

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 phyllic/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 سرچشمه کرمان

بهنام شفیعی و جمشید شهاپور

بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده: براساس این مطالعه عیار میانگین طلا و نقره کانسار مس پورفیری سرچشمه به ترتیب $0/06 \text{ g/t}$ و $1/22 \text{ g/t}$ است که اختلاف زیادی با عیارهای گزارش شده قبلی دارد. در آندزیت بیوتیتی و نمونه‌هایی از استوک سرچشمه 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 ($r \geq 0/72$) وجود دارد که نشان‌دهنده (۱) ته‌نشینی همزمان طلا و نقره با مس و (۲) حضور احتمالی طلا بصورت محلول جامد غیرقابل رویت و نیز طلای خالص یا الکتروم داخل دانه‌های کالکوپریت است.

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

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

واژه‌های کلیدی: سرچشمه، 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 ۵/۲ 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 سلکشن تراست^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 حداکثر 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 غیر واقعی 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 نوشته شده است.

روش مطالعه

تعداد ۷۰ نمونه کانسنگ از سنگ‌های دیواره‌ای آندزیتی و استوک سرچشمه، از ۱۰

حفاری الماسی و نیز جبهه‌های استخراجی معدن با توجه به مناطق مختلف کانی‌سازی (درون‌زاد - بیرون‌زاد) و دگرسانی (پتاسیک، بیوتیتیک، فیلیک، پروپیلیتیک) از سطح تا ژرفای ۱ کیلومتری کانسار برداشت شدند. پس از انجام مراحل آماده‌سازی، نمونه‌ها برای ۱۲ عنصر طلا، نقره، مس، مولیبدن، آرسنیک، آنتیموان، سرب، روی، آهن، گوگرد، پتاسیم و سیلیسیم مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. برای تعیین میزان بازیابی و هدررفتگی طلا و نقره در مسیر تولید مس، تعداد ۳۶ نمونه از محصولات کارخانه تغلیظ (خوراک کارخانه^۱ - ماده معدنی تغلیظ 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 پیدایش 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-ماگمایی ایران مرکزی و در بخش شمالی کمپلکس آتشفشانی رسوبی بند ممزار - پاریز در کمربند دهج - 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 کانسنگ با عیار ۰/۷٪ مس و ۰/۰۳٪ مولیبدن بزرگترین کانسار مس ایران و قابل مقایسه با کانسارهای بزرگی چون چوکی کاماتا (شیلی) و بینگهام (آمریکا) است.

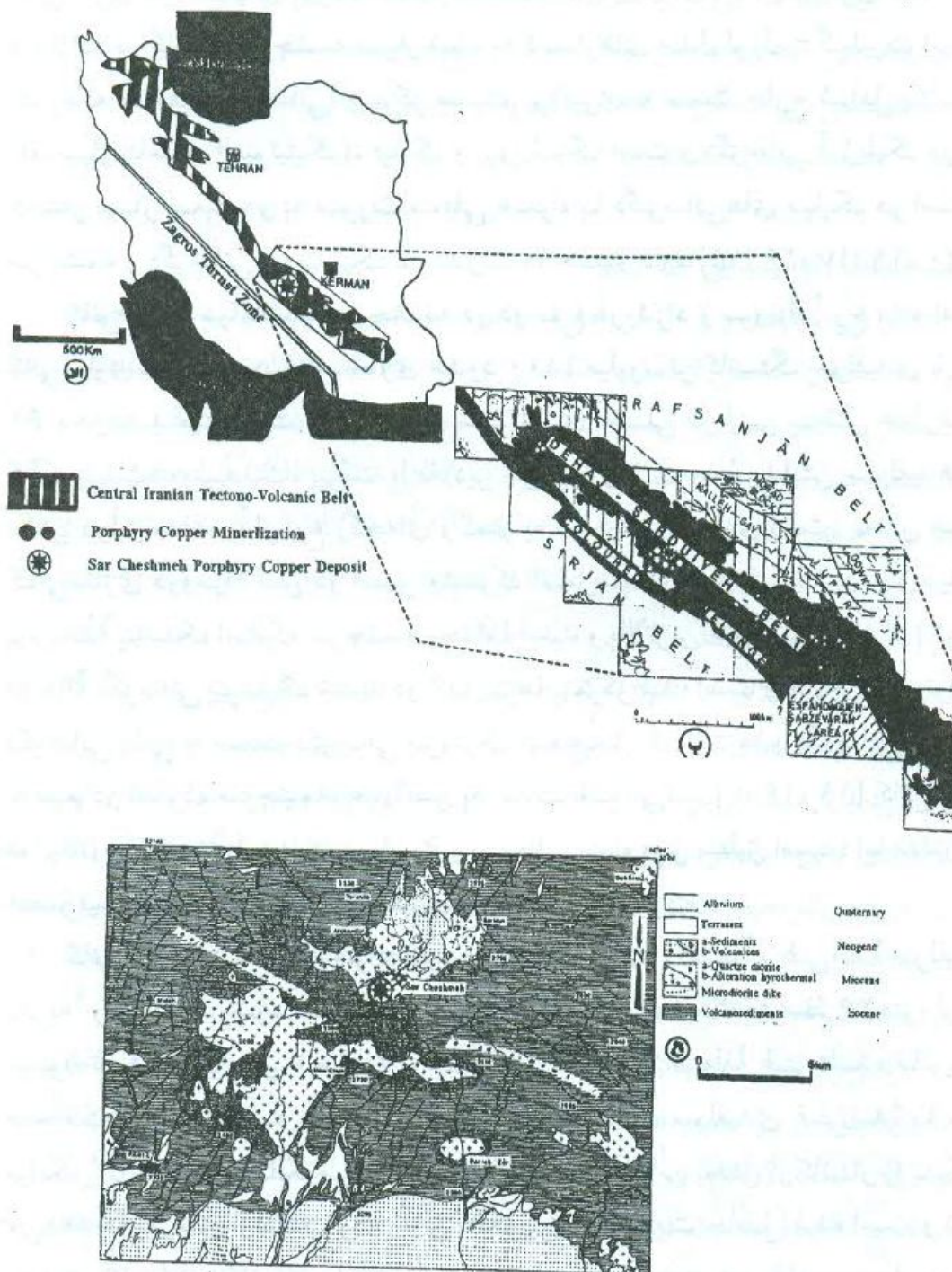
کانی‌سازی در کانسار سرچشمه در ارتباط با نفوذ استوک گرانودیوریتی سرچشمه به سن میوسن، با ماهیت پترولوژیکی کالک آکالین، به داخل آندزیت‌های دانه‌ریز پورفیری ۲۰۰۰ ساله صورت گرفته است [۷، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰]. استوک سرچشمه و آندزیت‌های میزبان به وسیله دایک‌هایی با روند عمومی NNW-SSE؛ هم‌زمان با کانی‌سازی (دایک 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 الف - موقعیت کانسار مس سرچشمه بر روی کمربند تکتونو-ماگمایی ایران مرکزی [۲۰].

ب: تقسیمات زمین‌شناسی استان کرمان و موقعیت کانسار سرچشمه به همراه

رخدادهایی دیگر از کانی‌سازی مس پورفیری در کمربند دهج - ساردوئیه [۲۰، ۵].

ج: نقشه زمین‌شناسی ناحیه پاریز و موقعیت کانسار سرچشمه [۷].

کانی سازی در سنگهای میزبان کانسار شده‌اند [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹]. الگوی دگرسانی درونزاد^۱ در کانسار سرچشمه بسیار شبیه به کانسارهای مدل لوول - گیلبرت است؛ بطوریکه هاله‌های دگرسانی از مرکز سیستم پورفیری به سمت خارج شامل پتاسیک (فلدسپار پتاسیم + بیوتیتیک)، فلیک و پروپیلیتیک است و دگرسانی آرژلیک در این کانسار بسیار ضعیف و به صورت محلی همراه با دگرسانی‌های فلیک 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 ۰/۶۱ درصد مس است و کانی‌های سولفیدی اصلی در این بخش عبارتند از کالکوپریت، مولیدنیت، 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 بیوتیتیک شدید و فلیک پوشاننده پتاسیک استوک سرچشمه رخ داده است و بالاترین عیار مس درونزاد (۱/۴٪) در هاله دگرسانی بیوتیتیک شدید در آندزیت‌ها متمرکز شده است و خارج از این نواحی دگرسانی یعنی به سمت دگرسانی بیوتیتیک ضعیف در آندزیت‌ها و دگرسانی فلدسپار پتاسیم در استوک سرچشمه، عیار مس به شدت افت می‌کند [۷، ۱۶، ۱۹]. کانی سازی مولیدن درونزاد نیز شبیه به مس است و بر محل پرعیار 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 ۰/۶۲٪ برخوردار است. منطقه غنی شده ثانویه با ضخامت متوسط ۳۷ متر شامل ۱۱۱ میلیون تن کانسنگ سولفیدی غنی شده با عیار میانگین ۱/۵٪ است. کالکوسیت کانی سولفیدی اصلی این بخش از کانسار را تشکیل می‌دهد که به بهای از دست رفتن آهن کالکوپریت 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

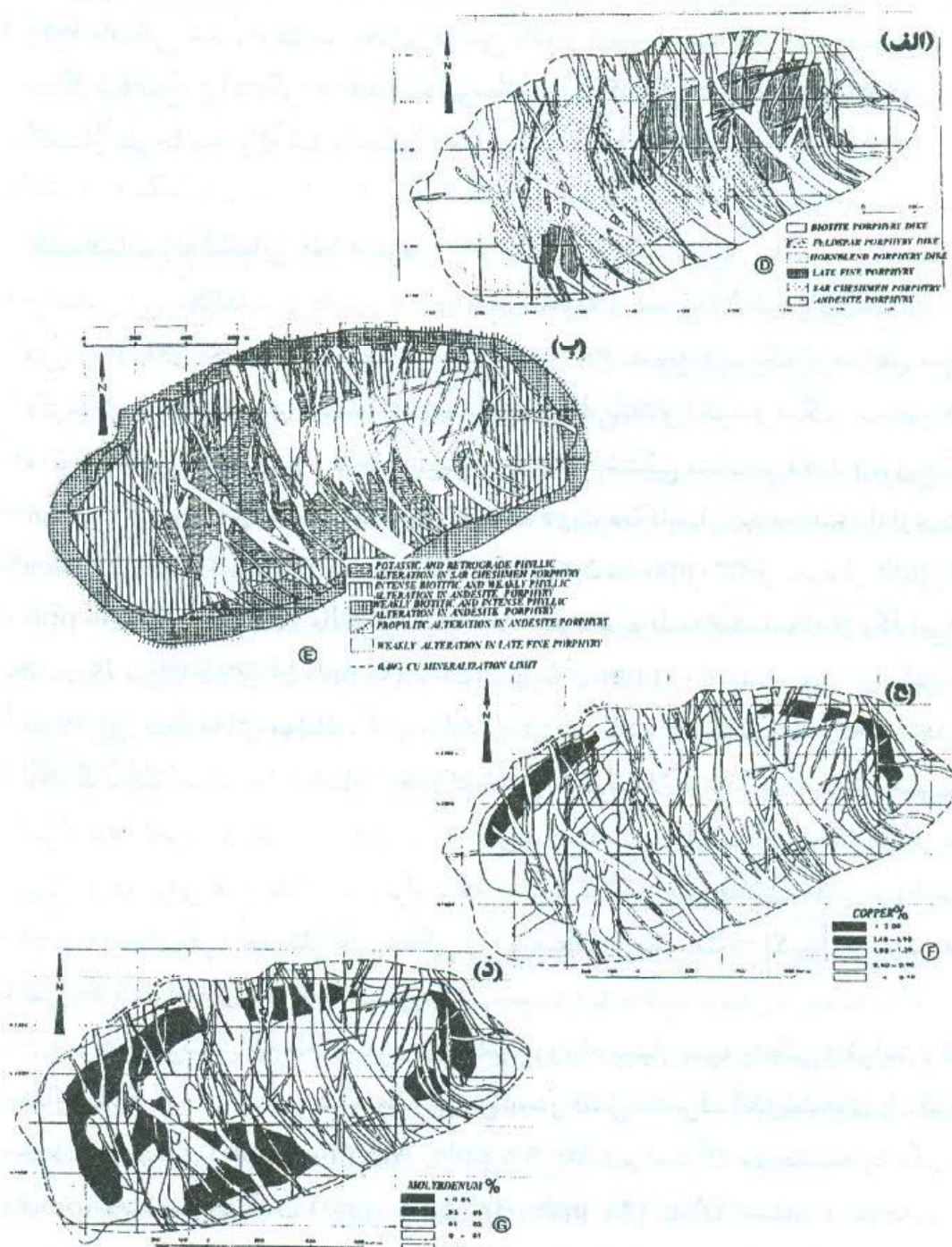
4- Secondary Sulfide Enrichment Zone

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 سنگ شناسی، 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، عمده نمونه‌ها از لحاظ طلا و نقره و دیگر عناصر (مس، مولیبدن، سرب، روی، آرسنیک، آنتیموان و...) غنی شدگی 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 ۵/۲ ppb تا ۳۳۰ ppb و نقره از ۱۴۰ ppb تا ۵۵۰۰ ppb تغییر می‌کند. بالاترین عیار طلا و نقره مربوط به یک نمونه از رگه‌ای ترمال است که میزان طلای آن ۵۰۰ ppb و میزان نقره آن ۲۰۰ 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 غنی شدگی طلا مربوط به منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه با دگرسانی فلیک $\pm$ آرژلیک است. عیار میانگین طلا در این بخش بیش از دو برابر عیار طلای درونزاد و در حدود ۴ برابر عیار طلای بخش فروشت - اکسید است. نقره حداکثر غنی شدگی را در منطقه فروشت - 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 (Au: ۹۴ ppb; Ag: ۲۴۰۰ ppb) و استوک سرچشمه با دگرسانی فلیک پوشاننده پتاسیک (Au: ۱۲۰ ppb; Ag: ۵۵۰۰ ppb) است و در نتیجه بر محل پرعیار 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 فلیک 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 الف - نقشه سنگ‌شناسی کانسار سرچشمه [۱۹، ۷].

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

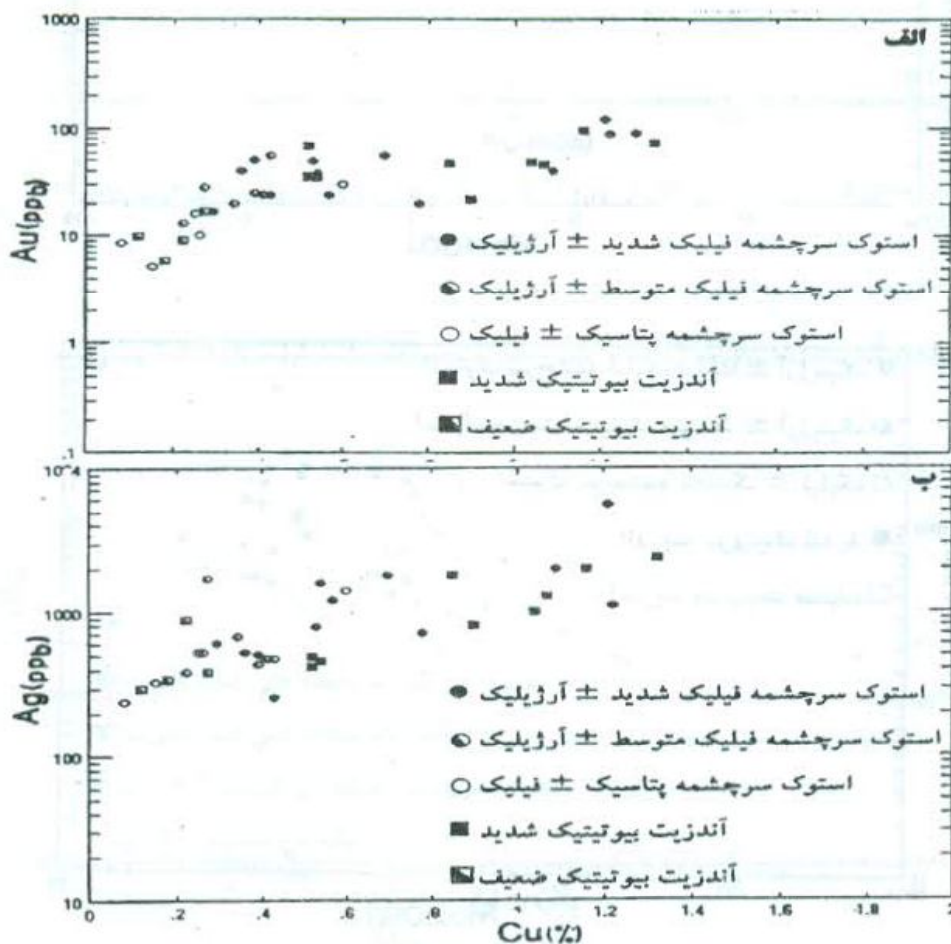
ج: نقشه پراکندگی مس درونزاد در کانسار سرچشمه [۱۹، ۷].

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

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

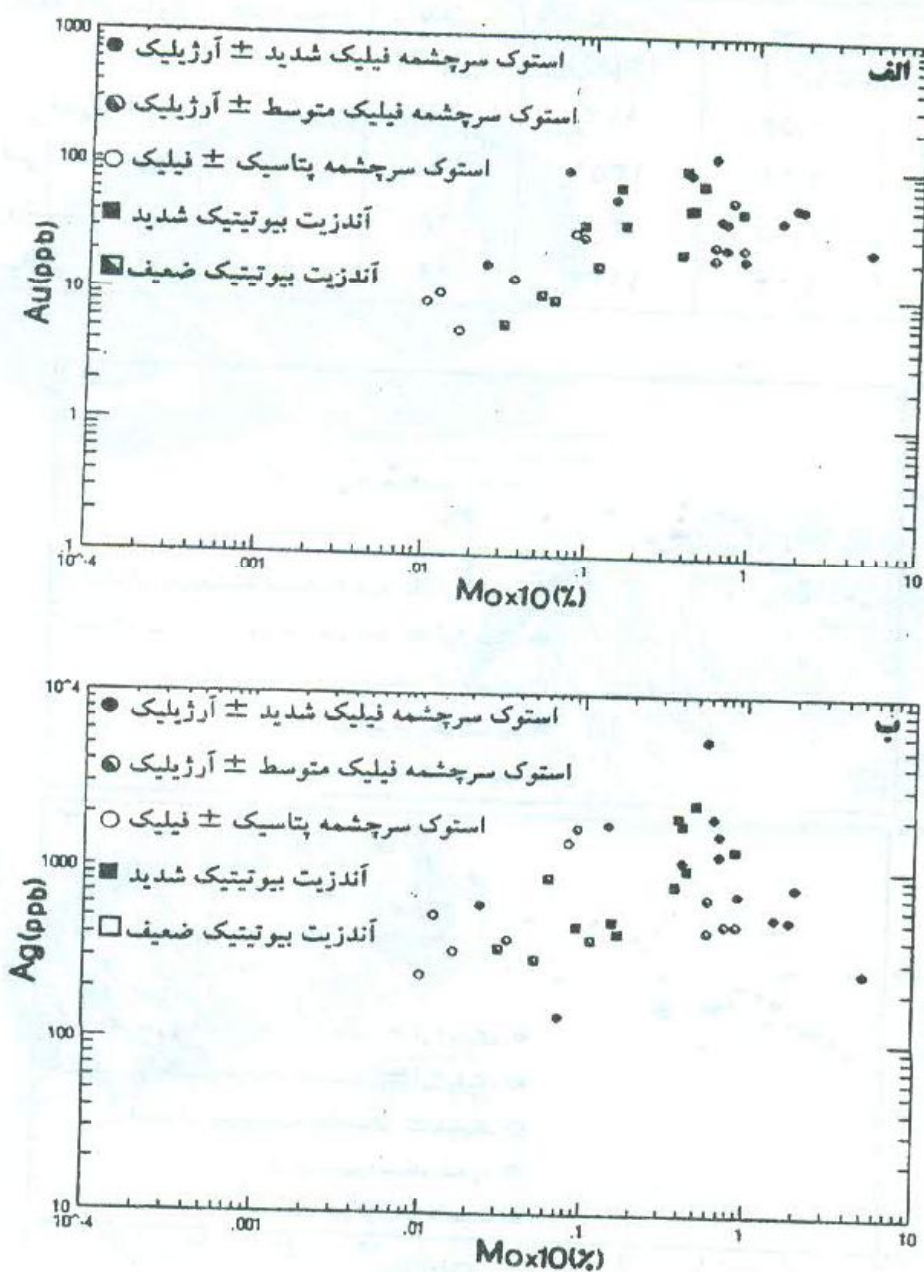
جدول ۱- عیار میانگین محاسبه شده طلا، نقره، مس و مولیبدن در مناطق مختلف کانی سازی و همچنین کل کانسار

مناطق کانی سازی	تعداد نمونه	طلا (ppb)	نقره (ppb)	مس (%)	مولیبدن (%)
درونزاد	۴۰	۳۷	۹۷۳	۰٫۵۶	۰٫۰۵۰
غنی شده ثانویه	۲۲	۱۰۸	۱۳۵۱	۲٫۴۸	۰٫۰۳۸
فروشت-اکسید	۶	۲۸	۱۴۰۸	۰٫۰۵	۰٫۰۲۰
میانگین کانسار	۶۸	۵۹	۱۱۳۴	۱٫۱۴	۰٫۰۴۵



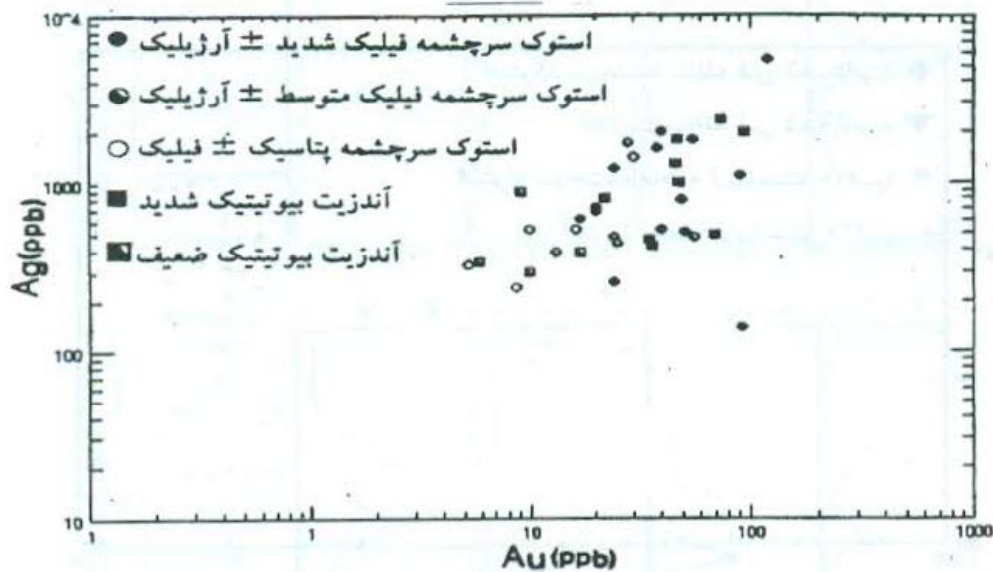
شکل ۳ روند تغییرات عیار طلا (الف) و نقره (ب) در مقابل مس در کانستگ‌های درونزاد با دگرسانی‌های مختلف.

رفتار ژئوشیمیایی این عناصر در منطقه غنی شده سولفیدی ثانویه نشان داد که عیار طلا و نقره در استوک سرچشمه ($\text{Au}: 330 \text{ ppb}$; $\text{Ag}: 3200 \text{ ppb}$) بیشینه است و کانسنگ‌های غنی از طلای این منطقه از لحاظ نقره نیز غنی هستند. منطقه فروشست - اکسید از لحاظ طلا فقیر اما در نقره غنی شدگی نشان می‌دهد. به طور کلی نسبت Cu/Au ، Au/Mo ، Cu/Ag و Cu/Au با کاهش نسبت Mo/Cu از منطقه فروشست -



شکل ۴ روند تغییرات عیار طلا (الف) و نقره (ب) در مقابل مولیبدن در کانسنگ‌های درونزاد با دگرسانی‌های 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 پرعیار مس، عیار این عناصر نیز بالا است و منطقه حد

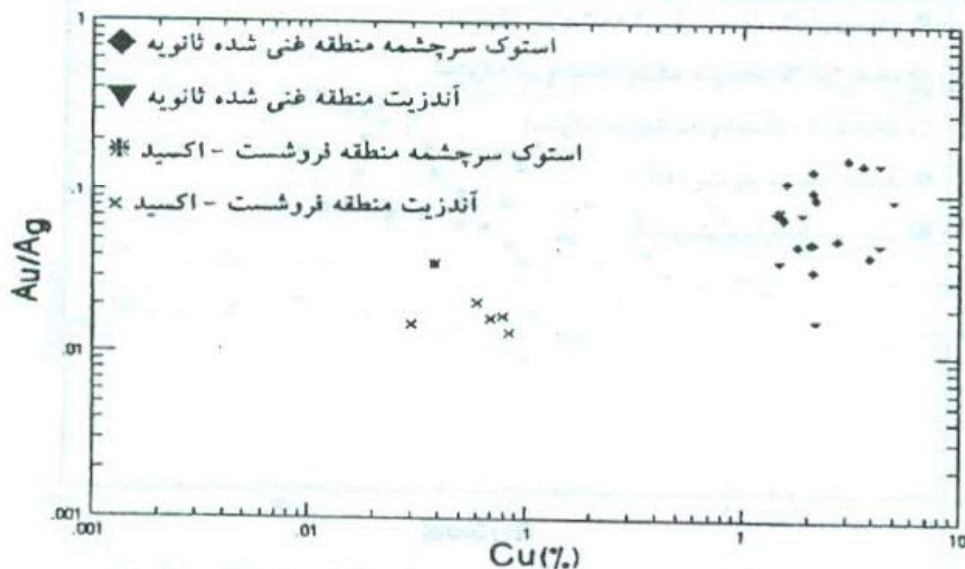


شکل ۵- ارتباط بین طلا و نقره در کانسنگ های درون زاد با دگرسانی های مختلف.

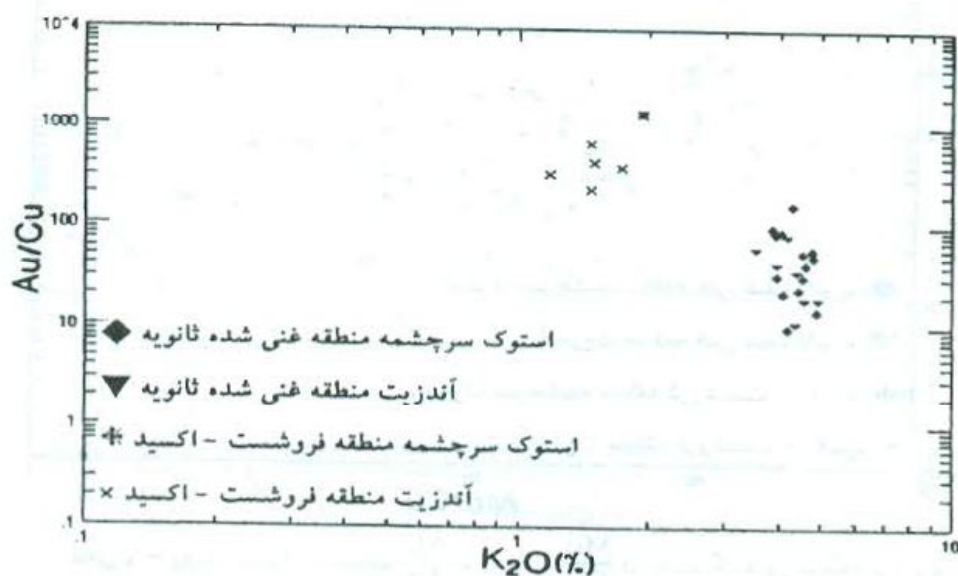


شکل ۶- روند تغییرات نسبت $\frac{Au}{Ag}$ در مقابل $\frac{Mo}{Cu}$ در کانسنگ های منطقه برون زاد.

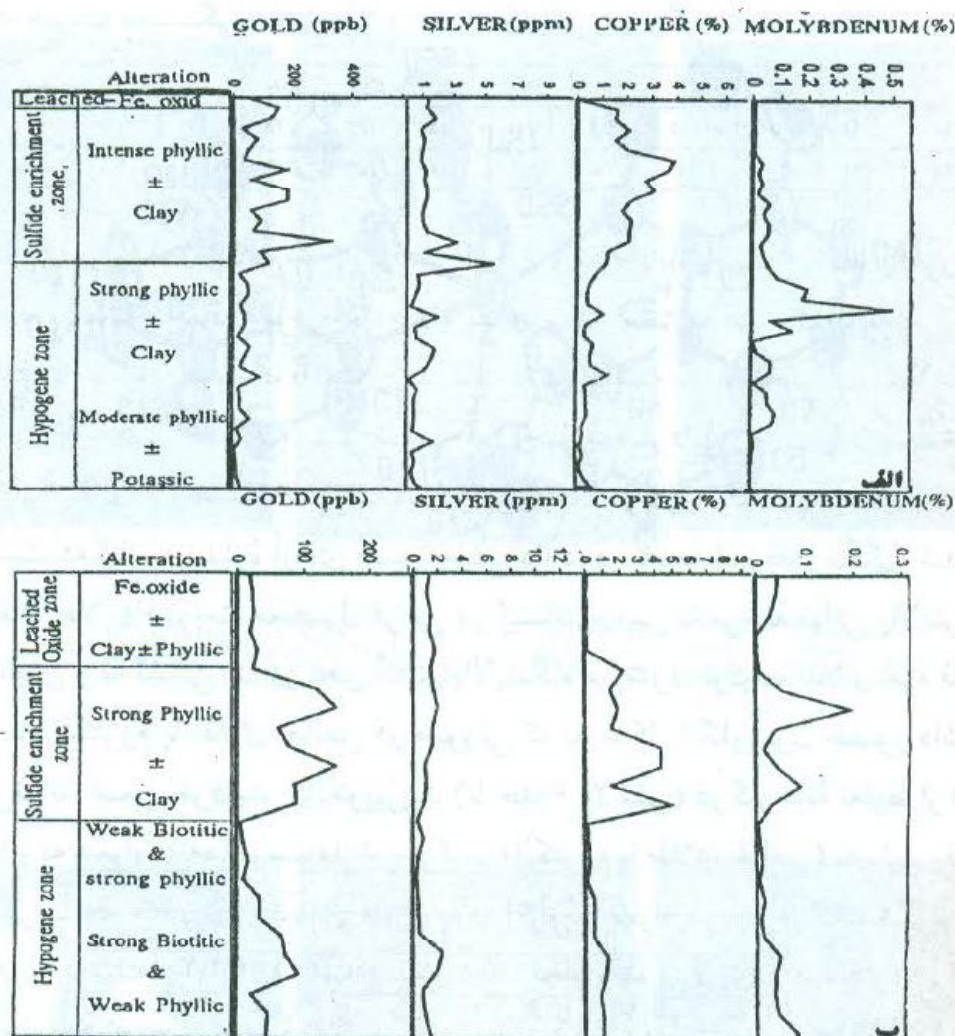
واسط بین استوک سرچشمه و سنگهای همبر در منطقه درونزاد و غنی شده ثانویه محل عیار و تراکم طلا، نقره و مس بیشینه است و مناطق سطحی و نیز ژرف کانسار از این عناصر فقیرند. این الگوها نشان می دهند که میزان این عناصر نسبت به عمق کاهش، اما مولیدن مقداری افزایش نشان می دهد (شکل ۹ - الف، ب).



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



شکل ۸- روند تغییرات نسبت $\frac{Au}{Cu}$ در مقابل K₂O در کانسنگ های 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 سرچشمه؛ 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 الپلوس و الپلوس^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 رؤیت^۳ به صورت محلول جامد

1- Eliopoulos and Eliopoulos

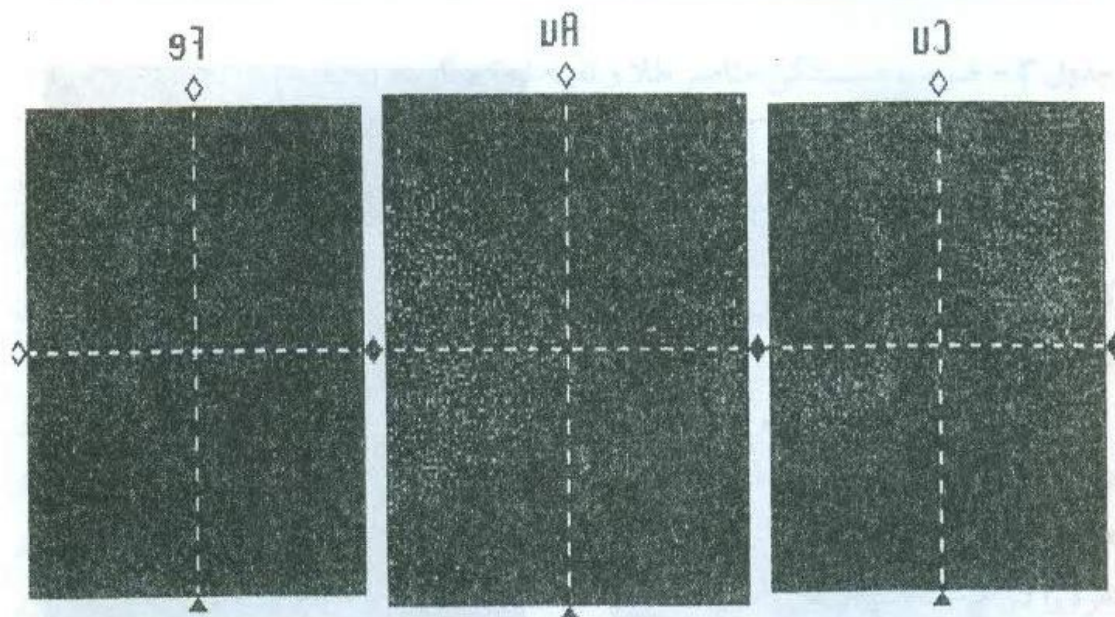
2- Cygan and Candela

3- Invisible

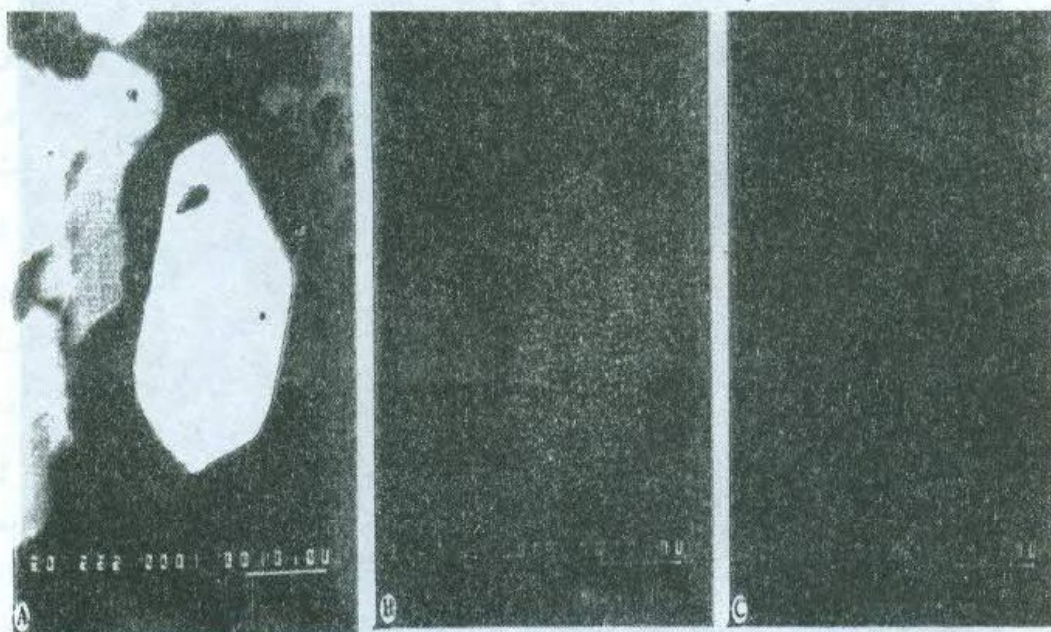
جدول ۲- ضریب همبستگی عناصر طلا و نقره با یکدیگر و با دیگر عناصر در منطقه درونزاد.

	Cu	Mo	As	Sb	Pb	Zn	K ₂ O	SiO ₂	Fe	S	Au	Ag
Au	۰/۸۱	۰/۵۲	-۰/۱۵	-۰/۱۱	-۰/۲۳	۰/۴۹	۰/۶۴	۰/۱۸	-۰/۱۰	-۰/۱۶	۱	۰/۶۱
Ag	۰/۷۲	۰/۱۶	۰/۶۷	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۶۱	۱

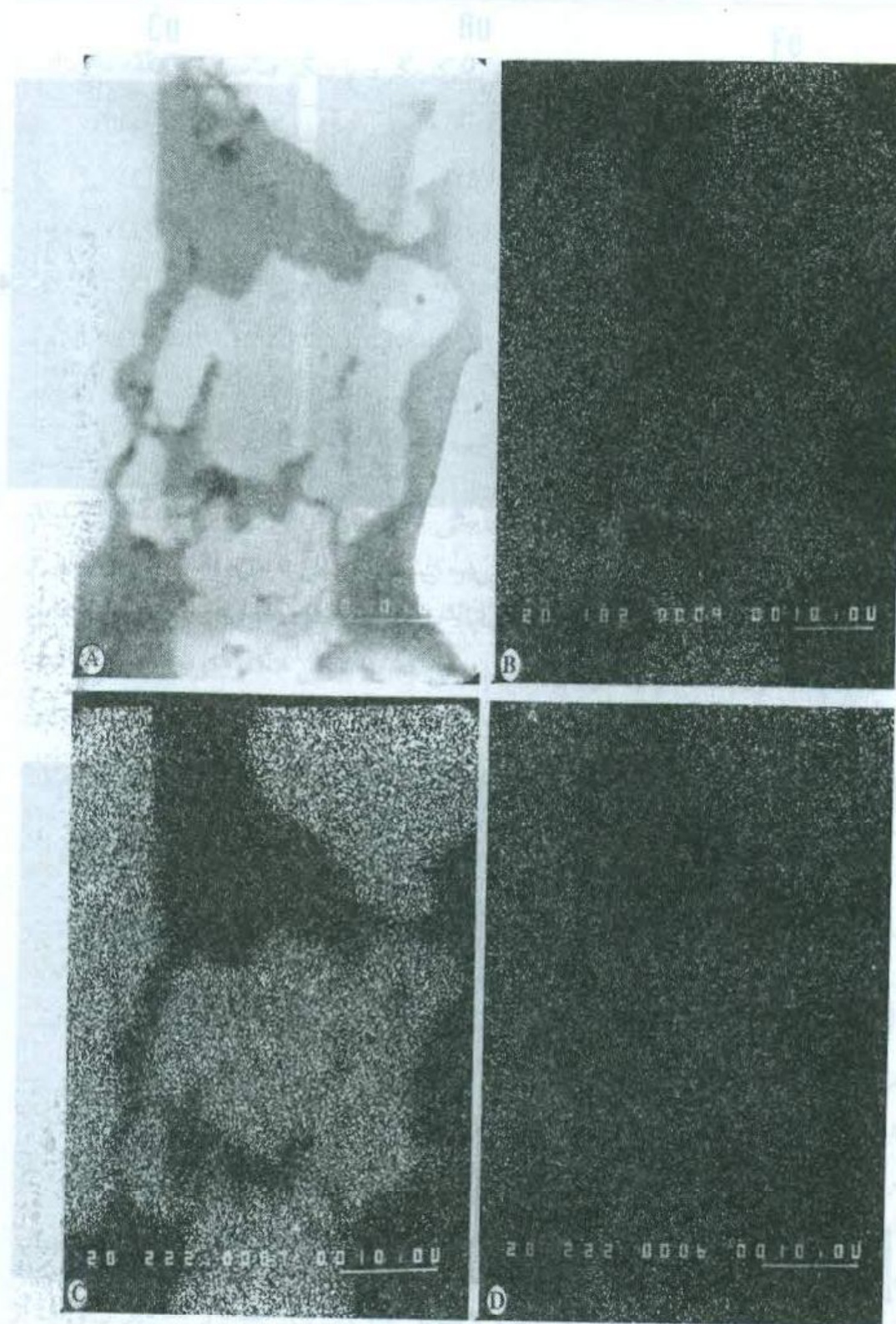
در ساختار کالکوپیریت یا کانی سازی ترکیبی از طلا و نقره قابل رؤیت^۱ به نام الکتروم یا طلای خالص است. ترکیب قابل رویت طلا و نقره ممکن است به صورت انکلوژیون در درون کالکوپیریت یا به صورت دانه های مستقل حضور داشته باشد. تحقیقات سالاری و همکاران [۱۴] حضور طلا به صورت محلول جامد غیر قابل رویت را در ساختار 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 می شود. ترکیب طلا و نقره قابل رؤیت به نام الکتروم یا طلای خالص در صورتی که به شکل انکلوژیون حضور داشته باشد، می تواند ضمن خردایش کالکوپیریت (تا حد ۲۰۰ مش) در کارخانه تغلیظ از این کانی جدا و به همراه دانه های 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 تأیید 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، آنتیموان در منطقه درونزاد می تواند نشان دهنده حضور بخشی از نقره کانسار در ساختار محلول جامد تتراهیدریت - تنانتیت یا رخدادهایی از رگه های اپی ترمال غنی از طلا و نقره در مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی در سیستم مس پورفیری سرچشمه باشد. براساس مطالعه میکروآنالیز الکترون پروب روی نمونه ای از رگه اپی ترمال، حضور ترکیبی از طلا و نقره به نام الکتروم و نیز حضور نقره در ساختار تنانتیت در این رگه مشخص شد که تأیید کننده ضرایب همبستگی فوق الذکر است (شکل ۱۱ و ۱۲). حضور مقادیر زیادی از آرسنیک و آنتیموان همراه با طلا و نقره در لجن آندی پالایشگاه نشان دهنده حضور این



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



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



شکل ۱۲ تصویر الکترون پروب از کانی تنانتیت در یک نمونه از رگه‌ای ترمال؛ A- تصویر الکترونی از تنانتیت؛ B- الگوی پراکندگی نقره C- الگوی پراکندگی مس D- الگوی پراکندگی آرسنیک

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

	Cu	Mo	As	Sb	Pb	Zn	K ₂ O	SiO ₂	Fe	S	Au	Ag
Au	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۸	-۰/۲۲	-۰/۳۰	-۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۲۲	-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	۰/۲۸	۰/۶۷	۱

کانیها در مسیر تولید مس و در نتیجه 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 ۹-۲۰ ppb است. همچنین تحقیقات سالاری و همکاران [۱۴] حضور طلا در پیریت و تحقیقات الکترون پروب 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 ($r=0.67$) و سپس همبستگی مثبت متوسط با سیلیس ($r=0.44$) 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 فرایندهای غنی سازی ثانویه مس نیست و غنی شدگی این عناصر در این منطقه با توجه به همبستگی مثبت طلا با سیلیس، در ارتباط با فرایندهای 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 آرسنیک در این بخش از کانسار می تواند نشان دهنده حضور نقره در ساختمان پروسیت (Ag_3AsS_3) باشد. همبستگی مثبت نسبتاً بالا تا متوسط نقره با گوگرد ($r=0.48$) و نسبتاً ضعیف با آهن ($r=0.36$) و روی ($r=0.27$) در این منطقه به همراه مطالعه الکترون پروب نشان دهنده حضور بخشی از نقره در ساختار پیریت و اسفالریت است. این همبستگی های ژئوشیمیایی همچنین می تواند نتیجه حضور نقره به صورت آکانتیت و کلرآزیریت 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 تغلیظ

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

میزان بازیابی (%)				عیار میانگین				محصولات کارخانه تغلیظ
Mo	Cu	Ag	Au	Mo(%)	Cu(%)	Ag(ppb)	Au(ppb)	
۷۱	۸۳	۶۸	۵۳	۰/۰۲۷	۱/۰۱	۱۳۰۰	۵۵	خوراک (۱۲)
				۰/۶۷۸	۳۰/۱۸	۲۸۷۷	۹۵۵	کنسانتره نهایی (۱۲)
				۰/۰۰۸	۰/۱۸	۴۳۰	۲۶/۳	باطله نهایی (۱۲)

(جدول ۴) به ترتیب 0.06 g/t طلا و 1.22 g/t نقره است که اختلاف بسیار فاحشی با عیار تعیین شده قبلی دارد. براساس محاسبات روی داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی ۳۶ نمونه از محصولات یکسال کارخانه تغلیظ (جدول ۴) و استفاده از فرمول $\%R = \frac{c(f-t)}{f(c-t)}$ میزان بازیابی سالیانه طلا ۵۳٪ و نقره ۶۸٪ است.

با احتساب مصرف ۱۴ میلیون تن کانسنگ مس در سال و براساس عیارهای جدید سالانه باید از این مقدار ماده معدنی حداکثر ۸۴۰ کیلوگرم طلا و ۱۸ تن نقره در مرحله نهایی پالایش حاصل گردد. مطابق گزارشات منتشر نشده شرکت ملی صنایع مس ایران و براساس واقعیت‌های بهره‌برداری، بازیابی و پالایش در طی سالیان متمادی در مجتمع مس سرچشمه، سالانه حداکثر ۴۰۰ کیلوگرم طلا و ۱۱ تن نقره در لجن پالایشگاه تجمع می‌یابد 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 (۱۰٪) و عدم دستیابی به حدود ۴ تن طلا و ۵۰ تن نقره در سال مطابق عیار 0.27 g/t طلا و 3.9 g/t نقره تعیین شده توسط شرکت سلکشن تراست، کاملاً نادرست است. واقعیت مهم این است که در حدود ۵۳٪ از طلا و ۶۸٪ از نقره کانسار به صورت محصول جانبی با کانیهای سولفیدی مس (کالکوپریت) وارد بخش تغلیظ شده مس (کنسانتره) می‌شود و تا مرحله نهایی پالایش با آن همراه است و سرانجام از آن جدا و وارد لجن آندی پالایشگاه می‌گردد. در نتیجه کمتر از نیمی از طلا و نقره کانسار عمدتاً از نوع قابل رویت به دلیل رفتار مشابه با دیگر کانیهای باطله بویژه پیریت از مسیر تولید مس خارج و وارد باطله می‌شود. تفاوت میزان بازیابی مس (۸۳٪)، طلا (۵۳٪) و نقره (۶۸٪) نیز نشان می‌دهد که تمام طلا و نقره کانسار در ساختار کالکوپریت حضور ندارد، یعنی

وارد بخش تغلیظ شده مس شوند. در نتیجه حضور ترکیبات دیگری از طلا و نقره در کانسار سرچشمه قطعی به نظر می‌رسد و میزان بازیابی طلا و نقره از خاک ورودی به کارخانه تغلیظ به وسیله ترکیب سنگ شناسی آن کنترل می‌شود.

مقایسه با سایر کانسارهای مس پورفیری

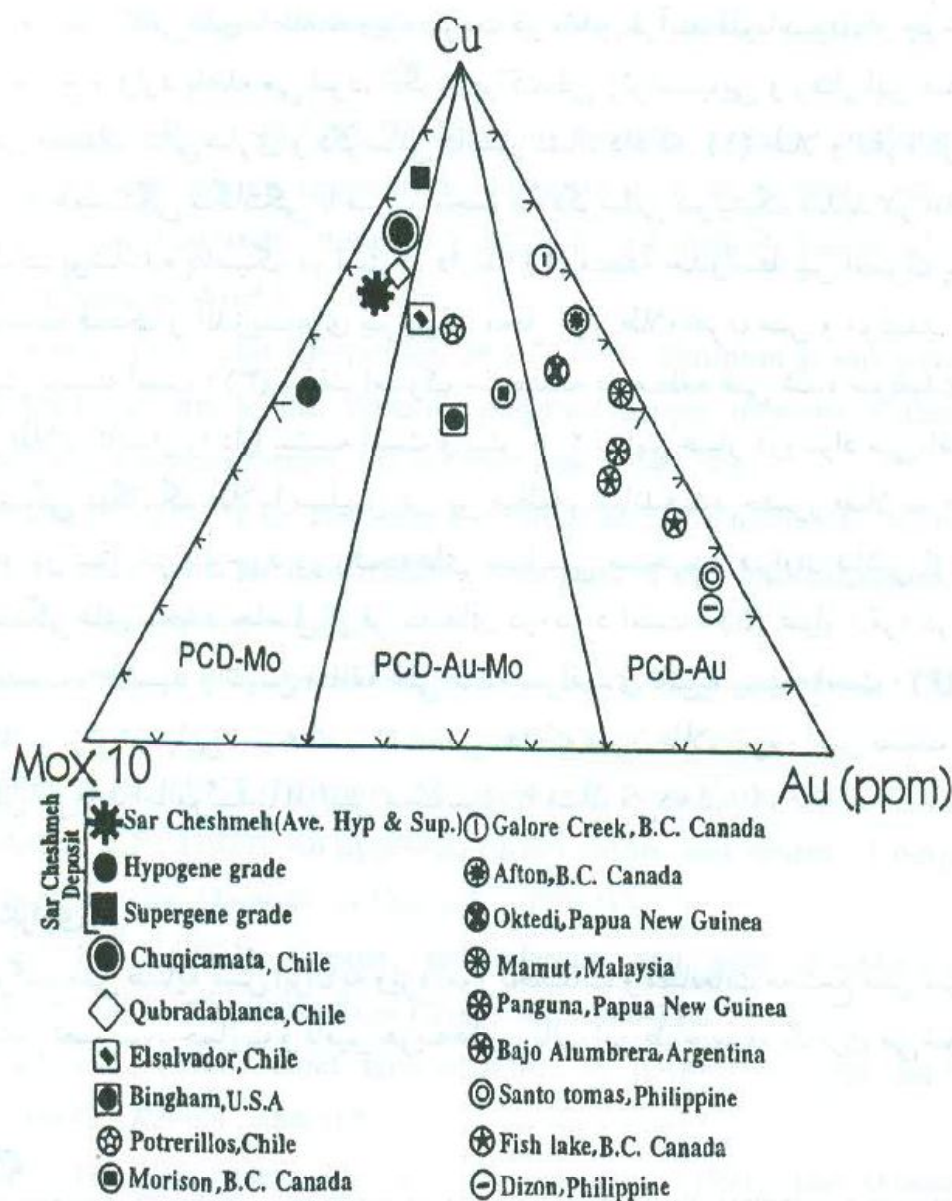
براساس اطلاعات و دستاوردهای حاصل از این پژوهش مشخص شد که کانسار مس پورفیری سرچشمه با عیار میانگین 0.06 g/t طلا و 1.22 g/t نقره از جمله کانسارهای مس پورفیری فقیر از طلاست. به منظور مقایسه همه جانبه این کانسار با انواع کانسارهای مس پورفیری، برخی شاخصهای اساسی تفکیک‌کننده این کانسارها از یکدیگر مانند میزان ذخیره، ریخت‌شناسی، عمق جایگزینی، موقعیت پوسته‌ای و ژئودینامیکی، ترکیب و ماهیت سنگ شناختی توده نفوذی مولد، میزان مگنتیت منطقه پتاسیک، و الگوی دگرسانی و کانی‌سازی مقایسه شدند و خلاصه این نتایج در جدول ۵ و شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.

جمع‌بندی و برداشت

براساس نتایج حاصل از این پژوهش، کانسار سرچشمه با توجه به میزان ذخیره بالا، جایگزینی در عمق ۳ تا ۴ کیلومتری، با ریخت‌شناسی کلاسیک، میزان بسیار جزئی مگنتیت (0.04%) در منطقه دگرسانی پتاسیک، میزان بسیار بالای مولیدن (0.03%) و پائین بودن عیار طلا (0.06 g/t) یک کانسار مس پورفیری فقیر از طلاست و مدل متالورژی کاملی از سیستم‌های مس - مولیدن پورفیری به حساب می‌آید که معلول وجود خاستگاهی از ماگماتیسزم کالک آلکالین نوع حاشیه قاره‌ای است. بر اساس عیارهای جدید، حداکثر محتوای اسمی طلا و نقره در ۱۴ میلیون تن کانسنگ مصرفی مس در سال، حدود ۸۰۰ کیلوگرم طلا و ۱۸ تن نقره خواهد بود و انتظار دستیابی به حدود ۴۰۰۰ کیلوگرم طلا و ۵۰ تن نقره در سال بر اساس عیارهای تعیین شده از سوی شرکت سلکشن تراست [۱۵] کاملاً غیرواقعی است. براساس پژوهش حاضر، میزان بازیابی فعلی سالیانه طلا 53% و نقره است که این میزان بازیابی با تجمع سالیانه حدود ۴۰۰ کیلوگرم طلا و ۱۱ تن نقره در لجن پالایشگاه طی سالیان متمادی بهره‌برداری، بازیابی و پالایش مس انطباق دارد. این میزان بازیابی نشان می‌دهد که 53% طلا و 68% نقره کانسار به صورت محلول جامد غیرقابل رویت در ساختار کانیهای

جدول ۵- خلاصه‌ای از مقایسه ویژگیهای اساسی کانسار مس سرچشمه با انواع کانسارهای مس پورفیری [۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰]

موارد مقایسه	کانسار سرچشمه	کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری (PCD-Mo)	کانسارهای مس-طلا-مولیبدن پورفیری (PCD-Au-Mo)	کانسارهای مس - طلای پورفیری (PCD-Au)
توده نفوذی منشأ	گرانودیوریت	گرانودیوریت، تونالیت، آدامیت، مونزوگرنائیت	گرانودیوریت، تونالیت، مونزوگرنائیت	دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزونیت، سینیت، تونالیت
سری ماگمایی	کالک آلکالین	عمدتاً کالک آلکالین	کالک آلکالین یا آلکالین	عمدتاً آلکالین
اندازه و میانگین ذخیره کانسار	بزرگ: ۱۲۰۰ میلیون تن	بزرگ: ≥ 500 میلیون تن	متوسط: ۳۹۰ میلیون تن	کوچک: ۱۶۰ میلیون تن
میانگین عمق جایگزینی	۳-۴ کیلومتر	۳/۶ کیلومتر	۰/۹ کیلومتر	۱ کیلومتر
ریخت شناسی	کلاسیک	کلاسیک یا پلوتونیک	ولکانیک یا کلاسیک	عمدتاً ولکانیک
وضعیت پوسته	قاره‌ای نازک	عمدتاً قاره‌ای	قاره‌ای یا اقیانوسی	عمدتاً اقیانوسی
موقعیت ژئودینامیکی	جزیره قوسی	عمدتاً حاشیه قاره‌ای	حاشیه قاره‌ای یا جزیره قوسی	عمدتاً جزیره قوسی
الگوی دگرسانی درونزاد	پتاسیک، نیلیک، پروپلیتیک ± آرژیلیک	پتاسیک، نیلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک	پتاسیک، نیلیک، پروپلیتیک	پتاسیک، پروپلیتیک
اجزاء فلزی درونزاد	Cu-Mo(Au,Ag)	Cu, Cu-Mo, Cu-Mo ± Au	Cu-Mo-Au	Au-Cu, Cu-Au Cu-Au-Mo
کانی‌های درونزاد	کالکوپیریت، پیریت، مولیبدنیت	کالکوپیریت، پیریت، مولیبدنیت	کالکوپیریت، پیریت، مولیبدنیت ± طلا	مگنتیت، بوریت، کالکوپیریت، طلا
حدوث غنی‌شدگی سولفیدی ثانویه	گسترش خوب و معمول	گسترش خوب و معمول	معمول یا نایاب	نایاب یا کمیاب
حدوث پوشش فروشت - اکسید	گسترش خوب و معمول	گسترش خوب و معمول	معمول یا نایاب	نایاب یا کمیاب
عیار میانگین مس (درصد)	۰/۶۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۵۵
عیار میانگین مولیبدن (درصد)	۰/۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳
عیار میانگین طلا (گرم در تن)	۰/۰۶	۰/۰۱۲	۰/۱۵	۰/۳۸
عیار میانگین نقره (گرم در تن)	۱/۲۲	۱/۲۲	۱/۶۳	۱/۶۹
میزان میانگین مگنتیت (درصد)	جزئی: ۰/۴	جزئی: ۰/۰۵	معمول: ۱	فراوان: ۲/۶
نسبت $\frac{Au}{Mo}$	۲	$\frac{Au}{Mo} \leq 3$	$3 < \frac{Au}{Mo} < 30$	$\frac{Au}{Mo} \geq 30$



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

سولفیدی مس (کالکوپیریت) و نیز به صورت محصول فرعی وارد بخش تغلیظ 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 فلوناسیون، 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 حدواسط بین استوک پورفیری سرچشمه فیلیک و آندزیت‌های بیوتیتیک محل عیار طلا، نقره، مس و مولیبدن درونزاد کانسار بیشینه است؛ (۳) سقف استوک سرچشمه 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 فروشت - 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 سرچشمه 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 chalcopryrite 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*, McGraw-Hill, New York, USA, 573P.
 10. Hollister, V.F., (1975) An appraisal 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 - شفیع، بهنام (۱۳۷۹) مطالعه رخداد، پراکندگی ژئوشیمیایی و مدل فلززایی طلا و نقره در کانسار مس پورفیری سرچشمه، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۵۳ صفحه.