Technical Study of a High-Tin Bronze Vessel from the Bam World Heritage Site

Ramin Talei[1]*, Parastoo Naeimi Taraei[2]

1. BA in Conservation of Cultural and Historical Objects, Art University of Isfahan, Iran.
2. Research Expert, Research Centre for Conservation of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran.

Abstract

With the advent of Islam, bronze temporarily replaced gold and silver in the production of metal vessels. Among the bronze artifacts used during this period, high-tin bronze (white bronze) objects, valued for their silver-like appearance, gained significant attention. One such artifact is a vessel discovered during debris removal operations following the 2003 Bam earthquake, located in the southern part of the Bam Citadel, specifically the southern section of the house known as Mir Akbar. Similar decorative patterns are found in artifacts from the Seljuk and Timurid periods. In this study, the artifact was examined using X-ray imaging, and microstructural analysis of a sample from the vessel's base was conducted using reflected light optical microscopy after preparation. To further the technical investigation, Scanning Electron Microscopy (SEM) equipped with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) was employed to analyze the alloy composition and metallic and non-metallic phases. The results indicate that the vessel was produced through casting, with directional mechanical work causing elongation of non-metallic sulfide phases within the metal matrix. The microstructure of the vessel consists of single copper-rich grains dispersed in a needle-like beta phase rich in tin, characteristic of high-tin bronze (white bronze). After cooling, the alloy underwent heat treatment at approximately 650°C followed by rapid quenching, leading to the formation of the needle-like phase and resulting in the vessel's hardness and brittleness.

Knowledge and Conservation Restoration

Special Issue. No.1
September 2019
Pages 54-62

https://journal.richt.ir/kcr

Corresponding Author

Ramin Talei

Email
Ramin_t_geom@yahoo.com

Keywords: Bam World Heritage Site, Bronze, White Bronze.

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 2026-11-17]

مطالعه‌ی فنی یک نمونه ظرف سفیدروی متعلق به محوطه میراث جهانی بم

رامین طالعی*[1]، پرستو نعیمی طرئی[2]

۱. دانشجوی کارشناسی مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران.
۲. کارشناس پژوهشی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

چکیده

با ظهور اسلام، مفرغ برای مدتی جانشین طلا و نقره در ساخت ظروف فلزی شد. ازجمله آثار مفرغی مورداستفاده در این دوران، آثار سفیدروی با میزان قلع بالا بوده است که به سبب ویژگی‌های ویژه، همچون جلوه‌ی نقره، موردتوجه قرارگرفته‌اند. نمونه‌ای از این آثار ظرفی است که در عملیات آواربرداری پس از زلزله‌ی سال ۱۳۸۲ در بم، از ضلع جنوبی ارگ بم، بخش جنوب خانه‌ی موسوم به میراکبر، به‌دست‌آمده است. نمونه‌هایی با تزئینات مشابه ظرف مورد نظر در دوران سلجوقی و تیموری نیز وجود دارد. در پژوهش حاضر، ضمن بررسی کلی اثر با تصویربرداری اشعهX ، مطالعات ریزساختار نمونه‌ای از کف ظرف پس از آماده‌سازی با استفاده از میکروسکوپ نوری انعکاسی انجام‌شده و جهت تکمیل مطالعات فنی، از میکروسکوپ روبشی الکترونی (SEM) مجهز به سیستم تجزیه عنصری EDX برای بررسی ترکیب آلیاژی و فازهای فلزی و غیرفلزی استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که شیوه‌ی ساخت اثر ریخته‌گری بوده و کار مکانیکی جهت‌دار باعث کشیدگی فازهای سولفیدی غیرفلزی در زمینه‌ی فلز شده است. ریزساختار ظرف مذکور دارای تک‌دانه‌های غنی از مس پراکنده در فاز سوزنی بتای غنی از قلع است که از مشخصات مفرغ‌های قلع بالا (سفیدروی) است و پس از سرد شدن، آلیاژ طی عملیات حرارتی تا حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفته و به‌صورت ناگهانی سرد شده است. چنین روندی تشکیل فاز سوزنی و سختی و شکنندگی را در ظرف مورد نظر موجب شده است.

واژگان کلیدی: محوطه‌ی میراث جهانی بم، برنز، سفیدروی.

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

ویژه‌نامه: شماره ۱
تابستان ۱۳۹۸
صفحات ۵۴-۶۲

https://journal.richt.ir/kcr

نویسنده مسئول
رامین طالعی
رایانامه
Ramin_t_geom@yahoo.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 2026-11-17]

مقدمه

وجه تمایز هنر فلزکاری ایران نسبت به سایر ممالک اسلامی در این است که ایران وارث هنر فلزکاری پیشرفته بوده و به‌ویژه ازنظر فنی پیشرفت‌های قابل‌توجهی یافته است (حیدرآبادیان و عباسی‌فرد، ۱۳۸۸، ص. ۲۰). با ظهور اسلام، برای مدتی مفرغ جانشین طلا و نقره در ساخت ظروف فلزی شد و به دلیل تشابه نقوش به‌کاررفته، بسیاری از پژوهشگران بخش اعظم آثار تولیدی در دوره‌ی نخستین اسلام تا زمان سلجوقیان را به دوره‌ی ساسانی نسبت داده‌اند (یاوری، ۱۳۹۱، ص. ۲۵).

ساخت ظروف برنزی با قلع بالا (مس آلیاژ شده با ۲۰ تا ۳۰٪ قلع) به سبب ویژگی‌های خاصی مانند جلوه‌ی نقره و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی ارزشمند بوده است (شایسته‌فر، ۱۳۸۴، ۲۹). تفاوت‌های موجود در میزان قلع برنزها می‌تواند راهنمای مناسبی برای پیش‌بینی شیوه‌ی ساخت آثار باشد. برنزهایی با میزان قلع بیش از ۱۶٪ غالباً به سهولت به‌صورت گرم و حرارت دیده کار شده‌اند. تغییرات موجود در ساختار بلوری برنزهایی با درجه قلع بالا، نتیجه‌ی سرد شدن ناگهانی[1] این آثار پس از یک دوره حرارت‌دهی زیاد است و این آثار دارای ساختاری ترد و شکننده می‌باشند (گانتر، ۱۳۸۳، ص. ۶۳). آلیاژ سفیدروی با شیوه ساخت مشابه، دارای درصد بالایی از قلع (بین ۲۰ تا ۳۰٪) است. یکی از ویژگی‌های متمایز سفیدروی، زنگاری است که به‌صورت لایه‌های سیاه براق همراه با جوش دانه‌هایی به رنگ‌های سبز، قرمز و قرمز متمایل به قهوه‌ای ظاهر می‌شود. تهیه‌ی آلیاژ سفیدروی از دیرباز در ایران شناخته شده است؛ برای نمونه، کاسه‌ای از کاوش‌های مارلیک متعلق به هزاره‌ی دوم پیش از میلاد، و قطعاتی از این نوع آلیاژ در کاوش‌های علمی محوطه‌ی باستانی ارجان به‌دست‌آمده است (لک‌پور، ۱۳۷۵، ص. ۱۷).

در تمامی دوره‌های اسلامی، از آغاز تا دوره‌ی صفوی، ساخت اشیایی از سفیدروی ادامه داشته است. بااین‌حال، در سده‌های چهارم تا هفتم هجری، استفاده از سفیدروی بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفت. پس از حمله‌ی مغول، زمانی که هنرمندان خراسان به علت ویرانی شهرها و مراکز هنری به مناطق غرب مهاجرت کردند، ساخت ظروف سفیدروی در آن مناطق ادامه یافت. در دوره‌ی تیموری نیز، ظروف سفیدروی در کارگاه‌های فلزکاری احیاشده‌ی خراسان تولید شد (لک‌پور، ۱۳۷۵، ص. ۱۸). به‌طورکلی، برنز سفید در ایران به‌طور وسیع مورداستفاده بوده و قدمت ساخت و به‌کارگیری آن کمتر از دیگر کشورهای آسیایی نبوده است؛ اما عدم شناخت کافی از این آلیاژ ممکن است باعث شده باشد تا تصور شود نمونه‌های آن در کشور نادر است. درواقع، در سایر نقاط مطالعات بیشتری بر روی این شیوه فلزکاری صورت گرفته و شناسایی شده است (انصاری و بخشنده فرد، ۱۳۸۹، ص. ۳).

در کتاب ابوالقاسم کاشانی در بحثی تحت عنوان «در معرفت سفیدروی» آمده است که سفر (برنز) آلیاژی از مس و قلع سفید است و سفیدروی ماده‌ای سفیدرنگ شبیه نقره تولید می‌کند که به خودی خود از هم پاشیده نمی‌شود. ابتکار آن در زمان حجاج بوده است؛ زمانی که خوردن و آشامیدن در ظروف زرین و سیمین در عراق و ایران منع شد. در آن زمان صنعتگران، مس و قلع را ترکیب کردند تا ظروف جایگزینی برای حکماء و ثروتمندان تولید کنند. خواجه نصیرالدین طوسی نیز در کتاب تناسخ‌نامه بیان می‌کند: اگر کسی مس را مذاب کند و مقدار مشخصی قلع درون آن بریزد، رنگ آن نقره‌ای خواهد شد و در این متن، این آلیاژ تحت عنوان اسپیدروی نیز یاد شده است. به هر حال، نکته‌ی مشترک در نوشته‌های کاشانی و طوسی، تعلق این آلیاژ به زمان حجاج است. این اشیاء همچنین با عناوینی چون هفت‌جوش، هفت‌جسد، طالیقون، برنز سفید و غیره شناخته شده‌اند (انصاری و بخشنده‌فرد، ۱۳۸۹، ص. ۲). ظرف مورد پژوهش، با شواهد ظاهری مشابه آثار سفیدروی (شکل ۲)، در جریان عملیات آواربرداری پس از زلزله‌ی سال ۱۳۸۲ در بم، از ضلع جنوبی ارگ تاریخی بم، بخش جنوب خانه‌ی موسوم به میراکبر به‌دست‌آمده است (شکل ۱) و هم‌اکنون در پایگاه میراث جهانی بم نگهداری می‌شود.



ب الف

شکل ۱. (الف): موقعیت جغرافیایی کشف اثر (ب): خانه‌ی موسوم به میراکبر. عکس از: پایگاه باستان‌شناسی محوطه‌ی میراث جهانی بم

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]

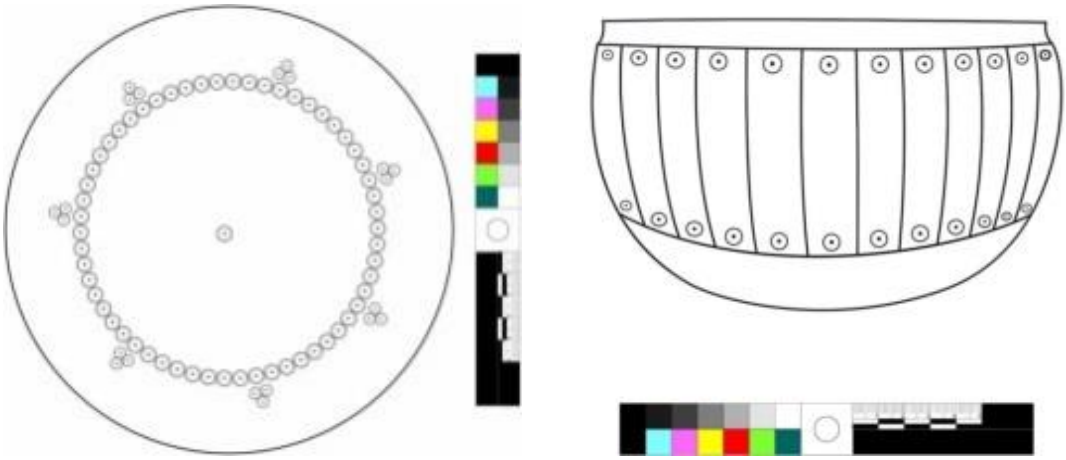
معرفی اثر

ظرف موردمطالعه متعلق به مجموعه اشیای تاریخی محوطه‌ی میراث جهانی ارگ بم است و در پایگاه باستان‌شناسی شهر بم با شماره‌ی ثبت ۰۲۰۶۳۱ نگهداری می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. کاسه‌ی برنزی مورد مطالعه مربوط به محوطه‌ی میراث جهانی بم

این ظرف دارای قطر دهانه‌ی خارجی ۱/۱۷۰ میلی‌متر و وزن ۹/۷۵۷ گرم است. بدنه‌ی آن با تزئینات شیاره‌ای در کناره‌ها و نقوش هندسی دایره‌ای شکل به‌صورت دوایر نقطه‌چین اجراشده، که با روش قلم‌زنی و ایجاد سوراخ‌های ریز در مرکز هر دایره تزئین شده‌اند. این نقوش در بخش‌های بالایی و پایینی شیاره‌ها حول یک محور دایره‌ای قرار دارند و در کف داخلی ظرف نیز مشاهده می‌شوند. همچنین ردیفی از نقوش مشابه در سطح خارجی کف ظرف نمایان است (شکل ۳). لازم به ذکر است که ظرف در قسمت‌هایی مانند کف و لبه دچار شکستگی و نقصان شده است.



شکل ۳. طرح نقوش تزئینی موجود در اثر: الف) نمای روبروی کاسه‌ی برنزی، ب) نمای پایین کاسه‌ی برنزی

رنگ و شواهد ظاهری نشان‌دهنده‌ی استفاده از میزان بالای قلع در آلیاژ این ظرف است. این روش ساخت با حکاکی و کنده‌کاری به شکل دوایر نقطه‌چین تزئین شده است. نمونه‌هایی مشابه در منابع پژوهشی گزارش شده‌اند؛ ازجمله کاسه‌ی برنزی چکش‌کاری شده با کف کمی محدب، بدنه محدب و لبه‌ی صاف که دارای ردیفی از دوایر متداخل در داخل ظرف و دوایر نقطه‌چین کوچک بین آن‌ها است، متعلق به سده‌ی چهارم و پنجم هجری قمری. سطح خارجی آن شامل سه ردیف دایره‌ای نقطه‌چین زیر لبه و ردیف گلبرگ‌های عمودی موازی است که تا نزدیک کف امتدادیافته و دورادور بدنه را فراگرفته و شکلی شبیه گل ایجاد کرده است (شکل ۴).

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]



شکل ۴. نمونه‌ی مشابه از سده‌ی چهارم ـ پنجم ه.ق. (لک‌پوز ۱۳۷۵، ص. ۵۱)

همچنین کاسه‌ی چکش‌کاری شده‌ی دیگر با بدنه محدب و لبه‌ی متمایل به داخل، متعلق به سده‌ی نهم ه.ق. است. در سطح خارجی این ظرف یک ردیف دوایر نقطه‌چین زیر لبه وجود دارد که به‌صورت ردیف‌های افقی یا ترکیب مثلث‌ها در چهار طرف دایره‌ی بزرگ روی بدنه و با روش قلم‌زنی ترسیم‌شده است (شکل ۵).



شکل ۵. نمونه‌ی مشابه از سده‌ی نهم ه.ق (لک‌پور ۱۳۷۵، ص. ۱۱۷)

شیوه تحقیق

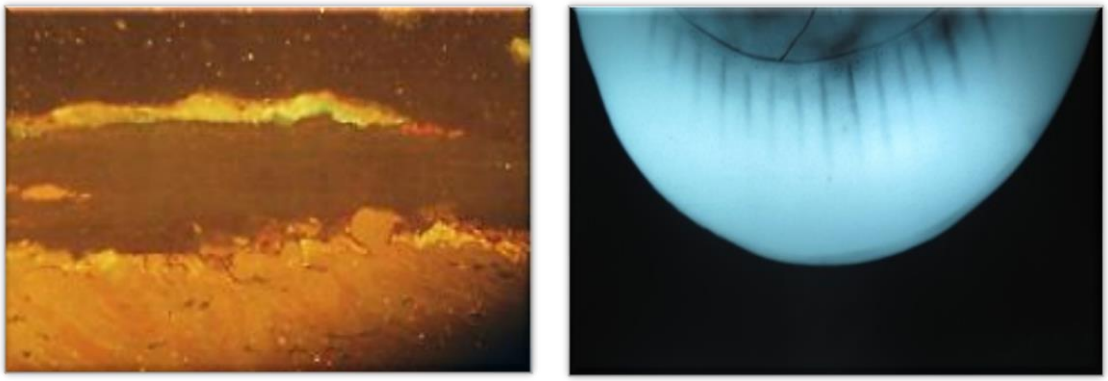
به‌منظور بررسی شیوه‌ی ساخت، ارزیابی شدت خوردگی الکتروشیمیایی و تعیین میزان مغزه‌ی فلزی باقی‌مانده، تصاویر رادیوگرافی با اشعه‌ی X از ظرف موردمطالعه تهیه شد. این بررسی با استفاده از سیستم رادیوگرافی آثار هنری انجام گرفت. برای مطالعات فنی اثر، نمونه‌برداری محدود از محل شکستگی کف ظرف صورت گرفت. نمونه‌برداری با استفاده از ابزارهای ظریف جواهرسازی و در کمترین حد ممکن انجام شد تا کمترین آسیب به اثر وارد شود. برای مطالعه‌ی سطوح صیقلی، نمونه‌ی برداشت‌شده پس از مانت در رزین اپوکسی، مراحل آماده‌سازی شامل صیقل دهی با سنباده‌های مختلف (ورق‌های سیلیسیم کاربید با مش بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰) و نمد پولیش را طی کرد. سپس سطح صیقلی نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری انعکاسی مدل Olympus PMG3 بررسی شد. به‌منظور مطالعه و تجزیه‌ی فازها و آخال‌های موجود در لایه‌های خوردگی، از میکروسکوپ روبش الکترونی (SEM) مدل MIRA-TESCAN مجهز به دستگاه تحلیل عنصری EDX استفاده گردید.

بحث و نتایج

تصویر رادیوگرافی اشعه X (۹۵ kV، ۱۲۰ s)، از کف اثر نشان می‌دهد که ظرف با استفاده از فن ریخته‌گری ساخته‌شده و توزیع نقوش به‌وضوح قابل‌شناسایی است. در قسمت‌های تیره‌ی تصویر، شدت خوردگی بالا مشاهده می‌شود. تیرگی بیشتر در نواحی دارای کمبود فلز است و تردی ناشی از فقدان فلز به دلیل خوردگی شدید در این نواحی قابل توضیح است. باوجوداینکه بخش های مفقودی فلز در دیگر بخش‌های کف مشاهده نمی‌شود، رنگ تیره‌ی برخی نواحی حاکی از وجود ساختاری نسبتاً ترد است. ترک‌ها و ریزترک‌ها در کف ظرف به‌وضوح در تصویر قابل‌شناسایی هستند (شکل ۶). تصویر رادیوگرافی X از لبه‌ی ظرف، شیارهای تزئینی را نشان می‌دهد. در نواحی سالم لبه، که کمبود فلز در آن‌ها مشاهده نمی‌شود، وضعیت مغزه‌ی فلزی باقی‌مانده، مناسب است (شکل ۷). مطالعات میکروسکوپی با نور

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]

پلاریزان نشان‌دهنده‌ی تشکیل لایه‌ای از محصولات اولیه‌ی خوردگی اکسیدی است که با یک لایه نازک از محصولات ثانویه‌ی مس پوشیده شده است (شکل ۸).



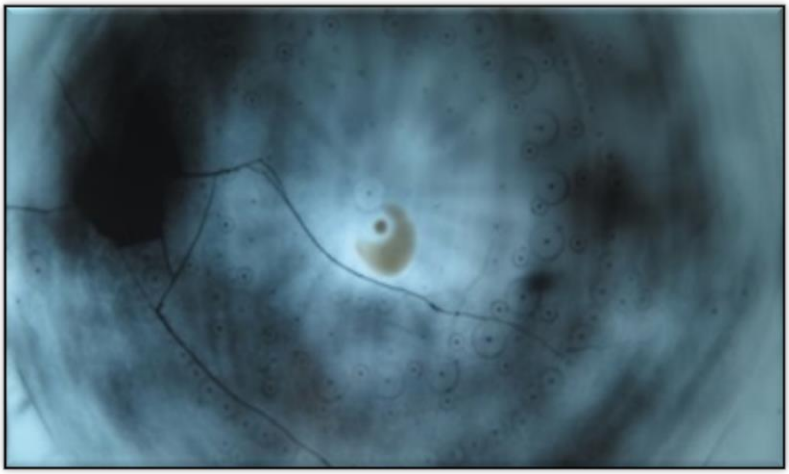
شکل ۶. تصویر رادیوگرافی اشعه X (۹۵ kV، ۱۲۰ s) ازکف اثر
شکل ۷. رادیوگرافی اشعه X (۹۵ kV، ۱۲۰ s) از لبه اثر در نواحی سالم



شکل۸. تصویر میکروسکوپ متالوگرافی

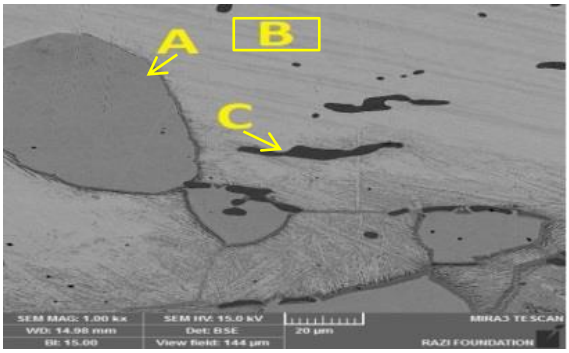
مطالعات ریزساختار با میکروسکوپ نوری انعکاسی نشان‌دهنده‌ی ساختاری دوفازی همراه با ناخالصی‌های کشیده است. جهت‌گیری فاز ناخالصی خاکستری‌رنگ حاکی از اعمال کار جهت‌دار در طول ساخت ظرف است. خوردگی نمونه باعث نمایان شدن ریزساختار اصلی پیش از مرحله‌ی حکاکی شده است، که شامل دانه‌های غنی از مس آلفا درزمینه‌ی فاز سوزنی شکل غنی از قلع بتا است. این ریزساختار مشخصه‌ی برنزی با میزان بالای قلع است و خوردگی انتخابی فاز بتا (غنی از قلع) سازوکار اصلی خوردگی را نشان می‌دهد که نتیجه‌ی آن باقی ماندن دانه‌های پراکنده‌ی غنی از مس درزمینه‌ی بتا است (شکل ۹). تشکیل فاز سوزنی بتا ناشی از سرعت‌بالای سرد شدن (کوئنچ شدن) فلز در دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این پدیده در برنزهای با درصد قلع بالا رایج بوده و منجر به محبوس شدن دانه‌های آلفا غنی از مس درزمینه‌ی فاز بتا می‌شود. به این ترتیب، از تشکیل ساختار یوتکتویید $\alpha+\delta$ جلوگیری می‌گردد.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]

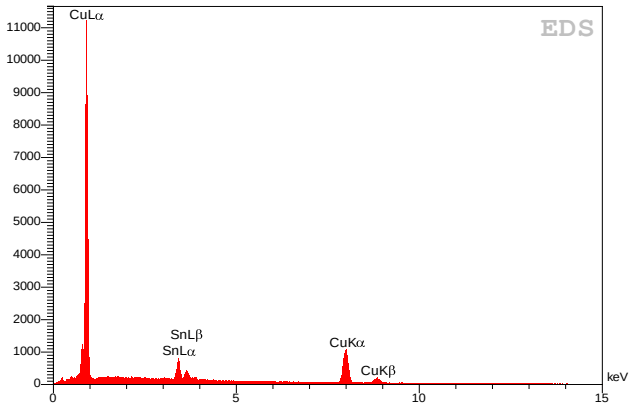


شکل ۹. تصویر میکروسکوپی از زمینه فلزی نمونه قبل از مرحله حکاکی

مطالعه و تجزیه‌ی فازها با استفاده از میکروسکوپ‌های روبش الکترون (SEM) همراه با تجزیه عنصری EDX انجام شد. تصویر SEM زمینه‌ی فلزی و فازهای موجود را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). تجزیه‌ی فازA، درصد بالایی مس را نشان می‌دهد و حاکی از پراکندگی فاز غنی از مس در ریزساختار است (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. تصویر SEM از زمینه فلزی و فازهای موجود

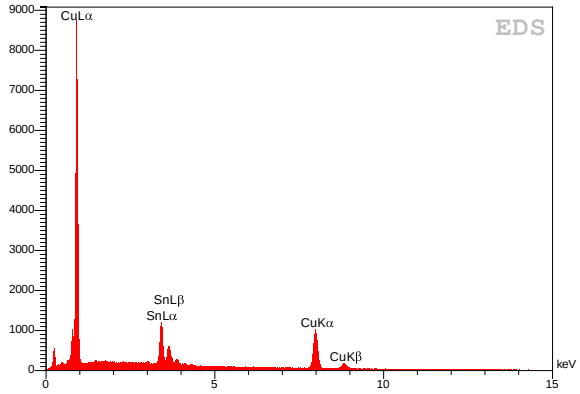


Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%
Cu	Ka	610.0	0.9417	0.8249	0.8205	80.04	88.22
Sn	La	326.8	2.7199	0.1751	0.1742	19.96	11.78
				1.0000	0.9947	100.00	100.00

شکل۱۱. طیف و نتایج EDX از فاز A

فاز B دارای درصد بالاتری از قلع نسبت به فاز A است. این نتیجه با تصویر سوزنی شکل فاز بتا (شکل ۱۰) که غنی از قلع است، همخوانی دارد و مطابق با ویژگی‌های آلیاژهای مس با درصد بالای قلع است که در شرایط خاص تولید می‌شوند (شکل ۱۲).

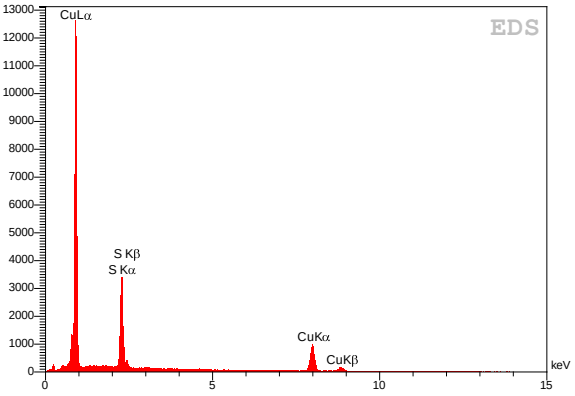
[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]



Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%
Cu	Ka	537.5	1.0098	0.7166	0.7113	68.36	80.14
Sn	La	536.5	2.4017	0.2834	0.2813	31.64	19.86
				1.0000	0.9926	100.00	100.00

شکل ۱۲. طیف و نتایج EDX از فاز B

تجزیه‌ی فاز C نشان‌دهنده‌ی فاز سولفیدی مس است که به‌صورت کشیده و در جهت کار مکانیکی انجام‌شده، درزمینه‌ی فلزی توزیع شده است. این فاز به‌عنوان ناخالصی باقی‌مانده از فرایند ذوب سنگ معدن وارد فلز اصلی شده است (شکل ۱۳).



Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%
S	Ka	959.7	3.8384	0.1966	0.1840	21.28	34.89
Cu	Ka	526.0	1.0087	0.8034	0.7520	78.72	65.11
				1.0000	0.9360	100.00	100.00

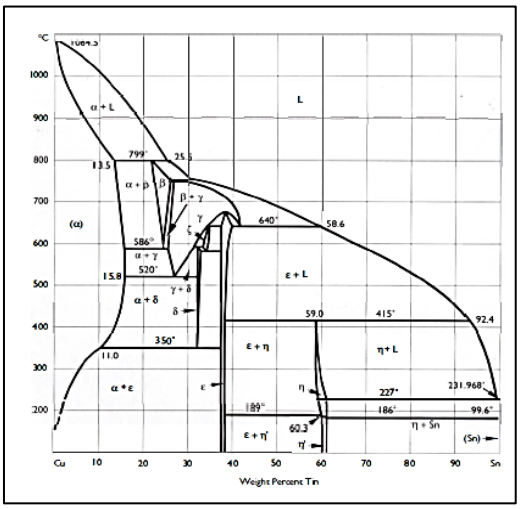
شکل ۱۳. طیف و نتایج EDX از فاز C

برای تولید چنین اشیایی، پس از ریخته‌گری، اثر توسط کارگر در دمای حدود ۶۵۰ °C شکل داده می‌شود. در پایان فرایند، آلیاژ تا دمای فوق حرارت داده‌شده و برای حفظ فاز دمای بالا و تولید ساختار مارتنزیتی بتا، به‌سرعت سرد می‌شود (شکل ۱۴). سطح اثر پس از چکش‌کاری و تشکیل پوسته‌ی اکسیدی با استفاده از سمباده‌های مختلف صیقل داده و سپس پولیش می‌شود. تزئینات سطحی در صورت نیاز قبل از پولیش نهایی انجام می‌شوند. اگرچه برخی ظروف از این آلیاژ ساخته‌شده و دارای خواص زنگ‌زدگی مطلوب هستند، دلیل اصلی استفاده از این ترکیب، رنگ آن است. برنز بتا رنگی مشابه طلا دارد و نخستین بار در هند و تایلند مورداستفاده قرارگرفته و سپس به دیگر مناطق گسترش‌یافته است. آلیاژ اسلامی سفیدروی نمونه‌ای از آلیاژهای قلع بالا است که در مناطق مختلف یافت شده است. با گسترش تولید آلیاژ برنج، استفاده از برنز قلع بالا محدود شد (Scott, 1991. P. 27).

یکی از مزایای فازβ، پایداری آن در برابر کوئنچینگ است. بررسی و محاسبه کامل پایداری فاز β پیچیده است، اما یکی از مهم‌ترین عوامل، ساختار مارتنزیتی سوزنی آن است. برنز بتای آبدهی شده سخت‌تر و تردتر از برنزهایی است که در دمای اتاق به آرامی سرد شده‌اند (Scott, 1991, p. 27). عوامل متعددی در بازه‌ی کمی از قلع حدود ۲۲٪ و دمای تقریبی ۷۰۰ °C در دیاگرام فازی Cu-Sn به‌عنوان ترکیب بهینه در برنزهای قلع بالا با دو عملیات آبدهی و فورجینگ مؤثر بوده‌اند. این ترکیب با جلوگیری از تشکیل فاز δ، استحکام حین آبدهی را حفظ می‌کند. سختی نمونه‌های آبدهی شده با افزایش قلع تا حدود ۲۲٪ افزایش یافته و سپس در حد ماکزیمم باقی می‌ماند. بررسی سطوح شکست نشان می‌دهد که مناطق مرزی دانه‌های β با قفل شدن دندریت‌های α تقویت می‌شوند. این اثر به میزان α وابسته است و بیشترین تأثیر آن در حدود ۲۲٪ قلع رخ می‌دهد. هر انحراف کوچک از این ترکیب خاص باعث تغییر خواص مکانیکی، از جمله استحکام و چقرمگی می‌شود: کاهش قلع موجب کاهش استحکام و تأثیر منفی بر چقرمگی می‌گردد، و افزایش قلع منجر به افزایش سختی می‌شود. دمای

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]

آبدهی نیز تأثیر قابل‌توجهی بر سختی دارد و بهترین تعادل در ترکیب حدود ۲۲٪ قلع و دمای آبدهی ۷۰۰ °C رخ می‌دهد (Park, 2009, p. 1274).



شکل۱۴. نمودارفازی مس ـ قلع (Scott, 1991, p. 122)

نتیجه‌گیری

شواهد ظاهری شامل رنگ و نوع خوردگی، مشابه ظروف سفیدروی بوده و شیوه‌ی تزئینات بکار رفته نیز با نمونه‌های شناخته‌شده از دوره‌های سلجوقی و تیموری همخوانی دارد. مطالعات نشان می‌دهد که اثر از آلیاژ برنز با درصد بالای قلع تولید شده و مراحل ساخت شامل ریخته‌گری اولیه و شکل‌دهی نهایی با روش چکش‌کاری بوده است. وجود دانه‌های غنی از مس در زمینه‌ی فلزی سوزنی β ناشی از سرد شدن ناگهانی اثر است و تردی و شکنندگی نمونه به شکل‌گیری همین فاز باز می‌گردد. همچنین، خوردگی قلع در فاز غنی از قلع زمینه و تبدیل آن به محصولات اکسیدی باعث تضعیف ساختار، به‌ویژه در نواحی کف و بخش‌هایی از لبه، شده است. فازهای سولفیدی مس که در زمینه‌ی فلزی توزیع شده‌اند، نشان‌دهنده‌ی جهت‌دار بودن کار حین عملیات ساخت هستند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از جناب آقای دکتر کامران احمدی، رییس محترم پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی، جناب آقای افشین ابراهیمی، مدیر محترم پایگاه میراث جهانی بم، سرکار خانم شیبا خدیر، مسئول بخش لیزر، سرکار خانم سمیه کاظمی، مسئول بخش آزمایشگاه شیمی، جناب آقای محمود قاسمی، مسئول بخش فلزشناسی، سرکار خانم فرشته رحیمی، مسئول بخش تصویر برداری اشعه X و سایر همکاران بخش شناخت مواد، و همچنین سرکار خانم فلک ناز باقری، مسئول دفتر ریاست، کمال قدردانی می‌شود. همچنین از جناب آقای رحمانی و همکاران ایشان در بخش میکروسکوپ روبش الکترون بنیاد علوم کاربردی رازی سپاسگزاری می‌گردد.

پی‌نوشت

[1]–Quenching: عبارت است از سرد کردن سریع در آب، گاز، هوای تح ت فشار و غیره، به منظور سخت کردن فلز در طی این فرایند.

منابع

انصاری، نفیسه، و بخشنده‌فرد، حمیدرضا. (۱۳۸۹). مروری بر فن‌شناسی فلز سفیدروی. *نشریه مرمت و پژوهش*.۴(۸) ۱۳۹–۱۴۸

حیدرآبادیان، شهرام، و عباسی‌فرد، فرناز. (۱۳۸۸). *هنر فلزکاری اسلامی*. تهران: سبحان نور.

گانتر، آن کلایبرن. (۱۳۸۳). *فلزکاری ایران در دوران هخامنشی، اشکانی و ساسانی* (ش. حیدرآبادیان، مترجم). تهران: گنجینه هنر.

لک‌پور، سیمین. (۱۳۷۵). *سفیدروی*. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

وارد، ریچل. (۱۳۸۴). *فلزکاری اسلامی* (م. شایسته‌فر، مترجم). تهران: موسسه مطالعات هنر اسلامی.

یاوری، حسین. (۱۳۹۱). *فلزکاری*. تهران: سوره مهر.

Park, Y. (2009). Implication of peritectic composition in historical high-tin bronze metallurgy. *Materials Characterization, 60*(10), 1169–1174.

Scott, D. A. (1991). *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*. The Getty Conservation Institute.

[Downloaded from journal.richt.ir on 2026-11-17]