The Use of Stereo Lithography (SLA) Printing Method in the Making Moulage of Historical and Cultural Objects (a Study Sample of a Historical Chess Piece Made of Elephant Ivory)

Mehdi Razani [1*], ***Jalil Esmailnezhad Teymurabadi*** [2]

1. Associate Professor, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

2. M.A. Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Abstract

Today, the use of new technologies and methods of preserving ivory objects has led to a better understanding and safe protection of objects. The purpose of this article is the feasibility of using new methods of rapid prototyping technologies, including 3D modeling and 3D stereolithography (SLA) printers, in order to achieve a suitable method for reconstructing missing parts and it is important to make a moulage of historical and cultural objects using existing equipment in order to use it in the restoration and reconstruction of sensitive objects. In line with the review of the introduced technology, an example of a chess piece made of elephant ivory was selected, with the statue of a man riding a camel carved in great detail. The selected object was missing a lot. Documentation was done from the same bead and according to the available images, 3D modeling was done with Zibrush software, which is a special software for sculpting. Settings related to print management were made in Chitubox software and 3D reconstruction to make a moulage from a stereolithography printer. The results of this research showed that the use of 3D modeling and printing with a stereolithography (SLA) 3D printer as a new method can be used in the direction of making moulage and reconstructing missing parts of sensitive objects; And they can also be useful to a great extent in the low-risk behavior of protection towards sensitive objects such as ivory. Because of advantages such as: methodical execution of most steps and minimal intervention and contact with the object, increasing precision and elegance in the execution of decorations, preventing common and unwanted mistakes of the restorer, duplicating all the object as many times as desired, sending the 3D model software file made to other research centers, they have the possibility of temporarily connecting the piece made to the main body of the object, which covers the principle of reversibility in conservation.

Keywords: stereolithography, conservation-restoration, moulage, 3D modeling, 3D printer.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 4(3) No.9

December 2021

https://kcr.richt.ir.

Pages: 1 to 12

Corresponding Author

Mehdi Razani

Associate Professor, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Email
m.razani@tabriziau.ac.ir

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.

استفاده از روش چاپ استریولیتوگرافی (SLA) در جهت ساخت مولاژ از اشیاء تاریخی فرهنگی (نمونه مطالعاتی مهره شطرنج تاریخی از جنس عاج فیل)

مهدی رازانی[1*]، جلیل اسمعیل نژاد تیمورآبادی[2]

۱. دانشیار، گروه آموزشی مرمت آثار تاریخی و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

۲. دانش‌آموخته کارشناس ارشد، گروه آموزشی مرمت آثار تاریخی و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

امروزه نمونه‌سازی به روش ساخت افزودنی توسط چاپگرهای سه‌بعدی در علوم مختلف علاقه‌مندان کثیری را در بین محققان به خود جذب کرده است. در این بین چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی قادر به ساخت نمونه‌هایی با تفکیک‌پذیری برتر نسبت به دیگر چاپگرها است. هدف این مقاله امکان‌سنجی استفاده از روش چاپ سه‌بعدی استریولیتوگرافی جهت دستیابی به یک روش مناسب برای ساخت مولاژ از اشیاء تاریخی و فرهنگی برای به‌کارگیری آن در مرمت و بازسازی اشیاء حساس همچون عاج است. پرسش‌های تحقیق عبارت‌اند از: چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ با چاپگر استریولیتوگرافی برای بخش‌های مفقود و ساخت مولاژ تهیه کرد؟ و این روش چه مزایا و معایبی دارد؟. در راستای بررسی روش معرفی‌شده، یک نمونه مهرهٔ شطرنج تاریخی از جنس عاج فیل از مخازن موسسهٔ فرهنگی موزه‌های بنیاد، انتخاب شد. اثر انتخاب شده دارای مفقودی بسیار زیادی بود. با توجه میزان مفقودی اثر انتخاب شده و به احتمال اینکه نمونه چاپ شده بر روی بدنه اصلی اثر تاریخی الصاق نشود، تصمیم بر این شد که از نمونه موجود مولاژ تهیه شود. از مهره مشابه با اثر موجود مستندسازی انجام گرفت و با توجه به تصاویر، مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار زیبراش که نرم‌افزار مخصوص حجاری و مجسمه‌سازی است، انجام شد. تنظیمات مربوط به مدیریت چاپ در نرم‌افزار Chitubox و بازسازی سه‌بعدی جهت ساخت مولاژ از چاپگر رزینی استریولیتوگرافی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از فناوری‌های مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ با چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی به‌عنوان یک روش مناسب می‌تواند در جهت ساخت مولاژ تا حد زیادی در رفتار کم خطر حفاظتی نسبت به اشیاء حساس مانند عاج مفید واقع شوند.

واژگان کلیدی: استریولیتوگرافی، حفاظت- مرمت، مولاژ، مدل‌سازی سه‌بعدی، چاپگر سه‌بعدی.

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

سال چهارم، شماره ۳

شماره پیاپی ۹، پاییز ۱۴۰۰

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۱ تا ۱۲

نویسنده مسئول

مهدی رازانی

دانشیار، گروه آموزشی مرمت آثار تاریخی و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه

m.razani@tabriziau.ac.ir

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

چاپ سه‌بعدی[1] که اصطلاحاً به آن ساخت افزودنی[2] و یا نمونه‌سازی سریع[3] هم گفته می‌شود، یک نوع فرآیندی است که در آن مواد با اتصال به یکدیگر اجسامی را تولید می‌کنند که به‌صورت اطلاعات سه‌بعدی به دستگاه داده شده است و عموماً این نوع فرآیند به‌صورت لایه به لایه است (Standard 2012). امروزه فناوری‌های سه‌بعدی‌سازی وارد علوم میراث فرهنگی از جمله مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی شده است. با استفاده از این فناوری‌های می‌توان: ۱. قسمت‌های مفقودی (رازانی و همکاران ۱۳۹۷، رازانی و همکاران ۱۳۹۵)، ۲. مولاژ (اسمعیل نژاد تیمورآبادی و رازانی ۱۴۰۲)، ۳. ساخت قالب (Lontos, et al. 2012) و ۴. انواع تکیه‌گاه جهت نمایش آثار در موزه‌ها (Hernõndez-Muūoz, et al. 2023) را طراحی و نمونه‌سازی کرد. فناوری‌های نوین همچون مدل‌سازی‌های سه‌بعدی به‌وسیله اسکنرهای سه‌بعدی، نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌ساز و چاپگر سه‌بعدی می‌توانند ابزاری مناسب برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از مصنوعات فرهنگی و تاریخی برای اهداف حفاظتی غیر مخرب را داشته باشند (Fantini, et al. 2008).

استفاده از فناوری‌های نوین سه‌بعدی‌ساز و چاپگر سه‌بعدی در علوم میراث فرهنگی باعث بهبود و افزایش دقت در مراحل کار شده است. فناوری‌های سه‌بعدی‌ساز از جمله روش‌های دیجیتال گرافیک رایانه‌ای در دو بخش نرم‌افزار و بخش سخت افزار قرار می‌گیرند (رازانی و دیگران ۱۳۹۷). به ۴ روش می‌توان یک شیء را مدل‌سازی سه‌بعدی کرد که این روش‌ها عبارتاند از:

۱. اسکنرهای سه‌بعدی دستی و لیزری (Atik, et al. 2023) (Marroquim, et al. 2017).

۲. توموگرافی رایانه‌ای (Applbaum) (Chena, et al. 2008 and Applbaum 2005).

۳. فوتوگرامتری (Barreau, et al.) (Atik, et al. 2023 2014).

۴. نرم‌افزارهای سه‌بعدی (Marroquim, et al. 2017).

(اسمعیل نژاد تیمورآبادی و رازانی، ۱۴۰۲) و این روش‌ها بسته به نوع اثر و شرایط موجود می‌توانند در تلفیق با هم به بهترین شکل ممکن اجرا شوند.

استفاده از تلفیق فناوری‌های نوین مدل‌سازها و چاپگرهای سه‌بعدی وارد علوم میراث فرهنگی شده است و طی یک دهه اخیر پیشرفت چشمگیری در این حوزه داشته است. رازانی و همکاران در سال ۱۳۹۷ برای بازسازی قسمت‌های مفقودی یک نمونه سفال باستانی از اسکنر سه‌بعدی جهت مدل‌سازی و از چاپگر سه‌بعدی رسوب مذاب[4] جهت ساخت قطعه مفقودی استفاده کردند (رازانی و همکاران ۱۳۹۷). همانند همین روش بر روی اشیاء شیشه‌ای تاریخی نیز انجام شد (رازانی و همکاران ۱۳۹۵). بهرام‌پور و کریمی نیز برای بازسازی قسمت‌های مفقودی یک اثر شیشه‌ای از چاپگر سه‌بعدی پاشش مواد[5] استفاده کردند (بهرامپور و کریمی ۱۳۹۵). استفاده از کاربرد این روش برای اشیاء تاریخی متعدد با روش‌های مدل‌سازی و چاپگرهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Arbace, et al. 2012) (Barreau, et al. 2014) در مطالعات اخیر با استفاده از چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی[6] و رزین دی‌متاکریلات اقدام به ساخت نمونه آثار شبه عاجی[7] شدند. این ماده جایگزین از نظر رنگ، شفافیت و براق بودن سطح همانند ویژگی‌های زیبایی‌شناختی عاج را دارد (Rath, Martl, et al.2021).

فناوری‌های سه‌بعدی‌ساز در حوزه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، باعث مداخله کمتر مرمتگر بر روی آثار تاریخی فرهنگی می‌شود و علاوه بر دقت بالا، زمان سریع در انجام فرآیند کار و هزینه به‌صرفه‌تر، از اشتباهات مرمتی مرمتگر بخصوص بر روی آثار حساسی همچون عاج جلوگیری می‌کند. برای حفظ و بازسازی قسمت‌های مفقودی آثار فرهنگی، هنری و مذهبی ساخته شده از عاج معمولاً از مواد جایگزینی همچون عاج‌سان‌های گیاهی مانند درخت نخل تاگوا یا دانه جارینا (Y. Chu, M. Meyers, et al. 2015) مواد طبیعی همچون استخوان، مواد کامپوزیت پلیمری با ذرات معدنی، کازئین و پودر عاج (Baker, et al. 2020) و مواد دیگری همچون گچ (Museo

Arqueolúgico Nacional 2018)، مـوم (آرشیـو کاخ مـوزه سـعد آبـاد، بی‌تـا)، اپوکـسی (Alconada 2017)، میکروبالـن (نیـک نـام ۱۳۹۰) و چاپگـر سـه‌بعدی رسـوب مـذاب (اسـمعیل نـژاد تیمورآبـادی و رازانی ۱۴۰۲) اسـتفاده می‌کننـد. بـا توجـه بـه سـاختار فیزیـکی عـاج کـه براحـتی لکـه برداشـته و چـرک می‌شـود (Godfrey 2014, 59) اسـتفاده از مـواد جایگزیـن و حـکاکی بـر روی آن کار بسیـار زمان‌بـری اسـت کـه ممکـن اسـت اشـتباهات جبران‌ناپذیـر مرمـتی را نیـز دربرداشـته باشـد. لـذا اسـتفاده از روشی کـه کمتریـن مداخلـه مرمتگـر بـا دقـت بـالا در کمتریـن زمـان را داشـته باشـد و بتوانـد بـا فناوری‌هـای سه‌بعدی‌سـاز و چاپگرهـای سـه‌بعدی پـردازش شـود، یـک جایگزیـن مناسـب می‌توانـد باشـد.

در رابطـه بـا انـواع چاپگرهـای سـه‌بعدی، معایـب و مزایـای آن‌هـا در مقـالات متعـدد پرداختـه شـده اسـت (رازانی و همـکاران ۱۳۹۷). بـا توجـه بـه معایـب، مزایـا و شیـوه کار انـواع چاپگرهـای سـه‌بعدی، از چاپگـر سـه‌بعدی اسـتریولیتوگرافی کـه وضـوح چـاپ بـالایی دارد بـرای بازسـازی انجـام ایـن کار مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت. چاپگـر اسـتریولیتوگرافی در سـال ۱۹۸۴ توسـط چارلـز هـال اختـراع شـد و در سـال ۱۹۸۶ ثبـت اختـراع گردیـد (Mota, et al. 2016). روش کار ایـن چاپگـر بـه ایـن صـورت اسـت کـه پرتوهـای فرابنفـش بـرای پلیمریـزه کـردن رزین‌هـای ایـن چاپگـر و سـاخت قطعـه مـورد نظـر به‌صـورت لایـه‌ای اسـتفاده می‌شـود (Stampfl, et al. 2008). پـس از تکمیـل فرآینـد، قطعـه سـاخته شـده به مـدت چنـد دقیقـه در یـک حلال مانند الـکل قـرار می‌گیرد تـا رزیـن موجـود مانـده درون قطعـه و سـطح قطعه شسـته شـود و قطعـه تمیـز آمـاده شـود. معمـولاً بـرای افزایـش اسـتحکام قطعـه، آن را چنـد دقیقـه تحـت تابـش فرابنفش قـرار می‌دهنـد کـه بـه ایـن مرحلـه فرآینـد پـس از تولیـد می‌گوینـد (منیـری و عجـمی، ۱۴۰۱).

روش تحقیق

روش تحقیـق در ایـن پژوهـش به‌صـورت کتابخانـه‌ای، تجربی-آزمایـشی و تحلیـلی اسـت؛ در راسـتای انجـام پژوهـش ابتـدا بـه بـررسی مـدارک منتشـر شـده و اسـناد کتابخانـه‌ای جهـت مـرور ادبیـات نوشـتاری و تجـربی حـوزۀ مطالعـاتی پرداختـه شـده اسـت. در بخـش مطالعـه‌ی ادبیـات تحقیـق، بـا بـررسی منابـع کتابخانـه‌ای به شـناخت و بـررسی روش‌هـای مرسـوم بازسـازی اشیـاء عـاجی پرداختـه شـده و بهینه‌تریـن روش مدل‌سـازی سـه‌بعدی و چـاپ سـه‌بعدی بـرای بازسـازی قسـمت‌های مفقـود و سـاخت مـولاژ از اشیـاء تاریخی-فرهنگی مشـخص گردیده اسـت. در مرحلـه تجربی-آزمایشـگاهی از تمـامی سـطح نمونـه مطالعـاتی مستندسـازی صـورت گرفـت و سـپس بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار مدل‌سـازی اقـدام بـه تهیـه‌ی نقشـه‌های سـه‌بعدی از سـطح نمونـه اثـر و تبدیـل آن بـه داده‌هـای قابـل اسـتفاده بـرای چاپگـر سـه‌بعدی شـده کـه در ادامـه بـا انجـام آزمون‌هـای عملـی و هـم سـنجی سیسـتم‌ها، اقـدام بـه چـاپ حجـم سـه‌بعدی مـولاژ شـد و در نهایـت بـا تحلیـل مزایـا و معایـب نتایـج و فرآینـد فوق در قالـب یافته‌هـای پژوهـش بـه پرسـش‌های تحقیـق پاسـخ داده شـده اسـت.

مواد و روش

معرفی نمونه مورد مطالعه

اثـر مـورد مطالعـه (شـکل ۱ و ۲) یـک نمونه مهره شـطرنج از جنـس عـاج فیـل و سـاخت آن مربـوط بـه کشـور هنـد اسـت و متعلـق بـه مخـازن موسسـه فرهنـگی موزه‌هـای بنیـاد اسـت. ایـن مهـره درون جعبـه‌ای قـرار داشـت کـه تعـداد مهره‌هـای موجـود در آن ۳۲ عـدد بـود کـه شـامل ۴ مهـره اسـب هم‌انـدازه و ۴ مهـره فیـل، ۴ مهـره شـتر، ۱۶ مهـره سـرباز کـه همگی بـه رنـگ سـفید می‌باشـند و مهره سیـاهی وجـود نـدارد. ۳ نمونـه مهـره شـتر و یک‌مهـره کـه فقـط پایـه آن موجـود بـود و قسـمت‌های اصـلی مهـره کـه بـا توجـه بـه کامـل بـودن سـایر مهره‌هـا متعلـق بـه مهـره شـتر اسـت مفقـودی دارد (شـکل ۳ و ۴). مشـابه همیـن مهره‌هـای شـطرنج در مـوزه عـاج رامسـر موجـود اسـت (شـکل ۵). تصمیـم بـر ایـن گرفتـه شـد از نمونـه مهـره مشـابه سـالم مـولاژ تهیـه شـود. همچنـان کـه می‌دانیـم مـولاژ نـوعی کپیـه اسـت بـا ایـن تفـاوت کـه در مـولاژ الـزامی بـه سـاخت اثـر از جنـس خـودش وجـود نـدارد و تنهـا بـه شـکل، انـدازه، فـرم، رنـگ و نقـش اکتفا می‌شـود (رازانی و همـکاران، ۱۳۸۹).

شکل ۱. نمونه عاج سالم.

شکل ۲. مستندنگاری تصویری و ترسیمی از نمونه عاج سالم.

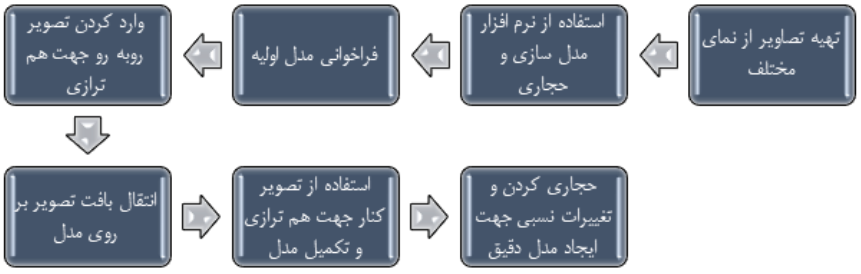
شکل ۳: نمونه عاج دارای مفقودی.

شکل ۴: مستندنگاری تصویری از نمونه عاج دارای مفقودی.

شکل ۵. مهره‌های شطرنج عاجی مشابه در موزه عاج رامسر (منبع: بایگانی موسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد).

نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

از تمامی جهت‌های اثر مورد نظر تصاویر باکیفیت گرفته شد. تا از نرم‌افزارهای سه‌بعدی برای مدل‌سازی اثر استفاده شود در این مقاله با توجه به مجسمه بودن اثر و همچنین دارا بودن جزئیات بسیار زیاد نسبت به‌اندازه شیء از نرم‌افزار زیبراش با نسخه ۲۰۲۱.۷.۱ استفاده گردید. زیبراش یک ابزار مجسمه‌سازی دیجیتالی است که ترکیبی از مدل‌سازی، نقاشی و نقاشی 2.5D و 3D است. این نرم‌افزار از فنّاوری اختصاصی Pixol استفاده می‌کند که اطلاعات مربوط به روشنایی، رنگ، مواد و عمق



شکل ۶. روند اجرای یک مدل سه‌بعدی در نرم افزار زیبراش (نگارندگان).

را بـر روی صفحه‌نمایـش ذخیـره می‌نمایـد. ایـن سیسـتم در دسـته نرم‌افزارهـای مدل‌سـازی سـه‌بعدی قـرار می‌گیـرد، بـا ایـن تفـاوت کـه بـرخلاف دیگـر نرم‌افزارهـا کـه طـراحی گرافیـکی شـطرنجی دارنـد، ایـن برنامـه یـک نرم‌افـزار طـراحی گرافیـکی بـرداری یـا وکتـور اسـت. در نرم‌افزارهـایی کـه طـراحی گرافیـکی وکتـور دارنـد، اسـاس کار بـر پایـه معـادلات و اصـول ریـاضی اسـت و هنرمنـدان بـا اسـتفاده از تکنیک‌هـای مجسمه‌سـازی، در مقیـاس دیجیتـالی، مجسمه‌سـازی سـه‌بعدی را انجـام می‌دهنـد. ایـن نرم‌افـزار از دقـت بـالایی برخـوردار اسـت و به‌خـوبی فرمت‌هـای خـروجی تولیـد نرم‌افزارهـای دیگـر را می‌پذیـرد. رونـد ایجـاد یـک مـدل سـه‌بعدی در نرم‌افـزار زیبـراش مطابـق شـکل ۶ اسـت.

جهـت نمایـش مـدل سـه‌بعدی رنـدر گرفتـه شـد. رنـدر در نرم‌افـزار Autodesk 3ds Max دارای نسـخه ۲۰۲۲ کـه موتـور رنـدر کرونـا نسـخه ۷ بـر روی آن نصب‌شـده بـود، گرفتـه شـد. از نرم‌افـزار CHITUBOX نسـخه Pro 1.2.0 x64 کـه نرم‌افـزار مدیریـت تنظیمـات چـاپ SLA اسـت، اسـتفاده شـد. عملکـرد پیش‌نمایـش در ایـن نرم‌افـزار بـه کاربـر ایـن امـکان را می‌دهـد کـه بتوانـد چـاپ را به‌صـورت لایه‌لایـه بـررسی کنـد تـا در نهایـت خـروجی مـورد نظـر توسـط چاپگـر سـه‌بعدی قابـل مشـاهده باشـد.

چاپگر سه‌بعدی SLA

بـرای نمونه‌سـازی اثـر نمونـه مـوردی مدل‌سـازی شـده از چاپگـر سـه‌بعدی مـدل Photon Mono X برنـد Anycubic سـاخت کشـور چیـن اسـتفاده شـد (شـکل ۷). میـزان لایه‌هـا ۵۰ میکـرون و پرشـدگی ٪۱۰۰ تنظیـم شـد. اصـول کار و فرآینـد چاپگـر اسـتریولیتوگرافی بـر پایـه دو اصـل می‌باشـد. ۱- قطعـات از رزیـن مایـع حسـاس بـه نـور سـاخته می‌شـوند. رزیـن مایـع در اثـر تابـش پرتـو لیزر UV کـه سـطح رزیـن را اسـکن می‌کنـد، جامـد می‌گـردد. ۲- سـاخت به‌صـورت لایه‌به‌لایـه انجـام می‌گیـرد. هـر لایـه توسـط سیسـتم اسـکن اپتیـکی، اسـکن شـده و بعـد از شـکل‌گیری توسـط یـک مکانیـزم بالابـر، بـه سـمت پاییـن می‌رود (Kai 2003). رزیـن اسـتفاده شـده بـرای سـاخت نمونـه مـولاژ، رزیـن اسـتاندارد برنـد لانگـر و بـه رنـگ سـفید اسـت.

شکل ۷. چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی(SLA) مورد استفاده.
(www.anycubic.com n.d.) .

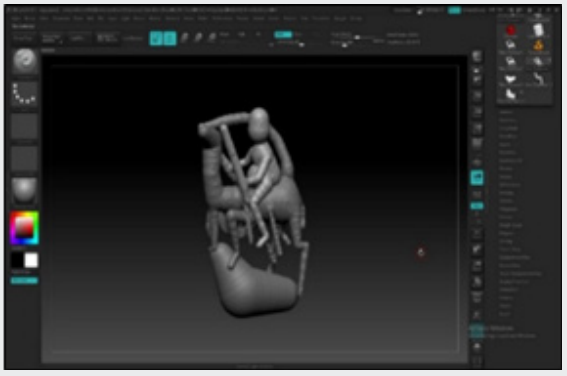
مراحل و نتایج حاصله از فرآیند بازسازی عملی

الف- مدل‌سازی اثر عاجی

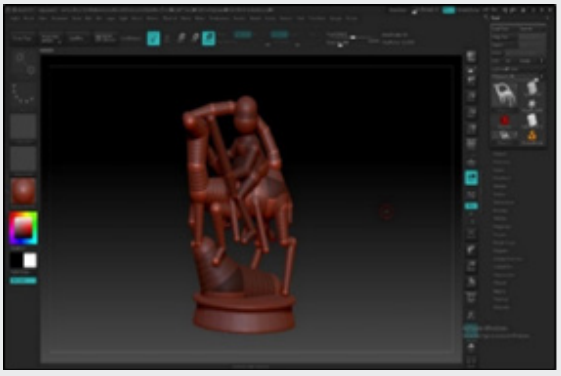
ابتدا از تمامی جهت‌های اثر عکس‌برداری و مستندنگاری دقیق و با جزئیات انجام گرفت. سطح نورانی عاج کار مستندنگاری را با مشکل مواجه کرده بود. باکم و زیاد کردن نور و تغییر پس‌زمینه اثر توانستیم عکس‌های باکیفیت از اثر داشته باشیم. بدلیل اینکه سطح براق عاج، جزئیات بسیار پیچیده و ظریف و همچنین اندازه کوچک آن استفاده از ابزارهای سه‌بعدی‌ساز ما را با مشکل مواجه می‌کرد. باید از روش‌های دیگر و جایگزین برای مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده می‌کردیم. بهترین روش بعد از ابزارهای سه‌بعدی‌ساز، استفاده از نرم‌افزارهای سه‌بعدی است. در روش حاضر برای مدل‌سازی سه‌بعدی اثر عاجی از نرم‌افزار Zbrush که نرم‌افزار تخصصی مجسمه‌سازی و حجاری سه‌بعدی است استفاده شد.

مدل با توجه به‌عکس و زوایای که از آن موجود بود با استفاده از Brush های نرم‌افزار حجاری شد. برای حجاری ابتدا با استفاده از Zsphere یک ساختار کلی از مدل ساخته شد (شکل ۸) و با استفاده از Adaptive Skin تبدیل به مش شد (شکل ۹) و بقیه جزئیات به‌صورت دستی و با قلم نوری حجاری شدند (شکل ۱۰). با توجه به اتمام حجاری، دقت تصویر نشان داده شده برای خروجی اولیه مناسب تشخیص داده شد.

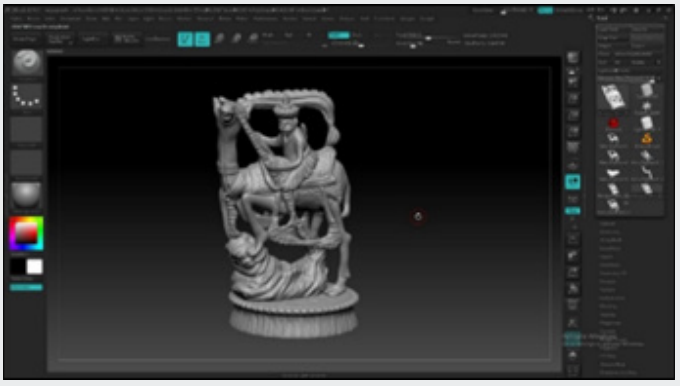
بعد از مدل‌سازی از نمونه جهت نمایش رندر گرفته شد. جهت انجام رندر، در برنامه زیبراش فایل با فرمت FBX که فرمت خروجی اکثر نرم‌افزارهای 3D است؛ خروجی گرفته و وارد نرم‌افزار Autodesk 3ds Max که موتور رندر کرونا بر روی آن نصب‌شده بود، شد. مهم‌ترین ویژگی موتور رندر کرونا کیفیت بالای آن، زمان کم رندر گرفتن، سادگی و قابلیت Lightmix آن و همچنین پشتیبانی از متریال‌ها، نورها و دوربین‌های



شکل ۸. حجاری ابتدایی با استفاده از Zsphere.

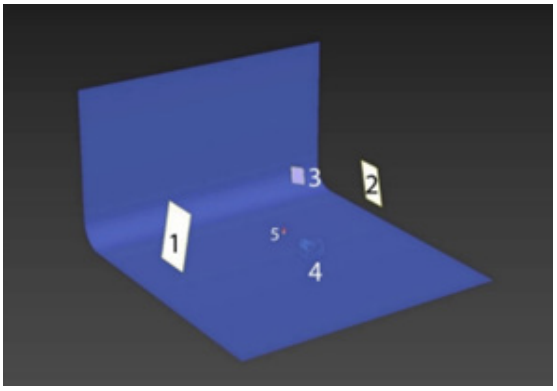


شکل ۹. بدیل به مش با استفاده از Adaptive Skin.



شکل ۱۰. اضافه کردن جزئیات به‌صورت دستی.

نرم‌افزار 3ds Max است. استودیوی شبیه‌سازی موتور رندر کرونا سه نور اصلی و یک پرده دارد (شکل ۱۱) که تنظیمات آن برای رندر به این صورت است: نور اول سفیدرنگ با شدت Lux 107285، نور دوم سفیدرنگ و با شدت Lux 53642 و نور سوم با رنگ آبی آسمانی و شدت Lux 53642، نویز لول ۲/۹۴ درصد، تناسب تصویر ۰/۸، رزولوشن ۳۰۰۰*۳۷۵۰، لنز دوربین focal 225 mm، زوم فکتور ۱، ایزو 100، F-Stop:16 و تایم رندر ۵:۴۳ دقیقه‌ای از ۴ نما رندر گرفته و جهت نمایش بهتر تکستچر استخوانی به آن داده شد (شکل ۱۲).



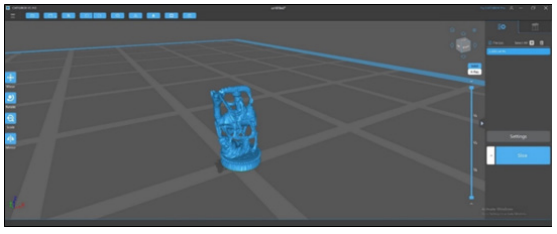
شکل ۱۱. استودیوی شبیه‌سازی موتور رندر کرونا: ۱- نور اول، ۲-نور دوم، ۳-نور سوم، ۴- دوربین، ۵- نمونه مورد مطالعه.

شکل ۱۲. رندر از ۴ نمای مدل سه‌بعدی.

ب-چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی

در چاپگرهای سه‌بعدی با فنّاوری استریولیتوگرافی، اجسام به‌صورت لایه‌ای از مواد رزینی بر روی لایه قبلی ساخته می‌شوند؛ بنابراین برای اینکه لایه ساخته شود، بایستی لایه قبلی هم وجود داشته باشد تا مواد خروجی بتواند محلی برای استقرار داشته باشد. برای ساخت و چاپ یک مدل سه‌بعدی که دارای پیش‌آمدگی شیب‌دار و یا معلق باشد و یا فرم قطعه دارای زاویه‌ای کمتر از ۴۵ درجه داشته باشد از ساپورت یا تکیه‌گاه استفاده می‌شود. منظور از ساپورت‌گذاری در چاپگرهای سه‌بعدی، به قسمت‌هایی اطلاق می‌شود که چاپگر مجبور است لایه‌هایی را به‌عنوان پایه بسازد تا قسمت اصلی قطعه بر روی آن چاپ شود. اثر مورد مطالعه بعد از انجام مراحل مدل‌سازی سه‌بعدی که با فرمت STL[8] خروجی گرفته‌شده بود، برای انجام مراحل تنظیمات چاپ در نرم‌افزار Chitobox اجرا شد (شکل ۱۳).

پس از تکمیل فرآیند چاپ، نمونه ساخته شده به مدت ۵ دقیقه با اتانول ۹۶ درصد شستشو داده و تمییز شد. جهت افزایش استحکام، نمونه درون محفظه تابش اشعه فرابنفش به‌صورت ۳۶۰ درجه قرار داده شد تا تمامی رزین پخت شده از تمامی زوایا تثبیت شود. سپس ساپورت‌ها با احتیاط جدا شدند. حذف ساپورت‌ها به‌منزله اتمام کار و افزایش سطح کیفیت قطعه نمی‌شود، بلکه بعد از عملیات حذف به سطح اصلی خواهیم رسید. معمولاً ساپورت‌ها را به ۲ روش مکانیکی و شیمیایی از قطعه جدا می‌کنند. ساپورت‌ها را می‌توان با فشار کم از بدنه قطعه جدا کرد. برای قسمت‌هایی که دسترسی به آن‌ها محدود است و یا بخش‌هایی ریز و ظریف دارد، از دم‌باریک و ابزارهای دندانپزشکی



شکل ۱۳. محیط مدیریت تنظیمات چاپ در نرم‌افزار Chitobox.

شکل ۱۴. چاپ سه‌بعدی مولاژ مجسمه عاجی با استفاده از روش چاپ استریولیتوگرافی.

جهت حذف ساپورت استفاده می‌شود (شکل ۱۴).

بحث در یافته‌های تحقیق

مقاله حاضر، روش استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ با چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی را جهت استفاده در مرمت اشیاء تاریخی–فرهنگی و اشیاء حساس همچون عاج را ارائه می‌کند. در پی مطالعات صورت گرفته، عناوین ذیل مزیت اصلی ملموس بودند که به هر یک از آن‌ها به اختصار اشاره می‌شوند:

انجام روشمند بیشتر مراحل و کمترین مداخله و تماس با اثر مورد نظر

– افزایش دقت و ظرافت در اجرای تزئینات، اشکال هندسی خاص و نامتقارن و نقوش احتمالی موجود؛

– حفظ پایداری اثر در دست مطالعه و کاهش درصد خطا در حین انجام کار؛

– امکان اجرای چندین طرح پیشنهادی، اصلاح و یا تکرار طرح در زمان کوتاه و درنهایت ارائه‌ی بهترین نمونه؛

– عدم نگرانی از برهم‌کنش‌های شیمیایی احتمالی موجود به دلیل بی‌اثر بودن ماده انتخابی و اتصال با استفاده از رزین‌های برگشت پذیر و ایجاد لایه پرایمر برای قسمت‌هایی که اثر دارای مفقودی است و قسمت‌های مفقودی توسط فناوری‌های نوین چاپ شده و قرار است بر روی قطعه اصلی نصب شود.

– میسر بودن استفاده از منابع دیجیتال و نمایش به‌صورت سه‌بعدی در قالب نرم‌افزار یا ویدیوها در رسانه‌ها و موزه‌های مجازی.

– به‌صرفه بودن از لحاظ زمان و هزینه‌ها نسبت به روش‌های سنتی

– جلوگیری از اشتباهات رایج و ناخواسته مرمتگر در برابر اشیاء حساس دارای اشکال ظریف و پیچیده همچون عاج

– چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی دارای وضوح دیداری بالا و مناسب چاپ قطعات ظریف است و برای نمونه‌سازی‌هایی که شکل ظاهری آن‌ها در اولویت باشد یک فناوری ایده‌آل بحساب می‌آید.

فناوری‌های نوینی که وارد رشته‌های خاص می‌شوند دارای محدودیت‌هایی می‌باشند، استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی همچون چاپگر استریولیتوگرافی نیز در علوم میراث فرهنگی از این امر مستثنی نبوده است. از مهمترین محدودیت‌ها، محدود بودن مواد و در دسترس از لحاظ تنوع ماده (بافت و جنس) و چه از لحاظ رنگ‌بندی است. در جریان ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود برای استخراج رنگ‌های خاص پاتین‌ها و تخریب‌های سطحی ناشی از تغییرات رنگی و مواردی مانند تبادل قلیایی، اگر اصرار به بازسازی مشابه با اثر تاریخی وجود داشته باشد، حتما رتوش کاری رنگی نیاز خواهد بود. همچنین خطاهای ابزاری حین اجرای اسکن و مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ مدل سه‌بعدی را می‌توان اشاره کرد که در کیفیت نمونه نهایی تاثیر گذار است.

چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی مناسب برای قطعات پیچیده و پرجزئیات با اندازه‌های کوچک است و محدودیت برای ابعاد بزرگتر را دارد؛ همچنین دوام و قدرت قطعات چاپ شده رزینی با چاپگر استریولیتوگرافی پایین بوده و اگر برای مدت طولانی در معرض نور آفتاب قرار بگیرد، به مرور زمان خواص مکانیکی و ویژگی‌های ظاهری آن تضعیف می‌شود. لذا برای ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقودی اشیاء در محیط موزه‌ای مناسب است. بدلیل ناشناخته بودن تقریبی این فنّاوری و بالطبع آن افراد حاذق برای اجرای کار به‌ویژه در زمینهٔ حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی کم می‌باشد. انجام هرگونه اقدامات تکمیلی برای مولاژ و قسمت‌های مفقودی برروی قطعه چاپ

شده جهت مطابقت مناسب با بدنه اشیاء نیز نیاز به مهارت دارد. در حقیقت موفقیت یک طرح بازسازی قسمت مفقود و ساخت مولاژ با فناوری‌های نوین سه‌بعدی‌ساز ارتباط مستقیمی با فرآیندهای؛ برداشت صحیح و دقیق شیء، طراحی و انجام عملیات تکمیلی بر روی داده‌های دیجیتالی به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بعدی‌سازی، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب، در کنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرآیند چاپ سه‌بعدی و در نهایت عملیات وصالی و روتوش نهایی دارد (رازانی و همکاران ۱۳۹۷). انجام چاپ استریولیتوگرافی مبتنی بر حضور اشعه ماورابنفش است که وجود این اشعه آسیب‌های احتمالی را دربر دارد، لذا مرمتگر یا مسئول اجرای چاپ اصول لازم را رعایت کند.

باتوجه به مزایا و محدودیت‌ها ذکر شده و اقدامات انجام گرفته در این مقاله جهت ساخت مولاژ اشیاء حساس همچون عاج با چاپگر استریولیتوگرافی، می‌توان گفت این روش‌ها توانایی بسیار زیادی در مطالعات و پروژه‌های اشیاء موزه‌ای دارای ظرافت و پیچیدگی، اشیاء حساس تاریخی هنری همچون عاج و مجسمه‌های تاریخی با ابعاد کوچک را دارند.

نتیجه‌گیری

امکان‌سنجی استفاده از روش چاپ با چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی برای ساخت مولاژ و به کارگیری آن در مرمت اشیاء تاریخی-فرهنگی با استفاده از تجهیزات موجود با کمترین دخالت ممکن از مهم‌ترین اهداف این پژوهش بوده است. با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینهٔ نمونه‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده است و فراهم بودن این‌گونه فناوری‌ها در کشور، امروزه بستر مناسبی جهت ورود تجهیزات به علوم میراث فرهنگی پدید آمده است. در این پژوهش با استفاده از روش بازسازی دیجیتال از طریق سه‌بعدی‌سازی با توجه به تصاویر موجود مدل‌سازی با نرم‌افزار زیبراش و چاپ با چاپگر سه‌بعدی استریولیتوگرافی جهت ساخت مولاژ صورت گرفت. یافته‌های پژوهش نشان داد که استفاده از تجهیزات سه‌بعدی در جهت نمونه‌سازی سریع می‌تواند برای بازسازی قسمت‌های مفقودی و ساخت مولاژ از اشیاء عاجی و مجسمه‌ها بسیار کارآمد و نتیجه‌بخش باشد. همچنین استفاده از روش چاپ استریولیتوگرافی روش کاربردی و دقیق‌تر و باکیفیت‌تر در مقایسه با سایر چاپگرهای از جمله روش رسوب مذاب است. از عملکرد این فناوری‌ها در مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی برای بازسازی قسمت‌های مفقودی و ساخت مولاژ اشیاء عاجی خلاصه نمی‌شود و می‌توان در رابطه با ساخت مولاژ از اشیاء، نقش برجسته‌ها و نقوش صخره‌ای، آثار ارزشمند تاریخی و همچنین بازسازی قسمت‌های مفقودی آثار تخریب‌شده؛ نظیر آثار فلزی، استخوان و شاخ، مروارید و صدف و جواهرآلات ارزشمند استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از دانشگاه هنر اسلامی تبریز و موسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد مستضعفان، همچنین از سرکار خانم فاطمه صحتی، مهندس کیهان عبدالهی ماکویی و محمدرضا قیصری را دارند.

حامیان مادی و معنوی

دانشگاه هنر اسلامی تبریز، بنیاد مستضعفان انقلاب اسلامی

پی‌نوشت‌ها

1.3D Printing

2. Additive Manufacturing (AM)

3. Rapid Prototyping

4. Fused Deposition Modeling (FDM)

5. PolyJet

6. Stereo lithography additive

۷. دراصطلاح Digory یا عاج دیجیتال گفته می‌شود.

۸. فرمت STL خلاصه عبارت Standard Triangle Language و یا Standard Tessellation Language است. فرمت STL معمولا توسط یک برنامه طراحی رایانه‌ای (CAD) به عنوان محصول نهایی فرآیند مدل‌سازی سه‌بعدی تولید می‌شود.

منابع

آرشیو کاخ موزه سعد آباد، (بی تا)، « گزارش مرمت

عاج‌هـای تزئینی کاخ مـوزه ملت»، گزارش کار.(چاپ نشـده

اسـمعیل نـژاد تیمورآبـادی، جلیـل و مهـدی رازانی.(۱۴۰۲). کاربـرد اسـتفاده از مـدل سـازی سـه بعـدی و چاپگـر سـه بعـدی FDM در مرمـت و نمونـه سـازی از اشیـاء تاریخی- فرهنـگی سـاخته شـده از عاج، بنیـان هنـر ۱(۲) ۲۷۶-۲۵۱.

بهـرام پـور، شیمـا و امیرحسیـن کریـمی.(۱۳۹۵). کاربـرد چاپگـر سـه‌بعدی در بازسـازی اشیـای تاریـخی شیشـه‌ای. مرمـت و معمـاری ایـران. (۱۲) ۶ ۱۲۶-۱۱۵.

رازانی، مهـدی، بخشـنده‌فرد، حمیدرضـا، تـوکلی، اصغـر، نصیـرزاده، بهنـاز. (۱۳۸۹). نـگاهی بـه جعـل میـراث فرهنـگی در ایـران (بـا بررسـی پایـه چـراغ جعلـی بـه سـبک سـلجوقی در کاخ مـوزه چهلسـتون اصفهـان). مرمت و پژوهـش- دو فصلنامـه تخصصـی مرمـت اشـیاء و بناهای تاریخـی۴.(۸)، ۶-۳.

رازانی، مهـدی، محمدعـلی حدادیـان و صفـر پرعبـاس. (۱۳۹۵)، اسـتفاده از فنـاوری هـای نمونـه سـازی سـریع در بازسـازی بخـش هـای مفقـود آثـار شیشـه ای بـا رویکـرد اسـتفاده در شیشـه هـای تاریـخی، مرمـت و معمـاری ایـران، (۱۲) ۶، ۸۵-۱۰۱.

رازانی، مهـدی، محمدعـلی حدادیـان و صفـر پرعبـاس. (۱۳۹۷)، اسـتفاده از فنـاوری هـای نویـن نمونـه سـازی در بازسـازی بخـش هـای مفقود سـفالینه هـای باستانشـناسی، پژوهـش هـای باسـتان شـناسی ایـران، (۱۸)۸، ۲۱۲-۱۹۳.

منیـری، سـودابه و علی اصغـر عجـمی.(۱۴۰۱). تاثیر توان لیـزر و سـرعت بـر دقـت سـاختاری تولیـدات در چاپگر سـه بعـدی اسـتریولیتوگرافی." دومیـن کنفرانـس ملی پیشـرفت هـای فناورانـه در فیزیـک کاربـردی. کرمـان. ۳۲-۲۶.

نیـک نـام، مهـدی.(۱۳۹۰). بـررسی سـاختاری آثـار عـاج کنـده کاری شـده پیـش از تاریـخ، بـه منظـور ارائـه طریـق حفاظـت و مرمـت. پایـان نامـه کارشـناسی ارشـد مرمـت اشیـاء فرهنـگی و تاریـخی (منتشـر نشـده), تهـران: دانشـگاه آزاد اسلامی واحـد تهـران مرکـزی.

Alconada, B.G. (2017). Informe de Intervenciún de la escultura Cristo en la cruz perteneciente a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando . Work Report, Madrid: Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

Applbaum, N, and Y.H Applbaum. (2005). "The Use of Medical Computed Tomography (CT) Imaging in the Study of Ceramic and Clay Archaeological Artifacts from the Ancient Near East." In X-rays for Archaeology, by M Uda, G Demortier and I Nakai. Dordrecht: Springer.

Arbace, L, E Sonnino, M Callieri, M Dellepiane, M Fabbri, A.I Idelson, and R Scopigno. (2012). "Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue." Journal of Cultural Heritage 332-345.

Atik, M.E, Z Duran, M Yanalak, D.Z Seker, and A Ak. (2023). "3D modeling of historical measurement instruments using photogrammetric and laser scanning techniques." Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage (DAACH) 30.

Baker, B.W, R.L Jacobs, M Mann, E.O Espinoza, and G Grein. (2020). Identification Guide for Ivory and Ivory Substitutes. Washington DC: CITES Secretariat.

Barreau, J.B, T Nicolas, G Bruniaux, E Petit, Q Petit, Y Bernard, R Gaugne, and V Gouranton. (2014). "Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications." Computer Science 1-8.

Chena, Y, X Hana, M Okadab, and Y Chenc. (2008). "Integrative 3D modelling of complex carving surface." Computer-Aided Design 123-132.

Chu, Y, M Meyers , B Wang, W Yang, J Jung, and C Coimbra. (2015). "A Sustainable Substitute for Ivory: the Jarina Seed from the Amazon." Scientific Reports 1-10.

Espinoza, E.O, and M.J Mann. (1993). "The

history and significance of the Schreger pattern in proboscidean ivory characterization." Journal of the American Institute for Conservation 32(3):241-248.

Fantini, M, F.D Crescenzio, F Persiani, S Benazzi, and G Gruppioni. (2008). "3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull." Rapid Prototyping Journal 14(5):318-324.

Godfrey, I.M. (2014). "Ivory, Bone and Related Materials." In Easy Guide to Care for Sculpture and Antique Art Collections, by B Robert and Faltermeier, 55-59. Switzerland: Springer, Cham.

Hernõndez-Muūoz, ł, E.S Moga, and A Sënchez-Oortiz. (2023(. "Stabilization of an Anatomical Wax Model of the Complutense Veterinary Museum with the Help of 3D Digital Technologies." International Journal of Conservation Science 45-56.

Kai, Ch.C. (2003). Rapid Prototyping: Principles and Applications (2nd Edition) 2nd Edition. USA: World Scientific.

Lin, T.H, H.G Chang, and S.J Hu. (2013). "3D Reconstruction of Intricate Objects using Planar Cast Shadows." SIGGRAPH 78.

Lontos, A, G Demosthenous, C Athanasiou, and G Zampelis. (2012). "Reproduction of Archaeological Findings by Means of Rapid Prototyping Technology, Laser Scsnning and the Use of Appropriate Software." Scientific proceedings IX Inrernational Congress "Machines, Technologies, Materials. 35-38.

Marroquim, R, A Sõ, K Rodrigues, V Balbio, and R Zamorano. (2017). "Digitising Ivory Artefacts at the National History Museum in Brazil." EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage 11-18.

Mota, r. c. d. a. g, e.o da Silva, F.F de Lima, L.R de Menezes, and A.C.S Thiele. (2016). "3D Printed Scaffolds as a New Perspective for Bone Tissue Regeneration: Literature Review." Materials Sciences and Applications 430-452.

Museo Arqueolúgico Nacional.(2018) September 7. http://www.man.es/man/coleccion/ultimas-restauraciones/figura-marfil.html.

n.d. www.anycubic.com. https://www.anycubic.com/products/photon-mono-x-resin-printer.

n.d. www.longer3d.com. https://www.longer3d.com/products/standard-uv-resin?variant=37757926604983.

Rath, T, O Martl, B Steyrer, K Seidler, R Addison, E Holzhausend, and J Stampfl. (2021). "Developing an ivory-like material for stereolithography-based additive manufacturing." Applied Materials Today 1-6. doi:10.1016/j.apmt.2021.101016.

Scopigno, R, M Callieri, P Cignoni, M Corsini, M Dellepiane, F Ponchio, and G Ranzuglia. (2011). "3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization." 48-55. doi:http://dx.doi.org/10.1109/MC.2011.196.

Stampfl, J, S Baudis, C Heller, R Liska, A Neumeister, R Kling, A Ostendorf, and M Spitzbart.(2008). "Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography." Journal of Micromechanics and Microengineering 1-9. doi:10.1088/0960-1317/18/12/125014.

Standard, A.(2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International F2792-12a.