

استحصال روی در ایران باستان: تحلیل ژئوشیمیایی و پتروگرافی میخ‌های سفالی و سرباره‌های کوره ذوب فلز روی بهاباد، یزد

امین اله کمالی

پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی، گروه باستان‌سنجی.

چکیده

محوطه ذوب فلز روی بهاباد، واقع در ۷۱ کیلومتری شمال بهاباد در استان یزد، با مساحت ۲۲۰ متر مربع در کمربند فلززایی طبس-پشت‌بادام قرار دارد. این پژوهش با هدف شناسایی نوع فلز استخراج‌شده و بررسی فرآیندهای استحصال به‌کاررفته، از طریق تحلیل پتروگرافی و ژئوشیمیایی میخ‌های سفالی و سرباره‌های کوره انجام شده است. از این محوطه، ۱۰ نمونه میخ سفالی و ۱۰ نمونه سرباره جمع‌آوری شد که از هر گروه، پنج نمونه برای مطالعات پتروگرافی و آنالیز شیمیایی به روش ICP-OES انتخاب شدند. پتروگرافی میخ‌های سفالی، ساخته‌شده از خاک رس پخته، بافت پورفیری با حدود ۲۰ درصد کوارتز و مقادیر اندک کلسیت را نشان می‌دهد، در حالی که سرباره‌های کوره ذوب فلز حاوی فایالیت (Fe_2SiO_4)، ملیلیت، پیروکسن و وستیت (FeO) بودند. نتایج آنالیز شیمیایی، میانگین ۱/۲۱ درصد اکسید روی ZnO در میخ‌های سفالی را نشان می‌دهد که نقش آنها را در استحصال فلز روی به‌صورت توتیا (ZnO) پس از قرن‌ها تأیید می‌کند. سرباره‌ها با میانگین ۳/۷۴ درصد ZnO ، بیانگر استخراج ناقص روی از این کوره هستند. غلظت پایین سرب (669 ppm در میخ‌ها و 315 ppm در سرباره‌ها) و گوگرد (1053 ppm در میخ‌ها و 361 ppm در سرباره‌ها) استفاده از کانی‌های اکسیدی مانند اسمیتسونیت (ZnCO_3) یا همی‌مورفیت را به‌جای سولفیدهایی نظیر اسفالریت (ZnS) نشان می‌دهد که با کمربند فلززایی سرب-روی کانسارهای اکسیدی منطقه همخوانی دارد. برای استحصال فلز روی، برخلاف سایر فلزات، از کوره‌های دوطبقه استفاده شده است که شامل طبقه زیرین برای حرارت‌دهی به سنگ معدن و طبقه بالایی با صفحه‌ای مشبک است. روی این صفحه مشبک، میخ‌های سفالی (با طول ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر و قطر ۱ تا ۳ سانتی‌متر) قرار می‌گرفتند. با حرارت‌دهی سنگ معدن، بخارات روی از طریق تصعید بالا آمده و بر سطح میخ‌ها رسوب می‌کردند. پس از خنک شدن، توتیا (اکسید روی) از میخ‌ها جدا می‌شد. این فناوری در مقایسه با روش تقطیر نزولی هند (با استفاده از اسفالریت و کوره‌های مربعی‌شکل) و روش تقطیر صعودی چین (با کندانسور و کوره‌های مستطیلی) متمایز است و فناوری کهن و منحصر به فرد ایران را در استحصال فلز روی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: بهاباد، میخ سفالی، سرباره، روی، فناوری.



فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۳

شماره پیاپی ۲۱، پاییز ۱۴۰۳

<https://kcr.richt.ir>

صفحات: ۳۹ تا ۵۸

نویسنده مسئول

امین اله کمالی

پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری،

پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار

تاریخی-فرهنگی، گروه باستان‌سنجی.

رایانامه

a.kamali@richt.ir

مقدمه

استخراج فلز روی دارای پیشینه‌ای طولانی و پیچیده است که به دوران باستان بازمی‌گردد. این فلز، اگرچه از دیرباز به‌صورت ناخالص در آلیاژهایی مانند برنج (ترکیب مس و روی) مورد استفاده قرار می‌گرفت، به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خاص خود، از جمله نقطه‌ی جوش پایین (۹۰۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) و تمایل به تصعید، به‌صورت خالص تا دوره‌های متأخرتر شناخته نشد. علم زمین‌شناسی مدرن این امر را به واکنش‌پذیری بالای روی و دشواری جداسازی آن در کوره‌های سنتی نسبت می‌دهد، زیرا بخارات روی پیش از متراکم شدن به فلز مایع، اکسید شده و از دسترس خارج می‌شد (Tylecote, 1988). به همین دلیل، در متون کهن و کتب طب یا جواهرشناسی باستانی نامی از روی به‌عنوان فلز مستقل یافت نمی‌شود. با این حال، شواهد باستان‌شناختی و تاریخی نشان‌دهنده‌ی بهره‌برداری از این فلز به‌صورت اکسید روی (توتیا) در تمدن‌های کهن، به‌ویژه در ایران، هند و چین است.

در هند، منطقه‌ی زاوار در راجستان از مراکز اصلی تولید روی در دوران باستان بود. کاوش‌های باستان‌شناختی در این منطقه که به بازه‌ی زمانی ۱۰۲۵ تا ۱۲۸۰ م. تاریخ‌گذاری شده‌اند، شواهدی از کوره‌های پیچیده‌ی ذوب روی را آشکار کرده است (Bunney, 1983). این کوره‌ها بر اساس روش تقطیر رو به پایین عمل می‌کردند، به‌طوری که بخارات روی در محفظه‌های جداگانه متراکم و جمع‌آوری می‌شدند. اوج این فناوری بین قرون چهاردهم تا شانزدهم میلادی بود، اما پس از آن به دلیل عوامل اجتماعی-سیاسی رو به افول گذاشت (Craddock et al., 1983; Freestone et al., 1985a). هند به‌عنوان اولین کشوری که روی را به‌صورت صنعتی ذوب کرد شناخته می‌شود، اما چالش اصلی در این فرآیند، احیای اکسید روی بود که در دمای زیر ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با کربن انجام نمی‌شد و نیازمند روش‌های پیشرفته‌ی تقطیر بود. چین نیز به‌طور مستقل فناوری استخراج روی را توسعه داد. اسناد تاریخی نشان می‌دهند که تولید روی در مقیاس بزرگ در این کشور از دوره‌ی سلسله‌ی مینگ (۱۶۴۴-۱۳۶۸ میلادی) آغاز شد (Zhou, 2007). برخلاف

روش هندی، فرآیند چینی بر پایه‌ی تقطیر رو به بالا بود و از دیگ/ کوره تقطیر^۱ با کندانسورهای داخلی در بخش بالایی استفاده می‌کرد. این روش امکان متراکم‌سازی بخارات روی را در محیطی کنترل‌شده فراهم می‌کرد و تا اواخر قرن بیستم در استان‌هایی مانند سیچوان، گوئیژو و یون‌نان رواج داشت. تفاوت‌های ساختاری در کوره‌ها و دیگ‌های تقطیر نشان‌دهنده‌ی نوآوری‌های بومی در این منطقه است.

در ایران، روی به‌صورت توتیا (اکسید روی ZnO) از دوران باستان، به‌ویژه در زمان ساسانیان، تولید می‌شد. اصطلاح "توتیا" از واژه‌ی پارسی "دودیا" (ماده‌ای که از دود گرفته می‌شود) ریشه گرفته و روش تولید آن را نشان می‌دهد (Ghorbani, 2013). به نقل از آل طه). ابوریحان بیرونی در قرن یازدهم میلادی فرآیند تولید توتیا را چنین توصیف می‌کند: «سنگ معدن روی در کوره‌ای با میخ‌های سفالی پخته قرار می‌گرفت. با روشن کردن آتش در زیر کوره، بخارات روی بالا می‌رفت، به میخ‌ها می‌چسبید و پس از خنک شدن، لایه‌ای فلس مانند از توتیا روی آن‌ها تشکیل می‌شد.» این فناوری بعدها توسط مارکوپولو در قرن سیزدهم (Polo, 1903) و ابوالقاسم کاشانی (۱۳۵۳) در منطقه‌ی کرمان مستند شد. بقایای کوره‌های ذوب توتیا در نواحی مرکزی ایران، مانند بهاباد و کوهبنان، هنوز قابل مشاهده است. توتیا نه تنها در مصارف طبی و صنعتی کاربرد داشت، بلکه به‌عنوان محصولی تجاری به نقاط مختلف جهان صادر می‌شد (قزوینی، ۱۳۶۶). متون کهن، از جمله آثار شهردان ابی‌الخیر (۱۳۶۲)، ویژگی‌های توتیا را چنین برمی‌شمارند: "مس را سفید می‌کند، طلا را شکننده و سرخ‌رنگ می‌سازد و در ساخت برنج نقش کلیدی دارد".

با وجود این پیشینه‌ی غنی، متون فنی اندکی درباره‌ی فناوری تقطیر روی در ایران وجود دارد. آثار حمدالله مستوفی (۱۳۶۲)، ابوالقاسم کاشانی (۱۳۵۳) و عقیلی خراسانی (۱۳۷۱) از معدود منابعی هستند که به این موضوع پرداخته‌اند. مستوفی، برای مثال، کوره‌های مشبک با میخ‌های سفالی ۲۰ سانتی‌متری را توصیف می‌کند که پیش از استفاده در آب‌نمک

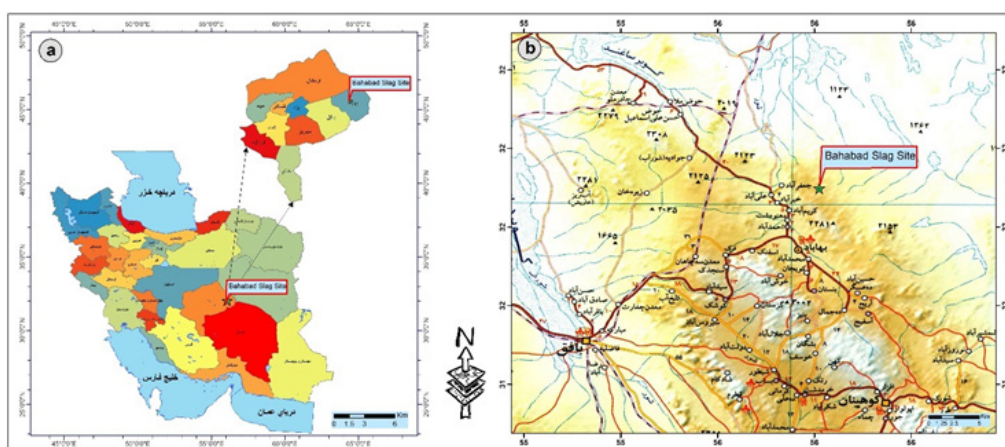
استخراج روی در دوران کهن فراهم کند.

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

محوطه ذوب فلز روی بهاباد در استان یزد و در ۷۱ کیلومتری شمال بهاباد واقع شده است. دسترسی به این محوطه پس از طی ۲۰ کیلومتر جاده آسفالتی مربوط به معادن و ۵۰ کیلومتر جاده خاکی امکان پذیر است. بخشی از این مسیر، نزدیک به ۲۵ کیلومتر، از طریق آبراهه‌ها طی می‌شود که دسترسی به محوطه را بسیار دشوار کرده است (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی ساختاری، منطقه مورد مطالعه بخشی از بلوک طیس محسوب می‌شود. واحدهای سنگی رخنمون یافته در این منطقه شامل آهک، شیل، ماسه‌سنگ کوارتزی، آرکوز، ماسه‌آهکی، شیل آهکی، زغال‌سنگ و شیل زغال‌دار است. عمده این رخنمون‌ها متعلق به سازند هجدک با سن ژوراسیک هستند (شکل ۲). در این منطقه کانسار فلزی مشاهده نشده است، اما در جنوب غربی محوطه، در فاصله‌ای قابل توجه، چندین کانسار متروکه سرب-روی وجود دارد. با توجه به دشواری دسترسی به این محدوده حتی در شرایط کنونی، اکتشافات قابل توجهی برای شناسایی کانسارهای فلزی، از جمله سرب و روی، در این منطقه انجام نشده است. این محوطه ذوب فلز روی می‌تواند

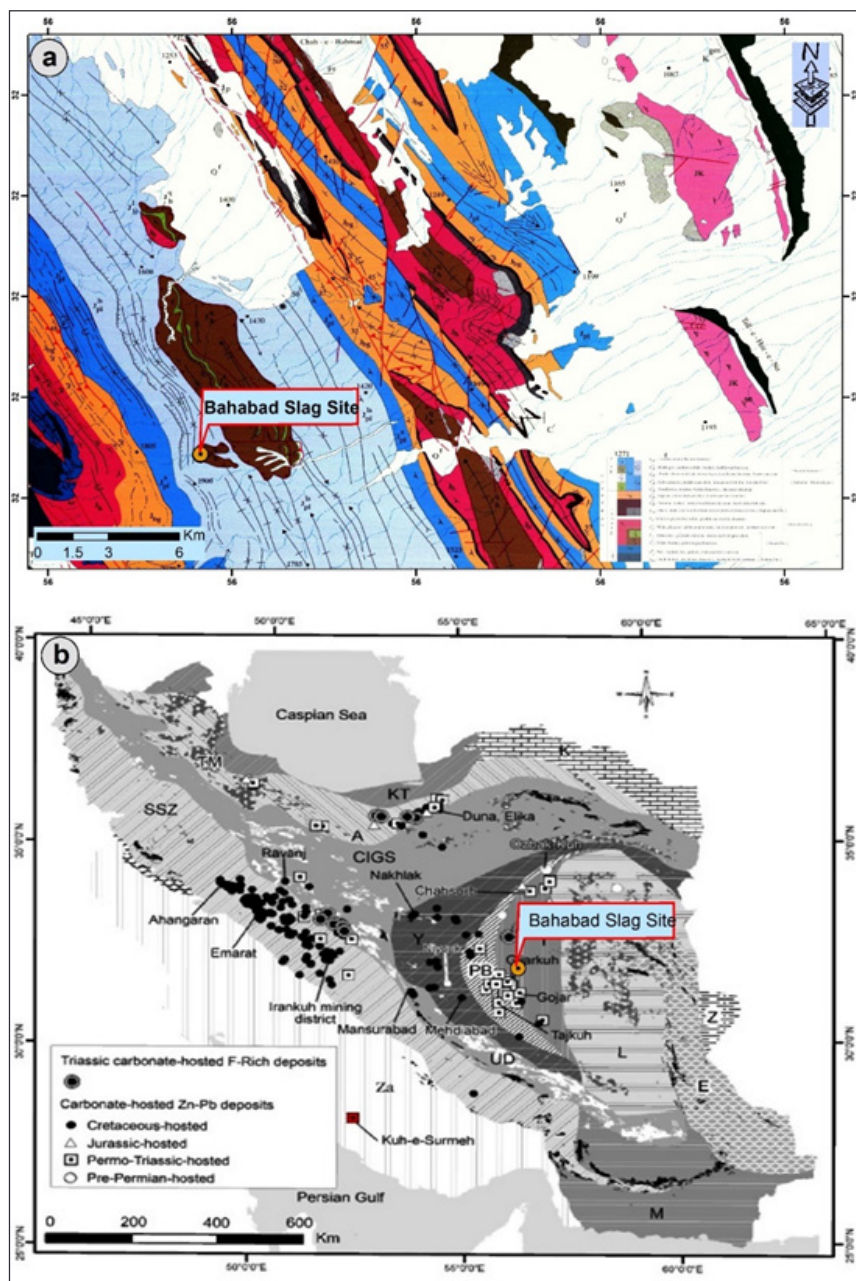
خوابانده می‌شدند، شاید برای افزایش استحکام یا چسبندگی توتیا. با وجود شواهد کوره‌های باستانی در اطراف معادن سرب و روی ایران، مطالعات در این زمینه محدود بوده است. تاکنون دو مطالعه در مورد معرفی محوطه‌های ذوب فلز روی انجام شده است. نخستین مطالعه توسط کمالی و همکاران (۲۰۲۴) در استان یزد بر روی محوطه ذوب فلز روی ندوشن انجام شده که در آن میخ‌های سفالی و سرباره‌های حاصل از ذوب مورد بررسی پتروگرافی، آنالیز شیمیایی و سن‌سنجی قرار گرفته‌اند (Kamali et al., 2024). مطالعه دوم در استان کرمان، شهرستان بم، توسط بهزادی و همکاران انجام شده که به بررسی باستان‌شناسی این محوطه‌ها پرداخته است (Behzad et al., 2024).

این پژوهش با هدف پر کردن این خلأها، به بررسی دقیق فناوری‌های باستانی استحصال روی می‌پردازد. محوطه‌ی مورد مطالعه که در پی‌جویی‌های زمین‌شناسی شناسایی شده، به دلیل موقعیت جغرافیایی دورافتاده تاکنون مورد مطالعه‌ی علمی قرار نگرفته است. از این‌رو، اهداف اصلی این تحقیق شامل شناسایی نوع فلز استحصال شده، تحلیل فرآیندهای متالورژیکی و بازسازی فناوری‌های به‌کاررفته با استفاده از داده‌های پتروگرافی و شیمیایی است. این مطالعه تلاش دارد تا با ارائه‌ی اطلاعات جدید، درک بهتری از تاریخچه‌ی



شکل ۱ - (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان یزد، (b) نقشه راه‌های دسترسی به محوطه مورد مطالعه.

Figure 1 - (a) Location of the study area within the country and Yazd province, (b) Road access map to the study site.



شکل ۲. (a). موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی شمال بهاباد (برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور)، (b) موقعیت محوطه مورد مطالعه در نقشه پراکندگی کانسارهای روی-سرب با سنگ درون‌گیر رسوبی (سنگ‌های تخریبی و کربناته) در کمربندهای متالوژنی ملایر-اصفهان، یزد-انارک، طبس-پشت‌بادام و البرز مرکزی (با تغییر از Rajabi et al., 2012). نقشه پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران برگرفته از (Aghanabati 1998).

Figure 2 - (a) Geological map of the northern Bāhābād region (adapted from the Geological Survey of Iran), (b) Distribution of zinc-lead ore deposits with sedimentary host rocks (clastic and carbonate) in the metallogenic belts of Malayer-Esfahan, Yazd-Anarak, Tabas-Pusht-e-Badam, and Central Alborz (modified from Rajabi et al., 2012). The sedimentary-structural zoning map of Iran is derived from Aghanabati (1998).

مختلف محوطه ذوب فلز به صورت تقریباً روشمند برداشت شوند.

نمونه برداری از میخ‌های سفالی

میخ‌های سفالی که برای استحصال فلز روی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌طور خاص از میان نمونه‌هایی انتخاب شدند که سالم‌تر بوده، کمتر آسیب دیده‌اند و لکه‌های سفید باقی‌مانده از فلز روی بر سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. این میخ‌ها به رنگ آجری، با بافتی ریز و از خاک رس پخته‌شده ساخته شده‌اند. بسیاری از این میخ‌ها در اثر تخریب کوره ذوب فلز و عوامل محیطی شکسته شده‌اند و اندازه‌های آن‌ها بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر است. برای این مطالعه، ۱۰ نمونه از میخ‌های سفالی موجود در سطح محوطه جمع‌آوری شد. از این تعداد، پنج نمونه که سالم‌تر و دارای بیشترین میزان روی بودند، انتخاب شدند. دو نمونه برای مطالعات پتروگرافی و سه نمونه برای آنالیز شیمیایی به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) مورد بررسی قرار گرفتند.

نمونه برداری از سرباره‌ها

نمونه‌های سرباره دارای رنگ خاکستری تیره و بافت متخلخل، در اندازه‌های ۳ تا ۷ سانتی‌متر دیده می‌شوند. این سرباره‌ها به دلیل سختی بالا و محتوای سیلیس زیاد، کمتر دچار فرسایش شده و برای مطالعه مناسب‌تر هستند. برای نمونه‌برداری از سرباره‌های موجود در محوطه، تلاش شد نمونه‌هایی که معرف فرآیند کوره ذوب فلز باشند و از نقاط مختلف محوطه به صورت تقریباً سالم برداشت شوند، انتخاب شوند. در مجموع، ۱۰ نمونه سرباره جمع‌آوری شد که از این تعداد، پنج نمونه سالم‌تر بودند. دو نمونه برای مطالعات پتروگرافی و سه نمونه برای آنالیز شیمیایی انتخاب شدند.

تحلیل‌های آزمایشگاهی

مختصات جغرافیایی نمونه‌های برداشت‌شده برای پتروگرافی و آنالیز شیمیایی در جدول یک و شکل

یک نشانگر اکتشافی مناسب برای شناسایی کانسارهای فلزی از جمله سرب-روی در نزدیکی همین کوره‌های ذوب باشد؛ به شرط آنکه پی‌جویی‌های زمین‌شناسی دقیق‌تری در منطقه انجام گیرد.

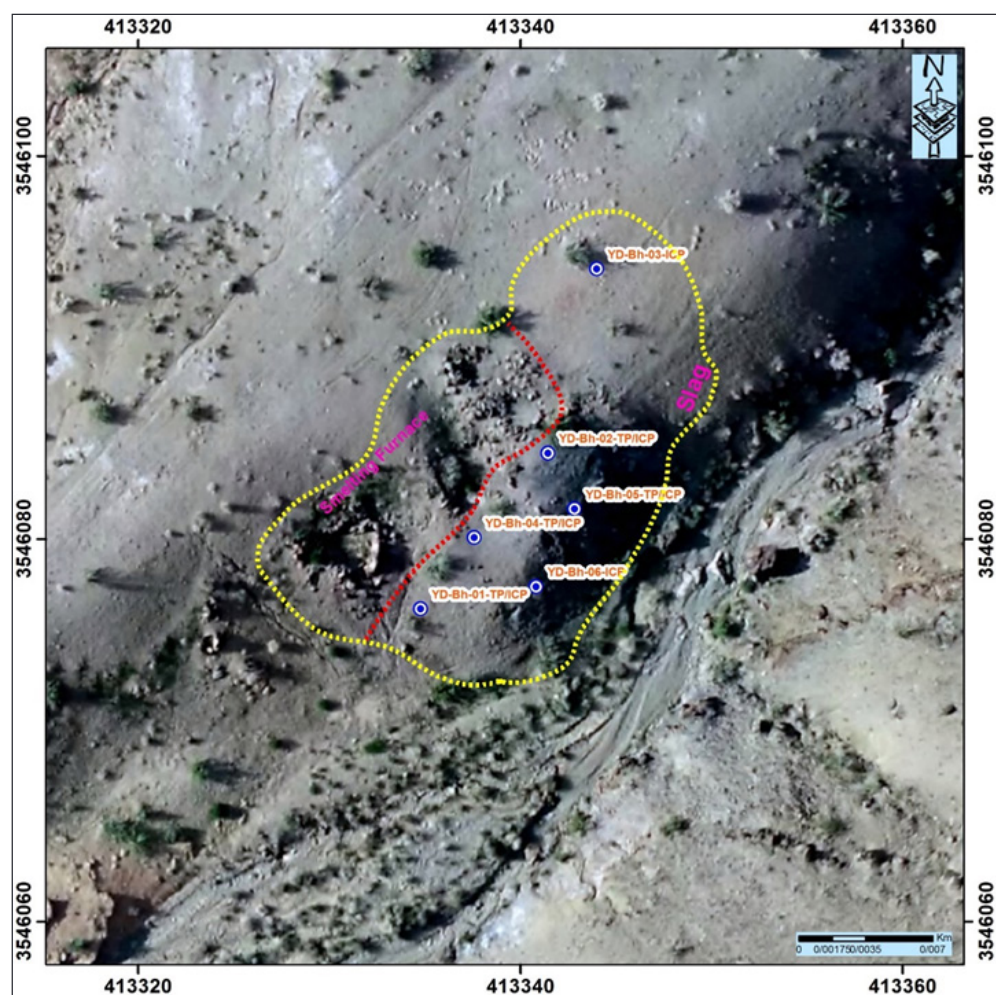
به‌طور کلی، تاکنون در ایران حدود ۵۰۰ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی شناسایی شده است که بیش از ۳۰۰ مورد از آن‌ها در سنگ‌های رسوبی تشکیل شده‌اند (Rajabi et al., 2012). مطالعات متالوژنی^۲ و پراکندگی کانسارهای سرب-روی با میزبان رسوبی در ایران (Rajabi et al., 2012, 2013) نشان می‌دهد این کانسارها عمدتاً در اطراف زمین‌درزه‌های اصلی واقع در مرکز ایران توزیع شده‌اند (شکل ۲). این امر بیانگر ارتباط نزدیک تشکیل این کانسارها با تحولات تکتونیکی اساسی در پوسته ایران است (Rajabi et al., 2012a, 2013). اکثر کانسارهای سرب و روی با میزبان رسوبی ایران در چهار کمربند اصلی فلززایی شامل البرز مرکزی، طبس-پشت‌بادام، ملایر-اصفهان و یزد-انارک تمرکز یافته‌اند (Rajabi et al., 2012a)، هرچند برخی از آن‌ها در زون مرکزی ایران و زاگرس نیز گزارش شده‌اند. برخی از این ذخایر، از جمله مهدی‌آباد، ایرانکوه، انگوران، آهنگران و کوشک، از بزرگ‌ترین کانسارهای سرب و روی جهان محسوب می‌شوند. محوطه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، بر اساس تقسیم‌بندی کمربندهای فلززایی، در زون طبس-پشت‌بادام-قرار دارد. این زون به دلیل کانی‌زایی گسترده‌ی سرب و روی، میزبان بسیاری از محوطه‌های ذوب فلز در ایران است و کوره‌های ذوب معمولاً در نزدیکی این کانسارها احداث می‌شدند (شکل ۲). نزدیکی محوطه‌ی به‌آباد به کانسارهای متروکه‌ی سرب-روی در جنوب‌غربی آن، فرضیه‌ی ارتباط این کوره‌ها با منابع معدنی محلی را تقویت می‌کند.

مواد و روش‌ها

مطالعات اولیه این پژوهش شامل جمع‌آوری، دسته‌بندی و ارزیابی اطلاعات موجود درباره منطقه مورد مطالعه بوده است. برای نمونه‌برداری، تلاش شد نمونه‌هایی انتخاب شوند که کمتر در معرض فرسایش و نزولات جوی قرار گرفته و از قسمت‌های

ارزیابی فناوری‌های به‌کار رفته در کوره ذوب فلز مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور تحلیل بهتر و مقایسه با داده‌های استاندارد اکسیدهای اصلی در سرباره‌ها، این مقادیر به شکل اکسید تبدیل شدند. این تبدیل بر اساس فرمول‌های استوکیومتری استاندارد (مانند Si به SiO_2 یا Fe به Fe_2O_3) انجام شد تا نتایج با مطالعات مشابه سازگار باشد. شایان ذکر است که مقدار اکسید سیلیس (SiO_2) در این مطالعه صرفاً به‌صورت تخمینی محاسبه شده است، زیرا تعیین دقیق آن نیازمند روش‌های تکمیلی مانند آنالیز XRF است.

سه ارائه شده است. برای مطالعات پتروگرافی، از هر نمونه مقاطع نازک-صیقلی به ضخامت ۳۰ میکرون تهیه شد. این مقاطع در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت و مرمت با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل Canada Smart Tech مورد بررسی قرار گرفتند. در این روش، لایه‌ای نازک از نمونه بر روی لام آزمایشگاهی تهیه شده، پس از برش و ساب، پوشش دهی شده و در نهایت به‌عنوان مقطع نازک-صیقلی آماده مطالعه شد. آنالیزهای شیمیایی نمونه‌ها به روش ICP-OES در آزمایشگاه زر آزما انجام شدند. این تحلیل‌ها برای تعیین ترکیب شیمیایی عناصر موجود در نمونه‌ها و



شکل ۳-نمایی کلی از موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت شده در منطقه مورد مطالعه.

Figure 3 - General view of the spatial distribution of collected samples in the study area.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت‌شده و نوع آنالیزهای انجام‌شده بر روی هر نمونه.

Table 1 - Geographic location of collected samples and the type of analyses performed on each sample.

NAME	X(UTM)	Y(UTM)	X(DD)	Y(DD)	Analysis	Comment
YD-Bh-01-TP/ICP	7689/413334	324/3546076	0820171/56	04756478/32	Thinpolish, ICP	Clay nail
YD-Bh-02-TP/ICP	8791/413341	302/3546085	0820916/56	04764631/32	Thinpolish, ICP	Clay nail
YD-Bh-03-ICP	9809/413343	099/3546094	08211307/56	04772582/32	ICP	Clay nail
YD-Bh-04-TP/ICP	3113/413337	105/3546080	08204369/56	04759909/32	Thinpolish, ICP	Slag
YD-Bh-05-TP/ICP	2902/413339	489/3546082	08206444/56	04762074/32	Thinpolish, ICP	Slag
YD-Bh-06-ICP	8208/413340	491/3546077	0820811/56	04757578/32	ICP	Slag

محوطه سرباره‌ای (کوره ذوب فلز روی)

در بررسی‌های میدانی به‌منظور اکتشاف منابع معدنی، یک محوطه ذوب فلز روی در ۷۱ کیلومتری شمال بهاباد شناسایی شد. مختصات جغرافیایی این محوطه شامل طول جغرافیایی ۵۶ درجه، ۴ دقیقه و ۵۵.۵۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه، ۲ دقیقه و ۵۱.۵۰ ثانیه شمالی، با ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا است. ابعاد این محوطه ذوب فلز به طول ۲۰ متر، عرض ۱۱ متر و مساحت ۲۲۰ مترمربع بوده و در نزدیکی یک آبراهه نسبتاً بزرگ قرار دارد (شکل ۴). در این محوطه، آثار کوره ذوب فلز و سرباره‌های مربوط به فرآیند ذوب روی به‌وضوح قابل مشاهده است. علاوه بر سرباره‌ها، زغال سنگ و میخ‌های سفالی نیز به چشم می‌خورند که به‌منظور استحصال فلز روی استفاده شده‌اند (شکل ۵). پوشش گیاهی اطراف کوره عمدتاً از درختچه‌های بادام و گون تشکیل شده است. متأسفانه، به دلیل تأثیر قابل توجه نزولات جوی و تخریب‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی، بخشی زیادی از این کوره از بین رفته است. تنها باقی‌مانده معماری این محوطه، کوره ذوب فلز است که بخش قابل‌توجهی از آن تخریب شده است. در بررسی‌های بیشتر در نزدیکی محوطه، هیچ‌گونه شواهدی از معدن‌کاری جدید و شدادی

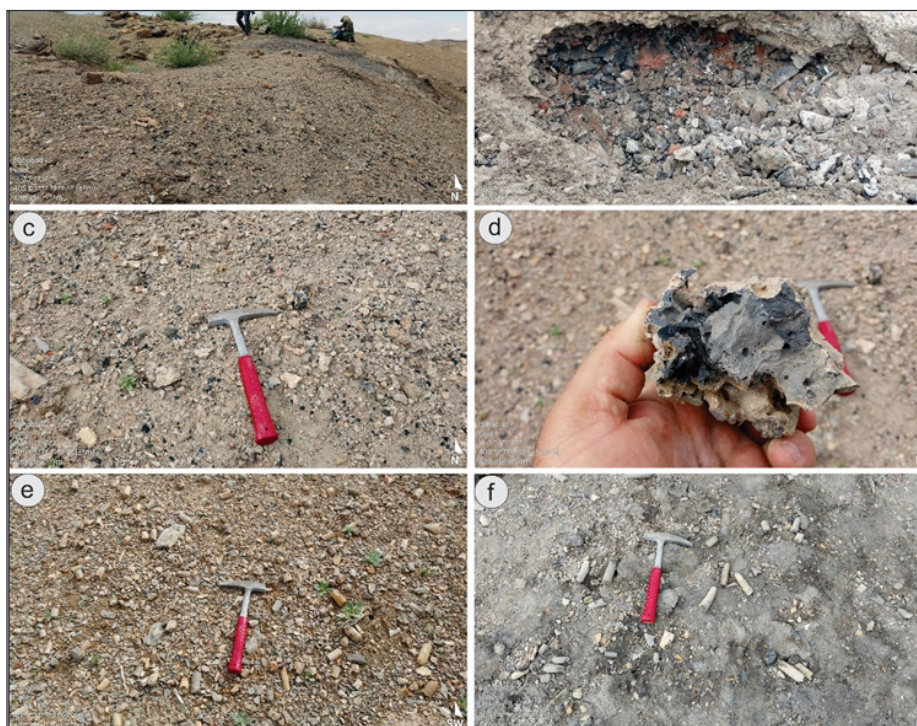
مشابه یافت نشد. این امر پرسشی اساسی را به‌وجود می‌آورد که منبع تأمین مواد خام معدنی روی در این منطقه از کجا بوده است.

در محوطه سرباره‌ای مورد مطالعه، میخ‌های سفالی با ابعاد مختلف، بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر، برای استخراج فلز روی به‌کار رفته‌اند (شکل ۶). این میخ‌ها به‌عنوان بخشی از فرآیند ذوب فلز و جداسازی روی از سایر مواد معدنی استفاده می‌شدند. مطالعه دقیق‌تر این میخ‌ها و بررسی روش‌های به‌کار رفته در استخراج فلز روی می‌تواند به درک عمیق‌تری از فرآیندهای فناوری و صنعت باستانی که در آن دوران مورد استفاده قرار می‌گرفته، منجر شود. بنابراین، مطالعه ترکیب پتروگرافی، شیمیایی و سن‌سنجی این میخ‌های سفالی، به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از فعالیت‌های معدن‌کاری و فلزکاری باستانی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در ادامه، جزئیات مرتبط با این میخ‌های سفالی ارائه خواهد شد. در شکل ۵، حجم قابل‌توجهی از این میخ‌ها که هنوز در محوطه پراکنده شده‌اند، قابل مشاهده است. این میخ‌ها سطحی پوشیده از لایه‌ای سفید دارند که به‌عنوان باقی‌مانده توتیا (روی) از فرآیند استخراج شناخته می‌شود. این لایه سفید رنگ با آزمون صنعتی تشخیص فلز روی



شکل ۴. محوطه ذوب فلز روی و بخش‌هایی از بقایای کوره ذوب.

Figure 4 - The zinc smelting site and remains of the smelting furnace.



شکل ۵. (a) نمای نزدیک از کوره ذوب فلز روی، (b, c, d) میخ‌های سفالی مشاهده‌شده در این محوطه، (e) بخشی از کوره ذوب همراه با بقایای زغال، (f) نمونه‌ای از سرباره خاکستری-سیاه که به‌صورت پراکنده در محوطه دیده می‌شود.

Figure 5 - (a) A close-up view of the zinc smelting furnace, (b, c, d) ceramic nails observed in the site, (e) a section of the furnace with residual charcoal, (f) a sample of grayish-black slag scattered throughout the site.

مشاهده می‌شوند. این سرباره‌ها به رنگ‌های سیاه و خاکستری تیره و به‌صورت متخلخل وجود دارند. اندازه این سرباره‌ها بین ۳ تا ۷ سانتی‌متر متغیر بوده و به‌صورت نسبتاً چگال قابل مشاهده هستند. علاوه بر این، سنگ‌های کمک‌ذوب نظیر آهک نیز در کنار کوره مشاهده می‌شوند (شکل ۷).

به سمت قرمز و قرمز تیره تغییر می‌کند. هرچه رنگ این لایه تیره‌تر باشد، نشان‌دهنده عیار بالاتر ماده معدنی است (شکل ۶).

در این محوطه، علاوه بر میخ‌های سفالی که آثار آن‌ها هنوز به‌وضوح قابل مشاهده است، سرباره‌های حاصل از ذوب سنگ‌های معدنی نیز در این منطقه



شکل ۶ میخ‌های سفالی استفاده‌شده در استحصال فلز روی. لکه‌های سفید روی این میخ‌ها نشان‌دهنده باقی‌مانده فلز روی هستند که در تصویر پایینی پس از واکنش با محلول تشخیص روی، به رنگ قرمز درآمده‌اند.

Figure 6 - Ceramic nails used for zinc extraction. The white spots on the nails represent residual zinc, which appears red after reaction with the zinc detection solution in the lower image.



شکل ۷. نمونه‌هایی از سرباره‌های روی در محوطه مورد مطالعه که دارای اندازه‌های متنوع بین ۳ تا ۷ سانتی‌متر هستند.

Figure 7 - Zinc slag samples from the study site, exhibiting variable sizes ranging from 3 to 7 cm.

دارای بافت پورفیری هستند. ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها عمدتاً شامل کوارتز (حدود ۲۰ درصد) و مقدار کمتری کلسیت است (شکل ۸). بلورهای کوارتز در دو اندازه درشت‌بلور و ریزبلور مشاهده شدند. کلسیت نیز در مقادیر کمتر به دو شکل میکرایت و اسپارایت شناسایی شد. علاوه بر این، کانی‌های کوارتز و کلسیت به‌صورت توده‌ای در ساختار این میخ‌ها حضور دارند. میزان کمی حفره نیز در نمونه‌ها قابل مشاهده است. از این میخ‌ها برای استخراج فلز روی استفاده می‌کنند.

سرباره‌های حاصل از ذوب

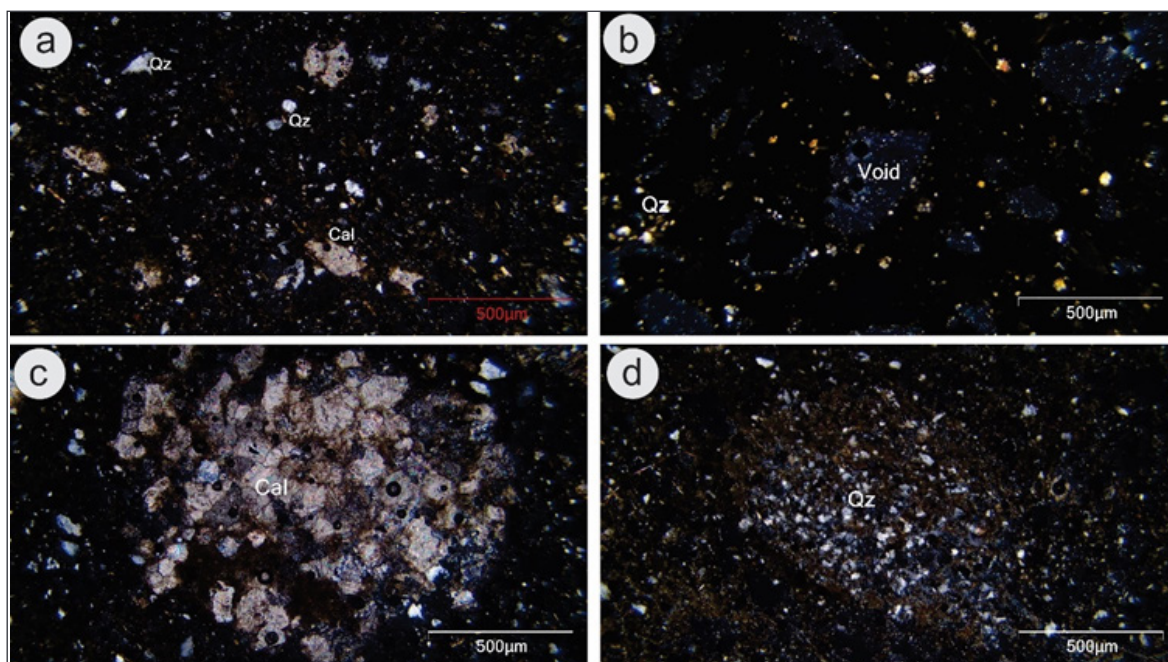
در زیر میخ‌های سفالی پراکنده در این کوره ذوب فلز روی، سرباره‌های حاصل از فرآیند ذوب سنگ‌های خام ماده معدنی مشاهده می‌شود. این سرباره‌ها عمدتاً به رنگ خاکستری و در برخی موارد سیاه‌رنگ بوده و اندازه آن‌ها بین ۳ تا ۷ سانتی‌متر متغیر است. سطح آن‌ها نسبتاً خشن بوده و دارای میزان کمی تا متوسط از حفرات و خلل و فرج است. برای بررسی‌های

پتروگرافی

برای مطالعه میکروسکوپی سفال‌ها و سرباره‌های ذوب فلز از میکروسکوپ دوچشمی پلاریزان مدل Canada Smart Tech استفاده گردید. بزرگنمایی بکار رفته در این مطالعه 4X، 10X است.

میخ‌های سفالی

میخ‌های سفالی موجود در محوطه ذوب فلز روی همچنان قابل مشاهده‌اند، برخی از آن‌ها تقریباً سالم باقی مانده‌اند، در حالی که بخش عمده‌ای شکسته و خرد شده است. این میخ‌ها از خاک رس پخته‌شده ساخته شده و دارای رنگ آجری هستند. طول آن‌ها بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر و قطرشان در محدوده ۱ تا ۳ سانتی‌متر متغیر است. سطح این میخ‌ها دارای بافت ریزبلور است. همچنین، ساختار داخلی آن‌ها توپر بوده و نوک آن‌ها تیز است. برای مطالعات پتروگرافی، دو نمونه از این میخ‌های سفالی برداشت شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که این سفال‌ها



شکل ۸ - (a) بلورهای کوارتز و کلسیت در یک خمیره، (b) کانی کوارتز و فضاهای خالی در میخ‌های سفالی، (c) کلسیت به صورت توده‌ای از نوع اسپارایت، (d) کوارتز به صورت توده‌ای در میخ‌های سفالی.

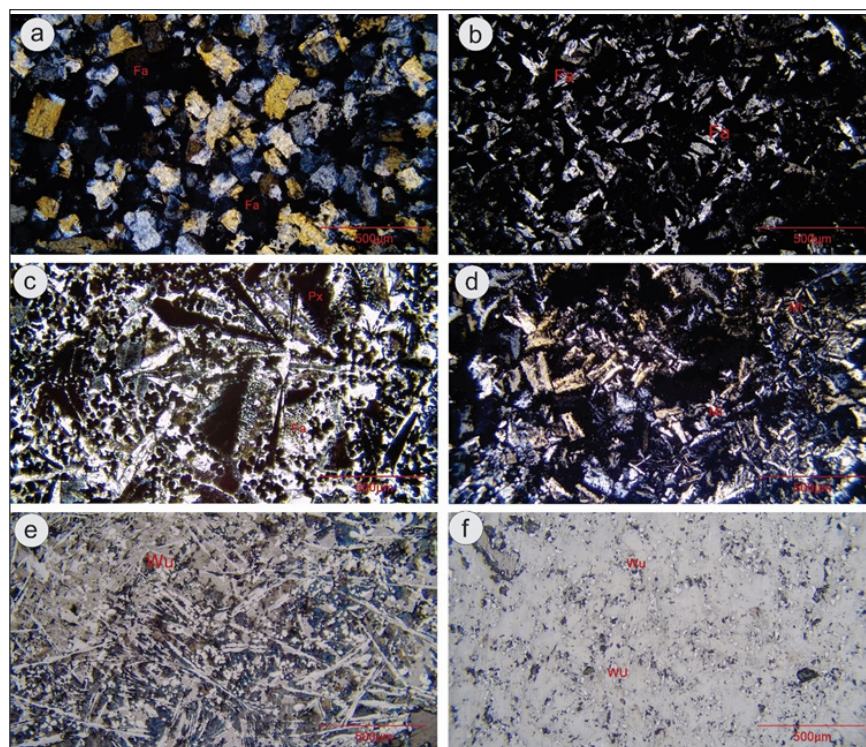
Figure 8 - (a) Quartz and calcite crystals within a fine-grained matrix, (b) Quartz grains and voids in ceramic nails, (c) Calcite as a sparitic aggregate, (d) Quartz forming a massive aggregate within ceramic nails.

بالای فرآیند ذوب و شرایط کاهش‌دهنده‌ای است که منجر به تبلور این ترکیبات شده است. حضور وستیت و الیوین (فایالیت) می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی دمای ذوب و میزان اکسیژن در محیط ذوب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی این سرباره‌ها نشان می‌دهد که فرآیند ذوب در یک سیستم با دمای بالا انجام شده و ترکیبات نهایی حاصل از آن شامل فازهای سیلیکاته و اکسیدی بوده است.

ژئوشیمی میخ‌های سفالی و سرباره‌های کوره ذوب فلز روی

برای بررسی ترکیب شیمیایی میخ‌های سفالی و سرباره‌های حاصل از ذوب فلز در محوطه مورد مطالعه، از هر گروه سه نمونه (در مجموع شش نمونه) به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) آنالیز شد. داده‌های عناصر اصلی به

پتروگرافی، دو نمونه از این سرباره‌ها برداشت شد. نتایج مطالعات نشان داد که کانی‌های اصلی این سرباره‌ها شامل الیوین (فایالیت، Fe_2SiO_4) و ملیلیت هستند (شکل ۹)، در حالی که پیروکسن به‌عنوان کانی فرعی حضور دارد. بلورهای الیوین عمدتاً به صورت فایالیت و تقریباً شکل‌دار دیده شده و پیروکسن با مقدار کمتر، بیشتر در فضاهای خالی میان بلورهای الیوین مشاهده می‌شود. علاوه بر این، ملیلیت با فراوانی کمتر از ۱۰ درصد به صورت بلورهای ریز با اشکال ستاره‌ای یا سه‌ضلعی در ساختار سرباره‌ها حضور دارد. از سوی دیگر، بررسی‌های کانه‌شناسی نشان داد که کانه غالب در این سرباره‌ها وستیت (FeO) است که به صورت دانه‌ای و رشته‌ای شکل یافت می‌شود (شکل ۹). وستیت همچنین به صورت بلورهای دندریتی با فراوانی حدود ۲۵ درصد و به رنگ کرم مشاهده شده است. ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی این سرباره‌ها نشان‌دهنده دمای



شکل ۹. (a, b) کانی‌های شکل‌دار فایالیت، (c) کانی فایالیت و پیروکسن، (d) کانی ملیلیت به‌صورت ستاره‌ای، (e) کانه وستیت به‌صورت سوزنی، (f) کانه وستیت به‌صورت دانه‌ای و پراکنده.

Figure 9 - (a, b) Well-formed fayalite crystals, (c) Fayalite and pyroxene minerals, (d) Melilite in a star-like habit, (e) Wüstite in a needle-like form, (f) Wüstite as disseminated granular aggregates.

است. غلظت روی در این میخ‌ها (میانگین ۹۷۱۰ ppm) موفقیت نسبی این روش را نشان می‌دهد، هرچند فرسایش ناشی از عوامل محیطی مانند نزولات جوی طی سده‌ها ممکن است عیار روی را کاهش داده باشد. سرباره‌های حاصل از ذوب فلز ترکیبی متفاوت با میخ‌های سفالی دارند و میانگین اکسیدهای اصلی آن‌ها شامل SiO_2 ۷۱/۳۹٪ و Fe_2O_3 ۱۱/۹۳٪ و CaO ۶/۸۵٪ است. مقدار بالای SiO_2 نشان‌دهنده استفاده از سنگ‌های سیلیکاتی یا شار سیلیسی در فرآیند استخراج است. غلظت بالای Fe_2O_3 با حضور کانی‌های فایالیت (Fe_2SiO_4) و وستیت (FeO) هم‌راستاست که در مطالعات پتروگرافی نیز تأیید شده‌اند. این کانی‌ها که در شرایط احیایی و دمای بالا (بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) تشکیل می‌شوند، حاکی از محیطی با اکسیژن کم هستند. حضور CaO

شکل اکسید تبدیل شدند تا امکان تحلیل دقیق‌تری فراهم شود. نتایج این آنالیزها در جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است که مقدار اکسید سیلیسیم (SiO_2) به‌صورت تخمینی محاسبه شده است. میخ‌های سفالی که ابزار اصلی جمع‌آوری بخارات روی (به‌صورت توتیا یا ZnO) بوده‌اند، دارای میانگین SiO_2 ۷۰/۷۶٪ و Al_2O_3 ۱۲/۴۹٪ هستند. این مقادیر نشان‌دهنده استفاده از خاک رس پخته‌شده به‌عنوان ماده پایه است که با نتایج مطالعات پتروگرافی نیز هم‌خوانی دارد. حضور اکسید روی ZnO با میانگین ۱/۲۱ درصد در این میخ‌ها تأیید می‌کند که حتی پس از گذشت چند قرن، آثار استخراج روی بر سطح آن‌ها باقی مانده است و بر نقش این میخ‌ها در فرآیند استحصال روی تأکید دارد؛ فرآیندی که در متون تاریخی توسط بیرونی و کاشانی شرح داده شده

بحث و بررسی

یکی از کاستی‌های اصلی مطالعات پیشین، کم توجهی به فناوری تقطیر روی و نقش آن در تاریخ استحصال فلز روی و فناوری کهن ایران بوده است. مطالعه علمی این کوره‌ها می‌تواند تاریخچه استحصال فلزات را روشن کند. پژوهش حاضر با تأکید بر استحصال فلز روی در ایران، تلاش دارد آن را به‌عنوان یکی از فناوری‌های کهن مهندسی معرفی کند. استحصال فلز روی، به دلیل تفاوت‌های بنیادی با سایر فلزات مانند مس و آهن، فرآیندی متفاوت و پیچیده است.

منابع تاریخی متعددی، از جمله آثار ابوریحان بیرونی، ابوالقاسم کاشانی، حمدالله مستوفی و سفرنامه‌ی مارکوپولو (Polo, 1903)، به روش‌های تولید روی در ایران اشاره کرده‌اند (بیرونی، ۱۳۷۴؛ کاشانی، ۱۳۵۳؛ مستوفی، ۱۳۶۲). این گزارش‌ها، همراه با شواهد باستان‌شناختی، نشان‌دهنده‌ی پیشرفت قابل‌توجه فناوری تقطیر روی در ایران باستان است. بقیای کوره‌ها و میخ‌های سفالی مرتبط با این فرآیند در استان‌های یزد (Kamali, 1402)، اصفهان، کرمان (Behzad et al., 2024)، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان یافت شده‌اند. انطباق مکان این کوره‌ها با کمر بند کانه‌زایی سرب-روی ایران، از مهارت بالای معدن‌کاران باستانی در شناسایی ذخایر معدنی حکایت دارد. تونل‌های شدادی عمیق و پیچیده در معادن بزرگ سرب و روی این مناطق نیز این موضوع را تأیید می‌کنند، هرچند بسیاری از این ساختارها در اثر فعالیت‌های معدنی مدرن تخریب شده‌اند.

کوره‌های ذوب روی در ایران، برخلاف کوره‌های متداول سایر فلزات، به‌صورت دوطبقه طراحی شده‌اند. این کوره‌های بلند و باریک شامل طبقه‌ی زیرین برای حرارت‌دهی به سنگ معدن و طبقه‌ی بالایی با صفحه‌ای مشبک از جنس رس هستند که میخ‌های سفالی پخته‌شده روی آن قرار می‌گیرند. این میخ‌ها، با طول ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۱ تا ۳ سانتی‌متر، به شکل قلمی و نوک‌تیز ساخته می‌شدند. بر اساس توصیف مستوفی در نزهةالقلوب، با حرارت‌دهی سنگ معدن، بخارات روی از طریق

در سرباره‌ها نشان می‌دهد که از کربنات کلسیم (احتمالاً آهک) به‌عنوان کمک‌ذوب برای کاهش دمای ذوب و جداسازی فلزات استفاده شده است. وجود سازند هجداک با سنگ‌شناسی آهکی، ماسه‌سنگ کوارتزیستی و شیل در منطقه این فرضیه را پشتیبانی می‌کند. غلظت بالای ($ZnO \ 3/74\%$) در هر سه نمونه سرباره (بیانگر آن است که استخراج روی به‌طور کامل انجام نشده و بخشی از آن در سرباره باقی مانده است.

میانگین غلظت سرب (669 ppm) و گوگرد (1053 ppm) در میخ‌های سفالی و همچنین سرب (315 ppm) و گوگرد (361 ppm) در سرباره‌ها پایین است. این مقادیر پایین حاکی از استفاده از سنگ معدن اکسیدی، مانند اسمیتسونیت ($ZnCO_3$) یا همی‌مورفیت، به جای کانی‌های سولفیدی مانند اسفالریت (ZnS) است. این یافته با مطالعات رجبی و همکاران (۲۰۱۲) درباره کانسارهای سرب-روی در کمر بند طبس-پشت‌بادام که عمدتاً اکسیدی هستند، هم‌خوانی دارد (Rajabi et al., 2012). غلظت کم سرب در هر دو دسته نمونه احتمالاً نتیجه جداسازی آن پیش از فرآیند ذوب یا در دماهای پایین‌تر (۴۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) پیش از تقطیر روی است. این فرآیند دو مرحله‌ای (جداسازی سرب و سپس تقطیر روی) با طراحی کوره‌های دوطبقه سازگار است. همچنین، میانگین غلظت استرانسیم در میخ‌های سفالی (875 ppm) و سرباره‌ها (5739 ppm) به ترکیب سنگ میزبان یا استفاده از کمک‌ذوب‌های کربناته غنی از استرانسیم اشاره دارد که در سرباره‌ها به دلیل افزودن آهک افزایش یافته است.

به‌طور کلی، شواهد موجود شامل نوع کوره، حضور میخ‌های سفالی و غلظت بالای روی در این مواد نشان‌دهنده استفاده از این محوطه برای استخراج فلز روی است. آنالیز داده‌های عنصری و مقادیر پایین سرب و گوگرد تأیید می‌کند که سنگ خام معدنی مورد استفاده، کانی‌های اکسیدی روی مانند اسمیتسونیت (کالامین) و همی‌مورفیت بوده است. این نتایج با تقسیم‌بندی کمر بندهای کانی‌زایی سرب-روی در ایران مطابقت دارد و بر مهارت معدن‌کاران باستانی در بهره‌برداری از منابع محلی تأکید می‌کند.

جدول ۲. نتایج آنالیز ICP میخ‌های سفالی و سرباره محوطه ذوب فلز روی بهاباد. مقادیر عناصر اصلی از تبدیل آنالیز عنصری به‌دست آمده‌اند و میزان اکسید سیلیس به‌صورت تخمینی ارائه شده است.

Table 2 - ICP analysis results of ceramic nails and slag from the Bāhābād zinc smelting site. Major element concentrations were obtained from elemental analysis conversion, with an estimated silica oxide content.

Clay nails			Slags			
Sample	-YD-BH01 ICP	-02-YD-BH ICP	-03-YD-BH ICP	-04-YD-BH ICP	-05-YD-BH ICP	-06-YD-BH ICP
SiO ₂	69.27	66.4	76.62	72.53	70.56	71.07
Al ₂ O ₃	14.65	12.82	10	1.87	2.16	4.07
Fe ₂ O ₃	6.63	5.45	3.18	12.53	13.25	10
CaO	0.66	6.42	1.8	6.37	6.72	7.47
MgO	2.02	3.33	1.57	2.32	2.93	2.9
K ₂ O	4.58	2.74	3.64	0.35	0.35	0.38
Na ₂ O	1.8	1.26	1.53	0.29	0.29	0.37
ZnO	0.39	1.58	1.66	3.74	3.74	3.74
Ag	6.28	2.39	0.89	0.57	0.5>	1.63
As	30.2	25.1	17.1	43.5	53.6	40.7
Ba	299	502	461	132	246	1778
Be	3.1	1.8	4.3	1>	1>	1.2
Cd	71.2	11.7	23.8	0.54	0.7	0.43
Ce	70	56	89	21	19	19
Co	17.5	15.2	11	15.4	15.5	5.7
Cr	65	79	81	30	29	33
Cu	64	54	59	148	98	134
La	36	33	45	11	11	12
Li	79	48	144	16	17	20
Mo	4.6	1.17	1.95	18.8	15.1	119
Na	13323	9375	11354	2178	2171	2721
Ni	45	57	46	33	33	23
P	1016	732	338	394	432	879
Pb	1400	403	206	173	44	728
S	1468	774	917	317	383	382
Sb	1.27	1.11	0.99	18.01	17.28	50.84
Sc	10.9	13.6	19.7	2.4	2.6	4.1
Sr	165	1890	518	3904	4638	7675
Th	5>	5>	5>	5>	5>	5>
Ti	4572	3645	5490	878	851	1191
U	5>	5>	5>	5>	5>	5>
V	155	100	171	19	22	107
Y	12	15.6	16.8	7.3	7	6.3
Yb	1.9	1.8	2.1	1.5	1.6	2.5
Zn	3162	12644	13321	%3<	%3<	%3<
Zr	66	58	76	37	35	53

هند، اسفالریت با زغال چوب و کود گاوی در کوره‌های مربعی شکل و با روش تقطیر نزولی ذوب می‌شد. این تفاوت‌ها بیانگر استقلال فناوری‌های بومی و سازگاری آن‌ها با شرایط محلی است. استفاده از میخ‌های سفالی در ایران، در مقایسه با کندانسورهای چینی و روش نزولی هندی، این فناوری را متمایز می‌سازد.

نتیجه گیری

این پژوهش با بررسی دقیق محوطه ذوب فلز روی در بهاباد، یزد، با استفاده از روش‌های پتروگرافی و ژئوشیمی، شواهد ارزشمندی از فناوری کهن استحصال روی در ایران ارائه کرده است. پتروگرافی میخ‌های سفالی، بافت پورفیری با حدود ۲۰ درصد کوآرتز و مقادیر اندک کلسیت را نشان می‌دهد، در حالی که پتروگرافی سرباره‌ها، حاوی کانی‌های فایالیت و وستیت، بیانگر دمای بالای ذوب (بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. از سیلیس و آهک به‌عنوان کمک‌ذوب در این کوره‌ها استفاده شده است. نتایج مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمی میخ‌های سفالی، استحصال فلز روی در این محوطه را تأیید می‌کند. این کوره‌های ذوب فلز روی، برخلاف سایر کوره‌های فلزات، دوطبقه هستند. در طبقه اول، سنگ‌های خام معدنی برای حرارت‌دهی قرار می‌گیرند و طبقه دوم مشبک است. درون این مشبک‌ها، میخ‌های سفالی قرار دارند تا پس از حرارت‌دهی سنگ معدن در طبقه اول، بخارات روی تولید شده و بر سطح میخ‌های سفالی رسوب کند و به‌صورت توتیا (ZnO) جمع‌آوری شود. حضور اکسید روی در میخ‌های سفالی با میانگین ۱/۲۱ درصد و در سرباره‌های حاصل از ذوب با میانگین ۳/۷۴ درصد، نشان‌دهنده استحصال نسبتاً موفق فلز روی از این کوره است. با این حال، مقدار اکسید روی در سرباره‌ها حاکی از استخراج ناقص روی از سنگ معدن است. غلظت پایین سرب و گوگرد در نمونه‌های این محوطه، استفاده از کانی‌های اکسیدی مانند اسمیتسونیت یا همیمورفیت را برای استخراج روی در این کوره‌ها نشان می‌دهد که با ویژگی کانسارهای کمر بند طبس-پشت‌بادام تطابق دارد. مقایسه انجام‌شده با روش‌های استحصال فلز روی در هند و چین، که

تصعید بالا آمده و بر سطح میخ‌ها رسوب می‌کردند. پس از خنک شدن، توتیا (اکسید روی) از میخ‌ها جدا می‌شد. این طراحی پیچیده و منحصربه‌فرد، جایگاه ویژه‌ای در تاریخ مهندسی متالورژی دارد و ضرورت حفاظت از این محوطه‌ها را به‌عنوان میراثی ارزشمند برای پژوهش‌های آینده برجسته می‌کند.

مقایسه‌ی فناوری تقطیر روی در ایران، هند و چین تفاوت‌های قابل‌توجهی را نشان می‌دهد (جدول ۳). در ایران، سنگ معدن اصلی اسمیت‌زونیت بود و از زغال چوب و مواد آلی به‌عنوان سوخت و عامل کاهنده در کوره‌های دایره‌ای شکل استفاده می‌شد. میخ‌های سفالی ابزار اصلی تقطیر بودند و روش صعودی به کار گرفته می‌شد. در چین، اسمیت‌زونیت با زغال سنگ در کوره‌های مستطیلی و با استفاده از ظروف و کندانسورها فراوری می‌شد که روش صعودی را دنبال می‌کرد.

جدول ۳. تفاوت‌های تقطیر روی در ایران، چین و هند (Zhou., 2012) بر اساس یافته‌های باستان‌شناسی و باستان‌سنجی.

Table 3 - Differences in zinc distillation techniques between Iran, China, and India (Zhou., 2012) based on archaeological findings.

تقطیر روی هند	تقطیر روی چین	تقطیر روی در ایران	ویژگی
اسفالریت	اسمیت زونیت (همی مورفیت)	اسمیت زونیت (همی مورفیت)	سنگ معدن
زغال چوب	زغال سنگ	زغال چوب	سوخت
زغال چوب، مواد آلی، کود گاوی	زغال سنگ، زغال چوب	زغال چوب، مواد آلی، کاهنده	عامل
ظرف و کندانسور	ظرف، کندانسور، جیب و درپوش	میخ‌های سفالی	رتورت
مربعی	مستطیلی	دایره ای	کوره
نزولی	صعودی	صعودی	روش تقطیر

تا فلزات فرار مانند جیوه یا روی را استخراج کند.

۲. متالوژنی (Metallogeny) شاخه‌ای از علوم زمین‌شناسی است که به مطالعه منشأ، تشکیل و توزیع کانسارهای معدنی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌پردازد. این علم ترکیبی از زمین‌شناسی اقتصادی، زمین‌شناسی ساختاری، پترولوژی و ژئوشیمی است و هدف آن درک فرآیندهای زمین‌شناسی است که منجر به تشکیل ذخایر معدنی می‌شوند.

منابع / References

- Bonnin, J. (1924). The history of zinc smelting in Europe. *Journal of Metallurgical Studies*, 12(3), 45–67.
- Craddock, P. T., Eckstein, K., & Meeks, N. D. (1983). Zinc production in medieval India: The evidence from Zawar, Rajasthan. *Antiquity*, 57(220), 180–187.
- Day, J. (1998). Bristol brass and the development of the zinc industry in England. *Historical Metallurgy*, 32(2), 115–130.
- Freestone, I. C., Middleton, A. P., & Craddock, P. T. (1985). Early zinc smelting techniques in India and their implications for European industry. *Journal of Archaeological Science*, 12(4), 305–317. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(85\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0305-4403(85)90003-8).
- Ghorbani, M. (2013). *The economic geology of Iran: Mineral deposits and natural resources*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0>.
- Khojasteh Behzadi, N., Mafi, F., & Emami, S. M. (2023). The study of mining and metallurgy in the central part of Bam County based on archaeological surveys and historical sources. *Journal of Archaeological Studies*, 15(2), 57–73. <https://doi.org/10.22059/jarcs.2023.358920.143203>.
- Polo, M. (1903). *The book of Ser Marco Polo, the Venetian, concerning the kingdoms and marvels of the East* (Vol. 2). Scribner.
- Rajabi, A., Rastad, E., & Canet, C. (2012). *Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted*

با ایران متفاوت است، نشان می‌دهد که ایران در زمینه استحصال فلز روی پیش‌تاز بوده و این فناوری، مختص و منحصر به فرد ایران است. کوره‌های ذوب فلز در مرکز و شرق کشور، بیانگر فناوری کهن و بومی ایران باستان است. با توجه به محدود بودن محوطه‌های ذوب فلز روی در کشور و خطر تخریب آنها، ضرورت ثبت ملی این محوطه‌ها برای حفظ این میراث مهندسی کهن بیش از پیش آشکار است.

سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس سید ایرج بهشتی برای تهیه و مطالعه مقاطع پتروگرافی و از آقایان دکتر فدایی و دکتر رازانی برای ارائه نقطه‌نظرات ارزشمند که به بهبود این پژوهش کمک شایانی کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. از شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید، به‌ویژه جناب آقای مهندس ابراهیم‌زاده، مدیر بخش اکتشاف، و جناب آقای مهندس شکری، مدیرعامل، به دلیل پشتیبانی لجستیکی و حمایت‌های بی‌وقفه که نقش مؤثری در پیشبرد این پژوهش داشته‌اند، سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از جناب آقای مهندس لاجپانی به خاطر همراهی در مستندنگاری، نمونه‌برداری و ارائه کمک‌های علمی ارزشمند قدردانی می‌کنم.

تضاد منافع: وجود ندارد.

حامیان مادی و معنوی: معاونت محترم پژوهشی پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری حامی مالی این تحقیق بوده است.

دسترسی به داده‌ها: داده‌های خام این مطالعه در اختیار نویسندگان است و از طریق مکاتبات قابل دسترسی است.

پی‌نوشت‌ها

۱. Retort) در معدن‌کاری و فرآیند ذوب فلزات، تقطیرکننده یا دیگ/ کوره تقطیر است. این عبارت به دستگاه یا سیستمی اشاره دارد که برای گرم کردن مواد معدنی یا فلزات در یک محیط بسته و کنترل شده استفاده می‌شود.

Zn–Pb deposits of Iran: Geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, 54(14), 1649–1672. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659110>.

Rajabi, A., Rastad, E., & 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), 197–216. <https://doi.org/10.1080/08120099.2012.754792>.

Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P., & Canet, C. (2012a). Geology, ore facies, and sulphur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam Block, Central Iran. *International Geology Review*, 54(14), 1635–1648. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659106>.

Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E., & Alfonso, P. (2015). Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn–Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan–Chahmir Basin, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 64, 328–353. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.019>.

Rajabi, A., Rastad, E., & Canet, C. (2015a). The early Cambrian Chahmir shale-hosted Zn–Pb deposit, Central Iran: An example of vent-proximal SEDEX mineralization. *Mineralium Deposita*, 50(5), 571–594. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0556-x>.

Thornton, C. P. (2007). Of brass and bronze in prehistoric Southwest Asia. In *Metals and mines: Studies in archaeometallurgy* (pp. 123–135). Archetype Publications.

Thornton, C. P., & Tuttle, O. F. (1960). Chemistry of igneous rocks—Part 1: Differentiation index. *American Journal of Science*, 258(9), 664–684. <https://doi.org/10.2475/ajs.258.9.664>

Zhou, W. (2012). Distilling zinc in China: The technology of large-scale zinc production in Chongqing during the Ming and Qing Dynasties (AD 1368–1911) [Doctoral dissertation, University

College London]. UCL Discovery.

Ibn Sina. (1991). *The Canon of Medicine*. Tehran: Soroush.

[ابن سینا. (۱۳۷۰). *قانون در طب*. تهران: سروش.]

Al-Khair, S. A. (1983). *Nozhatnameh-ye Ala'i* (Edited by F. Jahanpour). Tehran: Institute for Cultural Studies and Research.

[الخیر، ش. (۱۳۶۲). *نزهتنامه علایی* (تصحیح فرهنگ جهانپور). تهران: مطالعات و تحقیقات فرهنگی.]

Aqili Khorasani. (1992). *Makhzan al-Adviyeh*. Tehran: Islamic Revolution Education

Publishing.

[عقیلی خراسانی (۱۳۷۱). *مخزن الادویه*. تهران: انتشارات آموزش انقلاب اسلامی.]

Qazvini, Z. M. (1987). *Athar al-Bilad wa Akhbar al-Ibad* (Translated by A. Sharafkandi). Tehran: Young Thought Scientific Institute.

[قزوینی، زکریا بن محمد. (۱۳۶۶). *آثار البلاد و اخبار العباد* (ترجمه عبدالرحمن شرفکندی). تهران: موسسه علمی اندیشه جوان.]

Kashani, A. (1974). *Arayis al-Jawahir wa Nafayis al-Atayib* (Edited by I. Afshar). Tehran: National Heritage Association Publications.

[کاشانی، ا. (۱۳۵۳). *عرایس الجواهر و نفایس الاطایب* (به کوشش ایرج افشار). تهران: انتشارات انجمن آثار ملی.]

Kamali, A. A. (2022). Mining and ancient metalworking studies in cultural heritage: Recognizing values and the necessity of preservation. *Knowledge of Conservation and Restoration*, 5(1), 81–89.

[کمالی، امین‌اله. (۱۴۰۱). *مطالعات معدن‌کاوی و فلزکاری کهن در میراث فرهنگی: شناخت ارزش‌ها و ضرورت حفاظت*. دانش حفاظت و مرمت، ۵(۱) ۸۱–۸۹.]

Mustawfi, H. (1983). *Nuzhat al-Qulub*. Tehran: Tahuri Library.

[مستوفی، حمدالله. (۱۳۶۲). *نزهةالقلوب*. تهران: کتابخانه طهوری.]