

تعیین عناصر دارای پتانسیل غنی شدگی در باطله های کانه آرایه معدن مس

سرچشمه رفسنجان، استان کرمان

مهدی خراسانی پور^{۱*}، عصمت اسماعیل زاده^۲

۱- استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- کارشناس بخش تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه، رفسنجان، کرمان

(تاریخ دریافت ۹۵/۰۳/۱۷ - تاریخ پذیرش ۹۵/۱۱/۲۴)

چکیده

باطله های کانه آرایه مهم ترین نوع باطله معدنی می باشند که در طی فرایند فرآوری کان سنگ های سولفیدی؛ به ویژه مس پورفیری در حجم بسیار زیادی تولید می گردند. هدف اصلی از انجام این پژوهش تعیین عناصر دارای غنی شدگی در باطله های کانه آرایه معدن مس سرچشمه، به عنوان یکی از بزرگترین معادن مس پورفیری دنیا می باشد. برای این منظور تعداد ۹۰ نمونه سطحی و عمقی (تا عمق تقریباً ۱۰ متر) از باطله های تازه و همچنین از باطله های غیرهوا زده در بخش های قابل دسترس سد باطله نمونه برداری شدند. از این تعداد، ۱۴ نمونه مرکب برای انجام آنالیز چند عنصری به روش طیف سنجی جرمی با پلاسمای جفت شده القائی (ICP-MS) و تهیه مقاطع صیقلی آماده گردید. مطالعه میکروسکوپی مقاطع صیقلی نشان داد که باطله ها اغلب حاوی کانی سولفیدی پیریت و در مواردی حاوی کالکوپیریت و کالکوسیت می باشند. از مجموع بیش از ۶۰ عنصر بررسی شده نتایج حاصل از شاخص نرمال شده غنی شدگی نشان می دهد که در مقایسه با غلظت متوسط پوسته ای عناصر و همچنین غلظت آنها در سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا (۱) عناصر آنتیموان ($1/1 \pm 3/9$ mg/kg)، تنگستن ($8/8 \pm 2/4$ mg/kg)، آرسنیک ($2/3 \pm 2/4$ mg/kg)، بیسموت (10 ± 33 μg/kg)، طلا (10 ± 33 μg/kg) و نقره ($15 \pm 0/15$ mg/kg) دارای غنی شدگی با اهمیت، (۲) عناصر مس (478 ± 1350 mg/kg) و آهن ($4 \pm 0/52\%$) دارای غنی شدگی خیلی زیاد و (۳) عناصر گوگرد ($2/75 \pm 0/6\%$)، رنیم ($21 \pm 0/07$ mg/kg)، تلوریم ($0/23 \pm 0/38$ mg/kg)، سلنیم ($0/95 \pm 4/81$ mg/kg) و مولیبدن ($18/7 \pm 91$ mg/kg) دارای غنی شدگی بی نهایت زیاد می باشند (میانگین غلظت \pm انحراف معیار). این عناصر یا کالکوفیل بوده و یا پتانسیل بالایی برای حضور در فازهای سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت دارند. نتایج بدست آمده به خوبی با علائم ژئوشیمیایی عناصر در کانسارهای مس پورفیری همخوانی داشته و مبین عناصر دارای پتانسیل اقتصادی-زیست محیطی در باطله های کانه آرایه معدن مس سرچشمه می باشند.

کلید واژگان: باطله های کانه آرایه، ژئوشیمی، کانی های سولفیدی، مجتمع مس سرچشمه

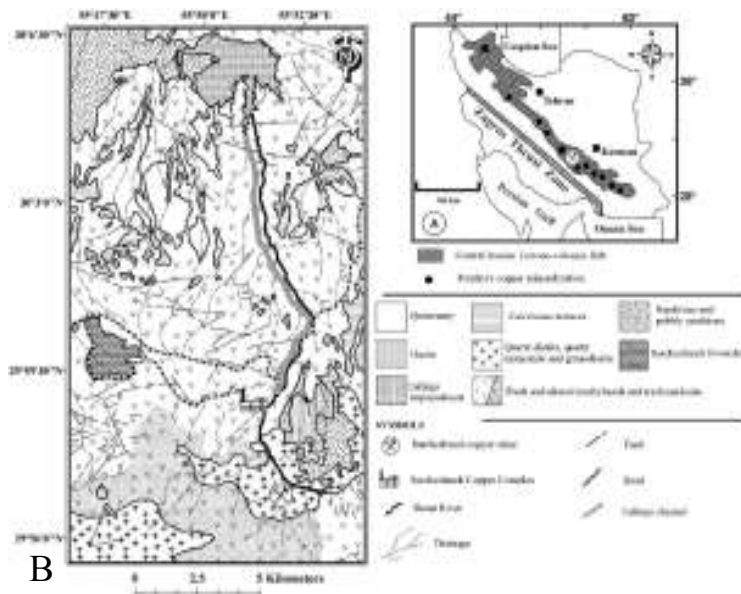
۱. مقدمه

بدنبال کانه آرایه ناقص در طی زمان حوضچه های سد رسوب گیر مقداری از کانیهای سولفیدی با ارزش را نیز دریافت می کنند (Lottermoser, 2003). مدیریت زیست محیطی باطله ها کانه آرایه یکی از چالش های مهم در فرایند معدنکاری کانسنگ های سولفیدی محسوب می شود. برخی از مهمترین این چالش ها شامل (۱) خطر شکست سدهای باطله و عواقب زیست محیطی مرتبط با آنها؛ (۲) تخریب شدید محیط زیست بدلیل گسترش زیاد سدهای باطله و (۳) پتانسیل آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی بدلیل وجود مواد شیمیایی استفاده شده در طی فرایند کانه آرایه، می باشند (Kossoff *et al.*, 2014).

معدن مس سرچشمه مهمترین معدن مس ایران و یکی از بزرگترین کانسارهای مس پورفیری دنیا محسوب می گردد. این معدن در ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرق شهر کرمان و در موقعیت جغرافیایی با مختصات ۲۰" ۵۵°۵۲' طول شرقی و ۴۰" ۲۹°۵۶' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). ویژگیهای زمین شناسی، کانه زایی، زمین ساختی و زیست محیطی معدن مس سرچشمه توسط محققین مختلف بررسی شده است (Aftabi and Atapour, 2010; Atapour and Aftabi, 2007; Hezarkhani, 2006; Khorasanipour *et al.*, 2011; Khorasanipour and Eslami, 2014; Khorasanipour, 2015; Shahabpour and Doorandish, 2007).

سد رسوب گیر معدن مس سرچشمه که در فاصله تقریبی ۱۹ کیلومتری شمال این معدن واقع شده است،

در فرایند معدن کاری، کانی های با ارزش، استخراج شده تنها بخش کوچکی از کل توده کانسنگ را شامل می شوند و بخش اعظم سنگ معدن کاری شده در نهایت به صورت باطله های فرآوری^۱ وارد حوضچه های سد رسوبگیری می شود (Dold and Fontboté, 2001; Khorasanipour and Eslami, 2014; Saxena and Dhimole, 2006). در معادن مس پورفیری، که به عنوان مهمترین منشا مس و مولیبدن دنیا شناخته شده اند (Lowell and Gilbert, 1970; Singer *et al.*, 2008)، باطله های کانه آرایه مهمترین نوع باطله ها را شامل می شوند. وزن خشک باطله های فرآوری تقریباً برابر با وزن کانسنگ معدن کاری شده می باشد (Lottermoser, 2003). در سطح دنیا سالانه در حدود ۱۸ میلیارد متر مکعب باطله کانه آرایه تولید می شود، یعنی چیزی تقریباً معادل رسوب طبیعی که توسط رودخانه های دنیا جابجا می شود. این مقدار در طی ۲۰ تا ۳۰ سال آینده دو برابر خواهد شد (Aswathanarayana, 2005). در تمام دنیا بخش عظیمی از باطله های فرآوری به حوضچه هایی با سطح وسیع، تحت عنوان سد باطله یا سد رسوب گیر پمپاژ می شوند. سدهای باطله بدلیل وسعت نسبتاً زیاد از دیدگاه تخریب چشم انداز ای طبیعی بزرگترین اثر هر فرایند معدن کاری محسوب می گردند. ویژگیهای سدهای باطله و اثرات زیست محیطی آنها بطور کامل توسط Kossoff و همکاران (2014) شرح داده شده اند.



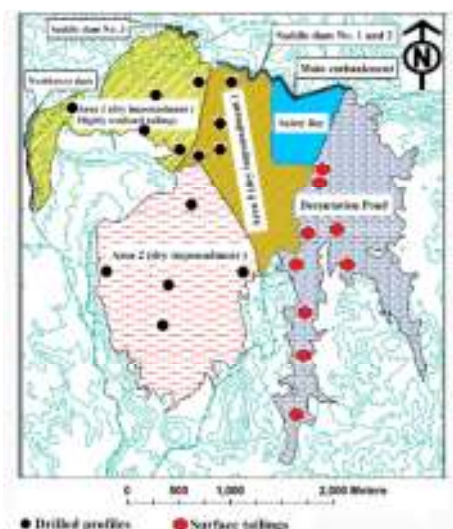
شکل ۱- A: کمر بند آتشفشانی نفوذی ایران مرکزی و موقعیت معدن مس سرچشمه در این کمر بند (modified after Shahabpour and Kramers, 1987). B: نقشه زمین شناسی منطقه سر چشمه با در نظر گرفتن موقعیت معدن سرچشمه و سد باطله (modified after Dimitrijevic, 1973)

در باطله های تازه و غیرهوازده در سد رسوب گیر مجتمع مس سرچشمه می باشد تا از این طریق ماهیت زیست محیطی و پتانسیل اقتصادی بالقوه آنها مشخص شود.

۲. مواد و روش ها

نمونه برداری از تمام بخش های قابل دسترس باطله های تازه و غیراکسیدی انجام شد. برای نمونه برداری از بخش های خشک از دستگاه نمونه برداری دستی استفاده گردید. این دستگاه قابلیت نفوذ در محیط های با بافت نرم مانند باطله را دارا می باشد. عمق نفوذ این نمونه بردار حدود ۹ تا ۱۰ متر بود. در بخش های خشک شده سد بدلیل وجود آب زیرزمینی امکان نمونه برداری از عمق بیش از ۱۰ متر وجود نداشت. تعداد نمونه های برداشت شده در مجموع بیش از ۹۰ نمونه بود که بعد از جمع آوری در شرایط محیطی خشک شدند.

مشمتمل برچندین حوضچه تخلیه باطله می باشد (شکل ۲). این سد شاید قدیمی ترین سد باطله در ایران باشد که از سال ۱۳۶۲ تخلیه باطله در آن شروع شده است. با گذشت زمان و در اثر تخریب کانی های سولفیدی موجود در لایه سطحی باطله های قدیمی، این باطله ها کاملاً اکسید شده اند (Khorasanipour, 2015). در حال حاضر و با راه اندازی "تیکرهای خمیری" آب بیشتری از باطله گرفته شده و باطله منتقل شده به سد با نسبت تقریباً ۶۰ درصد جامد به ۴۰ درصد مایع تخلیه می شود. از نظر جریان آب سطحی، سدهای متوالی به یکدیگر مرتبط بگونه ای که آب موجود درسد درمحل استقرار شناور سیار جمع شده و مجدداً جهت مصرف در مجتمع مس سرچشمه پمپاژ می شود. هدف از انجام این پژوهش شناسایی عناصر دارای پتانسیل غنی شدگی



شکل ۲- بخشهای مختلف سد رسوبگیر مجتمع مس سرچشمه به همراه محل نمونه برداری از باطله ها

داده های تکرار شده می باشد و از طریق رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$\text{رابطه ۱} \quad RSD = \frac{\delta}{\bar{X}} \times 100$$

در رابطه فوق δ انحراف معیار و \bar{X} میانگین دو داده تکرار شده است. نتایج نشان داد که در مجموع میانگین RSD برای تمام عناصر در نمونه های تکرار شده $1/42 \pm$ درصد می باشد.

۳. نتایج

۱.۳. کانی شناسی مقاطع صیقلی

پیریت فراوانترین کانی های سولفیدی موجود در باطله ها است (شکل ۳A). این کانی در مقاطع صیقلی، دارای رنگ زرد بوده و در برخی از نمونه ها به اکسید آهن تجزیه شده است. پیریت در کانسار مس پورفیری سرچشمه به وفور در تمامی مناطق کانه زایی یافت می گردد. این کانی مهمترین کانی سولفیدی در زون هایپوژن است که به صورت پراکنده و همچنین در رگه ها دیده می شود (Shafiei, 2008). زون هایپوژن یا

از این تعداد، ۱۴ نمونه مرکب^۱ برای آنالیز چند عنصری به روش طیف سنجی جرمی با پلاسمای جفت شده القائی^۲ و همچنین تهیه مقاطع صیقلی انتخاب شدند. با توجه به اینکه نمونه های باطله ها به صورت پودر می باشند، تهیه مقاطع صیقلی از آنها به صورت قرص صیقل داده شده با استفاده از روش حرارتی در آزمایشگاه مجتمع مس سرچشمه صورت گرفت. آنالیز نمونه های باطله در آزمایشگاه "اکت لب"^۳ کشور کانادا و در مجموع برای ۶۱ عنصر انجام شد. به منظور کنترل کیفیت، دقت نتایج از طریق تکرار نمونه های مشابه و صحت نتایج از طریق آنالیز نمونه های مرجع استاندارد در آزمایشگاه مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان دقت نتایج بر اساس شاخص "انحراف معیار نسبی"^۴ محاسبه گردید. این شاخص بیانگر انحراف معیار نسبی

- 1-Composite
- 2-ICP-MS
- 3-Actlabs
- 4-Relative Standard Deviation, RSD

نهایت رنگ تیره اولیه باطله ها را به رنگ های قرمز و زرد تبدیل خواهد کرد. شکل ۴ تبدیل بخشی از کانی پیریت به اکسیدهای آهن در باطله ها را نشان می دهد.

۲.۳. شناسایی عناصر دارای غنی شدگی

به منظور تعیین عناصر دارای غنی شدگی از شاخص غنی شدگی نرمال شده^۱ استفاده گردید (Khorasanipour and Esmaeilzadeh, 2015 and 2016). معیار مقایسه در این شاخص غلظت عناصر در سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا و همچنین متوسط پوسته ای آنها قرار داده شد. با توجه به اینکه کانه زایی صورت گرفته در معدن مس سرچشمه در یک توده با ترکیب گرانودیوریتی تا کوارتز مونزونیتی می باشد (Atapour & Aftabi, 2007) از گرانودیوریت غیر کانه زا به عنوان یکی از معیارهای مقایسه استفاده شد. از طرف دیگر متوسط پوسته ای عناصر نیز به خوبی نشان می دهد که با توجه به ماهیت سنگ و کانه زایی صورت گرفته کدامیک از عناصر دارای آنومالی می باشند. این شاخص از طریق رابطه ۲ محاسبه گردید.

رابطه ۲

$$NEF = \frac{\frac{[M]}{[Sc]_{\text{نمونه مورد نظر}}}}{\frac{[M]}{[Sc]_{\text{فراوانی پوسته ای یا سنگ گرانودیوریت}}}}$$

در رابطه فوق NEF شاخص غنی شدگی نرمال شده، M عنصر مورد نظر و Sc بیانگر عنصر نرمال کننده

زون غنی شده درون نژاد داخلی ترین بخش کانه زا بی در معادن مس پورفیری محسوب می گردد. این بخش در زیر زون های اکسید و غنی شده سوپرژن (برونژاد) قرار دارد. در کانسار مس سرچشمه نسبت پیریت به کالکوپیریت از ۲ به ۱ در قسمت های خارجی زون هایپوژن به ۱۰ به ۱ در قسمت های داخلی و مجاور با توده نفوذی افزایش می یابد (Hezarkhani, 2006). این کانی در شرایط هوازگی سطحی پایدار نبوده و به مرور زمان اکسید می شود. بررسی های قبلی صورت گرفته در منطقه نیز نشان می دهد که کانی پیریت در باطله های هوازده و قدیمی سد باطله سرچشمه بطور کامل اکسید شده است (Khorasanipour, 2015). کالکوپیریتکانی سولفیدی دیگری است که در مقاطع صیقلی مشاهده گردید (شکل ۳B). این کانی نیز به عنوان یکی از اساسی ترین و عمده ترین کانی های اولیه در زون هایپوژن معدن سرچشمه وجود دارد. کالکوسیت از کانی های سولفیدی دیگری است که مقدار آن در مقاطع شاید به کمتر از ۱ درصد برسد (شکل ۳C). این کانی تنها در باطله های قدیمی موجود در خلیج های ۱ و ۵ شناسایی شد. کالکوسیت مهمترین و فراوانترین کانی منطقه سولفیدی غنی شده ثانویه معدن مس سرچشمه می باشد.

اکسیدهای آهن از جمله فازهای اکسیدی می باشند که بدلیل غیر هوازده بودن باطله ها در مقاطع به مقدار کم حضور دارند. اکسید آهن موجود در باطله ها حاصل اکسایش کانی های سولفیدی به ویژه پیریت موجود در باطله ها می باشد. مسلماً با گذشت زمان و اکسیدشدن باطله های فرآوری در بخش های خشک شده سد رسوبگیر اکسیدهای آهن تشکیل خواهند شد که در

II-شاخص‌های غنی شدگی $2 < NEF \leq 5$ غنی شدگی متوسط

III-شاخص‌های غنی شدگی $5 < NEF \leq 20$ غنی شدگی با اهمیت

IV-شاخص‌های غنی شدگی $20 < NEF \leq 40$ غنی شدگی خیلی زیاد

V-شاخص‌های غنی شدگی $NEF > 40$ غنی شدگی بی نهایت زیاد

محاسبه شاخص NEF برای نمونه‌های آنالیز شده از باطله‌ها سد رسوبگیر سرچشمه نشان داد که با در نظر

اسکاندیم می‌باشد. در واقع صورت کسر رابطه فوق بیانگر غلظت در نمونه‌های باطله و مخرج کسر بیانگر غلظت پوسته ای و یا غلظت عنصر مورد نظر در سنگ گرانودیوریت غیر دگرسان می‌باشد. در هر دو مورد برای نرمال کردن نتایج از عنصر اسکاندیم استفاده شد که عنصری مرجع بوده و در بسیاری از شاخص‌های غنی شدگی استفاده می‌شود (Shotyk *et al.*, 2000). لو و همکاران (Lu *et al.*, 2009) بر مبنای مقادیر بدست آمده از شاخص غنی شدگی نرمال شده درجات متفاوتی از غنی شدگی را به شرح زیر پیشنهاد داده اند: I-شاخص‌های غنی شدگی کمتر از ۲ فاقد غنی شدگی



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از وجود کانی‌های سولفیدی در باطله‌های گانه آرای معدن سرچشمه، A: پیریت، B: پیریت و کالکوپیریت، C: کالکوپیریت و کالکوسیت



شکل ۴- اکسید شدن بخشی از کانی پیریت و تبدیل آن به ترکیبات اکسید آهن در باطله‌ها گانه آرای معدن سرچشمه

تعیین عناصر دارای پتانسیل غنی شدگی ...

می‌باشند. این عناصر شامل Al, Th, Eu, Dy, Rb, U, Ga, Nd, La, Ca, Be, Sm, Pr, Gd, Ti, Mn, K, Y, Tm, Tb, Li, Yb, Sr, Hg, Er, Na, Nb, Ge, Ta, Ba, Hf و Zr می‌باشند.

۲- عناصر دارای غنی شدگی متوسط ($2 < NEF \leq 5$) شامل عناصر Mg, Cd, Zn, Pb, Co, Tl و Lu (جدول ۱)

۳- عناصر دارای غنی شدگی با اهمیت ($5 < NEF \leq 20$) شامل عناصر Au, Bi, As, W, Sb و Ag (جدول ۲)

۴- عناصر دارای غنی شدگی خیلی زیاد ($20 < NEF \leq 40$) شامل عناصر Fe و Cu (جدول ۳)

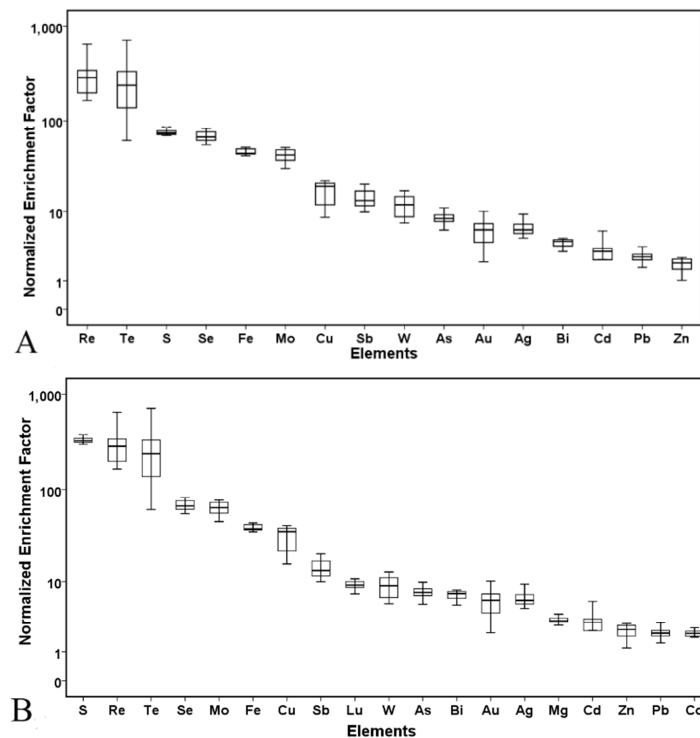
۵- عناصر دارای غنی شدگی بی نهایت زیاد ($NEF > 40$) شامل عناصر S, Re, Te, Se و Mo (جدول ۴)

گرفتن غلظت ۶۱ عنصر آنالیز شده در سنگ گرانودیوریت غیرکانه زا و متوسط پوسته ای آنها در مجموع ۲۰ عنصر S, Re, Te, Se, Mo, Fe, Cu, Sb, Lu, W, As, Bi, Au, Ag, Mg, Cd, Zn, Pb, Co و Tl دارای غنی شدگی می‌باشند. این غنی شدگی‌ها از حداقل ۲ تا حداکثر ۲۸۷ برابر متوسط پوسته ای و سنگ گرانودیوریتی غیرکانه زا می‌باشند. شکل A و B به ترتیب غنی شدگی عناصر بر اساس متوسط پوسته ای و غلظت آنها در سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا را نشان می‌دهد.

بر اساس گروه بندی پیشنهادی توسط لو و همکاران (Lu et al., 2009) ۶۱ عنصر آنالیز شده بر اساس

شدت غنی شدگی به گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

۱- عناصر فاقد غنی شدگی ($NEF < 2$): مجموعاً ۴۰ عنصر از مجموع ۶۱ عنصر آنالیز شده فاقد غنی شدگی



شکل ۵- ترتیب غنی شدگی عناصر در باطله های کانه آرای معدن مس سرچشمه در مقایسه بامتوسط فراوانی پوسته ای (A) و غلظت آنها در سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا (B)

جدول ۱- غلظت و خلاصه آماری عناصر دارای غنی شدگی متوسط ($5 \leq NEF < 2$) در نمونه‌های باطله کانه آرایبی معدن سرچشمه

عنصر واحد حد تشخیص	Lu mg/kg	Mg %	Cd mg/kg	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Co mg/kg	Tl mg/kg
S-1	0.08	1.32	0.2	109	32.9	34.8	1.17
S-2	0.11	1.02	0.6	148	40.3	29.4	1.34
S-3	0.15	1.5	0.3	141	38	32.6	1.48
S-4	0.16	1.21	0.9	236	46.6	30.9	1.46
S-5	0.15	1.24	1	228	49.6	32.6	1.57
S-6	0.15	1.12	1.7	259	49.5	27.4	1.41
S-7	0.16	1.17	1.2	231	47.2	39.6	1.46
S-8	0.16	1.19	1.1	233	49	42.6	1.41
S-9	0.15	1.2	1	270	46.8	33.9	1.55
S-10	0.16	1.12	0.9	258	47.9	31.9	1.42
S-11	0.12	1.08	0.9	216	46.4	25	1.28
S-12	0.09	1.07	1.3	191	44	24.8	1.34
S-13	0.08	0.8	0.1	74.3	47.6	6.2	1.36
S-14	0.21	0.98	0.6	149	47.8	23.2	1.51
میانگین	0.13	1.14	0.84	196	45.26	29.64	1.41
انحراف معیار	0.04	0.16	0.44	61	4.89	8.67	0.11
کمینه	0.08	0.80	0.10	74	32.90	6.20	1.17
بیشینه	0.21	1.50	1.70	270	49.60	42.60	1.57
گرانودیوریت غیرکانه زا ^a	0.01	0.24	0.2	60	15	10	0.5
متوسط پوسته ای ^a	0.5	2.09	0.2	70	13	25	0.45

a: Levinson, 1974

دارای شعاع تقریباً مشابه با یون آهن فرو می‌باشند؛

بنابراین

میتواند جانشین آهن موجود در پیریت شوند (Abraitis *et al.*, 2004). غلظت نیکل موجود در پیریت در محدوده بین ۲۰۰۰-۱۰۶ mg/kg تغییر می‌کند. عنصر آرسنیک نیز قابلیت انحلال محدودی در پیریت دارد؛ اما عموماً به عنوان یک عنصر فرعی در حد mg/kg تا درصد‌های وزنی پایین در این کانی حضور دارد

(Huston *et al.*, 1995). غلظت آنتیموان گزارش شده در پیریت از ۷۰۰-۸۰۰ mg/Kg متغیر است (Abraitis *et al.*, 2004). در باطله های معدن مس سرچشمه کانی پیریت مهمترین کانی سولفیدی می باشد که میزان آن در باطله ها ۷/۵ تا ۸ درصد

۴. بحث و نتیجه گیری

حضور کانی های سولفیدی، به ویژه پیریت و کالکوپیریت، در باطله های سد رسوبگیر مجتمع مس سرچشمه از دیدگاه زیست محیطی و پتانسیل اقتصادی این باطله ها دارای اهمیت می‌باشد؛ زیرا این کانی ها می‌توانند نقش برجسته‌ای در آنومالی‌های عنصری موجود در باطله ها داشته باشند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که کانی پیریت علاوه بر عناصر اصلی Fe و S می تواند حاوی مقادیری قابل توجهی از عناصر فرعی و کمیاب دیگر مانند Ag, As, Bi, Cd, Co, In, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, V, Au, Ge, Hg و Ti نیز باشد که به صورت جایگزینی در آن یافت می‌شوند (Vaughan and Craig, 1978; Spears *et al.*, 1994)؛ برای مثال یونهای دو ظرفیتی کبالت و نیکل

تعیین عناصر دارای پتانسیل غنی شدگی ...

بودند. در این گروه بر اساس مقادیر میانه غنی شدگی‌ها (۵۰ درصد غنی شدگی‌ها مشاهده شده) به ترتیب عناصر Lu, Cd, Pb, Zn, Tl, Mg, و Co دارای بیشترین غنی شدگی می‌باشند. ملاحظه می‌شود که در این گروه بیشترین شدت غنی شدگی مربوط به عناصری است که یا کالکوفیل بوده و یا اینکه بدلیل شعاع یونی مشابه می‌توانند وارد ساختارهای سولفیدی گردند. بالا بودن غلظت Mg در این گروه بدلیل وجود کانی‌های تیره مانند بیوتیت در باطله‌ها می‌باشد که در ساختار آن Mg وجود دارد. در برخی از موارد عنصر Tl به عنوان محصول فرعی در طی کانه آرایی کانسنگهای سولفیدی Cu, Pb, Zn و یا کنسانتره‌های غنی از پیریت استحصال می‌شود (Dill, 2010).

تعیین شده است (Khorasanipour et al., 2011). این کانی در بخش‌های هوازده و اکسید شده باطله‌ها عامل اصلی تولید زهاب اسیدی محسوب می‌شود (Khorasanipour, 2015). علاوه بر پیریت کالکوپیریت نیز می‌تواند حاوی ناخالصی‌هایی از عناصری مانند Ag, As, Bi, Cd, Co, In, Mo, Ni, Pb, Ti, V, Au, Ge, Hg و Ti باشد که به صورت جایگزینی در آن یافت می‌شوند (Lottermoser, 2003). هرچند میزان این کانی در باطله‌های مجتمع مس سرچشمه به شدت وابسته به میزان کارایی فرایند کانه آرایی بوده؛ اما عموماً کمتر از ۱ درصد است. عناصر Mg, Cd, Zn, Pb, Co, Tl و Lu در باطله‌های بررسی شده دارای غنی شدگی متوسط ($2 < NEF \leq 5$)

جدول ۲- غلظت و خلاصه آماری عناصر دارای غنی شدگی با اهمیت ($2 < NEF \leq 5$) در نمونه‌های باطله کانه آرایی معدن سرچشمه

عنصر واحد	Sb mg/kg	W mg/kg	As mg/kg	Bi mg/kg	Au µg/kg	Ag mg/kg
حد تشخیص	0.1	1	0.5	0.1	2	0.05
S-1	1.6	35	14.7	0.8	18	0.56
S-2	2.8	28	21.1	1	39	0.55
S-3	3.4	30	22.1	0.9	26	0.57
S-4	3.9	21	22.1	1.1	44	0.58
S-5	3.5	18	21	1.1	13	0.63
S-6	5.9	1	21.9	1.1	36	0.62
S-7	4.5	19	25.2	1.1	34	0.64
S-8	4.5	28	22.7	1.1	39	0.63
S-9	5.5	21	20.4	1	37	0.59
S-10	3.9	33	22.1	1	25	0.64
S-11	3.5	23	21.3	0.9	34	0.62
S-12	2.9	31	20.7	1	36	0.62
S-13	3.9	19	20.5	0.8	26	0.68
S-14	4.3	31	23.2	1.4	51	0.78
میانگین	3.9	24.1	21.4	1.02	33	0.62
انحراف معیار	1.1	8.8	2.3	0.15	10	0.06
کمینه	1.6	1.0	14.7	0.80	13	0.55
بیشینه	5.9	35.0	25.2	1.40	51	0.78
گرانودیوریت غیرکانه زا ^a	0.2	2	2	0.1	4	0.07
متوسط پوسته ای ^a	0.2	1.5	2	0.17	4	0.07

a:Levinson, 1974

جدول ۳- غلظت و خلاصه آماری عناصر دارای غنی شدگی خیلی زیاد ($NEF \leq 40$) تا بی نهایت ($NEF > 40$) در نمونه‌های باطله کانه آرایبی معدن

سرچشمه

عنصر	S	Re	Te	Se	Mo	Fe	Cu
واحد	%	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	%	mg/Kg
حد تشخیص	0.01	0.001	0.1	0.1	1	0.01	0.2
S-1	3.15	0.13	0.3	5.6	50	4.28	891
S-2	2.84	0.22	0.4	4.3	71	3.94	952
S-3	3.17	0.14	0.5	5.1	77	4.69	807
S-4	2.64	0.27	0.7	4.7	96	3.74	1510
S-5	2.85	0.15	0.5	5.1	89	3.97	1790
S-6	2.63	0.22	0.2	4.2	99	3.74	1740
S-7	3.48	0.14	0.4	6.7	86	4.8	1980
S-8	3.56	0.18	0.1	6.2	100	4.57	2020
S-9	2.97	0.19	0.4	4.4	91	4.74	1630
S-10	2.99	0.22	0.2	5.7	110	4.07	1620
S-11	2.35	0.25	0.1	4	95	3.43	1400
S-12	2.22	0.21	0.2	3.8	85	3.38	1330
S-13	1.18	0.15	0.4	3.6	132	3.24	566
S-14	2.42	0.41	0.9	4	91	4.04	778
میانگین	2.75	0.21	0.38	4.81	90.86	4.05	1358
انحراف معیار	0.60	0.07	0.23	0.95	18.75	0.52	478
کمینه	1.18	0.13	0.10	3.60	50.00	3.24	566
بیشینه	3.56	0.41	0.90	6.70	132.00	4.80	2020
گرانودیوریت غیر کانه زا ^a	0.0058	0.0005	0.001	0.05	1	0.0735	30
متوسط پوسته ای ^a	0.026	0.0005	0.001	0.05	1.5	0.0625	55

a:Levinson, 1974

سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا (به صورت $Sb > W >$ $As > Au > Ag > Bi$ می‌باشد.

متوسط غلظت Sb در باطله های سد رسوب گیر $1/1 \pm 3/9$ باحداقل $1/6$ و حداکثر $5/9$ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد. این میزان غلظت به مراتب بیشتر از غلظت پوسته ای و غلظت این عنصر در سنگ گرانودیوریت ($0/2$ mg/kg) می‌باشد. این عنصر از جمله عناصر کالکوفیل همراه با کانه زایی مسپورفیری می‌باشد.

عناصر Sb, W, As, Bi, Au و Ag در گروه عناصر دارای غنی شدگی با اهمیت ($NEF \leq 20$) قرار داشتند. اهمیت بالای عناصر موجود در این گروه بدلیل وجود دو عنصر طلا و نقره می‌باشد. در این گروه بجز عنصر W که لیتوفیل است سایر عناصر یا کالکوفیل بوده (Sb, As, Bi, Ag) و یا تمایل شدیدی به تمرکز در فازهای سولفیدی دارند (Fe و Au). شدت غنی شدگی عناصر در این گروه بر اساس میانه غنی شدگی‌ها (متوسط غنی شدگی پوسته ای و مقایسه با

همچنین غلظت این عنصر در سنگ گرانودیوریت $4 \mu\text{g/kg}$ است. درمورد جامعه آماری عنصر طلا، 50 درصد از نمونه‌ها دارای غنی شدگی بیش از 6 برابر می‌باشند. عنصر طلا می‌تواند در کانی‌های مانند پیریت، پیروتیت و یا آرسنوپیریت وجود داشته باشد. برای مثال کانی پیریت می‌تواند حاوی 20 تا 40 mg/kg طلا باشد، غلظتی که ارتباط مستقیم با میزان آرسنیک موجود در پیریت دارد (Dill, 2010). در کانسارهای پیریتی طلا به صورت دربرداریه‌های بسیار ریزی از طلای طبیعی و یا به صورت تلوریدهای حاوی طلا وجود دارد (Dill, 2010). با توجه به بالا بودن Te در نمونه‌های سد باطله احتمال حضور طلا به صورت ترکیبات تلوریدی در کانی پیریت وجود دارد. برخی از محققین (Murthy, 1990) اقدام به شستشوی طلا و نقره از باطله‌های سولفیدی سرب و روی با استفاده از فرایندهای تسهیل شده میکروبی نموده‌اند. برخی دیگر نیز با استفاده از روشهای گیاه بالایی و استفاده از گیاهان انباشتگر عناصر طلا و مس را از باطله‌ها استحصال نموده‌اند (Corral et al., 2011). در باطله‌هایی که این روش بر روی آنها اعمال شده بود غلظت طلا $2/35 \text{ mg/kg}$ و غلظت مس 49 mg/kg بوده است. علاوه بر این دو عنصر، میزان نقره باطله‌ها نیز $0/065 \text{ mg/kg}$ گزارش شده بود. روشهای استفاده از گیاهان برای استحصال طلا بطور کامل توسط Sheoran و همکاران (2013) شرح داده شده‌اند. بنظر نمی‌رسد باطله‌های Y که حاوی کمتر از 1 mg/kg طلا باشند را بتوان از طریق گیاه بالایی به نحو اقتصادی طلای آنرا استحصال کرد (Corral et al., 2011).

عنصر تنگستن (W) به عنوان یک عنصر لیتوفیل دارای متوسط غلظت $21/4 \pm 8/8 \text{ mg/kg}$ در باطله‌های کانه آرای می‌باشد. حداقل غلظت این عنصر 1 و حداکثر آن 35 میلی‌گرم بر کیلوگرم است. تنگستن نیز از جمله عناصری است که در کانسارهای مس پورفیری دارای غنی شدگی می‌باشد. این عنصر نیز همراه کانه زایی مولیبدن دیده می‌شود؛ بطوریکه نوع تیپ کانه زایی W-Mo در برخی از کانسارها پورفیری گزارش شده است (Dill, 2010). بنظر می‌رسد غنی شدگی W نیز بیشتر مرتبط با کانه زایی مولیبدن در معدن مس سرچشمه باشد.

عنصر As نیز از جمله عناصر کالکوفیل مهم در کانسارهای سولفیدی محسوب می‌شود که همبستگی بالای زمین شناسی با Sb دارد. متوسط غلظت این عنصر در باطله‌های سد رسوبگیر سرچشمه $2/3 \pm 21/4 \text{ mg/kg}$ می‌باشد. حداقل میزان غلظت این عنصر $14/7$ و حداکثر آن $25/2$ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. این مقادیر نیز نسبت به متوسط پوسته ای و گرانودیوریتی این عنصر (2 mg/kg) دارای غنی شدگی می‌باشند. عناصر As، Sb و Tl دارای همبستگی‌های ژئوشیمیایی با یکدیگر می‌باشند. برای مثال ارتباط زمین شیمیایی As و Sb یک ارتباط معمول در فرایندهای زمین شناسی می‌باشد و یا در اغلب موارد عنصر Tl به همراه آرسنیک دیده می‌شود (Dill, 2010).

متوسط غلظت عنصر Au در رسوبات سد باطله $10 \pm 33 \mu\text{g/kg}$ می‌باشد. حداقل غلظت اندازه گیری شده 13 و حداکثر مقدار اندازه گیری شده آن 53 میکروگرم بر کیلوگرم می‌باشد. متوسط پوسته ای عنصر طلا و

درصد می‌باشد. در جامعه آماری این عنصر میانه غنی شدگی ها در حدود ۲۷ برابر متوسط پوسته ای و گرانودیوریت غنی شدگی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بیش از ۵۰ درصد از نمونه‌ها دارای غنی شدگی بالای ۲۷ برابر می‌باشند. در سدرسوبگیر سرچشمه عنصر مس هم در کانی پیریت موجود در باطله ها به صورت جایگزینی وجود دارد و هم در کانی های با ارزش باقیمانده از فرایند کانه آرای می‌مانند کالکوپیریت، کالکوسیت، و یا کولیت حضور دارد.

متوسط غلظت آهن در باطله ها حدود $۰/۵۲ \pm ۴$ درصد می‌باشد. حداقل غلظت این عنصر $۳/۲۴$ و حداکثر آن $۴/۸$ درصد می‌باشد. میزان بالای آهن در باطله ها (میانه غنی شدگی در حدود ۴۱ برابر) بدلیل حضور این عنصر در کانی های سولفیدی مانند پیریت (FeS_2) و کالکوپیریت ($CuFeS_2$) می‌باشد. از طرف دیگر این عنصر می‌تواند در کانی های تیره مانند آمفیبول و بیوتیت نیز حضور داشته باشد.

متوسط غلظت مولیبدن در پوسته زمین 1 mg/kg است. مولیبدنیت (حاوی ۶۰ درصد مولیبدن) تنها کانی با ارزش این عنصر است که در سطح وسیع و اقتصادی از کانسارهای نوع پورفیری استحصال می‌شود. متوسط غلظت مولیبدن در باطله های بررسی شده حدود $۱۸/۷ \pm ۹۱ \text{ mg/kg}$ می‌باشد. حداقل غلظت این عنصر ۵۰ و حداکثر آن ۱۳۲ میلی گرم بر کیلوگرم است. در مقایسه با متوسط پوسته ای و سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا جامعه آماری مولیبدن دارای میانه غنی شدگی در حدود ۵۳ برابر می‌باشد؛ به عبارت دیگر ۵۰ درصد از نمونه‌ها دارای غنی شدگی بیش از ۵۳ برابر می‌باشند. هر چند در ترکیب کانی شناسی باطله ها کانی

متوسط غلظت عنصر نقره در باطله های سدرسوبگیر مجتمع مس سرچشمه $۰/۰۶ \pm ۰/۶۲ \text{ mg/kg}$ می‌باشد. حداقل مقدار این عنصر عنصر $۰/۵۵$ و حداکثر آن $۰/۷۸$ میلی گرم بر کیلوگرم است. مقادیر اندازه گیری شده برای این عنصر نیز در مقایسه با متوسط پوسته ای و یا غلظت آن در سنگ گرانودیوریت ($۰/۰۷ \text{ mg/kg}$) دارای غنی شدگی می‌باشد. در جامعه آماری این عنصر بیش از ۵۰ درصد از نمونه‌ها دارای غنی شدگی بیش از ۶ برابر مقادیر مبنا (گرانودیوریت و متوسط پوسته ای) می‌باشند.

آخرین عنصر در این گروه Bi می‌باشد که متوسط غلظت آن در باطله ها بررسی شده $۰/۱۵ \text{ mg/kg} \pm ۱/۰۲$ می‌باشد. حداقل غلظت این عنصر $۰/۸$ و حداکثر آن $۱/۴$ میلی گرم بر کیلوگرم است. در مورد جامعه آماری این عنصر نیز بیش از ۵۰ درصد از نمونه‌های غنی شدگی بیش از $۵/۸$ برابر مقادیر مبنا را نشان می‌دهند.

عناصر Cu, Fe, Mo, Se, Te, Re و S دارای بیشترین پتانسیل غنی شدگی در باطله های سدرسوبگیر سرچشمه محسوب می گردند (غنی شدگی خیلی زیاد $NEF < ۲۰$ تا بی نهایت زیاد $NEF > ۴۰$). ترتیب غنی شدگی عناصر این گروه بر اساس متوسط شدت غنی شدگی‌های بدست آمده از مقادیر متوسط پوسته ای و غلظت این عناصر در سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا به صورت زیر می‌باشد.

$Re > Te > S > Se > Mo > Fe > Cu$

متوسط غلظت مس در نمونه‌های باطله ۴۷۸ mg/kg می‌باشد. حداقل غلظت این عنصر $۵۶۶ \pm$ و حداکثر غلظت آن ۲۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم یا $۰/۲$

مولیبدنت شناسایی نشد؛ اما این کانی از جمله مهمترین کانی های موجود در معدن مس سرچشمه می باشد. بنظر میرسد عدم شناسایی این کانی بدلیل مقدار پایین آن در رسوبات می باشد. در مطالعات قبلی صورت گرفته نیز اشاره ای به حضور مولیبدنت نشده است. بجز کانی مولیبدنت عنصر مولیبدن می تواند در ساختار کانی هایی سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت نیز به صورت ناخالصی حضور داشته باشد.

متوسط غلظت عنصر سلیوم در باطله ها mg/kg $0/95 \pm 4/81$ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد. حداقل غلظت این عنصر $3/6$ و حداکثر آن $6/7$ میلی گرم بر کیلوگرم است. در مقایسه با مقادیر مبنا (متوسط پوسته ای و سنگ گرانودیوریت) میانه جامعه آماری عنصر سلیوم 66 برابر غنی شدگی نشان می دهد. این شدت از غنی شدگی نسبت به غلظت های مبنا ($0/05 mg/kg$) مقادیر قابل ملاحظه ای محسوب می شود. این عنصر نیز از جمله عناصر مهم کالکوفیل محسوب می شود. عنصر سلیوم بیشتر به صورت محصول فرعی از معادن مس پورفیرو کانسنگ های سولفید توده ای استحصال می شود. این عنصر به راحتی جایگزین گوگرد در سولفیدها می شود (Dill, 2010).

متوسط غلظت گوگرد در باطله ها در حدود $2/75 \pm 0/6$ درصد اندازه گیری شد. حداقل این عنصر $1/18$ و حداکثر آن $3/56$ درصد است. غنی شدگی قابل ملاحظه این عنصر در باطله های سد رسوبگیر به خوبی بیانگر ماهیت سولفیدی این باطله ها بوده بطوریکه میانه شدت غنی شدگی برای جامعه آماری عنصر گوگرد در حدود 200 برابر مقادیر متوسط پوسته ای و

سنگ گرانودیوریت غیر کانه زا می باشد. حضور کانی های سولفیدی به ویژه پیریت و کالکوپیریت عامل افزایش بیش از حد گوگرد در باطله ها می باشد. کانی شناسی کانسارهای پورفیری دارای تنوع بالایی می باشد؛ با این حال پیریت کانی غالب در اکثر کانسارهای Cu, Mo, Cd, Au, و Ag پورفیری محسوب می گردد و این موضوع بیانگر بالا بودن مقدار گوگرد این کانسارها می باشد.

متوسط غلظت عنصر Te در باطله ها در حدود mg/kg $0/23 \pm 0/38$ می باشد. حداقل غلظت این عنصر $0/1$ و حداکثر آن $0/9$ میلی گرم بر کیلوگرم است. میانه غنی شدگی برای جامعه آماری این عنصر 240 برابر می باشد. این عنصر نیز عنصری کالکوفیل با قابلیت جایگزینی در ساختار کانی های سولفید به صورت ناخالصی های عنصری می باشد. به رغم وابستگی ژئوشیمیایی Te به Se فراوانی این عنصر در پوسته زمین محدود و حدود mg/kg $0/001$ می باشد. برخی از کانی های معمول در کانسارسازی مس پورفیری می توانند پتانسیل بالایی برای Te داشته باشند. برای مثال غلظت این عنصر در کوولیت تا mg/kg 430 و در پیریت و کالکوپیریت تا mg/kg 70 گزارش شده است (Dill, 2010). از این رو تعجب آور نیست که این عنصر به همراه Se از جمله عناصری است که به صورت محصول فرعی از کانسارهای مس پورفیری استحصال می شود.

در باطله های معدن مس سرچشمه عنصر Re دارای بالاترین میزان غنی شدگی است. غنی شدگی این عنصر در مقایسه با متوسط پوسته ای و غلظت آن در سنگ گرانودیوریت بسیار بالا بوده؛ بطوریکه میانه غنی

عناصر، به ویژه عناصر کالکوفیل، بیشتر آنومالی‌های مشاهده شده در باطله‌ها مرتبط با وجود این کانی در باطله‌ها باشد. علاوه بر پیریت حضور کانی کالکوپیریت نیز در ایجاد آنومالی‌های عنصری در باطله‌های بررسی شده بی‌تاثیر نمی‌باشند؛ هرچند میزان این کانی در باطله‌ها به شدت وابسته به میزان کارایی فرایند کانه آرایی بوده و عموماً کمتر از ۱ درصد است. لازم به ذکر است که سایر کانی‌های سولفیدی مانند کالکوسیت و کوولیت تنها در باطله‌های قدیمی و به میزان بسیار کم حضور دارند؛ بنابراین نمی‌توانند نقش برجسته‌ای در آنومالی‌های عناصر موجود در باطله‌ها داشته باشند.

علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، وجود کانی‌های سولفیدی در باطله‌های کانه آرایی این باطله‌ها را مستعد تولید زهاب اسیدی و ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی نیز نموده است. چنین شرایطی در بخش‌های خشک شده باطله‌ها رخ خواهد داد، هرچند خوشبختانه بدلیل نفوذ پذیری بسیار پائین این باطله‌ها آلودگی‌های ایجاد شده صرفاً محدود به لایه سطحی (حداکثر تا عمق ۱ متر) بوده و گسترش چندانی ندارند. تاثیر این آلودگی‌های بیشتر بر روی کیفیت آب برگشتی از سد جهت مصرف مجدد آن می‌باشد. انجام راهکارهای مناسب به منظور جلوگیری از اکسید شدن کانی‌های سولفیدی موجود در باطله‌ها باید در مدیریت زیست محیطی سد رسوبگیر لحاظ گردند. با توجه به اینکه سد رسوبگیر سرچشمه در مرحله نهایی خود نبوده و به طور پیوسته تخلیه باطله به آن صورت می‌گیرد این روشها باید با هزینه منطقی قابل اجرا باشند. مواردی مانند تخلیه دوره‌ای باطله به منظور جلوگیری از خشک شدن و اکسید شدن آنها و یا ایجاد لایه‌های پوششی با مواد

شدگی‌ها برای جامعه آماری آن در حدود ۲۸۰ برابر می‌باشد. متوسط غلظت این عنصر در باطله‌ها 0.07 ± 21 mg/kg اندازه‌گیری شد. حداقل غلظت اندازه‌گیری شده 0.13 و حداکثر آن 0.41 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. رنیوم عنصری کالکوفیل بوده؛ بنابراین می‌تواند در کانی‌های سولفیدی تمرکز داشته باشد. از طرف دیگر کانی مولیبدنیت در مواردی به حدی غنی از عنصر رنیوم می‌باشد که مولیبدنیت رنیوم دار^۱ نامیده می‌شود؛ بنابراین غنی‌شدگی بیش از حد عنصر Re در مقایسه با متوسط پوسته‌ای آن (mg/kg) 0.005 می‌تواند بدلیل همراهی آن با عنصر مولیبدن نیز باشد.

۱.۴. نتیجه‌گیری کلی

عناصر S, Re, Te, Se, Mo, Fe, Cu, Sb, Lu, W, As, Bi, Au, Ag, Mg, Cd, Zn, Pb, Co و Tl مهمترین عناصری هستند که درجات متفاوتی از غنی‌شدگی را در باطله‌های بررسی شده نشان می‌دهند. از دیدگاه زیست محیطی و اقتصادی، کانی پیریت مهمترین کانی موجود در باطله‌های کانه آرایی مجتمع مس سرچشمه محسوب می‌شود. وجود این کانی هم از نظر پتانسیل اقتصادی عناصر فرعی موجود در باطله‌ها و هم از نظر پتانسیل عوارض زیست محیطی مرتبط با این باطله‌ها حائز اهمیت می‌باشد. میزان پیریت موجود در باطله‌های کانه آرایی مجتمع مس سرچشمه بین $7/5$ تا 8 درصد تخمین می‌شود. بنظر می‌رسد با توجه به قابلیت بالای کانی پیریت در جایگزین کردن

پیریت، به عنوان مهمترین کانی سولفیدی موجود در باطله ها ، بتواند راهکارهایی جدیدی را در مدیریت باطله های کانه آرای پیس رو قرار داد. این راهکارها در صورتیکه بتوانند با اولویت‌های زیست محیطی نیز همراه شوند می توانند گزینه های بسیار مطلوب‌تری محسوب گردند.

شیمیایی مانند مالچ های طبیعی و یا پلیمرهای اکریلیک محلول در آب می‌توانند به منظور جلوگیری از رسیدن اکسیژن به باطله ها می‌توانند به عنوان راهکارهایی برای جلوگیری از اکسیدشدن باطله ها مطرح باشند. تحقیقات در این زمینه‌ها در واحد تحقیقات مجتمع مس سرچشمه در حال انجام می‌باشد. مطالعات کانی شناسی و ژئوشیمیایی بیشتر با تمرکز بر روی کانی

References

Abraitis, P.K., Patrick, R.A.D., Vaughan, D.J., 2004. Variation in The compositional, textural and electrical Properties of natural pyrite: a review. *International Journal of mineral Processing*, 74: 41-59.

Aftabi, A., Atapour, H., 2010. Alteration geochemistry of volcanic rocks around Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: implications for regional exploration. *Resource Geology*, 61(1):76-90.

Aswathanarayana, U., 2005. *Mineral Resources Management and the Environment*. Taylor & Francis e-Library, p 313.

Atapour, H., Aftabi, A., 2007. The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: implications for exploration and the environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 93:47-65.

Corral, V.W., Anderson, C., Lopez, M.R., Vargas, M.A., Perez, J.L., 2011. Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and

Kalanchoe serrata L. *Minerals Engineering*, 24:1488-1494.

Dill, H.G., 2010. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100:1-420.

Dimitrijevic, M.D., 1973. *Geology of Kerman region: institute for geological and mining exploration and investigation of nuclear and other mineral raw material*, Beograd – Yugoslavia. *Iran Geol. Survey Rept Yu/52*.

Dold, B., Fontboté, L., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* 74: 2-55.

Hezarkhani, H., 2006. Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. *J. Asian Earth Sci.* 28:409-422.

Huston, D.L., Sie, S.H., Suter, G.F., Cooke, D.R., Both, R.A., 1995. Trace elements in sulfide minerals from Eastern Australian volcanic- hosted massive sulfide deposits. Part

I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite and sphalerite, and Part II. Selenium levels in pyrite: comparison with (d34) values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90:1167-1196.

Khorasanipour, M., 2015. Environmental mineralogy of Cu-porphyry mine tailings, a case study of semi-arid climate conditions, Sarcheshmeh mine, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 153:40-52.

Khorasanipour, M., Eslami, A., 2014. Hydrogeochemistry and contamination of trace elements in Cu-porphyry mine tailings: a case study from the Sarcheshmeh Mine, SE Iran. *Mine Water and the Environment*, 33: 335-352.

Khorasanipour, M., Esmailzadeh, E., 2015. Geo-genic arsenic contamination in the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Kerman, Iran: Implications for the source identification and regional analysis. *Applied Geochemistry*, 63: 610-622.

Khorasanipour, M., Esmailzadeh, E., 2016. Environmental characterization of Sarcheshmeh Cu-smelting slag, Kerman, Iran: Application of geochemistry, mineralogy and single extraction methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 166: 1-17.

Khorasanipour, M., Tangestani, M.H., Naseh, R., Hajmohammadi, H., 2011. Hydrochemistry, mineralogy and chemical fractionation of mine and processing wastes associated with porphyry copper mines: a case study from the Sarcheshmeh mine, SE Iran. *Applied Geochemistry* 26: 714-730.

Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards K.A., 2014. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51:229-245.

Levinson, A.A., 1974. Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publishing Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 611pp.

Lottermoser, B.G., 2003. Mine waste: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Berlin Springer, press, 277pp.

Lowell, J.D., Guilbert, U., 1970. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology* 65: 373-408.

Lu, X., Li, L.Y., Wang, L., Lei, K., Huang, J., Zhai, Y., 2009. Contamination assessment of mercury and arsenic in roadway dust from Baoji, China. *Atmospheric Environment*, 43:2489-96.

Murthy, D.S.R., 1990. Microbially enhanced thiourea leaching of gold and silver from lead-zinc sulphide flotation tailings. *Hydrometallurgy*, 25:51-60.

Saxena, M., Dhimole, L.K., 2006. Utilization and value addition of copper tailing as an extender for development of paints. *Journal of Hazardous Material* 129: 50-57.

Singer, D.A., Berger, V.I., and Moring, B.C., 2008. Porphyry copper deposits of the world—Database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1155.

Shafiei, B., 2008. The metallogenic modeling for Kerman porphyry copper belt and implications for exploration: Ph.D. *Thesis*, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, 311 pp.

Shahabpour, J., and Kramers, J.D., 1987. Lead isotope data from the Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Iran. *Mineralium Deposita*, 22: 275-281.

Shahabpour, J., Doorandish, M., 2007. Mine drainage water from the Sar Cheshmeh porphyry copper mine, Kerman, IR Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 141:105–120.

Sheoran, V.S., Sheoran, A., Poonia, P., 2013. Phytomining of gold: A review. Journal of Geochemical Exploration, 128:42-50.

Shotyk, W., Blaser, P., Grunig, A., Cheburkin, A.K., 2000. A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic,

atmospheric lead deposition using peat cores from bogs: Pb in eight Swiss peat bog profiles. Science of the Total Environment, 249: 281–295.

Spears, D.A., Tarazona, M.R.M., Lee, S., 1994. Pyrite in UK coals: its environmental significance. Fuel 37, 1051–1055.

Vaughan, D.J., Craig, J.R., 1978. Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 512pp.