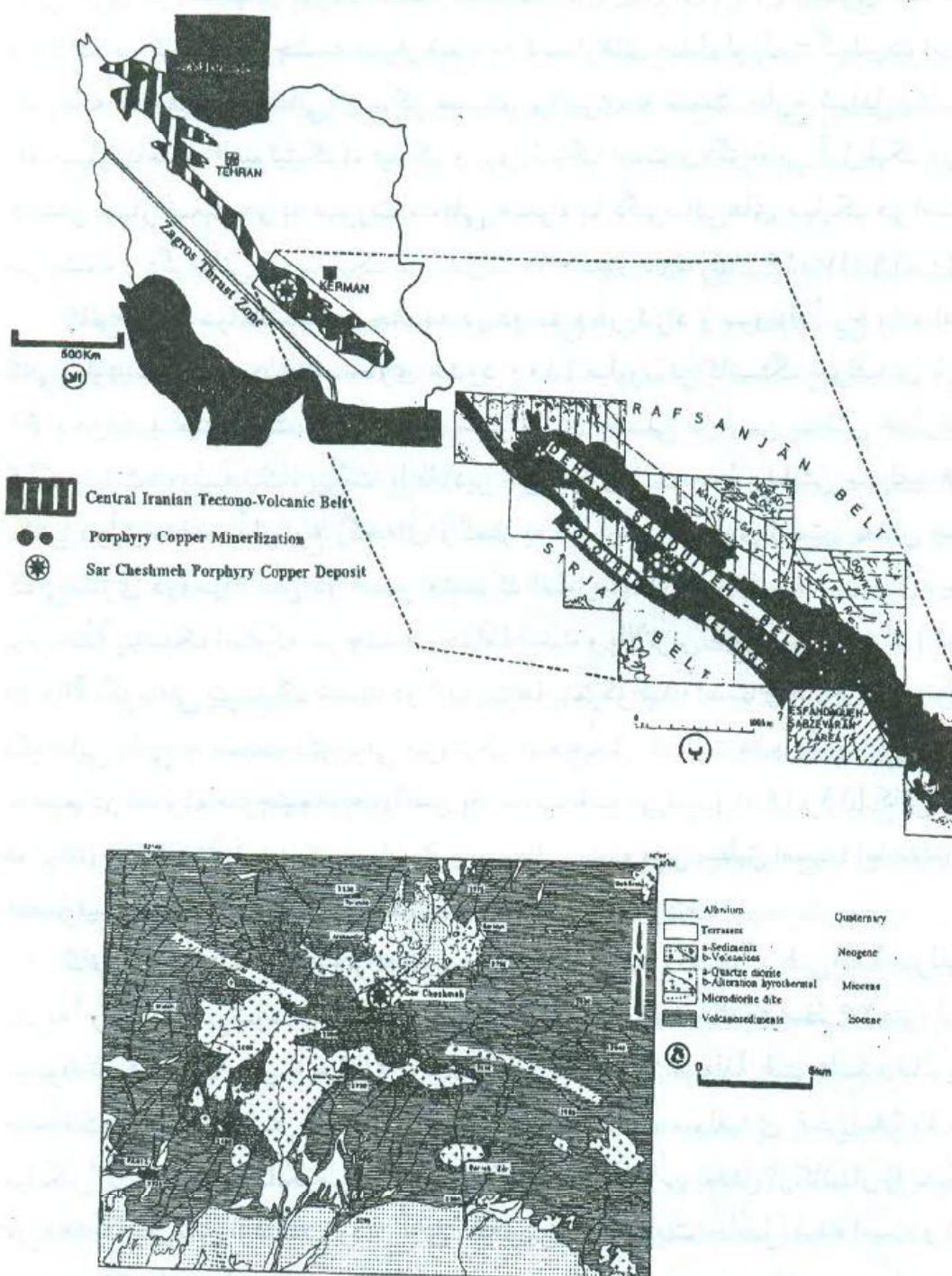
کانی‌سازی در کانسار سرچشمه در ارتباط با نفوذ استوک گرانودیوریتی سرچشمه به سن میوسن، با ماهیت پترولوزیکی کالک آلکالین، به داخل آندزیت‌های دانه‌ریز پورفیری ۲۰۰ میلیون صورت گرفته است [۷، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰]. استوک سرچشمه و آندزیت‌های میزبان به وسیله دایکهای با روند عمومی NNW-SSE؛ همزمان با کانی‌سازی (دایک هورنبلند پورفیری پیشین)، در مراحل میانی و نهایی کانی‌سازی (دایک هورنبلند پورفیری پسین) و بعد از کانی‌سازی (دایک فلدسپار پورفیری و بیوتیت پورفیری) مورد هجوم قرار گرفته‌اند و بعضی از این دایکها باعث جابجا شدن و قطع

1- Rougher feed (f)

2- Concentrated ore (c)

3- Final tailing (t)

4- Electron Probe Micro Analysis (EPMA)



شکل ۱ االف - موقعیت کانسار مس سرچشم بر روی کمربند تکتونو-ماگمایی ایران مرکزی [۲۰]
ب: تقسیمات زمین‌شناسی استان کرمان و موقعیت کانسار سرچشم به همراه
رخدادهایی دیگر از کانی‌سازی مس پورفیری در کمربند دهچ - ساردوئیه [۵، ۲۰].
ج: نقشه زمین‌شناسی ناحیه پاریز و موقعیت کانسار سرچشم [۷].

کانی سازی در سنگهای میزبان کانسار شده‌اند [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹]. الگوی دگرسانی درونزاد^۱ در کانسار سرچشمه بسیار شبیه به کانسارهای مدل لول - گیلبرت است؛ بطوریکه هاله‌های دگرسانی از مرکز سیستم پورفیری به سمت خارج شامل پتاسیک (فلدسپار پتاسیم + بیوتیک)، فیلیک و پروپیلیتیک است و دگرسانی آرژیلیک در این کانسار بسیار ضعیف و به صورت محلی همراه با دگرسانی‌های فیلیک در استوک سرچشمه و دگرسانی پروپیلیتیک در آندزیت‌ها حضور دارد [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰]. کانی سازی در کانسار سرچشمه در دو نوع درونزاد و برونزاد^۲ رخ داده است. کانی سازی در بخش درونزاد حاوی حدود ۱۱۰۰ میلیون تن کانسنگ سولفیدی با عیار ۶۱٪ درصد مس است و کانی‌های سولفیدی اصلی در این بخش عبارتند از کالکوپیریت، مولیبدنیت، پیریت با مقادیر جزئی بورنیت. نحوه پیدایش سولفیدها در بخش درونزاد عمدتاً از نوع رگچه‌ای و کمتر به صورت انتشاری است. بخش عمده کانی سازی درونزاد مس در فصل مشترک آندزیت‌های بیوتیک شدید و فیلیک پوشاننده پتاسیک استوک سرچشمه رخداده است و بالاترین عیار مس درونزاد (۴٪) در هاله دگرسانی بیوتیک شدید در آندزیت‌ها متمرکز شده است و خارج از این نواحی دگرسانی یعنی به سمت دگرسانی بیوتیک ضعیف در آندزیت‌ها و دگرسانی فلدسپار پتاسیم در استوک سرچشمه، عیار مس به شدت افت می‌کند [۱۶، ۱۷، ۱۹]. کانی سازی مولیبدن درونزاد نیز شبیه به مس است و بر محل پر عیار مس منطبق است؛ اما مقدار این عنصر نسبت به عمق افزایش مختصری می‌یابد.

کانی سازی در بخش برونزاد، دو بخش فروشست - اکسید^۳ و غنی شده سولفیدی ثانویه^۴ را شامل می‌شود. منطقه فروشست - اکسید با ضخامت متوسط ۲۶ متر، از ۲۷ میلیون تن کانسنگ مس با عیار ۶۲٪ برخوردار است. منطقه غنی شده ثانویه با ضخامت متوسط ۳۷ متر شامل ۱۱۱ میلیون تن کانسنگ سولفیدی غنی شده با عیار میانگین ۱۵٪ است. کالکوپیریت کانی سولفیدی اصلی این بخش از کانسار را تشکیل می‌دهد که به بهای از دست رفتن آهن کالکوپیریت و پیریت حاصل شده است و نحوه پیدایش آن بیشتر بصورت پراکنده است. کوولیت و بورنیت در مقادیر بسیار جزئی حضور دارند [۱۵، ۱۶، ۱۹].

1- Hypogene

2- Supergene

3- Leached - Oxide Zone

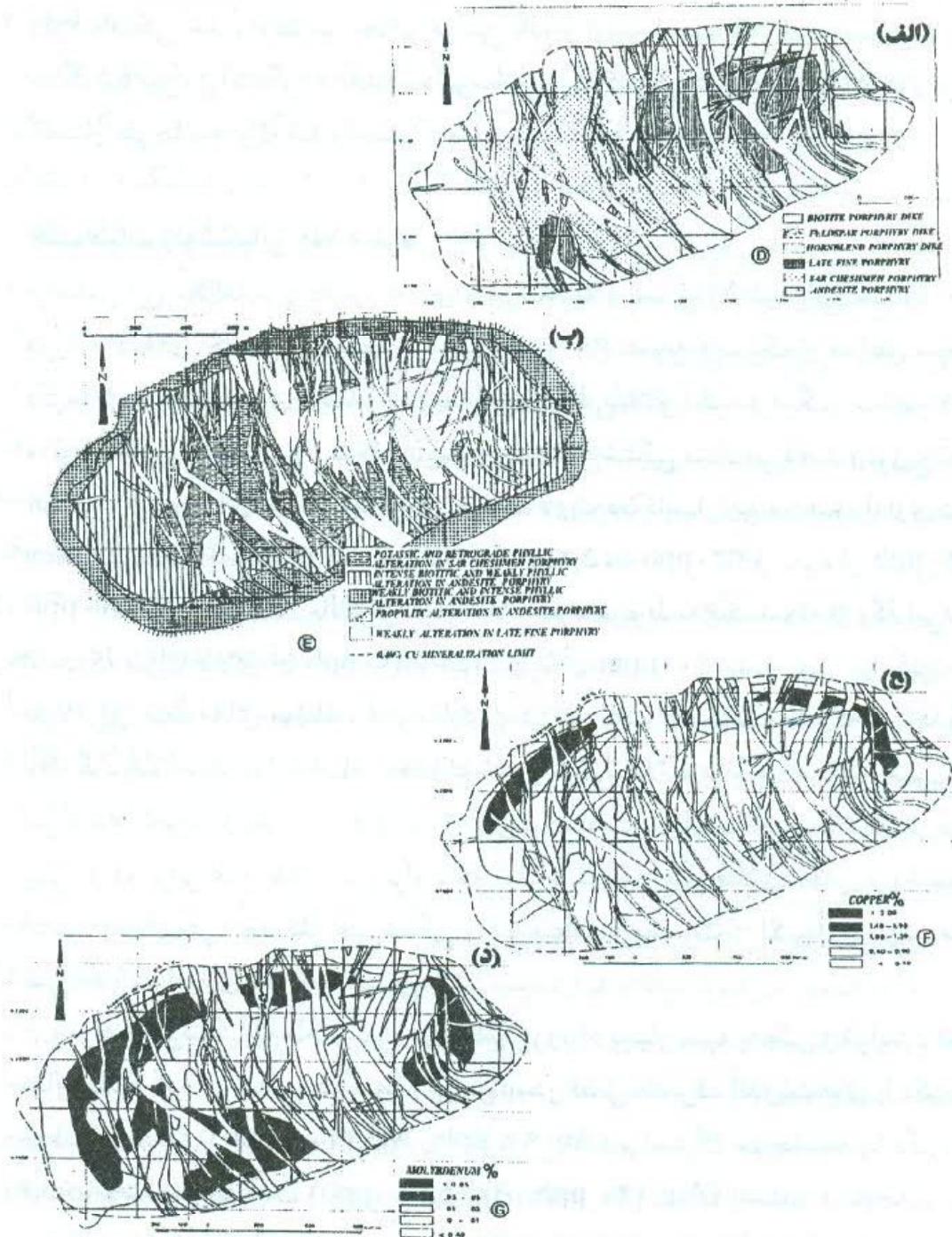
4- Secondary Sulfide Enrichment Zone

بر پایه مطالعه ایزوتوپ سرب، کانسار سرچشمه خاص نواحی کوهزایی با موقعیت ژئودینامیکی حد واسط بین جزایر قوسی بالغ و اولیه است [۱۷]. در شکل ۲ نقشه سنگ‌شناسی، پراکندگی هاله‌های دگرسانی و پراکندگی مس و مولیبدن درونزاد در کانسار سرچشمه ارائه شده است.

خصوصیات ژئوشیمیایی طلا و نقره

براساس این مطالعه و پردازش آماری و نیز تجزیه و تحلیل ژئوشیمیایی حدود ۱۰۰۰ مورد داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی روی ۶۹ نمونه کانسنگ از مناطق مختلف دگرسانی و کانی سازی، عمدۀ نمونه‌ها از لحاظ طلا و نقره و دیگر عناصر (مس، مولیبدن، سرب، روی، ارسنیک، آنتیموان...) غنی‌شدگی نشان می‌دهند و توزیع آماری آنها از نوع غیرعادی است که با توجه به اقتصادی بودن کانسار این مفاهیم، آماری دور از انتظار نیست. دامنه داده‌ها برای طلا از 2 ppb تا 5 ppb و نقره از 140 ppb تا 550 ppb تغییر می‌کند. بالاترین عیار طلا و نقره مربوط به یک نمونه از رگه اپی‌ترمال است که میزان طلای آن 500 ppb و میزان نقره آن 200 ppm است. عیار میانگین طلا و نقره برای منطقه‌های مختلف کانی سازی و نیز کل کانسار محاسبه شد که در جدول ۱ ارائه گردیده است. براین اساس حداکثر غنی‌شدگی طلا مربوط به منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه با دگرسانی فیلیک \pm آرزیلیک است. عیار میانگین طلا در این بخش بیش از دو برابر عیار طلای درونزاد و در حدود ۴ برابر عیار طلای بخش فروشست - اکسید است. نقره حداکثر غنی‌شدگی را در منطقه فروشست - اکسید و سپس منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه نشان می‌دهد.

رفتار ژئوشیمیایی طلا و نقره در منطقه درونزاد بسیار شبیه به مس و مولیبدن است. عیار بیشینه این دو عنصر در منطقه درونزاد، در فصل مشترک آندزیت‌های با دگرسانی بیوتیتیک شدید ($\text{Au}: ۹۴\text{ ppb}; \text{Ag}: ۲۴۰۰\text{ ppb}$) و استوک سرچشمه با دگرسانی فیلیک پوشاننده پتاسیک ($\text{Au}: ۱۲۰\text{ ppb}; \text{Ag}: ۵۵۰۰\text{ ppb}$) است و درنتیجه بر محل پرعيار مس و مولیبدن درونزاد منطبق است. به طور کلی میزان Au و Ag با افزایش میزان K_2O و Cu از منطقه دگرسانی پتاسیک استوک به سمت منطقه بیوتیتیک شدید در آندزیت‌ها و فیلیک ارتجاعی پوشاننده پتاسیک در استوک افزایش می‌یابد و بخش غنی از مس، مولیبدن، طلا و نقره را در این مجموعه دگرسانی ایجاد کرده است. خارج از این دو منطقه دگرسانی، یعنی به سمت منطقه بیوتیتیک ضعیف در آندزیت‌ها و منطقه



شکل ۲ االف - نقشه سنگ‌شناسی کانسار سرچشمۀ [۱۹، ۷]

ب: نقشه پراکندگی هاله‌های دگرسانی در کانسار سرچشمۀ [۱۹، ۷]

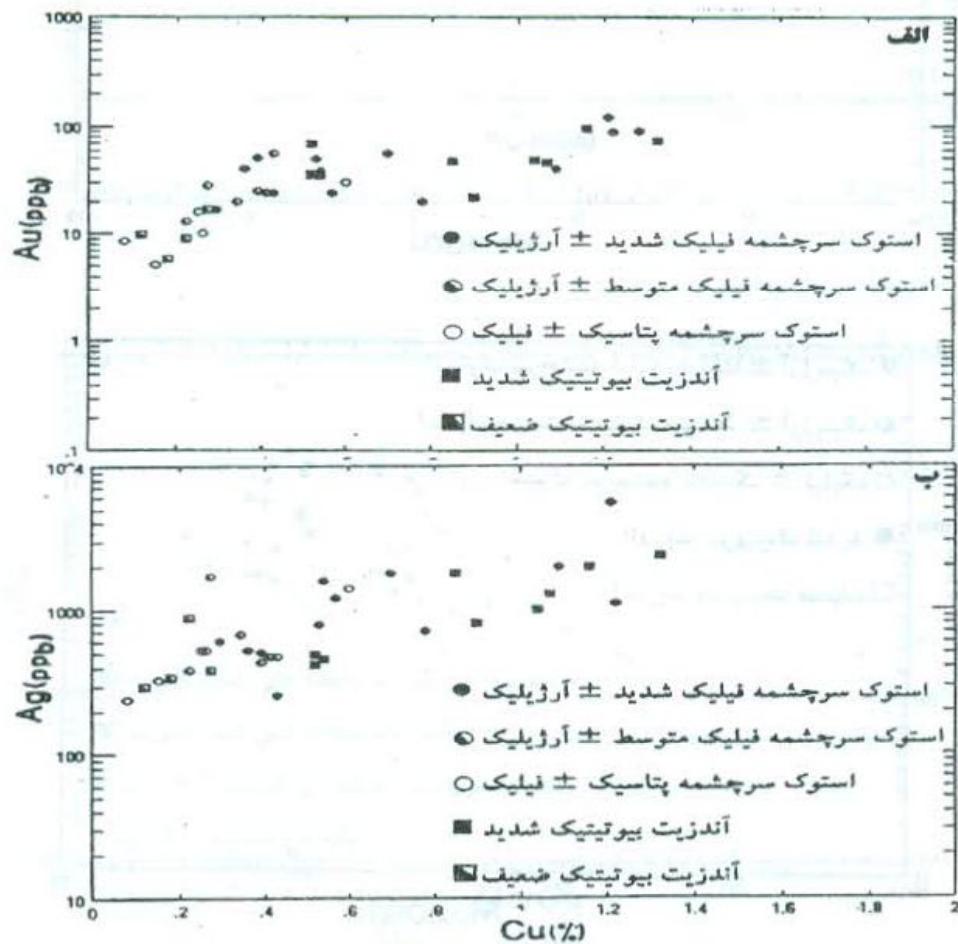
ج: نقشه پراکندگی مس درونزاد در کانسار سرچشمۀ [۱۹، ۷]

د: نقشه پراکندگی مولیبدن درونزاد در کانسار سرچشمۀ [۱۹، ۷]

پتاسیک در استوک سرچشمه، میزان این عناصر به شدت افت می‌کند (شکل ۳، ۴، ۵).

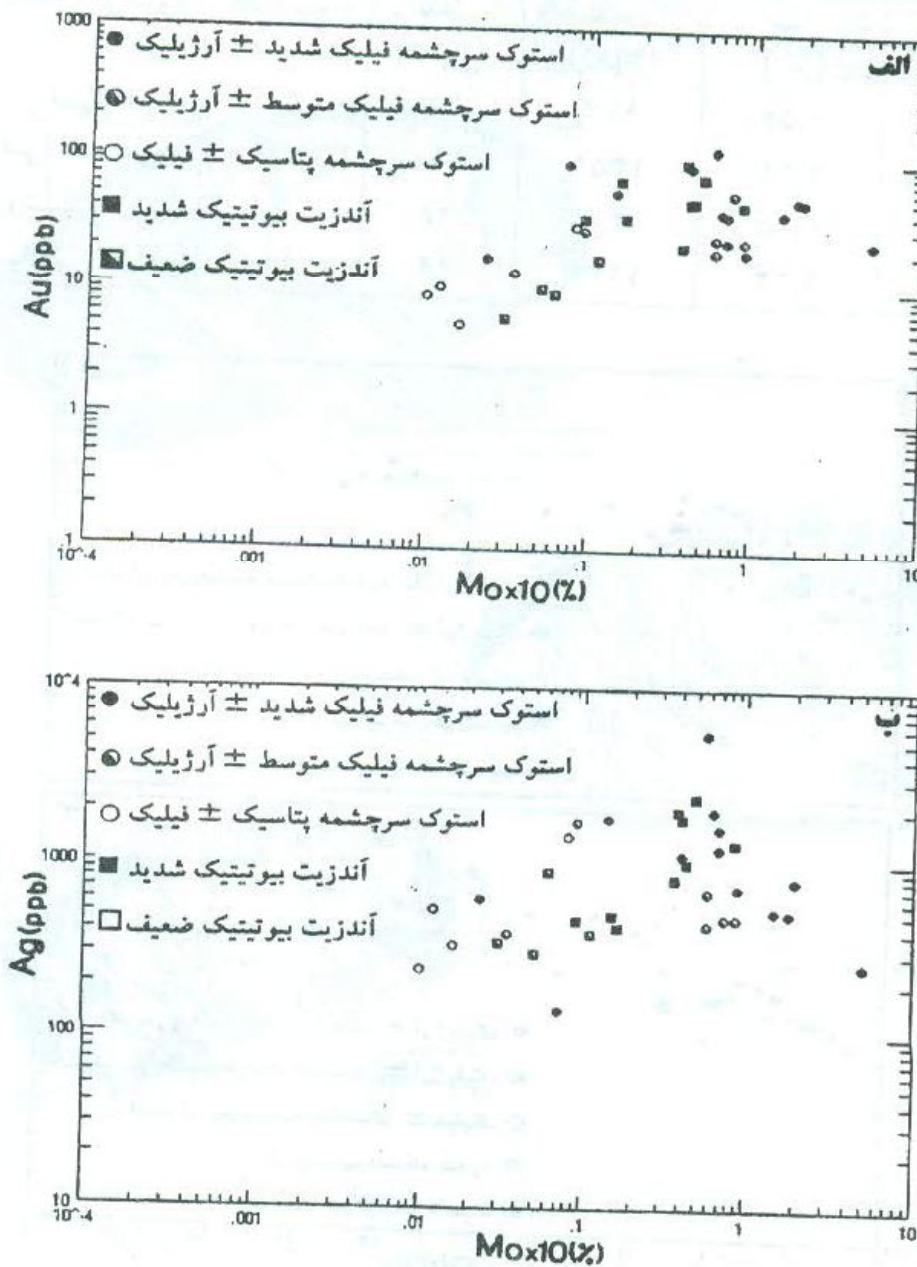
جدول ۱ - عیار میانگین محاسبه شده طلا، نقره، مس و مولیبدن در مناطق مختلف کانی‌سازی و همچنین کل کانسار

مولیبدن (%)	مس (%)	نقره (ppb)	طلا (ppb)	تعداد نمونه	منطقه کانی‌سازی
۰,۰۵۰	۰,۵۶	۹۷۳	۳۷	۴۰	درونزاد
۰,۰۳۸	۲,۴۸	۱۳۵۱	۱۰۸	۲۲	غنى شده ثانويه
۰,۰۲۰	۰,۰۵	۱۴۰۸	۲۸	۶	فروشست-اکسید
۰,۰۴۵	۱,۱۴	۱۱۳۴	۵۹	۶۸	ميانگين کانسار



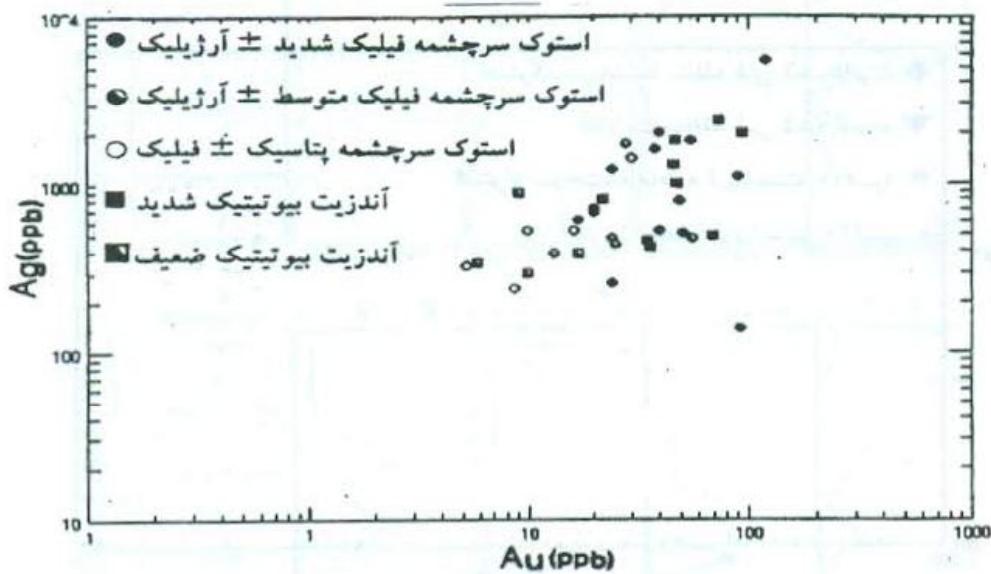
شکل ۳ روند تغییرات عیار طلا (الف) و نقره (ب) در مقابل مس در کانسنج‌های درونزاد با دگرسانی‌های مختلف.

رفتار ژئوشیمیایی این عناصر در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه نشان داد که عیار طلا و نقره در استوک سرچشم می باشد (Au: ۳۳۰ ppb ; Ag: ۳۲۰۰ ppb) بیشینه است و کانسنسگ های غنی از طلای این منطقه از لحاظ نقره نیز غنی هستند. منطقه فروشست - اکسید از لحاظ طلا فقیر اما در نقره غنی شدگی نشان می دهد. به طور کلی نسبت - کانسنسگ های غنی از طلای این منطقه از لحاظ نقره نیز غنی هستند. منطقه فروشست - اکسید از لحاظ طلا فقیر اما در نقره غنی شدگی نشان می دهد. به طور کلی نسبت - کانسنسگ های غنی از طلای این منطقه از لحاظ نقره نیز غنی هستند. منطقه فروشست -

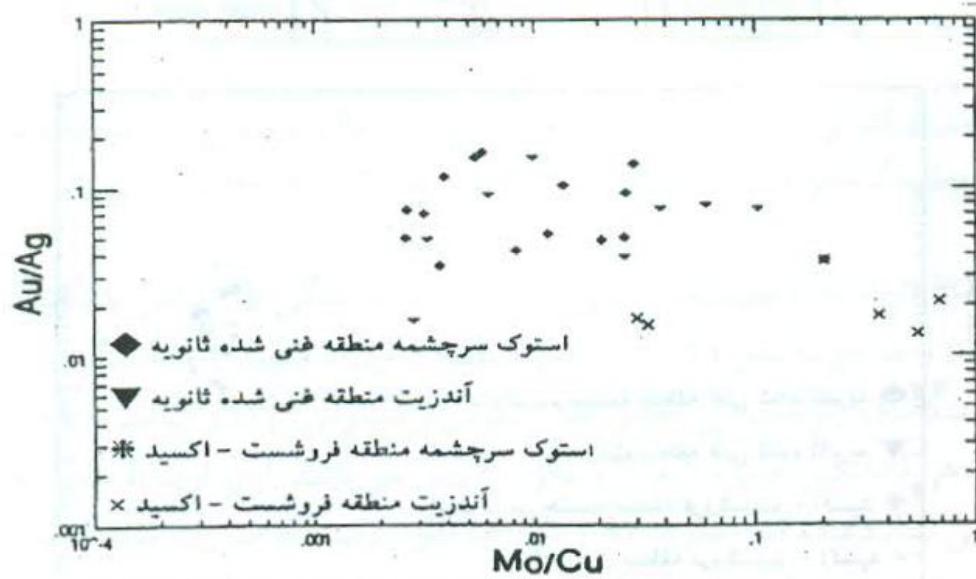


شکل ۴ روند تغییرات عیار طلا (الف) و نقره (ب) در مقابل مولیبدن در کانسنسگ های درونزاد با دگرسانی های مختلف.

اکسید به سمت منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه افزایش نشان می دهد (شکل ۶، ۷، ۸). به طور کلی الگوی پراکندگی ژئوشیمیایی و رفتار عناصر طلا، نقره و مولیبدن از مس تبعیت می کند و در محلهای پر عیار مس، عیار این عناصر نیز بالا است و منطقه حد

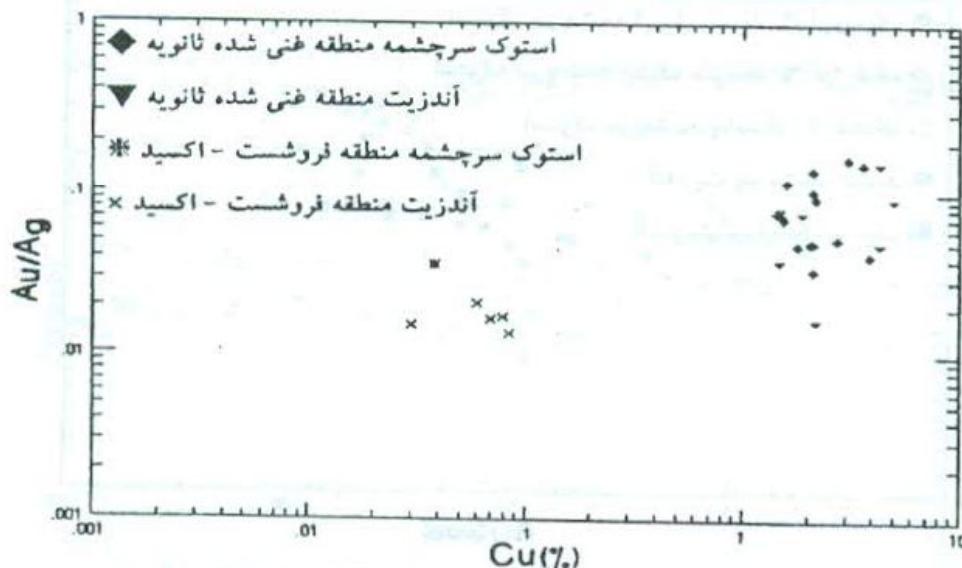


شکل ۵ - ارتباط بین طلا و نقره در کانسنگ های دروتزاد با دگرسانی های مختلف.

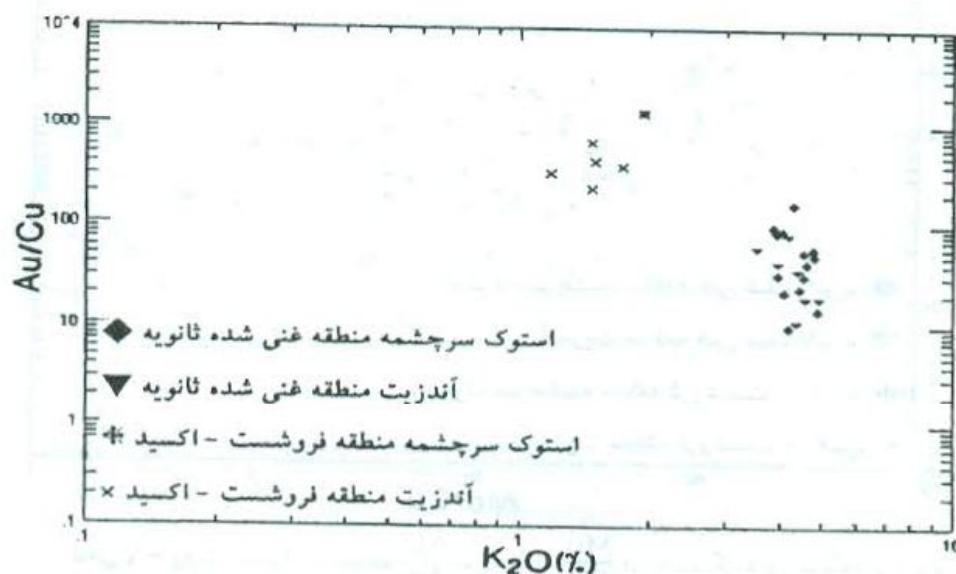


شکل ۶ - روند تغییرات نسبت $\frac{Mo}{Cu}$ در مقابل $\frac{Au}{Ag}$ در مقابله کانسنگ های منطقه بروتزاد.

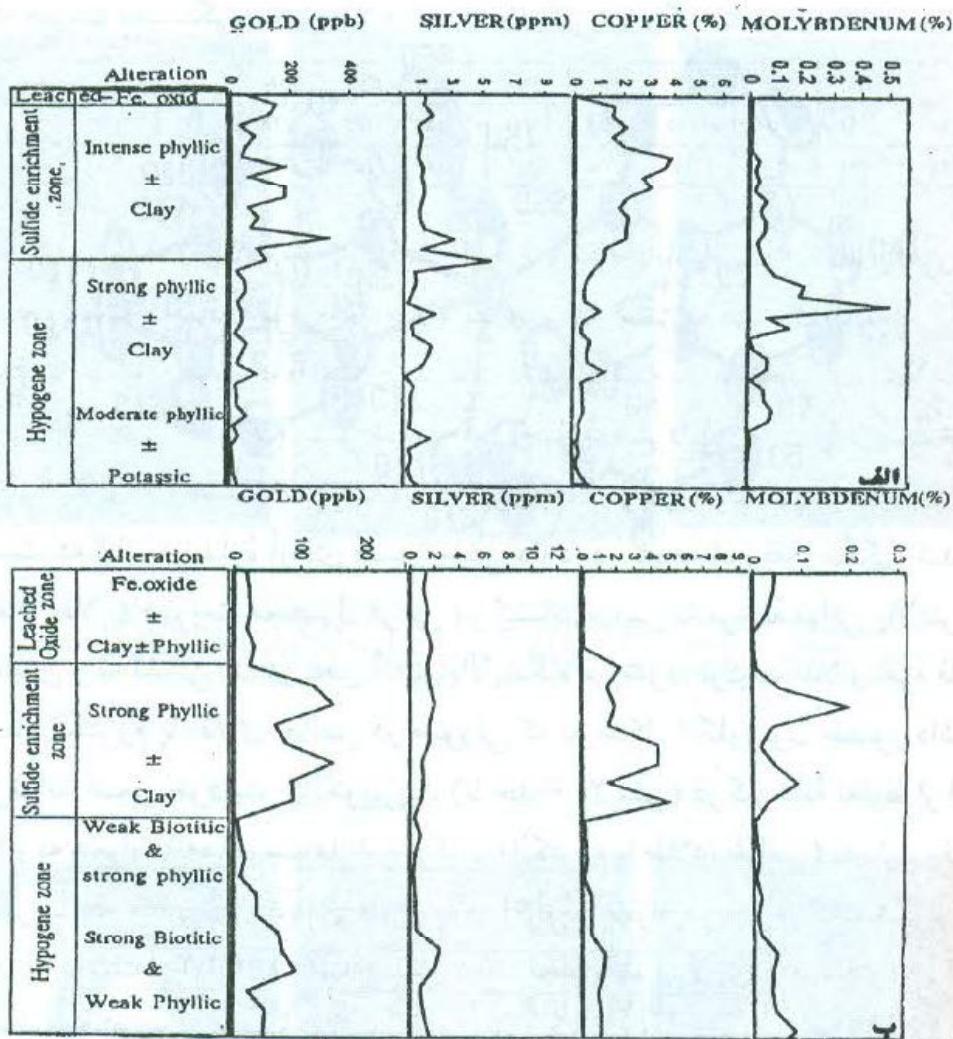
واسط بین استوک سرچشمه و سنگهای همبر در منطقه درونزاد و غنی شده ثانویه محل عیار و تراکم طلا، نقره و مس بیشینه است و مناطق سطحی و نیز ژرف کانسار از این عناصر فقیرند. این الگوها نشان می دهند که میزان این عناصر نسبت به عمق کاهش، اما مولیدن مقداری افزایش نشان می دهد (شکل ۹ - الف، ب).



شکل ۷ - روند تغییرات نسبت $\frac{\text{Au}}{\text{Ag}}$ در مقابل Cu در کانسگ‌های منطقه برونزاد.



شکل ۸ - روند تغییرات نسبت $\frac{\text{Au}}{\text{Cu}}$ در مقابل K₂O در کانسگ‌های منطقه برونزاد.



شکل ۹ الگوی پراکندگی ژئوشیمیایی و روند تغییرات فراوانی طلا، نقره، مس و مولیبدن نسبت به مجموعه‌های دگرسانی و مناطق کانی‌سازی در الف - استوک سرچشم؛ ب - آندزیت

براساس محاسبات همبستگی خطی (جدول ۲)، همبستگی طلا و نقره با یکدیگر $(r = 0,61)$ و هر دو با مس $(r \geq 0,72)$ در منطقه درونزاد مثبت و تنگاتنگ است. این ارتباط تنگاتنگ ژئوشیمیایی مطابق نظر الیپلوس و الیپلوس^۱ [۶] و کیگان و کاندلا^۲ [۴] نشان‌دهنده تشکیل همزمان طلا و نقره با مس می‌باشد. این ارتباط تنگاتنگ ژئوشیمیایی نشان‌دهنده کانی‌سازی طلا و نقره غیرقابل رویت^۳ به صورت محلول جامد

1- Eliopoulos and Eliopoulos

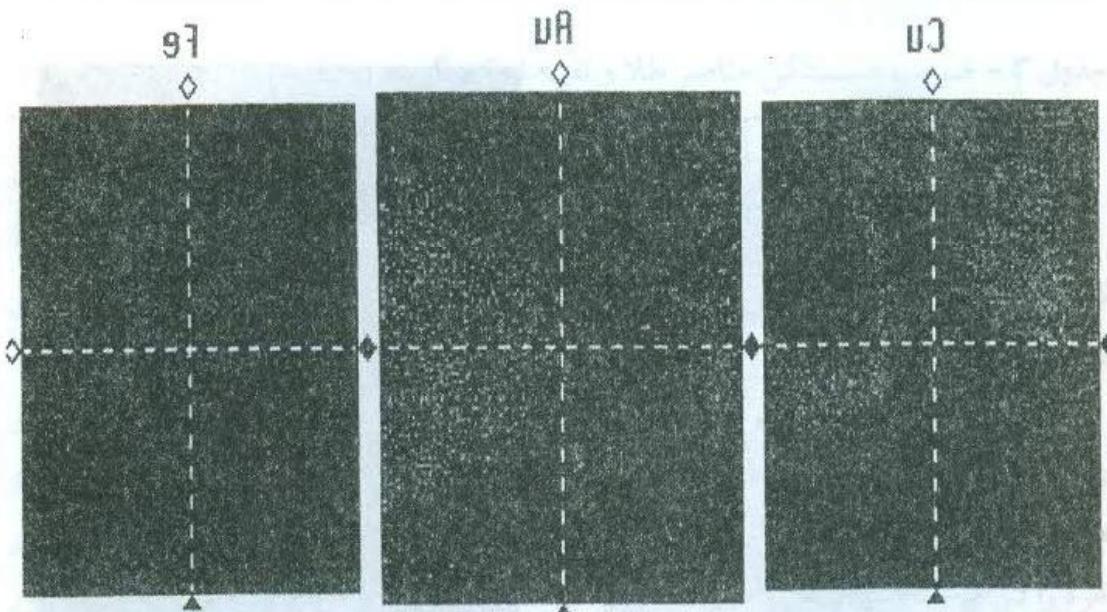
2- Cygan and Candela

3- Invisible

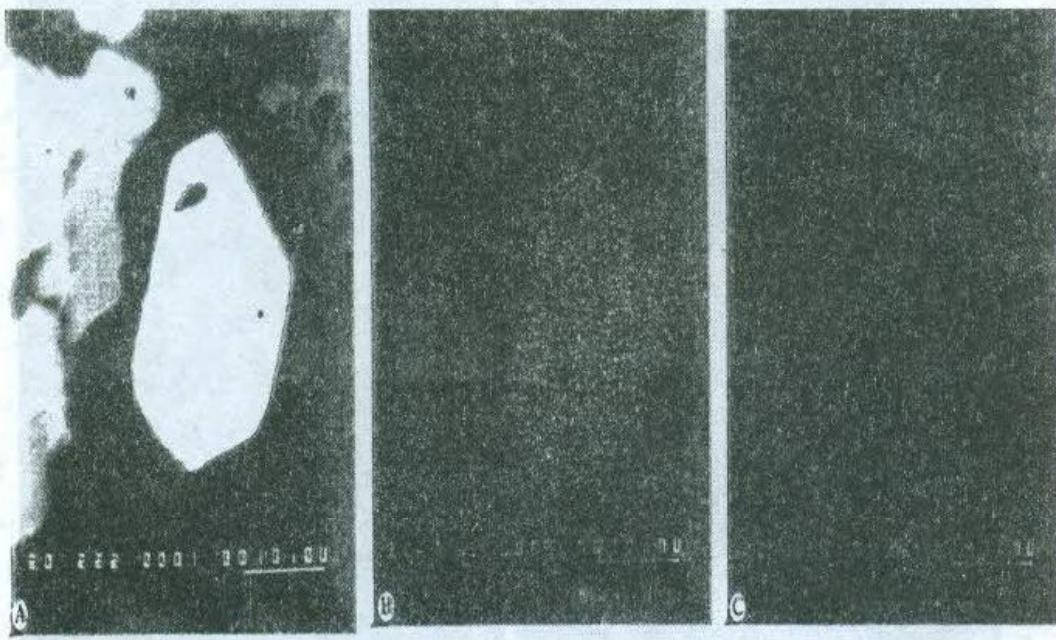
جدول ۲ - ضریب همبستگی عناصر طلا و نقره با یکدیگر و با دیگر عناصر در منطقه درونزاد.

	Cu	Mo	As	Sb	Pb	Zn	K ₂ O	SiO ₂	Fe	S	Au	Ag
Au	-0/81	-0/54	-0/10	-0/11	-0/23	-0/49	-0/64	-0/18	-0/10	-0/16	1	-0/61
Ag	-0/72	-0/16	-0/67	-0/00	-0/12	-0/07	-0/51	-0/05	-0/26	-0/29	-0/61	1

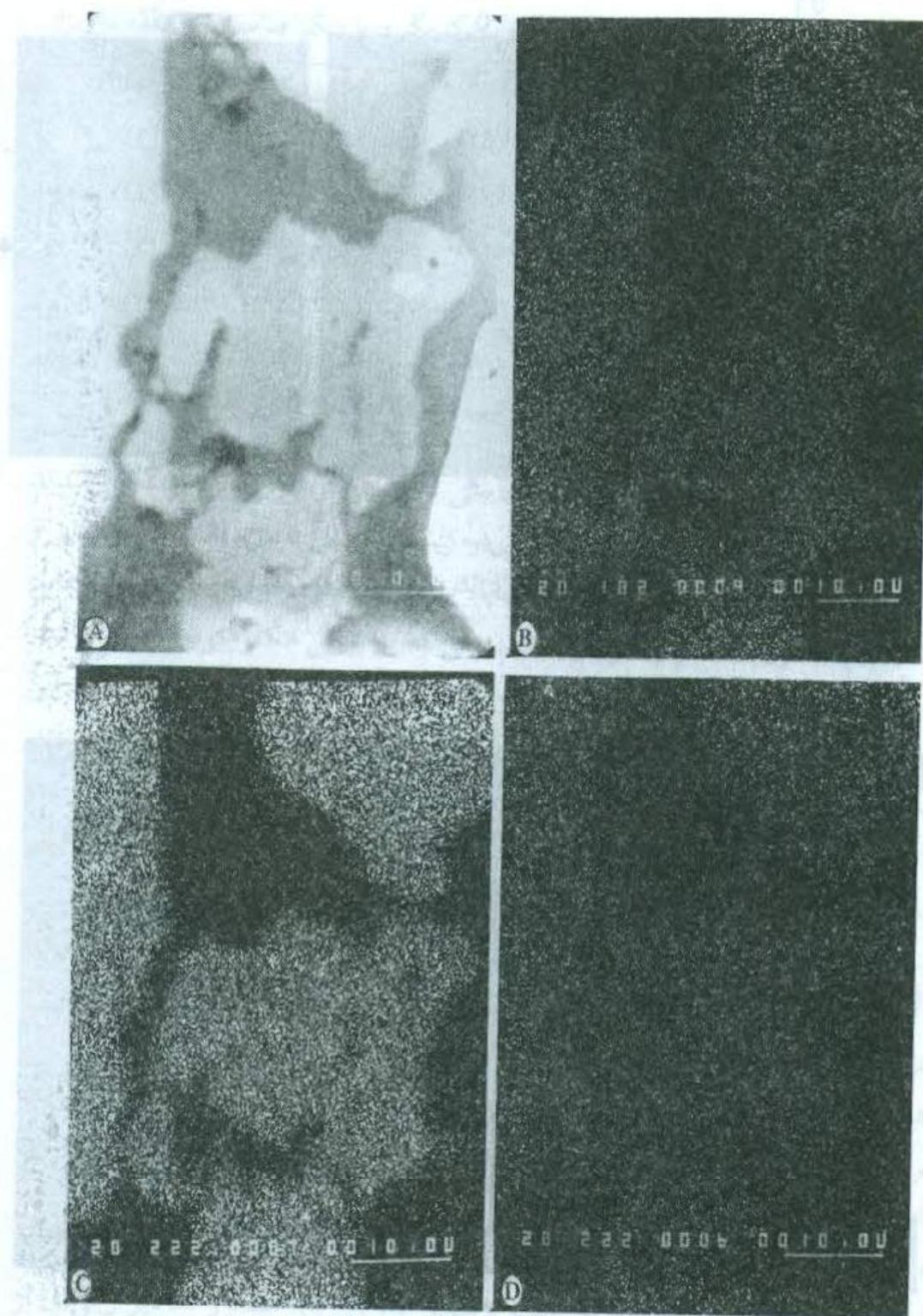
در ساختار کالکوپیریت یا کانی سازی ترکیبی از طلا و نقره قابل رویت^۱ به نام الکتروم یا طلای خالص است. ترکیب قابل رویت طلا و نقره ممکن است به صورت انکلوزیون در درون کالکوپیریت یا به صورت دانه‌های مستقل حضور داشته باشد. تحقیقات سالاری و همکاران [۱۴] حضور طلا به صورت محلول جامد غیرقابل رویت را در ساختار کالکوپیریت نشان داده است (شکل ۱۰). درگیری طلا در درون کالکوپیریت به حدی فشرده است که نیاز به اندازه آزادی بسیار پایینی دارد. در نتیجه این قفل شدگی شدید باعث انتقال طلا به صورت محصول فرعی در کنسانتره مس تا مرحله نهایی پالایش و نهایتاً جدایش و ته نشینی آن در لجن آندی پالایشگاه می‌شود. ترکیب طلا و نقره قابل رویت به نام الکتروم یا طلای خالص در صورتی که به شکل انکلوزیون حضور داشته باشد، می‌تواند ضمن خردایش کالکوپیریت (تا حد ۲۰۰ مش) در کارخانه تغییظ از این کانی جدا و به همراه دانه‌های مستقل این ترکیب (الکتروم یا طلای خالص) به دلیل رفتار مشابه با پیریت در مقابل فرایندهای فلوتاسیون [۹]، به همراه پیریت در کف سلولهای فلوتاسیون بازداشت و نهایتاً به باطله منتقل شود. تحقیقات سالاری و همکاران [۱۴] نشان داده است که بخش عمده طلای باطله از نوع قابل رویت است که تائید کننده ضریب همبستگی فوق الذکر و پیدایش طلا و نقره بدین شکل در کانسار سرچشمه است. همبستگی مثبت تنگاتنگ نقره با عناصر طلا، مس، آرسنیک، آتیموان در منطقه درونزاد می‌تواند نشان دهنده حضور بخشی از نقره کانسار در ساختار محلول جامد تراهیدریت - تناهیت یا رخدادهایی از رگه‌های اپی‌ترمال غنی از طلا و نقره در مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی در سیستم مس پورفیری سرچشمه باشد. براساس مطالعه میکروآنالیز الکترون پروب روی نمونه‌ای از رگه اپی‌ترمال، حضور ترکیبی از طلا و نقره به نام الکتروم و نیز حضور نقره در ساختار تناهیت در این رگه مشخص شد که تائید کننده ضرایب همبستگی فوق الذکر است (شکل ۱۱ و ۱۲). حضور مقادیر زیادی از آرسنیک و آتیموان همراه با طلا و نقره در لجن آندی پالایشگاه نشان دهنده حضور این



شکل ۱۰ تصاویر یونی از پراکندگی مس، طلا و اهن در نمونه‌ای از کانی کالکوپیریت سرچشمه به عنوان کانی‌سازی طلای غیرقابل رؤیت [۱۴]



شکل ۱۱ تصویر الکترون پرتو از کانی طلای فقیر از نقره (طلای خالص یا الکتروم) در یک نمونه از رگه اپی ترمال؛ A- تصویر الکترونی از طلای قابل رؤیت؛ B- الگوی پراکندگی طلا- C- الگوی پراکندگی نقره



شکل ۱۲ تصویر الکترون پروب از کانی تنانیت در یک نمونه از رگه اپی ترمال؛ A- تصویر الکترونی از تنانیت؛ B- الگوی پراکندگی نقره C-الگوی پراکندگی مس D- الگوی پراکندگی ارسنیک

جدول ۳ - ضریب همبستگی عناصر طلا و نقره با یکدیگر و با دیگر عناصر در منطقه بروز زاد.

	Cu	Mo	As	Sb	Pb	Zn	K ₂ O	SiO ₂	Fe	S	Au	Ag
Au	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۸	-۰/۲۴	-۰/۳۰	-۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۴۴	-۰/۰۹	۰/۱۸	۱	۰/۶۷
Ag	-۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۷۱	۰/۰۹	-۰/۰۲	۰/۲۷	-۰/۲۲	-۰/۰۳	-۰/۳۶	۰/۴۸	-۰/۲۷	۱

کانیها در مسیر تولید مس و درنتیجه حمل بخشی از طلا و نقره کانسار به وسیله این کانیهاست.

تجزیه شیمیایی سه نمونه کنسانتره پیریتی با خلوص ۷۵٪ سولفید از کانسنگهای درونزاد نشان داد که میزان طلای آن ۲-۹ ppb است. همچنین تحقیقات سالاری و همکاران [۱۴] حضور طلا در پیریت و تحقیقات الکترون پرور در مطالعه حاضر حضور نقره را در ساختار پیریت نشان داده است. برخلاف آنچه که در کانسار سرچشمه متصور بوده است، پیریت از لحاظ طلا فقیر و ارزشمندی حضور طلا در آن قابل مقایسه با کالکوپیریت نیست.

در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه، طلا بیشترین همبستگی را با نقره (۰/۶۷) و سپس همبستگی مثبت متوسط با سیلیس (۰/۴۴=۲) دارد و با مس هیچ گونه همبستگی نشان نمی دهد (جدول ۳). این مفاهیم آماری نشان می دهد که شرایط غنی شدگی طلا و نقره در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه در ارتباط با فرآیندهای غنی سازی ثانویه مس نیست و غنی شدگی این عناصر در این منطقه با توجه به همبستگی مثبت طلا با سیلیس، در ارتباط با فرآیندهای درونزاد است. حضور طلا و نقره به صورت محاط^۱ داخل کوارتز [۱۴] توجیه کننده این همبستگی درونزاد است. همبستگی مثبت و شدید نقره با ارسنیک در این بخش از کانسار می تواند نشاندهنده حضور نقره در ساختمان پروستیت (Ag₃AsS₃) باشد. همبستگی مثبت نسبتاً بالاتا متوسط نقره با گوگرد (۰/۴۸=۲) و نسبتاً ضعیف با آهن (۰/۳۶=۲) و روی (۰/۲۷=۲) در این منطقه به همراه مطالعه الکترون پرور نشاندهنده حضور بخشی از نقره در ساختار پیریت و اسفالریت است. این همبستگی های ژئوشیمیایی همچنین می تواند نتیجه حضور نقره به صورت آکاتیت و کلاراژیریت در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه کانسار نیز باشد. عیار میانگین محاسبه شده طلا و نقره کانسار براساس ۶۸ نمونه کانسنگ پورفیری (به استثناء رگه اپی ترمال - جدول ۱) و ۱۲ نمونه خوراک ۱۲ ماه کارخانه تغییظ

جدول ۴ - عیار میانگین طلا، نقره، مس و مولیبدن در محصولات مربوط به یکسال تولید کارخانه تغليظ مجتمع مس سرچشمه از مهر ۷۷ لغايت مهر ۷۸ (اعداد داخل پرانتز معرف تعداد نمونه هاست).

میزان بازیابی (%)				عيار میانگین				محصولات کارخانه تغليظ
Mo	Cu	Ag	Au	Mo(%)	Cu(%)	Ag(ppb)	Au(ppb)	
۷۱	۸۳	۶۸	۵۲	۰/۰۴۷	۱/۰۱	۱۴۰۰	۵۵	خوارک (۱۲)
				۰/۶۷۸	۴۰/۱۸	۲۸۷۷	۹۵۵	کنسانتره نهایی (۱۲)
				۰/۰۰۸	۰/۱۸	۴۳۰	۲۶/۳	باطله نهایی (۱۲)

(جدول ۴) به ترتیب $0,06\text{g/t}$ طلا و $1,22\text{g/t}$ نقره است که اختلاف بسیار فاحشی با عیار تعیین شده قبلی دارد. براساس محاسبات روی داده های حاصل از تجزیه شیمیایی 36% $R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)}$ نمونه از محصولات یکسال کارخانه تغليظ (جدول ۴) واستفاده از فرمول میزان بازیابی سالیانه طلا 53% و نقره 68% است.

با احتساب مصرف ۱۴ میلیون تن کانسنگ مس در سال و براساس عیارهای جدید سالانه باید از این مقدار ماده معدنی حداقل 840 کیلوگرم طلا و 18 تن نقره در مرحله نهایی پالایش حاصل گردد. مطابق گزارشات منتشر نشده شرکت ملی صنایع مس ایران و براساس واقعیت های بهره برداری، بازیابی و پالایش در طی سالیان متمادی در مجتمع مس سرچشمه، سالانه حداقل 400 کیلوگرم طلا و 11 تن نقره در لجن پالایشگاه تجمع می یابد که این مقادیر تقریباً نصف مقادیر محاسبه شده براساس عیارهای جدید است. با توجه به میزان محاسبه شده بازیابی طلا و نقره، این میزان تجمع طلا و نقره در لجن آندی پالایشگاه، کاملاً منطقی و صحیح است. بنابراین تصور میزان بازیابی ضعیف این عناصر (10%) و عدم دستیابی به حدود 4 تن طلا و 50 تن نقره در سال مطابق عیار محسوب نمی شود و تا مرحله نهایی پالایش با آن همراه است و سرانجام از آن جدا و وارد لجن آندی پالایشگاه می گردد. درنتیجه کمتر از نیمی از طلا و نقره کانسار عمده از نوع قابل رویت به دلیل رفتار مشابه با دیگر کانیهای باطله بویژه پیریت از مسیر تولید مس خارج و وارد باطله می شود. تفاوت میزان بازیابی مس (83%)، طلا (53%) و نقره (68%) نیز نشان می دهد که تمام طلا و نقره کانسار در ساختار کالکوپیریت حضور ندارد، یعنی

وارد بخش تغليظ شده مس شوند. در نتيجه حضور تركيبات ديگري از طلا و نقره در کانسار سرچشميه قطعي به نظر مى رسد و ميزان بازيابي طلا و نقره از خاک ورودي به کارخانه تغليظ به وسيله تركيب سنگ شناسی آن كنترل مى شود.

مقاييسه با ساير کانسارهای مس پورفيري

براساس اطلاعات و دستاوردهای حاصل از اين پژوهش مشخص شد که کانسار مس پورفيري سرچشميه با عيار ميانگين $0,06\text{g/t}$ طلا و $1,22\text{g/t}$ نقره از جمله کانسارهای مس پورفيري فقير از طلاست. به منظور مقاييسه همه جانبه اين کانسار با انواع کانسارهای مس پورفيري، برخى شاخصهای اساسی تفكيك‌کننده اين کانسارها از يكديگر مانند ميزان ذخیره، ريخت‌شناسي، عمق جايگزيني، موقعیت پوسته‌اي و ژئوديناميکي، تركيب و ماهيت سنگ شناختي توده نفوذی مولد، ميزان مگنتيت منطقه پتاسيك، و الگوي دگرسانی و کانی‌سازی مقاييسه شدند و خلاصه اين نتایج در جدول ۵ و شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.

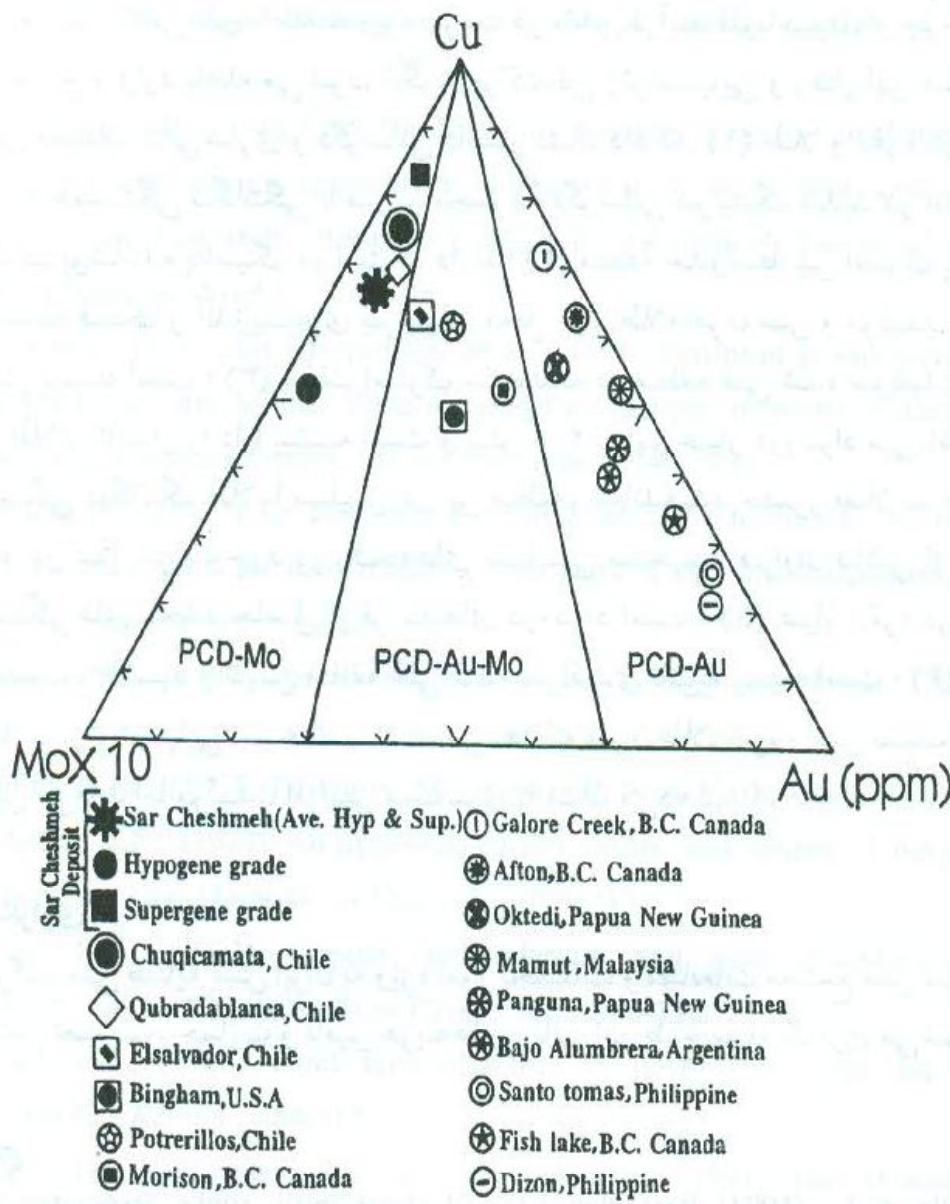
جمع‌بندی و برداشت

براساس نتایج حاصل از اين پژوهش، کانسار سرچشميه با توجه به ميزان ذخیره بالا، جايگزيني در عمق ۳ تا ۴ کيلومتری، با ريخت‌شناسي کلاسيك، ميزان بسيار جزئي مگنتيت ($0,04\%$) در منطقه دگرسانی پتاسيك، ميزان بسيار بالاي موليدن ($0,03\%$) و پائين بودن عيار طلا ($0,06\text{g/t}$) يك کانسار مس پورفيري فقير از طلاست و مدل متالوژني كاملی از سистем‌های مس - موليدن پورفيري به حساب مى آيد که معلوم وجود خاستگاهی از ماگماتيسم کالک آلکالين نوع حاشيه قاره‌ای است. بر اساس عيارهای جديد، حداکثر محتواي اسمی طلا و نقره در ۱۴ ميليون تن کانسنگ مصرفی مس در سال، حدود 800 کيلوگرم طلا و 18 تن نقره خواهد بود و انتظار دستيابي به حدود 4000 کيلوگرم طلا و 50 تن نقره در سال بر اساس عيارهای تعين شده از سوي شركت سلکشن تراست [۱۵] کاملاً غيرواقعي است. براساس پژوهش حاضر، ميزان بازيابي فعلی ساليانه طلا $0,53\%$ و $0,68\%$ نقره است که اين ميزان بازيابي با تجمع ساليانه حدود 400 کيلوگرم طلا و 11 تن نقره در لجن پالايشگاه طی ساليان متمادي بهره‌برداری، بازيابي و پالايش مس انطباق دارد. اين ميزان بازيابي نشان مى دهد که $0,53\%$ طلا و $0,68\%$ نقره کانسار به صورت محلول جامد غيرقابل رویت در ساختار کانيهای

جدول ۵ - خلاصه‌ای از مقایسه ویژگی‌های اساسی کانسار مس سرچشمه با انواع کانسارهای

مس پورفیری [۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]

کانسارهای کانسارهای من-طلاء-مولیدنپورتیری مس - طلای پورتیری (PCD-Au)	کانسارهای من-طلاء-مولیدنپورتیری مس - طلای پورتیری (PCD-Au-Mo)	کانسارهای من-مولیدنپورتیری (PCD-Mo)	کانسار سرچشمه	موارد مقایسه
دیوریت، کوارتز دیبوریت، مونزونیت، سینیت، تونالیت	گرانودیبوریت، تونالیت، آدامیلت، مونزونیت	گرانودیبوریت تونالیت، آدامیلت، مونزونیت	گرانودیبوریت	توude نفوذی منشاء
عمدتاً الکالین الکالن	کالک الکالین کالک	عدهاً کالک الکالین	کالک الکالین	سری ماغماتی
کوچک: ۱۶ میلیون تن	متوسط: ۳۹ میلیون تن	بزرگ: ۵۰۰ میلیون تن	بزرگ: ۱۲۰ میلیون تن	اندازه و میانگین ذخیره کانسار
۱ کیلومتر	۰/۹ کیلومتر	۳/۶ کیلومتر	۳-۴ کیلومتر	میانگین عمق جایگزینی
عمدتاً ولکانیک	ولکانیک یا کلایک	کلایک	کلایک	ویخت شناسی
عمدتاً اقیانوسی	قاره‌ای یا اقیانوسی	عمدتاً قاره‌ای	قاره‌ای نازک	وضعیت پوسته
عمدتاً جزیره	حاشیه تاره‌ای یا جزیره تووس	عمدتاً حاشیه قاره‌ای	جزیره، قوسی	موقعیت زُئودینامیکی
قوسی	پتاسیک، نیلیک، پروپلیتیک	پتاسیک، نیلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک	پتاسیک، نیلیک، پروپلیتیک ± آرژیلیک	الگوی دگرسانی درونزاد
Au-Cu, Cu-Au Cu-Au-Mo	Cu-Mo-Au	Cu,Cu-Mo, Cu-Mo±Au	Cu-Mo(Au,Ag)	اجزاء فلزی درونزاد
مگنتیت، بوریت، کالکوپیریت، طلا	کالکوپیریت، پیریت، مولیدنیت ± طلا	کالکوپیریت، پیریت، مولیدنیت	کالکوپیریت، پیریت، مولیدنیت	کانی‌های درونزاد
نایاب یا کمیاب	معمول یا نایاب	گسترش خوب و معمول	گسترش خوب و معمول	حدوث غسن شدگی سولفیدی ثانویه
نایاب یا کمیاب	معمول یا نایاب	گسترش خوب و معمول	گسترش خوب و معمول	حدوث پوشش فروشست - اکسید
۰/۰۵	۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۶۹	عيار میانگین مس (درصد)
۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۳	عيار میانگین مولیدن (درصد)
۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۶	عيار میانگین طلا (گرم در تن)
۱/۶۹	۱/۶۳	۱/۲۲	۱/۲۲	عيار میانگین نقره (گرم در تن)
۲/۶	معمول: ۱	جزئی: ۰/۰۵	جزئی: ۰/۴	میزان میانگین مگنتیت (درصد)
$\frac{Au}{Mo} \geq ۳۰$	$۳ < \frac{Au}{Mo} < ۳۰$	$\frac{Au}{Mo} \leq ۳$	۲	نسبت $\frac{Au}{Mo}$



شکل ۱۳ - موقعیت کانسار سرچشم در نمودار سه‌تایی مس - طلا - مولیبدن و مقایسه آن با مهمترین کانسارهای مس پورفیری دنیا؛ محدوده‌های مشخص شده PCD-Mo و PCD-Au مربوط به کاکس و سینگر [۳]؛ به استثنای داده‌های کانسار سرچشم، داده‌های به دیگر کانسارها از ویلا و سیلیتو [۱۸] هستند.

سولفیدی مس (کالکوپیریت) و نیز به صورت محصول فرعی وارد بخش تغییط شده مس می‌شود و در مرحله نهایی پالایش مس در لجن الکترولیز پالایشگاه تجمع می‌یابد و بقیه طلا و نقره کانسار احتمالاً به صورت قابل رویت (الکتروم و طلای خالص)، به دلیل

رفتار مشابه با کانی‌های باطله به ویژه پیریت در مقابل فرآیند فلووتاسیون، از چرخه تولید مس خارج و وارد باطله می‌شود. الگوی پراکندگی ژئوشیمیایی و رفتار این عناصر در مناطق مختلف کانی‌سازی و دگرسانی کانسار نشان داد که: (۱) طلا و نقره در منطقه درونزاد همبستگی تنگاتنگی با مس و مجموعه دگرسانی بیوتیتیک شدید در آندزیت‌ها و فیلیک پوشاننده پتاسیک در استوک دارند؛ (۲) منطقه حدواتسط بین استوک پورفیری سرچشمہ فیلیک و آندزیت‌های بیوتیتیک محل عیار طلا، نقره، مس و مولیبدن درونزاد کانسار بیشینه است؛ (۳) سقف استوک سرچشمہ در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه عیار طلای کانسار را دارا بیشینه است و بیش از ۲ برابر عیار درونزاد می‌باشد؛ (۴) همبستگی تنگاتنگ طلا با سیلیس در این منطقه، نشانده‌نده حضور طلا به صورت محاط در کوارتز موجود در رگچه‌های سیلیسی ضخیم و فراوان ناشی از رخداد شکستگی‌های مجدد حاصل از فرآیندهای درونزاد است؛ (۵) عیار نقره در منطقه فروشست - اکسید و سپس منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه بیشینه است؛ (۶) الگوی پراکندگی ژئوشیمیایی این عناصر نشان می‌دهد که میزان طلا، نقره و مس نسبت به عمق کاهش می‌یابد اما مولیبدن افزایش مختصری را نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

از شرکت ملی صنایع مس ایران به ویژه امور تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمہ به خاطر تصویب، حمایت و تأمین هزینه‌های ریالی این طرح سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

1. Bariie, C.T., (1993) Petrochemistry of shoshonitic rocks associated with porphyry copper-gold deposits of central Quesnellia, British Columbia, Canada: *Jour. Geochem. Explor.*, v.48, p.225-258.
2. Berberian, F., and Berberian, M., (1981) *Tectonic-plutonic episodes in Iran: Geodynamics series, 3.WG-6*, American Geophysical Union, p.5-32.
3. Cox, D.P., and Singer, D.A., (1988) Distribution of gold in porphyry copper deposits: *U.S. Geological Survey Bulletin*.1877-C: p.C1-C14.
4. Cygan, G.L., and Candela, P.A., (1995) Preliminary study of gold partitioning among pyrrhotite, pyrite, magnetite, and chalcopyrite in gold - saturated chloride solutions at 600 to 700°C, 140 MPa (1400

- bars): *Mineralogical Association of Canada Short Course*, v. 23, p.129-137.
5. Dimitrijevic, M.D., (1973) Geology of Kerman region. Institute for geological and mining exploration and institution of nuclear and other mineral raw materials, Beograd-Yugoslavia. *Geological Survey of Iran*, Report Number. Yu/52.
 6. Eliopoulos, D.G., and Eliopoulos, M.E., (1991) Platinum-group elements and gold contents in the Skouries porphyry copper deposits, Chalkidiki Peninsula, northern Greece: *Econ.Geol*, v.86, p.740-749.
 7. Etminan, H., (1977) Le Porphyre Cuprifere de Sar Cheshmeh. "Rôle des phases fluides dans les mecanismes d'alteration et de mineralization. *Science de la terre*, France. 242p.
 8. Evans, A.M., (1987) *An introduction to ore geology*, Blackwell, Oxford, 231p.
 9. Gaudin, A.M., (1957) *Flotation*, McGrow-Hill, New York, USA, 573P.
 10. Hollister, V.F., (1975) An apprasial of the nature and source of porphyry copper deposits: *Minerals.Sci.Eng*, v.7, p.225-233.
 11. Kesler, S.E., (1973) Copper, molybdenum and gold abundances in porphyry copper deposits: *Econ.Geol*, v.68, p.106-112.
 12. Lowell, J.D., (1988) Gold mineralization in porphyry copper deposits: *Soc.Min.Eng.Reprint*, v.88-117, 17p.
 13. Muller, D., Heithersay, P.S., and Groves, D.I., (1994) The shoshonite porphyry Cu-Au association in the Goonumbla District, N.S.W, Australia: *Mineralogy & Petrology*, v.51, p.299-321.
 14. Salari Rad, M.M., Tsunekawa, M., Hirajima, T., and Yoneda, T., (1999) Gold occurrence in the Sar Cheshmeh porphyry copper ore and its behaviour during beneficiation. In: *Proceeding of copper 99-Cobre 99. International environment conference*, v.II - Mineral Processing / Environment, p.129-143.
 15. Selection Trust Limited., (1970) *Feasibility report for the Sar Cheshmeh project of Kerman copper industries*, 120 p.
 16. Shahabpour, J., (1982) Aspects of alteration and mineralization at the

- Sar Cheshmeh copper-molybdenum deposit, Kerman, Iran. *Ph.D. thesis*, Univ. Leeds. U.K.342p.
17. Shahabpour, J., and Kramers, J.D., (1987) Lead isotope data from the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit, Iran: *Mineralium Deposita*, v.**22**, p.278-281.
18. Vila, T., and Sillitoe, R.H., (1991) Gold-rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile: *Econ.Geol.*, v.**86**, p.1238-1260.
19. Waterman, G.C., Hamilton, R.L., (1975) The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit. *Econ.Geol.*, v.**70**, p.568-576.
- ۲۰ - شفیعی، بهنام (۱۳۷۹) مطالعه رخداد، پراکندگی ژئوشیمیایی و مدل فلزیابی طلا و نقره در کانسار مس پورفیری سرچشم، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۵۳ صفحه.