دوفصلنامه علمی- پژوهشی مرمت و معماری ایران
سال ششم، شماره دوازدهم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۷

استفاده از فنّاوری‌های 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 منجربه 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. درراستای بررسی فنّاوری‌های معرفی‌شده، 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 قابل‌استفاده برای چاپگر سه‌بعدی تهیه شد. در ادامه، با بهره‌گیری از روش تحقیق تجربی در قالب نمونه‌سازی، نمونه‌های بازسازی‌شده، آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، قطعه مفقود و چاپ سه‌بعدی‌شده تحلیل شد و سپس به شیشه اصیل وصالی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از فنّاوری‌های مدل‌سازی سریع به‌عنوان روشی نو می‌توانند تا حد زیادی در رفتار کم‌خطر حفاظتی نسبت به شیشه‌های باستانی مفید باشند. چراکه از مزیت‌هایی از قبیل: سرعت و دقت در بازسازیِ قطعات مفقود، تکثیر تمامی اثر به تعداد دلخواه، اندازه‌برداری غیرتماسی ابعاد اثر با دقت و سرعت بالا، امکان ارسالِ فایل نرم‌افزاری قطعه مفقودشده به دیگر مراکز پژوهشی، امکان ساخت قطعه مفقود به شکل اولیه و به‌صورت کاملاً مشابه یا متفاوت با قطعه اصلی، امکان اتصال موقت قطعه ساخته‌شده به بدنه اصلی اثر که اصل برگشت‌پذیری در حفاظت را پوشش می‌دهد، برخوردارند. ازجمله محدودیت‌های این روش‌ها: تک‌رنگ بودن فعلی قطعه چاپ‌شده، محدودبودن جنس و شفافیت رشته‌های پلیمری مورداستفاده جهت ساخت قطعه، خطاهای ابزاری در مرحله اسکن و چاپ سه‌بعدی و همچنین نیاز به اپراتور ماهر برای بازسازی سطوح مفقودشده در نرم‌افزار سه‌بعدی‌است.

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

* مربی، گروه مرمت آثار تاریخی و باستان‌سنجی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نویسنده مسئول). m.razani@tabriziau.ac.ir
** مربی، دانشکده طراحی اسلامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
*** استادیار، دانشکده طراحی اسلامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز.

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

حفاظت آثار و بناهای تاریخی در سراسر جهان سابقه‌ای طولانی دارد و در رابطه با آن تعابیر و تعاریف بسیاری ارائه شده است؛ به‌نحوی 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). هدفِ حفاظت که درواقع، 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 دخالتِ مؤثر در زمان انجام مداخله و اقدامات فنی و پیشگیری قبل از وقوع صدمات است (فیلدن و یوکیلهتو، ۱۳۸۶:۸۳). امروزه حفاظت و مرمت برمبنای چند اصل قاطع و پذیرفته‌شده، 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 ایجادشده، **مستندنگاری:**[۴] برای ثبت مداخلات و همه اطلاعات مرتبط و قضاوت در رابطه با انتخاب‌های حفاظتی، **برگشت‌پذیری:**[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 به‌کارگرفته‌شده و احترام به مواد اصلی و درنهایت، **خوانایی:**[۷] برای نشان‌دادن بخش‌های افزوده‌شده و تغییرات ایجادشده از طریق مداخله، بدون مختل‌نمودن همگنی کل اجزای سازنده اثر (Pallot-Frossard, 2012). این اصول در زمینه اکثر آثار فرهنگی و یادمان‌های تاریخی به‌عنوان خط‌مشی قابل تعمیم‌اند 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 ازقبیل: ترک‌ها، شکستگی‌ها و درنهایت بروز بخش‌های مفقود در این آثار است. (Davison& Newton , 2008). ازاین‌رو، حفاظت و بازسازی این‌قبیل 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 ازلحاظ 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 سنتیِ قالب‌گیری بخش مفقود اثر را بازسازی نمود؛ اولویت دارد. طی چند سال گذشته بهره‌گیری از فنّاوری‌های نوین مانند اسکنر لیزری و چاپگر سه‌بعدی جهت ساخت مدلی سه‌بعدی و مجازی از اشیا و ارتقای آن مدل مجازی در نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌ساز کامپیوتری نتایج موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های ثبت، مستندنگاری- آسیب‌نگاری و کپیه میراث فرهنگی به دنبال داشته است. هدف از این تحقیق، به‌کارگیری فنّاوری‌های نمونه‌سازی سریع ازجمله: اسکنر و چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای و امکان‌سنجی روش یادشده جهت به‌کارگیری آن در مرمت و بازسازی شیشه‌های تاریخی است.

از مهم‌ترین سؤالاتی که این تحقیق براساس آنها شکل گرفته این است: چگونه می‌توان از فنّاوری‌های 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 درنهایت، تخریب می‌شوند: ۱. آسیب فیزیکی[۸] (شکنندگی 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 استفاده‌کردن، پسماندهای درطول دفن، لکه‌های ناشی از محصولات خوردگی فلز و ...، استفاده بیش از حد از مواد حفاظتی و آلودگی هوا ۳. فرسودگی شیمیایی[۱۰] (قوس و قزحی‌شدن، پوسته و حفره‌ای شدن، حل‌شدن شبکه، تبادل یونی (Davison & Newton, 2008: 168-171)، (تصویرهای ۱ و ۲).

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

Archive of SID

www.SID.ir

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

بااینکه رزین‌های مذکور در دمای محیط با انقباض کم و یا بدون آن در محل پلیمریزه می‌شوند، اما این نوع بازسازی درعمل 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 مبتنی‌بر استفاده از مواد قابل‌جدایش می‌دانستند.

امروزه در برخورد با آثار شیشه‌ای تاریخی وابسته به ماهیت شیء از لحاظ قدمت و ارزش‌های آن اگر حفاظت‌گران نیاز به انجام عملیات حفاظتی – اقدامات مرمتی؛ ازجمله بازسازی بخش‌های مفقود را تشخیص دهند، عموماً فرایندهای رایج و سنتیِ قالب‌گیری با مواد مختلف ازقبیل موم دندان‌پزشکی و یا رزین‌های سیلیکونی از شیء به‌کار می‌رود. به‌نحوی که وابسته به حجم و پیچیدگی بخش موردنظر 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، درادامه، انجام عملیات تکمیلی در بخش ریخته‌گری‌شده 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 ازدست‌رفته در شیشه‌های تاریخی توسعه و کاربرد روش‌هایی غیرتماسی (کم‌تماسی) و غیرمخرب همچون فنّاوری‌های مبتنی‌بر نمونه‌سازی سریع، ضرورت یافته است. درادامه، به معرفی روش‌های اسکن 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 وسیعِ گرافیک کامپیوتری، پدیده‌ای است که به ارائه شبیه‌سازی ریاضی سطوح در یک ساختار هندسی- فضایی می‌پردازد. تمامی فنّاوری‌های سه‌بعدی سازی، ازجمله 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 سه بعدی) 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 فنّاوری برای تبدیل ابعاد هندسی نمونه به داده دیجیتال، 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)

Archive of SID

www.SID.ir

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 فنّاوری‌های مبتنی‌بر سه‌بعدی‌سازی دقیق در پایش، ثبت، مستندنگاری و آسیب‌نگاری و همچنین واکنش‌های تخریبی و تعمیری درکنار 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. (Antlej 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، تخت‌جمشید، مقبره کوروش در پاسارگاد، چغازنبیل، کلیساهای ارامنه جلفا، تخت‌سلیمانِ تکاب، بیستون کرمانشاه و برخی دیگر از بناهای مهم ایران صورت گرفته است (امور پایگاه‌های میراث فرهنگی کشور، ۱۳۹۴)؛ اما سندی مبنی‌بر استفاده از این تکنولوژی درراستای بازسازی بخش‌های مفقود و یا ساخت مولاژها و کپیه‌ها 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 درادامه استفاده از چاپگر سه‌بعدی، اقدام به ساخت کپیه‌هایی از مجسمه‌ای مرمری[۱۹] و یک نقش برجسته پلی‌کروم روی چوب[۲۰] مربوط به دوران گوتیک (۱۵۱۰م.) نموده‌اند. در موزه ملی اسلوونی 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 فنّاوری 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 اسکن‌شده را در حداقل زمان بسازد و علاوه‌بر تصاویر دوبعدی، مدل سه‌بعدی را نیز برای بررسی‌های بیشتر دراختیار 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 اسلوونی) (Antlej et al., 2012-b)

Archive of SID

www.SID.ir

را با استفاده از فرایند افزایشی لایه‌لایه می‌سازند که درنتیجه، سریع‌تر از برداشتن یا کاهش مواد است در این فرایند ساخت بدون اعمال فشار و تنش انجام می‌شود. لذا، محدودیت‌های روش‌های موجود ماشین‌کاری را ندارد و هر شکل پیچیده‌ای را با دقت و کیفیت بالا می‌توان تولید کرد (King & Tansey, 2002:313-317). از مواد مختلف پلیمری و حتی فلزی برای ساخت مدل‌ها در نمونه‌سازی سریع استفاده می‌شود، با پیشرفت‌های صورت گرفته در این فنّاوری، نمونه‌سازی سریع به‌عنوان نوعی فرایند استاندارد صنعتی پذیرفته شده است (Colombo et al., 2006). صرف نظر از خواص مکانیکی، مواد مدل می‌تواند شامل ویژگی‌های دیگری ازقبیل رنگ‌پذیری، شفافیت، انعطاف‌پذیری و امثال آن باشد. از مهم‌ترین مزایای نمونه‌سازی سریع که می‌توان به آنها اشاره نمود: کاهش هزینه‌ها 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 نرم‌افزارهای طراحی، تولید انبوه در مرحله طراحی آزمایش و رفع بسیاری از عیوب طراحی به‌علت کاهش زمان تولید و هزینه‌ها، ایجاد قابلیت تجسم،[۲۱] تصحیح،[۲۲] تکرار طرح،[۲۳] بهینه‌سازی[۲۴] و انجام آزمون‌های عملکردی[۲۵] است.

در این فرایند، اطلاعات نمونه اندازه‌گیری‌شده وارد نرم‌افزارهای طراحی با رایانه [CAD][۲۶] می‌شود و با منطبق کردن آرام اطلاعات نقاط سه‌بعدی با ساخت منحنی و سپس ایجاد سطوح و اصلاح آن انجام می‌شود (Shuh, 2002: 241-245; Menq & Chen, 1996: 211-225). فرایند نمونه‌سازی سریع به‌صورت کلی دارای مراحلی است که با ایجاد مدل CAD موضوع موردنظر شروع شده و به ساخت محصول نهایی منتج می‌شود. در مراحل نمونه‌سازی سریع عموماً از این الگوریتم استفاده می‌شود:

ترسیم سه‌بعدی مدل با نرم‌افزارها (با به‌کارگیری یکی از روش‌های: ۱. نقشه دوبعدی موجود ۲. استفاده از داده‌های اسکن‌شده ۳. استفاده از داده‌های دیجیتالی‌شده ۴. استفاده از یک مدل CAD موجود ۵. ایجاد یک مدل CAD جدید)؛

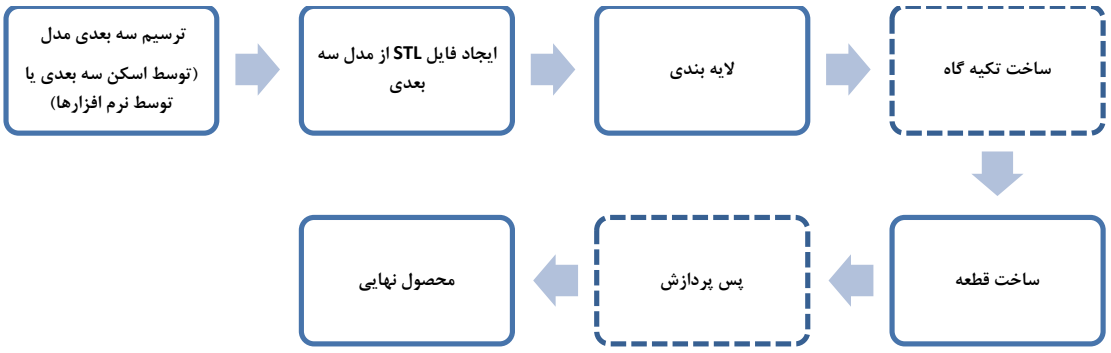
- ایجاد فایل STL[۲۷] از مدل سه‌بعدی تهیه‌شده؛
- لایه‌بندی: نرم‌افزار دیگری همانند CURA، مدل را لایه‌لایه (باتوجه‌به ضخامت لایه‌ها) می‌گرداند؛
- ساخت تکیه‌گاه: لایه‌ها در قسمت‌هایی از قطعه که زیر آنها خالی باشد، به تکیه‌گاه نیاز دارند؛
- ساخت قطعه: براساس فایل ساخت و با اضافه‌شدن مواد روی هم و شکل‌گیری لایه به لایه ساخته می‌شود؛
- پس پردازش: شامل یکی از عملیات‌های افزایش استحکام قطعه، تکمیل عملیات فرآوری و یا پرداخت قطعه می‌شود (رحمتی و همکاران، ۴۸۳۱: ۳۹-۰۹)، (تصویر ۴).

کاربرد اسکن سه بعدی در مستندنگاری و ثبت میراث فرهنگی

اندازه‌برداری دقیق قطعه از بخش‌های مهم در مهندسی معکوس و نمونه‌سازی، سریع است. امروزه به کمک فن‌آوری غیرتماسی اندازه‌برداری سه‌بعدی، توسط اسکنرهای نوری، دقت و سرعتِ اندازه‌برداری افزایش یافته است. دستگاه اسکنر سه‌بعدی[۲۸] با برداشت اطلاعات از قطعات موجود، یک فایل کاملاً دقیق و سه‌بعدی از قطعه را دراختیار قرار می‌دهد. در این روش با اسکن بخش به بخش قطعه موردنظر و انتقال اطلاعات به نرم‌افزار، حجم قطعه به‌صورت مجازی در رایانه ساخته می‌شود. انواع سیستم‌های اندازه‌برداری غیرتماسی در جدول ۱ آورده شده است.

به‌کارگیری چاپگرهای سه‌بعدی در بازسازی بخش‌های مفقود

بنا بر کاربرد روش‌های مدرن اسکن و چاپ سه‌بعدی در علوم پزشکی برای ساخت اندام مصنوعی و بافت‌های ازدست‌رفته، همچنین کاربردهای مهندسی آن در صنایع هوافضا و خودروسازی در ساخت ژنراتور الکتریکی، و نیز



تصویر ۴. الگوریتم مراحل نمونه‌سازی سریع (مراحل خط‌چین‌دار را می‌توان باتوجه‌به فرم قطعه و هدف کار حذف نمود)، (نگارندگان)

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. مقایسه انواع سیستم‌های اندازه‌برداری غیرتماسی مرسوم

اسکنر	روش اندازه‌برداری	فنّاوری	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 قابل‌حمل[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، غیراتوماتیک بودن فرایند اسکن
اندازه‌برداری لیزری دستی	اندازه‌برداری نقطه‌ای[۴۳]	اسکن لیزری	مشاهده فوری اطلاعات دریافتی از سطح اسکن‌شده، 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، اتومات‌بودن 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، اتوماتیک‌بودن 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 حرکت‌های ویژه برای سنسورها طراحی شده‌اند (مانند اسکن سرتاسری بدن انسان)

(D'Apuzzo et al., 2006)

در حوزه هنر و معماری برای ساخت انواع مجسمه و ماکت، این روش‌ها، بعد از تجربه‌های یادشده صلاحیت‌های لازم را برای به‌کارگیری در بازسازی اشیای میراث فرهنگی به‌دست آورده‌اند. در همین راستا، تاکنون بیش از ۳۰ روش مختلف در صنعت برای نمونه‌سازی سریع ابداع شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: استریو لیتوگرافی(SLA)[۲۹]، تف‌جوشی انتخابی لیزری(SLS)[۳۰]، ساخت لایه‌ای(LLM)[۳۱]، چاپ سه‌بعدی(3DP)[۳۲]، جاری‌کردن چندگانه(MJM)[۳۳]، فرایند جاری‌متعدد (PolyJet)[۳۴]، روش ترموجت(TJ)[۳۵]، رسوب مذاب (FDM)[۳۶]. باتوجه‌به 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 مورداستفاده 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. به‌دلیل هزینه بسیار روش اس‌ال‌ای و نیز دردسترس‌نبودن این روش برای محققان و مواردی ازاین‌دست، در این تحقیق برای ساخت و آزمون قطعات از روش FDM استفاده شده است. دلیل دیگر استفاده از این روش، بنابر عواملی همانند دردسترس‌بودن، دقت و سرعت اسکن، راحتی استفاده و به‌کارگیری دستگاه و شفاف‌بودن یا نیمه‌شفاف بودن نمونه اثر اسکن‌شده امروزه از مناسب‌ترین انواع اسکنر برای اسکن آثار شیشه‌ای و سیستم‌های پروژکت کدگذاری نوری قابل‌حمل 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 قابل‌استفاده 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،

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مقایسه معایب و مزیت‌های روش‌های مورداستفاده 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 درنظرگرفته 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
جاری‌کردن چندگانه (MJM)	سر چاپگر شامل تعداد زیادی جت (بیش از ۱۰۰ عدد) است که به‌صورت خطی آرایش یافته‌اند. در این فرایند، مواد ترموپلیمر و آکرلیک فتوپلیمر توسط جت‌ها و متناظر با مقاطع قطعه رویالگو ریخته شده و لایه‌ها و تکیه گاه‌های 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 جاری‌کردن 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 تکیه گاه 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 به‌صورت 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 دربرابر 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 سر چاپگر (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 به‌صورت 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، جداشدن آسان تکیه‌گاه از قطعه، ساخت قطعات عملکردی (مشابه نمونه اصلی)، مواد مورداستفاده: پلی‌ونیل سولفون و پلی‌کربنات، ای بی اس[۴۵] (آکریلو نیتریل بوتادین استایرن) و موم	دقت محدود در مقایسه با روش SLA غیرقابل پیش‌بینی بودن انقباض

(رحمتی و همکاران،۱۳۸۴؛ خلیل‌پور، ۱۳۸۳)

Archive of SID

www.SID.ir

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

مواد، دستگاه‌ها و روش‌های مورداستفاده

- نمونه موردمطالعه

نمونه موردمطالعه، سَری شیشه‌ای از یک چراغ دیواری به شکل کاسه به ارتفاع ۱۰۴ mm و قطر دهنه ۱۹۰ 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 ۶۲ میلی‌متر، بیشترین عرض ۳۸ میلی‌متر، بیشترین ضخامت ۹ 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 موردبررسی دارای یک خط تقارن بوده و نقوش روی آن علی‌رغم شباهت ظاهری و تکراری‌بودن، 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 بسیارریز استفاده می‌شود و اسکنرهای متوسط به‌دلیل نوع لیزر به‌کاررفته در آنها (جهت کاهش آسیب به بدن و چشم)،عمدتاً در نمونه‌گیری اشیا با اندازه متوسط و هنچنین در ابعاد انسانی کاربرد دارد. در این پژوهش، از اسکنر سه‌بعدی رکس‌کن۳ [۴۶] 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 برگردانده 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 به‌راحتی توسط اکثر نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌ساز مانند کتیا، سالید ورک و راینو پشتیبانی می‌شود (پژوهشگران صنعت آریا، ۱۳۹۴).

نرم‌افزارهای سه‌بعدی‌سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

باتوجه‌به خطاهای اجتناب‌ناپذیر در مرحله اسکن نمونه اثر و نیز بازسازی سه‌بعدی بخش مفقود به‌صورت مجازی، نیاز است تا از نرم‌افزار سه‌بعدی‌ساز برای ویرایش فایل به‌دست‌آمده از اسکنر استفاده شود. در این تحقیق از نرم‌افزار راینو سروس [۴۹] نسخه ۵ استفاده گردید. راینو، نرم‌افزاری سه‌بعدی ساز بوده و به‌عنوان تنها ابزار مدل‌سازی سه‌بعدی که کاملاً براساس سیستم نربز [۵۰] تجاری کار می‌کند. این نرم‌افزار را شرکت مک‌نیل و شرکا [۵۱] توسعه داده است. این سیستم، درواقع 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 به‌خوبی 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 موردچاپ به فایل G-code است، از نرم‌افزار Cura نسخه ۱۵/۰۴ استفاده گردید. این نرم‌افزار فایل مدل موردچاپ را با فرمت STL به‌صورت ورودی دریافت کرده و فایلی 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)

Archive of SID

www.SID.ir

چاپگر سه‌بعدی

برای بازسازی بخش مفقود نمونه شیشه موردآزمایش از چاپگری سه‌بعدی با نام چاپبات ۲۰۲۰ که در مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز بومی‌سازی شده است، استفاده گردید (تصویر ۷). روش کار این چاپگر مبتنی‌بر لایه‌گذاری مذاب یا FDM است که می‌تواند عملیات چاپ سه‌بعدی را تا حداقل ضخامت لایه ۱۰۰ میکرون (۰/۱ میلی‌متر) انجام دهد. نازل چاپگر مذکور دارای قطر ۰/۴ میلی‌متر است. به‌علاوه، با استفاده از این چاپگر امکان نمونه‌سازی با انواع رشته‌های پلیمری (رشته‌های ساخته‌شده از مواد مختلف که درواقع مواد اصلی چاپگر سه‌بعدی برای چاپ قطعات هستند) امکان‌پذیر است. ازجمله فیلامنت یا رشته‌های پلیمری موردنظر می‌توان به گونه‌های ساخته‌شده از ترکیبات ABS[۵۲]، PLA[۵۳]، PC[۵۴]، HIPS[۵۵] و PETG[۵۶] اشاره نمود.

مواد مورداستفاده

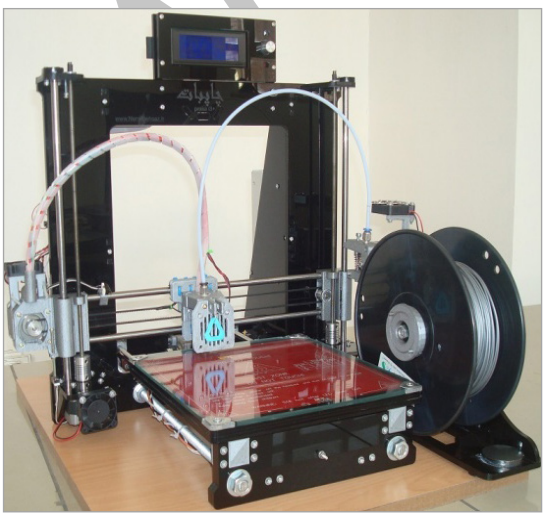
ضرورت‌هایی در ویژگی‌های ماده مورداستفاده در بازسازی شیشه وجود دارد که شامل: قابلیت شکل‌پذیری، شفافیت یا نیمه‌شفافی، با ضریب انعکاسی نزدیک به شیشه، حداقل انقباض بعد از سخت‌شدن و تشکیل جسم جامد و سخت، ایجاد بافت و سطح مناسب، مقاومت دربرابر تغییر رنگ و فساد، دارابودن قابلیت روتوش‌کاری و صیقل‌کاری کافی است (Davison & Newton, 2008, Down, 2001). در همین راستا از میان رشته‌های پلیمری چاپ سه‌بعدی، نمونه‌های ABS و PLA که تقریباً واجد این ویژگی‌ها هستند، در کار نمونه‌سازی بخش مفقود اثر شیشه‌ای این مطالعه مورداستفاده قرار گرفتند و قطعه موردنظر با این رشته‌های پلیمری چاپ گردید.

تصویر ۶. اسکنر لیزری رکس‌کن سه؛ مورد استفاده در اسکن‌نمودن نمونه موردمطالعه این تحقیق (پژوهشگران صنعت آریا، ۱۳۹۴)

دو نوع رشته‌های پلیمری ABS و PLA به‌صورت گسترده دردسترس بوده و ازلحاظ قیمت تمام‌شده نیز برای چاپ سه‌بعدی صرفه اقتصادی بیشتری دارند. گونه PLA، معمولی‌ترین رشته‌های پلیمری است که اسید پلی‌لاکتیک که دراصل پلاستیکی زیست تجزیه‌پذیر، دوستدار طبیعت و مشتق‌شده از نشاسته است که در گستره دمای بین ۱۸۰-۲۳۰ °C ذوب می‌شود. بوی بد آن هنگام پرینت به هیچ وجه خطرناک نیست. اجسام و قطعات ساخته‌شده از این ماده، قوی اما نسبتاً ترد هستند. این رشته‌ها به‌صورت طبیعی در رنگ‌های سفید نیمه‌شفاف‌اند 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 می‌شود. 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 استفاده‌های مداوم توصیه می‌شود. دمای ذوب آن ۲۱۰-۲۶۰ °C است و از لحاظ قیمت مشابه PLA است. مزیت ABS بر PLA آن است که اشیای ساخته‌شده با آن قوی‌تر و همچنین تردی کمتری دارد و تا دمای بالاتری مقاومت می‌کند. همچنین در رنگ‌های مختلفی این رشته تولید می‌شود که درخشندگی بیشتری دارد و در رنگ‌های نقره‌ای و طلایی در بازار موجود است (Canessa et al., 2013).

نتایج و بحث

پس از عکاسی و مستندنگاری قطعات شکسته‌شده نمونه مطالعاتی، بخش‌های جداشده اثر با رزین متیل متاکریلات ٪۴۰ وصالی گردید و برای بازسازی بخش مفقود شیشه با استفاده



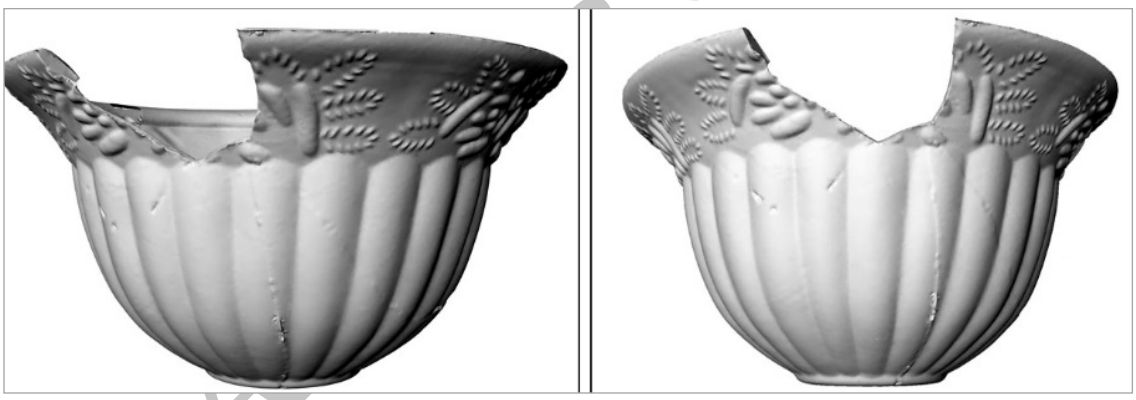
تصویر ۷. چاپگر سه‌بعدی چاپبات ۲۰۲۰ بومی‌سازی‌شده در مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نگارندگان)

Archive of SID

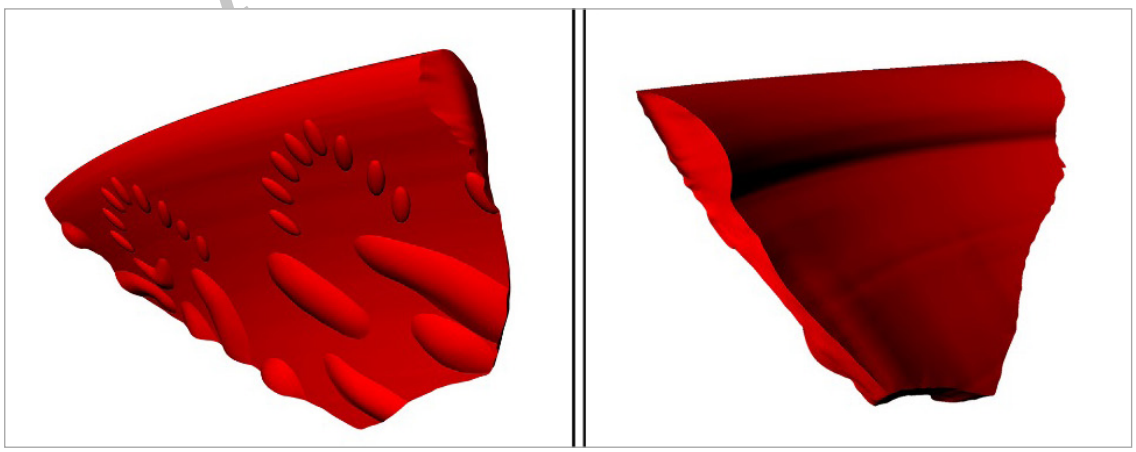
www.SID.ir

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 نربز ساخته شد. قابل‌ذکر است که هندسه فایل STL اسکنر به‌صورت مِش است و این تا حد زیادی در بازسازی بخش‌های مفقود براساس هندسه نربز، مشکل‌آفرین است چراکه ماهیت ساخت سطوح در این دو مدل گرافیک کامپیوتری متفاوت است. از دیگر مشکلات ویرایش فایل خروجی اسکنر در ارتباط با نمونه اثر موردمطالعه 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 نربز استخراج گردید و با فرمان‌های اختصاصی، سطوح نربز 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 مِش، بازسازی‌ها انجام گرفت و درصورت جواب‌نگرفتن، از دستورات اختصاصی سطوح نربز استفاده شد. برای حل مشکل عدم تقارن و عدم تکرار منظم نقوش برجسته روی نمونه اثر، براساس الگوی تاحدی تکرارشونده و تناسبات 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.



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



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

Archive of SID

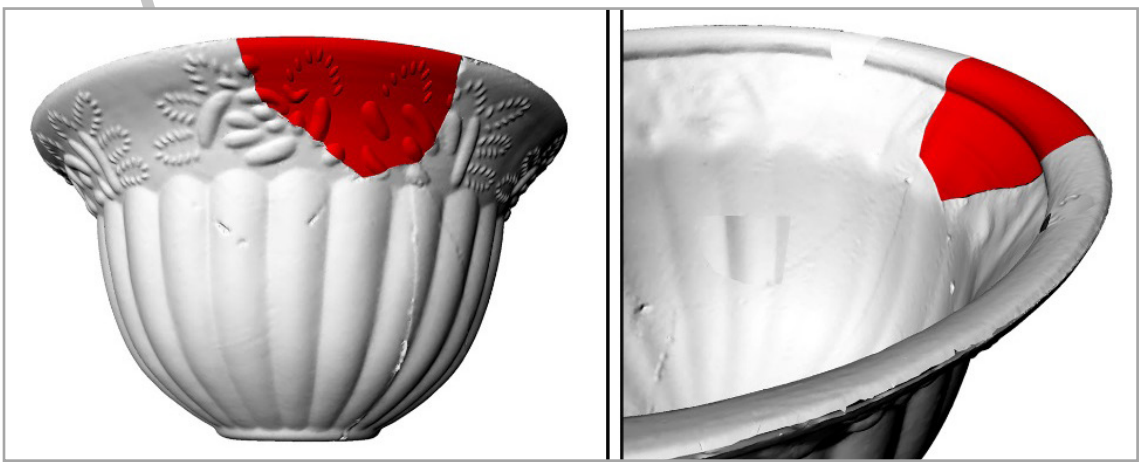
www.SID.ir

درادامه از قطعه مفقود که به‌صورت مجازی بازسازی شده بود، فایل دیجیتال مناسب برای چاپگر سه‌بعدی تهیه گردید. در همین راستا پس از اتمام ساخت مدل سه‌بعدی مجازی از قطعه مفقودشده براساس فایل STL خروجی اسکنر، برای آزمون نهایی و تطبیق آن با بدنه اصلی اثر، در محیط نرم‌افزار راینو، قطعه مفقودی بازسازی‌شده در محل اصلی به‌صورت نرم‌افزاری جااندازی شد و ایرادات نهایی بر اساس مطابقت با لبه سطوح قسمت‌های موجود، برطرف گردید (تصویر ۱۰). سپس طرح نهایی برای چاپ سه‌بعدی بخش مفقود و انجام آزمایشات جهت انجام مراحل پایانی کار ارائه گردید.

مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در کیفیت چاپگرهای سه‌بعدی را می‌توان در تکنولوژی مورداستفاده در چاپگر سه‌بعدی، ماده مورداستفاده (رشته پلیمری)، ضخامت لایه‌ها، سرعت چاپ، وضعیت قرارگیری قطعه حین چاپ و میزان توپری قطعه ارزیابی نمود. به‌نحوی که هرچه چاپگر از تکنولوژی پیشرفته‌تر برخوردار باشد کیفیت محصول نهایی مطلوب‌تر خواهد بود. بنابر اینکه رشته‌های پلیمری با کیفیت‌های مختلفی در بازار وجود دارند، می‌توان گفت مناسب‌ترین رشته پلیمری آن است که علاوه‌بر 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 لایه‌های اعمالی رشته پلیمری حین انزال است. به‌گونه‌ای که هرچه سرعت نزول و ضخامت لایه‌های رشته پلیمری کمتر باشد کیفیت قطعه بهتر می‌شود و هرچه سرعت و ضخامت لایه‌ها بیشتر باشد، قطعه موردنظر بافت‌های درشت‌تر و زمخت‌تری خواهد داشت و از میزان جلای سطحی آن کاسته می‌شود. چنانچه نیاز به چاپ ظریف‌تری باشد، می‌توان ضخامت لایه‌ای 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 می‌شود.

سرعت چاپ از عوامل دیگر مؤثر در کیفیت سطحی چاپ است. سرعت متداول چاپ مناسب برای چاپگرهای FDM در محدوده ۲۰-۷۰ میلی‌متر بر ثانیه توصیه می‌شود. ازآنجائی‌که در سرعت‌های چاپ بالا با افزایش ارتعاش در خود چاپگر روبرو هستیم و این افزایش ارتعاش به‌صورت یک‌سری از الگوهای ارتعاشی بر روی سطح ظاهری قطعه چاپ‌شده خود را نشان می‌دهد، لذا در مواردی همچون موضوع این تحقیق کاهش سرعت چاپ، افزایش کیفیت سطحی را درپی 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 می‌دهد. در قطعاتی که می‌توان بدون پایه نگهدارنده محسوس یا به‌صورت ایستاده اقدام به چاپ نمود، کیفیت سطحی کاملاً متفاوت و بسیار مطلوب‌تر خواهد بود. در همین راستا تجربیات این تحقیق نشان داد، در قطعاتی که برجستگی‌های ظریف دارند و سطح زمینه حامل این برجستگی‌ها به یک سطح افقی یا تخت نزدیک است، بهتر است تا حد امکان در وضعیت ایستاده چاپ شوند. چراکه نیمرخ لایه‌های چاپ‌شده در حالت افقی انحراف بیشتری از یک منحنی پیوسته از خود نشان می‌دهند. درحالی که در وضعیت ایستاده این انحراف به حداقل میزان خود می‌رسد (تصویر ۱۱).

درنهایت می‌توان به میزان توپری قطعه اشاره کرد که وابسته به میزان استقامت موردنیاز، میزان شفافیت، عبور نور و حساسیت قطعه، می‌توان آن را از ۰تا٪۱۰۰ توپر و یا توخالی درنظر گرفت. این امر در یک قطعه چاپ سه‌بعدی‌شده بیشتر از منظر هزینه تمام‌شده مدنظر قرار می‌گیرد. بدین معنا که با افزایش توپری قطعه، زمان چاپ و مصرف رشته پلیمری



تصویر ۱۰. جااندازی و تطبیق قطعه مفقودی بازسازی‌شده در بدنه اصلی اثر به‌صورت مجازی در محیط نرم‌افزار راینو (نگارندگان)

Archive of SID

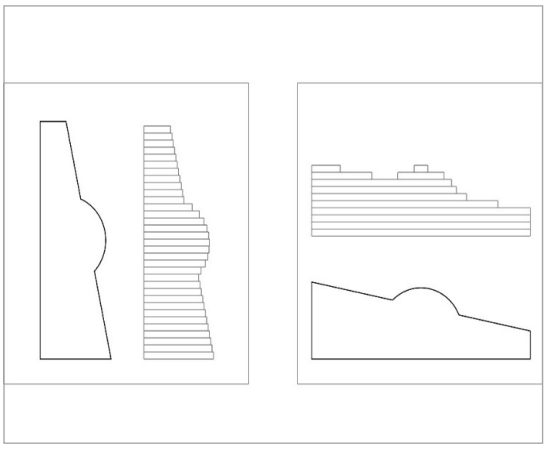
www.SID.ir

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 قابل‌انجام 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 قابل‌انجام است و حتی در مواردی نیز می‌توان لایه‌های رنگی مات و شفافی 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 قطعه‌چاپ‌شده به مقدار ٪۱ نسبت به قطعه اصلی طراحی‌شده کوچک‌تر درنظر گرفته شده و چاپ گردد. این پیشنهاد ازآن‌روست که فضایی برای جسمیت چسب مورداستفاده در وصالی وجود داشته باشد. در همین راستا بعد از انجام عملیات مختصر تکمیلی روی لبه‌های قطعه چاپ‌شده با سوهان ریز قطعه به ظرف 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: پارالوئیدبی۲۷ که در رابطه با اتصال قطعات در حفاظت و مرمت مورد استفاده قرار می‌گیرند، مبتنی‌بر انحلال در حلال‌های آلی مثل گزیلن و استن و الکل هستند؛ و ازآنجا 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 بازگشت‌پذیر تلقی می‌شوند همانند پریمال، می‌توان مسئله بازگشت‌پذیری را رعایت نمود و یا اینکه از رزین‌های برگشت‌پذیر به‌عنوان پرایمر در لبه‌های قطعه چاپ‌شده و ظرف اصلی استفاده کرد تا فرایند به‌طور کلی حالت برگشت‌پذیری خود را حفظ نماید.



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

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

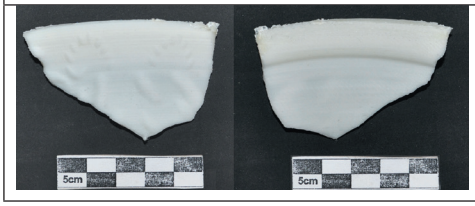
Archive of SID

www.SID.ir

اما در این نمونه به‌واسطه تاریخی‌نبودن شیء و حساس‌نبودن نسبت به برگشت‌پذیری، فرایند مدنظر قرار نگرفت.

بنابر پیشرفت‌های قابل توجهی که در زمینه مدل‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده و همچنین دردسترس‌بودن فنّاوری آنها، امروزه بستر مناسبی برای ورود این‌گونه فنّاوری‌ها در زمینه حفاظت و مرمت میراث فرهنگی فراهم شده است. از این قبیل تکنولوژی‌ها و درواقع مهم‌ترین ابزارهای مدل‌سازی سریع؛ اسکنرها و چاپگرهای سه‌بعدی هستند. فنّاوری‌های نمونه‌سازی سریع می‌توانند در رابطه با ساخت کپیه از اشیا و مجسمه‌ها، نقش‌برجسته‌ها و نقوش صخره‌ای، آثار و تزئینات ارزشمند در ابعاد واقعی (یا با تغییر ابعاد) و همچنین بازسازی بخش‌های مفقود آثار تخریب‌شده، به‌کار گرفته شوند. ازجمله مزیت‌های استفاده از این روش‌ها که

جدول ۳. مقایسه شرایط و محصولات چاپ‌شده با چاپگر چاپبات ۲۰۲۰ از قطعه مفقود موردمطالعه (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(پایه گذاری)	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 دربازسازی بخش مفقود

(نگارندگان)

Archive of SID

www.SID.ir

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 مرسومِ 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 به‌نحوی‌که محدودیت چندانی از نظر فرم و شکل هندسی برای ساخت وجود ندارد؛
- امکان ارزیابی و اصلاح طرح سه‌بعدی و تکرار آن درصورت عدم رضایت از هر بخش در کمترین زمان ممکن؛
- عدم خطر ناشی از اتصال قطعه بازسازی‌شده با شیء موردنظر به‌سبب خنثی بودن آن؛
- کاهش زمان در ساخت قطعات مفقود.

ذکر این نکته لازم است که از منظر دیگر درحال حاضر این روش ترکیبی محدودیت‌هایی دارد. ازجمله آنها: تک‌رنگ بودن قطعه‌مدل‌سازی و چاپ‌شده 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 داشته باشد احتمالاً به رتوش‌کاری رنگی نیز نیاز خواهد بود.

از دیگر محدودیت‌ها می‌توان به محدودبودن 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 به‌صورت 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 درکل می‌توان گفت؛ فرایند طی‌شده قابل‌قبول است و می‌تواند در امر بازسازی میراث فرهنگی به‌خصوص شیشه‌ای تاریخی مورداستفاده قرار گیرد. چراکه با مقایسه تک‌تک این مزیت‌های اجرایی و عملی نسبت به روش‌های سنتی و همچنین مطابقت‌دادن آنها با اصول مبانی مرمت آثار تاریخی می‌توان روش‌های یادشده را شدیداً منطبق با اصول مبانی نظری دانست. به‌خصوص در رابطه با شیشه‌های تاریخیِ حساس و ظریف و ترک‌دار موارد مذکور بسیار در اجرا و ارائه طرح حفاظت و مرمت و بازسازی کارآمدند. به‌نحوی که در بسیاری موارد به‌صورت حداکثری اصول پذیرفته‌شده حفاظت و مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی همچون؛ مطالعه، شناخت و مستندنگاری دقیق اثر، قابلیت جداشدن و برگشت‌پذیری کلیه فرایند (مواد مرمتی و اقدامات انجام‌شده)، حداقل دخالت مؤثر، خوانایی اقدامات مرمتی، عدم مداخله آسیب‌رسان، سازگاری حداکثری با اثر میزبان ازلحاظ خنثی‌بودن ماده و حفظ جنبه‌های زیبایی‌شناسی اثر را پوشش می‌دهند.

نتیجه‌گیری

امکان‌سنجی استفاده از روش‌های جدید در بازسازی قطعات مفقود بنابر تجهیزات و تکنولوژی‌های موجود در کشور از مهم‌ترین اهداف این پژوهش است. نتایج مطالعات صورت‌گرفته در این پژوهش نشان‌دهنده آن است که فرایند تبدیل تصاویر اسکن‌شده اثر موردمرمت به فایل سه‌بعدی مجازی با نرم‌افزار، به کمک روش‌های نمونه‌سازی سریع و درنهایت بازسازی قطعه‌ای متناسب با بخش مفقود در آثار شیشه‌ای می‌تواند درجهت حفاظت پایدار و غیرتماسی بسیار مفید باشد. اما درحقیقت موفقیت یک طرح بازسازی بخش مفقود با فنّاوری‌های نمونه‌سازی سریع ارتباط مستقیمی با این فرایندها دارد: برداشت صحیح و دقیق شیء، طراحی و انجام عملیات تکمیلی بر روی داده‌های دیجیتالی به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بعدی‌سازی، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب شامل: رشته‌های پلیمری (ازلحاظ رنگی و بافتی و صیقلی‌بودن) و چاپگر سه‌بعدی مناسب، درکنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرایند چاپ سه‌بعدی و درنهایت عملیات وصالی و روتوش نهایی. باتوجه‌به مزیت‌ها و معایب ذکرشده 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 به‌صورت بازسازی و بازنمایی بخش‌های مفقود سازه‌ای و تزیینی در آینده دارند. در همین راستا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای اینکه ترکیب روش‌های یادشده بتواند نتایج ملموس‌تر و

Archive of SID

www.SID.ir

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 ذکرشده 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 حفاری‌شده 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)

Archive of SID
www.SID.ir

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 درنظرگرفتن فاصله یک ضلع (بین دوربین و پرژکتور) و دو زاویه معلوم (زاویه تابش نور پروژکتور و زاویه‌دید دوربین)، فاصله نقطه موردنظر 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**.
- خلیل‌پور آذری، سامان و خانجانی، علی (۱۳۸۳). **قالب‌سازی و نمونه‌سازی سریع**. تهران: ناقوس.
- رحمتی، صادق؛ سلیمی، مجتبی و ایلدارژاله، 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.
- http://psarta.com/product/rexcan-3 (بازیابی‌شده در: ۲۰ آذر ۱۳۹۴)
- www.omurpaygah.ichto.ir/Default.aspx?tabid=4595&language=fa-IR (بازیابی‌شده در: ۸ آبان ۱۳۹۴)
- Antlej, 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.
- Antlej, K., Celec, K., Sinani, M., Mirtič, E., Ljubič, D., Slabe, J. & Kos, M. (2012). Restoration of

Archive of SID

www.SID.ir

a Stemmed Fruit Bowl Using 3d Technologies. **Review of the National Center for Digitization**, (21), 141-146.

- Antlej, 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.

Archive of SID

www.SID.ir