دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۵

کاربرد چاپگر سه‌بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای

شیما بهرام‌پور* امیرحسین کریمی **

چکیده

به‌دلیل مشکلات بازسازی بخش کمبود اشیای تاریخی شیشه‌ای در مرمت که در سه بخش: قالب‌گیری، دوغاب‌ریزی و شکل‌دهی قسمت بازسازی وجود دارد، تحقیق حاضر درپی یافتن مسیری برای حل مشکلات مذکور برآمده است. سؤال تحقیق به این شرح است: امکانات بازسازی قسمت کمبود اشیای شیشه‌ای با استفاده از چاپگر سه‌بعدی در ایران چگونه است؟ پژوهش حاضر، کاربردی و از نظر روش، تحلیلی- آزمایشگاهی است؛ و با هدف کلی ارائه روشی کارآ در این روند چاپگر سه‌بعدی را ابزاری با کمترین دخالت و تخریب و همچنین دارای دقت بالا در جزئیات به‌عنوان جایگزین روش‌های مرسوم پیشنهاد داده است. تا پیش از این، کاری متمرکز در استفاده از چاپگر سه‌بعدی برای بازسازی اشیای شیشه‌ای تاریخی انجام نشده است ازاین‌رو، پژوهش پیش‌رو دارای ایده‌ای نو است. تصمیم‌گیری در این مورد با بررسی دو روش بازسازی قسمت کمبود با روش رایج و با استفاده از فنّاوری سه‌بعدی انجام شد. روش‌های مقایسه‌شده عبارت‌اند از: روش رایج پرکردن کمبود با رزین اپوکسی و روش‌های پیشنهادی بازسازی سه‌بعدی با رزین آکریلیک، پلکسی‌گلاس و پلی‌اتیلن ترفتالات. نخست، نمونه‌هایی با روش‌های پیشنهادی بازسازی شدند و سپس برای دستیابی به روش بهتر به‌صورت آزمایشگاهی آزمون پیرسازی و تست مقاومت به سایش روی نمونه‌ها انجام گرفت. آزمایش‌های صورت‌گرفته نشان داد که رزین آکریلیک به روش چاپگر سه‌بعدی جایگزین مناسبی برای بازسازی قسمت کمبود اشیای شیشه‌ای است و پلکسی‌گلاس با روش کاهشی سه‌بعدی (لیزر و CNC) نیز، نتیجه‌ای مطلوب دارد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

کلیدواژگان: مرمت اشیای شیشه‌ای، چاپگر سه‌بعدی، اسکنر سه‌بعدی، بازسازی مجازی.

* کارشناسی‌ارشد مرمت اشیا، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان (نویسنده مسئول). shimabahrampoor@yahoo.com
**استادیار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

مقدمه

روش مرسوم بازسازی شیشه‌های تاریخی، به‌کارگیری انواع اپوکسی به‌عنوان ماده بازسازی است. این روش، سال‌هاست در موزه‌ها و مؤسسات مختلف مرمت به‌کار رفته و امروزه نیز کاربرد دارد. اما در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای چه با فرم پیچیده، چه ساده به روش مرسوم مشکلاتی وجود دارد (Koob, 2006: 91; Barton et al., 2013).

برای مثال، در اشیای شیشه‌ای به‌دلیل شفاف‌بودن ماده دو طرف قطعه بازسازی‌شده باید دارای فرم و بافت موردنظر باشد ولی در روش مرسوم ممکن است یک طرف قطعه، فرم دلخواه را به‌دست نیاورد. همچنین برای بازسازی قسمت کمبود باید از شیء قالبی درست شود تا شکل قسمت کمبود به‌دست آید؛ اولاً ممکن است به‌دلیل بی‌استحکامی شیء، اجازه قالب‌گیری نباشد. دوماً ممکن است قطعه قالب‌گیری‌شده، تفاوت زیادی با قسمت کمبود داشته باشد. سوماً ممکن است قسمت موردنظر بسیار بزرگ باشد و قالب‌گیری به روش مرسوم مشکل باشد (Lemajic, 2006). درنتیجه باید مراحل تکمیلی بر روی قطعه صورت گیرد که می‌تواند باعث آسیب به شیء و بدشکل‌شدن قطعه شود. برای مثال در بازسازی شیشه شفاف، عملیات بعد از دوغاب‌ریزی بر روی اپوکسی، باعث مات‌شدن قسمت بازسازی می‌گردد. همچنین بازسازی به روش مرسوم در بیشتر موارد با یک‌بار دوغاب‌ریزی صورت نمی‌گیرد و در چند مرحله این عمل باید تکرار شود تا نتیجه دلخواه به‌دست آید. این خود نیازمند پاک‌سازی شیء بعد از هربار بازسازی است که ممکن است به شیء آسیب برساند. در اینجا بحث برگشت‌پذیری نیز مطرح است که اپوکسی ماده برگشت‌پذیری محسوب نمی‌شود. در مواردی که بازسازی با استفاده از ریختن چسب به داخل قالب صورت می‌گیرد، احتمال تشکیل حباب بسیار زیاد است. البته امکان کنترل و کم‌کردن و ازبین نرفتن کامل حباب‌ها نیز وجود دارد. در قالب‌های بسته تعداد حباب‌ها بسیار زیاد می‌شود، زیرا دسترسی به آنها مقدور نیست و خروج حباب حتی از روزنه‌ای کوچک امکان‌پذیر نیست. اگر شیء شیشه‌ای را سطح صدفی‌شده گرفته باشد و یا سطح مملو از خلل و فرج باشد و اگر ماده بازسازی که برای پرکردن قالب‌ها ریخته می‌شود، از منافذ احتمالی قالب روی درزها نفوذ کند و یا بیشتر از حد معمول روی سطح بیاید، برداشتن آن بر روی سطح شیشه آسیب ایجاد می‌کند (حقی، ۱۳۷۵). مشکل دیگر این روش، یکدست‌بودن رنگ قسمت بازسازی است. زمانی که رنگدانه با اپوکسی مخلوط می‌شود، حتی اگر پودر رنگدانه کامل ساییده شده باشد، بازهم دانه‌های رنگ، درون اپوکسی باقی می‌ماند و رنگ کامل یکدست نمی‌گردد (Koob, 2006: 86).

در مراحل قالب‌گیری مشکلاتی دیگر وجود دارد. برای نمونه، قالب باید به‌خوبی به سطح شیء چسبیده باشد تا ضخامت قسمت بازسازی دقیقاً با ضخامت شیء یکی شود. برای این کار در مرحله اول متصل‌کردن کامل قالب به شیء مشکل است، مخصوصاً درمورد قالب سیلیکون رابر. در مرحله بعد ممکن است قالب به‌دلیل حرارتی که از اپوکسی ساطع می‌شود، خود را کمی ول کند و اتصال کامل را از دست بدهد. این امر درباره قالب شفاف بسیار اتفاق می‌افتد ازاین‌رو نامناسب است که در بازسازی شیء شفاف، عملیات تکمیلی روی اپوکسی باعث مات‌شدن آن می‌شود (بهرام‌پور، ۱۳۹۴).

با این مشکلات، استفاده از جایگزینی برای قالب‌گیری مرسوم و ساخت قطعه بازسازی به‌صورت جداگانه می‌تواند پیشنهاد خوبی باشد. نظربه پیشرفت‌های چاپ سه‌بعدی در سالیان اخیر، در پژوهش حاضر این روش به‌عنوان جایگزین پیشنهاد داده شده است. بنابراین پرسش‌های تحقیق به این شرح است: امکانات بازسازی قسمت کمبود اشیای شیشه‌ای با استفاده از چاپگر سه‌بعدی در ایران چگونه است؟ روش‌های بازسازی با چاپگر سه‌بعدی در مرمت شیشه دارای چه مزایا و معایب فنی و اجرایی هستند؟ مواد پلیمری پیشنهادی برای بازسازی شیشه ازنظر استحکام و زردشدگی چه کیفیتی دارند؟

هدف اصلی، بررسی مزایا و معایب روش‌های بازسازی اشیای شیشه‌ای با استفاده از فنّاوری سه‌بعدی است که با استفاده از نمونه‌سازی مواد و مقایسه صورت گرفته است.

بازسازی با استفاده از ابزارهای سه‌بعدی در درجه اول به‌دلیل کمترین دخالت هدف این پروژه قرار گرفت. بررسی بازسازی اشیای شیشه‌ای تاریخی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی، پژوهشی نو است. همان‌طور که گفته شد، در بازسازی قسمت کمبود با فرم پیچیده، با استفاده از روش‌های مرسوم زمان‌بر است و مشکلاتی دارد. درنتیجه، در پژوهش حاضر بازسازی شیشه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی بر روی شیشه مات و شفاف موردپژوهش قرار گرفت. علاوه‌بر چاپگر سه‌بعدی، فنون کاهشی سه‌بعدی، لیزر و CNC نیز بررسی شد. هر روشی معایب و مزایای خاص خود را دارد که درادامه به آن اشاره می‌شود.

پیشینه کاربرد فنّاوری تصویر مجازی در علوم میراث

اولین تعریف از کاربرد فنّاوری تصویر مجازی در علوم میراث را *رایلی*[1] در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان استفاده از بازسازی رقومی در باستان‌شناسی به‌کار برد. درکل، گرافیک کامپیوتری سه‌بعدی به

دو دسته: فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. مورد اول به برنامه‌های کاربردی به‌طور عمده تحقیق و مطالعه، -در جایی که نیاز اولیه به مستندنگاری وجود دارد، مانند حفاری‌های باستان‌شناسی- مربوط است. مورد دوم بیشتر در رشد و نشر میراث باستان‌شناسی از طریق موزه‌های مجازیِ قابل‌دسترس در رسانه‌های دیجیتالی به‌کار گرفته می‌شود (Stanco et al., 2011). تکنولوژی اسکنر سه‌بعدی درحال حاضر در مستندکردن آثار هنری مانند: مجسمه (Scopigno et al. 2011; Rocchini et al., 2001)، شناسایی، ثبت شواهد و بازسازی رنگهای قدیمی در تابوت سنگ آهکی رومی (Siotto et al., 2015)، یافته‌های باستان‌شناسی و انسان‌شناسی (Kuzminsky & Gardiner, 2012) به‌کار می‌رود. برای مثال ظرف‌های سفالی موزه ملی باستان‌شناسی فلورانس (Dionisio & Licari, 2010)، موضوع دیگر کاربرد این فنّاوری بوده‌اند. یکی دیگر از پروژههای انجام‌شده، موزه مجازی برای اشیای باستان‌شناسی است (Bruno et al., 2010). از دلایل دیگر استفاده از اسکنر سه‌بعدی، ساخت مولاژ است که زمان ساخت با استفاده از تکنولوژی سه‌بعدی حدود ٪۲۰کاهش می‌یابد (Koska, 2011). از این روش در غار معروف آلتامیرا[۲] در اسپانیا و همچنین غار دیگری در ایتالیا[۳] استفاده شده است (Pezzati & Fontana, 2008). با استفاده از این روش می‌توان در مطالعات تاریخی، دسترسی به آرشیو رقومی، همچنین نظارت و تحلیل مراحل مرمت کارها را آسان‌تر کرد (Ibid).

چاپگرهای سه‌بعدی در علوم میراث و مرمت آثار تاریخی کاربردهای گوناگونی در زمینه‌های ساخت مولاژ نقش برجسته سنگ مرمر (Balzani et al., 2005)، شیء سفالی (Doi & Ono, 2010)، پی‌سوز برنزی (Antlej et al., 2011)، مجسمه چوبی و سنگ مرمر (Antlej & Zavrl, 2010) داشته‌اند. ساخت قالب (Lontos et al., 2012)، آنالیز و بررسی قسمت‌های غیر قابل دسترس اشیای تاریخی (Nicolas et al., 2014) و بازسازی و ساخت تکیه‌گاه اشیا (Barreau et al., 2014) از دیگر کاربردهای این ابزارهاست که در بازسازی مجسمه مریم مقدس (Arbace et al., 2012)، بازسازی مجسمه از سنگ مرمر (Scopigno et al., 2014)، بازسازی اشیا موزه اسلوونی (Antlej et al., 2012) به‌کار گرفته شده است.

در بررسی حاضر مطالعه روش‌های رایج بازسازی شیشه‌های تاریخی در ایران با استفاده از بررسی پایان‌نامه‌های دانشگاه هنر اصفهان صورت گرفته‌است. روش معمول بازسازی شیشه شامل قالب‌گیری است که خود به سه دسته قالب یک‌طرفه، قالب دو طرفه و قالب بسته تقسیم می‌شود (حقی، ۱۳۷۵). در ایران اکثراً از آرالدیت[۴] به‌منظور پرکردن کمبود استفاده شده است (کریمی، ۱۳۸۰). در نمونه‌های خارجی در تحقیقات اخیر *مارتینز* و دیگران (2011) در موزه پرهیستوریا و انستیتو والنسیا،[۵] از فیلم‌های مصنوعی پلی‌اتیلن ترفتالات[۶] و پلی پروپیلن[۷] استفاده شده‌است. روش دیگر راکوب و دیگران (2011) با استفاده از پارالوئید B-72 است، به‌کار برده‌اند. روش دیگر ساخت قالب که آن را کوب برای قسمت‌های کمبود پیچیده مانند دسته مطرح نموده است، دو نوع دارد: موم تاشده یک‌تکه و قالب دو قسمتی. برای قالب پوششی یا کمربندی، قسمت کمبود در موقعیت مناسب قرار داده می‌شود و سیلیکون رابر در اطراف آن ریخته می‌شود (Koob, 2006: 95- 101). نوع دیگری از قالب را دیویسون با عنوان قالب گل مجسمه‌سازی[۸] شرح داده شده است. روش دیگر بازسازی قسمت کمبود در شیشه استفاده از پلکسی‌گلاس (ورقه اکریلیک) و متاکریلات است (Davison, 2006). اگرچه بنا بر بررسی‌ها، استفاده از چاپگر سه‌بعدی در بازسازی اشیای تاریخی سفالی و سرامیکی پیش از این انجام شده ولی هیچ پژوهشی درباره مرمت اشیای شیشه‌ای تاریخی با این شیوه منتشر نشده است.

روش‌ها

روش بازسازی در این پروژه به‌طور کلی شامل دو بخش، بازسازی معمول در مرمت و روش بازسازی با استفاده از فنون سه‌بعدی شامل: چاپگر سه‌بعدی، لیزر و CNC است. کار بازسازی مجازی اشیا در نرم‌افزار جئومجیک[۹] و کتیا[۱۰] انجام شد. در روش اول، چاپ سه‌بعدی با استفاده از دستگاه EDEN 260 انجام شد که جزو فنون PolyJet است. در این روش، قطعات به‌صورت لایه‌لایه از طریق خروج رزین از نازل‌های هد دستگاه و سخت‌شدن هم‌زمان آن توسط لامپ ماوراء بنفش ساخته می‌شوند. جنس قطعات ساخته‌شده به‌دلیل شفافیت در این روش از نوع رزین آکریلیک (فتو پلیمر)[۱۱] انتخاب شد. رزین مورداستفاده شفاف و بی‌رنگ است و Tg: ۵۲-۵۴ درجه سانتی‌گراد انعطاف‌پذیری در شکست ٪ ۲۵-۱۰ ، مقاومت کششی ۶۵-۵۰ مگاپاسکال و استحکام خمشی ۱۱۰-۷۵ مگاپاسکال دارد. روش دوم، چاپ قطعه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی مدل UP mini بود؛ این دستگاه جزو ابزارهای مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده[۱۲] محسوب می‌شود. در این روش تنها مادهٔ دارای شفافیت بیشتر نسبت به دیگر مواد، پلی‌اتیلن ترفتالات است. روش دیگر، با استفاده از دستگاه Cincinnati Milacron انجام شد که از ابزارهای CNC و دقت آن یک‌صدم میلیمتر است.

آزمون‌هایی برای سنجش ماندگاری قطعه بازسازی‌شده در طول زمان انجام گرفت. انتخاب آزمون‌ها برای مقایسه

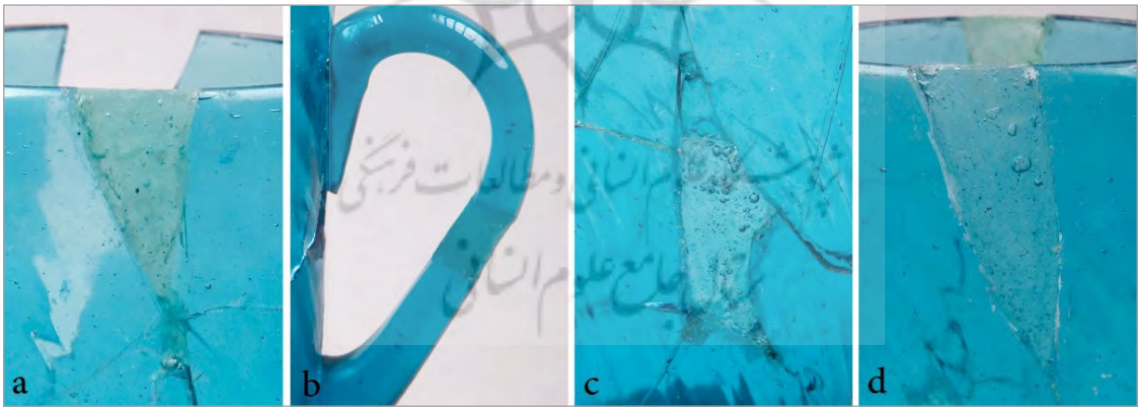
کیفیات ماده پیشنهادی بازسازی با ماده مرسوم اپوکسی صورت گرفته است. در این مورد، ثبات نوری و استحکام مکانیکی بیشتر مدنظر بوده است. ازآنجا که در بازسازی قسمت کمبود اشیای تاریخی علاوه‌بر دقت روش اجرایی، ماندگاری رنگ قطعه در طول زمان نیز مهم است و تغییر رنگ می‌تواند از حیث زیبایی‌شناختی به ظاهر اثر آسیب وارد کند، درنتیجه انتخاب ماده بازسازی که دربرابر نور بسیار حساس نباشد، اصلی مهم است. با این اوصاف یکی از کیفیات موردبررسی ماده بازسازی، زردشدن آن است. نکته مهم دیگر، ماندگاری قطعه در زمان جایجایی‌های احتمالی و یا قرارگیری در مخزن موزه است. در این مورد مقاومت بخش بازسازی نسبت به سایش موردتوجه قرار گرفت.

نمونه‌ها از نظر اجرایی و کیفیت مواد با استفاده از آزمون پیرسازی نوری و آزمون مقاومت به سایش، با یکدیگر مقایسه شدند. آزمون پیرسازی براساس استاندارد D-4587-01 و آزمون مقاومت به سایش براساس استاندارد G99-05، انجام شد.

نمونه‌سازی و نتایج

الف. بازسازی به روش مرسوم

دو لیوان شیشه‌ای مات و شفاف برای نمونه‌سازی انتخاب شدند. پس از شکستن اشیای قسمت‌های کمبودی در بدنه، لبه و دسته ایجاد شد. بازسازی به چند روش درباره این دو شیء انجام گرفت تا روش‌ها از لحاظ دقت در شکل کمبود و ضخامت، بافت و شفافیت، میزان به‌وجودآمدن حباب و نیاز به تمیزکاری نهایی، مقایسه شوند. ابتدا بازسازی شیشه شفاف با روش معمول (با پرکننده اپوکسی شفاف)[۱۳] صورت گرفت (تصویر ۱). اولین روش اجرا، قالب‌گیری با استفاده از طلق شفاف در دو طرف قسمت کمبود بود. رنگ‌آمیزی با استفاده از مخلوط ساییده پودر رنگ معدنی در اپوکسی انجام شد. در روش دوم، قالب‌گیری با موم دندان‌پزشکی بود و در روش سوم، قالب‌گیری با سیلیکون رابر و طلق به‌صورت بسته و دو طرفه به‌ترتیب در بدنه و لبه صورت گرفت. در روش قالب بسته که مطابق روش کوب (2006)، انجام شده با کمک نی حفره‌ای برای ریختن اپوکسی تعبیه شد. قالب کاملاً بسته بود و بجز نی راهی برای کمک‌کردن به خروج حباب‌ها وجود نداشت. در لبه لیوان، چون فضای کافی برای ریختن اپوکسی و خروج حباب‌ها وجود دارد، شفافیت و ضخامت قسمت بازسازی کاملاً مطلوب بود. سپس بازسازی شیشه مات با روش معمول در مرمت صورت گرفت (تصویر ۲)؛ روش اول، تا حدودی همانند روش بازسازی شیشه شفاف با طلق صورت گرفت با این تفاوت که هنگام ساخت ماده پرکننده زمانی که پودر رنگ به اپوکسی اضافه می‌شد، دانه‌های شیشه‌ای[۱۴] برای مات‌کردن و به‌منظور استحکام‌دهنده اضافه شدند. روش دوم، قالب‌گیری با استفاده



تصویر ۱. بازسازی لیوان شفاف به روش معمول با پرکننده اپوکسی. a، قالب شفاف. b، قالب موم دندان‌پزشکی. c، قالب بسته سیلیکون رابر. d، قالب سیلیکون رابر و شفاف (نگارندگان)

تصویر ۲. بازسازی لیوان مات به روش معمول با پرکننده اپوکسی به‌ترتیب با قالب‌های: a، طلق و اپوکسی همراه با دانه‌های شیشه‌ای. b، سیلیکون رابر. c، آلجینات (نگارندگان)

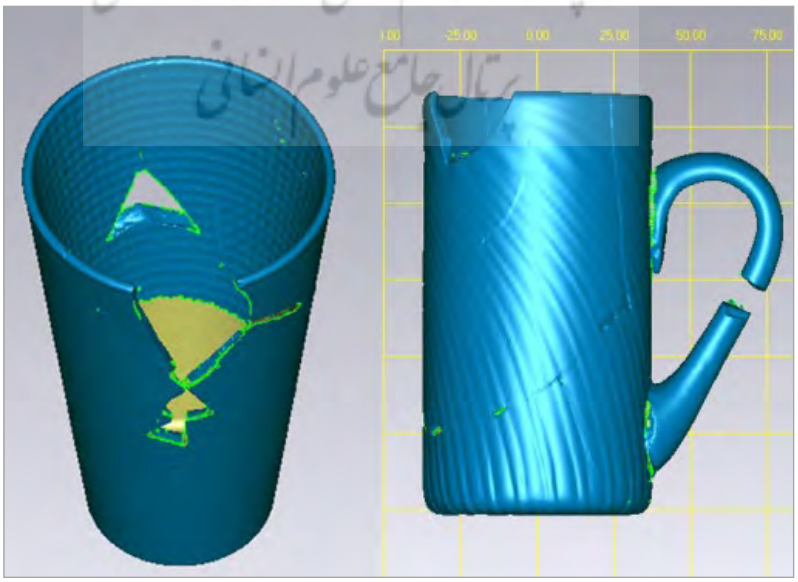
از سیلیکون رابر و طلق بود. به‌منظور دستیابی به ماتی شیشه از پودر آلوکسیت[۱۵] استفاده شد. کاربرد قالب سیلیکون رابر این امکان را داد که بافت درون لیوان به حد مطلوب برسد. ابتدا قالب‌گیری با آلجینات[۱۶] امتحان شد که منتقل‌نشدن جزئیات قالب در فرایند پرکردن قالب با اپوکسی (به‌سبب تغییر دمای اپوکسی حین گیرش) و همچنین باقی‌ماندن آلجینات روی ماده بازسازی، نشان داد که ماده قالب‌گیری مطلوب نبوده است. روش دیگر جهت بازسازی شیشه، مطابق روش کوب و دیگران (2011) انجام شد؛ که ساخت قطعه به‌صورت جداگانه با استفاده از پارالوئید B-72 بود. اما سطح پارالویید دارای حباب زیاد و چنان سخت و بدون انعطاف شد که قابل‌استفاده برای قسمت بازسازی نبود.

ب. بازسازی با روش‌های ساخت سه‌بعدی

روش دیگر بازسازی با استفاده از فنّاوری سه‌بعدی بود. انواع روش‌های ساخت سه‌بعدی شامل: چاپگر سه‌بعدی، CNC و لیزر است. برای بازسازی با فنون سه‌بعدی نیاز است که داده‌ها به‌صورت تصویر رقومی سه‌بعدی درآیند (تصویر ۳)؛ به این منظور از اسکنر سه‌بعدی نوری[۱۷] استفاده شد. چون اشیا شفاف بودند قبل از اسکن‌کردن پودر سفید رنگی از اکسید تیتانیم روی آنها پاشیده شد. این مشکل البته درباره اشیای تاریخی بسیار کمتر وجود دارد. همچنین علامت‌هایی بر روی شی نصب شد تا اسکنر جزییات سطح‌هایی که اسکن می‌کند و عمق بخش‌ها را تشخیص دهد. تصویر شیء اسکن‌شده ابتدا به‌صورت ابرنقاط است. برای کارکردن روی فایل نیاز است تا فایل در نرم‌افزاری شبکه شود. این نرم‌افزار فایل شبکه‌ای را به مثلث‌هایی تبدیل می‌کند؛ یعنی فاصله بین نقاط را با مثلث‌هایی پر کرده که اصطلاحاً به این مثلث‌ها مش گفته می‌شود. بنابر مشخصات و اطلاعات تصویر اسکن‌شده و قسمت بازسازی شامل چند روش ازجمله روش سطح و حجم است. تصویر مجازی شیء شیشه‌ای شفاف از ۱۸۳۸۲۶۱ مثلث و شیء مات از ۱۸۹۶۹۰۲ مثلث تشکیل شده است که هر دو ریزترین جزییات اشیا را دربر می‌گیرند. سپس کار بازسازی مجازی بافت سطح اشیا در نرم‌افزارهای جئومجیک و کتیا انجام شد. با استفاده از ابرنقاط و بنابر بافتی که هر شیء دارد، بازسازی صورت گرفت. ریتم و زاویه‌های بافت دقیقاً هماهنگ با شیء انجام شد. لبه‌ها دقیق در جای خود قرار گرفتند تا بعد از چاپ شیء کاملاً در محل خود نصب شود. فایل با فرمت STL[۱۸] ذخیره شد. درباره شیشه شفاف، دو قطعه چاپ شد که یکی در لبه شیء و دیگری در دسته لیوان بود. قطعات به پرداخت با سنباده یا سوهان نیاز نداشت و دقیق در قسمت کمبود نصب می‌شد. مسئله مهم در بازسازی قسمت کمبود شیشه مات، وجود بافت آن بود که با این روش، بافت به‌خوبی به‌دست آمد. البته در این چاپگر نمی‌توان رنگ را هنگام چاپ به ماده اضافه کرد چراکه فتوپلیمر شفاف دارای رنگ وجود ندارد.

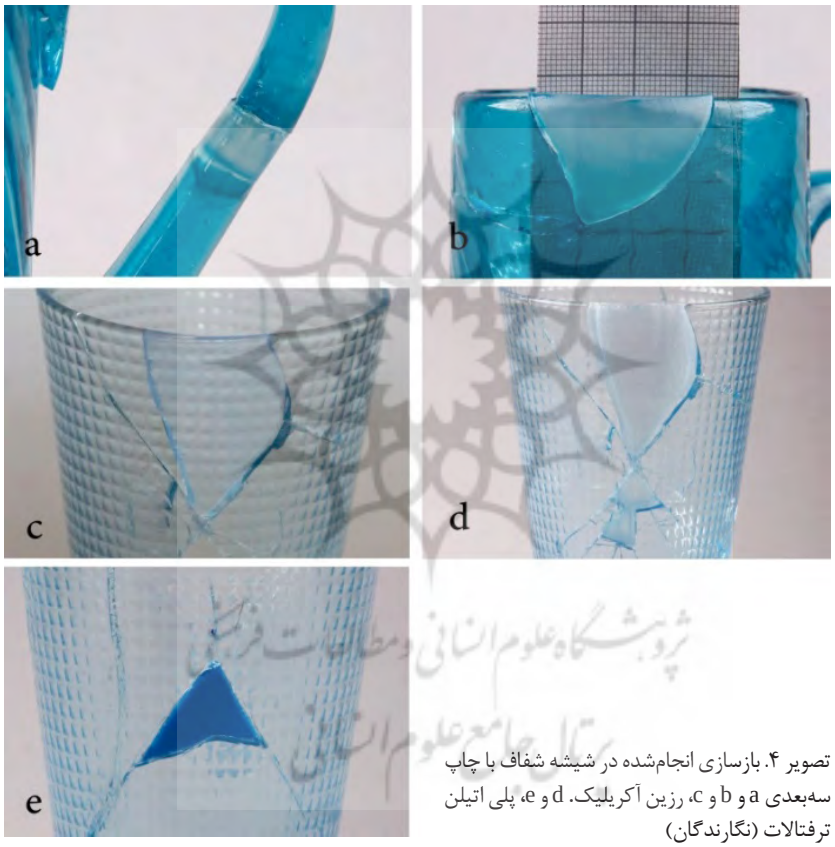
درکل، این فرایند سه قسمت دارد: ابتدا از شیء تاریخی اصلی اسکن الگوی مثبت تهیه می‌شود؛ سپس برمبنای بخش کمبود الگوی منفی به‌دست می‌آید و درپایان، الگوی منفی به الگوی مثبتی برای چاپ تبدیل می‌شود.

درباره روش دوم، مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده، بااینکه فیلامنت مورداستفاده کاملاً شفاف است؛ اما به‌دلیل روش چاپ

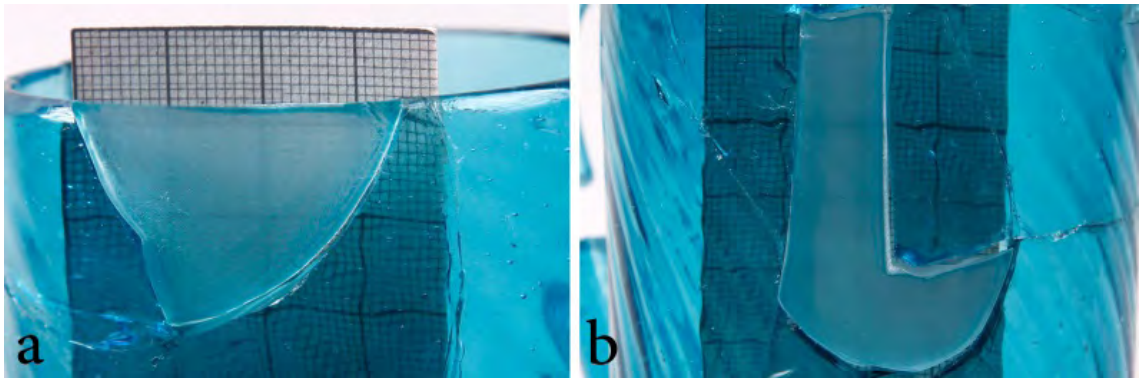


تصویر ۳. تصویر اسکن‌شده از لیوان شفاف (راست) و تصویر اسکن‌شده از لیوان مات (چپ)، (نگارندگان)

لایه لایه، نتیجه منجر به مات‌شدن قطعه چاپ‌شده می‌شود. زیرا لایه‌ها باعث ایجاد زاویه و شکست در نور می‌شوند و قطعه مات به نظر می‌رسد (تصویر ۴، d). این روش روی شیشه مات انجام شد. همچنین یک نمونه قطعه رنگی با استفاده از فیلامنت آبی چاپ شد تا با نمونه بی‌رنگ خود مقایسه شود (تصویر ۴، e)، اما به‌دلیل محدودبودن رنگ‌سایه‌های فیلامنت نتیجه مطلوبی به‌دست نیامد. روش دیگری که با استفاده از تکنولوژی لیزر انجام گرفت، بازسازی با استفاده از صفحات پلکسی‌گلاس بود (تصویر ۵). ضخامت پلکسی گلاس مناسب و هماهنگ با ضخامت شیء انتخاب شد و طرح رقومی بخش بازسازی با استفاده از لیزر برش زده شد. با استفاده از حرارت، انحنای پلکسی‌گلاس با انحنای شیء هماهنگ گردید. سپس با سوهان فرم موردنظر تصحیح و اضافات قطعه حذف شد. این صفحات همانند شیشه شفاف و بی‌رنگ هستند. البته صفحات رنگی نیز در بازار وجود دارد، اما انواع رنگی مات است و رنگ‌بندی محدودی دارد. روش دیگر، تکنولوژی CNC است. ابتدا تصویر مجازی قسمت کمبود، که با استفاده از کامپیوتر بازسازی شده بود، به دستگاه داده شد. سپس دستگاه طبق داده‌های رقومی با مته از مکعب قسمت‌های کمبود را حذف کرد تا شکل اصلی به‌دست آید. دستگاه، انحنای داخلی و بیرونی قطعه را به‌خوبی شکل داد و خطوط ریز قطعه نیز به‌دست آمد (تصویر ۵،b). سپس با



تصویر ۴. بازسازی انجام‌شده در شیشه شفاف با چاپ سه‌بعدی a و b و c، رزین آکریلیک. d و e، پلی اتیلن ترفتالات (نگارندگان)



تصویر ۵. بازسازی شیشه مات با چاپ سه‌بعدی: a، پلکسی گلاس با استفاده از لیزر b، پلکسی گلاس با استفاده از CNC (نگارندگان)

استفاده از سوهان لبه‌های نهایی شکل داده شد. در تمام روش‌های تکنولوژی سه‌بعدی، رنگ‌آمیزی قطعه با استفاده از پارالوئید ٪۵ در اتانول و پودر رنگ معدنی انجام شد.

درباره اتصال قطعه ساخته‌شده به بدنه اصلی شیء ابتدا پارالوئید امتحان شد که باعث خوردگی لبه قطعه گردید. سپس چسب اپوکسی شفاف مورداستفاده قرار گرفت که نتیجه مطلوبی داشت و قطعات با این چسب به شیء متصل گردید. در مواردی هم به‌دلیل انعطاف‌پذیر بودن قطعه، باوجود همسایگی‌هایی که آن را کامل پوشش داده بودند، بدون بازکردن وصالی امکان اتصال و نصب قطعه وجود داشت و حتی به چسب نیاز نداشت.

آزمون‌های پیرسازی مصنوعی مواد بازسازی و نتایج آنها

از نظر کیفیت مواد، عامل مهم دیگر در بازسازی قسمت کمبود اشیای تاریخی، مقاومت قطعه بازسازی و عمر قطعه در بازه زمانی است. ازآنجا که نور یکی از عوامل سرعت‌بخشیدن به روند فرسودگی پلیمرها است، انتخاب ماده بازسازی که دربرابر نور بسیار حساس نباشد، اصلی مهم است. براین اساس، آزمون پیرسازی و مقاومت به سایش مواد بازسازی انجام گرفت. یکی از عوامل موردبررسی، زردشدن ماده پرکننده به‌مرور دربرابر نور است. در این پژوهش چهار ماده: اپوکسی، پلکسی گلاس، رزین آکریلیک و پلی‌اتیلن ترفتالات آزمون شدند. در بررسی حاضر عملیات پیرسازی نوری براساس استاندارد بین‌المللی D-4587-01 صورت گرفت. نمونه‌ها در محفظه ماورای بنفش قرار گرفتند. هر ۷۰ ساعت تست رنگ‌سنجی صورت گرفت و درنهایت نمونه‌ها ۱۰۰۰ ساعت نوردهی شدند. نمودار زردشدگی نمونه‌ها براساس سیستم رنگی Lab ترسیم شد. در این سیستم میزان L به معنای روشنی، a از مثبت به منفی به معنای تفاوت رنگ از قرمزی تا سبزی و b از مثبت به منفی به معنای تفاوت رنگ زرد تا آبی است. نتایج در جدول‌های تصویرهای ۹-۶ آمده است.

نتایج آزمون رنگ‌سنجی

نمونه اپوکسی در ۷۰ ساعت اول با شیب زیادی زرد شد که با چشم غیرمسلح به‌راحتی دیده می‌شد. در نمودار میزان b نیز این نمونه تا ۴۰۰ ساعت با شیب ملایم‌تری به زردشدن ادامه داده و از ۴۰۰ ساعت به بعد روند زردشدگی خیلی کندتر پیش رفت (رنگ قرمز، تصویرهای ۷و ۹). در نمونه رزین آکریلیک شیب زردشدن تا ۳۰۰ ساعت آرام زیاد شده و از ۳۵۰ ساعت به بعد زردشدگی با ثبات بیشتر و روند کندتری انجام شده و در ۸۰۰ ساعت به ثبات رسیده است (رنگ سبز، تصویرهای ۷و ۹). در نمونه پلکسی زردشدن بسیار ناچیز صورت گرفته که حتی با چشم غیرمسلح قابل‌رؤیت نیست (رنگ بنفش، تصویرهای ۷و ۹). در نمونه پلی‌اتیلن ترفتالات زردشدگی بسیار کم و کُند پیش رفته است. تغییر رنگ بعد از ۳۵۰ ساعت با چشم بسیار کم قابل‌رؤیت است (رنگ آبی، تصویرهای ۷و ۹). شاخص دیگر ΔE [۱۹] یا اختلاف رنگ کلی در نمونه‌هاست. با نظر به شاخص تصویرهای ۸ و ۹، اپوکسی و پلکسی‌گلاس، اگرچه با فاصله زیاد ازهم با بیشترین و پلی‌اتیلن ترفتالات و رزین آکریلیک با کمترین تغییر همراه بوده است.

آزمون مقاومت مواد بازسازی نسبت به سایش

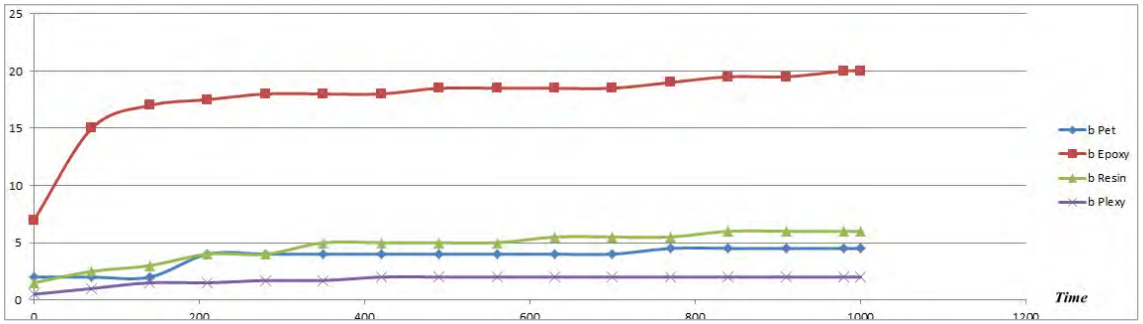
در این آزمون مواد بازسازی براساس استاندارد G99-05 موردآزمون قرار گرفتند. شرایط آزمون شامل سطح ساینده: سنباده نمره ۶۰، تنش اعمالی: ۱۰۰ کیلوپاسکال، نیروی اعمالی: ۴ کیلوگرم نیرو، سرعت خطی: ۱۰ متر بر دقیقه و مسافت طی‌شده: ۵۰ متر است. نمونه‌ها پس از آزمون مقاومت به سایش و طی مسافت ۵۰ متر دوباره وزن شدند و کاهش وزن آنها اندازه‌گیری شدند. منظور از کاهش وزن، اختلاف وزن اولیه نمونه و وزن آن پس از انجام آزمون است. براین اساس، نتیجه آزمون به شرح جدول ۱ است.

درنتیجه، نمونه پلی‌اتیلن ترفتالات نسبت به سایر نمونه‌ها از مقاومت سایشی بهتری برخوردار است.

b

time	0	70	140	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840	910	980	1000
b Pet	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
b Epoxy	7	15	17	17.5	18	18	18	18.5	18.5	18.5	18.5	19	19.5	19.5	20	20
b Resin	1.5	2.5	3	4	4	5	5	5	5	5.5	5.5	5.5	6	6	6	6
b Plexy	0.5	1	1.5	1.5	1.7	1.7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

تصویر ۶. جدول b برای تمامی نمونه‌ها (نگارندگان)

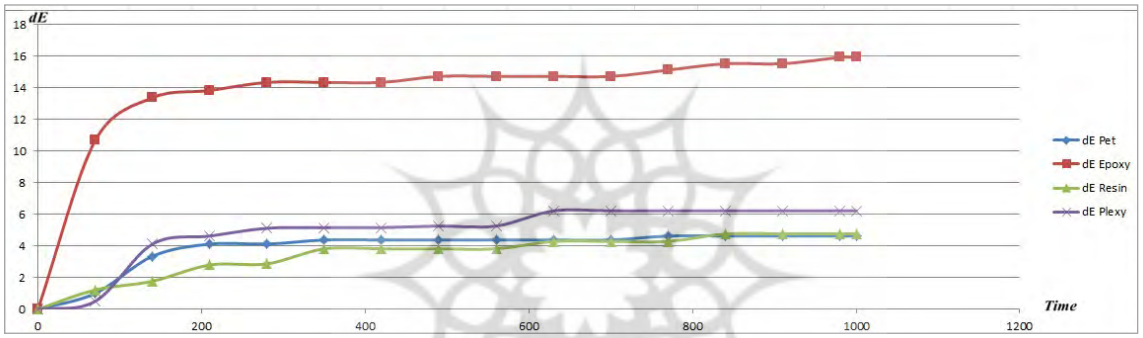


تصویر ۷. نمودار b برای تمامی نمونه‌ها (نگارندگان)

dE

time	0	70	140	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840	910	980	1000
dE Pet	0	1	3.35	4.12	4.12	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63
dE Epoxy	0	10.67	13.38	13.84	14.35	14.35	14.35	14.73	14.73	14.73	14.73	15.13	15.53	15.53	15.93	15.93
dE Resin	0	1.22	1.77	2.8	2.87	3.82	3.82	3.82	3.82	4.29	4.29	4.29	4.76	4.76	4.76	4.76
dE Plexy	0	0.5	4.12	4.63	5.12	5.16	5.16	5.26	5.26	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22

تصویر ۸. جدول زمان و دلتا E برای تمامی نمونه‌ها (نگارندگان)



تصویر ۹. نمودار زمان و دلتا E برای تمامی نمونه‌ها (نگارندگان)

نتیجه‌گیری

اگرچه به‌طور کلی بازسازی مرسوم با اپوکسی ازحیث برگشت‌پذیری و خطر آسیب به شیء در فرایند تکمیل بازسازی دچار مشکل است؛ اما در روش رایج بازسازی اشیا با پرکننده اپوکسی، بهترین روش قالب‌گیری قالب دوطرفه با ترکیب سیلیکون رابر و قالب شفاف است. سیلیکون رابر به نسبت دیگر روش‌ها قادر به بازسازی بیشتر جزئیات است؛ و سمت شفاف قالب باعث کنترل بیشتر بر عواملی مانند حباب‌زدگی و کنترل پرشدن قالب خواهد بود. معایب روش رایج بازسازی شامل حباب‌زدن اپوکسی، مشخص‌بودن رنگدانه در زمینه شفاف و عدم یکدستی رنگ و لزوم شکل‌دهی تکمیلی قسمت بازسازی است که موجب ماتشدن بخش بازسازی می‌گردد. همچنین، به تمیزکاری اطراف قسمت کمبود بعد از بازسازی نیاز است. اگر عدم استحکام شیء مانع از قالب‌گیری و یا قسمت کمبود بزرگ باشد، انجام عمل قالب‌گیری و دوغاب‌ریزی مشکل می‌شود. زیرا برای قالب‌گیری باید قسمتی از شیء همانند قسمت کمبود وجود داشته باشد. در مواردی که قسمت کمبود شیء کاملاً گرد است یا سطح بی‌قاعده‌ای دارد، به سختی می‌توان کمبود را با استفاده از اپوکسی بازسازی کرد. هریک از روش‌های بازسازی نیز معایبی دارد. واکنش گرمازای گیرش ماده پرکننده در قالب دوطرفه با استفاده از طلق، موجب شل‌شدن طلق می‌شود. درنتیجه، ضخامت قسمت بازسازی بیشتر می‌شود و نیاز به عملیات تکمیلی خود مشکلاتی به همراه دارد که از آن جمله ماتشدن قسمت بازسازی است. موم دندان‌پزشکی ممکن است به ماده پرکننده بچسبد و گاه مقداری اپوکسی همراه با آن جدا می‌شود. موم قابلیت نشان‌دادن جزئیات دقیق اشیا را نیز ندارد.

در روش بازسازی با استفاده از تکنولوژی سه‌بعدی، امکان ساخت قطعه جدا از خود شیء، خطر آسیب به اثر تاریخی را کاهش می‌دهد. در انواع این روش بازسازی، چاپگر نسبت به لیزر و CNC از نظر اجرایی دقیق‌تر است و

به فرم‌دهی با استفاده از سوهان نیاز ندارد. در تکنولوژی سه‌بعدی، لیزر و CNC از یک ماده استفاده می‌شود، اما نحوه کار و نتیجه کمی متفاوت است؛ تکنولوژی لیزر دوبعدی، اما تکنولوژی CNC سه‌بعدی است. درنتیجه، انحنای کلی قطعه در تکنولوژی CNC قابل‌بازسازی است، اما در لیزر جزو عملیات پس از چاپ محسوب می‌شود که اغلب عملیات ماشینی دقیق‌تر از دست است. همچنین قابلیت ایجاد بافت روی قطعه فقط در روش CNC امکان‌پذیر است. در هر دو روش مذکور پس از چاپ نیاز به سوهان‌کاری و پرداخت وجود دارد.

هدف از این پژوهش، دست‌یابی به روشی مناسب برای بازسازی قسمت کمبود اشیای تاریخی شیشه‌ای با کمترین دخالت و آسیب به اثر همراه با دست‌یابی به جزئیات بیشتر بود. بنابر تحقیقات صورت‌گرفته، از بین روش‌های رایج در مرمت و روش بازسازی با استفاده از فنون ساخت سه‌بعدی، شکل‌گیری بافت قطعه در فنّاوری سه‌بعدی با دقت و جزئیات بیشتر نسبت به تمامی روش‌های پیشین صورت می‌گیرد. سرعت و دقت بالای این روش، شکل‌دهی جداگانه از اثر و همچنین سهولت نصب قطعه از ویژگی‌های آن است که باعث کمترین دخالت و تخریب می‌شود. در پژوهش حاضر، علاوه‌بر مقایسه هر روش اجرایی با هم، مواد مورداستفاده در ایران نیز براساس آزمون پیرسازی و مقاومت سایشی موردبررسی قرار گرفتند. پیرسازی نوری چهار نمونه: اپوکسی، پلکسی‌گلاس، رزین آکریلیک و پلی‌اتیلن ترفتالات نشان داد که پلکسی‌گلاس کمترین و اپوکسی بیشترین زردشدگی را دارد و رزین آکریلیک کمترین و اپوکسی بیشترین تغییر را در اختلاف رنگ کلی داشتند. اپوکسی در تمام موارد با بیشترین تغییر همراه بود. درمقابل، پلکسی‌گلاس کمترین تغییرات را داشته و ازحیث زردی برای بازسازی اشیای شیشه‌ای مناسب‌تر است.

در آزمون مقاومت به سایش، نمونه پلی‌اتیلن‌ترفتالات به نسبت دو نمونه دیگر، از مقاومت بهتری برخوردار بود. بازسازی‌های انجام‌گرفته با فنون سه‌بعدی به‌راحتی به شیء متصل شدند که هیچ خوردگی و مشکلی در اتصال آن به‌وجود نیامد. همچنین عدم تکرار عمل بازسازی و تمیزکاری باعث کمترین تخریب به شیء می‌شود. درنتیجه می‌توان گفت که عملیات بازسازی با استفاده از تکنولوژی سه‌بعدی به‌خصوص چاپگر سه‌بعدی باعث تسریع در فرایند بازسازی، کمترین تخریب و آسیب به شیء تاریخی، بالابردن دقت و امکان بازسازی جزئیات بیشتر در بافت شیء و همچنین در ابعاد و ظرافت‌های قسمت‌های کمبود خواهد شد. همچنین ماده پرکننده به نسبت ماده روش رایج بازسازی دارای مزایای بهتری از نظر زردشدگی است. به‌خصوص پلکسی‌گلاس که با روش تکنولوژی CNC و لیزر قابل‌استفاده در کار بازسازی است.

در بین مواد پیشنهادی، پلکسی‌گلاس از نظر زردشدگی و مقاومت به سایش در وضعیت خوبی قرار دارد، اما اگر شیشه دارای بافت و جزئیات ریز باشد، چاپگر سه‌بعدی و رزین آکریلیک پیشنهاد می‌شود. اگر بخش بازسازی شیشه در مکانی قرار داشته باشد که تحت فشار یا سایش احتمالی باشد، بازسازی با پلی‌اتیلن‌ترفتالات بهتر است. از لحاظ شفافیت به‌ترتیب پلکسی‌گلاس، رزین آکریلیک و پلی‌اتیلن ترفتالات مطلوب هستند و پلی‌اتیلن‌ترفتالات فقط برای شیشه‌های مات با جزئیات کم پیشنهاد می‌شود. پلکسی‌گلاس در روش CNC دارای مزایای بهتری نسبت به لیزر به لحاظ اجرایی و جزئیات و هماهنگ‌تر با قسمت کمبود است. جمع‌بندی مزایا و معایب روش‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نکتهٔ دیگر دردسترس‌بودن مواد و ابزارهای ساخت سه‌بعدی در ایران است که نظر به توسعه اخیر فنّاوری چاپ سه‌بعدی و ارزانی نسبی دستگاه‌های اسکن و چاپ نسبت به گذشته و البته محدودیت مراکز تخصصی مرمت شیشه در ایران، توصیه می‌شود این مراکز و موزه‌های تخصصی به دستگاه‌های این‌چنینی مجهز شوند. همچنین، به نظر می‌رسد با سیر کنونی مواد پلیمری چاپ سه‌بعدی نیز درحال گسترش و توسعه است و آموزش و توسعه فنی در این مسیر آینده‌ای روشن داشته باشد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از مسئول آزمایشگاه مرکز پژوهش متالوژی رازی (خانم غفاریان)، مسئولین آزمایشگاه دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان (خانم‌ها ریسمانچیان و زاهدی)، گروه فنی و مهندسی پارتاک (آقای گدازنده‌ها)، که به‌نحوی در به ثمر رساندن این مقاله همکاری نموده‌اند، ابراز می‌دارند.

پی‌نوشت

1. Reilly
2. Altamira
3. Poesia cave
4. Araldite LY554
5. Institut Valencia
6. Polyethylene terephthalate (PETE)
7. Polypropylene (PP)
8. Modeling clay
9. Geomagic Studio 10
10. Catia

۱۱. رزین: م Veroclear RGD810

12. FDM (Fused deposition modeling)
13. Evoband
14. Microbaloon- Glass microsphere
15. Aloxite (White fused Alluminium oxide)
16. Alginate (Alginic acid)

۱۷. Rexcan3 ۱۴ مگاپیکسل

18. Stereolithography File Format
19. $$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

منابع و مآخذ

- بهرام‌پور، شیما (۱۳۹۴). **کاربرد چاپگر سه‌بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای**. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، اصفهان: دانشگاه هنر.
- حقی، شهرزاد (۱۳۷۵). **بررسی چگونگی تکنیک تراش شیشه در ایران از هخامنشی تا معاصر؛ حفاظت و مرمت یک کاسه تراش‌دار شیشه‌ای مربوط به عصر ساسانی**. پایان‌نامه کارشناسی، اصفهان: دانشگاه هنر.
- کریمی، بهراد (۱۳۸۰). **مطالعه و مرمت یک ظرف شیشه‌ایی دوره ساسانی**. پایان‌نامه کارشناسی، اصفهان: دانشگاه هنر.
- Antlej, K. Kristjan, C. Menaf, S. Erazem, M. Darja, L. Janja, S. Gorazd, L.& Mateja, K. (2012). Restoration of a Stemmed Fruit Bowl Using 3d Technologies. Review of the National Center for Digitization, No. 21: 141-146.
- Antlej, K.& Zavrl, M.S.V.F. (2010). The Use of 3D technologies in Cultural Heritage Communication. Drugi Međunarodni simpozij “Digitalizacija kulturne baštine Bosne i Hercegovine”, Zbornik radova, No. 39-44.
- Antlej, K. Šavnik, M. Županek, B.& Cele, K. (2011). ““Virtual Emona” on dLib. si using 3D technologies.” Review of the National Center for Digitization, Faculty of Mathematics, Belgrade, No. 19-27.
- Arbace, L. Sonnino, E. Callieri, M. Dellepiane, M. Fabbri, M. Idelson, A. I.& Scopigno, R. (2012). “Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue.” Journal of Cultural Heritage, Vol. 14, No. 4: 332-345.
- Balzani, M., Fabbri M., Maietti F., Santopuoli N.(2005). “Survey, modelling and scientific

integrated researches for restoration and enhancement of cultural heritage–A study of the bas-relieves of the Camerino dei Marmi di Alfonso I in the Estense Castle." **In The 6th international symposium on virtual reality, archaeology and cultural heritage**, VAST, ISTI-CNR, Pisa, 8-11.

- Barreau, J. B. Nicolas, T. Bruniaux, G. Petit, E. Petit, Q. Bernard, Y. Gaugne, R.& Gouranton, V. (2014). "Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications." **arXiv preprint arXiv**, No.:1412.1330.
- Barton, J., Meek, A. and Roberts, P. (2013). 'The examination, experimentation and exasperation of conserving an Archaeological Glass object for display' **British Museum Technical Research Bulletin**, 7, 6978-.
- Bruno, F. Bruno, S. De Sensi, G. Luchi, M. L. Mancuso, S.& Muzzupappa, M. (2010). "From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition." **Journal of Cultural Heritage**, Vol. 11, No. 1: 42-49.
- Davison, S. (2006). **Conservation and Restoration of glass.** London: . Butterworth Heinenemann.
- Dionisio, G.& Licari, D. (2010). "Silvery-Like Ceramics in the National Archaeological Museum of Florence: **Virtual Technologies in Analysis and Restoration**.
- Doi, A.& Ono, K. (2010). "Digital Archiving of Archaeological Remains Using X-Ray CT." In **10th WSEAS Int. Conf. On Applied Computer Science (ACS)**, pp. 204-209.
- Koob, S.P. Benrnubi, S. Van Giffen, A.R.& Hanna, N. (2011). An Old Material, a New Technique: Casting Paraloid B-72 for Filling Losses in Glass. **Adhesives and Consolidants for Conservation**, 17-21.
- Koob, Stephen P. (2006). "**Conservation and care of glass objects**."
- Koska, B. (2011). "Using Unusual Technologies Combination for Madonna Statue Replication." ***Geoinformatics FCE CTU* 6**, No. 220-227.
- Kuzminsky, S. C.& Gardiner, M.S. (2012). "Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research.**"Journal of Archaeological Science**, Vol. 39, No. 8: 2744-2751.
- Lemajic, G. (2006). Advantages of a transparent mould used in the process of replacing missing pieces on Hollow glass object. **National museum of Slovenia**.
- Lontos, A. Demosthenous, G. Athanasiou, C.& Zampelis, G. (2012). "Reproduction of archaeological findings by means of rapid prototyping technology, laser scanning and the use of appropriate software" **International Journal "Machines, Technologies, Materials-ISSUE**.
- Martinez, B. Pasies, T. & Peiro, M. A. (2011). Reversibility and minimal intervention in the Gap-Filling process of archaeological glass. **E-conservation the online magazine**, No.20:7.
- Nicolas, T. Gaugne, R. Tavernier, C. Gouranton, V.& Arnaldi, B. (2014). "Preservative Approach to Study Encased Archaeological Artefacts." In Digital Heritage. **Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection**, pp. 332-341. Springer International Publishing.
- Pezzati, L.& Fontana, R. (2008). "3D Scanning of Artworks." **Handbook on the Use of Laser in Conservation and Conservation Science.**
- Rocchini, C. Cignoni, P. Montani, C. Pingi, P. Scopigno, R. Fontana, M. Greco et al. (2001). "3D Scanning the Minerva of Arezzo**." InICHIM** (2), pp. 266-272.
- Scopigno, R. Callieri, M. Cignoni, P. Corsini, M. Dellepiane, M. Ponchio, F.& Ranzuglia, G.

(2011). “3D models for cultural heritage: **beyond plain visualization.” Computer**, No. 7: 48-55.

- Scopigno, R. Cignoni, P. Pietroni, N. Callieri, M.& Dellepiane, M. (2014). “Digital Fabrication Technologies for Cultural Heritage (STAR).” **InEurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage**, pp. 75-85. The Eurographics Association.
- Siotto, E. Dellepiane, M. Callieri, M. Scopigno, R. Gratziu, C. Moscato, A. Burgio, L. Legnaioli, S. Lorenzetti, G.& Palleschi, V. (2015). “A multidisciplinary approach for the study and the virtual reconstruction of the ancient polychromy of Roman sarcophagi**.”Journal of Cultural Heritage**, Vol. 16, No. 3: 307-314.
- Standard Practice for Fluorescent UV-Condensation Exposure of Paint and Related Coatings, **Annual Book of ASTM standard**, 06.01, D 4587-01, (2014).
- Stanco, F. Battiato, S.& Gallo, G. (2011). Digital imaging for cultural heritage preservation: Analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks. **CRC Press**.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Received: 2015/04/04
Accepted: 2016/11/15

Using Three Dimensional Printer for Reconstruction of Historic Glass Objects

Shima Bahrampour* **Amir Hosein Karimi****

Abstract

Three-dimensional tools are widely used for various purposes, particularly Three-dimensional printers which play a great role in simplification and acceleration of phases in production process for various fields ranging from medicine to industry.

Due to the problems related to the reconstruction of missing parts in restoration of historic glass objects in the methods of molding, casting and formation of reconstructed parts, the present research, aiming to propose an efficient method within this process has suggested 3D printer as a tool with the least intervention and destruction and also high accuracy and as a substitute to the current methods. Research questions are as follows: How is the condition of 3D reconstruction facilities for missing parts of glass objects in Iran? What are the technical and practical advantages and disadvantages of 3D printer in this process? How is the strength and yellowing quality of suggested polymers for reconstruction?

The research finalized through verifying both current and 3D technology methods for reconstruction of missing parts. The compared methods include: filling with Epoxy and also Acrylic resin, Plexiglas and PETE methods as suggestions. Samples were tested for yellowing and Pin on disk. The results showed that Acrylic resin in 3D printer is a proper substitute for reconstruction of the missing parts of glass objects, and Plexiglas using 3D technology method (laser and CNC) is also ranked as the second.

Keywords: restoration of glass, three-dimensional printer, three-dimensional scanner, virtual reconstruction.

* MA in Conservation of Cultural and Historical Objects, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan.
** Assistant Professor, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan.