



## شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی در کانسارهای روی و سرب نامیه‌ی راور-بافق، یافته‌های ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن

علی‌امیری<sup>۱</sup> و ایری‌رassa<sup>۲</sup>

(۱) عضو هیأت علمی گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرنند، زرنند کرمان، ایران. A-Amiri@iau-zarand.ac.ir

(۲) بخش زمین‌شناسی دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

### چکیده

کانسارهای روی و سرب ناحیه‌ی راور-بافق با سنگ میزبان کربناته به طور عمده در بردارنده‌ی کانسنگ غیرسولفیدی می‌باشند. در این مقاله به بررسی تغییرات ایزوتوپی کربن و اکسیژن کانی‌های جدا شده غیرسولفیدی پرداخته شد. دامنه تغییرات  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  کانی اسمیت سونیت در این کانسارها از  $-۱۷/۴۵۶$  تا  $-۷/۲۴۸$  در هزار در تغییر است که همخوان با  $\text{CO}_2$  جوّی است. در کانی همی مرفیت مقدار  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  از  $-۱۷/۸۷۱$  تا  $-۲۳/۵۵۴$  در هزار در تغییر است که نشان‌دهنده‌ی غنی‌شدگی شدید این کانی از ایزوتوپ سبک کربن است. کانی‌های آراگونیت رگه‌ای همراه با کانسنگ غیرسولفیدی در شرایط مشابه اسمیت سونیت به وجود آمده است، اما نمونه‌های کلسیت همراه با کانسنگ سولفیدی در شرایط مشابه با سنگ آهک شکل گرفته است. دامنه‌ی تغییرات  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  و  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  نیز در کانی‌های یاد شده بررسی شد. در کانی اسمیت سونیت مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  از  $+۲۱/۸۲۱$  تا  $+۲۶/۴۴۵$  در هزار و مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  از  $-۶/۸۸۲$  تا  $-۸/۷۶۸$  در هزار و در کانی همی مرفیت مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  از  $+۱۶/۲۶۳$  تا  $+۱۹/۵۸۰$  در هزار و مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  از  $-۱۰/۸۷۶$  تا  $-۱۴/۱۶۰$  در هزار در تغییر است. این مقادیر نشان می‌دهد که کانی‌های غیرسولفیدی موجود در این کانسارها از طریق هوازدگی کانسنگ سولفیدی به وسیله آب‌های جوّی فرورو و به مقدار کمتر سیالات روزنه‌ای محبوس در تخلخل سنگ میزبان کربناته به وجود آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ کربن، اکسیژن، سرب، روی، راور-بافق.

## The non-sulfide ore Formation conditions of Ravar-Bafgha rea, findings of carbon and oxygen stable isotopes

A. Amiri<sup>1</sup> & I. Rassa<sup>2</sup>

1) Department of Geology, Islamic Azad University, Zarand Branch, Zarand, I.R. Iran.

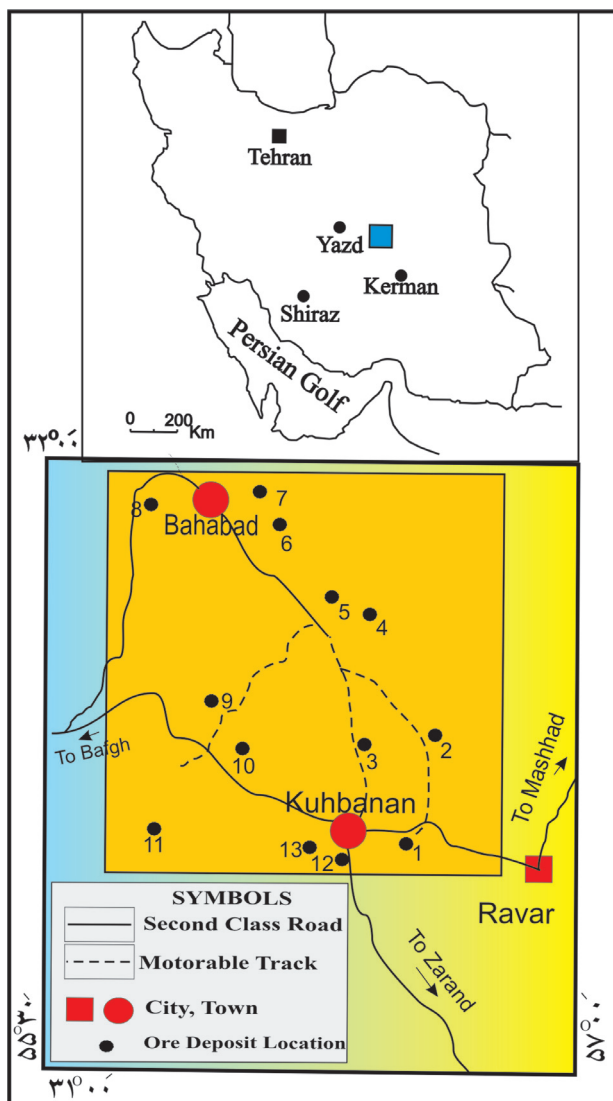
2) Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, I.R. Iran.

### Abstract

The carbonate-hosted zinc-lead deposits of Ravar-Bafgha area mainly contain non-sulfide ore. In this article, we have studied the variations of carbon and oxygen isotopic ratios from separated non-sulfide

minerals. The range of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  in the smithsonite varies from -1.456 to -7.248‰ and shows a good congruency with meteoric  $\text{CO}_2$ . In the hemimorphite,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values vary from -17.871 to -23.554‰ and show high enrichment of light carbon isotope. Vein-type aragonite associated with non-sulfide ore is formed under the same conditions as the smithsonite, but the calcite mineral associated with sulfide ore is formed under the same conditions as the limestone. The range of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  isotopic ratios is studied in the mentioned minerals. In the smithsonite, the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  values vary from +21.821 to +26.445‰, the values of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  vary from -6.882 to -8.768‰, the values in the hemimorphite vary from +16.263 to +19.580‰ and from -10.876 to -14.160‰ for  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  respectively. These values show that the non-sulfide minerals of these deposits are formed during the weathering of exposed sulfide ore and the fluids responsible for these processes are descending meteoric waters with minor amount of pore waters entrapped in the porosity of the carbonate host rocks.

**Key word:** Isotope, Carbon, Oxygen, lead, Zinc, Ravar-Bafgh.



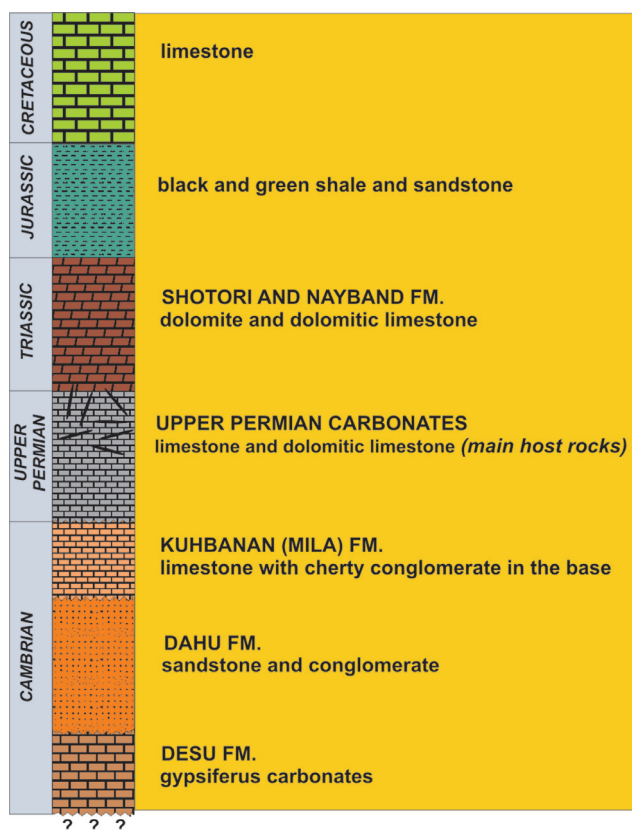
تصویر ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناته در ناحیه ی راور-بافغ. ۱- طرز، ۲- گوجر، ۳- کاروانگاه، ۴- تپه سرخ، ۵- سنجدو، ۶- گیچرکوه، ۷- آب حیدر، ۸- احمدآباد (بینه انار)، ۹- چاه میر (سدکس؟)، ۱۰- کوه قلعه، ۱۱- تاجکوه، ۱۲- گور (جور)، ۱۳- مگسو.

## ۱- مقدمه

در ناحیه ی راور-بافغ، در حد فاصل استان های کرمان و یزد، نزدیک به چهل معدن و اثر معدنی روی و سرب وجود دارد که در گذشته های دور و نزدیک مورد استخراج واقع شده اند. در این میان، ۱۲ معدن داری اهمیت بیشتر بوده (تصویر ۱) و در تمام این معادن، کانسنگ غیرسولفیدی روی و سرب به عنوان مهمترین بخش ماده ی معدنی مورد استخراج قرار گرفته است. این کانسارها غالباً در سنگ های کربناته ی پرمین بالایی قرار دارند و شکل ماده ی معدنی در آن ها عموماً رگه ای است. رگه های معدنی معمولاً چینه های دربردارنده را قطع می کنند، اما گاه نیز با راستای چینه بندی همخوان هستند (امیری و رسا ۱۳۸۵، امیری ۱۳۸۶).

بررسی های انجام شده نشان می دهد که کانسنگ غیرسولفیدی موجود در این کانسارها از طریق هوازدگی کانسنگ سولفیدی به وجود آمده است. وجود کانسنگ سولفیدی در عمق پایین تر از سطح آب های زیرزمینی دلیل اصلی این ادعاست. از طرفی، طی سال های اخیر در سطح دنیا توجه چشمگیری به کانسنگ غیرسولفیدی روی و سرب شده است. به همین خاطر، محققان زیادی به این دسته از کانسنگ ها پرداخته اند (Hitzman et al. 2003). با این وجود هنوز در کشور ایران نگاه درخور توجهی به این دسته از کانسارها نشده است.

یکی از زمینه های تحقیقاتی مهم این کانسارها، بررسی بر روی ایزوتوپ های پایدار کربن و اکسیژن است. با توجه به این که کانی های معدنی موجود در کانسنگ غیرسولفیدی عمدتاً ترکیبات غیرسولفیدی نظیر کربنات ها، سیلیکات ها، اکسیدها و هیدروکسیدها



تصویر ۲- ستون چینه‌شناسی شماتیک ناحیه‌ی معدنی راور-باق (بدون مقیاس) و موقعیت سنگ‌های کربناته میزبان کانسارهای روی و سرب این ناحیه.

جداسازی کانی‌های غیرسولفیدی از کانسنگ غیرسولفیدی معادن مختلف ناحیه‌ی راور-باق شد. جداسازی به روش میکرودریلینگ و به کمک مته‌های ظریف انجام گردید. سپس نمونه‌های جداشده در زیر استریومیکروسکوپ خالص سازی و با این روش، نمونه‌هایی به وزن تقریبی ۰/۲۵ میلی گرم از کانی‌های مختلف تهیه شد. نمونه‌های تهیه شده به طور عمده شامل کانی‌های غیرسولفیدی و باطله‌های همراه بوده است. علاوه بر آن برای بررسی محیط تشکیل کانسنگ سولفیدی، نمونه‌هایی از باطله‌های غیرسولفیدی همراه با این نوع کانسنگ نیز تهیه شد. تعدادی از نمونه‌ها در آزمایشگاه مرکزی علوم دانشگاه تاسمانیا در کشور استرالیا و تعدادی نیز در آزمایشگاه تحقیقات ایزوتوپی دانشگاه کویزلند در کشور کانادا به وسیله‌ی دستگاه اسپکترومتر جرمی مورد آنالیز قرار گرفت. رفرنس‌های مربوط به آنالیز در دانشگاه تاسمانیا به شرح زیر بوده است:

در مورد استاندارد ایزوتوپی کربن و اکسیژن و فاکتور تصحیح برای آنالیز اسپکتروگرافی جرمی دی‌اکسیدکربن از روش‌های

می‌باشند، در نتیجه عناصر کربن و اکسیژن به فراوانی در ترکیب این کانی‌ها شرکت می‌کنند. به همین خاطر، مطالعه بر روی ایزوتوپ‌های پایدار این عناصر می‌تواند در روشن شدن شرایط تشکیل کانسنگ‌های غیرسولفیدی از اهمیت زیادی برخوردار باشد. با توجه به مطالب یادشده، مطالعه بر روی ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن در این کانسارها ضروری می‌باشد.

## ۲- موقعیت زمین‌شناسی

ناحیه‌ی معدنی راور-باق در محدوده‌ی زون ساختاری-رسوبی ایران مرکزی واقع شده است. در این ناحیه کهن‌ترین چینه‌های موجود، کربنات‌های حاوی میان‌لایه‌های گچی سازند دزو می‌باشد (تصویر ۲). سپس توالی ضخیم آواری سازند داهو (معادل سازند لالون در البرز) قرار دارد. این سازند به طور عمده از ماسه سنگ قرمز و کنگلومرا تشکیل شده است و در مقاطع میکروسکوپی آن، دانه‌های کوارتز با خاموشی موجی و فلدسپار آلکالن بسیار فراوان است. واحد کربناته سازند کوهبنان (معادل سازند میلا)، با کنگلومرای چرتی پیشرونده (Base quartzite)، سازند داهو را پوشانده است. در این توالی کربناته چندین افق کوارتزآرنایت به چشم می‌خورد. وجود بقایای فسیلی تریلوبیت سن کامبرین را برای این سازند محرز نموده است. پس از سازند کوهبنان، با ناپیوستگی هم‌شیب، واحدهای کربناته پرمین بالایی قرار گرفته‌اند. این سنگ‌های کربناته (آهک دولومیتی شده) میزبان اصلی کانسارهای روی و سرب ناحیه‌ی مورد مطالعه است. بر روی واحد کربناته میزبان، نهشته‌های کربناته دیگر شامل دولومیت و سنگ آهک تریاس قرار گرفته و قابل مقایسه با سازندهای شتری و ناینند است. شیل‌های ضخیم لیاس و سنگ‌های آهکی کرتاسه مهم‌ترین چینه‌های جوان‌تر موجود در این ناحیه را شامل می‌شوند.

روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی در ناحیه‌ی معدنی شمال باختری-جنوب خاوری است و گسل‌های مهم و اساسی کوهبنان و بهاباد به عنوان ساختارهای تأثیرگذار در این بخش از ایران مرکزی محسوب می‌شوند.

## ۳- نمونه برداری و روش تهیه

به منظور بررسی ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن، اقدام به

(Walters et al. 1971, Swart et al. 1991, Craig 1957, McCrea 1950) استفاده و تعداد ۱۶ نمونه به روش‌های فوق، مورد آنالیز واقع شدند (جدول ۱). استاندارد مرجع مورد استفاده برای این آنالیزها و تعیین نسبت ایزوتوپی شامل دو استاندارد (Pee Dee Blemnitella Americana) PDB، نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت Blemnitella Americana متعلق به کرتاسه مربوط به سازند Pee Dee در آمریکا) و SMOW (Standard Mean Ocean Water استاندارد متوسط آب اقیانوس) بوده است. در مورد نسبت ایزوتوپی کربن تنها از استاندارد نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت (PDB) استفاده شده است، در حالی که در مورد نسبت ایزوتوپی اکسیژن از هر دو استاندارد بهره‌گیری شده است. با این وجود، چنانکه برخی از محققان اشاره نموده‌اند مثلاً (Hoefs 2004) استفاده از استاندارد نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت برای کربنات‌های دمای پایین ارجحیت دارد. تبدیل نتایج به دست آمده از طریق به کارگیری استانداردهای صدف فسیل بلمنیت و استاندارد متوسط آب اقیانوس در مواردی که تنها از یک استاندارد استفاده شده باشد، به کمک روابط زیر قابل انجام است. (Coplen et al. 1983)

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03091\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.91$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = 0.97002\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - 29.98$$

#### ۴- ایزوتوپ‌های کربن

به منظور مطالعه‌ی شرایط تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی، پس از بررسی‌های صحرایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی اقدام به مطالعه بر روی ایزوتوپ‌های پایدار کانی‌های غیرسولفیدی شد. برای نمونه‌های دو کانی اسمیت‌سونیت و همی مرفیت به عنوان فراوان‌ترین کانی‌های غیرسولفیدی روی در کانسارهای ناحیه‌ی مورد نظر، نسبت‌های ایزوتوپی کربن و اکسیژن محاسبه شد.

نسبت ایزوتوپی کربن ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) در کانی اسمیت‌سونیت از ۱۴۵۶- تا ۲۴۸- در هزار در تغییر است (تصویر ۳). سبک‌ترین و سنگین‌ترین نسبت ایزوتوپی کربن به ترتیب مربوط به نمونه‌های معادن تپه سرخ و گور به دست آمده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، میانگین حسابی نسبت ایزوتوپی کربن ۵/۰۶۱- در هزار محاسبه شد. مقادیر  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  در محیط‌های مختلف (Kerridge 1985, Field

جدول ۱- نتایج آنالیز ایزوتوپی کربن و اکسیژن کانی‌های غیرسولفیدی کانسارهای روی و سرب ناحیه‌ی راور-بافق.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/0/00$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/0/00$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/0/00$	Weight (mg)	Sample ID*
۲۲۰۱۹	-۸۵۷۶	-۵/۸۶۴	۲۳/۸	KGH.20.A
۱۷/۴۷۱	-۱۲/۸۸۸	-۲۳/۵۵۴	۲۶	TAJ.03.H
۲۳/۲۱۵	-۷/۴۱۶	-۶/۶۹۳	۲۵/۲	TAJ.03.S
۱۶/۲۶۳	-۱۴/۱۶۰	-۱۸/۶۵۱	۲۵/۶	TRZ.04.H
۱۷/۵۷۲	-۱۲/۸۹۰	-۲۱/۵۳۹	۲۴/۸	TRZ.06.H
۲۱/۳۴۵	-۹/۲۳۰	۱/۰۴۱	۲۴/۲	TRZ.12.C
۲۱/۸۲۱	-۸/۷۶۸	-۱/۴۵۶	۲۴/۴	TS.05.S
۱۹/۲۹۶	-۱۲/۲۶۵	-۱۹/۱۲۴	۲۵/۱	GAV.01.H
۲۳/۸۱۵	-۶/۸۸۲	-۷/۲۴۸	۲۶/۲	GAV.01.S
۱۷/۲۸۷	-۱۳/۲۱۴	-۲۱/۳۱۱	۲۶/۳	GUJ.11.H
۲۶/۴۴۵	-۴/۳۳۱	-۴/۴۷۲	۲۳/۷	GUJ.14.S
۲۵/۶۵۰	-۵/۱۰۲	-۵/۴۳۹	۲۴/۹	GUJ.26.S
۱۹/۲۹۲	-۱۲/۲۶۹	-۱۷/۸۷۱	۲۶	GIJ.02.H
۱۹/۵۸۰	-۱۰/۹۸۱	-۱۸/۲۳۲	۲۷/۱	GIJ.05.H
۲۱/۷۵۹	-۸/۸۷۶	۱/۲۱۴	۲۶/۵	TAJ.32.C
۲۲/۳۸۵	-۸/۲۶۹	-۶/۲۱۹	۲۳/۷	MAG.01.A

\*- علامت‌های اختصاری KGH, TAJ, TRZ, TS, GAV, GUJ, MAG و GIJ به ترتیب شامل معادن کوه قلعه، تاجکوه، طرز، تپه سرخ، گور، گوجر و مگسو می‌باشد. در شماره نمونه‌ها نیز حروف A, H, S و C به ترتیب نشانه‌ی رگه‌های آراگونیتی، همی مرفیت، اسمیت‌سونیت و کلسیت همراه با کانسنگ سولفیدی است.

در واقع شاید بتوان نقشی را در ارتباط با تشکیل این کانی به سیالات روزنه‌ای محبوس در تخلخل سنگ کربناته میزبان داد. قرارگیری کانسنگ غیرسولفیدی در سنگ میزبان کربناته و واکنش سیالات جوئی با این سنگ‌ها نیز می‌تواند سبب نزدیکی ترکیب ایزوتوپی آن‌ها با سنگ آهک شده باشد. در مقابل، همخوانی بسیار خوب  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  کانی اسمیت‌سونیت با دی‌اکسید کربن جوئی (تصویر ۳) نیز حاکی از این است که تشکیل این کانی بی‌تردید در ارتباط با سیالات جوئی فرورو بوده است. مطالعات کانی‌شناسی نیز این یافته را تأیید می‌کند (امیری ۱۳۸۶). وجود رگه‌های معدنی که از سطح به

وجود آمده باشند، بر روی نمونه‌های آراگونیت این رگه‌ها نیز بررسی ایزوتوپی انجام شد. دو نمونه از معادن کوه قلعه و مگسو برای این تحقیق خالص سازی گردید و در آن‌ها  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  اندازه‌گیری شد (جدول ۱). در این نمونه‌ها مقدار  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  از  $-۵/۸۶۴$  (نمونه مربوط به معدن کوه قلعه) تا  $-۶/۲۱۹$  (نمونه‌ی مربوط به معدن مگسو) در تغییر است. هرچند که آنالیز دو نمونه نمی‌تواند معرف وضعیت ایزوتوپی کانی آراگونیت در تمام معادن این ناحیه باشد، اما با این وجود، مشابهت نسبی ترکیب ایزوتوپی این کانی با اسمیت سونیت حائز اهمیت است. چنانکه در تصویر ۳ نیز دیده می‌شود، موقعیت آراگونیت بهترین پوشش را با  $\text{CO}_2$  جوئی نشان می‌دهد و این بدان معنی است که سیالات جوئی تنها سیالاتی بوده‌اند که در تشکیل رگه‌های این کانی نقش داشته‌اند. آخرین کانی مورد بررسی دو نمونه از کانی کلسیت همراه با کانسنگ سولفیدی است. مطالعه‌ی میکروسکوپی حاکی از آن است که کلسیت به عنوان یکی از مهمترین کانی‌های باطله، کانسنگ سولفیدی را همراهی نموده و از نظر بافتی به نظر می‌رسد که در شرایط مشابهی با کانی‌های سولفیدی به وجود آمده باشد. در این دو نمونه نیز مقدار  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  از  $+۰/۴۱$  (نمونه مربوط به معدن طرز) تا  $+۷/۲۱۴$  (نمونه‌ی مربوط به معدن تاجکوه) در هزار در تغییر است. مقایسه‌ی انجام شده بین وضعیت ایزوتوپی این کانی با محیط‌های زمین‌شناسی مختلف (تصویر ۳) نشان می‌دهد که این نمونه‌ها پوشش خوبی با کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های دریایی و همچنین سنگ آهک دارد. در نتیجه می‌توان پذیرفت که کانسنگ سولفیدی در نتیجه‌ی تأثیر سیالاتی مشابه با آب دریا به وجود آمده است.

### ۵- ایزوتوپ‌های اکسیژن

بر روی کانی‌های اسمیت سونیت، همی مرفیت، آراگونیت و کلسیت علاوه بر مقدار  $\delta^{13}\text{C}$ ، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  نیز اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، از دو استاندارد نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت و استاندارد متوسط آب اقیانوس استفاده شده است (جدول ۱). کانی اسمیت سونیت دارای تغییرات  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  از  $+۲۷/۸۲۱$  (نمونه‌ی مربوط به معدن تپه سرخ) تا  $+۲۶/۴۴۵$  (نمونه مربوط به معدن گوجر) در هزار می‌باشد. میانگین حسابی این تغییرات  $+۲۴/۱۸۹$  در هزار محاسبه شده

طرف عمق دارای منطقه بندی کانی شناسی غیرسولفیدی به سولفیدی است می‌تواند گویای این مطلب باشد که رگه‌های سولفیدی با سنگ میزبان کربناته، در نتیجه‌ی قرارگیری در معرض شرایط سوپرژن و تحت تأثیر سیالات جوئی به کانی‌های غیرسولفیدی تبدیل شده‌اند. همچنین وجود کانسنگ سولفیدی در عمق پایین‌تر از سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند تأییدی بر این ادعا باشد، چرا که در زیر سطح آب‌های زیرزمینی، برتری کانی‌شناسی متعلق به کانی‌های سولفیدی است و تنها مقادیر ناچیزی کانی غیرسولفیدی این نوع کانسنگ را همراهی می‌کند. برای کانی همی مرفیت نیز نسبت ایزوتوپی کربن محاسبه شد. در این کانی تغییرات  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  از  $-۱۷/۸۷۱$  تا  $-۲۳/۵۵۴$  در هزار در تغییر است. سبک‌ترین و سنگین‌ترین نسبت ایزوتوپی کربن به ترتیب متعلق به نمونه‌های همی مرفیت معدن گوجر و تاجکوه است. همچنین میانگین حسابی  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  این کانی  $-۲۰/۰۴۰$  در هزار محاسبه شده است. مقادیر به دست آمده مربوط به کانی همی مرفیت با نمودار تغییرات نسبت ایزوتوپی کربن در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی مقایسه شد (تصویر ۳). این بررسی نشان داد که ترکیب ایزوتوپی کربن کانی همی مرفیت با هیچ یک از سنگ‌های رسوبی رایج، از جمله با سنگ کربناته‌ی میزبان، مشابهت ندارد. هر چند که دامنه‌ی تغییرات ایزوتوپی کربن در مواد طبیعی بیشتر از  $۱۰۰$  در هزار است (کربنات‌های سنگین  $+۲۰$  تا  $-۸۰$  در هزار - Hoefs 2004)، در واقع می‌توان چنین اظهار نمود که تغییرات نسبت ایزوتوپی کربن این کانی در محدوده‌ی خارج از محدوده‌ی سنگ‌های رسوبی رایج و موجود در این ناحیه قرار دارد. تنها مشابهت موجود را می‌توان بین نمونه‌های همی مرفیت با توده‌ی آلی (Biomass) مشاهده کرد. یکی از مشکلات مربوط به تفسیر نتایج مربوط به کانی همی مرفیت نبود اطلاعات علمی در خصوص وضعیت ایزوتوپی این کانی است. مرور تحقیقات ایزوتوپی نشان می‌دهد که تا کنون در منابع علمی موجود هیچ تحقیق ایزوتوپی برای این کانی ارائه نشده است.

در بسیاری از کانسارهای این ناحیه، رگه‌های ضخیم آراگونیت با بافت کلوفرم وجود دارد. بهترین نمونه‌های این رگه‌ها در معدن کوه قلعه، مگسو و گوجر مشاهده می‌شود. با توجه به این که این رگه‌ها نیز ممکن است با فرایندهای مشابه تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی به

به تمرکز ایزوتوپ های سنگین تر هستند (Hoefs 2004) و طبعاً کانی های کربناته نظیر اسمیت سونیت به طور طبیعی می توانند از ایزوتوپ سنگین اکسیژن غنی باشند و به این ترتیب می توان به این تناقض پاسخ داد. با این توضیح ممکن است بتوان پذیرفت که سیالات مسئول هوازگی کانسنگ سولفیدی آب های جوئی بوده اند که در حین فرایند هوازگی کانی های سولفیدی روی، ایزوتوپ های سنگین اکسیژن را در ساختمان کانی اسمیت سونیت متمرکز نموده اند.

نسبت ایزوتوپی اکسیژن در کانی همی مرفیت نیز نشان می دهد که مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  در این کانی از  $+16/263$  (نمونه ی مربوط به معدن طرزه) تا  $+19/580$  (نمونه ی مربوط به معدن گیچرکوه) در هزار در تغییر بوده و میانگین حسابی این مقادیر  $+18/108$  در هزار محاسبه شده است. همچنین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  این کانی در کانسارهای مختلف ناحیه از  $-10/876$  تا  $-14/160$  در هزار در تغییر است. میانگین حسابی  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  این کانی نیز  $-12/380$  در هزار محاسبه شده است.

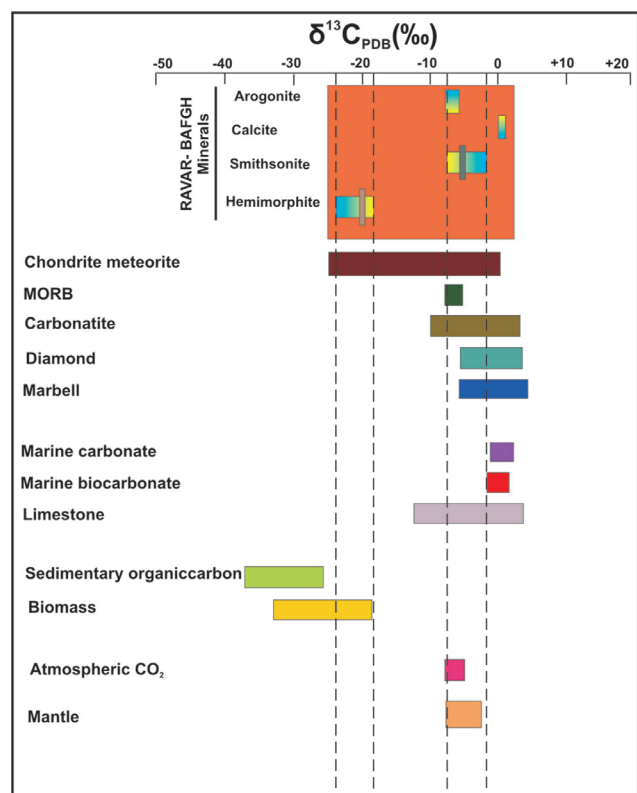
نتایج مربوط به کانی همی مرفیت نیز با محیط های مختلف زمین شناسی مقایسه شد (تصویر ۴). در این مورد نیز مشابهت بین این کانی و سنگ آهک، رسوبات رسی، نهشته های آواری و سنگ های دگرگونی وجود دارد که با توجه به سنگ میزبان کانسارهای این ناحیه می توان تنها مشابهت با سنگ آهک را حائز اهمیت دانست. در مورد مقایسه با سیالات مختلف نیز باید عنوان کرد که تنها سیالات دگرگونی با ترکیب ایزوتوپی این کانی سازگار می باشد که در این مورد نیز به دلیل نبود دگرگونی شاخص در این ناحیه تناقض وجود دارد. پاسخگویی به این تناقض نیز با توجه به ترکیب سیلیکاته کانی همی مرفیت قابل توجیه است، به گونه ای که اثبات گردیده است که

پیوند با سیلیسیم نیز قادر به تمرکز ایزوتوپ های سنگین  $\delta^{18}\text{O}$  است. در واقع شواهد صحرایی و ساختار کانی شناسی می تواند در رفع این ابهام مؤثر باشد. در نتیجه می توان در این مورد نیز پذیرفت که سیالات جوئی در حین فرایند هوازگی، ایزوتوپ های سنگین اکسیژن را در ساختمان کانی همی مرفیت متمرکز نموده اند.

نمونه های آراگونیت نیز کم و بیش در محدوده ی حد فاصل اسمیت سونیت و همی مرفیت قرار گرفته اند و در نتیجه می توان فرایند

است. همچنین تغییرات  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  در این کانی از  $-6/882$  تا  $-8768$  در هزار محاسبه شده است و میانگین حسابی این تغییرات  $-6/499$  در هزار به دست آمده است.

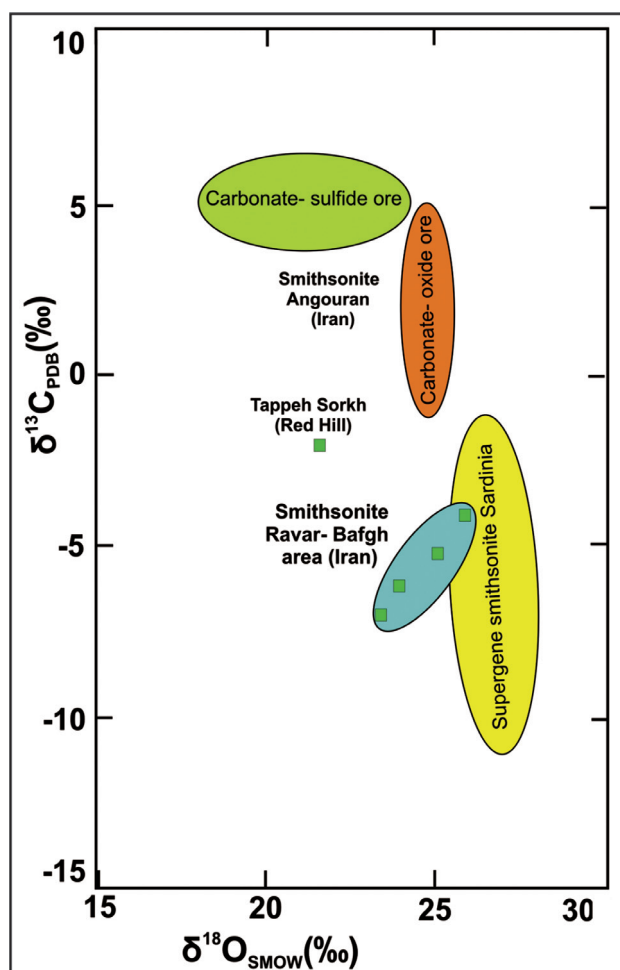
مقایسه ی انجام شده بین مقادیر نسبت ایزوتوپی کانی اسمیت سونیت با محیط های مختلف زمین شناسی نشان می دهد که این کانی قابل مقایسه با سنگ آهک و رسوبات رسی است (تصویر ۴). این مقایسه نتایج مربوط به نسبت ایزوتوپی کربن را تا حدودی تأیید می کند، اما نتایج مربوط به کانی اسمیت سونیت با هیچ یک از سیالات رایج و مورد انتظار تطبیق نمی کند و فقط با سیالات دگرگونی قابل مقایسه است. در نتیجه طبق این مقایسه نمی توان سیالات جوئی را در تشکیل



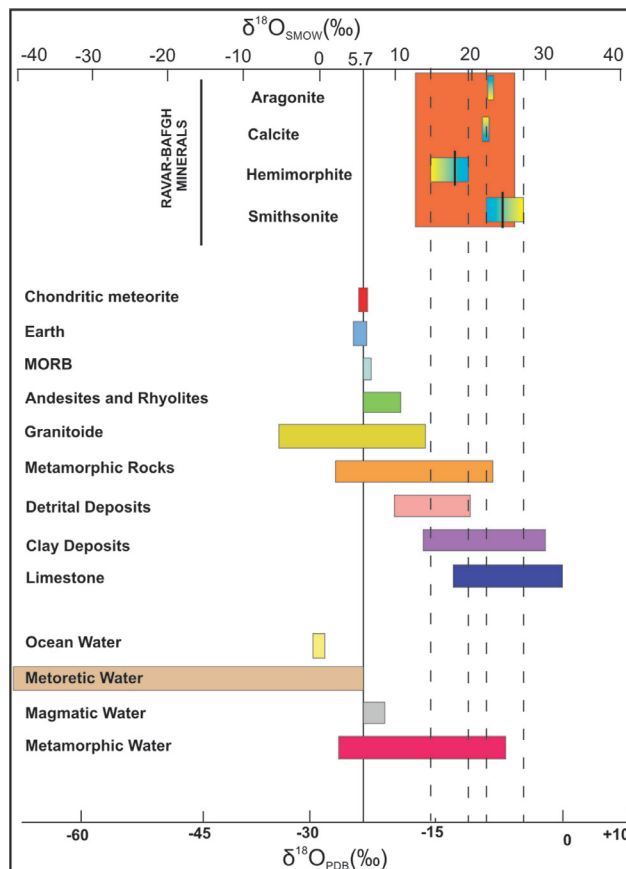
تصویر ۳- مقادیر نسبت ایزوتوپی کربن در محیط های مختلف (Kerridge 1985, Field & Fifarek 1986, Hoefs 2004) و جایگاه کانی های غیرسولفیدی روی (همی مرفیت و اسمیت سونیت)، رگه های هیدروترمال آراگونیت و باطله های کربناته همراه با کانسنگ سولفیدی در کانسارهای روی و سرب ناحیه ی راور- بافق.

این کانی دخیل دانست. برای پاسخ گویی به این ابهام باید یادآوری نمود که ترکیب کانی شناسی اسمیت سونیت به دلیل حالت اکسیدی بالا قادر به تفکیک ایزوتوپی و جذب بیشتر  $\delta^{18}\text{O}$  در مقایسه با  $^{16}\text{O}$  است. در این مورد ثابت شده است ترکیبات دارای پیوند اکسیدی قادر

علی رغم استفادهی وسیع از نسبت ایزوتوپی کربن و اکسیژن در مطالعهی برخی از کانسارها، هنوز کاربرد این دو نسبت برای مطالعهی کانسارهای غیرسولفیدی روی و سرب چندان رایج نشده است. مطالعه بر روی نسبت های ایزوتوپی کربن و اکسیژن در کانسار روی انگوران ایران بر روی فازهای غیرسولفیدی، توسط (Gilg et al. 2003) به انجام رسیده است. بونی و همکاران (Boni et al. 2003) نیز مطالعه مشابهی بر روی کانسار ایگلزینت (Iglesiente) در ساردینیا (Sardinia) انجام داده اند (تصویر ۵). در این نمودار نیز جایگاه نمونه های کانی اسمیت سونیت کانسارهای ناحیهی راور-بافق نمایش داده شده است. همان گونه که در تصویر ۵ مشاهده می شود، نمونه های اسمیت سونیت ناحیهی مورد مطالعه مشابهت بیشتری با نمونه های اسمیت سونیت سوپرژن کانسار ایگلزینت دارد و در آنجا نیز منشاء جوئی برای سیالات مؤثر در تشکیل این کانی پیشنهاد شده است.



تصویر ۵- نمایش موقعیت نمونه های اسمیت سونیت کانسارهای روی و سرب ناحیه راور-بافق در نمودار  $\delta^{13}C_{PDB}$  -  $\delta^{18}O_{SMOW}$  موقعیت نمونه های اسمیت سونیت مربوط به انگوران از (Gilg et al. 2003) و نمونه های مربوط به Sardinia از (Boni et al. 2003) نقل شده است.



تصویر ۴-مقادیر نسبت ایزوتوپی اکسیژن در محیط های مختلف غیرسولفیدی روی (همی مورفیت و اسمیت سونیت)، رگه های هیدروترمال آراگونیت و باطله های کربناته همراه با کانسنگ سولفیدی در کانسارهای روی و سرب ناحیهی راور-بافق.

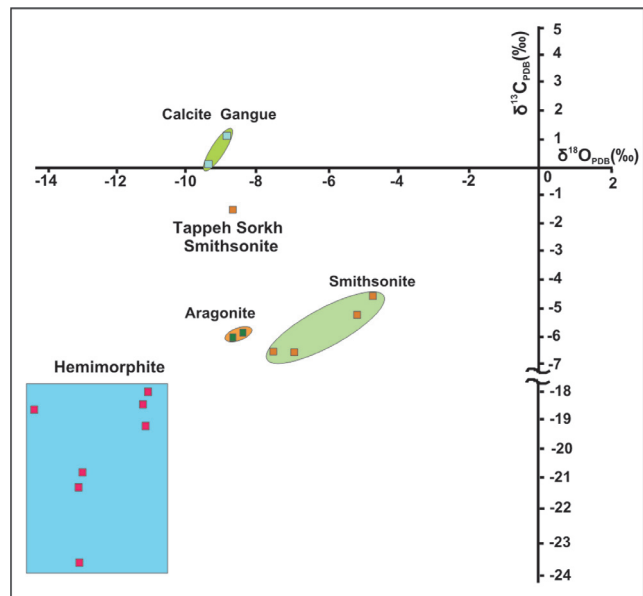
مشابهی را برای تشکیل آن ها در نظر گرفت. این نمونه ها بیشترین شباهت را با کانی اسمیت سونیت نشان می دهند. کانی کلسیت همراه با کانسنگ سولفیدی نیز در محدوده ی سنگ آهک قرار گرفته و در نتیجه می توان فرایند تشکیل آن را مشابه با سنگ آهک دانست.

#### ۶- نمودارهای نسبت ایزوتوپی کربن و اکسیژن

در مطالعات ایزوتوپی اکسیژن و کربن غالباً نتایج ایزوتوپی این دو عنصر به طور همزمان نیز مورد بررسی قرار می گیرد. مطالعهی همزمان این دو نسبت ایزوتوپی در سنگ های کربناته، وسیلهی مطمئنی برای تشخیص کربنات های دارای منشاء های مختلف می باشد (Rollinson 1995). به طوری که تشخیص انواع سنگ کربناته، نوع سیمان و محدوده ی سیالات گرمابی دخیل در تشکیل کانسارهای نوع دره ی می سی سی پی به کمک تلفیق این دو نسبت ایزوتوپی امکان پذیر است.

علاوه بر نمودار یاد شده، گاهی از فرم دیگر این نمودارها نیز استفاده می‌شود. در این فرم  $\delta^{13}\text{C}$  و  $\delta^{18}\text{O}$  به صورت دو خط عمود بر هم ترسیم می‌شوند. استاندارد مورد استفاده نیز برای هر دو عنصر استاندارد نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت است. در این نمودار نیز کانی‌های اسمیت سونیت، همی مرفیت، آراگونیت و باطله کربناته همراهی کننده‌ی کانسنگ سولفیدی نمایش داده شده است (تصویر ۶).

چنان‌که در این شکل مشخص شده است، کانی‌های اسمیت سونیت، آراگونیت و باطله‌ی کربناته در جایگاهی با میزان منفی  $\delta^{13}\text{C}$  و  $\delta^{18}\text{O}$  نسبت به استاندارد نمونه‌ی صدف فسیل بلمنیت واقع شده‌اند. این جایگاه برای سنگ‌های کربناته قابل پیش بینی است. همچنین جایگاه باطله‌های کلسیتی با  $\delta^{13}\text{C}$  نزدیک به صفر تا کمی مثبت و



تصویر ۶- نمودار  $\delta^{37}\text{C/PDB}$  در مقابل  $\delta^{18}\text{O/PDB}$  و موقعیت کانی‌های غیرسولفیدی روی شامل اسمیت سونیت و همی مرفیت و همچنین جایگاه رگه‌های آراگونیت گرمایی و باطله کربناته (عمدتاً کلسیتی) همراهی کننده‌ی کانسنگ سولفیدی در کانسارهای روی و سرب ناحیه‌ی راور- بافق.

مشابهت با نمونه‌ی استاندارد حکایت از منشاء دریایی آن دارد. اما در عوض، کانی همی مرفیت در این نمودار جایگاهی غیرعادی دارد. به طوری که این کانی به شدت از نظر  $\delta^{13}\text{C}$  فقیر می‌باشد و برای نشان دادن آن، محور  $\delta^{13}\text{C}$  را باید تا اعداد منفی بیشتری ادامه داد. به هر حال شاید دلیل این امر چنین باشد که اساساً ساختمان همی مرفیت فاقد مقدار کافی کربن است و فقط مقادیر بسیار جزئی از این عنصر در ساختمان آن مشارکت می‌نماید. با این حال، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  این کانی

## ۷- نتیجه‌گیری

به رغم کاربرد وسیع بررسی‌های ایزوتوپی در مطالعه‌ی کانسارهای سولفیدی روی و سرب، هنوز از این ابزار در مطالعه‌ی کانسارهای غیرسولفیدی روی و سرب استفاده‌ی چندانی نشده است. در این تحقیق، ضمن پرداختن به مطالعه بر روی ایزوتوپ‌های کربن و اکسیژن، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- بررسی نسبت ایزوتوپی کربن در کانی اسمیت سونیت نشان می‌دهد که ترکیب ایزوتوپی این کانی مشابه با  $\text{CO}_2$  جوّی و سنگ آهک است. در نتیجه می‌توان سیالاتی با منشاء جوّی (به عنوان سیال اصلی) و آب دریا (سیال روزنه‌ای محبوس در تخلخل سنگ کربناته‌ی میزبان) را سیالات مؤثر در تشکیل این کانی در نظر گرفت.

۲- نسبت ایزوتوپی کربن کانی همی مرفیت با هیچ یک از سنگ‌های رسوبی رایج همخوانی ندارد و تنها با توده‌ی آلی (Biomass) قابل مقایسه است. با توجه به این که توده‌ی آلی در شرایط سطح زمین شکل می‌گیرد، در نتیجه می‌توان پذیرفت که این کانی نیز در شرایط سوپرژن به وجود آمده است.

۳- نمونه‌های باطله‌ی کلسیتی همراه با کانسنگ سولفیدی از نظر ترکیب ایزوتوپی مشابهت خوبی با کربنات‌ها، بی کربنات‌ها و سنگ آهک داشته و بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کانسنگ سولفیدی تحت تأثیر سیالاتی مشابه با آب دریا به وجود آمده است.

۴- نسبت ایزوتوپی اکسیژن کانی اسمیت سونیت مشابه سنگ آهک است، اما این نسبت با سیالات مورد انتظار برای تشکیل این کانی، یعنی آب‌های جوی همخوان نیست. علت این تناقض را می‌توان در ارتباط با ساختار کانی اسمیت سونیت توجیه نمود. به طوری که تشکیل ترکیبات کربناته می‌تواند سبب تفکیک ایزوتوپی شده و ایزوتوپ‌های سنگین را در ساختمان خود متمرکز سازد. در نتیجه بدیهی است که ترکیب ایزوتوپی اسمیت سونیت نسبت به سیال سازنده خود قدری سنگین تر باشد.

۵- نسبت ایزوتوپی اکسیژن کانی همی مرفیت مشابه با سنگ آهک است. اما ترکیب ایزوتوپی اکسیژن این کانی نیز با سیالات مورد انتظار (آب‌های جوّی) همخوانی ندارد که دلیل این امر نیز ترکیب کانی شناسی آن است. در واقع ساختار سیلیکاته همی مرفیت عامل



**Kerridge, J. F., 1985**, "Carbon, hydrogen and nitrogen in carbonaceous chondrites: abundances and isotope compositions in bulk samples", *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 49: 1707-1714.

**McCrea J. M., 1950**, "On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale", *J. Chem. Phys.*, Vol. 18: 849-857.

**Rollinson, H. R., 1995**, "Using geochemical data: evaluation, presentation and interpretation", *Longman Group, UK*, 344p.

**Sheppard, S. M. F., 1977**, "The Cornubian batholith, SW England: D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  studies of kaolinite and other alteration minerals", *J. Geol. Soc.*, Vol. 133: 573-591.

**Swart P. K., Burns S. J., & Leder J. J., 1991**, "Fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon in carbon dioxide during the reaction of calcite with phosphoric acid as a function of temperature and technique", *Chem. Geol. Isotope Geosc. Section*, Vol. 86: 89-96.

**Taylor, H. P., 1974**, "The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition", *Econ. Geol.*, Vol. 69: 843-883.

**Walters, L. J. Jr., Claypool, G. E. & Choquette, P. W., 1971**, "Reaction rates and  $^{18}\text{O}$  variation for the carbonate-phosphoric acid preparation method", *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 36: 129-140.

غنی شدگی آن از ایزوتوپ‌های سنگین اکسیژن است.

۶- نمودارهای مقایسه‌ی همزمان نسبت‌های ایزوتوپی کربن و اکسیژن نیز ضمن تأیید منشاء سیالات جوئی برای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی، نشان می‌دهد که کانی اسمیت سونیت کانسارهای این ناحیه شباهت قابل ملاحظه‌ای با نمونه‌های اسمیت سونیت کانسار ایگلزینت در ساردینیا ایتالیا دارد.

۷- در آخر می‌توان نتیجه‌گیری نمود که قرارگیری کانسنگ سولفیدی در معرض هوازدگی سطحی و تحت تأثیر سیالات جوئی فرورو (و به مقدار کمتر سیالات روزنه‌ای محبوس در تخلخل سنگ میزبان کربناته که در نتیجه‌ی فشارهای تکتونیکی به حرکت در آمده) به کانسنگ غیرسولفیدی تبدیل شده است.

## ۷- مراجع

امیری، ع.، ۱۳۸۶، مطالعه‌ی ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و زلز کانسارهای روی و سرب با سنگ میزبان کربناته در ناحیه راور- بافق، رساله‌ی منتشر نشده دکترای تخصصی زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۳۲۰ ص.

امیری، ع.، رسا، ای.، ۱۳۸۵، بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی کانسارهای استراتاباند غیرسولفیدی روی و سرب در ناحیه‌ی کوهینان- بهاباد، فصلنامه‌ی زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال دوم، شماره اول، صفحات ۱-۹.

**Boni, M., Gilg, H. A., Aversa, G., & Balassone, G., 2003**, "The "calamine" of southwest Sardinia (Italy): Geology, mineralogy, and stable isotope geochemistry of nonsulfide Zn mineralization", *Econ. Geol.*, Vol. 98: 731-748.

**Coplen, T.B., Kendall, C. & Hopple, J., 1983**, "Comparison of stable isotope reference samples", *Nature, London*, Vol. 302: 236-238.

**Craig, H., 1957**, "Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide", *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 12: 133-149.

**Field, C. W & Fifarek R. H. 1986**, "Light stable isotope systematics in the epithermal environments", In: *B. R. Berger & P. M. Bethke (eds.) Geology and geochemistry of epithermal systems. Soc. Econ. Geol. Rev. Econ. Geol.*, Vol. 2: 99-128.

**Gilg, H. A. Allen, C. Balassone, G. Boni, M. & Moore, F., 2003**, "The 3- stage evolution of the Angouran Zn "oxide"-sulfide deposit, Iran", In: *Eliopoulos, D. et al. 2003, (eds.) Mineral exploration and sustainable development*", Mill press, Rotterdam: 77-80.

**Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R. & Carman, C. E., 2003**, "Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits", *Econ. Geol.*, Vol. 98 (4): 684-714.

**Hoefs, J., 2004**, "Stable isotope geochemistry", *5th edition, Springer Verlag, Berlin*: 244p.