

# دماسنجی و مدل تشکیل کانسارهای سولفیدی روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در ناحیه راور - بافق بر مبنای ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد

نویسنده: علی امیری\*\*\*، ابرج رسا\*\*، احمد خاکزاد\* و محمدحسین آدابی\*\*

\*گروه زمین شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*\*گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

\*\*\*دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنند

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۰/۰۲

## چکیده

کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق در سنگ میزبان کربناتی پرمین بالایی قرار دارند. برخی از کانسارهای روی و سرب این ناحیه، دربردارنده کانسنگ سولفیدی هستند. مطالعات انجام شده بر روی فازهای سولفیدی جدا شده از کانسنگ سولفیدی نشان می‌دهد که دامنه تغییرات ایزوتوپ‌های گوگرد در این کانسارها ناچیز بوده و مقدار  $\delta^{34}\text{S}$  در کانی‌های سولفیدی آنها از ۱۱/۰۳ تا ۱۸/۵۵ در تغییر است. شواهد موجود حاکی از برتری فرایند کاهیدگی گرمایشیمیایی (احیاء ترموشیمیایی) سولفات برای تأمین گوگرد کاهیده مورد نیاز این کانسارها بوده و به نظر می‌رسد که گوگرد مورد نیاز از طریق کاهیدگی سولفات‌های موجود در سازند گچ‌دار دزو (کامبرین زیرین) تأمین شده باشد. دمای برآورد شده از روی زوج‌های سولفیدی در حال تعادل نشانگر دامنه تغییرات تقریبی از ۵۸ تا ۱۱۴ درجه سانتی‌گراد است. بهترین مدل تشکیل برای کانسارهای این ناحیه مدل آمیختگی است. براساس این مدل، شوراب‌های حوضه‌ای مشتق از سازند دزو با سیال‌های حوضه‌ای مشتق از سنگ‌های کربناتی پرمین بالایی مخلوط شده و کانسارهای روی و سرب را در این ناحیه به وجود آورده‌اند.

**کلید واژه‌ها:** ایزوتوپ‌های گوگرد، کانسارهای روی-سرب، کاهیدگی گرمایشیمیایی (احیاء ترموشیمیایی) سولفات، مدل آمیختگی

## مقدمه

مناسب دارای دو ایزوتوپ، یکی با فراوانی بالا و دیگری با فراوانی به نسبت پایین هستند. باید فراوانی ایزوتوپ کمیاب‌تر دست کم در حد چند دهم درصد باشد. برای مثال گوگرد، دو ایزوتوپ پایدار فراوان به شرح زیر دارد؛

$$^{34}\text{S} = 4.21\% \text{ و } ^{32}\text{S} = 95.02\%$$

- داشتن بیش از یک حالت اکسایش (مثلاً برای کربن، نیتروژن و گوگرد)، به گونه‌ای که برای نمونه گوگرد دارای حالات اکسایش (ظرفیت‌های یونی)  $\text{S}^{-2}, \text{S}^0, \text{S}^{+4}, \text{S}^{+6}$  است.

در نتیجه تشکیل فازهای مختلف گوگرددار مانند گوگرد خالص  $\text{BaSO}_4, \text{FeS}, \text{HS}$  و ... توسط این عنصر امکان‌پذیر است. همچنین کربن به دلیل داشتن حالات اکسایش متفاوت می‌تواند ترکیب‌هایی مانند  $\text{CH}_4, \text{CO}_2$  و کربن خالص را به وجود آورد.  $\text{CO}_2$  و  $\text{CH}_4$  به ترتیب حالت به شدت اکسیدی و به شدت کاهیده (احیا) دارند.

- اختلاف جرم قابل ملاحظه ایزوتوپ‌ها، به گونه‌ای که هرچه این اختلاف بیشتر باشد، تفکیک ایزوتوپی بیشتری رخ می‌دهد. در این میان، عنصر هیدروژن با دو ایزوتوپ H و D، که دارای اختلاف جرم ۱۰۰ درصد هستند، بهترین عنصر است. بدیهی است هرچه جرم اتمی بیشتر باشد، درصد اختلاف جرم ایزوتوپ‌های مختلف کاهش یافته و کاربرد آن محدودتر می‌شود.

ایزوتوپ‌های پایدار در حل مسائل زمین‌شناسی، بویژه مطالعه کانسارها اهمیت زیادی دارند. به کمک ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد، مسائل زیادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعیین منشأ سیال کانه‌دار و عناصر تشکیل‌دهنده کانسنگ، تعیین سازوکار واکنش‌های مؤثر در حین کانی‌سازی و دماسنجی کانسارها از جمله این کاربردها است. باز یا بسته بودن سیستم و تعیین نقش فرایندهای باکتریایی یا گرمزادی در تأمین گوگرد در حین کانی‌سازی نیز از جمله مسائلی است که به کمک ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد قابل بررسی است. در این زمینه، قبل از هر چیز باید تفکیک ایزوتوپی را بررسی کرد. دلیل این امر این است که تفکیک ایزوتوپی تابع دما است (Hoefs, 2004). به عبارت دیگر، تفکیک ایزوتوپی سبب توزیع غیر یکنواخت

در ناحیه راور- بافق، بین استان‌های کرمان و یزد، نزدیک به چهل معدن و اثر معدنی روی و سرب وجود دارد که در گذشته‌های دور و نزدیک استخراج شده‌اند. از این میان، ۱۲ معدن اهمیت بیشتری داشته (شکل ۱) و تنها در دو مورد، یعنی معادن طرز و تاجکوه، کانسنگ سولفیدی قابل دسترسی است. این کانسارها اغلب در سنگ‌های کربناتی پرمین بالایی قرار دارند و شکل ماده معدنی در آنها عموماً رگه‌ای است. رگه‌های معدنی معمولاً چینه‌های دربردارنده را قطع می‌کنند، اما گاهی نیز با راستای چینه‌بندی همخوان هستند (امیری و رسا، ۱۳۸۵ و امیری، ۱۳۸۶). بر روی کانسنگ سولفیدی کانسارهای روی و سرب و از جمله کانسارهای موجود در سنگ‌های کربناتی مطالعات زیادی صورت می‌گیرد. از جمله مهم‌ترین مطالعاتی که بر روی این نوع از کانسارها انجام می‌شود، مطالعه بر روی ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد است. به کمک این ابزار، اطلاعات سودمندی از شرایط تشکیل کانسارها به دست می‌آید. در این مقاله، ضمن مروری کوتاه بر اصول این مطالعات، به کاربردهای آن در حل مسائل مربوط به زایش کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در ناحیه راور- بافق پرداخته شده است.

## اصول مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار و کاربردها

اصول زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار توسط محققان زیادی بررسی شده است (Faure, 1986; Rollinson, 1995; Hoefs, 2004; Ohmoto and Goldhaber, 1997; White, 2005). (White, 2005) و (Hoefs (2004) ضمن اشاره به عناصر هیدروژن، کربن، اکسیژن و گوگرد به عنوان ایزوتوپ‌های مناسب برای مطالعه کانسارها، ویژگی ایزوتوپ‌های پایدار مناسب را به خوبی توصیف کرده‌اند. این ویژگی‌ها به اختصار به قرار زیر است.

- داشتن جرم اتمی به نسبت پایین که معمول‌ترین عناصر مورد استفاده، عدد اتمی کمتر از ۲۰ دارند.

- داشتن دست کم دو ایزوتوپ پایدار با فراوانی قابل ملاحظه؛ به طور معمول عناصر

روند عمومی ساختارهای زمین‌شناختی در ناحیه معدنی، شمال باختری- جنوب خاوری است و گسل‌های مهم و اساسی کوهبنان و بهاباد به عنوان ساختارهای تأثیر گذار در این بخش از ایران مرکزی به شمار می‌آیند.

### نمونه‌برداری و روش تجزیه

به‌منظور انجام این مطالعه، در مجموع ۱۷ نمونه از فازهای جدا شده کانی‌های سولفیدی کانسارهای طرز و تاجکوه تهیه شد. تهیه این نمونه‌ها به روش میکرودریلینگ و به کمک مته‌های نازک انجام شد. برای این کار پس از تهیه مقاطع نازک و صیقلی و تشخیص اولیه کانی‌های مختلف، از انواع کانسنگ سولفیدی سطوح صاف تهیه شد. سپس به کمک مته‌های ظریف، محل کانی‌های مورد نظر به‌دقت حفاری گردید و به این ترتیب مقدار بسیار کمی از پودر این کانی‌ها تهیه شد. سپس این پودر به کمک استرومیکروسکوپ خلص سازی و کانی‌های اضافی از نمونه خارج شد. وزن هر یک از نمونه‌های آماده شده در حدود ۰/۵ گرم بوده که در ظرف شیشه‌ای مخصوص ریخته شده و آماده تجزیه شیمیایی شده است. فازهای جدا شده به طور عمده شامل اسفالریت و پیریت مربوط به کانسنگ رگه‌ای سولفیدی است؛ با این حال، دو نمونه نیز از گالن تهیه شد. از بین این نمونه‌ها، نمونه‌های پیریت به دلیل وضوح بیشتر و تشخیص ساده‌تر در سطوح صاف نمونه کانسنگ سولفیدی، با صحت بیشتر و آرایش کمتر تهیه شد. نمونه‌های سولفیدی دیگر به دلیل رشد درهم و ریز بودن اندازه، از نظر آرایش نسبت به نمونه پیریت وضعیت نامطلوب‌تری داشتند. بررسی میکروسکوپی روابط بافتی این کانی‌ها کم و بیش حکایت از تعادل آنها، دست‌کم در پاره‌ای از موارد دارد. به همین خاطر و با احتیاط کامل می‌توان از زوج‌های کانی در حال تعادل برای دماسنجی سیال کانه‌دار مسئول کانی‌سازی روی و سرب در این ناحیه استفاده کرد. بدیهی است نتایج این نوع دماسنجی باید به کمک میانبارهای سیال نیز کنترل و اصلاح شود.

تعدادی از نمونه‌های یاد شده پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه تحقیقات ایزوتوپی دانشگاه تاسمانیا (Central Science Laboratory)، در استرالیا توسط طیف‌سنج جرمی (Mass Spectrometer) تجزیه شد. در استرالیا علاوه بر آن تعدادی از نمونه‌ها نیز آزمایشگاه تحقیقات ایزوتوپی در دانشگاه کوئینزلند تجزیه شدند (جدول ۱). برای تمام نمونه‌های یاد شده، نسبت ایزوتوپی گوگرد ( $\delta^{34}\text{S}$ ) بر مبنای استاندارد CDT یا فاز سولفیدی ترویلیت شخانه (شهابسنگ) آهنی کانیون دیابلو آریزونا (Canyon Diablo Troilite) محاسبه شده است. در تمام موارد، تجزیه به روش پیشنهاد شده توسط Robinson and Kusakabe (1975) انجام شده است.

### بحث

یکی از پرکاربردترین ایزوتوپ‌های مورد استفاده در مطالعه کانسارها، ایزوتوپ‌های گوگرد است. ایزوتوپ‌های این عنصر از دیرباز توسط محققان مختلف و به منظور تعیین منشأ گوگرد و دماسنجی کانسارها به کار گرفته شده است. دلیل این امر این است که گوگرد به‌عنوان یک جزء مهم، بیشتر کانسارها را همراهی می‌کند. این عنصر هم در ساختار کانه‌ها و هم در ساختار باطله‌ها به‌طور گسترده وجود دارد و در نتیجه ایزوتوپ‌های گوگرد کاربرد وسیعی برای خود ایجاد کرده‌اند. در کانسارهای سولفیدی، به کمک ایزوتوپ‌های گوگرد می‌توان منشأ گوگرد مورد نیاز کانسار را تعیین کرد. به علاوه، به کمک این ابزار می‌توان مسائل دیگری از جمله تعیین دمای سیال کانه‌دار، تعیین نسبت مؤثر آب به سنگ در طول کانی‌سازی، تعیین درجه تعادل موجود در سیستم و در آخر تعیین سازوکار تشکیل کانسار اشاره کرد (Rollinson, 1995; Hoefs, 2004).

انواع ایزوتوپ‌های پایدار یک عنصر بین فازهای مختلف کانی‌شناختی یک کانسار می‌شود و از این اصل برای تعیین دمای سیال‌های مسئول کانی‌سازی استفاده می‌شود.

### تفکیک ایزوتوپی (isotope fractionation)

تفکیک ایزوتوپی، توزیع ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر بین فازهای کانی‌شناختی متفاوت و یا بین فازهای مختلف یک ترکیب است (Hoefs, 2004). این پدیده یکی از اصول مهم کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار است. در واقع تفکیک ایزوتوپی، در شرایط مختلفی رخ می‌دهد که همین امر زمینه کاربرد آنها را فراهم می‌آورد.

فرایندهای تفکیک ایزوتوپی به طور عمده از دو نوع است؛ تفکیک کینتیکی (kinetic isotope fractionation) و تبادل ایزوتوپی تعادلی (equilibrium isotope exchange). فرایندهای کینتیکی فرایندهای جنبشی یک طرفه‌ای هستند که معمولاً منجر به تفکیک قابل ملاحظه‌ای می‌شوند. نمونه این فرایند، تبخیر است. در فرایند تبخیر آب، ایزوتوپ‌های سبک اکسیژن و هیدروژن در فاز بخار متمرکز می‌شوند. کاهیدگی باکتریایی سولفات نیز یک فرایند کینتیکی به‌شمار می‌آید (Hoefs, 2004).

در مقابل، تبادل تعادلی شامل فرایندهایی است که تابع دمای محیط تشکیل کانی‌ها اتفاق می‌افتد و در مقایسه با فرایند قبلی، سبب تفکیک ناچیزتری می‌شود. این اثر، اساس دماسنجی به کمک ایزوتوپ‌های پایدار است (Hoefs, 2004). بر این اساس، در دمای بالا، به دلیل بسامد ارتعاشی بالا، معمولاً ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر رفتار مشابهی داشته و به مقدار بسیار کمی تفکیک انجام می‌شود. اما در دمای پایین، به دلیل تفاوت در بسامد ارتعاشی، تفکیک به میزان بیشتری انجام می‌شود.

علاوه بر دما، عوامل دیگری نیز تفکیک ایزوتوپی را کنترل می‌کنند که از جمله می‌توان به ترکیب شیمیایی، پتانسیل یونی، اثر جرم و ساختار بلوری اشاره کرد. مثلاً به خوبی ثابت شده است که پیوند با اکسیژن، ایزوتوپ‌های سنگین را جذب می‌کند. تفکیک ایزوتوپی بین پیریت و باریت (ته نشین شده از یک سیال) نتیجه همین اثر است. به گونه‌ای که باریت ایزوتوپ‌های سنگین گوگرد را جذب می‌کند. همچنین یون‌های با ظرفیت بالا و شعاع یونی پایین (مانند سیلیسیم) تمایل به جذب ایزوتوپ‌های سنگین‌تر دارند. نمونه این اثر، تفکیک ایزوتوپی بین کانی مگنتیت و کوارتز است که به میزان بالایی انجام می‌شود. این زوج کانی در رگه‌های گرمایی می‌توانند ایزوتوپ‌های اکسیژن را به میزان قابل ملاحظه‌ای تفکیک کنند. اثر جرم نیز سبب می‌شود عناصر سنگین‌تر، ایزوتوپ‌های سبک‌تر را جذب کنند. این تفکیک برای ایزوتوپ‌های گوگرد در کانی‌های گالن، پیریت و اسفالریت قابل ملاحظه است. ساختار بلوری متراکم و منظم نیز ایزوتوپ‌های سنگین‌تر را جذب می‌کند. برای مثال، الماس در مقایسه با گرافیت، از ایزوتوپ‌های سنگین کربن غنی‌تر است (Hoefs, 2004).

### جایگاه زمین‌شناسی

ناحیه معدنی راور- بافق در محدوده زون ساختاری- رسوبی ایران مرکزی واقع است. در این ناحیه، کهن‌ترین چینه‌های موجود، کربنات‌های حاوی میان‌لا‌به‌های گچ سازند دزو می‌باشد (شکل ۲). سپس توالی ستبر آواری سازند داهو (هم ارز سازند لالون در البرز) قرار دارد. واحد کربناتی سازند کوهبنان (هم ارز سازند میلا) با کنگلومرای چرتی، سازند داهو را پوشانده است. پس از سازند کوهبنان، با ناپیوستگی هم‌شیب، واحدهای کربناتی پرمین بالایی قرار گرفته‌اند. این سنگ‌های کربناتی (آهک دولومیتی شده) میزبان اصلی کانسارهای روی و سرب ناحیه مورد مطالعه است. بر روی واحد کربناتی میزبان، نهشته‌های کربناتی دیگر شامل دولومیت و آهک تریاس قرار گرفته و قابل مقایسه با سازندهای شتری و نایبند است. شیل‌های ستبر لیا و آهک‌های کرتاسه مهم‌ترین چینه‌های جوان‌تر موجود در این ناحیه است.

کانادا دارند. در این میان، وضعیت ایزوتوپی این ناحیه با کانسارهای Tri-State و Cave-in-Rock به عنوان نمونه‌های مهم کانسارهای MVT در آمریکا و کانادا به هیچ وجه شباهت ندارد. همچنین مقایسه‌های عمومی موجود در شکل ۴ نشان می‌دهد که محدوده ایزوتوپی کانسارهای این ناحیه همخوانی خوبی با  $SO_4$  آب دریای فانروزویک و تبخیری‌ها و به مقدار کمتر با نفت خام، گوگرد خالص زیستی و زغال سنگ دارد.

مقایسه این ناحیه و کانسارهای مهم روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی موجود در رشته‌کوه‌های آلپ موسوم به کانسارهای نوع آلپی، نشان داد که بین این ناحیه و کانسارهای آلپی هیچ شباهتی از نظر نسبت ایزوتوپی گوگرد وجود ندارد. مقدار  $\delta^{34}S$  کانی‌های سولفیدی اسفالریت و گالن در کانسارهای آلپی در جدول ۲ آورده شده است (Heyl et al., 1974; Brigo et al., 1977). همان طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، میانگین مقادیر  $\delta^{34}S$  در کانسارهای نوع آلپی، دست کم برای سه کانسار از این نوع، اعداد منفی در حدود ۱۰- تا ۲۰- در هزار است و این مقادیر با کانسارهای ناحیه راور- بافق با میانگین کل سولفید برابر ۱۴/۵۹ در هزار، حدود ۲۵ تا ۳۵ در هزار اختلاف دارند. مقدار منفی  $\delta^{34}S$  کانسارهای آلپی بنا به عقیده بسیاری از محققان می‌تواند نشان‌دهنده منشأ باکتریایی گوگرد باشد (Maynard, 1983). چرا که فرایندهای باکتریایی تمایل به تولید گوگرد کاهیده سبک در حین کاهیدگی سولفات دارند (برای نمونه Hoefs, 2004).

### منشأ گوگرد و فرایند تولید

یکی از مسائل مهم کانسارهای سولفیدی، منبع تأمین گوگرد مورد نیاز کانسار است. به علاوه، فرایند تولید گوگرد کاهیده به عنوان شکل مناسب و لازم تشکیل کانی‌های سولفیدی نیز از دیرباز مورد بحث بوده است. یکی از روش‌های پاسخگو در این زمینه، بهره‌گیری از مطالعات ایزوتوپی پایدار گوگرد است. به کارگیری این روش و توجه به شواهد صحرائی، می‌تواند معمای منشأ گوگرد را تا حد زیادی حل کند. برای کانسارهای سولفیدی ناحیه راور- بافق نیز تلاش شد تا این مسئله بررسی و پاسخ قابل قبولی ارائه شود.

شواهد ایزوتوپی کانسارهای این ناحیه نشان می‌دهد که دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد در این کانسارها ناچیز است. از طرفی به خوبی ثابت شده است که دامنه تغییرات ایزوتوپی گوگرد مشتق از فرایندهای باکتریایی گسترده بوده (Hoefs, 2004) و معمولاً مقادیر نسبت ایزوتوپی در حین این فرایندها اعداد منفی به دست می‌آید. دلیل این امر این است که در حین فرایندهای باکتریایی، این موجودات به‌طور انتخابی بیشتر ایزوتوپ سبک گوگرد ( $^{32}S$ ) را در فاز کاهیده متمرکز می‌کنند. چنانچه در زمان کاهیدگی باکتریایی، گوگرد تولید شده بلافاصله پس از تولید به صورت فاز سولفیدی تثبیت شود، دامنه تغییرات ایزوتوپی بین فازهای کانی‌شناختی مختلف زیاد خواهد شد. این نوع تفکیک تحت عنوان سیستم Rayleigh شناخته می‌شود (Ohmoto and Goldhaber, 1997). بنابراین دامنه تغییرات ناچیز نسبت ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای ناحیه راور- بافق می‌تواند نشانگر این باشد که در این ناحیه تفکیک Rayleigh رخ نداده است. به عبارت دیگر محدوده باریک تغییرات نسبت ایزوتوپی گوگرد می‌تواند نشانگر وضعیت تعادلی تفکیک ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای این ناحیه باشد.

همچنین دمای برآورد شده از زوج‌های سولفیدی در حال تعادل، نشان می‌دهد که دمای سیال‌های مسئول تشکیل کانسارهای این ناحیه به تقریب بین ۵۵ تا ۱۱۴ درجه سانتی‌گراد است (این مطلب در ادامه این مقاله، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است). این میزان دما برای فعالیت‌های باکتریایی چندان مناسب نیست و در نتیجه می‌توان

در کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در ناحیه راور- بافق نیز به مطالعه ایزوتوپی گوگرد پرداخته شد. در این ناحیه، تنها دو کانسار تاجکوه و طرز، دربردارنده کانسنگ سولفیدی قابل دسترس و قابل جدا شدن هستند و در دیگر کانسارها دسترسی به این نوع کانسنگ، در حال حاضر مقدور نیست (هرچند که وجود چنین کانسنگی در عمق دور از ذهن نیست).

نسبت ایزوتوپی گوگرد ( $\delta^{34}S$ ) کانی‌های سولفیدی (کل کانی‌های سولفیدی) در این کانسارها از ۱۱/۰۳ در هزار (مربوط به یکی از نمونه‌های اسفالریت کانسار تاجکوه) تا ۱۸/۵۵ در هزار (مربوط به یکی از نمونه‌های اسفالریت کانسار طرز) در تغییر است (شکل ۳). میانگین حسابی نسبت ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی این کانسارها (شامل اسفالریت، پیریت و گالن) معادل ۱۴/۵۹ در هزار است.

کانی پیریت دارای تغییرات  $\delta^{34}S$  از ۱۳/۰۱ در هزار (مربوط به کانسار طرز) تا ۱۶/۶۶ در هزار (مربوط به کانسار تاجکوه) است با میانگین حسابی  $\delta^{34}S$  ۱۴/۸۰ است. این مقدار نسبت به میانگین کل سولفیدها قدری بیشتر است. میانگین حسابی  $\delta^{34}S$  کانی پیریت در دو کانسار طرز و تاجکوه به ترتیب ۱۳/۶۷ و ۱۵/۹۳ در هزار است.

در نمونه‌های کانی اسفالریت جدا شده از کانسنگ رگه‌ای کانسار تاجکوه و طرز نیز نسبت ایزوتوپی گوگرد اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار  $\delta^{34}S$  این کانی در دو کانسار یادشده از ۱۱/۰۳ تا ۱۸/۵۵ در هزار در تغییر است. میانگین حسابی کل نمونه‌های اسفالریت این کانسارها ۱۵/۱۲ در هزار محاسبه شده است که نسبت به میانگین کل سولفیدها قدری سنگین‌تر است. میانگین مقدار  $\delta^{34}S$  اسفالریت در دو کانسار طرز و تاجکوه به ترتیب ۱۷/۸۵ و ۱۳/۴۹ در هزار به دست آمد. نکته قابل توجه این است که سبک‌ترین و سنگین‌ترین مقدار  $\delta^{34}S$  اندازه‌گیری شده در این کانسارها (۱۱/۰۳ در هزار مربوط به یکی از نمونه‌های اسفالریت کانسار تاجکوه تا ۱۸/۵۵ در هزار مربوط به یکی از نمونه‌های اسفالریت کانسار طرز) متعلق به نمونه‌های اسفالریت است و در واقع این کانی بیشترین دامنه تغییرات را در بین انواع کانی‌های سولفیدی دارد (شکل ۳). با توجه به اینکه جداسازی گالن نسبت به پیریت و اسفالریت دشوارتر بوده است، تنها ۳ نمونه از این کانی تهیه شد. در این نمونه‌ها مقدار  $\delta^{34}S$  دامنه تغییرات ناچیزی از ۱۲/۲۶ تا ۱۳/۰۳ در هزار داشته است و این مقادیر نسبت به کل سولفیدهای ناحیه سبک‌تر به نظر می‌رسد. هرچند تعداد این نمونه‌ها برای نتیجه‌گیری قطعی بسیار ناچیز است و نیاز به تجزیه‌های بیشتری دارد.

نسبت ایزوتوپی کانی‌های سولفیدی در کانسارهای ناحیه راور- بافق و فازهای کانی‌شناختی سولفیدی در کانسارهای فلزهای پایه و از جمله کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در نقاط مختلف دنیا مقایسه شد (شکل ۳). براساس شکل ۳، کانی‌های سولفیدی این کانسار با برخی از کانسارهای فلزات پایه مشابهت دارد. برای مثال، نمونه‌های سولفیدی این ناحیه با کانی‌های سولفیدی، سولفات و تبخیری کانسارهای مس تپ سرخ لایه (Red Bed)، برخی از کانی‌های سولفیدی مربوط به کانسارهای سولفید توده‌ای با سنگ میزبان رسوبی و به مقدار بیشتر با نمونه‌های سولفیدی و سولفات کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) همخوانی دارد. با توجه به سنگ میزبان رسوبی کربناتی کانسارهای ناحیه مورد مطالعه، نسبت ایزوتوپی گوگرد کانی‌های سولفیدی این ناحیه با کانسارهای روی و سرب مهم دنیا با سنگ میزبان کربناتی نیز مقایسه شد (شکل ۴). کانسارهای فلزات پایه با سنگ میزبان کربناتی دنیا بیشتر شامل کانسارهای موسوم به نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) و کانسارهای معروف به نوع آلپی (Alpine Type) هستند. مطابق شکل ۴، نمونه‌های سولفیدی کانسارهای تاجکوه و طرز بیشترین شباهت را با کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی، و بویژه با کانسارهای ناحیه بالایی دره می‌سی‌سی‌پی (Upper Mississippi Valley) و جنوب خاوری میسوری و تا حدودی با کانسار Pine Point

شود،  $R_A$  معرف  $R_B$  در کوارتز و  $R_B$  نشان دهنده  $(^{18}O/^{16}O)$  در مگنتیت است. در حالت تعادل،  $\alpha$  ممکن است به ثابت تعادل ترمودینامیکی وابسته باشد. این وابستگی با رابطه زیر مشخص می شود؛

$$\alpha = K^{1/n}$$

که در آن  $n$  برابر تعداد اتم‌های مبادله شده است. معمولاً واکنش تبادلی طوری نوشته می شود که در آن یک اتم مبادله شود، در این صورت  $\alpha = K$  خواهد بود، یعنی ثابت تعادل مساوی ضریب تفکیک است. مقادیر  $\alpha$  خیلی نزدیک به یک بوده و معمولاً در سومین عدد بعد از ممیز فرق دارند. به عبارت دیگر بیشتر اعداد به صورت  $1.00X$  هستند. به عنوان مثال، ضریب تفکیک  $^{18}O$  بین کوارتز و مگنتیت در  $500^\circ C$  درجه سانتی گراد برابر  $1.009$  است (Javoy, 1977). لذا آن را به صورت سومین عدد بعد از ممیز (مقدار در هزار یا per mil) نشان می دهند، یعنی ضریب تفکیک کوارتز-مگنتیت برابر  $9$  در هزار (‰) است. یک تخمین مفید دیگر برای ضریب تفکیک به صورت رابطه زیر بیان شده است (Rollinson, 1995)؛

$$1000 \ln(1.00X) \approx X$$

در مثال بالا داریم:  $\alpha = 1.009$  و  $1000 \ln \alpha = 9.0$ . این رابطه یک ارزش دیگر نیز دارد، بدین معنی که مطالعات تجربی نشان داده اند که  $1000 \ln \alpha$  به صورت تابعی یکنواخت و خطی از  $1/T^2$  برای یک جفت کانی-کانی و یا کانی-سیال است و در واقع تابع دما است.

$$1000 \ln \alpha_{\text{MINERAL1-MINERAL2}} = A(10^6/T^2) + B$$

که در آن  $T$  دما بر حسب درجه کلوین و  $A$  و  $B$  ضرایبی هستند که معمولاً به طور تجربی تعیین می شوند. در مورد جفت کانی کوارتز-مگنتیت، مقادیر  $A$  و  $B$  به ترتیب برابر  $6/29$  و صفر تعیین شده (Chiba et al., 1989) و لذا معادله آخر به صورت زیر در می آید.

$$1000 \ln \alpha_{\text{quartz-magnetite}} = 6.29 \times 10^6/T^2$$

برای چند زوج کانی سولفیدی، به منظور دماسنجی، مقادیر  $A$  و  $B$  توسط پژوهشگران مختلف تعیین شده است (جدول ۳). اما هنوز برای بسیاری از زوج های کانیایی همزیست این نسبت ها تعیین نشده است.

یک برآورد سودمند دیگر، رابطه بین  $1000 \ln \alpha$  و نسبت های ایزوتوپی اندازه گیری شده، یعنی مقادیر  $\delta$  است. اختلاف میان مقادیر  $\delta$  دو کانی همزیست را به صورت  $\Delta$  نمایش می دهند و این مقدار تقریباً برابر  $1000 \ln \alpha$  (زمانی که مقادیر  $\delta$  کمتر از  $10$  است) است. در مورد تبادل ایزوتوپی اکسیژن بین زوج کوارتز-مگنتیت می توان چنین نوشت؛

$$\Delta = \delta_A - \delta_B$$

$$\Delta \approx (10^3) \ln \alpha \quad \text{یا} \quad \Delta \approx (\alpha - 1) 10^3$$

$$\Delta_{\text{quartz-magnetite}} = \delta_{\text{quartz}} - \delta_{\text{magnetite}} \approx 1000 \ln \alpha_{\text{quartz-magnetite}}$$

زمانی که مقادیر  $\delta$  از  $10$  بزرگتر باشد، معادله فوق به صورت زیر نوشته می شود؛

$$\alpha_{A-B} = 1000 + \delta_A / (1000 + \delta_B)$$

در کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق نیز برای اولین بار به کمک مقادیر نسبت ایزوتوپی زوج پیریت-اسفالریت دمای سیال های کانه دار تعیین شد. بدیهی است که برای اطمینان کافی از این روش باید تعداد بیشتری اندازه گیری انجام داد تا نتایج حاصل از اعتبار لازم برخوردار باشد. بهر حال به کمک این روش، دمای تشکیل کانسنگ سولفیدی کانسارهای تاجکوه و طرز  $58/2254$  تا  $58/36$  درجه سانتی گراد تعیین شد. محاسبات مربوط به این کار در زیر آورده شده است.

مقادیر نسبت ایزوتوپی گوگرد در یک زوج کانی پیریت و اسفالریت در حال تعادل کانسار تاجکوه به ترتیب برابر  $16/66$  و  $13/89$  در هزار است (تغییرات ناچیز  $\delta^{34}S$  بین فازهای سولفیدی کانسارهای این ناحیه نیز کم و بیش شرایط تعادل را نشان می دهد). به کمک این

پذیرفت که شیوه کاهش (احیا) باکتریایی، راه حل مناسبی برای تولید گوگرد کاهیده در این ناحیه نیست. راه دیگری که برای تأمین گوگرد کاهیده پیشنهاد شده است، شیوه کاهیدگی گرمایشیمیایی سولفات (thermochemical sulfate reduction, TSR) است (Hoefs, 2004). در این شیوه، سولفات حل شده می تواند در برخورد با مواد هیدروکربنی (گاز، نفت و بیتومین) کاهیده شده و  $H_2S$  و شکل های کاهیده دیگر گوگرد را تولید کند. فرایند گرمایشیمیایی سولفات در دمای  $120-80$  درجه سانتی گراد رخ می دهد (Orr, 1974, 1977; Krouse et al., 1988).

مقایسه میزان  $\delta^{34}S$  کانی های سولفیدی مربوط به کانسارهای این ناحیه با نمودار تغییرات  $\delta^{34}S$  آب دریا در زمان های گذشته (شکل ۵، [Holser & Kaplan, 1966; Faure, 1986]) گویای این واقعیت است که گوگرد مورد نیاز این کانسارها بیش از هر منبع دیگر، از منبع سولفات آب دریای کامبرین (و احتمالاً اردووسین) منشأ گرفته است. مطالعه زمین شناسی نشان می دهد که برخی از نهشته های کامبرین این ناحیه حاوی مقادیر زیادی گچ می باشد. سازند دزو از این نظر نسبت به سایر سازندها اهمیت بیشتری دارد، به طوری که حتی می توان نهشته های گچی این سازند را به عنوان یکی از پتانسیل های اقتصادی ناحیه معرفی کرد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که گوگرد مورد نیاز این کانسارها از طریق کاهیدگی سولفات این سازند تأمین شده است. این نتیجه گیری را می توان با توجه به فرایند گرمایشیمیایی کاهیدگی سولفات صحیح دانست؛ چرا که در کاهیدگی گرمایشیمیایی سولفات، براساس آنچه Orr (1977) اظهار داشته، سولفید حاصل از این فرایند به میزان  $15$  در هزار نسبت به سولفات واکنش دهنده سبک تر می شود. نمودار یاد شده نشان می دهد که  $\delta^{34}S$  آب دریای کامبرین در حدود  $30$  در هزار بوده است. در صورتی که سولفات این دوره کاهیده شود، می تواند سولفیدهایی با  $\delta^{34}S$  حدود  $15$  در هزار تولید کند. وجود چنین سولفیدهایی در کانسارهای این ناحیه بدیهی است و بنابراین با توجه به میانگین حسابی میزان  $\delta^{34}S$  کانی های سولفیدی این ناحیه، یعنی  $14/59$  در هزار می توان این نتیجه گیری را قابل قبول دانست. همچنین وجود مواد هیدروکربنی (بیتومین) موجود در سنگ های کربناتی میزبان برخی از کانسارهای ناحیه (برای مثال در تاجکوه، طرز و سنجدو)، کاهیدگی گرمایشیمیایی را قوت می بخشد.

## دماسنجی سیال های مسئول کانی سازی

یکی از کاربردهای ایزوتوپی های گوگرد، دماسنجی سیال های مؤثر در کانی سازی است. برای این کاربرد از زوج های کانی های گوگرددار که در تعادل با یکدیگر تشکیل شده اند، استفاده می شود. دماسنجی کانسارها به کمک مطالعه تفکیک ایزوتوپی بین زوج های کانی در حال تعادل قابل انجام است. برای این که یک زوج کانی برای این کار مناسب باشد، باید شرایط زیر برقرار باشد (Hoefs, 2004)؛

- کانی ها در تعادل ایزوتوپی تشکیل شده باشند. این شرط به کمک روابط بافتی در مقاطع میکروسکوپی قابل بررسی است.

- کانی های مورد نظر پس از تشکیل ترکیب ایزوتوپی خود را حفظ کرده باشند.

- ضریب تفکیک (fractionation factor) زوج کانی مورد نظر وابسته به دما بوده و به کمک تجربه آزمایشگاهی به خوبی کالیبره شده باشد.

چنانچه شرایط فوق برقرار باشد، دماسنجی به کمک ضریب تفکیک انجام می شود. ضریب تفکیک ( $\alpha$ )، نسبت تفکیک ایزوتوپی در دو فاز مختلف است (White, 2005)

$$\alpha_{A-B} = R_A/R_B$$

که در آن  $R_A$  و  $R_B$  به ترتیب نسبت ایزوتوپی در فاز  $A$  و در فاز  $B$  است. مثلاً اگر ضریب تفکیک برای ایزوتوپ های اکسیژن بین زوج کانی کوارتز و مگنتیت نوشته



همراه با چینه‌های دیگر دچار چین خوردگی و کج‌شدگی شده و شرایط مهاجرت شوراب‌های گوگرددار و فلزدار فراهم شده است. مدل آمیختگی برای تشکیل کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (Mississippi Valley-type) توسط بسیاری از محققان مورد تأیید قرار گرفته است (برای مثال Sverjensky, 1989).

### نتایج

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی کانسنگ سولفیدی کانسارهای ناحیه راور- بافق می‌توان نتایج زیر را به اختصار مطرح کرد؛

-نسبت ایزوتوپی گوگرد کانسارهای سولفیدی این ناحیه دارای دامنه محدودی از ۱۱/۰۳ تا ۱۸/۵۵ در هزار است. این نسبت در کانی‌های مختلف با هم تفاوت‌هایی نشان می‌دهد، به گونه‌ای که بیشترین تغییرات مربوط به اسفالریت و کمترین تغییرات مربوط به گالن است. -مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کانی‌های سولفیدی نشان‌دهنده نقش فرایندهای گرمایشیمیایی سولفات در تأمین گوگرد کاهیده مورد نیاز این کانسارها است.

-با توجه به مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کانی‌های سولفیدی می‌توان دریافت که نهشته‌های تبخیری سازند دزو (کامبرین پایینی) مهم‌ترین منبع تأمین گوگرد مورد نیاز این کانسارها بوده است. کاهیدگی گرمایشیمیایی سولفات محلول مشتق از این نهشته‌ها گوگرد کاهیده مورد نیاز را فراهم نموده است.

-دمای برآورد شده از روی زوج‌های سولفیدی در حال تعادل، نشان داده است که این کانسارها در دمای تقریبی بین ۵۸ تا ۱۱۴ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. -بهترین مدل تشکیل این کانسارها، مدل آمیختگی است. بر اساس این مدل، شوراب‌های حوضه‌ای مشتق از نهشته‌های تبخیری کامبرین پایینی (سازند دزو) پس از مهاجرت به سمت بالا، با سیال‌های حوضه‌ای مشتق از چینه‌های کربناتی پرمین بالایی آمیخته شده و کانسنگ سولفیدی را به وجود آورده است. زمان این آمیختگی کراتاسه یا پس از آن است. -نیروی رانش سیال‌های مسئول کانه‌زایی در این ناحیه، تلفیقی از نیروی گرانش و فشردگی زمین‌ساختی بوده است.

### سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری نویسنده اول است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به‌انجام رسیده است. نویسندگان مراتب سپاس خود را از جناب آقای دکتر خسروتهرانی، مدیریت محترم گروه زمین‌شناسی و همچنین از حوزه معاونت پژوهشی این دانشگاه ابراز می‌دارند.

جدول ۲-  $\delta^{34}\text{S}$  مربوط به گالن و اسفالریت کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق

میزبان کربناتی (Heyl et al., 1974; Brigo et al., 1977)

و مقایسه آنها با کانسارهای ناحیه راور- بافق.

Mississippi Valley Type	Mean	Range
Southeast Missouri	+12	± 22
Upper Mississippi Valley	+7	± 7
Tri- State	-5	± 5
Alpine Type		
Bleiberg	-20	± 15
Mezica	-10	± 10
Raibl	-18	± 11
Ravar- Bafgh District (sphalerite, pyrite and galena)		
	14.59 +	± 4

مقادیر و براساس روابط ریاضی، می‌توان  $\alpha$  را به شرح زیر برای این مثال حساب کرد:

$$\alpha_{\text{pyrite-sphalerite}} = (1000 + \delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}) / (1000 + \delta^{34}\text{S}_{\text{sphalerite}})$$

$$\alpha_{\text{pyrite-sphalerite}} = (1000 + 16.66) / (1000 + 13.89) = 1.0027320$$

با توجه به معادلاتی که قبلاً معرفی شد می‌توان چنین نوشت؛

$$1000 \ln \alpha = 2.7320$$

اینک می‌توان به کمک معادله تفکیک پیریت- اسفالریت (Ohmoto & Rye, 1979)

که در جدول ۳ نیز آورده شده، دما را محاسبه کرد؛

$$1000 \ln \alpha = 0.3(10^6/T^2)$$

$$2.7320 = 0.3(10^6/T^2)$$

$$T^2 = 109809.6633; T = 331.375 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T = 58.2254 \text{ }^\circ\text{C}$$

به همین ترتیب، برای برخی زوج‌های دیگر (اسفالریت- پیریت) نیز دما تعیین شد. نتایج حاصل، حاکی از دامنه تغییرات دما از ۵۸/۲۲ تا ۱۱۴/۳۶ درجه سانتی‌گراد است. این یافته نشان می‌دهد که دمای تشکیل کانسارهای سولفیدی این ناحیه به‌طور نسبی پایین بوده است. شواهد صحرائی، بوژه فراوانی بافت کلو فرم کانه‌ها و باطله‌ها و همچنین ناچیز بودن آثار دگرسانی در هماهنگی با این یافته جدید است.

### مدل تشکیل و زایش (ژنز) کانسار

با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان مدل آمیختگی را به‌عنوان بهترین مدل تشکیل کانسارهای این ناحیه معرفی کرد. بر اساس این مدل، سیال‌های حاوی سولفات، شوراب‌هایی بوده است که از درون نهشته‌های تبخیری کامبرین زیرین منشأ گرفته و گوگرد مورد نیاز را به سمت بالا منتقل کرده‌اند. این سیال‌ها، مهاجرت خود را تا رسیدن به محل سنگ میزبان کانسار ادامه داده و در داخل فضاها باز (منطبق بر گسل‌های کششی) با سیال‌های حوضه‌ای فلزدار مشتق از سنگ‌های کربناتی پرمین بالایی به عنوان منشأ فلزها (امیری، ۱۳۸۶) آمیخته شده و به همین دلیل، شرایط نهشت کانی‌های سولفیدی در محل رگه‌ها را فراهم کرده است. نیروی رانش سیال‌های باد شده تلفیقی از نیروی رانش گرانشی و فشردگی ناشی از حرکات زمین‌ساختی بوده است (شکل ۶). مهم‌ترین فاز زمین‌ساختی مؤثر بر این سیال‌ها را می‌توان حرکات کوهزایی کراتاسه در نظر گرفت (امیری، ۱۳۸۶)، چرا که چینه‌های پرمین بالایی تا قبل از کراتاسه، چین خوردگی مهمی تحمل نکرده‌اند و در این زمان، چینه‌های میزبان

جدول ۱- نتایج تجزیه ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق.

	C L S No	Sample ID	Mineral	Weight (mg)	Yield (mmHg)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (permil)
1	9808	TAJ.05.S	sphalerite	38.3	1.4**	13.89
2	9809	TAJ.10.P	pyrite	16.0	20.4	16.66
3	9810	TAJ.10.S	sphalerite	44.0	1.0**	11.03
4	9811	TRZ.04.S	sphalerite	36.7	17.8	17.82
5	9812	TRZ.09.S	sphalerite	46.0	40.2	18.55
6	9813	TRZ.12.P	pyrite	15.2	30.8	13.01
7		TAJ.06.S	sphalerite	33.2		14.11
8		TAJ.06.P	pyrite	41.6		15.62
9		TAJ.08.S	sphalerite	23.1		13.47
10		TAJ.08.P	pyrite	45.4		15.51
11		TAJ.14.S	sphalerite	28.7		14.95
12		TRZ.04.P	pyrite	48.0		14.14
13		TRZ.09.P	pyrite	24.2		13.88
14		TRZ.14.S	sphalerite	38.4		17.19
15		TAJ.45.G	galena	21.0		12.26
16		TAJ.46.G	galena	19.2		12.98
17		TRZ.16.G	galena	23.9		13.01

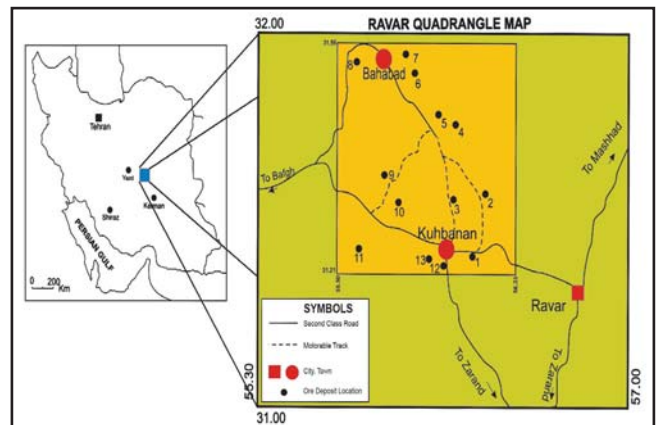
\*\*Cold finger used

نمونه‌های ردیف ۱ تا ۶ در دانشگاه تاسمانیای استرالیا و نمونه‌های ردیف ۷ تا ۱۷ در دانشگاه کوئینزلند، کانادا تجزیه شده است. TAJ و TRZ در شماره نمونه‌ها به ترتیب نشان دهنده نمونه‌های تاجکوه و طرز است.

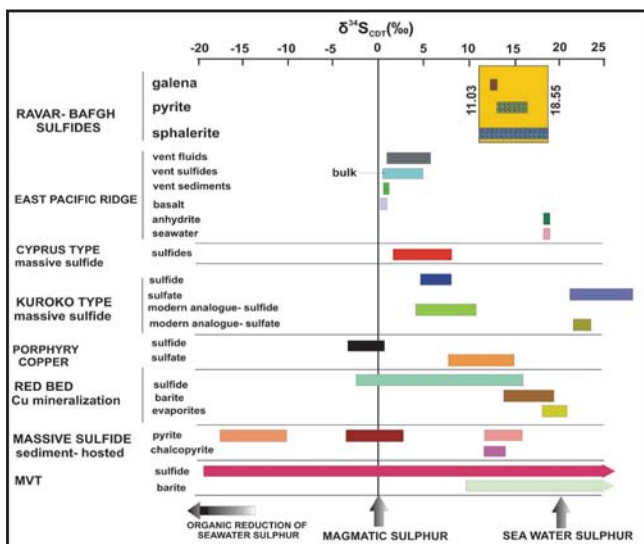
جدول ۳- کاربرد معادله تفکیک ایزوتوپی زوج های کانیاپی برای دماسنجی.

ردیف	زوج کانی	معادله تفکیک ایزوتوپی با مقادیر A و B	مرجع *
۱	پیریت- گالن	$1000\ln\alpha = 1.03(10^6/T^2)$	1
		$1000\ln\alpha = 1.08(10^6/T^2) , (150-600 \text{ } ^\circ\text{C})$	2
۲	پیریت- اسفالریت (پیریت- پیروتیت)	$1000\ln\alpha = 0.30(10^6/T^2)$	1
۳	پیریت- کالکوپیریت	$1000\ln\alpha = 0.45(10^6/T^2)$	1
۴	اسفالریت- گالن (پیروتیت- گالن)	$1000\ln\alpha = 0.73(10^6/T^2)$	1
		$1000\ln\alpha = 0.76(10^6/T^2) , (100-600 \text{ } ^\circ\text{C})$	2
۵	سولفات- پیریت	$1000\ln\alpha = 6.063(10^6/T^2) + 0.56$	3
۶	سولفات- کالکوپیریت	$1000\ln\alpha = 6.513(10^6/T^2) + 0.56$	3

\*References, 1- Ohmoto and Rey (1979); 2- Clay ton (1981); 3- Ohmoto and Lasaga (1982)

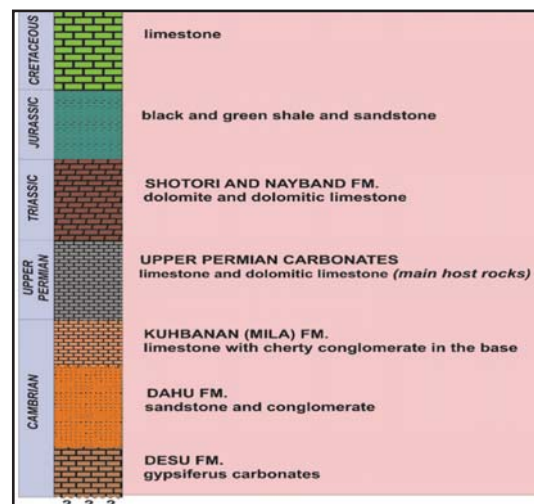


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در ناحیه راور- بافق. ۱- طرز، ۲- گوجر، ۳- کاروانگاه، ۴- تپه سرخ، ۵- سنجدو، ۶- گیچر کوه، ۷- آب حیدر، ۸- احمدآباد (بنه انار)، ۹- چاه میر(سدکس؟)، ۱۰- کوه قلعه، ۱۱- تاجکوه، ۱۲- گور (جور)، ۱۳- مگسو.

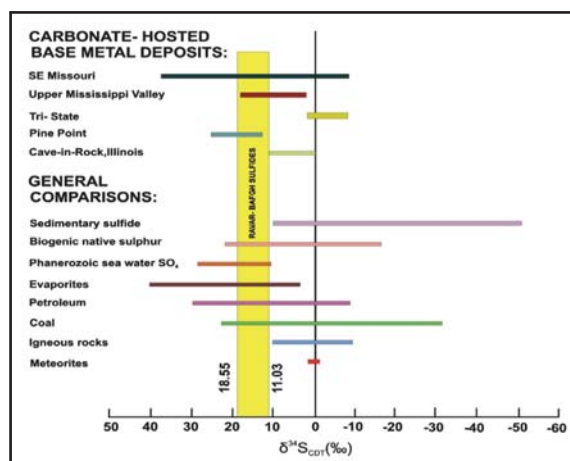


شکل ۳- تغییرات  $\delta^{34}\text{S}$  در محیط های مختلف زمین شناسی

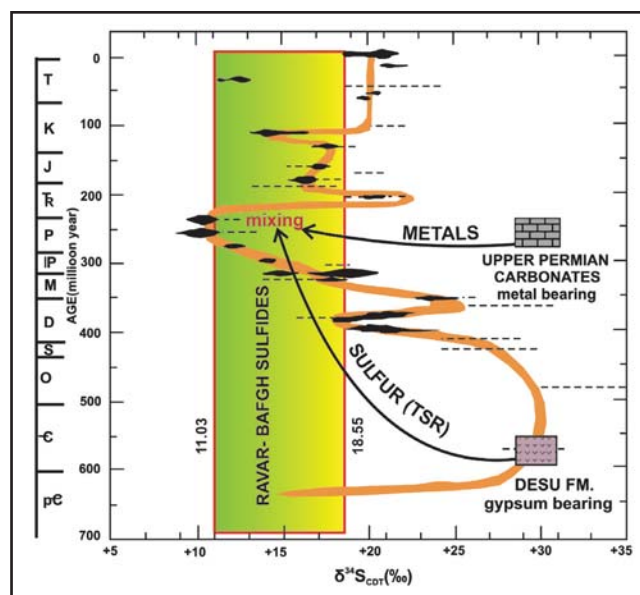
(نقل از Rollinson, 1995) و جایگاه محدوده تغییرات  $\delta^{34}\text{S}$  کانی های سولفیدی کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق.



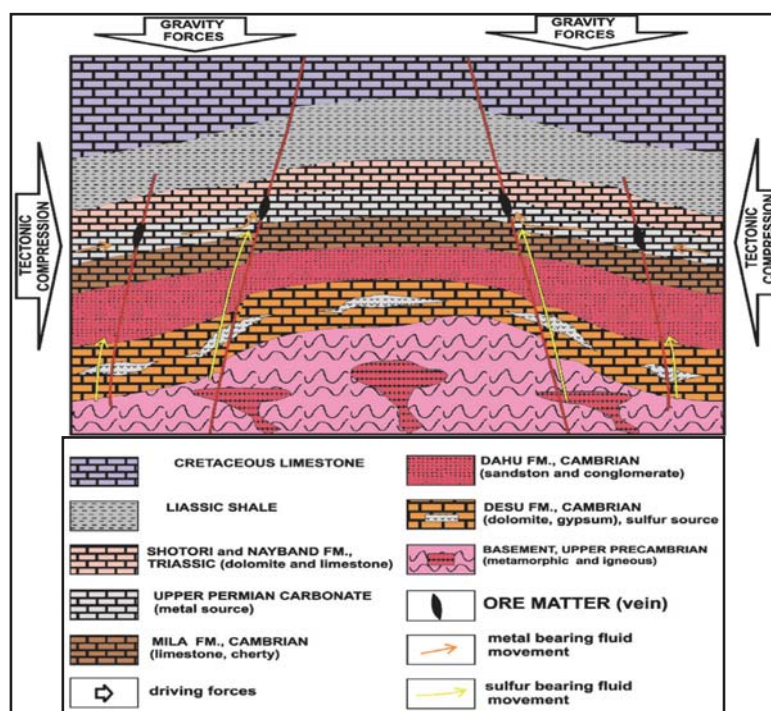
شکل ۲- ستون چینه شناسی ناحیه معدنی راور- بافق (بدون مقیاس) و موقعیت سنگ های کربناتی میزبان کانسارهای روی و سرب این ناحیه.



شکل ۴- مقایسه محدوده ایزوتوپی گوگرد کانی های سولفیدی کانسارهای روی و سرب ناحیه راور- بافق (تاجکوه و طرز) با کانسارهای فلزهای پایه با سنگ میزبان کربناتی دنیا (Heyl et al., 1974).



شکل ۵- تغییرات نسبت ایزوتوپی گوگرد آب دریا در زمان‌های مختلف (Holser and Kaplan, 1966; Faure, 1986) و محدوده تغییرات نسبت ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های سولفیدی ناحیه راور- بافق. با توجه به مقادیر  $\delta^{34}\text{S}$  کانسارهای ناحیه یادشده، کاهیدگی گرمایشیمیایی سولفات (TSR) و مدل آمیختگی را می‌توان برای تشکیل این کانسارها معرفی کرد.



شکل ۶- مدل احتمالی چگونگی نهشت کانسارهای سولفیدی در ناحیه راور- بافق. چنانکه در این شکل نشان داده شده است، مدل تشکیل این کانسارها از نوع آمیختگی است و سیال‌های حاوی گوگرد که از سازند دزو مشتق شده است با سیال فلزدار مشتق از کربنات‌های پریمین بالایی مخلوط شده و کانسارهای سولفیدی این ناحیه را به وجود آورده‌اند.

### کتابنگاری

- امیری، ع.، ۱۳۸۶- مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژنز کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناتی در ناحیه راور- بافق. رساله منتشر نشده دکترای تخصصی زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۳۲۰ صفحه.
- امیری، ع. و رسا، الف.، ۱۳۸۵- بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی کانسارهای استراتاباند غیرسولفیدی روی و سرب در ناحیه کوهبنان- بهاباد. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال دوم، شماره اول، صفحات ۹-۱.

## References

- Brigo, L. Kostelka, L. Omenetto, P. Schneider, H- J. Schulz, O. and Štucl, I., 1977- Comparative reflections on four Alpine Pb- Zn deposits. In: D. D. Klemm and H-J. Schneider, (eds.), Time and strata-bound ore deposits. Springer-Verlag, New York. 273-293.
- Chiba, H. Chacko, T. Clayton, R. N. and Goldsmith, J. R., 1989- Oxygen isotope fractionations involving diopside, forsterite, magnetite, and calcite: application to geothermometry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2985-2995.
- Clayton, R. N., 1981- Isotopic thermometry. In: R. C. Newton, A. Navrotsky and B. J. Wood, (eds.), Thermodynamics of minerals and melts. Springer-Verlag, New York, 85-109.
- Faure, G., 1986 - Principles of Isotope Geology. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons.
- Heyl, A. V. Landis, G. P. & Zartman, R. E., 1974- Isotopic evidence for the origin of Mississippi Valley-type mineral deposits: a review *Economic Geology*, Vol. 69: 992-1006.
- Hoefs, J., 2004- Stable isotope geochemistry. Springer Verlag, Berlin, 5th edition, 244p.
- Holser, W. T. & Kaplan, I. R., 1966- Isotope geochemistry of sedimentary sulfates. *Chem. Geol.*, Vol. 1: 93-135.
- Javoy, M., 1977- Stable isotopes and geothermometry. *Jour. Geol. Soc. London*, Vol. 133: 609-639.
- Krouse, R. H., Viau, C. A., Eluik, L. S., Ueda, A. & Halas, S., 1988- Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulfate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs. *Nature*, Vol. 333: 415-419.
- Maynard, J. B., 1983- Geochemistry of sedimentary ore deposits. Springer-Verlag, New York, 305p.
- Ohmoto, H. & Rye, R. O., 1979- Isotopes of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (ed.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Second Edition. John Wiley and Sons, New York: 509-567.
- Ohmoto, H. & Lasaga, A. C., 1982- Kinetics of reactions between aqueous sulfate and sulfides in hydrothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 46: 1727-1745.
- Ohmoto, H. and Goldhaber, M. B., 1997- Sulfur and carbon isotopes. In: H.L. Barnes (ed.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3rd edition, New York, John Wiley: 517-611.
- Orr, W. L., 1974- Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation- study of Big Horn Basin Paleozoic oils. *American Assoc. Petrol. Geologist Bull.*, Vol. 58: 2295-2318.
- Orr, W. L., 1977- Geologic and geochemical controls on the distribution of hydrogen sulfide in natural gas. In: Campos, R. and Goni, J. (eds.): *Advances in organic geochemistry*. Madrid, Enadisma: 572-597.
- Robinson, B. W. & Kusakabe, M., 1975- Quantitative preparation of sulphur dioxide for 34S/32S analyses from sulphides by combustion with cuprous oxide. *Anal. Chem.*, 47: 1179-1181.
- Rollinson, H. R., 1995- Using geochemical data: evaluation, presentation and interpretation. Longman Group, UK, 344p.
- Sverjenski, D. A., 1989- The diverse origins of Mississippi Valley-Type Zn-Pb-Ba-F deposits. *Chron. rech. min.*, n° 495: 5-13.
- White, M. W., 2005- *Geochemistry*. John Hopkins University Press, 701 p.