

زمین شیمی ایزوتوپ های پایدار گوگرد و اکسیژن کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام شهر بابک، استان کرمان

نادر تقی پور

دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان

مریم درانی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۱

taghipour@du.ac.ir

چکیده

کانسار مس پورفیری پرکام در ۸۷ کیلومتری شمال غرب معدن مس پورفیری سرچشمه و ۲ کیلومتری معدن مس پورفیری میدوک قرار دارد. مجموعه آتشفشانی رازک با سن ائوسن میزبان این کانسار میباشد. کانیزایی مس کانسار پرکام در ارتباط با جایگزینی توده‌های نفوذی دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری با سن میوسن است. ایزوتوپ گوگرد کانی های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) بیانگر گوگرد ماگمایی با مقدار $+0.7\%$ در هزار در کانسار پرکام می باشد. $\delta^{34}\text{S}$ کانی انیدریت دارای مقادیر بیشتری نسبت به کانی های سولفیدی در کانسار پرکام است و دامنه تغییرات 11.7% تا 21.3% و با مقدار متوسط 16.1% را نشان می دهد. دمای محاسبه شده با استفاده از ایزوتوپ گوگرد جفت کانی انیدریت-پیریت از 263.3°C تا 441.9°C در تغییر است. داده های ایزوتوپی نشاندهنده اختلاط آب ماگمایی و جوی در تشکیل محلول گرمایی کانسار پرکام می باشند ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 5.67\%$ تا 3.08%). تشابه مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام با دیگر کانسارهای مس پورفیری کمر بند ارومیه- دختر گویای تاثیر فرایندهای مشابه در تشکیل این کانسارها می باشد.

کلید واژه ها: ایزوتوپ پایدار، کانی های سولفیدی و سولفاتی، مس پورفیری، پرکام، شهر بابک، کرمان

مقدمه

تلاش های زیادی برای مطالعه ایزوتوپ های پایدار مانند کربن، اکسیژن، هیدروژن و گوگرد در سال های اخیر صورت پذیرفته است. هدف از این مطالعات، شناسایی منبع و ترکیب سیالات کانه دار، تعیین منبع سازنده های کانسنگ، تعیین دما و دیگر شرایط نهشت کانه ها بوده است. تغییرات توزیع زمین شناختی ایزوتوپ های پایدار به تفاوت اندک آنها در رفتار فیزیکی و شیمیایی در محیط های طبیعی وابسته است. به طور کلی پیوندهایی که توسط یون های سبکتر تشکیل شده اند، ضعیف ترند. از این رو یون های ایزوتوپی سبک تر نسبت به واحدهای سنگین ایزوتوپ معادل، پویاتر و واکنشگرتر هستند (علیرضایی، ۱۳۷۸).

ایزوتوپ های پایدار در حال حاضر بخش مهمی از مطالعه کانسارها را به خود اختصاص می دهند، این ایزوتوپ ها اطلاعاتی را در چهار حوضه زیر فراهم می کنند:

۱- دمای نهشت کانی ها ۲- منشاءهای سیالات گرمایی ۳- منشاءهای گوگرد، کربن و اکسیژن و به تبع آن منشاء فلزات ۴- اندرکنش های آب با سنگ دیواره

ایزوتوپ های پایدار که عموماً در کانی زایی پورفیری گرمایی به کار می روند شامل اکسیژن، هیدروژن، گوگرد و کربن می باشند. از مهمترین ویژگی های ایزوتوپ های پایدار، تفکیک ایزوتوپی می باشد. تفکیک ایزوتوپی جدایش ایزوتوپ های سنگین و سبک در اثر فرآیندهای ژئوشیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی در محیط های مختلف زمین شناسی می باشد. تفکیک ایزوتوپی بین دو کانی نسبت به دما باعث می شود که از جفت کانی ها به عنوان دامسنگ استفاده شود که به دلیل حساسیت بسیار کم نسبت به فشار، بهتر از انواع دیگر

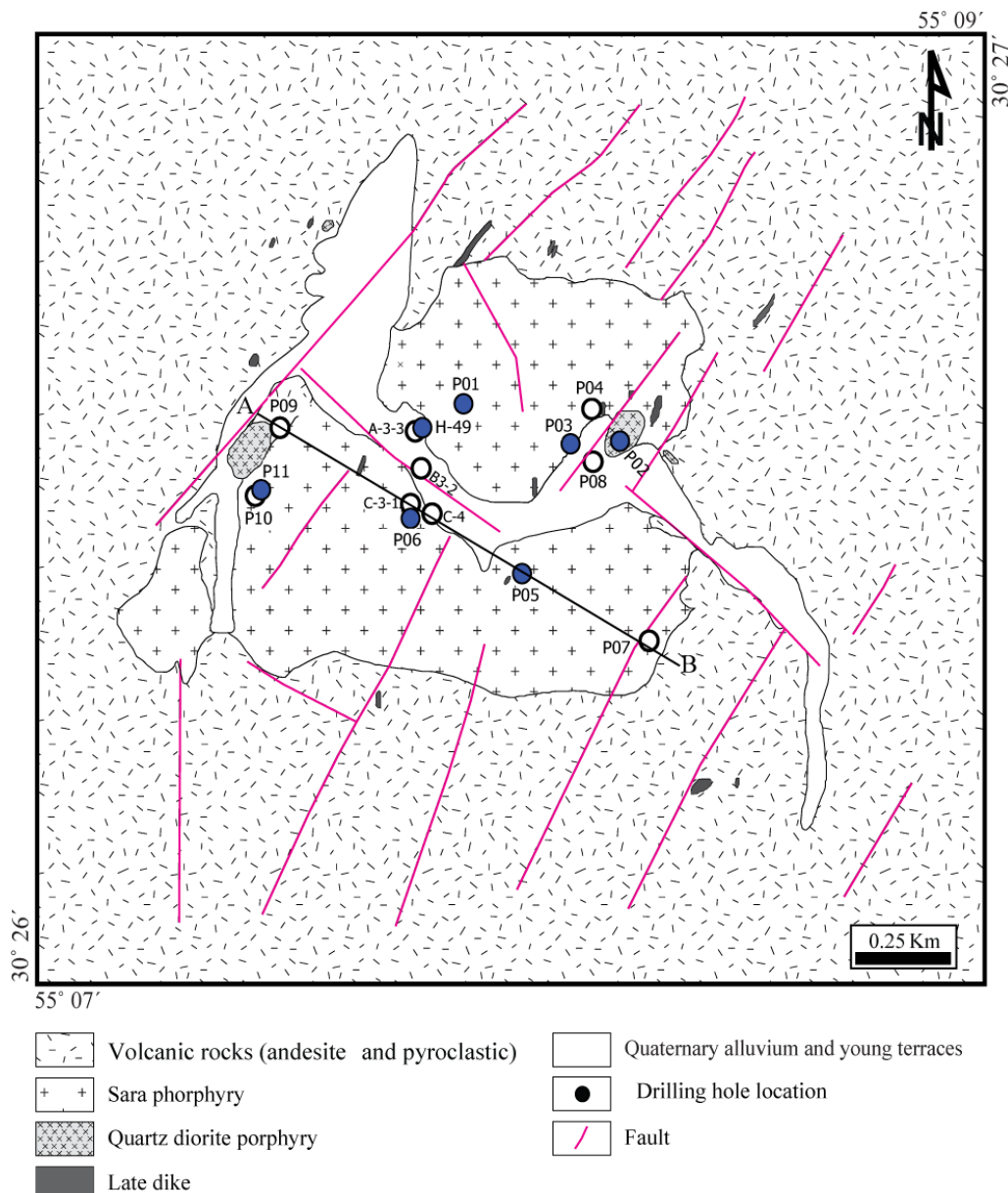
است. جفت کانی که برای دامسنجی مورد استفاده است، می بایست دارای دو خصوصیت زیر باشد.

۱- این جفت کانی به طور همزمان و در تعادل با هم نهشته شده باشند. یعنی از یک سیال و در یک دما تشکیل شده باشند. ۲- ترکیب ایزوتوپی آنها می بایست ثابت بماند و تحت تأثیر دگرسانی ها یا تعادل مجدد تغییر نکند.

زمین شناسی کانسار پرکام

کانسار مس پورفیری پرکام در استان کرمان و در ۸۷ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه و نیز دو کیلومتری شمال غرب معدن مس پورفیری میدوک قرار دارد. این کانسار بر روی کمر بند آتشفشانی - نفوذی سهند - بزمان (شکل ۱) و بر اساس تقسیم بندی زمین شناسی و ساختمانی استان کرمان بر روی کمر بند دهج - ساردونیه قرار دارد (Dimitrijevic, 1973). بخش اعظم کانی زایی مس پورفیری ایران مربوط به این کمر بند آتشفشانی - نفوذی می باشد که به علت فرورانش صفحه عربستان به زیر ایران مرکزی در امتداد گسل رورانده زاگرس بوجود آمده است (Berberian and King, 1981; Hassanzadeh, 1993).

در محدوده کانسار مس پورفیری پرکام، توده های نفوذی توسط سنگهای آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی در شمال و جنوب احاطه شده اند (شکل ۲) و شامل سنگ های آندزیت تا تراکی آندزیت، توف و سنگ های پیروکلاستیک آندزیتی می باشند. در قسمت جنوب منطقه، مجموعه آتشفشانی بصورت سنگ های آندزیتی با بافت پورفیریتیک و گاه همراه با توف و پیروکلاستیک ظاهر می شود. بخش بزرگی از محدوده مورد مطالعه توسط توده ساب ولکانیک دیوریتی تا میکرودیوریتی احاطه شده است. این توده همان توده پرکام پورفیری می



شکل ۲. نقشه زمین شناسی کانسار پرکام (با تغییرات از کان ایران، ۱۳۸۷). دایره های توپر نشاندهنده گمانه هایی هستند که نمونه برداری از آنها صورت گرفته است.

روش کار

کانسار مس پورفیری پرکام دارای تنوع رگه ای زیادی از کانی های فلزی و سیلیکاتی مختلف می باشد. رخداد همزمان کانی های سولفیدی-سولفاتی و سولفیدی-سولفیدی در کانسار پرکام باعث شده تا برای بررسی وضعیت جفت های ایزوتوپی، مطالعه ای بر روی ایزوتوپ های پایدار این کانی ها صورت پذیرد. در این مطالعه تعداد ۳۳ نمونه از رگه های حاوی پیریت - انیدریت، کالکوپیریت، انیدریت و پیریت-کالکوپیریت از قسمت های مختلف کانسار پرکام و از گمانه های مختلف انتخاب شد (شکل ۳). ابتدا بر اساس مطالعه مقاطع نازک و نازک-صیقلی، ترکیب کانی شناسی این رگه ها و هاله های دگرسانی در برگرفته آنها مشخص شد. سپس برای خالص سازی و جدایش کانی های سولفیدی و سولفاتی ابتدا نمونه ها را خرد کرده و با الک کردن، قطعات درشت

را جدا کرده سپس با روش دست چینی در زیر میکروسکوپ، نمونه های خالص را جدا شدند. درصد خالص سازی نمونه ها با این روش بیش از ۹۸ درصد بوده است. بعد از جداسازی، نمونه ها را پودر کرده و در حدود یک گرم از آنها در دانشگاه آریزونا آمریکا مورد آنالیز قرار گرفتند. نمونه های ارسالی شامل ۱۹ نمونه پیریت، ۵ نمونه کالکوپیریت و ۹ نمونه انیدریت بوده است. علاوه بر آنالیز ایزوتوپی گوگرد بر روی این نمونه ها، مقادیر ایزوتوپ اکسیژن نیز در نمونه های انیدریت اندازه گیری شده است.

دگرسانی و کانی زایی در کانسار پرکام

در کانسار سارا دگرسانی در توده های نفوذی و نیز سنگ های آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی میزبان گسترش یافته، ولی عمده ی دگرسانی در توده های نفوذی رخ داده است. شش نوع دگرسانی در این کانسار شناسایی شده است که

عمیق تر کانسار، با ضخامت کم و در بخش های سطحی با ضخامت بیشتری ظاهر می شوند (شکل ۴-۵). رگه های گروه VI از انیدریت تشکیل شده اند. این رگه ها ضخامت ۱ میلی متر تا ۳ سانتی متر داشته و رگه های نوع I، IV، V را قطع می کنند (شکل ۴-۵).

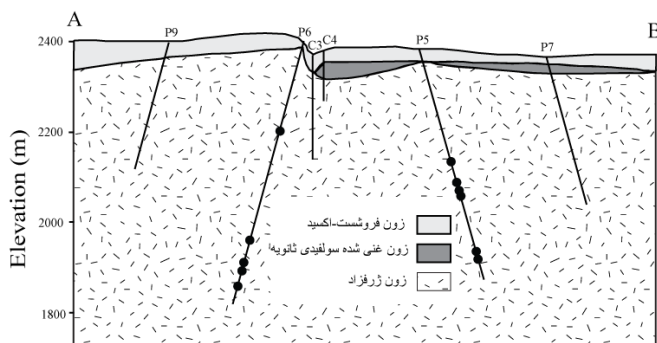
ایزوتوپ گوگرد و اکسیژن

مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ اندازه گیری شده در نمونه های پیریت کانسار پرکام دارای دامنه تغییرات نسبتاً وسیعی است. کمترین مقدار اندازه گیری شده در این پیریت ها $0/7\%$ - و بیشترین مقدار $\delta^{34}\text{S}$ $2/9\%$ می باشد (جدول ۱). مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ نمونه های پیریت $0/8$ در هزار است. کمترین مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه های کالکوپیریت $2/6$ - و بیشترین مقدار $2/3$ در هزار می باشد. مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ نمونه های کالکوپیریت کانسار پرکام $0/3\%$ می باشد. دامنه تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ نمونه های انیدریت دارای محدوده وسیعتری می باشد. این نمونه ها دارای دامنه تغییرات $11/7\%$ - $21/3\%$ و با مقدار متوسط $16/1\%$ می باشند (جدول ۱). هیستوگرام فراوانی مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ نمونه های پیریت، کالکوپیریت (سولفیدها) و انیدریت (سولفات) ترسیم شده است (شکل ۵). به طور کلی نمونه های انیدریت نسبت به نمونه های پیریت و کالکوپیریت از ^{34}S غنی تر هستند و دارای مقادیر بیشتری از $\delta^{34}\text{S}$ می باشند (شکل های ۵ و ۶).

دامنه تغییرات ایزوتوپ گوگرد در کانسار مس-مولیبدن پورفیری بیوت در مونتانا ای آمریکا بین یک تا دو در هزار می باشد که گویای منشاء ماگمایی گوگرد می باشد (Field, et al., 2005). معانی جو و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی سیستماتیک ایزوتوپ های گوگرد و اکسیژن در کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری سرچشمه پرداختند و منشاء گوگرد این کانسار را ماگمایی تشخیص دادند.

کلاگری (۲۰۰۳) به بررسی ایزوتوپ های پایدار گوگرد، اکسیژن، هیدروژن و کربن در زون های دگرسانی فیلیک و پتاسیک - فیلیک کانسار مس پورفیری سونگون پرداخته است و مقادیر ایزوتوپی این کانسار را با کانسارهای مهم مس پورفیری دنیا مقایسه کرده است. منشاء محلول گرمایی و گوگرد کانسار مس پورفیری سونگون بر اساس داده های ایزوتوپی از نوع ماگمایی می باشد (Calagari, 2003).

مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی پیریت - کالکوپیریت در کانسار مس پورفیری پرکام $0/7\%$ + می باشد که این امر نشان دهنده تشکیل کانی های سولفیدی از سیالی است که سولفور آن دارای منشاء ماگمایی است (Ohmoto and Rye, 1979).



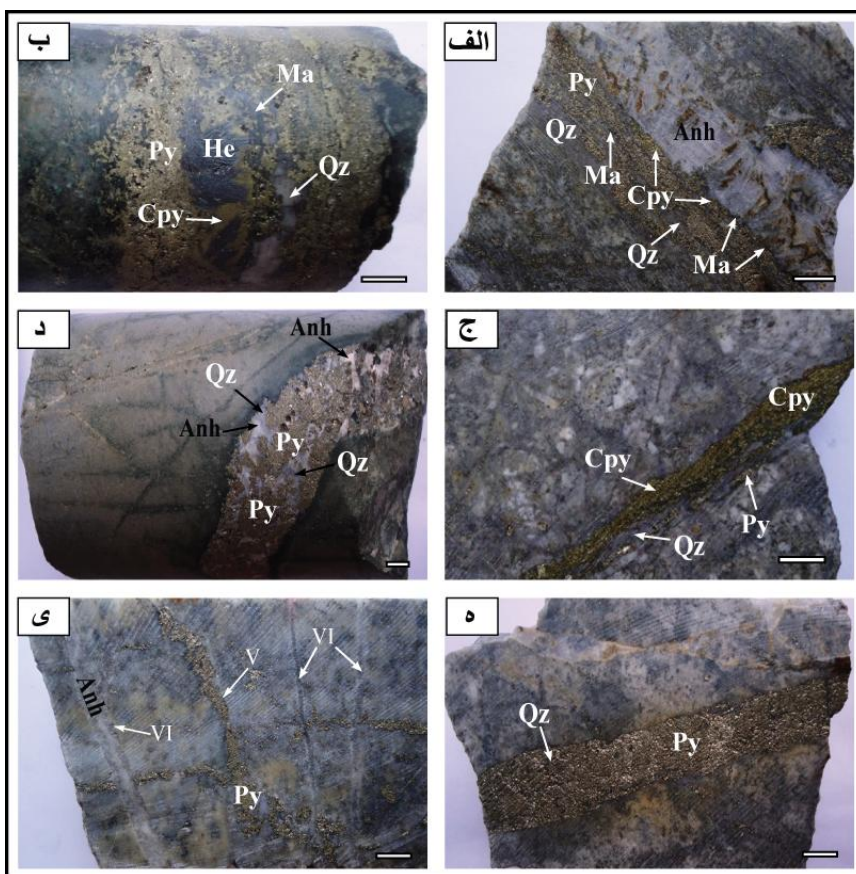
شکل ۳. مقطع عرضی از کانسار پرکام در امتداد برش A-B با زون های کانی زایی و محل گمانه ها. دایره های توپر محل بعضی از نمونه های برداشت شده در این گمانه ها را مشخص می کند.

شامل پتاسیک، بیوتیتیک، پتاسیک - فیلیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک می باشد (محمدی لقب و همکاران، ۱۳۹۱). دگرسانی پتاسیک اغلب در بخش مرکزی و ژرف ترین قسمت کانسار مشاهده می شود و بوسیله ی بیوتیت ثانویه و فلدسپار پتاسیم ثانویه مشخص می شود. بیش ترین گسترش این دگرسانی در توده های نفوذی سارا پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری دیده می شود. دگرسانی بیوتیتیک همانند دگرسانی پتاسیک بوده اما بیوتیت ثانویه در آن غالب می باشد و بیشتر در سنگ های آتشفشانی دیواره گسترش دارد (محمدی لقب و همکاران، ۱۳۹۱).

دگرسانی پتاسیک - فیلیک با متأثر شدن دگرسانی پتاسیک از دگرسانی فیلیک حاصل آمده است که با حضور کانی های فلدسپار پتاسیم ثانویه، بیوتیت ثانویه، سرسیت، کوارتز و انیدریت مشخص می شود. گسترش دگرسانی فیلیک در کانسار سارا زیاد بوده و بخش اعظم این دگرسانی در توده سارا پورفیری رخ داده است (محمدی لقب و تقی پور، ۱۳۹۰). اجتماع کانیایی این دگرسانی شامل کوارتز، سرسیت و پیریت می باشد. دگرسانی آرژیلیک، با حضور کانی های رسی (کائولینیت، مونتموریلونیت و ایلیت)، اندکی سرسیت و کوارتز مشخص می شود که اصولاً در سنگ های آتشفشانی و حاشیه ی جنوبی کانسار گسترش یافته است. در دگرسانی پروپلیتیک کانی های کلریت، اپیدوت، کلسیت، سرسیت و کوارتز قابل تشخیص است. کانی اپیدوت گسترش کمی دارد و به نظر می رسد دگرسانی پروپلیتیک با شدت قوی در منطقه حضور ندارد. این دگرسانی عمدتاً در سنگ های آتشفشانی منطقه گسترش دارد (محمدی لقب و تقی پور، ۱۳۹۰).

کانی زایی رگه ای و استوک ورک در کانسار سارا گسترش خوبی دارد و اصولاً در قسمت مرکزی و عمقی کانسار و همراه با دگرسانی های پتاسیک، پتاسیک - فیلیک و فیلیک تمرکز یافته است. بر اساس بررسی نمونه های دستی ۶ نوع رگه با ترکیب کانی شناسی زیر در این کانسار شناسایی شده است: I) کوارتز + مگنتیت + کالکوپیریت + پیریت + انیدریت، II) کوارتز + مگنتیت + کالکوپیریت + هماتیت + پیریت، III) کوارتز + کالکوپیریت + انیدریت ± پیریت، IV) کوارتز + پیریت + انیدریت (ژپیس) ± کالکوپیریت، V) پیریت ± کوارتز، VI) انیدریت.

ضخامت رگه های گروه I از ۳ میلی متر تا ۱۰ سانتی متر در تغییر است و اصولاً شامل کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت می باشد که بیشتر در قسمت مرکزی و در بعضی از رگه ها در حاشیه قرار می گیرند. این رگه ها با دگرسانی های پتاسیک، پتاسیک - فیلیک و فیلیک همراه می باشند و در توده پرکام پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری دیده میشوند. رگه گروه II که ضخامت آن ها تا ۵ سانتی متر هم می رسد و غالباً از پیریت، کالکوپیریت، هماتیت سوزنی شکل و مگنتیت تشکیل شده است. دگرسانی فیلیک این رگه را احاطه می کند (شکل ۴-ب). رگه گروه III دارای ضخامت ۲ میلی متر تا ۱/۵ سانتی متر می باشند. این نوع رگه اصولاً از کالکوپیریت و مقدار کمتری پیریت تشکیل یافته که بیشتر در قسمت مرکزی رگه قرار می گیرند (شکل ۴-ج). این رگه ها پیوسته و دارای دیواره منظم هستند و با دگرسانی های پتاسیک و پتاسیک - فیلیک همراه می باشند. رگه های گروه IV اصولاً از پیریت و مقدار اندکی از کالکوپیریت تشکیل شده است. دیواره آن ها منظم و گاهی نامنظم و ضخامت آن ها از ۲ میلی متر تا ۸ سانتی متر در تغییر است. این گروه از رگه ها با دگرسانی پتاسیک، پتاسیک - فیلیک و فیلیک همراه میباشند. در سیستم استوک ورک کانسار پرکام بیشترین گسترش را رگه IV دارد (شکل ۴-د). رگه های گروه V از پیریت و مقدار بسیار اندکی از کوارتز تشکیل شده است و بیشتر با دگرسانی فیلیک همراه می باشند. این رگه ها دارای ضخامت ۰/۵ سانتی متر تا ۲ سانتی متر و دیواره منظم و پیوسته می باشند که در قسمتهای

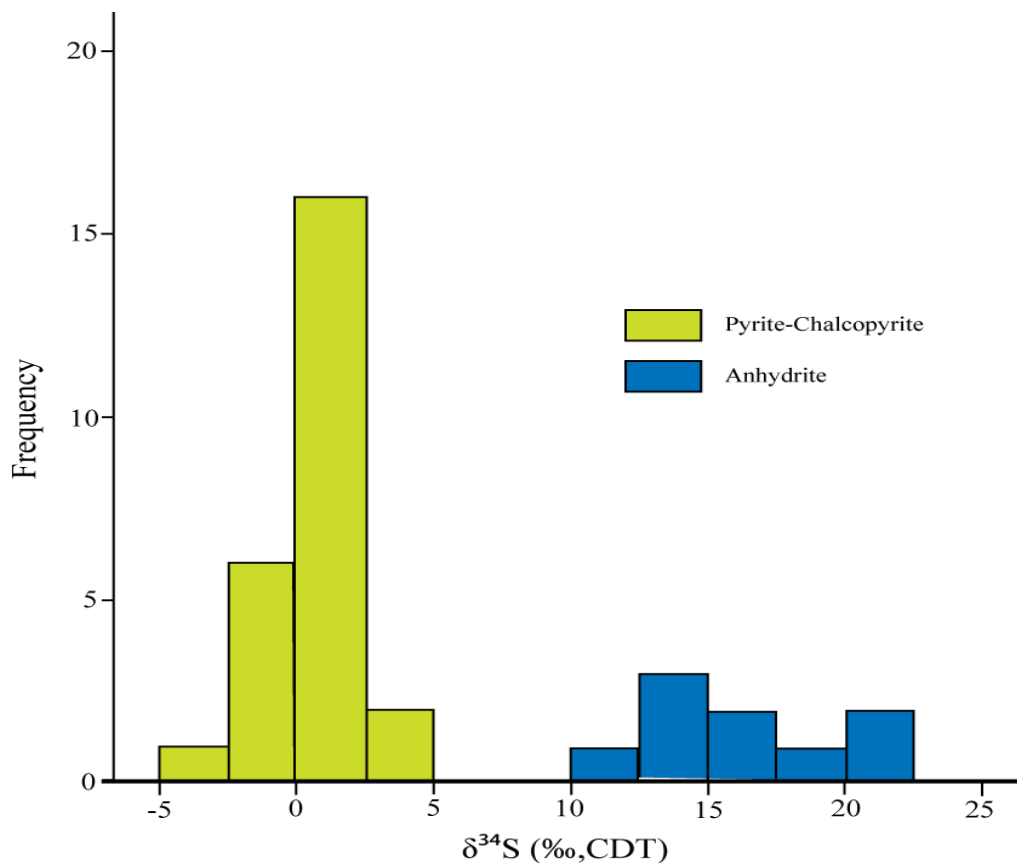


شکل ۴. انواع رگه ها در کانسار پرکام الف) رگه نوع I ب) رگه نوع II ج) رگه نوع III د) رگه نوع IV ه) رگه نوع V ی) رگه و رگچه VI که رگه V را قطع کرده است. مقیاس برای همه تصاویر ۱Cm می باشد. اختصارات: انیدریت: Anh، کالکوپیریت: Cpy، هماتیت: He، مگنتیت: Ma، پیریت: Py، کوارتز: Qz.

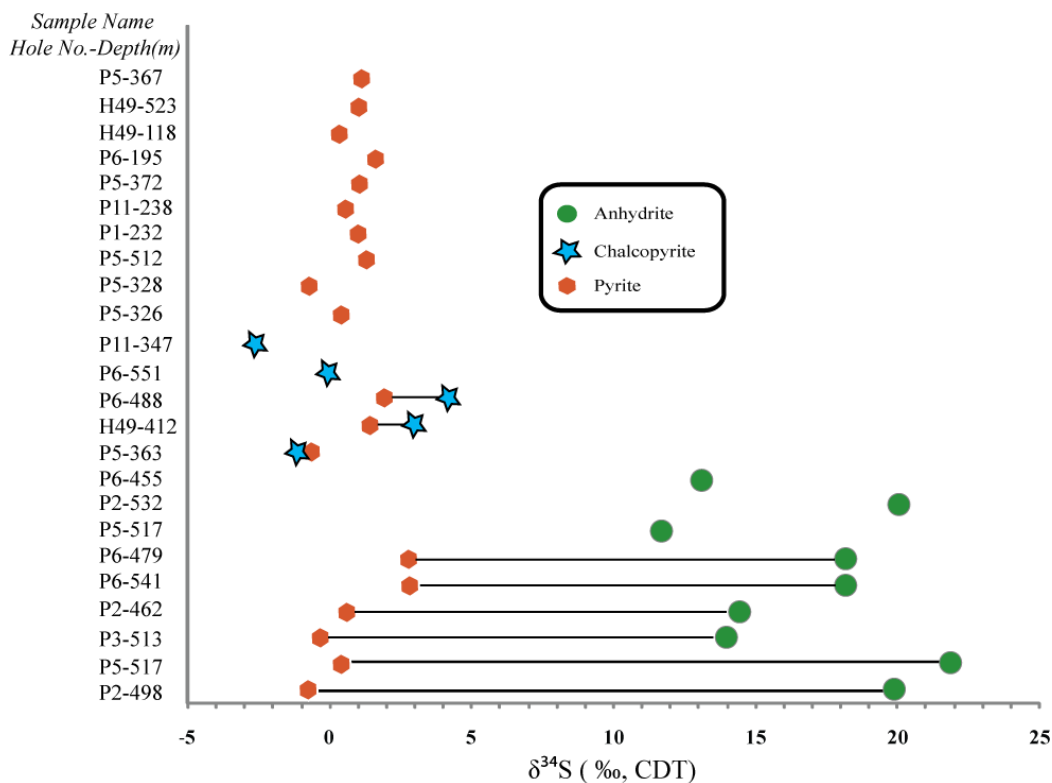
جدول ۱. نتایج آنالیز ایزوتوپ گوگرد و اکسیژن در کانی های پیریت، کالکوپیریت و انیدریت در کانسار مس پورفیری پرکام

Sample No.	Hole number-depth(meter)	Vein Mineralogy	Alteration Halo	$\delta^{34}\text{S}$			$\delta^{18}\text{O}$
				Py	Cpy	Anhy	Anhy
10520	P2-498	Py-Anhy	Qrz-Ser	-0.7		19.9	9.7
10521	P5-517	Py-Anhy	Qrz-Ser	0.5		21.3	9.1
10523	P3-513	Py-Anhy	Qrz-Ser	-0.3		14.1	8.3
10524	P2-465	Py-Anhy-Qrz-Mag	Kfl-Bi-Qrz-Ser	0.7		13.8	2.8
10525	P6-541	Py-Anhy-Qrz-Mag	Qrz-Ser	2.9		15.4	6.4
10526	P6-479	Py-Anhy-Qrz-Mag-Cpy	Kfl-Bi-Qrz-Ser	2.9		15.3	5.7
10527	P5-517	Py-Anhy.	Qrz-Ser			11.7	6.8
10528	P2-532	Py-Anhy-Mag	Qrz-Ser			20.1	7.0
10529	P6-455	Py-Anhy-Mag-Cpy	Kfl-Bi-Qrz-Ser			13.2	6.1
10536	P5-363	Py-Cpy-Mag	Qrz-Ser	-0.7	-0.1		
10537	H49-412	Py-Cpy-Mag-Qrz-Anhy	Kfl-Bi-Qrz	1.4	1.6		
10538	P6-488	Py-Cpy-Mag-Qrz-Anhy	Kfl-Bi-Qrz	2.0	2.3		
10539	P6-551	Py-Cpy-Qrz-Anhy	Kfl-Bi-Qrz		-0.1		
10540	P11-347	Py-Cpy	Qrz-Ser		-2.6		
10542	P5-326	Py-Anhy	Qrz-Ser	0.4			
10545	P5-328	Py-Anhy-Qrz-Cpy	Qrz-Ser	-0.7			
10553	P5-512	Py	Qrz-Ser	1.3			
10554	P1-232	Py-Anhy-Qrz	Qrz-Ser	1.0			
10555	P11-238	Py-Anhy	Qrz-Ser	0.6			
10556	P5-372	Py-Cpy	Qrz-Ser	1.0			
10557	P6-195	Py-Cpy-Mag-Anhy	Qrz-Ser	1.6			
10558	H49-118	Py-Anhy	Qrz-Ser	0.3			
10559	H49-523	Py-Cpy-Qrz-Anhy	Kfl-Bi-Qrz	1.0			
10560	P5-367	Py-Mag	Qrz-Ser	1.2			

Cpy = Chalcopyrite, Py = Pyrite, Anhy = Anhydrite, Mag = Magnetite, Kfl = K-feldspar, Bi= Biotite, Ser = Sericite, Qrz = Quartz



شکل ۵. نمودار فراوانی مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کالکوپیریت، پیریت و انیدریت در کانسار پرکام



شکل ۶. محدوده تغییرات مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانی های پیریت، کالکوپیریت و انیدریت کانسار مس پورفیری پرکام. جفت کانی های انیدریت-پیریت و پیریت-کالکوپیریت به وسیله یک خط نازک به هم وصل شده اند.

دماسنجی ایزوتوپ گوگرد

یکی از روش های تخمین دمای تشکیل رگه های مختلف در کانسارهای مس پورفیری استفاده از ایزوتوپ گوگرد جفت کانی های سولفیدی و یا سولفاتی-سولفیدی می باشد (Field and Gustafson, 1976; Field et al., 2005; Grinenko et al., 2008). با توجه به اینکه جفت کانی های پیریت-کالکوپیریت و انیدریت-پیریت به صورت اولیه در رگه های کانسار مس پورفیری پرکام رخ داده اند (محمدی لقب و همکاران، ۱۳۸۹)، می توان از مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ این جفت کانی ها برای محاسبه دمای تشکیل آنها استفاده کرد. تفاوت ایزوتوپی بین این جفت کانی ها می تواند منعکس کننده واکنش های ایزوتوپی تعادلی در زمان نهشته شدن این کانی ها باشد. بنابراین دمای ایزوتوپی محاسبه شده را می توان از مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ این جفت کانی ها و با استفاده از معادلات ارائه شده توسط اهموتو و رای (۱۹۷۹) و اهموتو و لاساگا (۱۹۸۲) محاسبه کرد. فیلد و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مقادیر ایزوتوپی گوگرد جفت کانی های انیدریت-مولیبدنیت، انیدریت-پیریت و کالکوپیریت در کانسار مس-مولیبدن پورفیری بیوت، دمای تشکیل این کانی ها را به ترتیب ۵۴۵-۶۳۰، ۳۶۰-۶۴۰ و ۴۸۰-۵۷۵ درجه سانتی گراد تعیین کردند. حسن زاده (۱۹۹۳) اولین مطالعه ایزوتوپی گوگرد را بر روی کانی های پیریت و کالکوپیریت واحدهای دگرسانی مختلف کانسار میدوک انجام داد. وی

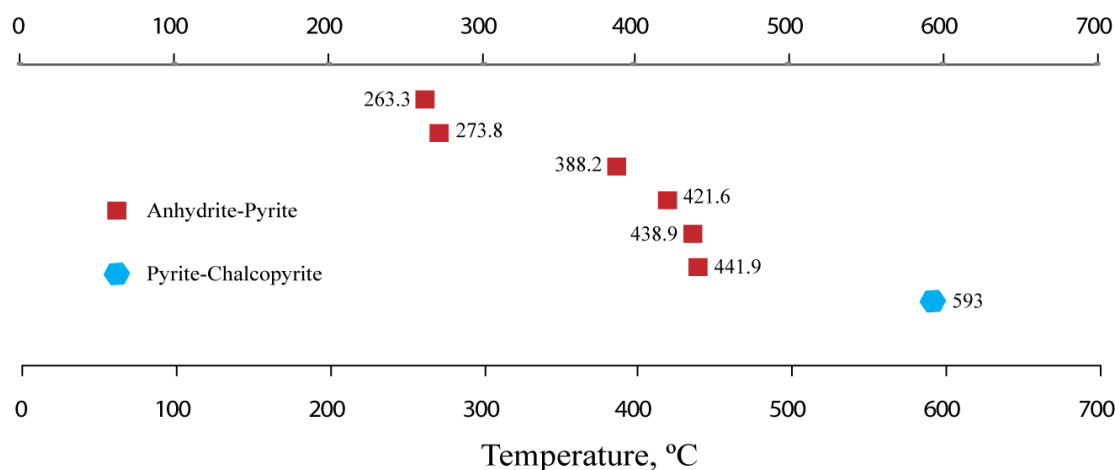
همچنین برای تعیین دمای تشکیل رگه های مختلف کانی زایی در کانسار مس پورفیری میدوک از مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ جفت کانی پیریت-کالکوپیریت استفاده کرده است.

در کانسار پرکام برای محاسبه دمای تشکیل رگه های مختلف از جفت کانی های انیدریت-پیریت و پیریت-کالکوپیریت استفاده شده است. مطالعات پتروگرافی و کانی شناسی نشان می دهد که انیدریت همزمان با پیریت، و پیریت همزمان با کالکوپیریت در رگه ها و رگچه ها در این کانسار نهشته شده است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ این جفت کانی ها و دمای محاسبه شده در (جدول ۲) آورده شده است.

دمای محاسبه شده با استفاده از ایزوتوپ گوگرد جفت کانی انیدریت - پیریت از 263.3°C تا 441.9°C در تغییر است. دو نمونه از جفت کانی پیریت-انیدریت دارای کمترین دمای تشکیل می باشند (شکل-۷) و این نمونه ها دارای بیشترین مقدار اختلاف در مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ می باشند (جدول-۲). این نمونه ها دارای دگرسانی کوارتز-سریسیت می باشند و مقدار بالای $\delta^{34}\text{S}$ کانی انیدریت (۲۱/۳% و ۱۹/۹) در این نمونه ها نشاندهنده تاثیر آب های جوی و اختلاط آنها با آب ماگمایی می باشد. از سه جفت کانی پیریت-کالکوپیریت، فقط یک نمونه در حال تعادل تشخیص داده شد که دمای تعادل آن 593°C درجه سانتیگراد می باشد (جدول ۲ و شکل ۷).

 جدول ۲. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ و دمای محاسبه شده جفت کانی های انیدریت-پیریت و پیریت-کالکوپیریت در کانسار مس پورفیری پرکام

Sample No.	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}}$ (‰, CDT)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Cpy}}$ (‰, CDT)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Anhy}}$ (‰, CDT)	$\Delta^{34}\text{S}_{\text{Anhy-Py}}$	$T, ^{\circ}\text{C}$ (calculated)	$\Delta^{34}\text{S}_{\text{Py-Cpy}}$	$T, ^{\circ}\text{C}$ (calculated)
10520	-0.7		19.9	21.6	263.3		
10521	0.5		21.3	20.8	273.8		
10523	-0.3		14.1	14.4	388.2		
10524	0.7		13.8	13.1	421.6		
10525	2.9		15.4	12.5	438.9		
10526	2.9		15.3	12.4	441.9		
10536	-0.7	-0.1				-0.6	593



شکل ۷. محدوده دمای محاسبه شده از جفت کانی های پیریت-انیدریت و پیریت-کالکوپیریت در کانسار پرکام

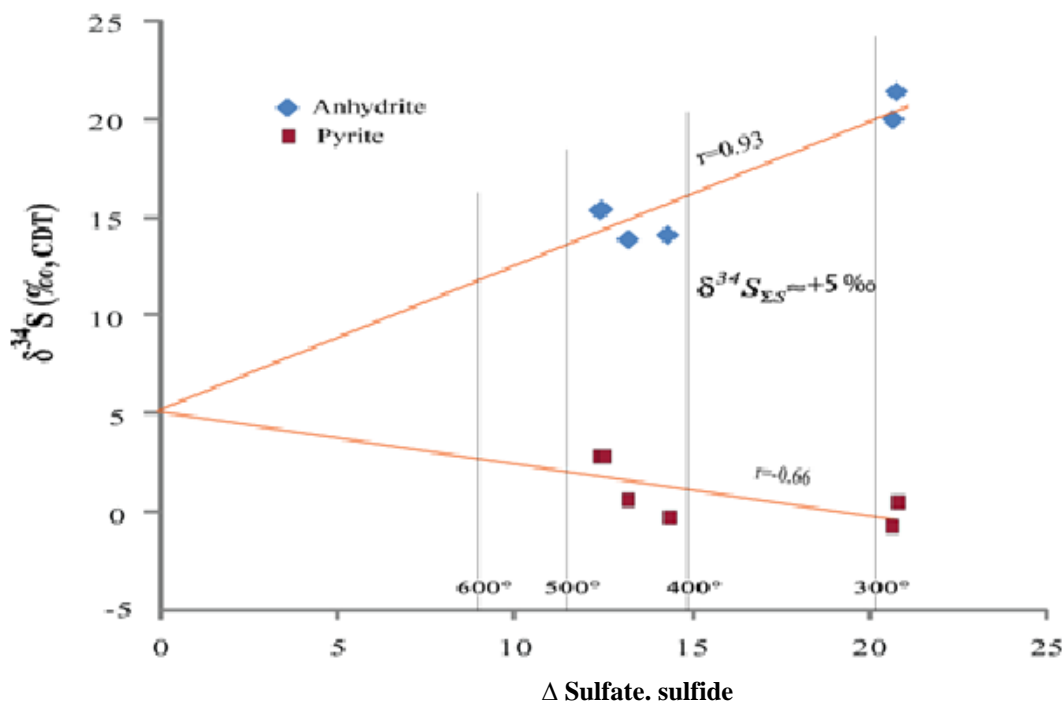
محاسبه مقدار $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ محلول گرمایی

با استفاده از مقدار $\delta^{34}\text{S}$ جفت کانی های سولفیدی-سولفاتی می توان مقدار $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ را تعیین کرد که نشاندهنده مقدار $\delta^{34}\text{S}$ گوگرد کل در محلول گرمایی می باشد. در کانسار مس پورفیبری پرکام از جفت کانی پیریت-انیدریت برای مشخص کردن مقدار ایزوتوپ گوگرد سولفور کل محلول گرمایی استفاده شده است. مقدار $\delta^{34}\text{S}$ کانی پیریت در این کانسار با مقدار $\delta^{34}\text{S}$ کانی انیدریت یک رابطه منفی نشان می دهد (شکل ۸). مقدار اختلاف بین $\delta^{34}\text{S}$ کانی پیریت و انیدریت ($\Delta^{34}\text{S}_{\text{Anhy-Py}}$) از ۱۲/۴ تا ۲۱/۶ ‰ در تغییر می باشد (جدول ۲ و شکل ۸). در شکل ۸ رابطه بین مقدار اختلاف ایزوتوپ گوگرد دو کانی پیریت و انیدریت را در مقابل مقدار $\delta^{34}\text{S}$ این کانی ها نشان می دهد. خط انطباق ترکیب ایزوتوپی کانی های پیریت و انیدریت در این نمودار یکدیگر را در $\delta^{34}\text{S} = +5\%$ قطع می کنند که نشاندهنده مقدار متوسط ایزوتوپ گوگرد سولفور کل موجود در محلول گرمایی می باشد ($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = +5\%$). این مقدار گویای این است که بخشی از گوگرد موثر در تشکیل این کانسار از گوگرد سنگین با منشاء قاره ای نشأت گرفته است.

یکی از راه های تعیین مقدار ایزوتوپ اکسیژن آب موجود در محلول گرمایی استفاده از مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ کانی های سولفاتی می باشد (Field and Gustafson, 1976; Field et al., 2005; Grinenko et al., 2008). در کانسار مس پورفیبری پرکام بر اساس مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ اندازه گیری شده در کانی انیدریت می توان مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ آبی که همزمان با تشکیل انیدریت حضور داشته است را اندازه گیری کرد. برای این کار از معادله ارائه شده توسط Chiba et al (1981) استفاده شده است. این معادله به صورت زیر می باشد:

$$1000\text{Ln}\alpha_{\text{Anhy-water}} = (3.88 \times 10^6)T^{-2} - 4.72$$

در این معادله T دمای تشکیل کانی بر حسب درجه کلوین می باشد. دمای به کار رفته برای این محاسبه بر اساس دمای تخمین زده شده با استفاده از جفت کانی انیدریت - پیریت می باشد. مقادیر ایزوتوپ اکسیژن و گوگرد کانی انیدریت، دمای محاسبه شده از جفت کانی پیریت-انیدریت و مقدار $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ آب موجود در محلول گرمایی در (جدول ۳) آورده شده است. مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ محلول گرمایی در کانسار پرکام به جز یک نمونه از ۳/۰۸ ‰ تا ۵/۶۷ ‰ در تغییر می باشد که نشاندهنده اختلاط آب ماگمایی و آب جوی در تشکیل محلول گرمایی می باشد. مقدار $\delta^{18}\text{O}$ آب های ماگمایی اولیه ۵/۵ تا ۱۰ ‰ در هزار می باشد (Taylor, 1979).



شکل ۸. نمودار تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ در مقابل $\Delta^{34}\text{S}_{\text{Anhy-Py}}$ جفت کانی پیریت-انیدریت در کانسار مس پورفیبری پرکام

جدول ۳. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$ انیدریت و مقادیر محاسبه شده $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ محلول گرمایی (دما با استفاده از جفت کانی انیدریت-پیریت محاسبه شده است).

Sample No.	$\delta^{34}\text{S}_{\text{Anhy}}$ (‰, CDT)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{Anhy}}$ (‰, SMOW)	T, °C (calculated)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ (‰, SMOW)
10520	19.9	9.7	263.3	3.24
10521	21.3	9.1	273.8	3.08
10523	14.1	8.3	388.2	5.67
10524	13.8	2.8	421.6	0.86
10525	15.4	6.4	438.9	4.78
10526	15.3	5.7	441.9	4.13

مقایسه با کانسارهای مس پورفیری ایران و جهان

مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام با مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ دیگر کانسارهای مس پورفیری مقایسه شده است (شکل ۹). دامنه تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی در کانسار پرکام نسبتاً محدود است و تقریباً مشابه با کانسارهای بینگهام، Marysdale، بیوت مونتانا و Twin Butte و کانسار مس پورفیری سرچشمه می باشد (شکل ۹). اما دامنه تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ انیدریت در کانسار پرکام وسیع تر از کانسارهای دیگر است. البته دارای مقدار قابل توجهی همپوشانی با مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ انیدریت در کانسار سرچشمه، سونگون و کانسار Twin Butte می باشد (شکل ۹). دامنه تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام دارای انطباق قابل توجهی با دیگر کانسارهای مس پورفیری دنیا می باشد.

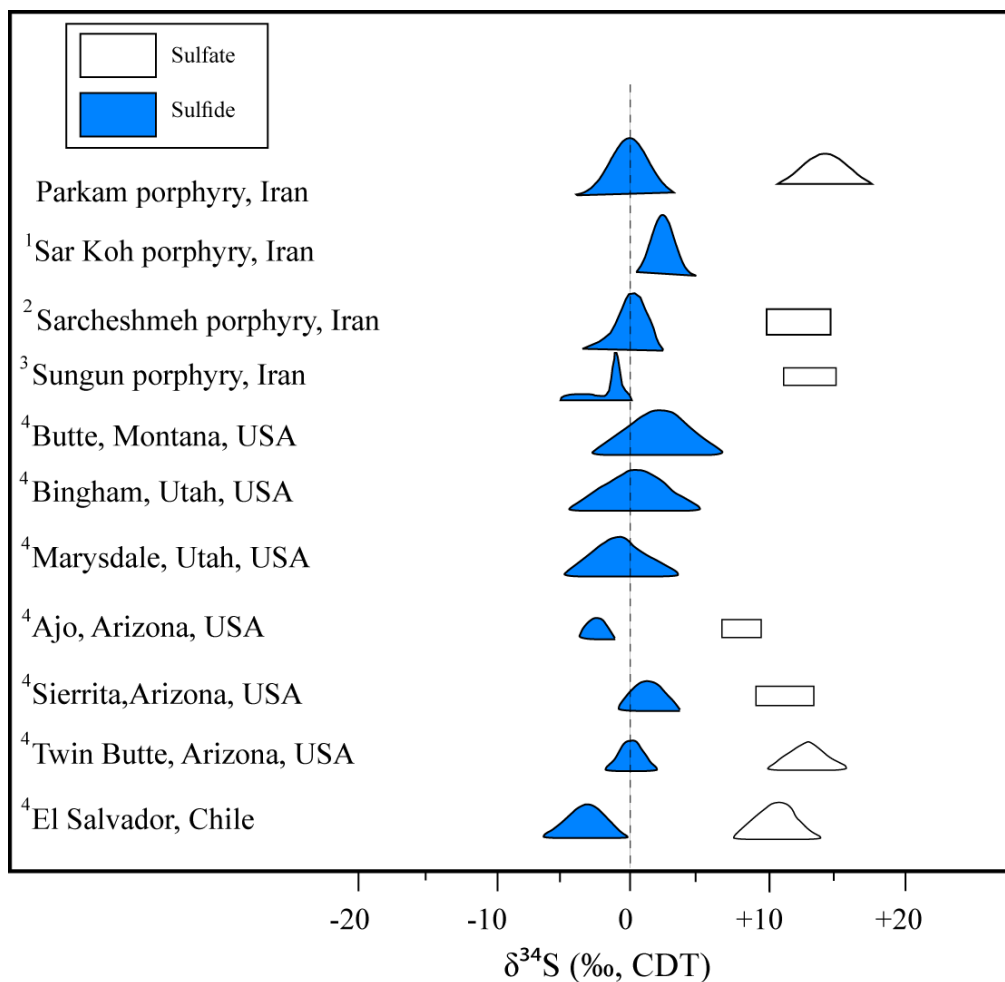
نتیجه گیری

مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی پیریت در کانسار مس پورفیری پرکام از -۰/۷ تا +۲/۹ در هزار متغییر می باشد و مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه های پیریت ۰/۸٪ است. کمترین مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه های کالکوپیریت ۲/۶٪- و بیشترین مقدار ۲/۳٪ است. مقدار متوسط $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه های کالکوپیریت کانسار پرکام ۰/۳٪+ می باشد. مقادیر ایزوتوپ گوگرد کانی های سولفیدی کانسار مس پورفیری پرکام گویای منشأ ماگمایی گوگرد در این کانسار می باشد. انیدریت نسبت به کانی های پیریت و کالکوپیریت در کانسار پرکام از $\delta^{34}\text{S}$ غنی تر

هستند و دارای مقادیر بیشتری از $\delta^{34}\text{S}$ می باشند. دمای محاسبه شده با استفاده از ایزوتوپ گوگرد جفت کانی انیدریت-پیریت از 263.3°C تا 441.9°C در تغییر است. مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ محلول گرمایی در کانسار پرکام از ۳/۰۸ تا ۵/۶۷ در تغییر می باشد که نشاندهنده اختلاط آب ماگمایی و آب جوی در تشکیل محلول گرمایی این کانسار می باشد. مقدار متوسط ایزوتوپ گوگرد سولفور کل موجود در محلول گرمایی موثر در تشکیل کانسار مس پورفیری پرکام $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = +5\%$ می باشد. این مقدار گویای این است که بخشی از گوگرد موثر در تشکیل این کانسار از گوگرد سنگین با منشأ قاره ای نشأت گرفته است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام تقریباً با مقادیر ایزوتوپ گوگرد این کانی ها در دیگر کانسارهای مس پورفیری زون ارومیه- دختر همخوانی دارد که گویای تاثیر فرایندهای مشابه در تشکیل این کانسارها می باشد.

تشکر و قدردانی

از حمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه دامغان در خصوص طرح پژوهشی شماره ۹۲/Geo/۱۱۶/۲۱۹ تقدیر و تشکر به عمل می آید. از جناب آقای مهندس تقی زاده، ریاست محترم امور اکتشافات معدن مس سرچشمه و آقای مهندس ایرانمنش به علت در اختیار گذاشتن اطلاعات و داده ها و کمک در نمونه برداری صمیمانه تشکر می شود. همچنین از خانم حکیمه محمدی لقب به خاطر جداسازی و آماده سازی نمونه ها سپاسگزاریم.



شکل ۹. مقایسه دامنه تغییرات مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی های سولفیدی و سولفاتی کانسار مس پورفیری پرکام با بعضی از کانسارهای مس پورفیری ایران و جهان. Ohmoto and Rye (2003), Calagari (2003),^۳ (1979) معانی جو و همکاران (۱۳۹۱)،^۱ Nourali and Mirnejad (2012).

منابع

- علیرضایی، س.، ۱۳۸۷، زمین شناسی کانسارها، نشر دانش امروز، ۱۱۵۵ صفحه (ترجمه)
- معانی جو، م.، مستقیمی، م.، عبدالهی ریس، م.، سپاهی گرو، ع.ا.، ۱۳۹۱، مطالعات سیستماتیک ایزوتوپ های پایدار گوگرد و سیالات درگیر گروه های رگچه های مختلف کانسار مس پورفیری سرچشمه، بر اساس داده های جدید، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۲، جلد ۴، ص ۲۱۷ - ۲۳۹.
- محمدی لقب، ح.، تقی پور، ن.، ۱۳۹۰، تکامل فیزیکی - شیمیایی سیال گرمایی در کانسار مس پورفیری سارا (پرکام)، استان کرمان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، جلد ۱، شماره ۱، ص ۱۱-۲۴.
- محمدی لقب، ح.، تقی پور، ن.، ایرانمنش، م.ر.، ۱۳۸۹، الگوی دگرسانی و کانی زایی کانسار مس پورفیری پرکام (پرکام)، شهر بابک، استان کرمان، نخستین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد
- مهندسین مشاور کان ایران، ۱۳۸۷، مطالعات زمین شناسی و دگرسانی در محدوده پرکام، ۸۷ صفحه
- Berberian.M., and King.G.C., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, Canadian Journal of Earth Sciences, Vol:18, p: 210-265
- Bethke.P.M., Rye.R.O., Stoffregen.R.E., Vikre.P.G., 2005, Evolution of the magmatic-hydrothermal acid-sulfate system at Summitville, Colorado: integration of geological, stable-isotope, and fluid-inclusion evidence, Chemical Geology, Vol: 215, p: 281-315
- Calagari.A.A., 2003, Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllitic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran, Journal of Asian Earth Sciences, Vol:21, p:767-780
- Chiba.H., Kusakabe.M., Hirano.S.I., Matsuo.S., Somiya.S., 1981, Oxygen isotope fractionation factors between anhydrite and water from 100 to 550°C, Earth and Planetary Science Letters, Vol:53, p:55-62
- Dimitrijevic.M., 1973, Geology of Kerman region: institute for geological and mining exploration and institution of nuclear and other mineral raw materials, Beograd-Yugoslavia, Iran Geol. Survey Rept. Yu/52.
- Field.C.W., and Gustafson.L.B., 1976, Sulfur isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile, Economic Geology, Vol: 71, p: 1533-1548
- Field.C.W., Zhang.L., Dilles.J.H., Rye.R.O., Reed.M.H., 2005, Sulfur and oxygen isotopic record in sulfate and sulfide minerals of early, deep, pre-Main Stage porphyry Cu-Mo and late Main Stage base-metal mineral deposits, Butte district, Montana, Chemical Geology, Vol: 215, p: 61-93
- Grinenko, V.A., Ustinov, V.I., Grinenko, L.N., 2008, Formation Conditions of Sulfide-Sulfate Assemblages in Hydrothermal Deposits: Isotopic and Fluid Inclusion Constraints, Geochemistry International, Vol: 46, No. 9, p: 945-950.
- Hassanzadeh.J., 1993, Metallogenic and tectono-magmatic events in SE sector of the Cenozoic active continental margin of Central Iran (Shahr-Babak, Kerman province), PH.D thesis, University of California, 201P.
- Nourali.S., Mirnejad.H., 2012, Hydrothermal evolution of the Sar-Kuh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: A fluid inclusion and sulfur isotope investigation, Jgeope, Vol: 2, p: 93-107
- Ohmoto.H., Rye.R.O., 1979, Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (Ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, (2nd Ed.)Wiley, New York, p: 509- 567
- Ohmoto.H., Lasaga.A.C., 1982, Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfides in hydrothermal systems, Geochim.Cosmochim. Acta, Vol:46, p:1727-1745
- Ohmoto.H., 1986, Stable isotope geochemistry of ore deposits. In J.W. Valley, H.P. Taylor, Jr., and J.R. O'Neil, eds., Reviews in Mineralogy, Volume 16: Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes, Mineralogical Society of America, p:491-560
- Ohmoto.H., Kaiser.C.J., and Geer.K.A., 1990, Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment-hosted basemetal deposits. In: H.M. Herbert & S.E. Ho eds., Stable Isotopes and Fluid Processes in Mineralisation: The Univ. of Western Australia Publication, No: 23, p:70-120
- Ohmoto.H., Goldhaber.M.B., 1997, Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (Ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, (2nd Ed.)Wiley, New York, p: 517- 612
- Taghipour.N., Aftabi.A.L., and Mathur.R., 2008, Geology and Re-Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran, Resource Geology, Vol: 58, Issue 2, p: 143-160
- Taylor.H.P.Jr., 1979. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal minerals deposit: In geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nded., Barnes, H.J. (ed), New York, John Wiley, p:236-277