چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علـوم زمیـــن
The 42nd National
Geosciences Congress
www.geoconf.ir

مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد و اکسیژن در محدوده مس ـ طلا کانسار هندوآباد، جنوب شرق اردستان

مریم ترمس هفشجانی[۱]، سروش مدبری[۲]، داود رئیسی[۳]

[۱] دانشگاه تهران، تهران maryamtarmas@ut.ac.ir

[۲] دانشگاه تهران، تهران modabberi@ut.ac.ir

[۳] دانشگاه تهران، تهران davood.raeisi@gmail.com

چکیده

کانسار هندوآباد در بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه - دختر در جنوب شرق اردستان واقع است. این کانسار در سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی تا بازالتی قرار دارد و دارای دو محدوده مس ـ طلا و مس‌دار است. در محدوده مس ـ طلا کانه‌زایی مس در دگرسانی پروپیلیتیک و سیلیسی‌شدن و کانه‌زایی طلا در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. پیریت، کالکوپیریت، گالن، بورنیت، کالکوسیت، دیژنیت، کوولیت، مالاکیت، و کریزوکلا از مهم‌ترین کانی‌های این محدوده به شمار می‌روند. با توجه به مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، شکل کانی‌سازی، دگرسانی، ژئوشیمی، کانسار هندوآباد بیشترین شباهت را به ذخایر رگه‌ای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن، منشأ سیال در این کانسار جوی است و محدوده $\delta^{34}S$ در این کانسار با محدوده کانسارهای اپی‌ترمال مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی

کانسار هندوآباد، ایزوتوپ پایدار گوگرد، ایزوتوپ پایدار اکسیژن، کانه‌زایی اپی‌ترمال

مقدمه

کانسار هندوآباد در ۷ کیلومتری جنوب روستای هندوآباد، ۱۲ کیلومتری جنوب شرق اردستان و ۱۱۰ کیلومتری اصفهان واقع است و در محدوده تقریبی طول جغرافیایی"۳۵'۲۴°۵۲ و "۲۶'۲۶°۵۲ و عرض جغرافیایی"۱۳'۱۵°۳۳ و "۰۸'۱۴°۳۳ قرار دارد.

دسترسی به منطقه از جاده آسفالته اردستان ـ نایین امکان‌پذیر است که با طی حدود ۱۲ کیلومتر مسافت قبل از ظفرقند مجدداً به سمت اردستان حرکت کرده و از طریق جاده خاکی وارد محدوده مورد مطالعه می‌شویم. محدوده مس‌دار در ۶۰۰ متری شمال شرق جاده آسفالته قرار دارد و محدوده مس ـ طلا در فاصله ۳۰۰۰ متری از جاده آسفالته و در شرق جاده قرار دارد، این محدوده به فاصله ۲/۵ کیلومتری شرق محدوده اول قرار دارد (شکل ۱). بر اساس تقسیم‌بندی‌های ساختاری ـ رسوبی [1]، این محدوده جزئی از کوهزاد زاگرس و کمان ماگمایی ارومیه ـ دختر است و در حاشیه غربی نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ اردستان قرار دارد. کانسار هندوآباد به دو محدوده مس‌دار و مس ـ طلا تقسیم می‌شود که با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات میانبار سیال و دمای تشکیل سیال در محدوده مس‌دار، انجام مطالعات ایزوتوپی در این محدوده امکان‌پذیر نبود و مطالعات ایزوتوپی فقط بر روی محدوده مس ـ طلا انجام شده است. در این پژوهش برای نخستین بار ویژگی ایزوتوپ‌های پایدار همراه با مطالعات میانبار سیال در محدوده مس ـ طلا هندوآباد بررسی شده است، تا با بررسی ویژگی‌های آن‌ها نوع و نحوه کانه‌زایی در این کانسار مشخص شود.

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی کانسار هندوآباد.

روش انجام پژوهش

برای بررسی‌های ایزوتوپی پس از بازدید صحرایی، نمونه‌برداری و انتخاب نمونه مناسب برای انجام مطالعات ایزوتوپ پایدار، کانی‌های مورد نظر (۲ نمونه گالن و ۳ نمونه پیریت و کالکوپیریت برای ایزوتوپ گوگرد و ۲ نمونه اپیدوت و ۳ نمونه کوارتز برای ایزوتوپ اکسیژن) در آزمایشگاه ژئوشیمی دانشگاه تهران پودر و برای بررسی به آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار اراک ارسال شد. لازم به ذکر است که برای مطالعات ایزوتوپی از کانی‌هایی استفاده شد که دمای همگن شدن سیال، توسط مطالعات زمین دماسنجی بررسی شده است.

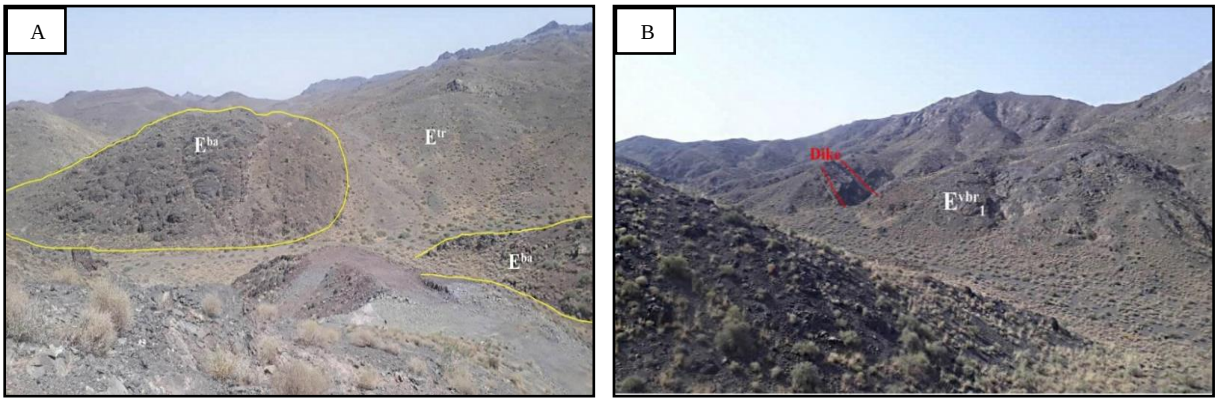
در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار اراک برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن، نمونه‌های ارسالی پس از تجزیه، در فرایند پیرولیز همراه با احیای کربن در دمای بیشتر از ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به گاز CO تبدیل و پس از عبور از ستون آب، گازهای مزاحم حذف و گاز CO جدا می‌شود. این گاز تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و پس از عمل واجذب گاز CO آزاد و همراه با گاز هلیم (گاز

حامل) از سیستم IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometer) عبور داده شده و $\delta^{18}O$ نسبت به استاندارد SMOW با خطای تجزیه در حد کمتر ۰/۳ ‰ اندازه‌گیری می‌شود.

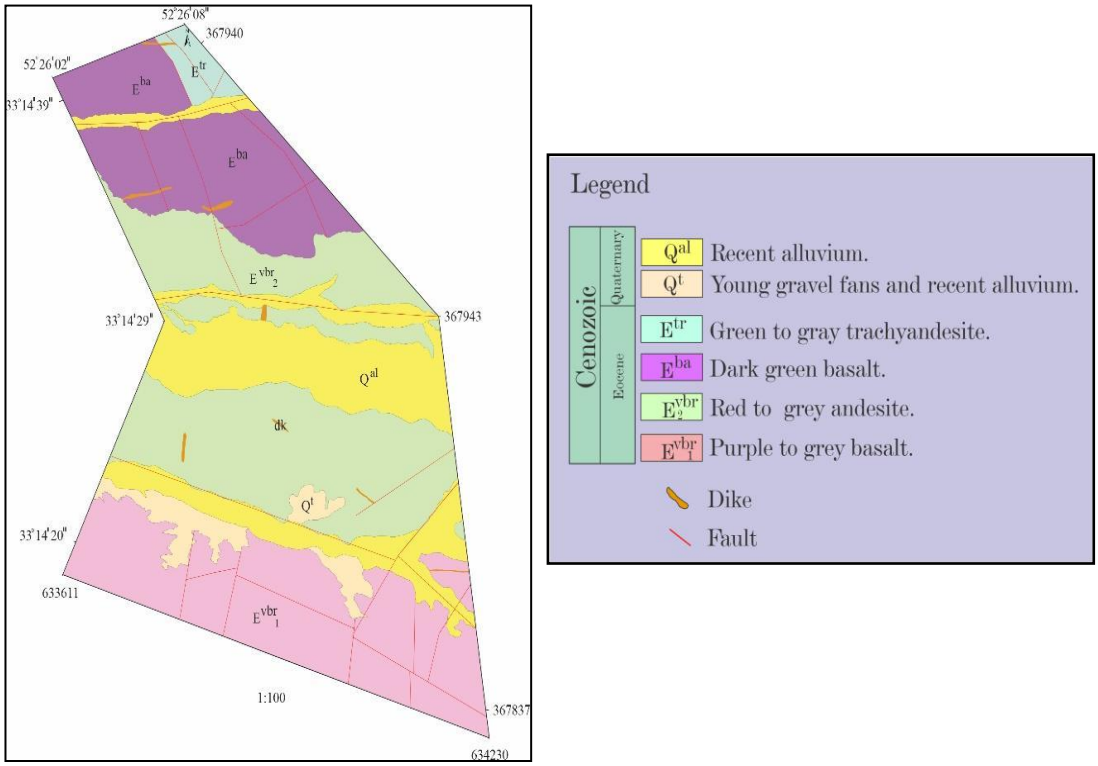
برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد، نمونه جامد در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود در این دما همه اتم های گوگرد به گاز SO_2 تبدیل می‌شوند، گاز SO_2 تولید شده از سیستم عبور می‌کند و پس از حذف گازهای مزاحم، تا دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود، از سیستم IRMS عبور کرده و مقادیر $\delta^{18}S$ نسبت به استاندارد CDT با خطای تجزیه کمتر از ۰/۲‰ اندازه‌گیری می‌شود.

زمین‌شناسی منطقه

کانسار هندوآباد در ۱۲ کیلومتر جنوب شرق اردستان و در کمربند ماگمایی ارومیه دختر واقع است. کمربند ماگمایی ارومیه ـ دختر با ۱۷۰۰ کیلومتر طول و ۱۵۰ کیلومتر عرض، به موازات زون زاگرس، میان زون سنندج سیرجان و ایران مرکزی قرار گرفته است. این پهنه از سمت جنوب شرق و شرق با گذر از آتشفشان‌های بزمان و تفتان تا منطقه چغای در پاکستان و همچنین از سمت شمال غرب تا درون خاک ترکیه ادامه می‌یابد [4]. این مجموعه شامل واحدهای سنگ‌شناسی مختلف ازجمله دیوریت، گرانودیوریت، گابرو و گرانیت است. گدازه‌های بازالتی، تراکی‌بازالت‌ها، آندزیت، داسیت، ایگنیمبریت و آذرآواری‌ها (توف و آگلومرا) گسترش وسیعی در این کمربند دارند [2]. قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی موجود در بخش جنوبی محدوده مس ـ طلا هندوآباد را نهشته‌های بازالتی قرمز و خاکستری E^{vbr}_1 تشکیل می‌دهند (شکل ۲: b). مرز زیرین این نهشته‌ها با سنگ‌های قدیمی‌تر مشخص نیست ولی در بخش بالایی به واحد آندزیتی E^{vbr}_2 ختم می‌شود. سنگ‌های خاکستری واحد E^{ba} با ترکیب بازالت متعلق به سن ائوسن هستند و در بخش شمالی محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند (شکل ۲: a). این واحد نیز همانند واحد E^{vbr}_1 دربرگیرنده دایک‌های حاوی کانه‌زایی است و در هر دو محدوده مس‌دار و مس ـ طلا رخنمون دارند. در بخش شمال شرقی محدوده واحد E^{tr} برونزد دارد که با رنگ سبز تا خاکستری روشن مشخص می‌شود (شکل ۲: a). به دلیل کوهستانی بودن منطقه، نهشته‌های کواترنری در محدوده توسعه قابل توجهی ندارند. رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر در مسیر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها توسعه یافته و شامل مخلوطی از قطعات سنگ به ابعاد شن، گراول، ماسه و رس است. با توجه به شکستگی‌های منطقه می‌توان سه روند اصلی برای گسل‌های این کانسار در نظر گرفت: روند شمال شرق ـ جنوب غرب که بر روند زون اصلی کانه‌زایی منطبق است، روند شمال غرب ـ جنوب شرق که دایک‌های منطقه بر این روند منطبق است و از لحاظ کانه‌زایی اهمیت دارد و روند شرقی ـ غربی.



شکل۲: A) رخنمون واحدهای E^{ba} و E^{tr} در محدوده مورد مطالعه. B) برونزد دایک در واحد E^{vbr}_1 در محدوده مورد مطالعه.



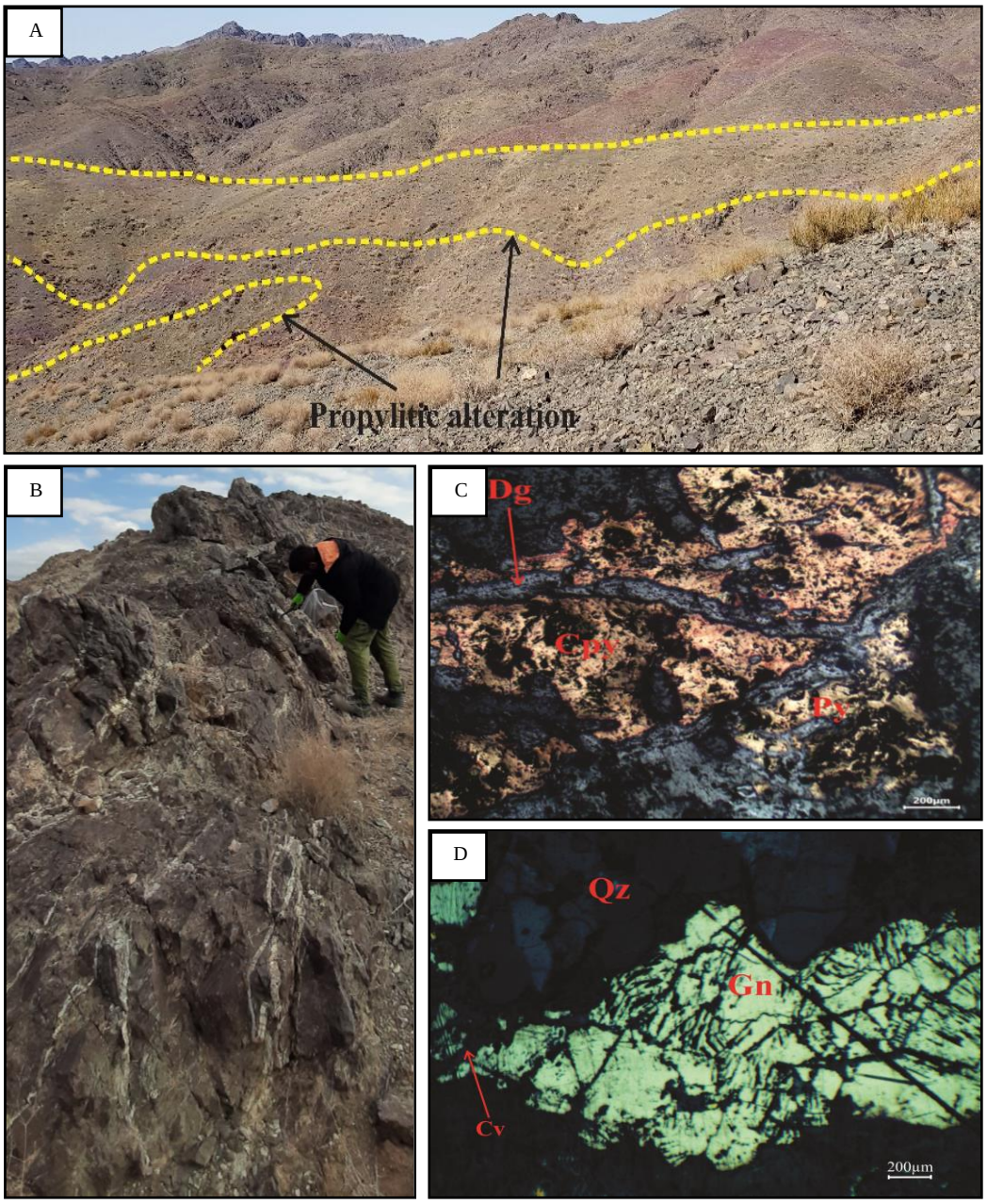
شکل۳: نقشه زمین‌شناسی محدوده مس ـ طلا هندوآباد.

کانه‌زایی و دگرسانی

در محدوده مس ـ طلا کانسار هندوآباد، کانه‌زایی درونزاد با حضور کالکوسیت، گالن، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کوولیت و دیژنیت و کانه‌زایی برونزاد با مالاکیت، هماتیت، کریزوکلا، گوتیت و لیمونیت مشخص می‌شود. در این محدوده گالن، کالکوسیت، کالکوپیریت، پیریت، کریزوکلا و مالاکیت بافت پرکننده فضای‌خالی و دانه پراکنده نشان می‌دهند و کالکوپیریت و بورنیت توسط دیژنیت و کوولیت جانشین می‌شوند. در این محدوده باریت (بافت توده‌ای)، کوارتز (بافت پرکننده فضای‌خالی، رگه رگچه و شانه‌ای)، کلسیت، کلریت و اپیدوت از کانی‌های باطله هستند (شکل 4: c,d).

در این محدوده دو نوع دگرسانی پروپیلیتیک و سیلیسی‌شدن مشاهده می‌شود، کانه‌زایی مس همراه با دگرسانی پروپیلیتیک و سیلیسی شدن است و کانه‌زایی طلا فقط همراه با رگه‌های سیلیسی مشاهده می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک در محدوده مس ـ طلا هندوآباد با رنگ خاکستری تا سبز در منطقه مشخص می‌شود (شکل ۴: a). در این محدوده دگرسانی پروپیلیتیک با حضور کانی‌های کلریت، اپیدوت، کربنات (کلسیت و باریت)، سریسیت و کوارتز قابل شناسایی است. این دگرسانی عمدتاً در سنگ‌های آتشفشانی بازالتی گسترش دارد، که در آن پیروکسن و آمفیبول به کلریت و اپیدوت تبدیل شده‌اند. بعضی از درشت بلورهای پلاژیوکلاز نیز با کانی‌های اپیدوت، کلسیت و سریسیت جایگزین شده‌اند. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری کلریتی شدن به صورت انتخابی و اپیدوتی شدن به صورت انتخابی و رگه ـ رگچه‌های در محدوده حضور دارند.

در این محدوده سیلیسی شدن صورت رگه ـ رگچه و با وسعت زیاد رخ داده است (شکل ۴: b). این رگه‌ها به صورت رگه‌های سیلیسی بارور با کانه زایی مس و طلا و رگه‌های سیلیسی بی‌بار در منطقه رخنمون دارند. در این دگرسانی کوارتزها با بافت رگه ـ رگچه و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند. اغلب بخش‌های این دگرسانی سریسیت و کائولینیت نیز حضور دارند.



شکل۴: A) گسترش دگرسانی پروپیلیتیک در محدوده مس ـ طلا هندوآباد. B) گسترش دگرسانی سیلیسی به صورت رگه ـ رگچه در محدوده مس ـ طلا هندوآباد. C) پیریت، کالکوپیریت و دیژنیت در محدوده مس ـ طلا هندوآباد. D) گالن و کوولیت در محدوده مس ـ طلا هندوآباد.

مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار

امروزه مطالعات ایزوتوپ پایدار، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تعیین ماهیت و منشأ سیال کانه‌ساز، ژنز سنگ و مطالعات ژئوشیمی و پترولوژی است. در این پژوهش با استفاده از ایزوتوپ‌های اکسیژن و گوگرد به بررسی و مطالعه الگوی ترکیب ایزوتوپی به دست آمده از نمونه‌ها برای تعیین منشأ سیال کانه‌ساز، پرداخته شد.

ایزوتوپ پایدار اکسیژن

اکسیژن یکی از فراوان‌ترین عناصر در زمین و یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سنگ‌ها است [7]، که به شکل ترکیبات گازی، جامد و مایع دیده می‌شود و در گستره بزرگی از دما پایدار است. این عنصر دارای سه ایزوتوپ پایدار ^{16}O، ^{17}O و ^{18}O است که به دلیل فراوانی و اختلاف جرم بالاتر، معمولاً نسبت $^{18}O/^{16}O$ اندازه‌گیری می‌شود. دو مقیاس δ متفاوت برای ایزوتوپ اکسیژن استفاده می‌شود:

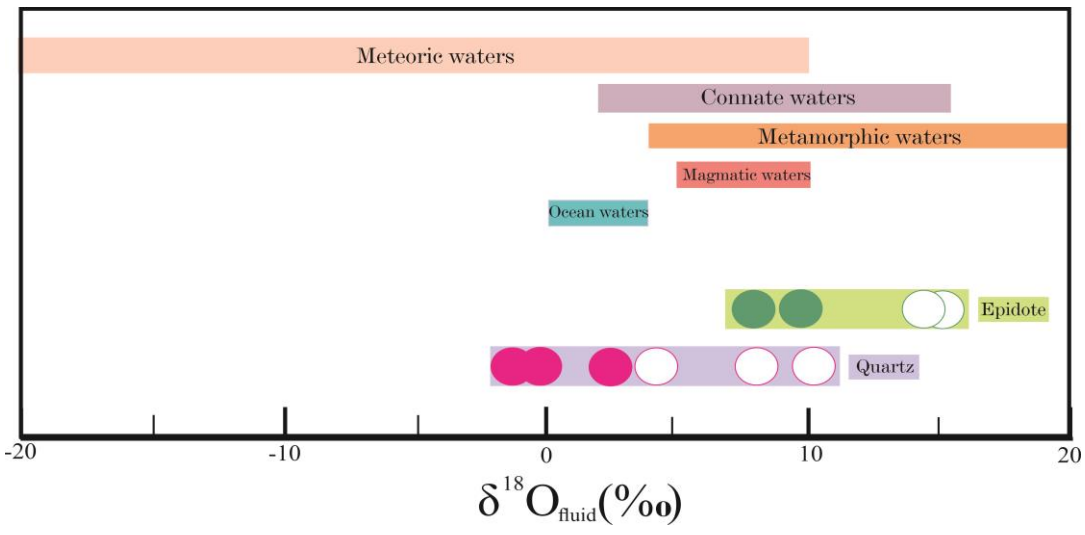
- $\delta\ ^{18}O_{(SMOW)}$
- $\delta\ ^{18}O_{(PDB)}$

کربنات‌های دما پایین نسبت به استاندارد PDB و دیگر تجزیه‌های ایزوتوپی اکسیژن (آب‌ها، سیلیکات‌ها، فسفات‌ها، سولفات‌ها و کربنات-های دما بالا) نسبت به SMOW ارائه می‌شوند [5].

نتایج آنالیزهای ایزوتوپی اکسیژن برای محدوده مس طلا هندوآباد در (جدول ۱) نشان داد شده است. $\delta^{18}O_{(SMOW)}$ در کوارتزهای همراه با کانه‌زایی از ۱۸/۱ تا۱۸/۴ و $\delta\ ^{18}O_{(SMOW)}$ در اپیدوت‌های همزمان با کانه‌زایی از ۱۷/۲ تا ۱۷/۵ متغیر است. برای محاسبه مقدار ایزوتوپ اکسیژن از کوارتز و اپیدوت‌های همزمان با کانی‌های سولفیدی استفاده شده است. برای محاسبه مقدار ایزوتوپ اکسیژن سیال در تعادل با کوارتز و مقدار ایزوتوپ اکسیژن سیال در تعادل با اپیدوت از معادله [9] استفاده شده است. با توجه به شکل ۵، $\delta\ ^{18}O_{(Fluid)}$ در محدوده آب‌های جوی قرار می‌گیرد و با محدوده $\delta\ ^{18}O_{(Fluid)}$ در کانسارهای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین مطابقت دارد.

جدول ۱: نتایج آنالیزهای ایزوتوپ اکسیژن محدوده مس ـ طلا کانسار هندوآباد

نمونه	کانی	دمای همگن‌شدن میانبار سیال			$\delta^{18}O_{SMOW}$ (‰)	$\delta^{18}O_{Fluid}$ (‰)		
		کمترین	میانگین	بیشترین		کمترین	میانگین	بیشترین
B2	اپیدوت	۱۰۹	۱۷۷,۴	۲۳۰	۱۷,۲	۷,۶	۱۲,۳	۱۴,۴
B6	کوارتز	۱۱۰	۱۴۴,۸	۱۶۸	۱۸,۱	-۱,۷	۲,۲	۴,۲
B8	کوارتز	۱۳۱	۱۹۹,۴	۲۷۵	۱۸,۵	۱,۲	۶,۸	۱۰,۶
B10	کوارتز	۱۱۴	۱۶۳,۵	۲۱۵	۱۸,۴	-۰,۹	۴,۱	۷,۷
B20	اپیدوت	۱۳۰	۲۱۵,۸	۲۸۰	۱۷,۵	۹,۷	۱۴,۲	۱۶,۱



شکل ۵: دامنه تغییرات $\delta\ ^{18}O_{(Fluid)}$ در آب‌های مختلف [5] و در محدوده مس ـ طلا هندوآباد.

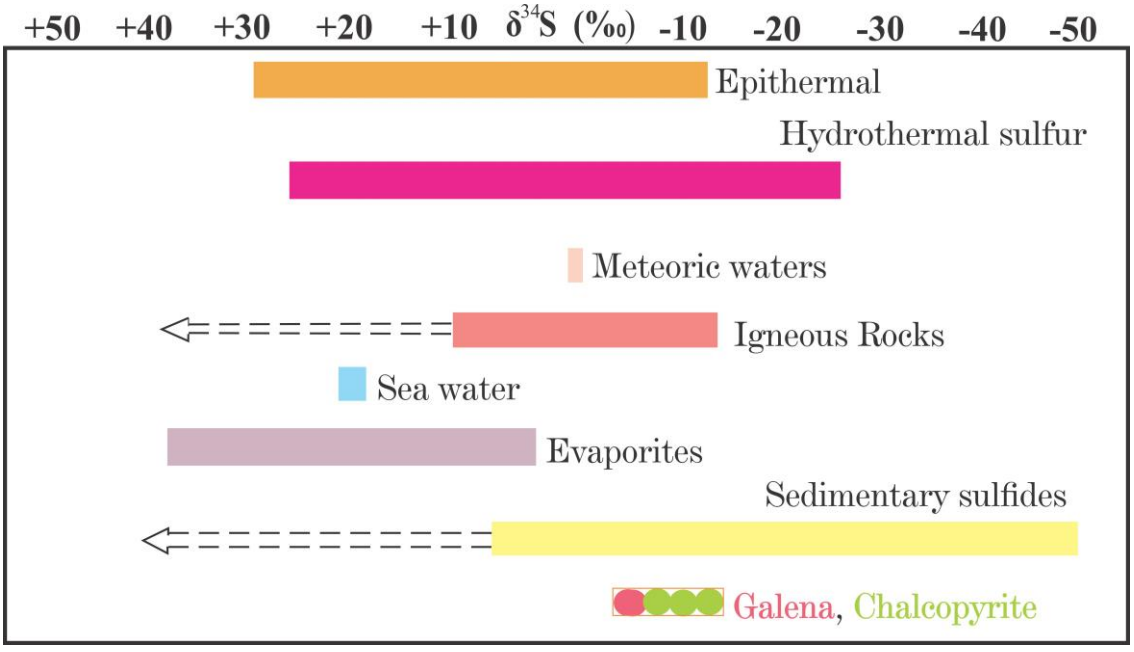
ایزوتوپ پایدار گوگرد

مطالعه ایزوتوپ گوگرد کاربرد وسیعی در مطالعه کانسارها و تعیین منشأ سیالات کانه‌ساز دارد. این عنصر دارای چهار ایزوتوپ ^{32}S، ^{33}S، ^{34}S و ^{36}S است و استاندارد مرجع رایج آن، ترویلیت شخانه آهنی کانیون دیابلو (CDT) است [5].

دامنه تغییرات $\delta^{34}S$ در سیالات مختلف و در محدوده مس ـ طلا کانسار هندوآباد در (شکل ۶) نشان داده شده است. ایزوتوپ گوگرد در نمونه‌های کانی کالکوپیریت از ۹/۷- تا ۱۱/۷- در تغییر است در حالی که در نمونه‌های کانی گالن نسبتاً مشابه است. برای محاسبه مقدار ایزوتوپ گوگرد کالکوپیریت و گالن از معادله [6] استفاده شده است. با توجه به (شکل ۶)، $\delta^{34}S$ سیال در این کانسار در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرد.

جدول ۲: نتایج آنالیزهای ایزوتوپ گوگرد در محدوده مس ـ طلا کانسار هندوآباد

نمونه	کانی	دمای همگن‌شدن میانبار سیال	$\delta^{34}S_{(CDT)}$ (‰)	$\delta^{34}S_{(Fluid)}$ (‰)
B4	گالن	۱۶۸,۳	-۹,۸	-۵,۴
B5	گالن	۱۶۸,۳	-۹,۷	-۵,۳
B9	کالکوپیریت	۱۶۸,۳	-۱۱,۷	-۱۲
B13	کالکوپیریت	۱۶۸,۳	-۹,۵	-۹,۸
B24	کالکوپیریت	۱۶۸,۳	-۷,۸	-۸,۱



شکل ۶: دامنه تغییرات $\delta^{34}S_{(Fluid)}$ در محیط‌های مختلف [3,5,8] و در محدوده مس طلا هندوآباد

نتیجه‌گیری

سنگ میزبان در این محدوده سنگ‌های آندزیت و آندزی بازالت است که متحمل دگرسانی سیلیسی و پروپیلیتیک شده است. کانی‌های باطله در این محدوده، کانی‌های کوارتز، باریت و کلسیت است که با بافت‌های پرکننده فضای-خالی، شانه‌ای دیده می‌شود. بر اساس مطالعات ایزوتوپ پایدار اکسیژن، منشأ سیال در این محدوده سیالات جوی است و مطالعات ایزوتوپ پایدار گوگرد در این محدوده با کانسارهای اپی‌ترمال مطابقت دارد و حضور بافت شانه‌ای در کوارتز نشان دهنده کانسارهای اپی‌ترمال است.

با توجه به مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، دگرسانی و ایزوتوپ پایدار، کانسار هندوآباد بیشترین شباهت را به ذخایر رگه‌ای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین نشان می‌دهد.

منابع

۱. آقانباتی، س. ع. (۱۳۸۵). زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.

2. Alavi, M. (1994). Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics, 229(3-4), 211-238.
3. Allègre, C. J. (2008). Isotope geology, 512.
4. Berberian, F., & Berberian, M. J. Z. H. K. H. G. E. (1981). Tectono-plutonic episodes in Iran. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution, 3, 5-32.
5. Hoefs, J., (2018). Stable isotope geochemistry (Vol. 285). Berlin: springer.
6. Li, Y., & Liu, J. (2006). Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(7), 1789-1795.
7. Shanks III, W. P. (2014). 13.3–Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits.
8. Thode, H. G. (1991). Sulphur isotopes in nature and the environment: an overview. Stable isotopes: natural and anthropogenic sulphur in the environment, 43, 1-26.
9. Zheng, Y. F. (1993). Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. Earth and Planetary Science Letters, 120(3-4), 247-263.