Technical Study and Damage Assessment of a Bronze Vessel from the Samavi Collection at the Esfahan Museum of Decorative Arts

Hossein Farahmand Boroujeni*[1], Hamidreza Bakhshandehfard[2]

1. M.A in Conservation of Cultural and Historical Objects, Art University of Isfahan, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Iran.

Abstract

Each alloy, depending on its constituent metallic elements, manufacturing process, and degradation mechanisms, exhibits unique characteristics. Studying the structure and composition of museum metal artifacts assists researchers in identifying similarities and differences among objects based on various criteria, contributing to a better understanding of the evolution of historical-cultural artifact production techniques. Additionally, such studies enable the identification of internal and external causes and conditions of alloy degradation, paving the way for preventive measures to mitigate or halt deterioration. This research focuses on the technical study and damage assessment of a bronze vessel from the Samavi Collection at the Esfahan Museum of Decorative Arts. Data collection was conducted through library research, and the analogical method was employed for comparative studies. Furthermore, experimental methods including chemical tests, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and radiography were applied to the artifact. This article examines the role of each of these methods and critiques the analogical approach in comparative studies. Based on the results, the artifact is attributed to the region spanning Luristan to Syria and dated to the 7th to 8th centuries BCE. Additional findings include the approximate composition of the artifact's elements, the use of molding and hot-working techniques in its production, and the identification of carbonate deposits.

Knowledge and Conservation Restoration

Special Issue. No.1
September 2019
Pages 46-53

https://journal.richt.ir/kcr

Corresponding Author

Hossein Farahmand Boroujeni

Email
hc.farahmand@gmail.com

Keywords: Conservation, Bronze, Laboratory Studies, Instrumental Methods.

Copyright © 2020, Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]

مطالعه و آسیب شناسی یک ظرف مفرغی متعلق به مجموعه سماوی در موزه هنرهای تزئینی اصفهان

حسین فرهمند بروجنی[1*]، ، حمیدرضا بخشنده‌فرد[2]

۱. کارشناس حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.
۲. دانشیار دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. ایران

چکیده

هر آلیاژی به‌تناسب عناصر فلزی موجود، فرآیند ساخت و مکانیسم تخریب مختص به خود را داراست. مطالعه ساختار و ساختمان اشیای فلزی موزه‌ای، پژوهشگران را در شناسایی وجوه اشتراک و افتراق میان اشیاء با معیارهای متعدد یاری می‌کند و از منافع آن می‌توان به درک بهتر سیر تحول فنون ساخت اشیای تاریخی–فرهنگی اشاره کرد. همچنین، این مطالعات امکان شناسایی علل و شرایط داخلی و خارجی تخریب آلیاژهای فلزی را فراهم می‌سازد و زمینه اقدامات پیشگیرانه برای کاهش یا توقف این تخریب‌ها را فراهم می‌کند. پژوهش حاضر به مطالعات فنی و آسیب‌شناسی یک ظرف مفرغی از مجموعه سماوی در موزه هنرهای تزئینی اصفهان می‌پردازد. جمع‌آوری اطلاعات به روش کتابخانه‌ای انجام شد و از روش تمثیلی برای مطالعات تطبیقی بهره گرفته شد. علاوه بر آن، آزمون‌های شیمیایی، پراش پرتوایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و رادیوگرافی به‌عنوان روش‌های تجربی بر روی شیء مورداستفاده قرار گرفت. مقاله حاضر ضمن بررسی جایگاه هریک از این آزمون‌ها، به نقد روش تمثیلی در مطالعات تطبیقی نیز می‌پردازد. بر اساس نتایج، شیء موردمطالعه از حیث مکان ساخت به محدوده لرستان تا سوریه و از حیث زمان ساخت به سده‌های هفتم تا هشتم پیش از میلاد نسبت داده شد. اطلاعاتی از قبیل میزان تقریبی عناصر موجود در شیء، استفاده از قالب و کار گرم در ساخت و شناسایی رسوب‌های کربناته نیز از دیگر یافته‌های پژوهش هستند.

واژگان کلیدی: نگهداری، مفرغ، مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های دستگاهی.

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

ویژه‌نامه: شماره ۱، تابستان ۱۳۹۸
صفحات :۴۶-۵۳
https://journal.richt.ir/kcr

نویسنده مسئول
حسین فرهمند بروجنی

رایانامه
hc.farahmand@gmail.com

مقاله منتخب دوازدهمین همایش دوسالانه حفاظت و مرمت اشیا فرهنگی و تاریخی و تزئینات وابسته به معماری
دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]

مقدمه

مجموعه سماوی اصفهان دارای تعداد قابل‌توجهی از اشیای مفرغی است که امروزه در موزه هنرهای تزئینی نگهداری می‌شوند. ظرف موردمطالعه ازجمله اشیای نفیس این مجموعه است و نمونه‌های مشابه آن در موزه متروپولیتن و مجموعه شخصی آدام مشاهده شده‌اند. مطالعات دقیق بر روی چنین اشیایی، علاوه بر فراهم آوردن مقدمات معرفتی برای فرایند مرمت، بدنه نظری پژوهشگران را نیز غنی‌تر می‌سازد و اطلاعاتی چون میزان عناصر موجود در اشیاء یا روش‌های ساخت آن‌ها را روشن می‌کند. حساسیت نمونه‌برداری و ماهیت تخریبی بسیاری از آزمون‌های مورد نیاز، ازجمله دشواری‌های این نوع پژوهش‌هاست؛ با این حال، تلاش شده است تا اطلاعات مورد نیاز با حداقل آسیب به شیء، از طریق ترکیبی از آزمون‌ها حاصل شود. مطالعات تطبیقی منجر به یافتن سه نمونه بسیار شبیه به شیء موردمطالعه شد که دو مورد در موزه متروپولیتن و یکی در مجموعه شخصی آدام بود. هرسه مورد از جنس برنز و متعلق به سده‌های ۷ تا ۸ پیش از میلاد بودند و همگی از محدوده‌ی لرستان تا سوریه به‌دست‌آمده بودند. بنابراین شیء موردنظر نیز، به‌طور ظنی، به همان دوره و محدوده نسبت داده شد. استفاده از واژه "ظن" در نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه، ضرورت دارد. یکی از روش‌های رایج برای نسبت دادن اشیاء تاریخی به دوره‌ای خاص، مقایسه‌ی شکل/فرم آن با دیگر نمونه‌های موجود در موزه‌ها و مجموعه‌هاست. این روش که اصطلاحاً از اقسام مطالعات تطبیقی/مقایسه‌ای نامیده می‌شود، در علم منطق، "تمثیل" نام دارد. تمثیل علیرغم رواجی که دارد، به لحاظ معرفت‌شناختی هرگز مفید یقین نیست و حداکثر می‌تواند موجب ایقاع "ظن" باشد. ظن عبارت است از حالتی میان شک و یقین که در آن حکم به ثبوت محمول برای موضوع، باارزشی بیشتر از ۵۰٪ (شک) و کمتر از ۱۰۰٪(یقین) است. به‌بیان‌دیگر: استدلال بر مبنای شباهت‌ها مابین دو شیء(در فرم و ساختار و فن ساخت و رنگ و غیره) به ترتیب دادن یک تمثیل منطقی می‌انجامد. "تمثیل عبارت است از سیر از جزئی به جزئی دیگر، یعنی حکم معلوم یک موضوع را به استناد شباهتی که میان آن موضوع با موضوعی دیگر است، برای آن موضوع دیگر اثبات کنیم. چنانکه اگر دو نفر شبیه هم باشند و یکی از ایشان باهوش باشد، بگوییم آن دیگری هم باهوش است. این کار را به‌اصطلاح منطقی "تمثیل" می‌گویند. بدیهی است که صرف مشابهت دو موضوع، موجب یقین به اشتراک حکم آن‌ها نمی‌شود و ازاین‌روی، تمثیل مفید یقین نیست و ارزش علمی ندارد" (مصباح یزدی، ۱۳۸۸، ۱۰۸). بنابراین لازم است که پژوهشگر این عرصه، نتایج حاصل از این دسته از مطالعات تطبیقی را حداکثر در حد ظن معرفی کند و از ادعای داشتن نتایج یقینی‌ای که صرفاً مبتنی بر تمثیل باشد، بپرهیزد.

مواد و روش‌ها

هر یک از آزمون‌هایی که در ادامه گزارش می‌شوند، غایت و هدف مشخصی داشته و در دو حوزه اصلی فن‌شناسی و آسیب‌شناسی شیء قابل ارزیابی هستند. این آزمون‌ها شامل آزمون شیمی تر، رادیوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی با تحلیل انرژی‌پراکنی (SEM-EDS)، متالوگرافی و آنالیز فازی با پراش اشعه ایکس (XRD) می‌شوند.

آزمون شیمی تر : این آزمون برای بررسی حضور یا عدم حضور برخی عناصر در مغز فلزی، محصولات خوردگی و رسوبات انجام شد. نتایج حاصل، هم در حوزه فن‌شناسی و هم در حوزه آسیب‌شناسی شیء قابل استفاده هستند.

میکروسکوپ الکترونی روبشی با تحلیل انرژی‌پراکنی (SEM-EDS): این روش برای شناسایی نوع و میزان تقریبی عناصر موجود در نمونه به کار گرفته شد و عمدتاً کاربرد فن‌شناسانه دارد. با این حال، شناسایی عناصری مانند کلر می‌تواند به تشخیص آسیب‌ها نیز کمک کند.

متالوگرافی : هدف از این آزمون، شناخت فن ساخت شیء از حیث کار سرد و گرم، میزان هر یک و تقدم و تأخر آن‌ها نسبت به یکدیگر بود. این روش به وضوح در حوزه فن‌شناسی قرار دارد، هرچند شناسایی نوع خوردگی نیز می‌تواند از مصادیق آسیب‌شناسی باشد.

رادیوگرافی : این روش برای تهیه تصویری از تعداد قطعات، اتصالات و نحوه ساخت شیء (از حیث ریخته‌گری یا غیرازآن) استفاده شد و به‌طور عمده ناظر به جنبه‌های فن شناسانه شیء است.

آزمون پراش اشعه ایکس (XRD): هدف از این آزمون، آنالیز فازی محصولات خوردگی بود تا نوع محصولات خوردگی مشخص شود و از این نظر، کاربرد آن در حوزه آسیب‌شناسی شیء قرار می‌گیرد.

شرح آزمون‌ها و نتایج

شیمی تر و پیش‌بینی نتایج آن

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]

روش شیمی تر یک روش کمی است که صرفاً از حضور یا غیاب عناصر موردبررسی در شیء آگاهی می‌دهد. پیش از آغاز آزمایش‌ها، بر اساس تجربه و مطالعات مربوط به اشیاء فلزی، ظن ایجاد شد که ماهیت ظرف موردمطالعه، مفرغی است. این ظن با توجه به ویژگی‌های محصولات خوردگی و مطالعات تطبیقی تقویت شد؛ هر آلیاژ فلزی، محصولات خوردگی مشخص خود را دارد و رنگ بسیاری از این محصولات می‌تواند اطلاعاتی درباره عنصر اصلی آلیاژ شونده ارائه دهد. رنگ سبز رایج‌ترین رنگ محصولات خوردگی در اشیای مسی و آلیاژهای آن‌هاست (وطن‌دوست، ۱۳۷۶، ص۳۰۰-۲۵۶). همچنین، مطالعات تطبیقی نشان داد نمونه‌هایی که از نظر شکلی و تزئینات مشابه شیء موردبررسی بودند، اغلب از جنس برنز (آلیاژ مس و قلع) هستند. بدین ترتیب، شواهد تطبیقی و مشاهدات تجربی هر دو دلالت بر مفرغی بودن شیء داشتند و این فرضیه با آزمون‌های آزمایشگاهی بعدی تقویت شد.

آزمایش‌ها بر اساس دستورهای ارائه‌شده در کتاب "روش‌های تجزیه‌ی مواد در مرمت و حفاظت آثار تاریخی" که نوشته باربارا استوارت انجام شد. نمونه‌ای از فلز از بخش کم‌اهمیت شیء جدا شد و با اره مویی فلزبر به چهار قسمت تقسیم گردید. دو قسمت در اسید نیتریک، یکی در اسید کلریدریک و دیگری در اسید سولفوریک حل شد و همگی حرارت داده شدند تا غلظت نمونه‌ها در اسید افزایش یابد. سپس به ترتیب به آن‌ها محلول‌های$K4FeCN6$، KI، فسفومولیبیدات و $Hg(NH4)2(SCN)2$ افزوده شد. در این شرایط، حضور عناصر به ترتیب زیر قابل‌تشخیص است: مس/آهن با رنگ قرمز/آبی، قلع با رنگ آبی، روی با رنگ آبی و سرب با رنگ آبی. نتایج آزمون‌ها نشان داد نمونه فلزی حاوی مس و قلع بوده و آهن در آن مشاهده نشد. حضور قلع و سرب نیز مثبت بود، هرچند غنای رنگ آبی برای قلع کم بود و آزمایش سرب نیازمند چند مرتبه تکرار بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ فلزی موردمطالعه، برنز است (بخشنده فرد، ۱۳۸۹، ص۴۱).

برای شناسایی محصولات خوردگی و تصمیم‌گیری درباره ضرورت حفظ یا حذف آن‌ها، آزمون شیمی تر روی رسوبات نیز انجام شد. نمونه‌های جداشده از محصولات خوردگی به چهار قسمت تقسیم شدند و در اسید نیتریک، سولفوریک و کلریدریک حل شدند. سپس محلول‌های نیترات نقره، بلور آمونیوم هپتامولیبدات، $FeSO4$ و کلرید باریم به آن‌ها افزوده شد (مورد آخر پیش از افزودن کلرید باریم جوش داده شد). حضور یون‌ها با مشاهده نشانه‌های زیر شناسایی شد: کلرید با رسوب سفید، فسفات با حلقه زرد اطراف بلورهای آمونیوم هپتامولیبدات، نیترات با حلقه قهوه‌ای، سولفات با رسوب سفید و کربنات با جوش دادن با اسیدکلریدریک.

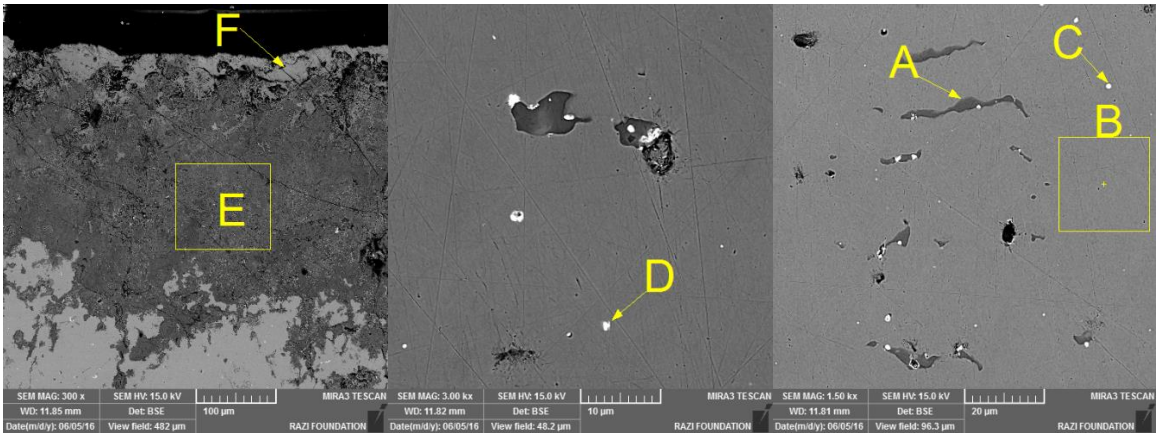
آزمون‌های مشابه روی مغز فلزی نیز انجام شد تا ترکیب مس یا قلع با دیگر عناصر مشخص شود. تنها آزمون مس مثبت بود. نتایج حاصل نشان داد محصولات خوردگی کربنات مس هستند که می‌توانند به شکل مالاکیت یا آزوریت وجود داشته باشند. از آنجا که شیمی تر صرفاً حضور ماده را نشان می‌دهد و فرمول شیمیایی دقیق را تعیین نمی‌کند، تشخیص دقیق نوع کربنات مستلزم آنالیز فازی (XRD) است (Scott, 2002, 102). بنابراین، مشخص شد محصولات خوردگی کربنات مس هستند و منشأ آن‌ها رسوبات خاکی محیط بوده است، چراکه یون‌های شناسایی‌شده در محصولات خوردگی در رسوبات نیز حضور دارند. نتایج آزمون XRD که در ادامه ارائه می‌شود، تأییدکننده همین یافته‌ها خواهد بود.

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM-EDS)

در میکروسکوپ الکترونی روبشی، تصویر یک شیء به‌جای امواج مرئی معمول، با به‌کارگیری شعاعی از الکترون‌ها خلق می‌شود. این میکروسکوپ با اسکن نمونه فلزی مانت شده و صیقل‌خورده، قادر است عناصر موجود در نقاط مختلف نمونه را شناسایی کرده و درصد آن‌ها را در همان نقاط نشان دهد (کثیری، ۱۳۹۳، ص۱۲۹). با مشخص کردن چند نقطه در جای‌جای نمونه، می‌توان میانگین درصد عناصر در آن نقاط را محاسبه و سپس نتیجه حاصل را به‌کل نمونه و در نهایت به‌کل شیء تعمیم داد. روشن است که این میانگین متعلق به نمونه‌ای کوچک از کل شیء است و نه کل آن؛ با این حال، از آنجا که آلیاژ ترکیبی نسبتاً همگن از فلزات مختلف است، می‌توان نتایج به‌دست‌آمده را با توجه به خطای جزئی، به‌کل شیء تعمیم داد.

نمونه‌برداری و مانت کردن نمونه به همان شیوه‌ای انجام شد که در بخش متالوگرافی به‌تفصیل ذکر خواهد شد. نمونه به بنیاد علوم کاربردی رازی ارسال و با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) ساخت شرکت TE-SCAN، مدل MIRA3، مورد آزمون، اسکن و بررسی قرار گرفت. در این فرآیند، پنج نقطه یا ناحیه مشخص شد و نوع و میزان عناصر در آن نقاط اعلام گردید. علاوه بر آن، دو آزمون اسکن خطی (Line Scan) و اسکن توده‌ای (Bulk) نیز به‌منظور شناسایی بهتر ساختار فلز انجام شد. در اسکن توده‌ای، کل حجم نمونه موردبررسی قرار گرفت. در ادامه، نتایج هر دو روش، یعنی اسکن توده‌ای و اسکن‌های معطوف به نقاط و نواحی، ارائه و تحلیل خواهد شد.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]



شکل ۱. سمت راست: نقاط A، ناحیه B و نقطه C در آزمون SEM-EDS؛ وسط: نقطه D؛ نمونه از جداره ظرف است؛ سمت چپ: ناحیه E و نقطه F، نمونه از جداره ظرف است (منبع: نگارنده)

جدول ۱. درصد عناصر در نقاط/نواحی موردنظر در آنالیز SEM-EDS

	Cu	Sn	Pb	As	Fe	S	Si	O
A	۷۸/۳۳	۱/۰۸	-	۰.۰۰	۱/۴۱	۱۸/۷۹	-	-
C	۸/۹۹	۰/۴۹	۷۱/۳۲	۰/۴۲	۰/۱۳	-	-	-
D	۱۷/۵۴	۱/۸۶	۷۹/۶۴	۰/۱۰	۰/۱۵	-	-	-
E	۲۱/۰۹	۳۱/۹۵	۴/۱۳	۰/۷۹	۰/۲۶	-	۱/۵۷	۳۷/۷۷
F	۹/۶۳	۳۸/۶۳	۱۱/۲۸	۰/۷۶	۰/۲۹	۱/۴۵	-	۳۶/۶۹
B	۸۴/۹۹	۱۱/۷۵	۱/۳۷	۰/۶۵	۰/۰۹	-	-	-
Bulk *	۸۵/۱۰	۱۱/۱۳	۲/۲۱	۰/۴۰	۰/۱۷	–	–	–

* نتایج این آزمون به نحو استثناء و برای مقایسه بهتر با نتایج ناحیه B در این جدول آمده است.

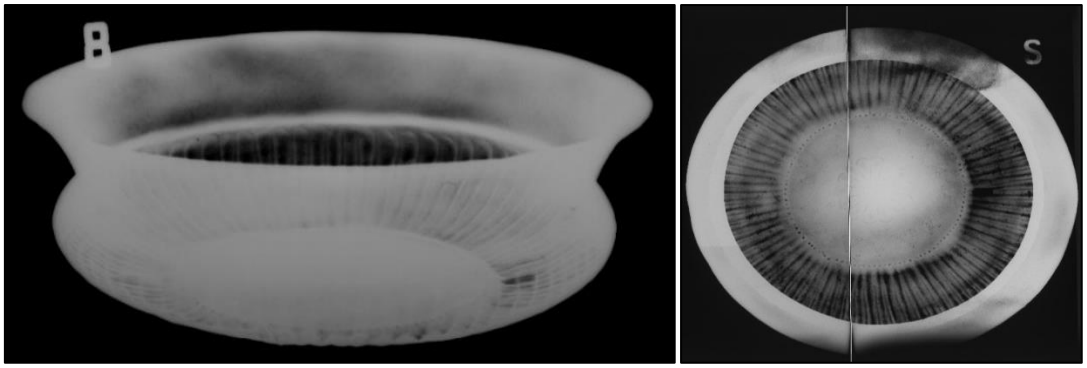
چنانکه در جدول ۱ آمده است، نقطه A دارای ۷۸/۳۳٪ مس، ۰۸/۱٪ قلع، ۷۹/۱۸٪ گوگرد و ۴۱/۱٪ آهن است. ناحیه B نیز شامل ۹۹/۸۴٪ مس، ۷۵/۱۱٪ قلع، ۳۷/۱٪ سرب و مقداری ارسنیک و آهن است. وجود گوگرد در بطن فلز می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از سنگ معدن‌های سولفوره مس باشد. همچنین عدم حضور اکسیژن در بطن نمونه، جز در نزدیکی سطح) موارد E و(F ، نشان می‌دهد که این شیء احتمالاً از ذوب کردن اشیای دیگری که حتی سطح آن‌ها اکسیدشده باشد، ساخته نشده است. به نظر می‌رسد ناحیه B بیشترین شباهت را به‌کل نمونه داشته باشد. این نظر توسط اسکن توده‌ای نیز تأیید می‌شود، چراکه درصد عناصر در این دو بسیار نزدیک به هم است. ازاین‌رو، برای مقایسه بهتر، نتایج اسکن توده‌ای نیز در همان جدول ارائه‌شده است.

نقاط C و D به ترتیب با درصدهای ۷۱/۳۲٪ و ۷۹/۶۴٪ بیشترین مقادیر سرب را دارا هستند و این نشان‌دهنده تجمع گلوله مانند سرب در این نواحی است. بنابراین، انتظار می‌رود در تصاویر متالوگرافی این نمونه، گویچه‌های سربی مشاهده شود؛ این پیش‌بینی در مبحث مربوط به متالوگرافی محقق شده است. در مقابل، ناحیه E و نقطهF ، برخلاف دیگر نواحی و نقاط که در آن‌ها اکسیژن مشاهده نشده است، دارای حدود ۴۰٪ اکسیژن هستند. این امر به دلیل نزدیکی این دو ناحیه به سطح است که طبیعتاً با اکسیژن محیط در تماس بوده‌اند.

رادیوگرافی

از تصویر رادیوگرافی حاصل از تابش اشعه ایکس می‌توان محدوده شیء و محصولات خوردگی را به‌خوبی از یکدیگر تفکیک کرد. همچنین درزها و چندتکه بودن نمونه نیز به‌وضوح قابل‌تشخیص است. اهمیت این تصویر در تصمیم‌گیری برای مرمت مشهود است، مانند انتخاب روش مناسب برای پاک‌سازی (همان، ۱۱۳).

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]



شکل ۲. راست: تصویر رادیوگرافی از نمای بالایی اثر؛ چپ: تصویر رادیوگرافی از نمای جانبی اثر

شیء موردنظر به مدت یک دقیقه در فاصله نیم‌تری منبع ناشر پرتو ایکس که با ولتاژ ۷۰ کیلوولت و شدت جریان ۵/۴ میلی‌آمپر به نشر پرتو ایکس و ثبت تصاویر آن می‌پرداخت، قرار گرفت. این میزان ولتاژ، زمان و شدت جریان برای ثبت تصاویر مطلوب کافی بود. در شکل ۲ (راست)، قسمت‌هایی از لبه شیء که دچار خوردگی شده و در واقع معدنی شده‌اند، به رنگ تیره‌تر دیده می‌شوند. به نظر می‌رسد که تصویر فوق نمایانگر هیچ‌گونه اتصال متالورژیکی در شیء نباشد، بنابراین شیء موردنظر یک تکه است و مرکب از اجزای فلزی متعدد نیست. از آنجایی که نشانه‌ای از استفاده از قالب مشاهده نمی‌شود، احتمال داده می‌شود که صورت فعلی شیء با چکش‌کاری حاصل شده باشد. البته دیده نشدن نشانه‌ها لزوماً به معنای عدم استفاده از قالب نیست، چراکه ممکن است زیرساخت اولیه توسط یک قالب یک‌تکه شکل گرفته باشد که هم‌اکنون در تصویر رادیوگرافی آثار آن به جا نمانده است. این ظن با دیدن آخال‌ها در تصاویر ریزساختار شیء موجه به نظر می‌رسد. به هر حال، ضخامت کم شیء، به‌خصوص در قسمت پایینی، احتمال چکش‌کاری شدن را بشدت تقویت می‌کند و اساساً به دلیل همین نازکی زیاد در خلق شیارهای بسیار ظریف ساختاری (که هم‌اکنون نیز بخشی از آن‌ها دچار آسیب‌های بریدگی مانند هستند)، نگارنده احتمال چکش‌کاری گرم را بالا می‌داند.

متالوگرافی: مشاهدات و تحلیل‌ها درباره تصاویر حاصل از آن

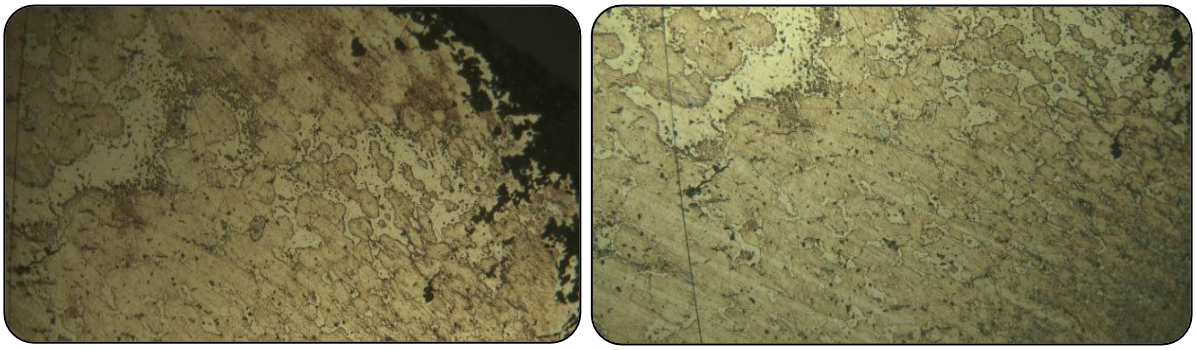
"متالوگرافی علم توصیف ساختار و ویژگی‌های فلزهاست" (فرهنگ واژگان آنلاین آکسفورد: ۳۰ ژوئن ۲۰۱۶). "متالوگرافی را می‌توان ابزاری مهم دانست که می‌تواند سرنخ‌هایی از شیوه ساخت شیء حاصل کند و یا در پاسخ به سؤالاتی کمک کند که در حین عملیات حفاظت و مرمت یک شیء برای مرمتگر ایجاد می‌شود" (عودباشی، ۱۳۹۵، ۹۳). از دو تعریف فوق روشن می‌شود که متالوگرافی علمی است که در آن به روش توصیفی، مطالعه ساختار و ویژگی‌های فلزات برای شناخت فن ساخت اشیای فلزی به کار می‌رود. در این رساله نیز به همین منظور، با نمونه‌برداری از شیء موردمطالعه و متالوگرافی آن، سعی در کشف فن ساخت صورت گرفته است. برای انجام عملیات متالوگرافی، از کتاب "متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی" ترجمه امید عودباشی بهره گرفته شد. با این وجود، بنا بر شرایط و امکانات موجود، تخلف جزئی و قابل اغماض از متن محتمل است، چنانکه در استفاده از خمیر الماس مشاهده شد.

متالوگرافی تا پیش از مشاهدات میکروسکوپی دارای سه مرحله "نمونه‌برداری"، "مانت کردن" و "اچ کردن" است که با دقت انجام شد. تصاویر پیش از اچ کردن نمایانگر آغاز نفوذ خوردگی از کناره‌های نمونه به درون آن بودند. رگه‌های خاکستری رنگ که در جای‌جای نمونه قابل مشاهده هستند، آخال نام دارند. آخال‌ها ناخالصی‌ها، نخاله‌ها و آشغال‌هایی هستند که غالباً به دلیل قالب‌گیری کثیف رخ می‌دهند. هرچند به طور کلی عوامل دیگری چون ناخالصی در مذاب، گلوگاه در حین ذوب‌ریزی و جایگذاری نادرست ماهیچه نیز از عوامل مؤثر در ایجاد آخال در فلزات هستند (بخشنده فرد، ۱۳۸۹، ۵۲). بنابراین، همان‌طور که در رادیوگرافی نیز اشاره شد، بعید نیست که لااقل برای زیرساخت اولیه شیء موردنظر از قالب بهره برده شده باشد.

تصاویر پس از اچ کردن نمونه نمایانگر دو فاز هستند که یکی غنی از قلع و دیگری غنی از مس است. به فاز غنی از مس، فاز آلفا نیز گفته می‌شود. دمای ذوب مس و قلع که به ترتیب حدود ۱۰۸۴ و ۲۳۲ درجه سانتی‌گراد است، اختلاف قابل‌توجهی دارند. این اختلاف موجب می‌شود در سرد شدن این دو، ابتدا مس شروع به سرد شدن کند و سپس قلع. این تقدم و تأخر موجب تشکیل دو فاز می‌شود که اولی غنی از مس و دومی غنی از قلع است. سرب در این میان فازی به خود اختصاص نمی‌دهد، اما به دلیل اینکه در مس محلول نیست، به طور پراکنده در آن قرار گرفته است. نقاط تیره رنگ کوچکی که در سطح نمونه پراکنده هستند، احتمالاً گلوله‌های سربی هستند که نشان می‌دهند این فلز به میزان اندک، احتمالاً برای افزایش چکش‌خواری به آلیاژ مس و قلع افزوده شده است. این مطلب با توجه به وجود سرب

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]

در نمونه موجه‌تر به نظر می‌رسد. نقاطی که در آزمون میکروسکوپ الکترونی دارای درصد بالای سرب هستند، می‌توانند ما به ازای همین گویچه‌ها باشند. همچنین خطوط بلند سایه–روشن مانند در زمینه این نقوش مشاهده می‌شود که حکایت از چکش‌کاری شیء دارد. نازکی شیء، به‌خصوص در ناحیه‌ای که از آن نمونه گرفته شده است، نیز چکش‌کاری همراه با اعمال حرارت را ایجاب می‌کند؛ بنابراین عمل تابکاری بسیار معقول به نظر می‌رسد.



شکل ۳. دو نما از تصویر نمونه بعد از اچ شدن با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر

آنالیز فازی محصولات خوردگی به روش پراش پرتو ایکس

برای انجام این آزمون، محصولات خوردگی از جای‌جای نمونه با استفاده از تیغ بیستوری جدا شدند و در صورت لزوم، نمونه‌های سخت با اعمال فشار تیغ بیستوری به پودر تبدیل گردیدند. از آنجا که نمونه‌برداری با هدف شناخت ماهیت محصولات خوردگی انجام می‌شود، ضروری است که دو شرط اساسی این تعریف در آن رعایت شود. تنوع در برداشت محصولات خوردگی از نقاط مختلف نمونه، احتمال «جامع بودن» جامعه آماری مورد آزمایش را افزایش می‌دهد. همچنین، تلاش برای پرهیز از انتخاب و نمونه‌برداری از رسوبات سطحی، به افزایش احتمال «مانع بودن» جامعه آماری موردنظر ـ که هدف آن محصولات خوردگی است ـ می‌انجامد. روشن است که اگر رسوبات سطحی حاوی یون‌هایی باشند که در محصولات خوردگی وجود ندارند، تا حد امکان نباید با آن‌ها ترکیب شوند و لازم است نتایج هر نمونه به‌صورت جداگانه مورد آزمایش قرار گیرد تا از اختلاط داده‌ها جلوگیری شود. نمونه‌ها برای تحلیل به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان ارسال شدند.

جدول شماره ۲. نتایج آزمون XRD

Line Color	Compound Name	Formula	PDF Number
rclini 19-0926 (* rclini 19-0926 (* rclini 19-0926 (*	Malachite, syn	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	41-1390 (I)

چنانکه در جدول ۲ دیده می‌شود، تنها محصول خوردگی موجود در شیء موردمطالعه، کربنات (بازی) مس است. همان‌طور که اشاره شد، هم آزوریت و هم مالاکیت از کربنات‌های بازی مس هستند و با روش شیمی تر تنها می‌توان حضور یون کربنات را احراز کرد. اگرچه حجم برداشت نمونه از محصولات خوردگی با رنگ‌های مختلف نسبتاً یکسان به نظر می‌رسید، آزمون فوق نشان داد که این کربنات‌های بازی همگی از نوع مالاکیت هستند. با توجه به اینکه این دستگاه قادر به شناسایی ترکیب‌های کمتر از ۵٪ کل نمونه نیست، احتمال حضور آزوریت یا دیگر ترکیب‌ها به میزان ناچیز و اندک همچنان وجود دارد.

جمع‌بندی نتایج آزمون‌ها

آزمون شیمی تر اثبات کرد که شیء فلزی موردمطالعه از انواع آلیاژ مفرغ است و همچنین مشخص شد که محصولات خوردگی عارض شده، کربنات مس هستند. آزمون پراش پرتو ایکس نوع محصول خوردگی کربناته را تشخیص داد: مالاکیت. این یافته‌ها دو نتیجه مهم داشت: شناسایی ماهیت فلز و شناسایی دقیق محصولات خوردگی به منظور اتخاذ تصمیم مناسب برای نگهداری و مرمت آن‌ها. در رادیوگرافی، شواهدی از ریخته‌گری مشاهده نشد، اما مشخص شد که شیء یک تکه است و محل آسیب‌پذیرتری که بیشتر معدنی شده و دچار خوردگی بود، قابل تشخیص است. میکروسکوپ الکترونی روبشی عناصر موجود در نمونه فلزی، مقدار آن‌ها و پراکندگی غنای هر عنصر در نقاط متعدد را مشخص کرد. از متالوگرافی و بررسی ریزساختار فلز، احتمال تابکاری زیرساخت قالب‌گیری شده موجه و معقول به

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]

نظر رسید. جدول شماره ۳ که حاوی نتایج آزمون‌هاست، علاوه بر تفکیک هدف هر آزمون از دیگری، تقدم و تأخر هر آزمون نسبت به دیگری را نیز مشخص می‌کند که بیانگر نوعی نوآوری در ارائه نتایج است.

جدول شماره ۳. آزمون‌ها و نسبت آن‌ها با یکدیگر + نتایج

نام آزمون	شناخت برای شناخت	توضیح	نتیجه	مکمل استفاده شده	شناخت برای عمل	توضیح	نتیجه	مکمل استفاده شده
شیمی تر	ماهیت فلز	درصد عناصر مشخص نمی‌شود	مفرغ: مرکب از مس و قلع و سرب	میکروسکوپ الکترونی روبشی	ماهیت محصولات خوردگی	نیاز به اقدام مرمتی در صورت تشخیص ترکیبات کلریدی	کربنات مس	پراش پرتو ایکس (XRD)
پراش پرتو ایکس (XRD)	نوع محصولات کربناته	هم آزوریت محتمل بود هم مالاکیت	مالاکیت	–	ماهیت محصولات خوردگی	اطمینان از غیاب محصولات خوردگی خطرناک	مالاکیت	–
رادیوگرافی	تشخیص تزئینات و روش ساخت شیء	ضخامت ها و اتصالات در ثبت تصاویر مبتنی بر اختلاف چگالی مؤثرند	یک‌تکه چکش کاری ظهور بهتر تزئینات	متالوگرافی	تشخیص نواحی معدنی شده ی کم‌چگال از فلز	نواحی خورده شده، در مقابل فشارهای مکانیکی آسیب پذیرترند	بخشی از مغز فلزی لبه ظرف، بیشتر خورده شده	–
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS)	نوع و درصد عناصر	لزوم اطلاع از خطای تعمیم نتایج از نمونه به شیء	در حدود ۸۵٪ مس و ۱۱٪ قلع و...	–	–	–	–	–
متالوگرافی	روش ساخت شیء	لزوم اطلاع از خطای تعمیم نتایج از نمونه به شیء	تابکاری و استفاده از قالب	–	–	–	–	–

تقدیر و تشکر

قدردان هدایت‌های مشفقانه استادان گرامی آقایان دکتر عودباشی و دکتر مرتضوی هستیم و بدین‌وسیله از ایشان سپاسگزاری میگردد

منابع

اسکات، د. (۱۳۹۵). *متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی* (ا. عودباشی، مترجم). اصفهان: جهاد دانشگاهی.
استوارت، ب. (۱۳۹۳). *روش‌های تجزیه مواد در مرمت و حفاظت آثار تاریخی* (م. کثیری، مترجم). تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
بخشنده‌فرد، ح. (۱۳۸۹). *بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت*. اصفهان: انتشارات دانشگاه هنر اصفهان.
پلندرلیت، ه. ج.، و ورنر، ا. (بی‌تا). *حفاظت، مرمت و نگهداری آثار هنری و تاریخی: درمان، مرمت و بازسازی* (د. ر. وطن‌دوست، مترجم). تهران: دانشگاه هنر.
مصباح یزدی، م. (۱۳۸۸). *آموزش فلسفه* (جلد اول و دوم). تهران: شرکت چاپ و نشر بین‌الملل.

Moorey. (1973). *Ancient Persian bronzes in the Adam Collection*. Adam Collection.
Muscarella, O. W. (2003). *Bronze and iron: Ancient metalworking in Iran and Mesopotamia*. Metropolitan Museum of Art.
Scott, D. A. (1991). *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*. The J. Paul Getty Trust.
Scott, D. A. (2002). *Copper and bronze in art: Corrosion, colorants, conservation*. Getty Publications.
Stuart, B. (2007). *Analytical techniques in materials conservation*. John Wiley & Sons.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-06-11]