



ارزیابی پایداری مواد مرسوم در چاپگر سه بعدی (FDM) برای کاربرد در مرمت آثار تاریخی و موزه‌داری

دوفصلنامه مطالعات موزه‌ای زرین فام
دوره ۳، شماره ۵، پاییز و زمستان ۱۴۰۴
شاپا چاپی: ۱۵۴۵-۳۱۱۶
شاپا الکترونیکی: ۱۳۲۴-۳۱۱۶

مهدی رازانی دانشیار، مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز.

جلیل اسمعیل‌نژاد تیمورآبادی دانشجوی دکترای تخصصی، مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر ایران، تهران.

سارا حسین زادگان دکترای تخصصی، دکترای شیمی تجزیه، محقق در دانشگاه علوم کاربردی فورآلبرگ، وین، اتریش.

انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

چکیده

فناوری چاپ سه بعدی به روش رسوب مذاب (FDM)، با برخورداری از دقت بالا و انعطاف پذیری، رویکردی نوین برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژهای موقت آثار تاریخی در موزه‌ها فراهم کرده است. این پژوهش با تمرکز بر چهار فیلامنت رایج در بازار ایران، شامل پلی لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی آمید (PA) و پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG)، پایداری رنگی و ساختاری آن‌ها را تحت شرایط پیرسازی تسریع شده با اشعه فرابنفش (UV) به مدت ۲۸۸ ساعت، بر اساس استاندارد ASTM D4587-11، ارزیابی کرده است. پیش از انجام آزمایش، ساختار شیمیایی پلیمرها با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) بررسی شد. نتایج رنگ‌سنجی بر اساس نظام CIE Lab* نشان داد که فیلامنت PLA کمترین میزان تغییرات رنگی و فیلامنت ABS بیشترین میزان تغییرات را نشان دادند. تحلیل طیف FTIR پس از فرایند پیرسازی، تشکیل پیک کربونیل را در نمونه‌های PLA، ABS و PETG تأیید کرد؛ با این حال، در نمونه PA چنین پیکی مشاهده نشد که می‌تواند نشان‌دهنده پایداری ساختاری بالاتر این فیلامنت در شرایط مورد بررسی باشد. بر این اساس، PLA به دلیل ثبات رنگی مناسب، برای کاربردهای موقت در موزه‌ها توصیه می‌شود، در حالی که PA، با توجه به پایداری ساختاری مطلوب، برای تولید قطعاتی که نیازمند دوام ساختاری بیشتری هستند، گزینه مناسب‌تری به شمار می‌رود. در مقابل، ABS به دلیل برخورداری از تغییرات رنگی شدید، برای کاربردهای مورد مطالعه نامناسب تشخیص داده شد. این مطالعه با پایبندی به اصول مرمت، ظرفیت بالقوه استفاده از فیلامنت‌های FDM را در حفاظت از میراث فرهنگی، مشروط بر مدیریت مؤثر شرایط محیطی، مورد توجه قرار می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فیلامنت پلی آمید (PA) به دلیل پایداری ساختاری نسبی و فیلامنت PLA به دلیل کمترین میزان تغییرات رنگی، گزینه‌های بهینه‌تری برای بازسازی قطعات مفقود یا ساخت حمایت‌های موقت برای اشیای موزه‌ای محسوب می‌شوند.

واژگان کلیدی: فیلامنت، چاپگر سه بعدی FDM، حفاظت-مرمت، اشعه فرابنفش UV، رنگ سنجی.

استناد: رازانی، مهدی، اسمعیل‌نژاد تیمورآبادی، جلیل، حسین‌زادگان، سارا (۱۴۰۴). ارزیابی پایداری مواد مرسوم در چاپگر سه بعدی (FDM) برای کاربرد در مرمت آثار تاریخی و موزه‌داری. *مطالعات موزه‌ای زرین فام*، ۳(۵)، ۶۳-۸۱.
<https://doi.org/10.30481/museum.2026.574239.1077>

© ۱۴۰۴/۲۰۲۶ نویسنده(گان). این مقاله یک اثر دسترسی آزاد است که تحت مجوز CC BY 4.0 منتشر شده است. استناد و انتشار مجدد این اثر با ذکر منبع درست مجاز است.

۱. مقدمه

حفاظت و مرمت آثار تاریخی، به عنوان یکی از ارکان اساسی صیانت از میراث فرهنگی، با چالش‌هایی همچون پیچیدگی‌های فنی، محدودیت منابع مادی و الزامات اخلاقی مواجه است. اصول و مبانی حفاظت و مرمت، چارچوبی علمی برای فعالیت در این حوزه فراهم می‌کنند که مؤلفه‌هایی همچون حداقل مداخله، به منظور کاهش تأثیرات بر اثر اصلی؛ قابلیت بازگشت‌پذیری، به منظور امکان حذف مواد افزوده شده بدون ایجاد آسیب به اثر؛ تمایزپذیری، به منظور متمایز بودن مواد و بخش‌های مرمتی از اجزای اصیل اثر؛ و مستندسازی کامل تمامی مراحل و فرایندهای مداخله را دربرمی‌گیرد (ICOMOS, 1964; UNESCO, 1994; ICOM-CC, 2014).

فناوری چاپ سه‌بعدی به روش رسوب مذاب (FDM)، با برخورداری از دقت بالا، انعطاف‌پذیری در طراحی و کاهش تماس مستقیم با اثر، راهکاری نوآورانه برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژهای موقت در موزه‌ها فراهم کرده است (Gebhardt, 2012). افزون بر این، این فناوری در طراحی و تولید ابزارهای حفاظتی، از جمله پایه‌های تعادل‌بخش برای اشیای ناپایدار، نیز نقش مؤثری ایفا کرده است (رازانی و همکاران، ۱۴۰۳).

پژوهش‌های پیشین، کاربردهای متنوع فناوری چاپ سه‌بعدی در حوزه حفاظت و مرمت را به خوبی نشان داده‌اند. برای نمونه، رازانی و همکاران (Razani et al., 2016; Razani et al., 2018) با استفاده از چاپگر FDM و فیلامنت ABS، به بازسازی بخش‌های مفقود سفال‌های باستانی و اشیای شیشه‌ای پرداختند. همچنین، رازانی و اسمعیل‌نژاد تیمورآبادی (۱۴۰۰) با بهره‌گیری از تکنیک استریولیتوگرافی (SLA)، به ساخت مولاژهایی از اشیای عاجی اقدام کردند. در پژوهشی دیگر، همین پژوهشگران از فناوری FDM و فیلامنت PLA برای بازسازی اشیای عاجی استفاده کردند (Esmaeilnezhad Teymourabadi & Razani, 2023). با وجود این پیشرفت‌ها، داده‌ها و شواهد کافی درباره پایداری فیلامنت‌های FDM، شامل PLA، ABS، PA و PETG، در برابر تابش فرابنفش (UV)، که یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر مواد پلیمری در محیط‌های موزه‌ای به شمار می‌رود، همچنان محدود است. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعات جامع‌تر در زمینه ارزیابی رفتار و پایداری این مواد را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

تابش فرابنفش (UV) می‌تواند از طریق ایجاد تخریب نوری، موجب تغییرات رنگی و کاهش خواص مکانیکی مواد پلیمری شود و از این منظر، چالش‌های قابل توجهی را برای کاربرد این مواد در فرایند حفاظت و مرمت آثار فرهنگی ایجاد کند (Sedlak et al., 2023; Koçar et al., 2024). در این پژوهش، پایداری رنگی و ساختاری چهار فیلامنت رایج در چاپ سه‌بعدی به روش FDM، شامل PLA، ABS، PA و PETG، تحت شرایط پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت و مطابق با استاندارد ASTM D4587-11 مورد ارزیابی قرار گرفت (ASTM International, 2011). هدف از این مطالعه، شناسایی فیلامنتی با بیشترین میزان سازگاری برای کاربردهای مرمتی، به گونه‌ای بود که ضمن بهره‌گیری از قابلیت‌های فناوری چاپ سه‌بعدی، احتمال آسیب به آثار اصلی به حداقل برسد. بر این اساس، پژوهش حاضر با تأکید بر رعایت اصول حفاظت و مرمت، گامی در جهت تلفیق فناوری نوین چاپ سه‌بعدی با رویکردهای پایدار در حفاظت از میراث فرهنگی به شمار می‌رود.



۲. روش پژوهش

این پژوهش با رویکردی تجربی - تحلیلی و در چارچوب اصول حفاظت و مرمت، با تأکید بر حداقل مداخله و قابلیت بازگشت‌پذیری، طراحی و اجرا شده است. فرایند تحقیق در سه فاز اصلی سازمان‌دهی شد: (۱) شناسایی و بررسی مواد پایه مورد استفاده در بازسازی؛ (۲) اعمال فرایند پیرسازی تسریع‌شده با هدف ردیابی روند و سیر تخریب؛ و (۳) تحلیل تطبیقی - زمانی فرایند تغییرات با استفاده از داده‌های پسین و نمونه‌های شاهد. تحلیل داده‌ها با رویکردی مقایسه‌ای - تشریحی انجام گرفت و نتایج بر اساس دو معیار اصلی، شامل پایداری رنگی و پایداری ساختاری، طبقه‌بندی شد؛ به گونه‌ای که نتایج حاصل بتواند مستقیماً مبنای اولویت‌بندی عملی مواد و گزینه‌های مناسب برای مرمتگران قرار گیرد.

۳. به کارگیری چاپگرهای سه‌بعدی در بازسازی بخش‌های مفقود

فناوری چاپ سه‌بعدی به عنوان یکی از روش‌های نوین ساخت و تولید، با موفقیت در صنایعی همچون هوافضا و پزشکی به کار گرفته شده و در تولید قطعات و اجزای مورد نیاز، کاربرد گسترده‌ای یافته است. این فناوری به تدریج به حوزه‌های هنر، معماری و میراث فرهنگی نیز راه یافته و به منظور بازسازی و نمونه‌سازی سریع مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون روش‌های متعددی در زمینه نمونه‌سازی سریع توسعه یافته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استریولیتوگرافی (SLA)، تف‌جوشی انتخابی لیزری (SLS)، ساخت لایه‌ای (LLM)، چاپ سه‌بعدی (DP3)، پاشش مواد چندگانه (MJM)، پاشش مواد متعدد (PolyJet)، روش ترموجت (TJ) و رسوب مذاب (FDM) اشاره کرد. ویژگی‌ها، مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه معایب و مزیت‌های روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی سریع (رازانی و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۳۹۸)

روش	شیوه کار	معایب	مزیت
استریولیتوگرافی (SLA)	استفاده از تابش اشعه (گاما) بر رزین مایع حساس به نور برای تشکیل لایه‌ها	نیاز به تکیه گاه، محدودیت رزین، هزینه بالای چاپ	بالاترین کیفیت قطعه، دقت بالا، حجم ساخت متنوع، دامنه وسیع کاربرد
تف‌جوشی انتخابی لیزری (SLS)	پخش لایه پودر و اسکن لیزری برای تف‌جوشی ذرات پودر	ابعاد بزرگ دستگاه، پرداخت سطح ضعیف	دامنه وسیع مواد، پایداری قطعات، عدم نیاز به تکیه گاه
ساخت لایه‌ای (LLM)	برش لایه‌ها با پرتوی لیزری و اتصال آن‌ها با چسب و حرارت	نیاز به اپراتور ماهر، زمان‌بر بودن جداسازی مواد اضافی	گستره وسیع مواد (کاغذ، پلاستیک، فلز، کامپوزیت)، عدم نیاز به تکیه گاه و پخت نهایی
پاشش مواد چندگانه (MJM)	پاشش ترموپلیمر و فتوپلیمر توسط جت‌ها برای ایجاد لایه‌ها و تکیه گاه	حجم ساخت کوچک، محدودیت مواد، دقت پایین	کارآمدی، صرفه اقتصادی، سرعت بالا، مناسب برای محیط‌های اداری
پاشش مواد متعدد (PolyJet)	پاشش رزین فتوپلیمر و جامدسازی با نور UV، همراه با ساخت تکیه گاه	نیاز به تکیه گاه، سختی جداسازی تکیه گاه، خواص مکانیکی متوسط	ضخامت لایه نازک (۱۶ میکرومتر)، صافی سطح عالی، سرعت بالا، امکان استفاده از مواد شفاف

تر موجت (TJ)	چاپ لایه لایه موم مذاب، سردسازی و فرزکاری برای تنظیم ضخامت	استحکام ضعیف قطعات، ناپایداری در برابر حرارت، سرعت پایین	مناسب برای ریخته گری دقیق، صافی سطح مناسب، ابعاد دستگاه مناسب محیط اداری
چاپ سه بعدی (3DP)	لایه گذاری پودر و تزریق چسب مایع برای اتصال ذرات	محدودیت استحکام، صافی سطح نامناسب	سرعت و کیفیت بالا، هزینه پایین، کاربرد چندگانه، سادگی فرآیند
رسوب مذاب (FDM)	اکستروژن مواد ترموپلاستیک از نازل گرم و لایه گذاری	دقت محدود، انقباض غیرقابل پیش بینی	سادگی، حداقل اتلاف مواد، جداسازی آسان تکیه گاه، ساخت قطعات عملکردی

با توجه به ویژگی های روش های معرفی شده در جدول ۱، در پژوهش حاضر روش رسوب مذاب (FDM) به دلیل مزایایی همچون سادگی فرایند، دسترسی گسترده به مواد اولیه و کاربرد وسیع آن در سطح جهانی، به عنوان روش اصلی انتخاب شد. این فناوری از متداول ترین روش های چاپ سه بعدی در جهان به شمار می رود و امکان تولید قطعاتی با عملکرد مشابه نمونه های اصلی را فراهم می کند.

۴. مواد و روش ها

۴-۱. مواد مورد استفاده در چاپگرهای سه بعدی به روش FDM

فیلامنت ها، به عنوان مواد مصرفی چاپگرهای سه بعدی مبتنی بر روش رسوب مذاب (FDM)، از رشته های پلیمری تشکیل شده اند. این مواد در انواع گوناگونی تولید و عرضه می شوند که از پرکاربردترین آن ها می توان به پلی لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) و پلی آمید (PA) اشاره کرد. ویژگی های این فیلامنت ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مواد مورد استفاده در مرمت آثار تاریخی-فرهنگی

ماده	فرمول شیمیایی	خواص
پلی لاکتیک اسید (PLA)	$(C_3H_4O_2)_n$	پلی لاکتیک اسید (PLA) یک پلیمر خطی و زیست تخریب پذیر است که از واحدهای تکرارشونده اسید لاکتیک تشکیل شده است. این فیلامنت در فرایند چاپ سه بعدی، به دلیل برخورداری از سطحی صاف، دقت بالا و مقاومت مکانیکی مناسب، برای تولید مدل های دقیق و نمونه سازی سریع کاربرد گسترده ای دارد. PLA از مقاومت شیمیایی مناسبی برخوردار است؛ با این حال، نسبت به رطوبت حساس بوده و مقاومت آن در دماهای بالا کاهش می یابد. انعطاف پذیری کم، استحکام و دوام نسبتاً بالا، قابلیت مناسب سماده زنی و هزینه اقتصادی از دیگر ویژگی های این فیلامنت به شمار می روند که آن را برای کاربردهای موقت و نمونه سازی در حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی مناسب می سازند. دمای اکستروژن و صفحه گرم نیز بر اساس محدوده های توصیه شده در منابع مروری تنظیم می شود (Shanmugam et al., 2024; Fontana et al., 2025).

اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) یک ترموپلاستیک است که از پلیمریزاسیون سه مونومر استایرن، اکریلونیتریل و بوتادین تولید می‌شود و به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و حرارتی مطلوب، در فرایند چاپ سه‌بعدی کاربرد گسترده‌ای دارد. این فیلامنت معمولاً به رنگ بژ شیرین عرضه می‌شود ABS. از انعطاف‌پذیری مناسب، مقاومت مطلوب در برابر سایش و ضربه، استحکام بالا و پایداری حرارتی قابل توجه برخوردار است و از این رو، برای تولید قطعاتی که به مقاومت مکانیکی بالا نیاز دارند، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود. دمای اکستروژن و دمای صفحه گرم نیز در محدوده‌های توصیه‌شده تنظیم می‌شوند (Ahn et al., 2002; Tymrak et al., 2014).	اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)	$(C_8H_8)_m - (C_4H_6)_n - (C_3H_3N)_p$
پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) یک ترموپلاستیک از خانواده پلی‌استرهاست که می‌تواند ساختاری آمورف یا نیمه‌بلوری داشته باشد. این فیلامنت به دلیل شفافیت، استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب، در فرایند چاپ سه‌بعدی کاربرد دارد و برخلاف برخی پلیمرها، هنگام چاپ تمایل کمتری به تاب‌خوردگی از خود نشان می‌دهد PETG. همچنین از مقاومت مطلوبی در برابر رطوبت، مواد شیمیایی، اسیدها و قلیاها برخوردار است و دارای ضریب اصطکاک پایینی است. دمای اکستروژن و نیاز به استفاده از صفحه گرم نیز در محدوده‌های توصیه‌شده تنظیم می‌شوند (Tymrak et al., 2014; Algarni & Ghazali, 2021).	پلی‌اتیلن تری‌فتالات گلیکول (PETG)	$(C_{10}H_8O_4)_n$
پلی‌آمید (PA)، یا نایلون، یک ترموپلاستیک مهندسی است که از استحکام مکانیکی بالا، انعطاف‌پذیری مناسب و دوام مطلوب در بلندمدت برخوردار است. این ماده در برابر سایش، ضربه، تابش فرابنفش (UV) و بسیاری از مواد شیمیایی مقاومت مناسبی دارد و از این رو، برای تولید قطعات عملکردی با استفاده از چاپ سه‌بعدی مناسب است. با این حال، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های PA، جذب بالای رطوبت است که می‌تواند موجب تغییر در خواص مکانیکی و ابعادی قطعات شود. همچنین، به دلیل میزان انقباض نسبتاً بالا در فرایند چاپ، احتمال تاب‌خوردگی قطعات وجود دارد و استفاده از صفحه گرم و فراهم کردن شرایط محیطی کنترل‌شده را ضروری می‌سازد. دمای اکستروژن و دمای صفحه گرم نیز در محدوده‌های توصیه‌شده تنظیم می‌شوند (Wang et al., 2017).	پلی‌آمید، نایلون (PA)	نایلون ۶: $(-NH-(CH_2)_5-CO-)_n$ نایلون ۶/۶: $(-NH-(CH_2)_6-NH-CO-(CH_2)_4-CO-)_n$

۲-۴. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

به‌منظور شناسایی و تحلیل ساختار شیمیایی فیلامنت‌های پلیمری، از دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) مدل FT-IR-680Plus ساخت شرکت Jasco (ژاپن)، مجهز به نرم‌افزار Spectra Manager نسخه ۱/۵۳/۰۱، در آزمایشگاه هنر اسلامی تبریز استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از روش پودرکردن و تهیه قرص از مخلوط پودر فیلامنت و پتاسیم برومید (KBr) با نسبت استاندارد ۱:۱۰۰ آماده‌سازی شدند. این روش آماده‌سازی نمونه برای انجام تحلیل FTIR در مطالعات مختلف نیز گزارش شده است (Finnegan et al., 2022). طیف‌های نمونه‌ها در محدوده 4000 تا 400 cm^{-1} و با تفکیک‌پذیری 4 cm^{-1} ثبت شدند تا تغییرات ساختاری ناشی از فرایند پیرسازی شناسایی و ارزیابی شوند.

۳-۴. رنگ سنجی

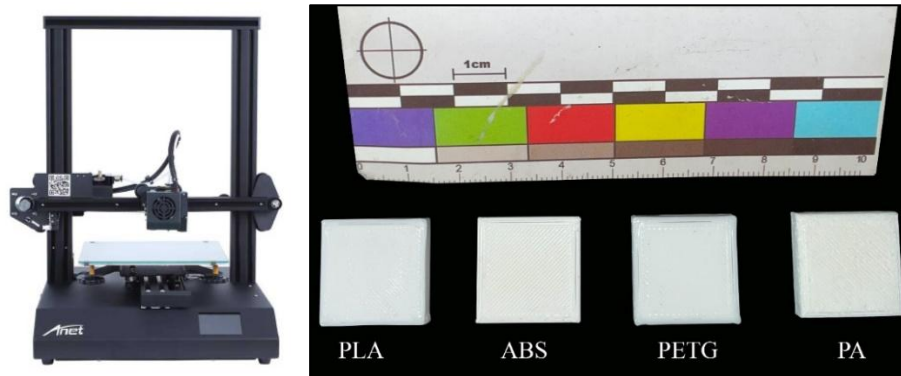
ارزیابی تغییرات بصری نمونه‌های پلیمری در فرایند پیرسازی تسریع شده، مستلزم تحلیل دقیق ویژگی‌های رنگی آن‌ها است. در پژوهش حاضر، از نظام رنگی CIE Lab* استفاده شد که در آن L^* در بازه ۰ تا ۱۰۰، بیانگر میزان روشنایی است؛ به‌طوری‌که مقدار ۰ نشان‌دهنده تیرگی و مقدار ۱۰۰ نشان‌دهنده روشنایی است. همچنین، مؤلفه a^* مقادیر مثبت را برای قرمزی و مقادیر منفی را برای سبزی، و مؤلفه b^* مقادیر مثبت را برای زردی و مقادیر منفی را برای آبی نشان می‌دهد (Vouvoudi et al., 2022). اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه رنگ سنج Precision Computer Colorimeter 3nh مدل ۵۵۵ در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام گرفت. داده‌های رنگی از سطح نمونه‌ها جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار CQCS3 تحلیل شدند. اختلاف کلی رنگ (ΔE) نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

معادله ۱

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]}$$

۴-۴. نمونه‌سازی

نور یکی از عوامل اصلی تسریع‌کننده فرایند پیرسازی پلیمرها به شمار می‌رود. از این‌رو، انتخاب ماده‌ای با کمترین میزان حساسیت در برابر نور، برای استفاده در بازسازی آثار تاریخی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر، چهار نوع فیلامنت شامل پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی‌آمید (PA) و پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG)، همگی به رنگ سفید و با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر، مورد استفاده قرار گرفتند. این فیلامنت‌ها، تولید شرکت Y.S (چین)، از بازار کنونی تبریز تهیه شدند. نمونه‌هایی با ابعاد ۲ × ۲ × ۰/۵ سانتی‌متر با استفاده از چاپگر سه‌بعدی مدل Anet ET5 Pro (۲۰۲۰، ساخت چین، تولید شدند (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۱. نمونه‌های آماده شده جهت پیرسازی
شکل ۲. چاپگر سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفته

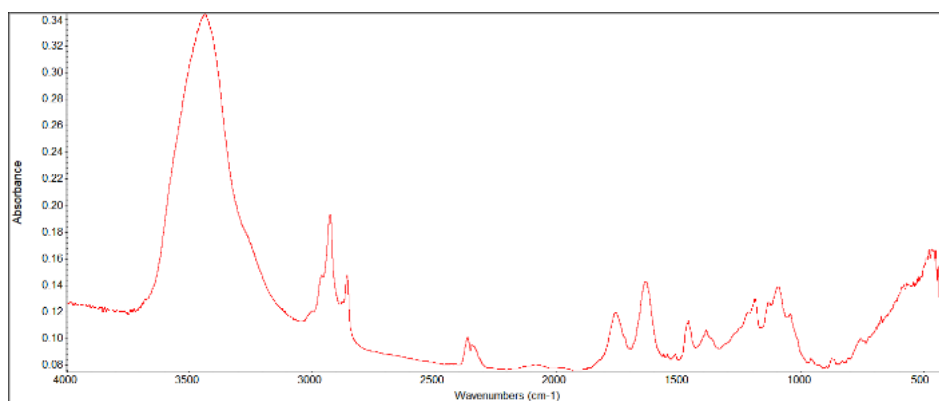
بخشی از نمونه‌ها به‌عنوان نمونه‌های شاهد و بخش دیگر به‌منظور انجام فرایند پیرسازی تسریع شده در نظر گرفته شدند. فرایند پیرسازی با هدف ارزیابی تغییرات رنگی و تخریب ساختاری نمونه‌ها، پیش و پس از قرارگیری در معرض تابش نور، انجام گرفت. این فرایند بر اساس استاندارد ASTM D4587-11 طراحی شد که مدت زمان توصیه شده برای انجام آزمون در آن ۱۰۰۰ ساعت است (ASTM International, 2011). با این حال، در پژوهش حاضر، نمونه‌ها به مدت ۲۸۸ ساعت تحت تابش UV قرار گرفتند و نمونه‌برداری در فواصل زمانی ۷۲ ساعته انجام شد. این مدت زمان برای آشکارسازی تغییرات ساختاری و رنگی

فیلامنت‌ها و فراهم کردن امکان ارزیابی روند پیرسازی کفایت داشت. لازم به ذکر است که افزایش مدت زمان آزمایش و انطباق کامل با زمان تعیین شده در استاندارد می‌تواند به بروز تغییرات بیشتری در نمونه‌ها منجر شود؛ با این حال، داده‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه برای مقایسه فیلامنت‌ها و شناسایی مواد مناسب برای کاربردهای موقت در حفاظت از میراث فرهنگی معتبر و قابل استفاده هستند. همچنین، سایر شرایط آزمایش شامل تابش UV-A در محدوده دمایی ۱۸ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد، فاصله ۱۵ سانتی‌متری نمونه‌ها از لامپ و رطوبت نسبی ۵۰ درصد بود.

۵. نتایج و بحث در یافته‌ها

۵-۱. ساختارشناسی فیلامنت PLA

تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید (PLA) نشان داد که پیک در 3434 cm^{-1} ناشی از ارتعاش کششی گروه اکسیژن-هیدروژن (O-H) است (M. Snyder et al., 2017). پیک‌های 2921 cm^{-1} و 2853 cm^{-1} نیز، به ترتیب، به ارتعاشات کششی گروه‌های کربن-هیدروژن (C-H) آلکانی موجود در زنجیره کربنی پلیمر نسبت داده می‌شوند (Riba et al., 2018). پیک مشاهده‌شده در 1757 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاش گروه کربونیل (C=O) لاکتونی است (Gonçalves et al., 2010). همچنین، پیک‌های 1384 cm^{-1} و 1467 cm^{-1} با تغییر شکل پیوندهای متیل و پیک‌های 1088 cm^{-1} و 1186 cm^{-1} با ارتعاشات کششی پیوند کربن-اکسیژن (C-O) مرتبط هستند (Leonés et al., 2020). پیک مشخصه در 871 cm^{-1} نیز به ارتعاش C-COO مربوط می‌شود (شکل ۳). مجموع این پیک‌ها، ساختار شیمیایی PLA موجود در فیلامنت‌های تهیه‌شده از بازار ایران را تأیید می‌کند و با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد.

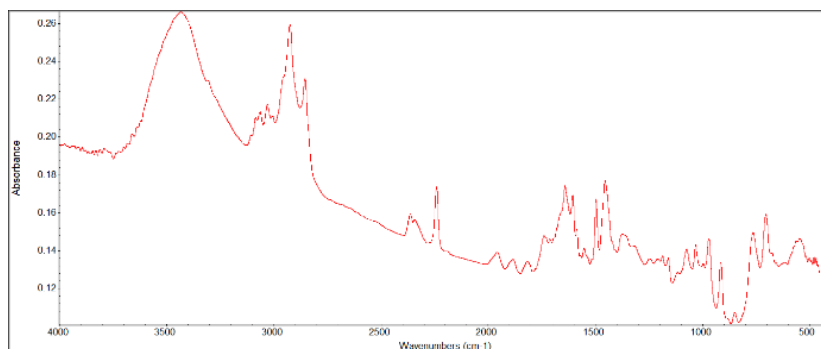


شکل ۳. طیف FTIR قبل از پیرسازی مربوط به فیلامنت PLA

۵-۲. ساختارشناسی فیلامنت ABS

تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) نشان داد که پیک در 3431 cm^{-1} ناشی از ارتعاش کششی گروه نیتروژن-هیدروژن (N-H) است (Mohammed et al., 2019). پیک‌های 2922 cm^{-1} و 2852 cm^{-1} نیز، به ترتیب، به ارتعاشات کششی گروه‌های کربن-هیدروژن (C-H) آلکانی موجود در زنجیره کربنی پلیمر مربوط می‌شوند (Mohammed et al., 2019؛ Pop et al., 2018). پیک ضعیف مشاهده‌شده در 2237 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاش کششی پیوند نیتریلی (C≡N) است (Harris et al., 2019). همچنین، پیک‌های 1954 cm^{-1} ، 1882 cm^{-1} و 1814 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی اورتون

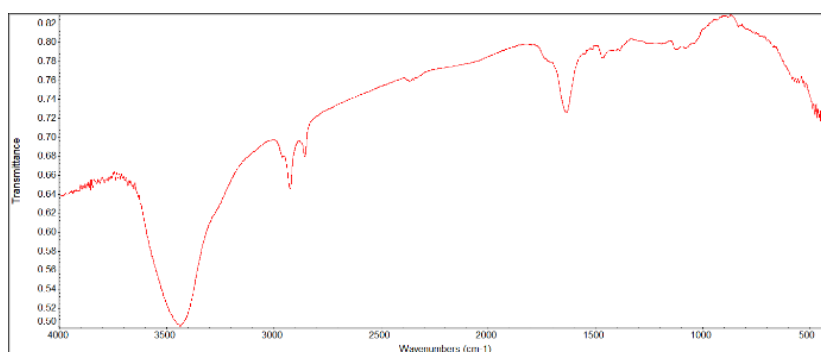
پیوندهای کربن - هیدروژن در حلقه آروماتیک نسبت داده می‌شوند (Mohammed et al., 2019). ارتعاشات مربوط به پیوند دوگانه کربن - کربن (C=C) مزدوج در حلقه‌های آروماتیک نیز موجب ایجاد پیک‌های 1638 cm^{-1} و 1602 cm^{-1} شده‌اند (Pop et al., 2018; Mohammed et al., 2019). پیک مشاهده‌شده در 1462 cm^{-1} به ارتعاش خمشی پیوند کربن - هیدروژن آلکانی مربوط است (Pop et al., 2018). در نهایت، پیک‌های 760 cm^{-1} و 700 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی پیوندهای کربن - هیدروژن آروماتیک استخلاف‌شده نسبت داده می‌شوند (Mohammed et al., 2019) (شکل ۴). مجموع این نتایج، ساختار شیمیایی ABS موجود در فیلامنت‌های تهیه‌شده از بازار ایران را تأیید می‌کند و با داده‌های گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد.



شکل ۴. طیف FTIR قبل از پیرسازی مربوط به فیلامنت ABS

۳-۵. ساختارشناسی فیلامنت PA

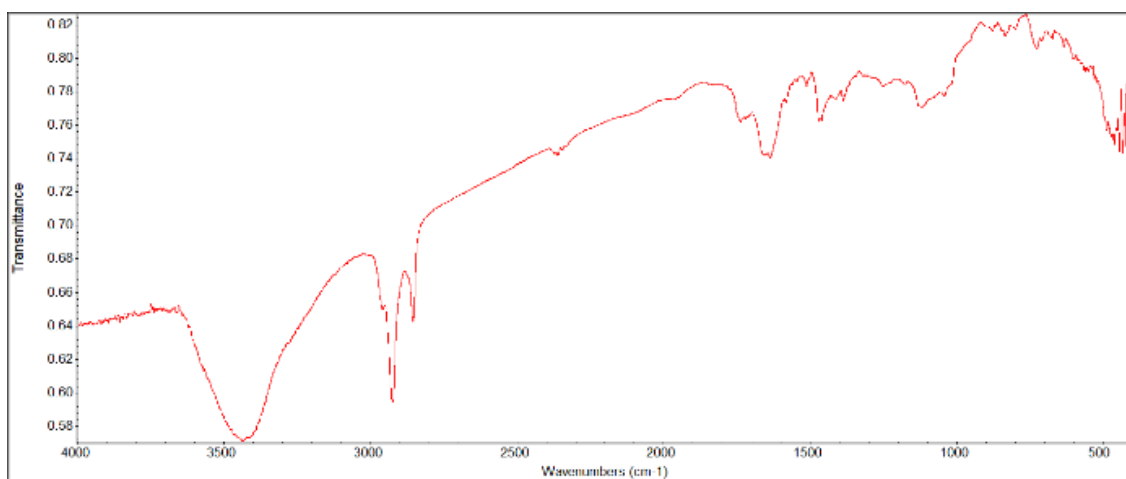
تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی‌آمید (PA) نشان داد که پیک در 3434 cm^{-1} ناشی از ارتعاش کششی گروه نیتروژن - هیدروژن (N-H) است (Derrick et al., 1999). ارتعاشات کششی گروه‌های کربن - هیدروژن (C-H) آلکانی نیز به صورت پیک‌هایی با شدت متوسط و ضعیف در 2921 cm^{-1} و 2853 cm^{-1} مشاهده شدند. باند با شدت متوسط در 1631 cm^{-1} به ارتعاش کششی گروه کربونیل (C=O)، موسوم به باند آمید، مربوط است (Khorih et al., 2020). همچنین، پیک ضعیف در 1465 cm^{-1} ناشی از ارتعاش خمشی پیوند کربن - هیدروژن آلکانی است (Kang et al., 2012) (شکل ۵). مجموع این پیک‌ها، ساختار شیمیایی PA موجود در فیلامنت‌های تهیه‌شده از بازار ایران را تأیید می‌کند و با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین همخوانی دارد.



شکل ۵. طیف FTIR قبل از پیرسازی مربوط به فیلامنت PA

۴-۵. ساختارشناسی فیلامنت PETG

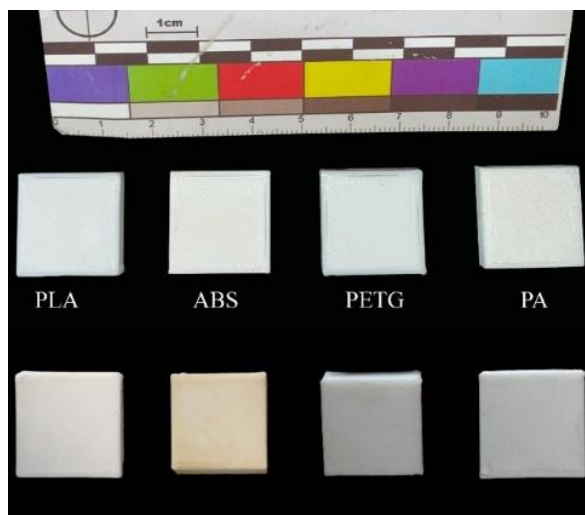
تحلیل طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) نشان داد که پیک در cm^{-1} ۳۴۳۴ ناشی از ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل (O-H) است. ارتعاشات کششی گروه‌های کربن - هیدروژن (C-H) آلکانی نیز به صورت پیک‌هایی با شدت متوسط و ضعیف در cm^{-1} ۲۹۲۲ و ۲۸۵۲ مشاهده شدند (Kasmi et al., 2021). پیک با شدت متوسط در cm^{-1} ۱۶۳۴ به ارتعاش کششی پیوند دوگانه کربن - کربن (C=C) مربوط است. پیک ضعیف در cm^{-1} ۱۴۶۵ ناشی از ارتعاش خمشی پیوند کربن - هیدروژن آلکانی است. همچنین، ارتعاش کششی پیوند کربن - اکسیژن (C-O) در ساختار استر، پیکی را در cm^{-1} ۱۱۱۴ ایجاد کرده است. افزون بر این، پیک‌های مشخصه در cm^{-1} ۸۳۱ و ۷۲۳ به ارتعاشات خارج از صفحه (out-of-plane) پیوندهای کربن - هیدروژن در حلقه آروماتیک نسبت داده می‌شوند (Seno Flores et al., 2024) (شکل ۶). مجموع این نتایج، ساختار شیمیایی PETG موجود در فیلامنت‌های تهیه شده از بازار ایران را تأیید می‌کند و با گزارش‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد.



شکل ۶. طیف FTIR قبل از پیرسازی مربوط به فیلامنت PETG

۴-۵. ارزیابی تغییرات رنگی در فرآیند پیرسازی

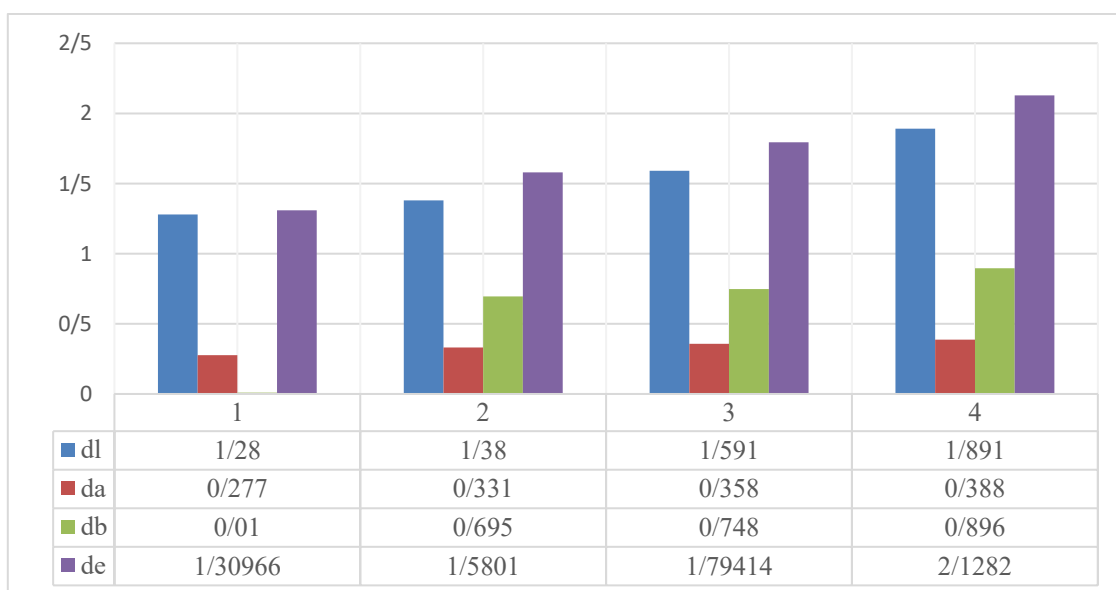
نمونه‌هایی از فیلامنت‌های پلی لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی آمید (PA) و پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG)، با ابعاد $2 \times 2 \times 0.5$ سانتی متر، با استفاده از چاپگر سه بعدی تولید شدند. تغییرات رنگی این نمونه‌ها پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. اندازه گیری‌های رنگ سنجی در فواصل زمانی ۷۲ ساعته و در مجموع در ۴ مرحله انجام شد و داده‌های حاصل ثبت گردیدند. نتایج نشان داد که فیلامنت ABS بیشترین میزان تغییرات رنگی را در محور b^* (زردی) با مقدار $\Delta b^* = 21.5$ نشان داد که بیانگر گرایش نمونه به سمت زردی است. در مقابل، فیلامنت PLA کمترین میزان تغییرات رنگی را به خود اختصاص داد و مقدار $\Delta a^* = 0.4$ را در محور a^* (قرمزی/سبزی) نشان داد. تغییرات رنگی نمونه‌ها به صورت بصری در شکل ۷ ارائه شده است. در ادامه، تحلیل تفصیلی داده‌های رنگ سنجی مربوط به هر یک از نمونه‌ها ارائه خواهد شد.



شکل ۷. اختلاف رنگی نمونه‌های فیلامنت قبل و بعد از پیرسازی

۵-۶. تغییرات رنگی نمونه فیلامنت پلی لاکتیک اسید (PLA)

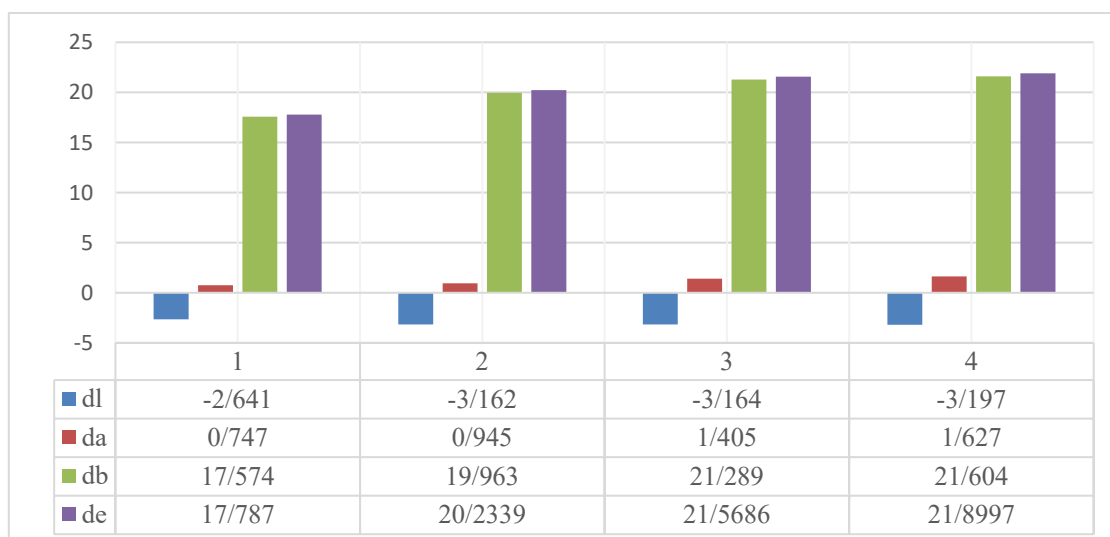
تغییرات رنگی فیلامنت پلی لاکتیک اسید (PLA) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از رنگ سنجی بر اساس سیستم CIE Lab* نشان داد که بیشترین میزان تغییر در محور L^* (روشنایی) با مقدار $\Delta L^* = 1.9$ رخ داده است که بیانگر گرایش نمونه به سمت سفیدی است. تغییرات ایجاد شده در محورهای b^* (زردی) و a^* (قرمزی/سبزی) نیز به ترتیب با مقادیر $\Delta b^* = 0.9$ و $\Delta a^* = 0.4$ ثبت شدند که نشان‌دهنده تمایل اندک نمونه به سمت زردی و قرمزی است. اختلاف کلی رنگ (ΔE) پس از ۲۸۸ ساعت فرایند پیرسازی برابر با ۲/۱۲ محاسبه شد که بیانگر پایداری رنگی قابل توجه این فیلامنت است. با توجه به محدود بودن تغییرات رنگی، فیلامنت PLA از منظر ثبات رنگی، گزینه‌ای مناسب برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژ به شمار می‌رود.



شکل ۸. اختلاف رنگی نمونه فیلامنت PLA قبل و بعد از پیرسازی به مدت ۲۸۸ ساعت و طی ۴ مرحله بر اساس ΔL^* ، Δa^* ، Δb^* و ΔE

۵-۷. تغییرات رنگی فیلامنت اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)

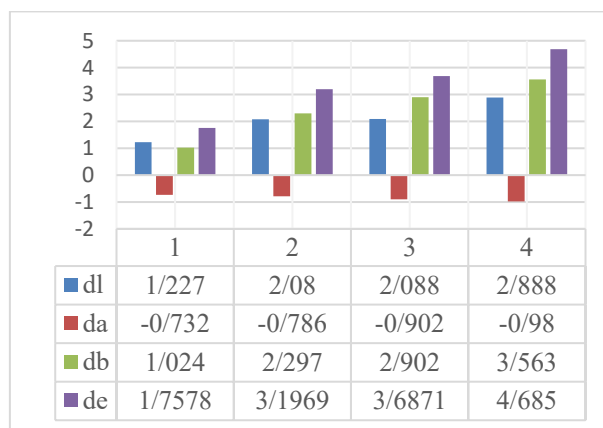
تغییرات رنگی فیلامنت اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت در شکل ۹ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از رنگ سنجی بر اساس سیستم CIE Lab* نشان داد که بیشترین میزان تغییر در محور b^* (زردی) رخ داده است؛ به گونه ای که نمونه از ابتدای قرارگیری در معرض تابش UV، گرایش محسوسی به سمت زردی نشان داد. این تغییر پس از ۷۲ ساعت به $\Delta b^* = 17.6$ و پس از ۲۸۸ ساعت به $\Delta b^* = 21.6$ افزایش یافت. در محور L^* (روشنایی) نیز اختلاف رنگی با مقدار $\Delta L^* = -3.2$ مشاهده شد که بیانگر گرایش نمونه به سمت تیرگی است. همچنین، در محور a^* (قرمزی/سبزی)، مقدار $\Delta a^* = 1.6$ پس از ۲۸۸ ساعت ثبت شد که نشان دهنده تمایل اندک نمونه به سمت قرمزی است. اختلاف کلی رنگ (ΔE) پس از ۲۸۸ ساعت فرایند پیرسازی حدود ۲۲ محاسبه شد که حاکی از ناپایداری رنگی قابل توجه این فیلامنت است. بر این اساس، فیلامنت ABS به دلیل شدت تغییرات رنگی، برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژ مناسب تشخیص داده نشد و استفاده از آن در این کاربردها توصیه نمی شود.



شکل ۹. اختلاف رنگی نمونه فیلامنت ABS قبل و بعد از پیرسازی به مدت ۲۸۸ ساعت و طی ۴ مرحله بر اساس ΔL^* ، Δa^* ، Δb^* و ΔE

۵-۸. تغییرات رنگی فیلامنت پلی آمید (PA)

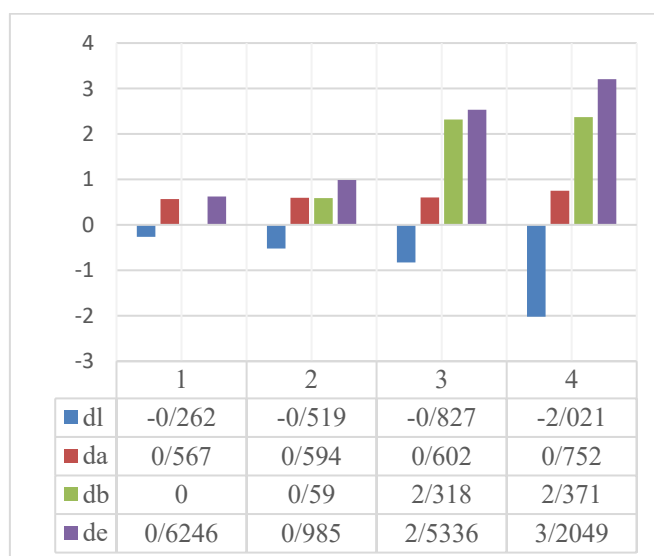
تغییرات رنگی فیلامنت پلی آمید (PA) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از رنگ سنجی بر اساس سیستم CIE Lab* نشان داد که بیشترین میزان تغییر در محور b^* (زردی) با مقدار $\Delta b^* = 3.5$ رخ داده است که بیانگر گرایش فزاینده نمونه به سمت زردی در طول دوره پیرسازی است. در محور L^* (روشنایی)، مقدار $\Delta L^* = 2.9$ ثبت شد که نشان دهنده تمایل نمونه به سمت سفیدی و افزایش روشنایی است. همچنین، در محور a^* (قرمزی/سبزی)، مقدار $\Delta a^* = -1.0$ پس از ۲۸۸ ساعت مشاهده شد که حاکی از گرایش اندک نمونه به سمت سبزی است. اختلاف کلی رنگ (ΔE) پس از ۲۸۸ ساعت فرایند پیرسازی برابر با ۴/۶۸ محاسبه شد که نشان دهنده پایداری رنگی نسبتاً محدود این فیلامنت است. بر این اساس، فیلامنت PA با توجه به میزان تغییرات رنگی مشاهده شده، برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژ مناسب تشخیص داده نشد و استفاده از آن در این کاربردها توصیه نمی شود.



شکل ۱۰. اختلاف رنگی نمونه فیلامنت PA قبل و بعد از پیرسازی به مدت ۲۸۸ ساعت و طی ۴ مرحله بر اساس ΔE و Δb^* , Δa^* , ΔL^*

۵-۹. تغییرات رنگی فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG)

تغییرات رنگی فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از رنگ سنجی بر اساس سیستم CIE Lab* نشان داد که بیشترین میزان تغییرات در محورهای L^* (روشنایی) و a^* (قرمزی/سبزی) رخ داده است. در محور b^* (زردی)، مقدار $\Delta b^* = 2.4$ ثبت شد که نشان‌دهنده گرایش نمونه به سمت زردی از ساعت ۷۲ به بعد است؛ این در حالی است که طی ۷۲ ساعت نخست هیچ‌گونه تغییری مشاهده نشد. در محور L^* ، مقدار $\Delta L^* = -2.0$ پس از ۲۸۸ ساعت به دست آمد که بیانگر گرایش نمونه به سمت تیرگی است. در محور a^* نیز مقدار $\Delta a^* = 0.75$ مشاهده شد که نشان‌دهنده تغییر اندک نمونه به سمت قرمزی است. اختلاف کلی رنگ (ΔE) پس از ۲۸۸ ساعت فرایند پیرسازی برابر با $3/2$ محاسبه شد که حاکی از پایداری رنگی نسبتاً مطلوب این فیلامنت است. بر این اساس، فیلامنت PETG با توجه به شرایط و الزامات کاربرد، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژ توصیه می‌شود.



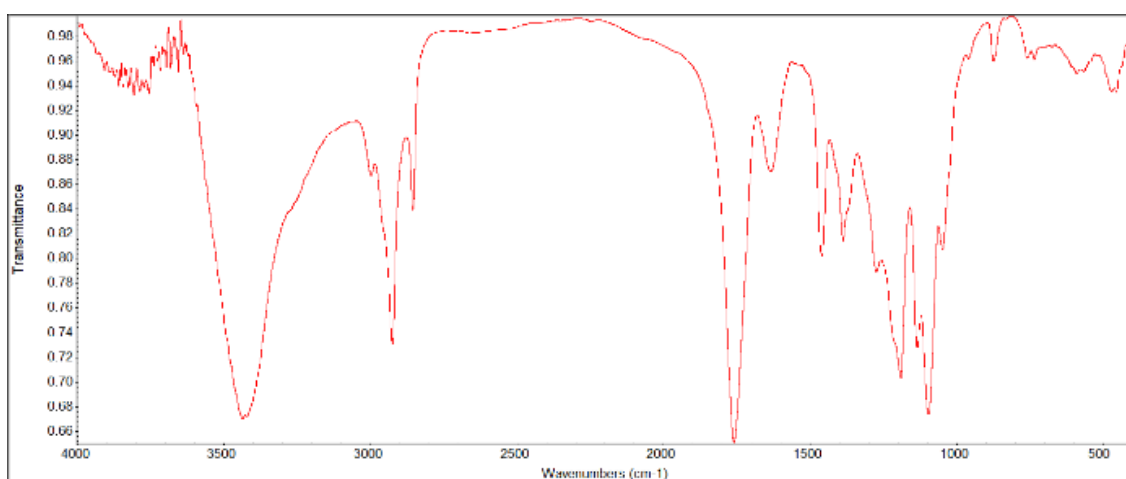
شکل ۱۱. اختلاف رنگی نمونه فیلامنت PETG قبل و بعد از پیرسازی به مدت ۲۸۸ ساعت و طی ۴ مرحله بر اساس ΔE و Δb^* , Δa^* , ΔL^*

۵-۱۰. تغییرات ساختاری فیلامنت‌ها پس از پیرسازی

پس از اجرای فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV، تغییرات ساختاری فیلامنت‌های پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. قرارگیری پلیمرها در معرض تابش فرابنفش می‌تواند به تخریب ساختاری، تغییرات رنگی و کاهش خواص فیزیکی آن‌ها منجر شود. این فرایند تخریب با تشکیل گروه‌های کربونیل در ساختار پلیمرها، در نتیجه فرایند اکسیداسیون، همراه است و می‌تواند ماهیت شیمیایی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. شاخص کربونیل به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان افزایش گروه‌های کربونیل مورد استفاده قرار گرفت (Javadi et al., 2014). در ادامه، تغییرات ساختاری فیلامنت‌های مورد مطالعه پس از فرایند پیرسازی UV به صورت دقیق تحلیل خواهد شد.

۵-۱۱. تغییرات ساختاری فیلامنت پلی لاکتیک اسید (PLA) پس از پیرسازی

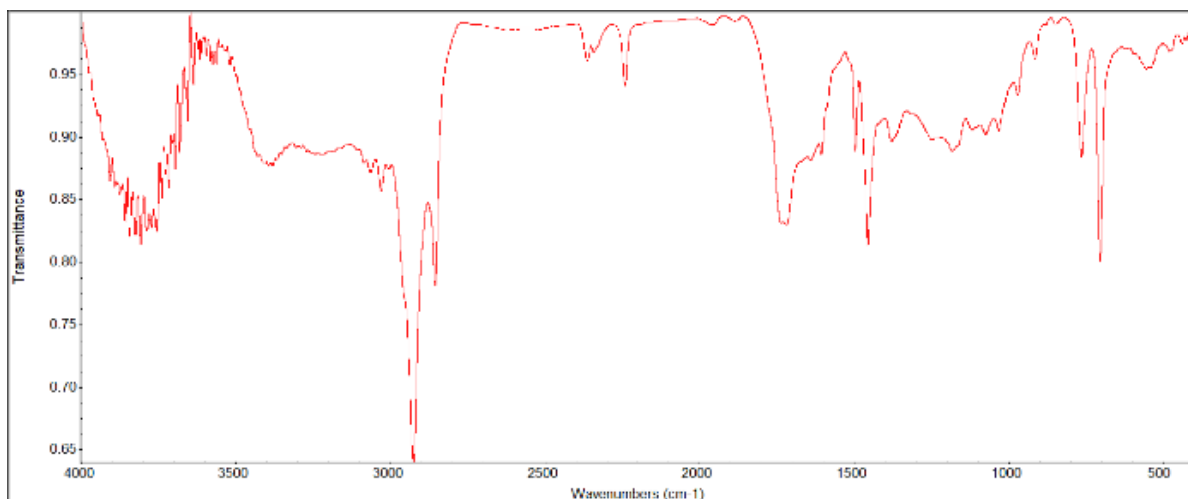
تحلیل طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی لاکتیک اسید (PLA) پس از پیرسازی تسریع شده با تابش UV، ظهور پیک قوی در 1766 cm^{-1} را نشان داد که بیانگر تشکیل گروه‌های کربونیل و افزایش شاخص کربونیل است (Lomakin et al., 2024). این یافته نشان‌دهنده وقوع اکسیداسیون قابل توجه در ساختار PLA طی فرایند پیرسازی است. بر این اساس، فیلامنت PLA در برابر تابش UV، پایداری ساختاری مطلوبی از خود نشان نداده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. طیف FTIR بعد از پیرسازی نمونه فیلامنت PLA

۵-۱۲. تغییرات ساختاری فیلامنت اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) پس از پیرسازی

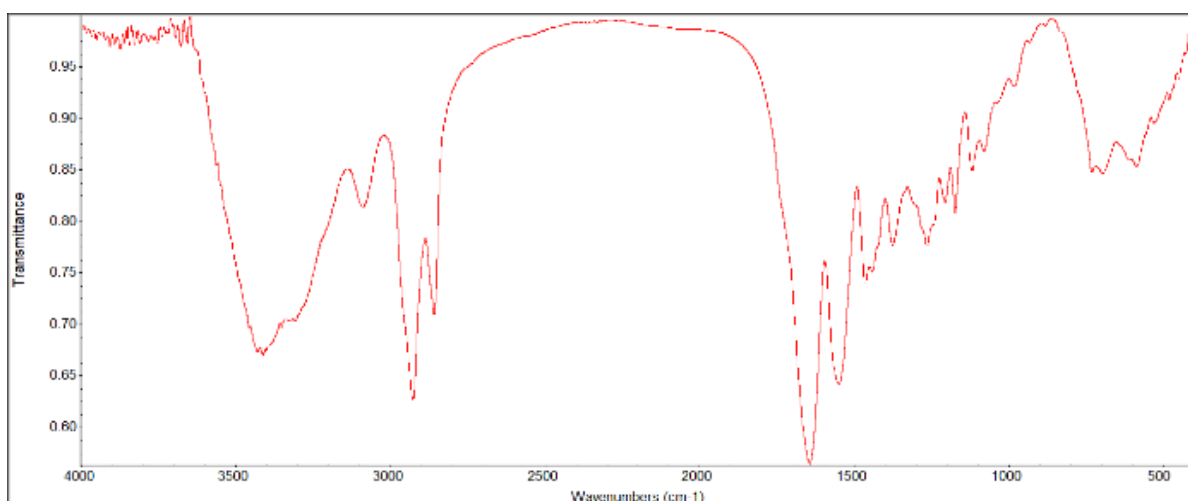
مقایسه طیف‌های مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در ساختار شیمیایی این پلیمر نشان داد. مهم‌ترین تغییر مشاهده شده، ظهور پیکی با شدت متوسط در 1716 cm^{-1} است که به ارتعاش گروه کربونیل (C=O) نسبت داده می‌شود (Li et al., 2017). ظهور این پیک، بیانگر اکسیداسیون قابل توجه پیوندهای کربنی در ساختار ABS است (شکل ۱۳). بر این اساس، عدم پایداری ساختاری فیلامنت ABS در برابر تابش UV باید در کاربردهای عملی، به ویژه در بازسازی قطعات مفقود، مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۳. طیف FTIR بعد از پیرسازی نمونه فیلامنت ABS

۱۳-۵. تغییرات ساختاری فیلامنت پلی آمید (PA) پس از پیرسازی

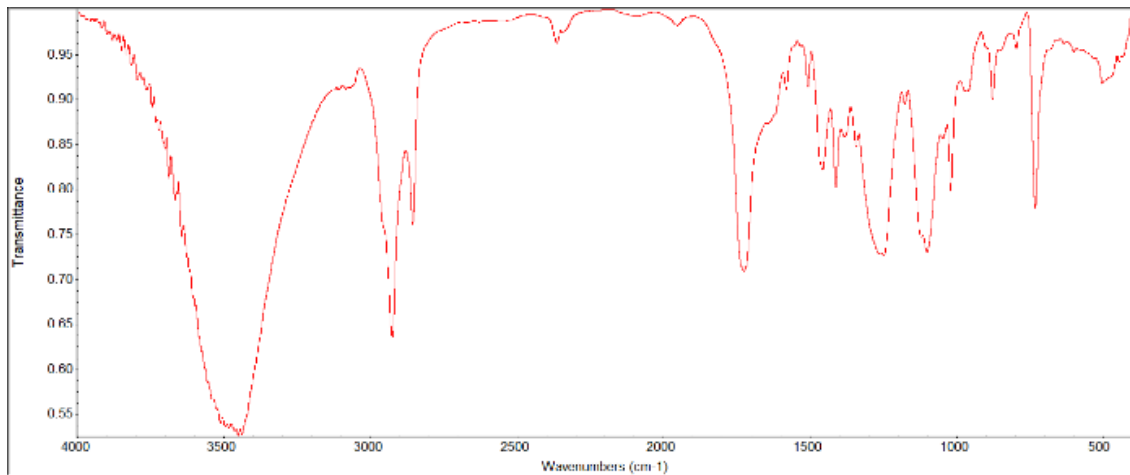
مقایسه طیف‌های مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی آمید (PA) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV، جابه‌جایی تمامی پیک‌های مشخصه به سمت اعداد موجی بالاتر و در نتیجه، فرکانس‌های بیشتر را نشان داد که می‌تواند بیانگر ایجاد تنش در ساختار شبه‌بلوری این پلیمر باشد. با این حال، عدم ظهور پیکی در ناحیه حدود 1700 cm^{-1} نشان‌دهنده عدم تشکیل گروه‌های کربونیل (C=O) است. به منظور ارزیابی میزان تخریب، از شاخص کربونیل استفاده شد که نسبت شدت پیک‌های مرتبط با پیوندهای دوگانه کربن - کربن (C=C) و کربن - اکسیژن (C=O) را به عنوان معیاری برای ارزیابی اکسیداسیون پیوندهای کربنی در نظر می‌گیرد (Pires et al., 2015). عدم مشاهده پیک کربونیل در فیلامنت PA، پایداری بالای این ماده در برابر شرایط پیرسازی را تأیید می‌کند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. طیف FTIR پس از پیرسازی نمونه فیلامنت PA

۱۴-۵. تغییرات ساختاری فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) پس از پیرسازی

مقایسه طیف‌های مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) پیش و پس از فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV، افزایش قابل توجه نسبت شدت پیک در 1723 cm^{-1} ، مرتبط با گروه کربونیل تشکیل شده در اثر فرایند پیرسازی، به پیک در 1465 cm^{-1} ، مرتبط با پیوند دوگانه کربن - کربن، را در مقایسه با ساختار اولیه نشان داد (P. K. Kumar et al., 2023). این افزایش، بیانگر وقوع اکسیداسیون قابل ملاحظه در ساختار PETG است (شکل ۱۵). بر اساس این یافته‌ها، فیلامنت PETG از نظر پایداری ساختاری در برابر تابش UV، ماده‌ای مناسب برای کاربردهای مورد نظر تلقی نمی‌شود.



شکل ۱۵. طیف FTIR پس از پیرسازی نمونه فیلامنت PETG

۶. نتیجه‌گیری

فناوری چاپ سه‌بعدی به روش رسوب مذاب (FDM) در حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی، با کاهش میزان مداخله انسانی، افزایش دقت در بازسازی اشکال هندسی پیچیده و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، رویکردی نوین ارائه می‌دهد. این روش، با حداقل میزان آسیب به اثر اصلی، برای بازسازی قطعات مفقود و تولید مولاژ از آثار تاریخی بسیار مناسب است. انتخاب موادی با پایداری رنگی و ساختاری در برابر عوامل محیطی، از جمله تابش UV و رطوبت، برای دستیابی به بازسازی دقیق و منطبق با استانداردهای حفاظت از میراث فرهنگی، از اهمیت بالایی برخوردار است. پژوهش حاضر، به‌عنوان فاز نخست بررسی کاربرد فیلامنت‌های چاپ سه‌بعدی، پایداری رنگی و ساختاری چهار فیلامنت پرمصرف در بازار ایران، شامل پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) و پلی‌آمید (PA)، را در فرایند پیرسازی تسریع شده با تابش UV به مدت ۲۸۸ ساعت ارزیابی کرد. نتایج رنگ‌سنجی که در فواصل زمانی ۷۲ ساعته انجام شد، نشان داد که PLA با $\Delta E = 2.12$ و PETG با $\Delta E = 3.20$ ، کمترین میزان تغییرات رنگی را داشتند؛ درحالی‌که ABS با $\Delta E = 22.00$ و PA با $\Delta E = 4.68$ ، تغییرات رنگی بیشتری نشان دادند. تحلیل‌های طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) نیز تشکیل گروه‌های کربونیل را در PLA، با ظهور پیک در 1766 cm^{-1} ، ABS، با ظهور پیک در 1716 cm^{-1} و PETG، با ظهور پیک در 1723 cm^{-1} ، تأیید کرد که بیانگر وقوع تخریب ساختاری ناشی از فرایند اکسیداسیون است. در مقابل، فیلامنت PA به دلیل عدم تشکیل پیک کربونیل، پایداری ساختاری قابل توجهی در برابر تابش UV از خود نشان داد (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه پایداری رنگی و ساختاری فیلامنت‌های مورد بررسی

فیلامنت	اختلاف کلی رنگ (ΔE)	پیک کربونیل (cm^{-1})	توصیه
PLA	2.12	1766 (قوی)	مناسب برای کاربردهای موقت به دلیل ثبات رنگی، اما با تخریب ساختاری
ABS	22	1716 (متوسط)	نامناسب به دلیل تغییرات رنگی و ساختاری بالا
PETG	3.2	1723 (متوسط)	مناسب مشروط برای کاربردهای موقت در رطوبت نسبی $< 50\%$
PA	4.68	-	مناسب برای کاربردهای نیازمند پایداری ساختاری

به دلیل محدودیت‌های تجهیزات، شاخص کربونیل به صورت عددی محاسبه نشد و تنها موقعیت و شدت کیفی پیک‌های کربونیل گزارش شد. به منظور تحلیل دقیق‌تر، در پژوهش‌های آینده، محاسبه نسبت شدت پیک‌های کربونیل به یک پیک مرجع، مانند 1465 cm^{-1} ، توصیه می‌شود.

لازم به ذکر است که استاندارد ASTM D4587-01، فرایند پیرسازی تسریع شده را برای مدت ۱۰۰۰ ساعت تعریف می‌کند. در پژوهش حاضر، به دلیل محدودیت‌های زمانی و تجهیزاتی، آزمایش تنها به مدت ۲۸۸ ساعت انجام شد. با این حال، داده‌های به دست آمده قابل استفاده و معتبر هستند؛ زیرا مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییرات اصلی ناشی از پیرسازی UV در مراحل اولیه، معادل ۲۰-۳۰٪ از مدت زمان استاندارد، آشکار می‌شوند و روند تغییرات در مراحل بعدی معمولاً به صورت خطی یا با شیب کمتری ادامه می‌یابد. بنابراین، نتایج این پژوهش را می‌توان به عنوان نماینده‌ای از رفتار اولیه مواد در شرایط پیرسازی UV مورد استناد قرار داد؛ هرچند بررسی جامع‌تر این رفتار، مستلزم اجرای کامل آزمون ۱۰۰۰ ساعته است.

بر اساس نتایج به دست آمده، فیلامنت PLA به دلیل پایداری رنگی بالا، منشأ زیستی، که از موادی مانند نشاسته ذرت و نیلشکر تولید می‌شود، و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری در شرایط کمپوست صنعتی، برای کاربردهای موقت در مرمت آثار تاریخی و ساخت مولاژ مناسب است؛ با این حال، تخریب ساختاری این فیلامنت، کاربرد آن را در دوره‌های زمانی بلندمدت محدود می‌کند. فیلامنت PETG، با توجه به برخورداری از تغییرات رنگی نسبتاً محدود، در محیط‌های خشک می‌تواند گزینه‌ای مناسب باشد. فیلامنت PA نیز به دلیل پایداری ساختاری بالا، برای کاربردهایی که در آن‌ها دوام ساختاری از اولویت برخوردار است، توصیه می‌شود. در مقابل، فیلامنت ABS به دلیل بروز تغییرات رنگی و ساختاری قابل توجه، برای کاربرد در مرمت آثار تاریخی مناسب نیست.

فیلامنت‌های PLA و PA به دلیل میزان جذب رطوبت بالا، مستعد فرایند هیدرولیز هستند. از این رو، استفاده از آن‌ها در محیط‌های خشک، با رطوبت نسبی کمتر از ۵۰٪، و برای بازه‌های زمانی کوتاه مدت، معادل ۹ تا ۱۲ ماه بر اساس استاندارد ASTM D4587-01، توصیه می‌شود. در محیط‌های موزه‌ای که میزان تابش UV، کمتر از $75 \mu\text{W}/\text{lm}$ ، و رطوبت نسبی تحت کنترل باشد، امکان استفاده از این مواد در دوره‌های زمانی طولانی‌تر وجود خواهد داشت. همچنین، به منظور رعایت اصول قابلیت بازگشت‌پذیری و تمایزپذیری در فرایند مرمت، استفاده از چسب‌های سازگار، از جمله چسب‌های مبتنی بر آب، و نیز تنظیم پارامترهای چاپ به گونه‌ای که تفاوت بصری میان بخش افزوده شده و اثر اصلی ایجاد شود، ضروری است.

پژوهش حاضر با تمرکز بر ویژگی‌های بصری و ساختاری فیلامنت‌های مورد مطالعه، با محدودیت‌هایی همچون عدم بررسی خواص مکانیکی، نبود ارزیابی چسبندگی مواد به آثار تاریخی و تمرکز بر چهار نوع فیلامنت پرمصرف موجود در بازار تبریز مواجه بود. برای انجام تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود:

۱. بررسی خواص مکانیکی فیلامنت‌ها، از جمله استحکام کششی، بر اساس استاندارد ASTM D638 و ارزیابی رفتار آن‌ها در برابر عوامل محیطی، از جمله دما، رطوبت و آلاینده‌ها.

۲. مطالعه میزان چسبندگی مواد پلیمری به آثار تاریخی با استفاده از رزین‌های اپوکسی یا چسب‌های سازگار و منطبق با استانداردهای مرمت.

۳. ارزیابی مواد اولیه مورد استفاده در سایر فناوری‌های چاپ سه‌بعدی، از جمله SLA و PolyJet، که در مقایسه با FDM، دقت و کیفیت سطح بالاتری ارائه می‌دهند.

۴. بررسی تأثیر روش‌های پس‌پردازش، از جمله پوشش‌دهی ضد UV، بر افزایش پایداری فیلامنت‌ها.

این پژوهش با رعایت اصول حفاظت و مرمت، از جمله حداقل مداخله، مستندسازی کامل فرایندها، شامل ثبت روش‌ها، شرایط آزمایش و نتایج تحلیل‌ها، و توجه به سازگاری مواد، گامی در جهت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در حفاظت از میراث فرهنگی برداشته است. باین حال، به منظور دستیابی به انطباق کامل با استانداردها و الزامات حفاظت و مرمت، انجام مطالعات بیشتر در زمینه سازگاری شیمیایی و بصری مواد با آثار تاریخی و همچنین بررسی روش‌های اتصال و تثبیت آن‌ها ضروری است.

سپاسگزاری

نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه هنر اسلامی تبریز به‌منظور فراهم کردن امکانات و بستر لازم برای انجام مراحل مختلف این پژوهش ابراز می‌دارند.

منابع

رازانی، مهدی، و اسمعیل نژاد تیمورآبادی، جلیل. (۱۴۰۰). استفاده از روش چاپ استریولیتوگرافی (SLA) در جهت ساخت مولاژ از اشیای تاریخی - فرهنگی (نمونه مطالعاتی: مهره شطرنج تاریخی از جنس عاج فیل). *دانش حفاظت و مرمت*، ۱۲-۱.

رازانی، مهدی، حدادیان، محمدعلی، و اسمعیل نژاد تیمورآبادی، جلیل. (۱۴۰۳). حفاظت و نمایش اشیای نامتعادل در موزه‌ها: رویکردی نوین با استفاده از پایه‌های تعادل‌بخش. *دانش حفاظت و مرمت*، ۱۸-۱.

Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257.

Algarni, M., & Ghazali, S. (2021). Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters. *Crystals*, 11(8), 995.

Antlej, K., Celec, K., Sinani, M., Mirtič, E., & Ljub, D. (2012). Restoration of a stemmed fruit bowl using 3D technologies. *Review of the National Center for Digitization*, 141-146.

ASTM International. (2011). *Standard practice for fluorescent UV-condensation exposures of paint and related coatings (ASTM D4587-11)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

- Derrick, M., Stulik, D., & Landry, J. (1999). *Infrared spectroscopy in conservation science*. The Getty Conservation Institute.
- Esmailnezhad Teymourabadi, J., & Razani, M. (2023). Application of using 3D modeling and FDM 3D printer in restoration and prototyping of ivory historical-cultural objects. *Bunyān-i hunar; justārhā-yi mūzah/dāri, marimmat, bāstānshināsī va tārikh-i hunar (Foundation of Art; Studies of Museums, Conservation, Archeology and Art History)*, 1(2), 220-245.
- Finnegan, A., Süsserott, R., Koh, L., Teo, W., & Gouramanis, C. (2022). A simple sample preparation method to significantly improve Fourier transform infrared (FT-IR) spectra of microplastics. *Applied Spectroscopy*, 76(7), 783-792.
- Fontana, L., Minetola, P., Khandpur, M., & Giubilini, A. (2025). Evaluating self-produced PLA filament for sustainable 3D printing: Mechanical properties and energy consumption compared to commercial alternatives. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(6), 172.
- Gebhardt, A. (2012). *Understanding additive manufacturing: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. (A. Amirjan, Trans.). Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
- Gonçalves, C., Coutinho, J., & Marrucho, I. (2010). Optical properties. In R. Auras, L.-T. Lim, S. Selke, & H. Tsuji (Eds.), *Poly (lactic acid): Synthesis, structures, properties, processing, and applications* (pp. 97-112). NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Harris, M., Potgieter, J., Ray, S., Archer, R., & Arif, K. (2019). Acrylonitrile butadiene styrene and polypropylene blend with enhanced thermal and mechanical properties for fused filament fabrication. *Materials*.
- ICOM-CC. (2014). *Environmental guide ICOM-CC and IIC declaration*. Paris, France: ICOM-CC.
- ICOMOS. (1964). *International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (Venice Charter)*. Venice, Italy: ICOMOS.
- Javadi, Y., Hosseini, M., & Aghjeh, M. (2014). The effect of carbon black and HALS hybrid systems on the UV stability of high-density polyethylene (HDPE). *Iranian Polymer Journal*, 793-799.
- Kang, E., Kim, M., Seok Oh, J., Wha Park, D., & Eun Shim, S. (2012). Electrospun BMIMPF₆/Nylon 6,6 nanofiber chemiresistors as organic vapour sensors. *Macromolecular Research*, 372-378.
- Kasmi, S., Ginoux, G., Allaoui, S., & Alix, S. (2021). Investigation of 3D printing strategy on the mechanical performance of coextruded continuous carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Applied Polymer Science*, 1-26.
- Khorih, N., Mohd Khor, E., Salmiati, S., Hadibarata, T., & Yusop, Z. (2020). A combination of waste biomass activated carbon and nylon nanofiber for removal of triclosan from aqueous solutions. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 1036-1045.
- Koçar, O., Anaç, N., Baysal, E., Parmaks z, F., & Akgül, I. (2024). Investigation of mechanical properties and color changes of 3D-printed parts with different infill ratios and colors after aging. *Materials*, 17(23), 5908.
- Leonés, A., Peponi, L., Lieblisch, M., Benavente, R., & Fiori, S. (2020). In vitro degradation of plasticized PLA electrospun fiber mats: Morphological, thermal and crystalline evolution. *Polymers*, 12(12), 2975.
- Li, J., Chen, F., Yang, L., Jiang, L., & Dan, Y. (2017). FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 184, 361-367.
- Lomakin, S., Mikheev, Y., Usachev, S., Rogovina, S., Zhorina, L., Perepelitsina, E., et al. (2024). Evaluation and modeling of polylactide photodegradation under ultraviolet irradiation: Bio-based polyester photolysis mechanism. *Polymers*, 16(7), 985.
- Mohammed, M., Wilson, D., Gomez-Kervin, E., Tang, B., & Wang, J. (2019). Investigation of closed loop manufacturing with acrylonitrile butadiene styrene (ABS) over multiple generations using additive manufacturing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13955-13969.
- P. K. Kumar, D., Jagadesh, T., & Shukla, K. (2023). Experimental investigation into flexural and impact behaviour of 3D printed PETG short carbon fibre composite under solar light irradiation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(16), 3597-3607.



- Pires, H., Mendes, L., Cestari, S., & Pita, V. (2015). Effect of weathering and accelerated photoaging on PET/PC (80/20 wt/wt%) melt extruded blend. *Materials Research*, 18(4), 763-768.
- Pop, M., Croitoru, C., Bedő, T., Geamăn, V., Radomir, I., Cosnita, M., et al. (2018). Structural changes during 3D printing of bioderived and synthetic thermoplastic materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 1-29.
- Razani, M., Haddadian, M., & Porabbas, S. (2016). The use of rapid prototyping technology to reconstruct the missing parts of glass works with the approach of applying in historical glasses. *Journal of Conservation and Architecture in Iran*, 85-102.
- Razani, M., Haddadian, M., & Pourabbas, S. (2018). The use of new prototyping technology to reconstruct missing parts of the archaeological pottery. *Pazhohesh-ha-ye Bastanshenasi Iran*, 193-212.
- Riba, J., Cailloux, J., Cantero, R., Canals, T., & LImaspoch, M. (2018). Multivariable methods applied to FTIR : A powerful technique to highlight architectural changes in poly (lactic acid). *Polymer Testing*, 65, 264-269.
- Sedlak, J., Joska, Z., Jansky, J., Zouhar, J., Kolomy, S., Slany, S., et al. (2023). Analysis of the mechanical properties of 3D-printed plastic samples subjected to selected degradation effects. *Materials*, 16(8), 3268.
- Seno Flores, J., de Assis Augusto, T., Lopes Vieira Cunha, D., Gonçalves Beatrice, C., Henrique Backes, E., & Costa, L. (2024). Sustainable polymer reclamation: Recycling poly (ethylene terephthalate) glycol (PETG) for 3D printing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1), 16.
- Shanmugam, V., Babu, K., Kannan, G., Mensah, R., Samantaray, S., & Das, O. (2024). The thermal properties of FDM printed polymeric materials: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 228, 110902.
- Tymrak, B., Kreiger, M., & Pearce, J. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
- UNESCO. (1994). *Nara document on authenticity*. Nara, Japan: UNESCO.
- Vouvoudi, E., Morfis, P., Verros, G., & Achilias, D. (2022). Polymerisation kinetics on FT-IR and colorimetric changes under UV irradiation for a commercial polycyanoacrylate adhesive, addressed to glass restoration. *Coatings*, 12(4), 490.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Engineering*, 110, 442-458.

