

کاربرد چاپگر سه بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای

شیما بهرام پور* امیرحسین کریمی**

چکیده

به دلیل مشکلات بازسازی بخش کمبود اشیای تاریخی شیشه‌ای در مرمت که در سه بخش: قالب‌گیری، دوغاب‌ریزی و شکل‌دهی قسمت بازسازی وجود دارد، تحقیق حاضر در پی یافتن مسیری برای حل مشکلات مذکور برآمده است. سؤال تحقیق به این شرح است: امکانات بازسازی قسمت کمبود اشیای شیشه‌ای با استفاده از چاپگر سه بعدی 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 سه بعدی 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 سه بعدی برای بازسازی اشیای شیشه‌ای تاریخی انجام نشده است از این رو، پژوهش پیش‌رو دارای ایده‌ای نو است. تصمیم‌گیری در این مورد با بررسی دو روش بازسازی قسمت کمبود با روش رایج و با استفاده از فناوری سه بعدی انجام شد. روش‌های مقایسه‌شده عبارت‌اند از: روش رایج پر کردن کمبود با رزین اپوکسی و روش‌های پیشنهادی بازسازی سه بعدی با رزین آکرلیک، پلکسی‌گلاس و پلی‌اتیلن ترفتالات. نخست، نمونه‌هایی با روش‌های پیشنهادی بازسازی شدند و سپس برای دستیابی به روش بهتر به صورت آزمایشگاهی آزمون پیرسازی و تست مقاومت به سایش روی نمونه‌ها انجام گرفت. آزمایش‌های صورت‌گرفته نشان داد که رزین آکرلیک به روش چاپگر سه بعدی جایگزین مناسبی برای بازسازی قسمت کمبود اشیای شیشه‌ای است و پلکسی‌گلاس با روش کاهشی سه بعدی (لیزر و CNC) نیز، نتیجه‌ای مطلوب دارد.

کلیدواژه‌گان: مرمت اشیای شیشه‌ای، چاپگر سه بعدی، اسکنر سه بعدی، بازسازی مجازی.

مقدمه

روش مرسوم بازسازی شیشه‌های تاریخی، به کارگیری انواع اپوکسی به‌عنوان ماده بازسازی است. این روش، سال‌هاست در موزه‌ها و مؤسسات مختلف مرمت به کار 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 به دلیل شفاف بودن ماده دو طرف قطعه بازسازی شده باید دارای فرم و بافت موردنظر باشد ولی در روش مرسوم ممکن است یک طرف قطعه، فرم دلخواه را به دست نیاورد. همچنین برای بازسازی قسمت کمبود باید از شیء قالبی درست شود تا شکل قسمت کمبود به دست آید؛ اولاً ممکن است به دلیل بی‌استحکامی شیء، اجازه قالب‌گیری نباشد. دوماً ممکن است قطعه قالب‌گیری شده، تفاوت زیادی با قسمت کمبود داشته باشد. سوماً ممکن است قسمت موردنظر بسیار بزرگ باشد و قالب‌گیری به روش مرسوم مشکل باشد (Lemajic, 2006). در نتیجه باید مراحل تکمیلی بر روی قطعه صورت گیرد که می‌تواند باعث آسیب به شیء و بدشکل شدن قطعه شود. برای مثال در بازسازی شیشه شفاف، عملیات بعد از دوغاب‌ریزی بر روی اپوکسی، باعث مات شدن 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 به دست آید. این خود نیازمند پاک‌سازی شیء بعد از هر بار 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 کم کردن و از بین 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 روزه‌های کوچک امکان‌پذیر نیست. اگر شیء شیشه‌ای را سطح صدفی شده گرفته باشد و یا سطح مملو از خلل و فرج باشد و اگر ماده بازسازی که برای پر کردن 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، یکدست بودن رنگ قسمت بازسازی است. زمانی که رنگدانه با اپوکسی مخلوط می‌شود، حتی اگر

پودر رنگدانه کامل ساییده شده باشد، باز هم 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 به خوبی به سطح شیء چسبیده باشد تا ضخامت قسمت بازسازی دقیقاً با ضخامت شیء یکی شود. برای این کار در مرحله اول متصل کردن کامل قالب به شیء مشکل است، مخصوصاً در مورد قالب سیلیکون رابر. در مرحله بعد ممکن است قالب به دلیل 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 از این رو نامناسب است که در بازسازی شیء شفاف، عملیات تکمیلی روی اپوکسی باعث مات شدن آن می‌شود (بهرام‌پور، ۱۳۹۴). با این مشکلات، استفاده از جایگزینی برای قالب‌گیری مرسوم و ساخت قطعه بازسازی به صورت جداگانه می‌تواند پیشنهاد خوبی باشد. نظریه 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 از نظر استحکام و زردشدگی چه کیفیتی دارند؟ هدف اصلی، بررسی مزایا و معایب روش‌های بازسازی اشیای شیشه‌ای با استفاده از فناوری سه‌بعدی است که با استفاده از نمونه‌سازی مواد و مقایسه صورت گرفته است. بازسازی با استفاده از ابزارهای سه‌بعدی در درجه اول به دلیل 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. در نتیجه، در پژوهش حاضر بازسازی شیشه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی بر روی شیشه مات و شفاف مورد پژوهش قرار گرفت. علاوه بر چاپگر سه‌بعدی، فنون کاهشی سه‌بعدی، لیزر و CNC نیز بررسی شد. هر روشی معایب و مزایای خاص خود را دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

پیشینه کاربرد فناوری تصویر مجازی در علوم میراث

اولین تعریف از کاربرد فناوری تصویر مجازی در علوم میراث را رابلی^۱ در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان استفاده از بازسازی رقومی در باستان‌شناسی به کار برد. در کل، گرافیک کامپیوتری سه‌بعدی به

اخیر مارتینز و دیگران (2011) در موزه پرهیستوریا و انستیتو والنسیا،^۵ از فیلم‌های مصنوعی پلی اتیلن ترفتالات^۶ و پلی پروپیلن^۷ استفاده شده است. روش دیگر را کوب و دیگران (2011) با استفاده از پارالوئید B-72 است، به کار برده‌اند. روش دیگر ساخت قالب که آن را کوب برای قسمت‌های کمبود پیچیده مانند دسته مطرح نموده است، دو نوع دارد: موم تا شده یک تکه 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 رادیوسون با عنوان قالب گل مجسمه‌سازی^۸ شرح داده شده است. روش دیگر بازسازی قسمت کمبود در شیشه استفاده از پلکسی گلاس (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 جنئومجیک^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 اکریلیک (فتو پلیمر)^{۱۱} انتخاب شد. رزین مورد استفاده شفاف و بی‌رنگ است و $Tg: 52-54$ درجه سانتی‌گراد انعطاف‌پذیری در شکست $10-25\%$ ، مقاومت کششی $65-50$ مگاپاسکال و استحکام خمشی $110-75$ 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 ماده دارای شفافیت بیشتر نسبت به دیگر مواد، پلی اتیلن ترفتالات است. روش دیگر، با استفاده از دستگاه Cincinnati Milacron انجام شد که از ابزارهای CNC و دقت آن یک صدم میلی‌متر است.

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

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 مجازی قابل دسترس در رسانه‌های دیجیتال به‌کار گرفته می‌شود (Stanco et al., 2011). تکنولوژی اسکنر سه‌بعدی در حال حاضر در مستند کردن 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 فناوری 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 20% کاهش می‌یابد (Koska, 2011). از این روش در غار معروف آلتامیرا^{۱۳} در اسپانیا و همچنین غار دیگری در ایتالیا^{۱۴} استفاده شده است (Pezzati & Fontana, 2008). با استفاده از این روش می‌توان در مطالعات تاریخی، دسترسی به آرشیو رومومی، 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 اسلوانی (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 گرفته است. 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 آالدیت^{۱۵} به‌منظور پر کردن کمبود استفاده شده است (کریمی، ۱۳۸۰). در نمونه‌های خارجی در تحقیقات

کیفیات ماده پیشنهادی بازسازی با ماده مرسوم اپوکسی صورت گرفته است. در این مورد، ثبات نوری و استحکام مکانیکی بیشتر مدنظر بوده است. از آنجا که در بازسازی قسمت کمبود اشیای تاریخی علاوه بر 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، در نتیجه انتخاب ماده بازسازی که در برابر نور بسیار حساس نباشد، اصلی مهم است. با این اوصاف یکی از کیفیات مورد بررسی ماده بازسازی، زرد شدن 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 مورد توجه 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 به‌وجود آمدن 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. رنگ آمیزی با استفاده از مخلوط ساییده پودر رنگ معدنی در اپوکسی انجام شد. در روش دوم، قالب‌گیری با موم دندان پزشکی بود و در روش سوم، قالب‌گیری با سیلیکون رابر و طلق به صورت بسته و دو طرفه به ترتیب 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 کمک کردن 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 مات کردن و به منظور 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 دندان پزشکی. c، قالب بسته سیلیکون رابر. d، قالب سیلیکون رابر و شفاف (نگارندگان)



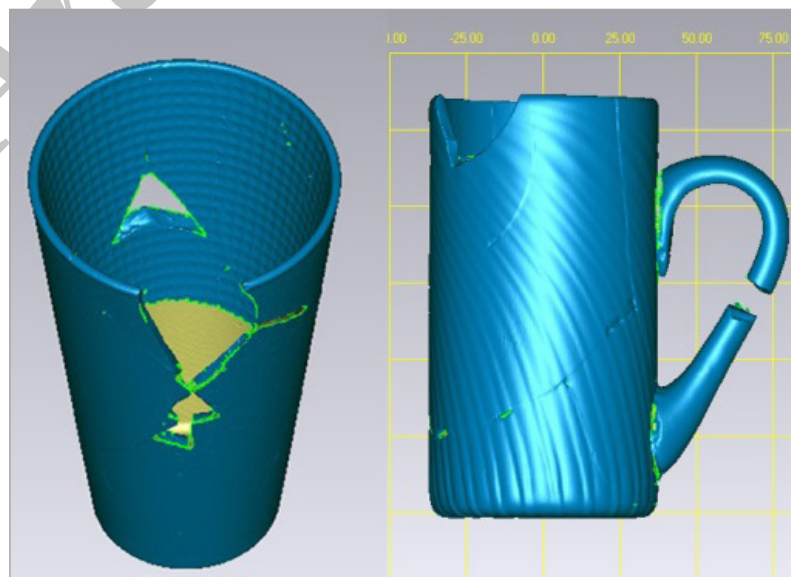
تصویر ۲. بازسازی لیوان مات به روش معمول با پرکننده اپوکسی به ترتیب با قالب‌های: a، طلق و اپوکسی همراه با دانه‌های شیشه‌ای. b، سیلیکون رابر. c، آلجینات (نگارندگان)

نرم افزار 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 اسکن شده و قسمت بازسازی شامل چند روش از جمله 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 جزئیات اشیا را دربر می‌گیرند. سپس کار بازسازی مجازی بافت سطح اشیا در نرم‌افزارهای جنومجیک 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 به خوبی به دست 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 بر مبنای بخش کمبود الگوی منفی به دست می‌آید و در پایان، الگوی منفی به الگوی مثبتی برای چاپ تبدیل می‌شود. درباره روش دوم، مدل‌سازی رسوب ذوب شده، باینکه فیلامنت مورد استفاده کاملاً شفاف است؛ اما به دلیل روش چاپ

از سیلیکون رابر و طلق بود. به منظور 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 منتقل نشدن جزئیات قالب در فرایند پرکردن قالب با اپوکسی (به سبب تغییر دمای روی ماده بازسازی، نشان داد که ماده قالب‌گیری 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 به صورت جداگانه با استفاده از پارالوئید B-72 بود. اما سطح پارالوئید دارای حباب زیاد و چنان سخت و بدون انعطاف شد که قابل استفاده برای قسمت بازسازی نبود.

ب. بازسازی با روش‌های ساخت سه‌بعدی

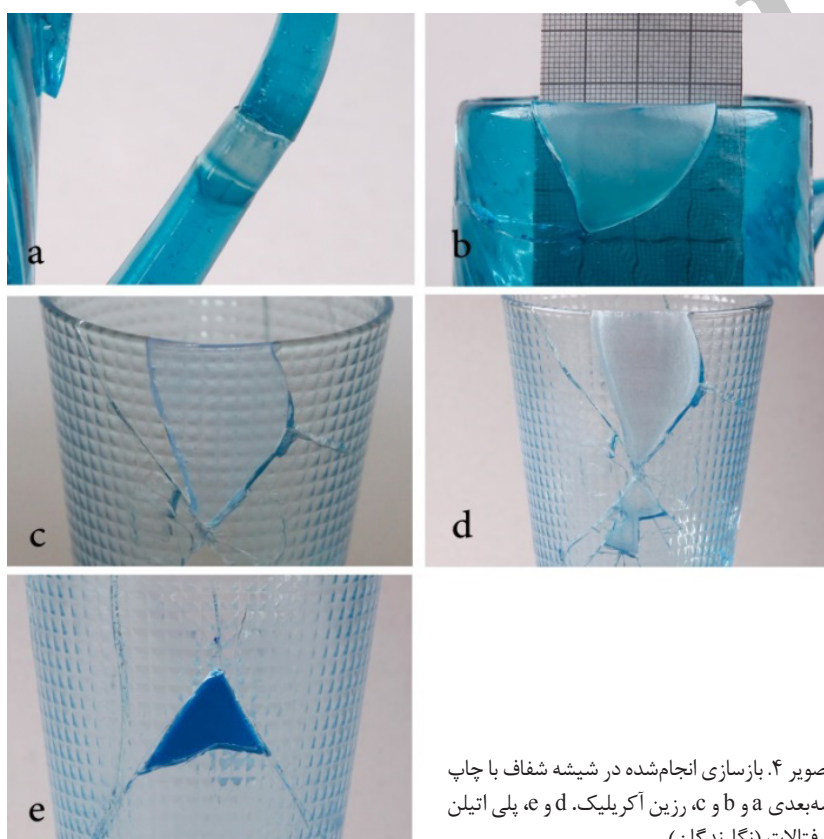
روش دیگر بازسازی با استفاده از فناوری سه‌بعدی بود. انواع روش‌های ساخت سه‌بعدی شامل: چاپگر سه‌بعدی، CNC و لیزر است. برای بازسازی با فنون سه‌بعدی نیاز است که داده‌ها به صورت تصویر رقومی سه‌بعدی درآیند (تصویر ۳)؛ به این منظور از اسکنر سه‌بعدی نوری^{۱۷} استفاده شد. چون اشیا شفاف بودند قبل از اسکن کردن پودر سفید رنگی از اکسید تیتانیم روی آنها پاشیده شد. این مشکل البته درباره اشیا تاریخی بسیار کمتر وجود دارد. همچنین علامت‌هایی بر روی شیء نصب شد تا اسکنر جزئیات سطح‌هایی که اسکن می‌کند و عمق بخش‌ها را تشخیص دهد. تصویر شیء اسکن شده ابتدا به صورت ابرنقاط است. برای کار کردن روی فایل نیاز است تا فایل در نرم‌افزاری شبکه شود. این



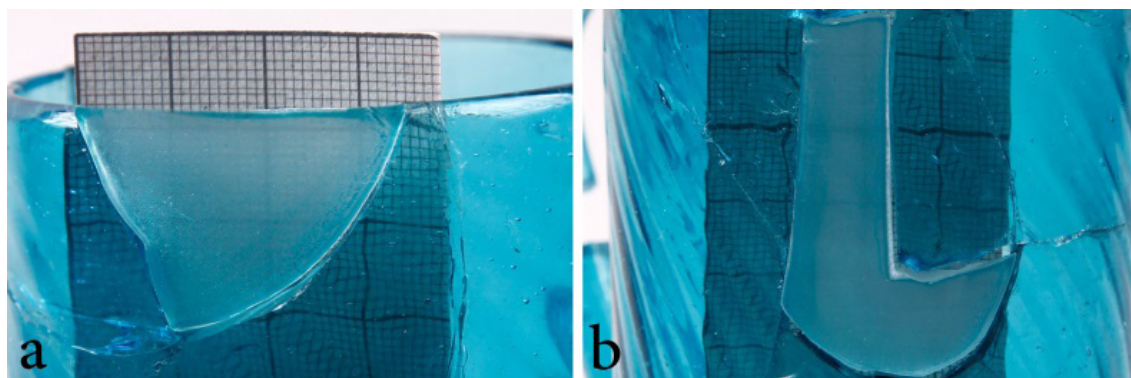
تصویر ۳. تصویر اسکن شده از لیوان شفاف (راست) و تصویر اسکن شده از لیوان مات (چپ)، (نگارندگان)

با استفاده از حرارت، انحناى پلکسی گلاس با انحناى 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 به دست آید. دستگاه، انحناى داخلی و بیرونی قطعه را به‌خوبی شکل داد و خطوط ریز قطعه نیز به دست آمد (تصویر ۵، b). سپس با

لایه لایه، نتیجه منجر به مات شدن قطعه چاپ شده 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 به دلیل محدود بودن رنگ‌سایه‌های فیلامنت نتیجه مطلوبی به دست نیامد. روش دیگری که با استفاده از تکنولوژی لیزر انجام گرفت، بازسازی با استفاده از صفحات پلکسی گلاس 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.



تصویر ۴. بازسازی انجام شده در شیشه شفاف با چاپ سه بعدی از a و b و c، رزین آکرلیک. d و e، پلی اتیلن ترفتالات (نگارندگان)



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

نتایج آزمون رنگ‌سنجی

نمونه اپوکسی در ۷۰ ساعت اول با شیب زیادی زرد شد که با چشم غیرمسلح به راحتی دیده می‌شد. در نمودار میزان b نیز این نمونه تا ۴۰۰ ساعت با شیب ملایم‌تری به زرد شدن ادامه داده و از ۴۰۰ ساعت به بعد روند زردشدگی خیلی کندتر پیش رفت (رنگ قرمز، تصویرهای ۷ و ۹). در نمونه رزین آکرلیک شیب زرد شدن 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 ۷ و ۹). در نمونه پلکسی زرد شدن بسیار ناچیز صورت گرفته که حتی با چشم غیرمسلح قابل‌رؤیت نیست (رنگ بنفش، تصویرهای ۷ و ۹). در نمونه پلی‌اتیلن ترفتالات زردشدگی بسیار کم و کند پیش رفته است. تغییر رنگ بعد از ۳۵۰ ساعت با چشم بسیار کم قابل‌رؤیت است (رنگ آبی، تصویرهای ۷ و ۹). شاخص دیگر ΔE^{19} یا اختلاف رنگ کلی در نمونه‌هاست. با نظر به شاخص تصویرهای ۸ و ۹، اپوکسی و پلکسی گلاس، اگرچه با فاصله زیاد از هم با بیشترین و پلی‌اتیلن ترفتالات و رزین آکرلیک 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 طی شده: 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. در نتیجه، نمونه پلی‌اتیلن ترفتالات نسبت به سایر نمونه‌ها از مقاومت سایشی بهتری برخوردار است.

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.

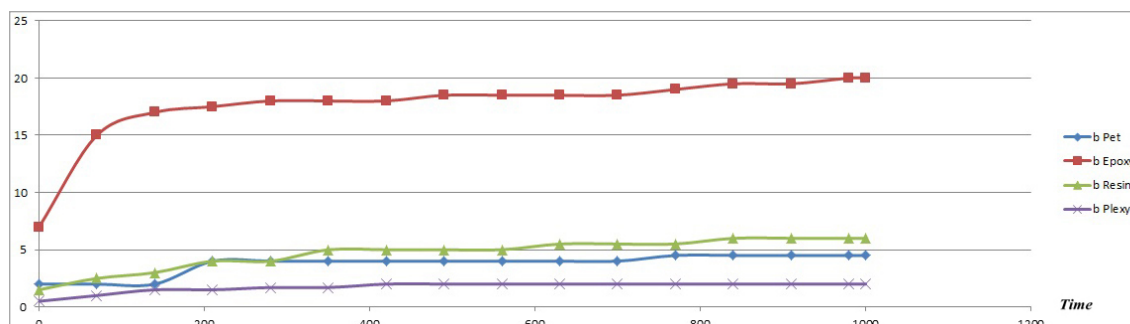
درباره اتصال قطعه ساخته‌شده به بدنه اصلی شیء ابتدا پارالوئید امتحان شد که باعث خوردگی لبه قطعه گردید. سپس چسب اپوکسی شفاف مورد استفاده قرار گرفت که نتیجه مطلوبی داشت و قطعات با این چسب به شیء متصل گردید. در مواردی هم به دلیل انعطاف پذیر بودن قطعه، با وجود همسایگی‌هایی که آن را کامل پوشش داده بودند، بدون باز کردن 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. از آنجا که نور یکی از عوامل سرعت‌بخشیدن به روند فرسودگی پلیمرها است، انتخاب ماده بازسازی که در برابر نور بسیار حساس نباشد، اصلی مهم است. براین اساس، آزمون پیرسازی و مقاومت به سایش مواد بازسازی انجام گرفت. یکی از عوامل مورد بررسی، زرد شدن ماده پرکننده به‌مرور در برابر نور است. در این پژوهش چهار ماده: اپوکسی، پلکسی گلاس، رزین آکرلیک 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 در نهایت 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 قرمز تا سبزی و b از مثبت به منفی به معنای تفاوت رنگ زرد تا آبی است. نتایج در جدول‌های تصویرهای ۹-۶ آمده 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

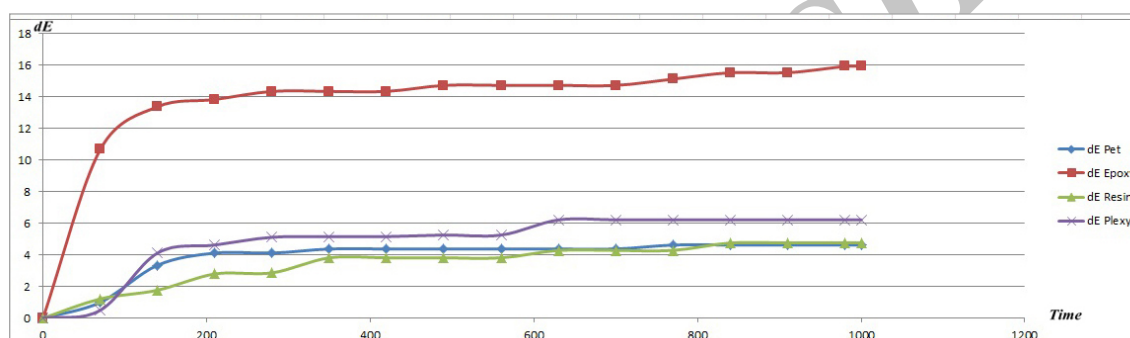
تصویر ۶. جدول b برای تمامی نمونه‌ها (نگارندگان)



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 از حیث برگشت‌پذیری و خطر آسیب به شیء در فرایند تکمیل بازسازی دچار مشکل است؛ اما در روش رایج بازسازی اشیای 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 گرم‌مازای گیرش ماده پرکننده در قالب دوطرفه با استفاده از طلق، موجب شل‌شدن طلق می‌شود. در نتیجه، 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 اشیای 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. در نتیجه، 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 سوهان کاری 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 صورت گرفته، از بین روش‌های رایج در مرمت و روش بازسازی با استفاده از فنون ساخت سه‌بعدی، شکل‌گیری بافت قطعه در فناوری 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، علاوه بر مقایسه هر روش اجرایی با هم، مواد مورد استفاده در ایران نیز براساس آزمون پیرسازی و مقاومت سایشی مورد بررسی قرار گرفتند. پیرسازی نوری چهار نمونه: اپوکسی، پلکسی‌گلاس، رزین آکرلیک و پلی‌اتیلن ترفتالات نشان داد که پلکسی‌گلاس کمترین و اپوکسی بیشترین زردشدگی را دارد و رزین آکرلیک کمترین و اپوکسی بیشترین تغییر را در اختلاف رنگ کلی داشتند. اپوکسی در تمام موارد با بیشترین تغییر همراه بود. در مقابل، پلکسی‌گلاس کمترین تغییرات را داشته و از حیث زردی برای بازسازی اشیای شیشه‌ای مناسب‌تر است. در آزمون مقاومت به سایش، نمونه پلی‌اتیلن ترفتالات به نسبت دو نمونه دیگر، از مقاومت بهتری برخوردار بود. بازسازی‌های انجام گرفته با فنون سه‌بعدی به راحتی به شیء متصل شدند که هیچ خوردگی و مشکلی در اتصال آن به وجود نیامد. همچنین عدم تکرار عمل بازسازی و تمیزکاری باعث کمترین تخریب به شیء می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که عملیات بازسازی با استفاده از تکنولوژی سه‌بعدی به خصوص چاپگر سه‌بعدی باعث تسریع در فرایند بازسازی، کمترین تخریب و آسیب به شیء تاریخی، بالا بردن 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. به خصوص پلکسی‌گلاس که با روش تکنولوژی CNC و لیزر قابل استفاده 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 آکرلیک پیشنهاد می‌شود. اگر بخش بازسازی شیشه در مکانی قرار داشته باشد که تحت فشار یا سایش احتمالی باشد، بازسازی با پلی‌اتیلن ترفتالات بهتر است. از لحاظ شفافیت به ترتیب پلکسی‌گلاس، رزین آکرلیک و پلی‌اتیلن ترفتالات مطلوب هستند و پلی‌اتیلن ترفتالات 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 هماهنگی با قسمت کمبود است. جمع‌بندی مزایا و معایب روش‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نکته دیگر در دسترس بودن مواد و ابزارهای ساخت سه‌بعدی در ایران است که نظر به توسعه اخیر فناوری 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 در حال 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.

پی نوشت

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 مأخذ

- بهرام پور، شیما (۱۳۹۴). کاربرد چاپگر سه بعدی در بازسازی اشیای تاریخی شیشه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، اصفهان: دانشگاه هنر.
- حقی، شهرزاد (۱۳۷۵). بررسی چگونگی تکنیک تراش شیشه در ایران از هخامنشی تا معاصر؛ حفاظت و مرمت یک کاسه تراش دار شیشه‌ای مربوط به عصر ساسانی. پایان نامه کارشناسی، اصفهان: دانشگاه هنر.
- کریمی، بهراد (۱۳۸۰). مطالعه و مرمت یک ظرف شیشه‌ای دوره ساسانی. پایان نامه 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-reliefs 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. Pasiés, 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.” **In ICHIM (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. Gratzu, 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.



Archive of SID