

# تغییرات ایزوتوپی گوگرد کانی‌های سولفیدی در سامانه‌های پورفیری خوشه میدوک، کمان ماگمایی سنوزویک کرمان، جنوب خاور ایران

هادی محمد دوست<sup>۱</sup>، مجید قادری<sup>۲</sup> و جمشید حسن زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
 پژوهشگر، بخش علوم زمین‌شناسی و سیاره‌ای، مؤسسه فناوری کالیفرنیا، پاسادنا، امریکا  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶

## چکیده

داده‌های ایزوتوپ گوگرد در کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و مولیدنیت موجود در رگچه‌های نوع A، B، D و سامانه‌های پورفیری خوشه میدوک در بخش شمال باختری کمر بند مس کرمان نشانگر ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  نزدیک به صفر برای این سامانه‌هاست. ترکیب ایزوتوپی گوگرد برای کانسارهای پورفیری چاه‌فیروزه و ایجو و اندیس‌های سرنو، گود کلواری و کدر به ترتیب میان  $-۱/۴$  تا  $+۲/۵$  (میانگین  $+۰/۳۱$ )،  $-۱/۳$  تا  $+۱/۱$  (میانگین  $+۰/۰۷$ )،  $+۰/۱$  تا  $+۲/۴$  (میانگین  $+۰/۸۷$ )،  $+۰/۲$  تا  $-۱/۵$  (میانگین  $-۰/۱$ ) و  $-۴/۱$  تا  $+۱$  (میانگین  $-۱/۰۴$ ) در هزار است که می‌تواند معرف منبع ماگمایی باشد. همچنین دامنه محدود تغییرات ایزوتوپی و ترکیب ایزوتوپی مشابه برای سه گروه رگه نشان می‌دهد که با تحول سامانه گرمایی، تغییر و تحول چندانی در منبع اولیه و به نسبت همگن گوگرد رخ نداده است. مقایسه داده‌های حاصل از خوشه میدوک با داده‌های موجود در مورد برخی کانسارهای بخش میانی و جنوبی کمر بند کرمان پیشنهاد می‌کند که منشأ گوگرد در سامانه‌های پورفیری بخش شمال باختری و تا حدی بخش‌های میانی کمان ماگمایی سنوزویک کرمان از یک ماگمای مافیک تأمین شده که از گوشته سنگ‌کره‌ای زیرقاره‌ای (SCLM) متاسوماتیز شده منشأ گرفته و آلاینش با سنگ‌های پوسته قاره‌ای نیز بر ترکیب  $\delta^{34}\text{S}$  اثر گذار بوده است؛ در حالی که در بخش جنوبی، فرایندهای مرتبط با فرورانش و سیال‌های ناشی از آب دریا و رسوبات همراه، در ترکیب ایزوتوپی گوگرد نقش بنیادین داشته‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** مس پورفیری، کانی سولفیدی، ایزوتوپ گوگرد، KCMA، ایران

**\*نویسنده مسئول:** مجید قادری

E-mail: mghaderi@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

استفاده از داده‌های ایزوتوپ پایدار C، O، H، S برای تعیین منشأ و همچنین دمای تشکیل سیال‌های کانه‌ساز، کاربردی گسترده و سابقه‌ای طولانی دارد. به عنوان اولین کارها در این زمینه می‌توان به مطالعات (Jensen 1957) و (Ohmoto and Rye 1979) اشاره کرد.

اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های سبک مانند ایزوتوپ گوگرد می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با منشأ سیال‌های کانسارساز، دمای کانی‌سازی و شرایط فیزیکوشیمیایی نهشت کانی‌ها فراهم کند. به عنوان نمونه، نتایج ایزوتوپ گوگرد برای کانی‌های پیریت و اندریت در سامانه‌های پورفیری نشانگر وجود مقادیر متفاوتی از  $\text{SO}_4^{2-}$  و  $\text{H}_2\text{S}$  در سیال‌های گرمایی است که می‌تواند بازتابی از شرایط اکسیدان ماگمای آنها باشد (Rye, 2005). نظر به اینکه آب جزو اصلی تشکیل‌دهنده سیال‌های کانه‌ساز است؛ تشخیص منشأ آن کلید بنیادین کشف ژنر کانسارهاست (Hoefs, 2015).

تاکنون پژوهشگران مختلفی به مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار در کانسارهای پورفیری ایران پرداخته‌اند. در این پژوهش به بررسی ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی موجود در رگچه‌های برخی از سامانه‌های پورفیری خوشه میدوک در بخش شمال باختری کمر بند مس کرمان (شامل چاه‌فیروزه، ایجو، سرنو، گود کلواری و کدر) پرداخته شده است. هر کدام از این محدوده‌ها از دید میزان ذخیره و عیار کانی‌سازی متفاوت، برخی مانند چاه‌فیروزه و ایجو جزو کانسارهای پورفیری اقتصادی و برخی مانند سرنو، گود کلواری و کدر از دید کانی‌سازی ضعیف هستند و نیمه اقتصادی یا غیر اقتصادی به شمار می‌روند.

## ۲- موقعیت و زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

کمان ماگمایی ارومیه- دختر مهم‌ترین خاستگاه کانسارهای مس پورفیری ایران است و کانسارها و اندیس‌های گوناگون مس پورفیری در آن رخ داده‌اند که از آن جمله می‌توان به کانسارهای رده جهانی سرچشمه، سونگون، میدوک، درآلو،

چاه فیروزه، ایجو، کهنک، و بسیاری کانسارها و اندیس‌های دیگر اشاره کرد. بخش جنوب خاوری ارومیه- دختر که به نام کمان ماگمایی سنوزویک کرمان (KCMA) (Shafiei, 2008) شناخته می‌شود؛ به طول حدود ۵۰۰ کیلومتر و عرض میان ۴۰ تا ۸۰ کیلومتر به‌طور کلی پوشیده از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری مافیک تا فلسیک ائوسن با گرایش کالک‌آلکان بهنجار، توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن و توده‌های نفوذی کم‌ژرفا به سن میوسن و با گرایش آداکیتی است (Dimitrijevic, 1973; Hassanzadeh, 1993; Atapour and Aftabi, 2007; Taghipour et al., 2008). سازوکار پذیرفته شده برای تشکیل KCMA در ارتباط با مراحل پی در پی بسته شدن اقیانوس نوتیس و فرورانش آن به زیر ایران مرکزی در طول پالئوژن و در پی آن، برخورد قاره‌ای در نئوژن است (Förster, 1978; Berberian and King, 1981; Berberian et al., 1982; Dercourt et al., 1986; Mohajjel et al., 2003; Allen et al., 2004; Agard et al., 2005; Shafiei, 2008).

فعالیت ماگمایی در کمان ماگمایی سنوزویک کرمان بیشتر مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی- نفوذی ائوسن تا میوسن است. بیشترین شدت فعالیت‌های آتشفشانی در ائوسن میانی رخ داده و فعالیت‌های نفوذی نیز در زمان الیگومیوسن در اوج بوده است (Dimitrijevic, 1973; Hassanzadeh, 1993). در طول ائوسن پیشین، فعالیت ماگمایی مرتبط با کمان در KCMA با ماهیت بازیگ تا فلسیک و به‌صورت فعالیت‌های آتشفشانی و آذرآواری همراه با میان‌لایه‌های رسوبی در یک محیط دریایی آغاز شده است (کمپلکس بحر آسمان) (Dimitrijevic, 1973; Hassanzadeh, 1993). فعالیت بعدی در طول ائوسن میانی- پایانی رخ داده و سکانسی از سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری همراه با میان‌لایه‌های رسوبی (کمپلکس رازک) و همچنین توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی با گرایش کالک‌آلکان و به‌طور محلی توله‌ای (نوع جبال‌بارز) را تشکیل داده است (Ahmad and Posht Kuh, 1993; Shafiei et al., 2009). در طول ائوسن پایانی تا الیگوسن میانی، فعالیت ماگمایی در مقیاس محدودتر ادامه یافت و سنگ‌های آتشفشانی (کمپلکس هزار) و نفوذی‌های با ویژگی

پورفیری نیز مهم هستند. کانسارهایی همانند سرچشمه، میدوک، سرکوه و دره‌زار در ارتباط با توده‌های گرانودیوریتی (Hassanzadeh, 1993; Mirnejad et al., 2013; Parsapoor et al., 2014) و ذخایری مانند چاه‌فیروزه، ایجو و آبدر نیز در ارتباط با دیوریت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونوزودیوریت هستند (طالبی، ۱۳۸۴؛ شفیع‌بافتی، ۱۳۸۶؛ محمدزاده، ۱۳۸۶؛ عباس‌زاده، ۱۳۹۰؛ Mirnejad et al., 2013, 2014). به‌طور کلی نواحی مرکزی و شمال باختری کمربند مس کرمان از دید کانی‌سازی غنی‌تر هستند. این نواحی منطبق بر بخش‌های سبترتر پسته هستند که در اثر رژیم برخورد در مراحل پایانی تکامل کمربند ماگمایی کرمان در حدود ۴۵ تا ۵۰ کیلومتر سبترشدگی پیدا کرده و مولد فعالیت ماگمایی مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری بوده‌اند (شفیع‌بافتی، ۱۳۸۶؛ Aghazadeh et al., 2015, 2009; Shafiei et al., 2009).

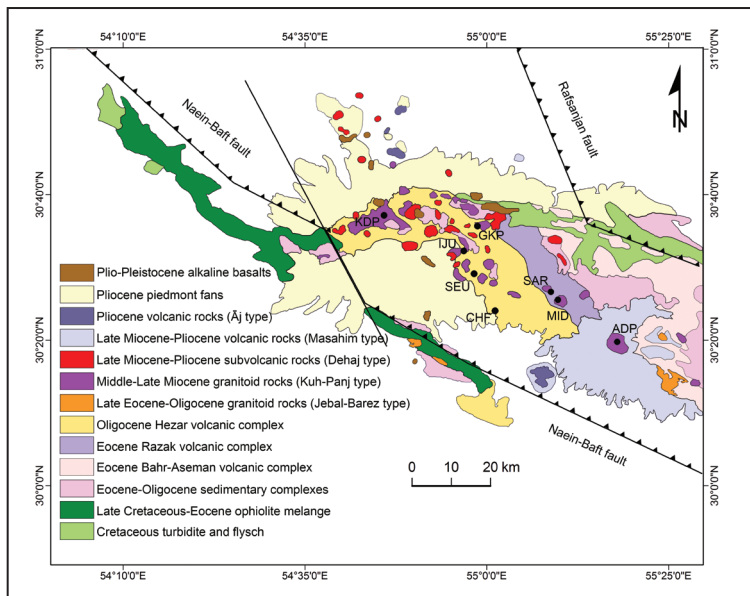
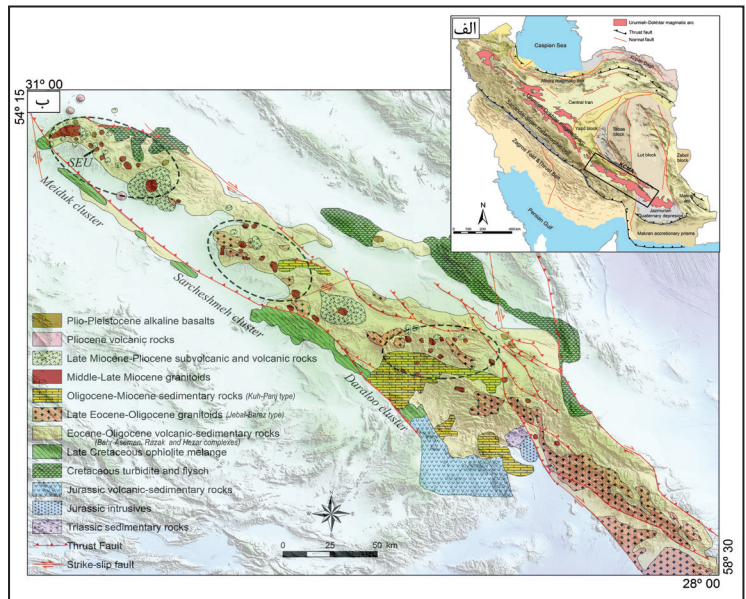
در کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان، سامانه‌های پورفیری در سه خوشه تمرکز یافته‌اند که به ترتیب از شمال باختر به جنوب خاور عبارتند از: خوشه میدوک، خوشه سرچشمه و خوشه درآلو (شکل ۱).

محدوده مورد مطالعه، در بخش شمال باختری این کمربند جای گرفته است که از دیدگاه فلزایی موسوم به خوشه میدوک است. از کانسارهای این محدوده می‌توان به معدن مس پورفیری میدوک و چند ذخیره و پتانسیل معدنی کوچک از جمله چاه‌فیروزه، ایجو، گود کلواری، چاه‌مسی، کدر و سارا (پرکام) اشاره کرد (شکل ۲).

پتاسیم بالا و شوشونیتی در این زمان شکل گرفتند (Hassanzadeh, 1993). شاخصه فعالیت ماگمایی در میوسن میانی-بالایی در KCMA جایگیری توده‌های گرانیتیویدی کم‌ژرفا (نوع کوه‌پنج) است و در پلیوسن، توده‌های نیمه‌ژرف، آتشفشان‌های چینه‌ای و گندهای فراوان داسیتی تا ریولیتی رخ دادند (Dimitrijevic, 1973; Shafiei, 2008) (شکل ۲).

در این کمربند، دو نوع سنگی شامل گرانیتویدهای نوع جبال‌بارز (ائوسن-الیگوسن) و گرانیتویدهای نوع کوه‌پنج (میوسن) در ارتباط با کانی‌سازی مس شناخته شده است (شفیع‌بافتی، ۱۳۸۶؛ Dimitrijevic, 1973; Hassanzadeh, 1993; Shafiei et al., 2009). گرانیتویدهای نوع جبال‌بارز از دید کانی‌سازی مس پورفیری به نسبت فقیر هستند و اهمیت کمتری دارند و مهم‌ترین نمودهای کانی‌سازی مس پورفیری در ارتباط با توده‌های توده‌های نفوذی کم‌ژرفا نوع کوه پنج است که در سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن-الیگوسن تزریق شده‌اند. گرانیتویدهای نوه کوه‌پنج بیشتر در بخش شمال باختری کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان دیده می‌شوند؛ در حالی که گرانیتویدهای نوع جبال‌بارز در طول این کمان پراکنده‌اند (شفیع‌بافتی، ۱۳۸۶). توده‌های نوع کوه‌پنج بیشتر ترکیب دیوریت، گرانودیوریت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونوزودیوریت و بافت پورفیری دارند. توده‌های گرانودیوریت اهمیت بیشتری دارند و ترکیبات کوارتز دیوریت و دیوریت

شکل ۱- الف) جایگاه کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان در نقشه زمین‌شناسی-ساختاری ایران (کادر مشکی رنگ) (با تغییرات از Stocklin, 1968; Alavi, 1991)، ب) نقشه ساده‌شده سنگ‌شناسی-ساختاری کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان، (با تغییرات از Shafiei, 2010). مهم‌ترین ذخایر و کانسارهای مس پورفیری در سه خوشه میدوک، سرچشمه و درآلو تمرکز دارند. پس‌زمینه DEM از داده‌های SRTM Global Digital Elevation Model, USGS, EROS Data Center.



شکل ۲- نقشه ساده شده زمین‌شناسی بخش شمال باختری کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان (خوشه میدوک) و جایگاه مهم‌ترین سامانه‌های پورفیری در آن. این نقشه بر پایه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ انار و ۱:۱۰۰,۰۰۰ دهج، انار، رباط، شهرابک، رفسنجان ۱ و پاریز سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. همان‌طور که مشخص است خوشه میدوک در دو سامانه گسل راندگی با مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد رفسنجان در شمال و ناین-بافت در جنوب دربر گرفته شده است. حروف اختصاری: ADP: آبدر، CHF: چاه‌فیروزه، GKP: گودکلواری، IJU: ایجو، KDP: کدر، MID: میدوک، SAR: سارا (پرکام)، SEU: سرنو.

### ۳- نمونه برداری و آماده سازی نمونه ها

برای مطالعه ایزوتوپی پایدار گوگرد، نمونه برداری با توجه به انواع رگچه ها (Gustafson and Hunt, 1975; Sillitoe, 2010) و دگرسانی مرتبط با آنها انجام گرفت. تجزیه ایزوتوپی گوگرد روی کانی های کالکوپیریت، پیریت و مولیبدنیت موجود در رگچه های مختلف نوع A، نوع B و نوع D انجام شد که بیشتر در دگرسانی های پتاسیک و فلیک تشکیل شده اند (شکل ۳) (جدول ۱). به طور کلی پاراژنز رگچه های مختلف در محدوده های مورد مطالعه به صورت زیر است:

پاراژنز رگچه های نوع A شامل کوارتز  $\pm$  کالکوپیریت  $\pm$  پیریت  $\pm$  مولیبدنیت  $\pm$  مگنتیت  $\pm$  بیوتیت  $\pm$  سریسیت  
 پاراژنز رگچه های نوع B شامل کوارتز  $\pm$  کالکوپیریت  $\pm$  پیریت  $\pm$  مولیبدنیت  $\pm$  بورنیت  $\pm$  مگنتیت  
 پاراژنز رگچه های نوع D به صورت کوارتز  $\pm$  کلریت  $\pm$  کلسیت  $\pm$  پیریت  $\pm$  کالکوپیریت  $\pm$  مولیبدنیت

به منظور جداسازی نمونه ها، ابتدا رگچه های مناسب از مغزه های حفاری و یا رخنمون انتخاب شد. سپس برای جدا کردن کانی های سولفیدی از دیگر کانی ها، ابتدا بخش های اضافی سنگ به دقت جدا شد تا بیشتر باطله از رگچه ها تفکیک شود. سپس نمونه ها تا حدی خرد شد که کانی های سولفیدی از یکدیگر و از کانی باطله جدا شود. در پایان، کانی های سولفیدی به صورت جدایش دستی در زیر میکروسکوپ دوچشمی جداسازی و سپس نمونه ها تا اندازه ۲۰۰ مش در هاون آگاتی پودر شدند و حدود ۵ گرم نمونه با خلوص بیش از ۹۹ درصد در ویال های مخصوص قرار داده و برای تجزیه فرستاده شد. ۳۴ نمونه از کانی های سولفیدی موجود در رگچه ها برای مطالعه ایزوتوپ گوگرد انتخاب و برای تجزیه به انستیتو ژئوشیمی گوانگژو چین فرستاده شد. اندازه گیری با استفاده از دستگاه طیف سنج جرمی (IRMS) IsoPrime100 stable isotope ratio mass spectrometer انجام شد.

آماده سازی نمونه های سولفیدی، با سوزاندن پودر کانی سولفیدی در حضور مواد اکسند ه همچون  $\text{CuO}$ ،  $\text{Cu}_2\text{O}$ ،  $\text{V}_2\text{O}_5$  و  $\text{O}_2$  و تهیه گاز  $\text{SO}_2$  صورت می گیرد. با گرمای مستقیم نیز می توان ترکیبات سولفاتی را به  $\text{SO}_2$  تبدیل کرد (Hoefs, 2015). توصیف نمونه ها و نتایج تجزیه های ایزوتوپ گوگرد در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۴- بحث و تحلیل نتایج

نتایج داده های ایزوتوپ گوگرد نشانگر آن است که ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  در همه محدوده ها بازه محدوده ای نزدیک به صفر دارد. بر پایه این نتایج، نسبت ایزوتوپی گوگرد برای کانسار پورفیری چاه فیروزه میان  $-1/4$  تا  $+2/5$  (میانگین  $+0/31$ )، برای ایجو میان  $-1/3$  تا  $+1/1$  (میانگین  $+0/07$ )، برای سرنو میان  $+0/1$  تا  $+2/4$  (میانگین  $+0/87$ )، برای گود کلواری میان  $+0/2$  تا  $-1/5$  (میانگین  $-0/1$ ) و برای کدر میان  $-4/1$  تا  $+1$  (میانگین  $-1/04$ ) متغیر است (شکل ۴). با توجه به ترکیب ایزوتوپی گوگرد در محیط های مختلف زمین شناسی (Hoefs, 2015)، همه نمونه ها در محدوده سنگ های گرانیتی قرار می گیرند و نشانگر منشأ ماگمایی برای گوگرد هستند.

با توجه به اینکه معدن میدوک، به عنوان یکی از مهم ترین کانسارهای کمر بند کرمان در بخش شمال باختری است؛ بررسی نتایج مربوط به این کانسار نیز اهمیت زیادی دارد. (Hassanzadeh (1993) و تقی پور (۱۳۸۶) مطالعه ایزوتوپ گوگرد را روی کانی های پیریت و کالکوپیریت و همچنین انیدریت کانسار میدوک انجام داده اند. (Hassanzadeh (1993) مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کانی های سولفیدی را میان  $-2/28$  تا  $+0/67$  گزارش کرده و تقی پور (۱۳۸۶) مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کانی های سولفیدی را میان  $+0/6$  تا  $+1/6$  و  $\delta^{34}\text{S}$  انیدریت را میان  $+11/5$  تا  $+19/4$  گزارش کرده است. بنابراین، ترکیب ایزوتوپی گوگرد کانی های سولفیدی برای کانسار میدوک نیز در محدوده  $-2/28$  تا  $+1/6$  % جای دارد که مشابه مقادیر به دست آمده برای دیگر سامانه های پورفیری در پژوهش پیش رو، در محدوده سنگ های گرانیتی قرار می گیرد.

به منظور محاسبه نسبت های ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  در  $\text{H}_2\text{S}$  سیال در تعادل با کانی های

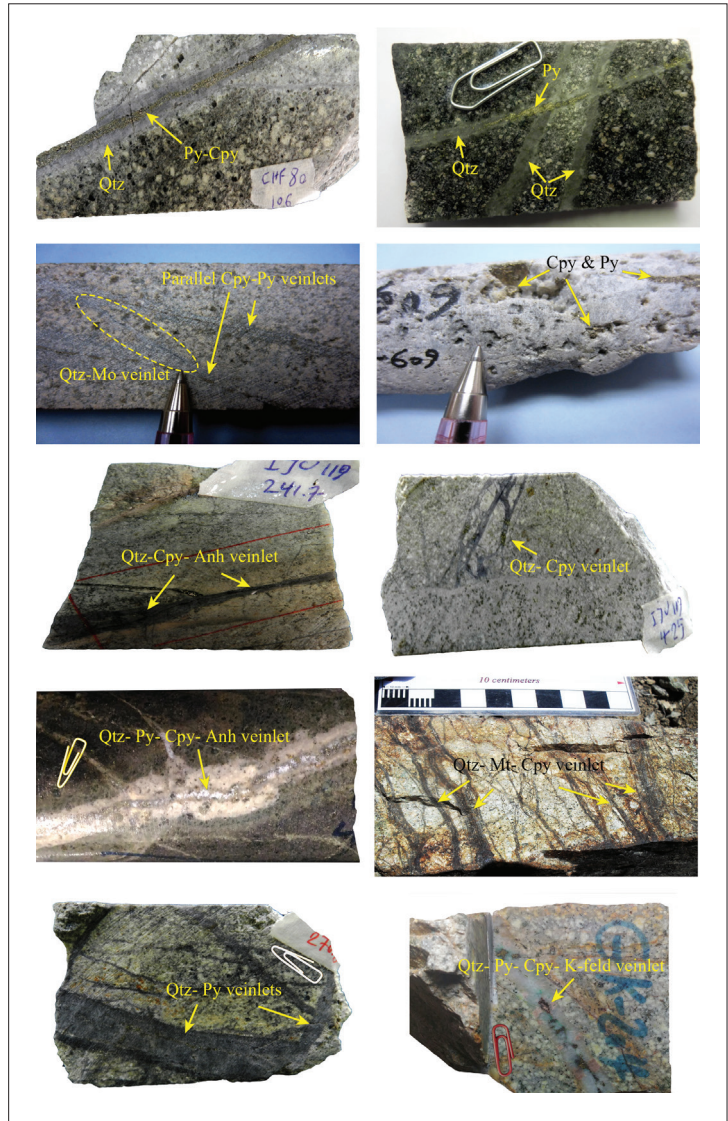
سولفیدی از نرم افزار اینترنی مربوط به این محاسبات استفاده شده که توسط دانشگاه Laval کانادا طراحی شده (Beaudoin and Therrien, 2004 and 2009) و به نشانی اینترنی <http://www2.ggl.ulaval.ca> قابل دسترس است. بدین منظور، ابتدا ضریب تفکیک  $(\ln \alpha 1000)$  برای هر کدام از کانی های سولفیدی با استفاده از دمای همگن شدگی میانبارهای سیال و سپس نسبت ایزوتوپی گوگرد در  $\text{H}_2\text{S}$  سیال به دست آمد (جدول ۲). فاکتور تفکیک برای کانی های پیریت و مولیبدنیت از معادله Ohmoto and Rye (1979) و برای کالکوپیریت از معادله Li and Liu (2006) استفاده شده است.

مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  در  $\text{H}_2\text{S}$  سیال گرمایی برای نمونه های مورد مطالعه، تغییرات ناچیزی را نسبت به ترکیب  $\delta^{34}\text{S}$  کانی سولفیدی نشان می دهد. با این حال دیده می شود که بر پایه نمودار (Hoefs (2015) ترکیب ایزوتوپ گوگرد در محدوده های مورد بررسی در بازه سنگ های گرانیتی قرار می گیرد.

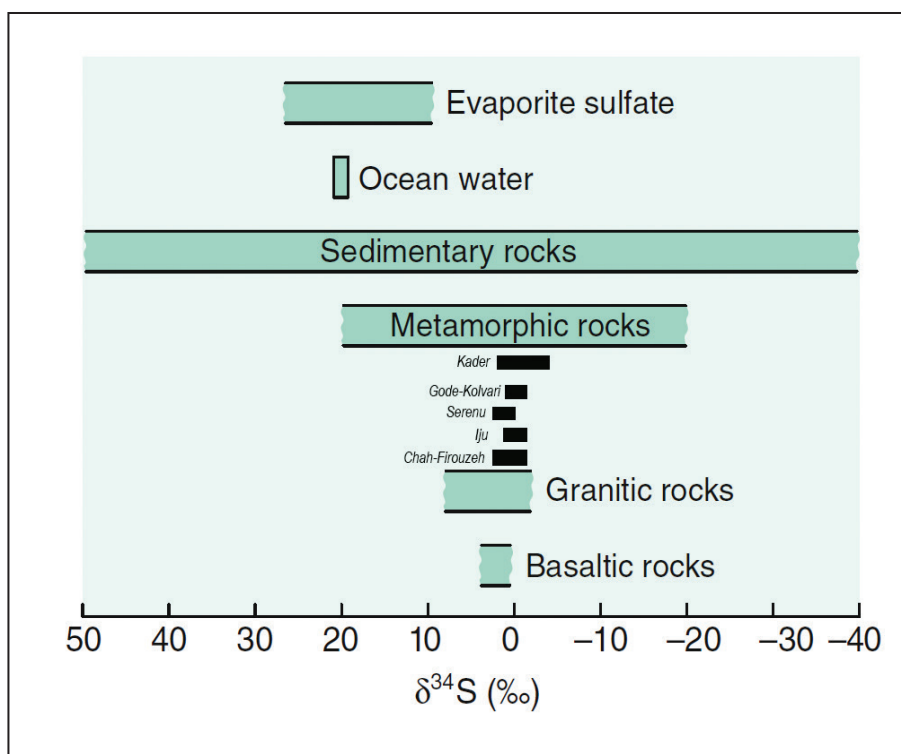
معمولاً در سنگ های گرانیتی سری مگنتیت مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  در حدود ۵ % است. اما در برخی موارد دیده می شود که مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کمتر و در حدود ۱ تا ۲ % است که به نسبت های ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  مربوط به گوشته نزدیک است. مقادیر مثبت  $\delta^{34}\text{S}$  می تواند مربوط به دخالت گوگرد سنگین موجود در سولفات در آب دریا و رسوبات باشد که در هنگام فرورانش به ناحیه تولید ماگما وارد می شود (Sasaki and Ishihara, 1979). اما اطلاعات زیادی راجع به ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  گوشته و به ویژه گوشته سنگ کراهی زیرقاره ای (SCLM) در دسترس نیست و بیشتر داده ها محدود به میانبارهای موجود در الماس مناطق کراتونی است. بر پایه این مشاهدات (Ionov et al. (1992) پیشنهاد دادند که ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  ۲ % معرف SCLM است. مقدار  $\delta^{34}\text{S}$  در میانبارهای سولفیدی در الماس های پریدوتیتی در حدود ۴- تا ۶+ % متغیر است. همچنین ایزوتوپ گوگرد اندازه گیری شده برای کانی های سولفیدی پریدوتیت SCLM اعداد مشابهی را نشان می دهد و در محدوده ۶- تا ۷+ % قرار دارد (Giuliani et al., 2016؛ شکل ۵). بنابراین به نظر می رسد ترکیب ایزوتوپی گوگرد در همه محدوده های مورد مطالعه، انطباق مناسبی با سولفورهای منشأ گرفته از یک ماگمای مافیک گوشته سنگ کراهی زیرقاره ای (SCLM) متاسوماتیز شده دارد که آرایش با سنگ های سنگ کراهی نیز هر چند کم رنگ، اما اثر گذار بوده است. بر خلاف سامانه های پورفیری مناطق میانی و جنوبی کمر بند کرمان که به صورت شاخصی مقادیر مثبت را نشان می دهند؛ مقادیر کم  $\delta^{34}\text{S}$  در محدوده های مورد مطالعه می تواند ناشی از تفریق ایزوتوپی میان  $\text{H}_2\text{S}$  و  $\text{SO}_4^{2-}$  باشد. همچنین رخداد انیدریت و همراهی آن با کانی های سولفیدی که در بیشتر محدوده ها دیده می شود؛ سبب کاهش مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  در کانی های سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت شده است.

بر پایه مطالعات انجام شده در کانسارهای پورفیری و اپی ترمال شیلی، میزان متفاوت اکسیژن در یک ماگمای کالک آلکانل زایا می تواند در مراحل تشکیل کانی های مختلف سولفوری دخیل باشد. این ماگماها معمولاً در زمان تفریق در ژرفا به دلیل حضور  $\text{H}_2\text{SO}_4$  در میزان  $\delta^{34}\text{S}$  غنی هستند (که از گازهای ماگمایی  $\text{H}_2\text{S}$ ،  $\text{SO}_2$  و  $\text{HCl}$  منشأ می گیرد). میزان ایزوتوپ گوگرد در مناطق مربوطه کمتر از  $+1/6$  % در دگرسانی پتاسیک، بالاتر از  $+6$  % در پهنه کوارتز-سریسیت و زیر  $+10$  % در محدوده همیاتی کانی های آلونیت و انیدریت است. در مراحل بعدی روند تفریق،  $\text{H}_2\text{S}$  و  $\text{SO}_2$  باقی مانده با تهی شدگی  $\delta^{34}\text{S}$  همراه است و در نتیجه شرایط اکسیدان در سطح، گوگرد به صورت خالص شکل می گیرد و میزان  $\delta^{34}\text{S}$  در آن به کمتر از  $-7$  % می رسد. ترکیب ایزوتوپی گوگرد در برخی انواع کانساری در شکل ۶ ارائه شده است. همان طور که دیده می شود در سامانه های پورفیری، سولفیدها مقادیر کمی مثبت تا حدود  $-5$  % را نشان می دهند؛ در حالی که مقادیر ایزوتوپ گوگرد برای کانی های سولفاتی به طور شاخصی مثبت است و میان  $+8$  تا حدود  $+17$  % را نشان می دهد.





شکل ۳- نمونه‌هایی از انواع رگچه‌ای در محدوده‌های پورفیری مورد مطالعه. حروف اختصاری: Anh: انیدریت، Cpy: کالکوپیریت، K-feld: پتاسیم فلدسپار، Mo: مولیبدنیت، Mt: مگنتیت، Py: پیریت، Qtz: کوارتز.



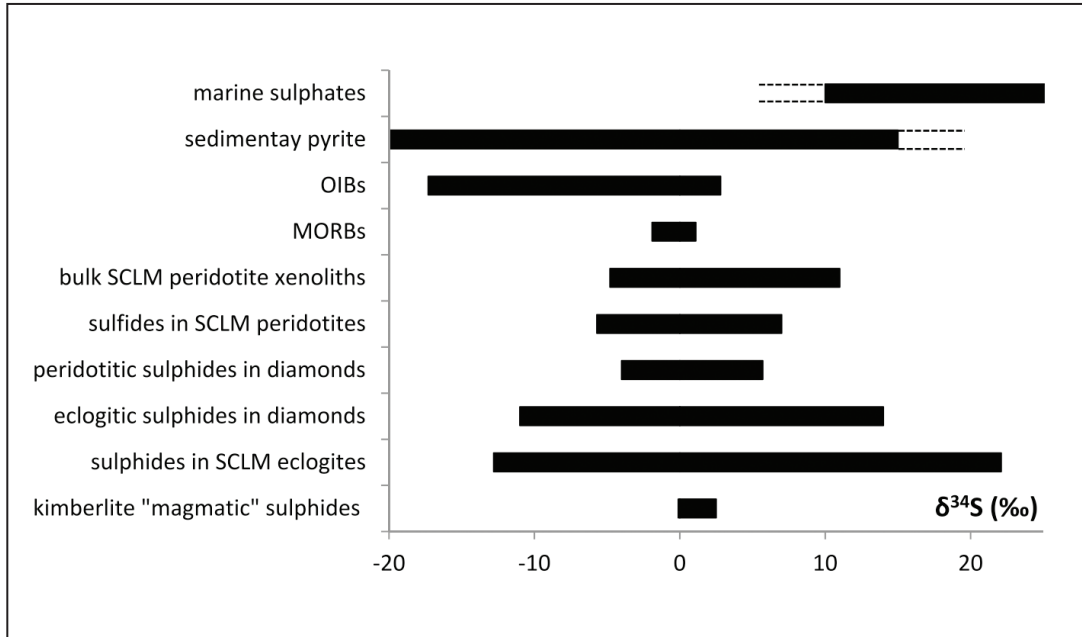
شکل ۴- ترکیب ایزوتوپی گوگرد در سامانه‌های پورفیری بارور و نابارور مورد مطالعه در خوشه میدوک. نمودار از (Hoefs, 2015).

جدول ۱- نتایج تجزیه ایزوتوپ گوگرد در کانی‌های سولفیدی. حروف اختصاری: Anh: اندریت، Cpy: کالکوپیریت، Mo: مولیدنیت، Mt: مگنتیت، Py: پیریت، Qtz: کوارتز، Ser: سرسیت.

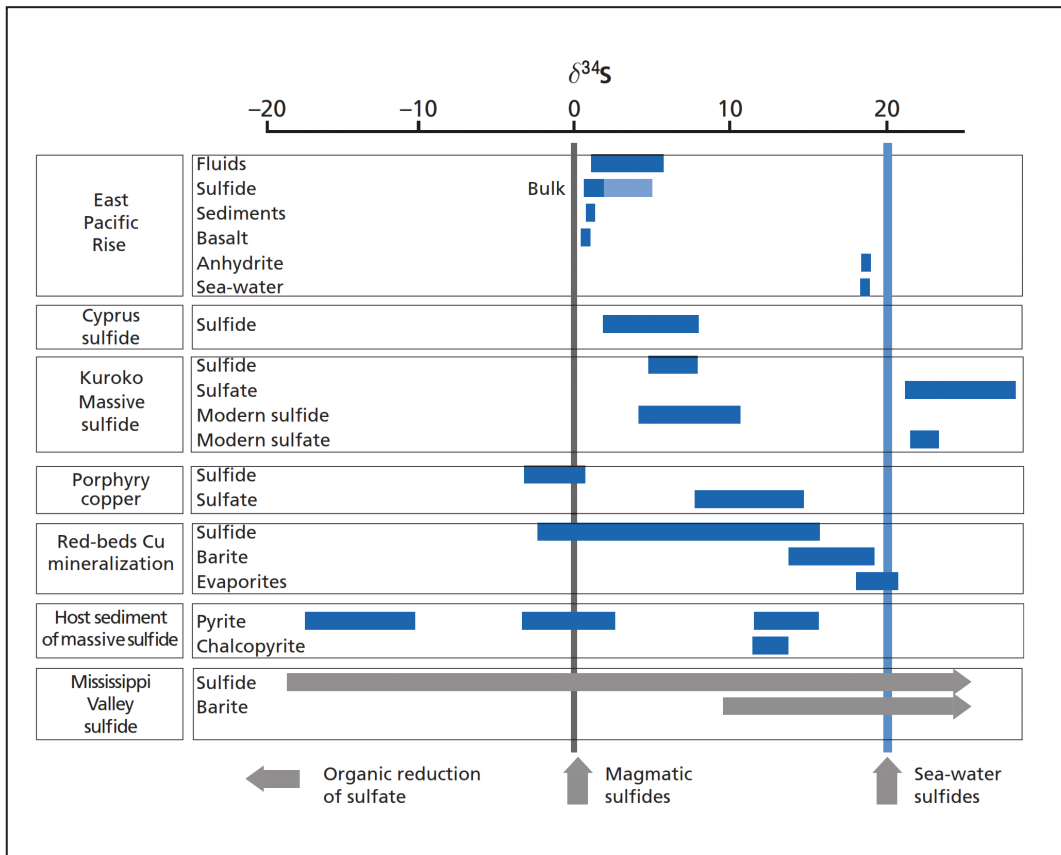
کانسار / اندیس	نمونه	نوع رگچه	پاراژنز	ژرفا (متر)	دگرسانی	کانی	$\delta^{34}\text{S}$ (‰ CDT)
ایجو	IJU 05-S1	نوع A	Qtz+Mt+Py	126	پتاسیک- فلیک	پیریت	0.2
	IJU 05-S2	نوع B	Qtz+Py+Cpy	148	فلیک	پیریت	0.1
	IJU 05-S3	نوع B	Qtz+Py+Cpy	148	فلیک	کالکوپیریت	- 0.6
	IJU 14-S4	نوع A	Qtz+Mt+Py	280	فلیک	پیریت	1.1
	IJU 14-S5	نوع B	Qtz+Py+Cpy	188	پتاسیک- فلیک	کالکوپیریت	1.1
	IJU 14-S6	نوع B	Qtz+Py+Cpy	188	فلیک	پیریت	0.2
	IJU 14-S7	نوع B	Qtz+Py+Cpy	244	فلیک	کالکوپیریت	-1.3
	IJU 14-S8	نوع B	Qtz+Py+Cpy	244	فلیک	پیریت	0.4
	IJU 09-S9	نوع D	Qtz+Py	110	فلیک	پیریت	- 0.5
چاه فیروزه	CHF 80-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Mo+Anh	438	پتاسیک	مولیدنیت	-1.3
	CHF 80-S2	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Mo+Anh	438	پتاسیک	پیریت	0.2
	CHF 80-S3	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Mo+Anh	438	پتاسیک	کالکوپیریت	0.5
	CHF 80-S4	نوع D	Qtz+Py	219	پتاسیک	پیریت	0.7
	CHF 80-S5	نوع A	Qtz+Mt+Py	219	پتاسیک	پیریت	- 0.3
	CHF 118-S6	نوع A	Qtz+Mt+Py	472	فلیک	پیریت	1.1
	CHF 118-S7	نوع B	Qtz+Py+Cpy	472	فلیک	کالکوپیریت	-1.4
	CHF 118-S8	نوع A	Qtz+Mt+Py+Cpy	88	فلیک	پیریت	1.4
	CHF 118-S9	نوع A	Qtz+Mt+Py+Cpy	88	فلیک	کالکوپیریت	2.5
	CHF 119-S10	نوع B	Qtz+Py+Mo+Cpy	380	پتاسیک- فلیک	پیریت	- 0.7
	CHF 119-S11	نوع B	Qtz+Py+Mo+Cpy	380	پتاسیک- فلیک	کالکوپیریت	0.1
	CHF 119-S12	نوع B	Qtz+Py+Mo+Cpy	112	پتاسیک- فلیک	مولیدنیت	0.5
کدر	CHF 119-S13	نوع D	Qtz+Py	112	پتاسیک- فلیک	پیریت	0.8
	KAR 01-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Ser+Anh	269	پتاسیک- فلیک	کالکوپیریت	- 4.1
	KAR 01-S2	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Ser+Anh	269	پتاسیک- فلیک	پیریت	-2.8
	KAR 01-S3	نوع B	Qtz+Py	270	پتاسیک- فلیک	کالکوپیریت	1
	KAR 01-S4	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Anh	450	فلیک	کالکوپیریت	0.1
	KAR 01-S5	نوع B	Qtz+Py+Cpy+Anh	450	فلیک	پیریت	0.6
سرنو	SEU 03-S1	نوع B	Qtz+Py+Anh	56	پتاسیک- فلیک	پیریت	0.1
	SEU 02-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	269	فلیک	کالکوپیریت	0.1
	SEU 02-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	269	فلیک	پیریت	0.9
	SEU 02-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	240	فلیک	کالکوپیریت	2.4
گود کلوری	GKP-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	رخنمون	فلیک- آرزبلیک	کالکوپیریت	-1.5
	GKP-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	رخنمون	فلیک- آرزبلیک	کالکوپیریت	0.2
	GKP-S1	نوع B	Qtz+Py+Cpy	رخنمون	فلیک- آرزبلیک	پیریت	1

جدول ۲- محاسبه فاکتور تفکیک و ترکیب ایزوتوپی گوگرد در  $H_2S$  سیال.

کانسار / اندیس	نمونه	$\delta^{34}S$ کانی (‰ CDT)	دمای همگن‌شدگی (°C)	$1000 \ln \alpha$	$\delta^{34}S$ سیال (‰)
ایجو	IJU 05-S1	0.2	470	0.7	-0.5
	IJU 05-S2	0.1	470	0.7	-0.6
	IJU 05-S3	-0.6	470	0.1	-0.7
	IJU 14-S4	1.1	290	1.3	-0.2
	IJU 14-S5	1.1	290	0.2	0.9
	IJU 14-S6	0.2	290	1.3	-1.1
	IJU 14-S7	-1.3	290	0.2	-1.5
	IJU 14-S8	0.4	290	1.3	-0.9
	IJU 09-S9	-0.5	350	1	-1.5
چاه‌فیروزه	CHF 80-S1	-1.3	350	1.2	-2.5
	CHF 80-S2	0.2	350	1	-0.8
	CHF 80-S3	0.5	350	0.1	0.4
	CHF 80-S4	0.7	470	0.7	0
	CHF 80-S5	-0.3	470	0.7	-1
	CHF 118-S6	1.1	380	0.9	0.2
	CHF 118-S7	-1.4	380	0.1	-1.5
	CHF 118-S8	1.4	380	0.9	-0.5
	CHF 118-S9	2.5	380	0.1	2.4
	CHF 119-S10	-0.7	435	0.8	-1.5
	CHF 119-S11	0.1	435	0.1	0
	CHF 119-S12	0.5	435	0.9	-0.4
	CHF 119-S13	0.8	435	0.8	0
کدر	KAR 01-S1	-4.1	445	0.1	-4.2
	KAR 01-S2	-2.8	445	0.8	-3.6
	KAR 01-S3	1	570	0.1	0.9
	KAR 01-S4	0.1	600	0.1	0
	KAR 01-S5	0.6	600	0.5	0.1
سرنو	SEU 03-S1	0.1	295	1.2	-1.1
	SEU 02-S1	0.1	588	0.1	0
	SEU 02-S1	0.9	588	0.5	0.4
	SEU 02-S1	2.4	295	0.2	2.2
گود کلواری	GKP-S1	-1.5	360	0.1	-1.6
	GKP-S1	0.2	415	0.1	0.1
	GKP-S1	1	415	0.8	0.2



شکل ۵- ترکیب ایزوتوپی گوگرد در برخی محیط‌های زمین‌شناسی (Giuliani et al., 2016).



شکل ۶- ترکیب ایزوتوپی گوگرد در برخی از کانسارهای سولفیدار (Allègre, 2008).

می‌کند تا مقادیر اضافی  $H_2S$  مورد نیاز برای ته‌نشست مقادیر قابل ملاحظه از کانی‌های سولفیدی، مانند کالکوپریت، بورنیت و پیریت تأمین شود که شاخص کانسارهای پورفیری هستند (Wilson et al., 2007).

بررسی نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد موجود در کانی‌های سولفیدی در دیگر سامانه‌های پورفیری کرمان (Hassanzadeh, 1993; Mirnejad et al., 2013; Parsapoor et al., 2014; Parsapoor et al., 2015؛ تقی‌پور، ۱۳۸۶؛ صالحیان، ۱۳۸۹؛ کاشانی، ۱۳۹۱؛ معانی‌جو و همکاران، ۱۳۹۱؛ تقی‌پور و درانی، ۱۳۹۲؛ کلهر پریدری و همکاران، ۱۳۹۲؛ محبی و همکاران، ۱۳۹۳) مؤید این نکته است که بیشتر این سامانه‌ها ترکیب ایزوتوپی گوگرد نزدیک به ۰ ‰ دارند و به‌طور کلی مقادیر کمتر از ۵- ‰ و بیشتر از ۸+ ‰ معمول نیستند (شکل ۷).

همچنین یک روند کاملاً واضح از تغییرات ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}S$  سولفیدی از بخش جنوب خاوری به سوی شمال باختری دیده می‌شود. این تغییرات به گونه‌ای است که سامانه‌های پورفیری بخش جنوب خاوری کمر بند کرمان به روشنی مقادیر  $\delta^{34}S$  مثبت دارد (حدود ۴ تا ۸ در هزار) و در بخش میانی ترکیب ایزوتوپی نزدیک به صفر بوده (حدود ۲ تا ۰ در هزار) و در بخش شمالی که مطابق بر خوشه میدوک است کمی منفی می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸). همچنین ارتباط معناداری میان سن جایگیری (یا کانی‌سازی) سامانه‌های پورفیری کمر بند ماگمایی سنوزویک کرمان دیده می‌شود (جدول ۳ و شکل ۹)، به‌گونه‌ای که سامانه‌های کهن تر دارای مقادیر مثبت تر  $\delta^{34}S$  هستند و سامانه‌های جوان تر مقادیر نزدیک به صفر و کمی منفی نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند بازتاب این نکته باشد که در سامانه‌های کهن تر و به‌ویژه کهن تر از میوسن زیرین، تأثیر ترکیب ایزوتوپی گوگرد مربوط به سیال‌ها و رسوبات حاصل از فرورانش نوتیس به زیر پوسته قاره‌ای ایران مرکزی و همچنین آرایش قابل توجه با سنگ‌های پوسته قاره‌ای موجب شده است که ترکیب ایزوتوپی گوگرد به سوی مقادیر مثبت میل کند. به تدریج و در مراحل برخورد و پس از برخورد، نقش سیال‌ها و فعالیت ماگمایی حاصل از فرورانش کم رنگ‌تر و در عوض، رژیم زمین‌ساختی برخورد و پس از برخورد سبب تغییر شکل و افزایش سبزی پوسته شده است. در این زمان، سنگ‌های مافیک زیرین به رخساره گارت آمفیبولیت تبدیل شده و منبع مناسبی برای تشکیل ماگماهای مس‌دار ایجاد کرده‌اند و نقش فرایندهایی مانند متاسوماتیزم و ذوب بخشی سنگ‌کره زیر قاره (Asadi et al., 2014; Aghazadeh et al., 2015؛ Dimitrijevic, 1973) به زایش ماگمای مافیک و با گرایش آداکتیتی شده است (Hassanzadeh, 1993; Atapour and Aftabi, 2007; Shafiei, 2008; Shafiei et al., 2009; Asadi et al., 2014; Aghazadeh et al., 2015). افزایش دما، تحرک دوباره و ذوب SCLM و/یا پوسته مافیک زیرین جوان ماگمای اکسیدان غنی از گوگرد و فلز با پتانسیل مناسب برای کانه‌زایی نوع پورفیری ایجاد می‌کند (Richards, 2009).

با توجه به خاستگاه پوسته زیرین و گوشته‌ای این ماگمای مافیک، ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}S$  آن احتمالاً منفی است و در طی بالا آمدگی و تفریق تا حدی نیز با سنگ‌های پوسته‌ای آرایش پیدا کرده و در نهایت، نسبت ایزوتوپی گوگرد به مقادیر منفی نزدیک به صفر تعدیل و اصلاح شده است (جدول ۳ و شکل ۸).

با توجه به اینکه رخداد کانی‌های سولفاتی در بیشتر سامانه‌های پورفیری کمر بند کرمان گزارش شده است؛ تفریق ایزوتوپی گوگرد میان  $H_2S$  و  $SO_4^{2-}$  و همچنین همراهی اندریت با کانی‌های سولفیدی به‌تنهایی نمی‌تواند علت کاهش مقدار  $S^{34}$  در کانی‌های سولفیدی سامانه‌های جوان‌تر باشد و یک منشأ مافیک با ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}S$  منفی و نزدیک به صفر در تغییرات نسبت ایزوتوپی گوگرد به‌ویژه در بخش شمالی KCMA مؤثر بوده است.

برای تعیین منشأ گوگرد در سنگ‌های ماگمایی به اطلاع از متغیرهای مختلف، مانند فوگاسیت، چگونگی زایش گوگرد انحلال یافته در مذاب و مهم‌ترین موارد در تاریخچه گاززدایی ماگما نیاز است (Hoefs, 2015). گوگرد می‌تواند به هردو شکل سولفید و سولفات و در چهار فرم متفاوت در ماگما حضور داشته باشد: محلول در مذاب، به‌صورت یک مذاب سولفیدی ناآمیخته، به‌صورت فاز گازی مستقل، به‌صورت کانی‌های مختلف سولفیدی و سولفاتی (Hoefs, 2015).

با توجه به چیرگی کانی‌های سولفیدی در سامانه‌های پورفیری، گوگرد در سیال کانه‌ساز از نوع احیایی و کمپلکس‌های غالب آن  $H_2S$  و  $HS^-$  است. یکی از دلایل این امر می‌تواند احیای غیرآلی سولفات باشد که به گسترش بیشتر  $H_2S$  در سامانه کمک می‌کند (Wilson et al., 2007).

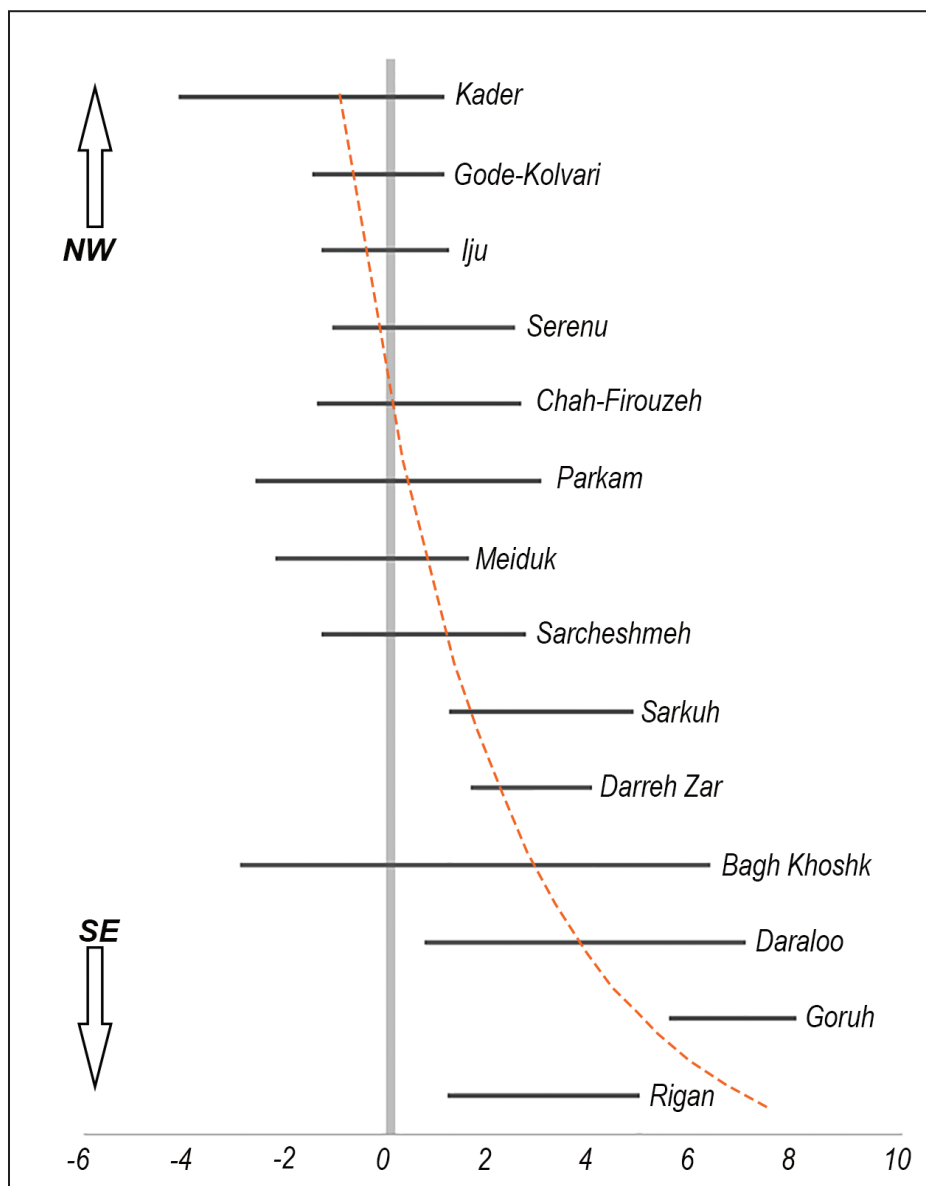
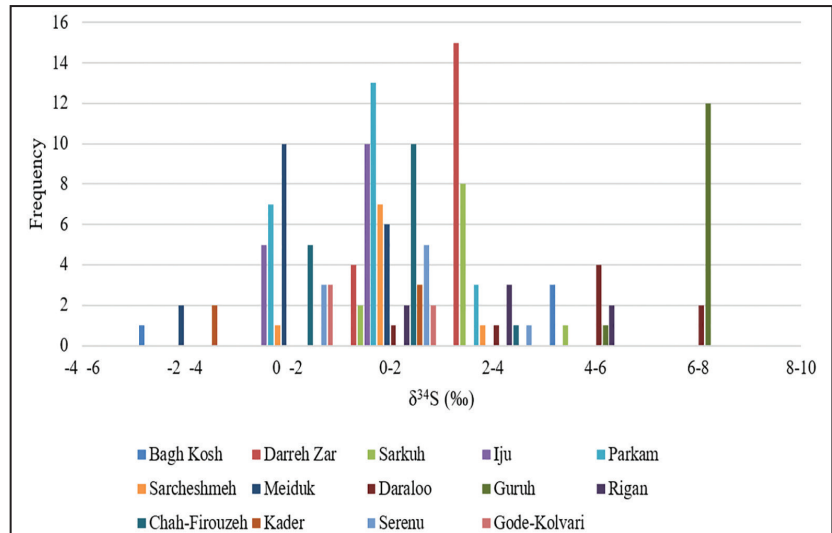
به‌طور کلی، با وجود ارتباط نزدیک نسبت ایزوتوپی  $\delta^{34}S$  کانسارهای پورفیری با منشأ ماگمایی، این کانسارها بازه گسترده‌ای از مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{34}S$  دارند (Field et al., 2005; Rye, 2005). این گوناگونی و گستردگی می‌تواند بازتابی از آرایش با سنگ‌های دیواره با مقادیر مختلف  $\delta^{34}S$  در کانی‌های سولفیدی یا سولفاتی باشد و یا در اثر فرایندهای پس از فعالیت ماگمایی مانند گاززدایی از  $SO_2$  و تسهیم نامتناسب (disproportionation) باشد. تسهیم نامتناسب واکنشی است که طی آن یک ماده به‌صورت همزمان اکسید و احیا می‌شود و دو محصول مختلف به‌وجود می‌آورد. مقادیر  $\delta^{34}S$  کانی‌های سولفیدی در کانسارهای پورفیری به‌صورت شاخص نزدیک به ۰ ‰ است و داده‌های بسیاری از کانسارهای پورفیری بازه میانگین ۰ تا ۵ ‰ را برای این نوع از کانسارها نشان می‌دهد که منطبق بر منشأ ماگمایی برای گوگرد است (Shanks, 2014). مقادیر کمتر از صفر و منفی  $\delta^{34}S$  سولفیدها می‌تواند نشانگر ته‌نشست کانی‌های سولفیدی از یک سیال سولفاتی (اکسیدان) (Rye, 1993; Wilson et al., 2007) و مقادیر بالاتر (مثبت)  $\delta^{34}S$  آنها می‌تواند مرتبط با گوناگونی در ترکیب کلی ایزوتوپ گوگرد ماگما باشد. همچنین بودجه کلی گوگرد ماگمایی، سهم گوناگونی از منشأهای مختلف مانند گوشته، سیال‌های پهنه فرورانش، آب دریا و یا آرایش با سنگ‌های دیواره دارد که به مقادیر مثبت  $\delta^{34}S$  برای کانی‌های سولفیدی می‌انجامد (Sasaki et al., 1984; John et al., 2010; Shanks, 2014).

اگر چه سولفیدها با منشأ ماگمایی، مقادیر ایزوتوپی گوگرد نزدیک به ۰ ‰ دارند؛ اما بسیاری از کانسارهای پورفیری به‌صورت شاخص مقادیر  $\delta^{34}S$  منفی نشان می‌دهند. این کانسارها به‌ویژه در فیلیپین و بریتیش کلمبیا کانادا مرتبط با توده‌های آلکالن و در شیلی و جنوب باختری آمریکا مرتبط با توده‌های کالک آلکالن هستند (Ohmoto and Rye, 1979; Heithersay and Walshe, 1995; Deyell, 2005; Wilson et al., 2007; Wolfe and Cooke, 2011).

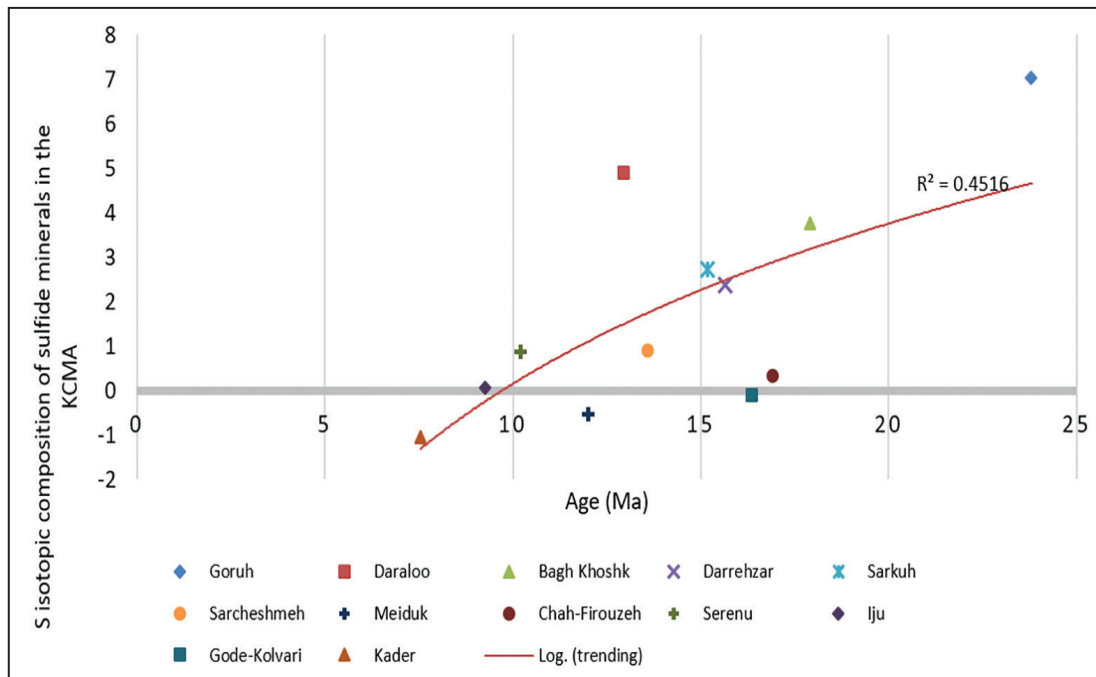
جذب گوگرد پوسته توسط ماگما و گاززدایی یا تغییر در فازهای  $H_2S$  و  $SO_2$  از جمله مهم‌ترین فرایندهای تفریق ایزوتوپی در ماگما هستند (Hoefs, 2015). ماگماهای به شدت اکسیدان گاززدایی شده مقادیر زیادی  $SO_2$  به‌صورت گاز آزاد می‌کنند. دی‌اکسید گوگرد در دمای حدود ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، دچار تسهیم نامتناسب می‌شود و به ازای یک مول  $H_2S$  حدود سه مول  $SO_4^{2-}$  تولید می‌کند (Rye et al., 1992; Rye, 1993). اگر این فرایند منبع اولیه برای  $H_2S$  سیال در کانسارهای پورفیری باشد؛ پس سولفات، فرم اصلی گوگرد آنگین در سیال‌های کانه‌دار است. در حالی که مطالعات بی‌شمار پارائز کانسارهای پورفیری نشان داده‌اند که هم در کانسنگ و هم در سنگ‌های دگرسان شده، کانی‌های سولفیدی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای چیره بر سولفات‌ها هستند (Wilson et al., 2003; Seedorff et al., 2005; Cannell et al., 2008; Vry et al., 2010). دلیل این امر آن است که  $SO_4^{2-}$  که در اثر تسهیم نامتناسب  $SO_2$  تولید شده است؛ احتمالاً به سوی محیط‌های نزدیک به سطح مهاجرت می‌کند. همچنین به عنوان یک فرایند جایگزین، احیای غیرآلی سولفات که در سامانه‌های پورفیری رخ می‌دهد؛ کمک



شکل ۷- ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  در سامانه‌های پورفیری کمرند مس کرمان. داده‌های ایزوتوپ گوگرد از: Hassanzadeh (1993); Mirnejad et al. (2013) Parsapoor et al. (2014); Parsapoor et al. (2015) تقی‌پور (۱۳۸۶)؛ صالحیان (۱۳۸۹)؛ کاشانی (۱۳۹۱)؛ معانی‌جو و همکاران (۱۳۹۱)؛ تقی‌پور و درانی (۱۳۹۲)؛ کلهر پریدری و همکاران (۱۳۹۲)؛ محبی و همکاران (۱۳۹۳).



شکل ۸- تغییرات نسبت ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی کمان ماگمایی سنوزوییک کرمان. همان‌گونه که دیده می‌شود یک روند مشخص از مقادیر مثبت در بخش‌های جنوب خاوری کمرند تا مقادیر کمی منفی در بخش‌های شمال باختری دیده می‌شود. داده‌های ایزوتوپ گوگرد از: Hassanzadeh (1993); Mirnejad et al. (2013); Parsapoor et al. (2014); Parsapoor et al. (2015) تقی‌پور (۱۳۸۶)؛ صالحیان (۱۳۸۹)؛ کاشانی (۱۳۹۱)؛ معانی‌جو و همکاران (۱۳۹۱)؛ تقی‌پور و درانی (۱۳۹۲)؛ کلهر پریدری و همکاران (۱۳۹۲)؛ محبی و همکاران (۱۳۹۳).



شکل ۹- روند تغییرات میانگین ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  نسبت به زمان جای‌گیری توده‌های نفوذی کمر بند ماگمایی سنوزویک کرمان. داده‌های سن سنجی از: Mohammaddoost et al. (2017); Aghazadeh et al. (2015); Mirnejad et al. (2013); McInnes et al. (2003); کاشانی (۱۳۹۱).

جدول ۳- میانگین نسبت ایزوتوپی گوگرد در برخی کانسارهای مس پورفیری کمر بند کرمان به همراه سن U-Pb روی زیر کن.

کانسار	میانگین ترکیب $\delta^{34}\text{S}$	سن (میلیون سال)	منبع داده‌های سن سنجی
گروه	+ 7.01	23.8	کاشانی (۱۳۹۱)
در آلو	+ 4.9	12.96	Aghazadeh et al. (2015)
باغ خشک	+ 3.76	17.9	Aghazadeh et al. (2015)
دره زار	+ 2.36	15.66	Aghazadeh et al. (2015)
سرکوه	+ 2.73	15.18	Mirnejad et al. (2013)
سرچشمه	+ 0.9	13.6	McInnes et al. (2003)
میدوک	- 0.52	12.5	McInnes et al. (2003)
چاه فیروزه	+ 0.31	16.91	Mohammaddoost et al. (2017)
سرنو	+ 0.87	10.2	Mohammaddoost et al. (2017)
ایجو	+ 0.07	9.27	Mohammaddoost et al. (2017)
گود کلواری	- 0.1	16.36	Mohammaddoost et al. (2017)
کدر	- 1.04	7.54	Mohammaddoost et al. (2017)

## ۵- نتیجه گیری

نسبت ایزوتوپی گوگرد مربوط به کانی های سولفیدی موجود در رگچه های برخی سامانه های پورفیری در بخش شمال باختری کمر بند مس کرمان مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  نزدیک به صفر و کمی منفی را نشان می دهد؛ در حالی که سامانه های پورفیری در بخش جنوبی و تا حدی بخش میانی کمر بند فلز زایی مس کرمان به صورت شاخصی مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  مثبت را نشان می دهند. با این وجود، روند این تغییرات به صورت تدریجی است و مرز مشخصی نمی توان برای آنها تعیین کرد.

در حالی که در یک نگاه کلی می توان اظهار داشت که نسبت های ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  موجود در کانی های سولفیدی همه این سامانه های پورفیری منطبق بر نسبت ایزوتوپی گوگرد در سنگ های گرانیتی است و اشاره به منشأ ماگمایی برای آنها دارد؛ اما تفاوت هایی در منشأ گوگرد وجود دارد و فرایندهای مؤثر در تعیین ترکیب ایزوتوپی گوگرد در همه این سامانه های پورفیری یکسان نبوده است.

مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  که به ویژه در سامانه های پورفیری بخش جنوبی KCMA مثبت است؛ پیشنهاد می دهد که سیال ها و رسوبات دریایی ناشی از فرورانش نوتتیس به زیر ایران مرکزی در تعیین ترکیب ایزوتوپی گوگرد آنها نقش پررنگی داشته است. به تدریج به سوی بخش های میانی، نسبت های ایزوتوپی گوگرد سبک تر و نزدیک به صفر می شوند که نشان از کم رنگ شدن نقش سیال های ناشی از فرورانش

دارد. در بخش های شمالی KCMA مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  سامانه های پورفیری باز هم سبک تر می شود و مقادیر نزدیک به صفر و کمی منفی نشان می دهد که با توجه به دامنه سنی توده های نفوذی مرتبط با آنها (میوسن میانی - بالایی) و رژیم زمین ساختی برخورد و پس از برخورد، در این مرحله فرایندهای متاسوماتیزم SCLM و تشکیل ماگمای مافیک پوسته زیرین جوان در تعیین ترکیب ایزوتوپی گوگرد نقش بنیادین داشته اند.

بنابراین، تغییرات نسبت ایزوتوپی  $\delta^{34}\text{S}$  در سامانه های پورفیری کرمان ماگمایی سنوزویک کرمان ارتباط ژنتیکی مستقیم با ماگمای مادر آنها دارد و نقش پنجره های زمانی تحولات زمین ساختی و فرایندهایی مانند فرورانش و همچنین متاسوماتیزم و ذوب بخشی سنگ کره زیرقاره بر منشأ گوگرد کاملاً آشکار می شود.

## سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از رساله دکترای نگارنده اول در دانشگاه تربیت مدرس است. نگارندگان مقاله از شرکت ملی صنایع مس ایران (NICICO) برای پشتیبانی مالی و فراهم کردن امکان بازدید و نمونه برداری از مغزه های حفاری و اطلاعات محدوده های مورد مطالعه سپاسگزاری می کنند.

## کتابنگاری

- تقی پور، ن. و درانی، م.، ۱۳۹۲- زمین شیمی ایزوتوپ های پایدار گوگرد و اکسیژن کانی های سولفیدی و سولفات کانسار مس پورفیری پر کام شهر بابک، استان کرمان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۸، صص. ۶۱ تا ۷۰.
- تقی پور، ن.، ۱۳۸۶- کاربرد ژئوشیمی سیالات در گیر و ایزوتوپی بعنوان راهبردهای اکتشافی، دگرسانی و کانی زایی در کانسار مس پورفیری میدوک، شهر بابک، کرمان، رساله دکترا، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- شفیعی بافتی، ب.، ۱۳۸۶- الگوی فلز زایی کمر بند مس پورفیری کرمان و رهیافت های اکتشافی آن، رساله دکترا، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- صالحیان، م.، ۱۳۸۹- مطالعات کانی شناسی، ژئوشیمی و سیالات در گیر کانسار مس پورفیری در آلو، جنوب کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- طالبی، م.، ۱۳۸۴- مطالعه لیتوژئوشیمی، دگرسانی و سیالات در گیر کانسار مس پورفیری ایجو، شمال غرب شهر بابک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- عباس زاده، غ.، ۱۳۹۰- بررسی سنگ شناسی، دگرسانی، مینرالوگرافی و منشأ کانی زایی چند فلزی در کالدرای آبدر شهر بابک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- کاشانی، ح.، ۱۳۹۱- مطالعات کانی شناسی، ژئوشیمی و سیالات در گیر اندیس های مس گروه و سینباد، جنوب کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- کلهر پردری، ش.، میرزاده، ح. و غیوری، ک.، ۱۳۹۲- تعیین منشأ سولفور در کانسار مس پورفیری باغ خشک با استفاده از نسبت های ایزوتوپی گوگرد، نخستین همایش ملی کاربرد ایزوتوپ پایدار، دانشگاه فردوسی مشهد.
- محبی، آ.، هزارخانی، ا.، بهزادی، م.، میرزاده، ح.، تقی زاده، ح.، ۱۳۹۳- بررسی ویژگی سیال های کانه زا با استفاده از میانبرهای سیال و ایزوتوپ های اکسیژن- هیدروژن در کانسار مس پورفیری بندر هزا، فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۶، صص. ۵۳ تا ۶۴.
- محمدزاده، ز.، ۱۳۸۶- زمین شناسی، دگرسانی و کانی سازی مس در منطقه چاه فیروزه، شهر بابک، استان کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- معانی جو، م.، مستقیم، م.، عبدالمی ربه، م. و سپاهی گرو، ع. ا.، ۱۳۹۱- مطالعات سیستماتیک ایزوتوپ های پایدار گوگرد و سیالات در گیر گروه های رگچه ای مختلف کانسار مس پورفیری سرچشمه، بر اساس داده های جدید، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۲، جلد ۴، صص. ۲۱۷ تا ۲۳۹.

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94, 401-419.
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015- Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews* 70, 385-406.
- Ahmad, T. and Posht Kuhi, M., 1993- Geochemistry and petrogenesis of Urumiah-Dokhtar volcanic belt around Nain and Rafsanjan area; a preliminary study: treatise on the geology of Iran. Iranian Ministry of Mines and Metals p. 90.
- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*. 103, 983-992.
- Allègre, C. J., 2008- *Isotope Geology*. Cambridge University Press, New York 1-534.
- Allen, M. B., Jackson, J. and Walker, R., 2004- Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics* 23, TC2008.
- Asadi, S., Moore, F. and Zarasvandi, A., 2014- Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth-Sci Reviews* 138, 25-46.
- Atapour, H. and 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.
- Beaudoin, G. and Therrien P., 2004- The web stable isotope fractionation calculator. *Handbook of stable isotope analytical techniques*, Volume-I. De Groot, P.A.: Elsevier; p. 1045-1047.
- Beaudoin, G. and Therrien, P., 2009- The updated web stable isotope fractionation calculator. *Handbook of stable isotope analytical techniques*, Volume-II. De Groot, P.A., Elsevier; p. 1120-1122.
- Berberian, F. and Muir, I. D., Pankhurst, R. J. and Berberian, M., 1982- Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society* 139, 605-614.
- Berberian, M. and King, G. C.P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Cannell, J., Cooke, D. R., Walshe, J. L. and Stein, H., 2008- Geology, mineralization, alteration and structural evolution of El Teniente porphyry Cu-Mo deposit-A reply. *Economic Geology* 102, 1171-1180.
- Dercourt, J., Zonenshain, L. P., Ricou, L. E., Kazmin, V. G., Le Pichon, X., Knipper, A. L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I. M., Geysant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D. H., Boulin, J., Sibuet, J. C., Savostin, L. A., Sorokhtin, O., Westphal, M., Bazhenov, M. L., Lauer, J. P. and Biju-Duval, B., 1986- Evolution of the Tethys Geological evolution of the tethys belt from the atlantic to the pamirs since the LIAS. *Tectonophysics*. 123, 2, 315-41.
- Deyell, C. L., 2005- Sulfur isotope zonation at the Mt Polley alkalic porphyry Cu-Au deposit, British Columbia, Canada. In: Mao J, Bierlein FP, editors. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge: Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting Beijing, China, 18-21 August 2005*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; p. 373-376.
- Dimitrijevic, M. D., 1973- *Geology of Kerman region*. Geological Survey of Iran p. 334.
- Field, C. W., Zhang, L., Dilles, J. H., Rye, R. O. and 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. *Chem Geol*. 215, 61-93.
- Förster, H., 1978- Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran. *J Geol Soc*. 135, 443.
- Giuliani, A., Fiorentini, M. L., Martin, L. A. J., Farquhar, J., Phillips, D., Griffin, W. L. and LaFlamme, C., 2016- Sulfur isotope composition of metasomatized mantle xenoliths from the Bultfontein kimberlite (Kimberley, South Africa): Contribution from subducted sediments and the effect of sulfide alteration on S isotope systematics. *Earth and Planetary Science Letters*. 445, 114-124.
- Gustafson, L. B. and Hunt, J. P., 1975- The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology* 70, 857-912.
- 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). USA: University of California, Los Angeles, Ph.D. thesis, 204 p.
- Heithersay, P. S. and Walshe, J. L., 1995- Endeavour 26 North; a porphyry copper-gold deposit in the Late Ordovician, shoshonitic Goonumbla volcanic complex, New South Wales, Australia. *Econ Geol*. 90, 1506-1532.

- Hoefs, J., 2015- *Stable Isotope Geochemistry*. Springer.
- Ionov, D. A., Hoefs, J., Wedepohl, K. H. and Wiechert, U., 1992- Content and isotopic composition of sulphur in ultramafic xenoliths from central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*. 111, 269-286.
- Jensen, M. L., 1957- Sulfur isotopes and mineral paragenesis. *Economic Geology* 52, 269-281.
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., Gray, F., Graybeal, F. T., Mars, J. C., McPhee, D. K., Seal, R. R., Taylor, R. D. and Vikre, P. G., 2010- Porphyry copper deposit model, Chap. B of *Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-B*; p. 169.
- Li, Y. and Liu J., 2006- Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochim Cosmochim Acta*. 70, 1789-1795.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Belousova, E., Griffin, W. T. and Andrew, R. L., 2003- Timing of mineralization and exhumation processes at the Sar Cheshmeh and Meiduk porphyry Cu deposits, Kerman Belt, Iran. 7th Biennial SGA Meeting, Athens, Millpress Rotterdam. 1197-1200.
- Mirnejad, H., Mathur, R., Hassanzadeh, J., Shafie, B. and Nourali, S., 2013- Linking Cu mineralization to host porphyry emplacement: Re-Os ages of molybdenites versus U-Pb ages of zircons and sulfur isotope compositions of pyrite and chalcopyrite from the iju and sarkuh porphyry deposits in southeast Iran. *Economic Geology* 108, 861-870.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Mohammaddoost, H., Ghaderi, M., Kumar, T. V., Hassanzadeh, J., Alirezaei, S., Stein, H. J. and Babu, E. V. S. S. K., 2017- Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and sulfur isotope composition of vein materials in the Chah-Firouzeh porphyry copper deposit, Kerman Cenozoic Magmatic Assemblage, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 88, 384-399.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O., 1979- Isotope of sulfur and carbon. In: Barnes HL, editor. *Geochemistry of Hydrothermal deposits*. 2 ed. New York: Wiley; p. 509-567.
- Parsapoor, A., Dilles, J. H., Khalili, M., Mackizadeh, M. A. and Maghami, M., 2014- Stable isotope record of hydrothermal sulfate, sulfide and silicate minerals in the Darreh-Zar porphyry copper deposit in Kerman, southeastern Iran: Implications for petrogenesis and exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 143, 103-115.
- Parsapoor, A., Khalili, M., Tepley, F. and Maghami, M., 2015- Mineral chemistry and isotopic composition of magmatic, re-equilibrated and hydrothermal biotites from Darreh-Zar porphyry copper deposit, Kerman (southeast of Iran). *Ore Geology Reviews* 66, 200-218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.015>
- Richards, J. P., 2009- Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology* 37, 247.
- Rye, R. O., 1993- The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment; the stable isotope perspective. *Economic Geology* 88, 733-752.
- Rye, R. O., 2005- A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chemical Geology* 21, 36-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.034>
- Rye, R. O., Bethke, P. M. and Wasserman, M. D., 1992- The stable isotope geochemistry of acid sulfate alteration. *Economic Geology* 87, 225-262.
- Sasaki, A. and Ishihara, S., 1979- Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 68, 107-115.
- Sasaki, A., Ulriksen, C. E., Sato, K. and Ishihara S., 1984- Sulfur isotope reconnaissance of porphyry copper and manto-type deposits in Chile and the Philippines. *Bulletin of the Geological Survey of Japan* 35, 615-622.
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A. and Barton, M. D., 2005- Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary Volume, 1905-2005*, 251-298.
- Shafiei, B., 2008- Transition from Paleogene normal calc-alkaline to Neogene adakitic-like plutonism. *Journal of Sciences of the Islamic Republic of Iran* 19, 67-84.
- 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. and Shahabpour, J., 2009- Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44, 265-283.
- Shanks, W., 2014- *Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits*. In: HDHK T, editor. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier; p. 59-85.



- Sillitoe, R. H., 2010- Porphyry copper systems. *Economic Geology* 105, 3-41.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*. 52, 1229.
- Taghipour, N., Aftabi, A. and Mathur, R., 2008- Geology and Re-Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran. *Resource Geology* 58, 143-160.
- Vry, V. H., Wilkinson, J. J., Seguel, J. and Millán, J., 2010- Multistage intrusion, brecciation, and veining at El Teniente, Chile: evolution of a nested porphyry system. *Economic Geology* 105, 119-153.
- Wilson, A. J., Cooke, D. R., Harper, B. J. and Deyell, C. L., 2007- Sulfur isotopic zonation in the Cadia district, southeastern Australia: exploration significance and implications for the genesis of alkalic porphyry gold–copper deposits. *Mineralium Deposita* 42, 465-487.
- Wilson, A. J., Cooke, D. R. and Harper, B. L., 2003- The Ridgeway gold-copper deposit: a high-grade alkalic porphyry deposit in the Lachlan Fold Belt, New South Wales, Australia. *Economic Geology* 98, 1637-1666.
- Wolfe, R. C. and Cooke, D. R., 2011- Geology of the Didipio region and genesis of the Dinkidi alkalic porphyry Cu-Au deposit and related pegmatites, northern Luzon, Philippines. *Economic Geology* 106, 1279-1315.

# Sulfur isotope variations of sulfide minerals in porphyry systems of the Meiduk cluster, Kerman Cenozoic magmatic arc, southeastern Iran

H. Mohammaddoost<sup>1</sup>, M. Ghaderi<sup>2\*</sup> and J. Hassanzadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Research Associate, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, U.S.A.

Received: 2016 November 07

Accepted: 2017 February 14

## Abstract

Sulfur isotope data of pyrite, chalcopyrite and molybdenite in the A, B and D type veinlets in porphyry systems of the Meiduk cluster, located in northwestern part of the Kerman copper belt, show that these systems have near zero  $\delta^{34}\text{S}$  values. Sulfur isotope composition for the Chah-Firouzeh and Iju deposits and Serenu, God-e-Kolvani and Kader prospects is from -1.4 to +2.5 (average +0.31), -1.3 to +1.1 (average +0.07), +0.1 to +2.4 (average +0.87), -1.5 to +0.2 (average -0.1) and -4.1 to +1 (average -1.04), respectively. These results suggest a magmatic source for sulfur. Also, limited range of isotopic variations and analogous isotopic composition for the three types of veinlets reveals that with evolution of the hydrothermal system, no significant changes occurred in the primary and relatively homogenous source of sulfur. Comparison the data for the Meiduk cluster with available data from other deposits in middle and southern parts of the Kerman belt suggested that sulfur was provided by a mafic magma originated from metasomatized subcontinental lithospheric mantle (SCLM) in porphyry systems of the northwestern, and to some extent southern parts of the Kerman Cenozoic magmatic arc. This magma was affected by assimilation with continental crust; while in the southern parts, processes related to subduction and fluids from seawater and associated sediments had a major role in their sulfur isotope composition.

**Keywords:** Porphyry copper, Sulfide mineral, Sulfide isotope, KCMA, Iran.

For Persian Version see pages 3 to 16

\*Corresponding author: M. Ghaderi; E-mail: [mghaderi@modares.ac.ir](mailto:mghaderi@modares.ac.ir)