

## Effect of Printing Parameters and Filament Material on Mechanical Properties of Roller-Reinforced FFF Parts

Abdolvahed Kami\*, Hossein Sattari Naeeni, and Ali Jadali

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 6 November 2025, accepted: 16 May 2026

### ABSTRACT

**Hypothesis:** This study hypothesizes that applying compressive force by a roller during the “fused filament fabrication” (FFF) 3D printing process can enhance interlayer adhesion and consequently improve the mechanical strength of parts fabricated from polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), and their blend.

**Methods:** To examine this hypothesis, tensile test specimens were fabricated according to ASTM D638 using a modified FFF 3D printer equipped with a roller-pressure mechanism. The experiments were designed based on the “response surface methodology” (RSM) with a Central Composite Design (CCD), including two continuous variables (printing speed and roller force) and one discrete variable (filament type). Tensile tests were conducted using a SANTAM STM-400 machine at a crosshead speed of 5 mm/min. The fracture surfaces were analyzed using a field emission scanning electron microscope (FESEM). The data were processed using Design-Expert 13 software to evaluate the main and interaction effects of the parameters on tensile strength.

**Findings:** Analysis of variance (ANOVA) revealed that the filament type and its interaction with roller force had a statistically significant effect on tensile strength ( $p < 0.05$ ). The applied compressive force improved interlayer bonding, reduced layer thickness, increased the raster shear angle, and promoted polymer chain alignment along the load direction, leading to enhanced tensile performance. Under optimized conditions, the maximum tensile strengths of PLA, ABS, and PLA/ABS samples were 58.8, 34.7, and 45.2 MPa, respectively, corresponding to an improvement of up to 10.9% compared to samples printed without roller pressure. FESEM observations further confirmed the reduced layer thickness and improved interlayer fusion. Overall, the application of roller force during FFF printing effectively enhances the strength and quality of printed components without the need for post-processing treatments.

#### Keywords:

3d printing,  
fused filament fabrication  
(FFF),  
roller compressive force,  
tensile strength,  
dual-material printing

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [akami@semnan.ac.ir](mailto:akami@semnan.ac.ir)

#### Please cite this article using:

Kami A., Sattari Naeeni H., and Jadali A., Effect of Printing Parameters and Filament Material on Mechanical Properties of Roller-Reinforced FFF Part, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 401-412, 2026.

# اثر پارامترهای چاپ و جنس رشته بر کارایی مکانیکی قطعات ساخت رشته مذاب تقویت شده با نیروی غلتکی

عبدالواحد کمی\*، حسین ستاری نایینی، علی جدلی

سمنان دانشگاه سمنان دانشکده مهندسی مکانیک، کد پستی ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱

دریافت: ۱۴۰۴/۸/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۶

## چکیده

**فرضیه:** در این پژوهش فرض بر آن است که اعمال نیروی فشاری به کمک غلتک حین فرایند چاپ سه بعدی با روش ساخت رشته مذاب می تواند موجب بهبود چسبندگی بین لایه ای و در نتیجه افزایش استحکام مکانیکی قطعات ساخته شده از پلی (لاکتیک اسید) (PLA)، آکریلونیتریل بوتادی ان استیرن (ABS) و ترکیب آن ها شود.

**روش ها:** برای بررسی این فرضیه، نمونه های آزمون کشش با استفاده از استاندارد ASTM D638 به کمک چاپگر سه بعدی مجهز به سازوکار اعمال فشار غلتکی تولید شدند. طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام شد که شامل دو متغیر پیوسته (سرعت چاپ و نیروی غلتک) و یک متغیر گسسته (جنس رشته) بود. آزمون کشش با دستگاه SANTAM STM-400 و سرعت ۵ mm/min انجام شد. همچنین، برای تحلیل سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی پویشی گسیل میدانی (FE-SEM) استفاده شد. داده ها با نرم افزار Design-Expert 13 تحلیل شد تا اثرهای اصلی و برهم کنش پارامترها بر استحکام کششی ارزیابی شود.

**یافته ها:** نتایج تحلیل واریانس نشان داد، جنس رشته و برهم کنش آن با نیروی غلتک اثر معناداری بر استحکام کششی دارند ( $p > 0.05$ ). اعمال نیروی فشاری موجب بهبود چسبندگی بین لایه ای، کاهش ضخامت لایه، افزایش زاویه برش بین رسترها و هم راستایی زنجیرهای پلیمری در راستای نیرو شد که در نهایت استحکام کششی را افزایش داد. در شرایط بهینه، بیشینه استحکام کششی برای نمونه های ABS، PLA و PLA/ABS به ترتیب ۵۸/۸، ۳۴/۷ و ۴۵/۲ MPa به دست آمد که نسبت به نمونه های بدون غلتک تا حدود ۱۰/۹٪ افزایش نشان داد. نتایج FE-SEM نیز کاهش ضخامت لایه و بهبود پیوند بین لایه ای را تأیید کرد. به طور کلی، اعمال نیروی غلتک حین چاپ می تواند بدون نیاز به عملیات پس فرایندی، استحکام و کیفیت قطعات ساخت رشته مذاب را به طور مؤثری بهبود دهد.

## واژه های کلیدی

چاپ سه بعدی،  
ساخت رشته مذاب،  
نیروی فشاری غلتک،  
استحکام کششی،  
چاپ دوماده ای

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

akami@semnan.ac.ir

## مقدمه

ساخت افزایشی شامل مجموعه‌ای از فناوری‌هایی است که امکان تولید قطعات فیزیکی را از مدل‌های سه‌بعدی دیجیتالی فراهم می‌کند. در این روش، قطعه به صورت لایه‌به‌لایه ساخته می‌شود تا شکل نهایی آن تکمیل شود. این فرایند در مقابل ساخت کاهشی قرار دارد که در آن یک قطعه از قطعه‌ای از ماده اولیه شکل می‌گیرد و با حذف بخش‌های اضافی به شکل مطلوب می‌رسد [۱]. اکستروژن مواد که اساس کار روش لایه‌نشانی ساخت رشته مذاب (fused filament fabrication, FFF) است، فرایند ساخت افزایشی بوده که شامل ذوب یک رشته پلیمری در یک افشانک (nozzle) گرم شده و رسوب لایه‌های مذاب روی لایه‌های قبلی یا روی صفحه ساخت گرم است. لایه‌های مذاب به سرعت سرد و صلب می‌شوند و یک قطعه نهایی با شکل دلخواه ایجاد می‌شود. رشته‌های پلیمری واقع در همان لایه به عنوان رستر (Raster) شناخته می‌شوند که از همجوشی با یکدیگر پیوند برقرار می‌کنند و خواص مکانیکی لازم را ایجاد می‌کنند. همجوشی بین رسترها و بین لایه‌ها به خواص ناهمسان‌گرد با بیشترین استحکام در جهت طولی (موازی با جهت رسوب) و ضعیف‌ترین مقاومت در جهت عمود بر صفحه ساخت منجر خواهد شد [۲]. فرایند FFF مزیت تولید قطعات با هندسه پیچیده، با انتخاب گسترده‌ای از مواد را بدون نیاز به ساخت قالب ارائه می‌دهد. با وجود این، چنین فرایندی دارای چندین اشکال است: (الف) زمان ساخت طولانی است، (ج) خواص مکانیکی در مقایسه با قطعات تولیدشده با سایر فرایندها به عنوان مثال تزریق پلاستیک کمتر است [۳].

در روش FFF، گرمانرم‌ها به عنوان مواد اصلی به کار می‌روند. در میان این مواد، پلی (لاکتیک اسید) (PLA) و آکریلونیتریل بوتادیان استیرن (ABS) بیشترین استفاده را دارند. PLA در مقایسه با سایر پلیمرها مزایایی نشان می‌دهد، زیرا (۱) زمانی که تخریب رخ می‌دهد، هیچ آلودگی به محیط منتشر نمی‌شود، (۲) زیست‌سازگاری عالی را نشان می‌دهد، بنابراین به طور گسترده برای اهداف پزشکی، یعنی مهندسی بافت استفاده می‌شود و (۳) دارای انعطاف‌پذیری و چقرمگی قابل توجهی در استفاده بلندمدت است. ABS دارای مقاومت گرمایی، مقاومت ضربه زیاد و چقرمگی است که می‌تواند با نسبت پلی‌بوتادیان به آکریلونیتریل و استیرن افزایش یابد [۴]. با توسعه مداوم و پذیرش گسترده ساخت افزایشی، اکنون می‌توان سامانه‌های چندماده‌ای و قطعات چندمنظوری را در یک مرحله پیوسته ایجاد کرد که به عنوان ساخت افزایشی چندماده‌ای شناخته می‌شود. این رویکرد شامل ترکیب دو یا چند ماده برای افزایش

عملکرد کلی یک قطعه، گسترش کاربردهای پلاستیکی است که قبلاً با خواص گرمایی، مکانیکی یا شیمیایی خاصی محدود شده بودند [۵]. بنابراین، تولید چند ماده با استفاده از مواد مختلف ممکن است، خواص مکانیکی یک قطعه را بهبود بخشد و کارایی فرایند ساخت افزایشی را افزایش دهد. از آنجا که FFF روشی کم‌هزینه است، این قابلیت را دارد که در زمینه مهندسی مکانیک و عمران، به ویژه در کاربردهای سازه‌ای به کار رود [۶].

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرایند FFF، زاویه رستر است که Naveed اثر آن را روی استحکام کششی [۷] بررسی کرده است. طبق نتایج این پژوهش بهترین زاویه رستر مقدار صفر درجه است که به موجب آن رسترها در راستای اعمال نیرو قرار می‌گیرند. Bardiya و همکاران [۸] اثر سه متغیر ضخامت لایه، جهت چاپ و تراکم پرشوندگی، بر استحکام کششی و خمشی قطعات از جنس PLA چاپ‌شده به کمک فرایند FFF را بررسی کرده‌اند. استحکام بیشتر در سطوح بالاتر ضخامت لایه و درصد پرشوندگی به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد، تنظیم پارامتر ارتفاع لایه ۰/۳۰ mm، جهت صفر درجه و پرکردن ۸۰٪ کمترین زمان ساخت را می‌دهد و امکان تولید قطعات با استحکام زیاد در زمان کمتر را نشان می‌دهد. بررسی تجربی ارائه شده بر اساس روش تاگوچی است. در پژوهش مرادی و همکاران [۹] اثر تراکم پرشوندگی، ضخامت لایه و زاویه رستر چاپ با روش FFF روی استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست نمونه‌ها از جنس آکریلونیتریل بوتادیان استیرن بهبودیافته بررسی شد. نتایج با روش سطح پاسخ (response surface method, RSM) اعتبارسنجی و پیش‌بینی شد. پارامتر زاویه رستر که به طور مستقیم با انتقال بار به نمونه مرتبط است، به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر هر دو پاسخ شناخته شد. نتایج بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست نشان‌دهنده تراکم پرشوندگی ۷۳/۴۲٪، ضخامت لایه ۰/۲۲۷ mm و زاویه رستر هم‌راستا با جهت اعمال نیرو است که به استحکام کششی ۳۴/۹۲ MPa و ازدیاد طول تا شکست ۳/۵۹٪ منجر می‌شود. Rodríguez-Reyna و همکاران [۱۰] از طراحی آزمایش برای بررسی اثر جنس رشته، الگو و تراکم پرشوندگی، برای چاپ و ضخامت لایه بر استحکام کششی و مدول کشسانی استفاده کردند. آن‌ها نمونه‌ها را از سه جنس PLA, ABS و نایلون به همراه الیاف کربن ساختند. در نتایج آن‌ها مشخص شد، دو پارامتر با بیشترین اثر جنس رشته و تراکم پرشوندگی است. همچنین، زاویه رستر و ضخامت لایه در پژوهش آن‌ها به ترتیب بین ۴۵-۴۵ و ۰/۹۰ و ۰/۱۸ و ۰/۱۴ mm تغییر می‌کرد که با توجه به نتایج در زاویه رستر ۴۵-۴۵ و ضخامت لایه ۰/۱۴ mm بیشتر استحکام به دست

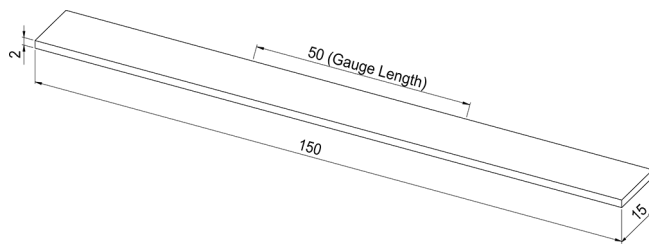
آمده است. خدایی و همکاران [۱۱] اثر درصد پرشوندگی و زاویه رستر بر استحکام کششی و خمشی نمونه‌های چندماده‌ای PLA/ABS ساخته شده با روش FFF را به کمک روش سطح پاسخ بررسی کردند. نتایج نشان داد، درصد پرشوندگی بر استحکام کششی و خمشی نسبت به سایر پارامترها اهمیت بیشتری دارد. همچنین، استحکام کششی و خمشی با توجه به نتایج آزمایش آن‌ها در حالتی به دست خواهد آمد که رسترها در راستای اعمال نیرو چاپ شوند. Baca و Ahmad [۱۲] با سه ماده PLA، ABS و پلی‌استیرن مقاوم به ضربه و فرایند FFF ساختارهای ساندویچی را چاپ کردند تا به قطعه‌ای با خواص مکانیکی بهینه دست یابند. پاسخ‌های تحت بررسی آن‌ها شامل استحکام کششی، ازدیاد طول تا شکست و مدول کشسانی بود. نتایج آن‌ها بیانگر این است که ساختار ساندویچی PLA-ABS-PLA، به بهترین خواص مکانیکی منجر خواهد شد. Wang و همکاران [۱۳] دیواره‌های کامپوزینی از سه جنس پلی (لاکتیک اسید)، PLA، اصلاح شده با عامل اسفنج دوستدار محیط زیست (ePLA-LW) و پلی (لاکتیک اسید) تقویت شده با الیاف شیشه دوستدار محیط زیست (ePLA-GF) در نسبت‌های مختلف ساختند. آن‌ها از نسبت حجمی و ترتیب چاپ این مواد به همراه الگو و تراکم پرشوندگی به عنوان متغیرهای ورودی در بررسی استحکام و مدول خمشی با روش تاگوجی استفاده کردند. آزمایش‌های تاگوجی نشان می‌دهد، توالی مواد مهم‌ترین عامل اثرگذار بر استحکام خمشی دیواره‌های کامپوزیت است. براساس نتایج پژوهش آن‌ها، نسبت ۱:۰:۲ در ترتیب PLA/ePLA-LW/ePLA-GF با استفاده از پارامترهای فرایند الگو پرشوندگی ژئروید و تراکم پرشوندگی ۸۰٪ بیشترین مدول خمشی به دست می‌آید. Kumar و همکاران [۱۴] از روش ساخت شیء لایه‌ای (laminated object manufacturing, LOM)، برای ساخت نمونه‌های چندماده‌ای از جنس ABS/TPU مطابق استاندارد ASTM D790 به صورت ساندویچی [۱۵] استفاده کردند. پارامتر متغیر آن‌ها نحوه قرارگیری لایه‌های ABS و پلی‌یورتان گرمانرم (TPU) در کنار یکدیگر بود. نمونه‌ها در دو حالت (ATA): ABS:TPU و (TAT): TPU:ABS:TPU ساخته شدند. بررسی استحکام خمشی و ازدیاد طول تا شکست در بررسی آن‌ها نشان داد که استحکام خمشی و ازدیاد طول تا شکست در هر دو حالت افزایش داشته است، اما حالت ATA افزایش استحکام خمشی بیشتر نسبت به حالت TAT داشته است.

راهکارهای کاهش حفره حین چاپ به فرایندهایی گفته می‌شود که از ابزارهای خارجی برای به حداقل رساندن حفره طی فرایند اکستروژن استفاده می‌کنند [۱۶]. Maidin و همکاران [۱۷] با اعمال امواج فراصوت به بستر ساخت فرایند FFF در سه بسامد ۱۱، ۱۶ و ۲۱ kHz توانستند به نتایج قابل توجهی درباره صافی سطح و ضخامت لایه نمونه‌های چاپ شده از جنس ABS برسند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد، در بسامد ۲۱ kHz نمونه‌های چاپ شده دارای صافی سطح بهبودیافته و ضخامت لایه کمتر هستند. Chen و همکاران [۱۸] اعمال ارتعاش فراصوت به اکسترودر را در راستای اکسترودر در فرایند FFF و اثرگذاری آن روی استحکام کششی PLA بررسی کردند. متغیرهای ورودی آن‌ها بسامد ارتعاش‌های فراصوت در پنج سطح و جهت چاپ نمونه‌ها بود. نتایج نشان داد، بسامد ارتعاش مختلف به ساختارهای سطحی و تخلخل‌های متفاوتی منجر می‌شوند. هنگامی که بسامد ارتعاش به اندازه کافی زیاد بود، استحکام کششی عمودی افزایش یافت. افزون بر این، ارتعاش بر استحکام کششی افقی اثری نداشت. تفنگچی و همکاران [۱۹] ارتعاش‌های فراصوت را عمود بر راستای اکسترودر در فرایند FFF به اکسترودر اعمال کرده و اثر آن را بر استحکام چسبندگی بین لایه‌های نمونه‌های چاپ شده از جنس ABS بررسی کردند. نتایج نشان داد، بسامد ارتعاش ۳۴/۴ kHz موجب افزایش استحکام چسبندگی بین لایه‌ای با مقدار تقریباً ۱۰٪ شد. Ravoori و همکاران [۲۰] فشرده‌سازی رستر رسوب شده با استفاده از غلتک را بررسی کردند. سازوکار استفاده آن‌ها به گونه‌ای است که غلتک با افشانک حرکت می‌کند و رستر را بلافاصله پس از رسوب در زمانی که هنوز نرم است، فشرده می‌کند. آن‌ها اثر نیروی فشرده‌سازی و دمای غلتک را بر کیفیت چاپ بررسی کردند. نتایج نشان داد، فشرده‌سازی رسترها به کاهش ۱۰ برابری تشکیل فضای خالی منجر می‌شود. نتایج آزمون کشش ۱۵۴٪ بهبود در استحکام کششی و ۴۱٪ بهبود در چقرمگی مواد به دلیل استفاده از این فرایند را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود، اعمال نیروی فشاری با غلتک هم‌زمان با فرایند چاپ ممکن است، به چاپ قطعات با خواص و کارایی بهبودیافته کمک کند.

با توجه به پژوهش‌ها می‌توان بیان کرد، مطالعه کمی متعددی درباره اعمال نیروی فشاری، به کمک غلتک حین چاپ سه‌بعدی با استفاده از فناوری اکسترودر (همانند FFF) در فرایند چاپ چندماده‌ای انجام شده است. نوآوری این پژوهش ترکیب چاپ چندماده‌ای با اعمال نیروی فشاری به کمک غلتک حین چاپ اکسترودر است. در این پژوهش، به منظور بررسی اثرهای غیرخطی و برهم‌کنش پارامترهای فرایندی و تعیین شرایط بهینه، از روش سطح پاسخ مبتنی بر طرح مرکب مرکزی (central composite design, CCD) استفاده شده است. این روش نسبت به روش تاگوجی، قابلیت بیشتری در مدل‌سازی رفتار واقعی سامانه و استخراج نقطه بهینه دقیق دارد. اثر هر پارامتر بر

اثر هر پارامتر بر

اثر هر پارامتر بر



شکل ۱- نقشه دوبعدی نمونه‌های آزمون کشش.

Fig. 1 -Drawing of tensile test specimens.

در این پژوهش از چاپگر سه‌بعدی کواتوم (مدل براید ساخت شرکت طراحان صنعت پرشیا) تک‌افشانکی با ابعاد ساخت  $400 \times 250 \times 300$  mm استفاده شد. سازوکار اعمال نیروی فشاری به کمک غلتک به صورت مجموعه الحاقی طراحی و ساخته شده و روی کلگی دستگاه نصب شد، به طوری که غلتک هم‌زمان با حرکت افشانک، بلافاصله پس از اکستروود رستر روی آن حرکت می‌کند. این سازوکار به گونه‌ای طراحی شده است که پیش از سرد شدن و صلب شدن ماده، نیروی فشاری کنترل شده‌ای به رستر تازه اکستروود شده اعمال شود تا تماس بین لایه‌ای افزایش یافته و پیوند بهتری با لایه زیرین ایجاد شود. سامانه غلتک شامل شاسی نگه‌دارنده، محور (shaft)، غلتک و مجموعه فنرهای فشاری است. از یک بلبرینگ با قطر خارجی 15 mm و عرض 5 mm به عنوان غلتک استفاده شد. بدنه نگه‌دارنده از جنس آلومینیم ساخته شد تا ضمن حفظ صلیبت، وزن مجموعه کلگی افزایش نیابد. نیروی فشاری با چهار فنر فشاری و با تنظیم پیچ کنترلی قابل تغییر بوده و مقدار آن به کمک یک سلول بار اندازه‌گیری و کالیبره شد. نیروی اعمالی در بازه 0 g تا 100 g تنظیم شد. برای انجام آزمون کشش از دستگاه آزمون کشش SANTAM STM-400 (ساخت شرکت سنتام) با سرعت آزمایش 5 mm/min

جدول ۱- مقدار پارامترهای ثابت فرایند چاپ نمونه‌ها.

Table 1- Values of fixed parameters of the sample printing process.

| Parameter              | Value |
|------------------------|-------|
| Print temperature (°C) | 230   |
| Bed temperature (°C)   | 80    |
| Infill (%)             | 100   |
| Nozzle diameter (mm)   | 0.4   |
| layer height (mm)      | 0.2   |

استحکام کششی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی فرایند FFF به همراه اعمال نیروی فشاری به کمک غلتک حین چاپ، بررسی شد.

## تجربی

### مواد

برای چاپ نمونه‌ها از رشته‌های پلی (لاکتیک اسید) (PLA) و آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS) با قطر اسمی 1/75 mm، محصول Y&S چین استفاده شد.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

رشته‌های PLA به دلیل دمای چاپ کمتر، پایداری ابعادی مناسب، کیفیت سطح زیاد و تمایل کمتر به تاب‌برداری در فرایند FFF، انتخاب شد. در مقابل، از رشته ABS به دلیل چقرمگی بیشتر، مقاومت ضربه‌ای مناسب، پایداری گرمایی بهتر و کاربرد گسترده در قطعات مهندسی که نیازمند استحکام و دوام بیشتر هستند، استفاده شد. به منظور کاهش مشکلاتی نظیر جمع‌شدگی گرمایی و تاب‌برداری، چاپ آن در شرایط دمایی کنترل شده انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش با نرم‌افزار SOLIDWORKS طراحی شدند (شکل ۱). در ادامه، نمونه‌ها با نرم‌افزار Simplify3D V4.1.2 به یک فایل لایه‌لایه تبدیل شدند. با توجه به طراحی آزمایش، در مجموع 27 نمونه چاپ شد.

نمونه‌ها در سه حالت ABS خالص، PLA خالص و ترکیب PLA و ABS ساخته شدند. برای چاپ نمونه‌های دو ماده‌ای ABS/PLA با استفاده از چاپگر تک‌افشانکی، مدل سه‌بعدی نمونه‌ها در نرم‌افزار Simplify3D به گونه‌ای لایه‌بندی شد که ضخامت مشخصی از قطعه به هر یک از مواد اختصاص یابد. در فرایند چاپ، ابتدا لایه‌های مربوط به ماده اول چاپ شد، سپس، فرایند به صورت دستی متوقف شد، رشته از افشانک خارج و رشته ماده دوم بارگذاری شد. پس از تنظیم دوباره شرایط چاپ، فرایند ساخت ادامه یافت تا ساختار دو ماده‌ای به صورت کامل تشکیل شود. این روش امکان تولید نمونه‌های چند ماده‌ای با کنترل دقیق توزیع لایه‌ها را بدون استفاده از چاپگر دوافشانکی فراهم می‌کند. قطر افشانک، ارتفاع لایه، دمای بستر ساخت، تراکم پرشوندگی و دمای چاپ به عنوان پارامترهای ثابت چاپ در نظر گرفته شدند که در جدول ۱، مقادیر آن‌ها آمده است. مقدار این پارامترها بر اساس تجربه نویسندگان و نیز مراجع [۱۱، ۲۱] انتخاب شدند.



جدول ۳- طراحی آزمایش به همراه پاسخ استحکام کششی.

Table 3. Design of experiment with tensile strength response.

| NO. | Run No. | Designation  | Print speed (mm/min) | Force (g) | Material | Tensile strength (MPa) |
|-----|---------|--------------|----------------------|-----------|----------|------------------------|
| 1   | 3       | S1/F0/A      | 1000                 | 0         | ABS      | 27.07                  |
| 2   | 15      | S1/F100/A    | 1000                 | 100       | ABS      | 25.55                  |
| 3   | 22      | S1/F50/A     | 1000                 | 50        | ABS      | 30.64                  |
| 4   | 7       | S1.5/F50/A   | 1500                 | 50        | ABS      | 32.85                  |
| 5   | 10      | S1.5/F100/A  | 1500                 | 100       | ABS      | 29.50                  |
| 6   | 13      | S1.5/F0/A    | 1500                 | 0         | ABS      | 30.40                  |
| 7   | 5       | S2/F50/A     | 2000                 | 50        | ABS      | 31.91                  |
| 8   | 17      | S2/F0/A      | 2000                 | 0         | ABS      | 29.12                  |
| 9   | 20      | S2/F100/A    | 2000                 | 100       | ABS      | 27.06                  |
| 10  | 9       | S1/F50/P     | 1000                 | 50        | PLA      | 41.46                  |
| 11  | 19      | S1/F0/P      | 1000                 | 0         | PLA      | 38.01                  |
| 12  | 27      | S1/F100/P    | 1000                 | 100       | PLA      | 41.46                  |
| 13  | 1       | S1.5/F50/P   | 1500                 | 50        | PLA      | 41.82                  |
| 14  | 4       | S1.5/F100/P  | 1500                 | 100       | PLA      | 40.99                  |
| 15  | 16      | S1.5/F0/P    | 1500                 | 0         | PLA      | 39.45                  |
| 16  | 18      | S2/F0/P      | 2000                 | 0         | PLA      | 38.55                  |
| 17  | 24      | S2/F50/P     | 2000                 | 50        | PLA      | 41.15                  |
| 18  | 26      | S2/F100/P    | 2000                 | 100       | PLA      | 42.75                  |
| 19  | 2       | S1/F0/AP     | 1000                 | 0         | ABS/PLA  | 33.24                  |
| 20  | 23      | S1/F50/AP    | 1000                 | 50        | ABS/PLA  | 34.13                  |
| 21  | 25      | S1/F100/AP   | 1000                 | 100       | ABS/PLA  | 28.62                  |
| 22  | 8       | S1.5/F50/AP  | 1500                 | 50        | ABS/PLA  | 12.61                  |
| 23  | 11      | S1.5/F100/AP | 1500                 | 100       | ABS/PLA  | 34.27                  |
| 24  | 12      | S1.5/F0/AP   | 1500                 | 0         | ABS/PLA  | 32.65                  |
| 25  | 6       | S2/F50/AP    | 2000                 | 50        | ABS/PLA  | 32.81                  |
| 26  | 14      | S2/F0/AP     | 2000                 | 0         | ABS/PLA  | 32.81                  |
| 27  | 21      | S2/F100/AP   | 2000                 | 100       | ABS/PLA  | 31.64                  |

پارامتر استحکام کششی را با مقدار قابل توجهی تحت تاثیر قرار می دهد.

با توجه به موارد بیان شده، رابطه قابل استفاده برای پیش بینی مقدار استحکام کششی نمونه ها در شرایط اعلام شده به شرح زیر است:  
معادله نهایی برحسب فاکتورهای واقعی

ABS

$$TS = (-13066.78 + 52.11S + 252.05F - 0.0166S^2 - 2.87F^2)^{(1/3)} \quad (1)$$

PLA

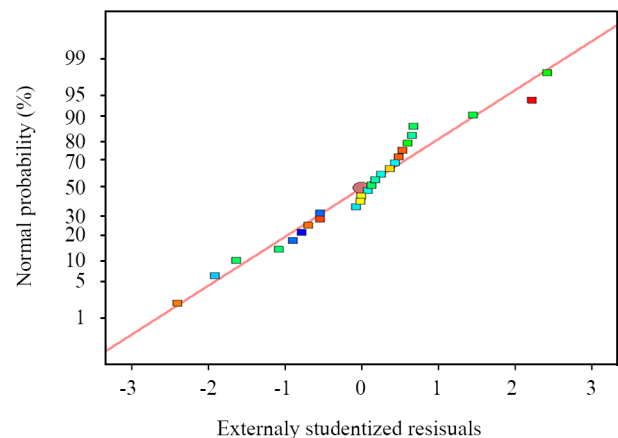
$$TS = (19352.34 + 52.11S + 435.79F - 0.01656S^2 - 2.87F^2)^{(1/3)} \quad (2)$$

ABS/PLA

$$TS = (-2993.74 + 52.11S + 248.41F - 0.0166S^2 - 2.87F^2)^{(1/3)} \quad (3)$$

TS، استحکام کششی؛ S، سرعت چاپ و F نیروی غلتک است.

مطابق نتایج جدول ۴، مقدار زیاد ضریب تعیین ( $R^2 = 97/52\%$ ) و



شکل ۳- نمودار درصد احتمال نرمال.

Fig. 3. Normal Plot of Residuals.

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس و آماره برازش برای پاسخ استحکام کششی.

Table 4. Results of analysis of variance and fit statistics for tensile strength response.

| Source         | Sum of Squares      | df | Mean Square         | F-value | p-value* |
|----------------|---------------------|----|---------------------|---------|----------|
| Model          | $9.315 \times 10^9$ | 8  | $1.164 \times 10^9$ | 83.41   | < 0.0001 |
| A-Speed        | $2.645 \times 10^9$ | 1  | $2.645 \times 10^7$ | 1.89    | 0.1865   |
| B-Force        | $2.851 \times 10^9$ | 1  | $2.851 \times 10^7$ | 2.04    | 0.1711   |
| C-Material     | $8.439 \times 10^9$ | 2  | $4.220 \times 10^9$ | 302.26  | < 0.0001 |
| BC             | $3.444 \times 10^8$ | 2  | $1.722 \times 10^8$ | 12.34   | 0.0005   |
| A <sup>2</sup> | $9.351 \times 10^7$ | 1  | $9.351 \times 10^7$ | 6.70    | 0.0191   |
| B <sup>2</sup> | $2.806 \times 10^8$ | 1  | $2.806 \times 10^8$ | 20.10   | 0.0003   |
| Residual       | $2.373 \times 10^7$ | 17 | $1.396 \times 10^7$ |         |          |
| Cor Total      | $9.553 \times 10^9$ | 25 |                     |         |          |

Fit Statistics  $R^2 = 97.52\%$  || Adjusted  $R^2 = 96.35$  || Predicted  $R^2 = 93.86$  || Adequate Precision = 25.5406

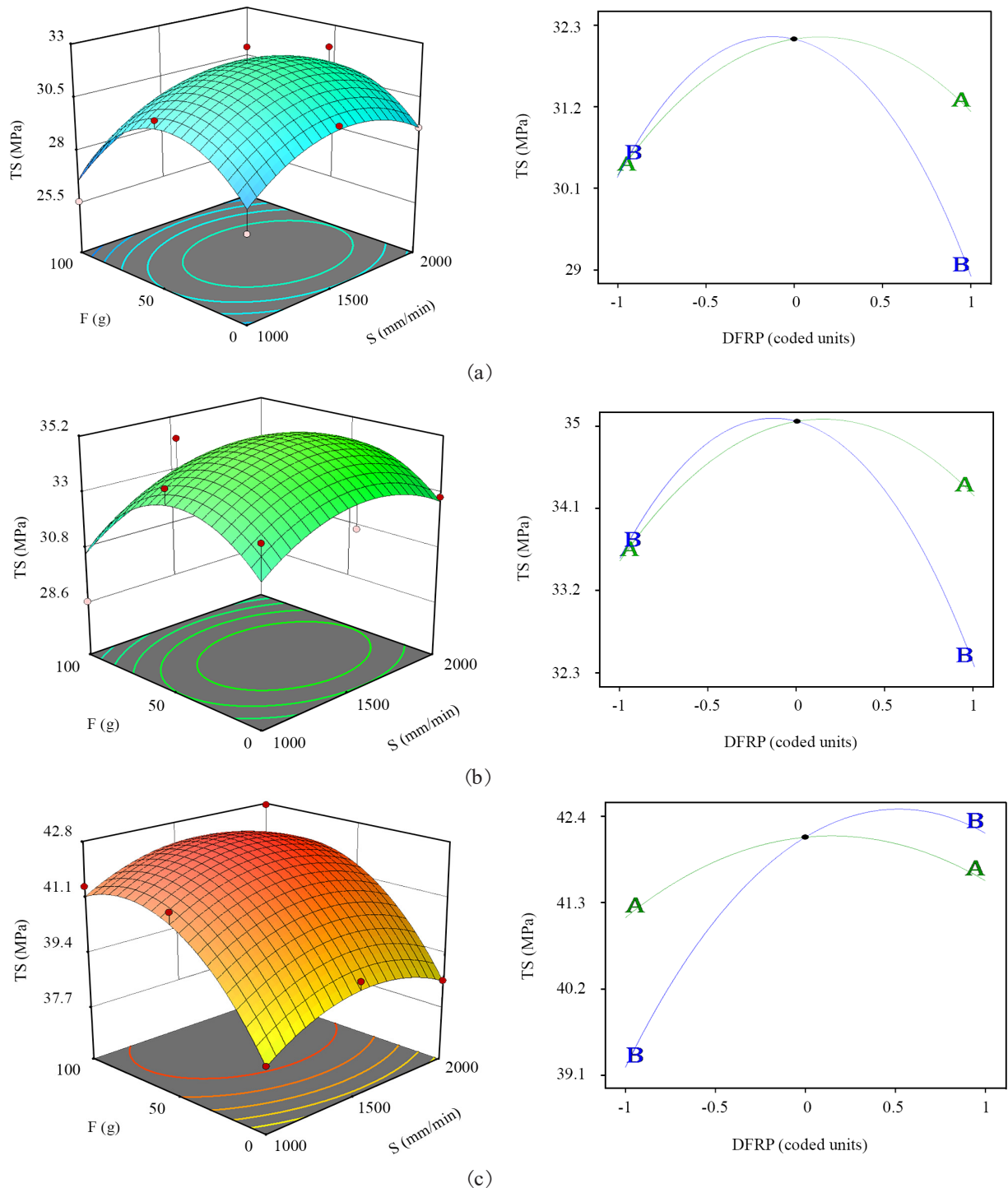
\* significant

بین لایه‌ای بهتر، انتقال تنش یکنواخت‌تر انجام می‌شود و استحکام کششی افزایش می‌یابد، [۲۰، ۲۲]. همچنین افزایش سرعت چاپ بر دینامیک گرمایی مذاب اثرگذار است. در سرعت چاپ متوسط، PLA مذاب انرژی گرمایی و زمان ماندگاری کافی را برای فعال کردن نفوذ بین‌لایه‌ای و بلورشدن مداوم را حفظ کرده است که به موجب آن استحکام کششی افزایش یافته است. با افزایش سرعت چاپ از مقدار متوسط ماده فرصت کافی برای تشکیل چسبندگی بین‌لایه‌ای را نداشته و موجب کاهش استحکام کششی شده است. همچنین این پدیده موجب افزایش احتمال تشکیل تخلخل شده و حفره را نیز بیشتر می‌کند. با کاهش مقدار سرعت چاپ از مقدار سرعت متوسط احتمال قرارگیری ماده در معرض تخریب گرمایی و تجمع تنش پسماند ناشی از گرمایش بلندمدت نیز افزایش می‌یابد [۲۳].

شکل ۵، نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های با بیشترین استحکام همراه با نمونه‌های بدون اعمال نیروی غلتک را نشان می‌دهد. در شکل ۵ (a) و (b)، مشهود است که اعمال نیروی غلتک موجب افزایش چقرمگی و استحکام کششی نمونه‌های تک‌ماده‌ای شده است. اما در حالتی که نمونه‌ها به صورت چندماده‌ای چاپ شده‌اند، نیروی غلتک اثر زیادی روی خواص مکانیکی آنها نداشته است که به دلیل ماهیت متفاوت PLA و ABS است (شکل ۵ (c)). با توجه به نحوه اعمال نیرو به رسترهای گرم و نرم تازه چاپ شده انتظار می‌رود، رسترها دچار تغییر در ضخامت لایه شوند [۲۰]. مطابق شکل ۴، بیشینه استحکام کششی برای هر سه ماده در محدوده سرعت چاپ متوسط و نیروی غلتک میانی مشاهده می‌شود که با داده‌های کمی جدول ۳ هم‌خوانی دارد. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد، اعمال نیروی غلتک افزون بر افزایش مقدار بیشینه تنش، موجب افزایش چقرمگی و بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌ها شده است.

اختلاف کم بین  $R^2$  تعدیل شده و پیش‌بینی شده، بیانگر برازش مناسب مدل آماری با داده‌های تجربی است. همچنین مقدار Adequate Precision برابر ۲۵/۵۴، کفایت مدل برای تحلیل و پیش‌بینی استحکام کششی را تأیید می‌کند. مقادیر p نشان می‌دهد، جنس رشته و برهم‌کنش آن با نیروی غلتک اثر معناداری بر استحکام کششی دارند ( $p > 0.05$ )، در حالی که اثرهای درجه دوم سرعت چاپ و نیروی غلتک وجود رفتار غیرخطی و نقطه بهینه را تأیید می‌کند. هم‌خوانی این نتایج با داده‌های تجربی جدول ۳ و توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۳، اعتبار مدل آماری ارائه شده را تأیید می‌کند. در شکل ۴، نمودارهای تغییرات و سطوح سه‌بعدی برای پاسخ استحکام کششی در سه سطح متغیر کمی جنس نمونه نشان داده شده است. شکل ۴ (a) و (b) نشان می‌دهد، در دو حالت استفاده از ABS/PLA و ABS رفتار پاسخ مشابه است و در میانه مقدار پارامترهای کمی سرعت چاپ و نیروی غلتک، استحکام کششی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در حالتی که تنها از جنس PLA برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده باشد، استحکام کششی بیشینه در حالتی اتفاق می‌افتد که نیروی غلتک در مقداری بین ۵۰ g تا ۱۰۰ g باشد و مقدار سرعت چاپ در میانه سطوح انتخاب شده این پژوهش یعنی مقدار ۱۵۰۰ mm/min قرار گیرد (شکل ۴ (c)).

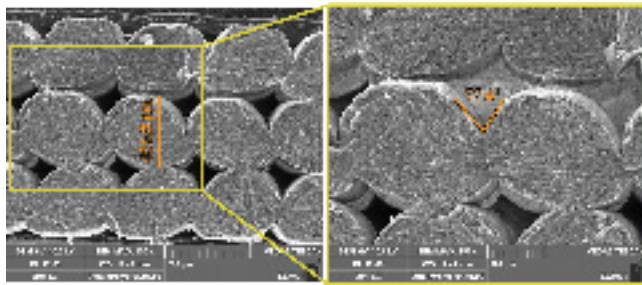
نقطه مشترک بین تمام سطوح متغیر کیفی جنس نمونه‌ها روند افزایشی-کاهش آن‌هاست. به عبارت دیگر، در تمام سطوح مشاهده شده ابتدا استحکام کششی افزایش یافته و سپس روند نزولی داشته است. به عبارت دیگر، نقطه میانی طراحی آزمایش (مقدار متوسط پارامترهای سرعت چاپ و نیروی غلتک) بیشترین استحکام کششی را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. اعمال نیروی غلتک موجب کاهش ضخامت لایه می‌شود که به بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای و افزایش زاویه برش بین رسترها، منجر می‌شود. در نتیجه چسبندگی



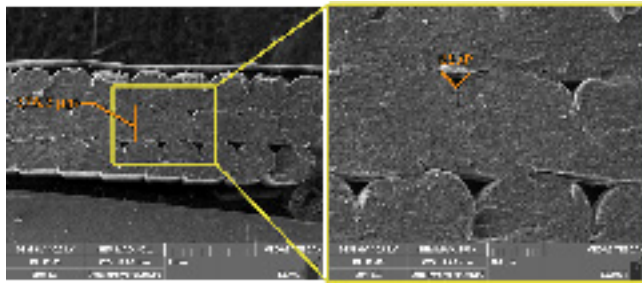
شکل ۴- نمودارهای اغتشاشی و سطوح سه‌بعدی برای پاسخ استحکام کششی در سه سطح متغیر کمی: (a) ABS، (b) PLA، و (c) ABS/PLA.  
 Fig. 4. Disturbance diagrams and three-dimensional surfaces for the tensile strength response at three levels of quantitative variation of the sample material of (a) PLA, (b) ABS, and (c) ABS/PLA.

راستای استرود موجب افزایش زاویه برش سطح مشترک بین رسترها می‌شود که به موجب آن خواص مکانیکی نمونه افزایش می‌یابد [۲۴]. همچنین اعمال نیرو به کمک غلتک موجب هم‌راستایی

کاهش ضخامت لایه موجب کاهش تخلخل و حفره‌ها و افزایش استحکام چسبندگی بین‌لایه‌ای از راه افزایش هم‌پوشانی بین‌لایه‌ای نمونه‌ها هنگام چاپ خواهد شد [۲۲]. اعمال نیروی فشاری در



(a)



(b)

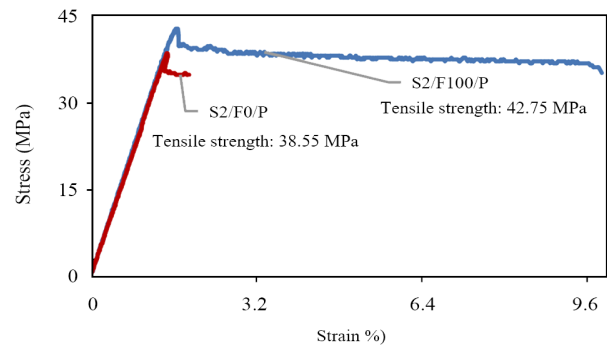
شکل ۶- تصاویر FE-SEM از سطح مقطع شکست نمونه: (a) بدون اعمال نیروی غلتک و (b) با اعمال نیروی غلتک.

Fig. 6. FE-SEM images of the fracture cross-section of the sample (a) without applying roller force and (b) with applying roller force.

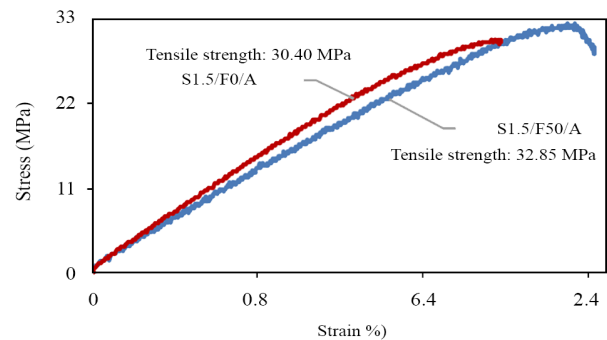
معنادار بوده و می‌تواند در کاربردهای صنعتی نظیر قطعات سازه‌ای سبک، بست‌ها (fixture) و نمونه‌های عملکردی چاپ‌شده با روش FFF به افزایش ضریب اطمینان و بهبود دوام قطعه منجر شود. تصاویر FE-SEM ارائه‌شده مربوط به سطح مقطع شکست نمونه‌های چاپ‌شده در شرایط اعمال و عدم اعمال نیروی غلتک بوده و تمرکز آن‌ها بررسی ریزساختار و کیفیت همجوشی بین لایه‌ای است. شکل ۶ (a) نمونه بدون اعمال نیروی غلتک و شکل ۶ (b) با نیروی غلتک را نشان می‌دهد. در این تصاویر مشخص است، ضخامت لایه به مقدار ۷/۵۰٪ کاهش داشته است. همان‌طور که بیان شد، نیروی غلتک موجب افزایش زاویه برش سطح مشترک بین رسترها می‌شود، شکل ۶ (a) و (b) به وضوح افزایش ۹/۸۲٪ زاویه برش سطح مشترک بین رسترها را نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

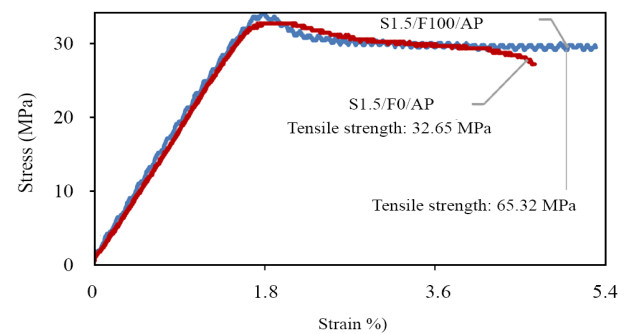
در این پژوهش، اثر نیروی فشاری غلتک حین فرایند چاپ سه‌بعدی



(a)



(b)



(c)

شکل ۵- نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌ها از جنس: (a) PLA

(b) ABS و (c) ABS/PLA

Fig. 5. Stress-strain diagrams for samples made of (a) PLA, (b) ABS, and (c) ABS/PLA.

زنجر پلیمر با راستای اعمال نیرو در آزمون کشش خواهد شد که به موجب آن استحکام کششی افزایش می‌یابد [۲۵]. بیشترین استحکام به‌دست‌آمده از آزمون کشش برای نمونه S2/F100/P است. مقایسه آن با نمونه S2/F0/P نشان می‌دهد، اعمال نیروی غلتک در فرایند چاپ FFF موجب افزایش ۱۰/۹۰٪ استحکام شده است. اگرچه مقدار افزایش استحکام کششی حدود ۱۰٪ است، این بهبود با توجه به عدم تغییر ماده و عدم نیاز به عملیات پس‌پردازش، از نظر مهندسی

نیز با نشان دادن هم‌جوشی بهتر بین لایه‌ها، کاهش ضخامت لایه‌ها و کاهش فضای خالی بین رسترها، به‌صورت چشمی تأییدکننده تحلیل‌های مکانیکی به‌دست‌آمده هستند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت، به‌کارگیری نیروی فشاری غلتک به‌عنوان سازوکار هم‌زمان با فرایند چاپ، راهکار مؤثری برای بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده با روش FFF است، بدون آنکه نیاز به عملیات ثانویه مانند عملیات گرمایی یا پوشش‌دهی سطحی وجود داشته باشد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد، روش چاپ FFF مجهز به غلتک فشاری، می‌تواند به‌عنوان روشی ساده، اقتصادی و کارآمد برای تولید قطعات پلیمری با استحکام زیاد در مقیاس صنعتی استفاده شود. این نتایج می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی در زمینه چاپ چندماده‌ای و ترکیب غلتک با سایر روش‌های بهبود درجا (in-situ) در چاپ سه‌بعدی باشد.

با روش ساخت رشته مذاب بر خواص مکانیکی قطعات از جنس‌های PLA، ABS و ترکیب PLA/ABS بررسی شد. نتایج طراحی آزمایش (CCD) و تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد، جنس رشته و نیروی فشاری غلتک بیشترین اثر را بر استحکام کششی دارند و اثر متقابل این دو پارامتر نیز از نظر آماری معنادار است ( $p > 0.05$ ). اعمال نیروی فشاری به‌کمک غلتک موجب افزایش چسبندگی بین‌لایه‌ای، کاهش ضخامت لایه‌ها و بهبود راستای زنجیرهای پلیمری در جهت اعمال نیرو می‌شود. این عوامل با کاهش تخلخل‌های داخلی و افزایش ناحیه مؤثر انتقال تنش، به شکل محسوس باعث افزایش استحکام کششی و چقرمگی نمونه‌ها شدند. مقایسه نمونه‌های دارای غلتک با نمونه‌های بدون غلتک نشان داد، در شرایط بهینه، استحکام کششی تا حدود ۹/۱۰٪ افزایش یافته است که این مقدار برای مواد PLA و PLA/ABS بیشترین مقدار بهبود را داشته است. تصاویر FE-SEM

## مراجع

- Diegel O., Nordin A., and Motte D., *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Springer, 2020.
- Coogan T.J. and Kazmer D.O., Prediction of Interlayer Strength in Material Extrusion Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.*, **35**, 101368, 2020.
- Lepoivre A., Boyard N., Levy A., and Sobotka V., Heat Transfer and Adhesion Study for the FFF Additive Manufacturing Process, *Procedia Manuf.*, **47**, 948-955, 2020.
- Dey A., Roan I.N., Eagle and Yodo N., A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication, *J. Manuf. Mater. Process.*, **5**, 3, 2021.
- Duarte C.T., de Queiroz H.F.M., Neto J.S.S., Cavalcanti D.K.K., and Banea M.D., Evaluation of Durability of 3D-Printed Multi-Material Parts for Potential Applications in Structures Exposed to Marine Environments, *Procedia Struct. Integr.*, **53**, 299-308, 2024.
- Baca D. and Ahmad R., The Impact on the Mechanical Properties of Multi-Material Polymers Fabricated with a Single Mixing Nozzle and Multi-Nozzle Systems via Fused Deposition Modeling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **106**, 4509-4520, 2020.
- Naveed N., Investigate The Effects of Process Parameters on Material Properties and Microstructural Changes of 3D-Printed Specimens Using Fused Deposition Modelling (FDM), *Mater. Technol.*, **36**, 317-330, 2021.
- Bardiya S., Jerald J., and Satheeshkumar V., The Impact of Process Parameters on the Tensile Strength, Flexural Strength and The Manufacturing Time of Fused Filament Fabricated (FFF) Parts, *Mater. Today: Proc.*, **39**, 1362-1366, 2021.
- Moradi M., Hashemi R., and Kasaeian-Naeini M., Experimental Investigation of Parameters in Fused Filament Fabrication 3D Printing Process of ABS Plus Using Response Surface Methodology, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023.
- Rodríguez-Reyna S.L., Mata C., Díaz-Aguilera J.H., Acevedo-Parra H.R., and Tapia F., Mechanical Properties Optimization For PLA, ABS and Nylon+CF Manufactured by 3D FDM Printing, *Mater. Today Commun.*, **33**, 104774, 2022.
- Khodae A., Abedini V., and Kami A., Effects of Fused Filament Fabrication (FFF) Process Parameters on Tensile and Flexural Properties of ABS/PLA Multi-Material, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **46**, 628, 2024.
- Baca Lopez D.M. and Ahmad R., Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling, *Polymers*, **12**, 2020.
- Wang Z., Wang L., Tang F., and Shen C., PLA-Based Composite Panels Prepared via Multi-Material Fused Filament Fabrication and Associated Investigation of Process Parameters on Flexural Properties of the Fabricated Composite, *Polymers*, **16**, 2024.
- Kumar S., Singh I., Kolor S.S.R., Kumar D., and Yahya M.Y., On Laminated Object Manufactured FDM-Printed ABS/TPU Multimaterial Specimens: An Insight into Mechanical and

- Morphological Characteristics, *Polymers*, **14**, 2022.
15. ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017.
  16. Sun X., Mazur M., and Cheng C.-T., A Review of Void Reduction Strategies in Material Extrusion-Based Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.*, **67**, 103463, 2023
  17. Maidin S., Muhamad M.K., and Pei E., Feasibility Study of Ultrasonic Frequency Application on FDM to Improve Parts Surface Finish, *J. Teknol.*, **77**, 2015.
  18. Chen F., Xu Q., Huang F., Xie Z., and Fang H., Effect of Nozzle Vibration at Different Frequencies on Surface Structures and Tensile Properties of PLA Parts Printed by FDM, *Mater. Lett.*, **325**, 132612, 2022.
  19. Tofangchi A., Han P., Izquierdo J., Iyengar A., and Hsu K., Effect of Ultrasonic Vibration on Interlayer Adhesion in Fused Filament Fabrication 3D Printed ABS, *Polymers*, **11**, 2019
  20. Ravoori D., Salvi S., Prajapati H., Qasaimeh M., Adnan A., and Jain A., Void Reduction in Fused Filament Fabrication (FFF) Through In Situ Nozzle-Integrated Compression Rolling of Deposited Filaments, *Virtual Phys. Prototyp.*, **16**, 146-159, 2021
  21. Safari F., Kami A., and Abedini V., 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Composites: A Review of the Processing, Pre- and Post-Processing Effects on Mechanical Properties, *Polym. Polym. Compos.*, **30**, 1-26, 2022
  22. Jadali A., Abedini V., and Kami A., Improving the Tensile Strength of 3D-Printed Polymer Parts Using the Fused Deposition Modeling by Hot Pressing and Optimizing the Process Parameters, *Karafan J.*, **21**, 231-253, 2024
  23. Eldeeb I.S., Esmael E., Ebied S., Diab M.R., M. Dekis, M.A. Petrov, Zayed A.A., and Egiza M., Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA, *J. Manuf. Mater. Process*, **9**, 2025.
  24. Rezaee A. and Adnan A., On the Elastic Stress Singularities and Mode I Notch Stress Intensity Factor for 3D Printed Polymers, *Eng. Fract. Mech.*, **204**, 235-245, 2018
  25. Yang F. and Pitchumani R., Interlaminar Contact Development during Thermoplastic Fusion Bonding, *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 424-438, 2002.