



## Experimental Study of the Effect of FDM Parameters on the Toughness, Hardness and Tensile Strength of its Products

Farzad Pashmforoush<sup>1</sup>, Mehdi Kazemi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of technology, Isfahan, Iran.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 10.25.2023

**Revised:** 01.07.2024

**Accepted:** 02.12.2024

#### Keyword:

Additive Manufacturing  
Fused Deposition Modeling  
Tensile Strength  
Toughness  
Hardness

#### \*Corresponding Author:

Mehdi Kazemi

Email: [Mahdi.kazemi@iut.ac.ir](mailto:Mahdi.kazemi@iut.ac.ir)

Additive manufacturing or 3D printing is used to make 3D parts. In recent years, many researchers have paid attention to the 3D printing method and this method has been widely used in various fields of engineering such as mechanics, aviation and biopharmaceutical industries. Polyethylene oxide polymer and polyethylene glycol polymer are among the most common polymers in the pharmaceutical and automotive industries and other related industries. In this research, two polymers, polyethylene oxide and polyethylene glycol, were used to fabricate test specimens by the 3D printing method. To investigate the mechanical properties of the manufactured parts under different operating conditions, tensile, hardness and impact tests were used. The obtained results showed that the tensile strength of the specimens decreased with the increase of the layer thickness. In addition, at the same extrusion speed, as the layer thickness increased and the temperature decreased, the hardness of the polymer specimen increased. The results of the impact test also indicated that the higher the hardness and tensile strength, the higher the energy input to the polymer piece. The results also showed that a sample with the highest hardness had higher extrusion speed, medium temperature and layer thickness. With the increase in temperature, a decrease in the hardness of polyethylene glycol polymer was observed when the specimen was constant in speed and layer thickness. The most effective parameter in determining the hardness of polyethylene glycol polymer was temperature.



---

**EXTENDED ABSTRACT**

---

**Introduction**

3D printing or additive manufacturing methods have been used to make functional 3D parts, recently. In recent years, many researchers have paid attention to the additive manufacturing method and this method has been widely used in various fields of engineering such as mechanics, aviation and biopharmaceutical industries. Polyethylene oxide polymer and polyethylene glycol polymer are among the most common polymers in the pharmaceutical and automotive industries and other related industries. Despite the advantages mentioned for additive manufacturing, creating such a production system and applying it and producing parts with its own difficulties. Among the problems of this type of production, lack of surface smoothness, inability to mass produce, limited size of production parts, and limited raw materials can be mentioned. The material extrusion method called FDM (Fused Deposition Modeling) is an additive manufacturing method in which the printed layers of each part are orthorhombic materials prepared from isotropic primary filaments. The quality of the parts made by the melting layer modelling method strongly depends on such parameters as image angle, layer thickness, air gap between adjacent paths, pattern dispersion and density involved in the process.

**Methodology**

To check the mechanical properties of the manufactured parts in different operating conditions, tensile test, hardness test and impact test were used. To achieve the desired target functions, the parameters affecting them were identified by preliminary tests and test samples. One of the standard methods for designing experiments when the number of possible states for the experiment is large is designing the experiment using the Taguchi method. Considering that the number of experiments in full factorial mode was very high and also relying on the very high degree of confidence of the Taguchi method, the Taguchi method was used in this research to design experiments. This research examines the effect of the effective parameters of the FDM process on the hardness, tensile strength and toughness of its products. The different stages of the problem-solving method in this article are as follows:

- **Step 1:** Identifying the parameters of the FDM process that are effective on the target functions, by conducting preliminary tests.
- **Step 2:** Choosing the appropriate levels for the selected parameters based on the results of the preliminary tests.
- **Step 3:** Running the experiments designed by Taguchi method to extract the values of the output parameters.
- **Step 4:** Deriving an empirical model using the regression method in SPSS software for each of the output parameters to predict the value of the objective functions in any other desired condition.
- **Step 5:** Optimizing parameters using genetic algorithm.
- **Step 6:** Evaluating the effect of important parameters by analyzing the percentage effect of each parameter on the output values using the ANOVA technique.

## Results and discussion

The obtained results show that the tensile strength of the sample decreases with the increase of the thickness of the layer. In addition, at the same speed, as the thickness of the layer increases, the hardness of the polymer parts increases. The results of the impact test also indicate that the higher the hardness and strength of the composite, the greater the energy input to the polymer parts. The findings demonstrate that a sample with the highest hardness has a high and medium layer thickness. With the increase in temperature, it was observed that the hardness of the PEG polymer decreased, which is consistent with the speed and thickness of the layer. The final factor in determining the hardness of the PEG polymer is temperature. The percentage deviation of the regression values from the practical test values is shown in the fourth column of these tables. The average deviation is 0.61%, which shows that the developed experimental models are suitable for predicting the objective functions for different combinations of process parameters.

## Conclusion

The following results were obtained from the present research. As the thickness of the layer increases, the tensile strength of the polymer parts made by the FDM 3D printing method decreases. With the same layer thickness, the tensile strength of the manufactured polymer piece increases with increasing temperature and increasing extrusion speed. Among the manufactured samples, the sample with the highest hardness is the one that has a higher layer thickness, temperature and extrusion speed. The higher the thickness of the layer and the higher the extrusion temperature, the higher the toughness of the polymer sample made by the FDM method. The optimum value of toughness at the same layer thickness and extrude temperature occurs when the extrude speed is moderate. The layer thickness parameter is considered the most effective factor in determining the tensile strength of the manufactured polymer parts. The temperature parameter was found to be the most effective factor in determining the hardness of the manufactured polymer parts. Layer thickness and extrusion speed are more important than extrusion temperature in determining the thickness of the manufactured polymer parts.



## مطالعه تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند FDM بر روی چقرمگی، سختی و استحکام کششی محصولات فرآیند

فرزاد پشم‌فروش<sup>۱</sup>، مهدی کاظمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

روش پرینتر سه‌بعدی یا تولید افزایشی جهت ساخت قطعات سه‌بعدی به‌کار می‌رود. در سال‌های اخیر، محققان بسیاری به روش پرینت سه‌بعدی توجه نموده و این روش کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف مهندسی نظیر مکانیک، صنایع هوایی و بیودارویی پیدا کرده است. پلیمر پلی‌اتیلن اکسید و پلیمر پلی‌اتیلن گلیکول، از جمله پلیمرهای بسیار رایج در صنایع دارویی و خودروسازی و سایر صنایع مرتبط می‌باشند. در تحقیق حاضر، از دو پلیمر پلی‌اتیلن اکسید و پلی‌اتیلن گلیکول برای ساخت نمونه‌های آزمایشی به روش پرینت سه‌بعدی استفاده گردید. جهت بررسی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده در شرایط عملیاتی مختلف، از تست کشش، سختی‌سنجی و تست ضربه استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه، استحکام کششی نمونه، افت پیدا می‌کند. همچنین، در سرعت اکسترود یکسان، با افزایش ضخامت لایه و کاهش دما نیز سختی قطعه پلیمری بیشتر می‌شود. نتایج تست ضربه نیز حاکی از آن است که هر چقدر مقدار سختی و استحکام کششی بیشتر باشد، مقدار انرژی وارده به قطعه پلیمری بیشتر خواهد بود. همچنین نتایج بیانگر این است که نمونه‌ای دارای بیشترین سختی است که دارای سرعت بالا، ضخامت لایه و دمای متوسط باشد. با افزایش دما، کاهش میزان سختی پلیمر پلی‌اتیلن گلیکول زمانی مشاهده گردید که نمونه در سرعت و ضخامت لایه ثابت است. همچنین مؤثرترین عامل پارامتر در تعیین میزان سختی پلیمر پلی‌اتیلن گلیکول، دماست.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

### کلیدواژگان:

ساخت افزایشی  
مدلسازی رسوب ذوب شده  
استحکام کششی  
چقرمگی  
سختی

\*نویسنده مسئول: مهدی کاظمی

پست الکترونیکی:

Mahdi.kazemi@iut.ac.ir



## مقدمه

در سال‌های اخیر طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر همراه با پیشرفت‌های قابل توجهی بوده است؛ به طوری که محققان نه تنها طراحی و آنالیز یک مدل سه بعدی را به کمک کامپیوتر انجام دهند، بلکه می‌توانند از روی این مدل یک نمونه واقعی از محصول نیز بسازند [۱]. تکنولوژی ساخت محصول از روی مدل سه بعدی آن که به صورت لایه لایه بر روی هم افزوده می‌شوند، ساخت افزایشی نام گرفته است. مهم‌ترین و اصلی‌ترین مزیت فرآیندهای ساخت افزایشی این است که محصول نهایی را می‌توان مستقیماً از روی مدل سه بعدی آن و بدون نیاز داشتن برنامه‌ریزی فرآیند ساخت [۲]. تکنولوژی‌های ساخت افزایشی، ساخت محصولات سه بعدی پیچیده را از روی مدلشان به مقدار قابل توجهی آسان‌تر کرده‌اند. دیگر فرآیندهای ساخت، به تحلیل دقیق و کامل از هندسه قطعه نیاز دارند؛ در حالی که در فرآیندهای ساخت افزایشی فقط اطلاعات کلی از مشخصات مواد و ابعاد محصول مورد نیاز است.

علی‌رغم مزایای ذکر شده برای ساخت افزایشی، قطعاً ایجاد چنین سیستم تولیدی و کاربردی کردن آن و تولید قطعات با آن سختی‌های خاص خود را دارد. از مشکلات این نوع تولید می‌توان به مواردی مانند عدم صافی سطح، عدم توانایی تولید انبوه، اندازه محدود قطعات تولیدی، و مواد خام محدود اشاره کرد [۳]. روش اکستروژن مواد تحت عنوان روش مدل‌سازی لایه‌ذوبی (FDM)، یک روش ساخت افزایشی است که در این روش لایه‌های پرینت شده از هر قسمت به صورت مواد ارتو ترومیک هستند که از فیلامنت‌های اولیه ایزوترومپیک تهیه شده‌اند. آنچه که باید ذکر شود این است که کیفیت قطعات ساخته شده به روش مدل‌سازی لایه‌ذوبی، به شدت به پارامترهای دخیل در فرایند، بستگی دارند که می‌توان به پارامترهایی نظیر: زاویه تصویری، ضخامت لایه، گپ هوایی مابین مسیرهای مجاور هم، الگوهای پراکندگی و تراکم اشاره نمود.

در فرایند رهایش دارو و سایر زمینه‌های تحقیقاتی نظیر کاربردهای مکانیکی به‌طور گسترده‌ای از پلیمرها برای ساخت قطعات استفاده می‌شود [۴؛ ۵]. پلیمر پلی‌اتیلن اکسید، PEO، و پلیمر پلی‌اتیلن گلیکول، PEG، از جمله پلیمرهای بسیار رایج در صنایع دارویی و خودروسازی و سایر صنایع مرتبط می‌باشند. قابل ذکر است که معمولاً پلی‌اتیلن گلیکول‌ها به پلیمرهایی گفته می‌شود که دارای وزن مولکولی کمتر از ۲۰۰۰۰ گرم بر مول هستند پلی‌اتیلن اکسید به پلیمرهایی اطلاق می‌شود که دارای وزن مولکولی بیشتر از ۲۰۰۰۰ گرم بر مول هستند. گزارش‌های علمی اندکی در راستای تولید پلیمرهای پلی‌اتیلن اکسید و پلی‌اتیلن گلیکول با استفاده از روش پرینتر سه‌بعدی مدل‌سازی لایه‌ذوبی وجود دارد. در برخی از تحقیقات از پلی‌اتیلن اکسید برای ساخت لایه‌نازک فیلم خوراکی در ترکیب با سایر افزودنی‌ها اشاره شده است و یا از پلی‌اتیلن اکسید و یا پلی‌اتیلن گلیکول به‌عنوان ماده‌افزودنی و یا پرکننده در قرص‌های متیل متاکریلات با استفاده از روش پرینتر سه‌بعدی ذکر شده است [۶].

نینگ<sup>۱</sup> و همکاران [۷] ادعان نمودند که خواص قطعات پرینت شده زمانی بهبود پیدا می‌کند که حفره‌های موجود به حداقل رسیده و کیفیت اتصالی مابین فیبرها افزایش یابد. همچنین مشخص کردند که پارامترهایی نظیر زاویه تصویری و گپ هوایی به‌طور بارز بر خواص مکانیکی قطعات تأثیرگذار می‌باشند. دورگون و ارتان<sup>۲</sup> [۸] عنوان نمودند که پارامترهای مکانیکی قطعات پرینت شده تحت تأثیر تشکیل پیوند مابین فیبرهای مجاور هم در طی فرایند رسوبی می‌باشد. ایشان نتیجه گرفتند که بهترین خواص کششی در قطعه زمانی حاصل می‌شود که فیلامنت‌ها به‌صورت طولی و به موازات راستای بارگذاری جهت‌گیری نمایند.

عسگری اقدم و همکارانش [۹] به بررسی تأثیر پارامترهای متغیر چاپ سه‌بعدی روی استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار قطعات ساخته‌شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند

<sup>1</sup> Ning

<sup>2</sup> Durgun & Ertan

و راه‌حل مناسب برای پرینت لایه اول و بهترین سطح مربوط به هر متغیر برای رسیدن به بهترین کیفیت پرینت قطعات را ارائه کردند. همچنین تأثیر پارامترهای ضخامت لایه، دمای نازل، الگوی پرشوندگی و زاویه پرشوندگی روی خواص مکانیکی (استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار) قطعات را بررسی کرده و از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و تعیین میزان تأثیر هر کدام از متغیرها استفاده کردند. مطابق با نتایج آزمایش‌های ایشان، بالاترین استحکام کششی و خمشی به ترتیب در الگوهای پرینت ویگل و ریکتیلینیر حاصل شد. برای آزمایش ضربه، الگوی پرینت ویگل، بیشترین انرژی ضربه را فراهم آورد. در نهایت برای آزمایش فشار، بهترین شرایط در الگوی ریکتیلینیر مشاهده شد. در آزمایش ضربه، دمای نازل و الگوی پرینت به ترتیب به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامترها و در آزمایش فشار، الگوی پرینت تأثیرگذارترین پارامتر بود. همچنین بهترین دمای پرینت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. یاداو<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۰] به بررسی اثر سرعت چاپ، شتاب، و تکان بر روی زبری سطح قطعات ساخته شده با FDM پرداختند. برای بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر زبری سطح، در مجموع ۲۰ نمونه آزمایش با استفاده از تکنیک طراحی مرکب مرکزی صورت محور ساختند. زبری سطح در اضلاع جانبی نمونه‌ها در دو جهت (در امتداد محورهای X و Y) اندازه‌گیری شد. ایشان مشاهده کردند که زبری سطح به‌دست‌آمده برای جهت محور X برابر با ۰.۰۵۵ میکرومتر در (سرعت: ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه؛ شتاب: ۱۱۳۷ میلی‌متر بر مجذور ثانیه) و برای جهت محور Y برابر با ۱۱.۸۹ میکرومتر در (سرعت: ۹۸.۶۰ میلی‌متر بر ثانیه؛ شتاب: ۹۸۸.۳۵ میلی‌متر بر مجذور ثانیه) است. مقادیر بهینه شده به صورت تجربی نیز تأیید شدند.

مارساوینا<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۱] به بررسی تأثیر پارامترهای ساخت بر روی خواص کششی و شکست نمونه‌هایی با جنس PLA و ساخته شده با فناوری FDM پرداختند. در تحقیق ایشان اثرات جهت ساخت، نوچاگر، ضخامت لایه، ضخامت نمونه و رنگ رشته به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. مشخص شد که هر دو ویژگی کششی و شکست نمونه‌های PLA به پارامترهای تولیدی مورد بررسی بستگی دارد. از تجزیه و تحلیل ریزساختاری سطوح، مشاهده شده است که مکانیسم شکست و انتشار ترک یک فرآیند گام به گام است. کام<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۲] اثرات پارامترهای فرآیند FDM بر خواص مکانیکی (استحکام کششی، ازدیاد طول و استحکام ضربه) نمونه‌هایی از جنس PA۱۲ (Polyamide۱۲) را با استفاده از روش تاگوچی مطالعه کردند. ایشان نتیجه گرفتند که ضخامت لایه مؤثرترین عامل برای افزایش خواص مکانیکی به جای دمای اکستروژن، نرخ اشغال و ساختار پر شدن است. مقاومت کششی بهینه تعیین شده برای پارامترهای ضخامت لایه، نرخ اشغال، ساختارهای پرکننده و دمای اکستروژن به ترتیب ۰.۲۵ میلی‌متر، ۵۰ درصد، مستطیل و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. استحکام ضربه بهینه تعیین شده برای پارامترهای ضخامت لایه، نرخ اشغال، دمای اکستروژن و ساختارهای پرکننده به ترتیب ۰.۲۵ میلی‌متر، ۵۰ درصد، ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و مستطیل بود.

در تحقیق دومینگو-اسپین<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳]، خواص مکانیکی قطعات پلی‌کربنات تحت فرایند مدل‌سازی لایه ذوبی را مدل‌سازی و توصیف نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که قطر نازل، ضخامت لایه و همچنین قطر الیاف اکستروژن شده تأثیر زیادی در خواص مکانیکی از جمله استحکام ضربه دارند. بورل<sup>۵</sup> و همکاران [۱۴]، مقاومت شکست پلیمرهای فرآیند مدل‌سازی لایه ذوبی را اندازه‌گیری نمودند. ایشان نتایج مهمی در خصوص شکست تیرهای کانتلیور دول و خاصیت چسباندگی بین لایه‌های و همچنین دمای نازل در فرایند مدل‌سازی لایه ذوبی به‌دست آوردند و نشان دادند قطعات پرینت شده با دمای نازل بالا دارای چسبندگی لایه‌های زیاد و مقاومت شکست بالایی می‌باشند. سولومون<sup>۶</sup> و همکاران

<sup>1</sup> Yadav

<sup>2</sup> Marsavina

<sup>3</sup> Kam

<sup>4</sup> Domingo-Espin

<sup>5</sup> Bourell

<sup>6</sup> Solomon

[۱۵] خواص ضربه استوانه‌های) سیلندرهای پلی لاستیک، PLA) تجاری مورد بررسی قرار گرفت. یک وابستگی شدید بین چگالی ظاهری و ظرفیت جذب ضربه در هر دو زمینه استهلاک انرژی و استحکام ضربه ملاحظه گردید. ویکراماسینگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] نشان دادند پارامترهای نمونه‌های با ۲۵ درصد دانسیته، محصولات بهینه‌ای در ضربه گیری و جذب انرژی تولید می‌نمایند. ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر بهترین عملکرد را در نمونه‌ها در مقایسه با ضخامت های بالاتر در مقابل ضربات از خود نشان دادند. خواص ضربه‌گیری نمونه‌های PLA به راحتی با تغییر در سازه مواد پرکننده می‌تواند افزایش یابند.

در پژوهشی که توسط کریستیوان<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷] انجام شد، با استفاده از روش DLP بر روی بیماری گرفتگی رگ‌های عروقی پژوهشی انجام شد و تأثیر تغییر قدرت منبع نور UV بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که افزایش قدرت منبع نور UV باعث استحکام بیشتر داربست خواهد شد. عبدالحماد<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] با استفاده از روش DLP در راستای بهبود خواص مکانیکی داربست‌ها تلاش کردند. آنها با تمرکز بر تأثیر شکل تخلخل‌ها و رفتار کمانش داربست تحت بار، با شیوه عکس‌برداری، سعی در یافتن بهترین شکل تخلخل برای داربست‌ها داشتند. در تحقیق ماگلوری<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۹] تأثیر دمای نازل، چگالی پر کردن و سرعت چاپ بر روی خواص کششی نمونه‌های چاپ شده با استفاده از رشته پلی لاکتیک اسید (PLA) مورد بررسی قرار گرفت. با هدف دستیابی به خواص کششی بهتر از جمله مدول الاستیک، استحکام کششی و کرنش شکست، روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شده و هشت آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد که دمای نازل به طور قابل توجهی بر خواص کششی نمونه‌ها و به دنبال آن چگالی پرکننده تأثیر می‌گذارد. سطوح بهینه برای پارامترها در دمای نازل ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، تراکم پر شدن ۱۰۰ درصد و سرعت چاپ ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه تعیین شد. فرتی<sup>۵</sup> و همکاران [۲۰] با استفاده از بلوک‌هایی از جنس پلی‌متیل متاکریلات و سوراخ‌کاری آنها توسط لیزر داربست‌های متخلخلی به‌وجود آوردند. نتایج آزمون‌های زیستی و مکانیکی مشخص کرد که با استفاده از این روش می‌توان داربست‌هایی مناسب برای کاربرد در بافت‌های سخت را به‌وجود آورد. ژو<sup>۶</sup> و همکاران [۲۱] با روش FDM داربست‌هایی با تخلخل و شکل حفرات متفاوتی ساختند. حفره‌های داربست‌های ساخته شده به‌وسیله آنها کاملاً به هم مرتبط بوده و این عامل جهت مهاجرت سلول‌ها بسیار مفید بود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که شکل و میزان تخلخل متفاوت، خواص مکانیکی متفاوتی را برای داربست به‌وجود می‌آورد. همچنین، آنالیز نتایج نشان داد که رابطه بین تخلخل و خواص مکانیکی فشاری، به شکل‌نمایی تغییر می‌کند.

پلی اتیلن اکسید دارای وزن ملکولی متنوعی می‌باشد که امکان بررسی تست ضربه را با توجه به وزن مولکولی پلیمر فراهم می‌نماید. در مقاله حاضر، خواص مکانیکی قطعات پلیمری تهیه شده با روش مدل‌سازی لایه ذوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، با استفاده از تکنولوژی FDM قطعات پلیمری به شکل نمونه استاندارد آزمون ضربه ساخته شده و در آزمایشگاه تحت تست ضربه قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها در شرایط مختلف ساخت و نمونه‌های مختلف با هم مقایسه شده و بهترین نمونه انتخاب گردید.

## روش‌شناسی

به منظور دستیابی به توابع هدف مورد نظر، پارامترهای مؤثر بر آنها توسط آزمایش‌های اولیه و نمونه‌های آزمایشی شناسایی شدند. یکی از روش‌های استاندارد برای طراحی آزمایش‌های زمانی که تعداد حالت‌های ممکن برای آزمایش

<sup>1</sup> Wickramasinghe

<sup>2</sup> Kristiawan

<sup>3</sup> Abdulhameed

<sup>4</sup> Maguluri

<sup>5</sup> Ferretti

<sup>6</sup> Zhu

- زیاد است، طراحی آزمایش به روش تاگوچی می‌باشد [۲۲]. با توجه به این که تعداد آزمایش‌های در حالت فاکتوریلی کامل بسیار زیاد می‌بود و همچنین با تکیه بر درجه اطمینان بسیار بالای روش تاگوچی، در این تحقیق از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌های استفاده شده است. این تحقیق اثر پارامترهای مؤثر فرآیند FDM را بر روی سختی، استحکام کششی و چقرمگی محصولات آن بررسی می‌کند. مراحل مختلف روش حل مسئله در این مقاله به شرح زیر می‌باشد:
- **گام ۱:** شناسایی پارامترهای فرآیند FDM که بر روی توابع هدف مؤثر می‌باشند، با انجام آزمایش‌های مقدماتی.
  - **گام ۲:** انتخاب سطوح مناسب برای پارامترهای انتخاب شده از روی نتایج آزمایش‌های مقدماتی.
  - **گام ۳:** اجرای آزمایش‌های که به روش تاگوچی طراحی شده‌اند برای استخراج مقادیر پارامترهای خروجی.
  - **گام ۴:** استخراج یک مدل تجربی با استفاده از روش رگرسیون در نرم‌افزار SPSS برای هر یک از پارامترهای خروجی به منظور پیش بینی مقدار توابع هدف در هر شرایط دلخواه دیگر.
  - **گام ۵:** بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک.
  - **گام ۶:** ارزیابی میزان اثر پارامترهای مهم با تحلیل درصد تأثیر هر پارامتر روی مقادیر خروجی با استفاده از تکنیک آنووا.

### روش انجام آزمایش

پارامترهای قابل کنترل فرآیند FDM زیاد هستند، اما همه این پارامترها بر روی توابع هدف مورد مطالعه ما تأثیرگذار نیستند. در این بخش از مقاله پارامترهایی که در مقالات اخیر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و توسط آزمایش‌های مقدماتی غربال شده‌اند مورد بحث می‌باشند. بعد از انجام آزمایش‌های مقدماتی که پارامترهای مهم فرآیند FDM از جمله ضخامت لایه، قطر نازل، سرعت اکستروژن، دمای بستر و دمای اکستروژن ارزیابی شدند، مشخص گردید که پارامترهای ضخامت لایه، دما و سرعت اکستروژن بیشترین تأثیر را بر روی پارامترهای خروجی (استحکام کششی، سختی و چقرمگی) داشتند. مشخصات فیلامنت مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

در ساخت تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این مقاله، مقدار درصد پرکنندگی در نرم افزار دستگاه FDM بر روی ۷۰٪ تنظیم شده است. ابتدا نمونه‌های تست ضربه با دو نوع ماده پلیمری، در دما، سرعت و ضخامت لایه متفاوت، بر اساس استاندارد ASTM A370 [۲۳] ساخته می‌شوند. نمونه‌های مورد نظر در این مقاله توسط دستگاه چاپ سه بعدی FDM ساخت شرکت جهان تری دی، مدل JP4 VR ساخته شده‌اند. ابعاد محفظه ساخت این دستگاه ۵۰\*۵۰\*۵۵۰ میلی‌متر، حداکثر سرعت حرکت نازل ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه، قطر نازل دستگاه بین ۰.۲ تا ۱ میلی‌متر با فواصل ۰.۱ میلی‌متر و دقت چاپ دستگاه ۲۰ میکرون می‌باشد. شکل ۱ تصویری از نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. قطعات پلیمری ساخته شده با این روش تحت آزمایش ضربه قرار می‌گیرند. همچنین، برای تمام نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه سختی‌سنج، استحکام نمونه تعیین می‌گردد. جهت بررسی میزان استحکام کششی بر روی نمونه‌های تست کشش ساخته شده، تست کشش توسط دستگاه انجام می‌گیرد و نتایج به دست آمده ثبت می‌شوند. نمونه‌های تست کشش بر اساس استاندارد ASTM D638 [۲۴] ساخته شدند. متغیرهای مستقل در این تحقیق عبارتند از: سرعت اکستروژن، دمای اکستروژن و ضخامت لایه (منظور از سرعت اکستروژن سرعت حرکت خطی نازل می‌باشد). جدول ۲ سطوح مختلف سه پارامتر مذکور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، دو گروه از نمونه‌ها از جنس پلی‌اتیلن اکسید (PEO) و پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) ساخته شدند که برای هر دو گروه نمونه سطوح مختلف پارامترها مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. تصویری از نمونه‌های آزمایشی ساخته شده.

جدول ۱. مشخصات فیلامنت.

چگالی ( $g/cm^3$ )	استحکام کششی (MPa)	استحکام خمشی (MPa)	استحکام ضربه ایزود (J/m)	نرخ انقباض (%)
۱.۲۴	۵۰	۸۰	۹۶.۱	۰.۳۷ - ۰.۴۱

جدول ۲. سطوح پارامترهای ورودی.

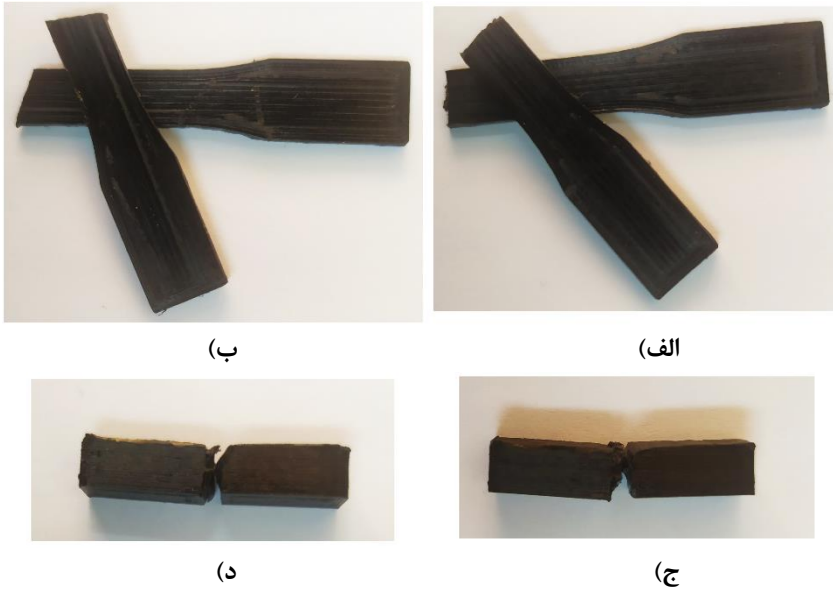
پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
ضخامت لایه (mm)	۰.۱	۰.۲	۰.۳
دما (درجه سانتیگراد)	۱۹۰	۱۹۷	۲۰۵
سرعت اکستروژن (mm/s)	۲۰	۴۰	۶۰

### طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق به منظور آنالیز هر چه دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی توابع خروجی، برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی استفاده شده است. در این روش طراحی آزمایش با توجه به وجود سه پارامتر در سه سطح، برای هر گروه از نمونه‌ها ۹ نمونه آزمایشی منطبق بر روش  $L_9$  تاگوچی ساخته شدند. جدول ۲ شرایط و سطوح پارامترهای مختلف را برای هر نمونه آزمایشی نشان می‌دهد.

### نتایج و بحث

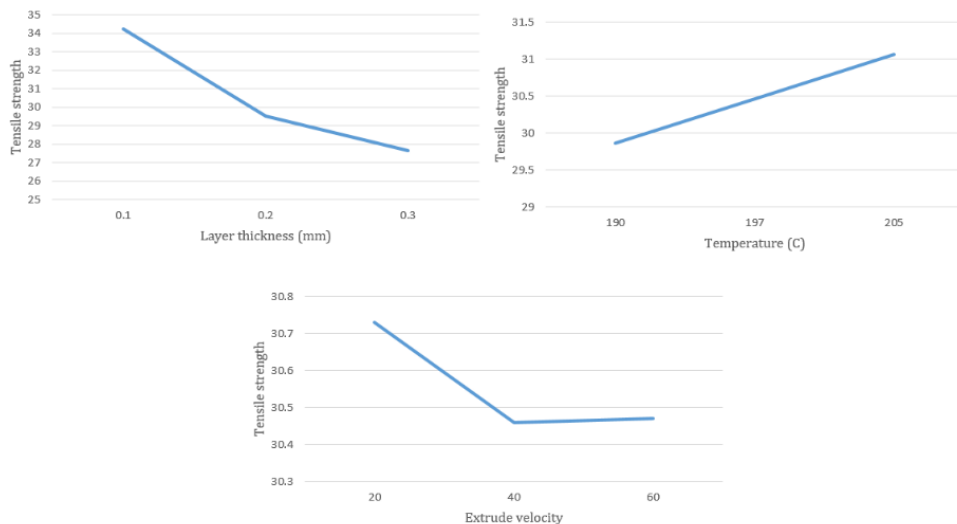
در شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های ساخته شده بعد از اجرای آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. ستون‌های پنجم، ششم و هفتم جدول ۳، نتایج آزمایش‌های عملی را برای استحکام کششی، سختی و چقرمگی به ترتیب ارائه می‌دهند و همچنین اشکال ۳، ۴ و ۵ نیز تأثیر هر یک از سطوح مختلف پارامترهای ورودی فرآیند FDM را بر روی استحکام کششی، سختی و چقرمگی محصولات فرآیند به ترتیب نشان می‌دهند.



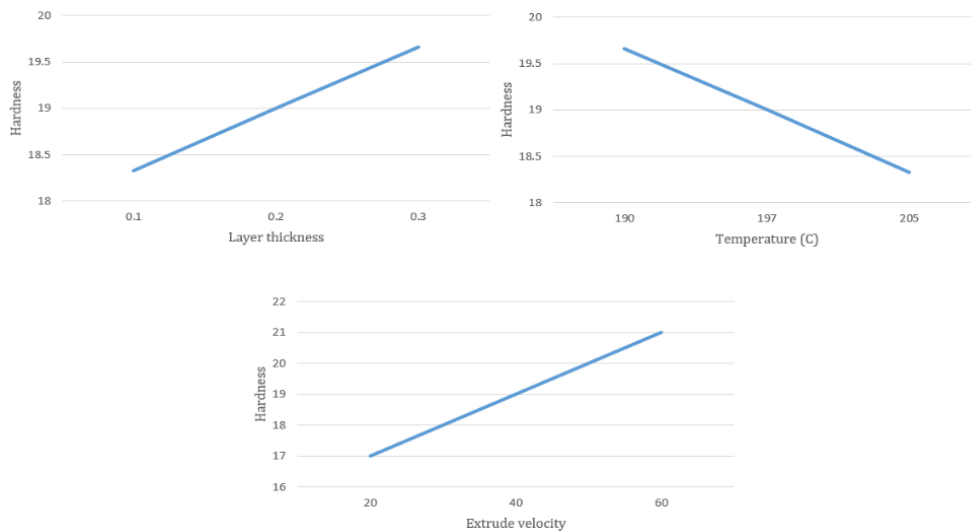
شکل ۲. تصویری از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش‌های تجربی (الف) نمونه شماره ۳ کشش (ب) نمونه شماره ۷ کشش (ج) نمونه شماره ۱ ضربه (د) نمونه شماره ۹ ضربه.

جدول ۳. شرایط و سطوح پارامترهای مختلف برای هر نمونه آزمایشی نتایج آزمایش‌های استحکام کششی، سختی و چقرمگی.

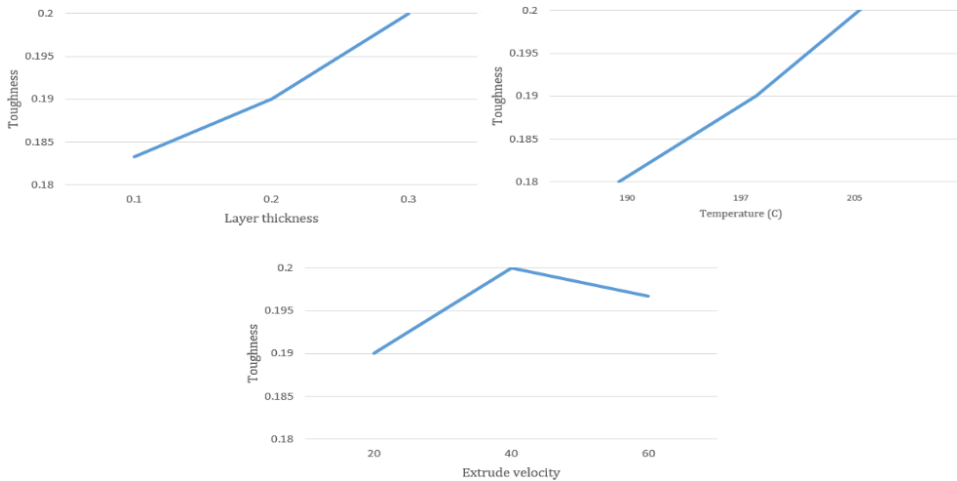
شماره آزمایش	ضخامت لایه (mm)	دما (سانتیگراد)	سرعت اکستروود (mm/s)	استحکام کششی (MPa)	سختی (Shore D)	چقرمگی (J)
۱	۰.۱	۱۹۰	۲۰	۳۳.۸۸	۱۷	۰.۱۷
۲	۰.۱	۱۹۷	۴۰	۳۴.۲۵	۱۸	۰.۱۸
۳	۰.۱	۲۰۵	۶۰	۳۴.۶۱	۲۰	۰.۲۰
۴	۰.۲	۱۹۰	۴۰	۲۸.۹۴	۲۰	۰.۱۸
۵	۰.۲	۱۹۷	۶۰	۲۹.۲۱	۲۱	۰.۱۹
۶	۰.۲	۲۰۵	۲۰	۳۰.۳۹	۱۶	۰.۲۰
۷	۰.۳	۱۹۰	۶۰	۲۶.۸۰	۲۲	۰.۱۹
۸	۰.۳	۱۹۷	۲۰	۲۷.۹۱	۱۸	۰.۲۰
۹	۰.۳	۲۰۵	۴۰	۲۸.۲۲	۱۹	۰.۲۱



شکل ۳. تأثیر ضخامت لایه (mm)، دما (C) و سرعت اکستروژن (mm/s) بر روی استحکام کششی (MPa).



شکل ۴. تأثیر ضخامت لایه (mm)، دما (C) و سرعت اکستروژن (mm/s) بر روی سختی (Shore D).



شکل ۵. تأثیر ضخامت لایه (mm)، دما (C) و سرعت اکستروژن (mm/s) بر روی چقرمگی (J).

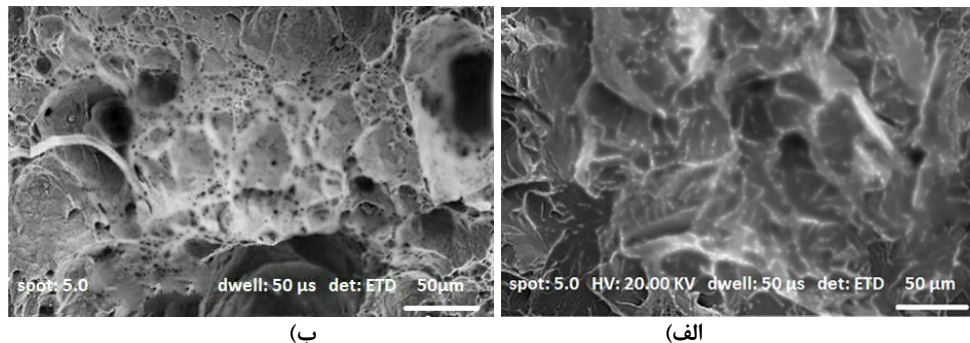
همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، با افزایش ضخامت لایه، استحکام کششی نمونه‌ها ساخته شده کاهش می‌یابد. دلیل این امر، اتصال کامل‌تر لایه‌های متوالی به یکدیگر در ضخامت لایه‌های کم است که باعث استحکام بالاتر کل نمونه خواهد شد. از سوی دیگر با افزایش دمای اکستروژن هر لایه محکم‌تر به لایه زیرینش می‌چسبد و استحکام کششی بالاتری را ارائه می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت اکستروژن تا یک حدی مقدار استحکام کششی افت می‌کند و سپس تقریباً ثابت می‌ماند که علت این اتفاق نیز عدم وجود فرصت کافی برای چسبیدن هر لایه به لایه زیرین در سرعت‌های اکستروژن بالاتر می‌باشد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه، سختی نمونه افزایش می‌یابد که به این دلیل است که توانایی نفوذ یک ماده خارجی در حد فاصل بین لایه‌ها بیشتر از توانایی نفوذ ماده خارجی در کانتور یکپارچه یک لایه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش دمای اکستروژن مقدار سختی کاهش می‌یابد که این امر را می‌توان با نرم شدن قطعه به دلیل تجربه دماهای بالاتر توجیه کرد و نیز مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت اکستروژن، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این اتفاق به این علت است که در سرعت‌ها اکستروژن بالاتر انجماد کامل مواد در تعامل با مواد کناری اتفاق می‌افتد و باعث تشکیل ریز ساختار محکم‌تر در مقابل نفوذ ماده خارجی می‌گردد.

شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه چقرمگی افزایش می‌یابد، زیرا در ضخامت لایه‌های پایین‌تر، تراکم حضور سطوح بین لایه‌های بالاتر است که محل‌های بالقوه برای ایجاد ترک و شکست می‌باشند. از سوی دیگر با افزایش دمای اکستروژن میزان چقرمگی افزایش می‌یابد که در اثر اتصال کامل‌تر به هنگام انجماد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت اکستروژن تا یک حدی، چقرمگی افزایش می‌یابد و سپس این روند کاهشی می‌شود. در سرعت‌های اکستروژن خیلی پایین، هنگامی که بخشی از فیلامنت در حال اکستروژن است، ناحیه‌های ماقبل آن به مقدار زیادی خنک شده و نزدیک انجماد هستند و این باعث افت کیفیت اتصال در جهت پیشروی نازل می‌گردد و همچنین در سرعت‌های اکستروژن خیلی بالا نیز فرصت لازم برای اتصال کامل فراهم نمی‌شود که در نتیجه هر دو حالت باعث افت میزان چقرمگی می‌گردد.

به منظور بررسی و شناسایی نوع شکست رخ داده در نمونه‌های تست ضربه، از مقطع شکست نمونه‌های شماره ۱ و ۹ مربوط به این تست که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار چقرمگی می‌باشند، تصاویر SEM تهیه شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. تصاویر SEM نشان می‌دهد که در هر دو نمونه شکست داکتیل رخ داده است. وجود

حفره‌ها در سطح مقطع شکست و عدم صاف بودن سطوح شکست در شکل ۶ تأیید کننده این ادعا می‌باشد. این دو تصویر نشان می‌دهد که با تغییر پارامترهای ورودی تغییراتی در نوع شکست رخ نداده است و هر دو نمونه شماره ۱ و ۹ (کمترین و بیشترین حالت چقرمگی) دچار شکست داکتیل شده‌اند.

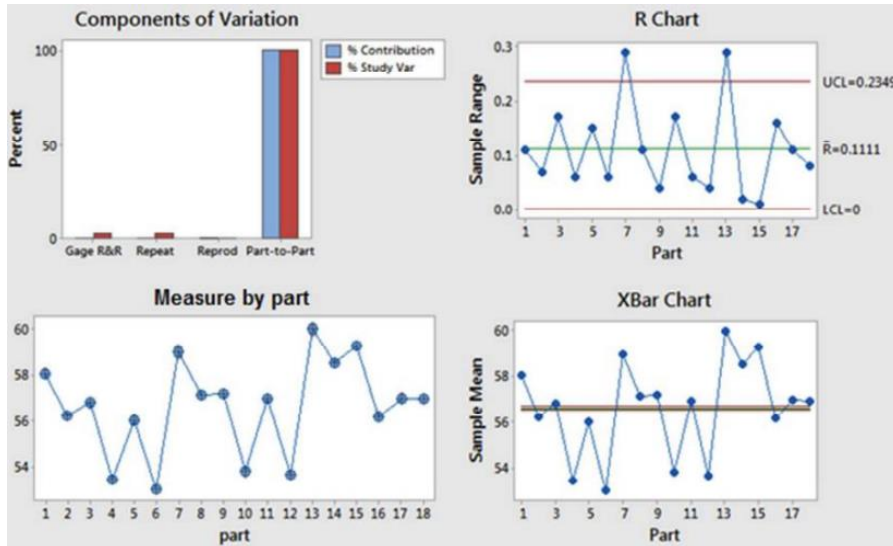


شکل ۶. تصاویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه‌ها (الف) نمونه شماره ۱ (ب) نمونه شماره ۹.

تکرارپذیری آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ستون مربوط به درصد تأثیرگذاری پارامترها در جدول ۴ نشان می‌دهد که درصد اثرگذاری قطعه به قطعه (۹۹.۹۱) بزرگ‌تر از تکرارپذیری (۰.۰۹) است. این شرایط نشان می‌دهد که بسیاری از تغییرات به دلیل تفاوت موجود بین قطعات است. ستون "Study Var" در این جدول نشان می‌دهد که تکرارپذیری معادل ۲/۵۴٪ از "study variation" است که این مقدار تکرارپذیری نیز در حد قابل قبول می‌باشد. شکل ۷ نیز نمودارهای تجزیه و تحلیل آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها.

Source	VarComp	Contribution of % VarComp	Std Dev (SD)	Study Var (۶*SD)	Study Var % (%SV)
Repeatability	۰.۰۰۲۸۱	۰.۰۹	۰.۰۵۲۴۸	۰.۳۱۴۴	۲.۵۴
Part to Part	۴.۱۶۱۱۹	۹۹.۹۱	۲.۰۴۰۸۹	۱۲.۲۴۱۵	۹۷.۴۶
Total variation	۴.۱۶۴۰۰	۱۰۰.۰۰	۲.۰۴۱۲۸	۱۲.۲۵۰۱	۱۰۰.۰۰



شکل ۷. تجزیه و تحلیل آماری خروجی‌های آزمایش‌ها.

### استخراج معادله رگرسیون تجربی

روابط بین توابع هدف و پارامترهای تأثیرگذار ورودی، زمینه‌ای برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیند فراهم می‌کند. از داده‌های ستون‌های پنجم، ششم و هفتم در جدول ۳ به منظور استخراج معادله رگرسیون تجربی استفاده استفاده شده است. سه معادله رگرسیون غیرخطی با تعیین هر یک از توابع هدف سه گانه به عنوان متغیر خروجی و ضخامت لایه، دما و سرعت اکستروود به عنوان متغیرهای ورودی، با استفاده از نرم افزار Minitab مطابق با معادله ۱، ۲ و ۳ استخراج شد.

$$S_t = -138(L_t^2) + 0.000026(T^2) + 0.000621(v^2) + 30.5 \quad (1)$$

$$H = 19.3(L_t^2) + 0.006(T^2) + 0.041(v^2) + 19 \quad (2)$$

$$TO = 4.2(L_t^2) + 0.0000003(T^2) + 0.000012(v^2) + 0.18 \quad (3)$$

### ارزیابی معادلات رگرسیونی

مرحله بعدی این مطالعه، صحت‌گذاری و تأیید معادلات به دست آمده برای توابع هدف سه گانه است. جداول ۵، ۶ و ۷ مقایسه بین مقادیر تجربی و مقادیر رگرسیونی متغیرهای خروجی در سطوح مختلف پارامترها را نشان می‌دهند. درصد انحراف مقادیر رگرسیونی از مقادیر آزمایش‌های عملی انجام شده در ستون چهارم مربوط به این جداول نشان داده شده است. میانگین انحراف به ترتیب ۰.۶۱٪ است که نشان می‌دهد مدل‌های تجربی توسعه یافته برای پیش‌بینی توابع هدف برای ترکیب‌های مختلف پارامترهای فرآیند مناسب است.

جدول ۵. درصد انحراف مقادیر استحکام کششی حاصل از معادله رگرسیون با مقادیر آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	مقدار معادله رگرسیون	مقدار تجربی	درصد انحراف
۱	۳۳.۹۷	۳۳.۸۸	۰.۲۶
۲	۳۴.۴۷	۳۴.۲۵	۰.۶۴
۳	۳۵.۰۴	۳۴.۶۱	۱.۲۵
۴	۲۸.۸۳	۲۸.۹۴	۰.۳۸
۵	۲۹.۵۲	۲۹.۳۱	۱.۰۶
۶	۳۰.۱۳	۳۰.۳۹	۰.۸۷
۷	۲۷.۲۵	۲۶.۸۰	۱.۶۸
۸	۲۷.۷۵	۲۷.۹۱	۰.۴۵
۹	۲۷.۹۵	۲۸.۲۲	۰.۹۵
میانگین	-	-	۰.۸۴

جدول ۶. درصد انحراف مقادیر سختی حاصل از معادله رگرسیون با مقادیر آزمایش‌های تجربی.

شماره آزمایش	مقدار معادله رگرسیون	مقدار تجربی	درصد انحراف
۱	۱۷.۴۳	۱۷	۲.۵۳
۲	۱۸.۵۸	۱۸	۳.۲۵
۳	۱۹.۸۳	۲۰	۰.۸۶
۴	۲۰.۲۶	۲۰	۱.۲۸
۵	۲۰.۵۱	۲۱	۲.۳۸
۶	۱۶.۶۲	۱۶	۳.۸۷
۷	۲۱.۶۴	۲۲	۱.۶۴
۸	۱۸.۲۱	۱۸	۱.۱۴
۹	۱۸.۶۱	۱۹	۲.۰۳
میانگین	-	-	۲.۱۱

جدول ۷. درصد انحراف مقادیر چقرمگی حاصل از معادله رگرسیون با مقادیر آزمایش‌های تجربی.

شماره آزمایش	مقدار معادله رگرسیون	مقدار تجربی	درصد انحراف
۱	۰.۱۷۲	۰.۱۷	۱.۲۹
۲	۰.۱۸۴	۰.۱۸	۲.۳۵
۳	۰.۱۹۹	۰.۲۰	۰.۴۵
۴	۰.۱۷۸	۰.۱۸	۱.۳۶
۵	۰.۱۹۵	۰.۱۹	۲.۸۴
۶	۰.۲۰۱	۰.۲۰	۰.۶۳
۷	۰.۱۸۷	۰.۱۹	۱.۷۸
۸	۰.۱۹۵	۰.۲۰	۱.۳۱
۹	۰.۲۱۱	۰.۲۱	۰.۳۹
میانگین	-	-	۱.۳۸

پس از به دست آوردن معادلهٔ تجربی برای سه پارامتر استحکام کششی، سختی و چقرمگی، حال بایستی آن را بهینه کرد. در این تحقیق، عملیات بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. الگوریتم ژنتیک تلاش می‌کند تا سطح بهینه را برای پارامترهای ضخامت لایه، دما و سرعت اکستروژن پیدا کند. این الگوریتم مقادیر بهینه را بر اساس مناسب‌ترین کروموزوم که می‌تواند حداکثر مقادیر توابع هدف را ایجاد کند، پیدا می‌کند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در این بخش روشی برای ایجاد یک شرایط عملیاتی بهینه برای فرآیند FDM ارائه می‌گردد.

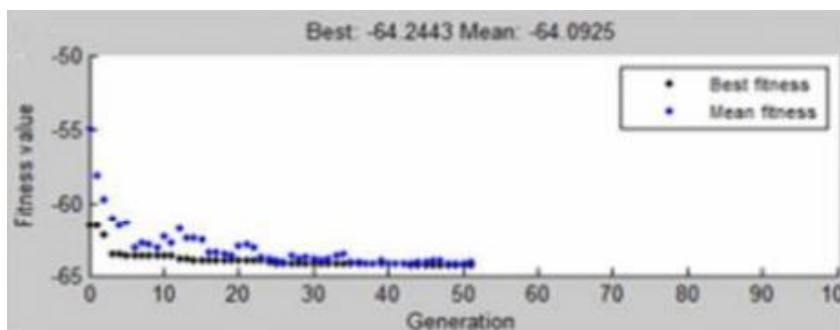
### روش بهینه‌سازی

در الگوریتم ژنتیک، ابتدا جمعیت با تبعیت از انتخاب طبیعی که نسل جدید را از طریق جهش و تقاطع باز تولید می‌کند، تکامل می‌یابد [۲۵]. تقاطع، دو فرزند (اعضای جدید) از دو والد (اعضای فعلی) ایجاد می‌کند، در حالی که جهش یک فرزند متفاوت از والدین ایجاد می‌کند [۲۶]. مراحل شبیه‌سازی انجام شده به ترتیب و به طور خلاصه به صورت زیر خواهد بود:

- **مرحله ۱:** تولید جمعیت اولیه با کروموزوم‌های دلخواه.
- **مرحله ۲:** استفاده از معادله تجربی به دست آمده از Minitab برای محاسبه مقادیر تناسب.
- **مرحله ۳:** بررسی برقراری شرایط معیار خاتمه الگوریتم. (در صورت برقرار بودن شرایط، عملیات را متوقف کن، در غیر این صورت ادامه بده).
- **مرحله ۴:** انجام عملیات تا زمانی که جمعیت نسل بعدی متشکل از  $n_p$  کروموزوم جدید (اندازه جمعیت) تولید شود.
- **مرحله ۵:** به مرحله ۲ برگرد و ادامه بده.

در عملیات بهینه‌سازی استحکام کششی، شکل ۸ مقدار فیتنس در برابر تولید نسل را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با ادامهٔ نسل، مقدار فیتنس به سرعت افزایش می‌یابد اما برای نسل ۲۴-۲۵ تقریباً صاف می‌شود. مقدار عددی فیتنس نشان می‌دهد که حالت بهینه در نسل ۵۱-۵۲ رخ می‌دهد. به عبارت دیگر در نسل ۲۴-۲۵، الگوریتم بهینه‌سازی تا حد زیادی به مقدار بهینه نزدیک شده است و دقیقاً در نسل ۵۱-۵۲ مقدار بهینه نهایی توسط الگوریتم پیدا می‌شود. در شکل ۸ خط نقطه سیاه نشان دهنده مقدار فیتنس کروموزوم با حداکثر مقدار فیتنس و خط نقطه آبی نشان دهندهٔ مقدار میانگین فیتنس همه کروموزوم‌ها در هر نسل است. استحکام کششی ماکزیم زمانی به دست آمده است که ضخامت لایه، دمای اکستروژن و سرعت اکستروژن به ترتیب برابر با ۰.۱ میلی‌متر، ۲۰۵ درجه سلسیوس و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. بنابراین، مقدار بهینه ضخامت لایه پایین‌ترین سطح آن است، در حالی که مقدار بهینهٔ دما و سرعت اکستروژن در بالاترین سطح آن است.

در عملیات بهینه‌سازی سختی، مقدار عددی فیتنس نشان می‌دهد که مقدار بهینه در نسل ۳۷-۳۸ رخ می‌دهد. سختی ماکزیم توسط الگوریتم زمانی حاصل شد که ضخامت لایه، دمای اکستروژن و سرعت اکستروژن به ترتیب برابر با ۰.۳ میلی‌متر، ۲۰۵ درجه سلسیوس و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه بود. بنابراین مقدار بهینه ضخامت لایه، دما و سرعت اکستروژن در بالاترین سطح آنها است. همچنین در عملیات بهینه‌سازی چقرمگی، مقدار بهینه ضخامت لایه و دما در بالاترین سطح آنها و مقدار بهینه سرعت اکستروژن در سطح متوسط آن قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر بالاترین میزان چقرمگی زمانی به دست آمد که ضخامت لایه، دمای اکستروژن و سرعت اکستروژن به ترتیب برابر با ۰.۳ میلی‌متر، ۲۰۵ درجه سلسیوس و ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه بود.



شکل ۸. خروجی الگوریتم ژنتیک.

به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های اولیه و همچنین اعتبارسنجی نتایج الگوریتم ژنتیک انجام شده، پس از به‌دست آمدن سطوح بهینه پارامترها توسط الگوریتم ژنتیک برای سه پارامتر خروجی استحکام کششی، سختی و چقرمگی، سه نمونه با شرایط بهینه پارامترها (برای هر پارامتر هدف، یک نمونه) ساخته شده و مورد تست قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج نشان داده شده مشاهده می‌شود، حالات بهینه پارامترهای ورودی منجر به حصول بهترین مقادیر پارامترهای هدف شده است و از طرفی نتایج آزمایش‌های نهایی بسیار نزدیک به آزمایش‌های قبلی می‌باشد که نشان دهنده تکرارپذیری بالای آزمایش‌ها و اعتبار نتایج است.

جدول ۸. نتایج آزمایش‌های نهایی جهت اعتبارسنجی نتایج.

نام آزمایش	ضخامت لایه (mm)	دما (سانتیگراد)	سرعت اکستروژن (mm/s)	مقدار خروجی جدید	مقدار خروجی قبلی
استحکام کششی	۰.۱	۲۰.۵	۶۰	۳۴.۵۲ (MPa)	۳۴.۶۱ (MPa)
سختی	۰.۳	۱۹۰	۶۰	۲۲ (Shore D)	۲۲ (Shore D)
چقرمگی	۰.۳	۲۰.۵	۴۰	۰.۲۱ (J)	۰.۲۱ (J)

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر فرآیند FDM بر روی سختی، استحکام کششی و چقرمگی محصولات آن بررسی شدند که بدین منظور آزمایش‌های تجربی متعددی طراحی شده و نمونه‌های زیادی ساخته شده و مورد تست قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها و همچنین بهینه‌سازی داده‌های خروجی آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه، استحکام کششی قطعات پلیمری ساخته شده به روش پرینت سه بعدی FDM افت پیدا می‌کند. از سوی دیگر مشخص گردید که در ضخامت لایه یکسان، با افزایش دما و افزایش سرعت اکستروژن، استحکام کششی قطعات پلیمری ساخته شده، بیشتر می‌شود. مقدار حداکثر استحکام کششی در مقدار کمینه ضخامت لایه (۰.۱ میلی‌متر) و مقادیر بیشینه دما و سرعت اکستروژن (به ترتیب ۲۰.۵ درجه سلسیوس و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه) حاصل می‌شود که برابر ۳۴.۶ مگاپاسکال می‌باشد. عملیات بهینه‌سازی نشان داد که در بین نمونه‌های ساخته شده نمونه‌ای دارای بیشترین سختی است که دارای ضخامت لایه و سرعت اکستروژن بالاتر (به ترتیب ۰.۳ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه) و دمای اکستروژن پایین‌تری (۱۹۰ درجه سلسیوس) باشد که در این حالت مقدار سختی برابر با ۲۲ (Shore D) می‌باشد و آزمایش عملی نهایی نیز این ادعا را تأیید کرد. از دیگر نتایج به‌دست آمده از این مطالعه این بود که هر چه قدر ضخامت لایه و دمای اکستروژن بالاتر رود، مقدار چقرمگی نمونه پلیمری ساخته شده به روش FDM بهبود می‌یابد.

آزمایش‌های انجام شده بر روی چقرمگی مشخص کردند که مقدار بهینه چقرمگی در ضخامت لایه و دمای اکستروود یکسان، زمانی رخ می‌دهد که سرعت اکستروود در حد متوسط باشد. مقدار حداکثر چقرمگی در مقدار بیشینه ضخامت لایه (۰.۳ میلیمتر) و مقدار بیشینه دما (۲۰۵ درجه سلسیوس) و مقدار متوسط سرعت اکستروود (۴۰ میلیمتر بر ثانیه) حاصل می‌شود که برابر ۰.۲۱ ژول می‌باشد. همچنین از خروجی آزمایش‌های تجربی مشخص گردید که پارامتر ضخامت لایه در تعیین میزان استحکام کششی قطعات پلیمری ساخته شده، مؤثرترین عامل محسوب می‌شود و از سویی دیگر پارامتر دما در تعیین میزان سختی قطعات پلیمری ساخته شده، مؤثرترین عامل شناخته شد. در نهایت نتایج نشان دادند که در تعیین میزان چقرمگی قطعات پلیمری ساخته شده، ضخامت لایه و سرعت اکستروود مهم‌تر از دمای اکستروود می‌باشند.

## References

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (3 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- [2] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., & Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69(7), 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
- [3] Davoud, M. S. (2005, November 5–11). *Rapid Prototyping Systems: Types, Case Studies, and Integration in a Mechanical Engineering Technology Program*. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-80478>
- [4] Kazemi, M., & Rahimi, A. (2019). Improving the efficiency of fabrication of AM parts by segmentation design in DLP process. *Rapid Prototyping Journal*, 25(7), 1155-1168. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2018-0253>
- [5] Kazemi, M., & Rahimi, A. (2021). An experimental and theoretical study of the abrasion performance of digital light processing parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(6-7), 1022-1035. <https://doi.org/10.1177/0954405420981333>
- [6] Dey, A., & Yodo, N. (2019). A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
- [7] Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- [8] Durgun, I., & Ertan, R. (2014). Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 228-235. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2012-0091>
- [9] Asgari Aghdam, A., DadgarAsl, Y., & Sheikhi, M. (2021). Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM). *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 18(1), 169-188. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.131056>
- [10] Yadav, K., Rohilla, S., Ali, A., Yadav, M., & Chhabra, D. (2023). Effect of Speed, Acceleration, and Jerk on Surface Roughness of FDM-Fabricated Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(14), 6998-7007. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08476-2>

- [11] Marsavina, L., Negru, R., Serban, D., Marghitas, M., & Popa, C. (2023). The notch effect on additive manufactured polymers. *Procedia Structural Integrity*, 47, 744-748. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.045>
- [12] Kam, M., İpekçi, A., & Şengül, Ö. (2023). Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(1), 307-325. <https://doi.org/10.1177/08927057211006459>
- [13] Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A-A., Llumà, J., Borros, S., & Reyes, G. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 83, 670-677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- [14] Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659-681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- [15] Solomon, I. J., Sevvell, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37, 509-514. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>
- [16] Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12(7), 1529. <https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- [17] Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- [18] Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1-27. <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- [19] Maguluri, N., Suresh, G., & Rao, K. V. (2023). Assessing the effect of FDM processing parameters on mechanical properties of PLA parts using Taguchi method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(4), 1472-1488. <https://doi.org/10.1177/08927057211053036>
- [20] Ferretti, P., Leon-Cardenas, C., Santi, G. M., Sali, M., Ciotti, E., Frizziero, L., Donnici, G., & Liverani, A. (2021). Relationship between FDM 3D Printing Parameters Study: Parameter Optimization for Lower Defects. *Polymers*, 13(13), 2190. <https://doi.org/10.3390/polym13132190>
- [21] Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>
- [22] Aliakbari, K., Saberi, M. R., & Andalib, M. (2021). Applying Taguchi method to optimize EDM parameters on Inconel 718 super alloy. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 17(4), 167-186. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128402>
- [23] American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products* (ASTM A370-23). ASTM. <https://www.astm.org/a0370-23.html>
- [24] American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D638-22). ASTM. <https://www.astm.org/d0638-22.html>

- [25] Panahizadeh, V., Abootorabi, M. M., & Saliminia, A. (2022). Optimization of Tool Wear and Surface Roughness in Machining with Cryogenic Treated Tool Using Genetic Algorithm. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 19(1), 565-581. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.304929.1738>
- [26] Taheri, N., Akbari, E., Askari, N., Tajik, V. A., Orojlo, H., Kazemi, A. M., & Ghasemi, G. (2022). Supplementary Damping Controllers Design in VSC HVDC Systems and Wind Farms to Improve Stability and Energy Conversion in Wind Turbine Using Proposed Genetic-Bat Algorithm. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 19(1), 357-381. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.293314.1603>