

استفاده از فناوری‌های نمونه‌سازی سریع در بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای با رویکرد استفاده در شیشه‌های تاریخی

مهدی رازانی* محمدعلی حدادیان** صفر پورعباس***

چکیده

با اینکه امروزه تکنولوژی‌ها و روش‌های نگهداری منجر به حفاظت بهتر از اشیای شیشه‌ای تاریخی و فرهنگی شده است؛ همچنان به توسعه روش‌های کم‌خطر در اقدامات حفاظتی نیازمندیم. هدف از این تحقیق، تشریح فرایند استفاده از فن‌آوری‌های نمونه‌سازی سریع از جمله: اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای و همچنین تعیین مزیت‌ها و معایب روش پیشنهادی نسبت به روش‌های معمول (مانند قالب‌گیری از بخشی مشابه قسمت مفقود و ریخته‌گری آن با رزین) جهت به‌کارگیری آن در مرمت و بازسازی شیشه‌های تاریخی است. در راستای بررسی فناوری‌های معرفی شده، یک نمونه شیشه مطالعاتی دارای نقوش برجسته که بخشی از آن مفقود بود، انتخاب گردید و با کمک اسکنر لیزری، نقشه‌های سه‌بعدی از سطح نمونه و تبدیل آن به داده‌های قابل استفاده برای چاپگر سه‌بعدی تهیه شد. در ادامه، با بهره‌گیری از روش تحقیق تجربی در قالب نمونه‌سازی، نمونه‌های بازسازی شده، آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، قطعه مفقود و چاپ سه‌بعدی شده تحلیل شد و سپس به شیشه اصلی وصالی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از فناوری‌های مدل‌سازی سریع به‌عنوان روشی نو می‌تواند تا حد زیادی در رفتار کم‌خطر حفاظتی نسبت به شیشه‌های باستانی مفید باشند. چراکه از مزیت‌هایی از قبیل: سرعت و دقت در بازسازی قطعات مفقود، تکثیر تمامی اثر به تعداد دلخواه، اندازه‌برداری غیر تماسی ابعاد اثر با دقت و سرعت بالا، امکان ارسال فایل نرم‌افزاری قطعه مفقود شده به دیگر مراکز پژوهشی، امکان ساخت قطعه مفقود به شکل اولیه و به‌صورت کاملاً مشابه یا متفاوت با قطعه اصلی، امکان اتصال موقت قطعه ساخته شده به بدنه اصلی اثر که اصل برگشت‌پذیری در حفاظت را پوشش می‌دهد، برخوردارند. از جمله محدودیت‌های این روش‌ها: تکرنگ بودن فعلی قطعه چاپ شده، محدود بودن جنس و شفافیت رشته‌های پلیمری مورد استفاده جهت ساخت قطعه، خطاهای ابزاری در مرحله اسکن و چاپ سه‌بعدی و همچنین نیاز به اپراتور ماهر برای بازسازی سطوح مفقود شده در نرم‌افزار سه‌بعدی است.

کلیدواژگان: آثار شیشه‌ای، حفاظت - مرمت، بازسازی، اسکنر سه‌بعدی، چاپگر سه‌بعدی.

مقدمه

حفاظت آثار و بناهای تاریخی در سراسر جهان سابقه‌ای طولانی دارد و در رابطه با آن تعابیر و تعاریف بسیاری ارائه شده است؛ به نحوی که یوکیلهتو^۱ حفاظت را مفهومی کلیدی، حاکی از فرایندی که مشتمل بر انواع عملیات لازم برای صیانت از میراث فرهنگی^۲ (اثر، سازه، محوطه) است، می‌داند (یوکیلهتو، ۱۳۸۷: ۳۴۷). ارسبانی (۱۳۹۴)، در یک اختصار معنادار حفاظت را فرایند مدیریت تغییرات تعبیر می‌کند). هدف حفاظت که در واقع، تمامی اقدامات مرمت و نگهداری را شامل می‌شود: تأمین کیفیت و ارزش‌های یک منبع، حفظ جوهره ماده و تضمین تمامیت آن برای نسل‌های آینده است. در همین راستا ثابت شده است بهترین سیاست در امر حفاظت از آثار باستانی، حداقل دخالت مؤثر در زمان انجام مداخله و اقدامات فنی و پیشگیری قبل از وقوع صدمات است (فیلدن و یوکیلهتو، ۱۳۸۶: ۸۳). امروزه حفاظت و مرمت بر مبنای چند اصل قاطع و پذیرفته شده، در سطح بین‌المللی انجام می‌پذیرد که عبارت‌اند از: **مطالعه مقدماتی**؛^۳ برای ایجاد ضرورت و ماهیت مداخله، براساس یک دانش کامل از آثار هنری. افزایش علم به مواد و اعمال درک ایجاد شده، **مستندنگاری**؛^۴ برای ثبت مداخلات و همه اطلاعات مرتبط و قضاوت در رابطه با انتخاب‌های حفاظتی، **برگشت پذیری**؛^۵ برای آنکه قادر به جبران آنچه انجام داده‌ایم، باشیم و بتوانیم بدون آسیب، آثار هنری را دوباره به حالت قبلی بازگردانیم، **پایداری / سازگاری**؛^۶ برای اطمینان از دوام مواد به کار گرفته شده و احترام به مواد اصلی و در نهایت، **خوانایی**؛^۷ برای نشان دادن بخش‌های افزوده شده و تغییرات ایجاد شده از طریق مداخله، بدون مختل نمودن همگنی کل اجزای سازنده اثر (Pallot & Frossard, 2012). این اصول در زمینه اکثر آثار فرهنگی و یادمان‌های تاریخی به‌عنوان خط‌مشی قابل‌تعمیم‌اند که از آن قبیل: حفاظت از شیشه‌های تاریخی را می‌توان بیان نمود. عوامل مختلف - فیزیکی و مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی - مهم‌ترین علل تخریب شیشه‌های تاریخی محسوب می‌شوند و نتیجه این عوامل آسیب‌هایی از قبیل: ترک‌ها، شکستگی‌ها و در نهایت بروز بخش‌های مفقود در این آثار است. (Davison & Newton, 2008). از این رو، حفاظت و بازسازی این قبیل آثار جهت صیانت و پایداری میراث فرهنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا هنگامی که بخش مفقود اشیای میراث فرهنگی به‌خصوص شیشه‌های تاریخی نقش سازه‌ای در ساختمان اثر داشته و باعث پایداری و ایستایی شی می‌گردند؛ ضرورت دارد حفاظت‌گران بخش‌های مفقود

را که از لحاظ جنبه‌های زیباشناختی و سازه‌ای در ارتقای ارزش‌های مادی و بصری اثر تأثیرگذارند، با استفاده از روش‌های کم‌خطر و غیرتخریبی بازسازی نمایند. در این جهت، استفاده از روش‌های غیرتماسی و جدیدی که بتوان بدون استفاده از فرایندهای سنتی قالب‌گیری بخش مفقود اثر را بازسازی نمود؛ اولویت دارد. طی چند سال گذشته بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اسکنر لیزری و چاپگر سه‌بعدی جهت ساخت مدلی سه‌بعدی و مجازی از اشیاء و ارتقای آن مدل مجازی در نرم‌افزارهای سه‌بعدی ساز کامپیوتری نتایج موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های ثبت، مستندنگاری - آسیب‌نگاری و کپی‌برداری میراث فرهنگی به دنبال داشته است. هدف از این تحقیق، به کارگیری فناوری‌های نمونه‌سازی سریع از جمله: اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای و امکان‌سنجی روش یادشده جهت به کارگیری آن در مرمت و بازسازی شیشه‌های تاریخی است.

از مهم‌ترین سؤالاتی که این تحقیق براساس آنها شکل گرفته این است: چگونه می‌توان از فناوری‌های نمونه‌سازی سریع در بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای تاریخی - فرهنگی استفاده نمود؟ کدام‌یک از روش‌های مرسوم اسکن و چاپ سه‌بعدی برای مرمت آثار شیشه‌ای مناسب است؟ و بازسازی بخش‌های مفقود در آثار شیشه‌ای با استفاده از روش‌های مذکور چه مزایا و معایبی نسبت به روش‌های معمول دارد؟

پیشینه پژوهش

الف. روش‌های مرسوم بازسازی قطعات مفقود در شیشه‌های تاریخی

شیشه‌های تاریخی در اثر سه عامل بسیار مهم دچار آسیب و در نهایت، تخریب می‌شوند: ۱. آسیب فیزیکی^۸ (شکندگی شیشه با شوک‌های مکانیکی و حرارتی، خواص ذاتی، سایش و درمان‌های قبلی). ۲. امراض و نهشت‌های سطحی^۹ (نشست و رسوب مواد خارجی از منابع مختلف ناشی از استفاده کردن، پسماندهای در طول دفن، لکه‌های ناشی از محصولات خوردگی فلز و ...، استفاده بیش از حد از مواد حفاظتی و آلودگی هوا). ۳. فرسودگی شیمیایی^{۱۰} (قوس و قزحی شدن، پوسته و حفره‌ای شدن، حل شدن شبکه، تبادل یونی (Davison & Newton, 1971: 168-171)، (تصویرهای ۱ و ۲).

به لحاظ تاریخی، مرمت اشیاء و آثار شیشه‌ای آنچنان که باید مسئله توسعه‌یافته‌ای نبوده است؛ چراکه طبیعت شفاف و شکننده شیشه، یافتن موادی برای وصالی اجزای شکسته شده و بازسازی قطعات مفقود، آن را مشکل می‌نموده است (Ibid). در درمان‌های اولیه برای بازسازی بخش‌های مفقود از مواد

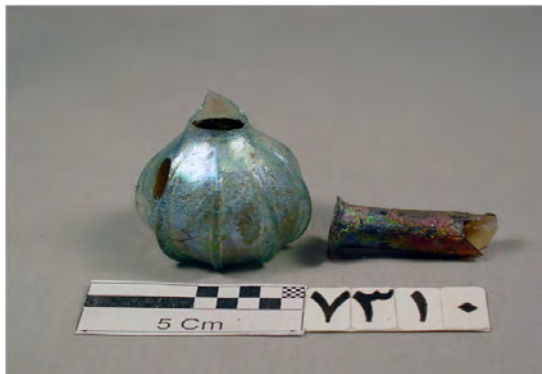
سه‌بعدی و چاپ سه‌بعدی در راستای استفاده بهینه از آنها در حفاظت و بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای با رویکرد استفاده در شیشه‌های تاریخی و فرهنگی پرداخته شده است.

ب. استفاده از روش‌های مدل‌سازی سریع در بازسازی قطعات مفقود میراث فرهنگی

سه‌بعدی سازی به‌عنوان بخشی از حوزه وسیع گرافیک کامپیوتری، پدیده‌ای است که به ارائه شبیه‌سازی ریاضی سطوح در یک ساختار هندسی - فضایی می‌پردازد. تمامی فناوری‌های سه‌بعدی سازی، از جمله روش‌های دیجیتالی گرافیک کامپیوتری فضایی، که ما با آنها در ارتباط هستیم، در این دو بخش می‌توانند قرار گیرند: بخش نرم‌افزار (مدل‌سازهای سه‌بعدی،^{۱۵} نمایش‌دهنده‌های سه‌بعدی^{۱۶}) و بخش سخت‌افزار (اسکنرهای سه‌بعدی، چاپگرهای سه‌بعدی) که هدف آنها بهبود ارتباط میان آثار و یا فهم بصری از برخی فرایندهاست. اگر پیش‌تر در رابطه با نمونه‌سازی سریع^{۱۷} صحبت می‌شد، با این روش‌ها می‌توان، در رابطه با ساخت سریع^{۱۸} بحث کرد. نمونه‌سازی سریع را می‌توان نوعی مهندسی معکوس، به معنی به‌کارگیری فناوری برای تبدیل ابعاد هندسی نمونه به داده دیجیتالی، برای ساختن مدل هندسی قطعه دانست (Fischer, 2000: 27-38).



تصویر ۱. شیشه تاریخی دچار آسیب پوسته‌های سطحی و تبادل قلیایی (آرشیو موزه ارومیه)



تصویر ۲. شیشه تاریخی شکسته‌شده با قطعات مفقود (آرشیو موزه ارومیه)

آکرلیک شفاف و تُردی همانند پرسفکس^{۱۱} که با استفاده از دما شکل‌دهی شده و بعد برش می‌خورد؛ استفاده می‌کردند. این روش، مزایایی داشت از جمله: شفافیت قطعه که تنها طی زمان دچار تغییر رنگ جزئی و شکنندگی می‌گشت. در عین حال، فرایندی وقت‌گیر بود و جایگذاری آن به‌خوبی و متناسب با شیشه اصلی انجام نمی‌شد. در ادامه از رزین‌های پلی‌اورتان، اپوکسی (شفاف)، استرهای سیانواکریلات، پلی‌استر و آکرلیک (رزین‌های متاکریلات) به‌علاوه مواد رنگ‌زا برای استخراج رنگ در شیشه‌های رنگی و همچنین لاک برای دادن جلای سطحی استفاده شد (Karayannidou et al., 2006).

با اینکه رزین‌های مذکور در دمای محیط با انقباض کم و یا بدون آن در محل پلیمریزه می‌شوند، اما این نوع بازسازی در عمل شامل تداخل و اتصال با شیشه اصلی و به‌کارگیری روش‌های قالب‌گیری (قالب‌هایی از گل کوزه‌گری^{۱۲} و پلاستیسین^{۱۳}، آلوپلاست^{۱۴}، موم دندان پزشکی، قالب سیلیکونی) و فرایندهای ریخته‌گری بود (Davison & Newton, 2008). هوگان (1993) و کوب (2090)، رهیافت‌های آینده حفاظت و مرمت بخش‌های مفقود شیشه‌های فرهنگی را مبتنی بر استفاده از مواد قابل جدایش می‌دانستند.

امروزه در برخورد با آثار شیشه‌ای تاریخی وابسته به ماهیت شیء از لحاظ قدمت و ارزش‌های آن اگر حفاظت گران نیاز به انجام عملیات حفاظتی - اقدامات مرمتی؛ از جمله بازسازی بخش‌های مفقود را تشخیص دهند، عموماً فرایندهای رایج و سنتی قالب‌گیری با مواد مختلف از قبیل موم دندان پزشکی و یا رزین‌های سیلیکونی از شیء به‌کار می‌رود. به‌نحوی که وابسته به حجم و پیچیدگی بخش مورد نظر از لحاظ شکل و تزئین از قالب‌گیری و تکثیر بخش مفقود براساس بخش‌های سالم و باقی‌مانده موجود استفاده می‌گردد. در بیشتر مواقع، قالب‌ها یک‌طرفه بوده و رزین بر یک سمت قالب ریخته شده، در ادامه، انجام عملیات تکمیلی در بخش ریخته‌گری شده انجام می‌شود. در موارد کمی، قطعه مفقود اثر بعد از ساخته‌شدن براساس بخش‌های موجود بدنه نصب می‌گردد که این مورد در رابطه با قطعات برجسته همانند دسته‌ها و دماغه اشیا قابل‌اجراست و در مواردی که بخش مفقود بخشی از بدنه میانی ظرف است، این کار را کمتر می‌توان انجام داد. استفاده از روش اول قالب‌گیری و ریخته‌گری روی شیء نیز همیشه با خطرات و آسیب‌هایی همراه بوده است؛ در همین ارتباط بنا بر نیاز به بازسازی قطعات مفقود و از دست‌رفته در شیشه‌های تاریخی توسعه و کاربرد روش‌هایی غیر تماسی (کم‌تماسی) و غیر مخرب همچون فناوری‌های مبتنی بر نمونه‌سازی سریع، ضرورت یافته است. در ادامه، به معرفی روش‌های اسکن

روش‌های سه‌بعدی‌سازی در یک دهه گذشته، پیشرفتی چشم‌گیر داشته‌اند و تحقیق در رابطه با آنها فرصت‌های متفاوتی در زمینه میراث فرهنگی به‌وجود آورده است. سیستم‌های چاپگر سه‌بعدی بیشتر در زمینه‌های فنی مهندسی، پزشکی، طراحی صنعتی و معماری کاربرد داشته است. درباره موضوع میراث تاریخی و فرهنگی می‌توان گفت اگرچه از فناوری‌های مبتنی بر سه‌بعدی‌سازی دقیق در پایش، ثبت، مستندنگاری و آسیب‌نگاری و همچنین واکنش‌های تخریبی و تعمیراتی در کنار بازسازی مجازی بناها و آثار تاریخی (Pedersini et al., 2000; Santagati et al., 2013; Forte, 2014)، به‌وفور استفاده شده اما در حوزه بازسازی آثار تاریخی-فرهنگی که شاید یکی از قابلیت‌های مهم این عرصه باشد کمتر به‌صورت توسعه‌یافته به‌کار گرفته شده است. (Antle et al., 2001-A).

استفاده از پرینت سه‌بعدی برای توسعه پایدار با استفاده از بازیافت

اگرچه پیش‌تر در زمینه استفاده از اسکن‌ها 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 (امور پایگاه‌های میراث فرهنگی کشور، ۱۳۹۴)؛ اما سندی مبنی بر استفاده از این تکنولوژی در راستای بازسازی بخش‌های مفقود و یا ساخت مولاژها و کپی‌ها در میراث فرهنگی کشور گزارش نشده است. تجربیات در رابطه با استفاده تلفیقی از تکنولوژی‌های اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای ایجاد تصاویر سه‌بعدی مجازی، بازسازی قطعات مفقود اشیای تاریخی - فرهنگی و همچنین ساخت کپی از آنها

چندان نیست. آنتلج و همکاران (2011) از ترکیب روش‌های اسکن سه‌بعدی و مدل‌سازی کامپیوتری اثر و در ادامه استفاده از چاپگر سه‌بعدی، اقدام به ساخت کپی‌هایی از مجسمه‌ای مرمری^{۱۹} و یک نقش برجسته پلی‌کروم روی چوب^{۲۰} مربوط به دوران گوتیک (۱۵۱۰ م.) نموده‌اند. در موزه ملی اسلوانی نیز تجربیاتی در رابطه با بازسازی بخش‌های مفقود قطعات سرامیکی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی گزارش شده است (Ibid)، (تصویر ۳).

مبانی نظری روش‌های نمونه‌سازی سریع و ویژگی‌های آن

با پیشرفت صنعت و فناوری نوین در تکنولوژی ساخت و تولید، روش‌های جدیدی برای ساخت قطعات مختلف ابداع شد. نمونه‌سازی سریع از جدیدترین تکنولوژی روز جهان است که از سال ۱۹۹۰ شرکت‌های آمریکایی، آلمانی و ژاپنی سرمایه‌گذاری چشمگیری را به این تکنولوژی اختصاص داده‌اند. نمونه‌سازی سریع، به روشی گفته می‌شود که در آن می‌توان مدلی فیزیکی را در زمان کوتاهی از روی مدلی رایانه‌ای ایجاد کرد. با استفاده از این روش، طراح می‌تواند مدلی فیزیکی واقعی از ایده خود یا کپی قطعه اسکن شده را در حداقل زمان بسازد و علاوه بر تصاویر دوتبعی، مدل سه‌بعدی را نیز برای بررسی‌های بیشتر در اختیار داشته باشد.

با داشتن مدل فیزیکی واقعی می‌توان ایده خود را مستقیم و واقعی به کاربران و تولیدکنندگان نشان داد یا می‌توان مدل ساخته‌شده را آزمایش و از نظر ابعادی مطالعه کرد. امروزه قابلیت این روش از حد نمونه‌سازی فراتر رفته است (رحمتی و همکاران، ۱۳۸۴). در نمونه‌سازی سریع، قطعات



تصویر ۳. حفاظت و بازسازی یک ظرف چینی با استفاده از چاپ سه‌بعدی قطعه مفقود (موزه ملی اسلوانی) (Antle et al., 2012-b)

- از یک مدل CAD موجود ۵. ایجاد یک مدل CAD جدید؛
- ایجاد فایل STL^{۲۷} از مدل سه بعدی تهیه شده؛
 - لایه بندی: نرم افزار دیگری همانند CURA، مدل را لایه لایه (باتوجه به ضخامت لایه ها) می گرداند؛
 - ساخت تکیه گاه: لایه ها در قسمت هایی از قطعه که زیر آنها خالی باشد، به تکیه گاه نیاز دارند؛
 - ساخت قطعه: براساس فایل ساخت و با اضافه شدن مواد روی هم و شکل گیری لایه به لایه ساخته می شود؛
 - پس پردازش: شامل یکی از عملیات های افزایش استحکام قطعه، تکمیل عملیات فرآوری و یا پرداخت قطعه می شود (رحمتی و همکاران، ۴۸۳۱: ۳۹-۰۹)، (تصویر ۴).

کاربرد اسکن سه بعدی در مستندنگاری و ثبت میراث فرهنگی

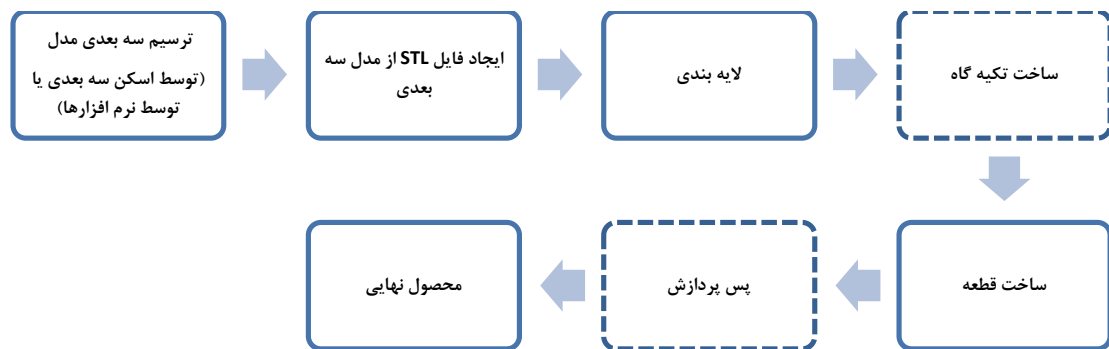
اندازه برداری دقیق قطعه از بخش های مهم در مهندسی معکوس و نمونه سازی، سریع است. امروزه به کمک فن آوری غیر تماسی اندازه برداری سه بعدی، توسط اسکنرهای نوری، دقت و سرعت اندازه برداری افزایش یافته است. دستگاه اسکنر سه بعدی^{۲۸} با برداشت اطلاعات از قطعات موجود، یک فایل کاملاً دقیق و سه بعدی از قطعه را در اختیار قرار می دهد. در این روش با اسکن بخش به بخش قطعه مورد نظر و انتقال اطلاعات به نرم افزار، حجم قطعه به صورت مجازی در رایانه ساخته می شود. انواع سیستم های اندازه برداری غیر تماسی در جدول ۱ آورده شده است.

به کارگیری چاپگرهای سه بعدی در بازسازی بخش های مفقود

بنا بر کاربرد روش های مدرن اسکن و چاپ سه بعدی در علوم پزشکی برای ساخت اندام مصنوعی و بافت های از دست رفته، همچنین کاربردهای مهندسی آن در صنایع هوافضا و خودروسازی در ساخت ژنراتور الکتریکی، و نیز

را با استفاده از فرایند افزایشی لایه لایه می سازند که در نتیجه، سریع تر از برداشتن یا کاهش مواد است در این فرایند ساخت بدون اعمال فشار و تنش انجام می شود. لذا، محدودیت های روش های موجود ماشین کاری را ندارد و هر شکل پیچیده ای را با دقت و کیفیت بالا می توان تولید کرد (King & Tansey, 2002: 313-317). از مواد مختلف پلیمری و حتی فلزی برای ساخت مدل ها در نمونه سازی سریع استفاده می شود، با پیشرفت های صورت گرفته در این فناوری، نمونه سازی سریع به عنوان نوعی فرایند استاندارد صنعتی پذیرفته شده است (Colombo et al., 2006). صرف نظر از خواص مکانیکی، مواد مدل می تواند شامل ویژگی های دیگری از قبیل رنگ پذیری، شفافیت، انعطاف پذیری و امثال آن باشد. از مهم ترین مزایای نمونه سازی سریع که می توان به آنها اشاره نمود: کاهش هزینه ها و زمان تولید ساخت ابزار و یا قالب (از چند ماه به چند روز یا هفته)، کاهش خطاهای فردی به دلیل استفاده مستقیم از اطلاعات نرم افزارهای طراحی، تولید انبوه در مرحله طراحی آزمایش و رفع بسیاری از عیوب طراحی به علت کاهش زمان تولید و هزینه ها، ایجاد قابلیت تجسم،^{۲۱} تصحیح،^{۲۲} تکرار طرح،^{۲۳} بهینه سازی^{۲۴} و انجام آزمون های عملکردی^{۲۵} است. در این فرایند، اطلاعات نمونه اندازه گیری شده وارد نرم افزارهای طراحی با رایانه [CAD]^{۲۶} می شود و با منطبق کردن آرام اطلاعات نقاط سه بعدی با ساخت منحنی و سپس ایجاد سطوح و اصلاح آن انجام می شود (Shuh, 2002: 241-245; Menq & Chen, 1996: 211-225). فرایند نمونه سازی سریع به صورت کلی دارای مراحل است که با ایجاد مدل CAD موضوع مورد نظر شروع شده و به ساخت محصول نهایی منتج می شود. در مراحل نمونه سازی سریع عموماً از این الگوریتم استفاده می شود:

ترسیم سه بعدی مدل با نرم افزارها (با به کارگیری یکی از روش های: ۱. نقشه دوبعدی موجود ۲. استفاده از داده های اسکن شده ۳. استفاده از داده های دیجیتالی شده ۴. استفاده



تصویر ۴. الگوریتم مراحل نمونه سازی سریع (مراحل خط چین دار را می توان باتوجه به فرم قطعه و هدف کار حذف نمود)، (نگارندگان)

جدول ۱. مقایسه انواع سیستم‌های اندازه‌برداری غیرتماسی مرسوم

اسکنر	روش اندازه‌برداری	فناوری	ویژگی‌ها و کاربرد
اندازه‌برداری لیزری (متصل بر دستگاه اندازه‌گیری مختصاتی) ^{۳۷}	اندازه‌برداری سطحی ^{۳۸}	اسکن لیزری	کاربرد در اندازه‌برداری‌های صنعتی، ترکیبی از نور لیزر و دوربین در محفظه‌ای کم‌حجم، دقت بسیار بالا در زمان نسبتاً کم
سیستم‌های پروژکت کدگذاری نوری قابل حمل ^{۳۹}	اندازه‌برداری طولی ^{۴۰}	پروژکت کدگذاری نوری ^{۴۱}	از یک پروژکتور نور سفید یا آبی و یک یا چند دوربین تشکیل شده است که براساس قاعده مثلث‌بندی ^{۴۲} کار می‌کنند. اندازه نسبتاً کوچکی دارد و به راحتی حمل می‌شود، سرعت و دقت در اسکن سطوح نسبتاً بزرگ، غیر اتوماتیک بودن فرایند اسکن
اندازه‌برداری لیزری دستی	اندازه‌برداری نقطه‌ای ^{۴۳}	اسکن لیزری	مشاهده فوری اطلاعات دریافتی از سطح اسکن شده، اسکن سطوح پیچیده در زمان کوتاه‌تر نسبت به حالت اتوماتیک، امکان حرکات پیچیده و راحت سنسور، دقت نسبتاً کمی دارد
دستگاه‌های رومیزی	اندازه‌برداری نقطه‌ای	اسکن لیزری یا پروژکت کدگذاری نوری	جهت اسکن قطعات کوچک به‌صورت کاملاً اتوماتیک، قطعه به دستگاه فیکس می‌شود و سنسور یا ساپورت قطعه حرکت و چرخش می‌کند، اتومات بودن فرایند اندازه‌برداری، تنظیمات متنوعی برای این سیستم از دو محوره تا ۷ محوره وجود دارد
سیستم اندازه‌برداری نقطه‌ای لیزری	اندازه‌برداری نقطه‌ای	زمان حرکت ^{۴۴}	از ساده‌ترین روش‌های اسکن سه‌بعدی است، اتوماتیک بودن فرایند اندازه‌برداری، کم‌هزینه‌تر بودن نسبت به دیگر فرایندهای اتومات، زمان اندازه‌برداری طولانی و مراحل انجام کار زیاد است
سیستم‌های ویژه	ترکیبی از موارد فوق	اسکن لیزری یا پروژکت کدگذاری نوری	برای قطعه‌ای خاص یا شغلی خاص، اختصاصی‌سازی شده است. سنسورهای چندگانه و حرکات ویژه برای سنسورها طراحی شده‌اند (مانند اسکن سرتاسری بدن انسان)

(D'Apuzzo et al., 2006)

روش، بنابر عواملی همانند در دسترس بودن، دقت و سرعت اسکن، راحتی استفاده و به کارگیری دستگاه و شفاف بودن یا نیمه‌شفاف بودن نمونه اثر اسکن شده امروزه از مناسب‌ترین انواع اسکنر برای اسکن آثار شیشه‌ای و سیستم‌های پروژکت کدگذاری نوری قابل حمل است.

روش پژوهش

مقاله پیش‌رو با روش تجربی و عملی در قالب آزمون‌های آزمایشگاهی و نمونه‌سازی برای رسیدن به نمونه ایده‌آل انجام شده است. در بخش مطالعات کتابخانه‌ای، با بررسی منابع به شناخت بررسی وضعیت حفاظتی آثار شیشه‌ای، مهم‌ترین آسیب‌ها و تخریب آنها پرداخته شده و بهینه‌ترین روش اسکن و چاپ سه‌بعدی برای مرمت آثار شیشه‌ای مشخص گردید. در مرحله آزمایشگاهی با کمک اسکنر سه‌بعدی اقدام به تهیه نقشه‌های سه‌بعدی از سطح نمونه شیشه‌ای و تبدیل آن به داده‌های قابل استفاده برای چاپگر سه‌بعدی شده است. در ادامه، با انجام برخی آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، چاپ حجم سه‌بعدی قسمت مفقود در نمونه مطالعاتی انجام شد و تأثیرات نوری و رنگی آن نسبت به شیشه سنجیده و سپس بخش موردنظر به شیشه اصیل وصالی شده است. در نهایت،

در حوزه هنر و معماری برای ساخت انواع مجسمه و ماکت، این روش‌ها، بعد از تجربه‌های یادشده صلاحیت‌های لازم را برای به کارگیری در بازسازی اشیای میراث فرهنگی به دست آورده‌اند. در همین راستا، تاکنون بیش از ۳۰ روش مختلف در صنعت برای نمونه‌سازی سریع ابداع شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: استریو لیتوگرافی (SLA)^{۲۹}، تف‌جوشی انتخابی لیزری (SLS)^{۳۰}، ساخت لایه‌ای (LLM)^{۳۱}، چاپ سه‌بعدی (3DP)^{۳۲}، جاری کردن چندگانه (MJM)^{۳۳}، فرایند جاری متعدد (PolyJet)^{۳۴}، روش ترموجت (TJ)^{۳۵}، رسوب مذاب (FDM)^{۳۶}. با توجه به حجم مطالب در رابطه با معرفی روش‌ها و شیوه‌های کار در مدل‌سازی سریع در جدول ۲ به بیان مزیت‌ها و معایب برخی از مهم‌ترین آنها اشاره شده است. بنابر مزیت‌ها و معایب سیستم‌های نمونه‌سازی سریع و نیز خواص مورد انتظار از ماده مورد استفاده در بازسازی شیشه و نیز شرایط و امکانات مورد نیاز و در دسترس، می‌توان روش‌های اف‌دی‌ام و اس‌ال‌ای را برای بازسازی قطعات مفقوده آثار شیشه‌ای بهینه دانست. به دلیل هزینه بسیار روش اس‌ال‌ای و نیز در دسترس نبودن این روش برای محققان و مواردی از این دست، در این تحقیق برای ساخت و آزمون قطعات از روش FDM استفاده شده است. دلیل دیگر استفاده از این

جدول ۲. مقایسه معایب و مزیت‌های روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی سریع

روش	روش کار	مزیت‌ها	معایب
استریو لیتوگرافی (SLA)	لایه‌ها از تابش اشعه (گاما) بر روی سطحی از رزین مایع حساس به نور تشکیل می‌شوند. بین روش‌های مختلف مدل‌سازی سریع، روش SLA بهترین دقت و صافی سطح را دارد	بالاترین کیفیت سطح قطعه، سرویس‌دهی مناسب به کاربر، دارای حجم‌های ساخت متفاوت، دقت بالا، دامنه وسیع مواد	نیاز به تکیه‌گاه، نیاز به پردازش (جداکردن تکیه‌گاه و مواد زائد از قطعه)، نیاز به پخت نهایی برای جامدشدن کامل
تف جوشی انتخابی لیزری (SLS)	در این فرایند، ذرات پودر متناظر با مقطع قطعه به وسیله پرتوهای لیزر در محل ذوب شده و مطابق با طرح روی سطح به هم جوش می‌خورند و مواد مذاب جامدشده یک لایه جامد را تشکیل می‌دهد	مناسب برای ساخت مدل‌های تجسمی، قطعات کاربردی، ریخته‌گری دقیق و قالب‌های فلزی برای تیراژ پایین، دامنه وسیع مواد پایداری مناسب قطعات	تجهیزات اولیه گران‌قیمت، نور پرتو مضر لیزر برای اپراتور، مصرف بالای انرژی، ابعاد بزرگ دستگاه، پرداخت سطح نسبتاً ضعیف
ساخت لایه‌ای (LLM)	در این روش از یک پرتوی لیزر (مثل برش چاقو) برای بریدن طرحی که روی هریک از لایه‌ها در نظر گرفته شده است، استفاده می‌شود	گستره وسیع مواد (کاغذ، پلاستیک‌ها، فلزات، کامپوزیت‌ها، مناسب برای قطعات بزرگ، عدم نیاز به تکیه‌گاه، قطعه ساخته‌شده عاری از هرگونه تنش و دیگر تغییر شکل‌هاست بنابراین به پخت نهایی نیاز ندارد	نیاز به اپراتور ماهر برای تنظیم دقیق دستگاه، یکپارچگی نمونه توسط چسب و حرارت، زمان‌بری جداکردن مواد اضافی
جاری کردن چندگانه (MJM)	سرچاپگر شامل تعداد زیادی جت (بیش از ۱۰۰ عدد) است که به صورت خطی آرایش یافته‌اند. در این فرایند، مواد ترموپلیمر و آکرلیک فتوپلیمر توسط جت‌ها و متناظر با مقاطع قطعه روبالگو ریخته شده و لایه‌ها و تکیه‌گاه‌های موردنیاز را ایجاد می‌کنند	استفاده مستقیم از فایل STL برای ساخت مدل‌ها بدون آماده‌سازی قبلی، ساخت سریع و استفاده از مواد ارزان ترموپلیمر به تأسیسات خاصی نیاز ندارد زیرا سیستم تمیز، ساده، کارآمد و کوچک است، با قابلیت شبکه‌شدن، می‌توان چندین سیستم رایانه‌ای را به آن متصل نمود	حجم کوچک ساخت، محدودیت مواد، دقت نسبتاً پایین
فرایند جاری کردن متعدد (PolyJet)	مراحل انجام کار بدین صورت است: خروج رزین فوتوپلیمر از هد دستگاه، تابش هم‌زمان نور UV توسط لامپ، جامدشدن رزین و تشکیل لایه، ساخت هم‌زمان تکیه‌گاه متراکم	نازک‌ترین ضخامت لایه (۱۶ میکرون) و صافی سطح عالی، قابلیت ساخت جزئیات و ظرایف قطعات، سرعت نسبتاً بالای ساخت، امکان استفاده از مواد شفاف، ساخت قطعات از جنس مشابه ABS و PP	نیاز به ساخت تکیه‌گاه، سختی خروج تکیه‌گاه، خواص مکانیکی متوسط، هزینه خدمات متوسط، ابعاد کوچک ساخت
روش ترموجت (TJ)	مبنای چاپ موم به صورت لایه لایه و یکپارچه شدن این لایه‌ها با یکدیگر است. مراحل انجام کار عبارت‌اند از: خروج موم مذاب از هد دستگاه، سردشدن موم و تشکیل لایه، فرزکاری سطح لایه برای رسیدن به ضخامت لایه موردنظر	ساخت مدل مومی جهت ریخته‌گری دقیق، صافی سطح مناسب، ابعاد دستگاه مناسب محیط اداری	استحکام ضعیف قطعات مومی، ناپایداری در برابر حرارت، سرعت پایین ساخت، صدای بالای فرزکاری، نیاز به ساخت تکیه‌گاه
چاپ سه‌بعدی (3DP)	یک لایه پودر با ضخامت کنترل‌شده روی سطح الگو پخش می‌شود. از طریق سرچاپگر (نازل) و متناظر با اولین مقطع قطعه روی پودر چسب پخش می‌شود	سرعت و کیفیت بالا، هزینه پایین در ساخت، ساخت قطعات معیوب، مفقود و کمبود در اشیا و دستگاه‌ها، کاربرد چندگانه، سادگی کار تنها با یک اپراتور، به‌هدرنرفتن مواد اولیه و ساخت قطعات رنگی مهندسی معکوس	محدودیت در استحکام، صافی سطح نامناسب
رسوب مذاب (FDM)	در این فرایند رشته قابل‌ارتجاع (مواد ترموپلاست) گداخته‌شده از داخل نازل گرم شده بیرون می‌آید و لایه‌لایه روی قطعه به صورت طرحی که به آن داده شده می‌نشیند با ادامه این لایه‌ها قطعه موردنظر ساخته می‌شود	سادگی عملکرد، حداقل اتلاف مواد و راحتی ایجاد تغییر در آنها، جداسدن آسان تکیه‌گاه از قطعه، ساخت قطعات عملکردی (مشابه نمونه اصلی)، مواد مورد استفاده: پلی‌ونیل سولفون و پلی‌کربنات، ای بی اس ^{۴۵} (اکریلو نیتریل بوتادین استایرن) و موم	دقت محدود در مقایسه با روش SLA غیرقابل پیش‌بینی بودن انقباض

(رحمتی و همکاران، ۱۳۸۴؛ خلیل‌پور، ۱۳۸۳)

با تحلیل فرایند مذکور و یافته‌های پژوهش پیشنهاداتی برای تکرار این فرایند به پژوهشگران حفاظتی ارائه شده است.

مواد، دستگاه‌ها و روش‌های مورد استفاده

- نمونه مورد مطالعه

نمونه مورد مطالعه، سری شیشه‌ای از یک چراغ دیواری به شکل کاسه به ارتفاع 104 mm و قطر دهانه 190 mm است که دارای شیارهای تزئینی دالبری و همچنین برجسته‌گی‌های منقوشی در لبه است. بخشی از شیء مدنظر مفقود، شکستگی‌ها و ترک‌هایی داشت. ابعاد بخش مفقود (بیشترین طول 62 میلی‌متر، بیشترین عرض 38 میلی‌متر، بیشترین ضخامت 9 میلی‌متر) تقریباً به شکل مثلثی بوده که بخشی از الگوی تزئینی روی سطح شیء نیز بر آن حک بوده و از بین رفته است (تصویر ۵). بدنه شیء مورد بررسی دارای یک خط تقارن بوده و نقوش روی آن علی‌رغم شباهت ظاهری و تکراری بودن، تقارن چندانی ندارد. نظر به اینکه ضخامت دیواره متغیر است، این امر بر مشکلات تصحیح نرم‌افزاری تصاویر برآمده از اسکن لیزری می‌افزاید.

اسکنر سه‌بعدی

اسکنرهای سه‌بعدی برحسب دقت و لیزر استفاده‌شده در آنها به دو دسته اسکنرهای دقیق و اسکنرهای متوسط تقسیم‌بندی می‌شوند. از اسکنرهای دقیق برای اسکن سه‌بعدی نمونه‌های صنعتی و بسیاری از اسکنرهای متوسط به دلیل نوع لیزر به کاررفته در آنها (جهت کاهش آسیب به بدن و چشم)، عمدتاً در نمونه‌گیری اشیاء با اندازه متوسط و همچنین در ابعاد انسانی کاربرد دارد. در این پژوهش، از اسکنر سه‌بعدی رکس کن^{۴۳} تولید شرکت سولوشنیکس^{۴۷} کشور کره جنوبی استفاده شده است. این اسکنر محصولی صنعتی و با توان بالای اجرایی است که در زمینه‌های مهندسی معکوس، کنترل کیفی محصولات و تهیه قطعات به روش نمونه‌سازی سریع از فایل خام دستگاه استفاده می‌شود. ضمن اینکه، از رزولوشنی بالا برخوردار است و دو دوربین CCD دارد که با تکنولوژی نور سفید^{۴۸} کار می‌کند (تصویر ۶). روش کار در

این اسکنر در واقع همانند دیگر اسکنرهای سه‌بعدی با کمک پردازش تصویر و تجزیه تحلیل نرم‌افزاری، نور ساطع‌شده از جسم و همچنین نور برگشتی لیزر تابیده‌شده بر جسم است که مدلی دیجیتالی (ابرنقاط) از جسم بر گردانده است. بدین صورت، با پردازش نرم‌افزاری اختصاصی دستگاه با نام EzScan این اطلاعات برداشت شده به صورت مدل سه‌بعدی دیجیتالی شکل می‌گیرد. فایل خروجی دستگاه STL است که به راحتی توسط اکثر نرم‌افزارهای سه‌بعدی ساز مانند کتیا، سالید ورک و راینو پشتیبانی می‌شود (پژوهشگران صنعت آریا، ۱۳۹۴).

نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

باتوجه به خطاهای اجتناب‌ناپذیر در مرحله اسکن نمونه اثر و نیز بازسازی سه‌بعدی بخش مفقود به صورت مجازی، نیاز است تا از نرم‌افزار سه‌بعدی‌سازی برای ویرایش فایل به دست آمده از اسکنر استفاده شود. در این تحقیق از نرم‌افزار راینو سروس^{۴۹} نسخه ۵ استفاده گردید. راینو، نرم‌افزاری سه‌بعدی ساز بوده و به عنوان تنها ابزار مدل‌سازی سه‌بعدی که کاملاً براساس سیستم نریز^{۵۰} تجاری کار می‌کند. این نرم‌افزار را شرکت مک‌نیل و شرکا^{۵۱} توسعه داده است. این سیستم، در واقع یک نمایش ریاضی از هندسه سه‌بعدی است که می‌تواند هر شکلی از خطوط و دوایر ساده دو بعدی را تا اشکال پیچیده سطوح و حجم‌های ارگانیک و سیال به درستی توصیف و تصویر کند. نرم‌افزار راینو از دقت بالایی برخوردار است و به خوبی فرمت‌های خروجی تولید نرم‌افزارهای دیگر را می‌پذیرد. اصول ساخت سطوح در راینو بر ساخت منحنی‌ها استوار است. همچنین برای مدیریت تنظیمات چاپگر که شامل تولید مسیرهای حرکت نازل سه‌بعدی و تبدیل فایل فرمت STL مدل مورد چاپ به فایل G-code است، از نرم‌افزار Cura نسخه $15/04$ استفاده گردید. این نرم‌افزار مدل مورد چاپ را با فرمت STL به صورت ورودی دریافت کرده و فایل را با فرمت G-code که کنترلر چاپگر سه‌بعدی آن را می‌شناسد، تولید می‌کند.



تصویر ۵. سری شیشه‌ای از یک چراغ دیواری با یک قطعه مفقود و شکستگی‌ها و جدایش‌هایی در بدنه (نگارندگان)

چاپگر سه بعدی

برای بازسازی بخش مفقود نمونه شیشه مورد آزمایش از چاپگری سه بعدی با نام چاپبات ۲۰۲۰ که در مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز بومی سازی شده است، استفاده گردید (تصویر ۷). روش کار این چاپگر مبتنی بر لایه گذاری مذاب یا FDM است که می تواند عملیات چاپ سه بعدی را تا حداقل ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون (۰/۱ میلی متر) انجام دهد. نازل چاپگر مذکور دارای قطر ۰/۴ میلی متر است. به علاوه، با استفاده از این چاپگر امکان نمونه سازی با انواع رشته های پلیمری (رشته های ساخته شده از مواد مختلف که در واقع مواد اصلی چاپگر سه بعدی برای چاپ قطعات هستند) امکان پذیر است. از جمله فیلامنت یا رشته های پلیمری مورد نظر می توان به گونه های ساخته شده از ترکیبات $PLA^{۵۲}$ ، $PC^{۵۴}$ ، $HIPS^{۵۵}$ و $PETG^{۵۶}$ اشاره نمود.

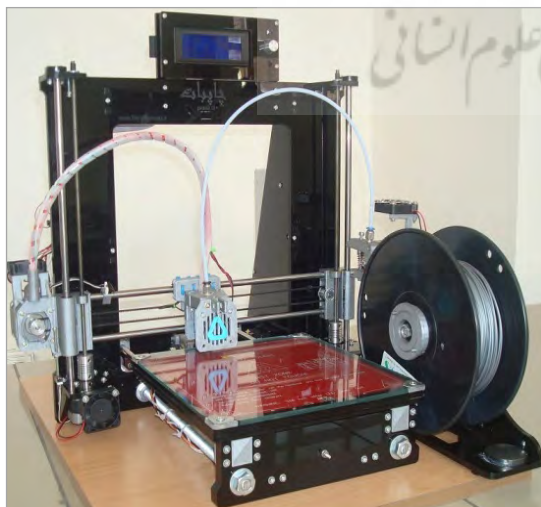
مواد مورد استفاده

ضرورت هایی در ویژگی های ماده مورد استفاده در بازسازی شیشه وجود دارد که شامل: قابلیت شکل پذیری، شفافیت یا نیمه شفاف، با ضریب انعکاسی نزدیک به شیشه، حداقل انقباض بعد از سخت شدن و تشکیل جسم جامد و سخت، ایجاد بافت و سطح مناسب، مقاومت در برابر تغییر رنگ و فساد، دارا بودن قابلیت روتوش کاری و صیقل کاری کافی است (Davison & Newton, 2008, Down, 2001). در همین راستا از میان رشته های پلیمری چاپ سه بعدی، نمونه های PLA و ABS که تقریباً واجد این ویژگی ها هستند، در کار نمونه سازی بخش مفقود اثر شیشه ای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند و قطعه مورد نظر با این رشته های پلیمری چاپ گردید.

دو نوع رشته های پلیمری ABS و PLA به صورت گسترده در دسترس بوده و از لحاظ قیمت تمام شده نیز برای چاپ سه بعدی صرفه اقتصادی بیشتری دارند. گونه PLA ، معمولی ترین رشته های پلیمری است که اسید پلی لاکتیک که در اصل پلاستیکی زیست تجزیه پذیر، دوستدار طبیعت و مشتق شده از نشاسته است که در گستره دمای بین $180-230^{\circ}C$ ذوب می شود. بوی بد آن هنگام پرینت به هیچ وجه خطرناک نیست. اجسام و قطعات ساخته شده از این ماده، قوی اما نسبتاً ترد هستند. این رشته ها به صورت طبیعی در رنگ های سفید نیمه شفاف اند و چاپ قطعه با آنها صورتی صاف و صیقلی خواهد داشت. در همین راستا گونه ABS دیگر رشته مشهور و معمول گرمانرم است که از اکریلونیتریل بوتادین استایرن ساخته می شود. این ماده نفتی که در ساخت آجرهای لگو نیز کاربرد دارد، دود آن هنگام ذوب برای سلامتی خطرناک است و استفاده از ماسک و تهویه هوا در استفاده های مداوم توصیه می شود. دمای ذوب آن $260-210^{\circ}C$ است و از لحاظ قیمت مشابه PLA است. مزیت ABS بر PLA آن است که اشیای ساخته شده با آن قوی تر و همچنین تردی کمتری دارد و تا دمای بالاتری مقاومت می کند. همچنین در رنگ های مختلفی این رشته تولید می شود که درخشندگی بیشتری دارد و در رنگ های نقره ای و طلایی در بازار موجود است (Canessa et al., 2013).

نتایج و بحث

پس از عکاسی و مستندنگاری قطعات شکسته شده نمونه مطالعاتی، بخش های جدا شده اثر با رزین متیل متاکریلات ۴۰٪ وصالی گردید و برای بازسازی بخش مفقود شیشه با استفاده



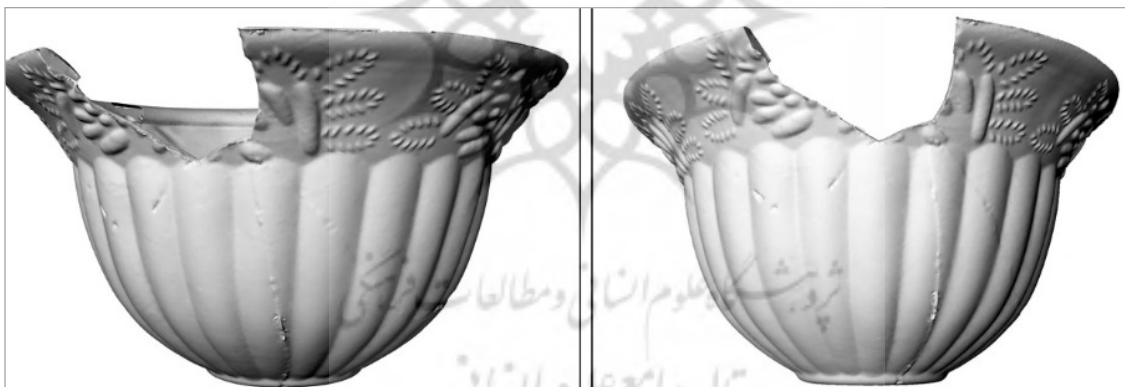
تصویر ۷. چاپگر سه بعدی چاپبات ۲۰۲۰ بومی سازی شده در مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نگارندگان)



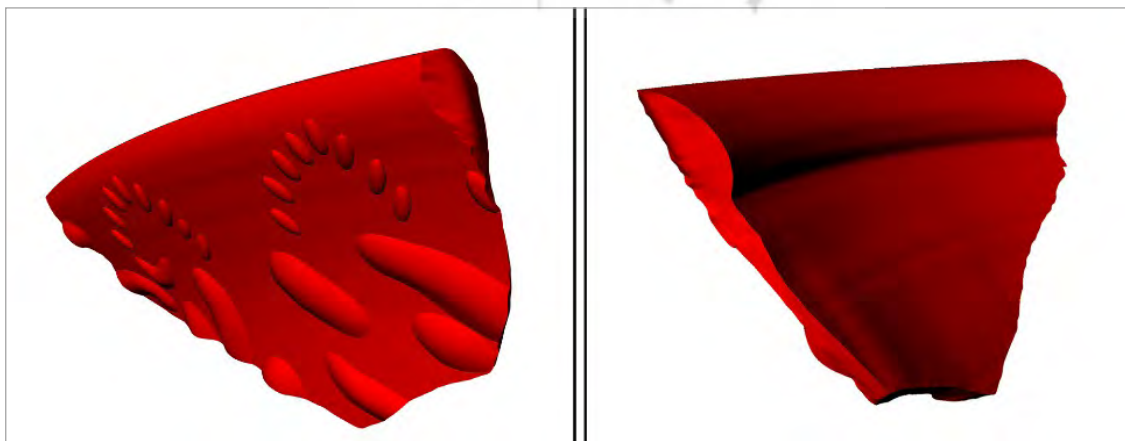
تصویر ۶. اسکنر لیزری رکس کن سه؛ مورد استفاده در اسکن نمودن نمونه مورد مطالعه این تحقیق (پژوهشگران صنعت آریا، ۱۳۹۴)

ویرایش فایل خروجی اسکنر در ارتباط با نمونه اثر مورد مطالعه که می‌توان به آنها اشاره نمود: خطاهای اسکنر در لبه‌های سطوحی که به هم می‌رسند، خطای اسکنر در ایجاد برخی از سطوح به‌خصوص در لبه‌ها، عدم تقارن فرم کلی نمونه اثر، عدم تقارن و تکرار نقوش برجسته روی نمونه اثر، لب پر شدن لبه سطوح در محل شکستگی و مفقودشده نمونه اثر (تصویر ۹). برای حل مشکلات اشاره‌شده، این اقدامات انجام گردید: از سطوح مش، خطوط موردنیاز جهت ترسیم سطوح نریز استخراج گردید و با فرمان‌های اختصاصی، سطوح نریز ساخته شد. برای سطوح ایجادنشده در فایل مش، مانند لبه سطوحی که به هم نرسیده و یا حفره‌هایی که در وسط سطوح مش ایجاد شده، در ابتدا با فرمان‌های اختصاصی ساخت سطوح مش، بازسازی‌ها انجام گرفت و در صورت جواب‌نگرفتن، از دستورات اختصاصی سطوح نریز استفاده شد. برای حل مشکل عدم تقارن و عدم تکرار منظم نقوش برجسته روی نمونه اثر، براساس الگوی تاحدی تکرارشونده و تناسبیات کلی فرم اثر، بازسازی‌ها انجام گرفت. لب‌پریدگی‌های سطوح نیز به علت پراکنده و کوچک بودن ابعاد در مقایسه با کل قطعه مفقودشده، نادیده گرفته شد.

از فناوری‌های نمونه‌سازی، سریع اقدام شد. بدین شرح: در مرحله نخست از روش نور ساختاری^{۵۷} جهت سه‌بعدی‌سازی مجازی نمونه استفاده گردید. در این روش یک الگوی مشخص بر جسم انداخته شده، شکل سه‌بعدی مجازی نمونه به‌دست می‌آید. دوربین‌های اسکنر در این روش در موقعیت ثابتی قرار دارند (اسکنر بر روی پایه ثابت گردید) و نور لیزر جسم را اسکن می‌کند و نمونه بر روی صفحه گردان با سرعتی ثابت به چرخش درمی‌آید تا تمامی زوایای نمونه اسکن شود (تصویر ۸). سپس اقدامات تکمیلی بر روی فایل سه‌بعدی حاصل از اسکن انجام و بخش مفقود در محیط مجازی به کمک نرم‌افزار بازسازی گردید. به‌نحوی که فایل خروجی اسکنر وارد نرم‌افزار راینو گردید و خطوط منحنی لازم از آن استخراج شد. در ادامه به کمک این خطوط به‌دست‌آمده، سطوح و حجم‌های مفقودشده با هندسه نریز ساخته شد. قابل‌ذکر است که هندسه فایل STL اسکنر به‌صورت مش است و این تا حد زیادی در بازسازی بخش‌های مفقود براساس هندسه نریز، مشکل‌آفرین است چراکه ماهیت ساخت سطوح در این دو مدل گرافیک کامپیوتری متفاوت است. از دیگر مشکلات



تصویر ۸. فایل STL خروجی دستگاه اسکنر سه‌بعدی (نگارندگان)



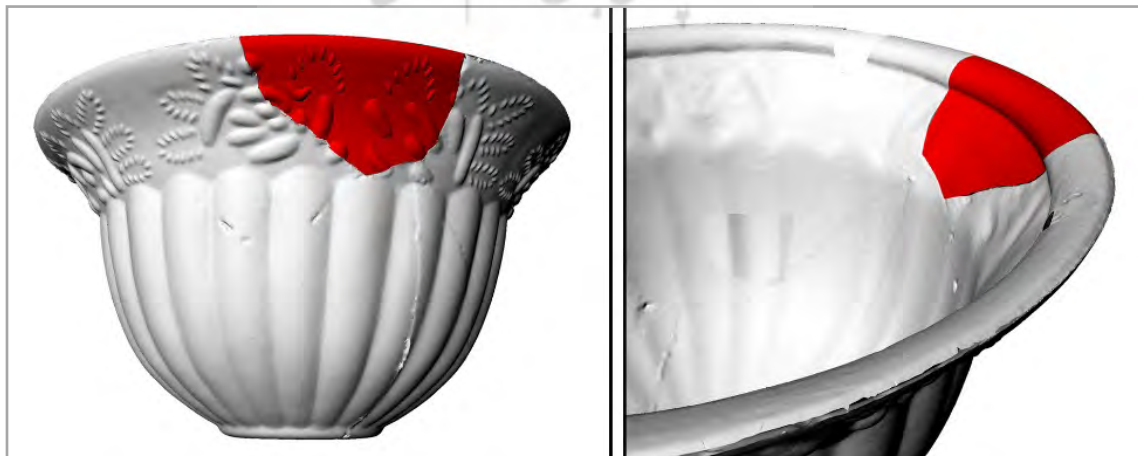
تصویر ۹. بازسازی قطعه مفقودشده اثر با نرم‌افزار راینو براساس الگوی تاحدی تکرارشونده (نگارندگان)

سرعت چاپ از عوامل دیگر مؤثر در کیفیت سطحی چاپ است. سرعت متداول چاپ مناسب برای چاپگرهای FDM در محدوده ۲۰-۷۰ میلی متر بر ثانیه توصیه می شود. از آنجائی که در سرعت های چاپ بالا با افزایش ارتعاش در خود چاپگر روبرو هستیم و این افزایش ارتعاش به صورت یک سری از الگوهای ارتعاشی بر روی سطح ظاهری قطعه چاپ شده خود را نشان می دهد، لذا در مواردی همچون موضوع این تحقیق کاهش سرعت چاپ، افزایش کیفیت سطحی را در پی خواهد داشت. از دیگر متغیرهای مهم، وضعیت قرارگیری قطعه حین چاپ است؛ هنگام چاپ، اگر قطعه وضعیت ایستایی مناسبی نداشته باشد بایستی برای آن یک پایه نگهدارنده طراحی نمود تا چاپگر بتواند آن را روی پایه خود ساخته و چاپ کند. این امر عمدتاً در وضعیت قطعات افقی یا خوابیده رخ می دهد. در قطعاتی که می توان بدون پایه نگهدارنده محسوس یا به صورت ایستاده اقدام به چاپ نمود، کیفیت سطحی کاملاً متفاوت و بسیار مطلوب تر خواهد بود. در همین راستا تجربیات این تحقیق نشان داد، در قطعاتی که برجستگی های ظریف دارند و سطح زمینه حامل این برجستگی ها به یک سطح افقی یا تخت نزدیک است، بهتر است تا حد امکان در وضعیت ایستاده چاپ شوند. چراکه نیمرخ لایه های چاپ شده در حالت افقی انحراف بیشتری از یک منحنی پیوسته از خود نشان می دهند. درحالی که در وضعیت ایستاده این انحراف به حداقل میزان خود می رسد (تصویر ۱).

در نهایت می توان به میزان توپری قطعه اشاره کرد که وابسته به میزان استقامت مورد نیاز، میزان شفافیت، عبور نور و حساسیت قطعه، می توان آن را از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ توپر و یا توخالی در نظر گرفت. این امر در یک قطعه چاپ سه بعدی شده بیشتر از منظر هزینه تمام شده مدنظر قرار می گیرد. بدین معنا که با افزایش توپری قطعه، زمان چاپ و مصرف رشته پلیمری

در ادامه از قطعه مفقود که به صورت مجازی بازسازی شده بود، فایل دیجیتال مناسب برای چاپگر سه بعدی تهیه گردید. در همین راستا پس از اتمام ساخت مدل سه بعدی مجازی از قطعه مفقود شده بر اساس فایل STL خروجی اسکنر، برای آزمون نهایی و تطبیق آن با بدنه اصلی اثر، در محیط نرم افزار راینو، قطعه مفقودی بازسازی شده در محل اصلی به صورت نرم افزاری جانندازی شد و ایرادات نهایی بر اساس مطابقت با لبه سطوح قسمت های موجود، برطرف گردید (تصویر ۱۰).

مهم ترین عوامل تأثیرگذار در کیفیت چاپگرهای سه بعدی را می توان در تکنولوژی مورد استفاده در چاپگر سه بعدی، ماده مورد استفاده (رشته پلیمری)، ضخامت لایه ها، سرعت چاپ، وضعیت قرارگیری قطعه حین چاپ و میزان توپری قطعه ارزیابی نمود. به نحوی که هرچه چاپگر از تکنولوژی پیشرفته تر برخوردار باشد کیفیت محصول نهایی مطلوب تر خواهد بود. بنابر اینکه رشته های پلیمری با کیفیت های مختلفی در بازار وجود دارند، می توان گفت مناسب ترین رشته پلیمری آن است که علاوه بر مقاومت ماده و سازگاری با چاپگر بیشترین شباهت رنگی و بافتی را بعد از چاپ با قطعه مفقود داشته باشد. عوامل دیگر، سرعت و ضخامت لایه های اعمالی رشته پلیمری حین انزال است. به گونه ای که هرچه سرعت نزول و ضخامت لایه های رشته پلیمری کمتر باشد کیفیت قطعه بهتر می شود و هرچه سرعت و ضخامت لایه ها بیشتر باشد، قطعه مورد نظر بافت های درشت تر و زمخت تری خواهد داشت و از میزان جلای سطحی آن کاسته می شود. چنانچه نیاز به چاپ ظریف تری باشد، می توان ضخامت لایه های چاپ را کم کرد. ضخامت متداول لایه برای چاپگرهای FDM بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرون است. لذا برای بهبود کیفیت سطحی ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون توصیه می شود.



تصویر ۱۰. جانندازی و تطبیق قطعه مفقودی بازسازی شده در بدنه اصلی اثر به صورت مجازی در محیط نرم افزار راینو (نگارندگان)

بیشتر خواهد شد و این امر تأثیر مستقیمی بر هزینه چاپ سه‌بعدی خواهد داشت. لازم است بیان شود، هرچه درصد توپری قطعه کمتر باشد میزان عبور نور بیشتر خواهد شد و برعکس. در این مطالعه، درصد توپری به‌عنوان پارامتری که نمود سطحی قطعه چاپ‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مدنظر قرار گرفت. به‌نحوی که چاپ با توپری ۲۰٪ شبیه‌ترین حالت نوری را نسبت به قطعه اصلی ایجاد می‌کرد و انتخاب گردید. بنابر آنچه آورده شد، آزمایشات این تحقیق براساس جدول ۳ ساماندهی گردیده است.

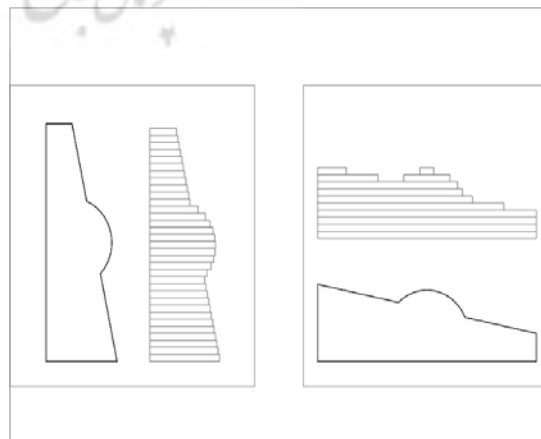
انجام چاپ‌های متفاوت برای دستیابی به حداکثر کیفیت چاپ سه‌بعدی با استفاده از رشته‌های پلیمری پیشنهادی، نشان داد مناسب‌ترین رشته پلیمری برای چاپ بافت مشابه نمونه مطالعاتی رشته پلیمری ABS است که با ضخامت لایه‌های ۱۰۰ میکرون و با سرعت ۲۰ mm/s، در وضعیت قرارگیری عمودی چاپ گردید. همچنین برای دستیابی به حداکثر شفافیت در نمونه‌ها چاپ آنها به‌صورت ۲۰٪ میزان توپری انجام گرفت که این محصول بیشترین شباهت را با قطعه مفقود شیشه‌ای در نمونه مطالعاتی این تحقیق داشت. در روند چاپ قطعات گاه در اطراف قطعه چاپ‌شده به‌علت انحرافات چاپگر و لرزش‌های نازل آن و همچنین کش‌آمدن رشته پلیمری ذوب‌شده روی سطوح دیگر و پیچیدگی شکل قطعه پلیسه‌هایی ایجاد می‌شود. این پلیسه‌ها عمدتاً باعث خواهد شد که قطعه در جای خود قرار نگرفته و بایستی هنگام اتصال قطعه، عملیات تکمیلی شامل سائیدن و برداشتن براده‌ها به‌نحو مقتضی صورت پذیرد. در برخی مواقع که نیاز است قطعه حالت صیقلی بیشتری داشته باشد می‌توان با پولیش دادن آن به حد صیقلی موردنظر دست یافت. این امر با دقت به‌وسیله کاغذ سمباده تا جایی که به سطح قطعه آسیبی

نرسد قابل انجام است. در موارد دیگر از حلال‌های شیمیایی مثل: بخار استون برای رشته‌های ABS و دیگر حلال‌ها برای رشته‌های PLA استفاده می‌شود. دما گزینه دیگری است که با تجهیزاتی مانند سشوار قابل انجام است و حتی در مواردی نیز می‌توان لایه‌های رنگی مات و شفاف روی قطعات اعمال نمود (Canessa et al., 2013).

در رابطه با قطعه بازسازی‌شده، تجربیات حاصل از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در حالت ایده‌آل بهتر است قطعه چاپ‌شده به مقدار ۱٪ نسبت به قطعه اصلی طراحی شده کوچک‌تر درنظر گرفته شده و چاپ گردد. این پیشنهاد از آن‌روست که فضایی برای جرمیت چسب مورد استفاده در وصالی وجود داشته باشد. در همین راستا بعد از انجام عملیات مختصر تکمیلی روی لبه‌های قطعه چاپ‌شده با سوهان ریز قطعه به‌طرف اصلی در محل بخش مفقود شیشه‌ای وصالی گردید (تصویر ۱۲). این فرایند با استفاده از رزین UHU ۴۳۶۰۵ انجام شد. علت استفاده از رزین مذکور آن بود که رزین‌های معمولی مانند: پارالوئیدی ۲۷ که در رابطه با اتصال قطعات در حفاظت و مرمت مورد استفاده قرار می‌گیرند، مبتنی بر انحلال در حلال‌های آلی مثل گزین و استن و الکل هستند؛ و از آنجا که رشته‌های پلیمری ABS به حلال‌های آلی حساسیت داشته و دچار خوردگی می‌شوند، در این کار احتمال ایجاد ضایعات و عدم تطابق در لبه‌های قطعه چاپ‌شده در صورت دفرمه‌شدن وجود داشت. لازم است بیان شود، با استفاده از رزین‌هایی که حلال آلی ندارند و بازگشت‌پذیری تلقی می‌شوند همانند پریمال، می‌توان مسئله بازگشت‌پذیری را رعایت نمود و با اینکه از رزین‌های برگشت‌پذیر به‌عنوان پرایمر در لبه‌های قطعه چاپ‌شده و طرف اصلی استفاده کرد تا فرایند به‌طور کلی حالت برگشت‌پذیری خود را حفظ نماید.



تصویر ۱۲. اثر شیشه‌ای مورد مطالعه بعد از اتصال قطعه بازسازی‌شده به وسیله تکنولوژی‌های مدل‌سازی سریع (نگارندگان)



تصویر ۱۱. شماتیکی از تأثیر وضعیت چاپ قطعه بر کیفیت جزئیات قطعه؛ چاپ به‌صورت عمودی (چپ) و چاپ به‌صورت افقی (راست)، (نگارندگان)

تکنولوژی‌ها و در واقع مهم‌ترین ابزارهای مدل‌سازی سریع؛ اسکنرها و چاپگرهای سه‌بعدی هستند. فتاوری‌های نمونه‌سازی سریع می‌توانند در رابطه با ساخت کپی از اشیا و مجسمه‌ها، نقش برجسته‌ها و نقوش صخره‌ای، آثار و تزئینات ارزشمند در ابعاد واقعی (یا با تغییر ابعاد) و همچنین بازسازی بخش‌های مفقود آثار تخریب‌شده، به‌کار گرفته شوند. از جمله مزیت‌های استفاده از این روش‌ها که

اما در این نمونه به‌واسطه تاریخی نبودن شیء و حساس نبودن نسبت به برگشت پذیری، فرایند مدنظر قرار نگرفت.

بنابر پیشرفت‌های قابل توجهی که در زمینه مدل‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده و همچنین در دسترس بودن فتاوری آنها، امروزه بستر مناسبی برای ورود این‌گونه فتاوری‌ها در زمینه حفاظت و مرمت میراث فرهنگی فراهم شده است. از این قبیل

جدول ۳. مقایسه شرایط و محصولات چاپ‌شده با چاپگر چاپ‌تاب ۲۰۲۰ از قطعه مفقود مورد مطالعه (نگارندگان)

رشته پلیمری	ضخامت لایه‌ها (mm)	سرعت چاپ (mm/s)	وضعیت چاپ	توپری قطعه	ارزیابی کیفیت	تصاویر
PLA رنگ طبیعی	۰/۱	۳۰	افقی (پایه‌گذاری)	۱۰۰٪	نامناسب	
PLA سفید	۰/۲	۲۰	عمودی	۲۰٪	نامناسب	
PLA سفید	۰/۲	۳۰	افقی (پایه‌گذاری)	۲۰٪	نامناسب	
*ABS	۰/۲	۳۰	عمودی	۲۰٪	مناسب	
ABS	۰/۱	۲۰	عمودی	۰٪	مناسب	
ABS	۰/۱	۳۰	عمودی	۱۰٪	مناسب	

*قطعه مورد انتخاب جهت استفاده در بازسازی بخش مفقود

(نگارندگان)

هم‌راستا با مبانی نظری مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی نیز هست، می‌توان به این موارد اشاره نمود:

کاهش تماس با اشیای تاریخی - فرهنگی و اجتناب از روش‌های معمول و زمان‌بر مرسوم تماسی و تاحدی مخرب همانند: فرایند قالب‌گیری و ریخته‌گری و لایه‌برداری؛

- دقت بیشتر در اجرای طرح‌ها و نقوش برجسته و پیچیده نسبت به روش سنتی؛
- دستیابی به سطوحی با کیفیت هم‌سان و مشابه با آثار فرهنگی تاریخی با استفاده ترکیبی از روش‌های مدل‌سازی سریع؛
- ساخت قطعات در ابعاد مختلف با مدل‌های هندسی نامتقارن به نحوی که محدودیت‌چندانی از نظر فرم و شکل هندسی برای ساخت وجود ندارد؛
- امکان ارزیابی و اصلاح طرح سه‌بعدی و تکرار آن در صورت عدم رضایت از هر بخش در کمترین زمان ممکن؛
- عدم خطر ناشی از اتصال قطعه بازسازی شده با شیء موردنظر به سبب خنثی بودن آن؛
- کاهش زمان در ساخت قطعات مفقود.

ذکر این نکته لازم است که از منظر دیگر در حال حاضر این روش ترکیبی محدودیت‌هایی دارد. از جمله آنها: تک‌رنگ بودن قطعه مدل‌سازی و چاپ شده است که با استفاده از چاپگرهایی که دارای دو یا سه کارتریج هم‌زمان هستند می‌توان تاحدی این محدودیت را برطرف نمود. اما برای استخراج رنگ‌های خاص پاتین‌ها و تخریب‌های سطحی ناشی از تغییرات رنگی و مواردی مانند تبادل قلیایی اگر اصرار به بازسازی مشابه با اثر اصلی وجود

نتیجه‌گیری

داشته باشد احتمالاً به رتوش کاری رنگی نیز نیاز خواهد بود. از دیگر محدودیت‌ها می‌توان به محدود بودن جنس و شفافیت رشته‌های پلیمری موجود در بازار، خطاهای ابزاری در مرحله اسکن و چاپ سه‌بعدی اثر اشاره نمود. این موارد می‌توانند در کیفیت محصول نهایی بسیار تأثیرگذار باشند. دیگر اینکه بازسازی قطعات مفقود در محیط مجازی و به صورت کامپیوتری نیاز به تخصص سطح بالایی دارد و در برخی مواقع، تشخیص فرم و جزئیات بخش مفقود اقدام بسیار دشواری خواهد بود. آنگونه که از محتوای تحقیق برمی‌آید، با برتری مزیت‌های این روش‌ها بر معایب آنها مواجه هستیم و در کل می‌توان گفت: فرایند طی شده قابل قبول است و می‌تواند در امر بازسازی میراث فرهنگی به خصوص شیشه‌ای تاریخی مورد استفاده قرار گیرد. چراکه با مقایسه تک‌تک این مزیت‌های اجرایی و عملی نسبت به روش‌های سنتی و همچنین مطابقت دادن آنها با اصول مبانی مرمت آثار تاریخی می‌توان روش‌های یادشده را شدیداً منطبق با اصول مبانی نظری دانست. به خصوص در رابطه با شیشه‌های تاریخی حساس و ظریف و ترک‌دار موارد مذکور بسیار در اجرا و ارائه طرح حفاظت و مرمت و بازسازی کارآمدند. به نحوی که در بسیاری موارد به صورت حداکثری اصول پذیرفته شده حفاظت و مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی همچون؛ مطالعه، شناخت و مستندنگاری دقیق اثر، قابلیت جدا شدن و برگشت پذیری کلیه فرایند (مواد مرمتی و اقدامات انجام شده)، حداقل دخالت مؤثر، خوانایی اقدامات مرمتی، عدم مداخله آسیب‌رسان، سازگاری حداکثری با اثر میزبان از لحاظ خنثی بودن ماده و حفظ جنبه‌های زیبایی‌شناسی اثر را پوشش می‌دهند.

امکان‌سنجی استفاده از روش‌های جدید در بازسازی قطعات مفقود بنابر تجهیزات و تکنولوژی‌های موجود در کشور از مهم‌ترین اهداف این پژوهش است. نتایج مطالعات صورت گرفته در این پژوهش نشان‌دهنده آن است که فرایند تبدیل تصاویر اسکن شده اثر مورد مرمت به فایل سه‌بعدی مجازی با نرم‌افزار، به کمک روش‌های نمونه‌سازی سریع و در نهایت بازسازی قطعه‌ای متناسب با بخش مفقود در آثار شیشه‌ای می‌تواند در جهت حفاظت پایدار و غیرتماسی بسیار مفید باشد. اما درحقیقت موفقیت یک طرح بازسازی بخش مفقود با فناوری‌های نمونه‌سازی سریع ارتباط مستقیمی با این فرایندها دارد: برداشت صحیح و دقیق شیء، طراحی و انجام عملیات تکمیلی بر روی داده‌های دیجیتال به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بعدی‌سازی، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب شامل: رشته‌های پلیمری (ازلحاظ رنگی و بافتی و صیقلی بودن) و چاپگر سه‌بعدی مناسب، در کنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرایند چاپ سه‌بعدی و در نهایت عملیات وصالی و رتوش نهایی. با توجه به مزیت‌ها و معایب ذکر شده این روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی و قابلیت ارتقا و بهبود برخی محدودیت‌های آنها می‌توان گفت این روش‌ها توانایی بسیار بالایی در حفاظت از اشیای تاریخی به صورت بازسازی و بازنمایی بخش‌های مفقود سازه‌ای و تزئینی در آینده دارند. در همین راستا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای اینکه ترکیب روش‌های یادشده بتواند نتایج ملموس‌تر و

شاید دقیق‌تری در رابطه با بازسازی آثار هنری با محدودیت‌های منحصربه‌فرد داشته باشد، بررسی‌ها روی نمونه‌های بیشتر و از مواد مختلف که دارای پیچیدگی‌های به‌مراتب دشوار در نقوش و بخش‌های سازه‌ای هستند؛ اجرا و متمرکز گردد. به‌علاوه، مطالعاتی مقایسه‌ای بین روش‌های معمول بازسازی قطعات مفقود اشیا و استفاده از تکنولوژی‌های ذکر شده انجام گیرد تا جنبه‌های قوت و ضعف این روش و امکان استفاده از آن در مرمت و بازسازی شیشه‌های تاریخی سنجش و ارزیابی شود. همچنین، از این روش برای بازسازی دیگر اشیا همانند آثار فلزی، سفالین، سنگ‌ها و مجسمه‌ها، همچنین قطعات مروارید و جواهرات ارزشمند استفاده شود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله نگارندگان از دانشگاه هنر اسلامی تبریز به‌دلیل دراختیارنهادن امکانات این تحقیق سپاس‌گزاری می‌نمایند.

پی‌نوشت

1. Jukka Jokilehto
۲. کنوانسیون میراث جهانی یونسکو، میراث فرهنگی را شامل آثار معماری، مجسمه‌سازی و نقاشی، عناصر و سازه‌های باستان‌شناسی، کتیبه‌ها، غارهای حفاری شده و ترکیب شاخصه‌هایی که از دیدگاه علمی، هنری و تاریخی ارزش جهانی بالا دارند؛ می‌داند (Unesco, 1972:art.1).

3. Preliminary study
4. Documentation
5. Reversibility
6. Stability/compatibility
7. Readability
8. Physical Damage
9. Superficial Disfigurement
10. Chemical Deterioration
11. Perspex (US:Plexiglass)
12. Clay
13. Plasticine
14. Aloplast
15. 3D modellers
16. 3D viewers
17. Prototyping – (RP)
18. Rapid Manufacturing RM
19. Narcissus fountain of baroque sculptor Francesco Robba
20. St. Hemma from Nemški Rovt in Slovenia
21. Visualization
22. Verification
23. Iteration
24. Optimization
25. Functional Tests
26. CAD (Computer Aided Design)

۲۷. فایل (Stereo Lithographic) (STL)، فرمت استاندارد ورودی کلیه فرایندهای نمونه‌سازی سریع است.

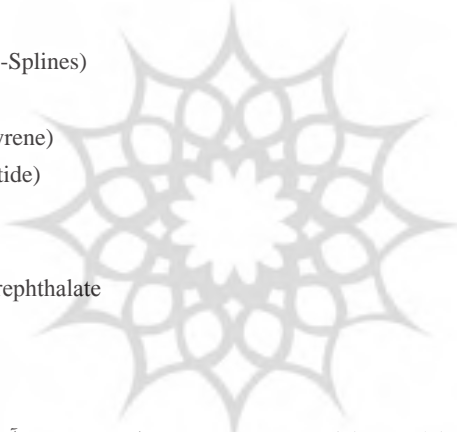
28. Digitizer
29. Stereo Lithography Apparatus – (SLA)
30. Selective Laser Sintering – (SLS)
31. Layer Laminate Manufacturing – (LLM or LOM)
32. Three Dimensional Printing – (3DP)



33. Multi Jet Modeling – (MJM)
34. PolyJet
35. ThermoJet
36. Fused Deposition Modeling
37. laser profilers mounted on CMM (coordinate measurement machine)
38. Surface Measurement
39. portable coded light projection systems
40. Measurement of Profiles
41. Coded Light Projection

۴۲. با استفاده از قاعده مثلث (method of triangulation) و در نظر گرفتن فاصله یک ضلع (بین دوربین و پروژکتور) و دو زاویه معلوم (زاویه تابش نور پروژکتور و زاویه دید دوربین)، فاصله نقطه مورد نظر روی قطعه مشخص می‌شود.

43. Point Measurement
44. Time-of-Flight
45. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS)
46. Rexcan III
47. Solutionix
48. White Light Phase Shifting Triangulation
49. Rhinoceros V5
50. Nurbs (Non-Uniform Rational B-Splines)
51. Robert McNeel & Associates
52. ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)
53. PLA (PolyLactic acid or Polylactide)
54. Polycarbonate
55. High Impact Polystyrene
56. glycol-modified polyethylene terephthalate
57. Structured light



منابع و مآخذ

- ارباسلی، آیین (۲۰۰۸/۱۳۹۴). حفاظت معمارانه، ترجمه: پیروز حناچی، مرضیه آزاد ارمکی، یلدا شاه تیموری، تهران: دانشگاه تهران به همراه سازمان نوسازی شهر تهران.
- پژوهشگران صنعت آریا- شرکت (۱۳۹۴). Rexcan-3، تارنمای شرکت پژوهشگران صنعت آریا- شرکت.
- خلیل پور آذری، سامان و خانجانی، علی (۱۳۸۳). قالب‌سازی و نمونه‌سازی سریع. تهران: ناقوس.
- رحمتی، صادق؛ سلیمی، مجتبی و ایلدارزاده، محمد (۱۳۸۴). فناوری نمونه‌سازی سریع. تهران: جهان جام‌جم.
- یوکیلهتو، یوکا (۷۸۳۱) تاریخ حفاظت معماری. ترجمه: محمدحسین طالبیان، خشایار بهاری. تهران: روزنه.
- سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، امور پایگاه‌های میراث فرهنگی کشور (۱۳۹۴). اهم اقدامات انجام‌شده امور پایگاه‌ها: سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری بخش امور پایگاه‌های میراث فرهنگی.
- سیم‌چی، عبدالرضا و توکلی، امیرحسین (۱۳۸۴). نمونه‌سازی و ابزارسازی سریع. تهران: مرکز صنایع نوین.
- صادقی، محمدحسین و شکوری، احسان (۱۳۸۷). طراحی و ساخت به کمک رایانه CAD / CAM / CAE. تهران: مهرگان قلم عابد.
- (بازیابی شده در: ۲۰ آذر ۱۳۹۴) <http://psarta.com/product/rexcan-3>
- (بازیابی شده در: ۸ آبان ۱۳۹۴) www.omurpaygah.ichto.ir/Default.aspx?tabid=4595&language=fa-IR
- Antlejš, K., & Zavrl, M. S. V. F. (2011-B). The Use of 3D technologies in Cultural Heritage Communication. **Drugi Međunarodni simpozij "Digitalizacija kulturne baštine Bosne i Hercegovine"**, Zbornik radova, 39-44.
- Antlejš, K., Celec, K., Sinani, M., Mirtič, E., Ljubič, D., Slabe, J. & Kos, M. (2012). Restoration of



- a Stemmed Fruit Bowl Using 3d Technologies. **Review of the National Center for Digitization**, (21), 141-146.
- Antlejš, K., Eric, M., Šavnik, M., Županek, B., Slabe, J., & Battestin, B. (2011-A). Combining 3D technologies in the field of cultural heritage: three case studies. In VAST Conference 2011, **International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage**, Short and Project Paper Proceedings, 1-4.
 - Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M., & DEADLINE, N. (2013). **Low--cost 3D printing for science, education and sustainable development**. Low-Cost 3D Printing, 11.
 - Colombo, G., Bertetti, M., Bonacini, D. and G. Magrassi. (2006). **Reverse engineering and rapid prototyping techniques. in: Three dimensional image capture and applications VII**, Edited by: B.D. Corner, P. Li and M. Tocheri, Proceedings of SPIE-IS&T; Vol. 60566056P-1, USA.
 - D'Apuzzo, Nicola, Corner B.D., Li P., Tocheri M. (Eds). (2006). **Three-Dimensional Image Capture and Applications VI**, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose (CA), USA.
 - Davison, S., & Newton, R. G. (2008). **Conservation and restoration of glass**. Routledge.
 - Down, J. L. (2001). Review of CCI research on epoxy resin adhesives for glass conservation. **Studies in Conservation**, 46(2), 39-46.
 - Fischer, A. (2000). Multi-level models for reverse engineering and rapid prototyping in remote CAD systems. **Computer-Aided Design**, 32(1), 27-38.
 - Forte, M. (2014). 3D archaeology: new perspectives and challenges—the example of Çatalhöyük. **Journal of Eastern Mediterranean Archaeology & Heritage Studies**, 2(1), 1-29.
 - Karayannidou, E. G., Achilias, D. S., & Sideridou, I. D. (2006). Cure kinetics of epoxy–amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic. **European Polymer Journal**, 42(12), 3311-3323
 - King, D., Tansey, T. (2002). Alternative material for rapid tooling. **Journal of materials processing technology**, 121, 313-317.
 - Liang, S. R., & Lin, A. C. (2002). Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering. **Computers in Industry**, 48(3), 241-251.
 - Menq, C. & Chen, F. L. (1996). Curve and surface approximation from CMM measurement data. **Computers & industrial engineering**, 30(2), 211-225.
 - Pedersini, F.; Sarti, A. & Tubaro, S. (2000). Automatic monitoring and 3D reconstruction applied to cultural heritage. **Journal of Cultural Heritage**, 1(3), 301-313.
 - Riek, T., todoulou, p. Chris, loose, S. (1996). Comparing rapid prototyping pattern for investment casting on Australian. **9th world conference on investment casting**.
 - Santagati, C.; Inzerillo, L. & Di Paola, F. (2013). Image-based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: limits and potentialities. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XL-5 W, 2, 555-560.
 - Scopigno, R.; Callieri, M.; Cignoni, P.; Corsini, M.; Dellepiane, M.; Ponchio, F. & Ranzuglia, G. (2011). 3 D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization. **Computer**, 44(7), 48-55.



Received: 2016/01/12

Accepted: 2016/10/08

The Use of Rapid Prototyping Technology to Reconstruct the Missing Parts of Glass Works with the Approach of Applying in Historical Glasses

Mehdi Razani* Mohammad Ali Haddadian**
Safar Pourabbas***

Abstract

7

Although nowadays the advancements in technologies and preservation methods have led to effective conservation of historical and ancient glass works, it is still necessary to develop much less-destructive methods in conservation practices. Rapid prototyping technique (RPT) in recent years has been increasingly implemented in Engineering, Medical, Industrial Design and Architecture fields. In this study the RPT- including 3D scanning and 3D printing was investigated and implemented in reconstruction of missing parts of glass works. The reconstruction of a glass work with missing parts was considered as the subject for this study. The ordinary methods for reconstruction of missing areas in historical glasses are moulding and casting away from the object gap-filling with resins, but in this new work the subject was scanned with an optical 3D scanner to be able to simulate the object itself and its missing part in a 3D modeling software and then print by a 3D printer. The whole process was performed with minimum need to make physical contact with the subject. Its potential in obtaining a less-destructive reconstruction procedure was investigated and its advantages and limitations in comparison to traditional methods were identified. The results indicated that implementing RPT in reconstruction of the missing parts of glass works can lead to none or less-destructive treatment in working with ancient glass masterpieces. The reconstruction process can be achieved in a very short time and higher accuracy and the printed piece can be an exact match of the main work. Several pieces of the missing part or the whole subject can be printed. Soft copy of the subject would be available for future works and can be used in other research centers. The subject can be reprinted with any desired changes in the original design of glass work. It is also achievable to attach the printed piece to the main piece temporarily with keeping the potential of reversibility in conservation of the object. And also the study was subject to the following limitations such as: mono color printing of the missing piece, using a polymer as a printing material, limited transparency in printing filaments and minor errors in the performance of the 3D scanner itself.

Keywords: glass objects, conservation, restoration, reconstruction, 3D Scanner, 3D Printer

* Lecturer, Faculty of Conservation and Archaeometry, Tabriz Islamic Art univesrity.

** Lecturer, Faculty of Islamic Design, Tabriz Islamic Art univesrity.

*** Assistant Professor, Faculty of Islamic Design, Tabriz Islamic Art univesrity.