



## بررسی تجربی نقش پارامترهای ساخت افزودنی بر خواص مکانیکی قطعه ساخت افزودنی از جنس پلی اتیلن ترفتالات گلیکول در فرایند مدل سازی رسوب ذوب شده

سید مصطفی میرطبايي<sup>۱\*</sup>، علی اصغر نادری<sup>۱</sup>، مهدی علیزاده یوسفی بابکی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: mirtabaei@iamu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۳ شهریور ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

ساخت افزودنی

پلی اتیلن ترفتالات گلیکول

ضخامت لایه

نرخ تغذیه

چگالی پرشدگی

فناوری های ساخت افزودنی در دهه های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته اند. در میان این روش ها، مدل سازی رسوب ذوب شده، به دلیل توانایی در تولید قطعات پیچیده با هزینه مناسب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی بر خواص مکانیکی قطعه ساخته شده از ماده پلی اتیلن ترفتالات گلیکول در این فرایند می پردازد. سه پارامتر اصلی شامل ضخامت لایه، نرخ تغذیه و چگالی پرشدگی مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه های استاندارد برای آزمون های کشش و خمش تولید و مورد آزمایش قرار گرفتند. برای ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترها، از تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج نشان داد که ضخامت لایه، با سهم ۵۶٪ برای استحکام کششی و ۳۷/۹۸٪ برای استحکام خمشی، بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی در مقایسه با دیگر پارامترها دارد. برای دستیابی به خواص کششی مطلوب، ضخامت لایه و نرخ تغذیه باید کمینه و چگالی پرشدگی بالا باشد. در مورد خواص خمشی، ضخامت لایه کم، نرخ تغذیه متوسط و چگالی پرشدگی پایین، نتایج بهتری نشان داد. این مطالعه اهمیت بهینه سازی پارامترهای فرایندی در چاپ سه بعدی PETG را برجسته می کند و می تواند به بهبود کیفیت و کارایی قطعات تولیدی در صنایع و کاربردهای مختلف کمک نماید.

## Experimental investigation of the role of additive manufacturing parameters on the mechanical properties of PETG parts in the FDM process

Seyed Mostafa Mirtabaei<sup>1\*</sup>, Aliasghar Naderi<sup>1</sup>, Mahdi Alizadeh Yousefi Babaki<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran

2- MSc Graduate, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: mirtabaei@iamu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 19 June 2024

Accepted: 24 August 2024

#### Keywords:

Additive Manufacturing  
Polyethylene Terephthalate Glycol  
Layer Thickness  
Feed Rate  
Infill Density

### Abstract

Additive manufacturing technologies have seen significant advancements in recent decades. Among these methods, Fused Deposition Modeling has garnered considerable attention due to its ability to produce complex parts at a reasonable cost. This research investigates the impact of process parameters on the mechanical properties of parts made from glycol-modified polyethylene terephthalate in this process. Three main parameters were studied: layer thickness, feed rate, and infill density. Standard specimens were produced for tensile and flexural tests. Analysis of Variance was used to assess the impact of each parameter. The results indicated that layer thickness had the greatest effect on mechanical properties compared to the other parameters, contributing 56% to tensile strength and 37.98% to flexural strength. To achieve optimal tensile properties, both layer thickness and feed rate should be minimized, while infill density should be high. For flexural properties, a low layer thickness, moderate feed rate, and low infill density yielded better results. This study highlights the importance of optimizing process parameters in the 3D printing of glycol-modified polyethylene terephthalate and can contribute to improving the quality and performance of manufactured parts across various industries and applications.

### Please cite this article using:

Mirtabaei SM, Naderi A, Alizadeh Yousefi Babaki M. Experimental investigation of the role of additive manufacturing parameters on the mechanical properties of PETG parts in the FDM process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Aug 22;11(6):16-28. doi: 10.22034/IJME.2024.463591.1973 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

در پنج دهه گذشته، صنایع استانداردها و محدودیت‌های خود را در مسیر تولید از سطح کنترل دستی ماشین‌ها به کنترل کامپیوتری و ساخت افزودنی<sup>۱</sup> یا نمونه‌سازی سریع<sup>۲</sup> ارتقاء داده‌اند. ساخت افزودنی، فرایندی که توجه‌ها را از سال ۱۹۸۱ به خود جلب کرد، پس از اختراع دو سیستم نمونه‌سازی سریع فوتوپلیمر توسط هیدئو کاداما از ژاپن مورد توجه قرار گرفت [۱]. با گذشت زمان، با اختراع تکنیک چاپگر استریولیتوگرافی<sup>۳</sup> توسط چارلز هال در سال ۱۹۸۳ محبوبیت بیشتری پیدا کرد [۲]. ساخت افزودنی یک فرایند تولید است که در آن قطعه با اتصال لایه‌های بسیار نازک از مواد خام (که گرم شده و به شکل مذاب در می‌آیند) ساخته می‌شود. در ابتدا، روش‌ها محدود به مواد مایع بود، اما بعدها با غلبه بر این محدودیت‌ها، مواد مورد استفاده به پودر و مواد ورقه‌ای نیز گسترش یافت. بر اساس روش‌های فرایندی مختلف، چندین تکنیک در حوزه تولید افزودنی معرفی شد؛ مدل‌سازی رسوب ذوب شده<sup>۴</sup> یکی از آن‌ها است [۳]. در تکنیک FDM، یک مدل سه‌بعدی با اکستروژن شدن رشته‌های کوچک از مواد مذاب به صورت لایه‌لایه تولید می‌شود که سپس سخت شده و قطعه را تشکیل می‌دهد. تکنیک FDM توسط اسکات کرامپ در اواخر دهه ۱۹۸۰ ابداع [۴] و سپس در سال ۱۹۹۰ توسط شرکت استراتاسیس<sup>۵</sup> پیاده‌سازی شد.

گزاره و همکاران [۵] به طور مفصل تاریخچه چاپ سه‌بعدی، انواع فرایندهای مرتبط و همچنین اصول کاری هر تکنیک را توضیح داده‌اند. نویسندگان در مورد مواد مختلف موجود برای ساخت یک طراحی سه‌بعدی و مزایا و محدودیت‌های هر یک نیز توضیح داده‌اند. گونایدین و همکاران [۶] عوامل مؤثر بر کیفیت چاپ را بررسی کرده‌اند و برای دستیابی به نتایج بهتر، توصیه‌هایی مانند نبود جریان هوا در اتاق، صاف و محکم بودن سطح قرارگیری چاپگر و استفاده از فیلامنت با کیفیت بالا را ارائه داده‌اند. انگکووست و همکاران [۷] در مقاله خود نتیجه‌گیری کرده‌اند که الگوهای پرشدگی داخلی تأثیر زیادی بر استحکام خمشی ندارند. براهنی و همکاران [۸] در پژوهش اخیر خود پارامترهای تأثیرگذار فرایندی شامل سرعت چاپ، درصد پر شدن و دمای نازل را برای ماده PLA بررسی کرده‌اند. همچنین در ادامه تأثیر هندسه قطعه بر زبری سطح نهایی و دقت ابعادی را مورد بررسی قرار دادند. پاداهی و همکاران [۹] فرایند FDM را در ضخامت‌های لایه مختلف و با چگالی پرشدگی متوسط بررسی کرده و دریافتند که با تغییر ضخامت لایه، مقادیر مقاومت کششی به دست آمده متفاوت است. ضخامت لایه نقش مهمی در مقاومت کششی نمونه با مقادیر مختلف ضخامت دارد. بسواراج و همکاران [۱۰] در مورد مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده کار کرده و مقادیر ضخامت لایه را مقایسه کرده‌اند. سپس نویسندگان آزمایشاتی انجام داده و نتایج را با استفاده از روش تاگوچی و نسبت‌های سیگنال به نویز (S/N) تحلیل کرده‌اند. آن‌ها نتیجه‌گیری کرده‌اند که در ضخامت‌های کمتر لایه، مقاومت کششی نمونه بهبود می‌یابد [۱۱].

مطالعات دقیق کارهای انجام شده و نتایج ارائه شده توسط محققان نشان داد که در میان مواد پرکاربرد در ساخت افزودنی FDM از قبیل PLA [۱۲]، ABS [۱۳، ۱۴] و PETG، تحقیقات کمتری بر روی ماده پلی اتیلن ترفتالات گلیکول انجام شده است. از طرفی PETG به عنوان یک ماده ترموپلاستیک با خواص مکانیکی مناسب و قابلیت چاپ سه‌بعدی بالا، پتانسیل زیادی در کاربردهای مختلف صنعتی دارد. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات موجود در این زمینه محدود بوده و نیاز به پژوهش‌های بیشتری احساس می‌شود.

این پژوهش بر ضرورت مطالعه بر روی ماده PETG متمرکز است. روش ساخت مورد استفاده در این تحقیق، مدل‌سازی رسوب ذوب شده است؛ که یکی از پرکاربردترین فناوری‌های چاپ سه‌بعدی می‌باشد. تمرکز اصلی این مطالعه بر تغییر پارامترهای فرایندی شامل ضخامت لایه، نرخ تغذیه و چگالی پرشدگی و مشاهده تأثیر این تغییرات از طریق انجام تست‌های مکانیکی مانند خمش و کشش است. این تغییرات به منظور بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات تولید شده از PETG صورت می‌گیرد.

نوآوری این پژوهش در استفاده از تحلیل واریانس برای تعیین بهترین پارامترهای فرایندی نهفته است. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمون‌های مکانیکی، این تحقیق قادر خواهد بود بهترین پارامتری که بیشترین تأثیر را در مقایسه با سایر پارامترهای فرایندی دارد، شناسایی کند. این نتایج می‌تواند به بهبود فرایندهای تولید قطعات PETG و افزایش کارایی و کیفیت این قطعات کمک کند.

<sup>1</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>2</sup> Rapid Prototyping

<sup>3</sup> Stereolithography (SLA)

<sup>4</sup> Fused Deposition Modeling (FDM)

<sup>5</sup> Stratasys

نتایج این پژوهش در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، هوافضا، و تجهیزات پزشکی قابل استفاده است. با بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی در چاپ سه‌بعدی، می‌توان قطعاتی با خواص مکانیکی بهتر و مقاومت بالاتر تولید کرد که این امر موجب افزایش طول عمر و کارایی این قطعات در کاربردهای مختلف خواهد شد.

## ۲- شیوه انجام پژوهش

بخش زیر به توضیح روش‌های آزمایشگاهی انجام شده و مراحل مرتبط با آن شامل مواد فیلامنت، مدل‌سازی رسوب ذوب شده، ساخت نمونه‌ها و خواص مکانیکی می‌پردازد.

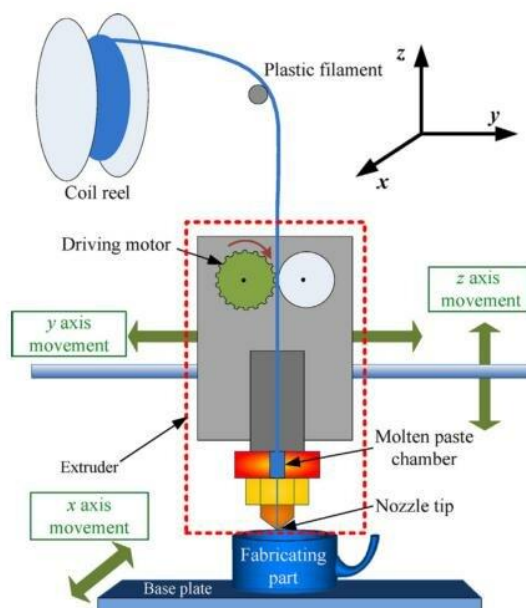
### ۲-۱- مواد فیلامنت

برای ساخت نمونه‌ها از فیلامنت پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) که یک نوع ترموپلاستیک دارای انقباض کم، استحکام و مقاومت به ضربه بالا، غیرشکننده و چسبندگی عالی لایه‌ها است [۱۵]، از برند تجاری Filatech-3D استفاده شد. خواص فیلامنت PETG در شرایط چاپ مطابق دستورالعمل سازنده [۱۶] و به شرح زیر است:

- قطر فیلامنت: ۱/۷۵ میلی‌متر
- چگالی فیلامنت: ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب
- دمای کار مناسب: ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد
- دمای بستر: ۶۰ درجه سانتی‌گراد

### ۲-۲- مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده

فرایند کار چاپگر FDM در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش یک رشته فیلامنت ترموپلاستیک به داخل اکسترودر گرم از طریق پولی‌های رانده شده تغذیه می‌شود و ماده تا دمای مناسب ساخت خود ذوب می‌شود که در کد برنامه‌نویسی از قبل مشخص شده است. مواد فیلامنت ترموپلاستیک مورد استفاده در فرایند FDM شامل PLA، PETG، ABS، نایلون، TPU، HIPS، پلی‌کربنات و پلی‌پروپیلن هستند [۱۷]. بر اساس این مواد فیلامنت، نازل‌های مختلفی مانند برنجی، آلیاژ فولاد و غیره وجود دارد که برای چاپ ماده PETG، نازل برنجی کافی است [۱۸]. در ادامه فیلامنت پس از عبور از اکسترودر به حالت مذاب از سوراخ نازل بیرون می‌آید و به این صورت، لایه‌های نازکی را یکی بر روی دیگری تا تکمیل ساخت نمونه قرار می‌دهد. پارامترهای ساخت در این روش، پیش از شروع به کار دستگاه توسط کاربر و به کمک نرم‌افزار لایه‌گذار (اسلایسر) تنظیم می‌گردد.

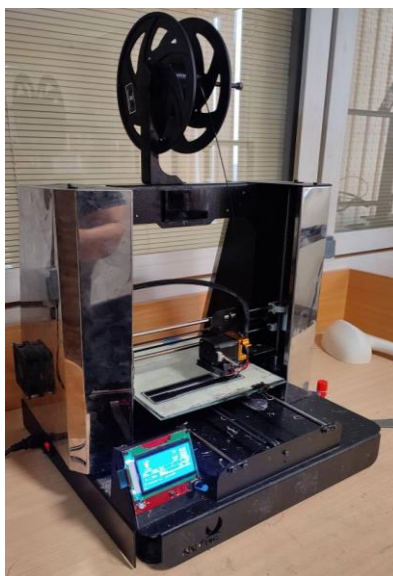


شکل ۱ نمای شماتیک از مکانیزم پرینتر سه‌بعدی با تکنولوژی FDM [۱۶]

پارامترهای پرینت سه بعدی نقش حیاتی در کیفیت و دقت نهایی محصول دارند. ضخامت لایه‌ها، میزان پرشوندگی، نرخ تغذیه و سرعت پرینت از جمله پارامترهای مهم هستند. ضخامت لایه‌ها تعیین کننده دقت و جزئیات سطحی است؛ لایه‌های نازک‌تر منجر به جزئیات بیشتر و سطح صاف‌تر می‌شوند. میزان پرشوندگی بر استحکام در وزن قطعه تأثیر می‌گذارد؛ پرشوندگی بیشتر به معنای استحکام بیشتر است. نرخ تغذیه و سرعت پرینت نیز بر کیفیت و زمان تولید تأثیرگذار است. از این رو در فرایند FDM به عنوان یک روش نمونه‌سازی پرکاربرد، کنترل پارامترهای فرایندی به منظور سفارشی‌سازی قطعه تولید شده باید مورد توجه قرار گیرد.

## ۲-۳- ساخت نمونه‌ها

برای مطالعه خواص مکانیکی ماده PETG، این ماده باید تحت آزمایش‌های کشش و خمش قرار گیرد. برای انجام این آزمایش‌های مکانیکی نیاز به ساخت نمونه‌ها می‌باشد؛ که این کار با استفاده از چاپگر سه بعدی Keytec-3D از نوع FDM که در شکل ۲ نشان داده شده است، انجام گردید. برای درک عمیق‌تر خواص مکانیکی، پارامترهای فرایندی ماده در هنگام ساخت نمونه‌ها با چاپگر FDM تغییر داده می‌شود. تغییر پارامترهای فرایندی از طریق نرم‌افزار اسلایسر Simplify3D 2017 نسخه ۴,۰,۱ انجام می‌شود که در آن می‌توان مقادیر پارامترهای فرایندی مانند چگالی پرشدگی، ضخامت لایه، سرعت و نرخ تغذیه، دمای بستر، دمای اکسترودر، کنترل فن خنک‌کننده، جهت‌گیری نمونه و غیره را تنظیم نمود. طراحی نمونه‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Solidworks 2023 و بر اساس استاندارد ASTM D638 [۱۹] برای بررسی خواص کششی و بر اساس استاندارد ASTM D790 [۲۰] برای بررسی خواص خمشی انجام گردید. پس از ایجاد مدل طراحی، آن را با فرمت STL ذخیره و سپس پارامترهای ساخت را در نرم‌افزار Simplify3D اعمال شد. در نهایت، فایل G-code ذخیره شده توسط چاپگر FDM برای ساخت نمونه‌های استاندارد اجرا می‌شود. مشخصات، استانداردها و پارامترهای موجود در فرایند ساخت نمونه‌های PETG در جدول ۱ لیست شده‌اند.



شکل ۲ چاپگر سه بعدی Keytec

جدول ۱ مشخصات مربوط به آماده‌سازی و ابعاد نمونه‌ها

نام مشخصه	استاندارد	مشخصات فنی
چاپگر FDM		Keytec-3D
نرم‌افزار طراحی		Solidworks 2023
نرم‌افزار لایه‌گذار		Simplify3D 2017
آزمون کشش	ASTM D638	۳×۱۸×۱۶۵ میلی‌متر
آزمون خمش	ASTM D790	۳×۱۳×۱۲۵ میلی‌متر

پارامترهای فرایندی که برای ساخت نمونه‌ها در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند، شامل ضخامت لایه، نرخ تغذیه و چگالی پرشدگی هستند (جدول ۲). انتخاب این پارامترها بر اساس بررسی‌های علمی و تجربی صورت گرفته است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

### ۱. ضخامت لایه:

ضخامت لایه یکی از پارامترهای کلیدی در فرایند مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM) است که تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی، کیفیت سطح و زمان تولید دارد. محدوده ضخامت لایه از ۰/۱۷ میلی‌متر شروع شده و با تغییرات ۰/۰۶-۰/۰۷ میلی‌متر به مقادیر ۰/۲۳ میلی‌متر و ۰/۲۳ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این بازه به دلیل توانایی آن در تغییر ویژگی‌های قطعات تولیدی انتخاب شده است. به عنوان مثال، ضخامت لایه کمتر معمولاً منجر به استحکام بیشتر و سطح صاف‌تر می‌شود، اما زمان تولید را افزایش می‌دهد. در مقابل، ضخامت لایه بیشتر باعث کاهش زمان تولید می‌شود اما ممکن است به کاهش کیفیت سطح و استحکام مکانیکی منجر شود.

### ۲. نرخ تغذیه:

نرخ تغذیه به سرعت حرکت نازل چاپ در فرایند FDM اشاره دارد و تأثیر زیادی بر کیفیت و استحکام قطعات تولیدی دارد. این پارامتر با تغییرات ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه در هر سطح انتخاب شده و مقادیر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. افزایش نرخ تغذیه می‌تواند زمان تولید را کاهش دهد، اما ممکن است منجر به کاهش دقت و استحکام قطعات شود. بنابراین، بررسی این پارامتر برای یافتن تعادل بین سرعت تولید و کیفیت قطعات ضروری است.

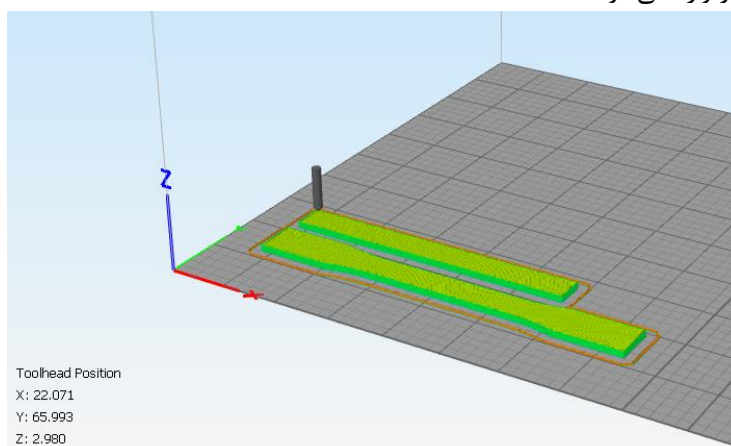
### ۳. چگالی پرشدگی:

چگالی پرشدگی نشان‌دهنده میزان تراکم ماده پر شده در داخل قطعه چاپی است و می‌تواند بر وزن، استحکام و مصرف مواد تأثیر بگذارد. حداکثر چگالی پرشدگی ۱۰۰٪ بوده و در این مطالعه مقادیر ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. انتخاب این مقادیر بر اساس تجربیات و تحقیقات قبلی است که نشان داده‌اند چگالی پرشدگی پایین‌تر می‌تواند به کاهش وزن و مصرف مواد منجر شود، اما ممکن است استحکام قطعه را کاهش دهد. از سوی دیگر، چگالی پرشدگی بالاتر می‌تواند استحکام بیشتری به همراه داشته باشد اما وزن و هزینه تولید را افزایش می‌دهد.

جدول ۲ واریانس در پارامترهای فرایندی ماده PETG

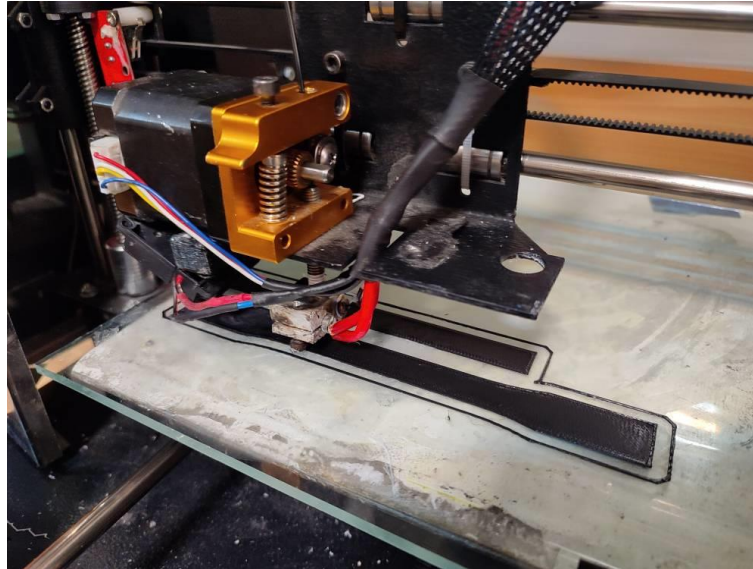
ردیف	پارامتر فرایندی	مرتبۀ ۱	مرتبۀ ۲	مرتبۀ ۳
۱	ضخامت لایه (میلی‌متر)	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۳۰
۲	نرخ تغذیه	۳۰	۴۰	۵۰
۳	چگالی پرشدگی	۶۰	۷۰	۸۰

در ادامه فرایند ساخت به تصویر کشیده شده است. شکل ۳ نرم‌افزار اسلایسر را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای فرایندی همراه با دمای بستر و دمای اکسترودر وارد می‌شوند.



شکل ۳ مدل نمونه در نرم‌افزار اسلایسر Simplify3D

شکل ۴ ساخت نمونه در محدوده استانداردهای ASTM بر روی چاپگر FDM را نشان می‌دهد. برای ساخت و بررسی خواص مکانیکی مرتبط با ماده PETG، سه پارامتر فرایندی شامل ضخامت لایه، چگالی پرشدگی و نرخ تغذیه در نظر گرفته شده‌اند که این سه پارامتر منجر به تولید ۲۷ نمونه برای تست‌های کششی و خمشی می‌شوند. آماده‌سازی نمونه شامل حالت کامل فاکتوریال است. یک نمونه از تست‌های کششی و خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴ ساخت نمونه بر روی چاپگر FDM



شکل ۵ نمونه‌های ساخته شده برای تست کششی و خمشی

## ۲-۴- سنجش خواص مکانیکی

خواص مکانیکی نمونه‌های PETG با انجام آزمایش‌های کششی و خمشی تعیین خواهد شد. این آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست یونیورسال STM-1، واقع در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شدند.

## ۲-۴-۱- آزمون کشش

نمونه‌ها بر اساس استانداردهای ASTM D638 نوع I برای بررسی خواص کششی نمونه‌های ساخته‌شده از PETG تهیه شدند [۲۱]. نمونه‌ها بر روی دستگاه STM-1 برای تعیین استحکام کششی آزمایش خواهند شد که طول گریپ ۵۵ میلی‌متر و سرعت تست ۲ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شده است. نمونه‌های آماده شده دارای طول ۱۶۵ میلی‌متر، عرض ۱۸ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر هستند. مجموعاً ۲۷ نمونه برای تعیین استحکام کششی در هر حالت از پارامترهای فرایندی مطابق شکل ۶ آزمایش شدند.



شکل ۶ تست کشش روی دستگاه STM-1

### ۲-۴-۲- آزمون خمش

برای بررسی خواص خمشی نمونه‌ها، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D790 انجام خواهد شد. نمونه‌ها در ابعادی با طول ۱۲۵، عرض ۱۳ و ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شده‌اند و استحکام خمشی و سفتی در حالی اندازه‌گیری می‌شود که نمونه‌ها بر روی دو پایه ثابت با طول دهانه ۵۳ میلی‌متر قرار دارند و از قسمت میانی با سرعت ۱۰ میلی‌متر در دقیقه تحت بارگذاری قرار داده می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور کلی، ۲۷ نمونه برای تعیین استحکام خمشی در هر حالت آزمایش شدند.



شکل ۷ تست خمش روی دستگاه STM-1

### ۳- نتایج و بحث

خواص مکانیکی ماده PETG از طریق نتایج حاصل از آزمون کشش و آزمون خمشی در پارامترهای فرایندی مربوطه مشخص شد. در هر یک از آزمون‌ها ۲۷ نمونه توسط دستگاه STM-1 تحت بارگذاری قرار گرفت. در این بخش، نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین تأثیر پارامترهای فرایندی بر خواص مکانیکی ماده PETG بررسی می‌شود. تأثیر ضخامت لایه، نرخ تغذیه، و چگالی پرشدگی بر استحکام کششی و خمشی مورد بحث قرار گرفته و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایش شده مقایسه شده‌اند [۲۲]. مقادیر مقاومت کششی و خمشی در نقطه بیشینه آزمایشی و پیش‌بینی شده در جدول ۳ آورده شده است.

<sup>1</sup> Analysis of Variance

جدول ۳ مقادیر مقاومت کششی و خمشی در نقطه بیشینه آزمایشی و پیش‌بینی شده

شماره نمونه	استحکام خمشی (MPa)		استحکام کششی (MPa)		پارامتر فرایندی		
	پیش‌بینی	تجربی	پیش‌بینی	تجربی	تراکم بردگی (%)	ترخ تغذیه (mm/s)	
۱	۷۴/۹۱۸	۷۱/۵۳۷۱	۲۵/۸۳	۲۶/۶۸	۶۰	۳۰	۰/۱۷
۲	۷۴/۱۶۷	۷۴/۰۰۲۵	۲۶/۷۸	۲۵/۲۴	۷۰	۳۰	۰/۱۷
۳	۷۳/۴۱۶	۷۷/۰۰۲۵	۲۷/۷۲	۲۸/۲۴	۸۰	۳۰	۰/۱۷
۴	۷۳/۰۶۵	۷۷/۰۰۲۵	۲۵/۰۳	۲۲/۹۳	۶۰	۴۰	۰/۱۷
۵	۷۲/۳۱۴	۶۸/۵۰۶۸	۲۵/۹۸	۲۵/۵۶	۷۰	۴۰	۰/۱۷
۶	۷۱/۵۶۲	۷۰/۳۴۶۶	۲۶/۹۲	۲۵/۶۳	۸۰	۴۰	۰/۱۷
۷	۷۱/۲۱۲	۶۹/۸۵۹۶	۲۴/۲۳	۲۴/۸۰	۶۰	۵۰	۰/۱۷
۸	۷۰/۴۶۰	۷۰/۰۲۱۹	۲۵/۱۸	۲۵/۵۴	۷۰	۵۰	۰/۱۷
۹	۶۹/۷۰۸	۷۲/۰۲۴۰	۲۶/۱۳	۲۶/۵۶	۸۰	۵۰	۰/۱۷
۱۰	۷۱/۷۸۶	۷۲/۰۲۴۱	۲۴/۰۴	۲۵/۰۷	۶۰	۳۰	۰/۲۳
۱۱	۷۱/۰۳۴	۶۸/۳۴۴۴	۲۴/۹۹	۲۶/۵۶	۷۰	۳۰	۰/۲۳
۱۲	۷۰/۲۸۳	۶۹/۰۴۷۹	۲۵/۹۴	۲۷/۶۳	۸۰	۳۰	۰/۲۳
۱۳	۶۹/۹۳۲	۷۷/۶۵۱۸	۲۳/۲۵	۲۲/۹۴	۶۰	۴۰	۰/۲۳
۱۴	۶۹/۱۸۱	۶۷/۳۷۰۴	۲۴/۱۹	۲۴/۱۵	۷۰	۴۰	۰/۲۳
۱۵	۶۸/۴۲۹	۶۹/۵۳۴۹	۲۵/۱۴	۲۴/۸۰	۸۰	۴۰	۰/۲۳
۱۶	۶۸/۰۷۸	۶۴/۰۶۹۵	۲۲/۴۵	۲۴/۰۵	۶۰	۵۰	۰/۲۳
۱۷	۶۷/۳۲۷	۶۷/۰۴۵۷	۲۳/۴۰	۲۳/۴۳	۷۰	۵۰	۰/۲۳
۱۸	۶۶/۵۷۵	۶۸/۵۰۶۸	۲۴/۳۴	۲۴/۱۰	۸۰	۵۰	۰/۲۳
۱۹	۶۸/۱۳۱	۶۸/۶۶۹۱	۲۱/۹۷	۲۱/۹۶	۶۰	۳۰	۰/۳
۲۰	۶۷/۳۷۹	۶۵/۲۰۵۹	۲۲/۹۲	۲۲/۸۹	۷۰	۳۰	۰/۳
۲۱	۶۶/۶۲۸	۶۵/۵۳۰۶	۲۳/۸۶	۲۴/۲۶	۸۰	۳۰	۰/۳
۲۲	۶۶/۲۷۷	۷۲/۰۲۴۱	۲۱/۱۷	۱۹/۷۶	۶۰	۴۰	۰/۳
۲۳	۶۵/۵۲۶	۶۳/۶۹۰۷	۲۲/۱۲	۱۹/۸۵	۷۰	۴۰	۰/۳
۲۴	۶۴/۷۷۴	۶۷/۶۹۵۱	۲۳/۰۷	۲۲/۴۰	۸۰	۴۰	۰/۳
۲۵	۶۴/۴۲۴	۶۱/۷۴۲۷	۲۰/۳۷	۲۰/۸۷	۶۰	۵۰	۰/۳
۲۶	۶۳/۶۷۲	۶۳/۳۶۶۶	۲۱/۳۲	۲۲/۳۱	۷۰	۵۰	۰/۳
۲۷	۶۲/۹۲۱	۶۱/۳۶۳۹	۲۲/۲۷	۲۲/۵۰	۸۰	۵۰	۰/۳

در ادامه به بررسی تحلیل واریانس برای استحکام کششی و استحکام خمشی به طور جداگانه پرداخته می شود. این تحلیل شامل اثرات اصلی و اثرات متقابل خواهد بود.

### ۳-۱-۱- مدل سازی و اعتبارسنجی

آزمون واریانس اولین مرحله در تحلیل عوامل موثر بر مجموعه داده های خاص است. این آزمون اجازه می دهد تا بیش از دو گروه به طور همزمان مقایسه شوند تا مشخص شود آیا رابطه ای بین آنها وجود دارد یا خیر. تحلیل واریانس (ANOVA) برای استخراج پارامتری که بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی ماده PETG دارد، استفاده شد. نرم افزار Minitab 18 برای انجام تحلیل آماری بر روی استحکام کششی و خمشی استفاده شده است. نمودارهای تأثیر اصلی برای هر دو حالت ایجاد و همچنین پارامترهای با بیشترین سهم در بهبود خواص مکانیکی مشخص شدند.

### ۳-۱-۱-۱- تحلیل واریانس برای استحکام کششی

اثر عوامل اصلی برای استحکام کششی بین ضخامت لایه، نرخ تغذیه و چگالی پرشدگی در شکل ۸ ارائه و نتایج به صورت زیر تفسیر شد. ضخامت لایه های کمتر باعث استحکام کششی بالاتر می شود زیرا قطعات نازک تر احتمالاً کمتر دچار عیوب میکروسکوپی و ترک های داخلی می شوند که منجر به کاهش استحکام کششی می گردد. با افزایش ضخامت، احتمال وجود این عیوب بیشتر شده و استحکام کششی کاهش می یابد. برای نرخ تغذیه، استحکام کششی در نرخ های تغذیه پایین تر بالاتر بود زیرا زمان بیشتری برای پیوندهای قوی تر بین لایه ها فراهم می شود؛ اما با افزایش نرخ تغذیه، زمان پیوند کاهش یافته و استحکام کمتر می شود. جالب است که بعد از ۴۰ میلی متر بر ثانیه، استحکام دوباره افزایش یافته که می تواند ناشی از تراکم و انباشتگی بیشتر مواد در سرعت های بالاتر باشد. در مورد تراکم پرشدگی، در ابتدا با افزایش تراکم، استحکام کششی به شدت افزایش یافت؛ زیرا فضای خالی کمتری بین فیلامنت ها وجود داشت و پیوندهای داخلی قوی تر شدند. مقادیر مربوط به استحکام کششی که توسط تحلیل واریانس بررسی شدند، در جدول ۴ ذکر شده است. از داده های جدول، به وضوح مشخص است که ضخامت لایه بیشترین تأثیر را با ۵۶٪ سهم داشته و پس از آن نرخ تغذیه با ۱۹/۳۳٪ و چگالی پرشدگی با ۱۲/۹۴٪ سهم داشتند. اثرات متقابل بین عوامل نیز بررسی شدند، اما تأثیر معناداری نداشتند. معادله رگرسیون زیر برای استحکام کششی است و مقادیر پیش بینی شده برای ماده را در پارامترهای فرایندی در نظر گرفته شده ارائه می کند. ضرایب A، B و C به ترتیب نشان دهنده تأثیر ضخامت لایه، نرخ تغذیه و تراکم پرشدگی هستند.

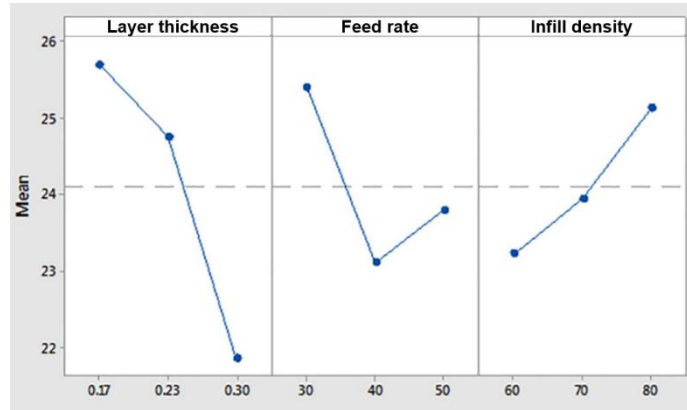
$$\text{Tensile strength} = 24.100 + 2.234A + 0.987B + 0.682C \quad (1)$$

این معادله امکان پیش بینی استحکام کششی را برای مقادیر مختلف پارامترهای فرایندی فراهم می کند.

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس برای استحکام کششی

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-value آماره	P-value احتمال	درصد مشارکت
ضخامت لایه (A)	۲	۷۱/۳۲	۳۵/۶۶	۶۵/۳۳	<۰/۰۰۱	۵۶/۰۰
نرخ تغذیه (B)	۲	۲۴/۶۲	۱۲/۳۱	۲۲/۵۵	<۰/۰۰۱	۱۹/۳۳
تراکم پرشدگی (C)	۲	۱۶/۴۸	۸/۲۴	۱۵/۱۰	<۰/۰۰۱	۱۲/۹۴
A × B	۴	۵/۴۷	۱/۳۷	۲/۵۱	۰/۰۹۵	۴/۳۰
A × C	۴	۳/۲۱	۰/۸۰	۱/۴۷	۰/۲۶۳	۲/۵۲
B × C	۴	۱/۸۹	۰/۴۷	۰/۸۶	۰/۵۱۲	۱/۴۸
خطا	۸	۴/۳۶	۰/۵۵			۳/۴۳
کل	۲۶	۱۲۷/۳۵				۱۰۰

در این تحلیل واریانس، مقادیر خطا نشان دهنده تغییرات در داده‌های استحکام کششی هستند که توسط عوامل اصلی (ضخامت لایه، نرخ تغذیه و تراکم پرشدگی) و اثرات متقابل آن‌ها توضیح داده نمی‌شوند. درصد مشارکت خطا در این مدل ۳,۴۳٪ است، که نشان می‌دهد مدل ارائه شده به خوبی قادر است ۹۶,۵۷٪ از تغییرات در استحکام کششی را توضیح دهد. این میزان خطای پایین اعتبار بالای مدل را در پیش‌بینی استحکام کششی تأیید می‌کند. نمودار اثر عوامل اصلی برای استحکام کششی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ نمودار اثر عوامل اصلی برای استحکام کششی

### ۳-۱-۲- تحلیل واریانس برای استحکام خمشی

در ادامه، اثر عوامل اصلی بر استحکام خمشی بین ضخامت لایه، نرخ تغذیه و چگالی پرشدگی بررسی شده و نتایج به صورت زیر تفسیر شده‌اند. در ضخامت‌های بیشتر، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل افزایش تعداد عیوب داخلی و ترک‌های میکروسکوپی در قطعات ضخیم‌تر باشد. افزایش نرخ تغذیه تا ۴۰ میلی‌متر در ثانیه باعث افزایش استحکام خمشی می‌شود؛ زیرا سرعت مناسب برای پیوندهای قوی‌تر بین لایه‌ها ایجاد می‌کند، اما با افزایش بیشتر نرخ تغذیه، پیوندها ضعیف‌تر شده و استحکام کاهش می‌یابد. تأثیر چگالی پرشدگی بر استحکام خمشی از نظر آماری معنادار نبود. با توجه به جدول ۵، ضخامت لایه با سهم ۳۷/۹۸٪ بیشترین تأثیر را بر استحکام خمشی داشته است و پس از آن نرخ تغذیه با ۱۶/۲۵٪ قرار دارد. اثرات متقابل بین عوامل نیز بررسی شدند، اما تأثیر معناداری نداشتند. معادله زیر، نتیجه تحلیل رگرسیون برای استحکام خمشی است. ضرایب A، B به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر ضخامت لایه و نرخ تغذیه هستند.

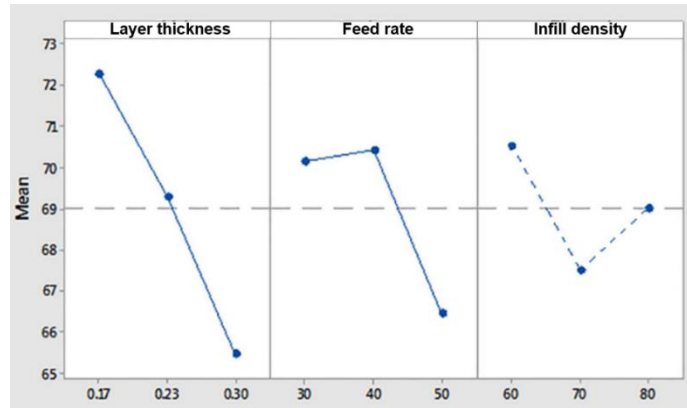
$$\text{Flexural strength} = 69.007 + 3.249A + 1.708B \quad (2)$$

این معادله امکان پیش‌بینی استحکام خمشی، را برای مقادیر مختلف پارامترهای فرایندی فراهم می‌کند.

جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس برای استحکام خمشی

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F-value	احتمال P-value	درصد مشارکت
ضخامت لایه (A)	۲	۲۰۷/۹۰	۱۰۳/۹۵	۱۳/۰۷	۰/۰۰۳	۳۷/۹۸٪
نرخ تغذیه (B)	۲	۸۸/۹۸	۴۴/۴۹	۵/۵۹	۰/۰۲۱	۱۶/۲۵٪
تراکم پرشدگی (C)	۲	۴۰/۵۸	۲۰/۲۹	۲/۵۵	۰/۱۲۶	۷/۴۱٪
A × B	۴	۷۲/۳۶	۱۸/۰۹	۲/۲۷	۰/۱۲۴	۱۳/۲۲٪
A × C	۴	۴۵/۲۱	۱۱/۳۰	۱/۴۲	۰/۲۸۸	۸/۲۶٪
B × C	۴	۲۸/۷۴	۷/۱۹	۰/۹۰	۰/۴۹۷	۵/۲۵٪
خطا	۸	۶۳/۶۵	۷/۹۶			۱۱/۶۳٪
کل	۲۶	۵۴۷/۴۲				۱۰۰٪

در تحلیل واریانس استحکام خمشی، مقادیر خطا بیانگر تغییراتی در داده‌ها هستند که توسط عوامل اصلی مورد بررسی و اثرات متقابل آن‌ها توجیه نمی‌شوند. درصد مشارکت خطا در این مدل ۱۱/۶۳٪ است، که نشان می‌دهد مدل ارائه شده توانایی توضیح ۸۸/۳۷٪ از تغییرات در استحکام خمشی را دارد. اگرچه این میزان خطا بیشتر از مدل استحکام کششی است، اما همچنان نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی قابل قبول مدل برای استحکام خمشی است. این افزایش در خطا می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های بیشتر در رفتار خمشی ماده PETG تحت شرایط آزمایش باشد. همچنین نمودار اثر عوامل اصلی برای استحکام خمشی در شکل ۹ نمایش داده شده است. از آن‌جا که تأثیر چگالی پرشدگی بر استحکام خمشی از نظر آماری معنادار نبود، این نمودار به صورت خط چین ترسیم می‌شود.



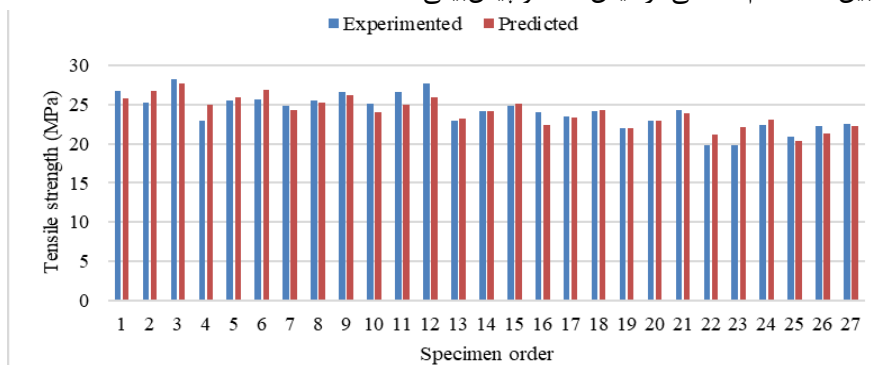
شکل ۹ نمودار اثر عوامل اصلی برای استحکام خمشی

### ۳-۱-۳- مقایسه مقادیر آزمایش شده و پیش‌بینی شده استحکام کششی و خمشی

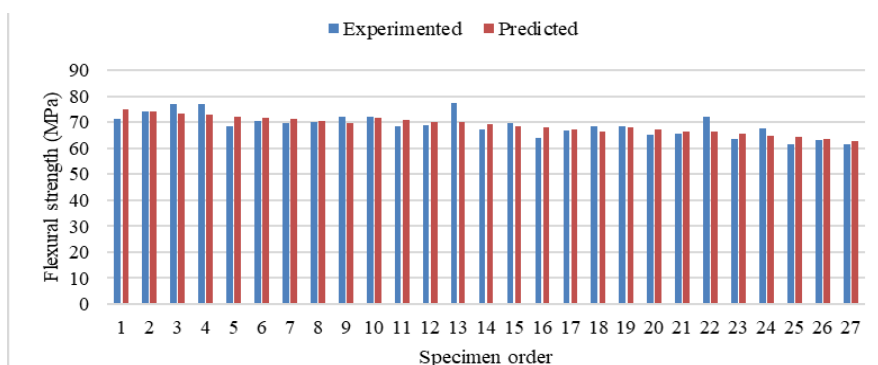
همه نمونه‌های آزمایش (۲۷ + ۲۷) که توسط چاپگر FDM برای تعیین استحکام کششی و خمشی ساخته شده‌اند، تحت آزمایش قرار گرفتند و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ذکر شده است. مقادیر پیش‌بینی شده برای این استحکام‌های کششی و خمشی از معادلاتی که در تحلیل واریانس ایجاد گردید، به دست آمدند. مقادیر پیش‌بینی شده این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان صحت و دقت مدل‌های به دست آمده را با نتایج تجربی مقایسه و بدین ترتیب اعتبار مدل‌های ANOVA را ارزیابی کرد.

تحلیل واریانس نشان داد که برای استحکام کششی، هر سه عامل اصلی (ضخامت لایه، نرخ تغذیه و تراکم پرشدگی) تأثیر معناداری دارند، در حالی که برای استحکام خمشی، تنها ضخامت لایه و نرخ تغذیه تأثیر معنادار آماری داشتند. علاوه بر این، اثرات متقابل بین عوامل نیز بررسی شدند، اما تأثیر معناداری از نظر آماری نداشتند. برای استحکام کششی، ضخامت لایه با ۵۶٪ بیشترین تأثیر را در تغییرات داشت. در حالی که برای استحکام خمشی، این پارامتر ۳۷/۹۸٪ از تغییرات را توضیح می‌داد. جالب است که در مورد استحکام خمشی، اثر متقابل ضخامت لایه و نرخ تغذیه (A × B) با ۱۳/۲۲٪ مشارکت، تأثیر قابل توجهی داشت، هرچند از نظر آماری معنادار نبود.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ از مقادیر گرفته شده از جدول ۳ ترسیم شده‌اند. نمودارها بین مقادیر آزمایش شده و پیش‌بینی شده نمونه‌ها برای هر دو استحکام کششی و خمشی تولید شده‌اند. شکل ۱۰ برای مقایسه بین استحکام کششی آزمایش شده و پیش‌بینی شده و شکل ۱۱ برای مقایسه بین استحکام خمشی آزمایش شده و پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۰ مقایسه نتایج بین مقاومت کششی آزمایش شده و مقاومت کششی پیش‌بینی شده



شکل ۱۱ مقایسه نتایج بین مقاومت خمشی آزمایش شده و مقاومت خمشی پیش‌بینی شده

#### ۴- نتیجه‌گیری

تأثیر پارامترهای فرایندی بر خواص مکانیکی ماده پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) با انجام آزمایش‌های کششی و خمشی روی دستگاه تست یونیورسال و نمونه‌های ساخته شده توسط چاپگر مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده Keytec-3D به خوبی مورد بررسی قرار گرفته است. با تغییر پارامترهای فرایندی در ساخت نمونه‌ها توسط چاپگر FDM و پس از انجام آزمایش‌های مکانیکی، نتایج زیر به دست آمده است:

- برای نشان دادن خواص کششی خوب در ماده PETG؛ ضخامت لایه و نرخ تغذیه مواد باید کمینه باشند و درصد پرشدگی بالا باشد.
  - از سوی دیگر، در ضخامت لایه کم، در نرخ تغذیه متوسط و درصد تراکم پرشدگی کم، ماده خواص خمشی خوبی نشان می‌دهد.
  - در کل، ضخامت لایه بیشترین سهم را در مقایسه با نرخ تغذیه و تراکم پرشدگی داشت. سهم ضخامت لایه برای استحکام کششی ۵۶/۰۰٪ و برای استحکام خمشی ۳۷/۹۸٪ بود.
- بنابراین، ضخامت لایه در میان دیگر پارامترهای فرایندی مانند نرخ تغذیه و درصد پرشدگی، بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی مواد پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) داشته است و این ماده در ضخامت‌های لایه‌گذاری کمتر، خواص مکانیکی بهتری نشان می‌دهد.
- برای تکمیل این یافته‌ها و بررسی نتایج در تراکم‌های داخلی مختلف، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، محدوده گسترده‌تری از درصدهای پرشدگی (از صفر تا ۱۰۰ درصد) بررسی شود. این رویکرد می‌تواند به درک جامع‌تری از تأثیر پرشدگی بر خواص مکانیکی PETG و بهینه‌سازی دقیق‌تر فرایند چاپ سه‌بعدی منجر شود.

#### References

- [1] Nie S. Comparative analysis of three-dimensional (3D) printing technology and traditional machining methods. In AIP Conference Proceedings 2024 Jun 26 (Vol. 3144, No. 1). AIP Publishing. doi: 10.1063/5.0215371
- [2] Robles Martinez P, Basit AW, Gaisford S. The history, developments and opportunities of stereolithography. 3D Printing of Pharmaceuticals. 2018:55-79. doi: 10.1007/978-3-319-90755-0\_4
- [3] Min JK, Mosadegh B, Dunham S, Al'Aref SJ, editors. 3D Printing applications in cardiovascular medicine. Academic Press; 2018 Jul 4.
- [4] Acierno D, Patti A. Fused deposition modelling (FDM) of thermoplastic-based filaments: process and rheological properties—an overview. Materials. 2023 Dec 15;16(24):7664. doi: 10.3390/ma16247664
- [5] Gokhare VG, Raut DN, Shinde DK. A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing. Int. J. Eng. Res. Technol. 2017 Jun 6;6(06):953-8. doi: 10.17577/IJERTV6IS060409
- [6] Wickramasinghe S, Do T, Tran P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. Polymers. 2020 Jul 10;12(7):1529. doi: 10.3390/polym12071529
- [7] Calignano F, Lorusso M, Roppolo I, Minetola P. Investigation of the mechanical properties of a carbon fibre-reinforced nylon filament for 3D printing. Machines. 2020 Sep 4;8(3):52. doi: 10.3390/machines8030052

- [8] Baraheni M, Shabgard MR, Tabatabaee AM. Effects of FDM 3D printing parameters on PLA biomaterial components dimensional accuracy and surface quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024 May;238(9):3864-73. doi: [10.1177/09544062231202142](https://doi.org/10.1177/09544062231202142)
- [9] Padhi SK, Sahu RK, Mahapatra SS, Das HC, Sood AK, Patro B, Mondal AK. Optimization of fused deposition modeling process parameters using a fuzzy inference system coupled with Taguchi philosophy. *Advances in Manufacturing*. 2017 Sep;5:231-42. doi: [10.1007/s40436-017-0187-4](https://doi.org/10.1007/s40436-017-0187-4)
- [10] Basavaraj CK, Vishwas M. Studies on effect of fused deposition modelling process parameters on ultimate tensile strength and dimensional accuracy of nylon. *InIOP conference series: materials science and engineering 2016 Sep 1 (Vol. 149, No. 1, p. 012035)*. IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/149/1/012035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012035)
- [11] Frunzaverde D, Cojocar V, Bacescu N, Ciubotariu CR, Miclosina CO, Turiac RR, Marginean G. The influence of the layer height and the filament color on the dimensional accuracy and the tensile strength of FDM-printed PLA specimens. *Polymers*. 2023 May 19;15(10):2377. doi: [10.3390/polym15102377](https://doi.org/10.3390/polym15102377)
- [12] Saraeian P, Shakouri E. Evaluation of cyclic bending fatigue and creep performance in PLA parts during melt lamination process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Nov;8(9):60-9. [In Persian]
- [13] Kumar KR, Soms N, Kumar M. Investigation of fused deposition modeling parameters on mechanical properties and characterization of ABS/carbon fiber composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024 Jun;238(3):1398-408. doi: [10.1177/09544089231156068](https://doi.org/10.1177/09544089231156068)
- [14] Gholizadeh Roshan A, Zulfiquari A, Shakri M. Investigating the physical and mechanical properties of 3D printed parts using ABS plastic filaments filled with alumina. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun;7(4):1-9. [In Persian]
- [15] Pandžić A, Hodžić D. Tensile Mechanical Properties Comparison of PETG, ASA and PLA-Strongman FDM Printed Materials With and Without Infill Structure. doi: [10.2507/33rd.daaam.proceedings.xxx](https://doi.org/10.2507/33rd.daaam.proceedings.xxx)
- [16] PETG Filament – Filatech. Available from: <https://fila-tech.store/product/petg-filament/>
- [17] Kristiawan RB, Imaduddin F, Ariawan D, Ubaidillah, Arifin Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*. 2021 Apr 16;11(1):639-49. doi: [10.1515/eng-2021-0063](https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063)
- [18] Chatterjee S, Chakraborty S. A Multi-criteria decision making approach for 3D printer nozzle material selection. *Reports in Mechanical Engineering*. 2023 Apr 21;4(1):62-79. doi: [10.31181/rme040121042023c](https://doi.org/10.31181/rme040121042023c)
- [19] Standard AS. D638: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken (PA): ASTM International. 2010.
- [20] Standard AS. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790. Annual book of ASTM standards. 1997.
- [21] Amini E, Fathi A, Baghestani AM. The effect of interlayer adhesion in predicting fatigue failure of 3D printed parts. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Oct 23;10(8):36-48. doi: [10.22034/ijme.2024.434383.1906](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.434383.1906) [In Persian]
- [22] Houshmand M, Mansour S. Investigating the effect of construction direction on surface quality and construction time in molten sediment modeling technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Feb 19;7(12):37-53. [In Persian]