



Comparison of the Lead Isotopic Ratios in the Ancient Silver Mines of Iran and Provenance of Silver Vessels

Fereshteh Rahimi*¹

1. Research Center for Conservation of Cultural Relics (RCCCR), Research Center of Iranian Cultural Heritage and Tourism Organization (ICHTO), Tehran, Iran

Vol. 3, No. 1, Spring 2020

Received: 2020/04/28

Accepted: 2020/06/30

DOI:

Corresponding Author
Fereshteh Rahimi, Research
Center for Conservation of
Cultural Relics (RCCCR),
Research Center of Iranian
Cultural Heritage and Tour-
ism Organization (ICHTO),
Tehran, Iran,
Email:
F.rahimi@richt.ir



Abstract

The geochemical information of the old mines such as lead isotopic ratios has a crucial role in understanding the origin of minerals, especially the evaluation of metal sources. This study was conducted to obtain a pattern or map of the geochemical information of Iran's lead, zinc and silver reserves. The previous studies on the provenance of Sasanian silver vessels from Quri Qaleh cave, showed the lead isotopic ratio of these vessels conformed to Nakhlak mine, but since these examinations were not done on other old silver mines, it was not possible to make a definitive conclusion. Today, in the archaeometallurgical studies and the determination of the origin, multicollector- inductively coupled plasma mass spectroscopy (MC-ICP-MS) is used. And since these studies are done on a global scale and the obtained information is recorded in the world wide database, it is necessary to use a similar method to carry out these experiments until the obtained information can be compared with each other. As the measurement of isotopes of elements has many applications in various sciences, especially in geological studies, the analysis of lead isotopes is used for dating of ores, provenance of metals and defining a geotectonic environment for ore deposits. Therefore, the results obtained from these studies on the desired mines could be used to calculate the isotopic ratios of lead for provenance and the source determination studies. In this study, the lead isotopic ratios of some of the ancient silver mines in Iran were compared. Comparing the results of analysis of lead isotope ratios for a number of ancient silver mines in Iran showed that the difference in lead isotope ratios of lead, zinc and silver reserves in the zone and geological axes of Iran is such that it can be used in the origin of ancient metalworking sites that mainly contain lead, zinc and silver minerals.

Keywords: old mines, provenance, lead isotopes, mass spectroscopy



مقایسه ترکیب ایزوتوپ‌های سرب در معادن کهن نقره ایران و تعیین منشأ آثار نقره‌ای

فرشته رحیمی^{*۱}

۱. کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

چکیده

مطالعه و بررسی شواهد فلزکاری و ردیابی معادن مورد استفاده بدون داشتن اطلاعات ژئوشیمیایی معادن کهن امکان‌پذیر نخواهد بود. همچنین اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های سرب ابزاری قدرتمند برای شناخت منشأ کانی‌ها به‌ویژه ارزیابی منبع فلزات است. این مطالعه به‌منظور به دست آوردن الگو یا نقشه‌ای از اطلاعات ژئوشیمیایی ذخایر سرب، روی و نقره ایران انجام شده است. همچنین پژوهش‌های منشأیابی روی ظروف نقره‌ای به‌دست‌آمده از غار قوری‌قلعه و طرح پژوهشی شناسایی و بررسی معادن کهن نقره در منطقه تکاب را بررسی کرده است. اهمیت این منطقه به‌دلیل وجود ذخایر معدنی فلزی، به‌ویژه ذخایر سرب، روی و نقره و هم‌جواری با تمدن‌های کهن بود. نتایج آنالیز ایزوتوپی سرب این معادن با معادن کهن سایر ذخایر سرب، روی و نقره ایران بررسی و مقایسه شد. برای انجام آزمایش‌های آنالیز ایزوتوپی در مطالعات آرکئومتالورژی و تعیین منشأ آثار تاریخی و محوطه‌های فلزکاری لازم است از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی مولتی‌کالکتور یا MC-ICP-MS استفاده شود. از سوی دیگر، در مطالعات و بررسی‌های زمین‌شناسی از همین روش آنالیز ایزوتوپ‌های سرب در راستای شناسایی منشأ فلزات و محیط زمین‌ساختی کانسارها استفاده می‌شود؛ بنابراین به‌خوبی می‌توان از نتایج آزمایش‌ها در این‌گونه مطالعات استفاده شد و با انجام محاسبات، نسبت‌های ایزوتوپی سرب مورد نیاز در مطالعات تعیین منشأ به دست آمد. مقایسه نتایج آنالیز نسبت‌های ایزوتوپ سرب برای تعدادی از معادن کهن نقره در ایران نشان می‌دهد که میزان تفاوت نسبت‌های ایزوتوپ سرب ذخایر سرب، روی و نقره در زون و محورهای زمین‌شناسی ایران در حدی است که می‌تواند در منشأیابی محوطه‌های فلزکاری کهن و آثار نقره‌ای (که سرب موجود در آن عمدتاً از کانی‌های سرب، روی و نقره است) کمک شایانی کرد.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ‌های سرب، معادن کهن، منشأیابی، آنالیز ایزوتوپی، طیف‌سنجی جرمی

سال سوم، شماره یک، بهار ۱۳۹۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰

DOI:

نویسنده مسئول: فرشته رحیمی،

کارشناس ارشد، پژوهشکده

حفاظت و مرمت آثار تاریخی

فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی

و گردشگری، تهران، ایران پست

الکترونیکی:

F.rahimi@richt.ir



مقدمه

کشف فلز و دستیابی انسان به شیوه‌های ذوب و بهره‌برداری از آن یکی از مهم‌ترین تحولات تاریخی زندگی انسان محسوب می‌شود؛ با وجود این اطلاعات ما از مراحل آغازین کشف این فناوری توسط فلزکاران اولیه بسیار ناچیز است. همچنین با توجه به اینکه بسیاری از متخصصان و محققان حوزه فلزکاری و معدن‌کاوی کهن معتقدند که ساکنان سرزمین ایران نخستین مردمانی بودند که به شیوه‌های ذوب و خالص‌سازی فلزات دست یافته‌اند، مطالعه و بررسی محوطه‌هایی با شواهد فلزکاری و معدن‌کاری کهن که در جای‌جای این سرزمین پهن‌آور گسترده هستند، بسیار اندک انجام شده است.

از سوی دیگر کشور ما به دلیل وجود ذخایر معدنی بسیار، پیشینه استقرار کهن‌ترین تمدن‌های بشری و وجود آثار فلزی متنوع و تکنیکی ساخته‌شده در دوره‌های پیش از تاریخ و تاریخی، همواره پتانسیل فراوانی برای دریافت اطلاعات و بازسازی فرهنگ‌ها، بررسی پیشرفت و روند فناوری‌های کهن و روابط تجاری دارد. یکی از اهداف مهم در مطالعه آثار فلزی باستانی، تعیین منشأ زمین‌شناسی ساخت آثار فلزی خاص بود تا به کمک آن به مسائلی درمورد پیشرفت و روند فناوری، روابط تجاری و انتقال اشیاء بپردازند. ابتدا در سال ۱۹۳۴ میلادی این رویکرد از طریق آنالیز شیمیایی آغاز شد و به برنامه‌های گسترده آنالیز شیمیایی انجامید. ارزش این مطالعات، در آشکارکردن توسعه و پیشرفت فلزکاری در طول زمان بود، اما به تعیین منشأ کانی مورد استفاده در ساخت فلز کمکی نکرد. به دلیل ناهمگنی ذخایر معدنی و روش‌های جداسازی متفاوت عناصر شیمیایی در کانی‌ها، سرباره و فلز در روند ذوب اولیه، آنالیزهای شیمیایی به‌تنهایی برای تشخیص منشأ فلزات موفق نبودند (Pollard and Bray, 2014).

با قبول اینکه آنالیز شیمیایی نمی‌تواند پاسخگوی منشأ زمین‌شناسی در ساخت فلزات باشد، دو گروه محقق به‌صورت مستقل بیان کردند که این هدف ممکن است از طریق مقایسه آنالیز ایزوتوپی سرب آثار و کانی‌های فلزی به دست بیاید. در دهه ۱۹۷۰ میلادی برای اولین بار ارتباط اشیای فلزی با منابع معدنی

خاص - هدفی که بیش از ۱۰۰ سال مورد نظر بود- با ترکیبی از نسبت‌های ایزوتوپی سرب و الگوی عناصر کم‌مقدار بیان شد (Stos-Gale and Gale 2009). با این رویکرد در سال ۱۳۸۱ در مطالعات انجام‌شده روی مجموعه ظروف نقره‌ای به‌دست‌آمده از غار قوری قلعه واقع در استان کرمانشاه، به‌منظور تعیین منشأ این آثار، علاوه بر آنالیز عناصر شیمیایی، نسبت‌های ایزوتوپی سرب نیز اندازه‌گیری و با نسبت‌های ایزوتوپی سرب معدن نخلک و وشنونه (تنها معدن سرب، روی و نقره ایران که تا نسبت‌های ایزوتوپی سرب آنها اندازه‌گیری شده بود) مقایسه شد (Rahimi, 2004).

این بررسی تطابق نسبت‌های ایزوتوپی سرب این ظروف را با معدن نخلک نشان داد، اما از آنجا که این‌گونه آزمایش‌های روی سایر معدن کهن نقره انجام نشده بود، امکان نتیجه‌گیری قطعی وجود نداشت (رحیمی و دیگران، ۱۳۸۲). در واقع مطالعه و بررسی شواهد فلزکاری و ردیابی معدن مورد استفاده بدون داشتن اطلاعات ژئوشیمیایی معدن کهن امکان‌پذیر نخواهد بود؛ از این‌رو ضروری است این‌گونه آزمایش‌ها روی معدن کهن و معدن نقره صورت بگیرد. با این هدف در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی پروژه‌ای با عنوان بررسی معدن کهن نقره در حوزه زاگرس مطرح شد و فاز اول آن، یعنی طرح شناسایی و بررسی معدن کهن نقره (سرب و روی) در منطقه تکاب با همکاری مؤسسه پژوهشی زرنه و استفاده از متخصصان مختلف زمین‌شناس، معدن و باستان‌شناس صورت گرفت (رحیمی و دیگران، ۱۳۸۶).

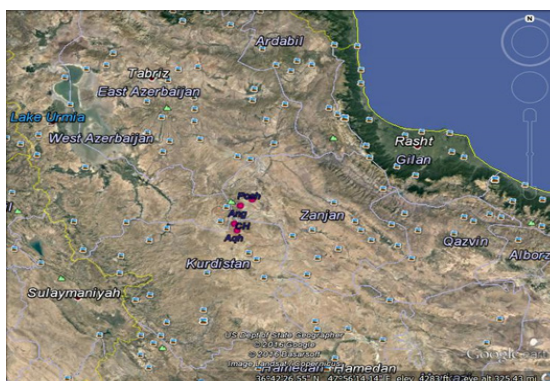
منطقه تکاب از نظر ذخایر معدنی فلزی و سایر مواد معدنی سرزمینی غنی است. وجود ذخایر غنی طلا، سرب، روی و نقره، جیوه و آهن و تاریخ چند هزارساله این سرزمین، منطقه‌ای مناسب برای شروع مطالعه و بررسی معدن کهن نقره بود. در این پروژه، ضمن شناسایی معدن کهن نقره در منطقه تکاب، مطالعات مستندنگاری، نمونه‌برداری از یافته‌های فعالیت‌های معدن‌کاوی و سنگ معدن روی چهار معدن صورت گرفت و مطالعات آزمایشگاهی روی سنگ معدن‌ها انجام شد، اما متأسفانه امکان آنالیزهای ایزوتوپی روی نمونه‌ها در آن زمان وجود نداشت.



نکته مهم این است که اندازه‌گیری ایزوتوپ عناصر کاربردهای بسیاری در علوم مختلف از جمله کشاورزی، علوم زیست‌محیطی، زمین‌شناسی و معدن دارد. به‌ویژه در مطالعات زمین‌شناسی برای تعیین سن کان سنگ و چگونگی تشکیل و محیط زمین‌ساختی آن استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها به دقت و حساسیت فراوانی نیاز دارد و معمولاً برای این کار از سیستم دستگاهی طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی مولتی کالکتور MC-ICP-MS استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در مطالعات تعیین منشأ همین میزان دقت ضروری است، نتایج آزمایش‌های ایزوتوپی روی معادن و ذخایر معدنی فلزی با اهداف زمین‌شناسی، با پاره‌ای محاسبات، در مطالعات تعیین منشأ آثار و بقایای محوطه‌های فلزکاری کهن کاربرد دارد. در این بررسی، ابتدا نسبت‌های ایزوتوپی معادن کهن نقره از نقاط

مختلف ایران (زون ارومیه-دختر (منطقه تکاب)، زون سهندج-سیرجان، ایران مرکزی و کمر بند چین‌خورده زاگرس) مقایسه شد. سپس به‌عنوان مطالعه موردی در تعیین منشأ آثار نقره‌ای، نتایج آنالیز ترکیبی ایزوتوپ‌های سرب ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه در مقایسه با این معادن، بازبینی و دوباره بررسی شد. **مطالعات ایزوتوپی کانسارهای سرب، روی و نقره در منطقه تکاب**

در پروژه بررسی معادن کهن نقره در حوزه زاگرس (فاز اول منطقه تکاب) به بررسی ظرفیت طبیعی و معادن احتمالی تأمین‌کننده سنگ معدن نقره، برای استحصال نقره استفاده‌شده در ساخت اشیای نقره‌ای کهن در چهار کانسار نقره، سرب و روی در منطقه تکاب پرداخته شد. برجسته‌ترین معادن کهن نقره، سرب و روی این منطقه شامل چیچکلو، انگوران، آی قلعه‌سی و پشتوک بازدید و نمونه‌گیری شد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت معادن کهن سرب، روی و نقره مورد مطالعه در منطقه تکاب

این‌چنینی مناسب شناخته شده‌اند.

۱. ایزوتوپ‌های سرب سنگین هستند (میانگین وزن اتمی ۲۰۶) و برخلاف ایزوتوپ‌های عناصر سبک، در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی تحت تأثیر فرایندهای دمای پایین (آلی و معدنی) و نیز فیزیک و شیمیایی مانند انحلال، حمل‌ونقل و ته‌نشینی قرار نمی‌گیرند.

۲. در کانسارهای غنی از سرب (مانند کانسارهای مورد مطالعه در این پژوهش) به‌دلیل بالا بودن مقدار سرب در مقایسه با ایزوتوپ‌های والد، واپاشی رادیواکتیو اورانیوم و توریم به سرب نمی‌تواند مشخصه‌های ایزوتوپ سرب زمان ته‌نشست کانسنگ را تغییر دهد؛ بنابراین ترکیب ایزوتوپ سرب کانسار با گذشت زمان و تحت تأثیر عوامل مختلف ثابت مانده و مشابه ترکیب

در این پروژه، علاوه بر مطالعات باستان‌شناختی معادن مذکور، آنالیز و آزمایش‌های مختلف برای تعیین مقادیر و نسبت‌های نقره به همراه سرب صورت گرفت، اما متأسفانه مطالعات ایزوتوپی به‌دلیل دسترسی نداشتن به تجهیزات مورد نیاز برای این‌گونه آزمایش‌های در داخل کشور انجام نشد.

به‌دلیل تشابه رفتار ژئوشیمیایی سرب با عناصر دیگری مانند روی، نقره، مس و... از ایزوتوپ‌های سرب به‌عنوان ابزاری مهم و قدرتمند برای شناخت منشأ کانی‌ها به‌ویژه برای ارزیابی منبع فلزات استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از این ایزوتوپ‌ها می‌توان محیط زمین‌ساختی کانسارها را تعیین کرد. به چند دلیل ایزوتوپ‌های سرب برای تحقیقات



نسبت‌های ایزوتوپی که به‌منظور مطالعات زمین‌شناسی استفاده می‌شود شامل $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ است؛ درحالی‌که برای مطالعات آرکئومتالورژی یا فلزکاری کهن باید نسبت‌های $^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ و $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ نیز اندازه‌گیری شود. تفسیر داده‌ها در مطالعات تعیین منشأ براساس مقایسه سه نسبت ایزوتوپی در دو گراف است که محور افقی همیشه $^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ و محور عمودی نسبت‌های $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ و $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ است. انتخاب این سه نسبت مستقل خاص، بخشی به‌دلیل روش ارائه اندازه‌های ایزوتوپ سرب در زمین‌شناسی ایزوتوپ است و بخشی برای راحتی؛ زیرا مقدار این سه نسبت با یک نظم و ترتیبی با هم متفاوت هستند (برای مثال ۱۸/۸، ...، ۲/۰۷ ... ۰/۸) بنابراین به‌آسانی تشخیص داده می‌شود (Stos-Gale and Gale 2009).

نسبت ایزوتوپ‌های سرب معادن کهن نقره در منطقه تکاب

از چهار معدن بررسی‌شده در پروژه معدن کهن نقره، آنالیز ایزوتوپی سرب دو معدن انگوران و آی‌قلعه‌سی وجود دارد (Mirnejad et al. 2011). معدن انگوران ($36^{\circ}37'19''\text{N}$ و $47^{\circ}24'34''\text{E}$) در حدود ۱۰۰ کیلومتری غرب زنجان و ۲۰ کیلومتری شمال غرب شهرک دندی واقع شده است. کانی‌سازی روی و سرب، در بخش‌های بالایی به‌صورت اکسیدی-کربناتی و در اعماق به‌صورت سولفیدی است. آنچه در دهه‌های اخیر، تحت معدن‌کاری و بهره‌برداری قرار گرفته، همان بخش اکسیدی-کربناتی کانسار است. پاراژنز کانه‌شناختی در بخش سولفیدی زیرین شامل گالن، اسفالریت و پیریت و در بخش اکسیدی فوقانی شامل اسمیت زونیت، سروزیت، هیدروزنیت، کالامین، همی مورفیت و اکسیدهای آهن و منگنز است. در جدول ۱، صورت تجزیه نمونه AN-۱ کانسنگ که از رگه اصلی معدن انگوران گرفته شده، آمده است:

ایزوتوپ سرب زمان کانه‌زایی است. ۳. تأثیر فعالیت‌های توده‌های گرانیتی و دگرگونی بر مشخصه‌های ایزوتوپی سرب کانسارهای بزرگ در مقایسه با کانه‌زایی‌های کوچک بسیار اندک است. ۴. به‌دلیل مقادیر فراوان سرب در گالن، نسبت‌های ایزوتوپی سرب به‌آسانی تحت تأثیر آلودگی و خطاهای مرتبط قرار نمی‌گیرند (ملاصالحی و میرنژاد، ۱۳۸۹). از سوی دیگر گالن (PbS) مناسب‌ترین کانی برای آنالیز نسبت‌های ایزوتوپ سرب در میان ذخایر سرب-روی است؛ زیرا این کانی عاری از اورانیوم است و به‌کمک مقدار فراوانی سرب مشخص می‌شود (تقریباً ۸۷ درصد وزنی). این ترکیب تضمین می‌کند که ترکیب ایزوتوپی سرب در طول زمان زمین‌شناسی بدون تغییر باقی می‌ماند (Mirnejad et al. 2011). سرب دارای چهار ایزوتوپ ^{204}Pb ، ^{207}Pb ، ^{206}Pb و ^{208}Pb است که سه ایزوتوپ ^{206}Pb ، ^{207}Pb و ^{208}Pb محصول واپاشی رادیواکتیو هستند. ترکیب ایزوتوپی سرب زمین در طول زمان در مقیاس زمین‌شناسی تغییر می‌کند. همچنین آشکار است که ذخایر سرب در پوسته زمین می‌تواند در ترکیب ایزوتوپی خود، با توجه به سن زمین‌شناسی و نسبت Th/Pb و U/Pb مخازن تأمین‌کننده سرب متفاوت باشند. با تشکیل یک ذخیره سرب، نسبت‌های این عناصر به‌کمک بسیاری از عوامل کمیته تغییر نمی‌کند؛ بنابراین تغییرات ناشی از فروپاشی اورانیوم و توریم ناچیز است و ترکیب ایزوتوپی سرب ثابت می‌ماند. همچنین نسبت‌های ایزوتوپی سرب، به‌جز در مواردی که سرب از منابع مختلف تأمین شده باشد، به‌کمک فرایندهای فیزیکی و شیمیایی که طی روند فلزکاری از سنگ معدن تا شیء نهایی تغییر نمی‌کند. فراوانی سرب در هر معدن یا ذخیره (ته‌نشست) زمین‌شناسی به سن زمین‌شناسی آن ذخیره و غلظت اولیه اورانیوم و توریم آن بستگی دارد (Pernicka 2014).

جدول ۱. صورت تجزیه نمونه AN-۱ کانسنگ که از رگه اصلی معدن انگوران گرفته شده

S	Cd	Sn	Hg	Sb	As	Au	Zn	Cu	Ag	Pb	شماره نمونه
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	ppm	
۸۰۰	۱۴۴۰	۳	۴/۵۱	۱۱۳	۵۱۳۰	۲	۲۵۴۰۰۰	۶۰/۹	۳۱/۲	۱۸۰۰۰	۱-AN



معادن باستانی آی قلعه سی (47,22,11/E"4 و 36,20,N"40) در شرق جنوب شرق تکاب و حدود ۲ کیلومتری شمال آبادی آی قلعه سی در ارتفاع ۲۴۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. در این کانسار، گانگ سیلیسی، حاوی کانه‌های اسفالریت آهن‌دار، گالن،

کالکوپیریت، پیریت و پیروتیت، آرسنوپیریت، رآلگار، هیدروکسیدهای آهن و منگنز، مالاکیت، آزوریت و کریزوکولاست. صورت تجزیه دو نمونه Iqa-۱ و Iqa-۲ کان سنگ که از قسمت‌های مختلف رگه اصلی معادن آی قلعه‌سی گرفته شده در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲. صورت تجزیه دو نمونه از کانسنگ معدن سرب و روی و نقره همراه با مس آی قلعه سی

شماره نمونه	Pb ppm	Ag ppm	Cu ppm	Zn ppm	Au ppb	As ppm	Sb ppm	Hg ppm	Sn ppm	Cd ppm	S ppm
۱-Iqa	۱۱۵۰۰	۳۱۰	۱۴۸۰۰	۲۰۱۰	۲۴۵	۲۹۵۰	۱۳۴۰	۰/۹۵	۱۰/۴	۱۰/۵	۹۶۲۰
۲-Iqa	۱۷۸۰۰	۳۴۴	۱۳۵۰۰	۱۲۵۰۰۰	۱۲۵	۳۵۵۰	۴۲۴	۰/۲۷	۱۲	۶۵۱	۱۲۹۰۰۰

صورت تجزیه دو نمونه از کانسنگ معدن آی قلعه‌سی نشان می‌دهد که اولاً این معدن، معدن سرب، نقره، روی و مس است و مقدار طلای آن نیز قابل توجه است. ثانیاً مقدار نقره طبعاً به همراه گالن است. نقره در عیارهای غنی‌تر کانسنگ به حدی می‌رسد که از نظر معدن کاران کهن، ارزش تولید نقره از کانسنگ را داشته است (رحیمی و همکاران، ۱۳۸۶). نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های سرب برای دو معدن انگوران و آی قلعه سی در جدول ۳ نشان داده شده است. اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی سرب

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ روی نمونه‌های گالن این دو معدن به کمک دستگاه طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی مولتی کالکتور (MC-ICP-MS) در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک دانشگاه آلبرتا در کشور کانادا انجام شده است (Mirnejad et al. 2011). سه نسبت ایزوتوپی $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ، $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ استفاده شده در مطالعات تعیین منشأ و باستان‌سنجی، با محاسبه روی دیگر نسبت‌ها به دست آمده که نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. فراوانی نسبت‌های ایزوتوپی سرب در دو معدن انگوران و آی قلعه سی

نام کانسار	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Angouran	۱۸/۹۱۹	۱۵/۷۰۲	۳۸/۹۱۱	۲/۰۵۷	۰/۸۳۰	۰/۰۵۳
Iqalesi	۱۸/۸۴۳	۱۵/۶۶۹	۳۸/۸۶۱	۲/۰۶۲	۰/۸۳۱	۰/۰۵۳

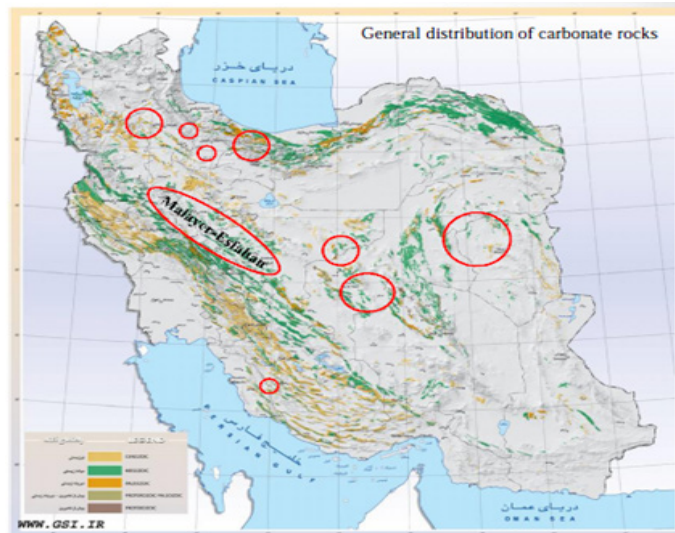
* نسبت‌های ایزوتوپ سرب محاسبه شده

مقایسه نسبت ایزوتوپ‌های سرب معادن کهن نقره در منطقه تکاب با سایر نقاط ایران
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، منبع اصلی نقره در طبیعت، کانسارهای سرب و روی هستند و تقریباً همه معادن کهن نقره، یعنی معدنی که معدن کاران کهن برای نقره در آنها فعالیت کرده‌اند، امروزه از نظر معدن کاران و معدن‌شناسان، نه به نام معدن نقره، بلکه به‌عنوان معدن سرب و روی معروف هستند. بیشتر ذخایر سرب از نوع سولفور سرب یا گالن است که

به‌طور معمول با اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت و دیگر سولفورها و سولفات‌ها همراه است. ممکن است بخشی از ذخیره سولفور سرب یا گالن که در نزدیکی سطح زمین قرار دارد در اثر هوازدگی به سروزیت، آنگلزیت و دیگر کانی‌های سرب تبدیل شود، ولی به‌طور کلی گالن عموماً در مقابل هوازدگی تا اندازه‌ای مقاوم است؛ زیرا قسمت اکسیده سطحی بقیه آن را محافظت می‌کند و در رخنمون‌ها به‌صورت غیرهوازده نیز دیده می‌شود. متداول‌ترین سنگ میزبان سرب، برای انباشت آن

تیپ چینه‌کران، آهک و یا دولومیت یعنی سنگ‌های کربناته است. کانسنگ معادن بزرگ دنیا به‌طور معمول، ترکیبی ریزدانه از پیریت یا پیروتیت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت همراه با مقادیر کمتری کانی‌های غیرفلزی

و کربناتی است. نقشه پراکندگی کانسارهای سرب و روی (نقره) در سنگ‌های کربناته ایران در شکل ۲ آمده است (Nezafati and Pernick, 2012).



شکل ۲. نقشه پراکندگی کانسارهای سرب، روی و نقره در سنگ‌های کربناته

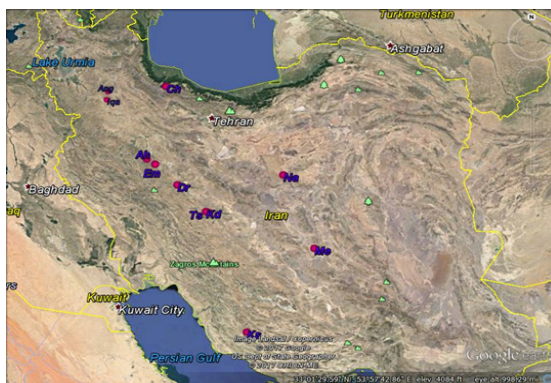
بیشتر ذخایر سرب-روی-نقره ایران در چهار محور ملایر-اصفهان، البرز-آذربایجان، انارک-یزد و طبس-فردوس قرار دارد (Nezafati and Pernick, 2012)؛ بنابراین نتایج آزمایش‌های نسبت‌های ایزوتوپی سرب مربوط به معادن کهن نقره (معادن سرب-روی و نقره) در این چهار محور مقایسه شد. همان‌طور که اشاره شد از میان ۴ معدن کهن سرب، روی و نقره مورد مطالعه در منطقه تکاب اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار سرب در دو معدن انگوران و آی قلعه سی انجام شده است. این دو معدن در زون ارومیه-دختر و محور البرز-آذربایجان قرار دارد. دیگر معادن مورد بررسی که آزمایش‌های ایزوتوپی روی آنها انجام شده بود شامل معادن کهن آهنگران، عمارت، تپه‌سرخ، کلاه دروازه، معدن تپه‌سرخ و کلاه دروازه جزء مجموعه ایرانکوه هستند. دره نقره در زون سنندج-سیرجان و محور ملایر-اصفهان و دو معدن نخلک و مهدی‌آباد در ایران مرکزی و محور انارک-یزد و تنها معدن سرب و روی واقع در کمربند چین‌خورده زاگرس یعنی معدن کوه سرمه در این بررسی مقایسه شد (شکل ۳).

معادن به‌کمک دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی مولتی کالکتور (MC-ICP-MS) در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک دانشگاه آلبرتا در کشور کانادا انجام شده است (Mirnejad et al, 2011, 2011). ملاحظاتی و همکاران، ۱۳۸۹ و افتخاری‌مقدم، ۱۳۹۱). نتایج آنالیز نسبت ایزوتوپ‌های پایدار سرب نشان می‌دهد که معدن چمبل واقع در زون البرز، بیشترین ایزوتوپ رادیوژنیک و معدن کوه سرمه واقع در کمربند چین‌خورده زاگرس کمترین ایزوتوپ رادیوژنیک را دارند. بعد از معدن چمبل در زون البرز، معادن انگوران و آی قلعه سی از زون ارومیه-دختر به‌مراتب رادیوژنیک‌تر از معادن سرب و روی واقع در زون سنندج-سیرجان و ایران مرکزی است؛ به عبارت دیگر میزان رادیوژنیک‌بودن سرب به‌ترتیب در کمربند چین‌خورده زاگرس، زون سنندج-سیرجان و ایران مرکزی، ارومیه-دختر و البرز رو به افزایش است.

اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی سرب $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ روی نمونه‌های گالن این

سه نسبت ایزوتوپی $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ، $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ و $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ مورد استفاده در مطالعات تعیین منشأ و فلزکاری کهن را با محاسبه روی نسبت‌های اندازه‌گیری شده، بدست آمد. در جدول ۴ نتایج نسبت‌های ایزوتوپی سرب معادن ذکرشده نشان داده شده است.





Angouran(Ang)	انگوران	زون ارومیه دختر (محور البرز- آذربایجان)
Iqalesi (Iqa)	آی قلعه‌سی	زون ارومیه دختر (محور البرز- آذربایجان)
Chombol(Ch)	چمبل	زون البرز (محور البرز- آذربایجان)
Ahangran(Ah)	آهنگران	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)
Emarat(Em)	عمارت	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)
Tapeh Sorkh(Ts)	تپه‌سرخ	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)
Kolah darvazeh(Kd)	کلاه دروازه	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)
Dareh noghreh(Dr)	دره نقره	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)
Nakhlak(Na)	نخلک	ایران مرکزی (محور انارک- یزد)
Mehdi Abad(Me)	مهدی‌آباد	ایران مرکزی (محور انارک- یزد)
Kuhe Sormeh(Ks)	کوه سرمه	کمر بند چین خورده زاگرس

شکل ۳. پراکندگی معادن سرب، روی و نقره مورد مقایسه

جدول ۴. فراوانی نسبت‌های ایزوتوپی سرب در زون و محورهای زمین‌شناسی ذخایر سرب، روی و نقره

نام کانسار	$^{202}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
Angouran	۱۸/۹۱۹	۱۵/۷۰۲	۳۸/۹۱۱	۲/۰۵۷	۰/۸۳۰	۰/۰۵۳
Iqalesi	۱۸/۸۴۳	۱۵/۶۶۹	۳۸/۸۶۱	۲/۰۶۲	۰/۸۳۱	۰/۰۵۳
Chombol	۲۰/۲۵۰	۱۶/۱۶۱	۴۰/۷۸۵	۲/۰۱۴	۰/۷۹۸	۰/۰۴۹
Emarat	۱۵/۵۸۰	۱۵/۶۸۰	۳۹/۲۱۰	۲/۱۱۰	۰/۸۴۴	۰/۰۵۴
Ahangran	۱۸/۴۰۷	۱۵/۶۴۱	۳۸/۵۷۱	۲/۰۹۵	۰/۸۵۰	۰/۰۵۴
Tapeh Sorkh	۱۸/۴۵۰	۱۵/۶۵۱	۳۸/۶۲۷	۲/۰۹۳	۰/۸۴۸	۰/۰۵۴
Kolah darvazeh	۱۸/۴۱۹	۱۵/۶۳۴	۳۸/۵۶۲	۲/۰۹۴	۰/۸۴۹	۰/۰۵۴
Dareh noghreh	۱۸/۳۹۸	۱۵/۶۴۰	۳۸/۴۸۸	۲/۰۹۲	۰/۸۵۰	۰/۰۵۴
Nakhlak	۱۸/۵۱۱	۱۵/۶۳۷	۳۸/۶۴۲	۲/۰۸۷	۰/۸۴۵	۰/۰۵۴
Mehdi Abad	۱۸/۴۹۹	۱۵/۶۵۸	۳۸/۶۳۴	۲/۰۸۸	۰/۸۴۶	۰/۰۵۴
Kuhe Sormeh	۱۸/۰۶۲	۱۵/۶۸۴	۳۸/۲۳۰	۲/۱۱۶	۰/۸۶۶	۰/۰۵۵

	ایران مرکزی (محور انارک- یزد)	
	کمر بند چین خورده زاگرس	
	* نسبت‌های ایزوتوپ سرب محاسبه شده	
	زون ارومیه دختر (محور البرز- آذربایجان)	
	زون البرز (محور البرز- آذربایجان)	
	زون سنندج- سیرجان (محور ملایر- اصفهان)	

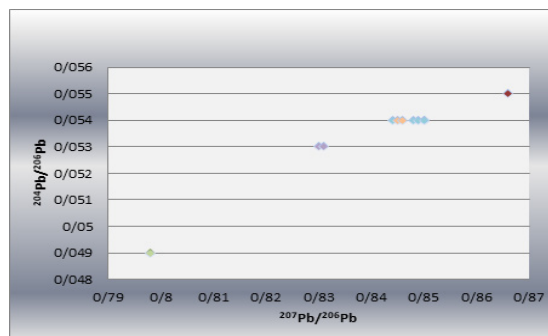


شکل ۴. مقایسه فراوانی نسبت‌های ایزوتوپ سرب معادن کهن نقره

ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه که با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی مولتی کالتور (MC-ICP-MS) در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه تکنیکال فرایبورگ آلمان انجام شده بود (Rahimi, 2004) در شکل ۵ با نتایج معادن کهن نقره مقایسه شد.

نتایج آنالیز ایزوتوپی سرب ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه که پیش‌تر به‌منظور تعیین منشأ مطالعه شده بود، با نسبت‌های ایزوتوپی سرب معادن کهن نقره مذکور مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۵).

در مباحث باستان‌شناسی و فلزکاری کهن داده‌های ایزوتوپ سرب، سه مجموعه از نسبت‌ها مرسوم است ($^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ ، $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ و $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) که به‌صورت یک جفت نمودار رسم می‌شود (Pernicka, 2014)؛ یعنی یک نمودار نشان‌دهنده نسبت $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ به $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و نمودار دیگر نشان‌دهنده نسبت $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ به $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ است. مقایسه فراوانی نسبت‌های ایزوتوپی سرب در معادن کهن نقره از زون و کانسارهای مختلف در شکل ۴ آمده است. در این بررسی، همچنین نتایج آنالیز نسبت‌های ایزوتوپ سرب



شکل ۵. مقایسه‌ی فراوانی نسبت‌های ایزوتوپی سرب ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه



همانطور که مشاهده می‌کنید، نسبت‌های ایزوتوپ سرب ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه با نسبت‌های ایزوتوپ سرب معدن نخلک منطبق بوده و می‌توان با قطعیت نتیجه گرفت که برای ساخت این ظروف از معادن نقره ایران مرکزی (نخلک) استفاده شده است.

نتیجه‌گیری

مقایسه نسبت‌های ایزوتوپی برای معادن نقره مورد مطالعه تفاوت در فراوانی نسبت‌های ایزوتوپ سرب را در زون و محورهای زمین‌شناسی ذخایر سرب و روی (نقره) ایران نشان می‌دهد. این تفاوت در فراوانی، در هر معدن یا ذخیره (ته‌نشست) زمین‌شناسی به سن زمین‌شناسی آن ذخیره و غلظت اولیه اورانیوم و توریم آن یا نسبت U/Pb و Th/Pb مخازن تأمین‌کننده سرب بستگی دارد.

بنابراین با توجه به اینکه سرب موجود در آثار نقره‌ای از کانی سرب، روی و نقره (عمدتاً گالن) است، این میزان تفاوت در نسبت‌های ایزوتوپ سرب معادن در زون و محورهای زمین‌شناسی ذخایر سرب، روی و نقره ایران می‌تواند کمک شایانی در منشأیابی محوطه‌های فلزکاری و معدن‌کاری کهن و آثار نقره‌ای کند. برای مثال در مورد ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه می‌توان با قطعیت نتیجه گرفت که برای ساخت این ظروف از معادن نقره ایران مرکزی (نخلک) استفاده شده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که آنها را در نوشتن این مقاله یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تعارض در منافع

میان نویسندگان هیچ‌گونه تعارض در منافع گزارش نشده است.

فهرست منابع

- افتخاری مقدم، طاهره و گنجی، علیرضا (۱۳۹۱). مقایسه ایزوتوپی کانسار سرب و روی چمبیل در زون البرز با کانسارهای سرب و روی در زون سنندج-سیرجان و ارومیه دختر. چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، ۷-۱۴.
- حسین‌خانی، احمد و ملاصالحی، فاطمه (۱۳۹۳). مطالعات کانی‌شناسی سرب و نقره و بررسی‌های ایزوتوپی سرب در معدن آهنگران. علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی ایران، ۹۴، ۳۵۹-۳۶۸.

رحیمی، فرشته (۱۳۸۲). ردیابی ایزوتوپی سرب در ظروف نقره‌ای غار قوری قلعه، مجموعه مقالات ششمین همایش حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی- فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری، تهران.

رحیمی، فرشته و دیگران (۱۳۸۶). بررسی معادن کهن نقره در حوزه زاگرس (منطقه تکاب)، مجموعه مقالات هشتمین همایش حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی- فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری.

ملاصالحی، فاطمه و میرزاد، حسن (۱۳۸۹). مقایسه ترکیب ایزوتوپی سرب در کانسار کوه سورمه با برخی از کانسارهای سرب و روی ایران مرکزی، مجله علوم دانشگاه تهران، سال ۳۶، ۱۱-۱۷.

مؤمن‌زاده، مرتضی (۱۳۸۴). مروری بر معادن و معدن‌کاری باستانی ایران ۱، مجله چشمه، مؤسسه فرهنگی مفرغ نگار وابسته به شرکت سرمایه‌گذاری مس سرچشمه، شماره ۵، ۷-۱۱.

مؤمن‌زاده، مرتضی (۱۳۸۵). مروری بر معادن و معدن‌کاری باستانی ایران ۲، مجله چشمه، مؤسسه فرهنگی مفرغ نگار وابسته به شرکت سرمایه‌گذاری مس سرچشمه، شماره ۶، ۲۱-۵۹.

Gale, N. H., & Stos-Gale, Z. A. (1981). Cycladic lead and silver metallurgy. *Annual of the British School at Athens*, 76, 169- 224.

Gale, N. H., Gentner, W., & Wagner, G. A. (1980). Mineralogical and geographical silver sources of archaic Greek coinage. *Metallurgy in numismatics*, 1, 3- 49.

Mirnejad, H., Simonetti, A., & 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), 181- 187.

Momenzadeh, M. (2004). Metallic mineral resources of Iran, mined in ancient times: a brief review. *Persian antiques splendor, mining crafts and metalurgy in ancient Iran. Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Bochum*, 8- 22.

Nezafati, N. (2015). Mineral resources of Iran; an overview. In Internationales alumni-symposium.

Nezafati, N., Pernick, E. (2012). Early Silver Production in Iran. *Iranian Archaeology*, No.3, 37- 45

Nezafati, N., Pernicka, E., & Momenzadeh,



- M. (2008). Iranian ore deposits and their role in the development of the ancient cultures. *Anatolian metal* IV, 77- 90.
- Nezafati, N., Momenzadeh, M., & Pernicka, E. (2008). New insights into the ancient mining and metallurgical researches in Iran. *Ancient Mining in Turkey and the Eastern Mediterranean. Atılım University. Ankara*, 307- 328.
- Nezafati, N., Pernick, E. and Momenzadeh, M. (2009). Introduction of the Deh Hosein ancient tin-copper mine, western Iran: Evidence from geology, archaeology, geochemistry and lead isotope data, TUBA-AR, 223- 236.
- Pernicka, E. (1984). Instrumentelle Multi-Elementaranalyse archäologischer Kupfer- und Bronzeartefakte: Ein Methodenvergleich. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, 31, 517- 531.
- Pernicka, E. (2004). Copper and Silver in Arisman and Tappeh Sialk and the Early Metallurgy in Iran, in Stöllner, T., Slotta, R., and Vatandoust, A. (eds) *Persias Ancient Splendour (Persiens Antike Pracht): Mining, Handicraft and Archaeology*, Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Germany, pp 232- 239.
- Pernicka, E., Adam, K., Böhme, M., Hezarkhani, Z., Nezafati, N., Schreiner, M., ... & Vatandoust, A. (2011). Archaeometallurgical researches at Arisman in central Iran. *Early mining and metallurgy on the Central Iranian Plateau. Report on the first five years of research of the Joint Iranian-German Research Project. Archäologie in Iran und Turan*, 9, 633705-.
- Pernicka, E., Rehren, T., & Schmitt-Strecker, S. (1998). Late Uruk silver production by cupellation at Habuba Kabira, Syria. *Metallurgica Antiqua, der Anschnitt*, 8, 123- 134.
- Pernicka, E., Rehren, T., & Schmitt-Strecker, S. (1998). Late Uruk silver production by cupellation at Habuba Kabira, Syria. *Metallurgica Antiqua, der Anschnitt*, 8, 123- 134.
- Pernicka, E., (2014). Provenance Determination of Archaeological Metal Objects, in B.W. Roberts and C.P. Thornton (eds), *Archaeometallurgy in Global Perspective, Methods and Syntheses*, Springer NewYork Heidelberg Dordrecht London. pp. 239- 268
- Pollard, A.M. & Bray, P., (2014). Chemical and Isotopic Studies of Ancient Metals, in B.W. Roberts and C.P. Thornton (eds), *Archaeometallurgy in Global Perspective, Methods and Syntheses*, Springer NewYork Heidelberg Dordrecht London. pp. 217- 238,
- Rahimi, F., (2004). Technical Examination and Provenance Studies on Sasanian Silver Vessels from Quri Qaleh, in T. Stöllner, R. Slotta, and A. Vatandoust (eds), *Persias Ancient Splendour (Persiens Antike Pracht) Mining, Handicraft and Archaeology, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum*. pp. 456- 460.
- Stos-Gale, Z. A., & Gale, N. H. (2009). Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1(3), 195- 213.