



بررسی منشأ فلز و گوگرد در کانسار سولفیدی سرب - روی چاهمیله (ایران مرکزی) با استفاده از شواهد ایزوتوپ‌های گوگرد و سرب

بهزاد مهرابی^۱، نفیسه چقانه^{۲*}، ابراهیم طالع فاضل^۳، فرناندو کورفو^۴

۱- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، mehrabi@khu.ac.ir

۲- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، na.chaghane@gmail.com

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، tale.fazel@gmail.com

۴- گروه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه اسلو، fernando.corfu@geo.uio.no

چکیده:

کانسار سرب - روی (- مس) چاهمیله با تناژ تقریبی یک میلیون تن و عیار ۲/۱۵ درصد سرب و روی در کمربند فلززایی یزد - انارک (پهنه ایران مرکزی)، واقع شده است. مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه چاهمیله شامل کمپلکس مرغاب، سنگ‌های اولترامافیک و کمپلکس چاه‌گره بوده که کانی‌سازی سولفیدی گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت در واحد دولومیت مرمری کمپلکس چاه‌گره به سن تریاس میانی شکل گرفته است. مهم‌ترین کانی‌های غیرسولفیدی کانسار چاهمیله شامل سروزیت، همی‌مورفیت، ولفنیت، میمتیت، اسمیت‌زونیت، اکسی - هیدروکسیدهای آهن و مالاکیت است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی گالن، اسفالریت و کالکوپیریت به ترتیب در محدوده ۶/۳ تا ۸/۲ در هزار، ۵/۹ تا ۶/۲ در هزار و ۱/۴ تا ۳/۴ در هزار و مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در باریت در محدوده ۱۵ تا ۱۷/۴ در هزار قرار می‌گیرد. این مقادیر نشان می‌دهد، سولفات دریایی محتمل‌ترین منشأ گوگرد است و تغییرات در مقدار $\delta^{34}\text{S}$ می‌تواند مربوط به احیا SO_4 به H_2S باشد که به وسیله احیای فرایندهای ترموشیمیایی صورت گرفته است. نسبت‌های ایزوتوپی $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ به ترتیب در گستره ۱۸/۵۴۶ تا ۱۸/۵۷۶، ۱۵/۶۵۰ تا ۱۵/۶۸۸ و ۳۸/۷۹۵ تا ۳۸/۹۱۸ برای گالن متغییر است. نتایج حاصل از تفسیر داده‌های ایزوتوپی سرب، نشانگر یک مخزن پوسته قاره‌ای به‌عنوان منبع اصلی سرب و احتمالاً سایر فلزات در کانسار چاهمیله مشابه با اغلب کانسارهای سرب - روی در ایران مرکزی است.

کلمات کلیدی: کانسار سرب و روی، سنگ میزبان کربناته، ایزوتوپ‌های گوگرد و سرب، ایران مرکزی، چاهمیله.



Source of metal and sulfur in the Chah Mileh Pb-Zn deposit (Central Iran): constraints on S-Pb isotopes

Behzad Mehrabi¹, Nafiseh Chaghaneh^{2*}, Ebrahim Tale Fazel³, Fernando Corfu⁴

1) Department of Geochemistry, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, mehrabi@khu.ac.ir

2) Department of Geochemistry, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, na.chaghane@gmail.com

3) Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, tale.fazel@gmail.com

4) Section of Geology and Geophysics, Department of Geosciences, University of Oslo, fernando.corfu@geo.uio.no

Abstract:

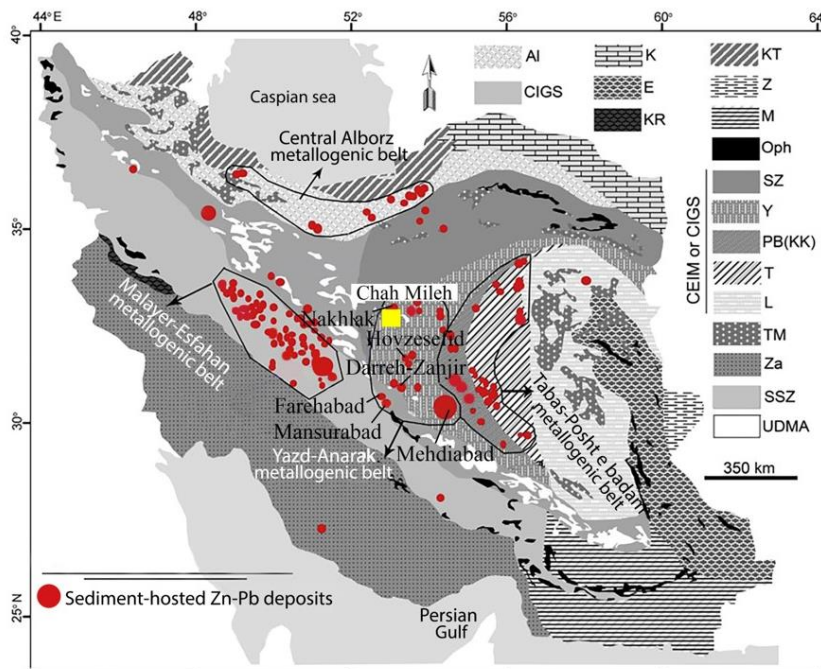
The Chah Mileh Pb-Zn (-Cu) deposit is located in the Yazd-Anarak metallogenic belt, Central Iran. Geology of the Chah Mileh area consists of the Morghab Complex, ultramafic rocks and Chah Gorbeh Complex, which sulfide mineralization (galena, sphalerite, pyrite and chalcopyrite) hosted by dolomitic marble unit of the Middle Triassic Chah Gorbeh complex. Cerussite, hemimorphite, wulfenite, malachite, mimetite, smithsonite and iron oxy-hydroxides are the main non-sulfide ore minerals in the Chah Mileh deposit. The $\delta^{34}\text{S}$ values range from 6.3 to 8.2‰ in galena, 5.9 to 6.2‰ in sphalerite, 1.4 to 3.4‰ in chalcopyrite, and 15 to 17.4‰ in barite. These values indicate that marine sulfate is the most likely source of sulfur, and variation in $\delta^{34}\text{S}$ could be due to the reduction of SO_4 to H_2S by thermochemical reduction processes. Galena samples have a homogeneous Pb isotopic composition with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 18.546 to 18.576, 15.650 to 15.688 and 38.795 to 38.918, respectively. These ratios are indicative of a continental crustal reservoir as the main source of lead and most probably other ore metals which is similar to the other Pb-Zn deposits in the Central Iran.

Keywords Pb-Zn deposit, Carbonate-hosted, S-Pb isotopes, Central Iran, Chah Mileh.

۱- مقدمه

کانسارهای سرب - روی با سنگ میزبان رسوبی از مهمترین منابع تأمین کننده سرب و روی دنیا هستند که در سنگ‌های آواری - سیلیسی و کربناته پروتروزوئیک پسین تا سنوزوئیک گزارش شده‌اند [۱، ۲]. تاکنون بیش از ۳۰۰ کانسار و نشانه معدنی در ایران شناسایی شده که کمتر از ۶ درصد این ذخایر به صورت فعال استخراج می‌شود [۱]. فرایندهای متنوعی از جمله ته‌نشینی همزمان، دیاژنز اولیه و تاخیری، جان‌نشینی دیرزاد و دگرگونی درجه پایین در تشکیل این کانسارها دخالت دارد [۳، ۴]. مهمترین مناطق فلززایی سرب - روی در ایران شامل کمربند طبس - پشت‌بادام، کمربند البرز مرکزی، کمربند ملایر - اصفهان و کمربند یزد - انارک است [۱]. کمربند فلززایی یزد - انارک در بخش غربی خرد قاره ایران مرکزی - شرقی واقع شده است. در این کمربند، کانسارهای سولفیدی سرب - روی مهمی نظیر مهدی‌آباد، فرح‌آباد و منصورآباد با تیپ برون‌دیمی رسوبی (SEDEX) [۱، ۵-۸] و نخلک، حوض سفید، دره‌زنجیر و چاه‌میله با تیپ دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) [۱، ۱۲-۹] معرفی شده‌اند (شکل ۱).

کانسار چاه‌میله به عنوان یکی از قدیمی‌ترین معادن سرب و روی در ایران مرکزی، در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال شرق انارک (استان اصفهان) و ۱۲ کیلومتری جنوب معدن سرب و روی نخلک، در رشته کوه‌های موسوم به میله - دم‌سفید - چاه‌گره، واقع شده است. پتانسیل کانی‌سازی فلزات پایه در کانسار چاه‌میله برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط کارشناسان روسی شرکت تکنواکسپورت (ژئومتال)، شناسایی شد. عملیات پی‌جویی و اکتشاف عمومی در این منطقه طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ توسط شرکت مهندسی مشاور کان‌آدین [۱۳، ۱۴]، انجام شد. طی این مطالعات، ورقه‌های ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی به‌همراه ۱۵۰۰ متر حفاری مغزه‌گیری و تجزیه ژئوشیمیایی تعداد ۴۵۰ نمونه به‌منظور عیارسنجی واقعی در منطقه انجام شده که در نتیجه آن سه اندیس معدنی کوه‌میله، مزرعه‌دراز و سیلچو مورد شناسایی قرار گرفتند. هدف از این مطالعه، معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ارائه داده‌های ایزوتوپی (گوگرد و سرب) در کانسار چاه‌میله است. این داده‌ها به منظور شناخت منبع تأمین‌کننده مواد سازنده کانسنگ و منشأ احتمالی این کانسار مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش سعی شده با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و داده‌های ایزوتوپی (گوگرد و سرب)، تفسیری در جهت درک صحیح از فرایندهای تشکیل کانسار چاه‌میله و تعمیم آن به دیگر ذخایر مشابه در کمربند فلززایی یزد - انارک، صورت گیرد.

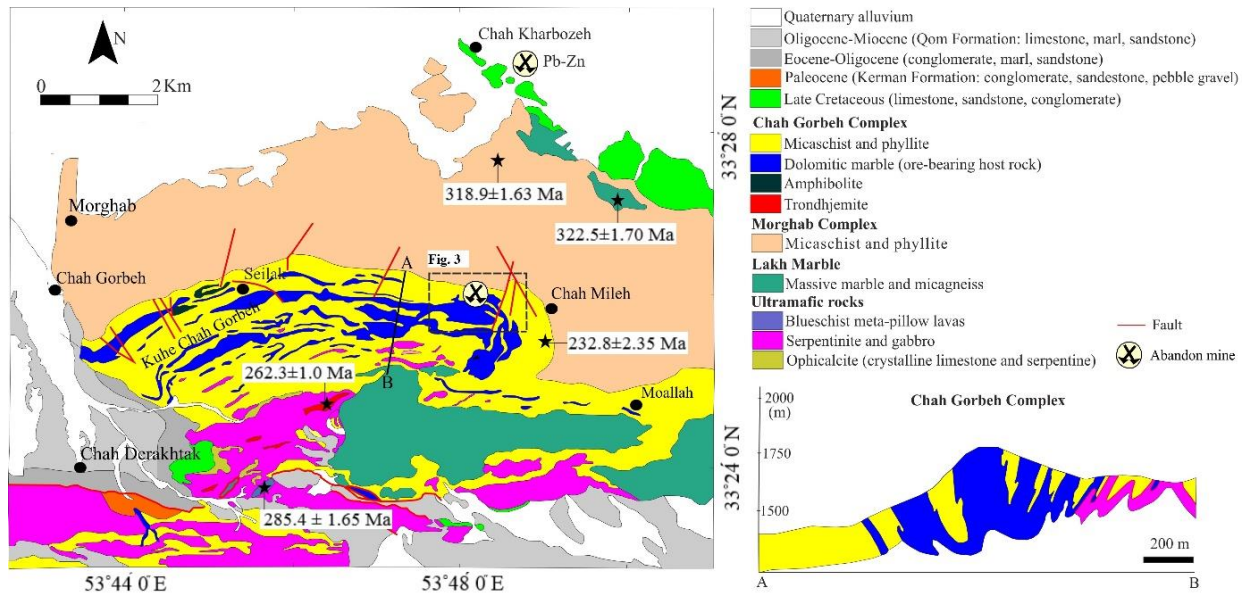


شکل (۱): توزیع ذخایر سرب - روی با سنگ میزبان رسوبی در نقشه ساختاری ایران (با تغییرات از [۱۵، ۱۶]) و موقعیت کانسار چاه‌میله در کمربند فلززایی یزد-انارک. حروف اختصاری شامل: AI: زون البرز، CIGS: زون تدریجی زمین‌شناسی و ساختاری ایران مرکزی، E: محدوده شرق ایران، K: کپه‌داغ، KR: زیر زون رادیولاریت‌ها ی کرمانشاه، KT: زون ساختاری خزر - تالش - زیوه، L: بلوک لوت، M: زون مکران، Oph: کمربند افیولیتی، PB: بلوک پشت‌بادام، SSZ: زون سنندج - سیرجان، T: بلوک طبس، TM: سنگهای ماگمایی ترشیری، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه - دختر، Y: بلوک یزد، Z: منطقه زابل، Za: کمربند زاگرس.

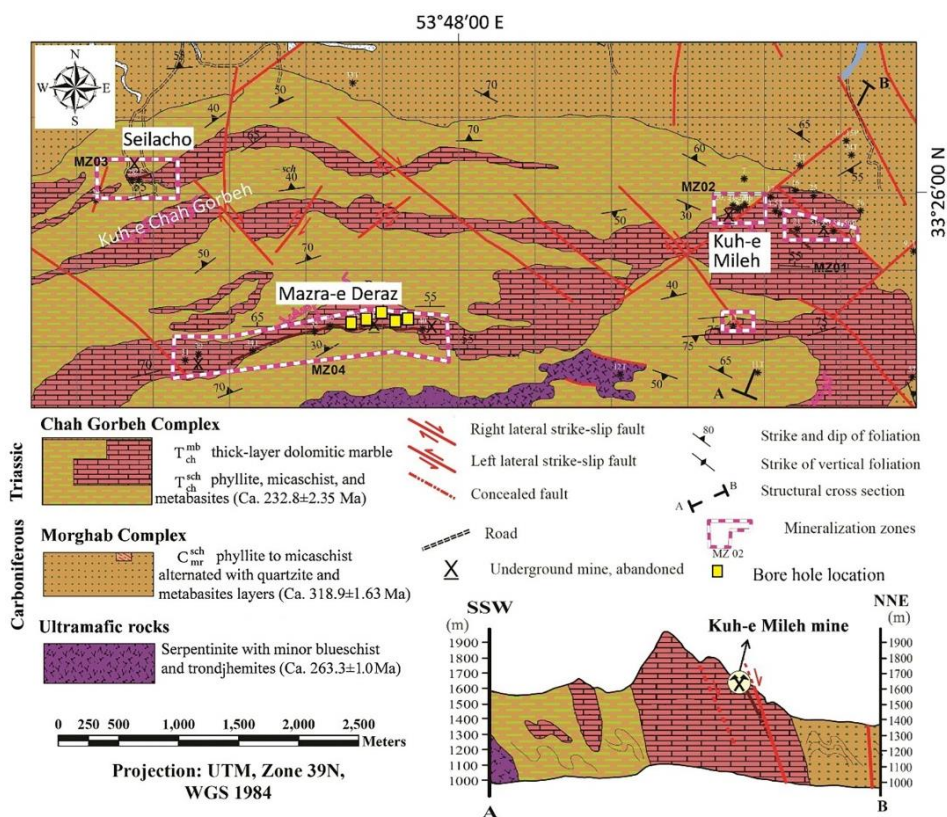


۲- زمین شناسی

کانسار چاه‌میله در شمال برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ انارک [۱۷] و چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ انارک [۱۸] قرار دارد. براساس تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی - ساختاری ایران توسط آقائاتی [۱۶]، منطقه چاه‌میله در غرب خرده قاره‌ی ایران مرکزی و بلوک یزد واقع شده که بخشی از کمپلکس دگرگونی انارک را تشکیل می‌دهد. کمپلکس دگرگونی انارک در پیرامون شهر انارک (شرق ناین) از چندین زیرکمپلکس با تحولات دگرگونی و ساختاری ناهمگن، در یک کمربند شرقی - غربی به طول تقریبی ۱۵۰ کیلومتر، تشکیل شده است [۱۹-۲۲]، (شکل ۲). مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه چاه‌میله از قدیم به جدید شامل کمپلکس مرغاب، سنگ‌های اولترامافیک و کمپلکس چاه‌گره هستند (شکل ۳). سنگ‌های اولترامافیک شامل توالی از هارزبورگیت سرپانتینی و الیوین پیروکسنیت لایه‌ای هستند که در آن توده‌های نفوذی پلاژیوگرانیت، کوارتز دیوریت، ترونجمیت، تونالیت و گابرو نفوذ کرده‌اند. کمپلکس مرغاب از مجموعه‌ای یکنواخت شامل فیلیت و میکاشیست متناوب با لایه‌های کوارتزیت و مرم‌های نازک لایه (C_{mr}^{sch})، تشکیل شده که سن این واحد بر اساس روش $^{40}Ar/^{39}Ar$ موسکوویت، حدود 318.9 ± 6.13 میلیون سال تعیین شده است [۱۹]. طبق مطالعات زانچی و همکاران [۲۲]، کمپلکس چاه‌گره از دو واحد سنگی شامل: (۱) فیلیت‌های غنی از کوارتزیت، میکاشیست و سنگ‌های اولترامافیک دگرگون شده (متابازیت‌ها) (T_{ch}^{sch}) و (۲) مرم‌های دولومیتی ضخیم لایه (T_{ch}^{mb})، تشکیل شده است (شکل ۴ الف، ب). سن شیست‌های کمپلکس چاه‌گره براساس روش $^{40}Ar/^{39}Ar$ بر روی کانی استیلپنوملان حدود 232.8 ± 2.35 میلیون به دست آمده است [۱۹]. واحد مرم دولومیتی ضخیم لایه از کمپلکس چاه‌گره، میزبان اصلی کانی‌سازی سولفیدی در کانسار چاه‌میله است. یکی از ویژگی‌های واحد مرم دولومیتی، رخداد مواد آلی به صورت بی‌شکل در برخی از نقاط آن است. در کانسار چاه‌میله شواهد عملکرد خطواره گسلی به صورت گسل‌های نرمال و امتداد لغز با روند شمال شرقی - جنوب غربی، شمال غربی - جنوب شرقی و شرقی - غربی قابل مشاهده است. همچنین، در جنوب مزرعه‌دراز، گسل‌های معکوس با راستای شرقی - غربی باعث رانده شدن واحدهای اولترامافیک بر روی واحدهای جوان تر کمپلکس چاه‌گره شده است.



شکل (۲): نقشه زمین‌شناسی منطقه انارک با روند نیم‌رخ A-B (با تغییرات از [۲۱، ۲۲])، سن رادیومتری سنگ‌های مختلف از [۱۹] اقتباس شده است.



شکل (۳): نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار چاه‌میله که در آن موقعیت اندیس‌های کوه‌میله، مزرعه‌دراز و سیلچو در میزبان مرم‌های دولومیتی کمپلکس چاه‌گره نشان داده شده است (با تغییرات از [۱۳، ۱۴]).

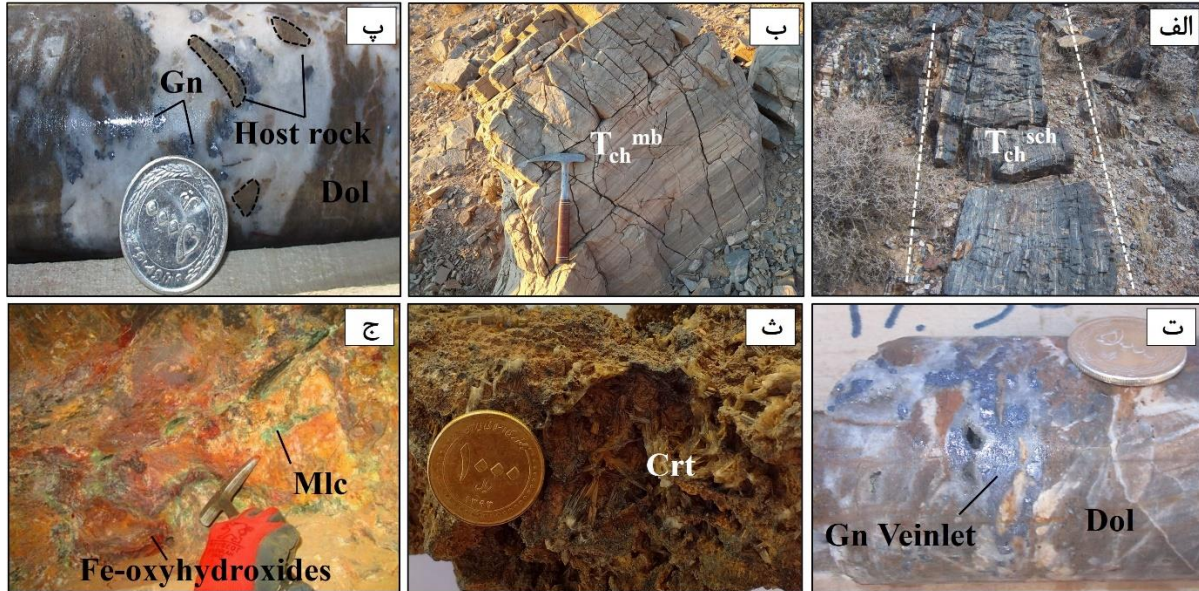


۳- روش مطالعه

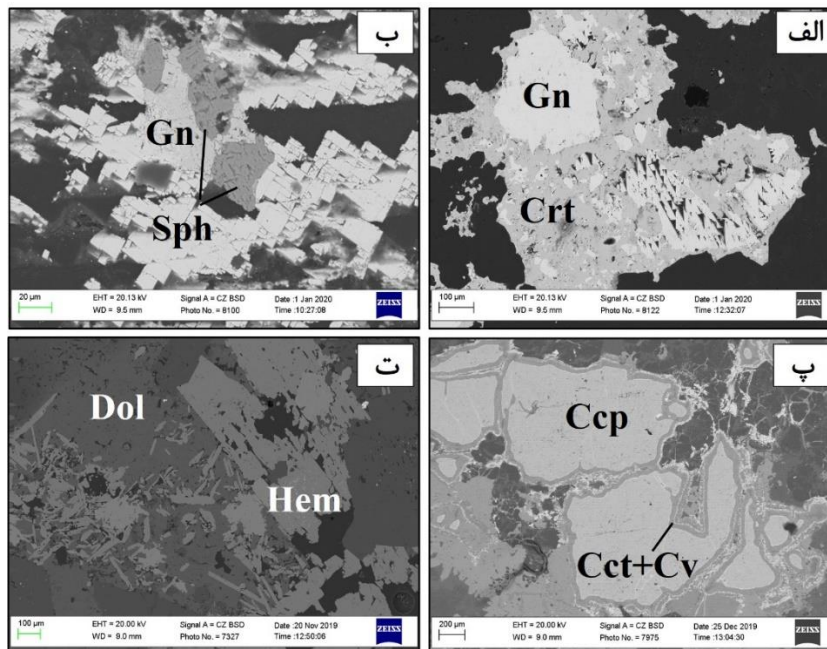
پس از مطالعات دفتری و نمونه برداری از بخش‌های مختلف کانسار، در مجموع تعداد ۱۲۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک - صیقلی برای انجام مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان نور بازتابی و عبوری زایس مدل Axioplan2 در دانشگاه خوارزمی تهران، مطالعه شد. برای تکمیل مطالعات کانه‌نگاری و شناسایی کانی‌های غیرسولفیدی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) زایس همراه الگوی EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) در آزمایشگاه SEM دانشگاه خوارزمی تهران، استفاده شد. به منظور انجام مطالعات ایزوتوپی گوگرد، تعداد ۴ نمونه گالن، ۲ نمونه اسفالریت، ۳ نمونه کالکوپیریت و ۲ نمونه باریت به روش جداسازی توسط بینوکولار با خلوص بیش از ۹۸ درصد آماده شد. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ با استفاده از دستگاه طیف سنج جرمی مدل Thermo Quest Finnegan Delta Plus XL در آزمایشگاه ایزوتوپ محیطی دانشگاه آریزونا اندازه‌گیری شد. مبنای استاندارد مورد استفاده برای تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد ($\delta^{34}\text{S}$) در نمونه‌های ایزوتوپی فاز سولفیدی، تریلویت شهاب‌سنگ آهنی کانیون دیابلو آریزونا (VCDT) و با دقت اندازه‌گیری $\pm 0.15\%$ در هزار یا (۱ σ) تخمین زده شد. ترکیبات ایزوتوپی سرب تعداد ۶ نمونه گالن پس از جداسازی توسط بینوکولار با خلوص بیش از ۹۸ درصد، در دانشگاه اسلو با استفاده از طیف سنج جرمی یونیزاسیون حرارتی انجام شد.

۴- کانه‌زایی

واحد مرمر دولومیتی کمپلکس چاه‌گربه با سن تریاس میانی، سنگ میزبان اصلی کانسار بوده که ماده معدنی با ماهیت چینه‌کران و بافت‌های برشی، شکافه‌پرکن، جانیشینی و افشان در آن شکل گرفته است (شکل ۴ پ، ت). گسل‌های نرمال و امتدادلغز با روند شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی مهم‌ترین کنترل‌کننده اصلی کانه‌زایی در کانسار چاه‌میله هستند. کانه‌زایی در کانسار چاه‌میله به دو صورت درون‌زاد (سولفیدی) و برون‌زاد (سولفیدی و غیرسولفیدی) وجود دارد. کانه‌زایی بخش درون‌زاد سولفیدی اغلب در بخش‌های زیرزمینی و تونل‌های منطقه مشاهده شده که شامل گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت است (شکل ۴ پ، ت و شکل ۵ الف، ب، پ). کانه‌زایی برون‌زاد غیرسولفیدی نیز به‌طور وسیع در رخنمون‌های سطحی و سینه‌کارهای استخراج روباز کانسار مشاهده شده که شامل کانی‌های کربناتی (سروزیت، مالاکیت، آزوریت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت)، سیلیکاتی (همی‌مورفیت، ویلمیت و کریزوکلا)، کلریدی (میمتیت و آتاکامیت)، سولفاتی (لیناریت) و اکسی - هیدروکسیدی (لیتارژ، پلانتریت، ولفنیت، کوپریت، همتایت، گوتیت، مگنتیت و لیمونیت)، است. کانی‌های سروزیت، میمتیت و ولفنیت، همی‌مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنیت، اکسی-هیدروکسیدهای آهن (اغلب گوتیت و همتایت) و مالاکیت مهم‌ترین کانی‌های برون‌زاد غیرسولفیدی در کانسار چاه‌میله است (شکل ۴ ث، ج و شکل ۵ الف، پ، ت). دگرسانی‌های دولومیتی و سیلیسی - شدن از دگرسانی‌های اصلی در کانسار چاه‌میله هستند که اغلب با بافت برشی همراه‌اند. دولومیت و کوارتز فراوان‌ترین کانی‌های باطله در کانسار چاه‌میله هستند که به‌طور فرعی کلسیت، باریت، سیدریت و آنکریت را همراهی می‌کنند.



شکل (۴): تصاویر صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی و کانه‌زایی در کانسار چاه‌میله. الف) لایه‌ی کوارتزیت در واحد مسکویت شیست کمپلکس چاه‌گره، ب) رخنمون واحد مرمر دولومیتی کمپلکس چاه‌گره، پ) گمانه حفاری از رگچه‌های متقاطع گالن، ت) گمانه حفاری از کانسنگ برشی قطعات سنگ میزبان کریناته در یک سیمان دولومیت - گالن، ث) بلورهای سوزنی سروریت ناشی از اکسایش گالن، ج) ملاکیت همراه با اکسی - هیدروکسیدهای آهن. علائم اختصاری کانی‌ها شامل: Crt: سروریت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Mlc: ملاکیت.



شکل (۵): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی در کانسار چاه‌میله. الف) بافت جانیشینی گالن توسط سروریت، ب) ادخال اسفالریت در گالن، پ) رخدادهای کانی‌های ثانویه کالکوسیت و کولیت در حاشیه کالکوپیریت، ت) رخدادهای بلورهای خودشکل همی‌مورفیت در سنگ میزبان دولومیت. علائم اختصاری کانی‌ها شامل: Ccp: کالکوپیریت، Crt: سروریت، Cv: کولیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Hem: همی‌مورفیت، Sph: اسفالریت.

۵- نتایج تجزیه ایزوتوپ گوگرد و سرب

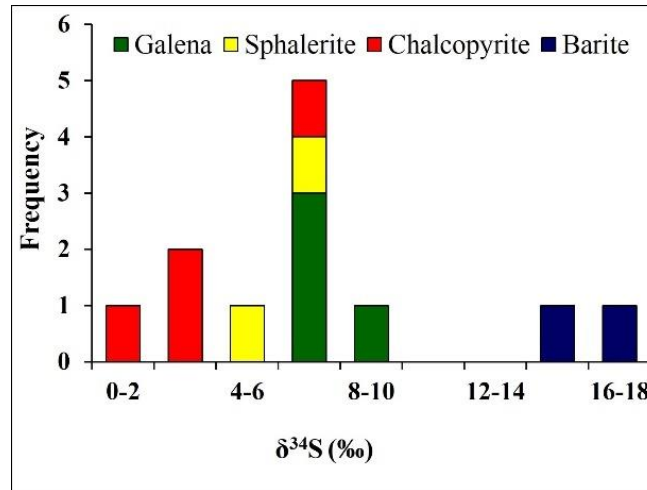
ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانه‌های سولفیدی و باریت کانسار چاه‌میله در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ برای گالن بین ۶/۳ تا ۸/۲ در هزار (میانگین ۷/۲ در هزار)، اسفالریت بین ۵/۹ تا ۶/۲ در هزار (میانگین ۶ در هزار)، کالکوپریت بین ۱/۴ تا ۳/۴ در هزار (میانگین ۲/۶ در هزار) و باریت بین ۱۵ تا ۱۷/۴ در هزار (میانگین ۱۶/۲ در هزار) قرار می‌گیرد. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سیال را می‌توان با استفاده از مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی‌های سولفیدی و ضریب تفریق ایزوتوپی کانی در حال تعادل با H_2S (1000 In α) در معادله پیشنهاد شده لی و لیو [۲۳] محاسبه کرد، با فرض اینکه سهم اصلی گوگرد در سیال به صورت H_2S باشد. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ گوگرد احیا شده (H_2S) در سولفیدها از حداکثر ۱۰/۸ در هزار در گالن تا حداقل ۱/۲ در هزار در کالکوپریت تغییر می‌کند.

ترکیبات ایزوتوپی سرب در نمونه‌های گالن در شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت‌های ایزوتوپی $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ به ترتیب بین ۱۸/۵۴۶ تا ۱۸/۵۷۶، ۱۵/۶۵۰ تا ۱۵/۶۸۸ و ۳۸/۷۹۵ تا ۳۸/۹۱۸ برای شش نمونه گالن بدست آمد. مقادیر ترکیبات ایزوتوپ سرب در کانسار چاه‌میله مشابه مقادیر ترکیبات سرب در تعدادی از کانسارهای سرب - روی ایران مرکزی است که منشأ یکسانی را پیشنهاد می‌کند [۲۴].

۶- بحث

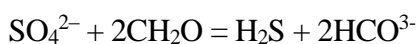
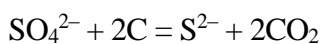
۶-۱- منشأ گوگرد و مکانیسم نهشت سولفید

ترکیبات ایزوتوپی گوگرد کانی‌های سولفیدی اغلب تحت تأثیر منبع تأمین‌کننده و فرایند تفریق ایزوتوپی (isotope fractionation) قرار می‌گیرند. بنابراین، منبع گوگرد و تکامل سیالات کانه‌ساز را می‌توان با ایزوتوپ‌های گوگرد آشکار کرد [۲۵-۲۷]. مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در کانه‌های سولفیدی کانسار چاه‌میله در محدوده ۱/۴ تا ۸/۲ در هزار قرار می‌گیرد. اگرچه این گستره کوچک ممکن است به دلیل تعداد محدود نمونه‌های مورد تجزیه باشد (شکل ۶)، مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ نشان می‌دهد که سولفیدها تحت شرایط فیزیکی و شیمیایی پایدار از یک منبع نسبتاً همگن منشأ گرفته و فرایندهای تفکیک ایزوتوپی بین اجزای گوگرد در سیال کانه‌دار در طول کانی‌سازی همسان بوده است. وجود اسفالریت‌های با $\delta^{34}\text{S}$ سبک‌تر از گالن ($\delta^{34}\text{S}_{\text{PbS}}$) در کانسار چاه‌میله می‌تواند معرف عدم تعادل ایزوتوپی این دو کانی و تشکیل آنها در زمان و شرایط مختلف باشد.

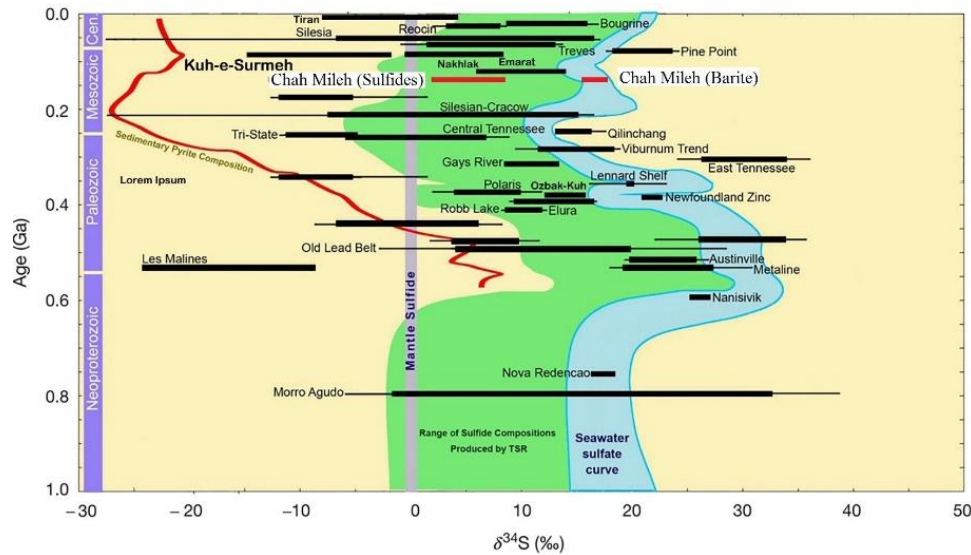


شکل (۶): نمودار ستونی مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ کانی‌های سولفیدی کانسار چاه‌میله.

مقایسه میزان $\delta^{34}\text{S}$ کانی‌های سولفیدی مربوط به کانسار چاه‌میله با نمودار تغییرات $\delta^{34}\text{S}$ آب دریا در زمان‌های گذشته (شکل ۷)، گویای این واقعیت است که گوگرد مورد نیاز در کانسار چاه‌میله بیش از هر منبع دیگر، از منبع سولفات آب دریای موزونیک (۱۳-۲۰ در هزار؛ از جمله آب دریای تریاس: ۱۱-۲۰ در هزار و آب دریای ژوراسیک: ۱۴-۱۸ در هزار [۲۸]) منشأ گرفته است. با فرض اینکه سولفات دریایی منبع تأمین گوگرد باشد، تغییرات در مقدار $\delta^{34}\text{S}$ می‌تواند مربوط به احیا SO_4 به H_2S باشد که به‌وسیله فرایند احیای باکتریایی سولفات (BSR) و یا احیای ترموشیمیایی سولفات (TSR) صورت گرفته است [۲۹]. فرایند احیای باکتریایی در دمای ۳۰ تا ۴۵ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد [۳۰]، اگرچه به‌ندرت به دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد [۳۱] نیز می‌رسد. تفکیک ایزوتوپی سولفور به‌وسیله فرایندهای احیای باکتریایی از ۲۰- تا ۶۰- در هزار (میانگین ۴۰-) در هزار نسبت به سولفات اولیه متغیر است و مقادیر منفی از $\delta^{34}\text{S}$ تولید می‌کند. در حالی که فرایند احیای ترموشیمیایی سولفات در دمای ۱۰۰ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد و گوگرد کاهیده شده طی این فرایند نسبت به سولفات‌های اولیه به اندازه ۱۵ در هزار تهی‌شدگی نشان می‌دهد [۳۲-۳۴]. همچنین اختلاط سیالات کانه‌ساز گرم و سرد می‌تواند S^{2-} را از SO_4^{2-} به‌وسیله احیای سولفات ترموشیمیایی از طریق واکنش‌های زیر تولید کند [۳۵، ۳۶].



بنابراین، با توجه به عدم تفکیک ایزوتوپی قابل توجه و نیز دمای نامناسب جهت فعالیت باکتریایی در کانسار چاه‌میله، فرایند احیای سولفات ترموشیمیایی در برخورد با مواد آلی موجود در سنگ بستر و سنگ میزبان کربناته نقش کلیدی در تولید S^{2-} در کانسار چاه‌میله ایفا کرده است. فرایند احیای سولفات ترموشیمیایی به‌عنوان فرایندی مهم در کانسارهای تیپ رسوبی برون‌دمی و تیپ دره‌می‌سی‌سی‌پی مطرح است [۳۶، ۳۷].



شکل (۷): مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ در سولفیدها و باریت کانسار چاه‌میله در مقایسه با دامنه و مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ سولفیدها در کانسارهای تیپ دره می‌سی‌سی‌پی مرتبط با کوهزایی [۱، ۳۶، ۳۸، ۳۹]، منحنی سولفات آب دریا [۴۰]، سولفید گوشته و میانگین ترکیب پیریت رسوبی (خط قرمز) که توسط احیا سولفات باکتریایی (BSR) تولید می‌شود [۳۷]. محدوده سایه دار سبز نشان‌دهنده دامنه احتمالی ترکیبات سولفید تولید شده توسط احیا سولفات ترموشیمیایی (TSR) برگرفته از آب دریا در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد است [۴۱]. گوگرد در اغلب کانسارهای تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، علاوه بر کانسار چاه‌میله، با منشأ سولفات آب دریا سازگار است که توسط TSR کاهش می‌یابد.

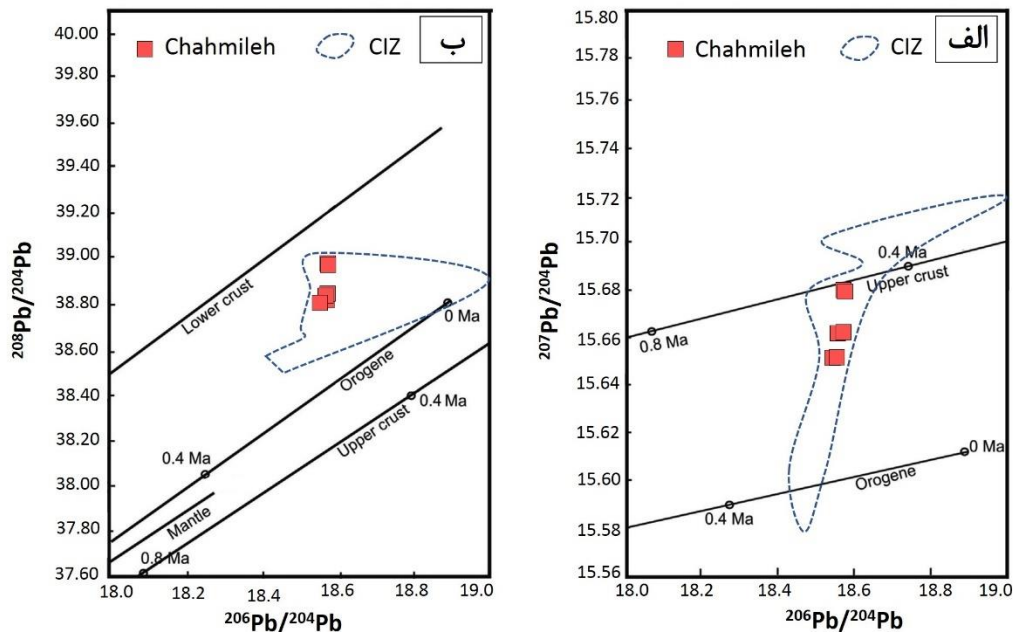
۲-۶- منشأ فلز

نسبت‌های ایزوتوپی سرب در سولفیدهای ذخایر فلزات پایه با میزان رسوبی برای تعیین خاستگاه سرب و احتمالاً فلزات دیگر استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات جدیدی بر روی ترکیبات ایزوتوپی سرب در کانسارهای سرب - روی ایران نظیر انگوران [۴۲، ۴۳]، عمارت [۴۴]، چاه‌گز [۴۵]، شهرمیرزاد [۴۶]، ازبک کوه [۳۸] و تیران [۴۷]، انجام شده است. علاوه بر این، نسبت‌های ایزوتوپی سرب تعداد ۱۸ کانسار و رخداد سرب - روی در زون دگرگونی سنندج - سیرجان، کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر، کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس و ۱۴ کانسار و رخداد سرب - روی در زون ایران مرکزی و زون البرز توسط میرنژاد و همکاران [۴۸، ۲۴] مورد بررسی قرار گرفته است.

نسبت‌های ایزوتوپی سرب در نمونه‌های گالن کانسار چاه‌میله همگن و دلالت بر این دارد که سرب از یک منبع مخلوط کاملاً همگن یا منبع واحد تأمین شده است. در نمودار اورانوژنیک ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در مقابل $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (شکل ۸ الف)، داده‌ها بین منحنی‌های رشد پوسته بالایی و کوهزایی قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که ترکیبات ایزوتوپ سرب از چندین منبع طی رویدادهای کوهزایی مشتق شده است. نسبت بالای $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (۱۵/۵۰-۱۵/۸۸) در کانسار چاه‌میله مشابه اغلب کانسارهای سرب - روی در زون ایران مرکزی [۲۴] می‌تواند معرف سهم بالای پوسته قدیمی یا رسوبات پلاژیک باشد. در نمودار تورونژنیک ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در مقابل $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (شکل ۸ ب)، رسم داده‌ها در بالای منحنی میانگین پوسته بالایی،

گوشته و کوهزایی می تواند حاکی از (۱) سهم بالای سرب مشتق شده از توریم و (۲) اختلاط متعدد عضوهای انتهایی به دلیل همبستگی خطی مثبت بین منحنی های پوسته بالایی و پایینی، باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، داده های ایزوتوپی سرب در کانسار چاهمیله در محدوده داده های ایزوتوپی تعدادی از کانسارهای سرب - روی ایران مرکزی قرار می گیرد که این امر نشانگر حجم بالای مخزن کانهزایی سرب در ایران مرکزی است.

در اغلب کانسارهای تیپ دره می سی سی پی نسبت های ایزوتوپی $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ به ترتیب بین ۱۷/۵ تا ۲۳/۵۷۶، ۱۵/۴ تا ۱۶/۲ است [۳۶]. ترکیب ایزوتوپی سرب نمونه های گالن در کانسار چاهمیله نیز در این گستره وسیع قرار می گیرد. فعالیت های کوهزایی و ضخیم شدگی پوسته ای بعد از کرتاسه (لارامید) سبب تحرک مجدد سرب و تشکیل کانسارهای سرب و روی در نقاط مختلف ایران و به ویژه در ایران مرکزی شده است [۲۴]. تشکیل کانسار چاهمیله با ماهیت دیرزاد و کنترل کانهزایی توسط عوامل ساختاری، مشابه اغلب کانسارهای سرب - روی در زون ایران مرکزی، نشانگر نقش فرایندهای کوهزایی در روند شکل گیری کانسار چاهمیله است.



شکل (۸): نسبت های ایزوتوپی سرب گالن در نمودارهای دوتایی [۴۹]. الف) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در مقابل $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و ب) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در مقابل $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، محدوده داده های ایزوتوپی سرب تعدادی از کانسارهای ایران مرکزی (CIZ) برای مقایسه ترسیم شده است.

۷- نتیجه گیری

کانسار سرب - روی (مس) چاهمیله با میزبانی مرمر دولومیتی تریاس میانی به صورت دیرزاد و با ماهیت چینه کران در کمربند فلززایی یزد - انارک شکل گرفته است. مطالعات ایزوتوپ گوگرد نشان می دهد که گوگرد کانی های سولفیدی و باریت احتمالاً از آب



دریای مزوزوئیک مشتق شده و با فرایند احیای ترموشیمیایی کاهش یافته است. نسبت‌های ایزوتوپ سرب در کانسار چاهمیله نشان دهنده منشأ گرفتن سرب از مخزن با نسبت‌های بالای Pb/U و Pb/Th است و نیز یک مخزن پوسته قاره‌ای به‌عنوان منبع اصلی سرب و احتمالاً سایر فلزات در کانسار چاهمیله مشابه با اغلب کانسارهای سرب - روی در ایران مرکزی است.

مراجع

- [1]- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14), pp.1649-1672.
- [2]- Rajabi, A., Rastad, E. and Canet, C., 2013. Metallogeny of Permian-Triassic carbonate-hosted Zn-Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60(2), pp. 197-216.
- [3]- Wilkinson, J.J., Eyre, S.L. and Boyce, A.J., 2005. Ore-forming processes in Irish-type carbonate-hosted Zn-Pb deposits: evidence from mineralogy, chemistry, and isotopic composition of sulfides at the Lisheen mine. *Economic Geology*, 100(1), pp. 63-86.
- [4]- Leach, D.L., Bradley, D.C., Huston, D., Pisarevsky, S.A., Taylor, R.D. and Gardoll, S.J., 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history. *Economic Geology*, 105(3), pp. 593-625.
- [5]- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R., Choulet, F., Alfonso, P., Azimzadeh, A.M. and Rajabi, A., 2019. Vent-proximal sub-seafloor replacement clastic-carbonate hosted SEDEX-type mineralization in the Mehdiabad world-class Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Southern Yazd Basin, Iran. *Ore Geology Reviews*, 113, pp. 103047.
- [6]- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R. and Choulet, F., 2020. Supergene nonsulfide Zn-Pb mineralization in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 109(7), pp. 2531-2555.
- [7]- Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M.R., Choulet, F., Lentz, D.R., Tajeddin, H.A., Movahednia, M. and Shariefi, A., 2021. Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and O-C-Sr isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 207, 104654.
- [8]- Maghfouri, S. and Hosseinzadeh, M.R., 2018. The early Cretaceous Mansourabad shale-carbonate hosted Zn-Pb (-Ag) deposit, Central Iran: an example of vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX mineralization. *Ore Geology Reviews*, 95, pp. 20-39.
- [9]- Jazi, M.A., Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2017. Naxhlak carbonate-hosted Pb-(Ag) deposit, Isfahan province, Iran: a geological, mineralogical, geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope study. *Ore Geology Reviews*, 80, pp. 27-47.



- [10]- Maghfouri, S. and Choulet, F., 2021. Ore-forming processes, O-C isotopes geochemistry, and fluid inclusions in the Darreh-Zanjir fault control MVT-type Zn-Pb deposit: Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2083.
- [11]- Rostami Paydar, G. and Adelpour, M., 2018. The Study of alteration, mineralization, and fluid inclusion in the Howz-e-Sefide zinc-lead deposit (Central Iran). *Iranian Journal of Geology*, 12(47), pp. 36-19.
- [12]- Technoexport., 1984. Geology of the Anarak area (Central Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 19, 136p.
- [13]- Kan-Azin Mining Consultant Company., 2014. General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:25000). Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 1, 438p.
- [14]- Kan-Azin Mining Consultant Company., 2015. General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:5000). Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 2, 214p.
- [15]- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountains system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 11, pp.1-33.
- [16] Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 586p.
- [17] Nabavi, M.H. and Houshmandzadeh, A., 1984. Geological Map of Anarak, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- [18] Nabavi, M.H. and Houshmandzadeh, A., 1990. Geological Map of Anarak, scale 1:250000. Geological Survey of Iran.
- [19] Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics*, 451, pp. 1-4.
- [20] Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M. and Muttoni, G., 2009. The Cimmerian evolution of the Naxhlak-Anarak area Central Iran and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. *Geological Society London Special*, 312(1), pp. 261-286.
- [21] Buchs, D.M., Bagheri, S., Martin, L., Hermann, J. and Arculus, R., 2013. Paleozoic to Triassic ocean opening and closure preserved in Central Iran: Constraints from the geochemistry of meta-igneous rocks of the Anarak area. *Lithos*, 172-173, pp. 267-287.
- [22] Zanchi, A., Malaspina, N., Zanchetta, S., Berra, F., Benciolini, L., Bergomi, M., Cavallo, A., Javadi, H.R. and Kouhpeyma, M., 2015. The Cimmerian accretionary wedge of Anarak, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102, pp 45-72.
- [23] Li, Y.B. and Liu, J.M., 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 70(7), pp. 1789-1795.



- [24] Mirnejad, H., Simonetti, A. and Molasalehi, F., 2015. Origin and formational history of some Pb-Zn deposits from Alborz and Central Iran: Pb isotope constraints. *International Geology Review*, 57(4), pp. 463-471.
- [25] Ohmoto, H. and Goldhaber, M.B., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: H.L., Barnes (Editor), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, third ed. Wiley, New York, pp. 517-611.
- [26] Seal, R.R., 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1), pp. 633-677.
- [27] Hoefs, J., 2015. *Stable Isotope Geochemistry*, 7th edition. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 389P.
- [28] Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan I.R., Sakai, H. and Zak, I., 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28(C), pp. 199-260.
- [29] Machel, H.G., 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights. *Sedimentary Geology*, 140(1), pp. 143-175.
- [30] Orr, W.L., 1974. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation study of Big Horn basin Palaeozoic oils, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58, pp. 2295-2318.
- [31] Jørgenson, B.B., Isaksen, M.F. and Jannasch, H.W., 1992. Bacterial sulfate reduction above 100°C in deep sea hydrothermal vent sediments. *Science*, 258, pp. 1756-1757.
- [32] Ohmoto, H., Kaiser, C.J. and Geer, K.A., 1990. Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment-hosted basemetal deposits. In: H.K., Hebert, H.o., SE (Editors), *In Stable Isotopes and Fluid Processes in Mineralization*. Geological Society of Australia, Special Publication, Sydney, Australia, pp 70-120.
- [33] Machel, H.G., Krouse, H.R., and Sassen, R., (1995). Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*, 10(4), 373-389.
- [34] Basuki, N.I., Taylor, B.E. and Spooner, E.T.C., 2008. Sulfur Isotope Evidence for Thermochemical Reduction of Dissolved Sulfate in Mississippi Valley-Type Zinc-Lead Mineralization, Bongara Area, Northern Peru. *Economic Geology*, 103(4), pp. 783-799.
- [35] Worden, R.H., Smalley, P.C. and Oxtoby, N.H., 1995. Gas souring by the thermo chemical sulfate reduction at 140°C. *AAPG Bulletin*, 79(6), pp. 854-863.
- [36] Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Ross, R.L., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J. and Walters, S., 2005. Sediment-hosted Pb-Zn deposits: A global Perspective. In: W.J. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 561-607.
- [37] Wilkinson, J.J., 2014. Sediment-Hosted Zinc-Lead Mineralization: Processes and Perspectives: Processes and Perspectives, *Treatise on Geochemistry*, 13, pp. 219-249.



- [38] Ehya, F., 2014. The Paleozoic Ozbak-Kuh carbonate-hosted Pb-Zn deposit of East Central Iran: isotope (C, O, S, Pb) geochemistry and ore genesis. *Mineralogy and Petrology*, 108(1), pp. 123-136.
- [39] Rajabi, A., Canet, C., Alfonso, P., Mahmoodi, P., Yarmohammadi, A., Sharifi S., Mahdavi, A. and Rezaei, S., 2022. Mineralization and Structural Controls of the AB-Bid Carbonate-Hosted Pb-Zn (\pm Cu) Deposit, Tabas-Posht e Badam Metallogenic Belt, Iran. *Minerals*, 12(1), 95.
- [40] Bottrell, S.H. and Newton, R.J, 2006. Reconstruction of changes in global sulfur cycling from marine sulfate isotopes. *Earth-Science Reviews*, 75(1-3), pp. 59-83.
- [41] Kiyosu, Y., Krouse, H.R., 1990. The role of organic acid in the abiogenic reduction of sulfate and the sulfur isotope effect. *Geochemical Journal*, 24(1), pp. 21-27.
- [42] Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D., and Moore, F., 2006. Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: Interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralium Deposita*, 41, pp. 1-16.
- [43] Maanijou, M., Tale Fazel, E., Hayati, S., Mohseni, H. and Vafaei, M., 2020. Geology, fluid inclusions, C-O-S-Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195, 104339.
- [44] Ehya, F., Lotfi, M., and Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2), p. 186-194.
- [45] Mousivand, F., Rastad, E., Meffre, S., Peter, J.M., Solomon, M., and Zaw, K., 2011. U-Pb geochronology and Pb isotope characteristics of the Chahgaz volcanogenic massive sulphide deposit, southern Iran. *International Geology Review*, 53(10), p. 1239-1262.
- [46] Bazargani-Guilani, K., Nekouvaht Tak, M.A., and Faramarzi, M., 2011. Pb-Zn deposits in Cretaceous carbonate host rocks, northeast Shahmirzad, central Alborz, Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 58(3), p. 297-307.
- [47] Nejadhadada, M., Taghipoura, B. and Lentz, D.R., 2018. Geochemical, isotopic, and fluid inclusion signatures of Zn-Pb mineralization in the Tiran mining district, Isfahan, Sanandaj-Sirjan zone (Iran). *Ore Geology Reviews*, 101, pp. 854-869.
- [48] Mirnejad, H., Simonetti, A., and Molasalehi, F., 2011. Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj-Sirjan zones in Iran: *Ore Geology Reviews*, 39(4), p. 181-187.
- [49] Zartman, R.E. and Doe, B.R., 1981. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 75(1-2), pp. 135-162.