

بررسی بقایای ذوب فلز در محوطه باستانی دهانه لشکر (رباط پشت بادام) با تأکید بر مطالعات پتروگرافی و شیمی سرباره‌ها

امین الله کمالی^۱^۱. گروه باستان‌سنجی و علوم طبیعی پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.<http://dx.doi.org/10.61882/kcr.8.1.33>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

چکیده

استان یزد به دلیل داشتن منابع معدنی متنوع و سابقه طولانی فعالیت‌های متالورژیکی از دوران پیش‌تاریخ تا معاصر، یکی از مراکز اصلی فلزکاری کهن در فلات مرکزی ایران محسوب می‌شود. محوطه ذوب فلز دهانه لشکر واقع در نزدیکی روستای رباط پشت‌بادام در جریان مطالعات زمین‌شناسی منطقه شناسایی شد و برای نخستین بار مورد مطالعه قرار گرفت. از این محوطه با مساحت ۱۴۰ مترمربع، ۱۰ نمونه سرباره جمع‌آوری شد که ۴ نمونه تحت مطالعات پتروگرافی و ۴ نمونه تحت آنالیزهای شیمیایی به روش ICP-OES قرار گرفتند. نمونه‌های مورد بررسی ویژگی‌های ماکروسکوپی مشخصی شامل رنگ سبز تیره تا سیاه، مورفولوژی نامنظم، بافت متخلخل تا متراکم و ابعاد ۲-۷ سانتی‌متر داشتند. مطالعات پتروگرافی نشان داد که سرباره‌ها عمدتاً از کانی‌های فایالیت (Fe_2SiO_4)، پیروکسن و فازهای شیشه‌ای تشکیل شده‌اند و دارای بافت‌های اسپینی‌فکس و پورفیری هستند که حاکی از نرخ سرمایش سریع و تبلور ناقص مذاب است. همچنین بررسی مقاطع صیقلی حضور فازهای سولفیدی مس شامل بورنیت (Cu_5FeS_4)، کوولیت (CuS) و مس نیتیو (Cu) را در این سرباره‌ها نشان می‌دهد. نتایج آنالیزهای شیمیایی نشان داد که میانگین غلظت مس ۱/۹۶ درصد وزنی و روی ۰/۸۸ درصد وزنی است که بیانگر استفاده از کانسارهای پلی‌متال Cu-Pb-Zn به‌عنوان مواد خام اولیه است. میانگین اکسید کلسیم (CaO) ۲۴ درصد، نشان‌دهنده استفاده از سنگ‌های کربناته (احتمالاً آهک و دولومیت) به‌عنوان فلاکس برای تنظیم گرانروی و کاهش دمای ذوب است. ترکیب شیمیایی سرباره‌ها دمای ذوب متوسط ۱۱۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که با استفاده از فلاکس‌های سیلیسی و کربناته برای بهبود جداسازی فلز سازگار است. مطالعه حاضر بر اساس نتایج مطالعات پتروگرافی و شیمیایی سرباره‌ها، شواهدی از چرخه صنعت فلزکاری کهن در این محوطه ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: کوره ذوب فلز، مس، رباط پشت‌بادام، متالورژی، شیمی سرباره‌ها.



فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

شاپا چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸
شاپا الکترونیکی: ۳۰۶۰-۶۲۱۷

سال هشتم، شماره اول
شماره پیاپی ۲۳، بهار ۱۴۰۴
صفحات: ۳۳-۴۵

<https://kcr.richt.ir>

نویسنده مسئول: امین الله کمالی

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

رایانامه:
a.kamali@richt.ir



مقدمه

فلات مرکزی ایران نیز سرشار از ذخایر فلزی است (Roustaei, 2004). بر اساس شواهد و یافته‌های باستان‌شناسی، فلات ایران به دلیل غنای مواد اولیه، از خاستگاه‌های مهم متالورژی در جنوب غربی آسیا محسوب می‌گردد (Pigott, 2004: 28). مس احتمالاً اولین فلزی است که برای ساخت ابزارها و مصنوعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. اولین کاربرد مس برای استفاده به‌عنوان ابزار اولیه به حدود ۱۰ هزار سال پیش در خاور نزدیک و به‌ویژه فلات ایران بازمی‌گردد (Oudbashi et al., 2012).

کشاورزان ساکن روستاها در دوره نوسنگی غرب ایران — حدود ۴۰۰۰-۸۵۰۰ قبل از میلاد — مس خالص را به‌عنوان ماده‌ای متمایز شناختند و ابتدا آن را برای اهداف تزئینی جمع‌آوری کردند (Pigott, 2004: 28). نخستین و معروف‌ترین شواهد استفاده از مس برای ساخت یک اثر هنری در ایران مربوط به یک قطعه مهره مسی خالص است که در محوطه نوسنگی علی کش در جنوب غربی ایران و در دشت دهلران یافت شده است (Pigott, 2004: 28) و اخیراً به اواخر هزاره هشتم/اوایل هزاره هفتم قبل از میلاد تاریخ‌گذاری شده است (Thornton, 2009; Hole, 2000).

با ظهور دوره مس‌سنگی در هزاره پنجم قبل از میلاد، کشاورزان به نوعی بر هنر ذوب مس از سنگ معدن آن تسلط یافتند (Pigott, 2004: 28). مرحله گذار از ذوب و استفاده از مس خالص به ذوب سنگ‌های معدن مس در هزاره پنجم قبل از میلاد انجام شد (Thornton et al., 2002). مواد معدنی حاوی Cu و As در مس خالص بسیار مهم هستند و این امر باعث تولید مس آرسنیک (آلیاژ تصادفی) شد (Oudbashi et al., 2012). بنابراین آرسنیک در اولین مصنوعات مسی ذوب‌شده و حتی در اشیاء مسی خالص به‌عنوان عنصر آلیاژی یا ناخالصی تصادفی یافت شده است (Thornton, 2009). آلیاژ آرسنیک - مس عمدی، مرحله مهمی در گذار از مس ریخته‌گری شده به استفاده از آلیاژ قلع - مس بوده است. اولین تلاش برای ساخت یک آلیاژ ممکن است تولید آلیاژ مس - آرسنیک یا مس آرسنیک در دوران پیش از تاریخ باشد (Thornton et al., 2002: 1452). آلیاژهای مس آرسنیک در هزاره پنجم قبل از میلاد در فلات ایران استفاده می‌شدند و رایج‌ترین آلیاژ تا عصر آهن بودند (Thornton et al., 2002: 1452).

بررسی‌های متالورژیکی یافته‌های عصر آهن از تپه یحیی (Thornton et al., 2002)، گودین تپه (Frame, 2010)، دیلمان و مارلیک (Pigott, 1999: 91) نشان داده است که مس آرسنیک همچنان در این دوره تولید می‌شد. دشت قزوین در بخش شمال غربی فلات مرکزی ایران به دلیل یافته‌های متالورژیکی پیش از تاریخی خود حائز اهمیت فراوان است؛ از جمله اشیاء فلزی، قالب‌ها، بوت‌ها و کارگاه‌های متالورژیکی مکشوفه از تپه قبرستان (اواخر مس‌سنگی، یا هزاره چهارم قبل از میلاد) نشان می‌دهد که این منطقه یکی از اولین مناطق ذوب مس در فلات ایران، و به تبع آن، در کل جنوب غربی آسیا بوده است (Pigott, 1999: 77; Pigott 2004: 312; Thornton, 2009: 37).

مجموعه ابزارهای فلزی از سگزآباد یکی از مهم‌ترین نمونه‌ها برای مطالعات باستان‌متالورژیکی عصر آهن در فلات ایران را تشکیل می‌دهد (Mortazavi et al., 2011). برخی از شواهد مربوط به یافته‌های اولیه مس در تپه زاغه (شمال مرکز ایران) و چغا سفید (غرب ایران) مشاهده شده است (Mortazavi et al., 2011). تجزیه و تحلیل این مصنوعات فلزی نشان داده است که همه آن‌ها از مس خالص با استفاده از عملیات حرارتی (آنیل کردن) روی فلز بین مراحل تغییر شکل مختلف به منظور جلوگیری از سخت شدن کار ساخته شده‌اند (Pernicka, 2004). یکی دیگر از محوطه‌های مهم در ذوب گسترده مس، محوطه تاریخی اریسمان نزدیکی کاشان در مرکز ایران است که در اواخر هزاره پنجم تا اوایل هزاره سوم قبل از میلاد رونق داشته است (Pernicka, 2004; Chegini, 2004; et al., 2004).

ایران طی هزاران سال در زمینه اکتشاف مواد معدنی و توسعه فنون معدنکاری نقشی پیشگامانه داشته است. تنوع ذخایر معدنی، نبود پوشش گیاهی متراکم، پیشینه طولانی تمدنی، موقعیت جغرافیایی مرکزی و تعامل میان اقوام و فرهنگ‌های گوناگون، همگی به رونق چشمگیر فعالیت‌های معدنی و کاربرد گسترده مواد معدنی در تمامی دوره‌های تاریخی ایران باستان انجامیده‌اند. تاکنون صدها معدن باستانی، شامل معادن طلا، مس، آهن، سرب، روی و نقره - و نیز ده‌ها کارگاه معدنی، ابزارآلات معدنکاری و ذوب فلزات، و محوطه‌های اسکان معدنکاران، که برخی از آن‌ها دست‌کم به هزاره چهارم پیش از میلاد بازمی‌گردند، در ایران شناسایی شده‌اند (بیگی هرچگانی و همکاران، ۱۳۹۴). استان یزد از نظر پتانسیل مواد معدنی و تنوع ذخایر، همواره یکی از قطب‌های مهم معدنکاری در ایران بوده است. وجود محوطه‌های متعدد ذوب فلزات در این استان، جایگاهی ویژه در تاریخ معدنکاری کهن ایران برای آن رقم زده است؛ هرچند برخی از این محوطه‌ها در اثر فعالیت‌های معدنکاری مدرن تخریب شده‌اند (مانند ذووه ندوشن). در زمینه مطالعات

محوطه‌های ذوب فلز کهن، از جمله محوطه دهانه لشکر کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین این مقاله به بررسی شواهد و سرباره‌های محوطه ذوب فلز دهانه لشکر بر پایه مطالعات پتروگرافی آزمایشگاهی می‌پردازد.



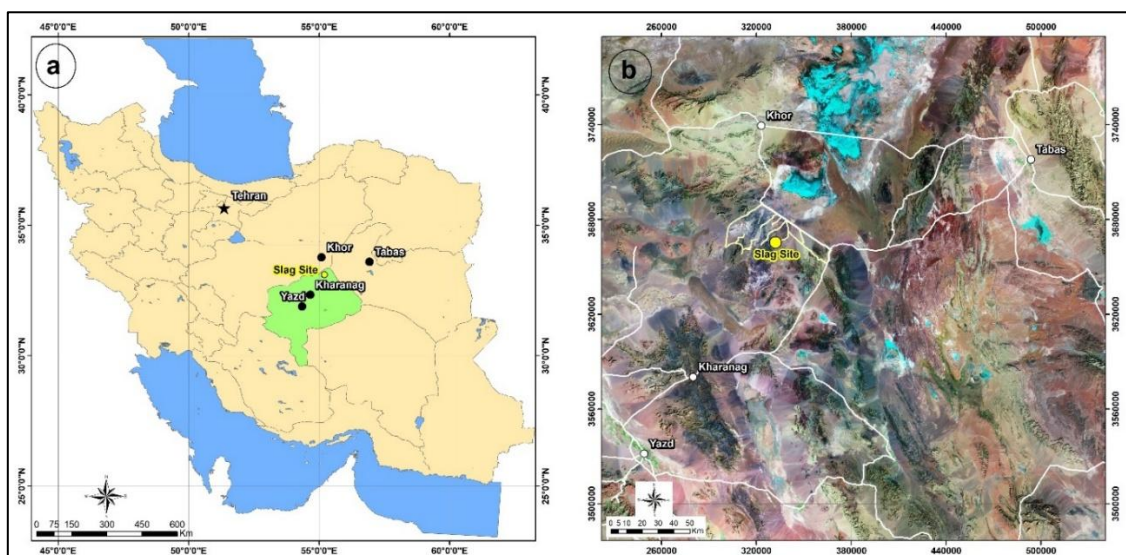
شکل ۱. محوطه‌های پیش از تاریخ و ذخایر مس و قلع در ایران (Vatandoust-Haghighi, 1977; Pigott, 2004)
Figure 1. Prehistoric sites and copper and tin deposits in Iran (Vatandoust-Haghighi, 1977; Pigott, 2004)

۲. موقعیت، دسترسی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محوطه ذوب فلز مورد مطالعه در استان یزد و با مختصات جغرافیایی ۳۳۲۰۵۶٫۹۶ شرقی و ۳۶۶۵۴۳۶٫۴۵ شمالی (زون ۴۰) واقع شده است. این محوطه در ۲۲۰ کیلومتری شمال شرقی یزد، در بخش جنوبی روستای بیاضه و باختر روستای حاجی‌آباد زرین قرار دارد. دسترسی به محوطه ذوب فلز به دهانه لشکر از طریق جاده آسفالتی یزد - اردکان - روستای زرین - روستای حاجی‌آباد زرین و سپس طی ۳۰ کیلومتر مسیر خاکی امکان‌پذیر است. موقعیت این محدوده بر روی تصویر ماهواره‌ای در (شکل ۲) نمایش داده شده است. به‌طور کلی ریخت‌شناسی ایران مرکزی عمدتاً شامل رشته‌کوه‌های نسبتاً موازی و دشت‌های میان کوهستانی است و منطقه مورد مطالعه، اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی تابستان‌های گرم (گاهی بالای ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و زمستان‌های سرد دارد. بارش سالانه کمتر از ۷۰ میلی‌متر بوده و اکثر آبراهه‌ها فصلی هستند.

محوطه مورد مطالعه در پهنه رسوبی - ساختاری بلوک یزد قرار دارد. واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه شامل سازندهای جمال و شمشک به‌عنوان قدیمی‌ترین واحدها با سن پرمین تا تریاس - ژوراسیک است. سازند جمال از آهک‌های دگرگون‌شده و دولومیت تشکیل شده و سازند شمشک شامل شیل ماسه‌ای، آهک طوسی، سیلت‌استون سبز، اسلیت و کوارتز آرنایت است. سازند بیابانک (کرتاسه) متشکل از شیل خاکستری، اسلیت مارنی، آهک ماسه‌ای و ماسه‌سنگ است. سازند نقره (نئوکومین کرتاسه) از آهک ضخیم‌لایه خاکستری، کنگلومرا و ماسه‌سنگ تبلور مجدد یافته تشکیل شده است. سایر واحدها شامل سازند چاه پلنگ (ژوراسیک - کرتاسه) و سازندهای میوسن و پلیوسن هستند. از پتانسیل‌های معدنی منطقه می‌توان به کانی‌سازی غیرفلزی (کوارتز اپی‌ترمال) و

لایه‌های زغال‌سنگ اشاره کرد. کانسار انارک II در گوشه جنوب‌شرقی منطقه واقع شده که بخش شمالی کانسار انارک را نشان می‌دهد. کانی‌سازی سولفید مس و مگنتیت آهن به مرزهای تماسی بین مرم‌های کمپلکس پشت‌بادام و توده نفوذی ائوسن محدود می‌شود. کانسار سرب بندگل II و رخداد معدنی بندگل I که در غرب بیاضه قرار دارند، به مناطق خردشده در سنگ‌آهک سازند بیابانک محدود هستند (آیستو و میلنکو، ۱۳۷۵).

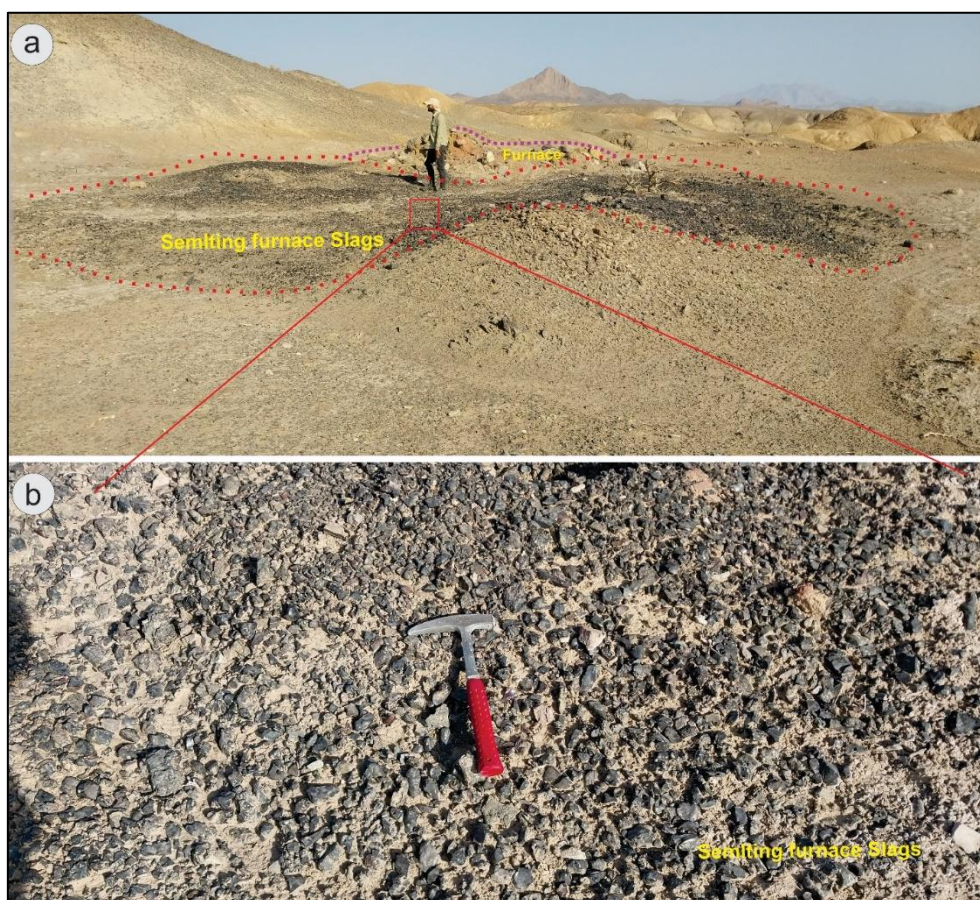


شکل ۲. موقعیت محوطه ذوب فلز دهانه لشکر. (a) نقشه ایران و موقعیت محوطه ذوب فلز دهانه لشکر در استان یزد. (b) تصویر ماهواره‌ای منطقه و راه‌های دسترسی به محوطه باستانی ذوب فلز

Figure 2. Location of the Dehneh Lashkar metal smelting site. (a) Map of Iran showing the position of the Dehneh Lashkar smelting site in Yazd Province. (b) Satellite image of the region highlighting access routes to this ancient metal smelting site

۳. معرفی و ویژگی‌های محوطه ذوب فلز

محوطه ذوب فلز دهانه لشکر در مختصات جغرافیایی (۳۳۲۰۵۶،۹۶ شرقی و ۳۶۶۵۴۳۶،۴۵ شمالی) واقع شده است. این محوطه دارای طول ۱۵ متر، عرض ۸ متر و مساحت ۱۲۰ مترمربع است. کوره ذوب فلز در حاشیه یک آبراهه بزرگ قرار دارد و توپوگرافی اطراف آن ملایم و تپه‌ماهوری است (شکل ۳). بخشی از ساختمان کوره همچنان باقی‌مانده و قابل مشاهده است. در این محوطه، علاوه بر سرباره‌های حاصل از ذوب مس، قطعاتی از سنگ خام معدنی مس نیز مشاهده می‌شود. قطعات ماسه‌سنگ کوارتزی حاوی مس در محوطه ذوب فلز مشاهده شد که احتمالاً این سنگ‌ها به‌عنوان سنگ خام حاوی کانی‌های مسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ماسه‌سنگ‌های کوارتزی، به دلیل محتوای بالای سیلیس، علاوه بر تأمین مس، احتمالاً به‌عنوان فلاکس (کمک‌ذوب) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. منبع سوخت این کوره از بوته‌های گون و سایر پوشش‌های گیاهی موجود در نزدیکی کوره تأمین شده است. به نظر می‌رسد سنگ‌های کانسنگ خام حاوی کانه‌های مس که برای ذوب در این کوره استفاده شده‌اند، از نوع کانه‌های سولفیدی بوده‌اند. برای تاریخ‌گذاری این محوطه ذوب، هیچ‌گونه آثار سفالی شاخص در محوطه یافت نشد و با توجه به محدودیت نمونه‌های قابل سال‌یابی، امکان تعیین سن دقیق برای فعالیت این کوره ذوب فلز وجود ندارد.



شکل ۳. نمایی از گستره و بقایای آشکار و سطحی محوطه ذوب فلز دهانه لشکر

Figure 3. Overview of the extent and visible surface remains of the Dehneh Lashkar metal smelting site

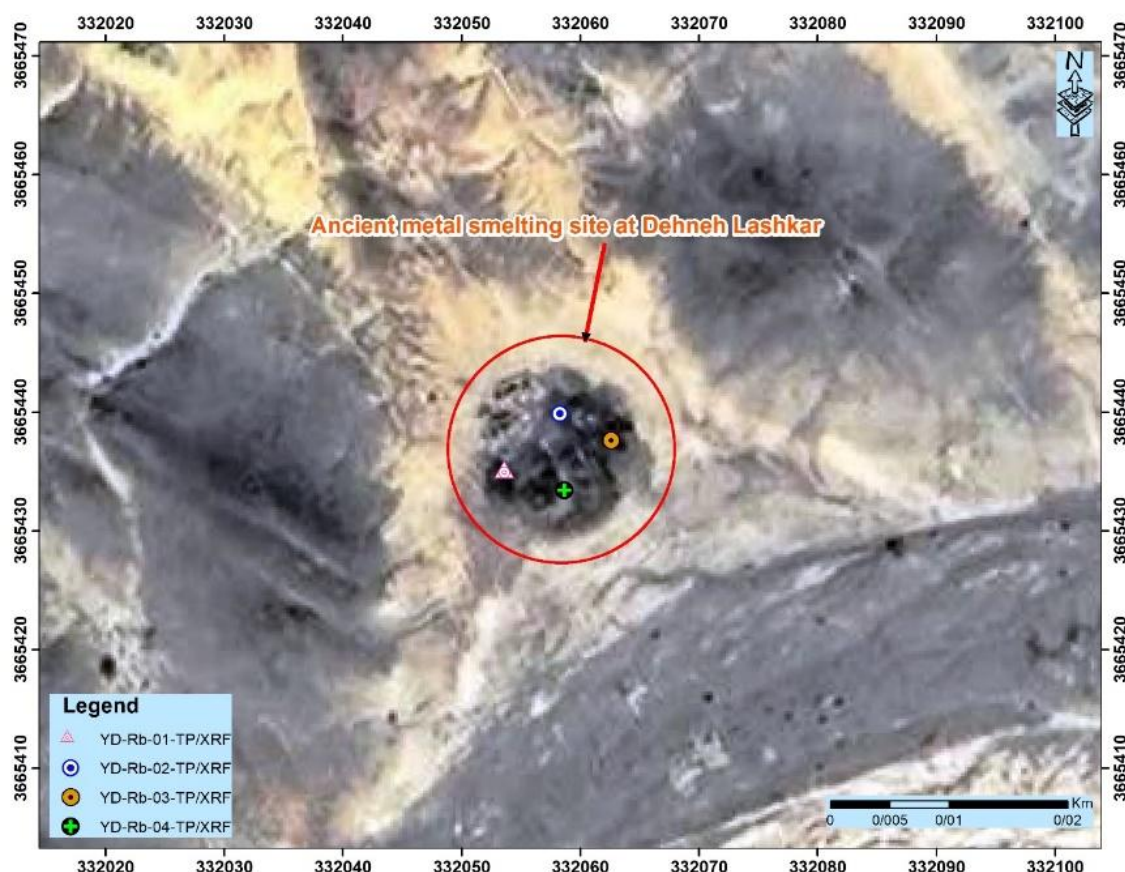
۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. نمونه‌برداری از سرباره‌های ذوب فلز

نمونه‌برداری (در انواع روش‌های شناخته‌شده) از آثار و بقایای تاریخی فرهنگی اقدامی کارا و مؤثر است که امکان به سرانجام رساندن پژوهش‌ها علمی را فراهم می‌سازد و به پژوهشگران این فرصت را می‌دهد تا فرضیات و گزاره‌های علمی خود را مورد ارزیابی و آزمون قرار دهند و از نتایج آن برای بهبود حفاظت از میراث تاریخی بهره ببرند. رویکرد پژوهشی علمی و کمی کارآمد در زمینه‌ی تحقیقات علوم میراث فرهنگی دهه‌های اخیر ایران، به دلیل میان‌رشته‌ای بودن و کثرت موضوعات و توسعه و پیشرفت‌های حاصل در علوم مختلف، به سمت استفاده از دانش مستقر در رشته‌های فنی و مهندسی مختلف ذیل گرایش‌های باستان‌سنجی، حرکت می‌کند (رازانی و اقوی، ۱۴۰۳). تحلیل‌های باستان‌سنجی مواد فرهنگی و باستان‌شناختی عمدتاً وابستگی زیادی به: نمونه‌برداری، انتخاب فنون و روش‌های آزمایشگاهی، زمان و هزینه‌های تحلیل‌های آزمایشگاهی و پردازش و تفسیر داده‌ها دارند (Artioli, 2010: 15). بدون نمونه‌برداری دقیق، داده‌های باستان‌سنجی ارزش علمی کمی خواهند داشت. نمونه‌برداری صحیح، به اندازه دقت ابزارها اهمیت دارد و این موضوع برای تمام مواد فرهنگی و باستان‌شناسی (اعم از معدنی و آلی) صدق می‌کند (Shackley, 1998).

در این پژوهش، با توجه به وسعت محوطه ذوب فلز باستانی دهانه لشکر (رباط پشت بادام)، گام نخست نمونه‌برداری با هدف انتخاب نمونه‌های معرف از طریق پیمایش سطحی و تعیین محدوده جغرافیایی محوطه انجام شد. پیمایش سطحی، به‌عنوان روشی استاندارد برای شناسایی بقایای متالورژیکی در محوطه‌های ذوب، به‌کار گرفته شد تا پوشش جامع و سیستماتیک از سرباره‌های موجود در محوطه فراهم آید. بر این اساس، محدوده‌ای با مساحت تقریبی ۴۰۰ متر مربع (۲۰ × ۲۰ متر) انتخاب شد که به دلیل تراکم بالا و تنوع قابل‌توجه سرباره‌های ذوب مس، به‌عنوان بخش نماینده فعالیت‌های متالورژیکی محوطه شناسایی گردید. سپس، ۱۰ نمونه دستی با ویژگی‌های ماکروسکوپی متمایز، شامل رنگ (سبز تیره تا سیاه)، مورفولوژی (نامنظم با سطوح گداخته)، بافت

(متخلخل تا متراکم)، و اندازه (۲ تا ۱۷ سانتی‌متر)، که کمترین میزان هوازدگی و فرسایش را نشان می‌دادند، جمع‌آوری شدند (شکل ۴). هدف از این انتخاب، انعکاس تنوع شیمیایی و فیزیکی سرباره‌ها برای انجام مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی بود. در نهایت، نمونه‌ها با دقت کدگذاری و موقعیت‌یابی جغرافیایی شدند و برای آنالیزهای آزمایشگاهی به مرکز مربوطه ارسال گردیدند.



شکل ۴. موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده از محوطه ذوب فلز دهانه لشکر در تصویر ماهواره‌ای

Figure 4. Locations of samples collected from the Dehneh Lashkar metal smelting site on a satellite image

۲-۴. روش‌شناسی و تجهیزات آزمایشگاهی

۱-۲-۴. مطالعات پتروگرافی

هدف از مطالعات پتروگرافی، شناسایی ساختار میکروسکوپی سرباره‌ها و بقایای ذوب فلز، تعیین کانی‌های تشکیل‌دهنده و کانه‌های استخراجی در محوطه دهانه لشکر است. این بررسی‌ها به درک بهتری از منشأ احتمالی مواد اولیه کمک می‌کند. برای این منظور، پس از نمونه‌برداری، چهار نمونه برای تهیه مقاطع نازک و صیقلی انتخاب شد. مقاطع نازک با ضخامت استاندارد ۰/۰۳ میلی‌متر (۳۰ میکرومتر) در کارگاه سنگ‌بری پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی تهیه شدند. این مقاطع با استفاده از میکروسکوپ پولاریزان مدل Canada Smart Tech مورد بررسی قرار گرفتند تا ترکیب کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی سرباره‌ها تعیین شود.

۲-۲-۴. آنالیز طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES)

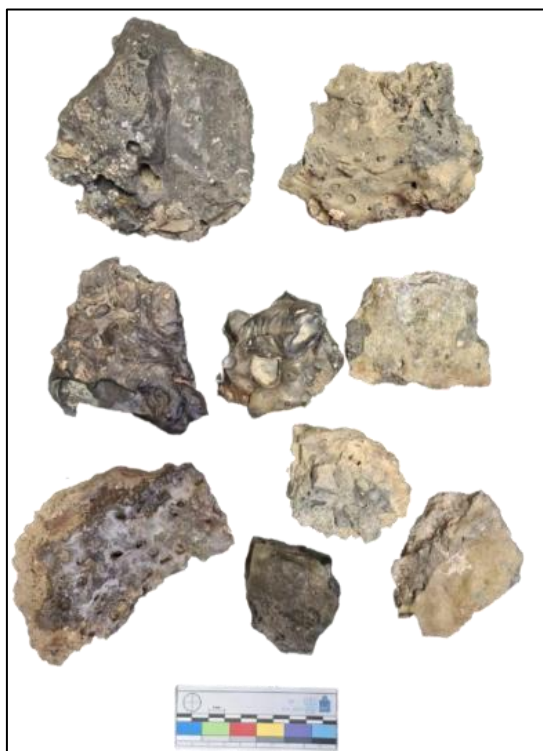
پس از انتخاب نمونه‌های مناسب برای مطالعات پتروگرافی، چهار نمونه از سرباره‌ها برای انجام آنالیز عنصری به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) به آزمایشگاه شرکت زرکاوان ارسال شد تا غلظت عناصر موجود در این نمونه‌ها مورد تحلیل قرار گیرد. این روش، به دلیل دقت بالا و توانایی شناسایی هم‌زمان چندین عنصر، امکان اندازه‌گیری دقیق غلظت عناصر را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که در آنالیز ICP-OES، داده‌های عناصر اصلی به‌صورت مقادیر عنصری گزارش می‌شوند.

به‌منظور تحلیل بهتر و مقایسه با داده‌های استاندارد، این مقادیر به شکل اکسیدهای مربوطه تبدیل شدند. این تبدیل بر اساس فرمول‌های استوکیومتری استاندارد (مانند Si به SiO_2 یا Fe به Fe_2O_3) انجام گرفت تا نتایج با مطالعات مشابه قابل مقایسه باشد. شایان ذکر است که مقدار اکسید سیلیس (SiO_2) در این مطالعه صرفاً به‌صورت تخمینی محاسبه شده است، زیرا تعیین دقیق آن نیازمند استفاده از روش‌های تکمیلی مانند فلورسانس اشعه ایکس (XRF) است.

۵. پتروگرافی

۵-۱. ماکروسکوپی

سرباره‌های محوطه دهانه لشکر در نمونه‌های دستی طیف رنگی متنوعی از سبز تیره تا سیاه و قهوه‌ای را نشان می‌دهند. رنگ سبز تیره به حضور اکسید مس (CuO) و رنگ‌های سیاه و قهوه‌ای به غلبه اکسید آهن (FeO) یا فازهای شیشه‌ای غنی از آهن نسبت داده می‌شود. از نظر مورفولوژی سطحی، این سرباره‌ها عمدتاً حالت نامنظم و چین‌خورده داشته و دارای لبه‌های تیز هستند (شکل ۵). این سرباره‌ها بافت متخلخل تا متراکم و چگالی نسبتاً بالایی دارند. اندازه نمونه‌های این سرباره‌ها بین ۲ تا ۷ سانتی‌متر متغیر است.



شکل ۵. نمونه‌های دستی سرباره‌های ذوب مس از محوطه باستانی دهانه لشکر، با رنگ سبز تیره تا سیاه و بافت متخلخل.
Figure 5. Hand-sampled copper smelting slags from the ancient Dehneh Lashkar site, exhibiting dark green to black colors and porous textures.

۵-۲. میکروسکوپی

سرباره‌های مورد مطالعه عمدتاً از کانی‌های فایالیت (از گروه اولیوین) و پیروکسن تشکیل شده‌اند. فایالیت با بافت سوزنی و کشیده، که به‌عنوان بافت اسپینیفکس شناخته می‌شود، در ساختار سرباره مشاهده می‌گردد و فضاهای بین بلورهای سوزنی‌شکل آن توسط پیروکسن پر شده است (شکل ۶ a و b). این ویژگی‌های بافتی نشان‌دهنده نرخ سرمایش سریع مذاب و شرایط متالورژیکی خاص طی روند تولید سرباره است. علاوه بر این، برخی نمونه‌ها دارای بافت پورفیری هستند که بیانگر تفاوت در نرخ سرمایش و مراحل مختلف تبلور است. در بخش‌هایی از سرباره، به دلیل دمای بالا و انجماد سریع، فاز شیشه‌ای غالب است که تبلور ناقص را نشان می‌دهد (شکل ۶ c). مشاهدات پتروگرافی استفاده از کوارتز و ماسه‌سنگ (کوارتزیت) به‌عنوان فلاکس را تأیید می‌کند، به‌طوری که

بلورهای پیروکسن و قطعات کوارتزیت در ماتریسی کاملاً شیشه‌ای احاطه شده‌اند (شکل ۶b). بررسی مقاطع صیقلی حضور فازهای سولفیدی مس شامل بورنیت، کوولیت و مس خالص را همراه با وزیکول‌ها نشان می‌دهد که احتمالاً نتیجه احیای ناقص یا بقایای فلزی از شیوه استخراج هستند (شکل ۶a و b). نمونه‌های برداشت‌شده از دیواره کوره ذوب فلز بافتی متخلخل دارند و حاوی ادخال‌های فراوان، به‌ویژه کانی کوارتز (حدود ۱۰ درصد حجم نمونه)، هستند. همچنین، قطعات ماسه‌سنگ به‌عنوان آمیزه در دیواره کوره به‌کاررفته‌اند و در برخی قسمت‌ها، به دلیل دمای بالا، خمیره به فاز شیشه‌ای تبدیل شده است (شکل ۶g و h).

۶. شیمی سرباره‌ها

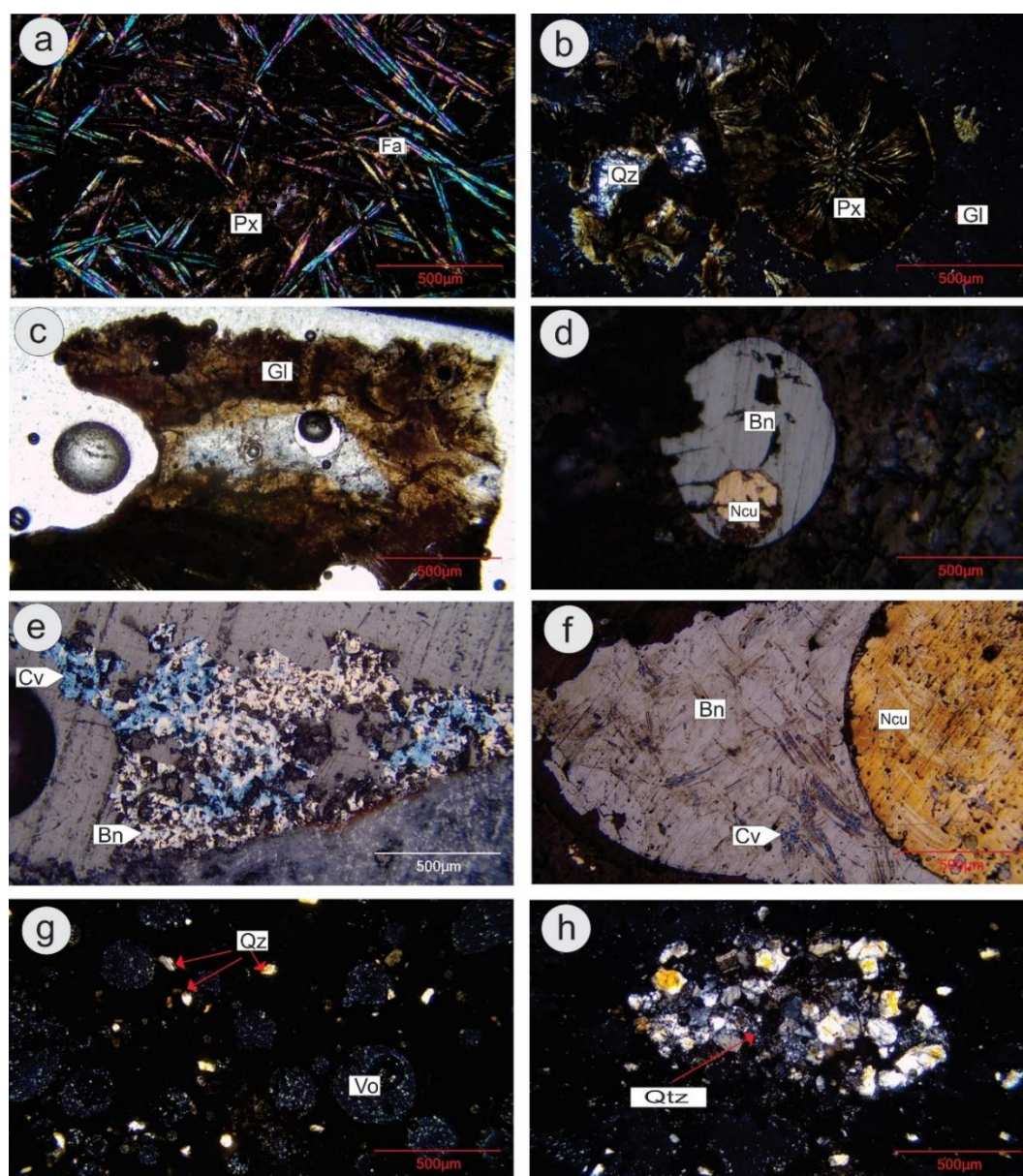
با توجه به نتایج آنالیزهای انجام شده از سرباره‌ها (جدول ۱)، بیشترین مقادیر SiO_2 با بیشترین مقادیر Cu ، Pb ، Zn و S همراه بوده است. با توجه به وجود سنگ‌های کوارتزی با کانه‌های مس‌دار در این کوره می‌توان گفت که سنگ اولیه مس‌دار با غنای بالایی سیلیس (کوارتزیت مس‌دار) خوراک اولیه کوره بوده است. در این سنگ اولیه در کنار کانه‌های مس، مقادیری Pb و Zn نیز وجود داشته و سنگ اولیه دارای کانی‌های سولفور مس‌دار نیز بوده است. در واقع می‌توان گفت نمونه (۴) ناشی از اولین مراحل ذوب در کوره بوده است. وجود مقادیر بالای SiO_2 در نمونه اولیه و خوراک کوره، نیاز به افزودن کمک ذوب کوارتز را منتفی کرده است. در واقع خوراک اولیه کوره یک سنگ پلی‌متال $\text{Cu}+\text{Pb}+\text{Zn}$ بوده است. وجود بالاترین مقادیر W در این نمونه‌ها تأییدی بر چندفلزی بودن خوراک اولیه بوده است.

از نظر مقادیر عنصری آلومینیوم در نمونه‌های آنالیز شده، بیشترین مقادیر Al_2O_3 موجود در نمونه‌ها با بیشترین مقادیر Th ، Zr ، Na ، K ، Cr ، La ، Li ، Ni همراه بوده است. این مقادیر می‌تواند نشان‌دهنده وجود متشکله فلدسپات سدیم-پتاسیم‌دار به‌عنوان کمک ذوب بوده باشد. اما با توجه به اینکه در نمونه (۲) با بیشترین مقادیر Al_2O_3 ، کمترین مقادیر Cu ، S ، Pb ، Sb ، W ، Ba ، Ag ، As ، Zn همراهی دارد، این آنالیز شیمیایی نمی‌تواند با یک متشکله فلدسپات سدیم-پتاسیم‌دار هماهنگ باشد و چون در آن مقادیر W کمترین است، می‌تواند شاخصی از استفاده از خاک‌های رسی در فرایند ذوب یا درون کوره باشد. این ترکیبات رسی در دیواره‌های کوره‌ها و در طی فرایند ذوب به‌عنوان کمک ذوب به‌کار گرفته می‌شدند.

با توجه به نتایج آنالیزهای به‌دست آمده در نمونه‌های (۱) و (۳)، بیشترین مقادیر کلسیم با بیشترین مقادیر عناصر Sr و Ba همراهی دارد. وجود مقادیری Sr و Ba در نمونه‌های سنگ‌های آهکی و کربناته در سنگ‌های رسوبی امری عادی است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که کربنات کلسیم نیز یکی از متشکله‌های اصلی کوره و فرایند ذوب بوده است. این مسئله با وجود قطعات رگه‌های کربنات کلسیم سفیدرنگ در اطراف کوره نیز تأیید می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه کمترین مقادیر K_2O و Na_2O در نمونه‌ها با بیشترین مقادیر Sr و Ba همراه بوده، می‌توان گفت که نمونه‌های با مقادیر بالای Sr و Ba در نتایج آنالیزها معرف سبک‌ترین بخش مذاب موجود در کوره بوده که در فوقانی‌ترین بخش کوره تجمع داشته است. در نمونه‌های دستی نیز تفاوت چگالی محسوس نمونه‌ها مشخص است. این نکته تأییدی بر وجود متشکله‌های کربنات کلسیم در طی فرایند ذوب و قرارگیری آن‌ها در فوقانی‌ترین قسمت‌های کوره در حین فرایند ذوب است.

در نمونه‌های ذوب‌شده با توجه به اینکه کمترین مقادیر W با بیشترین مقادیر Al ، Ni ، Li ، Cr ، Co ، Ti در Al_2O_3 و K_2O ، Na_2O دیده می‌شود، می‌توان گفت تنگستن در بخش‌های زیرین کوره تجمع می‌کند. در واقع در طی فرایند ذوب سنگ اولیه، برخی عناصر به قسمت پایینی کوره منتقل شده و برخی عناصر به قسمت‌های فوقانی کوره منتقل می‌شوند. وجود بیشترین مقادیر Ni ، Li ، Al ، Cr ، Co ، Ti ، Na ، K همراه با کمترین مقادیر W ، کمترین مقادیر Pb ، Cu و Zn شاخصی از فرایند ذوب است که در طی آن عناصر W - Cu - Zn - Pb به بخش‌های پایینی کوره منتقل شده‌اند.

با توجه به نتایج آنالیزهای نمونه‌های کوره ذوب در این مطالعه میانگین اکسید کلسیم ۲۴ درصد اندازه‌گیری شد که بیانگر استفاده از سنگ‌های کربناته (آهک) برای تنظیم گرانیروی، بهبود جریان‌پذیری مذاب و کاهش دمای ذوب است. میانگین اکسید آهن ۶/۸ درصد است که حاکی از حضور فازهای آهن‌دار (فایالیت) بوده و با نتایج مطالعات پتروگرافی سازگاری دارد. ترکیب شیمیایی سرباره‌ها حاکی از دمای ذوب متوسط (۱۱۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) است که با استفاده از فلاکس‌های سیلیسی و کربناته برای کاهش دمای ذوب و بهبود جداسازی فلز سازگار است.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی سرباره‌های ذوب محوطه ذوب دهانه لشکر. (a) فایالیت و پیروکسن در زمینه شیشه‌ای (XPL); فایالیت به صورت سوزنی شکل با رنگ‌های تداخلی مشخص و پیروکسن به صورت پراکنده دیده می‌شود. (b) کوارتز و پیروکسن در ماتریس شیشه‌ای (XPL). (c) فاز شیشه ای سرباره‌ها مورد مطالعه PPL. (d) کانی بورنیت و مس نیتیو؛ بورنیت به صورت خاکستری روشن. (e) فازهای بورنیت خاکستری و کوولیت آبی تیره (f) بورنیت، مس نیتیو و کوولیت؛ فازهای سولفیدی با درخشش فلزی. (g و h) مقاطع نازک پتروگرافی از دیواره کوره. کوارتز و حفرات خالی و استفاده از ماسه سنگ کوارتزی در دیواره کوره. اختصارات: Fa: فایالیت، Px: پیروکسن، Qtz: کوارتز، Gl: شیشه، Vo: حفرات، Bn: بورنیت، Ncu: مس نیتیو، Cv: کوولیت.

Figure 6. Microscopic images of thin and polished sections of slag from the Dehaneh Lashkar smelting site. (a) Fayalite and pyroxene in glassy groundmass (XPL); fayalite appears as acicular crystals with distinct interference colors, and pyroxene is scattered throughout. (b) Quartz and pyroxene in glassy matrix (XPL). (c) Glassy phase of the studied slags (PPL). (d) Bornite mineral and native copper; bornite appears as light gray. (e) Gray bornite and dark blue covellite phases. (f) Bornite, native copper, and covellite; sulfide phases with metallic luster. (g and h) Thin section petrography of furnace wall; quartz, void spaces, and the use of quartzitic sandstone in the furnace wall are observed. Abbreviations: Fa: fayalite, Px: pyroxene, Qz: quartz, Qtz: quartzite, Gl: glass, Vo: voids, Bn: bornite, Ncu: native copper, Cv: covellite.

غلظت بالای مس (۱/۹۶ درصد) بیانگر این است که هدف اصلی این محوطه، استخراج و ذوب مس بوده است. باقی ماندن درصد بالایی از مس در سرباره‌ها نشان‌دهنده احیای ناقص یا به‌دام‌افتادن ذرات مس در ساختار سرباره است که در فناوری‌های متالورژیکی باستانی رایج بوده است. میانگین گوگرد ۰/۲۳ درصد است که با مشاهدات پتروگرافی (حضور فازهای سولفیدی مانند بورنیت، کولیت و مس خالص) مطابقت دارد و استفاده از سنگ معدن سولفیدی را تأیید می‌کند. از طرفی با توجه به اینکه مقادیر قلع در نمونه‌های آنالیز شده ناچیز بوده، در این کوره ذوب در طی فرایند ذوب، هدف تولید برنز و فلزهای دیگر مس‌دار نبوده و صرفاً شمش‌های مس در این کوره تولید می‌شده‌اند. اینکه اجداد ما چگونه از شمش‌های تولید شده مس‌دار که دارای Zn-Pb نیز بوده‌اند، خلوص مس را افزایش داده و سرب و روی موجود را جدا می‌کرده‌اند یک موضوع پژوهشی جدید می‌تواند باشد، اما نکته اساسی آن است که اجداد ما دانش فناوری و فرآوری چندفلزی را نیز در اختیار داشته‌اند. این دانش و فناوری باستانی خود موضوعی جدید برای پژوهش‌های آینده است.

در محدوده دهانه لشکر، در سازندهای زمین‌شناسی موجود تنها سازند شمشک دارای میان‌لایه‌های کوارتزیتی است. از طرفی با توجه به تشابه زیاد کوارتزیتهای باقی‌مانده در اطراف کوره ذوب که دارای مس می‌باشند با واحدهای کوارتزیتی سازند شمشک، می‌توان گفت که این کوارتزیتهای احتمالاً متعلق به سازند شمشک بوده‌اند. این مسئله با وجود تزریق دایک‌های آندزیتی درون سازندهای شمشک و بیابانک، به‌عنوان منشأ احتمالی مس تقویت می‌گردد. رگه‌زایی‌های فراوان کوارتز در سازندهای شمشک و بیابانک نیز مؤید تأثیر فرایندهای هیدروترمالی در این منطقه است که احتمالاً کانی‌زایی مس در میزبان کوارتزیتی را تسهیل نموده است.

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سرباره‌های ذوب فلز محوطه دهانه لشکر به روش ICP-OES (اکسیدهای اصلی از تبدیل داده‌های عنصری محاسبه شده‌اند)

Table 1. Results of the chemical analysis of slags from the Dehneh Lashkar metal smelting site using ICP-OES (major oxides calculated from elemental data).

SAMPLE	YD-Rb-01-TP/ICP	YD-Rb-02-TP/ICP	YD-Rb-03-TP/ICP	YD-Rb-04-TP/ICP
SiO ₂	45.01	54.23	42.13	62.05
Al ₂ O ₃	6.29	18.96	6.51	6.92
CaO	33.72	8.90	36.49	17.24
Fe ₂ O ₃	2.62	3.08	2.51	3.16
FeO	5.96	3.95	5.93	4.94
K ₂ O	0.67	3.22	0.77	1.06
MgO	2.47	2.44	2.24	1.54
MnO	0.49	0.10	0.44	0.20
Na ₂ O	1.46	3.16	1.51	1.64
TiO ₂	0.35	0.90	0.37	0.57
Ag	2.14	0.99	2.13	2.44
As	64.04	42.93	61.19	100.28
Ba	4523.71	413.30	3449.92	701.20
Cd	1.39	1.34	1.57	0.91
Co	16.46	28.94	16.04	19.89
Cr	67.55	244.90	71.93	113.57
Cu	13958.33	688.34	15260.42	48510.34
La	14.74	34.62	15.85	22.35
Li	19.03	59.08	19.72	21.02
Mo	3.20	3.18	3.70	4.13
Ni	37.21	56.59	34.01	44.29
Pb	745.46	51.12	787.72	1847.13
S	0.19	0.12	0.14	0.46
Sb	23.81	4.87	18.45	17.90
Sn	6.45	13.83	9.37	13.23
Sr	3050.16	1788.37	2721.38	1592.60
Th	8.40	22.43	11.38	10.85
U	1.57	1.66	1.41	2.00
V	216.09	141.71	284.49	143.51
W	63.27	2.00	54.17	224.53
Zn	6651.77	190.51	5680.38	22972.52
Zr	61.03	106.65	64.77	68.40

۷. چالش‌های حفاظت از محوطه

حفاظت از محوطه‌های فلزکاری کهن، با چالش‌های متعددی روبروست. امروزه، با مشخص شدن کاربردهای متنوع برای سرباره‌های باستانی (مانند استفاده به‌عنوان پرکننده و ساینده)، این مواد ارزشمند در محوطه‌های کهن فلزکاری، در معرض خطر تخریب قرار گرفته‌اند. کمبود آگاهی و توجه باستان‌شناسان به فلزکاری کهن، این تهدید را دوچندان کرده است (Nezafati et al., 2017: 4). علاوه بر این، بسیاری از معادن باستانی که در نزدیکی محوطه‌های کهن فلزکاری قرار دارند، به دلیل اکتشافات معدنی مدرن و فعالیت‌های معدنکاری جدید، در معرض تخریب قرار گرفته‌اند (Nezafati et al., 2017: 8). این امر نه تنها شواهد معدنکاری کهن را از بین می‌برد، بلکه بسیاری از محوطه‌های فلزکاری را نیز نابود می‌کند.

مشکلات حفاظتی این مناطق، با دورافتادگی آن‌ها، دسترسی دشوار و کمبود نیروهای یگان حفاظت، پیچیده‌تر می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، عدم وجود مطالعات برنامه‌ریزی شده، منسجم و پیوسته در زمینه محوطه‌های کهن فلزکاری است. بیشتر مطالعات انجام شده، به‌صورت پراکنده و موردی بوده‌اند. بسیاری از این محوطه‌ها، به دلیل دورافتادگی و عدم بررسی‌های روشمند باستان‌شناسی، هنوز شناسایی و ثبت نشده‌اند. از جمله این نواحی، منطقه ندوشن در غرب استان یزد است که با دارا بودن ظرفیت‌های طبیعی و کان سنگ‌هایی همچون مس، سرب، آهن و روی، از دیرباز مرکز فعالیت‌های فلزکاری بوده و محوطه‌های سرباره‌ای متعددی را در خود جای داده است که بسیاری از آن‌ها هنوز شناسایی نشده‌اند. تدوین یک برنامه منسجم در این زمینه، می‌تواند ضمن افزایش دانش ما در این خصوص، جزئیات فراوانی از این میراث ارزشمند را آشکار کرده و زمینه را برای حفاظت از آن فراهم کند.

۸. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پاسخ به پرسش‌های اساسی درباره نوع فلزات استخراج‌شده و شناسایی فرایندهای متالورژیکی بر پایه مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای شیمیایی محوطه ذوب فلز دهانه لشکر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که این کوره عمدتاً برای استخراج مس طراحی شده و حضور روی در سرباره‌ها بیانگر استفاده از کانسارهای پلی‌متال به‌عنوان منبع تأمین مواد خام بوده است. مشاهده سنگ‌های کوارتزی دارای کانه‌زایی مس در محوطه نشان می‌دهد که احتمالاً این نوع سنگ‌ها ماده معدنی خام اصلی مورد استفاده در این کوره بوده‌اند و علاوه بر استخراج مس از آن‌ها، به‌دلیل درصد بالای سیلیس، به‌عنوان فلاکس نیز عمل کرده‌اند. در مطالعات میکروسکوپی این سرباره‌ها، کانی‌فایالیت شناسایی شده که نشان‌دهنده دمای ۱۲۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد این کوره است. در این مطالعات پتروگرافی، کانی‌های کوولیت و بورنیت نیز شناسایی شد که نشان از استفاده از سنگ خام ماده معدنی سولفیدی به‌عنوان خوراک این کوره بوده است، بنابراین این کوره با هدف ذوب و استحصال کانه‌های سولفیدی مس ساخته شده است. این مطالعه علاوه بر مستندسازی علمی محوطه، بر اهمیت حفاظت از میراث مهندسی و فناوری‌های متالورژیکی کهن تأکید دارد، چرا که محوطه ذوب دهانه لشکر نه تنها شاهدهی بر تسلط فنی نیاکان بر فناوری استخراج و ذوب فلزات است، بلکه نمونه‌ای ارزشمند از میراث علمی - فناوریانه کهن کشور به‌شمار می‌رود که در صورت نابودی، جبران‌ناپذیر خواهد بود و حفاظت فوری از آن ضرورتی انکارناپذیر دارد.

سپاسگزاری

از آقای دکتر سید ایرج بهشتی برای تهیه و مطالعه مقاطع پتروگرافی، و از آقایان دکتر حمید فدایی، دکتر مهدی رازانی، دکتر مهری و مهندس لاجینانی برای ارائه نقطه‌نظرات ارزشمند که به بهبود این پژوهش کمک کرد، صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین، از شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید، به‌ویژه جناب آقای مهندس ابراهیم‌زاده (مدیر بخش اکتشاف) و جناب آقای مهندس شکاری (مدیرعامل)، به‌دلیل پشتیبانی لجستیکی و حمایت‌های بی‌وقفه که نقش مؤثری در پیشبرد این پژوهش داشت، سپاسگزارم.

تضاد منافع: در این مقاله تضاد منافع وجود ندارد.

حامیان مادی و معنوی: پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی حامی این پژوهش بوده است.

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

منابع / References

- Beigi Harchagani, T., Hashemi Zarjabad, H., Ghorbani, H. R., & Barani, H. (2015). Archaeometallurgy and ancient mining research in South Khorasan: With emphasis on archaeological surveys and petrographic analyses. In *Proceedings of the Second National Conference on Iranian Archaeology*, Birjand, Iran. <https://civilica.com/doc/540989>[In Persian].
- [یگی هرچگانی، ط، هاشمی زرج‌آباد، ح، قربانی، ح. ر، و بارانی، ح. (۱۳۹۴). پژوهش‌های آرکتومتالورژی و معدنکاری کهن در خراسان جنوبی: با تکیه بر بررسی‌های باستان‌شناسی و آزمایشات پتروگرافی. در مجموعه مقالات دومین همایش ملی باستان‌شناسی ایران. بیرجند، ایران. <https://civilica.com/doc/540989>].
- Aistou, L., & Milenko, B. (1996). Geological map of Bayazeh at a scale of 1:100,000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. [In Persian]
- [آیستو، ل، و میلنکو، ب. (۱۳۷۵). نقشه زمین‌شناسی با مقیاس یکصد هزار بیاضیه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور].
- Bernbeck, R. (2004). Iran in the Neolithic. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour, mining, handicraft and archaeology* (pp. 140–147). Deutsches Bergbau-Museum.
- Chegini, N. N., Helwing, B., Parzinger, H., & Vatandoust, A. (2004). A prehistoric industrial settlement on the Iranian Plateau—Research at Arisman. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour, mining, handicraft and archaeology* (pp. 210–216). Deutsches Bergbau-Museum.
- Frame, L. (2010). Metallurgical investigations at Godin Tepe, Iran, Part I: The metal finds. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), 1700–1715. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.030>
- Hole, F. (1987). *The archaeology of western Iran*. Washington, D.C.
- Hole, F. (2000). New radiocarbon dates for Ali Kosh, Iran. *Neo-lithics*, 1(00), 13.
- Mortazavi, M., Salehi Kakhki, A., Golozar, M. A., & Talai, H. (2011). Preliminary metallurgical investigation of copper-based artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC). *Iranian Journal of Archaeological Studies*, 1(2), 49–59. <https://doi.org/10.22111/ijas.2011.468>
- Nezafati, N., Momenzadeh, M., & Ahmadi, K. (2017). A Road Map for the Ancient Mining and Metallurgical Studies in Iran. *Journal of Research on Archaeometry*, 3(1), 77-98. <http://dx.doi.org/10.29252/jra.3.1.77>[In Persian]
- [نظافتی، نیما؛ مومن زاده، مرتضی؛ و احمدی، کامران. (۱۳۹۶). نقشه راه مطالعات معدنکاری و فلزکاری کهن در ایران. پژوه باستان‌سنجی، ۳(۱)، ۷۷–۹۸. <http://dx.doi.org/10.29252/jra.3.1.77>].
- Oudbashi, O., & Mishmastnehi, M. (2020). Archaeometallurgy of copper in the Middle Elamite period of southwestern Iran: Analytical investigation of various parts of the copper production in Haft Tappeh. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 30, 102216. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102216>
- Oudbashi, O., Emami, S. M., & Davami, P. (2012). Bronze in archaeology: A review of the archaeometallurgy of bronze in Ancient Iran. In L. Collini (Ed.), *Copper alloys—Early applications and current performance-enhancing processes* (pp. 153–178). InTech Open Access Publication.
- Pernicka, E. (2004). Copper and silver in Arisman and Tappeh Sialk and the early metallurgy in Iran. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour, mining, handicraft and archaeology* (pp. 232–239). Deutsches Bergbau-Museum.
- Pigott, V. C. (1999). The development of metal production on the Iranian Plateau; An archaeometallurgical perspective. In V. C. Pigott (Ed.), *The archaeometallurgy of the Asian old world* (pp. 73–106). University of Pennsylvania Museum Press.
- Pigott, V. C. (2004). On the importance of Iran in the study of prehistoric copper-base metallurgy. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour, mining, handicraft and archaeology* (pp. 28–43). Deutsches Bergbau-Museum.
- Roustaei, K. (2004). A major manufacturing centre at the central plateau. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour, mining, handicraft and archaeology* (pp. 222–230). Deutsches Bergbau-Museum.
- Scott, D. A. (2002). *Copper and bronze in art: Corrosion, colorants and conservation*. Getty Conservation Institute Publications.
- Thornton, C. P. (2009). The emergence of complex metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine paradigm. *Journal of World Prehistory*, 22(3), 301–327. <https://doi.org/10.1007/s10963-009-9019-1>
- Thornton, C. P. (2010). The rise of arsenical copper in southeastern Iran. *Iranica Antiqua*, 45, 31–50. <https://doi.org/10.2143/IA.45.0.2047118>

- Thornton, C. P., Lamberg-Karlovsky, C. C., Liezers, M., & Young, M. M. (2002). On pins and needles: Tracing the evolution of copper-base alloying at Tepe Yahya, Iran, via ICP-MS analysis of common-place items. *Journal of Archaeological Science*, 29(12), 1451–1460. <https://doi.org/10.1006/jasc.2002.0809>
- Vatandoust-Haghighi, A. (1977). Aspects of prehistoric Iranian and copper and bronze technology [Doctoral dissertation, University College London].
- Bachmann, H. G. (1982). The Identification of Slags from Archaeological Sites. Institute of Archaeology, University College London.
- Hauptmann, A. (2007). *The Archaeometallurgy of Copper: Evidence from Faynan, Jordan*. Springer.
- Craddock, P. T. (1995). *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh University Press.