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 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

Research Paper

Laboratory Study, Conservation and Restoration of Ancient Iron Objects Found in the Excavations of Beheshtabad Archaeological Hill in Chaharmahal and Bakhtiari Province

Marjan Gandon Malmir[1], Zohreh Sadeghi[2], Hamid Reza Bakhshandehfard[3,*]

1. B.A, Department of Conservation and Restoration of Historical Objects, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. M.A Student, Department of Conservation and Restoration of Historical Objects, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Associate Professor, Department of Conservation and Restoration of Historical Objects, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran

* Correspondence: hr.bakhshan@aui.ac.ir

Abstract

The emergence of iron production in Iran reflects both cultural development and chronological transitions from the Stone to Iron Ages. Beheshtabad Hill Chaharmahal and Bakhtiari, registered as a national heritage site in 2006, contains archaeological remains dating from the 4th–1st centuries BC and the Ilkhanid period. Excavated iron objects provide valuable historical information but face rapid deterioration due to corrosion. The aim of this study is to identify the nature of corrosion, the microstructural characteristics of the excavated artifacts from this site, and the necessary measures for their conservation and maintenance in accordance with the condition of the objects. The research methodology includes microscopic observations, (SEM), (XRD), radiography, and metallographic analysis. The results indicate that the artifacts are made of iron-based alloys with a heterogeneous structure, most likely low-carbon iron with carburized zones. Irregular lamellar ferrite and acicular microstructures were observed, which may result from secondary alteration, localized carbon enrichment, or pseudo-phase corrosion products; additionally, in some areas, a pseudo-Widmanstätten structure was identified. XRD identified goethite, reflecting an alkaline, oxygen-rich burial environment with low humidity, and lepidocrocite, which accelerated corrosion. Sediments contained silica and quartz, with corrosion penetrating deep layers and causing cracking. Conservation and restoration treatments were subsequently applied.

Received: 2024/06/8
Revised: 2025/11/17
Accepted: 2025/11/27
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: Conservation & Restoration, Ancient Iron Objects, Corrosion, Beheshtabad archaeological site, SEM, XRD

Introduction

Metalworking represents one of the most significant technological and cultural achievements in human history. From as early as 4000 BC, communities in the Near East began extracting and smelting minerals to produce metals, marking a decisive shift in material culture and technological sophistication. Early experimentation was often limited by impurities in ores, yet over time, mastery of smelting techniques led to the development of tools, weapons, and ornaments that reshaped societies. During the Iranian Iron Age, approximately 1500–550 BC, the use of metals such as bronze, silver, and gold continued, but iron became the defining

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

element of the period. Its strength, availability, and adaptability distinguished it from earlier materials and enabled new technological and cultural practices. Archaeological discoveries across the Near East highlight this transition. For example, the iron dagger with a gold hilt from Alaca Höyük (2400–2300 BC) and the series of iron weapons excavated at Karagündüz (1200–1100 BC) demonstrate both the early experimentation with iron and its eventual mass production for warfare and daily life. These finds also underline the exchange of technological knowledge across regions, including Anatolia, Mesopotamia, and the Iranian plateau. Despite the cultural importance of iron, discovered iron artifacts present serious challenges to restorers. Iron is inherently unstable in buried environments and after excavation. After excavation, stable corrosion layers that have formed underground are exposed to new environmental conditions and often transform into more aggressive corrosion products. This process accelerates decay and leads to the loss of the integrity of matter and the disintegration of the object. Consequently, understanding the microstructure, corrosion mechanisms, and conservation strategies of iron artifacts is crucial for archaeological conservation.This site, with evidence spanning from the 4th–1st millennia BC to the Ilkhanid period, provides a valuable case for exploring ancient technologies and the long-term preservation of metal objects.

The present study focuses on artifacts excavated and seeks to answer three research questions:

1. What are the manufacturing techniques and microstructures of the objects?
2. What is the composition and morphology of their corrosion products?
3. What is the rate of corrosion, and which conservation strategies are most suitable?

Methodology

To address these questions, the study employed a combination of macroscopic observation, microscopy, SEM-EDS, XRD, radiography, and metallography. The results not only shed light on the production and use of iron at Beheshtabad but also provide insights into effective conservation practices for similarly vulnerable artifacts. Beheshtabad Hill is located in Ardal city, within Chaharmahal and Bakhtiari province in southwestern Iran. Archaeological surveys and excavations have revealed cultural deposits from multiple periods, including evidence of occupation in the 4th–1st millennia BC and renewed activity during the Ilkhanid era. Due to its significance, the site was registered as a national heritage property in 2006 (No. 19799). Rescue excavations were initiated prior to the construction of a dam in the area, during which several metal artifacts, including iron objects associated with burial contexts, were unearthed. The present research focuses on two iron artifacts, both resembling daggers. Object 1 preserves rivet traces, suggesting attachment to an organic handle, though the blade is fragmented and heavily corroded. Object 2 retains part of its handle, though corrosion has severely affected the blade. Both objects were covered with layers of corrosion mixed with soil deposits.

Conservation Procedures

Conservation treatment followed standard protocols aimed at stabilizing iron artifacts. Mechanical cleaning was used to remove loose soil and corrosion deposits while preserving the patina. For hard encrustations, selective chemical poultices with 10% sodium hexametaphosphate were applied. After thorough rinsing and drying, stabilization was achieved with a 2% solution of Paraloid B-72. Finally, the artifacts were placed in custom-made archival storage boxes with buffered supports, designed to minimize mechanical stress and regulate micro-environmental conditions.

Results and Discussion

Macroscopic and Microscopic Observations

Both artifacts displayed substantial corrosion, with thick, stratified layers incorporating soil particles. Common pathologies included pitting, surface cracks, and microcracks penetrating into deeper layers. Microscopic analysis revealed a tripartite stratigraphy: external sediments, corrosion phases, and remnants of the metallic core.

Fabrication Techniques

SEM–EDS: SEM was used at the Razi Metallography Research Center to examine the microstructure and semi-quantitative chemical composition of the samples. EDS analysis identified iron as the main component, with localized carbon enrichment (3.8–5.9%), and minor elements including copper, silicon, calcium, phosphorus, and potassium. Microstructural observations showed dark corrosion spots, bright and gray regions, and carbon-rich areas. Oxygen detected corresponded to corrosion processes. SEM–EDS provided qualitative elemental and corrosion-phase data; carbon measurements reflect secondary or corroded areas rather than the base metal composition (Scott, 1991).

XRD: XRD analysis identified goethite (α-FeOOH) and lepidocrocite (γ-FeOOH) as the dominant corrosion products, with magnetite (Fe_3O_4) also present. Quartz and calcite were found,

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

originating from burial sediments. The prevalence of goethite suggests that the artifacts were buried in an alkaline, oxygen-rich environment with relatively low humidity and low chloride content. However, the presence of lepidocrocite indicates localized conditions of higher humidity or acidity, which are more aggressive and accelerate deterioration. This duality underscores the complexity of corrosion processes, both in burial and post-excavation environments.

Radiography: Radiographic imaging revealed dense corrosion crusts but confirmed that metallic cores survive in both objects. This finding is significant, as it allows for ongoing conservation and demonstrates that, despite extensive degradation, the artifacts retain structural integrity beneath corrosion layers.

Conservation and Storage

The conservation process emphasized minimal intervention while stabilizing the artifacts for long-term preservation. Mechanical cleaning successfully removed loose debris and unstable corrosion, while poultices softened and detached hard sediments. Paraloid B-72 provided a reversible and protective coating, stabilizing fragile surfaces.For storage, custom archival boxes with buffered supports were constructed. These limit physical stress and provide a controlled microenvironment. Long-term preservation requires stable conditions, particularly relative humidity below 40%, moderate temperatures, and adequate ventilation to prevent reactivation of corrosion processes.

Conclusion

The study of two iron artifacts from Beheshtabad Hill provides valuable insights into both ancient ironworking technology and contemporary conservation challenges. The artifacts are composed of iron and display surface deposits enriched in elements such as phosphorus and calcium. Their archaeological context suggests that they were likely deposited in graves alongside the deceased as part of ritual or funerary practices. Phase identification of the corrosion products revealed the presence of quartz, calcite, goethite, and lepidocrocite. These mineral phases indicate that the burial environment was calcareous, slightly alkaline, and characterized by low salinity. The occurrence of goethite suggests burial conditions with relatively high oxygen availability and low moisture, whereas the presence of lepidocrocite in crust-like layers reflects the formation of lepidocrocite–goethite corrosion products under mildly acidic to neutral micro-environmental conditions. Although goethite generally indicates a relatively stable corrosion state, its presence alone is insufficient for an exact reconstruction of the burial chemistry. The artifacts exhibit numerous cracks, pitting, and carbonate-type corrosion. However, considering the non-acidic pH conditions and the absence of chloride-bearing corrosion phases, the corrosion can be classified as largely inactive. Despite extensive corrosion, portions of the metallic core remain preserved, further supporting the interpretation of a relatively stable post-burial environment. From a pathological perspective, the observed deterioration includes cracking, localized pitting, and carbonate encrustations, most of which are currently inactive and directly related to the burial chemistry. Conservation operations were carried out on the stabilization of the antiquities through mechanical cleaning, selective chemical treatments and the application of protective coatings in order to preserve the longevity of the antiquities and for the vital role of preventive conservation strategies in maintaining sustainable stability. Ultimately, this research demonstrates the importance of combining archaeometallurgical analysis with conservation science. By understanding the fabrication techniques, corrosion mechanisms, and burial environments of iron artifacts, restorers can design more effective strategies for preserving these vulnerable objects..

Author Contributions: Ideation: H.R.B.; Research and review: M.G.M. Z.S.; Supervision: H.R.B.; Project management: H.R.B.; Writing the initial draft: M.G.; Reviewing and editing the text: H.M.R.B. Z.S.; All authors have read and agreed with the published version of the article.

Funding: This research has not received any external funding.

Acknowledgments: This article is derived from Marjan Gandom Malmiri's final bachelor's project titled "Repair and Conservation of Two Iron Objects Obtained from the Excavations of Behesht Abad Hill in Chaharmahal and Bakhtiari Province" under the guidance of Hamid Reza Bakhshandeh Fard at the Department of Conservation and Restoration, Isfahan University of Art. The authors of this article would like to express their gratitude to the support of the esteemed Dean of Isfahan University of Art for providing a suitable research and investigation environment.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

پژوهه باستان سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

مقاله پژوهشی

مطالعهٔ آزمایشگاهی، حفاظت و مرمت اشیاء آهنی باستانی یافته‌شده از کاوش تپهٔ بهشت‌آباد استان چهارمحال‌وبختیاری

مرجان گندم مالمیری[۱]، زهره صادقی[۲]، حمیدرضا بخشنده‌فرد[۳،*]

۱. دانش آموختهٔ کارشناسی مرمت آثار، گروه مرمت آثار و اشیاء فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت اشیاء تاریخی فرهنگی، گروه مرمت آثار و اشیاء فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
۳. دانشیار، گروه مرمت آثار و اشیاء فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
* مسئول مکاتبات: hr.bakhshan@aui.ac.ir

چکیده

پیدایش صنعت آهن در ایران نشان‌دهندهٔ ظهور تمدن و پیشرفت فرهنگ منطقه است. تپهٔ بهشت‌آباد در شهرستان اردل واقع شده و در تاریخ ۱۳ آبان ۱۳۸۶ با شمارهٔ ۱۹۷۹۹ به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. در تپهٔ بهشت‌آباد شواهد باستان‌شناسی مربوط به هزارهٔ چهارم و اول قبل از میلاد و همچنین از دورهٔ ایلخانی وجود دارد. اشیاء کاوش‌شده از محوطه‌های باستان‌شناسی، حاوی اطلاعات مهمی است و حفاظت پایدار و دراز مدت آن‌ها و شناسایی پدیده‌های تخریب و رابطهٔ آن با محیط دفن، ضروری به‌نظر می رسد. اشیای آهنی به علت تمایل به ترکیب سریع با اکسیژن، فرایند خوردگی شدید و میل زیاد برای تبدیل‌شدن به محصولات خوردگی، همواره در معرض عوامل گوناگون تشدیدکننده بوده و در خطر نابودی و فروپاشی قرار دارند. هدف این پژوهش شناسایی ماهیت خوردگی، ویژگی‌های ریزساختاری آثار کاوش‌شده از این محوطه و اقدامات ضروری در حفظ و نگه‌داری متناسب با وضعیت اشیاء است. روش پژوهش شامل مشاهدات میکروسکوپی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس، رادیوگرافی و متالوگرافی است. نتایج نشان داد، اشیاء از آلیاژ آهنی با ساختار ناهمگن، احتمالاً آهن کم‌کربن با نواحی کربوره‌شده دارای فریت صفحه‌ای نامنظم و ریزساختارهای سوزنی می‌باشند که می‌تواند ناشی از دگرسانی ثانویه، تمرکز کربن موضعی یا محصولات خوردگی شبه‌فازی باشند و نیز در برخی قسمت‌ها ساختار شبه ویدمانشتاتن است و شیوهٔ ساخت آن‌ها آهنگری و چکش‌کاری است. نتایج پراش پرتو ایکس وجود گوتیت را اثبات کرد که نشان‌دهندهٔ محیط دفن قلیایی با میزان اکسیژن بالا و رطوبت پایین بدون یون کلریدی و لیپدوکروسیت می‌باشد که باعث تسریع در خوردگی ماتریکس آهن شده است. رسوبات محیطی ترکیبات سیلیسی و کوارتز بودند. خوردگی و گسترش ترک‌ها و نیز نفوذ خوردگی به لایه‌های زیرین نیز مشاهده شد که عملیات حفاظت و مرمت لازم بر روی آن‌ها انجام شد.

واژگان کلیدی: حفاظت و مرمت، اشیاء آهنی باستانی، خوردگی، تپهٔ باستانی بهشت‌آباد، SEM, XRD

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۹
آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۸/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۶
انتشار: ۱۴۰۴/۹/۱۰

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

۱. مقدمه

بشر عهد کهن از چهار هزار سال قبل از میلاد با ذوب انواع سنگ‌های معدنی توفیق ساخت فلزات را یافت، اما به دلیل ناخالصی‌های ترکیبات، نتیجهٔ مطلوب حاصل نشد. هر چند از دیرباز حتی قبل از عصر نوسنگی هم اقوامی چند به خواص بعضی از سنگ‌های معدنی پی برده بودند و از آن به همان حالت طبیعی استفاده می‌کردند، ولی باید گفت فلزکاری واقعی که در حدود چهار هزار سال ق. م در خاور نزدیک نزدیک شروع شده است (Aslani, 1995). در طول عصر آهن، ایران که تاریخی حدود هزار سال (۱۵۰۰–۵۵۰ ق. م) را دربردارد؛ فلزات مختلفی از جمله آهن، مفرغ، نقره و طلا مورداستفاده قرار گرفت. در میان فلزات مختلف فلزآهن، برای اولین بار در این دوره ظهور کرده و به همین دلیل نیز این دوران را عصر آهن نامیده‌اند. پیدایش صنعت آهن در ایران که دارای

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

معادنی غنی است، علاوه بر این که نشان‌دهندهٔ ظهور تمدن و پیشرفت فرهنگ منطقه بود، مقیاس و اساس تعیین ادوار کهن مانند سنگ، مس، مفرغ و آهن شد. درآلاجاهویوک در آناتولی ترکیه خنجری با قبضهٔ طلا و تیغهٔ آهنی متعلق به ۲۴۰۰–۲۳۰۰ ق.م شناسایی شده است که نشان‌دهندهٔ آشنایی این حوزهٔ فرهنگی با آهن در این دوره بوده است (Yalçın, Y, 2006. pp.495-504) (.(Zimmermann-Y, 2010). هیتیان و میتانی‌ها در غرب ایران از ۱۵۰۰ سال ق. م. آهن را می‌شناختند. در قبرستان کاراگوندوز واقع در شرق دریاچهٔ ارچک در استان وان کشور ترکیه که به ۱۲۰۰ –۱۱۰۰ قبل میلاد تاریخ گذاری شده است و بالغ بر ۱۰۰ سلاح آهنی در آن شناسایی شده که به نظر حفار سری سازی است. این آثار نشان‌دهندهٔ ساخت و استفاده از سلاح‌های آهنی به صورت سری ساخت با تعداد زیاد بوده است (Sevin, et al., 1997, pp.847-881). مجموعه‌اشیاء حفاری‌شده (اشیاء آهنی) از محوطه‌های باستان‌شناسی، حاوی اطلاعات اولیه از محوطه‌های حفاری‌شده هستند. حفاظت پایدار و درازمدت این منابع اولیه، از اهداف اصلی مرمت‌گران به شمار می‌رود. به منظور دستیابی به این اهداف، مطالعه بر روی اشیاء آهنی و شناسایی پدیده‌های تخریب و رابطهٔ آن با محیط دفن، ضروری به‌نظر می‌رسد. اشیاء آهنی به علت تمایل به ترکیب‌شدن سریع با اکسیژن، فرایند خوردگی شدید و میل زیاد آن‌ها برای تبدیل‌شدن به ترکیبات پایدار و محصولات خوردگی، همواره در معرض عوامل مختلف تشدیدکننده، در خطر نابودی و فروپاشی قرار دارند و در محیط خاک و پس از حفاری، تحت تأثیر عوامل مختلف (رطوبت، دما و...) به‌شدت آسیب‌پذیر هستند. شناسایی تأثیر خوردگی بر اشیاء آهنی در محیط خاک را می‌توان یکی از مهم‌ترین اقدامات مرمت‌گران در شناخت فرایند خوردگی و تخریب اشیاء به منظور حفظ و نگه‌داری آن‌ها و کاهش سرعت خوردگی پس از حفاری دانست(Ehsani, 2007).

مجموعه‌های فلزی به‌دست‌آمده از محوطه‌های باستانی معمولاً از نقطه‌نظر تکنولوژی فلزگری و ساخت و مقدار عناصر تشکیل‌دهندهٔ آلیاژ و ناخالصی‌ها، تکنیک ساخت و خوردگی مشابهت‌های نسبتاً زیادی با یکدیگر دارند (Robbiola et al .,1993) (Robbiola et al .,1998) . این شباهت‌ها از یک سو و اهمیت مجموعه‌های باستان‌شناسی به‌عنوان شواهد و مدارک تاریخی و فنی از سوی دیگر، نیاز به اتخاذ رویکردی یکپارچه و منسجم جهت اصالت‌سنجی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. به‌طور کلی تعیین اصالت فلزات باستانی هنوز هم یک چالش علمی مهم است که هم به متالوژی محکم و هم معیارهای مربوط نیازمند است (Robbiola & Portier, 2006) . پس از یک یا چند هزار سال، خوردگی بسیاری از اشیاء آهنی مدفون در خاک، ممکن است منجر به متلاشی‌شدن آن‌ها شود.

معمولاً در این گروه قطعات غیرقابل‌تشخیص، اشیایی که قسمت‌های مهمی از شکل اصلی خود را از دست داده‌اند و اشیایی که زیر پوششی ضخیم از اکسیدهای آهن به‌شدت خورده شده‌اند، وجود دارد. در محیط‌های دارای فعالیت زیست محیطی زیاد یا شرایط تدفین غیرهوازی ممکن است اشیاء آهنی از لایه‌های سولفیدهای مختلف آهن پوشیده شوند. خاک‌های سرشار از کلرید، باعث سوراخ و ورقه شدن اشیاء آهنی می‌شوند که معمولاً همراه با فرایند کاهش در آن و تبدیل نسبی یا کامل شئ به محصولات خوردگی است (Scott, 2009).

فازهای خوردگی و شرایط تشکیل در آهن‌های باستان اکسید و هیدروکسید آهن در طول زمان خوردگی اشیاء آهنی تاریخی، دامنهٔ وسیعی از اکسیدهای آهن را تشکیل می‌دهند که عبارتند از گوئتیت، مگنتیت، آکاگانیک و ...، که تشکیل هر کدام از آن‌ها به pH محلول‌های خاک و پتانسیل‌های اکسایش و کاهش بستگی دارد. اشیاء آهنی تاریخی که سالیان سال در محیط زیر خاک مدفون بوده‌اند، با توجه به شرایط محیطی (رطوبت نسبی بالا و میزان اکسیژن کم) که شئ تحت‌تأثیر آن قرار داشته، دچار خوردگی می‌شوند، اما شئ پس از حفاری، در شرایط محیطی جدیدی قرار می‌گیرد و محصولات خوردگی که در شرایط محیطی دفن، پایدار بوده‌اند در شرایط جدید پایدار نبوده و به محصولات جدید خوردگی تبدیل می‌شوند (Selwyn et al.,1999). اکسیدهای آهن یکی از مهم‌ترین گروه‌های ترکیبات مختلف اشیاء آهنی هستند. ترکیبات اکسیدی آهن ممکن است بر اثر فرایندهای جایگزین، ترکیبات پاتین، اجزای خاک و سایر سنگ‌های معدنی به‌عنوان محصولات خوردگی به وجود آیند. اهمیت ترکیبات آهنی بیولوژیکی از زمان بسیار دور تا به امروز توسط هلویگ با جزئیات مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. (Jafari et al ., 2015) (جدول ۱)

جدول ۱. بعضی از فازهای اکسیدی و هیدروکسیدی آهن. (Jafari et al ., 2015)

Table 1. Some oxide and hydroxide phases of iron

نام	فرمول شیمیایی	شبکه کریستال	رنگ
گوئتیت	α - FeOOH	اورتورومبیک	زرد–قهوه‌ای
لپیدوکروسیت	γ - FeOOH	اورتورومبیک	نارنجی
آکاگانیت	β - FeOOH	مونوکلینیک	زرد–قهوه‌ای
فروکسیت	δ - FeOOH	هگزاگونال	قرمز–قهوه‌ای
هماتیت	α - Fe_2O_3	هگزاگونال	قرمز
ووستیت	FeO	کوبیک	سیاه
مگنتیت	Fe_3O_4	کوبیک	سیاه
ماگهمیت	γ - Fe_2O_3	کوبیک	متمایل به قهوه‌ای

بسیاری از محصولات خوردگی اشیاء آهنی تاریخی پس از حفاری شکل می‌گیرند، محصولات خوردگی ناپایدار، می‌تواند سرعت خوردگی مغز فلزی را در محیط عادی افزایش دهد و مشکل اصلی آثار آهنی محسوب می‌شود و باید

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

زدوده شود و دلیل آسیب‌های شیمیایی پس از حفاری، تشکیل اسید هیدروکلریدریک است. دلیل آسیب فیزیکی، شکل‌گیری محصولات خوردگی جدید مانند اکسی هیدروکسیدهای آهن در میان لایه‌های سطحی است که باعث ایجاد فشار و ترک می‌شود(Jafari et al ., 2015).

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود مطالعات پراکنده در خصوص آثار فلزی محوطه‌های باستانی همجوار، در زمینه آثار این محوطه باستانی مطالعات کمی صورت گرفته است و نظر به اهمیت اشیاء مورد مطالعه در این پژوهش، شناخت این آثار و حفاظت و مرمت آن امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، پرسش های پژوهش در این مقاله شامل: ۱) جنس اشیا، و نوع عملیاتی که به منجر به ساخت آن‌ها شده، چیست ؟ و ریزساختار های نمونه‌های به‌دست آمده چگونه است؟ ۲) نوع و ماهیت محصولات خوردگی و ریخت شناسی خوردگی سطح چگونه است؟ ۳) میزان خوردگی و سرعت تخریب در اشیای مذکور چگونه است و مناسب‌ترین روش حفاظت و مرمت آن‌ها چیست؟ بر این اساس در پژوهش حاضر دو نمونه از این آثار، انتخاب و با کمک روش‌های آزمایشگاهی، نوع آلیاژ و تکنیک ساخت آن‌ها مشخص شد و سپس به آسیب‌های موجود پرداخته شد و نهایتاً عملیات لازم حفاظت و مرمت بر روی آن‌ها انجام گرفت.

۲. پیشینهٔ پژوهش

پژوهش‌های باستان‌سنجی و آرکئومتالورژیکی پیرامون آثار آهنی، چه در ایران و چه در سایر مناطق جهان، عمدتاً بر سه محور اصلی شامل فناوری تولید آهن، ویژگی‌های ریزساختاری و ترکیب شیمیایی اشیاء و فرایندهای خوردگی و پایداری آثار متمرکز بوده‌اند. بنیان نظری این رویکردها در مطالعات کلاسیک آرکئومتالورژی شکل گرفته است؛ جایی که تیلکوت با تحلیل فرایندهای کاهش مستقیم و تولید آهن اسفنجی نشان داد که ناهمگنی ترکیب شیمیایی و ریزساختار آهن‌های باستانی پیامد مستقیم محدودیت‌های کنترل دما، اکسیژن و ترکیب مواد اولیه در کوره‌های کهن است (Tylecote, 1987). در ادامه، پلینر با تمرکز بر مطالعات تطبیقی اروپا، این ناهمگنی را به‌عنوان شاخصی از بلوغ فناوری آهن و تنوع مسیرهای تولید در عصر آهن معرفی کرد (Pleiner, 2000).

در ایران، مطالعات انجام‌شده توسط لورنز در ۲۰۰۸ بر روی ۱۷۱ نمونه از اشیاء آهنی بازگیر در مؤسسهٔ باستان‌سنجی دانشگاه فرایبرگ آلمان، اگرچه به‌طور کامل منتشر نشده‌اند، اما از نخستین تلاش‌ها برای تحلیل سیستماتیک آثار آهنی ایران به‌شمار می‌روند. همچنین پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی در جنوب‌شرق ایران، در محدودهٔ مثلث سیرجان–نیریز–شهربابک، شواهدی روشن از معدن‌کاری کهن آهن، بقایای کوره‌های ذوب و انباشت سرباره‌ها ارائه داده‌اند. نتایج آنالیزهای شیمیایی و مینرالوژیکی نشان می‌دهند که فلزگران این منطقه از دو مسیر فناورانه شامل تولید آهن اسفنجی و چدن مذاب بهره می‌برده‌اند و قدمت این فعالیت‌ها به حدود ۵۰۰ سال پیش از اسلام تا قرون اولیهٔ اسلامی بازمی‌گردد (Abbasnejad, 2009). این نتایج با مدل‌های نظری ارائه‌شده توسط تیلکوت دربارهٔ تنوع مسیرهای تولید آهن هم‌خوانی دارند (Tylecote, 1987). از منظر فناوری ساخت ادوات و سلاح‌های آهنی، مطالعات مربوط به آثار لرستان اهمیت ویژه‌ای دارند. سلاح‌های آهنی به‌دست‌آمده از گوهرلرستان، شامل شمشیرها و خنجرها، نشان‌دهندهٔ سطح بالایی از پیچیدگی فنی هستند. بررسی‌های متالوگرافی و ریزساختاری نشان می‌دهند که این آثار غالباً از طریق ترکیبی از ریخته‌گری اولیه، چکش‌کاری و جوشکاری آهنگری ساخته شده‌اند (Moshtagh Khorasani, 2009). این الگوی تولید، با آنچه پلینر در مورد فناوری پیشرفته سلاح‌سازی عصر آهن اروپا مطرح کرده، قابل مقایسه است (Pleiner, 2000). کاوش‌های ارگ حسنلو (دوره IVB، اواخر قرن نهم پیش از میلاد) منجر به کشف حدود ۲۰۰۰ شیء آهنی شد که نزدیک به ۶۵ درصد آن‌ها را سلاح‌ها تشکیل می‌دهند. تحلیل‌های متالوگرافی نشان می‌دهند که این آثار عمدتاً از آهن کم‌کربن ناهمگن با کربن‌دهی موضعی ساخته شده‌اند. وجود اشیاء مرکب شامل نیزه‌هایی با سوکت آهنی و تیغهٔ برنزی، یا خنجرهای آهنی با اجزای پرچ‌شده، بیانگر هم‌زیستی و گذار تدریجی فناوری‌های برنز و آهن است (Pigott, 2004). این الگو پیش‌تر در چارچوب نظری پلنیر به‌عنوان یک ویژگی شاخص جوامع در حال گذار فناورانه معرفی شده است (Pleiner, 2000).

در خارج از ایران، پژوهش‌های متعددی بر نقش ترکیب شیمیایی سرباره‌ها در بازسازی فناوری ذوب آهن تأکید کرده‌اند. در حفاری شهرستان سومگی در مجارستان، نتایج آنالیزهای XRD و SEM-EDS نشان دادند که هم سنگ معدن آهن و هم شمش‌های تولیدشده دارای محتوای بالای فسفر هستند و فازهای کلسیم فسفات به صورت متبلور در ریزساختار سرباره حضور دارند؛ موضوعی که نقش تعیین‌کنندهٔ فسفر در فلزگری این منطقه را آشکار می‌کند (Thiele et al., 2012). مطالعات انجام‌شده در منطقهٔ کامپانیا نیز با استفاده از رویکرد چندتکنیکی (XRD و SEM-EDS) نشان دادند که سرباره‌ها عمدتاً از فازهای اکسیدی آهن (مگنتیت و وستیت جزئی) و سیلیکات‌ها تشکیل شده‌اند و فرایند کاهش از مگنتیت به وستیت و نهایتاً آهن فلزی صورت گرفته است (Balassone et al., 2009).

مطالعات انجام‌شده بر کارگاه‌های ذوب آهن اسکاندیناوی متعلق به عصر آهن نیز نشان می‌دهند که آهنگران این مناطق از فرایندهای کلیدی کاهش اولیه، جوشکاری آهنگری و چکش‌کاری گسترده استفاده می‌کرده‌اند که از طریق آنالیزهای ماکروسکوپی و SEM-EDS شناسایی شده‌اند (Balassone et al., 2009). یافته‌های مشابهی در هند، در سایت‌های نیکوند و بهاگاموری، گزارش شده‌اند؛ جایی که بررسی‌های متالوگرافی نشان می‌دهند که اشیاء آهنی

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

از طریق عملیات مکانیکی–حرارتی چندمرحله‌ای ساخته شده‌اند (Deshpande & Dhokey, 2008).

در دوره‌های تاریخی متأخرتر، به‌ویژه قرون وسطی، آهن نقش مهمی در معماری مذهبی و غیرنظامی ایفا کرده است. بررسی‌های آرکئومتریک انجام‌شده بر میله‌ها، بست‌ها و چنگک‌های آهنی کاخ پاپ آوینیون با استفاده از متالوگرافی، میکروسکوپ نوری و SEM-EDS نشان می‌دهد که تولید آهن عمدتاً به روش مستقیم انجام شده و در برخی موارد از فولادهای هیپویوتکتوئید نسبتاً همگن با ناخالصی‌های اندک استفاده شده است (Chitty et al., 2005).

در حوزهٔ خوردگی آثار آهنی، پژوهش‌های دیلمن و همکاران نقطهٔ عطف محسوب می‌شوند. این مطالعات نشان می‌دهند که حضور فازهایی نظیر آکاگانتیت (β-FeOOH) به‌عنوان شاخص خوردگی فعال و ناپایدار، ارتباط مستقیمی با حضور یون‌های کلرید در محیط دفن دارد و می‌تواند به تخریب سریع آثار پس از حفاری منجر شود (Dillmann et al., 2007; Dillmann et al., 2011). این چارچوب نظری در مطالعات متعددی مورد تأیید قرار گرفته است.

برای مثال، در مطالعهٔ یک چاقوی آهنی کشف‌شده در صربستان، آنالیز XRD نشان داد که فازهای غالب محصولات خوردگی شامل گوئتیت و مگنتیت هستند و عدم شناسایی آکاگانتیت بیانگر غلظت پایین یون‌های کلرید در محیط دفن است (Jegdić, 2012). در آفریقای جنوبی، بررسی لایه‌های خوردگی آثار آهنی با استفاده از SEM-EDS، XRD و طیف‌سنجی میکرو رامان نشان دادند که ترکیب فازهای گوئتیت، لپیدوکروسیت، مگنتیت، مگهمیت و هماتیت به‌شدت تحت‌تأثیر نفوذ اکسیژن و شرایط محیطی است (Koleini et al., 2013).

همچنین روگر و همکارانش نشان دادند که مکانیسم‌های خوردگی وابسته به کلر نه‌تنها در محیط‌های دریایی بلکه در شرایط زیرخاکی نیز فعال هستند و می‌توانند منجر به ناپایداری شدید آثار آهنی پس از تغییر شرایط محیطی شوند. این دیدگاه در مطالعات حفاظتی بعدی به‌عنوان یک اصل اساسی پذیرفته شده است(Reguer et al. 2007). در همین راستا، پژوهش‌های انجام‌شده بر اشیای آهنی در سونگی، باتوبوجانگ و لی با استفاده از XRF، XRD و SEM-EDS نشان دادند که ترکیب سنگ معدن، سرباره و ناخالصی‌های موجود در اشیاء آهنی ارتباط مستقیمی با منابع محلی و شرایط کوره دارد (Mokhtar et al., 2011).

مرور تحلیلی پیشینهٔ پژوهش نشان می‌دهد که فناوری تولید و شکل‌دهی آهن در باستان فرایندی چندمسیره، محلی‌محور، فناورانه و پیچیده بوده است (Tylecote, 1987; Pleiner, 2000). افزون بر این، مطالعات خوردگی نشان می‌دهند که پایداری آثار آهنی به‌شدت تابع شرایط محیطی دفن و حضور فازهای ناپایدار کلردار است (Dillmann et al., 2007; Reguer et al., 2007). این مجموعه پژوهش‌ها، چارچوب نظری و روش‌شناختی لازم را برای تحلیل آثار آهنی موردمطالعه در پژوهش حاضر فراهم می‌کند. با وجود مطالعات متعدد، داده‌های آرکئومتالورژیکی از زاگرس مرکزی، به‌ویژه در پیوند با حفاظت و مرمت، همچنان محدود است.

۳. مواد و روش

۳-۱. معرفی محوطه

شهرستان اردل یکی از شهرستان‌های استان چهارمحال و بختیاری در ایران و موقعیت جغرافیایی ۳۱٫۹۹۷۹۷۰۱ درجهٔ شمالی و ۵۰٫۶۶۲۰۵۷۴ درجهٔ شرقی در ارتفاع ۱۳۸۸ متری از سطح دریا است. اردل در فاصلهٔ ۸۶ کیلومتری بروجن و ۷۵ کیلومتری جنوب باختری شهرکرد، در مسیر جادهٔ ارتباطی استان خوزستان به استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. آب و هوای آن معتدل مایل به سرد و خشک و بیش‌ترین درجه حرارت در تابستان‌ها ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد و کم‌ترین درجهٔ حرارت در زمستان‌ها ۷ درجهٔ سانتی‌گراد زیر صفر است. میزان باران سالانه اردل به‌طور متوسط ۵۰۰ میلی‌متر است (شکل ۱). در تپهٔ بهشت‌آباد شواهد باستان‌شناسی مربوط به هزارهٔ چهارم و اول قبل از میلاد و هم‌چنین از دورهٔ ایلخانی وجود دارد. این تپه در شهرستان اردل، بخش مرکزی، دهستان ناغان، مجاور روستای بهشت آباد واقع شده است. این اثر در تاریخ ۱۳ آبان ۱۳۸۶ با شمارهٔ ثبت ۱۹۷۹۹ به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است (Rahjo , 2016)

شکل ۱. موقعیت منطقهٔ بهشت‌آباد (Rahjo , 2016).

Figure. 1. Location of Beheshtabad area

۳-۲. معرفی آثار

این پژوهش شامل مطالعه، مرمت و حفاظت دو شئ آهنی یافته از کاوش نجات بخشی تپهٔ باستانی بهشت‌آباد است. با توجه به این‌که پس از ساخت و آبگیری سد، روستاهای بهشت‌آباد، شیخ محمود، سنگ بیل و شهر کاج به زیر آب می روند، این امر توسط کارشناسان ادارهٔ کل میراث فرهنگی چهار محال و

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

بختیاری در این حوضه انجام شد که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده می‌تواند مربوط به هزارهٔ اول قبل از میلاد باشد. شئ ۱ کاملاً از گل و لای پوشیده شده است و روی سطح آن محصولات خوردگی و زنگ‌زدگی مشاهده شد. محصولات خوردگی به رنگ زرد–نارنجی–قهوه‌ای تیره و روشن هستند. یک قطعه آهن روی آن پرچ شده که با توجه به پرچ دقیق در قسمت بالای شئ احتمال می‌رود که شئ ابزاری مانند خنجر بوده باشد که دستهٔ آن به مرور زمان جدا شده است. به علت خوردگی زیاد و زنگ زدگی، اشیاء سست و ناپایدار شده‌اند (شکل ۲ و ۳). سطح شئ ۲ که بخشی از شئ ابزاری دیگری مانند خنجر است و بخش سر کج دستهٔ حفظ‌شده و بخش تیغهٔ آن بیشتر آسیب دیده است. این شیء نیز به علت خوردگی شدید و زنگ‌زدگی پوشیده از محصولات خوردگی به رنگ‌های زرد–نارنجی–قهوه‌ای است. لبه‌های کناری و دسته یکنواخت نبوده و در بعضی قسمت‌ها شکستگی وجود دارد. محصولات خوردگی موجود روی شئ با رسوبات محیطی به صورت لایه‌های متراکم مشاهده می‌شوند (شکل ۴ و ۵). مشخصات کلی این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات کلی نمونه‌های موردآزمایش

Table 2. General characteristics of the tested samples

مشخصات شیء	ارتفاع (Cm)	عرض شئ کمترین (Cm)	عرض بیشترین (Cm)	لبه (Cm)	وزن شی قبل از مرمت (gr)
شئ ۱	7.10	3	6.1	4	16.8
شئ ۲	8.12	6.1	14.1	7	26.5

شکل ۲. شئ۱ از نمای روبرو قبل از مرمت

Figure. 2. Object 1 from the front facade before restoration

شکل ۳. شئ۱ از نمای پشت قبل از مرمت

Figure. 3. Object 1 from the back view before restoration

شکل ٤. شیء۲ از نمای روبرو قبل از مرمت

Figure. 4. Object 2 from the front facade before restoration

شکل ٥. شیء ۲ از نمای پشت قبل از مرمت

Figure. 5. Object 2 from the back view before restoration

۳-۳. روش‌ها

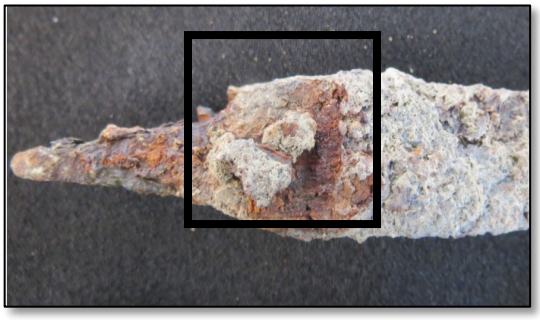
در تحقیق حاضر نمونهٔ آثار انتخاب‌شده با کمک آزمایش‌هایی نظیر مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تفرق یا پراش پرتو ایکس (XRD) و متالوگرافی؛ نوع آلیاژ و تکنیک ساخت، مورد بررسی قرار گرفتند و سعی شد تا با توجه به محدودیت‌ها، از جمله ناممکن بودن نمونه‌برداری از اشیاء و محدودیت در روش‌های آنالیز در دسترس، کمیت مناسب انتخاب و نمونه‌برداری انجام شود؛ به‌طوری که پاسخگوی سؤالات تحقیق باشند. نمونه‌برداری این اشیاء با کمک اره از نواحی غیرقابل رؤیت انجام گرفت و در رزین اپوکسی ثابت شد و بعد از مراحل پولیش جهت انجام متالوگرافی به وسیلهٔ خمیر الماس صیقل داده شدند. نمونه‌های آماده‌شده برای انجام آنالیز نقطه‌ای به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA II، ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک و بدون اچ کردن در اختیار مرکز پژوهش متالوگرافی رازی قرار گرفتند. به منظور شناسایی محصولات خوردگی و فازهای موجود در آن از دستگاه پراش اشعهٔ ایکس دستگاه XRD مدل D8ADVANCE کمپانی Bruker کشور آلمان در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان، استفاده شد. برای مشاهدات میکروسکوپی و شناسایی ریزساختار نمونه‌ها، از لوپ دیجیتال با مدل Dino Lite AM3013T ساخت کشور تایوان با بزرگنمایی‌های متفاوت لستفاده شد. برای اچ کردن نمونه‌ها نیز مقرر شد که از محلول نیتال که همان اسید نیتریک ۲۰ درصد در اتانول است، استفاده گردد. اما شئ موردنظر به مرور زمان و به‌طور طبیعی اچ شده بود و لزومی به دوباره اچ‌کردن نداشت و از ساختار قبل از اچ آن در مطالعات استفاده شد. به جهت مطالعات آسیب‌شناسی، از دستگاه رادیوگرافی توسط دستگاه مدل جیلاردونی ساخت ایتالیا در آزمایشگاه رادیوگرافی دانشکدهٔ مرمت، استفاده شد

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

و مقدار و شکل آسیب‌ها مشخص و تعیین گردید. جهت مرمت این اشیاء نیز عملیات پاکسازی و تثبیت نهایی انجام شد.

شکل ٦. نوک تقریباً تیز با محصولات خوردگی

Figure. 6. Relatively sharp tip with corrosion products



شکل ۷. محل اتصال با پرچ

Figure. 7. Rivet connection

شکل ۸. خوردگی به شکل حفره

Figure. 8. Corrosion in the form of cavities

٤. بحث

٤-١. مشاهدات ماکروسکوپی

در این آزمایش همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، مشخص شد که شئ ۱ از جنس آهن است و از نظر شکل ظاهری شبیه به یک خنجر کوچک است که در قسمت بالایی آن (شکل ۷)، اتصال یا پرچی قرار دارد که از دو تکه‌بودن آن حکایت می‌کند. نوک آن تقریباً تیز است و در اطراف پرچ، خوردگی نسبتاً زیادتری از قسمت‌های دیگر به رنگ نارنجی و قهوه‌ای دیده می‌شود. رسوبات محیطی کل سطح شئ را پوشانده‌اند که باعث ایجاد سطحی ناهموار شده است. در قسمت پایین آن نیز صورت خوردگی به شکل حفره دیده می‌شود (شکل ۸).

در مشاهدهٔ ماکروسکوپی شئ ۲، وجود قشر ضخیم رسوبات محیطی که به صورت غیریکنواخت لایهٔ بیرونی شی، را احاطه کرده بود (شکل ۹)، قابل رؤیت بود و فلز تنها در بخش‌های شکستگی آن دیده می‌شد. رسوبات محیطی (گل و لای و سنگریزه) و ترکیب آن با محصولات خوردگی در شئ مذکور قابل مشاهده بود. رسوبات پودری نارنجی و قهوه‌ای رنگ سطح بیرونی اثر را پوشانده (شکل ۱۰) و در قسمت میانی، یک قطعه آهن کوچک به سطح شئ چسبیده شده بود (شکل ۱۱). خوردگی حفره‌ای در این شئ همانند شئ ۱ مشاهده شد (شکل ۱۲).

شکل ۹. وجود رسوبات محیطی

Figure. 9. Presence of environmental sediments

شکل ۱۰. رسوبات پودری نارنجی و زرد رنگ

Figure. 10. Orange and yellow powdery deposits

شکل ۱۱. آهن چسبیده‌شده به سطح

Figure. 11. Iron stuck to the surface

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

شکل ۱۲. خوردگی حفره‌ای ریز در سطح

Figure. 12. Surface pitting corrosion

٤-۲. مشاهدات میکروسکوپی

این روش امکان مطالعهٔ ریخت‌شناسی، خوردگی سطح نمونه‌ها و قابلیت مقایسهٔ شرایط سطحی نمونه‌ها را میسر می‌سازد. روی اشیاء لایه‌های متفاوتی دیده می‌شوند که از رنگ‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. سطحی‌ترین لایه شامل رسوبات محیطی است که حاصل محل دفن شئ می‌باشد. لایهٔ رسوبات خاکی بیش‌تر اشیاء را پوشانده و در بعضی قسمت‌ها ضخامت بیش‌تری دارند. مشاهدهٔ میکروسکوپی توسط لوپ دیجیتال با مدل Dino Lite AM3013T ساخت کشور تایوان با بزرگنمایی‌های متفاوتی انجام شد که در این مشاهدات رسوبات به رنگ‌های نارنجی، زرد و سفید دیده می‌شوند (شکل ۱۳)؛ رسوبات نارنجی به صورت لایه‌ای در عکس مشخص هستند. (شکل ۱۴). با توجه به این‌که اشیاء دارای ثبات و ایستایی کافی نبوده، قسمت‌های سُست با کم‌ترین فشار به تکه‌های کوچک‌تر تبدیل شده و از قطعهٔ اصلی جدا می‌شدند. در تصاویر شیارها، شکاف‌ها و ریزترک‌های محسوسی بر سطح شیء و موازی با آن به‌خوبی مشاهده می‌شوند (شکل ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸).

٤-۳. تکنیک ساخت

در پی پاسخگویی به تکنیک ساخت و آلیاژ به‌کاررفته در این اشیاء، از آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (SEM-EDS) و متالوگرافی استفاده شد که در ادامه نتایج آن مورد بحث قرار گرفته‌اند.

٤-۳-۱. میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (SEM-EDS)

به منظور شناسایی و بررسی نیمه‌کمی ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها و مشاهدهٔ ریزساختار، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA II، ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک در مرکز پژوهش متالوگرافی رازی بهره گرفته شد. این ابزار یکی از متنوع‌ترین تجهیزات برای بررسی ریزساختار مواد است. این آنالیز EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) که به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) متصل است، ذاتاً روشی نیمه‌کمی برای تعیین خواص مواد به محسوب می‌شود. ریزساختار نمونه‌ها شامل ماتریس فلزی همراه با ساختار مشاهده‌شده شامل نقاط تیره گرد و روشن هستند و در زمینه پراکنده شده‌اند. هم‌چنین نقاط بسیار تیره نیز در ماتریس دیده می‌شوند که خوردگی‌ها را نمایش می‌دهند. هم‌چنین مناطق خاکستری‌رنگ از کربن پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۱۹ و ۲۰). نتایج آنالیز در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

شکل ۱۳. رسوبات نارنجی، زرد و سفید

Figure. 13. Orange, yellow, and white sediments

شکل ۱٤. رسوبات نارنجی لایه‌ای

Figure. 14. Layered orange sediments

شکل ۱۵. شیارهای موجود در سطح

Figure. 15. Grooves on the surface

شکل ۱٦. شکاف‌های موجود در سطح

Figure. 16. Cracks in the surface

شکل ۱۷. ریزترک‌های موجود در سطح

Figure. 17. Microcracks on the surface

شکل ۱۸. ترک موازی با سطح

Figure. 18. Crack parallel to the surface

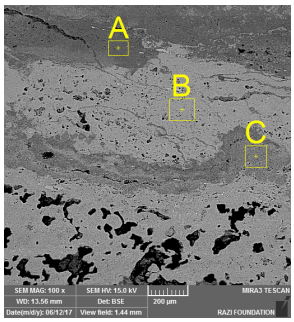
[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

جدول ۳. توزیع عناصر در دو نمونهٔ ۱ و ۲ بر اساس درصد وزنی

Table 3. Distribution of elements in samples 1 and 2 based on weight percentage

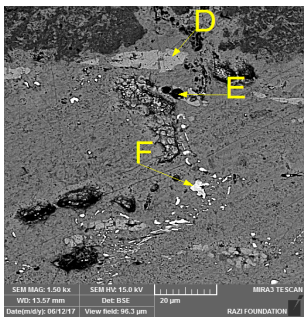
نقاط		عناصر							
		C	O	Fe	Cu	Si	Ca	P	K
شی۱	A	6.94	53.30	38.95	0.80	–	–	–	–
شی۱	B	4.84	43.34	51.45	0.36	–	–	–	–
شی۱	C	5.94	48.70	45.07	0.30	–	–	–	–
شی۲	D	5.36	37.83	56.47	0.34	–	–	–	–
شی۲	E	12.41	46.93	4.15	0.30	0.82	24.84	10.31	0.24
شی۲	F	19.90	–	79.71	0.39	–	–	–	–

در جدول ۳ نقاط A، B، C مربوط به شیء ۱ آورده شده‌اند. بر این اساس مقادیر کربن به‌ترتیب برابر با ۶/۹۴، ۴/۸۴و ۵/۹۴ هستند که احتمالاً ناشی از تمرکز کربن موضعی است. در آنالیز نقطه‌ای مربوط به این شیء (شکل ۱۹) نقطه B ماتریس فلزی است.



شکل ۱۹. آنالیز نقطه‌ای نمونهٔ ۱

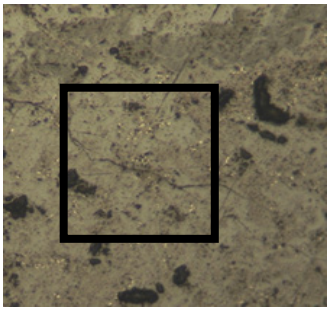
Figure. 19. Sample 1 spot analysis



شکل ۲۰. آنالیز نقطه‌ای نمونهٔ ۲

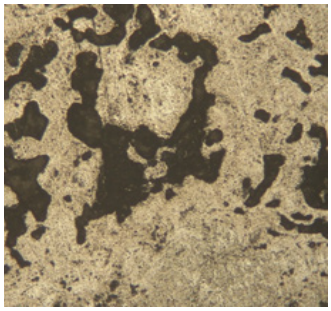
Figure. 20. Sample 2 spot analysis

با توجه به داده های این جدول و بر اساس مقادیر به‌دست آمده از عناصر در این نقطه میزان آهن۵۱/۴۵ درصد و میزان کربن ۴/۸۴ درصد که نشانه تمرکز کربن موضعی نایکنواختی است، معمولاً ۳/۸-۴/۷٪، (Scott, D. A. 1991, p. 37). همراه با سیلیس و سایر تفاله‌ها، که باعث شکننده‌شدن اثر شده و مستقیماً به‌عنوان ماده به‌جز برای کاربردهای محدود، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. هم‌چنین میزان قابل‌توجه عنصر اکسیژن در این نقاط مربوط به فرایند خوردگی اثر است. مقادیر مس به‌عنوان ناخالصی محسوب می‌شود و نقش چندانی در فرایند استحصال و ساخت اثر نداشته است. هم‌چنین در این جدول داده‌های مربوط به شیء دوم آمده است. بر این اساس در نقطهٔ D میزان کربن ۵/۳۶ درصد و میزان آهن ۵۶/۴۷ درصد است و در سایر نقاط میزان کربن به صورت نایکنواختی افزایش یافته و تمرکز کربن موضعی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که آنالیز SEM-EDS صرفاً برای شناسایی کیفی عناصر و محصولات خوردگی به کار رفت و داده‌های مربوط به کربن، به دلیل محدودیت‌های ذاتی روش، تنها به‌عنوان حضور احتمالی کربن در نواحی خورده‌شده یا فازهای ثانویه تفسیر شده و مبنای تعیین ترکیب فلز پایه قرار نمی‌گیرد. این موضوع می‌تواند مربوط به شرایط کوره و نحوهٔ استحصال اثر باشد. با افزایش دمای تمپرینگ، تأثیر محتوای کربن بر سختی ساختارهای معتدل به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. مس از ۰/۳۰ ، ۰/۳۴ و ۰/۳۹ درصد است که مقادیر جزیی به شمار می‌رود و نقش موثری در ساخت اثر ندارد. هم‌چنین درصد ناچیزی از سایر عناصر نظیر سیلسیم، کلسیم، فسفر و پتاسیم نیز در نقطهE شناسایی شد. مقادیر قابل توجه از کلسیم و فسفر در این اثر مربوط به محیط دفن است. مهم‌ترین افزودنی‌های آلیاژی یا ناخالصی تا دوران باستان و تاریخی چدن های مربوط به سیلیکون، گوگرد و فسفر است (Scott, D. A. 1991, p.96). در پایان بایستی متذکر شد، روش EDS صرفاً برای شناسایی عناصر اصلی و محصولات خوردگی استفاده شد و مشخصاً به منظور تعیین کمی کربن به کار نرفته است.



شکل ۲۱. وجود فریت صفحه‌ای نامنظم (بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر)

Figure. 21. Presence of irregular plate ferrite (100x magnification)



شکل ۲۲. وجود آخال‌ها (بزرگنمایی۱۰۰ برابر)

Figure. 22. Presence of inclusions (magnification 100x)

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

٤-٣-٢. متالوگرافی

این آزمایش برای بررسی ریزساختارهای فلزات با بزرگنمایی بالا است و نقش عمده‌ای در شناسایی بافت فلز، انواع بلورها، دانه‌بندی‌ها، ترکیب مواد آلیاژها و حتی شیوه ساخت فلز و نوع آسیب‌های وارده بر آن دارد و عملیات مکانیکی و حرارتی اعمال شده روی فلز و خوردگی‌ها و لایه پوشش روی فلز را در صورت وجود نشان می‌دهد.

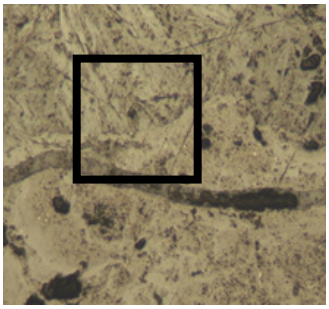
در شکل‌های متالوگرافی از نمونه‌های مورد بررسی، چند ساختار دیده شد. بخش‌هایی از ساختار شئ حاوی فریت بوده و دانه‌های فریت با اندازه‌های متفاوتی در سطح نمونه پخش شده‌اند (شکل ۲۱). این اشیاء از آهن کار شده(آهن نرم)، ساخته شده‌اند (بخشنده فرد،۱۳۸۹) و دارای پراکندگی آخال‌های سرباره‌ای است، که بعضی از آخال‌ها در عرض پهنای مقطع کشیده شده هستند (شکل ۲۲). این آخال‌ها شامل فاز شیشه‌ای خاکستری تیره است، که این جنبه ممکن است به دلیل انجام کار سرد در بعضی مراحل ساخت ایجاد شده باشد. حضور آخال‌های سرباره‌ای کشیده و جهت‌دار نشان‌دهنده تولید آهن به روش احیای مستقیم و تغییر شکل پلاستیک در حالت جامد است. این ویژگی با فرایند آهنگری سنتی و ناهمگنی شیمیایی آهن‌های کم‌کربن تاریخی سازگار بوده و با مواد ریخته‌گری‌شده یا فلزات پرکربن هم‌خوانی ندارد. آخال‌ها در سطح نمونه پراکنده بوده که بعضی از آخال‌ها در عرض پهنای مقطع کشیده شده هستند در حالی که بقیه گرد و کروی هستند. هم‌چنین شاهد بافتی یکدست بوده که در مرکز آن آخال‌های کشیده و گرد تیره وجود دارد و در شکل متالوگرافی شئ این ساختار که باید به صورت لبه‌های خطی و تیز در هم فرو رفته مشاهده شود در بعضی قسمت‌ها قابل مشاهده است. این ساختار، ساختاری سخت و سوزنی شکل است که می‌توانند ناشی از فریت سوزنی، ناهمگنی موضعی ترکیب شیمیایی یا تحولات ثانویه باشند. (شکل ۲۳). ریزساختارهای سوزنی و ساختارهای خطی تیز در بعضی از قسمت‌های شئ احتمال ساختار شبه ویدمانشتاتن وجود دارد با توجه به ناهمگنی ترکیب شیمیایی و نبود کنترل حرارتی در فرایندساخت ، می‌توان ساختارهای مشاهده‌شده را به‌عنوان شبه‌ویدمنشتاتن تفسیر نمود. (شکل ۲۴).

٤-٤. آسیب‌شناسی نمونه‌ها

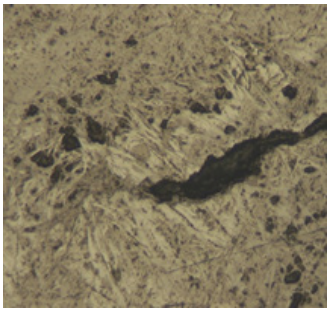
هدف از آسیب‌شناسی در آثار تاریخی، بررسی انواع و اشکال مختلف عوامل آسیب‌رسان و دلایل آن است تا با تحلیل اطلاعات حاصل از بررسی و مشاهدات عینی، مطالعات میکروسکوپی و ماکروسکوپی و انجام مطالعات آزمایشگاهی، مناسب‌ترین روش درمان ارائه شود.

٤-٤-١. رادیوگرافی

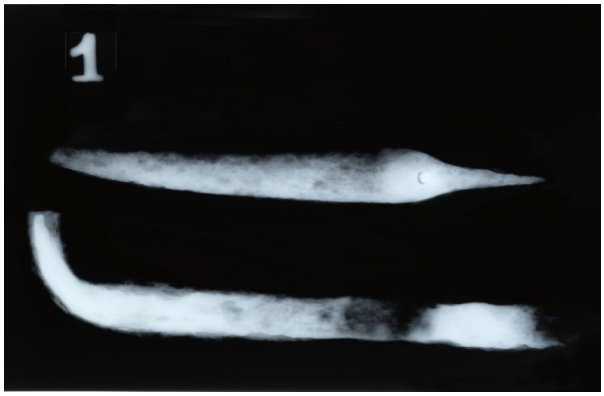
پرتونگاری اشعه ایکس باعث شناسایی لایه‌های مختلف اشیاء شده که بر روی صفحه حساس فیلم انجام می‌شود. اشعه ایکس با خاصیت طول موج کوتاه خود قادر به نفوذ به لایه‌های مختلف و نسبتاً ضخیم اشیاء می‌شود. در این شکل‌ها، اثری از ترک و نقش تزئینی در اشیاء دیده نمی‌شود که این نشانگر عدم آسیب عمیق در اشیاء است. اشیاء مورد مطالعه توسط دستگاه اشعه ایکس با مارک تجاری جیلاردونی ساخت ایتالیا در آزمایشگاه رادیوگرافی دانشکده مرمت با اختلاف پتانسیل‌ها و زمان‌های متفاوت و شدت جریان ۵/۴ میلی آمپر و در مدت زمان ۵ دقیقه تحت اشعه ایکس قرار داده شدند که مشاهدات به شرح زیر است. (شکل ۲۵).



شکل ۲۳. ساختار سوزنی
(بزرگنمایی۲۰۰ برابر)
Figure. 23. Needle structure
(magnification 200 X)



شکل ٢٤. ساختار شبه ویدمانشتاتن
(بزرگنمایی۲۰۰ برابر)
Figure. 24. psudo
Widmanstätten



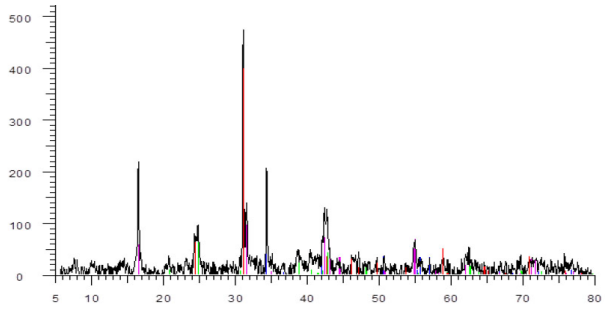
شکل ۲۵. عکس رادیوگرافی نمونه‌های مطالعاتی
Figure. 25. Radiographic images of study samples

٤-٤-٢. آنالیز پراش اشعهٔ ایکس (XRD)

پراش اشعهٔ ایکس روشی است که از آن برای تعیین آرایش اتم‌ها در یک نمونهٔ جامد استفاده می‌شود. از آن‌جا که طول موج برخی از تابش‌های ایکس، تقریباً برابر با فاصلهٔ بین صفحات اتمی در جامدهای بلوری است، هنگامی‌که یک شعاع اشعهٔ ایکس به یک چنین جامدی برخورد می‌کند، پیک‌های پراش

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

تقویت‌شدهٔ تابش مورد ظر با شدت‌های گوناگون تولید می‌شوند. جهت شناسایی محصولات خوردگی و فازهای موجود در آن، مقدار کمی از رسوبات و محصولات خوردگی به صورت پودر آنالیز در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان، بخش XRD توسط دستگاه D8ADVANCE انجام گرفت که نتایج آن به صورت نمودار (شکل ۲۶) و جدول ارائه شده‌اند. حضور هر یک از محصولات خوردگی روی سطح اشیاء تاریخی، نشان‌دهندل شرایط محیطی محل دفن اشیاء و نحوهٔ تشکیل این محصولات خوردگی است. با توجه به جدول ۴ نمونه شامل کوارتز و کلسیت که جز رسوبات محیطی هستند و گوئتیت و لپیدوکروسیت که از محصولات خوردگی هستند، شناسایی شد.



شکل ۲۶. نتایج حاصل از طیف‌سنجی آنالیز XRD

Figure 26. Results from XRD analysis spectroscopy

جدول ٤. نتایج حاصل از آنالیز XRD

Table 4. Results from XRD analysis

PDF Number	Formula	Compound Name	Line Color
46-1045	SiO_2	Quartz, syn	
05-0586	$CaCO_3$	Calcite, syn	
29-0713	FeO(OH)	Goethite	
44-1415	FeO(OH)	Lepidocrocite, syn	

در اشیاء مورد مطالعه همان‌طورکه در نتایج آزمایش XRD مشخص شد، وجود گوئتیت که از طریق اکسایش محیطی آهن و هیدرولیز ترکیبات مایع یا جامد به وجود آمده، نشان دهنده محیط دفن قلیایی است با میزان اکسیژن بالا و رطوبت پایین همچنین عدم حضور محصولات خوردگی کلریدی در اشیاء نشان دهنده محیطی بدون یون کلریدی است. البته بایستی متذکر شد، شناسایی گوئتیت نشان‌دهنده پایداری نسبی محصولات خوردگی است، اما به‌تنهایی برای بازسازی دقیق شرایط شیمیایی محیط دفن کافی نیست. لایه لپیدوکروسیت به شکل پوسته مانند با ساختارهای شبیه گلبرگ است. لپیدوکروسیت ممکن است به مرور زمان های طولانی مدت به گوئتیت تبدیل شود. تشکیل ازلپیدوکروسیت و گوئتیت در شرایط اسیدی ملایم تا خنثی است. گوئتیت نیز می‌تواند تحت شرایط به شدت اسیدی نیز شکل گیرد و تحت شرایط اسیدی می‌تواند به Fe^{2+} تبدیل شود و باعث تسریع در خوردگی ماتریکس آهن شود Turner, Lisheng, (Chi , 2012) و می‌تواند تحت شرایط اسیدی از محصولات خوردگی مخرب برای اشیاء آهنی باستانی محسوب شود. رسوبات محیطی شناسایی شده شامل ترکیبات سیلیسی و وجود کوارتز نشان دهنده سیلیسی است که بیشتر روی سطح زمین است و این هم نشان دهنده این است که شئ در نزدیک سطح زمین پیدا شده است.

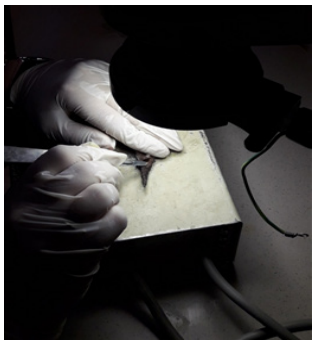
٤-٥. عملیات مرمت و حفاظت

هدف از درمان و مرمت اشیاأ فلزی، حفاظت از شئ و نمایان‌کردن ماهیت واقعی اثر است. نتیجهٔ این عملیات آزمایشگاهی که با کنترل کامل علمی، صورت می‌گیرد، در پاره‌ای موارد خیره‌کننده است. لیکن باید توجه داشت که این تغییر شدید ظاهری، الزاماً نباید نتیجهٔ یک روش مرمتی شیمیایی باشد. در بسیاری موارد، لازم است شئ فلزی چنان تحت کارهای آزمایشگاهی و مرمتی قرار گیرد که قشر نازک پاتین روی آن از بین نرود، چرا که این قشر از دیدگاه زیبایی و هنری، ارزش بیش‌تری به اثر می‌بخشد و در مواردی ممکن است شدت خوردگی فلز به‌حدی باشد که برداشتن رسوبات حاصل از آن، خود شئ فلزی را به خطر بیندازد. انتخاب روش و ترتیب اقدامات حفاظتی بر اساس نتایج XRD انجام شد تا شرایط محیط دفن و وضعیت خوردگی اشیاء به‌درستی بازسازی شود. شناسایی گوئتیت در نمونه‌ها، که از طریق اکسایش محیطی آهن و هیدرولیز ترکیبات جامد یا مایع شکل گرفته، نشان‌دهندهٔ محیط دفن قلیایی با اکسیژن بالا و رطوبت پایین است. عدم حضور محصولات خوردگی کلریدی بیانگر محیط بدون یون کلرید است. هرچند گوئتیت نشانهٔ پایداری نسبی خوردگی است، اما به‌تنهایی برای بازسازی دقیق شرایط شیمیایی کافی نیست. لایه‌های لپیدوکروسیت به شکل پوسته و ساختار شبیه گلبرگ مشاهده شدند و ممکن است در طول زمان به گوئتیت تبدیل شوند. تشکیل لپیدوکروسیت و گوئتیت معمولاً در شرایط اسیدی ملایم تا خنثی رخ می‌دهد، اما گوئتیت می‌تواند تحت شرایط شدیداً اسیدی به Fe^{2+} تبدیل شده و موجب تسریع خوردگی آهن شود (Turner et al., 2012). بنابراین به هنگام تصمیم‌گیری در مورد انتخاب و چگونگی اجرای عملیات مرمت یک اثر فلزی، باید کیفیت و شرایط آن در نظر گرفته شده و روشی انتخاب شود که با کم‌ترین تغییر، بهترین نتیجه را از لحاظ ثبات و استحکام شئ به دست دهد. با توجه به نتایج حاصل از بررسی رادیوگرافی که اشیاء را در وضعیت فیزیکی مناسبی نشان می‌داد، روش مکانیکی در مرمت و پاکسازی این اشیاء به کار گرفته شد. در این روش رسوبات سطحی و خاک بیش‌تر قسمت‌های شئ را فراگرفته بود. در ابتدا رسوبات سطحی با استفاده از بیستوری به‌آرامی زدوده شدند، به‌طوری که لایهٔ خوردگی آسیب نبیند

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

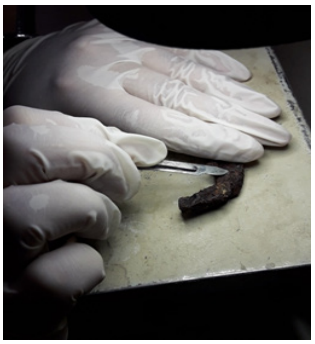
و سپس طی عملیات مکانیکی، بسیاری از رسوبات خاکی که سست بودند از لایهٔ خوردگی برداشته شدند. در مرحلهٔ بعد رسوبات اضافه به روش مکانیکی پاکسازی شد. (شکل ۲۷ و ۲۸). هم‌چنین به منظور بررسی وجود ترکیبات مخرب کلرید مس در اشیاء مزبور، از روش رزنبرگ بهره گرفته شد. نتایج این آزمون نشان می‌دهند که اشیاء فاقد کلر هستند. به دلیل نداشتن کلر در اشیاء از انجام تست هدایت‌سنجی صرف نظر شد.

لازم به ذکر است که با توجه به پاتین غیریکنواخت روی سطح اشیاء، علاوه بر لایهٔ رسوبات سطحی سخت شده، لایهٔ سبزرنگ که غیریکنواخت است نیز پاکسازی شد. از آن‌جا که لایهٔ رسوبات و خوردگی این اشیاء بسیار نازک است، ترجیحاً از مواد شیمیایی استفاده نشد، زیرا استفاده از این مواد بر روی رنگ فلز اثر نامطلوب گذاشته و زیبایی هنری آن را مخدوش می‌کند. با توجه به نازکی لایه‌های رسوب و خوردگی، استفاده از مواد شیمیایی محدود شد تا رنگ و زیبایی فلز آسیب نبیند. بنابراین، روش ضمادگذاری محلول هگزا متافسفات سدیم (۱۰٪ کالگن) فقط در نقاطی که رسوبات بسیار سخت هستند، استفاده شد و پس از نرم‌شدن به روش مکانیکی کل سطح پاکسازی شد، در پایان، اشیاء تحت شست‌وشوی کامل با آب مقطر و خشک‌کردن دقیق قرار گرفتند (بخشنده فرد، ۱۳۹۹). (شکل ۲۹). در نهایت و برای تثبیت نهایی هر دو شئ از محلول پارالوئید ۲٪ استفاده و تمام قسمت‌های هر دو شئ پوشش داده شد تا پایداری و محافظت بلندمدت تضمین شود (شکل ۳۰). شکل ۳۱ الی ۳۴، وضعیت اشیاء را پس از طی مراحل یادشده، نشان می‌دهد.



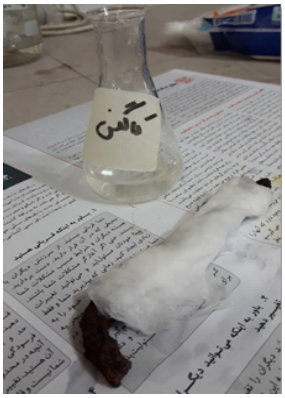
شکل ۲۷. تمیزکاری اولیه با بیستوری برای برداشتن رسوبات

Figure. 27. Initial cleaning with a scalpel to remove deposits



شکل۲۸. پاک‌کردن رسوبات باقی‌مانده بر اثر استفاده از بیستوری

Figure. 28. Removing residual deposits from the use of a scalpel



شکل ۲۹. ضمادگذاری با کالگن برای برداشتن لایه‌های خوردگی

Figure. 29. Poultice with Calgon to remove corrosion layers

شکل ۳۰. تثبیت شئ با پارالوئید ۲٪ برای جلوگیری از فرایند خوردگی

Figure. 30. Stabilization of the object with 2% paraloid to prevent the corrosion process

شکل ۳۱. بعد اتمام کار مرمت از روبرو شئ اول

Figure. 31. After completing the restoration work from the front of the first object

شکل ۳۲. بعد اتمام کار مرمت از پشت شئ اول

Figure. 32. After completing the restoration work from behind the first object

شکل ۳۳. بعد اتمام کار مرمت از روبرو شئ دوم

Figure. 33. After completing the restoration work in front of the second object

شکل ۳٤. بعد اتمام کار مرمت از پشت شئ دوم

Figure. 34. After completing the restoration work from behind the second object

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

شکل ۳۵. جعبهٔ ساخته‌شده از جنس کارتن پلاست

Figure. 35. Box made of cardboard plastic

پس از انجام عملیات حفاظت و مرمت، پیشنهاد یک محیط مناسب برای نگه‌داری شئ لازم و ضروری است چرا که اگر محیط نگه‌داری از نظر رطوبت مرتب کنترل شود، شئ می‌تواند تا چندین سال بدون پاکسازی گسترده و یا خوردگی مجدد، به عمر خود ادامه دهد. ایجاد محیط مناسب نگه‌داری علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه بیانگر پیشرفت علمی و میزان توجه برای حفاظت اشیاء تاریخی نیز است. در طی نگه‌داری شیء، کنترل منظم و مرتب شرایط محیطی از جمله رطوبت و تهویه لازم است. برای جابجایی شئ به موزه یک جعبه از جنس کارتن پلاست ساخته شد. داخل جعبه با ابری به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر پوشانده شده تا از شئ در برابر ضربات احتمالی، بیش‌تر محافظت کند. در کف جعبه ابری به ضخامت ۳ سانتیمتر قرار داده شده که به عمق ۰/۵ سانتیمتر و به‌اندازهٔ ارتفاع اشیا، آن را گود کرده تا ظرف به راحتی و بدون حرکت سر جای خود قرار گیرد. (شکل ۳۵).

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده بر روی اشیاء موردنظر که از اکتشافات تپهٔ بهشت‌آباد شهرستان اردل یکی از شهرستان‌های استان چهارمحال و بختیاری به دست آمده است، مشخص شد.

۱- جنس اشیاء از آهن است و بر روی آن‌ها رسوباتی چون فسفر و کلسیم مشاهده شد. این اشیاء ممکن است در مراسم آیینی و تدفین در کنار جسد در قبر قرار گرفته‌اند. در اشیاء با توجه به آزمایش‌های شناسایی فازهای محصولات خوردگی کوارتز، کلسیت، گوئتیت و لپیدوکروسیت یافت شد.

در بررسی محصولات خوردگی به‌دست‌آمده مشخص شد که خاک آن آهکی و مقداری قلیایی بوده و نمک‌های زیادی ندارد، وجود گوئتیت نشان‌دهندهٔ محیط دفن قلیایی است با میزان اکسیژن بالا و رطوبت پایین و نیز وجود لایهٔ لپیدوکروسیت به شکل پوسته‌ای که نشانهٔ تشکیل محصولات خوردگی لپیدوکروسیت و گوئتیت در شرایط اسیدی ملایم تا خنثی است. البته، شناسایی گوئتیت نشان‌دهندهٔ پایداری نسبی محصولات خوردگی است، اما به‌تنهایی برای بازسازی دقیق شرایط شیمیایی محیط دفن کافی نیست. اشیاء دارای ترک‌های متعدد بوده و خوردگی کربناتی در آن‌ها مشاهده شد و می‌توان گفت احتمالاً با توجه به pH اشیاء که اسیدی نبوده و عدم وجود محصولات خوردگی کلریدی، می‌توان آن را غیرفعال توصیف کرد.

۲- بعد از متالوگرافی مشخص شد که شیوهٔ ساخت اشیاء آهنگری و چکش‌کاری است و از نوع آلیاژ آهنی با ساختار ناهمگن و قسمت‌های سفید رنگ نشان‌دهندهٔ بافت فریت صفحه‌ای نامنظم داشته و ریزساختارهای سوزنی و ساختارهای خطی نیز در بعضی قسمت‌های شئ ساختار شبه ویدمانشتاتن را تصدیق کرد.

۳- بر اساس تصاویر رادیوگرافی، چگالی قسمت‌های اصلی از لایه‌های خوردگی تفاوت رنگ قابل‌ملاحظه‌ای دارد. اشیاء بر اساس اختلاف چگالی، مشخص است که مغز فلزی در بین لایه‌های محصولات خوردگی باقی مانده است. قسمتی از اشیاء که روشن‌تر است دارای بافت متراکم‌تری است. قسمت‌های خوردگی و آسیب دیده چگالی پایینی دارند و اشعه را به راحتی از خود عبور داده و تیره‌تر به‌نظر می‌رسند و نواحی روشن چگالی بیش‌تری دارند.

۴- حفاظت از اشیا آهنی جزء اعمالی است که باید در محل حفاری آغاز شود و برنامه‌ریزی برای نیازهای حفاظتی باید زمانی انجام شود که طرح حفاری آغاز می‌شود، به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی، همیشه فرض کنیم که هر شئ به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی بسیار شکننده است. اولین اقدام مرمتی که باید روی شئ انجام گیرد؛ حذف رسوبات محیطی روی سطح بدنه است. پس از پاکسازی شیء باید به‌سرعت در محیطی با دما و رطوبت نسبی مناسب قرار گیرد. اشیاء آهنی باستانی را نباید بیهوده جابجا کرد و در صورت لزوم این کار را باید با احتیاط لازم انجام داد. از لحظه‌ای که شیء پس از حفاری در معرض هوا قرار می‌گیرد، فرایند خوردگی آن آغاز می‌شود. برای جلوگیری از زنگ‌زدگی مواد ساخته‌شده از آهن، بایستی آن را بعد از حفاری خشک نمود. روند زنگ‌زدگی هرگز متوقف نمی‌شود، اما برخی از گزینه‌ها برای جلوگیری از افزایش آن لازم است که بایستی قابل توجه مرمتگران نیز باشد. با توجه به عوامل مؤثر در روند خوردگی (رطوبت نسبی، دما و اکسیژن محیط) و امکان فعال‌شدن مجدد خوردگی پس از مرمت، لازم است شرایط محیط طوری تنظیم شود که احتمال بروز مجدد آسیب، به حداقل رسد. با توجه به بررسی‌ها و شرایط اشیاء موردمطالعه، به منظور مرمت از روش ضمادگذاری با استفاده از محلول هگزا متافسفات سدیم (۱۰٪ کالگن) در نقاط دارای رسوبات بسیار سخت، استفاده شد و پس آن از روش مکانیکی و شست‌وشو، خشک و نهایتاً تثبیت نهایی شد. شیء پس از مرمت می‌بایست در شرایط محیطی جدیدی قرار گیرد به‌طوری‌که محصولات خوردگی که در شرایط محیطی دفن پایدار بوده‌اند، در شرایط جدید پایدار نبوده و به محصولات جدید خوردگی تبدیل نگردند. پس از

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

انجام عملیات حفاظت و مرمت، پیشنهاد یک محیط مناسب برای نگهداری شئ لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد. کنترل منظم و مرتب شرایط محیطی از نظر رطوبت و تهویه سبب حفظ شیء تا چندین سال بدون پاکسازی گسترده و یا خوردگی مجدد، خواهد بود. ایجاد محیط مناسب نگه‌داری علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه بیانگر پیشرفت علمی و میزان توجه برای حفاظت اشیاء تاریخی است. لازم به ذکر است اگرچه داده‌های آزمایشگاهی هرچند معتبرند، اما تفسیر آن‌ها نیازمند پرهیز از تعمیم‌های قطعی و توجه به محدودیت‌های روش‌های تحلیلی است.

سپاسگزاری : این مقاله برگرفته از پروژهٔ نهایی کارشناسی مرجان گندم مالمیری با عنوان مرمت و حفاظت دو قطعه شیء آهنی به دست آمده از حفاری‌های تپهٔ بهشت‌آباد استان چهار محال و بختیاری به راهنمایی حمیدرضا بخشنده فرد در دانشکدهٔ حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان است. نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از حمایت‌های ریاست محترم دانشگاه هنر اصفهان در فراهم‌شدن بستر مناسب پژوهش و تحقیق کمال تشکر را نمایند.

مشارکت نویسندگان: ایده‌پردازی ح.ر.ب : تحقیق و بررسی م.گ.م ز.ص: نظارت ح.ر.ب : مدیریت پروژه ح.ر.ب : نگارش پیش‌نویس اولیه م.گ: بازبینی و ویرایش متن ح.م.ر.ب ز.ص : تمام نویسندگان نسخهٔ منتشرشدهٔ مقاله را مطالعه کرده و با آن موافقت نموده‌اند

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

تضاد منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

References

Abbasnejad Seresty, R. (2009). *Iron Archaeometallurgy in the Triangle of the Sirdjān, Neiriz and Shahr- e- Bābak* . The International Journal of Humanities. Volume 16, Issue 1.

Ashkenazi D., Cvikel D, Stern A., Pasternak A, Barkai O, Aronson A., & Kahanov Y. (2014). Archaeometallurgical investigation of joining processes of metal objects from shipwrecks: three test cases. *Metallography, Microstructure, and Analysis.* ; 3:349-62. https://doi.org/10.1007/s13632-014-0153-5

Aslani, H. (1995). *Structural studies in tracing bronze technology, practical technology, conservation and restoration of Tasme Jan ram statue.* Thesis of the undergraduate restoration course, Isfahan Art University. [in Persian].

Bakhshandehfard, H.R. (2010). *Technical Survey of Historical Metal Objects in Conservation.* Publications of Isfahan University of Arts. [in Persian].

Bakhshandehfard, H.R. (2020). *Conservation Treatment Methods for Copper and Bronze Artifacts.* Publications of Isfahan University of Arts. [in Persian].

Balassone G, Boni M, Di Maio G., & Villa IM. (2009). Characterization of metallic artefacts from the Iron Age culture in Campania (Italy): a multi-analytical study. *Periodico di mineralogia.*;78(1):45-63.

Bani-Hani M, Abd-Allah R., & El-Khouri L. (2012). Archeaometallurgical finds from Barsinia, Northern Jordan: Microstructural characterization and conservation treatment. *Journal of cultural heritage.*;13(3):314-25. https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.12.005

Chitty WJ, Dillmann P, L'Hostis V., & Lombard C. (2005). Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete—a study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts. *Corrosion Science.* Jun 1;47(6):1555-81. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.07.032

Deshpande P.P., & Dhokey NB. (2008). *Metallographical investigations of iron objects in ancient Vidharbha region of Maharashtra.* Transactions of the Indian Institute of Metals. Apr;61(2-3):135-7.

Dillmann, P., L'Héritier, M., et al. (2007). Corrosion of iron archaeological artefacts: Characterisation and mechanisms. *Corrosion Science.*

Dillmann, P., et al. (2011). Long-term corrosion of archaeological iron in soil. *Journal of Nuclear Materials.*

Ehsani, M. T. (2007)*Seven thousand years of metalworking art in Iran.* Third edition. Tehran: Scientific and Cultural Publishing Company; 1386. [in Persian].

Eliyahu, M., Barkai, O., Goren, Y., Eliaz, N., Kahanov ,Y., & Ashkenazi, D. (2011). The iron anchors from the Tantura F shipwreck: typological and metallurgical analyses. *Journal of Archaeological Science.* 1;38(2):233-45. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.08.023

Ferrer Eres ,MA., Valle-Algarra, FM., Gimeno Adelantado, JV., Peris-Vicente, J., Soriano Piñol , MD., & Mateo-Castro, R. (2008). Archaeometric study on polymetallic remains from the archaeological dig in Lixus (Larache, Morocco) by scanning electron microscopy and metallographic techniques. *Microchimica Acta.* 162:341-9.

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

https://doi.org/10.1007/s00604-007-0926-5

Figueiredo ,E., Araújo M. D., Silva, R.J., Senna-Martinez, J.C., & Vaz ,J.I. (2011). Characterization of Late Bronze Age large size shield nails by EDXRF, micro-EDXRF and X-ray digital radiography. *Applied Radiation and Isotopes*.;69(9):1205-11. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.027

Jafari , A., Oudbashi ,O., & Abedini Iraqi ,M. (2015). Microscopic studies on ancient iron objects obtained from archaeological excavations in northern Iran. *Archaeological researches of Iran*.7(15):131-47. [in Persian]. https://doi.org/10.22084/NBSH.2017.13218.1579

Jegdić ,b., polić-radovanović ,s., ristić s., & Alil , a .(2012). Corrosion stability of corrosion products on an archaeological iron artefact. International journal of conservation science. 1;3(4).

Koleini, F., Prinsloo ,L.C., Schoeman, M.H., Pikirayi, I., & Chirikure, S. (2013). Characterization of the corrosion layer on iron archaeological artefacts from K2 (825–1220 AD), an archaeological site in South Africa. *Studies in conservation*. 1;58(3):274-82. https://doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000044

Lorenz S.(2008). *Archäometrische untersuchungen am hortfund von Bazgir, Iran* (Doctoral dissertation, Diplomarbeit-/Magister, Institute für Archämetries, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, TU Bergakademie Freibreg, Betreuer: Ernst Pernicka).

Mokhtar, N.A., Saidin ,M., & Abdullah, J. (2011). *The ancient iron smelting in Sg. Batu, Bujang valley, Kedah*. In Postgraduate student forum presentation, Chinese University of Hong Kong, China.

Moshtagh Khorasani, M. (2009). *Bronze and iron weapons from Luristan*. Legat Verlag .

Pigott, V.C. (2004). *Hasanlu and the Emergence of Iron in Early 1st Millennium BC Western Iran. Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*.

Pleiner, R. (2000). *Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters*. Prague: Archeologický ústav AV ČR.

Rahjo, Z. (2016). Archeological studies on the iron objects discovered from the archaeological site of Tahig Khomein, M.A thesis, Art University of Isfahan: Faculty of Conservation and Restoration. [in Persian].

Reguer, S., Neff, D., Bellot-Gurlet ,L., & Dillmann ,P. (2007). Deterioration of iron archaeological artefacts: micro-Raman investigation on Cl-containing corrosion products. *Journal of Raman Spectroscopy*: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering. ;38(4):389-97. https://doi.org/10.1002/jrs.1659

Robbiola ,L., Blengino, J. M., & Fiaud, C. (1998). Morphology and mechanisms of formation of natural patinas on archaeological Cu–Sn alloys. *Corrosion Science*.;40(12):2083-111. https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00096-1

Robbiola, L., & Fiaud ,C. (1993). Corrosion structures of long-term burial Cu-Sn alloys: influence of the selective dissolution of copper. Metallurgical Research & Technology (*Revue de Métallurgie*).;(6):157-62.

Robbiola ,L., & Portier, R. (2006). A global approach to the authentication of ancient bronzes based on the characterization of the alloy–patina–environment system. *Journal of Cultural Heritage*.;7(1):1-2. https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.11.001

Scott, D. A. (1991). *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals* (No. 77). Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute.

Scott, D. A,. (2009). *Iron and steel in art. Corrosion, colorants, conservation*. Eggert, Gerhard - ISBN 10: 1904982050 - ISBN 13: 9781904982050 – Archetype

Selwyn L. S., Sirois, P. I., & Argyropoulos ,V. (1999). The corrosion of excavated archaeological iron with details on weeping and akaganeite. *Studies in conservation*.;44(4):217-32. https://doi.org/10.1179/sic.1999.44.4.217

Sevin, V., Özfırat, A., & Kavaklı, E. (1997) . Van-Karagündüz Mound Excavations Studies. Bulletin, 63(238), pp.847-881. https://doi.org/10.37879/belleten.1999.847

Thiele. S., Fuchs B.M., Ramaiah. N., & Amann, R. (2012). Microbial community response during the iron fertilization experiment LOHAFEX. *Applied and Environmental Microbiology*. 15;78(24):8803-12. https://doi.org/10.1128/AEM.01814-12

Turner , C.W., & Lisheng, Chi . (2012). formation of corrosion products of carbon steel under condenser operating conditions International Atomic. Energy Agency. https://inis.iaea.org › NCLCollection

[DOI: 10.66224/jra.2025.11.206]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 8:21 +0330 on Saturday November 14th 2026

Trade, Ü.Yalçın-C.Pulak -R.Slotta, Ege Publications, Istanbul, 495-504.

Zimmermann- Yıldırım (2010).T. Zimmermann -T. Yıldırım, "*Çorum Arkeoloji Müzesinde Bulunan İTÇ Maden Buluntularının Xrf Analizi*", XXXV. ARST, 99-104

احسانی محمد تقی (۱۳۸۶) . هفت هزار سال هنر فلزکاری در ایران. چاپ سوم، تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.

اصلانی، حسام (۱۳۷۴) . مطالعات ساختاری در ردیابی فن‌شناسی برنز فن‌شناسی عملی، حفاظت و مرمت مجسمهٔ قوچ طسمه جان. پایان‌نامهٔ دورهٔ کارشناسی مرمت، دانشگاه هنر اصفهان،.

بخشنده فرد، حمیدرضا (۱۳۸۹). بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت. انتشارات دانشگاه هنر اصفهان .

بخشنده فرد، حمیدرضا (۱۳۹۹). روش‌های درمان در آثار مسی و برنزی. انتشارات دانشگاه هنر اصفهان.

جعفری علیرضا، عودباشی امید، عابدینی عراقی مهدی (۱۳۹۵). مطالعات میکروسکوپی بر روی اشیاء آهنی باستانی به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی شمال ایران. پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران. ؛۷(۱۵): ۱۳۱-۴۷.

Store.

Tylecote, R. F. (1987). *The Early History of Metallurgy in Europe*. London: Longman.

Yalçın, Y .(2006). *Iron in the Hittites, Uluburun Ship 3000 Years Ago World*

رهجو، زهرا (۱۳۹۶). مطالعات باستان‌سنجی بر روی اشیاء آهنی کشف‌شده از سایت باستان‌شناسی تهیق خمین پایان‌نامهٔ دورهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان: دانشکدهٔ حفاظت و مرمت.

Gandom Malmir, M., Sadeghi, Z., & Bakhshandehfard, H, R. (2025). Laboratory, Conservation and Restoration of Ancient Iron Objects Found in the Escavations of Beheshtabad Archaeological Hill in Chaharmahal and Bakhtiari Province, *Journal of research on Archaeometry, 11*(2), 11206. DOI: 10.66224/jra.2025.11.206