استفاده از فناوری‌های نوین نمونه‌سازی در بازسازی بخش‌های مفقود سفالینه‌های باستان‌شناسی

مهدی رازانی[I]، محمدعلی حدادیان[II]، صفرپور عباس[III]

شناسه‌ی دیجیتال (DOI): 10.22084/nbsh.2018.15134.1670
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸
(از ص ۱۹۳ تا ۲۱۲)

چکیده

امروزه فناوری‌های نوین، منجر به درک بهتر آثار باستانی و حفاظت بی‌خطر آن‌ها گشته‌اند؛ هدف این تحقیق، تشریح فرآیند جدید و بومی شده‌ی استفاده از فناوری‌های نمونه‌سازی سریع، شامل: اسکنر و چاپگر سه‌بُعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین و امکان سنجی به‌کارگیری آن‌ها در بازسازی دیگر اشیای باستانی است. پرسش‌های تحقیق عبارتنداز: ۱- چگونه می‌توان از فناوری‌های نمونه‌سازی نوین در بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین تاریخی استفاده نمود؟ ۲- بازسازی سفال‌های تاریخی با روش‌های نوین نمونه‌سازی چه مزایا و معایبی نسبت به روش‌های معمول دارد؟ در همین راستا بر اساس روش تحقیق تجربی-آزمایشگاهی فناوری‌های نوین نمونه‌سازی در قالب آزمون‌های موردی روی نمونه سفالی خاکستری پیش‌ازتاریخی مربوط به کاوش‌های باستان‌شناسی کول‌تپه در هادیشهر جلفا(ی) آذربایجان شرقی انجام گرفت و در ادامه با تحلیل داده‌های حاصل از هم‌سنجی تجهیزات به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفتند. بخش‌های مفقود نمونه مطالعاتی این تحقیق بر اساس تحلیل نرم‌افزاری تصاویر اسکن سه‌بُعدی ۲۰٪ محاسبه و برای انجام بازسازی بخش مفقود در ابتدا با کمک اسکنر لیزری اقدام به تهیه‌ی تصاویر سه‌بُعدی از سطح نمونه گردید؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار تصاویر سه‌بُعدی تبدیل به داده‌های قابل استفاده در چاپگر سه‌بُعدی شد. در ادامه‌ی نمونه‌سازی تجربی، جهت یافتن نمونه مناسب انجام گرفت؛ پس از تحلیل نمونه‌های بازسازی شده و هم‌سنجی سیستم‌ها، از نظر ظرافت بدنه‌ی چاپ شده و همچنین قابلیت دستگاهی برای ساخت قطعه‌ای هماهنگ و بدون عیب جهت بخش‌های مفقود، اقدام به چاپ سه‌بُعدی قطعات مفقود گردید و در نهایت نیز بخش‌های چاپ شده متناسب با بخش‌های مفقود به بدنه‌ی سفال اصیل وصالی شد. نتایج تحقیق نشان داد استفاده از فناوری‌های مدل‌سازی نوین باعث درک بهتر آثار سفالین از لحاظ شکلی برای بررسی‌های باستان‌شناسی و مطالعات موزه‌ای می‌گردد؛ همچنین استفاده از این فناوری‌ها موجب کاهش رفتارهای تماسی حفاظتی از آثار گردیده و اقدامی مفید در جهت حفاظت غیر تماسی و کم‌خطر است.

کلیدواژگان: آثار سفالین، حفاظت- مرمت، بازسازی، اسکنر سه‌بُعدی، چاپگر سه‌بُعدی.

I. استادیار گروه مرمت آثار تاریخی دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نویسنده‌ی مسئول).
m.razani@tabriziau.ac.ir
II. عضو هیأت‌علمی، دانشکده طراحی اسلامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز
III. دکترای مهندسی مکانیک

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

آثار و اشیاء سفالین نقش ویژه‌ای در علوم مرتبط با باستان‌شناسی و باستان‌سنجی دارند و به زبانی دیگر، الفبای علوم باستان‌شناختی برمبنای سفال، از مهم‌ترین و پُرتعدادترین یافته‌های باستان‌شناسی تدوین شده است؛ چراکه وابسته به دوره‌های مختلف در محوطه‌های تاریخی از نوسنگی تا دوره‌ی اسلامی، و براساس تکنولوژی‌های موجود در این اعصار، امکان دستیابی به انواع سفال‌های دست‌ساز، چرخ‌ساز و بی‌لعاب و لعاب‌دار و منقوشی که بتوان آن‌ها را تقسیم‌بندی، گاهنگاری و ساختارشناسی نمود، وجود دارد. از این‌رو از سفال‌های تاریخی در اقداماتی همچون: سالیابی و تعیین قدمت، شناخت دوره‌ی استقراری و لایه‌نگاری علمی در محوطه‌های باستانی (آذرنوش و همکاران، ۱۳۹۵) و همچنین شناخت فناوری‌های گذشته (در رابطه با فرآیندهای استحصال مواد اولیه، روش ساخت و تزئین، گونه‌ی پخت و غیره)، (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ نقشینه و همکاران،۱۳۹۲) مورد استفاده می‌گیرند. ازطرفی بسیاری از سفال‌های سفال‌های یافت‌شده از کاوش، در اثر سه عامل بسیار مهم دچار آسیب و درنهایت تخریب می‌شوند: ۱) آسیب فیزیکی[۱] (شامل: شکنندگی سفال با ضربات و شوک‌های مکانیکی و حرارتی، سایش و درمان‌های قبلی)؛ ۲) امراض و نهشت‌های سطحی[۲] (نشست و رسوب مواد خارجی از منابع مختلف ناشی از استفاده کردن، رسوب نمک‌های محلول و نامحلول، پس‌ماندهای در طول دفن، لکه‌های ناشی مواد در تماس و جذب شده، استفاده بیش از حد مواد حفاظتی و غیره)؛ ۳) فرسودگی شیمیایی[۳] (انحلال و خروج مواد از بدنه و آسیب‌های شیمیایی). نتیجه‌ی این عوامل، آسیب‌هایی از قبیل: ترک‌ها، شکستگی‌ها و درنهایت بروز بخش‌های مفقود در این آثار است.

بازسازی آثار فرهنگی و تاریخی، همچون سفال‌های باستان‌شناختی جهت درک فرمی و شکلی برای حفاظت و صیانت آینده‌ی آن‌ها با درنظر گرفتن مسائل زیبایی‌شناسی و ارزش‌های فرهنگی و موزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هنگامی که بخش مفقود اشیاء میراث‌فرهنگی و به‌خصوص سفالینه‌های تاریخی و موزه‌ای نقش سازه‌ای در ساختمان اثر داشته و باعث عدم پایداری و ایستایی شئ گردند؛ ضرورت دارد بخش‌های مفقودی که از لحاظ جنبه‌های زیباشناختی و استقامتی در ارتقاء ارزش‌های مادی و بصری اثر تأثیرگذار هستند را با استفاده از روش‌های کم‌خطر و غیرتخریبی بازسازی گردد؛ از این‌رو استفاده از روش‌های غیرتماسی و جدیدی که بتوان بدون استفاده از فرآیندهای سنتیِ قالب‌گیری بخش مفقود اثر را بازسازی نمود، اولویت دارند (رازانی و همکاران، ۱۳۹۵). در طی چند سال گذشته، استفاده از فناوری‌های نوین، مانند اسکنر لیزری و چاپگر سه‌بُعدی جهت ساخت مدلی سه‌بُعدی و مجازی از اشیاء و ارتقاء آن مدل مجازی در نرم‌افزارهای سه‌بُعدی‌ساز کامپیوتری نتایج موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های ثبت، مستندنگاری-آسیب‌نگاری و کپیه‌ی میراث‌فرهنگی به‌دنبال داشته است. تصاویر دیجیتال، مدل‌های سه‌بُعدی‌سازی شده، و پایگاه‌های چند رسانه‌ای[۴] از آثار باستان‌شناختی نقش مهمی در پروژه‌های تحقیقاتی باستان‌شناسی، موزه‌داری و علوم میراث‌فرهنگی را بر عهده دارند (Koutsoudis & Pavlidis, 2010).

Archive of SID

www.SID.ir

اهداف و ضرورت پژوهش: هدف از این تحقیق، به‌کارگیری فناوری‌های نوین نمونه‌سازی، از جمله: اسکنر و چاپگر سه‌بُعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین شاخص و امکان‌سنجی به‌کارگیری روش‌های فوق جهت بازسازی دیگر اشیای باستان‌شناختی است.

پرسش‌های پژوهش: مهم‌ترین پرسشی که این تحقیق براساس آن‌ها شکل‌گرفته عبارتنداز: چگونه می‌توان از فناوری‌های نمونه‌سازی نوین در بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین تاریخی-باستان‌شناختی استفاده نمود؟ و بازسازی آثار سفالین باستانیِ دارای بخش‌های مفقود با استفاده از روش‌های نوین نمونه‌سازی همچون اسکن لیزری و چاپ سُه‌بعدی چه مزایا و معایبی نسبت به روش‌های معمول دارد؟

روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش به‌صورت تجربی-آزمایشی و تحلیلی است؛ از جمله ابداعات این تحقیق بومی‌سازی استفاده از تکنولوژی‌های جدید در راستای بازسازی قطعات مفقود است که مبتنی‌بر اقدامات تجربی و به‌کارگیری اسکنر و چاپگر سه‌بُعدی بوده است. در همین راستا، بررسی مدارک منتشر شده و اسناد کتابخانه‌ای جهت مرور ادبیات نوشتاری و تجربی حوزه‌ی مطالعاتی فوق انجام گردیده است. در بخش مطالعه‌ی ادبیات تحقیق، با بررسی منابع کتابخانه‌ای به‌شناخت و بررسی وضعیت حفاظتی سفالینه‌های باستانی، مهم‌ترین گونه‌های آسیب و تخریب آن‌ها پرداخته شده و بهینه‌ترین روش اسکن و چاپ سه‌بُعدی برای بازسازی این اشیاء مشخص گردیده است و در مرحله‌ی تجربی-آزمایشگاهی با کمک اسکنر سه‌بُعدی اقدام به تهیه‌ی نقشه‌های سه‌بُعدی از سطح نمونه‌ی سفالی و تبدیل آن به داده‌های قابل استفاده برای چاپگر سه‌بُعدی شده که در ادامه با انجام آزمون‌های عملی و هم‌سنجی سیستم‌ها، اقدام به چاپ حجم سه‌بُعدی قسمت مفقود در نمونه‌ی مطالعاتی شده و بخش مورد نظر بازسازی گردیده است؛ درنهایت نیز با تحلیل مزایا و معایب نتایج و فرآیند فوق در قالب یافته‌های پژوهش به پرسش‌های تحقیق پاسخ داده شده است.

پیشینه‌ی تحقیق

حفاظت و بازسازی از آثار سفالین در سراسر جهان سابقه‌ای طولانی به اندازه‌ی تاریخ ساخت اشیاء سفالی دارد. فارغ از گونه‌های بازسازی خاص همانند: بازسازی تَرک‌ها و بخش‌های مفقود با طلا در کشورهای شرق دور (Buys & Oakley, 2014,68) و یا برخی بازسازی‌های نادر که توسط سفال پخته شده و اتصال آن به شیوه‌ی اصلی و با همان نقوش انجام شده است (Oddy, 1992). از حدود ۸۰ سال قبل مواد و روش‌های بازسازی سفال‌های باستانی چندان تغییر نکرده است و بر مبنایی ساخت بخش مفقود با مواد شکل‌پذیر همانند گچ در ترکیب با سایر مواد پُرکننده و رنگ‌دانه‌های هنری استوار بوده است. براساس تصاویری که از کاوش‌های

Archive of SID

www.SID.ir

باستان‌شناسی تخت‌جمشید وجود دارد، نخستین بازسازی‌های اشیاء سفالین توسط محسن و موسی پیرامون، توسط گچ در حال انجام است (تصویر۱)، که این امر تا به امروز نیز ادامه دارد. می‌توان گفت به لحاظ تاریخی مرمت اشیاء و آثار سفالی آن‌چنان‌که باید، مسأله‌ی توسعه‌یافته‌ای نبوده است.

امروزه در برخورد با آثار سفالین باستانی وابسته به ماهیت شئ از لحاظ قدمت و ارزش‌های آن عملیات حفاظتی مرمتی با میزان مداخله‌های متفاوتی بر روی آثار انجام می‌گیرد؛ از جمله‌ی این اقدامات بازسازی بخش‌های مفقود در آثار سفالین است که عموماً از فرآیندهای رایج و مرسوم استفاده از گچ در ترکیب با مواد رنگی یا شاموت استفاده می‌شود. استفاده از روش مرسوم قالب‌گیری و ریخته‌گری روی شئ نیز همیشه با خطرات و آسیب‌هایی همراه بوده است (Koob, 1998) که در همین ارتباط با توجه به نیاز به بازسازی قطعات مفقود و از دست رفته در سفالینه‌های باستان‌شناختی توسعه و کاربرد روش‌هایی غیرتماسی (کم‌تماسی) و غیرمخرب همچون فناوری‌های مبتنی‌بر نمونه‌سازی سریع، ضرورت یافته است. این درحالی‌ست که بسیاری از مخاطبان موزه‌ها و مجموعه‌های تاریخی و فرهنگی، علاقمند هستند تا با فناوری‌های جدید برای درک بیشتر آثار تاریخی و نکات ویژه‌ی هر کدام از آن‌ها درگیر شوند؛ مجموع روش‌های سنتی نمایش آثار و روش‌های جدید همانند سیستم‌های سه‌بُعدی همه‌جانبه و چاپ سه‌بُعدی به‌عنوان راه‌های مؤثری برای افزایش ادراک، فهم و تعامل با مصنوعات محسوب می‌شوند (Di Franco & Camporesi, 2015). در ادامه به معرفی روش‌های اسکن سُه‌بعدی و چاپ سُه‌بعدی در راستای استفاده‌ی بهینه از آن‌ها در حفاظت و بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین باستان‌شناسی و تاریخی شاخص پرداخته شده است.

▲ تصویر ۱. مرمت اشیاء سفالین استخر توسط موسی و محسن پیرامون به‌همراه دیگر مرمتگران در حرم بازسازی شده‌ی خشایارشاه ۱۳۱۰ هـ.ش. (ماخذ: https://oi.uchicago.edu/gallery/harem-xerxes#4E12_300dpi.jpg).

سه‌بُعدی‌سازی به‌عنوان بخشی از حوزه‌ی وسیعِ گرافیک کامپیوتری، پدیده‌ای است که به ارائه‌ی شبیه‌سازی ریاضی سطوح در یک ساختار هندسی-فضایی می‌پردازد. تمامی فناوری‌های سه‌بُعدی‌سازی، از جمله روش‌های دیجیتالی گرافیک کامپیوتری فضایی، که ما با آن‌ها در ارتباط هستیم در این دو بخش می‌توانند قرار گیرند: بخش نرم‌افزار (مدل‌سازهای سُه بعدی[۵]، نمایش‌دهنده‌های سه‌بُعدی[۶]) و بخش سخت افزار (اسکنرهای سه‌بُعدی، چاپگرهای سه‌بُعدی) که هدف آن‌ها بهبود ارتباط میان آثار و یا فهم بصری از برخی فرآیندها است. اگر پیش‌تر در رابطه با نمونه‌سازی سریع[۷] صحبت می‌شد با این روش‌ها می‌توان، در رابطه با ساخت سریع[۸] بحث کرد. نمونه‌سازی سریع، نوعی مهندسی معکوس، به معنی به‌کارگیری فناوری برای تبدیل ابعاد هندسی نمونه به داده‌ی دیجیتال، برای ساختن مدل هندسی قطعه دانست (Fischer, 2000: 27-38). روش‌های سه‌بُعدی‌سازی در یک دهه‌ی گذشته، پیشرفتی چشم‌گیر داشته‌اند و تحقیق در رابطه با آن‌ها فرصت‌های متفاوتی در زمینه‌ی میراث‌فرهنگی به‌وجود آورده است. سیستم‌های چاپگر سه‌بُعدی بیشتر در زمینه‌های فنی مهندسی، پزشکی، طراحی صنعتی و معماری، کاربرد داشته است. در موضوع میراث تاریخی و فرهنگی می‌توان گفت، اگرچه از فناوری‌های مبتنی‌بر سه‌بُعدی‌سازی دقیق در پایش، ثبت،

Archive of SID

www.SID.ir

مستندنگاری و آسیب‌نگاری همچنین و واکنش‌های تخریبی و تعمیری در کنار بازسازی مجازی بناهای و آثار باستانی (Pedersini et al., 2000; Santagati et al., 2013; Forte 2014)، (تصاویر ۲ و ۳) به‌وفور استفاده شده، اما حوزه‌ی بازسازی آثار باستانی و تاریخی که شاید یکی از قابلیت‌های مهم این عرصه باشد کمتر به‌صورت توسعه‌یافته به‌کار گرفته شده است (Antlej et al., 2001-A).

◄ تصاویر ۲ و ۳. سفالینه تاریخی که دچار آسیب بخش‌های مفقود شده است (راست) و بازسازی دیجیتال اثر همان ویترین به صورت پوستر(چپ) (ماخذ: موزه باستان‌شناسی الیکانته، اسپانیا ۲۰۱۵).

پیش‌تر در زمینه‌ی استفاده از اسکن‌های لیزری و ساخت تصاویر سه‌بُعدی در ایران اقداماتی در ارگ بم (Bouroumand & Studnicka, 2004)، تخت‌جمشید و مقبره‌ی کوروش در پاسارگاد (Afshar et al., 2002)، بیستون کرمانشاه و برخی دیگر از بناهای مهم کشور صورت گرفته است (امور پایگاه‌های میراث‌فرهنگی کشور، ۱۳۹۴). اما سندی مبنی‌بر استفاده از این تکنولوژی در راستای بازسازی بخش‌های مفقود و یا ساخت مولاژها، و کپیه‌ها در میراث‌فرهنگی کشور گزارش نشده است. تجربیات در رابطه با استفاده‌ی تلفیقی از تکنولوژی‌های اسکنر و چاپگر سه‌بُعدی برای ایجاد تصاویر سه‌بُعدی مجازی، بازسازی قطعات مفقود اشیاء تاریخی فرهنگی و همچنین ساخت کپی از آن‌ها چندان نیست. آنتلج و همکارانش، از ترکیب روش‌های اسکن سه‌بُعدی و مدل‌سازی کامپیوتری اثر و در ادامه استفاده از چاپگر سه‌بُعدی، اقدام به ساخت کپیه‌هایی از مجسمه‌ای مرمری[۹] و یک نقش‌برجسته‌ی پلی‌کروم روی چوب[۱۰] مربوط به دوران گوتیک (۱۵۱۰ م.) نموده‌اند (Antlej et al., 2011-b). در موزه‌ی ملی اسلوونی نیز تجربیاتی در رابطه با بازسازی بخش‌های مفقود قطعات سرامیکی با استفاده از چاپگر سه‌بُعدی گزارش شده است (Antlej et al., 2012). جدیدترین مطالعات انتشار یافته در زمینه‌ی استفاده از روش‌های مدل‌سازی نوین در بازسازی اشیاء، توسط نگارندگان این پژوهش برروی شیشه انجام گرفته است که شامل بازسازی و مرمت بخش مفقود شیشه‌های جدید و امروزی بوده است و در مطالعات فوق از مواد تاریخی و فرهنگی به‌عنوان نمونه‌های موردی استفاده نشده است (رازانی و همکاران، ۱۳۹۵). در همین راستا و در جهت درک فرمی و چند بُعدی از سفالینه‌ها و اشیاء باستان‌شناسی و تاریخی با توجه به فقدان به‌کارگیری این تکنولوژی‌ها، این تحقیق به ارزیابی آن در مقیاس واقعی برروی شئ سفالین باستان‌شناسی پرداخته است.

Archive of SID

www.SID.ir

روش‌های نوین نمونه‌سازی سریع و ویژگی‌های آن

با پیشرفت صنعت و فناوری نوین در تکنولوژی ساخت و تولید، روش‌های جدیدی برای ساخت قطعات مختلف ابداع شد، «نمونه‌سازی سریع» از جدیدترین تکنولوژی روز جهان است که از سال ۱۹۹۰ م. شرکت‌های آمریکای، آلمانی و ژاپنی، سرمایه‌گذاری زیادی 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 ایده‌ی خود یا کپی قطعه‌ی اسکن شده را در حداقل زمان بسازد و علاوه‌بر تصاویر دوبُعدی، مدل سه‌بُعدی را نیز برای بررسی‌های بیشتر در اختیار داشته باشد. با داشتن مدل فیزیکی واقعی می‌توان ایده‌ی خود را به‌صورت مستقیم و واقعی به کاربران و تولیدکنندگان نشان‌داد یا می‌توان مدل ساخته شده را آزمایش و از نظر ابعادی مطالعه کرد. امروزه قابلیت این روش از حد نمونه‌سازی فراتر رفته است (رحمتی، ۱۳۸۴). در نمونه‌سازی سریع، قطعات را با استفاده از فرآیند افزایشی و لایه‌لایه می‌سازند که در نتیجه سریع‌تر از برداشتن یا کاهش مواد است؛ در این فرآیند 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, 2002: 313-317). از مواد مختلف پلیمری و حتی فلزی برای ساخت مدل‌ها در نمونه‌سازی سریع استفاده می‌شود؛ با پیشرفت‌های صورت گرفته در این فناوری، نمونه‌سازی سریع به‌عنوان نوعی فرآیند استاندارد صنعتی پذیرفته شده است (Colombo, 2006). صرف‌نظر از خواص مکانیکی، مواد مدل می‌توانند شامل ویژگی‌های دیگری از قبیل: رنگ‌پذیری، شفافیت، انعطاف‌پذیری و امثال آن باشند. از مهم‌ترین مزایای نمونه‌سازی سریع: کاهش هزینه‌ها و زمان تولید ساخت ابزار و یا قالب (از چند ماه به چند روز یا هفته)، کاهش خطاهای فردی به‌دلیل استفاده‌ی مستقیم از اطلاعات نرم‌افزارهای طراحی، تولید انبوه در مرحله‌ی طراحی آزمایش و رفع بسیاری از عیوب طراحی به‌علت کاهش زمان تولید و هزینه‌ها، ایجاد قابلیت تجسم[۱۱]، تصحیح[۱۲]، تکرار طرح[۱۳]، بهینه سازی[۱۴] و انجام آزمون‌های عملکردی[۱۵] قابل اشاره هستند.

فرآیند نمونه‌سازی سریع، به‌صورت کلی دارای مراحلی است که با ایجاد مدل[۱۶] (CAD) موضوع مورد نظر شروع شده و به ساخت محصول نهایی منتج می‌شود. مراحل نمونه‌سازی سریع عموماً از الگوریتم زیر استفاده می‌کنند:

- ترسیم سه‌بُعدی مدل توسط نرم‌افزارها (با به‌کارگیری یکی از روش‌های: ۱) نقشه‌ی دو بُعدی موجود؛ ۲) استفاده از داده‌های اسکن شده؛ ۳) استفاده از داده‌های دیجیتالی شده؛ ۴) استفاده از یک مدل CAD موجود؛ ۵) ایجاد یک مدل CAD جدید).
- ایجاد فایل STL[۱۷] از مدل سه‌بُعدی تهیه شده.
- لایه‌بندی: نرم‌افزار دیگری (همانند CURA) مدل را به لایه‌لایه (با توجه به ضخامت لایه‌ها) تقسیم می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

– ساخت تکیه‌گاه: لایه‌ها در قسمت‌هایی از قطعه که زیر آن‌ها خالی باشد، نیاز به تکیه‌گاه دارند.
– ساخت قطعه: براساس فایل ساخت و با اضافه‌شدن مواد روی‌هم، و شکل‌گیری لایه‌به‌لایه ساخته می‌شود.
– پس‌پردازش: شامل یکی از عملیات‌های افزایش استحکام قطعه، تکمیل عملیات فرآوری و یا پرداخت قطعه می‌شود (رحمتی، ۱۳۸۴: ۹۳-۹۰)، (شکل-۱).

کاربرد اسکن سه‌بُعدی در مستندنگاری و ثبت میراث‌فرهنگی

اندازه‌برداری دقیق قطعه از بخش‌های مهم در مهندسی معکوس و نمونه‌سازی سریع است. امروزه به کمک فناوری غیرتماسی اندازه‌برداری سه‌بُعدی، توسط اسکنرهای نوری، دقت و سرعتِ اندازه‌برداری افزایش یافته است. دستگاه اسکنر سه‌بُعدی[۱۸] با برداشت اطلاعات از قطعات موجود، یک فایل کاملاً دقیق و سه‌بُعدی از قطعه، در اختیار قرار می‌دهد. در این روش با اسکن جز به جز قطعه‌ی مورد نظر و انتقال اطلاعات به نرم‌افزار، حجم قطعه به‌صورت مجازی در رایانه ساخته می‌شود. انواع سیستم‌های اندازه‌برداری غیرتماسی در جدول ۱، آورده شده است. اسکن سه‌بُعدی، درواقع ابزاری مفید است و با توانایی قابل‌توجه برای بهبود مطالعه‌ی سفال‌های باستان‌شناسی است و توصیه می‌شود این روش به‌عنوان یک ابزار عملی و قابل اعتماد در تحقیقات باستان‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد (Karasik & Smilansky, 2008).

◄ شکل ۱. الگوریتم مراحل نمونه‌سازی سریع (مراحل خط‌چین‌دار با توجه به فرم قطعه و هدف کار قابل حذف هستند)، (نگارندگان، ۱۳۹۶).

به‌کارگیری چاپگرهای سه‌بُعدی در بازسازی بخش‌های مفقود

با توجه به کاربرد روش‌های مدرن اسکن و چاپ سه‌بُعدی در علوم پزشکی برای ساخت اندام مصنوعی و بافت‌های از دست رفته، همچنین کاربردهای مهندسی آن در صنایع هوافضا و خودروسازی در ساخت ژنراتور الکتریکی، و همچنین در حوزه‌ی هنر و معماری برای ساخت انواع مجسمه و ماکت، این روش‌ها، بعد از تجربه‌های فوق صلاحیت‌های لازم برای به‌کارگیری در بازسازی اشیاء میراث‌فرهنگی را به‌دست آورده‌اند. در همین راستا تاکنون بیش از ۳۰ روش مختلف در صنعت برای نمونه‌سازی سریع ابداع شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتنداز: استریو لیتوگرافی[۱۹] (SLA)، تف‌جوشی انتخابی لیزری[۲۰] (SLS)، ساخت لایه‌ای[۲۱] (LLM)، چاپ سه‌بُعدی[۲۲] (3DP)، جاری کردن چندگانه[۲۳] (MJM)، فرآیند جاری کردن متعدد[۲۴] (PolyJet)، روش ترموجت[۲۵] (TJ)، رسوب مذاب[۲۶] (FDM)، پیشینه‌ی مطالعاتی در

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- مقایسه انواع سیستم های اندازه برداری غیر تماسی مرسوم (ماخذ: D'Apuzzo, 2006 بر گرفته از رازانی و دیگران ۱۳۹۵)

نام اسکنر	روش اندازه برداری	فن آوری	ویژگی ها و کاربرد
اندازه برداری لیزری (متصل بر دستگاه اندازه-گیری مختصاتی)[19]	اندازه برداری سطحی[20]	اسکن لیزری	کاربرد در اندازه برداری‌های صنعتی- ترکیبی است از نور لیزر و دوربین در محفظه‌ای کم حجم- دقت بسیار بالا در زمان نسبتاً کم.
سیستم‌های پروژکت کدگذاری نوری قابل حمل[21]	اندازه برداری طولی[22]	پروژکت کدگذاری نوری[23]	از یک پروژکتور نور سفید یا آبی و یک یا چند دوربین تشکیل شده است که بر اساس قاعده‌ی مثلث بندی[24] کار می‌کنند. اندازه نسبتا کوچکی دارد و به راحتی حمل می‌شود - سرعت و دقت در اسکن سطوح نسبتا بزرگ - غیر اتوماتیک بودن فرایند اسکن-
اندازه برداری لیزری دستی	اندازه برداری نقطه-ای[25]	اسکن لیزری	مشاهده‌ی فوی اطلاعات دریافتی از سطح اسکن شده، اسکن سطوح پیچیده در زمان کوتاهتر نسبت به حالت اتوماتیک، امکان حرکات پیچیده و راحت سنسور- دقت نسبتا پایین دارد.
دستگاه‌های رومیزی	اندازه برداری نقطه‌ای	اسکن لیزری یا پروژکت کدگذاری نوری	جهت اسکن قطعات کوچک به‌صورت کاملاً اتوماتیک- قطعه به دستگاه فیکس می‌شود و سنسور یا ساپورت قطعه حرکت و چرخش می‌کند- اتومات بودن فرایند اندازه برداری - تنظیمات متنوعی برای این سیستم از دو محوره تا ۷ محوره وجود دارد.
سیستم اندازه برداری نقطه‌ای لیزری	اندازه برداری نقطه‌ای	زمان حرکت[26]	از ساده‌ترین روش‌های اسکن سه‌بعدی است. اتوماتیک بودن فرایند اندازه برداری- کم هزینه تر بودن نسبت به دیگر فرایند های اتومات - زمان اندازه برداری طولانی و مراحل انجام کار زیاد می باشد.
سیستم‌های ویژه	ترکیبی از موارد فوق	اسکن لیزری یا پروژکت کدگذاری نوری	برای قطعه‌ای خاص یا شغلی خاص، اختصاصی سازی شده است. سنسورهای چندگانه و حرکت‌های ویژه برای سنسورها طراحی شده‌اند (مانند اسکن سرتاسری بدن انسان).

قالب معرفی روش‌ها و شیوه‌های کار در مدل‌سازی سریع و بیان مزیت‌ها و معایب برخی از مهم‌ترین آن‌ها (رازانی و همکاران، ۱۳۹۵). و نیز شرایط و امکانات مورد نیاز و در دسترس موجب به‌کارگیری روش اف‌دی‌ام برای ساخت و آزمون قطعات جهت بازسازی قطعات مفقوده‌ی اثر سفالین این تحقیق گردید. با توجه به فاکتورهایی همانند در دسترس بودن، دقت و سرعت اسکن، راحتی استفاده و به‌کارگیری دستگاه و شفاف یا نیمه‌شفاف بودن نمونه‌ی اثر اسکن شده، امروزه از مناسب‌ترین انواع اسکنر برای اسکن آثار سفالی، سیستم‌های پروژکت کدگذاری نوری قابل حمل هستند، که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است.

مواد، دستگاه‌ها و روش‌های مورد استفاده برای بازسازی قطعات مفقود

معرفی نمونه‌ی مورد مطالعه

نمونه‌ی مورد مطالعه برای ارزیابی بازسازی بخش مفقود به‌وسیله روش‌های سه‌بُعدی‌سازی، سفالی سیاه رنگ براق و صیقلی متعلق به کارگاه ۱، از محوطه‌ی کول‌تپه هادیشهر در شهرستان جلفا، از استان آذربایجان شرقی است که در فصل نخست کاوش‌های باستان‌شناسی به مدیریت اکبر عابدی در سال ۲۰۱۰ م. کاوش شده و با شناسه‌ی اختصاصی (Kul. T. J. 2010) به‌شماره‌ی ثبتی ۱۱۴۲ به ثبت رسیده است. علت انتخاب نمونه، در دسترس بودن و امکان کار برروی آن به‌واسطه‌ی مطالعاتی بودن و همچنین اجازه‌ی سرپرست هیأت کاوش بوده است. سفال فوق از جمله سفال‌های عصر مفرغ قدیم منطقه‌ی شمال‌غرب ایران و قفقاز به‌شمار می‌رود که تحت‌عنوان «سفال‌های خاکستری-سیاه صیقلی» یا «داغدار فرهنگ کورا-ارس» در مطالعات باستان‌شناسی منطقه، از آن نام می‌برند. کول‌تپه دارای

Archive of SID

www.SID.ir

جدول-۲ : مشخصات عددی ظرف سفالین مورد مطالعه و بخش‌های مفقود آن

	بیشترین ارتفاع(mm)	بیشترین ضخامت بدنه (mm)	بیشترین طول(mm)	قطر دهنه(mm)	حجم mm^3	نسبت حجم قطعه به کل حجم کاسه	توضیح
بخش اصیل ظرف	۶۵	۵	۱۴۰	۱۲۰	۱۹۳۵۲۱.۵۴۹	٪ ۸۰	کلیه قطعات ظرف بعد وصالی
بخش مفقود کوچک	۱۹	۵	۶۵	-	۵۹۵۲.۱۰۷	٪ ۲.۴۵	لبه ظرف
بخش مفقود بزرگ	۶۵	۵	۹۰	-	۴۲۵۴۲.۴۴۳	٪ ۱۷.۵۷	کف و بخشی از لبه ظرف

◄تصویر ۴. کاسه‌ی سفالی کول‌تپه جلفا با دو قطعه‌ی مفقودی بزرگ و کوچک و شکستگی‌ها و جدایش‌هایی در بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).

۸ دوره‌ی فرهنگی است که از قدیم به جدید با نام‌های VIII دوره‌ی مس‌وسنگ تا دوره‌ی I، دوره‌ی هخامنشی نام‌گذاری شده است. این سفال‌ها در دوره‌ی IV (چهارم) کول‌تپه همزمان با عصر مفرغ قدیم قرار می‌گیرد که بازه‌ی زمانی ۳۰۰۰ تا ۲۵۰۰ ق.م. را دربر می‌گیرد (عابدی، ۱۳۹۵). بعد از وصالی موقت قطعات، بدنه‌ی اصلی مشخص گردید؛ شئ مورد نظر کاسه‌ای خاکستری رنگ دارای سه برجستگی منقوش به شکل Z است (تصویر ۴). ظرف فوق، دارای دو بخش مفقودی بزرگ و کوچک تقریباً مثلث‌شکل است. همچنین براساس محاسبات آماری حاصل از اسکن سه‌بُعدی و تفکیک‌های نرم‌افزاری قطعات مفقودی ساخته شده، حجم بدنه‌ی اصلی و دو قطعه‌ی ساخته شده و نسبت آن‌ها محاسبه گردید. نتایج محاسبات فوق نشان‌داد حجم دو قطعه‌ی مفقودی تقریباً ۲۰٪ از کل حجم ظرف است (جدول ۲).

اسکنر سه‌بُعدی مورد استفاده

اسکنرهای سه‌بُعدی برحسب دقت و لیزر استفاده شده در آن‌ها به دو دسته‌ی اسکنرهای دقیق و اسکنرهای متوسط، تقسیم‌بندی می‌شوند. از اسکنرهای دقیق برای اسکن سه‌بُعدی نمونه‌های صنعتی و بسیار ریز استفاده می‌شود و اسکنرهای متوسط به‌دلیل نوع لیزر به‌کار رفته در آن‌ها (جهت کاهش آسیب به بدن و چشم) عمدتاً جهت نمونه‌گیری از اشیاء با اندازه‌ی متوسط و انسان استفاده می‌شود. در این پژوهش از اسکنر سه‌بُعدی REXCAN4 (رکس‌کن ۴)[۲۷] تولید شرکت سولوشنیکس[۲۸] کشور کره‌جنوبی استفاده شده است. REXCAN4 از دو دوربین CCD با رزولوشن بسیار بالا و یک پرژکتور حرفه‌ای ساختار یافته است. REXCAN4 با سیستم عامل Windows 32/46Bit هماهنگی کامل داشته و نرم‌افزار منحصربه‌فرد EzScan، کلیه‌ی نیازهای مربوط به اسکن قطعات را مرتفع می‌سازد؛ این اسکنر با رزولوشن‌های مختلف عرضه می‌گردد (تصویر ۵). روش کار در این اسکنر، درواقع

Archive of SID

www.SID.ir

همانند دیگر اسکنرهای سه‌بُعدی با کمک پردازش تصویر و تجزیه‌تحلیل نرم‌افزاری نور ساطع شده از جسم و همچنین نور برگشتی لیزر تابیده شده بر جسم بوده است که مدلی دیجیتالی (ابر نقاط) از جسم برگردانده و بدین‌صورت با پردازش نرم‌افزاری اختصاصی دستگاه با نام EzScan، این اطلاعات برداشت شده به‌صورت مدل سه‌بُعدی دیجیتالی شکل می‌گیرد. فایل خروجی دستگاه STL است که به‌راحتی توسط اکثر نرم‌افزارهای سه‌بُعدی‌ساز، مانند: کتیا، سالید ورک و راینو، پشتیبانی می‌شود (پژوهشگران صنعت آرتا، ۱۳۹۵).[۲۹]

نرم‌افزارهای سه‌بُعدی‌سازی و مدیریت تنظیمات چاپ

با توجه به خطاهای اجتناب‌ناپذیر در مرحله‌ی اسکن نمونه‌ی اثر و نیز بازسازی سه‌بُعدی بخش مفقود به‌صورت مجازی، نیاز است تا از نرم‌افزار سه‌بُعدی‌ساز برای ویرایش فایل به‌دست آمده از اسکنر استفاده شود که در این تحقیق از نرم‌افزار راینو سروس[۳۰] نسخه‌ی ۵، سرویس ریلیز ۹ استفاده گردید. راینو، نرم‌افزاری سه‌بُعدی‌ساز بوده و به‌عنوان تنها ابزار مدل‌سازی سه‌بُعدی که کاملاً براساس سیستم نربز[۳۱] تجاری کار می‌کند، توسط شرکت مک نیل و شرکا[۳۲] توسعه‌یافته است. این سیستم، درواقع یک نمایش ریاضی از هندسه‌ی سه‌بُعدی است که می‌تواند هر شکلی از خطوط و دوایر ساده‌ی دوبُعدی تا اشکال پیچیده‌ی سطوح و حجم‌های ارگانیک و سیال را به‌درستی توصیف و تصویر کند. این نرم‌افزار 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 سه‌بُعدی و تبدیل فایل فرمت STL مدل مورد چاپ به فایل G-code است از نرم‌افزار Cura نسخه‌ی ۱۵،۰۴ استفاده گردید. این نرم‌افزار، فایل مدل مورد چاپ با فرمت STL را به‌صورت ورودی دریافت کرده و فایل با فرمت G-code را که قابل شناسایی توسط کنترلر چاپگر سه‌بُعدی می‌باشد، تولید می‌کند.

چاپگر سه‌بُعدی مورد استفاده

برای بازسازی بخش مفقود نمونه‌ی سفال مورد آزمایش از چاپگری سه‌بُعدی با نام «چاپبات ۲۰۲۰» که در -مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز- بومی‌سازی شده است، استفاده گردید (تصویر ۶). روش کار این چاپگر مبتنی‌بر لایه‌گذاری مذاب یا FDM است که می‌تواند عملیات چاپ سه‌بُعدی تا حداقل ضخامت لایه‌ی ۱۰۰ میکرون (۰،۱ میلی‌متر) را انجام دهد؛ نازل چاپگر فوق دارای قطر ۰/۴ mm است. به‌علاوه با استفاده از چاپگر فوق امکان نمونه‌سازی با انواع رشته‌های پلیمری (رشته‌های ساخته شده از مواد مختلف که درواقع خوراک اصلی چاپگر سه‌بُعدی برای چاپ قطعات هستند) چاپ سه‌بُعدی امکان‌پذیر است. از جمله فیلامنت یا رشته‌های پلیمری مورد نظر می‌توان به گونه‌های ساخته شده از ترکیبات ABS[۳۳]، PLA[۳۴]، PC[۳۵]، HIPS[۳۶] و PETG[۳۷] اشاره نمود.

Archive of SID

www.SID.ir

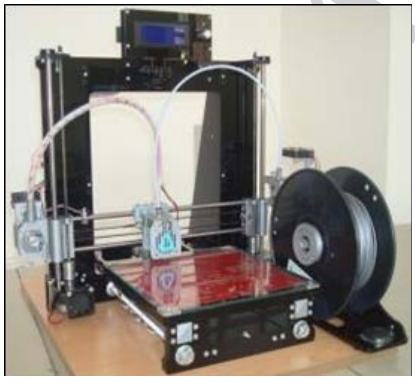
رشته‌های رنگی مورد استفاده برای بازسازی قطعات مفقود

ضرورت‌هایی در ویژگی‌های ماده‌ی مورد استفاده در بازسازی سفال‌های باستانی وجود دارد که شامل: قابلیت شکل‌پذیری، شفافیت، یا نیمه‌شفافی، با ضریب انعکاسی نزدیک به سفال، حداقل انقباض بعد از سخت شدن و تشکیل جسم جامد و سخت، ایجاد بافت و سطح مناسب، مقاومت در مقابل تغییر رنگ و فساد، دارا بودن قابلیت روتوش‌کاری و صیقل‌کاری کافی (Down, 2001) است؛ در همین راستا از میان رشته‌های پلیمری چاپ سه‌بُعدی، نمونه‌های ABS و PLA که تقریباً واجد این ویژگی‌ها هستند، در کار نمونه‌سازی بخش مفقود اثر سفالی این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند و قطعه‌ی مورد نظر با این رشته‌های پلیمری چاپ گردید. دو نوع رشته‌های پلیمری ABS و PLA به‌صورت گسترده در دسترس بوده و از لحاظ قیمت تمام شده نیز برای چاپ سه‌بُعدی صرفه‌ی اقتصادی بیشتری دارند. گونه‌ی PLA معمولی‌ترین رشته‌های پلیمری است که اسید پلی‌لاکتیک که در اصل پلاستیکی زیست تجزیه‌پذیر و دوست‌دار طبیعت مشتق شده از نشاسته است در بازه‌ی دمای بین ۱۸۰-۲۳۰ °C ذوب می‌شود. بوی بد آن به هنگام پرینت به‌هیچ‌وجه خطرناک نیست. اجسام و قطعات ساخته شده از این ماده قوی، اما نسبتاً تُرد هستند. این رشته‌ها به‌صورت طبیعی در رنگ‌های سفید نیمه‌شفاف هستند و چاپ قطعه با آن‌ها صورتی صاف و صیقلی خواهد داشت. در همین راستا گونه‌ی ABS دیگر رشته‌ی مشهور و معمول گرمانرم است که از اکریلونیتریل بوتادین استایرن ساخته می‌شود، این ماده‌ی نفتی که در ساخت آجرهای لگو نیز استفاده می‌شود، دود آن در هنگام ذوب برای سلامتی خطرناک است و به استفاده از ماسک و تهویه‌ی 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 اشیاء ساخته شده با آن قوی‌تر و همچنین دارای تُردی کمتری هستند و تا دمای بالاتری مقاومت می‌کنند. همچنین در رنگ‌های مختلفی، این رشته تولید می‌شود که درخشندگی بیشتر و به‌صورت رنگ‌های نقره‌ای و طلایی در بازار موجود است (Canessa et al., 2013).

▲ تصویر ۵. اسکنر لیزری رکس‌کن ۴، مورد استفاده در اسکن نمونه‌ی مورد مطالعه این تحقیق (پژوهشگران صنعت آرتا، ۱۳۹۵ http:// /psarta.com/product/rexcan4).

روش انجام کار و نتایج حاصله از فرآیند بازسازی

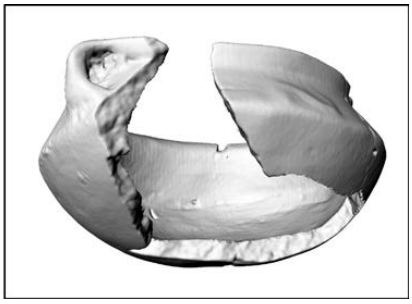
پس از عکاسی و مستندنگاری قطعات شکسته شده‌ی نمونه‌ی مطالعاتی، بخش‌های جدا شده‌ی اثر به‌وسیله آب مقطر شستشو و تمیزکاری گردید و پس از ۱۶ ساعت ماندن در آورن با دمای ۱۰۵ سانتی‌گراد، قطعات به‌وسیله‌ی رزین متیل متا اکریلات ۳۵٪ وصالی گردید و برای بازسازی بخش مفقود سفال با استفاده از فناوری‌های نمونه‌سازی اقدام شد، که بدین شرح است؛ در مرحله‌ی نخست از روش نور ساختاری[۳۸] جهت سه‌بُعدی‌سازی مجازی نمونه استفاده گردید. در این روش یک الگوی مشخص بر جسم انداخته شده، شکل سه‌بُعدی مجازی نمونه به‌دست می‌آید. دوربین‌های اسکنر در این روش در موقعیت ثابتی قرار دارند (اسکنر برروی پایه ثابت گردید) و نور لیزر جسم را اسکن می‌کند و نمونه برروی صفحه‌ی گردان با سرعتی ثابت به چرخش در می‌آید تا تمامی زوایای نمونه اسکن شود

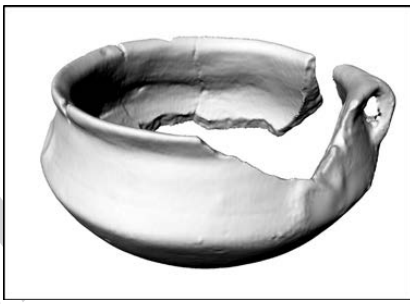


▲ تصویر ۶. چاپگر سه‌بُعدی چاپیات ۲۰۲۰ بومی‌سازی شده در مرکز رشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نگارندگان، ۱۳۹۶).

Archive of SID

www.SID.ir





▲ تصویر ۷. فایل STL خروجی دستگاه اسکنر سه‌بُعدی (نگارندگان، ۱۳۹۶).

(تصویر ۷). نمونه‌ی مطالعاتی با دو کیفیت ۲ و ۵ مگاپیکسلی اسکن شد که پس از بررسی اولیه‌ی فایل به‌دست آمده از این دو کیفیت متفاوت، فایل اسکن سه‌بُعدی با کیفیت ۵ مگاپیکسلی مورد تأیید قرار گرفت و برای مراحل بعدی کار انتخاب گردید.

سپس اقدامات تکمیلی برروی فایل سه‌بُعدی حاصله از اسکن انجام و بخش مفقود در محیط مجازی به کمک نرم‌افزار بازسازی گردید. به‌نحوی که فایل خروجی اسکنر با فرمت STL وارد نرم‌افزار راینو گردید و خطوط منحنی لازم از آن استخراج شد. در ادامه به کمک این خطوط به‌دست آمده، سطوح و حجم‌های مفقود شده با هندسه‌ی نربز ساخته شد. قابل ذکر است که هندسه‌ی فایل STL اسکنر به‌صورت مِش می‌باشد و این مورد تا حد زیادی در بازسازی بخش‌های مفقود براساس هندسه نربز، مشکل آفرین است؛ چراکه ماهیت ساخت سطوح در این دو مدل گرافیک کامپیوتری متفاوت می‌باشد. از دیگر مشکلات ویرایش فایل خروجی اسکنر در ارتباط با نمونه‌ی اثر مورد مطالعه، می‌توان به این موارد اشاره کرد: خطای اسکنر در ایجاد برخی از سطوح، به‌خصوص در لبه‌ها، به‌طوری که برخی از لبه‌ها به‌طور کامل به‌هم نرسیده و شکافی در سطح ایجاد گردید؛ عدم تقارن شکل کلی نمونه‌ی مورد مطالعه؛ یکسان نبودن ضخامت دیواره‌ها و تغییر در ضخامت آن‌ها بدون قاعده‌ی خاصی؛ لب‌پَر شدن لبه‌ی سطوح در محل شکستگی و مفقود شده‌ی نمونه‌ی اثر؛ وسیع بودن سطح یکی از دو قطعه‌ی مفقودی به‌طوری که ۲۰٪ از سطح کلی نمونه را دربر می‌گرفت (تصویر ۸). برای حل مشکلات اشاره شده، اقدامات پیش‌رو انجام گردید: از سطوح مش، خطوط مورد نیاز جهت ترسیم سطوح نربز استخراج گردید و با فرمان‌های اختصاصی، سطوح نربز ساخته شد. برای سطوح ایجاد نشده در فایل مش، مانند لبه‌ی سطوحی که به‌هم نرسیده‌اند و یا حفره‌هایی که در وسط سطوح مش ایجاد می‌شود، در ابتدا با فرمان‌های اختصاصی ساخت سطوح مِش، بازسازی‌ها انجام گرفت و در صورت جواب نگرفتن، از دستورات اختصاصی سطوح نربز استفاده شد. برای حل مشکل عدم تقارن و یکسان نبودن ضخامت دیواره‌ها، بر اساس الگوی تا حدی تکرار شونده و تناسبات کلی فرم اثر، بازسازی‌ها انجام گرفت. لب‌پریده‌گی‌های سطوح نیز به علت پراکنده بودن و کوچک بودن ابعاد در مقایسه با کل قطعه‌ی مفقود شده، نادیده گرفته شد.

در ادامه از دو قطعه‌ی مفقود که به‌صورت مجازی بازسازی شده بودند، فایل دیجیتال مناسب برای چاپگر سه‌بُعدی تهیه گردید و پس از اتمام ساخت مدل سه‌بُعدی مجازی از قطعه‌ی مفقود شده براساس فایل STL خروجی اسکنر، برای آزمون نهایی و تطبیق آن با بدنه‌ی اصلی اثر، در محیط نرم‌افزار راینو، قطعه‌ی مفقودی بازسازی شده در محل اصلی به‌صورت نرم‌افزاری جااندازی شد و ایرادات نهایی براساس مطابقت با لبه‌ی سطوح قسمت‌های موجود، برطرف گردید (تصویر ۹). لازم به ذکر است برای ویرایش و اصلاح فایل STL به‌دست آمده از اسکنر سه‌بُعدی و همچنین ساخت قطعات مفقودی شئ مورد مطالعه، از دیگر نرم‌افزارهای سه‌بُعدی‌ساز موجود و رایج در بازار داخلی همانند: 3D Max، Katia، Solidworks و

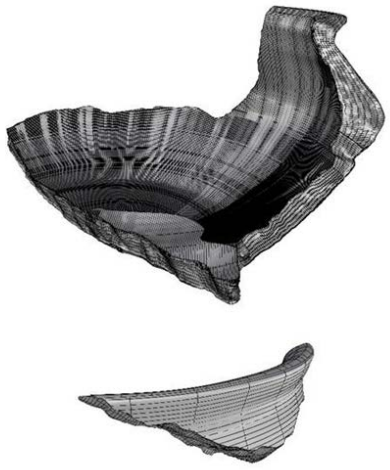
Archive of SID

www.SID.ir

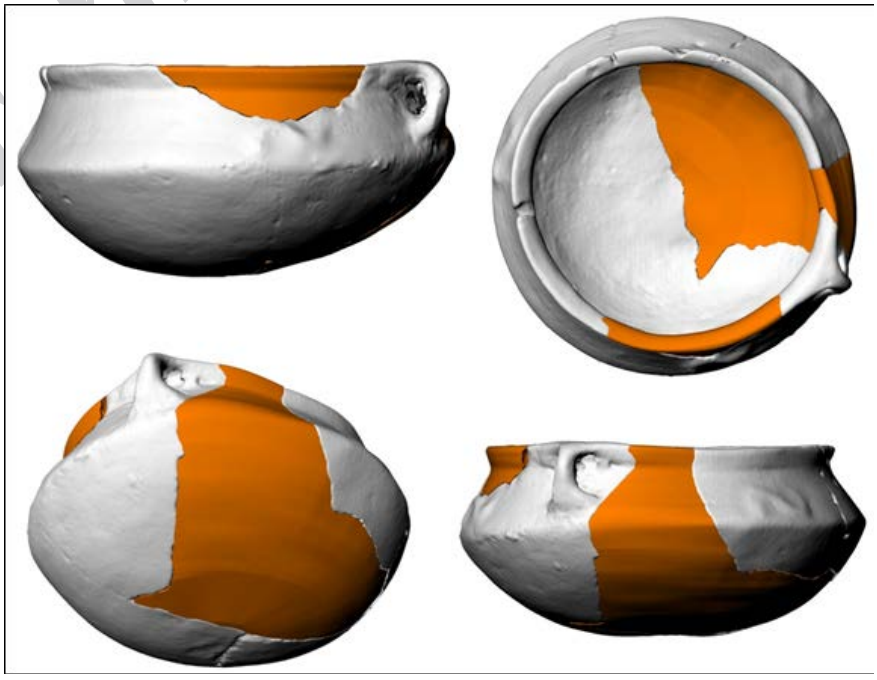
غیره نیز می‌توان استفاده کرد، ولی با توجه به قابلیت‌های منحصربه‌فرد نرم‌افزار سه‌بُعدی‌ساز راینو در بازسازی سطوح پیچیده و تسلط مؤلفین به آن، در این مطالعه، مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین نرم‌افزار اختصاصی برای ساخت مدل مجازی ظروف سفالین، به‌نام Qp نیز وجود دارد که قادر است به‌صورت نیمه‌خودکار مجموعه‌ای از ظروف سفالی را به‌صورت تصادفی و براساس ریخت‌شناسی فرم مقطع دوبُعدی آن‌ها ایجاد کند (Koutsoudis & Pavlidis, 2009) که با توجه فراگیر و در دسترس نبودن این نرم‌افزار و نیز عدم کارایی آن، با توجه به اهداف این مطالعه در اولویت قرار نگرفت. با توجه به آن‌که قطعه‌ی بزرگ، لبه‌ای مسطح و هم‌تراز جهت قرارگیری در دستگاه پرینتر سه‌بُعدی نداشت، این قطعه با مشورت اپراتور پرینتر سه‌بُعدی به دو قسمت تقسیم گردید و سپس این سه قطعه‌ی نهایی برای چاپ سه‌بُعدی بخش‌های مفقود و انجام آزمایشات جهت انجام مراحل پایانی کار ارائه گردید (تصویر ۱۰).

مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در کیفیت چاپگرهای سه‌بُعدی را می‌توان در تکنولوژی مورد استفاده در چاپگر سه‌بُعدی، ماده‌ی مورد استفاده (رشته‌ی پلیمری)، ضخامت لایه‌ها، سرعت چاپ، وضعیت قرارگیری قطعه در حین چاپ و میزان توپری قطعه ارزیابی نمود؛ به‌نحوی که هرچه چاپگر از تکنولوژی پیشرفته‌تر برخوردار باشد، کیفیت محصول نهایی مطلوب‌تر خواهد بود. با توجه به آن‌که رشته‌های پلیمری با کیفیت‌های مختلفی در بازار وجود دارند، می‌توان گفت مناسب‌ترین رشته‌ی 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 رشته‌ی پلیمری در حین انزال است. به‌نحوی که هرچه



▲ تصویر ۸. بازسازی دو قطعه‌ی مفقود شده‌ی اثر (بالا: قطعه‌ی بزرگ، پایین: قطعه‌ی کوچک) توسط نرم‌افزار راینو بر ساس الگوی تا حدی تکرار شونده (نگارندگان، ۱۳۹۶).



▶ تصویر ۹. جااندازی و تطبیق قطعه‌ی مفقودی بازسازی شده در بدنه‌ی اصلی اثر به‌صورت مجازی در محیط نرم‌افزار راینو (نگارندگان، ۱۳۹۶).

Archive of SID

www.SID.ir

سرعت نزول و ضخامت لایه‌های رشته‌ی پلیمری پایین‌تر باشد، کیفیت قطعه بالاتر می‌رود و همچنین هرچه سرعت و ضخامت لایه‌ها بالاتر باشد، قطعه‌ی 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 کاهش داد. ضخامت متداول لایه برای چاپگرهای FDM بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرون است؛ لذا برای بهبود کیفیت سطحی ضخامت لایه‌ی ۱۰۰ میکرون توصیه می‌شود.

سرعت چاپ از عوامل مؤثر دیگر در کیفیت سطحی چاپ است. سرعت متداول چاپ، مناسب برای چاپگرهای FDM در محدوده‌ی ۲۰-۷۰ میلی‌متر بر ثانیه توصیه می‌شود. از آنجایی‌که در سرعت‌های چاپ بالا با افزایش ارتعاش در خود چاپگر روبه‌رو هستیم و این افزایش ارتعاش به‌صورت یک‌سری از الگوهای ارتعاشی برروی سطح ظاهری قطعه‌ی چاپ شده خود را نشان می‌دهد، لذا در مواردی همچون موضوع این تحقیق، کاهش سرعت چاپ، افزایش کیفیت سطحی را در پی خواهد داشت. از دیگر متغیرهای مهم، وضعیت قرارگیری قطعه حین چاپ است؛ به‌هنگام چاپ، اگر قطعه از وضعیت ایستایی مناسبی برخوردار نباشد، بایستی برای آن یک پایه‌ی نگه‌دارنده طراحی نمود تا چاپگر بتواند آن‌را برروی پایه‌ی خود ساخته، چاپ کند؛ این امر عمدتاً در وضعیت قطعات افقی یا خوابیده رخ می‌دهد. در قطعاتی که می‌توان بدون پایه‌ی نگه‌دارنده‌ی 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 زمینه‌ی حامل این برجستگی‌ها به یک سطح افقی یا تخت نزدیک است، بهتر است تا حد امکان در وضعیت ایستاده چاپ شوند؛ چراکه نیم‌رخ لایه‌های چاپ شده در حالت افقی انحراف بیشتری از یک منحنی پیوسته از خود نشان می‌دهند. درحالی‌که در وضعیت ایستاده، این انحراف به حداقل میزان خود می‌رسد. درنهایت می‌توان به میزان توپری قطعه اشاره کرد که وابسته به میزان استقامت مورد نیاز، میزان شفافیت، و عبور نور و حساسیت قطعه، می‌توان آن‌را از ۰ تا ۱۰۰٪ توپر و یا توخالی درنظر گرفت. این امر در یک قطعه‌ی چاپ سه‌بُعدی شده بیشتر از منظر هزینه‌ی تمام شده مدنظر قرار می‌گیرد. بدین‌معنا که با افزایش توپری قطعه زمان چاپ و مصرف رشته‌ی پلیمری بالاتر خواهد رفت و این امر تأثیر مستقیمی بر هزینه‌ی چاپ سه‌بُعدی خواهد داشت. لازم به ذکر است، 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 چاپ شده را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، مدنظر قرار گرفت. به‌نحوی که چاپ با توپری ۳۰٪ شبیه‌ترین حالت نوری را نسبت به قطعه‌ی اصلی ایجاد می‌کرد که مورد انتخاب نیز قرار گرفت. با توجه به موارد فوق آزمایشات این تحقیق بر اساس جدول ۳، ساماندهی گردیده است.

▲ تصویر ۱۰. تقسیم قطعه‌ی بزرگ به دو قطعه، جهت ایجاد لبه‌ای مسطح و هم‌تراز جهت قرارگیری در دستگاه پرینتر سه‌بُعدی (نگارندگان، ۱۳۹۶).

انجام چاپ‌های متفاوت برای دستیابی به حداکثر کیفیت چاپ سه‌بُعدی با استفاده از رشته‌های پلیمری پیشنهادی، نشان داد مناسب‌ترین رشته‌ی پلیمری برای چاپ بافت مشابه نمونه‌ی مطالعاتی، رشته‌ی پلیمری ABS است که با

Archive of SID

www.SID.ir

جدول۳- مقایسه شرایط و محصولات چاپ شده با چاپگر چاپیات۲۰۲۰ از قطعات مفقود مورد مطالعه

رشته پلیمری	ضخامت لایه mm	سرعت چاپ mm/s	وضعیت چاپ	توپری قطعه ٪	ارزیابی کیفیت	تصاویر	
PLA سیاه	۱	۲۰	یک تکه	٪۲۰	نامناسب		
ABS سیاه	۱	۳۰	یک تکه	٪۲۰	نامناسب		
ABS سیاه	۱.۲	۲۰	دو تکه	٪۳۰	مناسب		

ضخامت لایه‌های µ ۱۵۰ و با سرعت mm/s ۲۰، در وضعیت قرارگیری عمودی چاپ گردید؛ همچنین برای دستیابی به حداکثر شفافیت در نمونه‌ها، چاپ آن‌ها به‌صورت ۳۰٪ میزان توپری انجام گرفت که این محصول بیشترین شباهت را با قطعه‌ی مفقود سفال در نمونه‌ی مطالعاتی این تحقیق را دارا بود.

در روند چاپ قطعات گاهی در اطراف قطعه‌ی چاپ شده به‌علت انحرافات چاپگر و لرزش‌های نازل آن و همچنین کش‌آمدن رشته‌ی پلیمری ذوب شده برروی سطوح دیگر و پیچیدگی شکل قطعه پلیسه‌هایی ایجاد می‌شود، این پلیسه‌ها عمدتاً باعث خواهد شد که قطعه سرجای خود قرار نگرفته و از این‌رو بایستی در هنگام اتصال قطعه، عملیات تکمیلی شامل سائیدن و برداشتن براده‌ها به‌نحو مقتضی صورت پذیرد. در برخی موارد که نیاز است قطعه، حالت صیقلی بیشتری داشته باشد می‌توان با پولیش دادن آن به حد صیقلی مورد نظر دست‌یافت، این امر با دقت به‌وسیله‌ی کاغذ سمباده تا جایی‌که به سطح قطعه آسیبی نرسد قابل انجام است؛ همچنین در موارد دیگر، از حلال‌های شیمیایی (مثل: بخار استن برای رشته‌های ABS و دیگر حلال‌ها برای رشته‌های PLA استفاده می‌شود). دما، گزینه دیگری است که با تجهیزاتی مانند سشوار قابل انجام است و حتی در موادی نیز می‌توان لایه‌های رنگی مات و شفافی بر روی قطعات اعمال نمود (Canessa etal., 2013). در رابطه با قطعه‌ی بازسازی شده‌ی تجربیات حاصل از پژوهش حاضر، نشان می‌دهند که در حالت ایده‌آل بهتر است قطعه‌ی چاپ شده به مقدار ۱٪ نسبت به قطعه‌ی اصلی طراحی شده کوچکتر درنظر گرفته شده و چاپ گردد؛ این پیشنهاد از آن‌روست که فضایی برای جسمیت چسب مورد استفاده در وصالی وجود داشته باشد. در همین راستا بعد از انجام عملیات مختصر تکمیلی برروی لبه‌های قطعه‌ی چاپ شده با سوهان ریز، قطعه به‌ظرف اصلی در محل بخش‌های مفقود سفال وصالی گردید (تصویر۱۱)؛ که این فرآیند با استفاده از رزین UHU 43605 انجام شد. علت استفاده از این رزین بدان سبب بود که رزین‌های معمولی همچون پارالوئید بی۷۲ که مبتنی‌بر انحلال، در حلال‌های آلی همانند گزیلن و استن هستند، به‌علت حساسیت رشته‌های پلیمری ABS به حلال‌های آلی خورده شده و احتمال ایجاد

▲ تصویر ۱۱. بازسازی بخش مفقود نمونه‌ی بعد از اتصال قطعه‌ی بازسازی شده (نگارندگان، ۱۳۹۶).

www.SID.ir

ضایعات و عدم تطابق در صورت تغییر شکل (عوجاوج) در لبه‌های قطعه‌ی چاپ شده وجود داشت.

بحث در یافته‌های تحقیق

با توجه به پیشرفت‌های قابل‌توجهی که در زمینه‌ی مدل‌سازی سریع در صنعت اتفاق افتاده و همچنین در دسترس بودن فناوری‌های سه‌بُعدی‌سازی در کشور، امروزه بستر مناسبی برای ورود این‌گونه فناوری‌ها در زمینه‌ی مطالعات میراث‌فرهنگی از قبیل: باستان‌شناسی، موزه‌داری و حفاظت آثار باستانی فراهم شده است؛ از این قبیل تکنولوژی‌ها و درواقع مهم‌ترین آن‌ها، اسکنرها و چاپگرهای سه‌بُعدی هستند. به‌نحوی که از این فناوری‌ها می‌توان در رابطه با ساخت کپیه از اشیاء و مجسمه‌ها، نقش‌برجسته‌ها و نقوش‌صخره‌ای، آثار و تزئینات ارزشمند تاریخی در ابعاد واقعی (و/یا با تغییر ابعاد) و همچنین بازسازی بخش‌های مفقود آثار تخریب شده استفاده نمود (رازانی و همکاران، ۱۳۹۵). از جمله مزیت‌های استفاده از این روش‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- کاهش تماس با اشیاء حساس و اجتناب از روش‌های معمول و زمان‌بر مرسومِ تماسی و تا حدی مخرب، همانند: فرآیند قالب‌گیری و ریخته‌گری و لایه‌برداری در بازسازی آثار باستان شناختی.
- دقت بی‌نظیر در ثبت و ضبط اجرای طرح‌ها و نقوش‌برجسته و کتیبه‌های حجاری شده و پیچیده نسبت به مقایسه با روش‌های سنتی.
- دستیابی به سطوحی با کیفیت هم‌سان و مشابه با آثار فرهنگی تاریخی جهت استفاده‌ی ترکیبی از روش‌های مدل‌سازی سه‌بُعدی.
- 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 سه‌بُعدی و تکرار آن در صورت عدم رضایت از هر بخش در کمترین زمان ممکن.
- امکان اتصال موقت قطعه‌ی ساخته شده به بدنه‌ی اصلی اثر بدون خطر ناشی از اتصال قطعه با شئ به سبب خواص خنثای آن.
- کاهش زمان در ساخت قطعات مفقود.
- امکان نمایش مجازی آثار و بازسازی مجازی بخش‌های مفقود و از دست‌رفته در قالب انواع رسانه‌های تصویری.

آن‌چنان‌که در نمونه‌ی موردی این تحقیق نیز مشهود است؛ درحال حاضر، این روش‌ها از محدودیت‌هایی برخوردارند، از آن‌جمله: تک‌رنگ بودن قطعه‌ی مدل‌سازی و چاپ شده است که با استفاده از چاپگرهایی که دارای دو یا سه کارتریج همزمان هستند می‌توان تا حدی 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، حتماً رتوش‌کاری رنگی نیاز خواهد بود.

Archive of SID

www.SID.ir

از دیگر محدودیت‌ها می‌توان به محدود بودن رشته‌های پلیمری موجود در بازار (از لحاظ رنگی و بافتی و صیقلی بودن جنس و شفافیت) نام‌برد، همچنین خطاهای ابزاری در مرحله‌ی اسکن و چاپ سه‌بُعدی در بازسازی سطوح مفقود شده را می‌توان اشاره کرد؛ که 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 موارد تشخیص فرم و جزئیات بخش مفقود اقدام بسیار دشواری خواهد بود (همان‌گونه که در نمونه‌ی مطالعاتی در این پژوهش، عدم تقارن فرمی سفال و یکسان نبودن ضخامت لبه‌ها و وسیع بودن بخش‌های مفقودی، دشواری کار تشخیص و ساخت قطعات مفقود را چند برابر کرده است)؛ به‌علاوه، انجام اقدامات تکمیلی برروی قطعه‌ی چاپ شده جهت مطابقت مناسب با بدنه‌ی اشیاء اثر نیز نیاز به مهارت دارد. در حقیقت موفقیت یک طرح بازسازی بخش مفقود با فناوری‌های نمونه‌سازی ارتباط مستقیمی با فرآیندهای؛ برداشت صحیح و دقیق شئ، طراحی و انجام عملیات تکمیلی برروی داده‌های دیجیتالی به کمک نرم‌افزار تصویری سه‌بُعدی‌سازی، انتخاب تجهیزات و مصالح مناسب، در کنار انجام تنظیمات دقیق و کنترل فرآیند چاپ سه‌بُعدی، و درنهایت عملیات وصالی و روتوش نهایی دارد. با توجه به مزیت‌ها و معایب ذکر شده، این روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی، می‌توان گفت این روش‌ها توانایی بسیار بالایی در مطالعات و پروژه‌های باستان‌شناختی به‌صورت بازسازی و بازنمایی بخش‌های مفقود سازه‌ای و تزیینی در آینده دارند.

نتیجه‌گیری

آن‌چنان‌که در متن مقاله آمده است، استفاده از فناوری‌های نمونه‌سازی سریع از جمله: اسکنر و چاپگر سه‌بُعدی برای بازسازی بخش‌های مفقود آثار سفالین و امکان‌سنجی به‌کارگیری روش‌های فوق جهت بازسازی دیگر اشیای شاخص باستان‌شناختی، از اهداف این پژوهش است. به‌طور کلی می‌توان گفت؛ پس از تهیه‌ی تصاویر اسکن سه‌بُعدی از اثر مورد مطالعه، که موجب درک شکلی بهتری از اثر خواهد شد می‌توان به‌راحتی و با دقت زیاد فایل سه‌بُعدی به‌دست آمده از اسکنر سه‌بُعدی را در سیستم رایانه، مطالعه و مورد بررسی شکلی قرار داد و به کلیه‌ی جزئیات و قسمت‌های موجود نمونه در زوایای مختلف دسترسی داشت. همچنین می‌توان با انجام بازسازی‌های شکلی براساس بخش مفقود نسبت به بازسازی دیجیتال آن اقدام نمود. دستیابی به چنین جزئیات دقیقی در صورت بازسازی بخش‌های مفقود به‌صورت دیجیتال می‌تواند تصور بهتری از قسمت‌های مفقود اثر را برای محقق به‌دنبال داشته باشد و امکان این را فراهم می‌کند تا قسمت‌های مفقودی را در محیطی مجازی و بدون هیچ تماس فیزیکی با نمونه‌ی اثر بازسازی نمود؛ به‌علاوه ساخت قطعه‌ی واقعی و جای‌گذاری آن در محل مفقودی مرحله‌ی بعدی اقدام بی‌خطر است که این‌کار به کمک چاپگر سه‌بُعدی و تکنولوژی‌هایی که خوشبختانه در کشور بومی شده است، به سادگی قابل انجام است. این سلسله فعالیت‌ها در عین ارتقاء کیفی نمایش و ادراک شکلی و سه‌بُعدی، منجر به حفاظت پایدار و غیرتماسی آثار خواهد شد.

Archive of SID

www.SID.ir

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نگارندگان از دانشگاه هنر اسلامی تبریز به‌واسطه‌ی در اختیار نهادن امکانات این تحقیق و همچنین جناب آقای دکتر اکبر عابدی جهت در اختیار نهادن سفال مطالعاتی پیش‌ازتاریخی متعلق به کاوش‌های تپه کول‌تپه‌ی هادیشهر سپاسگزاری می‌نمایند.

پی‌نوشت

1. Physical Damage
2. Superficial Disfigurement,
3. Chemical Deterioration
4. multimedia databases
5. 3D modellers
6. 3D viewers
7. Rapid Prototyping – (RP)
8. Rapid Manufacturing RM
9. Narcissus fountain of baroque sculptor Francesco Robba
10. St. Hemma from Nemški Rovt in Slovenia
11. Visualization
12. Verification
13. Iteration
14. Optimization
15. Functional Tests
16. CAD (Computer Aided Design) نرم‌افزارهای طراحی با رایانه

۱۷. فایل (Stereo Lithographic) STL فرمت استاندارد ورودی کلیه‌ی فرآیندهای نمونه‌سازی سریع می‌باشد.

18. Digitizer
19. Stereo Lithography Apparatus – (SLA)
20. Selective Laser Sintering – (SLS)
21. Layer Laminate Manufacturing – (LLM or LOM)
22. Three Dimensional Printing – (3DP)
23. Multi Jet Modeling – (MJM)
24. PolyJet
25. ThermoJet
26. Fused Deposition Modeling
27. Rexcan III
28. Solutionix

۲۹. برای کسب اطلاعات دقیق‌تر در رابطه با اسکنر سه‌بُعدی یاد شده به آدرس اینترنتی (http://psarta.com/product/rexcan4؛ آخرین دسترسی ۱۳۹۵) مراجعه شود.

30. Rhinoceros V5
31. Nurbs (Non-Uniform Rational B-Splines)
32. Robert McNeel & Associates
33. ABS)Acrylonitrile butadiene styrene(
34. PLA (PolyLactic acid or Polylactide)
35. Polycarbonate
36. High Impact Polystyrene
37. glycol-modified polyethylene terephthalate
38. Structured light

کتابنامه

- پژوهشگران صنعت آرتا، شرکت، ۱۳۹۴، Rexcan-3، تارنمای شرکت پژوهشگران صنعت آرتا- شرکت، تاریخ بروز رسانی (بی‌تا) تاریخ‌دسترسی: ۱۳۹۴/۹/۲۰: در دسترس به آدرس: http://psarta.com/product/rexcan-3).

- آذرنوش، مسعود؛ شریفی، علی؛ و هژبری علی، ۱۳۹۵، «بازنگری گاهنگاری نسبی و مطلق تپه هگمتانه، براساس یافته‌ها و نتایج آزمایش گرمالیان و رادیو کربن». *مجله‌ی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، دانشگاه بوعلی‌سینا، دوره‌ی ۶،

Archive of SID

www.SID.ir

شماره‌ی ۱۰، بهار، صص: ۱۲۱-۱۴۰.
- خلیل‌پور آذری، سامان؛ و خانجانی، علی، ۱۳۸۳، *قالب‌سازی و نمونه‌سازی سریع*. تهران: انتشارات ناقوس.
- رحمتی، صادق؛سلیمی، مجتبی؛ و ایلدارژاله، محمد، ۱۳۸۴، *فناوری نمونه‌سازی سریع*. تهران: جهان جام‌جم.
- سازمان میراث‌فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری امور پایگاه‌های میراث‌فرهنگی کشور،۱۳۹۴، اهم اقدامات انجام شده امور پایگاه‌ها: سازمان میراث‌فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری بخش امور پایگاه‌های میراث‌فرهنگی، در دسترس به آدرس: تاریخ دسترسی: ۱۳۹۴/۸/۸؛ www.omurpaygah.ichto.ir/Default.aspx?tabid=4595&language=fa-IR.
- 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.
- رازانی، مهدی؛ حدادیان، محمدعلی؛ و عباس، صفرپور، ۱۳۹۵، «استفاده از فناوری‌های نمونه‌سازی سریع در بازسازی بخش‌های مفقود آثار شیشه‌ای با رویکرد استفاده در شیشه‌های تاریخی»، *مجله مرمت و معماری ایران*، سال ۶، شماره‌ی ۱۲، پاییز و زمستان، صص: ۸۵-۱۰۱.
- عابدی، اکبر، ۱۳۹۵، «گزارش مقدماتی دومین فصل کاوش باستان‌شناختی محوطه‌ی کول‌تپه‌ی هادیشهر، شمال‌غرب ایران». *مجله علمی پژوهشی مطالعات باستان‌شناسی*، سال ۸، شماره‌ی ۱، بهار و تابستان، صص: ۹۱-۱۱۱.
- یزدانی، ملیکا؛ احمدی، حسین؛ امامی، سید محمد امین؛ لامعی رشتی، محمد؛ آقاعلی‌گل، داوود؛ عبدالله‌خان‌گرجی، مهناز؛ و چوبک، حمیده، ۱۳۹۶، «شناخت فنون ساخت و اجرای لایه زراندود در سفال مینایی، بر اساس مطالعات میکروسکوپی و منابع کهن»، *مجله‌ی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، دانشگاه بوعلی‌سینا، دوره‌ی ۷، شماره‌ی ۱۴، پاییز، صص: ۱۶۱-۱۷۸.
- نقشینه، امیرصادق؛ حاتمی، الناز؛ و نیکروان‌متین، هومن، ۱۳۹۲، «مطالعه‌ی پتروگرافی سفال عصر آهن غار هوتو»، *مجله‌ی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، دانشگاه بوعلی‌سینا، دوره‌ی ۳، شماره‌ی ۵، پاییز، صص: ۶۳-۷۸.

- Afshar, M.; Boroumand, M. & Studnicka, N., 2002, "Archaeological scanning of Persepolis. Using 3D laser scanning for mapping of ancient sites in Iran". *GIM International,* 16(6), p.12.
- Antlej, K.; Celec, K.; Sinani, M.; Mirtič, E.; Ljubič, D.; Slabe, J. & Kos, M., 2012, "Restoration of a Stemmed Fruit Bowl Using 3d Technologies". *Review of the National Center for Digitization*, (21), 141-146.
- 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.; 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* (pp. 1-4).

Archive of SID

www.SID.ir

- Bouroumand, M. & Studnicka, N., 2004, *The fusion of laser scanning and close range photogrammetry in Bam laser-photogrammetric mapping of Bam Citadel (Arg-E-Bam)/Iran.* Proceedings ISPRS Commission V.

- Buys, S., & Oakley, V., 2014, *Conservation and restoration of ceramics*. Routledge.

- 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. & Magrassi, G., 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, T*hree-Dimensional Image Capture and Applications VI, Proc.* of SPIE-IS & T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose (CA), USA.

- Di Franco, P., Camporesi, C., & Galeazzi, F., 2015, "3D Printing and Immersive Visualization for Improved Perception of Ancient Artifacts". *The Massachusetts Institute of Technology,* Vol. 24, No. 3, 243–264.

- 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.

- Oddy, W. A. (Ed.), 1992, *The art of the conservator:* Trustees of the British Museum.

- 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.

- Koob, S., 1998, "Obsolete fill materials found on ceramics". *Journal of the American Institute for Conservation,* 37(1), 49-67.

- 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, L, 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