

Exploration of Mining and Slag Sites of Ancient Metal Smelting in Khatam County, Yazd Province

Amin Allah Kamali¹ , Mohammad Hossein Azizi Kharanaghi² ,
Seyed Iraj Beheshti³ , Ali Arab⁴ 

Type of Article: Research

Pp: 37-64

Received: 2023/03/01; Revised: 2023/05/06; Accepted: 2023/05/07

 <https://doi.org/10.22034/PJAS.832>

Abstract

The slag sites under study are located in Khatam County, Yazd Province. In the archaeological surveys of Khatam County in 1400 AH, twelve metal smelting sites were identified through abundant metallic slag, and each of these sites was sampled. Petrographic analysis revealed that the predominant slag is iron, with only one instance of copper slag. The sites where metal smelting occurred, attributed to historical and Islamic periods based on pottery, exhibited evidence of iron smelting and its compounds in eleven samples. These samples contain metallic minerals such as wüstite, marcasite, hematite, and magnetite. Marcasite and wüstite minerals are related to smelting furnace processes and are products of mineral substances. It appears that in some mines in the region, magnetite and hematite are the predominant minerals, while in others, hematite is the predominant mineral, with a smaller amount of magnetite, which is evident in these primary minerals within the slag. Another sample related to copper slag exhibited small vesicular structures and limited copper ore minerals (chalcopyrite, digenite, and metallic copper) within the slag matrix. Alongside these primary minerals, there is a flow-like green glassy component indicating high furnace heat. The analytical results show that the MgO content in the samples is less than the amount of lime. Therefore, the limestone in this area is mainly ordinary limestone and not dolomite. Chemical analysis revealed that metal workers in this area were more successful at producing sponge iron.

Keywords: Archaeological Survey, Slag, Iron, Ancient Mining, Khatam.



Parseh Journal of Archaeological Studies (PJAS)

Journal of Archeology Department of
Archeology Research Institute, Cultural
Heritage and Tourism Research
Institute (RICHT), Tehran, Iran

Publisher: Cultural Heritage and
Tourism Research Institute (RICHT).

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Cultural Heritage and
Tourism Research Institute (RICHT).
This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial
uses of the work are permitted, provided
the original work is properly cited.

© The Author(s)



1. Assistant Professor, Department of Archaeometry and Natural Sciences, Research Center for Conservation of Culture Relics (RCCCR), Research institute of Cultural Heritage & Tourism (RICHT), Tehran, Iran (Corresponding Author).

Email: a.kamali@richt.ir

2. Assistant Professor, Department of Prehistoric Archaeology, Iranian Center for Archaeology (ICAR), Research institute of Cultural Heritage & Tourism (RICHT), Tehran, Iran.

3. Research Expert, Department of Archaeometry and Natural Sciences, Research Center for Conservation of Culture Relics (RCCCR), Research institute of Cultural Heritage & Tourism (RICHT), Tehran, Iran.

4. Researcher, Institute of Archaeology, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citations: Kamali, A. A., Azizi Kharanaghi, M. H., Beheshti, S. I. & Aarab, A., (2025). "Exploration of Mining and Slag Sites of Ancient Metal Smelting in Khatam County, Yazd Province". *Parseh J. Archaeol Stud.*, 9(32): 37-64. <https://doi.org/10.22034/PJAS.832>

Homepage of this Article: <https://journal.richt.ir/mbp/article-1-832-en.html>

Introduction

Iran has long been recognized as a center for mining and metal smelting. Archaeological evidence indicates that northern and central Iran are among the oldest centers of metallurgy in the world. The presence of rich mineral reserves in Iran, among other factors, has influenced the growth of mining and metalworking in this region (Momenzadeh, 2005). Due to the existence of various metal ores and advanced cultures in Iran, this area can be identified as one of the main hubs of technological innovation in the field of ancient mining and metalworking. Khatam County, located in the southern part of Yazd Province, holds particular significance in the realm of iron slag. One of the earliest efforts to produce steel worldwide took place in this region (Alipour et al., 2021). Considering the evidence of steel production in this area, it is essential (Alipour, 2017) to understand the role Khatam played in iron production during the Islamic and Sassanian periods. To investigate this matter, 12 sites in Khatam County were selected for studying iron slag. The main objective of this research includes petrographic and geochemical analysis of the slag to identify the type of extracted metal(s) and the extraction process and production of metal(s) at these sites. Additionally, the provision of necessary minerals for mining in this area is also under scrutiny. Historical and field research methods were employed for this study, involving the collection of data and archaeological investigations; field studies, such as topographic mapping, photography, identification of sites and metal smelting furnaces; and examination of samples using polarizing microscopes and XRF devices. This research has addressed primary inquiries related to the type of metals in slag, the mining process, and metal production at Khatam's iron slag sites. Overall, Khatam County held significant importance in the production of metals during ancient and Islamic times. This region is recognized as one of the ancient mining and metalworking centers, and further research into the history and mining processes in this area could provide additional insights into the history of metalworking in Iran.

Discussion

Based on XRF chemical analyses of the slag, the results indicate that the majority of the mineral content in these slags consists of iron ore, with only one case showing the presence of copper. The CaO concentrations in these slags range from 3.59 to 28.41%, and an increase in CaO leads to the production of calcium-rich olivine. The type of slag (flow, permeable, massive, or furnace bottom) significantly impacts the results of chemical analysis and the ratio of oxides of the main elements (metallic oxides and silica). Additionally, the high amount of CaO facilitates the formation of a calcium-rich silicate phase. Petrographic microscopy studies confirm these findings, revealing observable olivine phases and primary silicate phases with metallic iron minerals such

as magnetite and hematite. Due to the silica content, the addition of limestone to the smelting process increases the amount of duplex iron (Fe_3O_4). Consequently, silica stabilizes triplex iron oxide (hematite), while limestone stabilizes spinel iron oxide (magnetite). Moreover, microscopic examinations primarily reveal metallic minerals such as magnetite and metallic iron. Furthermore, sponge iron, like many other ancient civilizations in the region under study, was produced. The production of this type of iron requires less technical knowledge than other types of iron (Abbasnejad, 2009).

Surveying the region revealed that plants such as pistachios and wild almond produce high-quality charcoal. Since blacksmiths have no idea about using additional limestone in the furnace, the smelted slags were highly adhesive, leading to significant iron loss. The use of limestone in iron removal creates slags with fine properties that are easily separated from the iron (Abbasnejad, 2009). A good slag resulting from smelting should contain 30 to 40% limestone. Tests conducted on iron ore in this region show limestone percentages ranging from 3.59 to 28.41%. The slag analysis results also indicate a small amount of limestone, averaging approximately 11.38%. The deficiency of these two elements in slag, as they play crucial roles in reducing smelting heat and separating iron from slag, can indicate high iron levels and the inadequacy of slag (adhesiveness, viscosity, high density), resulting in low-quality sponge iron. The percentage of Fe_2O_3 ranges from 23.20 to 74.25%, and the percentage of Al_2O_3 ranges from 0.003 to 0.94%. The percentage of MgO in the tested slags is less than 0.003%. According to the mineral analysis, the most important iron minerals in this region include hematite (Fe_2O_3) and magnetite (Fe_3O_4). Due to technical flaws in these furnaces, sponge iron contains impurities such as silica, phosphorus, aluminum oxide, manganese oxide, and other metallic oxides, as confirmed by various tests conducted on ore and slag.

Conclusion

Eleven samples from the metal smelting site showed evidence of iron smelting and its compounds. In these samples, metallic ores such as wüstite, marcasite, hematite, and magnetite are observed. Marcasite and wüstite ores are related to smelting furnace processes and are mineral byproducts. It seems that in some mines in the region, magnetite and hematite are predominant, while in others, hematite is less prevalent, and magnetite dominates. Additionally, in the sample related to copper smelting slag, small and limited vesicles of copper ores (covellite, digenite, and metallic copper) are observed alongside a part of the green glassy matrix, indicating high furnace heat. This primary mineral evidence is observed in the slags. Considering the changes in the calcium oxide (CaO) concentration, it can be inferred that this substance was added during smelting operations to aid in smelting and reduce the temperature of the furnace materials. The microscopic results of some slags reveal primary minerals, mostly hematite and magnetite metallic

ores, indicating a magmatic origin for the utilized minerals. The percentages of silica (SiO_2), magnesium, and aluminum in these slags are relatively low. Analyses of these slags and iron stones from this region show that a deficiency of CaO and SiO_2 leads to iron loss in the slag while increasing the iron content within it.

Based on this research, it is likely that iron ore was extracted from mines near the site and was subsequently transported to this location. Given the presence of iron mines at distances of 8, 10, and 15 kilometers from these sites, these mines are likely the source of these slags. Regarding the archaeology of the region, historical references indicate that the area held significance and prominence in various historical periods, particularly during historical and Islamic eras. However, due to insufficient information about the archaeology of the region and the lack of precise dating of these sites, accurate dating of these sites is unfeasible.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere appreciation to Dr. Gholamreza Rahmani, Head of the Research Institute of Conservation and Restoration of Historical Monuments, for his kind cooperation. They also gratefully acknowledge the esteemed reviewers for their valuable comments and scholarly guidance.

Observation Contribution

In this study, the authors contributed as follows: First author: synthesis and writing of the manuscript, Second author: sampling and archaeological investigations, Third author: petrographic studies, Fourth author: data analysis.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest and that all ethical standards for citation and publishing have been observed.

بررسی معدنکاوای و محوطه‌های سرباره‌ای ذوب فلز کهن در شهرستان خاتم، استان یزد

امین‌اله کمالی^I، محمدحسین عزیزی خرانق^{II}، سید ایرج بهشتی^{III}،
علی اعراب^{IV}

نوع مقاله: پژوهشی
صص: ۶۴ - ۳۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

شناسه دیجیتال (DOI): <https://doi.org/10.22034/PJAS.832>

چکیده

محوطه‌های سرباره‌ای مورد مطالعه در شهرستان خاتم، استان یزد واقع شده‌اند. در بررسی‌های باستان‌شناسی شهرستان خاتم در سال ۱۴۰۰ ه.ش، ۱۲ محوطه ذوب فلز از طریق فراوانی سرباره‌های فلزی شناسایی شدند و هر یک از محوطه‌ها نمونه‌برداری شدند. روش پژوهش شامل مطالعات تاریخی، بررسی‌های میدانی باستان‌شناسی، و تحلیل‌های آزمایشگاهی (پتروگرافی و آنالیز شیمیایی به روش XRF) بوده است. نتایج پتروگرافی نشان داد که ۱۱ محوطه به ذوب فلز آهن و تنها یک محوطه (معدن سید نظری) به ذوب فلز مس اختصاص دارد. در سرباره‌های آهنی، کانی‌های وستیت، مارکاسیت، هماتیت و مگنتیت شناسایی شدند که وستیت و مارکاسیت به عنوان محصولات فرآیند کوره ذوب و هماتیت و مگنتیت به عنوان کانی‌های اولیه حضور دارند. در سرباره مسی، وزیکول‌های کوچک حاوی کانی‌های مس (کوپریت، دیجنیت و مس فلزی) همراه با بخش شیشه‌ای جریانی سبز رنگ مشاهده شد که نشان‌دهنده حرارت بالای کوره ذوب (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. آنالیز شیمیایی XRF نشان داد که مقدار Fe_2O_3 در سرباره‌های آهنی بین ۲۰/۲۳ تا ۷۴/۲۵٪ و SiO_2 بین ۲۲/۰ تا ۶/۱۲٪ متغیر است. میزان CaO بین ۳/۵۹ تا ۲۸/۴۱٪ می‌باشد. کمبود سیلیس و کربنات در برخی سرباره‌ها نشان‌دهنده غلظت بالای آهن و کیفیت پایین‌تر آهن اسفنجی تولید شده است. نتایج حاکی از آن است که فلزگران منطقه عمدتاً به تولید آهن از طریق فرآیند احیای مستقیم پرداخته‌اند. هم‌چنین، با توجه به وجود معادن سنگ آهن در فواصل ۸ تا ۱۵ کیلومتری محوطه‌ها، احتمالاً مواد خام از این معادن تأمین شده است. محوطه‌ها براساس سفال‌های یافت شده به دوره‌های تاریخی و اسلامی منسوب شده‌اند.

کلیدواژگان: بررسی باستان‌شناسی، سرباره، آهن، معدن کاری کهن، خاتم.

- I. استادیار گروه باستان‌سنجی و علوم طبیعی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران (نویسنده مسئول). Email: a.kamali@richt.ir
- II. استادیار گروه باستان‌شناسی پیش‌اتاریخ، پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.
- III. کارشناس پژوهشی گروه باستان‌سنجی و علوم طبیعی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه، تهران، ایران. میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.
- IV. کارشناس مؤسسه باستان‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ارجاع به مقاله: کمالی، امین‌اله؛ عزیزی خرانقی، محمدحسین؛ بهشتی، سید ایرج؛ و اعراب، علی. (۱۴۰۴). «بررسی معدنکاوای و محوطه‌های سرباره‌ای ذوب فلز کهن در شهرستان خاتم، استان یزد». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۹ (۳۲): ۶۴-۳۷. <https://doi.org/10.22034/PJAS.832>

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه: <https://journal.richt.ir/mbp/article-1-832-fa.html>



فصلنامه علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه
نشریه پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه
میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

ناشر: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسنده (گان) آن است. © ۱۴۰۴ ناشر این مقاله، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری است. این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

© The Author(s)



مقدمه

ایران از دیرباز کانون معدن‌کاری و فلزکاری کهن بوده است. شاید فلات مرکزی ایران یکی از اولین مناطق جهان باشد که انسان فلز را در آن شناخته و مورد استفاده قرار داده است. قدمت تمدن در سرزمین ایران و غنی بودن آن از نظر وجود ذخایر معدنی از علل اساسی رشد معدن‌کاری و ذوب فلز در این بخش از جهان است (مومن‌زاده، ۱۳۸۴). شواهد باستان‌شناختی نشان می‌دهند شمال و مرکز ایران از قدیمی‌ترین مراکز فلزکاری جهان‌اند (وولف، ۱۳۸۸). منابع زمین‌شناسی تأثیر به‌سزایی بر جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و آئینی جوامع ایرانی داشته‌اند. در دهه‌های اخیر، مطالعه معادن و استخراج آن‌ها در باستان‌شناسی اهمیت یافته، اما معدن‌کاوی مدرن بسیاری از معادن باستانی را نابود کرده است. مستندنگاری مناسب می‌تواند از این میراث کهن حفاظت کند. ایران با وجود کانی‌های متنوع و فرهنگ‌های پیشرفته پیش‌ازتاریخ، یکی از مراکز اصلی نوآوری‌های تکنولوژیکی در معدن‌کاری و فلزکاری کهن محسوب می‌شود. با توجه به وسعت و تنوع زیستی فلات ایران، بررسی این فرایندها نیازمند رویکرد منطقه‌ای است. یکی از دلایل اهمیت شهرستان خاتم در جنوب استان یزد در مطالعات مربوط به سرباره‌های آهن از آن‌رو بوده که یکی از نخستین تلاش‌ها برای ساخت فولاد در دنیا در همین محدوده رخ داده است (Alipour et al., 2021). از آنجا که شواهد تولید فولاد در شهرستان خاتم به دوره سلجوقی بازمی‌گردد (Alipour, 2017)؛ بنابراین، لازم بود تا مشخص گردد این شهرستان از نظر ظرفیت تولید آهن در دوران اسلامی و ساسانی چه جایگاهی داشته است.

محوطه‌های سرباره‌ای مورد مطالعه ۱۲ مورد می‌باشد که در شهرستان خاتم، استان یزد قرار گرفته‌اند. این محوطه‌ها طی پروژه بررسی باستان‌شناسی شهرستان خاتم (بخش‌های هرات، چاهک و ایثار) که در بهار ۱۴۰۰ ه.ش. به منظور تکمیل نقشه باستان‌شناسی کشور با حمایت و تأمین اعتبار ازسوی پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری صورت گرفت، شناسایی شده‌اند. طی این بررسی آثار مختلف از دوران پیش‌ازتاریخ تا دوران متأخر اسلامی شناسایی و معرفی گردید و محوطه‌های مربوط به معدن‌کاوی کهن و فلزگری با توجه به غنای معدنی منطقه، بخشی از آثار شناسایی شده، طی این پروژه بودند (عزیزی‌خرانقی، ۱۴۰۰).

در این پژوهش، با توجه به اهمیت محوطه‌های سرباره‌ای در شناسایی شواهد معدن‌کاری و فلزکاری، به بررسی این محوطه‌ها در منطقه شهرستان خاتم با تمرکز بر معادن باستانی پرداخته شده است. در این پژوهش، محوطه‌های سرباره‌ای مانند سرباره مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ شناسایی معادن منطقه و ارتباط آن‌ها با سرباره‌های مورد مطالعه، پراکندگی‌های سرباره‌ای و ارتباط آن‌ها با یکدیگر، مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای دستگاهی جهت دستیابی به فرضیات مطرح شده است. **پرسش‌های پژوهش:** (۱) نوع فلز یا فلزات سرباره‌ها در محوطه‌های مورد بررسی چیست؟ (۲) فرآیند معدن‌کاری، استحصال و تولید فلز در محوطه‌های سرباره‌ای مورد مطالعه به چه صورت است؟ (۳) کان‌سنگ‌های مورد نیاز معدن‌کاری محوطه‌های یزد از کدام معدن تأمین می‌گردیده است؟

روش پژوهش: پژوهش حاضر با هدف انجام پژوهش‌های بنیادی و با استفاده از روش‌های تحقیقات تاریخی، شامل گردآوری اطلاعات و بررسی‌های باستان‌شناسی، انجام شده است. در مطالعات کتابخانه‌ای، از کتب تاریخی و زمین‌شناسی، مقالات، پایان‌نامه‌ها و گزارش‌های باستان‌شناسی منطقه استفاده شده است؛ هم‌چنین، مطالعات و بررسی‌های میدانی شامل تهیه نقشه‌های توپوگرافی منطقه، عکس‌برداری، شناسایی محوطه‌ها و تعیین محدوده، و شناسایی کوره‌های ذوب فلز انجام شده است. در آزمایشگاه پتروگرافی پژوهشکده حفاظت و مرمت، از ۱۲ نمونه از محوطه‌های سرباره‌ای، مقطع نازک-صیقلی به ضخامت ۳۰ میکرون تهیه شده و با استفاده از

میکروسکوپ پلاریزان مدل James Swift مورد مطالعه قرار گرفتند. در این روش، ابتدا لایه نازکی به ضخامت ۳۰ میکرون از نمونه مورد نظر بر روی لام آزمایشگاهی تهیه شده و پس از اتمام فرآیند برش و ساب، نمونه کاور شده تا از آسیب‌های احتمالی مصون بماند؛ در نهایت، مقطع نازک-صیقلی (Thin section-Polish) آماده مطالعه می‌باشد. آنالیز شیمیایی سرباره‌ها با دستگاه XRF شرکت AMETEK مدل Spectro Xepos (ED-XRF) در آزمایشگاه مؤسسه باستان‌شناسی، دانشگاه تهران انجام شده است. برای آنالیز نمونه‌ها، ابتدا آن‌ها را به شکل پودر تبدیل کرده و سپس به قرص جامد فشرده شدند؛ سپس نمونه مورد آنالیز را در محفظه مخصوص دستگاه قرار داده و آنالیز می‌شوند. ۱۲ نمونه از محوطه‌های سرباره‌ای مورد آنالیز شیمیایی XRF قرار گرفتند.

پیشینه پژوهش

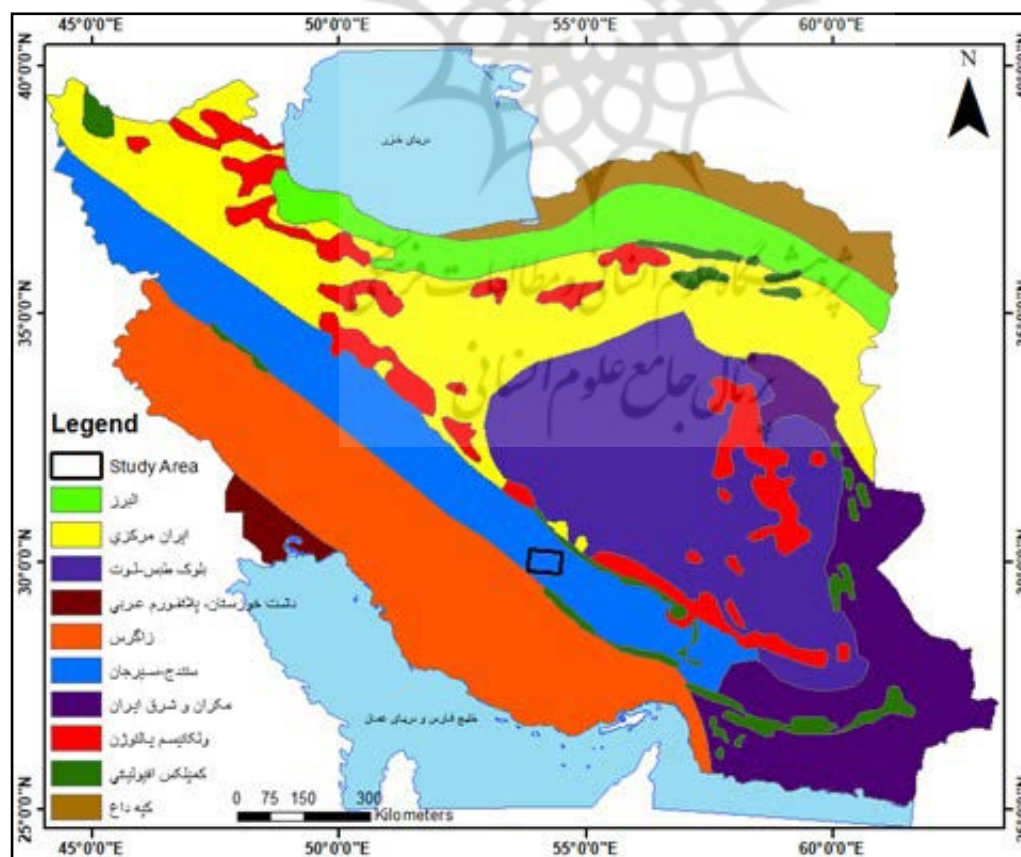
سرزمین ایران یکی از مهم‌ترین پیشگامان صنعت فلزکاری در جهان باستان محسوب می‌شود. اولین ابزارهای فلزی در این منطقه از مس ساخته شده‌اند که عمدتاً شامل ابزارهای کشاورزی و اشیاء تزئینی بوده‌اند (Ramtin, 2008). ایران با توجه به شواهد متعدد فرآوری و گداحت کانسنگ‌ها و فعالیت مستمر معدنی از حدود ۹۰۰۰ سال پیش، یکی از پیشگامان مهم در حوزه معدن‌کاری و فلزکاری باستان به‌شمار می‌آید (مؤمن‌زاده، ۱۳۸۴؛ Rashidinejad, 2015). فرهنگ‌ها و تمدن‌های باستانی ایران، غنای منابع طبیعی و سوابق دیرینه معدن‌کاری و فلزکاری، همگی گواه بر این ادعا هستند (Zavosh, 1997). یافته‌های باستان‌شناسی نشان می‌دهند که فلات ایران در طول تاریخ، منطقه‌ای مستعد برای استخراج و فرآوری فلزات بوده است. این نتایج از گستره زمانی نوسنگی تا عصر آهن و هم‌چنین آثار به‌دست‌آمده از تپه‌ها و مناطق پیش‌ازتاریخی تا آغاز عصر تمدن در ایران باستان حکایت دارند. این یافته‌ها حاکی از آن است که مواد معدنی فلزی و غیرفلزی مانند: مس، آهن، سرب، روی، قلع، انواع گوهر، سنگ‌های ساختمانی و کاربردی نظیر: سیلیس (چخماق)، نمک، گوگرد و پتاس به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گرفته‌اند (باقریان، ۱۳۹۰). پژوهش‌های متعددی در زمینه معدن‌کاری و فلزکاری کهن در ایران، به‌ویژه در فلات مرکزی انجام شده است (Abbasnejad, 2009; Momenzadeh, 2004; Nezafati & Pernicka, 2012; Ovissi, 2004; Vatandoust, 2004; Stöllner, 2004; et al., 2017). پروژه‌های معدن‌کاوای و فلزکاری کهن در محوطه‌های وشنوه و اریسمان، از اولین تحقیقات برجسته در این حوزه به‌شمار می‌روند (Chegini, 2004; Stöllner, 2004; et al., 2004). تاریخ معدن‌کاری در ایران را می‌توان به دو دوره اصلی تقسیم کرد؛ دوره نخست، مربوط به معادن متروکه و دوران باستان و پیشامدرن است. دوره دوم که معدن‌کاری مدرن محسوب می‌شود، با بهره‌گیری از تکنیک‌های غربی از زمان «فتحعلی‌شاه قاجار» (۱۷۹۷-۱۸۳۴) و تلاش‌های «عباس میرزای ولیعهد» آغاز گردید (Ghorbani, 2013). تاکنون پژوهش‌های متنوعی درباره معدن‌کاری و فلزکاری کهن در ایران انجام شده است که بخش عمده‌ای از آن‌ها در قالب فعالیت‌های کمیته معدن‌کاری و فلزکاری کهن ایران صورت پذیرفته و بخش دیگری حاصل پایان‌نامه‌های دانشگاهی و طرح‌های پژوهشی است؛ ازجمله مهم‌ترین این مطالعات می‌توان به پژوهش‌های «رحمت عباس نژادسرسی» درباره فلزکاری در جنوب شرق ایران و دشت قزوین (عباس نژادسرسی، ۱۳۷۳؛ ۱۳۸۷)، مطالعات اسلامی کردی درباره شمال فلات مرکزی (اسلامی‌کردی، ۱۳۹۱)، تحقیقات «باغبادرانی» در کول تپه هادیشهر (باغبادرانی، ۱۳۹۵) و بررسی‌های «قاسم نژاد» در خراسان جنوبی (قاسم نژاد، ۱۳۹۶) اشاره کرد. از طرح‌های پژوهشی می‌توان به طرح‌های «بهشتی» درباره میراث معدن‌کاری در ناحیه انارک و بانک اطلاعاتی معادن باستانی شمال ایران مرکزی (بهشتی، ۱۳۹۳؛ ۱۴۰۰)، مطالعات «الیکایی» پیرامون شواهد معدن‌کاری کهن در غار بتخانه، گل‌گل کوه‌دشت و شهداد (الیکایی، ۱۳۹۶؛ ۱۳۹۸؛ ۱۳۹۹)، بررسی «سیدین» درباره فرآیندهای

ذوب فلزات در دوره ساسانی (سیدین، ۱۳۹۴)، پژوهش‌های «رحیمی» درباره معادن کهن نقره و بانک اطلاعاتی محوطه‌های فلزکاری کهن (رحیمی، ۱۳۹۵؛ ۱۴۰۰؛ ۱۴۰۲)، تحقیقات «میرشکرایبی» پیرامون معادن کهن، تلاقی فرهنگ و طبیعت (میرشکرایبی، ۱۳۹۵)، مطالعه «نظافتی» درباره نقشه راه مطالعات معدن‌کاری و فلزکاری کهن در ایران (نظافتی، ۱۳۹۶) و بررسی‌های «غلامی» درباره شیوه‌های معدن‌کاری در گذشته (غلامی، ۱۳۹۷) اشاره کرد که طیف وسیعی از جنبه‌های فلزکاری و معدن‌کاری کهن را پوشش می‌دهند.

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، محدوده‌ای میان سه استان یزد، کرمان و فارس است که دارای غنی‌ترین معادن سنگ آهن و مس در کشور می‌باشد. یکی از مؤثرترین روش‌های شناسایی شواهد معدن‌کاوی و ذوب فلزات در گذشته، انجام مطالعات باستان‌شناسی در این ناحیه است. در بررسی‌های باستان‌شناختی شهرستان خاتم (شامل: بخش‌های هرات، چاهک و ایثار) ۱۸ محوطه باستانی با شواهد فلزکاری و معدن‌کاوی کهن شناسایی شده که از این میان، ۱۲ محوطه در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (عزیزی خرائقی، ۱۴۰۰؛ کمالی و همکاران، ۱۴۰۱).

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی، بخشی از پهنه ساختاری دما پایین-فشار بالا سندج-سیرجان است که دربردارنده سنگ‌های رسوبی و ماگمایی است که تحت تأثیر فازهای دگرگونی بعدی قرار گرفته‌اند (شکل ۱). این مجموعه دگرگونی به عبارتی دیگر یک پنجره ساختاری از کمپلکس دگرگونی در کمر بند کوه‌زایی زاگرس است که در پهنه جوش خورده، طی برخورد قاره عربی-آفریقا با خرده قاره



شکل ۱: موقعیت محدوده در زون‌های رسوبی-ساختاری ایران (Stocklin, 1968).

Fig. 1: Location of the area within the sedimentary-structural zones of Iran (Stocklin, 1968).

ایران مرکزی تشکیل شده است و بین دو کمربند افیولیتی خوی-نیریز و نائین-بافت قرار گرفته است (Ghasemi & Talbot, 2006). به‌طورکلی، پهنه‌ سنندج-سیرجان بخش تکتونوماگمایی و دگرگونی کمربند کوه‌زایی زاگرس است (Stocklin, 1968). که از رسوبات پالئوزوئیک تا کرتاسه و سنگ‌های دگرگونی فشار بالا-دمای پایین و فشار پایین-دمای بالا در جنوب خردۀ قاره ایران تشکیل شده است.

شهرستان خاتم در حدفاصل رشته‌کوه‌های زاگرس، ایران مرکزی و سنندج-سیرجان و بین دو گسل مهم و سراسری نائین-بافت (دهشیر) در شمال و روراندگی زاگرس در غرب قرار دارد. گسل نائین-بافت با راستای شمال غرب-جنوب شرق از بخش میانی منطقه عبور می‌نماید و بخش‌های شرقی این گسل نسبت به نواحی غربی پایین افتاده و این امر موجب به‌وجود آمدن گودال‌های متعدد مانند: کویر لوت، کویر ابرکوه، باتلاق گاوخونی و... در امتداد این گسل شده است.

سنگ‌های دوران اول پالئوزوئیک به جز بخشی از رسوبات پرمین بقیه تقریباً شامل مجموعه‌ای از انواع سنگ‌های دگرگونی هستند. که از جنس دولومیت‌های قهوه‌ای، میکاشیست، کالک‌شیست و مرمر هستند. ارتفاعات کوه سفید که در بخش‌هایی به نام «چاه‌براق» نیز نامیده می‌شود، بخش عمده ارتفاعات مذکور از جنس سازندی به نام «کمپلکس هرات» است. این کمپلکس شامل دو بخش قدیم و جدید است؛ از آنجا که سنگ‌ها و نهشته‌های این واحد عمدتاً و به‌طورکلی در بخش عمده‌ای شامل انواع شیست می‌باشند.

کمپلکس دگرگونی توتک در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان از جمله مناطقی است که در آن واحدهای سنگی پالئوزوئیک رخنمون دارد. این مجموعه دگرگونی به‌طور غالب از تناوبی از مرمر، شیست، آمفیبولیت و گنایس با سن کامبرین تا کربنیفر زیرین تشکیل شده است. رسوبات سازند جمال مربوط به دوره پرمین، بیشتر از نوع کربناته است.

در محدوده مورد مطالعه سنگ‌ها و لایه‌های تریاس برون‌زد نداشته و قدیمی‌ترین برون‌زدهای دوران دوم مربوط به ژوراسیک است.

سازند ساچون از کنگلومراها، ماسه‌سنگ‌ها و مارن‌های گچ‌دار قرمز تشکیل گردیده (واحد PEs) و سازند جهرم که عمدتاً آهکی است، مستقیماً بر روی PEs تشکیل شده است. سن این سازند رو به پالئوسن زیرین نسبت داده‌اند.

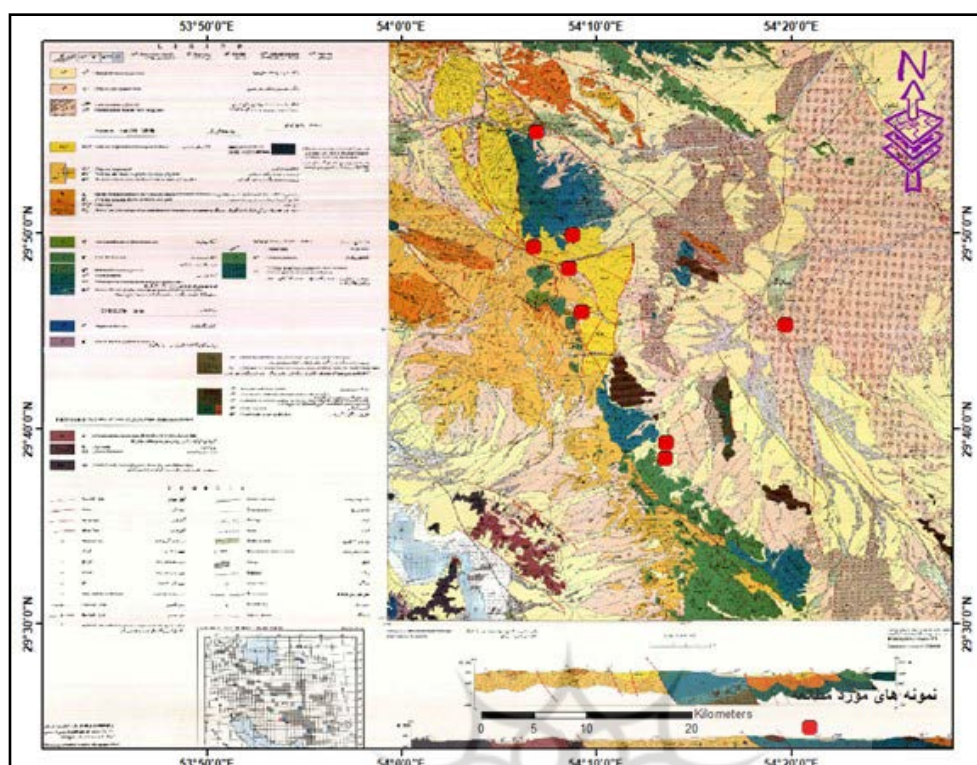
فلیش‌های آئوسن میوسن به‌صورت مجموعه‌ای ستبر و گسترده عمدتاً در جنوب باختری گسل چاهک-قوری پدیدار گشته است. این مجموعه همه پیکره‌های افیولیتی دگرگونی رسوبی، از پالئوزوئیک زیرین تا آئوسن زیرین را دربر می‌گیرد. در درون فلیش‌ها تکه‌هایی از سازندهای تاربور، جهرم، ساچون، سروک و پیکره‌های بسیار بزرگی از مرمرها، آمفیبولیت‌ها و میکاشیست‌های زون سنندج-سیرجان دیده می‌شود که نشان‌دهنده آن است که فلیش در یک زون بسیار پویا تشکیل شده است (روشن‌روان و اشراقی، ۱۳۸۰)، (شکل ۲).

محوطه‌های سرباره‌ای

نقشه پراکندگی‌های محوطه‌های سرباره‌ای شهرستان خاتم (۱۲ محوطه) در شکل ۳، مشخص شده است؛ هم‌چنین در شکل‌های ۴، ۵ و ۶، تصاویر محوطه‌های مذکور به‌همراه نمونه‌های سرباره‌های جمع‌آوری شده طی بررسی باستان‌شناسی، ارائه شده است. در ادامه، محوطه‌هایی که طی بررسی، آثار معدن‌کاوی کهن و فلزکاری از آن‌ها شناسایی شده است، معرفی می‌گردد.

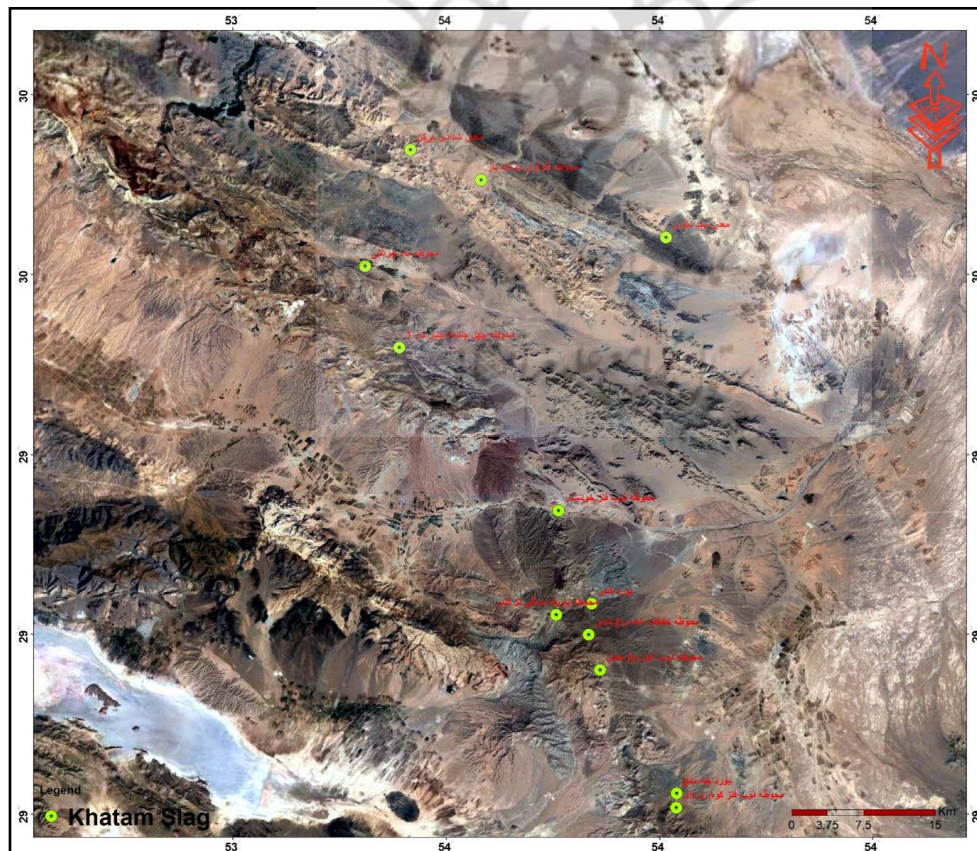
۱. یورد ۱ چاه مُنج

یورد چاه مُنج در مرز جنوب غربی هرات و در ۱۶ کیلومتری جنوب غرب بخش چاهک واقع شده



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چاهک (روشن‌روان و اشراقی، ۱۳۸۰).

Fig. 2: Geological map of Chahak at a scale of 1:100,000 (Roshanravan & Eshraghi, 2001).



شکل ۳: موقعیت محوطه‌های سرباره در شهرستان خاتم (گوگل ارث، با برجسته‌سازی محوطه‌ها؛ نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 3: Location of slag sites in Khatam County (Google Earth, with highlighted sites; authors, 2023).

است. ابعاد تقریبی این یوردها ۲۱×۱۵ متر و ارتفاع آن‌ها تقریباً ۱/۲ متر بوده که بخش‌هایی از سنگ چین‌های آن باقی مانده است. استفاده از این یورد، بنا به گفته اهالی منطقه از دوره پهلوی اول شروع شده و هم‌چنان نیز از آن استفاده می‌شود. این یورد دارای سرباره‌های جریانی و متخلخل در ابعاد متفاوت و از نوع آهن است (شکل ۴: الف).

۲. معدن سید نظری

معدن شدادی سید نظری در ۱۷ کیلومتری شمال غربی شهر هرات و در منطقه حفاظت‌شده محیط‌زیست معروف به سید نظری بخش مرکزی شهرستان خاتم قرار دارد. این معدن با ابعاد ۷×۰/۹ متر، عمق ۳/۵ متر و در ارتفاع ۱۷۴۰ متری از سطح دریا در کف زمین و بستر صخره‌ای حفر گردیده است. برای دسترسی به داخل این معدن نیاز به تجهیزات لازم جهت صخره‌نوردی است. بر روی بستر صخره‌ای این معدن آثار تعدادی حفره کوچک نیز به چشم می‌خورد که به احتمال زیاد کاربردی شبیه به جوغن داشته‌اند. در اطراف دهانه این معدن شواهدی از پراکندگی سرباره و سنگ‌های سبز رنگی که احتمالاً حاوی رگه‌های مس هستند، وجود دارد (شکل ۴: ب). با فاصله حدود ۵۵۰ متری شمال شرقی و ۱۰۰ متری شرق معدن شواهد دیگری از محوطه‌های مرتبط با معدن کاوی شدادی از جمله اشکفت کفتاری و اشکفت معدن سید نظری قرار دارند که به وضوح نشانی از آگاهی پیشینیان از وجود ذخایر فلزی در این منطقه است. در این اثر، هیچ مواد فرهنگی قابل تاریخ‌گذاری یافت نشد تا بتوان استفاده از این معدن شدادی را به دوره‌ای مشخص نسبت داد (شکل ۵: الف).

۳. معدن شداد بی‌کن

این معدن در منطقه‌ای کوهستانی قرار گرفته و پوشش گیاهی زمین‌های اطراف آن بوته‌زار و درخت‌های بادام وحشی و بنه است. دهانه این غار رو به شرق، ارتفاع آن ۲/۲، عرض ۲/۶، عمق غار ۱۴ و عرض انتهای آن ۵ و ارتفاع انتهای غار ۳/۸ متر است؛ هم‌چنین در این غار آثار و شواهد دپو بقایای فلزگری به عرض تقریباً ۴۰ سانتی‌متر و سرباره و آثار دودزدگی در سقف غار قابل مشاهده است و براساس شواهد غار شدادی بی‌کن مربوط به دوران تاریخی/اسلامی است (شکل ۴: پ). باتوجه به برداشت‌های معدن از مقابل دهانه غار حدود ۱/۵ متر بقایای انباشت بر روی کف غار قابل مشاهده است که در این انباشت دو سطح دارای آثار سوختگی است که به نظر می‌رسد در دو دوره تاریخی از این غار به عنوان معدن شدادی برای استحصال آهن استفاده می‌شده است (شکل ۵: ب) که فعالیت‌های معدن‌کاوی مدرن تمامی این آثار را از بین خواهد برد.

۴. محوطه ماه جوغنی

این محوطه، یک مجموعه شامل محوطه مسکونی، گورستان و فضای صنعتی بوده که در آن تجمع سفال‌ها در مرکز محوطه بیشتر بوده و در جهت جنوب غربی محوطه تجمع سرباره مشاهده می‌شود (شکل ۵: پ، شکل ۴: ت). در بخش شمال غرب محوطه، ساقه یک ستون سنگی به طول ۲/۲۰ متر دیده می‌شود. محوطه درمیان زمین‌های کشاورزی و باغات قرار گرفته است و سطح آن پوشیده از بوته‌زار و سنگ است. با توجه به تنوع سفال‌های این محوطه می‌توان آن را به دوره ساسانی منسوب کرد.

۵. محوطه فلزگری توتک‌باز

در این محوطه، سرباره‌های آهن به صورت شواهد سطحی به طور پراکنده، بر روی بستر محوطه

دید می‌شود. محوطه فلزگری توتک باز دارای ابعاد 28×20 متر و مساحت 560 مترمربع و با توجه به این‌که از این محوطه هیچ مواد فرهنگی که قابل تاریخ‌گذاری باشد، یافت نشد؛ براساس هم‌جواری آن با چند محوطه اسلامی می‌توان آن را نیز به دوران اسلامی نسبت داد. محوطه فلزی توتک باز دارای سرباره‌های متخلخل در ابعاد متفاوت و از نوع آهن است (شکل ۵: ت، شکل ۴: ث).

۶. محوطه ذوب فلز کوه زیره‌ای

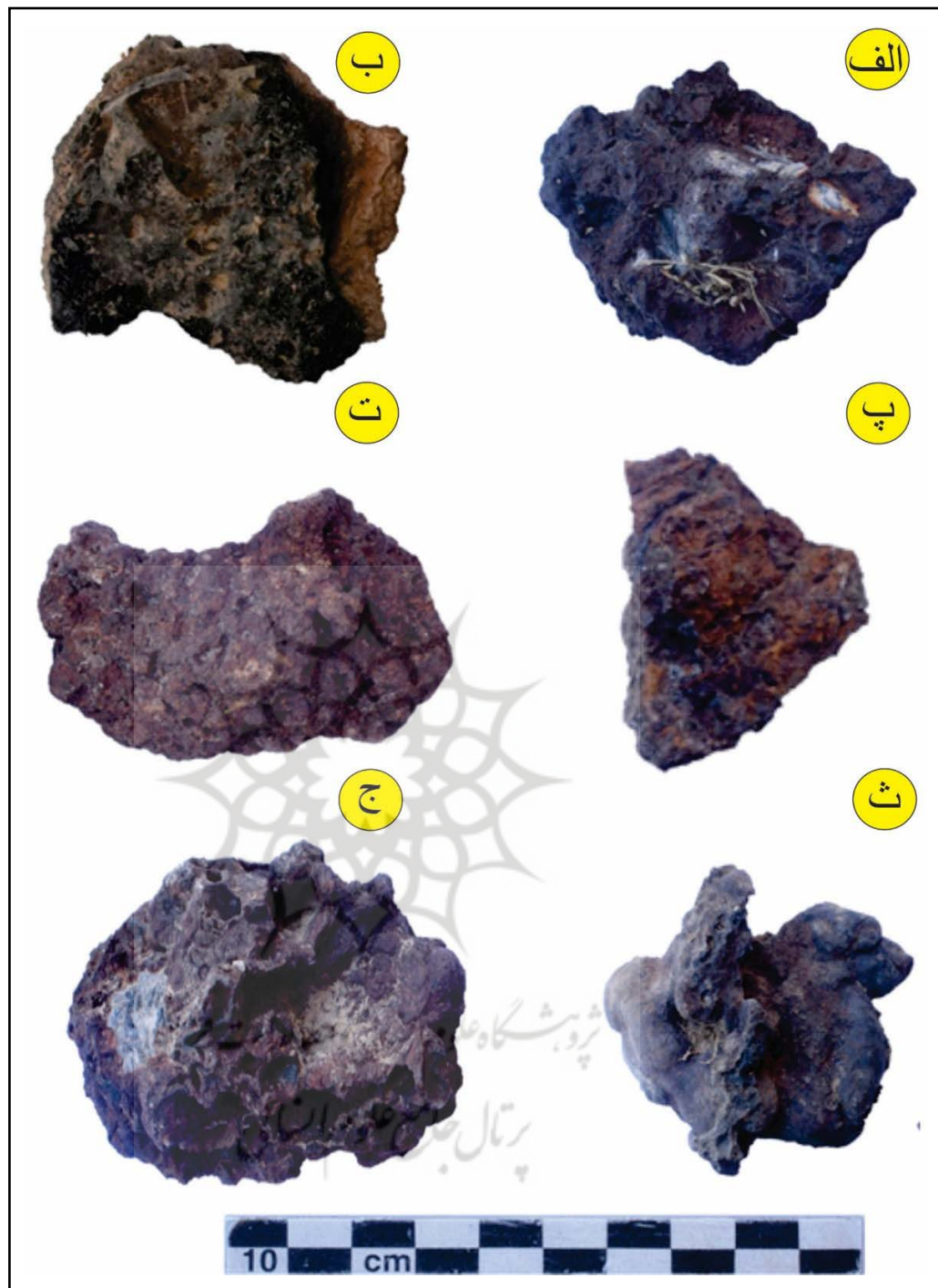
در این محدوده سرباره‌های آهن به صورت پراکنده بدون هیچ یافته فرهنگی دیگری، شناسایی شد. با توجه به عدم کشف مواد فرهنگی قابل تاریخ‌گذاری، نمی‌توان تاریخ خاصی را برای این محوطه ارائه کرد. محوطه ذوب فلز زیره‌ای دارای سرباره‌های جریانی و متخلخل و از نوع آهن است (شکل ۴: ج).

۷. محوطه ذوب فلز خوانسار

محوطه که بر روی دامنه شرقی کوه در راستای شمالی-جنوبی قرار گرفته توسط دو جاده خاکی، از جمله جاده مذکور آسیب دیده و بخش‌هایی از آن تسطیح شده است. این محوطه در واقع انباشتی در حدود 20 سانتی‌متر از آثار و شواهد فراوری فلز با ابعاد 26×30 متر و مساحتی در حدود 625 مترمربع است که به صورت بیضی‌شکلی بر روی دامنه کوه گسترده شده است (شکل ۶: الف). عبور جاده از روی محوطه باعث آشکار شدن ضایعات کوره به صورت توده‌هایی سیاه رنگ و پراکنده در سطح و اطراف جاده شده است (شکل ۵: ث). برخلاف اکثر محوطه‌های مرتبط با ذوب و فراوری فلزات که در مناطق جنگلی و با پوشش درختی مناسب جهت تأمین سوخت مورد نیاز برای این‌گونه فعالیت‌های صنعتی واقع شده‌اند؛ حداقل امروزه تنها پوشش گیاهی موجود بر روی و اطراف محوطه غیچ و درمنه‌های کوتاهی است. با توجه به این‌که از این محوطه هیچ مواد فرهنگی قابل تاریخ‌گذاری یافت نشده، تنها براساس نزدیکی و هم‌جواری آن با چند محوطه ساسانی-اسلامی می‌توان آن را نیز متعلق به اواخر دوران تاریخی و اوایل دوران اسلامی نسبت داد.

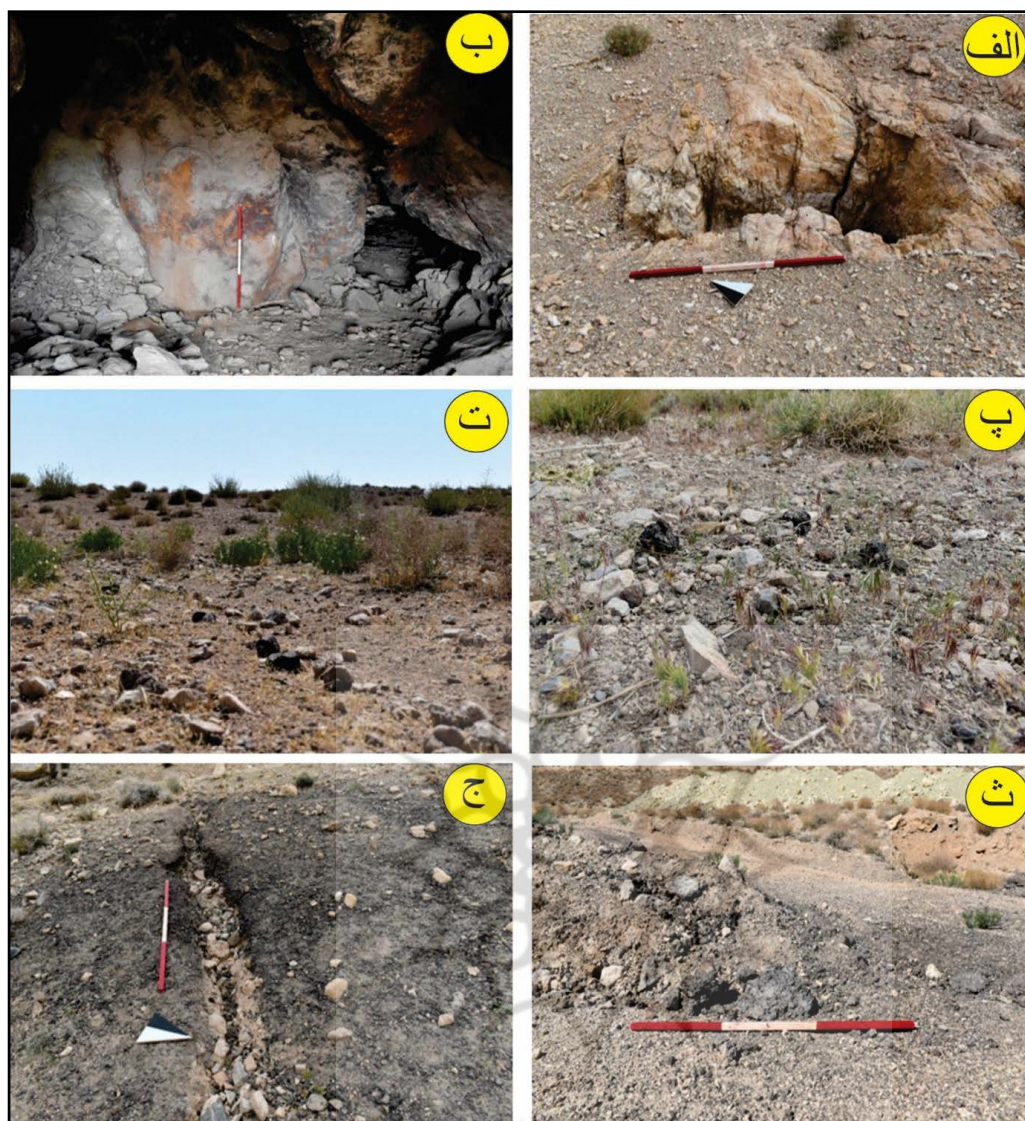
۸. محوطه ذوب فلز باغ معدن

محوطه معروف به کوره‌های ذوب آهن «باغ معدن» واقع در بخش غربی روستای باغ معدن، $15/5$ کیلومتری چاهک و 37 کیلومتری جنوب غربی شهر هرات است. سطح محوطه پر از سرباره‌های به جا مانده از فعالیت ذوب این فلز به صورت انباشت لایه‌ای با ضخامت 20 سانتی‌متر است (شکل ۶: ب)، به گونه‌ای که از دور به صورت سطحی سیاه رنگ بر روی دامنه تپه دیده می‌شود. برخلاف حجم بالای سرباره‌ها هیچ اثری از شواهد کوره یا ساختارهایی مرتبط با فعالیت‌های گرمایشی وجود ندارد. به نظر می‌رسد وجود منابع غنی سنگ آهن و از طرفی پوشش جنگل‌های بنه و بادام وحشی در دامنه کوه‌های اطراف شرایط مساعدی را برای فعالیت‌های مرتبط با ذوب فلز فراهم می‌کرده است (شکل ۵: ج). برخلاف اعتقاد مردم محلی بر تعلق این محوطه به دوره هخامنشی، نه تنها هیچ‌گونه شواهدی مبتنی با این گزاره یافت نشد، بلکه با اتکا به وجود محوطه و آثار متعددی از اواخر دوران تاریخی و هم‌چنین اسلامی در بافت این منطقه به نظر نمی‌رسد که فعالیت‌های صورت گرفته در این محوطه نیز تاریخی بیش از این دوره‌ها داشته باشد، اما تاریخ‌گذاری مطلق و دقیق آثار این محوطه تنها منوط به انجام آزمایشات میان‌رشته‌ای، از جمله ترمولومینسانس بر روی سرباره‌های موجود است.



شکل ۴: الف) سرباره آهنی به رنگ سیاه و با تخلخل زیاد، از محوطه یورد چاه منج، ب) سرباره مسی به رنگ سیاه و نخودی از معدن سید نظری، پ) سرباره آهنی به رنگ قهوه‌ای از معدن شدادی بی‌کن، ت) سرباره آهنی به رنگ قهوه‌ای و با تخلخل زیاد، از محوطه ماه جوغنی، ث) سرباره آهنی به رنگ سیاه از محوطه فلزگری توتک باز، ج) سرباره آهنی با تخلخل زیاد، از محوطه ذوب فلز کوه زیره‌ای (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 4: a) Black, highly porous iron slag from the Yurd Chahmanj site; b) Black and buff copper slag from the Seyyed Nazari mine; c) Brown iron slag from the Shadadi Bikan mine; d) Brown, highly porous iron slag from the Mah Joughani site; e) Black iron slag from the Tutak Baz metallurgical site; f) Highly porous iron slag from the Kouh Zire'i smelting site (Authors, 2023).



شکل ۵: الف) معدن سید نظری، ب) فضای داخلی معدن شدادی بی‌کن، پ) نمونه‌ای از سرباره آهن در محوطه ماه جوغنی، ت) آثار سرباره‌های آهن در محوطه فلزگری توتک‌باز، ث) سطح محوطه ذوب فلز خوانسار، ج) بقایای سرباره‌های آهن ذوب شده از محوطه ذوب آهن باغ معدن (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 5: a) Seyyed Nazari mine; b) Interior view of the Shadadi Bikan mine; c) An iron slag specimen from the Mah Joughani site; d) Remains of iron slags at the Tutak Baz metallurgical site; e) Surface of the Khansar smelting site; f) Remnants of smelted iron slags from the Baghe Madan iron smelting site (Authors, 2023).

۹. محوطه چهل چشمه چنار ناز ۱

برروی سطح محوطه شواهدی از دیوار سنگی تخریب شده، سفال و تجمع سرباره در بخش شرقی آن قابل مشاهده است. محوطه چهل چشمه ۱، دارای سرباره‌های جریانی از نوع آهن می‌باشد (شکل ۶: پ). تراکم آثار در سطح محوطه پایین و احتمالاً و براساس شواهد این محوطه مربوط به دوران اسلامی بوده است.

۱۰. محوطه پارینه سنگی تل گندر

این محوطه به صورت پراکندگی از دست‌افزارهای سنگی و سرباره‌های فلز آهن است که در دامنه

شمالی کوه و تراس هر دو سوی رودخانه گسترده شده است. محوطه مزبور به ابعاد حدودی ۲۲۵×۲۰۰ متر و مساحت ۲/۶ هکتار در میان جنگل‌های بادام وحشی قرار دارد. پراکندگی پایین سرباره‌های فلزی نیز بر روی تراس شمالی رودخانه یافت شد که به نظر می‌رسد با توجه به وجود منابع و ذخایر مناسب فلز و هم‌چنین شواهد استحصال و فرآوری فلزات در دیگر محوطه‌های این منطقه، اینجا نیز محوطه‌ای مرتبط با فعالیت‌های صنعتی ذوب فلز بوده است (شکل ۶: ت)؛ اگرچه تا انجام آزمایشاتی از جمله ترمولومینسانس بر روی این سرباره‌ها نمی‌توان تاریخ دقیقی بیش از تاریخی-اسلامی برای فعالیت‌های صنعتی صورت گرفته در این محوطه پیشنهاد کرد، اما با توجه به تکنیک ابزارسنگی‌ها می‌توان برهه زمانی پارینه‌سنگی جدید را برای بقایای سنگی یافت شده از این محوطه تعیین کرد.

۱۱. محوطه باغ شادی

این محوطه به ابعاد ۳۸×۲۳ متر و مساحت ۸۹۰ مترمربع به شکل یک نیم‌دایره در میان جنگل‌های بادام وحشی واقع شده است. در سطح محوطه آثار و شواهد سرباره‌های فلز آهن با تراکم بالایی وجود دارد؛ به طوری که از دور و هم‌چنین تصاویر هوایی به شکل گسترده‌ای سیاه رنگ دیده می‌شود. این شواهد مشخصاً نشان از فعالیت‌های صنعتی مرتبط با استحصال و فرآوری فلز آهن در این محوطه است (شکل ۶: ث) که با توجه به وجود منابع طبیعی سنگ آهن و هم‌چنین پوشش گیاهی و جنگل‌های اطراف به نظر می‌رسد شرایط مناسبی برای این‌گونه فعالیت‌ها در منطقه وجود داشته است. به علت عدم کشف هر نمونه مواد فرهنگی قابل تاریخ‌گذاری نمی‌توان فعلاً تاریخی را برای این محوطه در نظر گرفت.

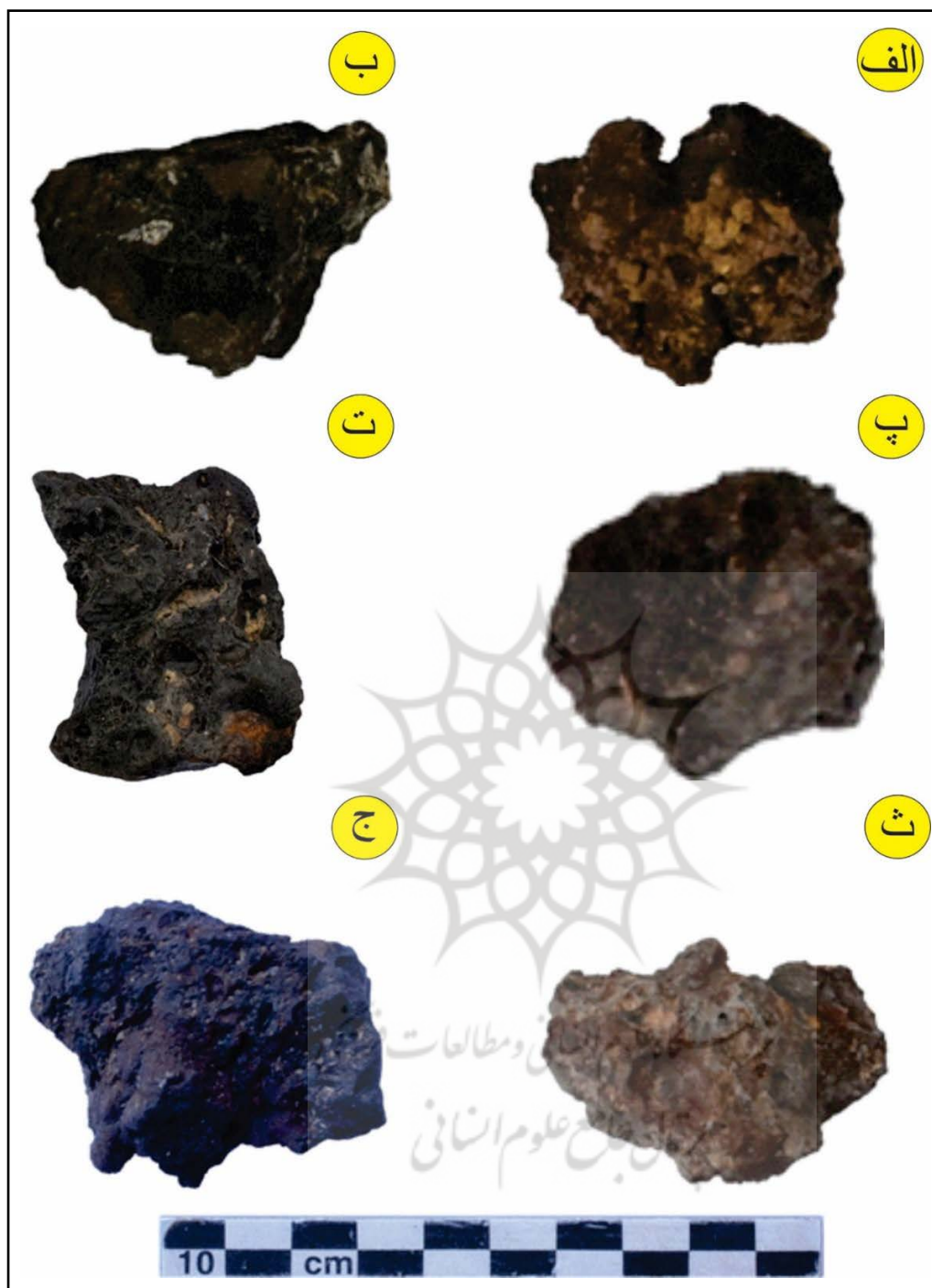
۱۲. سرباره آهنی یورد کندر ۱

این محوطه در ۲۰ متری جنوب جاده و درست در جنب شمالی کوه و در میان جنگل‌های بادام وحشی به ابعاد ۱۳۷×۶۵ متر و مساحت ۷۶۰۰ مترمربع قرار دارد. با توجه به این نکته که شواهد و مواد فرهنگی قابل تاریخ‌گذاری از سطح محوطه یافت نشد؛ تنها برپایه وضعیت معماری‌ها و وجود بقایای زباله‌های مصرفی باقی‌مانده در اطراف و سطح یورد و هم‌چنین متروک شدن اکثر یوردهای منطقه در چند دهه گذشته به نظر می‌رسد (شکل ۶: ج) این یورد متعلق به پهلوی اول و دوران بعد از انقلاب اسلامی است.

پتروگرافی سرباره‌ها

پس از نمونه‌برداری از سرباره‌های حاصل از ذوب فلز در بررسی‌های باستان‌شناسی، از هر محوطه یک نمونه برای تهیه مقاطع نازک-صیقلی و انجام مطالعات پتروگرافی انتخاب شد. در مجموع، ۱۲ محوطه ذوب فلز مورد مطالعه قرار گرفت که همگی مربوط به ذوب و استخراج آهن هستند؛ به جز محوطه معدن سید نظری که به استخراج مس اختصاص دارد. نمونه‌های این محوطه‌ها براساس مشاهدات ماکروسکوپی دارای رنگ‌های قهوه‌ای تا سیاه، چگالی نسبتاً بالا، تخلخل و بافت متراکم هستند.

برای مطالعات میکروسکوپی از میکروسکوپ دوچشمی پلاریزان مدل James Swift موجود در آزمایشگاه پتروگرافی پژوهشکده حفاظت و مرمت استفاده شد. خلاصه نتایج پتروگرافی این محوطه‌ها در جدول ۱، ارائه شده است. به طور کلی، سرباره‌ها و فازهای موجود در آن‌ها به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند: فازهای سیلیکاته، اکسیدی، سولفیدی (یا ارسنیدی، سولفاتی و غیره) و فلزی (امامی، ۱۳۸۲). در این پژوهش، براساس مطالعات آزمایشگاهی، سرباره‌ها به دو بخش اصلی



شکل ۶: الف) سرباره آهنی به رنگ نخودی از محوطه ذوب فلز خوانسار، ب) سرباره مسی و سیاه رنگ از محوطه ذوب فلز باغ معدن، پ) سرباره آهنی قهوه‌ای رنگ و متخلخل از محوطه چشمه چنار ناز ۱، ت) سرباره آهنی و سیاه رنگ با تخلخل زیاد از محوطه پارینه‌سنگی تل کندر، ث) سرباره قهوه‌ای رنگ، چگال و متخلخل از محوطه باغ شادی و ج) سرباره آهنی سیاه رنگ با تخلخل زیاد از محوطه یورد کندر ۱ (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 6: a) Buff-colored iron slag from the Khansar smelting site; b) Black and copper-colored slag from the Baghe Madan smelting site; c) Brown, porous iron slag from the Cheshmeh Chenar Naz 1 site; d) Black, highly porous iron slag from the Paleolithic Tel Kandar site; e) Brown, dense and porous slag from the Baghe Shadi site; f) Black, highly porous iron slag from the Yurd Kandar 1 site (Authors, 2023).

سیلیکاته و فلزی تفکیک شدند. بخش سیلیکاته شامل الیوین و شیشه است؛ درحالی‌که بخش فلزی متشکل از کانی‌های وستیت، مارکاسیت، هماتیت و مگنتیت می‌باشد.

پتروگرافی تنها محوطه ذوب فلز معدن سید نظری (شماره ۱۶) که برای استخراج مس مورد استفاده قرار گرفته، نشان‌دهنده بافت اسپینفکس است. در این نمونه بلورهای الیوین به صورت تیغه‌ای و کشیده در زمینه سرباره تشکیل شده‌اند و همراه با آن‌ها شیشه ولکانیکی آب‌دار به رنگ سبز مشاهده می‌شود. شکل‌گیری الیوین تیغه‌ای نشان‌دهنده حرارت بالای ذوب و سردشدگی سریع مذاب است و احتمالاً دمای ذوب تا حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است (شکل ۷). بقایای کانی‌های فلزی در این سرباره شامل مقادیر اندک و پراکنده ترکیبات مس (کولیت و دیجنیت)، مس فلزی و اکسید آهن است. شواهد میکروسکوپی تأیید می‌کنند که این سرباره‌ها حاصل ذوب ماده اولیه برای استحصال مس بوده‌اند.

در مقابل، پتروگرافی سرباره‌های ۱۱ محوطه مربوط به ذوب آهن نشان‌دهنده حضور کانی سیلیکاته الیوین است که اغلب به صورت درشت بلور مشاهده می‌شود. در برخی موارد (نمونه‌های شماره ۸ و ۱۵) این سرباره‌ها نیز دارای بافت اسپینفکس هستند. علاوه بر الیوین، در این سرباره‌ها شیشه و کلسیت ثانویه نیز وجود دارد. از میان کانه‌های فلزی، وستیت (FeO)، هماتیت، مگنتیت و مارکاسیت (FeS₂) شناسایی شده‌اند (شکل‌های ۷ و ۸). وستیت به طور معمول در مراحل نهایی فرآیند احیای آهن تشکیل می‌شود و مطالعه ویژگی‌های آن برای درک دقیق‌تر مکانیزم احیا اهمیت دارد. لازم به ذکر است که برای سهولت محاسبات، فرمول شیمیایی وستیت به صورت FeO نوشته می‌شود.

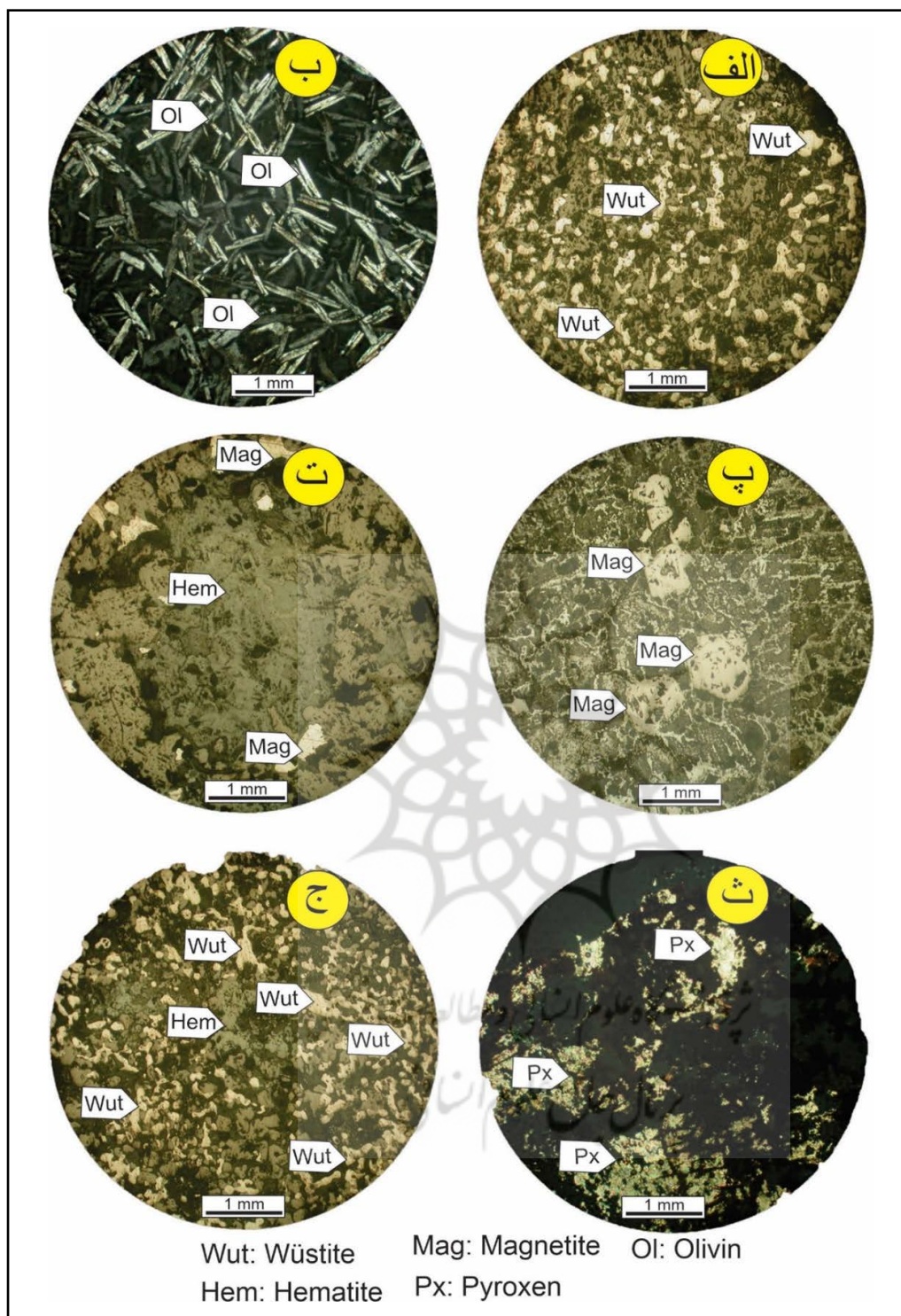
جدول ۱: نتایج مطالعه پتروگرافی سرباره‌های شهرستان خاتم (استان یزد)، (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Tab. 1: Petrographic study results of slags from Khatam County (Yazd Province) (Authors, 2023).

شماره نمونه	بافت	نام محوطه	نوع سرباره	کانی‌های سیلیکاته	کانی‌های فلزی
00-y-kh-01	متخلخل	یورد چاه منج	آهن	شیشه مذاب سیلیکاته	وستیت، مارکاسیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-16	اسپینفکس	معدن سید نظری	مس	الیوین، شیشه، ولکانیکی	کولیت و دیجنیت، اکسید آهن
00-y-kh-03	متخلخل	معدن شدادی بی‌کن	آهن	کلسیت ثانویه	وستیت، هماتیت
00-y-kh-07	متخلخل	محوطه ماه جوغنی	آهن	الیوین، شیشه مذاب سیلیکاته	وستیت، مارکاسیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-04	متخلخل	محوطه فلزگری توتک باز	آهن	الیوین، کلسیت ثانویه	وستیت، هماتیت
00-y-kh-13	متخلخل	محوطه ذوب فلز کوه زیره‌ای	آهن	الیوین، کلسیت ثانویه	وستیت، مارکاسیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-10	متخلخل	محوطه ذوب فلز خوانسار	آهن	الیوین، شیشه مذاب سیلیکاته	وستیت، مارکاسیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-05	متخلخل	محوطه ذوب آهن باغ معدن	آهن	شیشه مذاب سیلیکاته، کلسیت ثانویه	وستیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-12	متخلخل	محوطه چشمه چنار ناز ۱	آهن	الیوین، کلسیت ثانویه	وستیت، هماتیت، مگنتیت
00-y-kh-15	اسپینفکس	تل کندر	آهن	الیوین	وستیت
00-y-kh-09	متخلخل	محوطه باغ شادی	آهن	الیوین	وستیت، مارکاسیت، هماتیت
00-y-kh-11	اسپینفکس	یورد کندر ۱	آهن	الیوین	وستیت، مارکاسیت

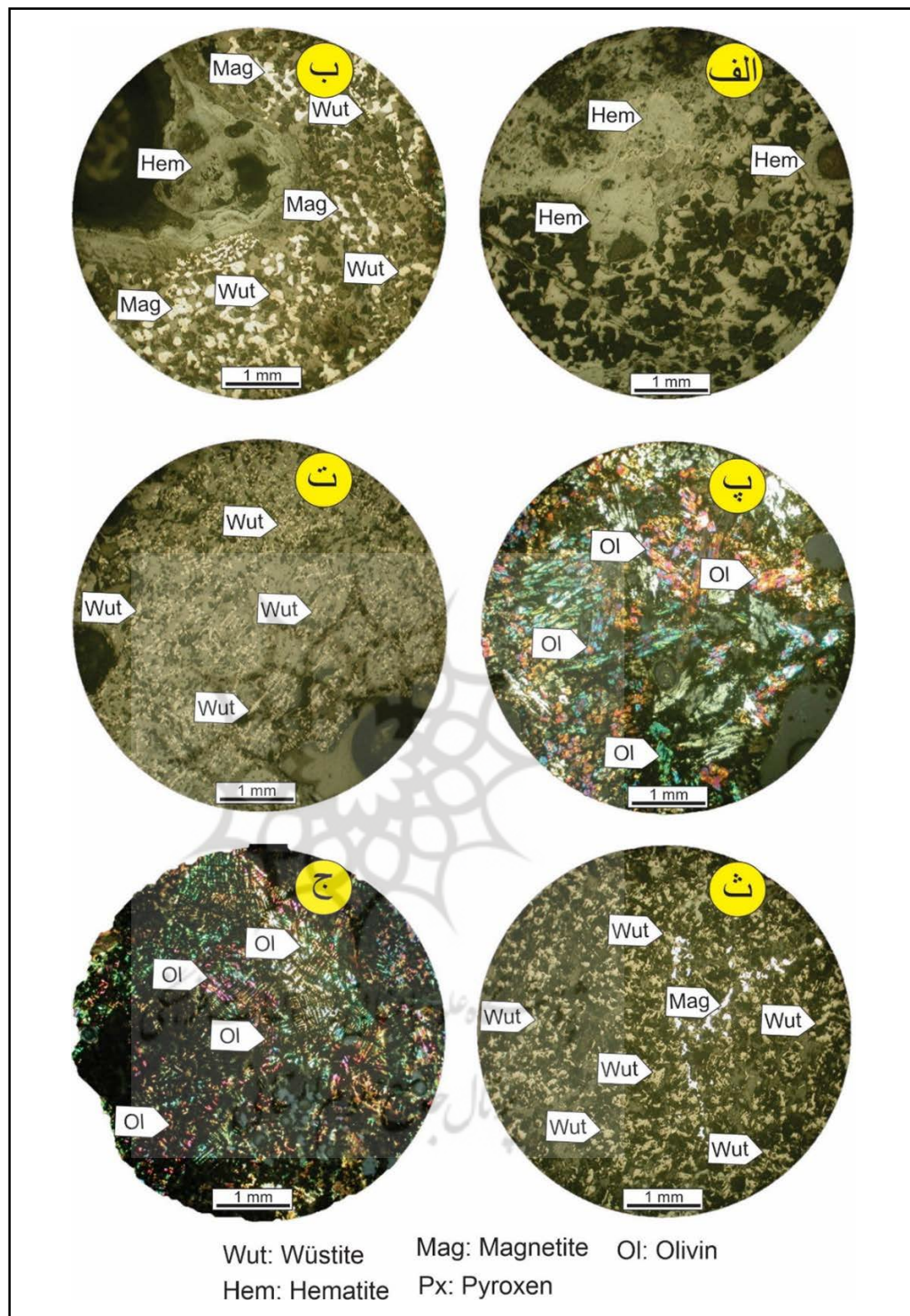
بحث و بررسی

براساس آنالیزهای شیمیایی XRF انجام‌شده بر روی سرباره‌های مورد مطالعه (جدول ۲)، مشخص شد که این کوره‌های ذوب فلز عمدتاً مربوط به استخراج و فرآوری آهن بوده‌اند. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد مقدار Fe₂O₃ بین ۲۰/۲۳ تا ۷۴/۲۵٪ و SiO₂ بین ۰/۲۲ تا ۶/۱۲٪ متغیر است. مقدار پایین سیلیس احتمالاً ناشی از ترکیب غنی از وستیت است (جدول ۲). میزان CaO نیز در بازه ۳/۵۹ تا ۲۸/۴۱ درصد قرار دارد. این موضوع حاکی از استفاده از



شکل ۷: الف) غالب بودن کانه وستیت در سرباره‌های محوطه یورد چاه منج، ب) کانی الیوین در مقاطع نازک سرباره‌های معدن سید نظری، پ) فراوانی مگنتیت در سرباره‌های معدن شادادی بی‌کن، ت) کانه‌های مگنتیت و هماتیت در سرباره‌های محوطه ماه جوغنی، ث) کانی پیروکسن در مقاطع نازک سرباره‌های محوطه فلزگری توتک باز، ج) غالب بودن کانه وستیت در سرباره‌های محوطه ذوب فلز کوه زیره‌ای (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 7: a) Predominance of wüstite in slags from the Yurd Chahmanj site; b) Presence of olivine in thin sections of slags from the Seyyed Nazari mine; c) Abundance of magnetite in slags from the Shadadi Bikan mine; d) Magnetite and hematite minerals in slags from the Mah Joughani site; e) Presence of pyroxene in thin sections of slags from the Tutak Baz metallurgical site; f) Predominance of wüstite in slags from the Kouh Zire'i smelting site (Authors, 2023).



شکل ۸: (الف) فراوانی کانه هماتیت در سرباره‌های محوطه ذوب فلز خوانسار، (ب) کانه‌های وستیت، مگنتیت و هماتیت در سرباره‌های محوطه ذوب فلز باغ معدن، (پ) کانی الیوین در مقاطع نازک محوطه چشمه چنار ناز ۱، (ت) فراوانی کانه وستیت در سرباره‌های محوطه پارینه‌سنگی تل کندر، (ث) کانه‌های وستیت و مگنتیت در سرباره‌های محوطه باغ شادی، (ج) کانی الیوین در مقاطع نازک محوطه یورد کندر ۱ (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 8: (a) The abundance of hematite ore in the slags of the Khansar metallurgical site; (b) the occurrence of wüstite, magnetite, and hematite ores in the slags of the Bagh-Madan metallurgical site; (c) the presence of olivine mineral in thin sections from the Cheshmeh Chenar Naz 1 site; (d) the abundance of wüstite ore in the slags of the Paleometallurgical site of Tal-Kandar; (e) the occurrence of wüstite and magnetite ores in the slags of the Bagh-Shadi site; (f) the presence of olivine mineral in thin sections from the Yord-Kandar 1 site (Authors, 2023).

جدول ۲ الف: آنالیز شیمیایی سرباره‌های مورد مطالعه (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Tab. 2 A: Chemical analysis of the studied slags (Authors, 2023).

Sample	Y-Kh-03	Y-Kh-07	Y-Kh-09	Y-Kh-04	Y-Kh-05	Y-Kh-02	Y-Kh-10	Y-Kh-11
SiO ₂	0/22	1/04	1/77	0/49	0/51	1/08	2/61	4/95
Al ₂ O ₃	< 0.0038	< 0.0038	< 0.0038	< 0.0038	< 0.0038	< 0.0038	0/11	0/37
Fe ₂ O ₃	64/13	67/50	61/53	58/01	72/35	68/48	49/43	49/66
CaO	3/59	12/56	10/59	7/63	3/76	10/99	17/32	5/32
MgO	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034
K ₂ O	0/03	0/10	0/56	0/11	0/12	0/20	0/35	1/48
MnO	6/69	1/10	0/98	4/61	0/24	5/05	9/46	7/85
TiO ₂	0/01	0/05	0/14	0/02	0/02	0/04	0/11	0/31
V ₂ O ₅	0/00	0/00	0/02	< 0.00018	0/02	0/06	0/01	0/01
Cr ₂ O ₃	0/01	0/04	0/02	< 0.00015	0/00	0/05	0/02	0/01
SrO	0/05	0/09	0/07	0/05	0/03	0/09	0/22	0/09
P ₂ O ₅	0/20	0/26	0/26	0/20	0/28	0/33	0/08	0/29
SO ₃	< 0.00050	0/03	0/12	0/02	0/07	0/05	0/07	0/05
ZrO ₂	0/00	0/00	0/00	0/00	< 0.00043	< 0.00014	< 0.00014	0/01
PbO	0/00	0/00	0/47	< 0.00004	0/00	0/02	< 0.00011	0/01
NiO	0/01	0/02	0/00	0/01	0/02	0/02	0/01	0/01
CuO	0/00	0/01	0/06	0/01	0/02	0/02	0/01	0/01
ZnO	0/01	0/00	0/18	0/01	0/00	0/01	0/00	0/01
Mo	0/001	0/004	0/001	0/001	0/001	0/001	0/004	0/001
Ag	< 0.00020	0/002	< 0.00020	< 0.00020	< 0.00060	0/001	0/002	0/001
Cd	< 0.00020	0/002	< 0.00020	0/000	< 0.00020	0/001	0/001	0/000
Te	< 0.00030	0/004	< 0.00030	0/001	0/000	0/000	0/001	< 0.00030
Ba	< 0.00020	0/02	< 0.00020	0/03	0/02	< 0.00020	0/07	0/02

جدول ۲ ب: آنالیز شیمیایی سرباره‌های مورد مطالعه (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Tab. 2 B: Chemical analysis of the studied slags (Authors, 2023).

Sample	Y-Kh-12	Y-Kh-13	Y-Kh-15	Y-Kh-16
SiO ₂	1/39	2/79	4/29	4/75
Al ₂ O ₃	< 0.0038	0/06	< 0.0038	0/25
Fe ₂ O ₃	74/06	60/05	47/88	23/08
CaO	5/39	13/07	10/22	28/41
MgO	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034	< 0.0034
K ₂ O	0/14	0/68	2/09	0/97
MnO	1/60	1/64	7/18	7/95
TiO ₂	0/07	0/18	0/46	0/30
V ₂ O ₅	0/00	0/02	0/02	0/01
Cr ₂ O ₃	0/06	0/02	0/12	0/06
SrO	0/03	0/09	0/23	0/37
P ₂ O ₅	0/21	0/32	0/30	0/35
SO ₃	0/00	0/06	0/13	0/04
ZrO ₂	0/00	0/00	0/02	0/01
PbO	0/02	< 0.00011	0/00	0/00
NiO	0/05	0/01	0/04	0/02
CuO	0/06	0/02	0/00	0/02
ZnO	0/01	0/01	0/00	0/00
Mo	0/001	0/001	0/002	0/001
Ag	< 0.00020	0/001	< 0.00020	0/002
Cd	< 0.00020	0/000	< 0.00020	0/001
Te	0/001	0/002	0/001	0/002
Ba	0/03	0/02	0/05	0/08

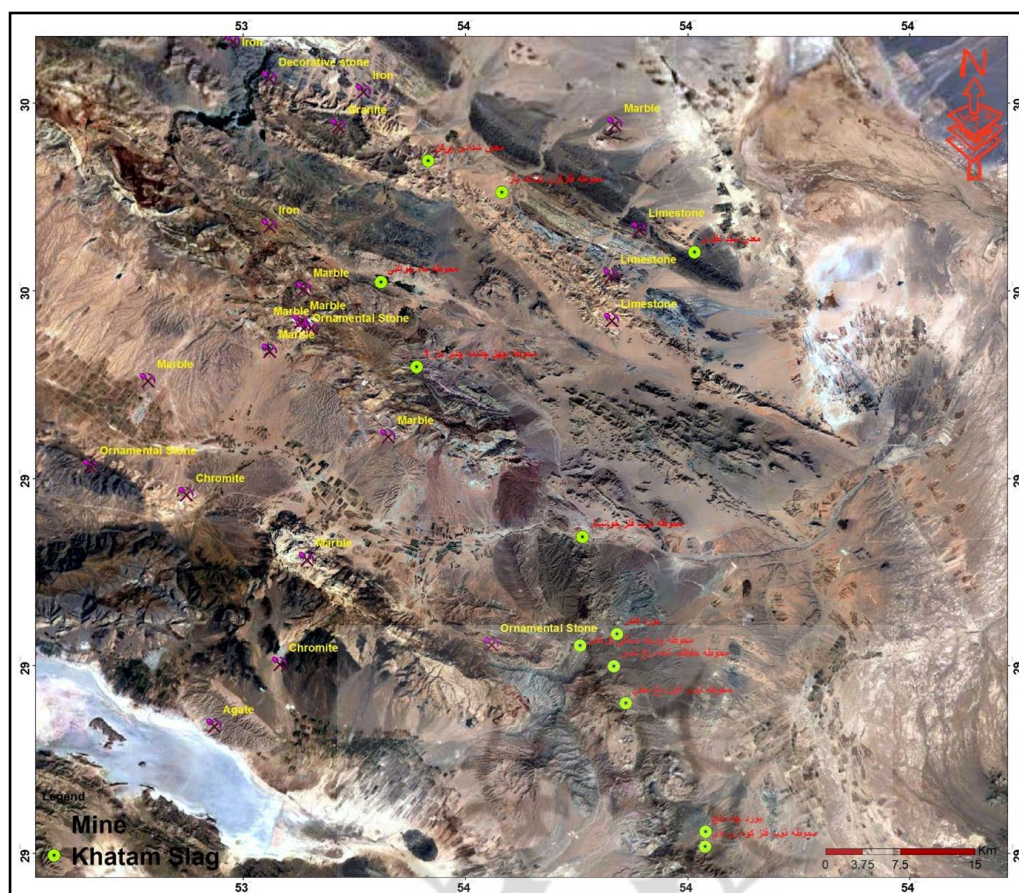
سنگ آهک به عنوان یکی از کمک ذوب‌های اصلی در فرآیند ذوب است؛ به گونه‌ای که علاوه بر احتمال حضور کلسیم در ترکیب اولیه کانسنگ، این اکسید ممکن است به صورت ماده گدازآور به بار کوره افزوده شده باشد. افزایش CaO منجر به تشکیل فازهای الیوین غنی از کلسیم می‌شود و شرایط ایجاد فازهای سیلیکاته الیوین کلسیم‌دار را فراهم می‌کند. نتایج مطالعات میکروسکوپی نیز این مسئله را تأیید کرده است. از آنجا که آهک و سیلیس در کاهش دمای ذوب و تسهیل جداسازی آهن از سرباره نقش مهمی دارند، کمبود این دو عنصر در سرباره‌ها می‌تواند بیانگر غلظت بالای آهن، ناپایداری سرباره (به دلیل چسبندگی، ویسکوزیته و چگالی زیاد) و در نهایت کیفیت پایین آهن اسفنجی تولید شده باشد. درصد Al₂O₃ در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۹۴ و مقدار MgO در سرباره‌های مورد آزمایش کمتر از ۰/۳۴٪ گزارش شده است. براساس نتایج حاصل از بررسی کانسنگ، کانی‌های اصلی آهن در این منطقه شامل هماتیت (Fe₂O₃)

و مگنتیت (Fe_3O_4) هستند. در نمونه‌های بررسی شده، فازهای سیلیکاته‌ی الیوین غالب بوده و کانی‌های فلزی عمدتاً به صورت آهن فلزی، مگنتیت و هماتیت مشاهده می‌شوند. با توجه به ترکیب سیلیکاته‌ی سرباره‌ها، افزودن آهک به فرآیند ذوب موجب افزایش مقدار آهن دوفرفیتی (FeO) و پایداری فاز اسپینلی مگنتیت می‌شود، درحالی‌که حضور سیلیس به پایداری فاز هماتیت کمک می‌کند. مشاهدات میکروسکوپی نیز حضور غالب مگنتیت و آهن فلزی را تأیید می‌کند.

از آنجا که آهن دارای نقطه‌ی ذوب بالایی (۱۵۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) است و ذوب آن دشوار محسوب می‌شود، استخراج آن مستلزم توجه به جنبه‌های فناورانه متعدد بوده است؛ به همین دلیل، شناخت و استفاده از آهن دیرتر از سایر فلزات تحقق یافته است. با این حال، فرآیند جداسازی آهن از کانسنگ به تدریج و با تکیه بر تجربیات حاصل از ذوب و احیای سنگ مس شکل گرفت؛ هرچند تفاوت‌های متالورژیکی و شیمیایی میان این دو فلز، این مسیر را پیچیده‌تر ساخته است (Rehder, 1991). شواهد باستان‌شناسی نیز نشان‌دهنده‌ی تولید تصادفی آهن پیش از عصر آهن است (Wertime, 1968). به‌طور معمول، تشکیل سرباره در کوره‌های آهن بدین‌گونه رخ می‌دهد که بخشی از اکسید آهن در شرایط احیایی به فلز آهن تبدیل شده و بخشی دیگر به صورت اکسید در سرباره باقی می‌ماند (Rehren et al., 2007). شایان ذکر است ترکیب نهایی سرباره تنها تحت تأثیر ترکیب شیمیایی کانسنگ نیست؛ بلکه نوع و ترکیب سوخت، مواد کمک‌ذوب و حتی جنس سرامیکی بدنه‌ی کوره و لوله‌های دمش نیز در آن نقش دارند (Blakelock et al., 2009). شواهد موجود حاکی از آن است که انسان با استفاده از تجربیات حاصل از کوره‌های ذوب مس و سرب، موفق به تولید آهن اسفنجی گردید. آهن اسفنجی نیز مانند بسیاری از تمدن‌های باستانی در منطقه‌ی مورد مطالعه تولید می‌شده است؛ زیرا این نوع آهن نسبت به دیگر انواع آهن نیازمند دانش فنی کمتری بوده است (Abbasnejad, 2009).

نمونه‌برداری از سرباره‌های معدنی و بقایای سفالی مرتبط با کوره‌ها برای مطالعات باستان‌متالورژی و باستان‌سنجی اهمیت فراوان دارد. این اقدام موجب توسعه‌ی روش‌های پژوهشی در باستان‌شناسی معدنی، تکمیل داده‌های مربوط به دوران پیش‌ازتاریخ و یاری‌رسانی به کاوش‌های باستان‌شناسی می‌شود. چنین مطالعاتی می‌تواند به شناخت بهتر فرآیندهای استخراج و فرآوری فلزات در گذشته کمک کرده و با تحلیل داده‌های به دست آمده، درک ما را از شبکه‌ی تجارت مواد معدنی و نحوه‌ی بهره‌برداری نیاکان از آن‌ها افزایش دهد؛ همچنین، تکمیل این داده‌ها امکان بازسازی تاریخچه‌ی توسعه‌ی فعالیت‌های معدنی در مناطق مختلف جهان، به‌ویژه ایران را فراهم می‌آورد.

نتایج شیمیایی سرباره‌ها نشان می‌دهد که مقادیر بالایی از آهن در این نمونه‌ها وجود دارد که بیانگر دسترسی به کانسارهای آهن در منطقه‌ی مورد مطالعه است. در گذشته عواملی مانند فاصله‌ی معدن تا کوره‌های ذوب، دسترسی به منابع انرژی (سوخت) و آب نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مکان فعالیت‌های متالورژیکی داشتند. به همین دلیل، معدن‌کاران باستانی تلاش می‌کردند فاصله‌ی معدن تا محل ذوب را به حداقل برسانند. با توجه به شرایط کوهستانی، جنگلی و وجود منابع آب در شهرستان خاتم، به نظر می‌رسد مواد خام موردنیاز برای ذوب آهن از نزدیکی همین محوطه‌ها تأمین می‌شده است. در نقشه‌ی معادن اطراف محوطه‌های سرباره‌ای (شکل ۹)، بیشتر معادن شناسایی شده مربوط به سنگ‌های تزئینی مرمر هستند؛ با این حال، معادن آهن در فواصل ۸، ۱۰ و ۱۵ کیلومتری این محوطه‌ها قرار دارند که احتمالاً منشأ اصلی سرباره‌های کشف شده محسوب می‌شوند.



شکل ۹: نقشه معادن آهن در نزدیکی محوطه‌های سرباره‌ای (گوگل ارث، با برجسته‌سازی محوطه‌ها؛ نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 9: Map of iron mines in the vicinity of the slag-bearing sites (Google Earth, with highlighted sites; Authors, 2023).

نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه در شهرستان خاتم، استان یزد، واقع شده و از نظر زمین‌شناسی در زون سندانج-سیرجان قرار دارد. این پژوهش با بررسی ۱۲ محوطه سرباره‌ای ذوب فلز در شهرستان خاتم، از طریق مطالعات پتروگرافی و آنالیز شیمیایی به روش XRF، به شناسایی ویژگی‌های فلزکاری و معدن‌کاوی کهن در این منطقه پرداخته است. در پاسخ به پرسش نخست پژوهش، یعنی نوع فلز یا فلزات سرباره‌ها در محوطه‌های مورد بررسی، نتایج نشان داد که سرباره‌های ۱۱ محوطه عمدتاً مربوط به استخراج و فرآوری فلز آهن هستند و تنها یک نمونه (از معدن سید نظری) به استخراج فلز مس اختصاص دارد. در این نمونه مسی، وزیکول‌های کوچک حاوی کانی‌های مس (کولیت، دیجنیت و مس فلزی) همراه با بخش شیشه‌ای جریان‌ی سبز رنگ مشاهده شد که نشان‌دهنده حرارت بالایی کوره ذوب (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. در پاسخ به پرسش دوم، فرآیند استحصال و تولید فلز در محوطه‌های سرباره‌ای به روش احیای مستقیم و تولید آهن اسفنجی بوده است. کانی‌های وستیت و مارکاسیت به عنوان محصولات فرآیند کوره ذوب شناسایی شدند، درحالی‌که کانی‌های اولیه مانند هماتیت و مگنتیت در سرباره‌ها حضور دارند. این شواهد حاکی از آن است که در اکثر معادن منطقه، ماده معدنی غالب مگنتیت و هماتیت بوده و در برخی موارد، هماتیت به مقدار غالب و مگنتیت به مقدار کمتر وجود داشته است. در پاسخ به پرسش سوم، مبنی بر منشأ کان‌سنگ‌های مورد نیاز برای معدن‌کاوی، باتوجه به وجود معادن سنگ آهن در فواصل ۸ تا ۱۵ کیلومتری محوطه‌های سرباره‌ای، به احتمال زیاد مواد خام مورد نیاز از این معادن تأمین شده

است. شرایط جغرافیایی منطقه، ازجمله وجود منابع آب و پوشش گیاهی مناسب (مانند: جنگل‌های بادام وحشی و بنه)، شرایط مساعدی را برای فعالیت‌های متالورژیکی فراهم کرده بود. نتایج آنالیز شیمیایی نشان داد که مقدار Fe_2O_3 در سرباره‌ها بین ۲۰/۲۳ تا ۷۴/۲۵٪ و SiO_2 بین ۰/۲۲ تا ۶/۱۲٪ متغیر است. مقدار پایین سیلیس احتمالاً به دلیل غلظت بالای وستیت است. میزان CaO نیز بین ۳/۵۹ تا ۲۸/۴۱٪ قرار دارد که نشان‌دهنده استفاده از سنگ آهک به عنوان کمک ذوب اصلی در فرآیند ذوب است. افزایش CaO به تشکیل فازهای سیلیکاته‌یوین غنی از کلسیم منجر شده و نقش مهمی در کاهش دمای ذوب و جداسازی آهن از سرباره داشته است. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده دسترسی به کانسارهای غنی آهن در منطقه و توانایی معدن‌کاران باستانی در استحصال آهن است. محوطه‌ها براساس سفال‌های یافت‌شده به دوره‌های تاریخی و اسلامی (احتمالاً دوران ساسانی و سلجوقی) منسوب شده‌اند.

سپاسگزاری

نویسندگان از آقای دکتر غلامرضا رحمانی، رئیس پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی، به خاطر همکاری صمیمانه تشکر می‌کنند؛ هم‌چنین از داوران محترم برای ارائه نظرات ارزشمند و راهنمایی‌های علمی قدردانی می‌نمایند.

مشارکت درصدی نویسندگان

در این پژوهش، نویسنده اول: جمع‌بندی و نگارش متن مقاله، نویسنده دوم: نمونه‌برداری و مطالعات باستان‌شناسی، نویسنده سوم: مطالعات پتروگرافی، نویسنده چهارم: آنالیز داده‌ها را برعهده داشته‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان ضمن رعایت اخلاق نشر در ارجاع‌دهی، نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

پی‌نوشت

۱. «یورد» واژه‌ای ترکی است به معنی «جایگاه عشایر»، در لری و گُردی به چنین مکان‌هایی، «وارگه» یا «بارگه» نیز گفته می‌شود؛ یورد محلی برای اقامت عشایر در بیلاق یا قشلاق است که هر خانواده هر ساله به همان مکان، بازمی‌گردند. این منطقه، زیستگاه اقوام ترک قرائی است.

کتابنامه

- اسلامی‌کردی، سید نجمه، (۱۳۹۱). «فلزکاری کهن در شمال فلات مرکزی ایران: مطالعات موردی تپه سیلک، تپه حصار، تپه چشمه علی و محوطه باستانی اریسمان». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اصفهان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی (منتشر نشده).
- امامی، سید محمدامین، (۱۳۸۳). «مطالعات مینرالوژیک بر روی سرباره‌های ذوب مس در معدن چاه موسی در طرود، شاهرود». کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- امیری باغبادرانی، علیرضا، (۱۳۹۵). «تحلیل منشأ فلزکاری در عصر مفرغ قدیم در شمال غرب ایران؛ بر مبنای داده‌های فلزگری کول تپه هادیشهر». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز (منتشر نشده).
- الیکایی دهنو، ثریا، (۱۳۹۶). «بررسی سیستماتیک محوطه‌های دارای شواهد فلزکاری کهن در دهستان شمالی کوه‌دشت». لرستان: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).

- الیکایی دهنو، ثریا، (۱۳۹۸). «بررسی سیستماتیک محوطه‌های دارای شواهد فلزکاری کهن در دهستان گل‌گل کوه‌دشت». لرستان: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- الیکایی دهنو، ثریا، (۱۳۹۹). «بررسی سیستماتیک محوطه‌های دارای شواهد فلزکاری کهن در شهداد کرمان». کرمان: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- باقریان، سیامک، (۱۳۹۴). «سیر تاریخی معدنکاری در فلات ایران در دوره باستان (از آغاز تا تشکیل دولت ماد)». تاریخ، ۱۰(۳۷): ۱۳۳-۱۴۳. https://journals.iau.ir/article_540093.html
- بهشتی، سید ایرج، (۱۳۹۳). «شواهد میراث معدنکاری کهن در ایران: مرحله اول، ناحیه انارک در شرق استان اصفهان». انارک: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- بهشتی، سید ایرج، (۱۴۰۰). بانک اطلاعاتی معادن باستانی فلزی حوزه راه ابریشم در شمال ایران مرکزی (فاز اول: مطالعات کتابخانه‌ای). تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری. (منتشر نشده).
- رحیمی، فرشته، (۱۳۸۵). «شناسایی و بررسی معادن کهن نقره در حوزه زاگرس». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- رحیمی، فرشته، (۱۴۰۰). «بانک اطلاعاتی محوطه‌های فلزکاری کهن در شمال فلات مرکزی (فاز اول: استان‌های تهران و قزوین)». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- رحیمی، فرشته، (۱۴۰۲). «بانک اطلاعاتی محوطه‌های فلزکاری کهن در فلات مرکزی (فاز سوم: استان‌های کاشان، قم و اصفهان)». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- روشن‌روان، حسین؛ و اشراقی، علی، (۱۴۰۲). گزارش نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ چاهک. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- زواش، محمد، (۱۳۷۶). کانی‌شناسی در ایران قدیم. تهران: انتشارات پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، چاپ دوم.
- سیدین، ساسان، (۱۳۹۴). «فرآیندهای ذوب و استحصال فلزات در دوره ساسانی بر اساس مطالعات باستان‌فلزشناسی: نمونه موردی دارابگرد، گور (اردشیرخوره) و بیشاپور». رساله دکتری، تهران: دانشگاه تربیت مدرس (منتشر نشده).
- عباس‌نژاد سرشتی، رحمت؛ و فاضلی‌نشی، حسن، (۱۳۸۵). «فرآیند فلزکاری در جنوب شرقی ایران در هزاره‌های چهارم و سوم ق.م.: سازوکارهای اقتصادی، اجتماعی و سیاسی». پژوهش‌های تاریخی ایران و اسلام، ۲(۲): ۸۱-۹۸. <http://noo.rs/ogEsi>
- عباس‌نژاد، رحمت، (۱۳۸۷). «فرآیند تحولات اقتصادی-اجتماعی و برهم‌کنش‌های فرهنگی در هزاره‌های پنجم و چهارم ق.م در دشت قزوین: با تکیه بر فلزکاری». رساله دکتری، تهران: دانشگاه تهران (منتشر نشده).
- عسگری، رحمان، (۱۳۹۶). «مطالعات فلزکاری کهن بر روی محوطه باستانی اریسمان (دوره I) بر اساس یافته‌های جدید». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان (منتشر نشده).
- غلامی، محسن، (۱۳۹۷). «بررسی شیوه‌های معدنکاری در گذشته و معدنکاری کهن در منطقه کاشان». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، کاشان: دانشگاه کاشان.
- قاسم‌نژاد، مریم، (۱۳۹۶). «بررسی باستان‌شناسی محوطه‌های فلزگری کهن در شمال شرقی خراسان جنوبی: مطالعه موردی منطقه زیرکوه». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بیرجند: دانشگاه بیرجند (منتشر نشده).
- قاسمی، محمد، (۱۳۹۳). «بررسی و مطالعه فلزکاری مس و آلیاژهای مسی در محوطه‌های فرهنگی در محدوده زمانی هزاره سوم بر اساس مطالعات متالوگرافی (فاز ۱)». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).

- کمالی، امین‌اله؛ بهشتی، سید ایرج؛ عزیزی خرائقی، محمدحسین؛ و دارخال، نازلی، (۱۴۰۱). «بررسی فیزیکوشیمیایی سرباره‌های استان یزد به‌منظور رهیافتی به کانه‌های استحصالی (شهرستان خاتم)». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- مؤمن‌زاده، مرتضی، (۱۳۸۴). «مروری بر معادن و معدن‌کاری باستانی ایران». مجله مفهرغ، ۵: ۱۲-۷.
- میرشکرای، محسن، (۱۳۹۵). «معادن کهن، تلاقی فرهنگ و طبیعت: پژوهشی در میراث معدنی ایران - مطالعه موردی دو معدن باقرق و نخلک». تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری (منتشر نشده).
- نظافتی، نیما؛ مومن‌زاده، مرتضی؛ و احمدی، کامران، (۱۳۸۴). «نقشه راه مطالعات معدنکاری و فلزکاری کهن در ایران». پژوهش باستان‌سنجی، ۳(۱): ۷۷-۹۸. <https://doi.org/10.29252/jra.3.1.77>
- وولف، هانس، (۱۳۸۸). صنایع دستی کهن ایران. ترجمه سیروس ابراهیم‌زاده، تهران: انتشارات علمی و فرهنگی، چاپ سوم.

- Abbāsnejād, R., (2008). "The Process of Socioeconomic Transformations and Cultural Interactions in the Fifth and Fourth Millennia BC in the Qazvin Plain: With an Emphasis on Metallurgy". PhD Dissertation, Tehran: University of Tehran. (In Persian).

- Abbāsnejād-Sarashti, R. & Fāzeli-Nashli, H., (2006). "The Process of Metallurgy in Southeastern Iran During the Fourth and Third Millennia BC: Economic, Social, and Political Mechanisms". *Iranian and Islamic Historical Studies*, 2(2): 81-98. (In Persian). <http://noo.rs/ogEsi>

- Abbasnejad Serešty, R., (2009). "Iron archaeometallurgy in the triangle of the Sirdjān, Neiriz and Shahr-e-Bābak". *The International Journal of Humanities*, 16(1): 1-14. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25382640.2009.16.1.7.6>

- Alipour, R., (2017). "Persian crucible steel production: Chāhak tradition". Doctoral dissertation, University College London.

- Alipour, R., Rehren, T. & Martínón-Torres, M., (2021). "Chromium crucible steel was first made in Persia". *Journal of Archaeological Science*, 127: 105224. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105224>

- Amiri Bāghbāderāni, A., (2016). "An Analysis of the Origins of Metallurgy in the Early Bronze Age in Northwestern Iran: Based on the Metallurgical Data from Kul Tepe Hadishahr". Master's Thesis, Tabriz: Tabriz Islamic Art University. (In Persian).

- Bagheryan, S., (2015). "Historical course of mining in the Iranian Plateau during antiquity (from the beginning to the formation of the Median state)". *Journal of History*, 10(37): 133-143. (In Persian). https://journals.iau.ir/article_540093.html

- Bahshti, S. I., (2014). "Evidence of Ancient Mining Heritage in Iran: Phase I, Anarak Region, Eastern Isfahan Province". Anarak: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).

- Bahshti, S. I., (2021). "Database of Ancient Metal Mines Along the Silk Road Corridor in Northern Central Iran (Phase I: Library Studies)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Bagherian, S., (2015). "A Historical Overview of Mining in the Iranian Plateau in Antiquity (From the Beginning to the Formation of the Median State)". *Journal of History*, 10(37). (In Persian). https://journals.iau.ir/article_540093.html
- Blakelock, E., Martín-Torres, M., Veldhuijzen, H. A. & Young, T., (2009). "Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: An experiment and a case study". *Journal of Archaeological Science*, 36(8): 1745–1757. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.03.032>
- Büchner, W., Schliebs, R., Winter, G. & Büchel, K. H., (1989). *Industrial inorganic chemistry* (D. R. Terrell, Trans.). New York: VCH.
- Chegini, N. N., Helwing, B., Parzinger, H. & Vatandoust, A., (2004). "A prehistoric industrial settlement on the Iranian Plateau – Research at Arisman". In: *Persia's Ancient Splendour: Mining, Handicraft and Archaeology*: 210–217.
- Concidine, D. M. & Concidine, G. D., (1984). *Encyclopedia of Chemistry*. Van Nostrand Reinhold.
- Elikaei Dehno, S., (2017). "Systematic Survey of Sites with Evidence of Ancient Metallurgy in the Northern District of Kuhdasht". Lorestan: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Elikaei Dehno, S., (2019). "Systematic Survey of Sites with Evidence of Ancient Metallurgy in the Gol-Gol District of Kuhdasht". Lorestan: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Elikaei Dehno, S., (2020). "Systematic Survey of Sites with Evidence of Ancient Metallurgy in Shahdad, Kerman Province". Kerman: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Elykaei, S., (2020). "Systematic study of sites with ancient metallurgy evidence in Shahdad". Kerman. (In Persian).
- Emāmi, S. M.-A., (2004). "Mineralogical Studies on Copper Smelting Slags from Chah-Mousa Mine in Taroud, Shahroud". *Iranian Mining Engineering Conference*, Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Eslāmi Kordi, S. N., (2012). "Ancient Metallurgy in Northern Central Iran: Case Studies of Tepe Sialk, Tepe Hissar, Tepe Cheshmeh Ali, and the Ancient Site of Arisman". Master's Thesis, Tehran: Islamic Azad University, Central Tehran Branch. (In Persian).
- Ghasemi, A. & Talbot, C. J., (2006). "A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran)". *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Gholāmi, M., (2018). "Study of Ancient and Historical Mining Methods in the Kashan Region". Master's Thesis, Kashan: University of Kashan. (In Persian).

- Ghorbani, M. (2013). The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0>
- Horne, L., (1982). "Fuel for the Metal Worker". *Expedition*, 25(1): 6.
- Kamāli, A., Bahshti, S. I., Azizi Kharanaghi, M. H. & Darkhāl, N., (2022). "Physicochemical Study of Slags in Yazd Province for Insights into Extracted Ores (Khatam County)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Mirmashkarei, M., (2016). "Ancient Mines: The Intersection of Culture and Nature – A Study of Iran's Mining Heritage (Case Studies of Baqerq and Nakhlak Mines)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Momenzādeh, M., (2005). "A Review of Ancient Mines and Mining in Iran". *Mehregan (Bronze) Journal*, 5: 7–12. (In Persian).
- Nazāfati, N., Momenzādeh, M. & Ahmadi, K., (2005). "A Roadmap for the Study of Ancient Mining and Metallurgy in Iran". *Archaeometry Research Journal*, 3(1): 77–98. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jra.3.1.77>
- Nezafati, N. & Pernicka, E., (2012). "Early Silver Production in Iran". *Archaeology*, 3(2): 37–45.
- Ovissi, M., Yazdi, M. & Ghorbani, M., (2017). The Persian Turquoise Mining at Neyshabur Mine in Historical Times.
- Pezeshkan, A. J. & Damghani, B., (2005). Mines and Mining in Iran. Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization.
- Qāsemi, M., (2014). "Study of Copper and Copper Alloy Metallurgy in Cultural Sites of the Third Millennium BC Based on Metallographic Studies (Phase I)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Qāsemnejād, M., (2017). "Archaeological Study of Ancient Metallurgical Sites in Northeastern South Khorasan: A Case Study of Zirkuh Region". Master's Thesis, Birjand: University of Birjand. (In Persian).
- Rahimi, F., (2006). "Identification and Survey of Ancient Silver Mines in the Zagros Region". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Rahimi, F., (2021). "Database of Ancient Metallurgical Sites in Northern Central Plateau (Phase I: Tehran and Qazvin Provinces)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- Rahimi, F., (2023). "Database of Ancient Metallurgical Sites in the Central Plateau (Phase III: Kashan, Qom, and Isfahan Provinces)". Tehran: Research Institute of Cultural Heritage and Tourism. (In Persian).
- 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*, 235–244, Sydney, NSW.

- Rehder, E., (1991). "The Decorated Iron Swords from Luristan: Their Material and Manufacture". *Iran*, 29(1): 13–19. <https://doi.org/10.2307/4299845>
- Rehren, T., Charlton, M., Chirikure, S., Humphris, J., Ige, A. & Veldhuijzen, H. A. (2007). "Decisions Set in Slag: The Human Factor in African Iron Smelting". In: *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*: 211–218.
- Roshān-Ravān, Hossein & Eshrāqi, Ali., (2023). *Geological Map Report of the 1:100,000 Chahak Sheet*. Tehran: Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian).
- Seyedin, S., (2015). "Processes of Smelting and Metal Extraction in the Sasanian Period Based on Archaeometallurgical Studies: A Case Study of Darabgerd, Gor (Ardashir Khurreh), and Bishapur". PhD Dissertation, Tehran: Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Stocklin, J., (1968). "Structural History and Tectonics of Iran". *AAPG Bulletin*, 52(7): 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Stocchi, E., (1990). *Industrial Chemistry*. Ellis Horwood.
- Stöllner, T., (2004). "Prehistoric and Ancient Ore-Mining in Iran". In: *Persia's Ancient Splendour: Mining, Handicraft and Archaeology*: 44–63).
- Vatandoust, A., (2004). "Old Mining and Metallurgy in Iran: Past and Future of a Research Perspective". In: *Persia's Ancient Splendour: Mining, Handicraft and Archaeology*: 2–7.
- Volf, H., (2009). *Ancient Iranian Handicrafts*. Translated by Siros Ebrahimzadeh. Tehran: Elm va Farhang Publications, 3rd Edition. (In Persian).
- Zāvash, M., (1997). *Mineralogy in Ancient Iran*. Tehran: Institute for Humanities and Cultural Studies, 2nd Edition. (In Persian).