



Research Article

New Technology in the Reconstruction of Missing Parts of Blue-and-White Pottery Belonging to the Middle Islamic Centuries Found in the Tabriz Bazaar, Iran

Mehdi Razani (a)*, Tahereh Ghaffari (b)

a Associate Professor, Department of Conservation and Restoration, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. (m.razani@tabriziau.ac.ir)

b. M.A. in Archaeometry, Department of Conservation and Restoration, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran. (tahereh.ghaffari1302@gmail.com)

Keywords

Pottery; Conservation and reconstruction; 3D scanner; 3D printer; Islamic archaeology; Tabriz Bazaar

Citation

Razani, M., & Ghaffari, T. (2025). New Technology in the Reconstruction of Missing Parts of Blue-and-White Pottery Belonging to the Middle Islamic Centuries Found in the Tabriz Bazaar, Iran. *Greater Khorasan Handicrafts*, 3(11), 21-38.



Use your device to scan and read articles online

Abstract

Around the world, digital technology has proven highly effective and has received attention in documentation, monitoring, and reconstruction as a tool for the restoration and preservation of cultural heritage and as a low-risk method for dealing with the problems in this field. Accordingly, the present study aims to investigate the process of applying rapid prototyping technology, including three-dimensional (3D) scanning and 3D printing, for the reconstruction of missing parts of ceramic artifacts, while examining the advantages and disadvantages of this technology. For this purpose, a glazed ceramic artifact from the Islamic period, excavated during the archaeological investigations of the Tabriz Grand Bazaar, was selected as the case study for conducting historical, comparative, and condition assessment analyses, as well as 3D reconstruction. Historical studies, based on the motifs, colors of the decorations, and the excavation site, indicate that the pottery dates to the Middle Islamic Period. The results of technological studies, based on classical chemical tests conducted to determine the oxides of the color-forming elements of the glaze, indicate the presence of iron oxide in the pottery glaze. Also, serious damage to the pottery, such as loss of structural integrity, lack of strength of the pottery structure, and improper joints resulting from previous conservation during the excavation, were identified. Therefore, in accordance with conservation principles, the previous joins were dismantled, and the initial conservation procedures, including cleaning, consolidation, and reassembly, were carried out. Then, in order to reconstruct the missing parts of the artifact (46%, as calculated by software), three-dimensional images of the sample surface and its missing surfaces were initially prepared with the help of a 3D scanner. In the next step, these 3D images were converted into usable data in a 3D printer by software, and then the missing parts were fabricated by a 3D printer, and the printed parts were fitted to the missing parts of the pottery body, and color matching was performed. In other words, the results of this study showed that the application of this new method leads to a better perception of the form of historical artifacts while providing a safe and non-contact approach to their conservation.

DOI: <https://doi.org/10.22034/hgj.2026.577956.1062>



URL: https://hgj.imamreza.ac.ir/article_245161.html



©Authors retain the copyright and full publishing rights.

* Corresponding Authors

Introduction

The conservation of historical ceramics, especially glazed wares, presents considerable challenges in reconstructing damaged or missing parts. Traditional methods such as plaster molding and casting are often time-consuming, imprecise, and may expose fragile surfaces to physical contact. These limitations create a knowledge gap in Iranian conservation practice regarding safe, accurate, and reversible reconstruction methods. This research focuses on a specific blue-and-white pottery fragment excavated in 2018 from the Tabriz Bazaar (Locus 2011, Layer 2, depth 10–12 m). The piece features a white glaze with blue, green, and brown underglaze decorations, characteristic of late Timurid–Safavid traditions. However, it suffers from cracks, fractures, and extensive missing sections, along with previous improper restorations during excavation. The study addresses two main questions: First, what is the process of applying 3D scanning and printing technologies to reconstruct missing parts of glazed pottery, and how does it align with conservation principles? Second, given the colored glaze and decorations, how should color reintegration be approached—minimal intervention or full visual recreation? By answering these, the research aims to provide an operational model for low-risk, precise digital reconstruction that respects both structural integrity and aesthetic authenticity.

Materials and Methods

The study followed a structured conservation workflow. Initial documentation included descriptive (textual and metric), graphical (sectional drawings), and photographic records. A Dino-Lite AM413T digital microscope (58×) was used to examine glaze cracks and structural weaknesses. For 3D documentation, a Rexcan CS structured-light scanner (accuracy 0.01 mm) was employed. To reduce glaze reflectivity, the surface was lightly dusted with titanium dioxide powder and industrial target points were applied. Scanning was performed using EZScan software, generating an STL point cloud. The point cloud was denoised and converted to a mesh surface using Geomagic Design X, then transformed into a solid 3D model in SolidWorks 2020. Due to the asymmetric shape of the sherd, the revolved boss/base command failed; instead, ten horizontal

sections were lofted to create inner and outer surfaces. Missing parts (46% of total volume) were virtually extracted via the cavity command. For printing, a Prusa i3 FDM printer (0.4 mm nozzle) with PLA+ filament was chosen for its flowability, low shrinkage, and post-processing capability. Print settings: 0.05 mm precision, 150-micron layers, 40 mm/s speed, vertical orientation, and 30% infill. Physical reconstruction involved: (1) initial consolidation with 5% Paraloid B-72 in acetone, (2) removal of previous inappropriate repairs using acetone, (3) surface cleaning with water and alcohol, (4) final rejoining of original fragments with 30% Paraloid B-72, (5) attaching printed parts (sized 2% smaller to allow adhesive space) with the same adhesive, and (6) color reintegration using a white-chalk base and acrylic paint applied with fine brushes, extending original patterns at lower tonal intensity to ensure distinguishability.

Discussion and Findings

The digital documentation revealed that the piece had seven original fragments, a diameter of 34 cm, a base diameter 10.2 cm, a weight 670 g, and wall thicknesses ranging from 0.6 to 0.9 mm. Chemical tests indicated iron oxide in the glaze. Virtual reconstruction successfully generated missing sections that fit the fracture edges with high precision (a deviation of less than 0.1 mm). The 3D-printed PLA+ parts were rigid yet lightweight, and their semi-translucency approximated the ceramic body. The decision to print at 0.05 mm resolution minimized the need for sanding, reducing mechanical stress on the original sherd. Adhesion with 30% Paraloid B-72 proved reversible and strong. Color reintegration adopted a full visual recreation approach (tonal harmonization) because the original decorative scheme was well-documented from existing motifs. However, the new paint was applied with lower color intensity and thinner brushstrokes, ensuring distinguishability upon close inspection. Compared to traditional plaster casting, the digital method eliminated direct contact with the glaze, reduced reconstruction time by an estimated 40%, and allowed multiple digital trial fittings before final printing. The main limitation was the monochrome nature of FDM printing, necessitating a separate color toning phase. Nevertheless, the process fully respected

reversibility, minimal intervention (no physical molding), and legibility (tonal difference). The figure references in the original paper (Figs. 1–14) visually confirm the stepwise success: from initial damage (Fig. 1), through 3D scanning (Fig. 3), virtual reconstruction (Fig. 4, 10–12), printing (Fig. 6), final joining (Fig. 13), and color toning (Fig. 14).

Conclusions

This research demonstrates that 3D scanning and printing technologies offer a highly effective, minimally invasive, and ethically sound method for reconstructing missing parts of historical glazed pottery. The process aligns well with core conservation principles: reversibility (through the use of Paraloid B-72), minimal intervention (no direct-contact molding), distinguishability (achieved via tonal differences in color reintegration), and legibility (visual completeness without forgery). Regarding the first research question, the digital workflow—from scanning to printing—provides superior dimensional accuracy and allows iterative virtual corrections before physical intervention. Regarding the second question, while current 3D printers cannot directly reproduce polychrome glazes, a controlled post-printing color reintegration that respects

distinguishability is both necessary and acceptable. The study confirms that digital reconstruction is particularly beneficial for glazed wares with complex surfaces and extensive losses, where traditional molding would risk further damage. Future work should explore multi-material printing and the integration of digital color documentation. This approach can serve as a replicable model for other ceramic conservation projects in Iran and beyond, bridging the gap between modern technology and traditional conservation ethics.

Acknowledgments

This article is derived from the author's undergraduate thesis in the Conservation and Restoration of Historical Objects program at Tabriz Islamic Art University, conducted under the supervision of Dr. Mehdi Razani. The author gratefully acknowledges Tabriz Islamic Art University for its academic support of this research. Special thanks are extended to Eng. Masoud Valipour Kalibar for his invaluable guidance, technical expertise, and patient assistance throughout all stages of the 3D reconstruction process. The author also sincerely thanks Dr. Ghader Ebrahimi for generously providing the archaeological findings from the Tabriz Bazaar excavation that formed the basis of this study.



هنرهای صناعی خراسان بزرگ

دوره ۳، شماره ۱۱، پاییز ۱۴۰۴

ISC | MSRT | ICI

شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۱۶۷۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۶۱۳۱

مقاله پژوهشی

فناوری نوین در بازسازی قسمت‌های مفقود سفال آبی سفید یافته شده از بازار جهانی تبریز (متعلق به قرون میانی اسلامی)

مهدی رازانی (الف)*، طاهره غفاری (ب)

الف) دانشیار دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. (m.razani@tabriziau.ac.ir)
ب) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. (tahereh.ghaffari1302@gmail.com)

چکیده

در سراسر جهان، فناوری دیجیتال به عنوان ابزاری برای مرمت و حفاظت از میراث فرهنگی و به عنوان روشی کم‌خطر در مقابل مشکلات این حوزه، در مستندنگاری، نظارت و بازسازی بسیار کارآمد بوده و مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی فرایند استفاده از فناوری نمونه سازی سریع از جمله اسکنر و چاپگر سه بعدی برای بازسازی قسمت‌های مفقود آثار سفالی، به بررسی مزایا و معایب این فناوری پرداخته و در این راستا، نمونه سفال لعاب دار دوره اسلامی که مربوط به کاوش‌های باستان شناسی بازار تبریز بوده را انتخاب نموده و به انجام مطالعات تاریخی، تطبیقی، آسیب شناسی و بازسازی سه بعدی پرداخته است. نتایج مطالعات تاریخی با توجه به نقوش، رنگ تزیینات و محل کاوش، حکایت از تعلق سفال به قرون میانی اسلامی دارد. نتایج مطالعات فن شناسی نیز با توجه به آزمایش‌های شیمی کلاسیک که برای تعیین اکسید عناصر رنگ ساز لعاب انجام شد، حاکی از وجود اکسید آهن در لعاب سفال می باشد. همچنین آسیب‌هایی جدی در سفال نظیر سستی، عدم استحکام ساختار سفال و وصالی‌های غیراصولی در مرمت حین کاوش، شناسایی گردید. بنابراین، با توجه به مبانی مرمت، وصالی‌ها باز شدند و مراحل اولیه مرمت که شامل پاک سازی، استحکام بخشی و وصالی مجدد بود، انجام شد. سپس، برای انجام بازسازی بخش‌های مفقود اثر (= ۴۶٪، محاسبه شده با نرم افزار)، در ابتدا با کمک اسکنر سه بعدی اقدام به تهیه تصاویر سه بعدی از سطح نمونه و سطوح مفقود آن گردید. در مرحله بعد توسط نرم افزار، این تصاویر سه بعدی تبدیل به داده‌های قابل استفاده در چاپگر سه بعدی شدند و در ادامه نیز، چاپ سه بعدی قطعات مفقود صورت گرفت و بخش‌های چاپ شده، متناسب با بخش‌های مفقود به بدنه سفال وصالی شد و موزون سازی رنگی انجام گشت. به بیانی دیگر، نتایج تحقیق نشان داد که بهره گیری از این روش جدید، تا حد زیادی منجر به ادراک فرمی بهتر آثار تاریخی و حفاظت غیرتماسی و بی خطر آن‌ها می گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

شماره صفحات: ۲۱-۳۸

واژگان کلیدی

سفال، حفاظت و بازسازی، اسکنر سه بعدی، چاپگر سه بعدی.

استناد به مقاله

رازانی، م؛ و غفاری، ط. (۱۴۰۴). فناوری نوین در بازسازی قسمت‌های مفقود سفال آبی سفید یافته شده از بازار جهانی تبریز (متعلق به قرون میانی اسلامی). هنرهای صناعی خراسان بزرگ، ۳(۱۱)، ۲۱-۳۸.



از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید.

DOI: <https://doi.org/10.22034/hgj.2026.577956.1062>



URL: https://hgj.imamreza.ac.ir/article_245161.html



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

مقدمه

حفاظت از سفالینه‌های تاریخی، به‌مثابه اسنادی چندلایه از تعاملات فرهنگی و فناوری‌های ادوار گذشته، همواره با چالش‌های بنیادینی در زمینه بازسازی و تکمیل اجزای آسیب‌دیده مواجه بوده است. در این میان، سفال‌های لعاب‌دار به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی و زیبایی‌شناختی خاص خود، نیازمند رویکردهای مرمتی دقیق و کم‌مداخله‌ای هستند که ضمن تأمین پایداری اثر، اصالت و خوانایی آن را نیز حفظ نمایند (Haddadi, 2008; Tohidi, 2016). از این میان، پژوهش حاضر با تمرکز بر قطعه‌ای سفالی از نوع «آبی سفید» منقوش، سعی بر آن دارد تا از ظرفیت‌های فناوری‌های نوین برای پاسخگویی به این نوع چالش‌ها بهره برد. مطالعات باستان‌شناختی در بافت تاریخی شهر تبریز - به‌ویژه کاوش‌های انجام‌شده در سال ۱۳۹۷ به سرپرستی دکتر قادر ابراهیمی در محدوده خیابان جمهوری اسلامی و بازار تبریز- منجر به کشف انبوهی از داده‌های سفالی از دوران میانی و متأخر اسلامی گردید (Ebrahimi, 2019). در این عملیات میدانی که با هدف بازخوانی لایه‌های تاریخی این کلان‌شهر (واقع در ۲۸ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی) صورت پذیرفت، کارگاه‌های متعددی حفاری شد که از میان آن‌ها، کارگاه دوم در حوالی خیابان جمهوری اسلامی (لایه لوکوس ۲۰۱۱) اهمیت ویژه‌ای دارد. در عمق ۱۰ تا ۱۲ متری این کارگاه و علی‌رغم آشفته‌گی‌های ناشی از تأسیسات مدرن، یک لایه دست‌نخورده ۳۰ سانتی‌متری حاوی قطعات عصر آهن و در درون پیت‌های فاضلاب مجاور نیز، نمونه‌های متنوعی از سفال‌های ادوار اسلامی استخراج شدند. یکی از این اشیاء، قطعه سفالی می‌باشد با خمیره قرمز و لعاب سفید که با نقوشی به رنگ‌های آبی، سبز و قهوه‌ای مزین شده است (تصویر ۱). این قطعه که با تکنیک چرخ‌سازی ساخته شده، از منظر سبک‌شناختی در زمره سفالینه‌های موسوم به «آبی و سفید» طبقه‌بندی می‌شود. این سنت سفالگری در شمال غرب ایران، ریشه در تحولات فنی و فرهنگی اواخر دوره تیموری و اوج‌گیری در عصر صفوی دارد که متأثر از تعاملات هنری با چین و تداوم فنون کهن ایرانی شکل گرفته است (Tohidi, 2016). با این حال، این اثر ارزشمند که بخشی از

هویت فرهنگی این خطه را در خود نهفته دارد، دچار آسیب‌های ساختاری از قبیل ترک‌خوردگی و شکستگی شده و عمدتاً بخش‌هایی از آن مفقود گردیده که پایداری فیزیکی و وحدت بصری آن را تهدید می‌کند؛ بنابراین، ضرورت بازسازی بخش‌های مفقود، از سویی ناشی از نقش سازه‌ای آن‌ها در استحکام اثر و از سوی دیگر، اهمیت آن در بازخوانی هرچه کامل‌تر زیبایی‌شناسی و نقش‌مایه‌های آن می‌باشد، اما چالش اصلی در اینجا، ناکارآمدی نسبی روش‌های مرسوم قالب‌ریزی و دوغاب‌ریزی است که ضمن تماس فیزیکی گسترده با سطح اصلی اثر (که خود عاملی خطرآفرین برای لعاب‌های آسیب‌پذیر است)، فرآیندی زمان‌بر و عاری از دقت ابعادی کافی را برای بازآفرینی فرم‌های پیچیده دارا هستند. این محدودیت‌ها، خلأ دانشی و عملیاتی را در بازسازی دقیق و ایمن قطعات سفالی تاریخی آشکار می‌سازد که در پژوهش‌های داخلی نیز، کمتر به آن پرداخته شده است (Razani, & et al, 2018). از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، در پی به‌کارگیری فرایندی روش‌مند مبتنی بر فناوری‌های نوین است تا به بازسازی این سفال تاریخی بپردازد. در این راستا سؤالات به شرح زیر مطرح می‌شوند:

۱- فرایند به‌کارگیری فناوری‌های اسکنر و چاپگر سه‌بعدی در بازسازی بخش‌های مفقود سفال‌های لعاب‌دار تاریخی چگونه است؟ و این روش تا چه میزان با اصول و مبانی نظری حفاظت و مرمت (برگشت‌پذیری، حداقل مداخله، تمایز و خوانایی) انطباق دارد؟

۲- با توجه به ماهیت لعاب‌دار بودن اثر و وجود نقوش رنگی، بازسازی قطعات رنگی چاپ‌شده چگونه و با چه رویکردی (حداقل مداخله در برابر بازآفرینی کامل تصویری) انجام می‌شود؟

برای نیل به این اهداف و پاسخگویی به پرسش‌های مذکور، روند پژوهش به این ترتیب طراحی شده است: ابتدا فرایند مستندنگاری دقیق اثر با استفاده از اسکنر سه‌بعدی انجام می‌شود؛ در ادامه، مرمت ضروری شامل پاک‌سازی، تثبیت و وصالی قطعات موجود صورت می‌پذیرد. هم‌زمان، داده‌های حاصل از اسکن، با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای

الف) مستندسازی توصیفی-تشریحی

مستندسازی توصیفی-تشریحی به گردآوری و ثبت اطلاعات متنی و داده‌های قابل‌سنجش اثر می‌پردازد و از دو بخش توصیف کیفی و تشریح کمی (سنجه‌ای) تشکیل شده است. **بخش توصیفی:** شیء مورد مطالعه، بشقابی سفالی با لعاب سفید است که در زمره ظروف ساخته شده با چرخ سفالگری قرار می‌گیرد. وجود ردّ خطوط موازی و یکدست در پشت ظرف، مؤید این شیوه ساخت می‌باشد. تزیینات اثر شامل نقوش آبی و سفید است که به شیوه نقاشی زیرلعابی با لعاب شفاف بر روی بدنه اجرا شده‌اند. در فرایند ساخت این‌گونه سفالینه‌ها، ابتدا سطح سفال با دوغاب سفیدرنگ پوشانده شد و سپس، با استفاده از قلم‌مو و لعاب رنگی، نقوش موردنظر اعمال گردید و در نهایت، اثر برای بار دوم پخت می‌شد. نقوش این بشقاب شامل یک گل مرکزی و شش دایره پیرامونی می‌باشد. درون سه دایره با خطوط شطرنجی و درون سه دایره دیگر با نقاط تزیین شده است. حاشیه بشقاب نیز با خطوطی مزین گشته و این اثر با رنگ‌های آبی، سبز، قهوه‌ای و سفید نقاشی شده است (تصویر ۲-۴). این سفال به هفت قطعه شکسته شده بود که قطعات در حین کاوش به یکدیگر متصل شده‌اند. آسیب‌های فیزیکی همچون ضربه و فشار را می‌توان از جمله عوامل اصلی این شکستگی‌ها دانست. افزون بر این، آسیب‌های دیگری نیز در اثر وجود دارد، آسیب‌هایی نظیر: فقدان بخش‌هایی از بدنه (بیش از ۵۰٪ حجم اثر)، ترک‌های ریز در سطح داخلی و خارجی، ریختگی لعاب، پوسته‌شدن، تاول‌زدگی، حباب و پیتینگ در لایه لعاب. همچنین آسیب‌های ناشی از مداخلات انسانی اعم از مرمت‌ها و وصالی‌های نادرست پیشین و آسیب‌های حین حفاری و نیز آلودگی‌های سطحی در اثر مشاهده می‌شود. ترک‌های ریز و آسیب‌های لعاب نیز احتمالاً ناشی از عیوب مرحله ساخت، نظیر عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بدنه و لعاب و یا پخت نامناسب می‌باشد (تصویر ۱).

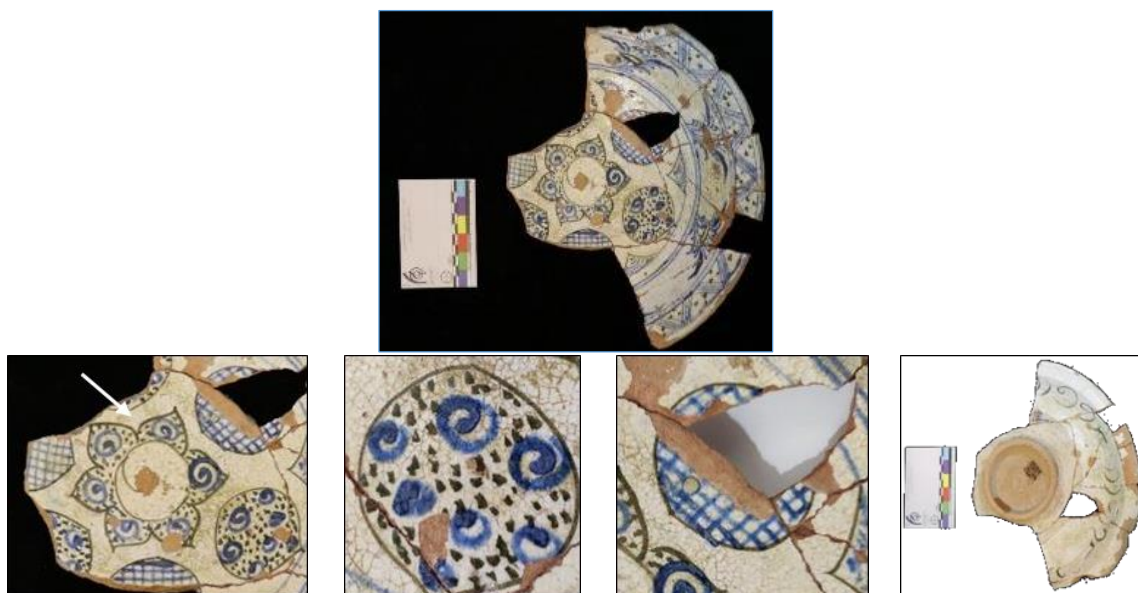
تخصصی مدل‌سازی شده و طرح اولیه بخش‌های مفقود، با تکیه بر منطق فرمی و نقوش باقی‌مانده، طراحی می‌گردد. در نهایت، قطعات طراحی شده توسط چاپگر سه‌بعدی ساخته شده و برای اتصال به اثر اصلی آماده می‌شوند. نظر به نوآوری این رویکرد در عرصه حفاظت و مرمت در ایران، این پژوهش می‌تواند الگویی عملیاتی برای بازسازی کم‌خطر، دقیق و مطابق با اصول علمی حفاظت را ارائه دهد و افق‌های جدیدی از تعامل میان فناوری‌های دیجیتال و میراث فرهنگی را بگشاید.

شناخت و معرفی اثر مورد مطالعه

آثار سفالی به دلیل نقش برجسته و کاربرد گسترده‌ای که در زیست‌ماده انسانی دارند، از اهمیت شایانی در مطالعات باستان‌شناختی و تاریخ فرهنگ مادی برخوردار هستند. از این‌رو، شناخت و تحلیل جایگاه سفال در ادوار مختلف تاریخی، مستلزم انجام پژوهش‌هایی نظام‌مند و مطالعاتی دقیق با هدف حفاظت از این میراث فرهنگی است. امروزه حفاظت و مرمت آثار سفالی، ضرورتی انکارناپذیر برای انتقال ارزش‌های هنری و تاریخی آن‌ها به نسل‌های آینده محسوب می‌شود (Razani & Butter, 2024). در ادامه به معرفی و شناسایی اثر مطالعاتی با رویکرد مستندنگاری پرداخته می‌شود که سه حوزه اصلی مستندسازی‌های توصیفی-تشریحی، ترسیمی و تصویری را فرا می‌گیرد.

مستندسازی اولیه

مستندسازی عبارت است از: تهیه تصاویر دقیق و ثبت نوشتاری تمامی اقدامات انجام‌گرفته، پیش، حین و پس از مداخلات حفاظتی و مرمتی. تمام مراحل درمان باید به‌صورت جامع و دقیق مستندسازی شوند؛ این فرایند در پژوهش حاضر بر اساس تقسیم‌بندی سه‌گانه الف) مستندسازی توصیفی-تشریحی (شامل اطلاعات متنی و سنجه‌ای)، ب) مستندسازی ترسیمی و ج) مستندسازی تصویری (مستندنگاری) صورت پذیرفته و فناوری اسکن سه‌بعدی به‌عنوان ابزاری کارآمد در خدمت هر سه حوزه مستندسازی قرار گرفته که در ادامه به تشریح هر یک می‌پردازیم.



تصویر ۱: سفال منقوش تبریز؛ بدنه نخودی-قرمز با تزیینات زیرلعاب به رنگ‌های آبی، سبز و قهوه‌ای، شامل نقوش شطرنجی، نقطه‌ای، گیاهی (گل مرکزی) و خطوط حلزونی در پشت ظرف

اجرا شده بر روی اثر پرداخت. در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری و ثبت ابعاد شیء با هدف تجزیه و تحلیل مشخصات ابعادی و تبدیل به داده‌های قابل استفاده در قالب مدل دیجیتال سه بعدی صورت پذیرفته است (جدول ۱).

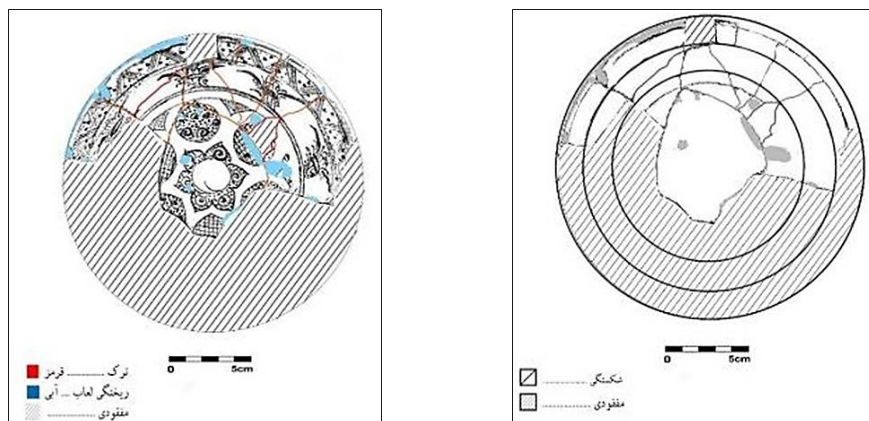
بخش تشریحی (سنجه‌ای): این بخش، اندازه‌گیری و ثبت دقیق ابعاد و ویژگی‌های قابل کمی‌سازی اثر اعم از طول، عرض، ارتفاع، عمق، ضخامت، قطر و وزن آن را شامل می‌شود. در این فرآیند، می‌توان از طریق بررسی‌های میکروسکوپی به تعیین ضخامت لایه لعاب، نقوش و تزیینات

جدول ۱: مشخصات سنجه‌ای سفال مورد نظر	
قطر کف: ۱۰/۲ سانتی‌متر	قطر: ۳۴ سانتی‌متر
ضخامت وسط ظرف: ۰/۹ میلی‌متر	ضخامت لبه: ۰/۶ میلی‌متر
وزن تکه کوچک: ۴۸ گرم	وزن: ۶۷۰ گرم

اثر، گویاتر از روش‌هایی همچون عکاسی عمل نموده و قادر است وجوهی از اثر را که در مستندسازی تصویری به وضوح قابل بازنمایی نیستند، آشکار سازد. در این بخش به مستندسازی مقطعی سفال پرداخته شده است (تصویر ۲).

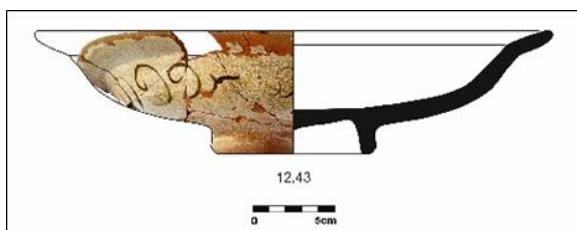
ب) مستندسازی ترسیمی

مستندسازی ترسیمی، تصویری روشن و واضح از تعداد، اندازه و شکل اجزای تشکیل دهنده و نیز چگونگی کنار هم قرارگیری آن‌ها را شامل می‌شود (Griffiths., & et al., 2009, p. 27). این روش با ارائه ابعاد، انحنای شکل فرضی



تصویر ۲: ترسیم فنی و نقشه آسیب‌شناسی سفال مورد نظر

رقومی‌سازی اطلاعات باستان‌شناسی و سهولت طبقه‌بندی و نظم‌دهی اطلاعات اشاره نمود. مستندسازی کامل اثر، نخستین گام برای شناخت، تحلیل، آسیب‌شناسی و حفاظت از آن به‌شمار می‌رود و نباید صرفاً به‌عنوان کاری مقدماتی تلقی شود. در این پژوهش، استفاده از اسکن سه‌بعدی لیزری به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های مستندسازی سه‌بعدی آثار باستان‌شناسی (Yari & Feiz, 2015) در خدمت هر سه حوزه مستندسازی قرار گرفته است. این فناوری ضمن ثبت دقیق هندسه و ابعاد اثر (مستندسازی تشریحی)، امکان تولید نقشه‌های مقطعی و پلان‌های دقیق (مستندسازی ترسیمی) و همچنین خلق تصاویری واقع‌نما با قابلیت چرخش و بررسی از زوایای مختلف (مستندسازی تصویری) را فراهم آورده است. در این بخش، هم مستندنگاری تصویری به روش‌های مرسوم و هم مستندنگاری به‌وسیله اسکن سه‌بعدی ارائه شده است (تصویر ۳).



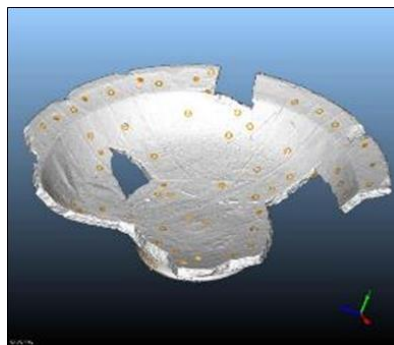
تصویر ۳-ب: مستندسازی ترسیمی سفال لعاب‌دار آبی و سفید (Ebrahimi, 2019)

ج) مستندسازی تصویری (مستندنگاری)

مستندسازی تصویری که با عنوان مستندنگاری نیز شناخته می‌شود، به‌گردآوری و ثبت اطلاعات تصویری اثر با استفاده از ابزارها و فنون مختلف می‌پردازد. این نوع مستندسازی و گردآوری اطلاعات پایه، جهت برنامه‌ریزی مؤثر و درازمدت برای پژوهش، حفاظت و نگهداری آثار و دستیابی به اطلاعات بنیادین، از مراحل اساسی فرآیند مستندسازی محسوب می‌گردد؛ بنابراین، اتخاذ روش‌های مناسب برای این امر ضروری است. شیوه‌های سنتی مستندسازی تصویری به‌دلیل تراکم بالا و تنوع داده‌های حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی، کارآمدی کافی در ثبت و تحلیل این حجم انبوه از یافته‌ها را ندارند. در مقابل، مستندسازی با روش‌های دیجیتال، نتایج سودمندی را به‌همراه دارد که از جمله آن می‌توان به ثبت و ضبط سریع و دقیق داده‌ها، جلوگیری از مفقود شدن اطلاعات در پی انجام کاوش‌ها، افزایش سرعت و دقت در تجزیه و تحلیل، قابلیت‌های جست‌وجوی پیشرفته، کاهش خطا در ثبت داده‌ها،



تصویر ۳-الف: نمایی از پشت و روی سفال مورد مطالعه



تصویر ۳-ج: تصویر اسکن خام اولیه سفال مورد نظر

بازسازی مجازی اثر مورد نظر

بازسازی مجازی، رویکردی علمی برای بازآفرینی آثار تاریخی در فضای رایانه‌ای است که با اصول حفاظت (حداقل مداخله و برگشت‌پذیری) سازگاری کامل دارد. این روش ضمن ایجاد آرشیو دیجیتال ماندگار، امکان بازسازی بخش‌های مفقود را بر اساس شواهد و الگوهای تکراری فراهم می‌آورد. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به امکان آزمون و خطا بدون آسیب به اثر اصلی، کاربرد در پژوهش و آموزش، تلفیق با فناوری‌های واقعیت مجازی و افزوده و همچنین

پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مرمتی اشاره نمود. در ساده‌ترین شیوه، بازسازی مجازی با استفاده از نرم‌افزارهای تصحیح عکس در طی فرآیندی دو مرحله‌ای صورت می‌پذیرد: ۱- تصویربرداری دقیق از اثر و ۲- بازسازی تصاویر با ابزارهای مناسب. لازم به ذکر است که در بازسازی مجازی، تنها بخش‌هایی بازسازی می‌شوند که اطلاعات دقیق و مستندی از طرح و تزیینات آن‌ها موجود باشد. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار فتوشاپ برای بازسازی دیجیتال بخش‌های مفقود سفال مورد مطالعه استفاده شده است (تصویر ۴).



تصویر ۴: بازسازی مجازی لعاب سفال مورد نظر

مبانی کاربرد فناوری‌های سه‌بعدی در حفاظت و مرمت آثار تاریخی

به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال در حوزه میراث فرهنگی به تحولی بنیادین در روش‌های مستندسازی، تحلیل و بازسازی اشیاء تاریخی انجامیده است. مفهوم بازسازی رقومی برای نخستین بار توسط رایلی در سال ۱۹۹۱ مطرح شد و از آن‌پس، گرافیک کامپیوتری سه‌بعدی به دو شاخه کاربردهای فعال (نظیر مستندنگاری میدانی) و غیرفعال (نظیر موزه‌های مجازی) تقسیم شده است (Bahrampour, 2015). این فناوری‌ها که عمدتاً شامل اسکنرها و چاپگرهای سه‌بعدی

می‌شوند، مداخلات دقیق‌تر، برگشت‌پذیرتر و کم‌خطرتری را ممکن ساخته‌اند.

در بازسازی سفال‌های باستان‌شناسی، درک عمیق زیبایی‌شناختی و ارزش‌های فرهنگی اثر، پیش‌شرط ضروری برای بازآفرینی اصیل بخش‌های مفقود است (Razani, et al, 2018). اصول بنیادین مرمت -به‌ویژه دو اصل برگشت‌پذیری و تمایز- همواره مورد تأکید بوده‌اند. بازسازی را می‌توان به دو نوع کلی تقسیم نمود: بازسازی فرمی با جنبه تحقیقاتی و بازسازی مبتنی بر اهمیت زیبایی‌شناختی که در آن مواد مرمتی باید با مستندنگاری دقیق، قابلیت

در مقابل روش‌های سنتی بازسازی که مبتنی بر قالب‌گیری با موادی چون گچ هستند، نمونه‌سازی سریع با اسکنر و چاپگر سه‌بعدی، به‌عنوان روشی کم‌خطر و غیرتماسی مطرح شده است. فناوری ساخت دیجیتال یا تولید افزودنی، با اضافه کردن پی‌درپی مواد از مدل طراحی‌شده توسط رایانه، اجسام فیزیکی را ایجاد می‌کند (Izadi et al., 2014). این روش به‌دلیل حذف مراحل قالب‌گیری، آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر است و در صنایع مختلف از جمله پزشکی، هوافضا و هنر کاربرد یافته است. روش‌های ساخت دیجیتال به دو بخش کاهشی (مانند CNC و برش لیزری) و افزایشی (مانند چاپ سه‌بعدی) تقسیم می‌شوند. در روش افزایشی، قطعات به‌صورت لایه‌به‌لایه از طریق همجوشی یا رسوب مواد پلیمری، سرامیکی یا کامپوزیتی و نیز اتصال ذرات پودر به کمک چسب یا حرارت ساخته می‌شوند (Rahmati., & et al., 2013). مهم‌ترین روش‌های نمونه‌سازی سریع عبارتند از: استریولیتوگرافی، تفجوشی انتخابی لیزری، ساخت لایه‌ای، چاپ سه‌بعدی و رسوب مذاب (Razani., & et al., 2016).

برگشت‌پذیری و نزدیکی به ساختار اصلی انتخاب شوند (Haddadi, 2008). اسکن سه‌بعدی به‌عنوان یک فناوری غیرتماسی برای اندازه‌گیری دقیق قطعات، با استفاده از اسکنرهای نوری به افزایش دقت و سرعت اندازه‌گیری انجامیده است که عملکرد آن بر قاعده مثلث‌بندی استوار می‌باشد؛ یعنی با در نظر گرفتن فاصله بین دوربین و پروژکتور به‌عنوان ضلع معلوم و دو زاویه تابش نور و دید دوربین، فاصله نقاط مختلف روی قطعه محاسبه می‌شود. مناسب‌ترین اسکنرها برای سفال، سیستم‌های پروژکتور کدگذاری نوری قابل‌حمل هستند که با توجه به دقت، سرعت و قابلیت اسکن سطوح نیمه‌شفاف انتخاب می‌شوند. مستندسازی کامل هر اثر، نخستین گام برای شناخت، آسیب‌شناسی و حفاظت از آن می‌باشد و در این زمینه، اسکنرهای سه‌بعدی لیزری از جمله دقیق‌ترین روش‌ها به‌شمار می‌روند (Yari & Feiz, 2015). از کاربردهای اسکن سه‌بعدی می‌توان به مستندسازی دقیق، تشکیل بانک اطلاعاتی سه‌بعدی، مدل‌سازی مجازی کاوش‌ها و ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی اشاره نمود. این فناوری فرآیند ساخت مولژ را تا ۲۰ درصد سریع‌تر از روش‌های سنتی انجام می‌دهد (Bahrapour, 2015).



تصویر ۵: طراحی و چاپ پایه تعادل‌بخش به روش FDM برای سفال خاکستری نامتعادل موسوم به آبخوری یافت شده از گورستان عصر آهن تپه دالما (Razani et al, 2025)

بازسازی معبد بعل‌شنین در پالمیرا و مستندنگاری شهر ممنوعه در چین، با بهره‌گیری از این فناوری‌ها به انجام رسیده‌اند (Bahrapour, 2015). در ایران نیز پروژه‌هایی در محوطه‌هایی چون تخت‌جمشید، طاق‌بستان و ارگ بم با استفاده از فناوری‌های سه‌بعدی اجرا گردیده است. مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که این فناوری‌ها ضمن افزایش

چاپگرهای سه‌بعدی در حوزه مرمت آثار تاریخی، کاربردهای متنوعی یافته‌اند، از جمله: ساخت مولژهای دقیق، تولید قالب‌های پیچیده، ساخت تکیه‌گاه‌های حفاظتی برای نمایش و حمل‌ونقل و همچنین بازسازی مستقیم بخش‌های مفقود اشیاء سفالی و مرمی. در سطح بین‌المللی، پروژه‌های شاخصی نظیر بازسازی طاق نصرت در رم باستان،

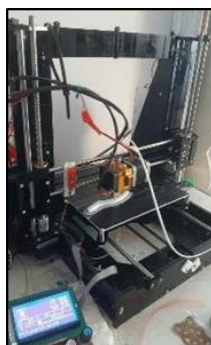
پوشانده و سپس، اسپری پودر دی‌اکسید تیتانیوم بر روی آن پاشیده شد و تارگت‌پوینت‌ها برای شناسایی بهتر توسط اسکنر الصاق گردید. اسکن با نرم‌افزار ezScan انجام و ابر نقاط به‌صورت فایل STL ذخیره شد. برای بازسازی بخش‌های مفقود، از چاپگر سه‌بعدی Prusa i3 (بومی‌سازی شده در تبریز) با روش لایه‌گذاری مذاب (FDM) و نازل ۰/۴ میلی‌متری استفاده گردید. از میان رشته‌های پلیمری، نمونه‌های ABS و PLA با توجه به ویژگی‌هایی چون شکل‌پذیری، شفافیت، حداقل انقباض و قابلیت روتوش‌کاری انتخاب شدند. ویرایش مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار سالیدورکس انجام گرفت و برای مدیریت تنظیمات چاپ و تبدیل فایل STL به G-code از نرم‌افزار Cura استفاده شد (تصویر ۶)

دقت و سرعت، امکان مداخلاتی را فراهم می‌آورند که با اصول بنیادین مرمت (برگشت‌پذیری و تمایز) سازگاری بیشتری دارند.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، به‌منظور مستندسازی و بازسازی بخش‌های مفقود سفال تاریخی، از تجهیزات و روش‌ها به شرح زیر استفاده شد:

برای بررسی ریزساختار و آسیب‌های پنهان از لوب دیجیتال مدل AM413T Series شرکت Dino light با بزرگنمایی ۵۸ برابر استفاده گردید. تصاویر میکروسکوپی از لعاب، بدنه و شکستگی‌ها تهیه شد. برای اسکن سه‌بعدی قطعه سفالی، از اسکنر Rexcan CS ساخت Solutionix کره جنوبی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر بهره گرفته شد. به‌دلیل براقت لعاب، ابتدا سطح قطعه با برچسب صنعتی



تصویر ۶-ج: چاپگر سه‌بعدی Prusa i3؛ بومی‌سازی شده توسط شرکت پرو سا در تبریز



تصویر ۶-ب: اسکن قطعه روی میز چرخان تارگت‌گذاری شده



تصویر ۶-الف: میز چرخان اسکنر و قطعه سفالی با تارگت‌های الصاق شده

انقباض، ایجاد بافت مناسب، مقاومت در برابر تغییر رنگ و فساد و همچنین قابلیت روتوش‌کاری و صیقل‌کاری مدنظر قرار گرفت (Haddadi, 2008). از میان فیلامنت‌های رایج، PLA+ نسبت به PLA استاندارد و ABS برتری داشت. PLA+ جریان‌پذیری مناسب، دمای چاپ پایین‌تر و در نتیجه کاهش خطر خمش و تغییر شکل حین خنک‌شدن را ارائه می‌دهد و برای چاپ گوشه‌های تیز عملکرد بهتری دارد؛ علاوه بر آن، در مقایسه با ABS که برای محصولات نهایی کاربردی مناسب‌تر است، برای نمونه‌سازی سریع با تأکید بر دقت فرم، انتخاب بهینه‌ای محسوب می‌شود. همچنین این فیلامنت در مقایسه با PLA معمولی، خواص

مواد و فناوری‌های منتخب

در اسکن سه‌بعدی اثر، با توجه به دقت موردنیاز برای پرینت قطعات (در حد صدم میلی‌متر) و همچنین ارگانیک بودن فرم سفال از اسکنر Rexcan CS با فناوری Projected Structured Light و دقت ۰,۰۱ میلی‌متر استفاده شد. انتخاب این دستگاه با در نظر گرفتن نسبت بهینه دقت، زمان و هزینه، در مقایسه با اسکنرهای کم‌دقت‌تر یا لیزرهای صنعتی با دقت بسیار بالا (۰,۰۰۱ میلی‌متر) صورت گرفت. در انتخاب ماده اولیه پرینت (فیلامنت)، الزامات بازسازی سفال‌های باستانی‌ام از قابلیت شکل‌پذیری، شفافیت یا نیمه‌شفافی، ضریب انعکاس نزدیک به سفال، حداقل

اثر و سست شدن مرمت‌های کهنه، با استفاده از استون باز شد؛

۳- **پاک‌سازی:** این مرحله به‌منظور زدودن چرکی‌ها و کثیفی‌ها، لکه‌های چسب به‌کاررفته در حین حفاری و آلودگی‌های سطحی موجود انجام شد. به‌دلیل سست بودن لایه لعاب در برخی قسمت‌ها، ابتدا با تزریق پارالوئید ۱۰٪ به زیر لایه لعاب، استحکام‌بخشی موضعی صورت گرفت و سپس پاک‌سازی با استفاده از آب و الکل انجام شد. لکه‌های ناشی از پارالوئید نیز با استون پاک‌سازی گردید. در نتیجه این اقدامات، لکه‌ها، چرکی‌ها و رد چسب‌ها تا حد ممکن از بین رفت و اثر برای اقدامات بعدی آماده شد؛

۴- **وصالی نهایی:** در این مرحله، قطعات به‌منظور یکپارچه شدن شیء و بازگرداندن آن به فرم اولیه، با استفاده از پارالوئید B-72 با غلظت ۳۰٪ به یکدیگر متصل شدند (تصویر ۷).

مکانیکی بهتر و شکنندگی کمتری دارد. برای چاپ قطعات نیز، روش رسوب مذاب (FDM) به‌دلیل سادگی عملکرد، حداقل اتلاف مواد، سهولت اعمال تغییرات، جدا شدن آسان تکیه‌گاه از قطعه و امکان ساخت قطعات عملکردی مشابه نمونه اصلی، برگزیده شد.

اقدامات عملی پروژه: حفاظت و مرمت

تمامی اقدامات این پروژه بر پایه مبانی نظری مرمت و با رعایت ملاحظات اخلاقی شامل مستندسازی، حداقل مداخله، برگشت‌پذیری و حفظ اصالت تاریخی اثر انجام شد. توالی عملیات به شرح زیر صورت پذیرفت:

- ۱- **استحکام‌بخشی اولیه:** نخستین گام، تثبیت بخش‌های سست اثر با استفاده از پارالوئید B-72 با غلظت ۵٪ حل‌شده در استون بود تا استحکام لعاب و بدنه افزایش یابد؛
- ۲- **بازکردن وصالی‌های پیشین:** وصالی‌های نامناسب که در جریان کاوش انجام شده بود، به دلایلی نظیر عدم زیبایی ظاهری، رنگ‌پریدگی مواد قبلی، پنهان‌ماندن بخشی از اصل



تصویر ۷-الف: تثبیت نهایی قطعات با استفاده از پارالوئید ۵٪

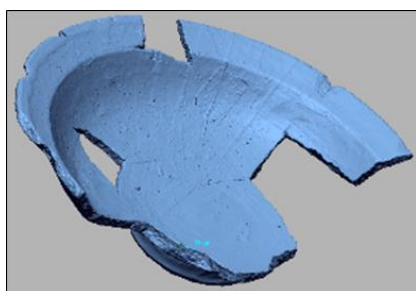


تصویر ۷-ب: بازکردن وصالی‌های نامناسب با تزریق استون، پاک‌سازی چرکی‌ها روی لعاب با استون، آب و الکل و وصالی قطعات به همدیگر با استفاده از پارالوئید ۳۰٪



تصویر ۷-ج: وصالی نهایی قطعات سفال لعاب‌دار آبی و سفید

حذف نویزها و تبدیل ابر نقاط به سطح مش‌بندی‌شده (مجموعه صفحات مثلثی حاصل از اتصال ابر نقاط به هم) و سپس کاهش تعداد مش‌ها جهت افزایش سرعت پردازش از نرم‌افزار ویژه کار بر روی نقاط به نام Geomagic Design X استفاده گردید. این نرم‌افزار امکانات متنوعی جهت پردازش ابر نقاط و تبدیل آن به Surface مش‌بندی‌شده ارائه می‌کند. پس از حذف نویزهای ابر نقاط و هموار کردن سطوح صاف و کاهش تعداد صفحات مش، سطح قطعه (Surface Meshes) آماده استفاده در نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی گردید.

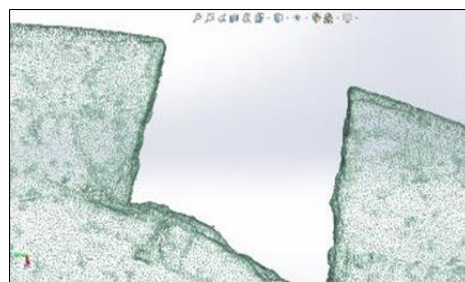


تصویر ۸-ب: قطعه اسکن‌شده (خام و پردازش‌نشده)

پس از آماده شدن، اثر با استفاده از اسکتر سه‌بعدی REXCAN CS مستندنگاری شد.

اسکن سه‌بعدی شیء و تبدیل فایل ابر نقاط به مدل سه‌بعدی

فایل STL صرفاً حاوی مجموعه‌ای از نقاط در فضای سه‌بعدی (ابر نقاط) بوده و جهت کار کردن با آن در نرم‌افزارهای سه‌بعدی الزاماً بایستی به مدل سه‌بعدی توپر تبدیل گردد. همچنین فایل اسکن خام و پردازش‌نشده حاوی نویز و ناهمواری‌های مختلف روی سطح است که نیاز به اصلاح دارند. به همین منظور برای پردازش فایل اسکن و



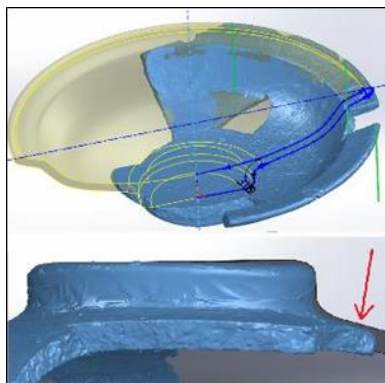
تصویر ۸-الف: مجموعه ابر نقاط اسکن‌شده در نزدیکی یکی از لبه‌های شکسته سفال

مدل سه‌بعدی بر پایه چرخش ۳۶۰ درجه‌ای سطح مقطع طراحی‌شده (Revolved Boss/Base) انجام گردید، اما پس از اعمال انواع تغییرات و انجام هم‌ترازی با قطعه سفالی مشاهده گردید که سطح بیرونی قطعه سفالی متقارن نیست و همچنین لبه بالایی قطعه و صفحه پایه قطعه سفالی باهم موازی نیستند. به همین دلیل ترمیم با دستور Revolved Boss/Base در انطباق کامل با قطعه سفالی، کارایی لازم را نشان نداد (تصویر ۹).

در ادامه، اطلاعات ابر نقاط اصلاح‌شده، مجدد بر روی فایل STL ذخیره شد و به نرم‌افزار SolidWorks 2020 منتقل شد. نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی صنعتی SolidWorks از نسخه ۲۰۱۸ به بعد قابلیت تبدیل مستقیم فایل‌های مش همچون STL به مدل سه‌بعدی توپر را به امکانات خود افزوده است. به همین دلیل بعد از اعمال دستورات لازم داخل نرم‌افزار سالی‌دورکس، فایل مش‌بندی‌شده به فایل توپر سه‌بعدی تبدیل شد.

نمونه‌سازی برای بخش‌های مفقود

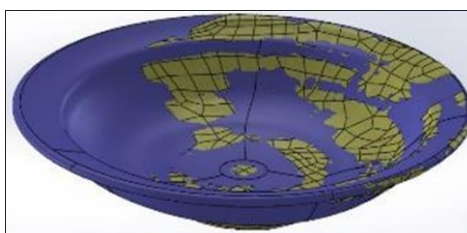
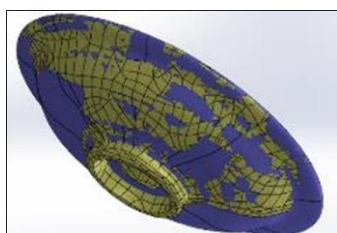
طراحی بخش مفقود قطعه سفالی در نرم‌افزار SolidWorks جهت طراحی نقاط مفقود، ابتدا از ایجاد



تصویر ۹: عدم تقارن قطعه سفالی منجر به عدم موفقیت ایجاد مدل به شیوه Revolved Boss/Base گردید

دستورات Lofted Boss/Base (جهت ایجاد سطح بیرونی قطعه) و Lofted Cut Boss/Base (جهت ایجاد سطح درونی قطعه) استفاده گردید تا مدل یکپارچه و کامل قطعه سفالی ایجاد گردد (تصویر ۱۰).

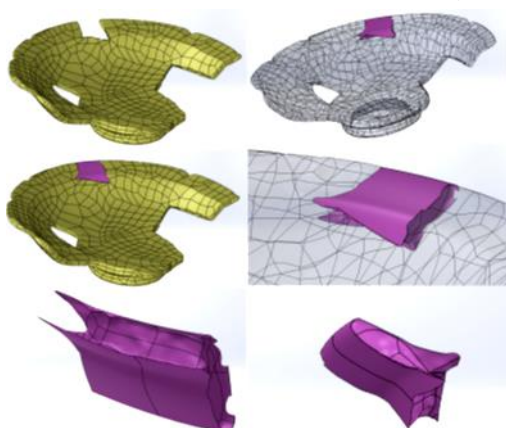
سپس، با توجه به هندسه خاص قطعه سفالی مورد نظر، سطوح مجزایی برای لبه بالایی و پایه قطعه سفال ایجاد شد و با ایجاد ۱۰ برش افقی از قطعه در میان این دو صفحه و تبدیل خطوط تماس قطعه با این صفحات، با کمک



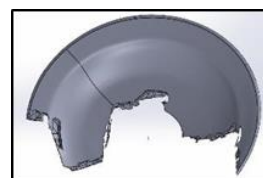
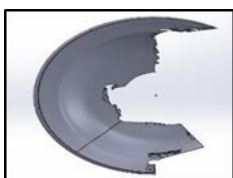
تصویر ۱۰: انطباق قطعه سفال (مش‌بندی شده) با مدل کامل بازسازی شده

مخصوص پرینترهای سه‌بعدی ذخیره گردید (تصاویر ۱۱ و ۱۲).

در نهایت با حذف مدل قطعه سفالی از مدل کامل با کمک دستور Cavity و حذف لایه‌های نازک اضافی، قطعات مورد نیاز بازسازی ایجاد شد و به‌صورت فایل STL



تصویر ۱۱: حذف مدل قطعه سفال از قطعه طراحی شده کامل و ایجاد قطعات مورد نیاز بازسازی



تصویر ۱۲: جداسازی قطعات بازسازی شده کامل از قطعه سفال

بخش‌های مفقود نمونه مورد نظر این پروژه بر اساس تحلیل نرم‌افزاری تصاویر اسکن سه‌بعدی، ۴۶٪ و قسمت‌های موجود سفال نیز، ۵۴٪ محاسبه شد (جدول ۲).

جدول ۲: تحلیل نرم‌افزاری تصاویر اسکن شده		
توضیح	حجم (mm ³)	درصد حجم از کل
قطعه سفالی موجود	۴۴۹,۷۵۵	۵۴
قطعات پرینت شده	۳۷۵,۶۷۰	۴۶
قطعه بازسازی شده کامل	۸۲۵,۴۲۵	۱۰۰

میکرون و سرعت ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و در وضعیت عمودی چاپ شدند. برای دستیابی به حداکثر شفافیت و شباهت به سفال اصلی، چاپ با تراکم ۳۰٪ توپری انجام شد (تصویر ۱۳) که بهترین تطابق را با قطعه مفقود ایجاد کرد؛

۲- **وصالی قطعات:** قطعات چاپ شده با استفاده از پارالوئید B-72 با غلظت ۳۰٪ به‌عنوان چسب به اثر اصلی متصل شدند. این ماده با توجه به ویژگی‌های برگشت‌پذیری و پایداری انتخاب گردید؛

۳- **تکمیل و مستندسازی:** در نهایت، قطعات بازسازی شده با رعایت اصل تمایز (قابلیت تشخیص از اصل) به اثر اصلی وصاله شد و بازسازی سطوح تکمیل گردید. تمامی مراحل مستندسازی گردید تا امکان ارزیابی و تکرارپذیری در آینده فراهم باشد (تصویر ۱۳).

بازسازی و وصالی قطعات مفقود

برای بازسازی بخش‌های مفقود سفال، از چاپگر سه‌بعدی Prusa i3 و رشته پلیمری PLA استفاده شد. فرآیند ساخت قطعات با رعایت اصولی انجام گرفت که هم‌خوانی دقیق با اثر اصلی و قابلیت برگشت‌پذیری را تضمین کند.

۱- **طراحی و تنظیمات چاپ:** قطعات بازسازی شده با توجه به هندسه ابعادی شکستگی‌ها، ابتدا ۲٪ کوچک‌تر از سایز اصلی طراحی شدند تا فضای کافی برای لایه‌چسب بین قطعه بازسازی و سفال اصلی تأمین گردد. سپس این قطعات به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شدند تا امکان قرارگیری در محل شکستگی، بدون اعمال فشار به سفال اصلی فراهم شود. با توجه به نیاز به تطابق دقیق با لبه‌های شکستگی و کاهش نیاز به سمباده‌کاری پس از چاپ، دقت پرینت ۰,۰۵ میلی‌متر انتخاب شد. قطعات با ضخامت لایه‌های ۱۵۰



تصویر ۱۳: وصالی قطعات چاپ شده به قسمت‌های مفقود سفال مورد نظر

بازسازی رنگی و بازسازی قسمت‌های لبه اثر

اثر مورد نظر در قسمت‌های لبه دارای بخش مفقود است که برای بازسازی قسمت‌های لبه از ترکیب مل و R84 استفاده گردید. همچنین برای بازسازی رنگی از آکرلیک استفاده شد. ابتدا از رنگ زمینه سفید چرک با توجه به رنگ بدنه استفاده شد؛ سپس، با استفاده از طرح قسمت اصلی لعاب موجود و به کمک مداد، به‌طور ملایم طرح بر روی قسمت‌های الحاقی انتقال داده شد. در مورد قسمت‌های لبه اثر به کمک خط‌کش بر اساس طرح اصلی با رنگ تونالیت کمتر از رنگ اصلی و با استفاده از قلم‌موی بسیار نازک طرح‌ها امتداد یافت و طرح کشیده شد (تصویر ۱۴).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند به‌کارگیری فناوری‌های اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود یک سفال لعاب‌دار تاریخی (متعلق به قرون میانی دوره اسلامی) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های تحقیق نشان داد که این روش، ضمن ثبت دقیق هندسه اثر و مستندنگاری جامع دیجیتال، امکان بازسازی مجازی و ساخت قطعات مفقود را بدون تماس فیزیکی با شیء اصلی فراهم می‌آورد. در پاسخ به پرسش نخست تحقیق، فرآیند مذکور در چهارچوب اصول نظری حفاظت و مرمت نظیر برگشت‌پذیری، حداقل مداخله، تمایز و خوانایی، از تطابق قابل‌قبولی برخوردار

است. این روش با کاهش مداخلات مخربی نظیر قالب‌گیری مستقیم و کوتاه کردن زمان بازسازی، ضمن حفظ اصالت شیء، قابلیت ارزیابی و اصلاح دیجیتال قطعات را پیش از اجرای نهایی میسر می‌سازد. در پاسخ به پرسش دوم تحقیق که به چالش بازسازی رنگی در قطعات چاپ‌شده می‌پرداخت، نتایج نشان داد که با توجه به محدودیت فناوری‌های رایج در چاپ سه‌بعدی هم‌زمان و تک‌رنگ بودن خروجی نهایی، انجام موزون‌سازی رنگی به‌عنوان مرحله‌ای تکمیلی و مستقل ضرورت می‌یابد. در پژوهش، با عنایت به ماهیت لعاب‌دار اثر و وجود نقوش رنگی، رویکرد بازآفرینی کامل تصویری (موزون‌سازی رنگی) برای دستیابی به ایستایی بصری و خوانایی مفهومی اثر انتخاب شد؛ رویکردی که اگرچه به‌عنوان مداخله‌ای آشکار در سطح اثر محسوب می‌شود، اما با تکیه بر مستندات رنگی و رعایت اصل تمایز، به بازخوانی هویت بصری اثر کمک می‌کند. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که فناوری نمونه‌سازی سه‌بعدی -به‌ویژه در مواجهه با آثار لعاب‌داری که نقوش پیچیده و بخش‌های مفقود گسترده دارند- می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و انعطاف‌پذیر در اختیار مرمت‌گر قرار گیرد، مشروط بر آنکه مداخلات تکمیلی مانند موزون‌سازی رنگی، با آگاهی از مبانی نظری و در راستای تکمیل فرآیند مرمت صورت پذیرد.



تصویر ۱۴: بازسازی رنگی قسمت‌های مفقود سفال مورد نظر

قدردانی

مقاله حاضر، برگرفته از پروژه نهایی کارشناسی «طاهره غفاری» در رشته حفاظت و مرمت آثار تاریخی است که به

راهنمایی دکتر مهدی رازانی در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شده است. نگارنده از دانشگاه هنر اسلامی تبریز به‌عنوان نهاد علمی حامی این پژوهش و همچنین از جناب

Knowledge, 7(2), 29-46. (In Persian with English abstract). doi: 10.61882/kcr.7.2.29

Razani, M., Haddadian, M., & Safarpour, A. (2018). The application of modern prototyping technologies in reconstructing missing parts of historical pottery. *Iranian Archaeological Research Journal*, 8(18), 193-212. (In Persian with English abstract). doi: 10.22084/nbsh.2018.15134.1670

.....
(2016). The use of rapid prototyping technologies in the reconstruction of missing parts of glass artifacts with an approach to utilizing historical glass. *Iranian Journal of Restoration and Architecture*, 6(12), 85-102. (In Persian with English abstract). URL: <http://mmi.aui.ac.ir/article-1-343-fa.html>

Tohidi, F. (2016). *The craft and art of pottery*. Tehran: Organization for the Study and Compilation of Humanities Textbooks of Universities (SAMT).

Yari, M., & Feiz, Z. (2015). The necessity and methods of utilizing modern technologies in the documentation of archaeological excavations. *The Second National Conference on Iranian Archaeology*. Tehran.

آقای مهندس مسعود ولی‌پور کلیبر که در تمام مراحل بخش بازسازی سه‌بعدی تحقیق با راهنمایی و صبوری خود، محقق را یاری رساندند و همچنین از جناب آقای دکتر قادر ابراهیمی که نتایج یافته‌های خود در بازار تبریز را در اختیار این مطالعه قرار دادند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نماید.

References

Bahrampour, Sh. (2015). Application of 3D printing in the reconstruction of historical glass objects (Master's thesis). University of Art Isfahan, Isfahan.

Ebrahimi, G. (2019). Report on the first season of excavation in the historical context of Tabriz: The Tarui-Tarmakis archaeological project. In R. Shirazi & Sh. Hurshid (Eds.), *Proceedings of the 17th Annual Iranian Archaeological Conference 2018* (Vol. 1, pp. 22-29). Research Institute of Cultural Heritage and Tourism.

Griffiths, N., Jenks, A., & Wilson, C. (2009). *Drawing archaeological and artistic finds* (Z. Yahyavi, Trans.). Tehran: Samira.

Haddadi, M. (2008). Preservation and restoration of pottery works. *Electronic Journal of Restoration and Cultural Heritage Knowledge*, 4(2), 1-22.

Izadi, A., Fazel, A., Khalatbari, R., & Ekuchkian, S. (2014). An introduction to modern methods of digital fabrication of free-form architecture based on augmented reality technology. *Iranian Journal of Restoration and Architecture*, 4(8), 61-73. (In Persian with English abstract). URL: <http://mmi.aui.ac.ir/article-1-172-fa.html>

Rahmati, S., Salimi, M., & Ildarzhaleh, M. (2013). *Rapid prototyping technology*. Tehran: Jahan-e Jam-e Jam.

Razani, M., Haddadian, M. A., & Esmaeilnezhadteymourabadi, J. (2025). Conservation and Display of Unstable Artifacts in Museums: A Novel Approach Using Balancing Mounts. *KCR*, 7(4): 1-18. (In Persian with English abstract). URL: <http://journal.richt.ir/kcr/article-1-228-fa.html>

Razani, M., & Butter, M. (2024). A guide to documentation and registration of clay and ceramic objects in conservation and restoration operations. *Conservation and Restoration*

