

پراکندگی رنیوم و عوامل کنترل کننده آن در انواع مولیدنیت کانسارهای مس پورفیری کرمان

سارا لعلی‌فاز^۱، بهنام شفیعی^۲، غلامحسین شمعانیان^۲، حسین تقی‌زاده^۲، مرضیه حسینی^۴ و ربان مسور^۵

^۱ کارشناس ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

^۳ کارشناس ارشد، امور اکتشافات و مهندسی توسعه، مجتمع مس سرچشمه، شرکت ملی صنایع مس ایران، تهران، ایران.

^۴ کارشناس، امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس سرچشمه، شرکت ملی صنایع مس ایران، تهران، ایران.

^۵ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، کالج جانیتا، هانتینگدان، پنسیلوانیا، ایالات متحده آمریکا.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۲۳

چکیده

در پژوهش حاضر، غلظت رنیوم در ۳۰ نمونه مولیدنیت هگزاگونال (2H) و تریگونال (3R) متعلق به رگچه‌های مراحل مختلف کانی‌سازی ژرف‌زاد از ۷ کانسار پورفیری مس و مولیدن کرمان تعیین شد. غلظت رنیوم در مولیدنیت‌های این کانسارها از ۴۹ تا ۱۴۴۹ گرم در تن متغیر بود که در محدوده غلظت رنیوم در کانسارهای پورفیری مس و مولیدن دیگر مناطق جهان است. مولیدنیت نوع 3R (میانگین حدود ۵۶۳ گرم در تن) عموماً غلظت بالاتری از رنیوم را نسبت به مولیدنیت‌های 2H (میانگین ۴۷۹ گرم در تن) نشان داده است. تغییرات غلظت رنیوم در انواع مولیدنیت‌های نهشته شده در طی مراحل مختلف کانی‌سازی ژرف‌زاد، غلظت بیشتر رنیوم در مولیدنیت نهشته شده با رگچه‌های مراحل انتقالی و پایانی کانی‌سازی (نوع B و نوع D) نسبت به مولیدنیت رگچه‌های مراحل اولیه (نوع A) را نشان می‌دهد. این پراکندگی پیشنهاد می‌کند که رنیوم با سیال‌های گرمایی اسیدی تر و سردتر در مراحل میانی تا پایانی تکامل سامانه پورفیری در دگرسانی سیلیسی، سریستی و رسی بیشتر تمرکز یافته است. مطالعه حاضر نشان داد که مولیدنیت‌های با مقدار زیاد رنیوم با کانسارهای مس پورفیری همراه هستند که با عیار میانگین کم از مولیدن، مقادیر محدود مولیدنیت و توده نفوذی مولد، حاصل دخالت بیشتر ماگماهای مشتق از جبه نسبت به مواد پوسته‌ای مشخص می‌شوند. افزون بر ویژگی‌های یادشده، فراوانی پلی‌مورف 3R مولیدنیت در کانسارها، ترکیب کمتر تفریق یافته و کلسیمی تر توده‌های نفوذی مولد کانسارها با مقادیر کمتر رادیوژنی نسبت‌های ایزوتوپی استرانسیم و سرب آنها و همچنین رخداد فرایندهای تأخیری دگرسانی و کانی‌سازی گرمایی کم‌دما و اسیدی در تاریخچه شکل‌گیری و تکامل کانسارها از ویژگی‌های کانسارهای پورفیری مس و مولیدن با محتوای زیاد از رنیوم هستند.

کلیدواژه‌ها: رنیوم، مولیدنیت، مس پورفیری، کرمان

*نویسنده مسئول: بهنام شفیعی

E-mail: behnam.shafiei@gmail.com

۱- مقدمه

وجود مقادیری در حد چند صد ppm رنیوم در آن است. با توجه به قیمت بالای فلز رنیوم و کاربردهای راهبردی آن و همچنین وجود کارخانه تولید کنسانتره مولیدنیت در مجتمع مس سرچشمه (کرمان) و همچنین راه‌اندازی چنین کارخانه‌ای در مجتمع مس سونگون (آذربایجان خاوری) ضروری است تا نسبت به پتانسیل رنیوم در انواع مولیدنیت‌های موجود در کانسنگ‌هایی با دگرسانی‌های مختلف ژرف‌زاد (Hypogene) که در این کارخانه‌ها مورد فرآوری و استحصال مولیدنیت قرار می‌گیرند مطالعات مفصلی صورت پذیرد. به همین منظور در این پژوهش به بررسی تعیین مقادیر رنیوم در مولیدنیت‌های هفت کانسار پورفیری مس و مولیدن واقع در کمربند مس پورفیری کرمان (شامل کانسارهای سرچشمه، میدوک، دره‌زار، درآلو، سرکوه، نوچون و کرور) پرداخته شده است که هر کدام از این کانسارها از نظر نوع و محتوای فلزی و همچنین ذخیره و عیار با یکدیگر متفاوت هستند و مولیدنیت موجود در آنها در مراحل مختلف دگرسانی و کانی‌سازی (پتاسیک، سریستی، سیلیسیک و آرژیلیک) با شدت و ضعف نهشته شده است (جدول ۱). آشکار کردن غلظت رنیوم در انواع نسل‌های مولیدنیت نهشته شده با رگچه‌های مراحل مختلف کانه‌زایی ژرف‌زاد کانسارهای مس پورفیری و شناخت عوامل مؤثر بر این پراکندگی و تغییرات غلظت، موضوع این پژوهش است.

۲- موقعیت زمین‌شناسی

کانسارهای مس پورفیری کرمان بر روی یک کمربند آتشفشانی-نفوذی سنوزویک با درازای تقریبی ۵۰۰ کیلومتر و پهنای تقریبی ۸۰ کیلومتر با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاور در حاشیه جنوبی خردقاره ایران مرکزی (بلوک سه گانه یزد- طبس- لوت) شکل گرفته و توسعه یافته‌اند (شکل ۱). این کمربند که در

رنیوم یک فلز کمیاب (کلارک ppm ۰/۰۱ در پوسته زمین) اما راهبردی است که به‌طور گسترده‌ای در صنعت پالایش نفت و صنایع الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ishihara, 1988; Kesler, 2000). رنیوم در پوسته زمین عمدتاً ماهیت زمین‌شیمیایی گوگرد دوست (chalcophile) دارد اما به دلیل فراوانی بسیار کم در پوسته زمین کانی مستقل تشکیل نمی‌دهد بلکه تمایل به تمرکز در ساختار سولفیدها به‌ویژه مولیدنیت (MoS₂) موجود در کانسارهای مس و مولیدن پورفیری دارد (Newberry, 1979; Watanabe & Sodea, 1981; Filimonova et al., 1985; Tarkian et al., 1991). میزان رنیوم در مولیدنیت کانسارهای مولیدن پورفیری و مس پورفیری از چند ppb تا چند هزار ppm متغیر است (Suzuki et al., 1996; Berzina et al., 2005). بنابراین کانسارهای یادشده تنها و تجاری‌ترین منبع دستیابی به رنیوم هستند و مهم‌ترین تولیدکنندگان رنیوم دنیا کشورهای شیلی، ایالات متحده آمریکا، کانادا و قزاقستان هستند (Kesler, 2000; Berzina et al., 2005). پژوهش‌های انجام شده در زمینه پراکندگی رنیوم در کانسارهای پورفیری مس و مولیدن نشان داده است که میزان رنیوم در مولیدنیت‌های این کانسارها تابع عوامل مختلفی از جمله نوع و محتوای فلزی کانسار، ترکیب و ماهیت ماگمای مولد کانسارهای پورفیری، ترکیب سیال‌ها و محلول‌های کانه‌زا، درجه حرارت نهشت مولیدنیت در طی مراحل مختلف کانی‌سازی پورفیری و ساختار کانیایی مولیدنیت است.

با توجه به رخداد معمول انواع کانسارهای مس پورفیری در ایران که همگی به مقدار کم تا زیاد مولیدنیت دارند، تاکنون میزان رنیوم و تغییرات آن در انواع مولیدنیت‌های نهشته شده در طی مراحل مختلف کانی‌سازی سامانه‌های پورفیری مورد مطالعه قرار نگرفته است و تنها اطلاعات پراکنده و اتفاقی در ارتباط با میزان رنیوم موجود در کنسانتره مولیدنیت تولید شده در مجتمع مس سرچشمه حاکی از

(Juniata college) در ایالت پنسیلوانیای ایالات متحده آمریکا ارسال شدند و مورد تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) قرار گرفتند. از این میان، ۱۳ نمونه مولیبدنیت از نوع پلی مورف 2H و ۱۷ نمونه از نوع پلی مورف 3R شناخته شدند (جدول ۲). پس از مشخص شدن نوع پلی مورف مولیبدنیت‌های جدا شده، نمونه‌های مولیبدنیت خالص برای سنجش مقادیر رنیوم در آنها توسط طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) به دانشگاه آریزونا در ایالات متحده آمریکا ارسال شدند. نتایج این سنجش در جدول ۳ ارائه شده است.

۴- داده‌ها

بر پایه داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی، میزان غلظت رنیوم در مولیبدنیت‌های کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری کرمان از دست کم چند ppm (۴۹ ppm) تا حداکثر چند هزار ppm (۱۴۴۹ ppm) متغیر است که تقریباً در دامنه غلظت رنیوم کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری در دیگر نقاط دنیا (۳۰-۴۰۰۰ ppm) (Berzina et al., 2005) قرار می‌گیرد (جدول ۳ و شکل ۳). بیشترین میزان غلظت رنیوم در یک نمونه از مولیبدنیت کانسار سرچشمه (۱۴۴۹ ppm) و کانسار میدوک (۱۳۲۵ ppm) و کمترین آن (۴۹ ppm) در نمونه‌ای از کانسار درآلو ثبت شده است. میانگین غلظت رنیوم در مولیبدنیت کانسارهای مختلف به ترتیب فراوانی عبارتند از: کانسار میدوک (۱۳۲۵/۳۲ ppm)، سرکوه (۸۰۲/۵۷ ppm)، سرچشمه (۶۶۳/۹۱۱ ppm)، دره‌زار (۵۹۴/۸۸ ppm)، کروور (۴۷۱/۹۹۶ ppm)، درآلو (۴۲۶/۳۷۵ ppm) و نوچون (۳۳۶/۳۸۵ ppm) (شکل ۴). مقایسه غلظت مطلق رنیوم در پلی مورف‌های 2H و 3R مولیبدنیت در مجموع نشان داد که پلی مورف 2H میانگین غلظت پایین‌تری (۴۷۹/۰۹ ppm) نسبت به پلی مورف 3R (۵۶۳/۱۲ ppm) دارد (شکل ۵). کمترین میزان رنیوم متعلق به یک نمونه مولیبدنیت 2H و بیشترین میزان غلظت رنیوم متعلق به پلی مورف 3R آن است. هرچند که یک نمونه مولیبدنیت 2H با غلظت بالای رنیوم (۱۳۲۵/۳۲ ppm) ثبت شد (جدول‌های ۲، ۳ و شکل ۵). بیشترین فراوانی برای غلظت رنیوم در مولیبدنیت 2H در دامنه غلظت ۳۰۰ تا ۶۰۰ ppm است (شکل ۶). این فراوانی برای مولیبدنیت‌های 3R بین غلظت‌های ۹۰۰-۲۰۰ ppm است و تنها یک نمونه پلی مورف 3R در دامنه غلظت ۱۵۰۰-۱۴۰۰ ppm قرار دارد (شکل ۶).

تغییرات غلظت رنیوم در انواع مولیبدنیت‌های نهشته شده در طی مراحل مختلف کانی‌سازی ژرف‌زاد کانسارهای مس پورفیری کرمان میانگین ppm ۳۳۳/۴۹۵ برای مولیبدنیت رگچه نوع A، میانگین ppm ۵۴۳/۱۴۱۷ برای مولیبدنیت رگچه نوع B، میانگین ppm ۴۶۶/۳۷۸ برای مولیبدنیت رگچه نوع C و سرانجام میانگین ppm ۶۲۸/۸۶۸۵ برای مولیبدنیت رگچه نوع D را نشان داده است (شکل ۷). این تغییرات غلظت نشان می‌دهند که غلظت رنیوم در رگچه‌های مراحل انتقالی و پایانی کانی‌سازی (نوع B و نوع D) بالاتر از رگچه‌های مراحل اولیه (نوع A) است (شکل ۸). در نتیجه می‌توان عنوان کرد که غلظت رنیوم در مولیبدنیت‌ها با تکامل سامانه کانی‌سازی، روند افزایشی را طی کرده است. بررسی تغییرات غلظت رنیوم با عیار میانگین مس و مولیبدن کانسارهای مس پورفیری کرمان ارتباط مستقیم با مس و ارتباط وارون با مولیبدن را نشان می‌دهد (شکل ۹ و ۱۰) که سازگار با دیگر کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری دنیا است (Berzina et al., 2005).

۵- بحث

مطالعات بی‌شمار و ارزشمند انجام شده بر روی پراکنندگی و عوامل کنترل‌کننده غلظت رنیوم در مولیبدنیت کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری (Gilles & Schilling, 1972; Newberry, 1979; Filimonova et al., 1985; Todorov & Staikov, 1985; Ishihara, 1988; Mao et al., 1999; Economou-Eliopoulos &

تقسیمات زمین‌شناسی ناحیه کرمان به نام کمر بند دهج - ساردوییه شناخته می‌شود (Demitrijevic, 1973)، در طی فعالیت‌های ماگمایی مربوط به مراحل متوالی بسته‌شدن اقیانوس تیسس شامل فرورانش در طول کرتاسه - الیگوسن و برخورد قاره به قاره در پالئوژن (ائوسن - الیگوسن) است (Berberian & King, 1981; Shafiei, 2010; Berberian et al., 1982; Mohajjel et al., 2003; Agard et al., 2005; Ricou, 1994; McClay et al., 2004; Dercourt et al., 1986). کانی‌سازی مس پورفیری در کمر بند دهج - ساردوییه در ارتباط با توده‌های نفوذی کم‌ژرفای متعلق به میوسن است که در سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی دوره ائوسن - الیگوسن نفوذ کرده‌اند. توده‌های نفوذی مولد کانسارهای مس پورفیری، بافت پورفیری و ترکیب سنگ‌شناسی محدود از دیوریت تا گرانودیوریت دارند؛ اما برتری سنگ‌شناسی با توده‌های کوارتز دیوریتی و گرانودیوریتی است. از نظر کانی‌سازی نوع پورفیری، از بخش‌های جنوب خاوری به طرف نواحی مرکزی و شمال باختری کمر بند، بر شدت کانی‌سازی و فراوانی کانسارهای مس پورفیری افزوده می‌شود. این نواحی منطبق بر سبترترین بخش‌های پوسته کمر بند یاد شده (با سبترای ۴۵ تا ۵۰ کیلومتر) هستند که دارای تمرکز بالایی از ماگماتیسیم حدواسط - فلیسیک دوره نئوژن نسبت به مناطق جنوب خاوری این کمر بند است. این مسئله می‌تواند نشان دهد که ماگماتیسیم مولد فلز زایی مس پورفیری در مراحل پایانی تکامل کمر بند آتشفشانی - نفوذی دهج - ساردوییه و همراه و همزاد با سبترشدگی پوسته بوده است (Shafiei et al., 2009).

۳- روش نمونه‌برداری و تجزیه

برای انجام مطالعه حاضر نیاز به نمونه‌هایی از کانسنگ‌های دارای مولیبدنیت بود که در طی مراحل مختلف کانی‌سازی شکل گرفته بودند. بدین منظور برای انتخاب نمونه‌ها از مغزه‌های اکتشافی کانسارهای مورد مطالعه سعی شد تا نمونه‌ها از ژرفاهایی برداشت شوند که به دلیل داشتن عیارهای بالا از مس (بیشتر از ۰/۷٪) و مولیبدن (بیشتر از ۱۰۰ ppm) دارای کانی‌های قابل رؤیت با چشم غیر مسلح از مولیبدنیت باشند. از سوی دیگر نمونه‌های برداشت شده از ژرفاهایی باشند که انواع دگرسانی ژرف‌زاد را شامل شوند تا بتوان تغییرات غلظت رنیوم در آنها را با تغییر دگرسانی و همچنین تغییر ساختار مولیبدنیت (هگزگونال یا 2H و تریگونال یا 3R) را شناسایی کرد. در بانک اطلاعات عیاری - دگرسانی - کانی‌سازی، ۲۰۷ گمانه اکتشافی از هفت کانسار تحت مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و در مجموع ۷۱ نمونه از ژرفاها و دگرسانی‌های ژرف‌زاد مختلف از کانسارهای تحت مطالعه برداشت شد. پس از نمونه‌برداری، ابتدا ویژگی‌های دگرسانی و کانی‌سازی آنها با مطالعات ماکروسکوپی تشریح و شناسایی شد. به دلیل بالا بودن هزینه تجزیه شیمیایی رنیوم، در مجموع ۳۰ نمونه به عنوان کانسنگ‌های مولیبدنیت‌دار متعلق به انواع دگرسانی‌ها و انواع رگچه‌های کانه‌دار انتخاب شد. از این نمونه‌ها به منظور شناسایی نوع رگچه‌ها و همچنین نوع دگرسانی، مقاطع نازک - صیقلی تهیه و مطالعات میکروسکوپی روی آن انجام شد. پس از انجام این مطالعات و شناسایی انواع رگچه‌ها (نوع A: پاراژنز کوارتز - بیوتیت - انیدریت - ارتوکلاز - مولیبدنیت - کالکوپیریت - پیریت، نوع B: پاراژنز کوارتز - مولیبدنیت ± پیریت بدون کانی‌های دگرسانی، نوع C: پاراژنز کوارتز - بیوتیت - انیدریت - ارتوکلاز - کالکوپیریت - پیریت ± مولیبدنیت با هاله سریستی، نوع D: پاراژنز کوارتز - سریست - کلریت - پیریت - کالکوپیریت ± مولیبدنیت) (جدول ۲ و شکل ۲)، ۳۰ نمونه مولیبدنیت خالص به روش سنگ‌جوری دستی (Hand Picking) و استفاده از میکروسکوپ بیناکولار از این نمونه‌ها جدا شد. از این تعداد، ۱۸ نمونه از کانسارهای مس و مس - مولیبدن پورفیری و ۱۲ نمونه از کانسارهای مولیبدن - مس پورفیری بود. به منظور شناسایی نوع ساختار بلوری و نوع پلی مورف مولیبدنیت، نمونه‌های جدا شده به گروه زمین‌شناسی کالج جانایاتا

شود. محتوای رنیوم کمتر کانسارهای مولیدن و مولیدن-مس پورفیری در مقایسه با کانسارهای مس و مس-مولیدن پورفیری به ترکیب تفریق یافته‌تر و قلیایی‌تر توده نفوذی مولد آنها (عمدتاً ترکیب گرانیته و مونزوگرانیته تا کوارتز مونزونیتی) (Mutschler et al., 1981; White et al., 1981; Kooiman et al., 1986;) Guan et al., 1988) نسبت داده شده است که نتیجه فرایندهای هضم و آلودگی ماگمای مادر آنها با مواد پوسته‌ای و تفریق بلوری بیشتر آن در بخش‌های میانی و بالایی پوسته است که با مقادیر رادیوژنیک $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (۰/۷۰۶۴۲-۰/۵۷۰۴۹) (Xiong & Wood, 1999;) و محتوای رنیوم مولد چنین کانسارهایی قابل تأیید است (Stein et al., 2001; Berzina et al., 2005). در میان کانسارهای پورفیری کرمان، کانسار نوچون که در رده کانسارهای مولیدن-مس پورفیری قرار گرفته است دارای توده مولد ریوداسیتی یا کوارتز چشمی پورفیری است که بسیار تفریق‌یافته‌تر و قلیایی‌تر از توده‌های نفوذی مولد دیگر کانسارهای پورفیری کرمان است (سلطانی‌نژاد، ۱۳۸۹؛ سلطانی‌نژاد و همکاران ۱۳۸۹). غلظت کمتر رنیوم در مولیدنیت‌های این کانسار نسبت به کانسارهای مس و مس-مولیدن انطباق خوبی با نتایج مطالعات گذشته در ارتباط با نقش ترکیب توده نفوذی مولد این کانسارها در میزان محتوای رنیوم آنها دارد. تفاوت‌های گزارش‌شده در فراوانی رنیوم بین این دو گروه از کانسارهای پورفیری می‌تواند در کنترل میزان انحلال‌پذیری رنیوم و رفتار آن در سیال‌های گرمایی کانسنگ‌ساز باشد (Popov, 1977; Stein et al., 2001). داده‌های تجربی از انحلال‌پذیری رنیوم در سیال‌های گرمایی کانه‌ساز (Xiong & Wood, 1999, 2001, 2002) نشان داده است که ReS_2 فاز کنترل‌کننده انحلال‌پذیری رنیوم در سیال‌های گرمایی قلیایی، احیایی و دارای سولفور است. چنین سیال‌هایی ظرفیت پایینی برای انتقال و انحلال‌پذیری رنیوم دارند اما می‌توانند مولیدنیت زیادی را نهشته کنند (Gilles & Shilling, 1972; Stein et al., 1997). نهشته شدن این میزان کم رنیوم در ساختار مولیدنیت‌های فراوان فقط زمانی می‌تواند رخ دهد که این سیال با منابع آبی اکسیدان (آب‌های جوی) آمیخته شود (Xiong & Wood, 2002). این می‌تواند به عنوان یکی دیگر از دلایل غلظت کمتر رنیوم در مولیدنیت موجود در کانسارهای مولیدن-مس پورفیری در نظر گرفته شود (Berzina et al., 2005). در مقابل، سیال‌های اکسیدان و دارای سولفات که در شکل‌گیری کانسارهای مس و مس-مولیدن پورفیری نقش اساسی دارند توانایی بالایی برای انتقال و انحلال‌پذیری رنیوم و ته‌نشست آن در ساختار مولیدنیت نشان داده‌اند (Bernard et al., 1990; Berzina et al., 2005).

مقادیر رنیوم در مولیدنیت‌ها ممکن است تحت تأثیر درجه حرارت نهشت مولیدنیت از سیال‌های گرمایی نیز باشد (Newberry, 1979; Filimonova et al., 1985; Todorov & Staikov, 1985;) (Xiong & Wood, 2001, 2002). انحلال‌پذیری کمی پیشرونده رنیوم در سیال‌های گرمایی دما بالا (۵۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مولد دگرسانی پتاسیک) بدان معنی است که رنیوم بیشتر در درجه حرارت بالا محلول است (Xiong & Wood, 2002) که ممکن است مقدار پایین‌تر رنیوم در مولیدنیت‌هایی که در درجه حرارت‌های بالاتر از سیال‌های قلیایی‌تر (مانند پلی‌مورف 2H مولیدنیت در دگرسانی پتاسیک) نسبت به مولیدنیت‌های درجه حرارت پایین‌تر از سیال‌های اسیدی‌تر (۳۵۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد؛ مخلوط پلی‌مورف 3R و 2H مولیدنیت در دگرسانی فلیک و آرژلیک) نهشته شده‌اند را توضیح دهد (Fleischer, 1960; Frondel & Wickman, 1970; Terada et al., 1971, Giles & Schilling, 1972; Ayres, 1974; Newberry, 1979; Filimonova et al., 1985; Stein et al., 2000). هرچند که این الگو ممکن است در همه کانسارهای مس-مولیدن پورفیری صادق نباشد (Berzina et al., 2005). بر این اساس، تغییرات دیده شده در غلظت

Eliopoulos, 1996; Melfos et al., 2001; Xiong & Wood, 1999, 2001, 2002; Stein et al., 2001; Berzina et al., 2005) نشان داده است که ترکیب ماگمای مادر و میزان تفریق بلوری آن، واکنش بین ماگماهای مادر با سنگ‌های پوسته، نوع و محتوای فلزی کانسار، غلظت رنیوم در سیال‌های گرمایی کانسنگ‌ساز و تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی تبلور (فوکاسیته اکسیژن، pH، فعالیت یون کلرید، دما) و تغییر ساختار بلوری مولیدنیت (پلی‌مورف‌های 2H و 3R) می‌تواند بر روی میزان تغییرات غلظت رنیوم در مولیدنیت مؤثر باشند.

یکی از نتایج مطالعه حاضر ثبت میزان بالاتر غلظت رنیوم در مولیدنیت کانسارهای مس (میدوک) و مس-مولیدن پورفیری (سرچشمه) نسبت به کانسارهای مولیدن-مس پورفیری (نوچون) بود که با وجود یک ارتباط وارون بین غلظت رنیوم و عیار میانگین مولیدن و ارتباط مستقیم بین عیار میانگین مس و غلظت رنیوم تأیید شد (نمودارهای ۱ و ۲). همچنین تحقیقات نشان داده است که بین غلظت رنیوم در مولیدنیت‌ها و میزان مولیدنیت در کانسارها یک رابطه وارون وجود دارد (Newberry, 1979; Gilles & Schilling, 1972). بنابراین مولیدنیت‌های کانسارهای مس-مولیدن پورفیری عموماً نسبت به مولیدنیت‌های کانسارهای مولیدن-مس پورفیری میزان رنیوم بیشتری دارند که این رابطه را به پدیده تعادل جرم نسبت داده‌اند (Stein et al., 2001). پژوهشگران یادشده بر این باورند که اگر تقریباً تمام محتوای رنیوم کانسارهای مس-مولیدن پورفیری به وسیله مولیدنیت‌های موجود در این کانسارها تمرکز یابد، حضور محدودتر مولیدنیت در هر کانسار مس-مولیدن پورفیری منجر به تمرکزهای بالایی از رنیوم در این مولیدنیت‌ها خواهد شد؛ در حالی که حضور فراوان‌تر مولیدنیت در کانسارهای مولیدن-مس و مولیدن پورفیری باعث می‌شود که محتوای رنیوم چنین کانسارهایی در تمام مولیدنیت‌ها توزیع شود که این توزیع گسترده باعث کاهش غلظت آن در مولیدنیت‌های کانسارهای یادشده می‌شود. ترکیب و ماهیت منبع تأمین‌کننده فلز (ماگمای مولد) در کانسارهای پورفیری به عنوان یکی دیگر از عوامل احتمالی کنترل‌کننده محتوای رنیوم کانسارها و غلظت آن در مولیدنیت‌ها معرفی شده است (Mao et al., 1999). این مسئله با کاهش یافتن میزان رنیوم در مولیدنیت‌های کانسارهای پورفیری همراه شده با توده‌های گرانیوتییدی جبه‌ای، به طرف توده‌های I-type و سپس توده‌های S-type مطابقت دارد. پژوهش‌ها نشان داده است کانسارهایی که ماگمای مولد آنها از ذوب بخش‌های مافیک زیرپوسته‌ای حاصل شده است، محتوای رنیوم بالاتری نسبت به کانسارهایی که ماگمای مولد آنها فقط از ذوب سنگ‌های پوسته میانی و بالایی شکل گرفته است، دارند (Stein et al., 2001). این ویژگی به همراه ترکیب کوارتز دیوریتی-گرانودیوریتی توده نفوذی مولد کانسارهای مس-مولیدن پورفیری و همچنین مقادیر کمتر رادیوژنی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ آنها شاخص چنین کانسارهایی است که نشان می‌دهد در شکل‌گیری آنها ماگماهایی با منشأ جبه‌ای نسبت به منابع پوسته‌ای نقش بسیار بیشتری داشته‌اند. الگوی منشأ ارائه شده برای توده‌های مولد کانه‌زایی در کمرند مس پورفیری کرمان که بیشتر ترکیب گرانودیوریتی و کمتر کوارتز دیوریتی دارند، به همراه مقادیر غیررادیوژنی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ توده‌های نفوذی مولد کانسار سرچشمه (۰/۷۰۴۷۰۲) و کانسار میدوک (۰/۷۰۴۵۵۰) (Shafiei et al., 2009) و همچنین مقادیر کمتر رادیوژنی $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ این توده‌ها (Shafiei, 2010) در کانسار سرچشمه (۱۸/۵۲۵)، میدوک (۱۸/۵۲۱)، سرکوه (۱۸/۵۷۳) و دره‌زار (۱۸/۵۴۵) در انطباق با نتایج مطالعات در دنیا است (Stein et al., 2001). در میان این کانسارها، مولیدنیت کانسار میدوک بیشترین میزان غلظت رنیوم را نشان داده است که ویژگی‌های این کانسار همچون ترکیب کوارتز دیوریتی و مقادیر کمتر رادیوژنی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ توده نفوذی مولد و محتوای مولیدنیت بسیار کمتر آن در مقایسه با کانسارهای سرچشمه، دره‌زار و سرکوه می‌تواند به عنوان شاخص‌های شناسایی کانسارهای مس و مس-مولیدن پورفیری با محتوای زیاد رنیوم در نظر گرفته

مولیبدینیت نوع 3R نسبت به نوع 2H و همچنین حمل و نهشت دوباره رنیوم در مولیبدینیت‌های تغییر ساختار یافته (3R به 2H) در آنها باعث افزایش محتوای رنیوم این کانسارها نسبت به کانسارهای مس پورفیری با توسعه ضعیف دگرسانی فیلیک شده است.

۶- نتیجه‌گیری

- پراکنندگی رنیوم در مولیبدینیت کانسارهای مس و مولیدن پورفیری کرمان تقریباً شبیه به کانسارهای مشابه در دیگر مناطق دنیا و از چند ده تا چند هزار ppm متغیر است. ثبت مقادیر چند هزار ppm رنیوم در مولیبدینیت‌های کانسارهای مس-مولیدن پورفیری کرمان گویای ارزش بالای این فلز راهبردی (استراتژیک) در کنسانتره تولیدی مولیبدینیت مجتمع مس سرچشمه است که بازیابی مؤثر آن می‌تواند نقش مهمی در ارزش افزوده تولیدات شرکت ملی صنایع مس ایران داشته باشد.

- میزان رنیوم کانسارهای مس پورفیری (مانند میدوک) به سمت کانسارهای مس-مولیدن-طلا (مانند سرکوه)، مس-مولیدن (مانند سرچشمه و دره‌زار) و مولیدن-مس پورفیری (مانند نوچون) روند کاهشی نشان می‌دهد که این روند در کنترل میزان فراوانی رخداد مولیبدینیت و عیار میانگین مولیدن و مس در این کانسارها است.

- کانسارهای مس و مولیدن پورفیری که توده نفوذی مولد آنها از ماگماهای کمتر تفریق یافته، کلسیمی تر و با دخالت بیشتر سازنده‌های جبه‌ای نسبت به مواد پوسته‌ای حاصل شده باشند محتوای رنیوم بالاتری نسبت به کانسارهای مولیدن و مولیدن-مس پورفیری دارند و توده نفوذی مولد آنها تفریق یافته تر، قلیایی تر و حاصل دخالت زیاد سازنده‌های پوسته‌ای است.

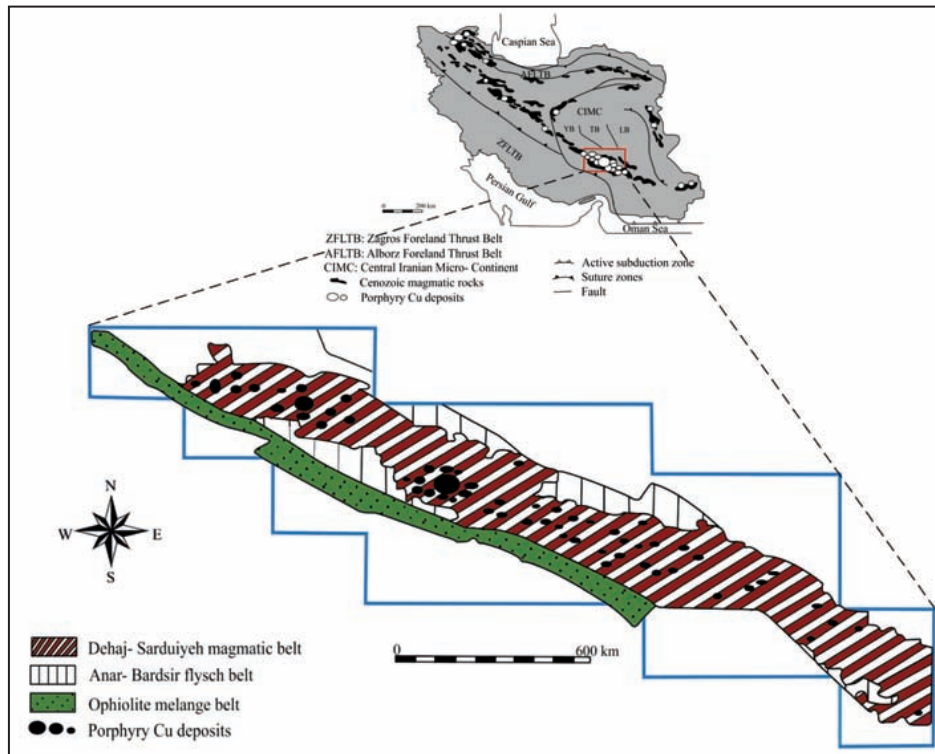
- مولیبدینیت‌های نوع 3R که در مرحله انتقالی کانی‌سازی در رگچه‌های نوع B و مولیبدینیت‌های نوع 2H که در مرحله پایانی کانی‌سازی و با رگچه‌های نوع D نهشته شده‌اند رنیوم بیشتری نسبت به مولیبدینیت‌های نوع 2H که در مراحل اولیه (رگچه‌های نوع A) شکل گرفته‌اند دارند. این روند رو به افزایش غلظت رنیوم در طی مراحل تکاملی سامانه‌های کانی‌سازی پورفیری می‌تواند با ارتباط وارون بین غلظت رنیوم و دمای سیال‌های گرمایی کانه‌ساز و همچنین با اسیدی‌تر شدن سیال‌های مسئول کانی‌سازی‌های مراحل میانی و نهایی کانسارها توضیح داده شود.

- تبدیل پلی‌مورف‌های نهشته شده از مولیبدینیت به یکدیگر در طی مراحل تکامل کانی‌سازی پورفیری و از دست رفتن رنیوم از ساختار مولیبدینیت اولیه و یا اضافه شدن دوباره آن به ساختار مولیبدینیت حاصل می‌تواند توضیحی برای حضور مولیبدینیت‌های 2H با غلظت بالای رنیوم و یا رخداد مولیبدینیت‌های 3R با غلظت پایین رنیوم در کانسارهای پورفیری باشد.

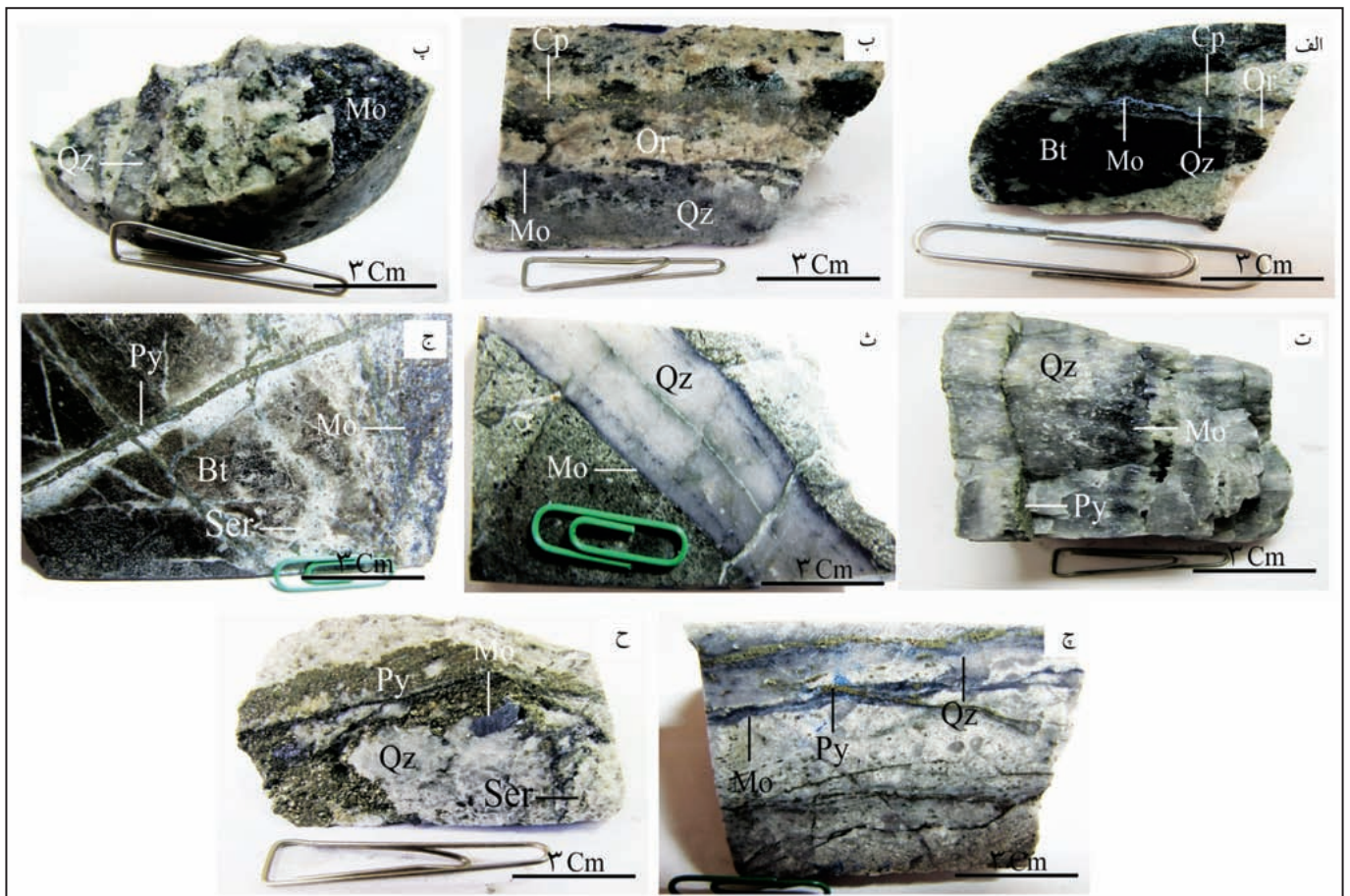
سپاسگزاری

از شرکت ملی صنایع مس ایران به‌ویژه امور تحقیق و توسعه و امور اکتشافات و مهندسی توسعه که با تصویب، همکاری و حمایت مالی این پروژه باعث به ثمر نشستن آن شدند تا بتوان از نتایج این پژوهش در صنعت مس کشور بهره‌مند شد، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از شرکت مهندسین مشاور زمین-آب-پی به دلیل ارسال نمونه‌ها به آمریکا و تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) در کالج جانایاتا، ایالت پنسیلوانیا و سنجش مقادیر مطلق رنیوم در دانشگاه آریزونا قدردانی می‌شود.

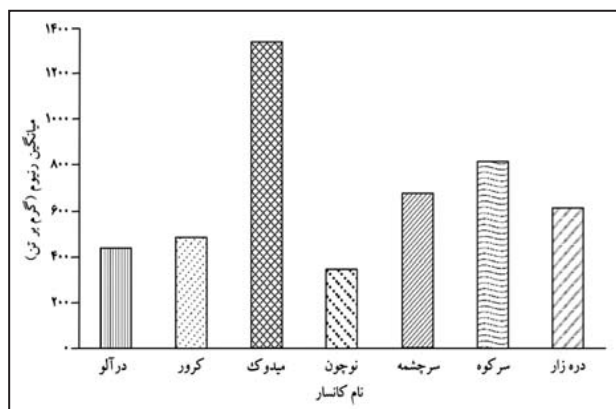
رنیوم انواع مولیبدینیت‌های نهشته شده در رگچه‌های مراحل مختلف کانی‌سازی در کانسارهای پورفیری را می‌توان بر پایه تغییرات درجه‌حرارت نهشت و نوع پلی‌مورف مولیبدینیت تفسیر کرد. مطالعه پراکنندگی رنیوم در انواع رگچه‌های کانسارهای پورفیری (Newberry, 1979b) نشان داده است که مولیبدینیت موجود در رگچه‌های نوع A (پاراژنز کوارتز-بیوتیت-انیدریت-ارتوکلاز-مولیبدینیت-کالکوپیریت-پیریت) که در دگرسانی پتاسیک و با ساختار 2H در دمای بالا (۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) نهشته می‌شوند دارای عیار بالای مولیدن و محتوای رنیوم پایین هستند. رگچه‌های نوع B (کوارتز-مولیبدینیت±پیریت بدون کانی‌های دگرسانی) که مولیبدینیت‌های آنها عمدتاً از نوع 3R است و در مرحله انتقالی کانی‌سازی در دماهای پایین‌تر (کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) نهشته می‌شوند بالاترین میزان رنیوم را دارند. همچنین مولیبدینیت موجود در رگچه‌های نوع D (کوارتز-سریست-کلریت-پیریت-کالکوپیریت±مولیبدینیت) که در دگرسانی فیلیک نهشته شده‌اند و با نسبت بالایی از مولیبدینیت نوع 2H به 3R مشخص می‌شوند عموماً دارای غلظت بالایی از رنیوم نسبت به مولیبدینیت‌های موجود در رگچه‌های نوع A (دگرسانی پتاسیک) هستند. وجود غلظت‌های پایین رنیوم در پلی‌مورف 3R (برای مثال نمونه NCP-6) و یا غلظت بالای رنیوم در پلی‌مورف 2H (نمونه MP-1) که در تعداد کمی از نمونه‌ها قابل مشاهده است (جدول ۳) می‌تواند با الگوی تبدیل پلی‌مورف‌ها به یکدیگر با تغییر شرایط دمایی کانی‌سازی در طی تکامل سامانه گرمایی کانی‌سازی توجیه شود (Newberry, 1979 b). مطابق این الگو، تبدیل و تبلور دوباره مولیبدینیت 3R به 2H تحت شرایط درجه‌حرارت بالا می‌تواند در اثر عملکرد سیال‌های گرمایی تأخیری داغ‌تر بر مجموعه کانیایی شکل گرفته در دمای کمتر رخ داده باشد. تحت چنین شرایطی رنیوم می‌تواند با سیال‌های تأخیری دوباره حمل و نهشته شود که این اثر تجمعی کانی‌سازی باعث افزایش غلظت رنیوم در مولیبدینیت‌های تغییر ساختار یافته می‌شود، هرچند که این تبدیل پلی‌مورفی در درجه حرارت‌های بالا می‌تواند با از دست رفتن رنیوم از ساختار مولیبدینیت اولیه همراه باشد که در نتیجه باعث کاهش غلظت رنیوم در این مولیبدینیت‌ها می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده است که مولیبدینیت‌های 3R با غلظت کم رنیوم و همچنین مولیبدینیت‌های 2H با غلظت بالای رنیوم می‌توانند در نتیجه دگرسان شدن و تبدیل پلی‌مورف‌ها به یکدیگر در طی مراحل تکامل کانی‌سازی به‌وجود آمده باشند که این تغییر ساختار با از دست رفتن رنیوم از ساختار مولیبدینیت اولیه و یا با اضافه شدن و نهشت دوباره رنیوم در مولیبدینیت جدید همراه خواهد بود (Ruiz & Mathur, 2000; McCandless et al., 1993). رخداد مولیبدینیت‌های نوع 2H در دگرسانی فیلیک (رگچه‌های نوع D) کانسارهای مس پورفیری کرمان با غلظت‌هایی نزدیک به غلظت رنیوم در مولیبدینیت‌های 3R رگچه‌های نوع B می‌تواند با این الگو توجیه و تفسیر شود. پژوهش‌ها نشان داده است که مجموعه‌های کانیایی که از سیال‌های گرمایی اسیدی شکل گرفته‌اند برای تمرکز دادن رنیوم در مولیبدینیت‌ها مناسب‌تر از سیال‌های قلیایی هستند (Filimonova et al., 1985; Ivanov & Yushko-Zakharova, 1989). با توجه به شدت و توسعه زیاد دگرسانی فیلیک در کانسارهای مس-مولیدن پورفیری که از چرخش و فعالیت سیال‌های گرمایی اسیدی شکل گرفته‌اند (Williams-Jones and Heinrich, 2005; Heinrich, 2005)، بنابراین رخداد فراوان‌تر



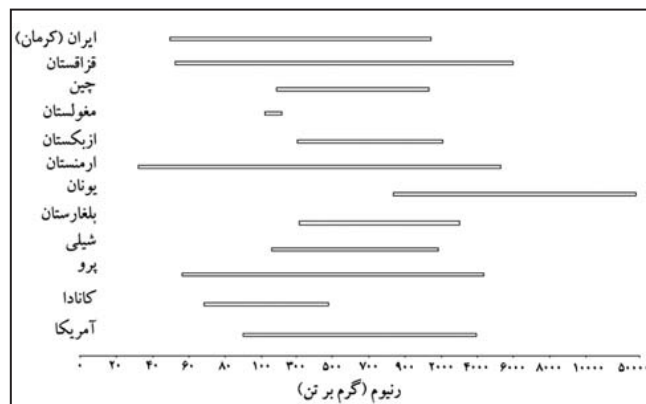
شکل ۱- نقشه ساده شده کمر بند مس پورفیری کرمان (دهج- ساردویییه) و موقعیت آن در نقشه ساده شده زمین‌شناسی ایران (نقل با تغییرات از Demitrijevic, 1973)



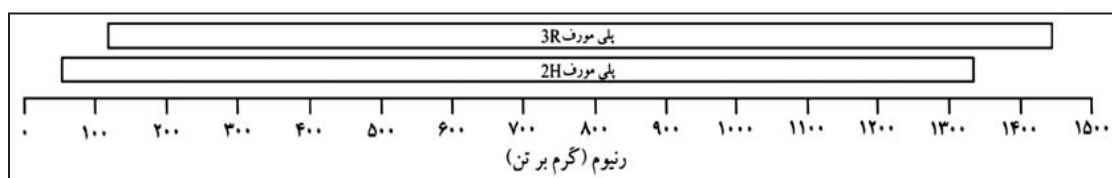
شکل ۲- نمونه‌هایی از انواع گچ‌های مولیبدنیت‌دار موجود در کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری کرمان (Mo: مولیبدنیت، Py: پیریت، Cp: کالکوپیریت، Qz: کوآرتز، Bt: بیوتیت، Or: ارتو کلاز، Ser: سریسیت)



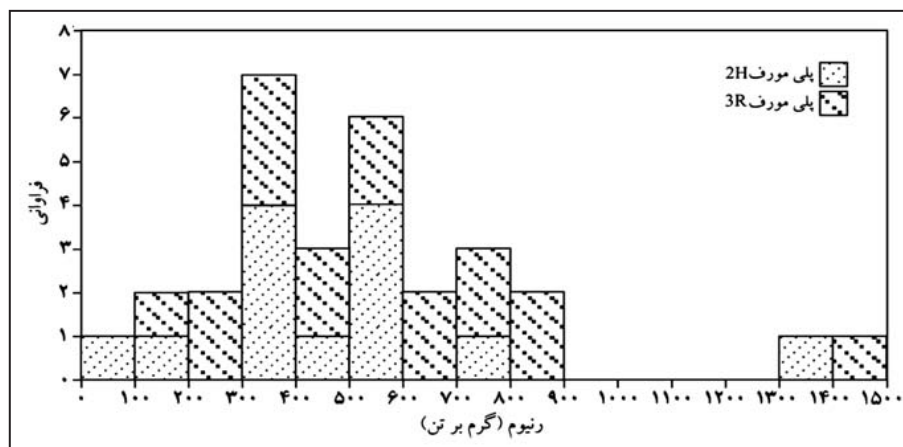
شکل ۴- میانگین غلظت رنیوم در مولیبدنیت کانسارهای پورفیری مس و مولیبدن کرمان



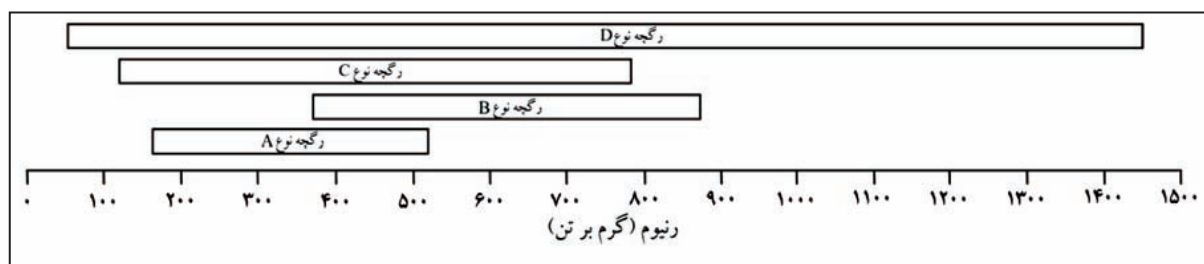
شکل ۳- مقایسه مقادیر و تغییرات غلظت رنیوم در مولیبدنیت کانسارهای مس و مولیبدن پورفیری ایران (مطالعه حاضر) و دیگر مناطق جهان (Berzina et al., 2005)



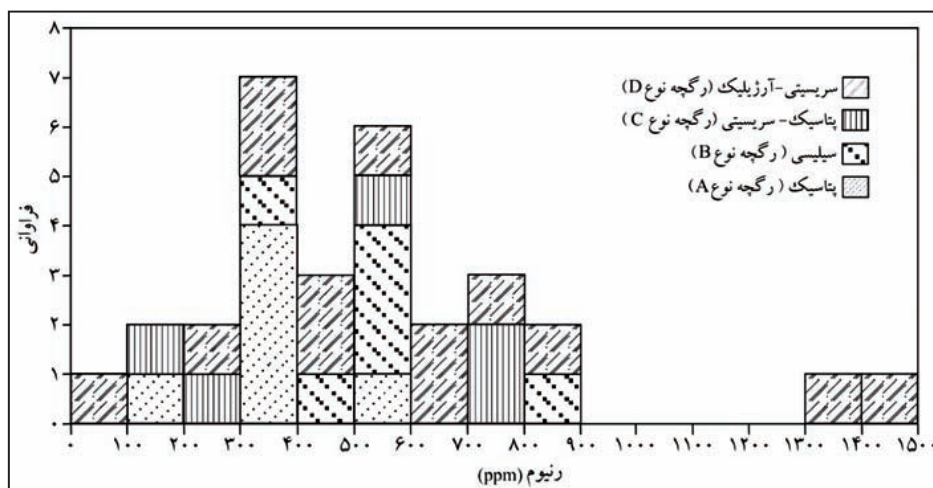
شکل ۵- میانگین غلظت رنیوم در پلی مورف‌های 3R و 2H مولیبدنیت



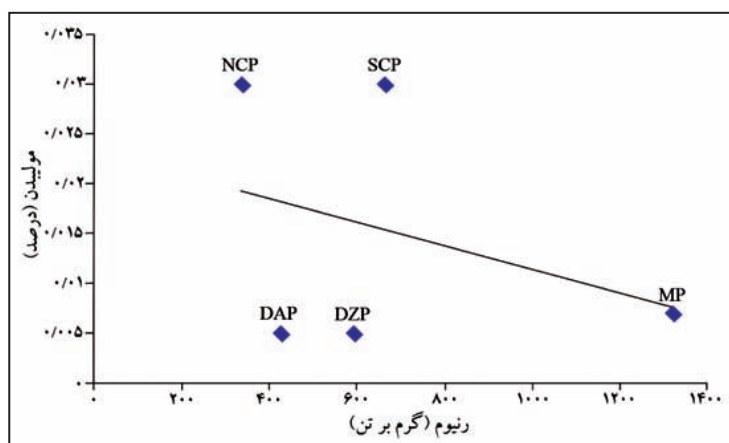
شکل ۶- فراوانی غلظت رنیوم در پلی مورف‌های 3R و 2H مولیبدنیت کانسارهای مس پورفیری کرمان



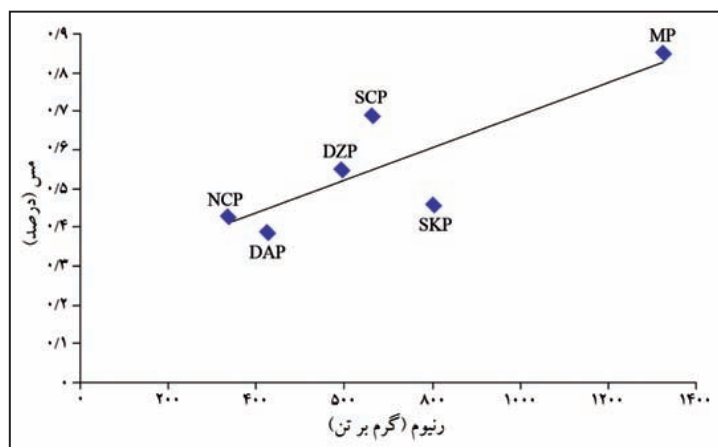
شکل ۷- تغییرات غلظت رنیوم در مولیبدنیت‌های رگچه‌های نوع A, B, C و D کانسارهای مس پورفیری کرمان



شکل ۸- فراوانی غلظت ننیوم در مولیدنیت‌های رگچه‌های نوع A، B، C و D کانسارهای پورفیری مس و مولیدن کرمان



شکل ۹- رابطه بین عیار میانگین مولیدن و میانگین غلظت ننیوم در تعدادی از کانسارهای پورفیری کرمان؛ SCP: کانسار سرچشمه، MP: کانسار میدوک، DZP: کانسار دره‌زار، DAP: کانسار درآلو و NCP: کانسار نوچون



شکل ۱۰- رابطه بین عیار میانگین مس و میانگین غلظت ننیوم در تعدادی از کانسارهای پورفیری کرمان؛ SCP: کانسار سرچشمه، MP: کانسار میدوک، DZP: کانسار دره‌زار، DAP: کانسار درآلو، NCP: کانسار نوچون و SKP: کانسار سرکوه

جدول ۱ - ویژگی‌های ذخایر و کانسارهای مس - مولیبدن و مولیبدن - مس پورفیری در کمربند مس کرمان

مشخصات	سرچشمه	میدوک	دره‌زار	سرخوه	نوجون	درآلو	کرور
وضعیت کانسار	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)	معدن روباز فعال (۱)
میزان ذخیره	۱۲۰۰ میلیون تن (۲۳۴۶۵۸۱۰)	۱۴۴ میلیون تن (۱)	۱۳۴ میلیون تن (۱)	۱۶ میلیون تن (۸۱۰)	۲۶۸ میلیون تن (۱۲)	۱۳۳ میلیون تن (۱)	برآورد نشده است (۱)
عبار عناصر	مس، ۰/۰۳٪، مولیبدن، ۰/۰۶ ppm، طلا، ۱/۱۴ تقره (۱۰،۲۳،۴،۶،۸)	مس، ۰/۰۸۵٪، مولیبدن، ۱/۸ ppm، طلا، ۷/۸ تقره (۵،۹)	مس، ۰/۰۵٪، مولیبدن، ۱/۱۱ تقره (۱،۱۱)	مس، ۰/۰۴۶٪، مولیبدن، ۰/۰۲۵ ppm، طلا (۱۲)	مس، ۰/۰۳۳٪، مولیبدن، ۰/۰۳۳ ppm، طلا (۱۲)	مس، ۰/۰۳۹٪، مولیبدن، ۰/۰۳۹ ppm، طلا (۱۲)	برآورد نشده است (۱)
نوع کانسار پورفیری	مس - مولیبدن (۸)	مس (۸)	مس - مولیبدن (۸)	مس - طلا - مولیبدن (۸)	مولیبدن - مس (۱۲)	مس (۸،۱۴)	مولیبدن - مس (۱)
کانی‌های سولفیدی اصلی	کالکوپیریت - پیریت - مولیبدنیت - کالکوسیت (۲،۳،۴،۷)	کالکوپیریت - پیریت - مولیبدنیت - مگنتیت (۵،۹)	کالکوپیریت - پیریت - مولیبدنیت - کولیت - بوریت - کالکوسیت - دژنیت (۱،۱۱)	کالکوپیریت - پیریت - کالکوسیت - مولیبدنیت (۱)	مولیبدنیت - کالکوپیریت - پیریت - مگنتیت (۱۲)	کالکوپیریت - پیریت - مولیبدنیت - بوریت - مگنتیت (۱۴)	مولیبدنیت - کالکوپیریت - پیریت (۱)
ترکیب توده فئودی مولد کانسار	گرانودوریت تا کاراترموزونیت (۱۰،۲،۳،۴،۶،۷)	کاراترموزونیت (۵،۹)	گرانودوریت (۱۱)	دوریت - کاراترموزونیت (۱)	موزوگرانیت - ریداسیت (۱۵، ۱۲)	گرانودوریت (۱۴)	میکروکاراترموزونیت (۱)
دگرسانی	تاسیک، پروپلیتیک، فلیک، سلیسیک، آرزلیک (۲،۳،۴،۷)	تاسیک، تاسیک - فلیک، فلیک، پروپلیتیک (۵،۹)	تاسیک، فلیک، آرزلیک، پروپلیتیک (۱۱)	تاسیک، آرزلیک، پروپلیتیک، آهن - سلیس - سوسیت (۱)	تاسیک، تاسیک - فلیک، فلیک (۱۲)	تاسیک، فلیک، آرزلیک، پروپلیتیک (۱۴)	تاسیک، سلیسی - پیریتی، فلیک، پروپلیتیک (۱۳)

۱- گزارشات منتشر شده شرکت ملی صنایع مس ایران؛ ۲- Waterman & Hamilton (1975)؛ ۳- Etminan (1977)؛ ۴- Kramers (1987)؛ ۵- Shahabpour & Hassanzadeh (1993)؛ ۶- شفیعی و همکاران (۱۳۸۰)؛ ۷- (2006) Hezarkhani؛ ۸- Shafiei & Shahabpour (2008)؛ ۹- Taghipour et al (2008)؛ ۱۰- Shafiei et al. (2009)؛ ۱۱- Abdolzadeh (2009)؛ ۱۲- Derakhshani & Hassanzadeh (2009)؛ ۱۳- قاسمی و همکاران (۱۳۸۹)؛ ۱۴- صالحیان و قادری (۱۳۸۹)؛ Nedimovic (1973)

جدول ۲- ویژگی‌های نمونه‌های انتخاب شده برای انجام جدایش مولبدینیت از آنها و نتایج تجزیه XRD آنها برای تعیین نوع پلی مورف مولبدینیت

نام کانسار	شماره نمونه	نوع رگچه و دگرسانی	پلی مورف مولبدینیت
میدوک	MP-1	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن- آرژیلیک (رگچه نوع D)	2H
سرچشمه	SCP-1	رگچه کوارتز- مولبدینیت- کالکوپیریت- پیریت؛ سریسیتی شدن- سیلیسی شدن (رگچه نوع C)	3R
سرچشمه	SCP-4	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ بیوتیتی شدن (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
سرچشمه	SCP-7	رگچه مولبدینیت؛ سیلیسیک- سریسیتی (رگچه نوع B)	2H
سرچشمه	SCP-8	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن- سیلیسی شدن (رگچه نوع C)	3R
سرچشمه	SCP-10	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ بیوتیتی شدن (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
سرچشمه	SCP-11	رگچه مولبدینیت ± کوارتز؛ آرژیلیک ± سریسیتی شدن (رگچه نوع D)	3R
دره زار	DZP-4	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ بیوتیتی شدن (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
دره زار	DZP-6	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± سیلیسی شدن (رگچه نوع D)	3R
درآلو	DAP-4	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن- کلریت ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	2H
درآلو	DAP-6	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سیلیسی- سریسیتی (رگچه نوع B)	3R
درآلو	DAP-9	رگچه مولبدینیت؛ سریسیتی ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	2H
درآلو	DAP-10	رگچه کوارتز- مولبدینیت ± پیریت؛ (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
درآلو	DAP-11	رگچه مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	2H
درآلو	DAP-12	رگچه کوارتز- مولبدینیت- کالکوپیریت ± پیریت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
درآلو	DAP-14	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
سرکوه	SKP-4	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	2H
سرکوه	SKP-5	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سیلیسی شدن (رگچه نوع B)	3R
کرور	KVP-4	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سیلیسی شدن (رگچه نوع B)	2H
کرور	KVP-7	رگچه کوارتز- مولبدینیت- ژپس؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
کرور	KVP-9	رگچه کوارتز- پیریت- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
کرور	KVP-10	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
کرور	KVP-14	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ پتاسیک- فلیک (رگچه نوع B)	3R
نوچون	NCP-2	رگچه کوارتز- مولبدینیت- کالکوپیریت- پیریت؛ سریسیتی شدن- پتاسیک (رگچه نوع C)	3R
نوچون	NCP-3	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ سریسیتی شدن ± آرژیلیک (رگچه نوع D)	3R
نوچون	NCP-6	رگچه کوارتز- مولبدینیت- کالکوپیریت (رگچه نوع C)	3R
نوچون	NCP-7	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ بیوتیتی شدن (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
نوچون	NCP-8	رگچه کوارتز- مولبدینیت؛ فلیک فراگیر (رگچه نوع B)	3R
نوچون	NCP-9	رگچه کوارتز- مولبدینیت ± پیریت؛ بیوتیتی شدن (پتاسیک) (رگچه نوع A)	2H
نوچون	NCP-10	رگچه مولبدینیت ± کوارتز؛ سریسیتی شدن- پتاسیک (رگچه نوع C)	3R

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی رنیوم در نمونه‌های مولیبدنیت کانسارهای پورفیری مس و مولیبدن کرمان

شماره نمونه	رنیوم (گرم بر تن)
MP-1	۱۳۲۵/۳۲
SCP-1	۷۸۳/۶۴
SCP-4	۳۱۹/۴۵
SCP-7	۵۶۶/۸۷
SCP-8	۷۰۵/۲۳
SCP-10	۱۵۸/۸۲
SCP-11	۱۴۴۹/۴۶
DZP-4	۳۰۶/۱۹
DZP-6	۸۸۳/۵۷
DAP-4	۴۶۲/۷۱
DAP-6	۵۰۸/۱۷
DAP-9	۴۹/۰۵
DAP-10	۳۶۹/۰۷
DAP-11	۵۷۷/۳۵
DAP-12	۶۶۱/۱۲
DAP-14	۳۵۷/۱۶
SKP-4	۷۳۲/۲۱
SKP-5	۸۷۲/۹۳
KVP-4	۵۱۳/۸۱
KVP-7	۳۰۷/۷
KVP-9	۴۹۸/۳۹
KVP-10	۶۶۲/۰۹
KVP-14	۳۷۷/۹۹
NCP-2	۵۰۸/۹۷
NCP-3	۲۴۵/۱۶
NCP-6	۱۰۹/۶۷
NCP-7	۳۲۶/۱۵
NCP-8	۴۱۹/۰۸
NCP-9	۵۲۱/۲۹
NCP-10	۲۲۴/۳۸

کتابنگاری

- سلطانی‌نژاد، س.، ۱۳۸۹- مطالعه توزیع و رفتار ژئوشیمیایی مولیبدن در کانسار پورفیری تحت اکتشاف نوچون (جنوب معدن مس سرچشمه رفسنجان) پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گلستان، ۱۱۲ ص.
- سلطانی‌نژاد، س.، شفیعی، ب. و اصفهانی‌پور، ر.، ۱۳۸۹- رفتار زمین‌شیمیایی مولیبدن، مس و طلا در کانسار پورفیری نوچون، رفسنجان، نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- سلطانی‌نژاد، س.، شفیعی، ب. و تقی‌زاده، ح.، ۱۳۸۹- دگرسانی و کانی‌سازی در کانسار مولیبدن-مس پورفیری نوچون، رفسنجان، هیجدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران. شفیعی، ب.، شهاب‌پور، ج. و سعدلو، م.، ۱۳۸۰- ویژگی‌های ژئوشیمیایی، سرشت و خاستگاه طلا و نقره ژرف‌زاد در کانسار مس پورفیری سرچشمه کرمان. فصلنامه علمی- پژوهشی علوم‌زمین، سال هشتم، شماره ۳۳-۳۴، صفحات ۳۴-۴۹.
- صالحیان، م. و قادری، م.، ۱۳۸۹- تکامل هیدروترمالی کانسار مس پورفیری در آلو، جنوب کرمان، نخستین همایش زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- قاسمی، ق.، علیرضایی، س. و ایرامنش، م.، ر.، ۱۳۸۹- ویژگی‌های زمین‌شناسی و دگرسانی در محدوده اکتشافی کروور، جبال‌بارز استان کرمان، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. & Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94: 401-419.
- Ayres, D., 1974- Distribution and occurrence of some naturally- occurring polytypes of molybdenite in Australia and Papua New Guinea. *Journal of Geological Society of Australia* 21:273-278.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. & Berberian, M., 1982- Late Cretaceous and early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran. *Geological Society of London* 139:604-614.

- Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of Earth Sciences* 18: 210-265.
- Bernard, A., Symonds, R. B. & Rose, W. I. JR., 1990- Volatile transport and deposition of Mo, W, and Re in high temperature magmatic fluids. *Applied Geochemistry* 5:317-326.
- Berzina, A. N., Sotnikov, V. I., Economou-Eliopoulos, M. & Eliopoulos, D. G., 2005- Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu–Mo and Mo–Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews* 26: 91-113.
- Candela, P. A. & Holland, H. D., 1986- A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type deposits. *Economic Geology* 81:1-19.
- Candela, P. A. & Holland, H. D., 1984- The partition of Copper and Molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48:373-380.
- Demitrijevic, M. D., 1973- Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran Report 52. 334 pp.
- Derakhshani, R. & Abdolzadeh, M., 2009- Mass change calculations during hydrothermal alteration/mineralization in the porphyry copper deposit of Darrehzar, Iran. *Research Journal of Environmental Sciences* 3(1): 41-51.
- Dercourt, J., Zonenshain, L., Ricou, L. E., Kasmin, G., Lepichon, X., Knipper, A. L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I. M., Geysant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D. H., Boulin, J. P., Sibuet, J. C., Savostin, L. A., Sorokhtin, O., Westphal, M., Bazhenove, M. L., Lauer, J. P., Biju-Duval, B., 1986- Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to Pamirs since the Lias. *Tectonophysics* 123: 241-315.
- Economou-Eliopoulos, M. & Eliopoulos, D. G., 1996- Distribution of rhenium (Re) in molybdenites and Mo-bearing minerals of Greece and its economic significance. Final Report, University of Athens, 30 pp (in Greek with English abstract).
- Etmnian, H., 1977- Le porphyre cuprifere de Sar Cheshmeh (Iran), role des phases fluids dans les mechanism de alteration et de mineralization. *Sci. Terr. Mem.*, 34, 78p.
- Filimonova, L. Y., Zhukov, N. M. & Malyavka, A. G., 1985- Genetic aspects of polytypism and rhenium contents of molybdenite in porphyry copper deposits. *Geochemistry International* 22:74-79.
- Fleischer, M., 1960- The geochemistry of rhenium – addendum. *Economic Geology* 55:607-609.
- FrondeL, J. W. & Wickman, F. E., 1970- Molybdenite polytypes in theory and occurrence. II. Some naturally-occurring polytypes of molybdenite. *American mineralogist* 55: 1857-1875.
- Giles, D. L. & Schilling, J. H., 1972- Variation in rhenium content of molybdenite. In: 24th International Geological Congress, Montreal Proceedings 10:145-152.
- Guan, X., Shou, Y., Xiao, J., Lian, S. & Li, J., 1988- A new type of tin deposit- the Yinyan porphyry tin deposit in China, in Hutchison C.S., ed., *Geology of Tin Deposits in Asia and the Pacific*. Springer Verlag, Berlin, New York, 487- 494.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenic and tectono-magmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahr e Babak area, Kerman province). Unpublished Ph-D. Thesis, University of Colifornia, Los Angeles, 204 p.
- Hezarkhani, A., 2006- Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Sciences* 28: 409-422.
- Heinrich, C. A., 2005- The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study. *Mineralium Deposita* 39: 864-889.
- Ishihara, S., 1988- Rhenium contents of molybdenites in granitoid-series rocks in Japan. *Economic Geology* 83:1047-1051.
- Ivanov, V. V. & Yushko-Zakharova, O. E., 1989- Rhenium. In: Ivanov V.V., et al., (Eds.), *Siderophile and chalcophile rare metals geological directory*. Nedra, Moscow, pp. 425-459 (in Russian).
- Kesler, S. E., 2000- Mineral resources and environmental and economic influences.
- Kooiman, G. J. A., McLeod, M. J. & Sinclair, W. D., 1986- Porphyry tungsten- molybdenum ore bodies, polymetallic veins and replacement bodies and tin- bearing greisen zones in the Fire Tower Zone, Mount Pleasant, New Brunswick. *Economic Geology*, 81: 1356-1373.
- Mao, J., Zhang, Z., Zhang, Z. & Du, A., 1999- Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W-(Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 1815-1818.
- McCandless, T. E., Ruiz, J. & Campbell, A. R., 1993- Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments: implications for Re–Os geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57:889-905.
- McClay, K. R., Whitehouse, P. S., Dooley, T. & Richards, M., 2004- 3D evolution of fold and thrust belts formed by oblique convergence. *Marine Geology* 21: 857-877.
- Melfos, V., Voudouris, P., Arikas, K. & Vavelidis, M., 2001- Rhenium-rich molybdenites in Thracian porphyry Cu+Mo occurrences, NE Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 34:1015-1022 (in Greek with English abstract).
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. & Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21: 397-412.

- Mutschler, F. E., Wright, E. G., Ludington, S. & Abbott, J. T., 1981- Granite molybdenite system. *Economic Geology* 76: 874- 897.
- Nedimovic, R., 1973- Exploration for ore deposits in Kerman Region, Geological Survey of Iran, Rep 53: 1-247.
- Newberry, R. J. J., 1979a- Polytypism in molybdenite: A non-equilibrium impurity-induced phenomenon. *American mineralogist* 64:758-767.
- Newberry, R. J. J., 1979b-Polytypism in molybdenite: Relationships between polytypism, ore deposition-alteration stages and rhenium contents. *American mineralogist* 64: 768-775.
- Popov, V. S., 1977- Geology and genesis of copper and molybdenum porphyry deposits. Nauka, Moscow. 203 pp (in Russian).
- Richards, J. P., 2003- Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology* 98: 1515-1533.
- Ricou, L. E., 1994- Tethys reconstructed: plates continental fragments and their boundaries since 260 Ma from Central America to south-eastern Asia. *Geodinamica Acta* 7: 169-218.
- Ruiz, J. & Mathure, R., 2000- Metallogenesis in continental margins: Re-Os evidence from porphyry copper deposits in Chile. *Reviews in Economic Geology* 12: 59-72.
- Shafiei, B. & Shahabpour, J., 2008- Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, Southeastern Iran. *Journal of Sciences* 19(3): 247-260.
- Shafiei, B., 2010- Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic-metallogenetic implications. *Ore Geology Reviews* 38: 27-36.
- Shafiei, B., Haschke, M. & Shahabpour, J., 2009- Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44: 265-283.
- Shahabpour, J. & Kramers, J. D., 1987- Lead isotope data from the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran. *Mineralium Deposita* 22: 278-281.
- Stein, H. J., Markey, R. J. & Morgan, J. W., 1997- Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the east Qinling molybdenum belt, Shaanxi province, China. *Economic Geology* 92: 827-835.
- Stein, H. J., Markey, R. J., Morgan, J. W., Hannah, J. L. & Schersten, A., 2001- The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite :how and why it works .*Terra Nova* 13:479-486.
- Stein, H. J., Morgan, J. W. & Schersten, A., 2000- Re- Os dating of low- level highly- radiogenic (LLHR) sulfides: the Harnas gold deposit, southwest Sweden records continental scale tectonic events. *Economic Geology* 95: 1657-1671.
- Suzuki, K., Shimizu, H. & Masuda, A., 1996- Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 3151-3159.
- Taghipour, N., Aftabi, A. & Mathur, R., 2008- Geology and Re-Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran. *Resource Geology* 58(2): 143-160.
- Tarkian, M., Housley, R. M., Volborth, A., Greis, O. & Moh, G. H., 1991- Unnamed Re-Mo-Cu sulfide from the Stillwater Complex, and crystal chemistry of its synthetic equivalent spinel type $(Cu,Fe)(Re,Mo)_4S_8$. *European Journal of Mineralogy* 3: 977-982.
- Terada, K., Osaki, S., Ishihara, S. & Kiba, T., 1971- Distribution of rhenium in molybdenites from Japan. *Geochemical Journal* 4: 123-141.
- Todorov, T. & Staikov, M., 1985- Rhenium content in molybdenite from ore mineralizations in Bulgaria. *Geological Balcanica* 15(6): 45-58.
- Watanabe, M. & Soeda, A., 1981- Distribution of poly-type contents of molybdenites from Japan and possible controlling factor in polytypism. *Neues. Jahrb. Mineral* 141:258-279.
- Waterman, G. C. & Hamilton, R. L., 1975- The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit. *Economic Geology* 70: 568-576.
- White, W. H., Bookstrom, A. A., Kamilli, R. J., Ganster, M. W., Smith, R. P., Ranta, D. E. & Steininger, R. C., 1981- Character and origin of Climax- Type molybdenum deposits. *Economic Geology* 75th Anniversary 270-316.
- Williams-Jones, A. E. & Heinrich, C. A., 2005- Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 100: 1287-1310.
- Xiong, Y. & Wood, S., 1999- Experimental determination of the solubility of ReO_2 and dominant oxidation stage in hydrothermal solutions. *Chemical Geology* 158: 245-256.
- Xiong, Y. & Wood, S., 2001- Hydrothermal transport and deposition of rhenium under subcritical conditions (up to 200 °C) in light of experimental studies. *Economic Geology* 96: 1429-1444.
- Xiong, Y. & Wood, S., 2002- Experimental determination of the hydrothermal solubility of ReS_2 and the Re- ReO_2 buffer assemblage and transport of rhenium under supercritical conditions. *Geochemical Transactions* 3: 1-10.

Rhenium Distribution and Its Controlling Factors in Molybdenite Types of Kerman Porphyry Copper Deposits

S. Lali faz¹, B. Shafiei^{2*}, Gh. H. Shamanian², H. Taghizadeh³, M. Hossaini⁴ & R. Mathur⁵

¹M.Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

² Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

³ M.Sc., Exploration and Development Engineering Affairs, SarCheshmeh Copper Complex, National Iranian Copper Industries Co. Tehran, Iran.

⁴ Expert of Research and Development Affairs, SarCheshmeh Copper Complex, National Iranian Copper Industries Co. Tehran, Iran.

⁵ Associate Professor, Department of Geology, Juniata College, Huntingdon, Pennsylvania, USA.

Received: 2011 March 14

Accepted: 2011 June 07

Abstract

In present study, Re concentration determined in 30 hexagonal (2H) and trigonal (3R) molybdenite samples belong to veinlets of different stages of hypogene mineralization from 7 porphyry Cu and Mo deposits from Kerman region. Re concentration in molybdenites of these ore deposits varied from 49 g/t to 1449 g/t which are in Re concentration range of other porphyry Cu and Mo deposits around the world. In general, 3R molybdenites show the higher Re concentration (average ~ 563 g/t) than those of 2H molybdenites (average ~ 479 g/t). Variations of Re concentration in molybdenite types deposited during different stages of hypogene mineralization indicate more concentration of Re in molybdenites precipitated with transitional (B-type veins) and late (D-type veins) stages of mineralization than those of early stage veinlets (A-type veins). This distribution suggest that Re with more acidic and cooler hydrothermal fluids at the transitional and the late stages of porphyry system evolution is more concentrated with silicification, sericitization, and argillization alterations. Present study indicated that molybdenites with high Re content are associated with porphyry copper deposits which are characterized by low average grade of Mo, limited contents of molybdenite, and also their productive intrusive is resulted from significant contribution of mantle-derived magmas respect to crustal materials. In addition to abovementioned signatures, frequency of 3R poly-type of molybdenite in ore deposits, less fractionated and more calcic composition of productive intrusive of ore deposits with their less radiogenic of Sr and Pb isotope ratios, as well as occurrence of late stages of acidic and low temperature hydrothermal alteration and mineralization processes in formation and evolution history of ore deposits are signatures of porphyry copper and molybdenum deposits with high Re contents.

Keywords: Rhenium, Molybdenite, Cu porphyry, Kerman

For Persian Version see pages 143 to 154

*Corresponding author: B. Shafiei; E-mail: behnam.shafiei@gmail.com