Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

Research Paper

Investigation of the Structure of the Ancient Copper Smelting Furnace in Western Javadiyeh, Kerman: Petrographic and Geochemical Analysis of Slags

Aminallah Kamali[1], **Mohammad Mehri**[*2]

1. Assistant Professor, Research Center for Conservation of Cultural Relics (RCCCR), Cultural Heritage and Tourism Research Institute, Tehran, Iran
2. Omid Geological, Geotechnical Geoscience Co, Yazd, Iran

* Correspondence: Mehri.moh@gmail.com

Abstract

The present study investigates an ancient smelting furnace located 19.5 km west of Javadiyeh and 51.5 km southeast of Bafq in Kerman Province, Iran, with an area of 216 square meters and geographic coordinates (356007, 3448674). The research was conducted using field surveys, sampling of slag, ore-bearing rocks, and flux materials, followed by data analysis through petrographic and ICP-OES methods. The results indicate that the furnace was designed for smelting copper ores, utilizing andesite and dacite as host rocks for copper minerals such as malachite, chalcocite, and chalcopyrite. Carbonate rocks, quartz, schist, and sodic feldspar were employed as flux materials in the smelting process. The furnace design comprises three main sections—smelting, tapping, and molding—distinguished by specific elevation differences, reflecting the advanced technical expertise of its builders in managing metallurgical processes. Petrographic analysis of the slag confirms the presence of minerals such as pyroxene (green swallowtail-shaped crystals), olivine (colorless elongated blades), wüstite, and copper sulfides (covellite and native copper), suggesting a reductive environment and high temperatures of approximately 1200°C. Pores observed in the slag indicate rapid solidification or gas release. Chemical analysis reveals elevated levels of Fe_2O_3 (26.09–53.75%), SiO_2 (27.35–51.13%), and CaO (11.05–14.66%), confirming the formation of fayalite and the use of siliceous and alkaline fluxes. The copper content in the slag (14,044–20,737 ppm) suggests either incomplete smelting or the use of high-grade ore, while the low sulfur content (0.16–0.20%) indicates strongly reductive conditions. These findings establish the Western Javadiyeh furnace as a notable example of copper smelting technology in Iran's Central Plateau, designed with optimized resource use and precise control over extraction and smelting processes. This research underscores the significance of ancient metallurgical knowledge and highlights the need for further studies to deepen our understanding of such technologies.

Received: 2025/01/7
Revised: 2025/09/5
Accepted: 2025/09/14
Published: 2025/12/30

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Keywords: Smelting furnace, slag, flux, Western Javadiyeh, Copper Ore

Introduction

Iran, as an ancient cradle of diverse technologies (Nezafati et al., 2017), is regarded as one of the pioneers of early mining and ancient metallurgical industries and as one of the prominent regions of mining activity in antiquity (Alipur, 1993).

Manifestations of ancient mining and metallurgy, as an integral part of the engineering heritage of ancient Iran, include evidence of mineral extraction, smelting furnaces, metal vessels, weapons, and a wide variety of artifacts found in different regions, particu-

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

larly across the Central Iranian Plateau. Based on historical evidence, the processes of ore extraction and smelting in Iran date back to approximately 9,000 years ago (Momenzadeh, 2005), or according to other estimates, to around 7,000 years ago (Rashidinejad, 2015). The Achaemenid period is recognized as one of the most significant eras of mining exploitation in Iran (Pezeshkan, 2005). The present study investigates a copper ore smelting site located west of Javadieh, focusing on aspects such as smelting furnace processes, the type of ore, the extracted material, and the smelting methods employed.

Methodology

From the ancient metal smelting site under investigation, fifteen samples were collected for chemical and archaeometric analyses. During the sampling process, priority was given to selecting specimens that had undergone the least degree of weathering and alteration, in order to obtain more reliable and accurate results. After collection, the samples were packaged and transferred to the laboratory. Following sampling, two thin and polished sections were prepared from selected specimens at the thin-section preparation workshop of the Research Institute for Conservation and Restoration of Cultural-Historical Objects. These sections were examined using a polarizing microscope manufactured by Canada Smart Tech. The aim of this study was to identify mineralogical phases and ore minerals, as well as the textures and microscopic structures of the slags. Observations were recorded using both transmitted and reflected polarized light in order to accurately identify the characteristics of silicate and metallic minerals present within the slags. For chemical analysis, three samples were analyzed using the ICP-OES (Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry) method by Zarkavan.

Results

For the petrographic study of slags produced by ancient copper smelting at this site, two polished thin sections were prepared. The silicate-phase minerals identified in these samples include pyroxene and olivine (in the form of fayalite). Pyroxene occurs as swallowtail-shaped crystals with a green coloration, which is likely related to the presence of iron in its crystal structure. Olivine appears as elongated, colorless blades and, in some cases, is associated with pyroxene. The metallic minerals present in these slags consist of iron oxides and copper sulfides. Among the iron oxides, wüstite (FeO) and ilmenite ($FeTiO_3$) were identified, indicating reducing conditions and high temperatures during the smelting process. Copper-bearing phases include covellite (CuS) and native copper (Cu). These observations suggest that the studied slags formed under thermal conditions of approximately 1200 °C, which is consistent with ancient copper smelting processes. For the chemical investigation of the ancient copper smelting slags, three samples were analyzed using the ICP method. The results show high concentrations of iron oxide (Fe_2O_3), with values of 53.75, 46.76, and 26.09%, and silica (SiO_2), with values of 27.35, 29.84, and 51.13%. The high Fe_2O_3 content indicates the presence of the fayalite phase (Fe_2SiO_4) in the slags, which is consistent with the petrographic observations. The elevated SiO_2 content further supports this interpretation, as fayalite forms from the combination of silica and iron oxide under reducing conditions. The high proportion of SiO_2 likely reflects the use of a silica-rich flux during the smelting process, which enhanced slag fluidity. Following these two major components, calcium oxide (CaO), with values of 11.05, 14.66, and 13.03%, shows a significant presence and was probably used as an alkaline flux to reduce the melting temperature and improve metal slag separation. Among the trace elements, copper (Cu) is particularly notable, with very high concentrations of 20,737.53, 16,531.34, and 14,044.21 ppm, indicating a substantial amount of residual target metal within the slags. Such high values point to incomplete ore smelting or low efficiency in metal separation, which is consistent with the relatively simple technologies employed during ancient periods.

Discussion

The data obtained from ICP-OES analysis of the slags indicate that they are mainly composed of Fe_2O_3 (26.09–53.75 wt%), SiO_2 (27.35–51.13 wt%), and CaO (11.05–14.66 wt%). This chemical composition is characteristic of fayalite-based slags, which are commonly produced in copper smelting furnaces. The elevated SiO_2 content points to the use of siliceous fluxes, which increased slag fluidity and facilitated metal separation. Given that these slags originate from copper smelting furnaces, the copper content ranges between 14,044 and 20,737 ppm, representing a substantial concentration. Such high copper levels may be attributed to two main factors: first, incomplete smelting processes that resulted in residual copper remaining within the slag; and second, the high-grade nature of the raw ores supplied to the furnaces, which contained relatively high copper contents. In addition, the presence of elevated concentrations of strontium and barium is likely related to the use of carbonate fluxes (such as limestone), which

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

were employed to lower the melting point and promote slag formation. The low sulfur content (0.16–0.20 wt%) in these slags, despite the presence of sulfide minerals such as chalcocite and chalcopyrite in the raw materials, indicates strongly reducing conditions within the furnace. Under such conditions, sulfur was volatilized during smelting and did not remain in the slag. The occurrence of impurities such as lead and silver is also most likely associated with the polymetallic nature of the raw mineral ores, a feature that is common in many Iranian ore deposits.

Conclusion

The investigation of the ancient smelting furnace west of Javadieh indicates an advanced design developed through the efficient use of local resources for the smelting of copper ores. The location of the furnace with access to clay, seasonal water sources, mineral rocks, and fuel vegetation reflects the builders' profound understanding of the local geographical and climatic conditions. Structural evidence, comprising three distinct sections for preparation, preliminary testing, and smelting at clearly differentiated elevation levels, demonstrates technical complexity and an emphasis on quality control comparable to that of modern industrial processes. The presence of experimental furnaces used to regulate temperature and flux composition, together with the employment of schist, sodic feldspar, carbonates, and quartz as fluxes, confirms the high level of metallurgical knowledge possessed by ancient practitioners. These materials played a crucial role by lowering the melting point and facilitating metal slag separation. Petrographic analysis of the slags reveals the presence of pyroxene (green swallowtail-shaped crystals), fayalite (elongated blades), wüstite, ilmenite, and copper sulfides (covellite and native copper), collectively indicating reducing conditions and high smelting temperatures of approximately 1200 °C. Vesicles within the slags are interpreted as evidence of rapid solidification or gas release during cooling. ICP-OES analyses reveal high contents of Fe_2O_3 (26.09–53.75%) and SiO_2 (27.35–51.13%), confirming fayalite formation and the use of siliceous fluxes. The presence of CaO (11.05–14.66%) further indicates the application of alkaline fluxes.The substantial residual copper content (14,044–20,737 ppm) suggests either incomplete smelting or the processing of high-grade ores, whereas low sulfur concentrations (0.16–0.20%) point to strongly reducing furnace conditions and the probable roasting or oxidation of sulfides prior to smelting.

Author Contributions: ll authors contributed to the preparation and writing of the manuscript.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon reasonable request.

Acknowledgments: We would like to express our sincere gratitude to Dr. Mehdi Razani for his valuable scientific advice during the course of this research. We would also like to thank Omid Geology Engineering and Geosciences Company for providing the appropriate conditions for the implementation of this research, especially in the field of logistical support. We would like to express our gratitude to Eng. Ebrahimzadeh, the exploration manager, and Eng. Shokri, the CEO of this company, for their continuous support and sincere cooperation. In addition, we would like to express our sincere gratitude to Hossein Masoudi Jozchal for his sincere support and efforts

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

پژوهه باستان‌سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله پژوهشی

بررسی ساختار کوزهٔ ذوب مس باستانی (واقع در کرمان غرب جوادیه): تحلیل پتروگرافی و ژئوشیمیایی سرباره‌ها

امین‌اله کمالی[۱]، محمد مهری[۲،*]

۱. استادیار، گروه باستان سنجی و علوم طبیعی، پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران
۲. کارشناس شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین، یزد، ایران
* مسئول مکاتبات: Mehri.moh@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی یک کوره ذوب باستانی واقع در ۱۹.۵ کیلومتری غرب جوادیه و ۵۱.۵ کیلومتری جنوب شرق بافق، استان کرمان، با مساحت ۲۱۶ متر مربع و مختصات جغرافیایی (۳۵۶۰۰۷، ۳۴۴۸۶۷۴) می‌پردازد. این مطالعه با استفاده از روش‌های بررسی میدانی، نمونه‌برداری از سرباره، سنگ‌های کانه‌دار و کمک‌ذوب‌ها، و تحلیل داده‌ها با روش‌های پتروگرافی و ICP-OES انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که این کوره برای ذوب کانسنگ‌های مس طراحی شده و از آندزیت و داسیت به‌عنوان میزبان کانی‌های مس‌دار نظیر مالاکیت، کالکوسیت و کالکوپیریت در آن استفاده شده است. سنگ‌های کربناته، کوارتز، شیست و فلدسپار سدیک نیز به‌عنوان کمک‌ذوب در فرآیند ذوب استفاده شده‌اند. طراحی کوره شامل سه بخش اصلی ذوب، مجرای تخلیه و قالب‌گیری با اختلاف ارتفاع مشخص است که نشان‌دهندهٔ دانش فنی بالای سازندگان در مدیریت فرآیندهای متالورژیکی است. بررسی پتروگرافی سرباره‌ها، حضور کانی‌هایی چون پیروکسن (بلورهای دم‌چلچله‌ای سبز)، الیوین (تیغه‌های بی‌رنگ)، وستیت و سولفیدهای مس (کوولیت و مس نیتیو) را تأیید می‌کند که حاکی از شرایط احیایی و دمای بالای حدود ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. حفره‌های موجود در سرباره‌ها نیز نشان‌دهندهٔ انجماد سریع یا آزادسازی گازها هستند. آنالیز شیمیایی مقادیر بالای Fe_2O_3 (26.09–53.75%)، SiO_2 (27.35–51.13%) و CaO (11.05–14.66%) را نشان می‌دهد که حضور فایالیت و استفاده از کمک‌ذوب‌های سیلیسی و قلیایی را تأیید می‌کند. میزان مس (14,044–20,737 ppm) در سرباره بیانگر ذوب ناقص یا سنگ معدن پرعیار است، در حالی که گوگرد پایین (۰.۱۶–۰.۲۰٪) شرایط احیایی قوی را نشان می‌دهد. این یافته‌ها کورهٔ غرب جوادیه را به‌عنوان یک نمونهٔ برجسته از فناوری ذوب مس در فلات مرکزی ایران معرفی می‌کنند که با بهینه‌سازی منابع و دقت در فرآیندهای استخراج و ذوب طراحی شده است. این پژوهش بر اهمیت دانش متالورژیکی باستانی و ضرورت مطالعات تکمیلی تأکید دارد.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸
آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۶/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۳
انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۹

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

واژگان کلیدی: کورهٔ ذوب فلز، سرباره، کمک‌ذوب، غرب جوادیه، کانسنگ مس

۱. مقدمه

ایران، به‌عنوان زادگاه دیرینهٔ فناوری‌های متنوع (Nezafati et al. 2017)، یکی از پیشگامان صنعت معدن‌کاوی و فلزکاری کهن و از کشورهای برجسته در زمینهٔ فعالیت‌های معدنی در دوران باستان است (Alipur 1993). نمودهای معدن‌کاوی و فلزکاری کهن به‌عنوان بخشی از میراث مهندسی ایران باستان، شامل شواهدی از استخراج مواد معدنی، کوره‌های ذوب، ظروف فلزی، ابزارهای جنگی و مصنوعات متنوع در مناطق مختلف، به‌ویژه فلات مرکزی ایران، دیده می‌شوند. بر اساس شواهد تاریخی، فرایند استخراج و گداز کانسنگ‌ها در ایران به حدود نه هزار سال پیش (Momenzadeh 2005) یا حدود هفت هزار سال پیش بازمی‌گردد (Rashidinejad 2015). دوران هخامنشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دوره‌های استخراج معادن در ایران شناخته شده است (Pezeshkan 2005). ایرانیان باستان از نخستین جوامع جهانی بودند که ابزارهای فلزی

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

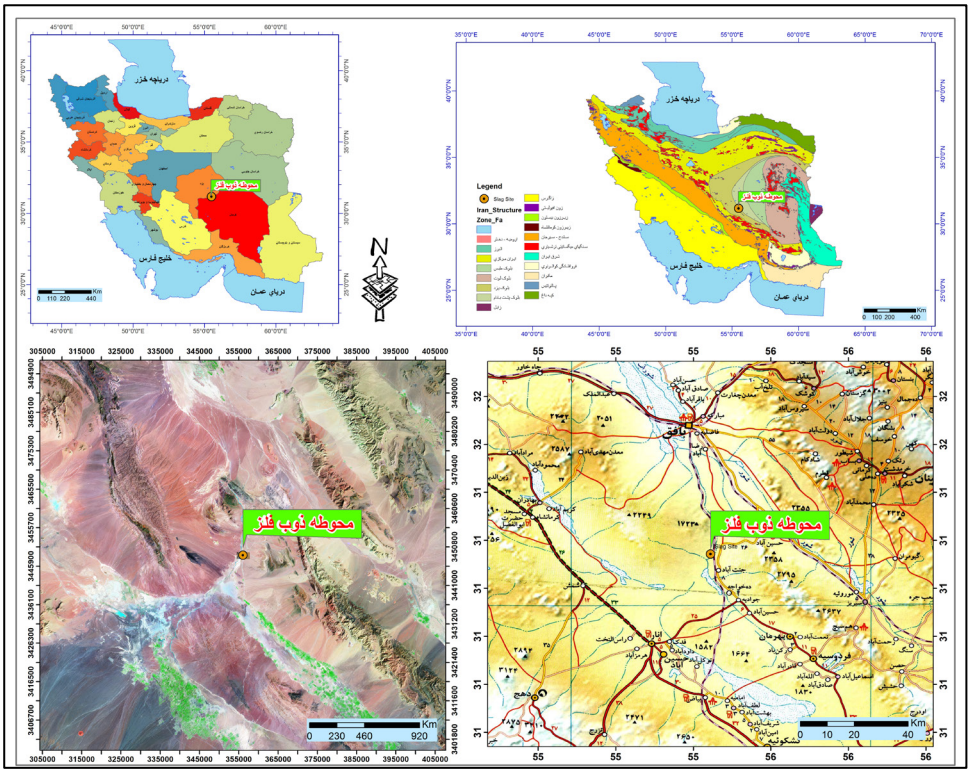
برداشت محصولات کشاورزی را از مس ساختند (Ramtin 2008) . تولید اشیاء تزئینی فلزی ابتدا با کار سرد روی فلزات طبیعی، مانند مس، آغاز شد و سپس با توسعهٔ فناوری‌های حرارتی (پیروتکنولوژی)، از طریق شکل‌دهی گرم و پیشرفته‌تر، انجام می‌شد. فناوری‌های پیروتکنولوژیکی نظیر متالورژی، سفالگری و شیشه‌سازی به اطلاعات دقیقی در مورد مواد خام، رفتار آن‌ها در دماهای بالا و پایداری در شرایط دمایی شدید نیاز داشتند (Eskandari and Emami 2022). چهار محوطهٔ متالورژی برجسته در حاشیهٔ فلات ایران، شامل تل ابلیس (Frame and Pleiner 2004; Pleiner 1967) ، تپهٔ قبرستان (Majidzadeh 1979) ، شهداد (Elikay Dehno et al. 2025; Hakemi 1989) و تپهٔ حصار (Thornton 2009)، شواهدی از ذوب مس در دوران کالکولیتیک ارائه می‌دهند. در این دوران، ذوب مس معمولاً با استفاده از بوته‌هایی برای ذوب اکسیدها و کربنات‌های مس انجام می‌شد (Hauptmann et al 2003; Rostoker et al 1989). در کوره‌های ذوب مس باستانی، دما به حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بیش‌تر می‌رسید. (Hauptmann et al 2003; Rehren et al 2012) آغاز استفاده از مس طبیعی در فلات ایران به هزارهٔ هفتم قبل از میلاد بازمی‌گردد (Muhly 1989; Wertime 1968)، و شواهد نخستین ذوب کانسنگ‌های مس به اواخر هزارهٔ ششم قبل از میلاد تعلق دارند. در این دوره، اکسیدهای مس (کوپریت) و کربنات‌ها (مالاکیت) به‌عنوان منابع اولیهٔ مس در فرآیندهای ذوب مورد استفاده قرار گرفتند. تولید مس از سنگ‌های معدنی سولفیدی نیز از اوایل هزاره ششم تا چهارم قبل از میلاد متداول بود(Emami and Shahsavari 2020). شواهد تاریخی گواهی می‌دهند که ایران یکی از نخستین کشورهای صنعتی جهان بوده و میراث معدن‌کاوی و فلزکاری باستانی آن نشان‌دهنده دانش پیشرفته ایرانیان در این حوزه است. ایران یکی از نخستین خاستگاه‌های تحولات متالورژی در جهان باستان به‌شمار می‌آید. شواهد استفاده از فلزات طبیعی را می‌توان تا هزاره هفتم پیش از میلاد ردیابی کرد. علاوه بر این، محوطه‌های متعددی در فلات مرکزی ایران نشان می‌دهند که فناوری ذوب سنگ معدن‌های فلزی از هزارهٔ پنجم تا سوم پیش از میلاد، توسعه یافته است. به‌طور خلاصه، شایسته است که ایران به‌عنوان قلب توسعهٔ اولیهٔ متالورژی استخراجی و فلزکاری در جهان شناخته شود (Weeks 2016). نشانه‌های صنعت معدنکاری و فلزکاری در بسیاری از مناطق ایران، مانند کانسار مس طرود و معدن مس چاه موسی (استان سمنان)، مناطق چهل‌کوره در سیستان و طبس، حاشیهٔ جنوبی کویر مرکزی ایران در استان‌های کرمان و زاهدان امروزی، و همچنین مناطق مرکزی و غربی زاگرس از جمله یزد و لرستان، به‌واسطهٔ صنعت گسترده و برجستهٔ مفرغ‌کاری، از مهم‌ترین و برجسته‌ترین مناطق فلزکاری کهن ایران محسوب می‌شوند (Emami 2006, 2014).

سنگ‌ها، فلزات و مواد آلی، چه به‌عنوان ماد، خام و چه به‌صورت زیورآلات یا مصنوعات فلزی، همواره نقشی کلیدی در پیشرفت تمدن‌های بشری داشته‌اند. استخراج فلزاتی نظیر مس، طلا، نقره، سرب و روی به ایرانیان نسبت داده شده است. وجود سرباره‌های باستانی، علاوه بر تأیید دانش پیشرفتهٔ آلیاژسازی، نشان‌دهندهٔ شناخت دقیق ساختار فلزات در دوران کهن است. مطالعهٔ معادن و سرباره‌های قدیمی، علاوه بر کمک به درک تحولات تاریخی، امکان بازسازی دانش و روش‌های استخراج و فرآوری مواد معدنی را فراهم می‌کند (Emami 2016). این پژوهش‌ها می‌توانند تطبیق یافته‌های باستانی با معادن کنونی را تسهیل کرده و به شناسایی منابع معدنی و فناوری‌های باستانی کمک کنند (Razan et al 2021). چنین مطالعاتی، میراثی ارزشمند از مهندسی و فناوری کهن برجای می‌گذارند که نیازمند حفاظت، مستندسازی و پژوهش‌های عمیق‌تر هستند (Kamali 2022). پژوهش حاضر به مطالعهٔ محوطهٔ ذوب کانسنگ مس در غرب جوادیه می پردازد، و مواردی از قبیل فرآیندهای کورهٔ ذوب، نوع کانسنگ، مادهٔ استخراجی و روش‌های ذوب را ارائه می‌دهد.

۲. موقعیت، دسترسی و عناصر اصلی جانمایی کوره ذوب قدیمی مس در غرب جوادیه

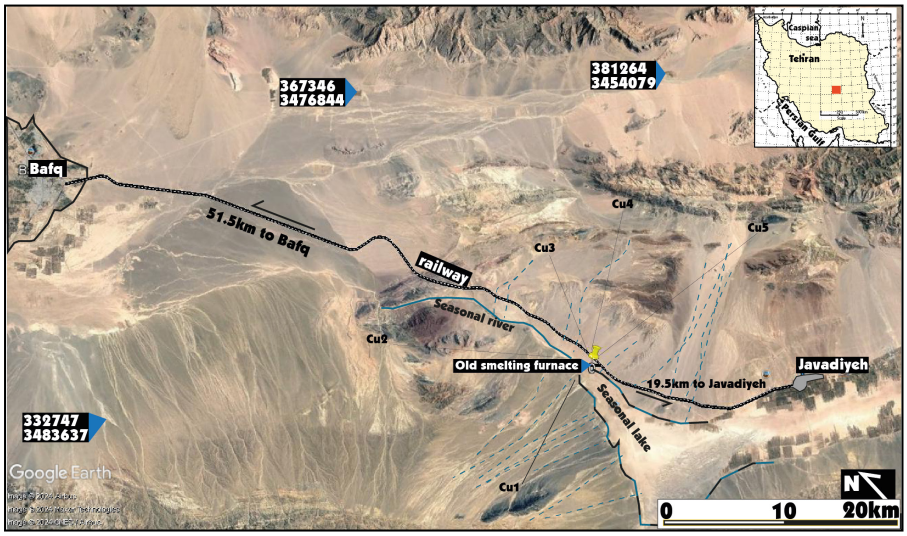
کورهٔ ذوب قدیمی غرب جوادیه در استان کرمان، در فاصلهٔ ۱۹/۵ کیلومتری غرب جوادیه و ۵۱/۵ کیلومتری جنوب شرق بافق، با وسعتی معادل ۲۱۶ متر مربع در مختصات جغرافیایی ۳۵۶۰۰۷، ۳۴۴۸۶۷۴، زون ۴۰ WGS84واقع شده است (شکل ۱). این کوره در مکانی با مورفولوژی ملایم و حداکثر اختلاف ارتفاع ۲ متری از سطح زمین‌های اطراف ساخته شده است. برای دسترسی به کوره می‌توان از جوادیه، مسیر ۱۹/۵ کیلومتری جاده خاکی کنار خط راه‌آهن را طی کرد یا از مسیر ۵۱/۵ کیلومتری به آن دست یافت. جانمایی این کوره نشان‌دهندهٔ دقت و شناخت عمیق اجداد ما از محیط طبیعی و نیازهای فرآیند ذوب فلز بوده است. از جمله ویژگی‌های کلیدی محل انتخاب‌شده، می‌توان به محل تلاقی رودخانهٔ فصلی و دریاچهٔ فصلی غرب جوادیه اشاره کرد که تأمین‌کنندهٔ آب، خاک رس، و نمک‌های تبخیری موردنیاز بوده است. همچنین، دسترسی به منابع سوخت از جمله گیاهان درختی مانند طاق، گز، قیچ و درختچه‌های خانوادهٔ دم‌اسبیان و ساروان‌کَش که قدرت حرارت‌دهی بالایی دارند، از دیگر مزایای این موقعیت بوده است. جهت وزش باد غالب جنوبی–شمالی (باد قبله) نیز در طراحی کوره و افزایش راندمان سوخت مؤثر بوده است. علاوه بر این، فاصلهٔ مناسب از مناطق مسکونی از دیگر ملاحظاتی بوده که در انتخاب این محل رعایت شده است. مواد اولیهٔ کانسنگ از معادنی در فاصلهٔ دورتر به این کوره حمل می‌شده است، زیرا در محل کوره، معدن خاصی وجود ندارد. محتمل‌ترین مناطق دارای ذخایر فلزی در شکل ۲ مشخص شده‌اند. این کوره به‌عنوان یک شاخص کلیدی، امکان وجود کانسنگ‌های فلزی در اطراف یا در نزدیکی آن را نشان می‌دهد و می‌تواند سرنخی ارزشمند برای تحقیقات بیش‌تر در این منطقه باشد (شکل ۲).

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026



شکل ۱. موقعیت محوطهٔ ذوب فلز در نقشهٔ ایران، نقشهٔ زون‌های ساختاری زمین‌شناسی ایران، تصاویر ماهواره‌ای و راه‌های دسترسی به آن

Figure 1. Location of the metal smelting site on the map of Iran, map of Iran's geological structural zones, satellite imagery, and access routes to the site.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی کورهٔ قدیمی غرب جوادیه و نزدیکی آن به خط راه‌آهن، راه‌های دسترسی به این کوره از طریق جوادیه و بافق، عناصر مرفولوژیکی اصلی مانند دریاچه و رودخانهٔ فصلی (Seasonal Lake and River) و موقعیت کوره نسبت به آن‌ها. موقعیت نزدیک‌ترین نقاط با احتمال دارابودن کانسنگ فلزی (Cu1 تا Cu5) نیز در تصویر مشخص شده است.

Figure 2. Geographical location of the old furnace west of Javadiyeh and its proximity to the railway line, access routes to this furnace via Javadiyeh and Bafq, main morphological elements such as the seasonal lake and river, and the furnace's position relative to them. The locations of the nearest points likely containing metal ore deposits (Cu1 to Cu5) are also marked in the image.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

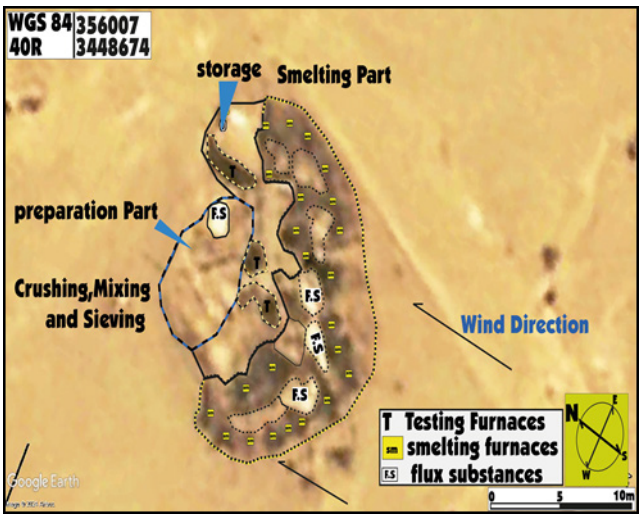
۳. شناخت عناصر اصلی کورهٔ قدیمی غرب جوادیه

کورهٔ ذوب قدیمی غرب جوادیه با مساحت ۲۱۶ متر مربع دارای ساختاری فضایی و چیدمانی به شکل عدسی بوده و با اختلاف ارتفاع ۲ متری نسبت به سطوح مجاور جانمایی شده است. این کوره از نظر ساختار فضایی شامل سه بخش اصلی می‌باشد که عبارتد از (شکل ۳):

الف) بخش آماده‌سازی[۱]: در این بخش از ساختار فضایی کوره، عملیات جدایش دستی کانسنگ مس از نظر ابعاد قطعات، خردایش دستی، و مخلوط‌سازی عیاری انجام می‌شده است. این بخش در قسمت پشتی محوطهٔ کوره قرار گرفته، به‌گونه‌ای که کم‌ترین تأثیر را از وزش باد داشته باشد. در این قسمت، دپوهای مختلفی شامل دپوی کمک‌ذوب‌ها، دپوی کانسنگ آمادهٔ ذوب، و دپوی کانسنگ حمل‌شده از معدن تعبیه شده بوده است (شکل ۳). در انتهایی‌ترین بخش این قسمت، عمل مخلوط‌سازی کانسنگ با کمک‌ذوب‌ها صورت می‌گرفته است.

ب) بخش ذخیره‌سازی و آزمایش اولیهٔ ذوب[۲]: این بخش از ساختار فضایی کوره شامل سه کوره برای آزمایش اولیهٔ ذوب (حرف T در شکل ۳) و محوطه‌ای برای ذخیرهٔ کانسنگ آماده جهت انتقال به کوره و حرارت‌دهی بوده است (شکل ۳). در این مرحله، کانسنگ آمادهٔ ذوب در مقادیر کم در کوره‌های آزمایشی ذوب می‌شده تا رفتار ترمودینامیکی آن نسبت به مقادیر و عملکرد کمک‌ذوب‌ها، دمای ذوب مواد آماده‌شده و میزان بازدهی مس با توجه به عیار آن بررسی شود. در صورتی که در نمونه‌های آماده‌شده، بهترین رفتار و بازدهی مشاهده می‌شده، آن دپو برای انتقال به کوره یا کوره‌های اصلی انتخاب می‌شده است. در صورت وجود نقایص در فرآیند ذوب، از نظر عملکرد کمک‌ذوب‌ها یا بازدهی موردنظر، تغییراتی در دانه‌بندی، عیار کانسنگ، ترکیب کمک‌ذوب‌ها و شرایط حرارتی کوره اعمال می‌شده است (شکل ۳). این بخش معادل بخش کنترل کیفی (Q.C) در واحدهای صنعتی مدرن امروزی بوده است.

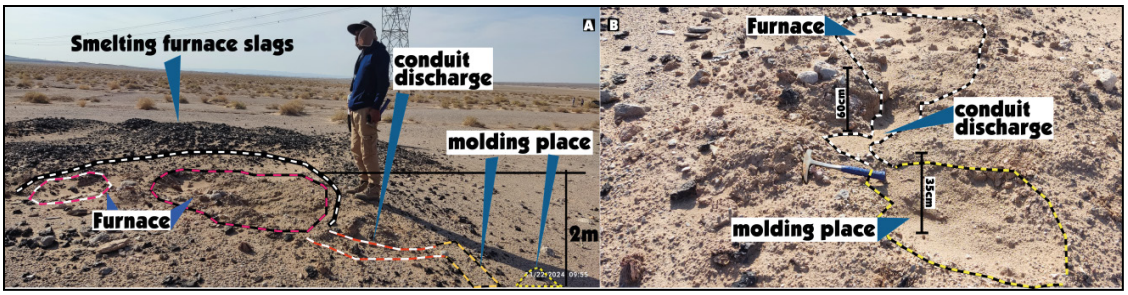
ج) بخش ذوب، آلیاژسازی و قالب‌گیری[۲]: این بخش، اصلی‌ترین قسمت مرتبط با ذوب و متالورژی کورهٔ قدیمی غرب جوادیه بوده و شامل چندین جزء است. جزء اول: دپوهای کمک‌ذوب‌ها[۳] و سوخت، که برای تأمین مواد مورد نیاز جهت کاهش دمای ذوب و سوخت‌رسانی در طول فرآیند ذوب استفاده می‌شده‌اند. این دپوها در نزدیک‌ترین نقاط به بدنهٔ کوره قرار داشته‌اند (شکل ۳). جزء دوم: بدنهٔ کوره، شامل مخزن ذوب و حرارت‌دهی[۵]، مجرای تخلیهٔ کوره و مکان قالب‌گیری بوده است. مکان قالب‌گیری در کورهٔ ذوب قدیمی غرب جوادیه ظاهراً دو مرحله‌ای بوده و دارای دو سطح پشت سر هم با اختلاف ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بوده است (شکل ۴) این طراحی احتمالاً به بهبود جریان مواد مذاب و کارایی فرآیند قالب‌گیری کمک می‌کرده است.



شکل ۳. عناصر هندسی و فضایی کورهٔ ذوب قدیمی جوادیه بر روی تصویر هوایی آن. تقسیم‌بندی بخش‌های مختلف این محوطه، کورهٔ ذوب و موقعیت مکانی آن‌ها نسبت به هم به همراه جهت اصلی وزش باد (باد قبله، جنوبی – شمالی). مختصات نقطهٔ مرکزی این کوره بر اساس مختصات UTM در گوشهٔ بالای تصویر ارائه شده است. توضیح هر بخش نیز در متن آمده است.

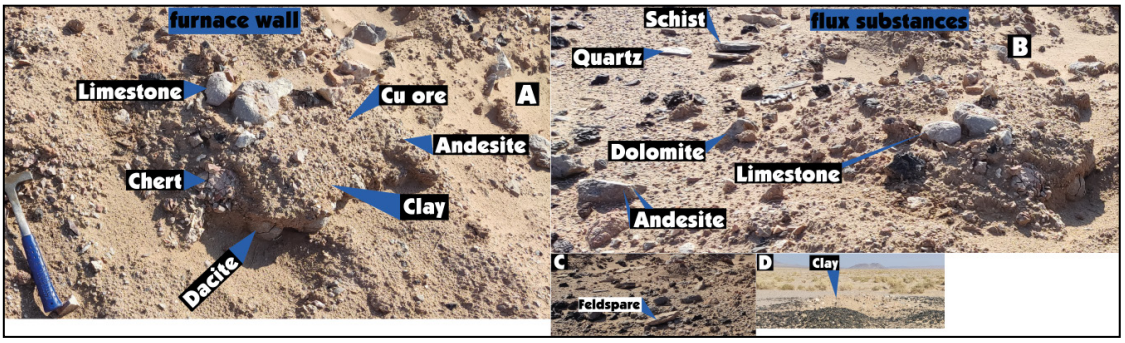
Figure 3. Geometric and spatial elements of the old Javadiyeh smelting furnace on its aerial image. Division of the various sections of this furnace site and their spatial positions relative to each other, along with the primary wind direction (Qibla wind, south-north). The coordinates of the furnace's central point, based on the UTM coordinate system, are provided in the upper corner of the image. Descriptions of each section are presented in the text.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026



شکل ٤. عناصر اصلی کورهٔ قدیمی جوادیه در مقیاس یک سلول کامل ذوب کانسنگ. در مورد هر بخش در متن توضیح داده شده و اختلاف ارتفاع بین بخش‌های مختلف کوره نیز مشخص شده است.

Figure 4. Main components of the old Javadiyeh furnace at the scale of a complete ore smelting cell. Each section is explained in the text, and the elevation differences between the various parts of the furnace are also specified



شکل ٥. (A) مواد تشکیل دهندهٔ دیوارهٔ کوره (Furnace Wall) ذوب جوادیه و اجزاء تشکیل‌دهندهٔ آن (B) به همراه سنگ‌شناسی‌های دیگر استفاده شده در این کوره به‌عنوان کمک‌ذوب (Flux Substances)

Figure 5. (A) Composition of the furnace wall of the Javadiyeh smelting furnace and its constituent components, (B) along with other lithological materials used in this furnace as flux substances.

در کورهٔ قدیمی غرب جوادیه، بین مخزن ذوب–حرارت‌دهی و مجرای تخلیه، و همچنین بین مجرای تخلیه و مکان قالب‌گیری، به ترتیب اختلاف ارتفاعی معادل ۶۰ سانتی‌متر و ۳۵ سانتی‌متر وجود داشته است (شکل B۴). این بخش از کوره به‌عنوان محل ذخیرهٔ سرباره‌های حاصل از فرآیند ذوب در نظر گرفته می‌شده که با استفاده از ابزارهای دستی از کورهٔ تخلیه و به‌عنوان مواد دورریز انباشته می‌شده است. تعداد دپوهای کوچک سرباره در کورهٔ ذوب قدیمی جوادیه برابر با ۲۴ دپو بوده است (شکل ۳). برای پوشش دیوارهٔ این کوره‌ها از مخلوطی از خاک رس، قطعات چرتی، قطعات سنگ داسیتی و ماسه استفاده شده است. در لایهٔ داخلی دیواره، علاوه بر مواد مذکور، قطعاتی از کانسنگ‌ها نیز قابل مشاهده هستند (شکل ۵ A) ابعاد دانه‌بندی مصالح به‌کاررفته در دیوارهٔ کوره‌ها شامل ذراتی با اندازهٔ ۰/۶۲۵ میلی‌متر (۷۰ درصد)، ۲ میلی‌متر (۱۰ درصد)، و ۲ تا ۳۰ میلی‌متر (۲۰ درصد) بوده است.

٤.مواد و روش‌ها

٤–١. نمونه‌های موردمطالعه

از محوطهٔ ذوب فلز باستانی موردمطالعه، ۱۵ نمونه برای بررسی‌های شیمیایی و باستان‌سنجی جمع‌آوری شد. در فرآیند نمونه‌برداری، ابتدا تلاش شد نمونه‌هایی انتخاب شوند که کمترین میزان فرسایش و دگرسانی را متحمل شده باشند تا نتایج دقیق‌تری به‌دست آید. همچنین، به‌منظور بررسی تنوع در ترکیب شیمیایی و شرایط فرآیند ذوب، نمونه‌ها از بخش‌های مختلف کوره (مانند دیواره‌ها، کف، و مناطق نزدیک به محل ذوب) و با ابعاد متفاوت برداشت شدند. این رویکرد امکان تحلیل جامع‌تری از فناوری متالورژیکی محوطه را فراهم می‌کند. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری، بسته‌بندی شده و به آزمایشگاه منتقل شدند.

٤–٢. مطالعات پتروگرافی

پس از نمونه‌برداری، دو مقطع نازک و صیقلی از نمونه‌های منتخب در کارگاه تهیهٔ مقطع پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی تهیه شد. این مقاطع با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل Canada Smart Tech و با بزرگ‌نمایی‌های ۱۰×، ۲۰×، ۴۰×، و ۵۰× مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از این مطالعه، شناسایی فازهای کانی‌شناسی و کانه‌ها، بافت، و ساختار میکروسکوپی سرباره‌ها بود. مشاهدات با استفاده از نور پلاریزهٔ عبوری و انعکاسی ثبت شدند تا ویژگی‌های کانی‌های سیلیکاته و فلزی موجود در سرباره‌ها به‌دقت شناسایی شوند.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

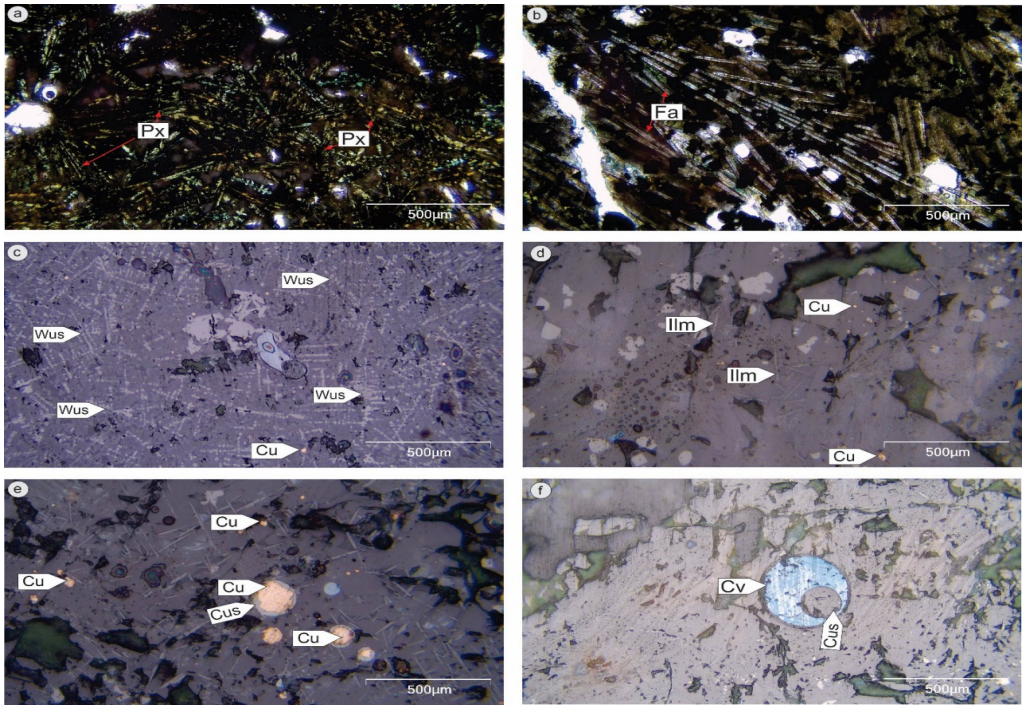
٤-٣. آنالیز شیمیایی(ICP-OES)

برای تحلیل شیمیایی، نمونه‌های باقی‌مانده پس از مطالعات پتروگرافی به آزمایشگاه زرکاوان ارسال شدند. آنالیز عنصری با استفاده از روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شدهٔ القایی (ICP-OES) و دستگاه (Bruker Q8 Magellan) شرکت زرکاوان انجام گرفت.

۵. نتایج مطالعات آزمایشگاهی

۵-۱. پتروگرافی

برای مطالعهٔ پتروگرافی سرباره‌های حاصل از ذوب فلز مس باستانی در این محوطه، دو مقطع نازک صیقلی تهیه شد. نمونه‌های سرباره موردبررسی به رنگ سیاه متمایل به خاکستری هستند و حفره‌هایی با فراوانی کم تا متوسط در سطح آن‌ها قابل‌مشاهده هستند. این حفره‌ها نشان‌دهندهٔ فرآیندهای گازی یا انجماد سریع در طی تشکیل سرباره هستند. کانی‌های فاز سیلیکاته در این نمونه‌ها شامل پیروکسن و الیوین (به‌صورت فایالیت) شناسایی شدند. پیروکسن به صورت بلورهای دم‌چلچله‌ای و به رنگ سبز مشاهده می‌شود که احتمالاً به حضور آهن در ساختار آن مرتبط است (شکل۶- a). الیوین به صورت تیغه‌های بی‌رنگ و کشیده ظاهر شده و در برخی موارد با پیروکسن همراه است (شکل۶- b). فضاهای خالی یا حفره‌های بین بلورهای پیروکسن نیز دیده می‌شوند که می‌تواند نتیجهٔ انقباض در هنگام سردشدن یا حضور فازهای گازی باشد. کانی‌های فلزی موجود در این سرباره شامل اکسیدهای آهن و سولفیدهای مس هستند. از میان اکسیدهای آهن، وستیت (FeO) و ایلمنیت ($FeTiO_3$) شناسایی شدند که نشان‌دهندهٔ شرایط احیایی و دمای بالای فرآیند ذوب هستند (شکل۶- c و d). سولفیدهای مس شامل کوولیت (CuS) و مس نیتیو (Cu) هستند. مس نیتیو به صورت قطره‌های پراکنده در ماتریس سرباره دیده می‌شود و اغلب دارای حاشیه‌ای از سولفید مس (احتمالاً کوولیت) است (شکل۶- e و f) که می‌تواند نتیجهٔ واکنش‌های ثانویه در طی سردشدن باشد. این مشاهدات حاکی از آن است که سرباره‌های موردمطالعه در شرایط دمایی۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند که با فرآیندهای ذوب باستانی مس سازگار است.



شکل٦. a). کانی پیروکسن به صورت بلورهای دم‌چلچله‌ای و به رنگ سبز .b) کانی الیوین به صورت تیغه‌های کشیده و بی‌رنگ c) کانی وستیت به صورت بلورهای کشیده و پراکنده در ماتریس d) کانی ایلمنیت ب ەصورت تیغه‌های بسیار نازک e) کانی مس نیتیو با حاشیه‌ای از سولفید مس f) کانی‌های مس به صورت کوولیت و دیگر سولفیدهای مس.

Figure 6. Descriptions of minerals observed in the smelting remains: (a) Pyroxene mineral occurring as swallowtail-shaped crystals, green in color; (b) Olivine mineral appearing as elongated, colorless blades; (c) Wüstite mineral present as elongated crystals scattered within the matrix; (d) Ilmenite mineral occurring as very thin blades; (e) Native copper mineral with a rim of copper sulfide; (f) Copper minerals occurring as covellite and other copper sulfides.

۵-۲. شیمی سرباره‌ها

بررسی شیمیایی سرباره‌های ذوب مس باستانی با استفاده از نتایج آنالیز سه نمونه با بهره‌گیری از روش ICP انجام شد و اکسیدهای موجود در جدول از تبدیل عناصر اصلی به اکسیدها محاسبه شده‌اند (جدول ۱). در این سرباره‌ها، مقادیر بالای اکسید آهن (Fe_2O_3) با ۵۳.۷۵، ۴۶.۷۶، و ۲۶.۰۹ ٪ و سیلیس (SiO_2) با ۲۷.۳۵، ۲۹.۸۴، و ۵۱.۱۳٪ مشاهده می‌شود. مقدار بالای Fe_2O_3

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

نشان‌دهندهٔ حضور فاز فایالیت (Fe_2SiO_4) در سرباره‌هاست که با نتایج پتروگرافی همخوانی دارد. میزان بالای SiO_2 نیز این فرضیه را تأیید می‌کند، زیرا فایالیت از ترکیب سیلیس و اکسید آهن در شرایط احیایی تشکیل می‌شود. درصد بالای SiO_2 احتمالاً بیانگر استفاده از شار سیلیسی بیش‌تر در فرآیند ذوب است که سیالیت سرباره را افزایش داده است. پس از این دو عنصر، اکسید کلسیم (CaO) با مقادیر ۱۱.۰۵، ۱۴.۶۶، و ۱۳.۰۳ ٪ حضور قابل‌توجهی دارد و احتمالاً به‌عنوان شار قلیایی برای کاهش دمای ذوب و بهبود جدایش فلز از سرباره به کار رفته است. مقادیر سایر اکسیدها از جمله آلومینیوم (Al_2O_3)، سدیم(Na_2O) ، پتاسیم(K_2O) ، تیتانیوم (TiO_2)، و منیزیم (MgO) در محدودهٔ معمول قرار دارند. در میان عناصر کمیاب، مس (Cu) با مقادیر بسیار بالای ۲۰۷۳۷.۵۳، ۱۶۵۳۱.۳۴، و ۱۴۰۴۴.۲۱ ppm برجسته است که نشان‌دهندهٔ باقی‌ماندهٔ قابل‌توجه فلز هدف در سرباره است. این مقادیر بالا حاکی از ذوب ناقص سنگ معدن یا کارایی پایین فرآیند جدایش فلز است که با فناوری ابتدایی دوره‌های باستانی سازگار می‌باشد. مقادیر سرب (Pb) و نقره (Ag) در حد معمول هستند و می‌توانند به ناخالصی‌های موجود در سنگ معدن خام یا استفاده از معادن چندفلزی اشاره داشته باشند. آرسنیک (As) با مقادیر ۱۵۰.۲۳، ۹۵.۳۷، و ۷۵.۰۸ ppm نیز قابل‌توجه است و احتمالاً نشان‌دهندهٔ استفاده از سنگ معدن‌های حاوی آرسنیک در تأمین مواد اولیهٔ این کورهٔ ذوب است. مقادیر بالای Fe_2O_3 همراه با درصد پایین گوگرد (S) (۰.۱۷، ۰.۱۶، و ۰.۲۰ ٪) بیانگر شرایط احیایی قوی در کورهٔ ذوب می‌باشد. مقدار ناچیز گوگرد نشان می‌دهد که کانی‌های سولفیدی (مانند کالکوپیریت) احتمالاً پیش از ذوب به اکسید تبدیل شده‌اند یا سنگ معدن اولیه از نوع اکسیدی بوده است. به‌طور کلی، فقدان گوگرد به شرایط احیایی نسبت داده می‌شود. با توجه به حضور فایالیت (که از انواع الیوین است)، دمای ذوب کوره احتمالاً در حدود ۱۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد بوده است که برای فناوری باستانی منطقی به‌نظر می‌رسد. سایر عناصر مانند کروم(Cr) ، نیکل(Ni) ، و کبالت (Co) با مقادیر متغیر احتمالاً از سنگ معدن یا مواد سوختی وارد سرباره شده‌اند. مقادیر بالای استرانسیم (Sr) (1597.67-1665.54 ppm) و باریم (Ba) (185.21-231.10 ppm) نیز می‌توانند به ترکیب سنگ میزبان یا استفاده از شارهای آهکی مرتبط باشند. این داده‌ها نشان‌دهندهٔ پیچیدگی فرآیند ذوب و تنوع منابع مورداستفاده در این محوطهٔ باستانی هستند.

٦. بحث در یافته‌ها

بر اساس بررسی‌های میدانی انجام‌شده، واریزه‌های موجود در کورهٔقدیمی غرب جوادیه تنوع زیادی دارند. عمده‌ترین واریزه‌های موجود شامل سرباره‌ها و باقی‌مانده‌های حاصل از فرآیند ذوب هستند (اشکال ۷ و ۸ A). این سرباره‌ها در رنگ‌های سیاه، قرمز–قهوه‌ای و سبز تیره مشاهده می‌شوند و دارای ساختارهای جریانی و چگالی کم‌تر از ۳ هستند. علاوه بر این، در برخی از این سرباره‌ها قطعات سنگی نیز به چشم می‌خورند (شکل‌های B۸، C، D).

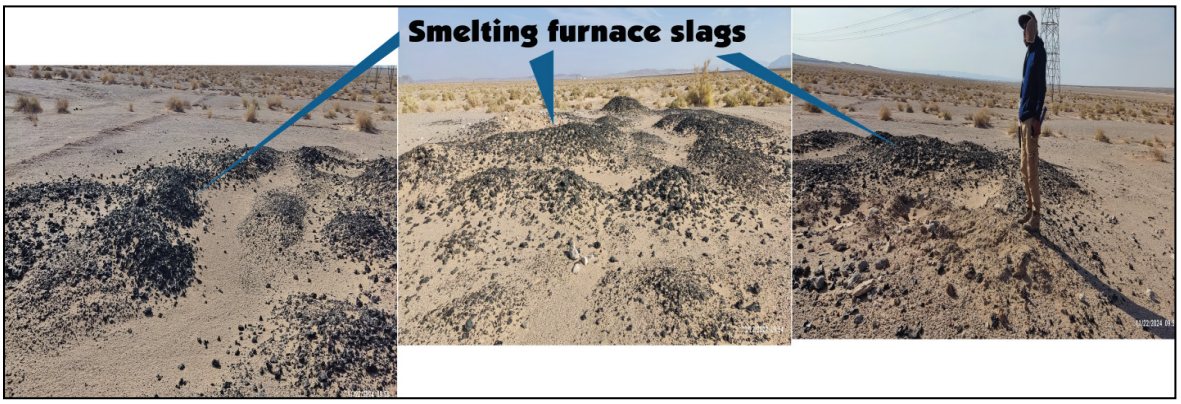
این قطعات باقیمانده شامل سنگ‌هایی از نوع آندزیت، داسیت، میکاشیست، آهک، دولومیت، قطعات رس سخت‌شده، فلدسپار سدیک، بلورهای درشت کوارتز و کربنات کلسیم هستند (اشکال B۸، 7C). همچنین، بقایای کانی‌های مس‌دار مانند مالاکیت، کالکوسیت و کالکوپیریت نیز در نمونه‌های سرباره مشاهده شده است (اشکال B۸، C، D) از میان این قطعات سنگی، آندزیت و داسیت به‌عنوان میزبان کانه‌های مس‌دار شناخته می‌شوند، در حالی که رس‌های سخت‌شده احتمالاً از دیواره‌های کوره جدا شده و به درون مذاب وارد شده‌اند (شکل D۸).

جدول ۱. نتایج آنالیز سرباره‌های موردمطالعه به روش ICP-OES

Table 1. Results of the analysis of the studied slag samples using the ICP-OES method.

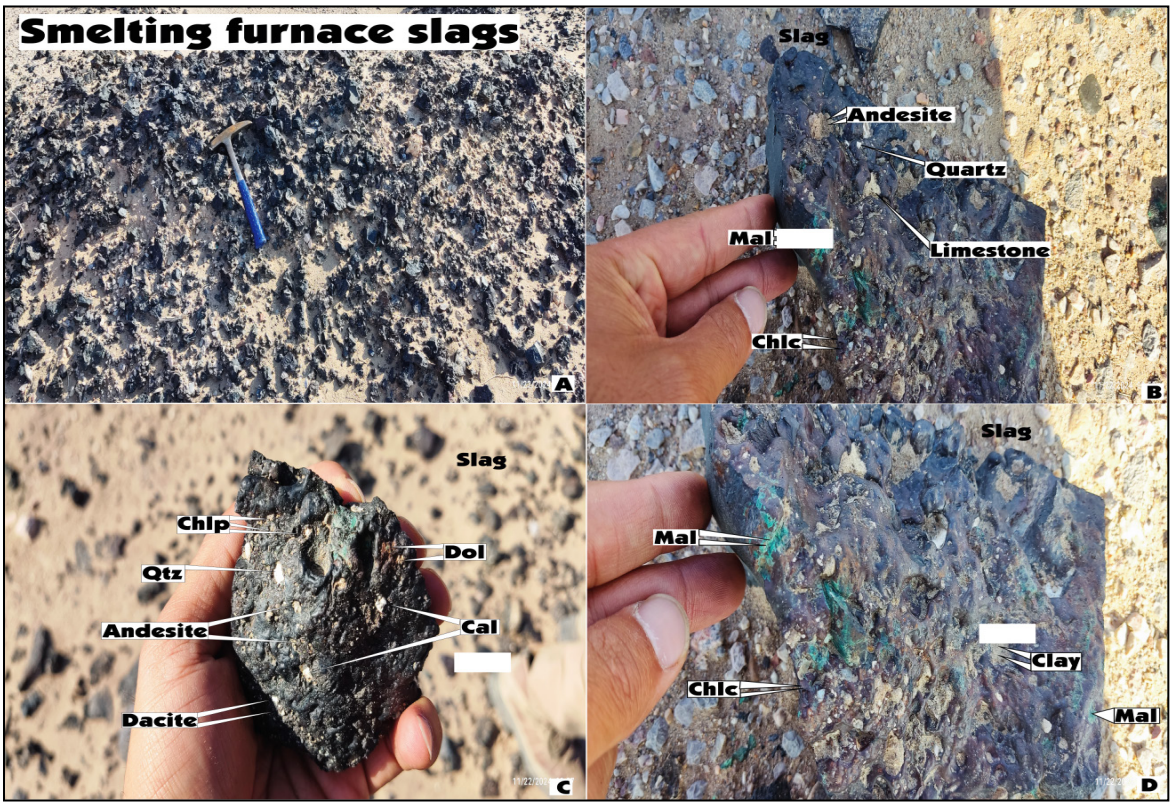
	Sample		
	223-1204-G-1	**223-1204-G-2**	**223-1204-G-3**
SiO2	27.35	29.84	51.13
Al_2O_3	4.99	5.61	6.37
CaO	11.05	14.66	13.03
Fe_2O_3	53.75	46.76	26.09
K_2O	0.76	0.86	1.14
MgO	0.97	1	0.95
Na_2O	0.86	0.98	1.01
TiO_2	0.27	0.28	0.28
Ag	0.60	0.89	1.39
As	150.23	95.37	75.08
Ba	231.10	206.69	185.21
Cd	5.44	4.99	3.07
Co	174.56	128.60	85.08
Cr	88.14	69.98	94.37
Cu	20737.53	16531.34	14044.21
Fe	37.61	32.72	18.26
La	17.11	21.49	16.49
Li	12.76	12.69	13.31
Mo	8.41	9.09	3.46
Ni	233.05	155.63	175.68
Pb	154.10	157.60	336.03
S	0.17	0.16	0.20
Sb	12.10	2.97	8.76
Sn	13.22	12.56	11.96
Sr	1597.67	1633.67	1665.54
Th	11.85	10.27	12.65
Ti	0.16	0.17	0.17
U	1.00	0.60	0.60
V	53.03	53.71	46.41
W	1.38	1.73	0.80
Zn	354.21	372.25	182.06
Zr	49.85	61.70	58.66

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026



شکل ۷. تصویر صحرایی واریزه‌های موجود در کورهٔ قدیمی جوادیه و فراوان‌ترین بخش آن که سرباره‌ها می‌باشد.

Figure 7. Field image of the deposits present in the old Javadiyeh furnace, with the most abundant component being slag.



شکل۸. فراوانی (A) و چند نمونهٔ دستی از سرباره ها و قطعات موجود در این بقایای ذوب (B, C, D) که به صورت سنگ شناسی و کانی‌ها مشخص شده‌اند و کانی‌های مس‌دار در آن (B, C) مشخص شده است.

Figure 8. (A) Abundance and several hand samples of slag and fragments present in these smelting remains (B, C, D), identified in terms of lithology and minerals, with copper-bearing minerals specified in (B, C).

به‌نظر می‌رسد در این کوره که شیست‌ها و فلدسپارهای سدیک به‌عنوان منابع تأمین سیلیکات‌ها و سنگ‌های کربناته و کوارتز به‌عنوان شناورکنندهٔ بقایای حاصل از ذوب مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند اشکال (B ،C ،D) این مواد در فرآیند ذوب به‌عنوان کمک‌ذوب‌ها، کاهنده‌های نقطهٔ ذوب سنگ، و همچنین عوامل کمک‌کننده به شناورسازی و جدایش محصولات حاصل از ذوب به کار گرفته می‌شده‌اند. با توجه به وجود کانی‌های مس‌دار مانند مالاکیت، کالکوسیت و کالکوپیریت، نوع کمک‌ذوب‌ها و باقی‌مانده‌های آن‌ها، و همچنین چگالی کمتر از ۳ در سرباره‌های حاصل از ذوب، این کوره به‌عنوان یکی از کوره‌های قدیمی ذوب کانسنگ مس شناسایی شده است. به‌نظر می‌رسد کانسنگ مس‌دار از محلی دیگر به این کوره حمل شده است.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

بررسی‌های پتروگرافی سرباره‌های ذوب فلز نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهندهٔ این سرباره‌ها شامل پیروکسن، الیوین (از نوع فایالیت) و سیلیس است. حضور این فازها تأیید می‌کند که از سیلیکات‌ها به‌عنوان کمک‌ذوب برای افزایش سیالیت استفاده شده است، که این خود بیانگر دمای بالا و شرایط احیایی در فرآیند ذوب است. پیروکسن به صورت بلورهای دم‌چلچله‌ای و الیوین به شکل تیغه‌های کشیده مشاهده می‌شود که این ساختارها نتیجه سردشدن سریع پس از ذوب کانسنگ است. علاوه بر این، وجود کانی وستیت (FeO) نشان‌دهندهٔ انجام فرآیند ذوب در شرایط احیایی است. حضور اکسیدهای آهن همراه با کانی‌های سولفیدی مانند کوولیت (CuS) و کالکوسیت (Cu_2S) تأیید می‌کند که از کانسنگ‌های سولفیدی مس به‌عنوان منبع اولیهٔ مادهٔ خام استفاده شده است. این احتمال نیز وجود دارد که سنگ معدن پیش از ذوب برشته شده باشد، فرآیندی که طی آن کلسیناسیون رخ داده و سولفیدها به اکسیدهای مس تبدیل شده‌اند. شناسایی فازهای سولفیدی مس، از جمله کالکوسیت و کوولیت، در سرباره‌ها نشان می‌دهد که استخراج به‌طور کامل انجام نشده و بخشی از مادهٔ معدنی در سرباره‌های باقی‌مانده حفظ شده است. وجود حفره‌ها در سرباره‌ها نیز نشانهٔ آزادشدن مواد فرّار طی فرآیند احیاست. به‌طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که سنگ‌های خام حاوی سولفید مس برای استخراج به کار گرفته شده‌اند و حضور فایالیت در سرباره‌ها دمایی حداقل ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را برای کوره پیشنهاد می‌کند.

داده‌های به‌دست‌آمده از آنالیز ICP-OES سرباره نشان می‌دهد که این سرباره‌ها عمدتاً از(Fe_2O_3 ۲۶.۰۹ تا ۵۳.۷۵ درصد)،) SiO_2 ۲۷.۳۵ تا ۵۱.۱۳ درصد) و CaO ۱۱.۰۵ تا ۱۴.۶۶ درصد) تشکیل شده‌اند. این ترکیب شیمیایی، ویژگی سرباره‌های مبتنی بر فایالیت را نشان می‌دهد که در کوره‌های ذوب فلز مس رایج هستند. بالا بودن مقدار SiO_2 به استفاده از کمک‌ذوب‌های سیلیسی اشاره دارد که سیالیت سرباره را افزایش داده و جداسازی فلز را تسهیل می‌کند. با توجه به اینکه این سرباره‌ها از کوره‌های ذوب مس به‌دست آمده‌اند، میزان مس موجود در آن‌ها بین ppm ۱۴،۰۴۴ تا ۲۰،۷۳۷ است که مقدار قابل‌توجهی محسوب می‌شود. این مقدار بالا می‌تواند دو دلیل داشته باشد: اول، ناقص بودن فرآیند ذوب فلز که باقی‌ماندن مس در سرباره شده است؛ دوم، پرعیار بودن سنگ‌های خام تأمین‌کننده کوره ذوب که حاوی مس بیشتری بوده‌اند. همچنین، حضور مقادیر بالای استرانسیم و باریوم احتمالاً به استفاده از کمک‌ذوب‌های کربناته (مانند سنگ آهک) مربوط می‌شود که برای کاهش نقطه ذوب و تسهیل تشکیل سرباره به کار گرفته شده‌اند. مقدار پایین گوگرد (۰.۱۶ تا ۰.۲۰ درصد) در این سرباره‌ها، با وجود کانی‌های سولفیدی مانند کالکوسیت و کالکوپیریت در مواد اولیه، نشان‌دهنده شرایط احیایی قوی در کوره است که طی آن گوگرد تبخیر شده و در سرباره باقی نمانده است. وجود ناخالصی‌هایی مانند سرب و نقره نیز احتمالاً به ماهیت پلی‌متال سنگ‌های معدنی خام مربوط می‌شود که در کانسارهای ایران امری رایج است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، استان کرمان یکی از مناطق مهم فلزکاری ایران محسوب می‌شود و شواهد گسترده‌ای از فعالیت‌های متالورژیکی دوران باستان (با محوطه‌هایی مانند تل ابلیس و شهداد) در آن یافت شده است. محوطه‌هایی مانند تل ابلیس گواهی بر این مدعا هستند. بر اساس یافته‌ها، ذوب مس در کرمان به اواخر هزارهٔ ششم پیش از میلاد (حدود ۵۸۰۰ تا ۵۶۰۰ ق.م) بازمی‌گردد (Muhly 1989; Wertime 1968) و با استفاده از کانسنگ‌های اکسیدی و کربناتی مانند مالاکیت و کوپریت انجام می‌شده است. کوره‌های ذوب مس در این منطقه قادر بودند به دمای حدود ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد برسند .(Emami and Shahsavari 2020) علاوه بر این، می‌توان به یکی دیگر از محوطه‌های فلزکاری کهن در استان کرمان به نام محوطهٔ باستانی شهداد اشاره کرد که در جنوب شرقی ایران، یکی از مراکز کلیدی متالورژی در دوران پیش از تاریخ، به‌ویژه هزارهٔ ۳.ق.م، محسوب می‌شود (Thornton and Karlovsky, 2004) . کاوش‌ها بین سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۷ در لبهٔ غربی بلوک لوت، گورستان‌ها و کارگاه‌های پیش از تاریخ را آشکار ساخت که قدمت آن‌ها به ۳۱۰۰ تا ۲۷۵۰ پیش از میلاد بازمی‌گردد (Hakemi and Sajjadi, 1997). این محوطه، با کشف بیش از ۷۰۰ شیء برنزی و کارگاه‌های ذوب مس، نشان‌دهنده نقش کلیدی شهداد به‌عنوان یک مرکز تولید فلز در هزارهٔ سوم پیش از میلاد است .(Eskandari and Emami, 2022) کاوش‌ها و تحلیل سرباره‌های مسی این منطقه نشان‌دهندهٔ فعالیت گسترده ذوب فلز و استفاده از منابع معدنی متنوع است. این محوطه در مجاورت بیابان لوت قرار دارد و شواهد نشان می‌دهد که از ذخایر مسی اطراف آن به‌طور مؤثر بهره‌برداری شده است. فناوری متالورژی شهداد با استفاده از کمک‌ذوب‌ها و شرایط خاص ذوب، نقش مهمی در تولید اشیاء برنزی ایفا کرده است (Elikay Dehno et al., 2025). این یافته‌ها بر اهمیت شهداد به‌عنوان یک مرکز صنعتی و فرهنگی در ایران باستان تأکید دارند. شناسایی بقایای این کوره‌ها در نقاط مختلف استان، نقش کلیدی کرمان را در توسعهٔ فناوری‌های متالورژیکی دورهٔ کالکولیتیک نشان می‌دهد. در این میان، بررسی تأثیر فعالیت‌های ذوب مس در منطقهٔ جوادیه، که شواهد آن حاکی از فعالیت‌های معدنی و متالورژیکی گسترده است، می‌تواند درک بهتری از تاریخچهٔ این فناوری در منطقه ارائه دهد.

۷. نتیجه‌گیری

بررسی کورهٔ ذوب قدیمی غرب جوادیه نشان‌دهندهٔ طراحی پیشرفته‌ای است که با استفادهٔ بهینه از منابع محلی برای ذوب کانسنگ‌های مس شکل گرفته است. موقعیت کوره، با دسترسی به خاک رس، آب فصلی، سنگ‌های معدنی و گیاهان سوختی، بیانگر درک عمیق سازندگان از شرایط جغرافیایی و اقلیمی است. شواهد ساختاری، شامل سه بخش آماده‌سازی، آزمایش اولیه و

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

ذوب‌سازی با اختلاف ارتفاع مشخص، مشابه فرآیندهای صنعتی مدرن، پیچیدگی فنی و توجه به کنترل کیفیت را نشان می‌دهد. وجود کوره‌های آزمایشی برای تنظیم دما و ترکیب کمک‌ذوب‌ها، همراه با استفاده از شیست، فلدسپار سدیک، کربنات‌ها و کوارتز به‌عنوان کمک‌ذوب، دانش متالورژیکی بالای پیشینیان را تأیید می‌کند. این مواد با کاهش نقطهٔ ذوب و تسهیل جدایش فلز، نقش کلیدی در فرآیند داشته‌اند. طراحی دقیق مخزن ذوب، مجرای تخلیه و مکان قالب‌گیری نیز بر مهارت عملیاتی سازندگان دلالت دارند. تحلیل پتروگرافی سرباره‌ها، حضور پیروکسن (بلورهای دم‌چلچله‌ای سبز)، فایالیت (تیغه‌های کشیده)، وستیت، ایلمنیت و سولفیدهای مس (کوولیت و مس نیتیو) را نشان می‌دهد که شرایط احیایی و دمای بالای حدود ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد را تأیید می‌کند. حفره‌های سرباره، نشانهٔ انجماد سریع یا آزادسازی گازها هستند. آنالیز ICP-OES مقادیر بالای Fe_2O_3 (۲۶.۰۹–۵۳.۷۵٪) و SiO_2 (۲۷.۳۵–۵۱.۱۳٪) را آشکار می‌کند که تشکیل فایالیت و استفاده از کمک‌ذوب‌های سیلیسی را اثبات می‌کند. حضور CaO (۱۱.۰۵–۱۴.۶۶٪) نیز کاربرد شار قلیایی را نشان می‌دهد. میزان مس باقیمانده (۱۴,۰۴۴–۲۰,۷۳۷ ppm) حاکی از ذوب ناقص یا کانسنگ پرعیار است، در حالی که گوگرد پایین (۰.۱۶–۰.۲۰٪) شرایط احیایی قوی و احتمال برشته‌شدن سولفیدها را پیشنهاد می‌کند. وجود مالاکیت، کالکوسیت و کالکوپیریت در سرباره، استفاده از کانسنگ‌های سولفیدی را تأیید می‌کند. این یافته‌ها کورهٔ غرب جوادیه را به‌عنوان نمونه‌ای برجسته از فناوری باستانی معرفی می‌کنند که با مدیریت دقیق منابع و فرآیندها عمل می‌کرده است. پیشنهاد می‌شود مطالعات شیمیایی تکمیلی روی سرباره‌ها و مقایسه با کوره‌های مشابه منطقه انجام شود تا جزئیات بیش‌تری از این فناوری روشن گردد و میراث متالورژیکی ایران بهتر مستند شود.

سپاسگزاری: بدین‌وسیله از آقای دکتر مهدی رازانی به‌خاطر ارائهٔ مشاوره‌های علمی ارزشمند در طول انجام این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. همچنین، از شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید به دلیل فراهم‌نمودن شرایط مناسب برای اجرای این تحقیق، به‌ویژه در زمینهٔ پشتیبانی لجستیکی، قدردانی به عمل می‌آید. مراتب تشکر و امتنان خود را از مهندس ابراهیم‌زاده، مدیر اکتشاف، و مهندس شکری، مدیرعامل محترم این شرکت، به‌سبب حمایت‌های مستمر و همکاری صمیمانه‌شان ابراز می‌داریم. افزون بر این، از حسین مسعودی جوزچال به‌طور ویژه به‌خاطر همراهی و تلاش‌های صادقانه‌شان صمیمانه قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان: نویسندهٔ اول: تدوین و نگارش متن مقاله، تحلیل مطالعات پتروگرافی، تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، بحث و تفسیر نتایج. نویسندهٔ دوم: انجام مطالعات میدانی، نمونه‌برداری و نگارش بخش مربوط به مطالعات میدانی.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

دسترسی به داده‌ها و مواد: مجموعه‌داده‌های مورداستفاده و یا تحلیل‌شده در طول پژوهش حاضر از طریق درخواست منطقی از نویسندهٔ مسئول قابل دسترسی هستند.

پی‌نوشت‌ها

1. Preparation Part
2. Storage Part
3. Smelting Part
4. Flux Substances
5. Furnace
6. Conduit Discharge
7. Molding Place
8. Smelting Furnaces Slags
9. Flux Substances

References

Alipur, K. A. (1993). History of geology and mining in Iran. Tehran.

Elikay Dehno, S., Kamali, A. A., Beheshti, S. I., Ebrahimi, M., & Aarab, A. (2025). Unveiling Shahdad: Exploring ancient copper reserves and metallurgical practices on Iran's southeast plateau. L'Anthropologie, 129, 103343. https://doi.org/10.1016/j.anthro.2024.103343

Emami, M. (2006). Phase transition induced by solid solution in the pyroxene-rich ancient copper slags from Toroud, Iran. In Proceedings of the International Symposium of Archaeometallurgy. Canada.

Emami, M. (2014). TOROUD: The late motion for As–Sb bearing Cu production from 2nd millennium B.C. in Iran: An archaeometallurgical approach. Mediterranean Archaeology and Archaeometry, 14(2), 185–204.

Emami, S. M. A. (2016). Archaeometry, a discipline for linking archaeology to natural sciences (aims and scopes). Journal of Research on Archaeometry, 1(2). http://jra-tabriziau.ir/article-1-50-fa.html

Emami, S. M. A., & Shahsavari, M. (2020). Kahiro II: The importance of copper oxide extraction technology in 4th millennium BC in Halil River Basin. Journal of Research on Archaeometry, 6(2), 41–55.

Eskandari, N., & Emami, S. M. (2022). Retracing copper metallurgy in the Shahdad region (3rd millennium BCE). Journal of Archaeological Studies, 12(4), 23–45.

Frame, L. L. D., & Pleiner, R. (2004). Investigations at Tal-i Iblis: Evidence for copper smelting during the Chalcolithic period. Massachusetts Institute of Technology.

Hakemi, A. (1989). The copper smelting furnaces of the Bronze Age in

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.201]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 13:07 +0330 on Wednesday October 7th 2026

Shahdad. In South Asian Archaeology (pp. 119–132).

Hauptmann, A., Rehren, T., & Schmitt-Strecker, S. (2003). Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran) reconsidered. In Deutsches Bergbau-Museum.

Majidzadeh, Y. (1979). An early prehistoric coppersmith workshop at Tepe Ghabristan. In Akten des VII. Internationalen Kongresses für Iranische Kunst und Archäologie (pp. 82–92). Berlin.

Momenzadeh, M. (2005). An overview of ancient mines and mining in Iran. Bronze, 2(5).

Muhly, J. D. (1989). Çayönü Tepesi and the beginnings of metallurgy in the Old World. In Old World Archaeometallurgy (pp. 1–13).

Nezafati, N., Momenzadeh, M., Ahmadi, K., et al. (2017). A road map for the ancient mining and metallurgical studies in Iran. Journal of Research on Archaeometry, 3(1), 77–98. http://jra-tabriziau.ir/article-1-80-en.html

Pezeshkan, A. J., & Damghani, B. (2005). Mines and mining in Iran.

Pleiner, R. (1967). Preliminary evaluation of 1966 metallurgical investigation in Iran: Investigation at Tal-i Iblis.

Ramtin, I. (2008). Summary of 10,000 years of Iran's history (Pre-Islamic).

Rashidinejad, F. (2015). Iran mining industry based on the 20-year perspective 2025. In Proceedings of the 2nd International Future Mining Conference (pp. 235–244). Sydney, NSW.

Razani, M., Sohati, F., & Bagherzadeh-Kasiri, M. (2021). Archaeometry in cultural heritage and art studies (definitions, trends, and future challenges). Pajouheh Bastanshenasi, 7(1), 1–30.

Rehren, T., Boscher, L., & Pernicka, E. (2012). Large-scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran. Journal of Archaeological Science, 39(6), 1717–1727.

Rostoker, W., Pigott, V. C., & Dvorak, J. R. (1989). Direct reduction to copper metal by oxide–sulfide mineral interaction. Archeomaterials, 3(1), 69–87.

Thornton, C. P. (2009). The Chalcolithic and Early Bronze Age metallurgy of Tepe Hissar, northeast Iran: A challenge to the "Levantine paradigm" (Doctoral dissertation). University of Pennsylvania.

Thornton, C., & Lamberg-Karlovsky, C. (2004). A new look at the prehistoric metallurgy of southeastern Iran. Iran, 42(1), 47–59. https://doi.org/10.1080/05786967.2004.11834645

Weeks, L. (2016). Iran and the Bronze Age metals trade in the Persian Gulf. International Journal of the Society of Iranian Archaeologists, 2(3), 13–25.

Wertime, T. A. (1968). A metallurgical expedition through the Persian Desert. Science, 159.

حکیمی، ع.، و سجادی، س. م. س. (۱۳۷۶). گزارش دهمین فصل کاوش گروه باستان‌شناسی دشت لوت در محوطه باستانی شهداد. گزارش‌های باستان‌شناسی، ۱، ۸۷–۱۲۴.

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

Kamali, A., & Mehri, M. (2025). Investigation of the Structure of the Ancient Copper Smelting Furnace in Western Javadiyeh, Kerman: Petrographic and Geochemical Analysis of Slags, *Journal of research on Archaeometry, 11*(2),11201 DOI: 10.66224/jra.2025.11.201