



کاربرد استفاده از مدل سازی سه بعدی و چاپگر سه بعدی FDM در مرمت و نمونه سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج

جلیل اسماعیل نژاد تیموری

دانش آموخته کارشناسی ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

مهدی رازانی (نویسنده مسئول)^۱

دانشیار دانشکده حفاظت آثار فرهنگی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

 <https://doi.org/10.22034/ciom.2024.709309>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

نوع مقاله: پژوهشی، صص: ۲۴۲-۲۲۰

چکیده

امروزه استفاده از فناوری‌های نوین و روش‌های نگهداری از اشیای ساخته شده از عاج منجر به حفاظت بهتر و بی‌خطرتر از اشیاء شده است. هدف این مقاله امکان‌سنجی استفاده از روش‌های جدید فناوری نمونه‌سازی سریع از جمله مدل‌سازی‌های سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM، جهت دستیابی به روش مناسب برای بازسازی بخش‌های مفقودی و ساخت مولاژ از اشیای عاجی با استفاده از تجهیزات موجود جهت به‌کارگیری آن در مرمت و بازسازی اشیاست. به منظور بررسی فناوری معرفی شده، یک مهره شطرنج از جنس عاج که دارای مفقودی بسیار است انتخاب شد. مهره مشابه نمونه، مرد شترسواری است که حکاکی ظریف و ریزی دارد و این مهره در مجموعه مهره‌های شطرنج موجود بود. از مهره مشابه با آن مستندسازی انجام گرفت و با توجه به تصاویر موجود، مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار زی‌براش که نرم‌افزار مخصوص حجاری و مجسمه‌سازی است، انجام شد. مدل سه‌بعدی

1. M.razani@tabriziau.ac.ir



شده با فرمت STL ذخیره شد و در نرم افزار مدیریت چاپگر سه-بعدی Simplify3D در جهت مدیریت چاپ و تنظیم میزان ساپورت ها به صورت دستی و تبدیل به G-Code بارگذاری و سپس با نازل ۰/۳ نمونه چاپ شد. با توجه به حجم زیاد مفقودی اثر انتخابی و عدم سوار شدن نمونه چاپ شده بر روی بدنه اصلی اثر تاریخی، تصمیم بر این شد که از نمونه موجود مولاژ تهیه شود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل سازی سه بعدی با نرم افزار سه بعدی زی براش و چاپ با چاپگر سه بعدی FDM به عنوان روش مناسب در جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت های مفقودی از اشیاء عاجی می تواند مفید واقع شود و همچنین می توان در بازسازی قسمت های مفقودی سایر اشیاء تاریخی-فرهنگی نیز مورد استفاده قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: عاج، مدل سازی، حفاظت-مرمت، بازسازی سه بعدی، مولاژ، چاپگر سه بعدی

مقدمه

در گذشته، واژه عاج فقط به عاج فیل ها نسبت داده می شد. ساختار شیمیایی تمامی گونه های عاج مشابه یکدیگر هستند و تجارت دندان ها و عاج های متعلق به حیواناتی غیر از فیل به شکل گسترده ای در سراسر جهان رایج است. بنابراین واژه عاج را می توان برای دندان یا عاج هر پستانداری که کاربرد تجاری دارد و به اندازه کافی برای تراش و حکاکی بزرگ است، به کار برد (Baker, et al. 2020: 4). گونه عاج های حیوانی شامل فیل (آسیایی، آفریقایی)، ماموت، شیرماهی، نهنگ عنبر، گاوماهی، نهنگ دریایی، اسب آبی و گراز می شود. (Locke. 2013: 120) عاج های حیوانی به طور کلی شامل کریستال های هیدروکسی آپاتیت غنی شده با منیزیم است که در ماتریکسی از الیاف کلاژن نوع ۱ تعبیه شده است (Cui, Wen, Zhang, MA. & Li. 1994). عاج و استخوان از نظر ساختار شیمیایی مشابه اند ولی از لحاظ ساختار فیزیکی تفاوت هایی با هم دارند. از استخوان عمدتاً برای دفاع و ابزار روزمره استفاده می شد و از عاج به دلیل دوام و ظاهر زیبایی آن که شامل رنگ، شفافیت و براقی سطح می شود، برای اهداف تزئینی استفاده می شد (Bisht. 2010: 84). از دیگر ویژگی های مهم عاج ها وجود خطوط شرگر در مقاطع عرضی عاج فیل و ماموت است. این خطوط اولین بار در سال ۱۸۴۵م به عنوان خطوط منحنی، متقاطع و لوزی توصیف شدند (Owen. 1856) اما در سال ۱۹۹۳ میلادی از عبارت الگوی شرگر برای توصیف شکل های ریخت شناسی عاج به عنوان ابزاری برای تشخیص و شناسایی استفاده شد (Espinoza & Mann. 1993: 35). شناسایی عاج ها و تفکیک گونه های آن در حفاظت و مرمت، باستان سنجی و علوم باستان-شناختی مفید است. ساختارشناسی و شناسایی اشیاء ساخته شده از عاج موجب فهم مبادلات و تجارت در دوره های تاریخی و پیشاتاریخ می شود، به علاوه به درک فناوری های ساخت و فرآوری اشیاء در دوره های باستانی و شناسایی ارزش های مادی، معنوی و نمادین اینگونه آثار کمک شایانی می کند.



کاربرد استفاده از
مدل سازی سه بعدی و
چاپگر سه بعدی FDM
در مرمت و نمونه سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج

۲۲۲

شناسایی انواع عاج در مباحث حقوقی و قضایی که اتفاقاً از رویکردهای باستان سنجی ست، بسیار مهم است. این رویکرد مبتنی بر شناسایی سره از ناسره و تشخیص جعل در آثار تقلبی و بدلی است. اشیای عاجی فراوان به دست آمده از کاوش های باستان شناختی که روند اکتشاف آن ها همچنان ادامه دارد، حاکی از استفاده از عاج در حوزه های مختلف فرهنگ، هنر و صنایع دستی است. محبوبیت استفاده از اشیای عاجی و تقاضای زیاد ناشی از آن، باعث به خطر افتادن و انقراض برخی گونه های حیوانی، به ویژه فیل شده است؛ در نتیجه کاهش جمعیت تعداد فیل ها، در سال ۱۹۸۹ کنوانسیون تجارت بین المللی گونه های در معرض خطر (CITES)^۱، تجارت عاج را ممنوع اعلام می کند (Stiles, 2004) و باتوجه به محدود شدن منابع عاج، استفاده از آن علاوه بر غیرقانونی بودن از نظر اخلاقی نیز توجیهی ندارد (Ratha, et al. 2021). لذا برای حفظ و بازسازی قسمت های مفقودی اشیای تاریخی- فرهنگی که از عاج تراشیده شده اند، معمولاً از مواد جایگزینی همچون عاج سان های گیاهی مانند درخت نخل تاگوا یا دانه جارینا (Chu, et al. 2015) مواد طبیعی همچون استخوان، مواد کامپوزیت پلیمری با ذرات معدنی، کازئین و خاک اره عاج (Baker, et al. 2020: 56-62) و مواد دیگری همچون گچ، موم و غیره استفاده می کنند. باتوجه به ساختار حساس عاج و حکاکی های ظریفی که روی آن انجام می گیرد، استفاده از مواد جایگزین و حکاکی بر روی آن کار بسیار زمان بری است و ممکن است به اشتباهات مرمتی نیز منجر شود. لذا استفاده از روشی که کمترین مداخله مرمتگر با دقت بالا در کمترین زمان را داشته باشد و بتواند با فناوری های سه بعدی پردازش شود، می تواند جایگزین مناسبی باشد. با استفاده از این فناوری ها می توان سبک هنرمند اصلی را بازیابی و ظاهر یک اثر هنری را دقیقاً همانطور که در نظر گرفته شده، حفظ کرد. فناوری های سه بعدی ابزاری مناسب برای نمایش سه بعدی اشیاء به صورت مجازی، بازسازی قسمت های مفقود و ساخت مولاژ از مصنوعات فرهنگی و تاریخی برای اهداف حفاظتی در علوم میراث فرهنگی و باستان شناختی را دارند (Fantini, et al. 2008). در این مقاله برای مدل سازی سه بعدی از نرم افزار ZBrush و برای نمونه سازی از چاپگر سه بعدی FDM که متداول ترین نوع چاپگر سه بعدی در ایران و جهان است استفاده شده است. روش کار این چاپگر مبتنی بر لایه گذاری مذاب است که می تواند عملیات چاپ سه بعدی را تا حداقل ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون انجام دهد (رازانی و دیگران ۱۳۹۷).

اهمیت و ضرورت تحقیق

هدف از این تحقیق، استفاده از مدل سازی سه بعدی و چاپگر سه بعدی در جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت های مفقودی از اشیای تاریخی- فرهنگی عاجی و امکان سنجی به کارگیری روش های مذکور جهت بازسازی دیگر اشیاست.

1. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora

پرسش‌های پژوهش

مهمترین پرسش‌هایی که این پژوهش براساس آنها شکل گرفته، عبارتند از: چگونه می‌توان از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM^۱ در ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود برای اشیای عاجی تاریخی-فرهنگی استفاده کرد؟ و بازسازی بخش‌های مفقودی و نمونه‌سازی برای اشیای عاجی با استفاده از روش‌های مذکور چه مزایا و معایبی نسبت به روش‌های معمول دارد؟

روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش به صورت کتابخانه‌ای، تجربی-آزمایشی و تحلیلی است؛ به منظور انجام دادن پژوهش ابتدا مدارک منتشر شده و اسناد کتابخانه‌ای جهت مرور ادبیات نوشتاری و تجربی حوزه مطالعاتی بررسی شده است. در بخش مطالعه ادبیات تحقیق، با بررسی منابع کتابخانه‌ای به شناخت و بررسی روش‌های مرسوم بازسازی اشیای عاجی پرداخته شده و بهترین روش مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ سه‌بعدی برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از اشیای تاریخی-فرهنگی مشخص گردیده است. در مرحله تجربی-آزمایشگاهی تمامی سطح نمونه مطالعاتی را تبدیل به مدل‌های رایانه‌ای کردیم؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی، از سطح نمونه اثر نقشه‌های سه‌بعدی تهیه شد و در ادامه، این نقشه‌ها به داده‌های قابل استفاده برای چاپگر سه‌بعدی تبدیل شد که با اجرای آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، حجم سه‌بعدی مولاژ چاپ گردید. در نهایت پس از انجام تمامی مراحل یاد شده و با تحلیل مزایا و معایب نتایج و فرآیند فوق در قالب یافته‌های پژوهش به پرسش‌های تحقیق پاسخ داده شده است.

روش‌های مرسوم بازسازی اشیای عاجی در ایران و جهان

از عاج و استخوان در طول تاریخ برای بسیاری از اشیای هنری، مذهبی و اشیاء روزمره استفاده می‌شده است. عاج به دلیل ظاهر زیبایی‌شناختی، کارایی راحت و دوام بالا حکاکی شده و مورد استفاده قرار می‌گرفت. از سال ۱۹۸۹ که قانون ممنوعیت تجارت عاج از سوی کنوانسیون تجارت بین‌المللی گونه‌های در معرض خطر انقراض جانوران و گیاهان (CITES) وضع شده است (Stiles, 2004)، بسیاری از مواد طبیعی و مصنوعی به‌منزله جایگزین‌های عاج (Locke, M. 2008) (Baker, et al. 56-59) که به عاج‌سان‌ها معروف هستند معرفی شدند. هنرمندانی که روی اشیای هنری از جنس عاج کار می‌کنند، معمولاً با استفاده از ترکیب‌های حکاکی و کنده‌کاری، اره کردن، تراشکاری، حکاکی و قلم‌زنی، جلا دادن و رنگ‌آمیزی، از نظر فرم ترکیبات پیچیده‌ای را به‌وجود می‌آورند (Bisht 2010:100-104).



1. Fused Deposition Mode

ساختار فیزیکی عاج به گونه‌ای است که به راحتی لکه برمی‌دارد و چرک می‌شود؛ لذا برای جلوگیری از لک شدن سطح، هنگام کار با مواد عاجی باید دستکش نخی پوشید (Robert & Faltermeier 59: 2014). این ویژگی عاج، مرمت و بازسازی قسمت‌های مفقودی و دارای ترک را دشوارتر می‌کند. معمولاً مرمت عاج‌های شکسته را با رزین اپوکسی و گچ انجام می‌دهند. در مواردی که ترک‌های سطح عاج زیاد باشد، چسب PVAC را در آب حل کرده و روی عاج یا استخوان اعمال می‌کنند. برخی از مرمتگران آثار تاریخی، استفاده از روغن بادام را هم مفید دانسته‌اند (Bisht 2010: 124-127). برای حفظ و زیبایی اثر تاریخی، ترک‌خوردگی‌های روی آن را به راحتی می‌توان برطرف کرد. همچنین برخی از ترک‌ها را می‌توان به کمک بتونه‌های مناسب پر کرد. این بتونه‌ها، با رنگی هماهنگ با رنگ اثر آغشته شده و روی سطح آسیب‌دیده پخش می‌شوند (Robert & Faltermeier 2014, 57). ترک‌های موجود روی مجسمه عاجی مسیح که متعلق به آکادمی سلطنتی هنرهای زیبای فرناندو بود، با بتونه اپوکسی Milliput® Superfine White که بافت و رنگ پایه مناسبی دارد، مرمت شد. برای بازسازی قسمت مفقود انگشتان دست راست پیکره مسیح با ریخته‌گری سیلیکونی قالبی ساخته شده و با رزین پی‌یورتان (که از نظر رنگ بسیار شبیه به خود عاج است)، قطعات مفقودی بازسازی گردید (شکل ۱) (Alconada, 2017).

در گزارش دیگری که مربوط به فیگور یک نمونه سوارکار اسب در موزه باستان‌شناسی، بخش عصر مدرن موزه ملی اسپانیا است، برای بازسازی بخش‌های مفقود در قسمت سُم، با استفاده ریخته‌گری سیلیکونی قالب گرفته شد و طرح مورد نظر با دوغاب گچی ساخته شد (شکل ۲) (Museo Arqueológico Nacional, 2018). تکنیک‌های متعددی برای بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای عاجی وجود دارد. برای این کار، عاج مصنوعی یا طبیعی را با استفاده از چسب‌های طبیعی Mowilith DVD به قسمت‌های جدا شده الصاق می‌کنند، از ترکیب پلی وینیل استات با pH کمتر از ۶ نیز می‌توان استفاده کرد (اگر اسید زیادی در این ترکیب وجود داشته باشد، آسیب‌های غیرقابل جبرانی به شیء وارد می‌شود). همچنین قانونی کلی برای مرمت عاج وجود دارد و آن این است که قسمت مرمتی باید از فاصله ۳ اینچی مشاهده شود ولی در فاصله ۱۸۰ cm (۶ فوت) قابل مشاهده نباشد (Bisht, 2010: 124-127). در جدیدترین پژوهش‌ها در مورد بازسازی عاج، ماده جایگزین پیشرفته‌ای بنام دیگوری^۱ ساخته شده که از نظر رنگ، شفافیت و براق بودن سطح همانند ویژگی‌های زیبایی شناختی عاج است (Ratha, et al, 2021).



کاربرد استفاده از
مدل سازی سه بعدی و
چاپگر سه بعدی FDM
در مرمت و نمونه سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج



■ شکل ۱: راست-قبل و بعد از مرمت مجسمه مسیح، چپ-بازسازی انگشتان ست راست (Alconada, 2017).



■ شکل ۲: الف-پیکره مجسمه قبل از مداخلات، ب-جدا کردن مرمت‌های قبلی و ج-بازسازی سمت سم (Museo Arqueológico Nacional, 2018)

در ایران نیز نمونه‌هایی از مرمت عاج با گچ و رزین انجام شده است. در ویتترین موزه ملی ایران یک نمونه پیکره عاجی به شکل گاو شاخ‌دار قرار داشت (شکل ۳). قسمت‌هایی از این اثر دچار مفقودی بود که به نظر می‌رسید با ماده‌ای شبیه به پلی‌استر بازسازی شده است. بر روی این ماده از لحاظ بصری و مبانی مرمتی، موزون‌سازی صحیحی انجام نشده بود و هیچ‌گونه شباهت رنگی با بدنه عاج نداشت. در متن مصاحبه‌ای که با ریاست وقت موزه ملی ایران انجام گرفت، بیان شده که اثر با گچ بازسازی و موزون‌سازی شده است و در بازنگری‌های بعدی موزون‌سازی‌های رنگی، پاک شده و پس از آن سطوح، بازسازی و با استفاده از آبرنگ با بدنه عاج، همگون‌سازی رنگی شده است (عبدالله خان گرجی، ۱۴۰۰). قسمت‌های ترک‌خورده موجود روی دو نمونه عاج فیل موجود در کاخ موزه ملت کاخ سعدآباد با استفاده از موم کریستال ترمیم شده‌اند (شکل ۴) (آرشیو کاخ موزه سعدآباد، بی‌تا). همچنین در پایان‌نامه‌ای با عنوان بررسی ساختاری آثار عاج کنده‌کاری شده پیش از تاریخ، برای پر کردن درز شکاف‌ها و ترک‌ها و قسمت‌های مفقودی، از پرکننده‌ای به نام Glass Micro Balaon و از پریمال به عنوان بست استفاده شد (نیک نام، ۱۳۹۰).



■ شکل ۳: نمایی از دو طرف پیکره گاو شاخدار عاجی بازسازی شده با گچ (مأخذ: بایگانی شخصی مهدی رازانی، ۱۳۹۹).



■ شکل ۴: الف- نمونه عاج‌ها قبل از مرمت، ب- پر کردن درز ترک‌ها با موم میکرو کریستال گرم شده، ج- وضعیت کنونی اثر (مأخذ: بایگانی کاخ موزه سعدآباد بی تا).



کاربرد استفاده از
مدل سازی سه بعدی و
چاپگر سه بعدی FDM
در مرمت و نمونه سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج

۶- پیشینه استفاده از فناوری‌های نوین سه بعدی در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی

در این مقاله، پیشینه استفاده از فناوری‌های نوین سه بعدی در حفاظت و مرمت میراث فرهنگی شامل دو بخش می‌شود. بخش اول شیوه‌های مدل سازی سه بعدی با استفاده از تکنیک‌ها، ابزارها و نرم افزارهای سه بعدی ساز است و بخش دوم تلفیق استفاده از مدل سه بعدی تهیه شده با چاپگر سه بعدی و نمونه سازی را در بر می گیرد.

بخش اول:

امروزه استفاده از فناوری‌های روز، تحولات شگرفی در زمینه‌های مختلف به وجود آورده است. در زمینه علوم میراث فرهنگی نیز این فناوری‌ها باعث بهبود و افزایش دقت در مراحل کار شده است. از این رو از مدل سازی سه بعدی در زمینه‌های مختلف همچون مرمت بناهای تاریخی (نیکنامی و میرا، ۱۳۸۴)، محوطه‌های باستان شناسی (Spencer, 2008)، مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی (رازانی و دیگران،

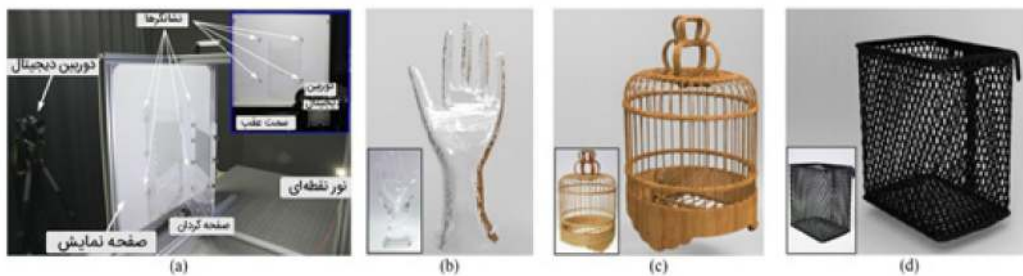


۱۳۹۵) و ایجاد موزه‌های مجازی (Styliani et al, 2009) استفاده شده است. سه‌بعدی‌سازی به عنوان بخشی از حوزه وسیع گرافیک کامپیوتری، پدیده‌ای است که به ارائه شبیه‌سازی ریاضی سطوح در یک ساختار هندسی-فضایی می‌پردازد. تمامی فناوری‌های سه‌بعدی‌سازی، از جمله روش‌های دیجیتالی گرافیک کامپیوتری فضایی، که ما با آن‌ها در ارتباط هستیم می‌توانند در این دو بخش قرار گیرند: بخش نرم افزار (مدل‌سازهای سه‌بعدی، نمایش دهنده‌های سه‌بعدی) و بخش سخت افزار (اسکنرهای سه‌بعدی، چاپگرهای سه‌بعدی) که هدف آن‌ها بهبود ارتباط میان آثار و یا فهم بصری از برخی فرایندها است. روش‌های سه‌بعدی‌سازی در یک دهه گذشته، پیشرفت چشمگیر داشته‌اند و تحقیق در مورد آن‌ها فرصت‌های متفاوتی در زمینه میراث فرهنگی به وجود آورده است (ارازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

از اسکنر سه‌بعدی و ساخت تصاویر دیجیتالی در حوزه میراث فرهنگی استفاده بسیاری شده است. در حال حاضر این فناوری در جهت مستند کردن آثار هنری کاربرد دارد. پروژه سه‌بعدی‌سازی مجسمه میکال آنز پیشگام سه‌بعدی‌سازی در حوزه میراث فرهنگی است (Scopigno, et al., 2011) و در پروژه سه‌بعدی‌سازی مجسمه مینروا نشان داده شد که تکنیک‌های سه‌بعدی‌سازی با استفاده از اسکنرهای سه‌بعدی کمک شایانی به بهبود روش‌های سنتی مرمت می‌کند (Rocchini, Cignoni, Montani, & Pingi, 2011). استفاده از ترکیب اسکنر سه‌بعدی و نرم افزارهای مدل-سازی، برای ایجاد مدل سه‌بعدی از اشیای پیچیده و ظریف کاربرد دارد. برای انجام پروژه مجسمه مدونا که ظرافت و پیچیدگی زیادی دارد، از فناوری‌های ترکیبی شامل توموگرافی، اسکن سه‌بعدی و مدل‌سازی با نرم افزار Geomagic Studio استفاده شد (Koska, 2011).

از دیگر روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی، فوتوگرامتری برد کوتاه است. برای انجام دادن این روش، یک دوربین رفلکس دیجیتال تک لنز باکیفیت بالا و با وضوح تصویر خوب مورد نیاز است. بارو و دیگران (۲۰۱۴) این روش را برای بازسازی قطعات سرامیک به کار بردند. آن‌ها از دوربین SLR دیجیتال Nikon D۶۰ برای عکاسی قطعات مختلف سرامیک استفاده کردند. در این فرایند، نورهای مورد استفاده باید یکنواخت و دارای کنتراست یکسان باشند، فاصله دوربین تا اثر باید ثابت نگه داشته شود، دوربین روی دایره‌ای فرضی به دور اثر بچرخد و از تمامی قسمت‌های اثر، عکس‌هایی باکیفیت بالا ثبت کند. در پژوهش یاد شده از نرم افزار Agisoft PhotoScan جهت مدل‌سازی سه‌بعدی و از نرم افزار MeshLab جهت مقیاس و محاسبه حجم استفاده شده است (Barreau, et al., 2014).

مدل‌سازی سه‌بعدی اشیای بسیار پیچیده از قبیل اجسامی که ساختارهای مشبک دارند یا از مواد نیمه‌شفاف ساخته شده‌اند، کار چالش برانگیزی است. بازسازی این نوع از اشیای پیچیده با استفاده از سایه انداختن‌های مسطح انجام می‌شود (شکل ۵) (Lin, Chang, & Hu, 2013). در ادبیات رایانه‌ای، اشیایی که شبیه به کنده کاری‌ها و حکاکی‌های روی عاج هستند، معمولاً اشیای پیچیده و یا فیلیگرانی نام دارند (Chen, et al. 2016).



■ شکل ۵: (a) سیستم پیشنهادی برای گرفتن تصاویر سه‌بعدی با استفاده از یک صفحه شطرنجی نیمه‌شفاف، مقایسه نتایج بازسازی سه‌بعدی با اشیای واقعی نشان داده شده است: (b) ماکت دست از جنس اکریلیک نیمه‌شفاف، (c) قفس چوبی، (d) جاقلمی فلزی (مأخذ: Lin, Chang & Hu, 2013).

علاوه بر روش بازسازی اشیای پیچیده با سایه انداختن‌های مسطح که پیش‌تر به آن اشاره شد، چن و همکاران (۲۰۰۸) روش دیگری در مقاله‌ای ارائه کرده‌اند. آن‌ها در این روش نشان دادند که حکاکی‌های سه‌بعدی را می‌توان با برون‌یابی خطوط و منحنی‌ها از نقشه‌های خطی با استفاده از تشخیص لبه و الگوریتم‌های خط اسکن روی تصاویر به دست آورد. در این پژوهش فناوری اسکن CT به‌عنوان تکنیکی برای بررسی‌های مصنوعات حکاکی‌شده عاجی پیشنهاد شده است (Chena, et al. 2008).

در موزه ریودوژانیرو برزیل به‌منظور تحکیم روابط تاریخی برزیل با شرق، نمایشگاهی از عاج برگزار شد و دو نمونه اثر عاجی (یک مجسمه و یک کشتی)، برای مدل‌سازی سه‌بعدی انتخاب شدند. سطح براق اشیایی مانند عاج، معمولاً هنگام استفاده از تکنیک‌های سه‌بعدی مرسوم برای گرفتن سطح، مشکلاتی ایجاد می‌کند. در اسکن‌های سه‌بعدی همانند اسکن‌های نور سفید و لیزری، انکسار نور از سطوح براق ایجاد می‌شود. همچنین اشیاء با تزیینات و جزئیات زیاد با استفاده از اسکن یا فوتوگرامتری نمی‌توانند به‌درستی بازسازی شوند. در این پژوهش رویکردی که برای مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شد، ترکیبی از چند روش بود. برای مدل مجسمه فرآیند ساده‌تری انجام گرفت؛ مدل‌سازی با اسکن لیزری Minolta Vivid 9i دیجیتالی انجام شد و بافت‌سازی با استفاده از مجموعه‌ای شامل ۱۵ عکس به‌انجام رسید، اما اسکن لیزری برای مدل‌سازی کشتی چینی قادر به ثبت جزئیات دقیق ساختار و پانل‌ها نبود و بنابراین مورد استفاده قرار نگرفت. برای این منظور از ترکیب هندسی بر اساس عکس‌های دیجیتالی با توجه به محدودیت‌های موجود استفاده شد. از این‌رو ابتدا ساختار اصلی کشتی با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی سنتی، مانند اکستروژن، تقسیم‌بندی، دستکاری صورت و لبه انجام گرفت؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار Blender مدل‌سازی شد. به همین ترتیب سایر اشیای تزیینی موجود در کشتی به‌جز پانل‌ها و پنجره‌ها که پیچیده بودند، مدل‌سازی شدند. ساختار شکننده کشتی چینی به‌گونه‌ای بود که اجازه هیچ‌گونه دست‌کاری در قطعات از جمله باز یا بسته کردن پنجره‌ها، یا حتی قرار

کاربرد استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM در مرمت و نمونه‌سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج



دادن پس‌زمینه ثابت پشت پنجره‌ها برای تسهیل بازسازی آن را نمی‌داد. اسکنر سه‌بعدی موجود نیز رزولوشن کافی برای سه‌بعدی‌سازی آن نداشت. روش فوتوگرامتری هم نتوانست مدل‌سازی دقیقی را انجام دهد؛ لذا از رویکردی متفاوت برای این کار استفاده شد. در ابتدا تصویری از نمای روبه‌روی هر پنجره گرفته شد تا آن را برای فرآیند بازسازی آماده کند. برای این کار، تصویر برش داده و پرسپکتیو آن تصحیح گردید و در ضمن پیش‌زمینه نیز با استفاده از نرم‌افزار Gimp از پس‌زمینه جدا شد. بر اساس کار Lengyel یک تصویر رایانه‌ای سه‌بعدی از پنجره‌ها با کیفیت بصری بالا و با ساختار لایه‌لایه با استفاده از مجموعه‌ای از لایه‌ها، تولید شد. این نتیجه با اجرای چند مرحله به‌دست آمد: ۱- ایجاد یک نقشه باینری با اطلاعات پس‌زمینه‌ای تا بافت اثر بتواند حاوی یک کانال آلفا باشد و مناطق شفاف را به‌درستی نمایش دهد. ۲- ایجاد یک نقشه معمولی با تصویر رنگی ۳- ایجاد یک چهارگوش هندسی ۴- ترسیم نقشه بافت و خواص مواد ۵- پیکربندی ضخامت پنجره‌ها با روی هم قرار دادن چندین نسخه. برش‌های متعدد چهارتایی روی هم چیده شدند تا حس یک حجم را ایجاد کنند (Marroquim, et al. 2017).

در زمینه استفاده از اسکن و ساخت تصاویر سه‌بعدی در ایران اقداماتی در ارگ بم، تخت جمشید، مقبره کوروش در پاسارگاد، چغازنبیل، کلیساهای ارامنه جلفا، تخت سلیمان تکاب، بیستون کرمانشاه و برخی دیگر از بناهای مهم ایران صورت گرفته است؛ همچنین اخیراً در مورد کاربرد اسکن و مدل‌سازی سه‌بعدی در ایران، روی سه نمونه اثر تاریخی مقالاتی ارائه شده است. علاوه بر این، دو نمونه اسکن سه‌بعدی روی شیشه تاریخی (رازانی و دیگران، ۱۳۹۵) (بهرام پور و کریمی، ۱۳۹۵) و یک نمونه روی یک سفال تاریخی انجام گرفته است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

بخش دوم:

تجربه استفاده تلفیقی از فناوری‌های اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای ایجاد تصاویر سه‌بعدی مجازی، بازسازی قطعات مفقود اشیای تاریخی-فرهنگی و همچنین ساخت مدل رایانه‌ای از آن‌ها چندان متداول نیست. در موزه ملی اسلوانی، یک نمونه مدل‌سازی از ظرف چینی با استفاده از تلفیق اسکنر و چاپگر سه‌بعدی انجام گرفت. در این پروژه ابتدا اثر با استفاده از اسکنر لیزری اسکن شد و سپس بازسازی دیجیتال قطعات مفقودی انجام گرفت و قطعات با چاپگر سه‌بعدی چاپ شدند. قبل از اتصال قطعات چاپ‌شده روی اثر، سطح اثر قطعات چاپ‌شده به دلیل خشن بودن سطح و شباهت کمی که با اصل اثر داشت سمباده‌زنی شد و پس از آن قطعات جداگانه، با رزین اپوکسی روی اثر اصلی چسبانده شدند (Antleij, et al. 2012).

آراباس و همکاران با استفاده از فناوری‌های نوین نمونه‌سازی سریع، مجسمه سفالی مدونا پیترا نیکو را که در زلزله سال ۲۰۰۹ به شدت آسیب‌دیده و تکه‌تکه شده بود، بازسازی کردند. در این پروژه ابتدا

قسمت‌های موجود با اسکنر، اسکن شد و سپس در نرم‌افزارهای سه‌بعدی مجسمه را مونتاژ کردند تا قسمت‌های مفقود مشخص شود. این قسمت‌ها در نرم‌افزار Meshlab بازسازی و سپس چاپ شدند (Arbace, et al. 2012). باروئا و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از تکنیک فوتوگرامتری که فقط قطعاتی از آن موجود بود، توانستند قسمت‌های مفقود را مدل‌سازی کنند. در این پروژه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی مدل MarkerBot Replicator 2x قسمت‌های مفقود با فیلامنت^۱ ABS چاپ شده و قطعات اصلی بر روی قسمت بازسازی شده نصب شدند (Barreau, et al. 2014). شیلینگ و همکاران با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی توپوگرافی رایانه‌ای و استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی اقدام به احیاء و بازسازی مجازی ستون مهره‌های گونه‌ای از دایناسور کردند (Schilling, et al. 2013). مقالاتی از استفاده تلفیقی مدل‌سازی و چاپگرهای سه‌بعدی در ایران نیز منتشر شده است. در مقاله‌ای بر روی یک نمونه شیشه‌ای دارای نقوش برجسته که بخشی از آن مفقود بود، با کمک اسکنر لیزری نقشه سه‌بعدی از سطح نمونه تهیه و به داده‌های قابل استفاده برای چاپگرهای سه‌بعدی تبدیل شد تا قسمت‌های مفقود، چاپ و بر روی شیشه اصلی وصل شوند (رازانی و دیگران، ۱۳۹۵) همچنین در پژوهشی با موضوع شیشه‌ای تاریخی، از اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی قسمت مفقود استفاده شد (بهرام پور و کریمی، ۱۳۹۵). در جدیدترین مطالعات انتشار یافته در زمینه استفاده از روش‌های مدل‌سازی نوین در بازسازی اشیاء، رازانی و همکاران در مورد بازسازی بخش‌های مفقود سفالینه‌های باستان‌شناسی، پژوهشی انجام داده‌اند. در این پژوهش از اسکنر و چاپگر سه‌بعدی جهت بازسازی قسمت‌های مفقود سفال‌ها استفاده شده است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷).

۷- مواد، تجهیزات و روش‌های مورد استفاده برای ساخت مولاژ

۷-۱ معرفی نمونه مورد مطالعه

اثر مورد مطالعه (شکل ۶) یک نمونه مهره شطرنج از جنس عاج بوده و متعلق به مؤسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد است. این مهره درون جعبه‌ای قرار دارد که تعداد مهره‌های موجود در آن ۳۲ عدد است که شامل چهار مهره اسب هم‌اندازه و چهار مهره فیل، چهار مهره شتر، ۱۶ مهره سرباز که همگی به رنگ سفید هستند و مهره سیاهی وجود ندارد. در این میان سه نمونه مهره شتر وجود دارد و یک مهره که فقط پایه آن موجود است و قسمت‌های اصلی آن مفقود شده است و با توجه به کامل بودن سایر مهره‌ها این احتمال وجود دارد که متعلق به مهره شتر باشد (شکل ۷). مشابه همین مهره‌های شطرنج در موزه عاج رامسر نیز موجود است (شکل ۸). برای مرمت و بازسازی این اثر تصمیم بر آن شد که ابتدا از تمامی زوایا مستندنگاری شود (شکل ۹) و از نمونه مهره مشابه سالم، مولاژ تهیه شود و به جای نمونه دارای مفقودی قرار بگیرد. در تعریف مولاژ به سادگی می‌توان گفت: مولاژ همان کپی است با این تفاوت که در مولاژ الزامی به ساخت اثر از



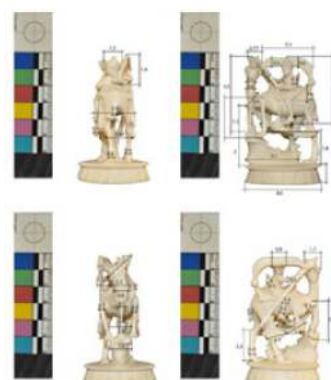
کاربرد استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM در مرمت و نمونه‌سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج

جنس خودش وجود ندارد و تنها به شکل، اندازه، فرم، رنگ و نقش اکتفا می‌شود (رازانی و دیگران، ۱۳۸۹).

■ شکل ۶: اثر مورد مطالعه (مأخذ: بایگانی مؤسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد).

مه‌شفاف، (C) قفس چوبی، (d) جاقلمی فلزی (مأخذ: Lin, Chang & Hu, 2013).

■ شکل ۷: اثر دارای مفقودی (مأخذ: همان).



■ شکل ۸: سمت راست مهره‌های شطرنج ۴۶۸۵۳ در موزه عاج رامسر (مأخذ: همان).

■ شکل ۹: مستندنگاری از اثر سالم (مأخذ: نگارندگان).

۲-۷- نرم افزارهای سه بعدی سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

برای این کار ابتدا از تمامی زوایای اثر مورد نظر تصاویر با کیفیت گرفته می‌شود و برای مدل سازی اثر نرم افزارهای سه بعدی به کار می‌رود. در این پژوهش با توجه به مجسمه بودن اثر و همچنین دارا بودن جزئیات بسیار زیاد نسبت به اندازه شیء از نرم افزار زیربراش با نسخه ۱۰.۷.۲۰۲۱ استفاده گردید؛ زیربراش یک ابزار مجسمه سازی دیجیتالی ترکیبی از مدل سازی، نقاشی دو بعدی و 2,5D و 3D است. این نرم افزار از فناوری اختصاصی Pixol استفاده می‌کند که اطلاعات مربوط به روشنایی، رنگ، مواد و عمق را بر روی صفحه نمایش ذخیره می‌کند. این سیستم در دسته نرم افزارهای مدل سازی سه بعدی قرار می‌گیرد، با این تفاوت که برخلاف دیگر نرم افزارها که طراحی گرافیکی پیکسلی دارند، یک نرم افزار طراحی گرافیکی برداری یا وکتور است. در نرم افزارهایی که طراحی گرافیکی وکتور دارند، اساس کار بر پایه معادلات و اصول ریاضی است و هنرمندان با استفاده از تکنیک‌های مجسمه سازی، در مقیاس دیجیتالی، مجسمه سازی سه بعدی را انجام می‌دهند. این نرم افزار دقت بالایی دارد و به خوبی، فرمت‌های خروجی تولید شده از سوی نرم افزارهای دیگر را می‌پذیرد. برای نمایش مدل سه بعدی، رندر گرفته می‌شود. رندر در نرم افزار Autodesk 3ds Max دارای نسخه ۲۰۲۲ که موتور رندر کرانا نسخه ۷ بر روی آن نصب شده بود،



گرفته می‌شود. همچنین جهت مدیریت تنظیمات چاپگر که شامل تولید مسیرهای حرکت نازل سه‌بعدی و تبدیل فایل فرمت STL مدل مورد چاپ به فایل G-code است، از نرم‌افزارهای Ultimaker Cura نسخه 4.12.1 و Simplify3D نسخه 4.12.2 که جزو نرم‌افزارهای مدیریت تنظیمات چاپ FDM است، استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها، فایل مدل سه‌بعدی مورد چاپ با فرمت STL را به صورت ورودی دریافت کرده و فایل با فرمت G-code^۱ را که قابل شناسایی توسط کنترلر چاپگر سه‌بعدی است، تولید می‌کند.

۳-۲- نرم‌افزار مدل‌سازی زی‌براش

فناوری‌های نوین سه‌بعدی در حال توسعه روزافزون هستند؛ نرم‌افزارهایی مانند 3D Studio Max, Maya Zbrush, Lightwave و غیره. نرم‌افزارهای مدل‌سازی با نوآوری‌های مداوم در پالت ابزارها و سیستم‌های رندر و وضوح هستند که جایگاه خود را در دنیا و در حوزه علوم میراث فرهنگی پیدا کرده‌اند. در این بین Zbrush نرم‌افزاری است که در آن دست کاربر برای خلق هر نوع اثری کاملاً باز است و به او این امکان را می‌دهد که اثر مورد نظر را از طریق مدل‌سازی دیجیتال خلق کند. هنگام بازسازی اثری در نرم‌افزار Zbrush باید دو نکته مهم در نظر گرفته شود: یکی سطح وضوحی که در نظر داریم نشان داده شود و دیگری، توانایی بازسازی از طریق تصاویر موجود. همان‌طور که گفته شد، ZBrush ابزاری بدون محدودیت و خلاقانه است؛ به همین دلیل استفاده از آن بسیار آسان است و در نهایت منجر به ساخت آثار هنری می‌شود. هیچ‌گونه محدودیتی در این نرم‌افزار وجود ندارد و اگر در خلق اثر کم و کاستی‌ای مشاهده می‌شود، به دلیل کم‌توانی هنرمندی است که قطعه را خلق می‌کند. به همین دلیل، بسیار مهم است که پیش از تصمیم به خلق اثر، طرحی از پیش تعیین شده داشته باشیم. ابزارهایی که هنگام شروع مجسمه‌سازی با ZBrush مورد استفاده قرار می‌گیرند Zspheres و Tools هستند. با مدل‌سازی از طریق zspheres می‌توان انواع اشیاء و فیگورها اعم از انسان و حیوان را ایجاد کرد. Zspheres کره‌هایی هستند که به عنوان مفصل استفاده می‌شوند و نیمکره‌ها را به هم متصل می‌کنند. پس از ایجاد شکل اصلی، این کره‌ها متناسب با شکلی که در نظر داریم، به چند ضلعی‌هایی با وضوح بالاتر یا پایین‌تر تبدیل می‌شوند. علاوه بر ZBrush، zspheres دارای طیف گسترده‌ای از ابزار یا مدل‌هایی از قبل ایجاد شده است که مدل‌سازی شخصیت‌ها، حیوانات و اشیاء بی‌جان را تسهیل می‌کند. اشکال هندسی اصلی مانند مکعب‌ها، کره‌ها، مخروط‌ها یا استوانه‌ها در کتابخانه ابزار برنامه ظاهر می‌شوند؛ به طوری که هنگام استفاده از آن‌ها می‌توان اصلاح و ترکیب‌شان کرد تا پایه‌ای برای مدلی که می‌خواهیم بسازیم، ایجاد شود (Pixologic Team, 2009).



کاربرد استفاده از
مدل‌سازی سه‌بعدی و
چاپگر سه‌بعدی FDM
در مرمت و نمونه‌سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج

۴-۷- چاپگر سه بعدی

از چاپگر سه بعدی برای ساخت نمونه مدل سازی شده با مدل دستگاه Anet et5 pro ۲۰۲۰ ساخت کشور چین استفاده شد. روش کار این چاپگر مبتنی بر لایه گذاری مذاب یا FDM است که می تواند عملیات چاپ سه بعدی تا حداقل ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون (۰/۱ میلی متر) را انجام دهد؛ از مدل موجود دو نمونه چاپ به روش FDM گرفته شد که اطلاعات هر کدام به شرح زیر است:

۱-۴-۷- تنظیمات مربوط به قطعه چاپ اول:

نازل چاپگر استفاده شده دارای قطر 4/0 mm، ضخامت لایه گذاری: 12/0 mm، درصد پر شوندگی: ۲۵٪، دمای چاپ: 205°C و دمای هیت بد: 60°C، سرعت چاپ: 40 mm2/s، زمان چاپ: ۷ ساعت، فیلامنت استفاده شده PLA^۱ با برند Y.S به مقدار مصرفی 26 g است.

۲-۴-۷- تنظیمات مربوط به قطعه چاپ دوم

نازل چاپگر استفاده شده دارای قطر 3 mm، ضخامت لایه گذاری: 1 mm، درصد پر شوندگی: ۲۵٪، دمای چاپ: 205°C و دمای هیت بد: 60°C، سرعت چاپ: 25 mm2/s، زمان چاپ: ۱۴ ساعت، فیلامنت استفاده شده PLA با برند Y.S به مقدار مصرفی 26 g است.

این چاپگر دارای سه محور آزاد است که در طول، عرض و ارتفاع در حرکت اند. چاپگر سه بعدی ابتدا مواد مصرفی را ذوب کرده و سپس این مواد از طریق نازل به صورت رشته های پلیمری ذوب شده در کنار هم قرار می گیرند و به هم متصل و در هم ادغام می شوند تا چاپ طرح مورد نظر لایه به لایه در محور Z به پایان برسد.

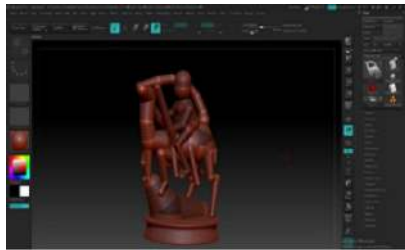
۸- روش انجام کار و نتایج حاصل از فرآیند بازسازی

۱-۸- مدل سازی اثر عاجی

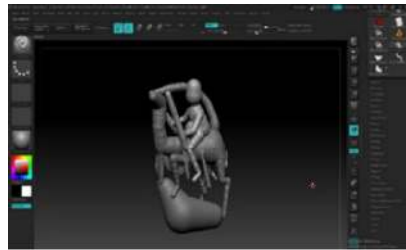
ابتدا از تمامی جهت های اثر عکس برداری و مستندنگاری دقیق و با جزئیات انجام می گیرد. البته سطح نورانی عاج کار مستندنگاری را با مشکل مواجه می کند که با کم و زیاد کردن نور و تغییر پس زمینه عکس های با کیفیت تهیه می شود. همان طور که در قسمت مطالعات بیان شده است با توجه به سطح براق عاج، جزئیات بسیار پیچیده و زیاد اثر مورد مطالعه و همچنین اندازه کوچک آن با توجه به جزئیات زیاد اثر، استفاده از تکنیک های سه بعدی مانند اسکنرهای نوری و لیزری و روش فوتوگرامتری را با مشکل مواجه می کند. باید روش های دیگری برای مدل سازی سه بعدی به کار رود. بهترین روش بعد از ابزارهای سه بعدی ساز، استفاده از نرم افزارهای سه بعدی است. در اینجا بازسازی اثر عاجی از نرم افزار



Zbrush که نرم افزار تخصصی مجسمه سازی و حجاری سه بعدی است، استفاده شده است. مدل با توجه به عکس و زوایایی که از آن موجود بود با استفاده از Brush های نرم افزار حجاری شد. برای حجاری ابتدا با استفاده از Zsphere یک ساختار کلی از مدل ساخته می شود (شکل ۱۰)، با استفاده از Adaptive Skin تبدیل به مش شده (شکل ۱۱) و بقیه جزئیات به صورت دستی و با قلم نوری اسکالپت می شوند (شکل ۱۲).

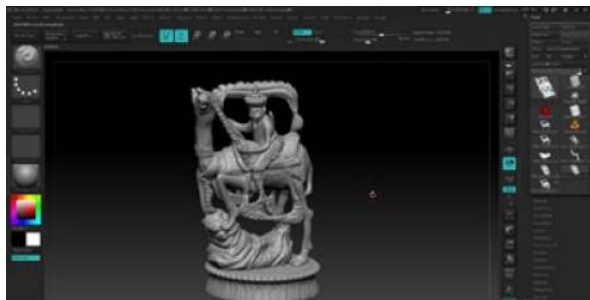


■ شکل ۱۱: تبدیل به مش با استفاده از Adaptive Skin (مأخذ: نگارندگان).



■ شکل ۱۰: حجاری ابتدایی با استفاده از Zsphere (مأخذ: نگارندگان).

■ شکل ۱۲: اضافه کردن جزئیات به صورت دستی (مأخذ: نگارندگان).



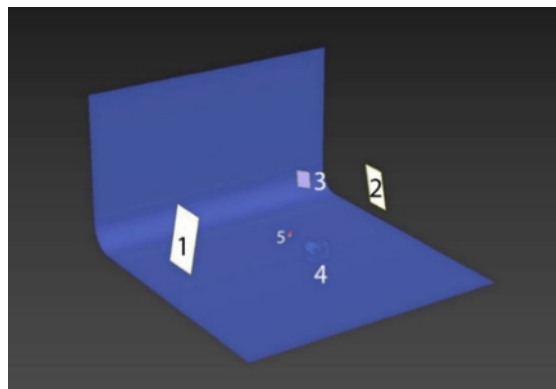
کاربرد استفاده از مدل سازی سه بعدی و چاپگر سه بعدی FDM در مرمت و نمونه سازی از اشیاء تاریخی- فرهنگی ساخته شده از عاج

۲-۸- رندر گرفتن از نمونه

بعد از مدل سازی از نمونه جهت نمایش رندر گرفته می شود. جهت انجام رندر، در برنامه زی برانش فایل با فرمت FBX که فرمت خروجی رایج در اکثر نرم افزارهای 3D است، خروجی گرفته و وارد نرم افزار Au-todesk 3ds Max که موتور رندر کرنا بر روی آن نصب شده بود، می شود. مهم ترین ویژگی موتور رندر کرنا کیفیت بالای آن، کوتاه بودن زمان لازم برای رندر گرفتن، سادگی و قابلیت Lightmix آن و همچنین پشتیبانی از متریال ها، نورها و دوربین های نرم افزار 3ds Max است. استودیوی شبیه سازی موتور رندر کرنا سه نور اصلی و یک پرده دارد (شکل ۱۳) 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 94/2 %، تناسب تصویر 8/0، رزولوشن 3750x3000، لنز دوربین focal 225 mm، زوم فکتور ۱، ایزو ۱۰۰، F-Stop: 16 و تایم رندر 5:43 دقیقه ای از چهار نما رندر گرفته شده است (شکل ۱۴).



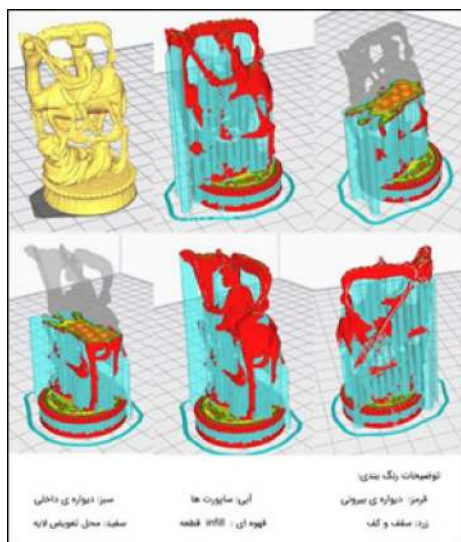
■ شکل ۱۴: رندر از ۴ نمای مدل سه بعدی (مأخذ: نگارندگان)



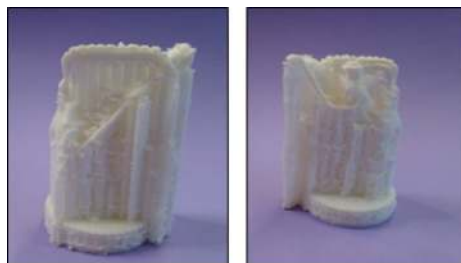
■ شکل ۱۳: استودیوی شبیه سازی موتور رندر کرونا: ۱- نور اول، ۲- نور دوم، ۳- نور سوم، ۴- دوربین، ۵- نمونه مورد مطالعه (مأخذ: نگارندگان).

۳-۸- چاپگر سه بعدی

در چاپگرهای سه بعدی با فناوری FDM، اجسام به صورت لایه ای از مواد ترموپلاستیک ذوب شده، روی لایه قبلی ساخته می شوند. بنابراین برای اینکه لایه ساخته شود، باید لایه قبلی هم وجود داشته باشد تا مواد خروجی نازل بتوانند در جایی مستقر شوند. برای ساخت و چاپ یک مدل سه بعدی که دارای پیش آمدگی شیب دار و یا معلق باشد یا فرم قطعه زاویه ای کمتر از ۴۵ درجه داشته باشد، از ساپورت یا تکیه گاه استفاده می شود. ساپورت در چاپگرهای سه بعدی، به قسمت هایی اطلاق می شود که چاپگر مجبور است لایه هایی را به عنوان پایه بسازد تا قسمت اصلی قطعه بر روی آن چاپ شود. اثر مورد مطالعه بعد از انجام مراحل مدل سازی سه بعدی که با فرمت STL خروجی گرفته شده بود، برای انجام مراحل چاپ در نرم افزار Cura جهت تبدیل به G-code اجرا شد (شکل ۱۵).



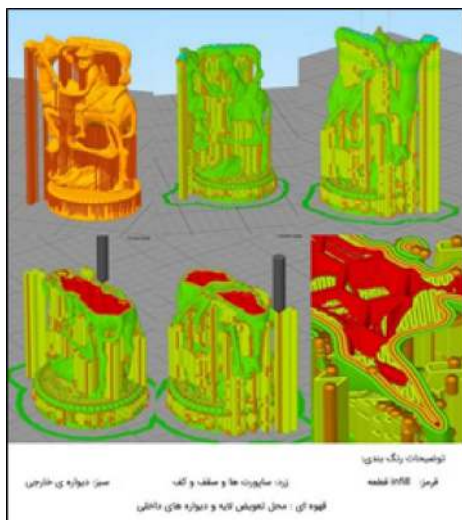
■ شکل ۱۵: ساپورت گذاری در محیط نرم افزار Cura (مأخذ: نگارندگان).



■ شکل ۱۶: قطعه اول، بعد از چاپ سه بعدی (مأخذ: نگارندگان).



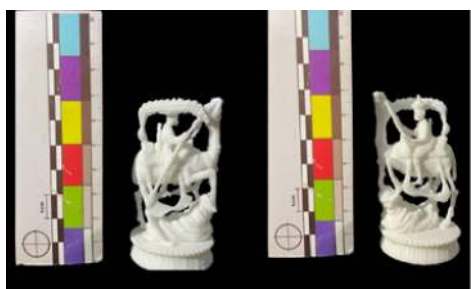
■ شکل ۱۷: نتیجه نهایی نمونه اول چاپ شده بعد از جداسازی ساپورت‌ها و آسیب به بدنه نمونه چاپ شده (مأخذ: نگارندگان).



■ شکل ۱۸: ساپورت‌گذاری در نرم‌افزار Simplify3D (مأخذ: نگارندگان).



■ شکل ۱۹: نمونه دوم بعد از چاپ سه‌بعدی (مأخذ: نگارندگان).



■ شکل ۲۰: نتیجه نهایی (مأخذ: نگارندگان).

با توجه به شکل ۱۵ میزان ساپورت، دیواره‌های داخلی و خارجی و میزان توپر بودن قطعه کاملاً قابل تشخیص است و طبق تنظیمات قطعه شماره ۱ چاپگر سه‌بعدی، قطعه اول از مدل موجود پرینت گرفته شده است (شکل ۱۶).

اولین اقدام پرداخت سطح در قطعات چاپ شده با چاپگر FDM جداسازی ساپورت‌ها است؛ البته حذف ساپورت‌ها به منزله اتمام کار و افزایش سطح کیفیت قطعه نیست، بلکه بعد از عملیات حذف به سطح اصلی خواهیم رسید. معمولاً ساپورت‌ها را به دو روش از قطعه جدا می‌کنند؛ اولین روش، حذف مکانیکی است که در این مقاله نیز با این فرایند پیش رفته‌ایم، دومین روش قرار دادن قطعه در حلال مناسب و حل شدن قسمت‌های ساپورت است. انجام دادن این کار باید با دو نوع نازل و فیلامنت مختلف صورت بگیرد. برای قسمت ساپورت‌گذاری معمولاً از فیلامنت‌هایی همچون PVA و HydroFill استفاده می‌شود. فناوری این روش و همچنین فیلامنت‌های ذکر شده برای استفاده در روند این مقاله، تا کنون در کشور موجود نبوده است.

ساپورت‌ها را می‌توان با فشار کم از بدنه قطعه جدا کرد. برای حذف ساپورت در قسمت‌هایی که دسترسی به آن‌ها محدود است یا بخش‌هایی ریز و ظریف دارند، از دم‌باریک و ابزارهای دندانپزشکی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود دورتادور اثر به دلیل فرم آن ساپورت‌گذاری شده است. برای حذف ساپورت‌ها از ابزارهای مکانیکی همچون دم‌باریک و انبردست استفاده شده است. نوع



کاربرد استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM در مرمت و نمونه‌سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج



ساپورت‌ها به گونه‌ای است که در قسمتی‌هایی به بخش ظریف بدنه اصلی چسبیده و در حین جداسازی، به اثر نیز آسیب می‌رساند (شکل ۱۷). لذا تصمیم گرفته شد که نمونه دیگری با تنظیمات دقیق‌تر و در نرم‌افزار اسلایسر Simplify3D چاپ شود. این نرم‌افزار نوعی نرم‌افزار مدیریت چاپگر سه‌بعدی است و ساپورت‌گذاری‌ها را به صورت هوشمندانه در زوایه‌های مورد نیاز قرار می‌دهد (شکل ۱۸).

با تغییر قطر نازل از $mm\ 4/0$ به $mm\ 3/0$ و کم کردن مقدار ساپورت‌ها در نرم‌افزار Simplify3D، این بار بعد از چاپ مدل سه‌بعدی کیفیت بهتری از مجسمه چاپ شد (شکل ۱۹).

جداسازی ساپورت‌ها تا جایی که ممکن بود با فشار کم و به صورت دستی انجام شده است. برای بخش‌های حساس و ظریف ساپورت‌ها با نهایت دقت و با استفاده از تیغ بیستوری و قیچی حذف شده‌اند. پس از حذف کامل، آثار به جا مانده از وجود ساپورت‌ها، روی بدنه اصلی قطعه باقی‌مانده بود که با استفاده از هیتر جت و با گرمای ملایم از بین رفتند (شکل ۲۰).

۹- بحث در یافته‌های تحقیق

استفاده از فناوری سه‌بعدی در حوزه علوم میراث فرهنگی از قبیل باستان‌شناسی، موزه‌داری و مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی رو به رشد است. اما بررسی تمام وجوه آن از منظر مزایا و معایب بسیار ضروری است. در پی مطالعات صورت گرفته، چندین مورد به عنوان مشکلات اصلی مطرح شده‌اند که به هر یک از آن‌ها به اختصار اشاره شده است:

- ۱- حفظ پایداری اثر در دست مطالعه و کاهش درصد خطا در حین انجام کار.
- ۲- انجام مراحل به صورت روشمند و کمترین دخل و تصرف و لمس اثر مورد نظر.
- ۳- افزایش دقت و ظرافت در اجرای تزیینات، اشکال هندسی خاص و نامتقارن و نقوش احتمالی موجود که در اثر شکستگی از بین رفته‌اند.
- ۴- امکان اجرای چندین طرح پیشنهادی، اصلاح یا تکرار طرح در زمان کوتاه و در نهایت ارائه بهترین نمونه.
- ۵- صرفه بودن از لحاظ زمان و هزینه نسبت به روش‌های سنتی.
- ۶- ایجاد عدم تعادل وزنی؛
- ۷- جلوگیری از اشتباهات رایج و ناخواسته مرمتگر در برابر اشیای حساس دارای اشکال ظریف و پیچیده همچون عاج.
- ۸- عدم نگرانی از برهم کنش‌های شیمیایی احتمالی موجود به دلیل بی‌اثر بودن ماده انتخابی و اتصال اجزای مختلف اثر با استفاده از رزین‌های برگشت‌پذیر و ایجاد لایه پرایمر در هنگام بازسازی قسمت‌های مفقودی اشیای تاریخی.
- ۹- میسر بودن استفاده از منابع دیجیتال و نمایش به صورت سه‌بعدی در قالب نرم‌افزار یا ویدیوها در

رسانه‌ها.

فناوری‌هایی که وارد رشته‌های خاص می‌شوند، دارای محدودیت‌هایی هستند. چاپگرهای سه‌بعدی همچون چاپگر FDM نیز در مرمت اشیای تاریخی-فرهنگی از این امر مستثنی نیستند. از مهمترین محدودیت‌ها، محدود بودن مواد در دسترس چه از نظر تنوع ماده (بافت و جنس) و چه از نظر رنگ‌بندی است. در جریان ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای تاریخی، 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، حتماً به رتوش کاری رنگی نیاز خواهد بود. همچنین می‌توان به خطاهای ابزاری حین اجرای مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپ آن اشاره کرد که در کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است.

فناوری چاپگر سه‌بعدی به روش FDM در مقایسه با سایر فناوری‌های چاپ سه‌بعدی دقت کمتری دارد. بنابراین نسبت به چاپگرهای دیگر برای نمونه‌سازی اشیای ظریف و با جزئیات زیاد مناسب نیست ولی با تنظیمات دستی در نرم‌افزارهای مدیریت چاپ و با نازل‌های ۰,۳ به پایین می‌توان کیفیت چاپ را بهبود بخشید. در اشیای نمونه‌سازی شده با چاپگر سه‌بعدی به روش فناوری FDM بخش‌هایی از ساپورت نگهدارنده و خطوط لایه‌ای قابل مشاهده است، بنابراین برای رسیدن به یک سطح صاف نیاز به پرداخت دارد، همچنین مواد پلیمری مصرفی در چاپگرهای سه‌بعدی اگر برای مدت طولانی در معرض نور آفتاب قرار گیرند، به مرور زمان خواص مکانیکی و ویژگی‌های ظاهری آن‌ها ضعیف می‌شود؛ لذا برای ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود اشیاء در محیط موزه‌ای مناسب است. به دلیل ناشناخته بودن تقریبی این فناوری، تعداد افراد حاذق برای اجرای کار به‌ویژه در زمینه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی چندان زیاد نیست. انجام هرگونه اقدامات تکمیلی برای ساخت مولاژ و قسمت‌های مفقود بر روی نمونه چاپ شده جهت مطابقت با بدنه اشیاء نیز نیاز به مهارت دارد. در حقیقت مؤفقت یک طرح در بازسازی قسمت مفقود و ساخت مولاژ با فناوری‌های نوین سه‌بعدی‌ساز، با فرآیندهای برداشت صحیح و دقیق شیء، طراحی و انجام عملیات تکمیلی بر روی داده‌های دیجیتالی به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بعدی‌ساز، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب، در کنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرآیند چاپ سه‌بعدی و در نهایت عملیات اتصال و رتوش نهایی ارتباط مستقیمی دارد (رازانی و همکاران ۱۳۹۷). با توجه به مزایا و محدودیت‌های ذکر شده و اقدامات انجام گرفته در این مقاله جهت ساخت مولاژ و بازسازی قسمت‌های مفقود اشیای حساس همچون عاج با چاپگر FDM و در مقایسه با روش‌های سنتی، می‌توان گفت این روش‌ها توانایی بسیار زیادی در مطالعات و پروژه‌های اشیاء موزه‌ای و اشیاء حساس تاریخی هنری همچون عاج و مجسمه‌های تاریخی-فرهنگی دارند.



کاربرد استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و چاپگر سه‌بعدی FDM در مرمت و نمونه‌سازی از اشیاء تاریخی-فرهنگی ساخته شده از عاج

۱۰- نتیجه گیری

امکان سنجی استفاده از فناوری‌های نوین سه‌بعدی جهت دستیابی به روش مناسب برای بازسازی قطعات مفقود و ساخت مولاژ با استفاده از تجهیزات موجود با کمترین دخالت ممکن از مهم‌ترین اهداف این پژوهش بوده است. با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه نمونه‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده است و فراهم بودن این گونه فناوری‌ها در کشور، امروزه بستر مناسبی جهت ورود تجهیزات به علوم میراث فرهنگی پدید آمده است. در پژوهش حاضر با در نظر داشتن حجم زیاد مفقودی اثر و عدم سوار شدن قطعه چاپ شده، با استفاده از روش بازسازی دیجیتال سه‌بعدی‌سازی با توجه به تصاویر موجود مدل‌سازی با نرم‌افزار زی‌براش و چاپ با چاپگر سه‌بعدی FDM جهت ساخت مولاژ تصمیم به ساخت مولاژ گرفته شد. یافته‌های پژوهش نیز نشان می‌دهد استفاده از تجهیزات سه‌بعدی در جهت نمونه‌سازی سریع می‌تواند برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ از اشیای عاجی بسیار کارآمد و نتیجه‌بخش باشد. عملکرد این فناوری‌ها در مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی برای بازسازی قسمت‌های مفقود و ساخت مولاژ اشیای عاجی خلاصه نمی‌شود و می‌توان برای ساخت مولاژ از اشیاء، نقش برجسته‌ها و نقوش صخره‌ای، آثار ارزشمند تاریخی و همچنین بازسازی قسمت‌های مفقود آثار تخریب‌شده نظیر آثار فلزی، استخوان و شاخ، مروارید و صدف و جواهرآلات ارزشمند از این روش استفاده کرد. پیشنهادهایی که می‌توان برای مطالعات آینده داد، بررسی و ارزیابی فیلامنت‌های چاپگر FDM است و همچنین انتخاب بهترین ماده‌ای که سازگاری مناسب با اشیای دارای مفقودی و شرایط محیطی آن را داشته باشد. مطالعه در مورد چگونگی چسبندگی و به‌کارگیری مواد پلیمری بر روی آثار تاریخی از دیگر موارد پیشنهادی است.

۱۱- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از دانشگاه هنر اسلامی تبریز برای فراهم نمودن مراحل انجام تحقیق و از مؤسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد بدلیل در اختیار نهادن نمونه اثر عاجی و همچنین از سرکار خانم فاطمه صحتی، جناب آقای یاسین صدقی، مهندس کیهان عبداللّهی ماکویی و مهندس قیصری را دارند.



منابع

- آرشیو کاخ موزه سعد آباد، (بی تا)، « گزارش مرمت عاج های تزئینی کاخ موزه ملت»، گزارش کار.
- بهرام پور، شیما و کریمی، امیرحسین، (۱۳۹۵)، « کاربرد چاپگر سه بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه ای»، مرمت و معماری ایران، (۱۲)، ۶، ۱۱۵-۱۲۶.
- رازانی، مهدی، بخشنده فر، حمیدرضا، توکلی، اصغر و نصیرزاده، بهناز، (۱۳۸۹)، «نگاهی به جعل میراث فرهنگی در ایران»، مرمت و پژوهش دو فصلنامه مرمت اشیاء فرهنگی و بناهای تاریخی، (۸)، ۴، ۲۲-۷.
- رازانی، مهدی، حدادیان، محمدعلی و پورعباس، صفر، (۱۳۹۵)، «استفاده از فناوری های نمونه سازی سریع در بازسازی بخش های مفقود آثار شیشه ای با رویکرد استفاده در شیشه های تاریخی»، مرمت و معماری ایران، (۱۲)، ۶، ۱۰۱-۸۵.
- رازانی، مهدی، حدادیان، محمدعلی و پورعباس، صفر، (۱۳۹۷)، «استفاده از فناوری های نوین نمونه سازی در بازسازی بخش های مفقود سفالینه های باستانشناسی»، پژوهش های باستان شناسی ایران، (۱۸)، ۸، ۱۹۳-۲۱۲.
- عبدالله خان گرچی، مهناز، (۱۴۰۰)، تیر (۲۷)، «مصاحبه ای در رابطه با بازسازی گاو شاخدار از جنس عاج موجود در ویترین موزه ایران باستان»، (جلیل، اسمعیل نژاد تیمورآبادی، مصاحبه کننده).
- نیک نام، مهدی، (۱۳۹۰)، «بررسی ساختاری آثار عاج کنده کاری شده پیش از تاریخ، به منظور ارائه طریق حفاظت و مرمت»، کارشناسی ارشد، عبدالله خان گرچی، مهناز و حصاری، مرتضی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی. دانشکده هنر و معماری.
- نیکنامی، کمال لدین و میراشه، زهرا، (۱۳۸۴)، «استفاده از مدل های مجازی سه بعدی رایانه ای در بازسازی نیایشگاه ساسانی بندیان درگز»، پژوهش های باستان شناسی و مطالعات میان رشته ای، ۲۲-۳۰.



کاربرد استفاده از
مدل سازی سه بعدی و
چاپگر سه بعدی FDM
در مرمت و نمونه سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج



- Alconada, B. (2017). Informe de Intervención de la escultura Cristo en la cruz perteneciente a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando . Madrid: Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.
- Antlej, K., Celec , K., Sinani, M., Mirtič , E., & Ljub, D. (2012). Restoration of a stemmed fruit bowl. Преглед НЦД, 21, 141-146.
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A., & Scopigno, R. (2012). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. Journal of Cultural Heritage, 14(4), 332-345.
- Baker, B., Jacobs, R., Mann, M., Espinoza, E., & Grein, G. (2020). Identification Guide for Ivory and Ivory Substitutes. Washington DC CITES Secretariat.
- J. Barreau, 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, arXiv preprint arXiv:1412.1330.
- Bisht, A. (2010). Conservation Of Textiles Bone and Ivory. New delhi Agam Kala Prakashan.
- Chena, Y., Hana, X., Okadab, M., & Chenc, Y. (2008). Integrative 3D modelling of complex carving surface. Computer-Aided Design, 40(1), 123-132.
- Chu, Y., Meyers, M., Wang, B., Yang, W., Jung, J., & Coimbra, C. (2015). A Sustainable Substitute for Ivory: the Jarina Seed from the Amazon. Scientific Reports, 5(1), 1437.
- Cui, F., Wen, H., Zhang, H., MA, C., & Li, H. (1994). Nanophase hydroxyapatite-like crystallites in natural ivory. materials science letters, 13, 1042-1044.
- Espinoza, E., & Mann, M. (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., Crescenzo, F., Persiani, F., Benazzi, S., & Gruppioni, G. (2008). 3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull. Rapid Prototyping Journal, 14(5), 318-324.
- Koska, B. (2011). Using unusual technologies combination for madonna statue replication. Geoinformatics, 6, 220- 227.

- Lin, T., Chang, H., & Hu, S. (2013). 3D Reconstruction of Intricate Objects using Planar Cast Shadows. In ACM SIGGRAPH 2013 Posters, pp.1-1.
- Locke, M. (2013). Bone, Ivory, and Horn: Identifying Natural Materials. Atglen, Pennsylvania, United States Schiffer.
- Locke, M. (2008), Structure of ivory, Morphology, 269 (4), 423-450.
- Marroquim, R., Sá, A., Rodrigues, K., Balbio, V., and Zamorano, R. (2017). Digitising Ivory Artefacts at the National History Museum in Brazil. EUROGRAPH-ICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage, 11-18.
- Museo Arqueológico Nacional. (2018, September 7). Retrieved from <http://www.man.es/man/coleccion/ultimas-restauraciones/figura-marfil.html>
- Owen, R. (1856). Ivory and the teeth of commerce. Journal of the Royal Society, 5, 65-71.
- Pixologic Team. (2009, 01 15). Retrieved 05 03, 2010, from [online] <http://www.pixologic.com/zbrush/downloadcenter/>
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., & Pingi, P. (2011). 3D Scanning the Minerva of Arezzo. Ichim, 2, 1-5.
- Robert, B, and Faltermeier, (2014), An Easy Guide to Care for Sculpture and Antique Art Collections, In Ivory, Bone and Related Materials, by I.M Godfrey, 55-59. Switzerland Springer, Cham.
- Schilling, R., Jastram, B., Wings, O., Schwarz-Wings, D., & Issever, A. (2013). Reviving the Dinosaur: Virtual Reconstruction and Three-dimensional Printing of a Dinosaur Vertebra. Radiology, 270(3), 864-871.
- Scopigno, R., Callieri, M., Cignoni, P., Corsini, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Ranzuglia, G. (2011). 3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization. 44(7), 48-55.
- Spencer, S. (2008). ZBrush Character Creation: Advanced Digital Sculpting. Indianapolis: Wiley Publishing Inc.
- Stiles, D. (2004). The ivory trade and elephant conservation. Environmental Conservation, 31(4), 309-321.
- Styliani, S., Fotis, F., Kostas, K., & Petros, P. (2009). Virtual museums, a survey and some issues for consideration. Journal of Cultural Heritage, 10(4), 520-528.



کاربرد استفاده از
مدل سازی سه بعدی و
چاپگر سه بعدی
FDM در مرمت و نمونه سازی
از اشیاء تاریخی-
فرهنگی ساخته شده از
عاج