



Improving the Tensile Strength of 3D-printed Polymer Parts Using the Fused Deposition Modeling by Hot Pressing and Optimizing the Process Parameters

Ali Jadali¹, Vahid Abedini^{2*}, Abdolvahed Kami^{3*}

¹MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnna, Iran.

^{2,3}Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnna, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 05.16.2024

Revised: 07.25.2024

Accepted: 10.15.2024

Keyword:

Additive Manufacturing
Fused Deposition Modeling
Hot Pressing
Mechanical Properties

*Corresponding Authors:

Vahid Abedini and Abdolvahed Kami

Email: v.abedini@semnan.ac.ir .

a.kami@semnan.ac.ir

ABSTRACT

In 3D printing technologies, producing polymer parts with desirable mechanical properties is crucial. The fused deposition modeling (FDM) technique is one of the most common 3D printing processes for manufacturing polymeric parts. However, due to the weak interlayer bonding of the printed parts and consequently inferior mechanical properties, enhancing interlayer bonding is necessary. This study investigated the combination of 3D printing parameters (printing angle) and post-processing via hot pressing (temperature and pressing force). Additionally, the simultaneous optimization of these parameters was conducted to achieve the highest tensile strength in parts made of polylactic acid (PLA). To this end, an experimental design was conducted using the response surface methodology (RSM), and changes in tensile properties concerning the studied parameters were evaluated. The results indicated an interaction between the studied parameters. The optimal values for the raster angle, pressing temperature, and pressure were 90 degrees, 70 degrees Celsius, and 25 N, respectively. Under these conditions, the highest tensile strength of 33 MPa was achieved, showing an approximately 22% increase compared to the initial sample.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Additive Manufacturing (AM) encompasses technologies that produce physical items from virtual 3D models via a layer-by-layer construction process. Unlike subtractive manufacturing, which removes material from a solid block, AM builds the object by adding layers. Material extrusion, specifically the fused deposition modeling (FDM) process, is widely used in AM, utilizing thermoplastic polymers like polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). Due to weak interlayer bonding and consequently inferior mechanical properties, enhancing interlayer bonding through various methods is necessary. The printing process can be optimized by adjusting factors such as raster angle to improve the quality of printed parts.

Another feasible approach for improving part quality is conducting post-processing. Post-processing techniques enhance the part's qualities, performance, and appearance through activities like steam baths and hot-pressing. Hot-pressing involves applying pressure and temperature to enhance mechanical properties. In this study, the influence of raster angle and hot-pressing temperature and force on the mechanical characteristics of 3D-printed PLA components was investigated.

Methodology***Equipment***

The hot-press machine used in this study features dual heated plates with adjustable pressure, controlled by weights, and a temperature regulator that can exceed 300°C. A 7000 series aluminium mold, shaped with two dies matching the geometry of the tensile test samples, was used to apply force. The mold was positioned inside the hot-press machine, with a layer of thermal grease applied at the interface between the dies and the plates to enhance thermal conductivity. Figure 1 shows the hot-pressing die inside the heated platens. The contact surface of the die is greased with a layer of thermal grease and placed between the two heated plates of the hot-press equipment. The SANTAM STM-400 tensile test machine was used for the tensile tests at a 5 mm/min speed.

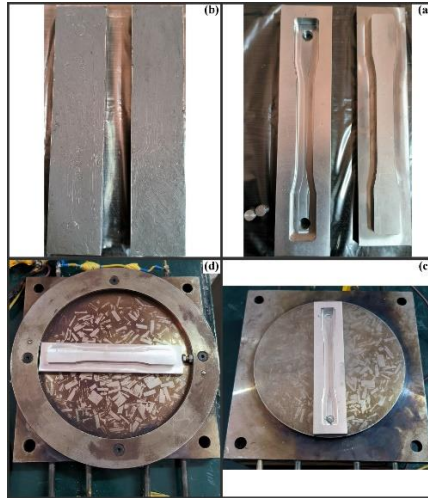


Figure 1. The hot-pressing die and heat plates.

Sample Preparation and Design of Experiments

The experiment used PLA filament (YOUSU, China) with a diameter of 1.75 mm. Samples were designed according to the ASTM D638 Type I standard and then printed using a Quantum 3D printer. The fixed settings for the printing parameters are provided in Table 1. The effects of temperature, force, and raster angle were studied, with values ranging from 70-130°C, 5-25 N, and 0-90°, respectively. The hot-press process duration was fixed at 10 minutes. These parameters were examined using Response Surface Methodology (RSM) and the central composite design in Design-Expert 13 software. Three center points were chosen, resulting in 17 experiments.

Table 1. Fixed parameters of the printing process.

| Parameters | Unit | Value |
|-------------------------------------|--------|-------|
| Extruder temperature | °C | 200 |
| Bed temperature | °C | 60 |
| Print speed | mm/min | 2000 |
| Nozzle diameter | mm | 0.4 |
| Layer height | mm | 0.2 |
| The number of external rigid layers | - | 3 |

Results and discussion

A tensile test was conducted on each sample, producing force-displacement diagrams. The tensile strength was determined by dividing the maximum force by the sample's cross-sectional area. The findings indicated that raster angle and temperature are the primary factors influencing tensile strength, with raster angle having a more significant impact. Perturbation Plots in Figure 2 show that the effect of the raster angle is significantly greater than temperature and force. The increase in temperature during hot-pressing does not

consistently increase the tensile strength of PLA, with the highest strength achieved at the lowest hot-pressing temperature.

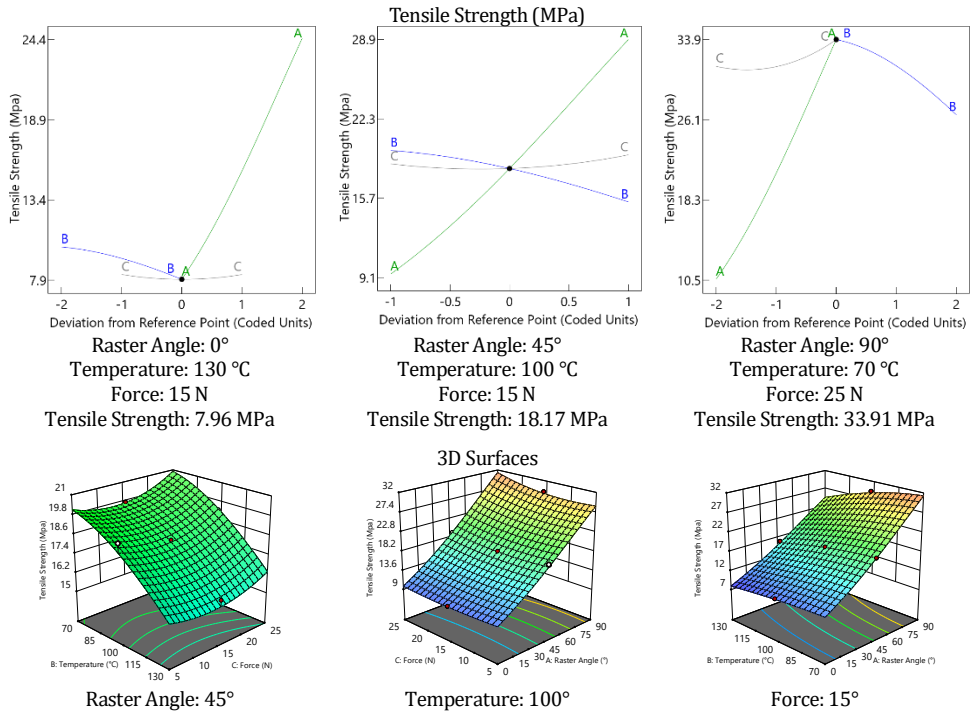


Figure 2. Perturbation plots for the three states of maximum, minimum and median response of tensile strength and 3D surface plots in the median state of three input variables.

Optimization of Parameter

Based on the optimization, the highest tensile strength can be achieved with a raster angle of 90°, a temperature of 70°C, and a force of 25 N. These conditions correspond to the R90T70F25 sample. Figure 3 shows the stress-strain curve of the R90T70F25 sample compared to a raw sample (without hot-pressing). The data indicated that the hot-pressing process increased the tensile strength by approximately 22%.

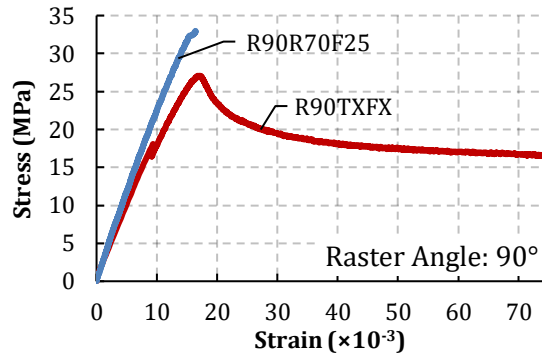


Figure 3. Strain stress diagrams of the optimum hot-pressed and raw samples.

Conclusion

This study aimed to enhance the mechanical properties of PLA printed using FDM technology by investigating the impact of hot-press process parameters, temperature and force in addition to the raster angle, a key printing parameter. Techniques such as Design of Experiments (DOE) and optimization were employed to achieve the desired results. The findings indicated that increasing the temperature during the hot-pressing process negatively affects tensile strength as PLA degrades after passing through its annealing temperature. Temperature emerged as the most crucial factor, with slight variations significantly impacting PLA's tensile strength. The force applied during hot-pressing had a considerably lower impact than temperature and raster angle. Selecting the appropriate raster angle is essential to ensure the desired toughness and elongation at the break of PLA.



بهبود استحکام کششی قطعات پلیمری چاپ‌شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوبی با اعمال پرس گرم و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند

علی جدلی^۱، وحید عابدینی^{۲*}، عبدالواحد کمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۲ و ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در فناوری‌های چاپ سه‌بعدی، تولید قطعات پلیمری با خواص مکانیکی مطلوب، از اهمیت چشمگیری برخوردار است. یکی از رایج‌ترین فرایندهای چاپ سه‌بعدی برای تولید قطعات پلیمری، روش مدل‌سازی رسوب ذوبی است. با این وجود، به دلیل ضعیف‌بودن اتصال بین‌لایه‌ای قطعات چاپ‌شده و در نتیجه ضعف خواص مکانیکی، لازم است پیوند بین لایه‌ای بهبود یابد. در این تحقیق ترکیب پارامترهای چاپ سه‌بعدی (زاویه چاپ) و عملیات تکمیلی پرس گرم (دما و نیروی پرس گرم) مطالعه شده است. همچنین بهینه‌سازی هم‌زمان این پارامترها با هدف رسیدن به بالاترین استحکام کششی در قطعات چاپ‌شده از جنس پلی‌لاکتیک اسید انجام شد. بدین منظور طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ انجام شد و تغییر خواص کششی با تغییر در پارامترها ارزیابی گردید. نتایج نشان‌دهنده تأثیر متقابل بین پارامترهای مورد مطالعه بود. مقادیر بهینه پارامترهای زاویه چاپ، دما و نیروی پرس گرم به ترتیب ۹۰ درجه، ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ نیوتن به‌دست آمد. در این شرایط، بالاترین استحکام کششی یعنی ۳۳ مگاپاسکال به‌دست آمد که در مقایسه با نمونه اولیه حدود ۲۲ درصد افزایش نشان داد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

کلید واژگان:

ساخت افزایشی
مدل‌سازی رسوب ذوبی
پرس گرم
خواص مکانیکی

*نویسندگان مسئول:

وحید عابدینی و عبدالواحد کمی

پست الکترونیکی:

v.adebini@semnan.ac.ir

a.kami@semnan.ac.ir



مقدمه

ساخت افزایشی، مجموعه‌ای از تکنولوژی‌هایی را دربر می‌گیرد که امکان تولید قطعات فیزیکی از مدل‌های سه‌بعدی مجازی را فراهم می‌کنند و در آنها ساخت قطعه به‌صورت لایه‌به‌لایه تا تکمیل کامل قطعه انجام می‌شوند. در مقایسه با فرایندهای ساخت کاهشی که در آن، یک قطعه از یک بلوک ماده شروع می‌شود و با حذف قسمت‌های اضافی تا رسیدن به قطعه نهایی ادامه می‌یابد، ساخت افزایشی با یک مدل نرم‌افزاری آغاز می‌شود و با چاپ یک لایه جدید در بالای لایه قبل، تا کامل شدن قطعه ادامه می‌یابد [۱]. فرایندهای ساخت افزایشی در بسیاری از صنایع مانند پزشکی، خودروسازی، هوافضا ورود پیدا کرده‌اند و رو به پیشرفت هستند [۲]. اکستروژن مواد یک فناوری ساخت افزایشی است که در آن یک فیلامنت پلیمری به‌صورت پیوسته به محل چاپ اضافه می‌شود. این فرایند با استفاده از یک نازل^۱ انجام می‌شود؛ به این صورت که نازل در دمای مشخصی قرار می‌گیرد و سپس مواد وارد آن می‌شود و روی سکوی ساخت به‌طور لایه‌لایه رسوب داده می‌شوند. یک فرایند چاپ پر کاربرد بر اساس روش اکستروژن مواد، مدل‌سازی رسوب ذوبی^۲ (FDM) است که تحت عنوان ساخت به‌وسیله ذوب فیلامنت^۳ (FFF) نیز شناخته می‌شود [۳]. مدل‌سازی رسوب ذوبی در دهه ۹۰ میلادی در آمریکا ظهور پیدا کرد و امروزه برای کاربردهایی مانند مدل‌سازی، نمونه‌سازی و تولید قطعه نهایی به‌کار گرفته می‌شود [۴]. در فرایند FDM، یک منبع پیوسته رشته ترموپلاستیک از طریق یک قرقره برای چاپ لایه‌های مواد برای ساخت قطعه استفاده می‌شود. فیلامنت بدون وقفه وارد نازل می‌شود و توسط المنت حرارتی داخل آن تا فاز نیمه‌مایع گرم می‌شود و این ترموپلاستیک نیمه‌مایع از سوراخ نازل اکسترودر روی بستر یا سکو چاپ، اکستروید می‌شود [۵]. در روش FDM پلیمرهای ترموپلاستیک، اصلی‌ترین مواد مورد استفاده هستند که در بین آنها پلی‌لاکتیک‌اسید^۴ (PLA) و اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۵ (ABS) بیشترین کاربرد را دارند [۶].

کیفیت قطعات چاپ‌شده تحت تأثیر پارامترها و تنظیمات مختلفی است که می‌توان آنها را برای بهینه‌سازی فرایند چاپ تنظیم کرد. یکی از این پارامترها زاویه چاپ است که بیانگر زاویه ماده در حال اکستروید نسبت به محور X سکو ساخت است. معمولاً زاویه چاپ از ۰ تا ۹۰ درجه متغیر است [۷؛ ۸]. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، زاویه چاپ رابطه مستقیم با استحکام کششی قطعات دارد. با کاهش زاویه چاپ از ۹۰ تا ۰ درجه نسبت به راستای بارگذاری مقدار استحکام کششی افزایش می‌یابد [۷]. عملیات تکمیلی به تمام عملیاتی اشاره دارد که پس از خارج کردن قطعه از سکوی ساخت بر روی آن انجام می‌شود. عملیات تکمیلی به دو دسته کلی عملیات تکمیلی اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود. عملیات تکمیلی اولیه به فرایندهای اجتناب‌ناپذیری هستند که باید انجام شوند تا قطعه چاپ‌شده آماده استفاده شود مانند جداسازی مواد نگهدارنده و تمیز کردن قطعه، اما عملیات تکمیلی ثانویه می‌تواند به‌منظور بهبود خواص، عملکرد و ظاهر قطعه چاپ‌شده انجام شود. عملیات تکمیلی ثانویه با توجه به اهداف کاربر انجام می‌شوند که می‌توان به حمام بخار و پرس گرم اشاره کرد. به فرایند قرارگیری قطعه چاپ‌شده در معرض گرما و فشار برای بهبود خواص مکانیکی آن پرس گرم گفته می‌شود [۹]. شایان ذکر است پارامترها و روش‌های خاص مورد استفاده برای پرس گرم ممکن است وابسته به ماده چاپ و نتیجه مورد نظر، متفاوت باشد. همچنین از عوامل مؤثر بر فرایند پرس گرم می‌توان به گرما، نیرو و زمان اشاره کرد.

¹ Nozzle

² Fused Deposition Modeling (FDM)

³ Fused Filament Fabrication (FFF)

⁴ Polylactide (PLA)

⁵ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

گنگ^۱ و همکاران [۱۰]، به بررسی تراکم و الگوی پرشدن، زاویه چاپ و سرعت چاپ در چاپ پلی فنیلن سولفید^۲ پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که استحکام با افزایش تراکم پرشدن و کاهش سرعت چاپ رابطه مستقیم دارد. هوانگ و سینگمننی^۳ [۱۱]، اثر زاویه چاپ بر استحکام کششی را بررسی کردند. مشخص شد که با کاهش زاویه چاپ، استحکام کششی کاهش می‌یابد. مدول الاستیک نیز رفتاری مشابه استحکام کششی از خود نشان داد. راجپورهیت و دیو^۴ [۱۲] به بررسی زاویه چاپ، عرض چاپ و ارتفاع لایه در چاپ FDM ماده PLA پرداخته‌اند. نتایج آن نشان می‌دهد که در عرض چاپ ۶۰۰ میکرومتر بیشترین استحکام کششی به دست می‌آید. جایانت و همکاران^۵ [۱۳]، در تحقیقات به عمل آورده، به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی PLA پرداخته‌اند. طبق نظر آنها علت اصلی استحکام مناسب نداشتن قطعات چاپ شده نسبت به روش‌های معمول، تولید قطعات پلاستیکی مانند تزریق پلاستیک، اتصال ضعیف بین ساختار داخلی چاپ شده است. آنها اظهار داشتند که قرار گرفتن قطعات چاپ شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت موجب افزایش ۸۰ درصدی استحکام کششی نمونه‌ها خواهد شد. همچنین آزمون دمای تغییر شکل حرارتی^۶ بر روی نمونه‌ها در آزمایش آنها نیز انجام شده است که نتایج آن بیانگر افزایش ۷۳ درصدی مقاومت حرارتی بوده است. شبان و همکاران^۷ [۱۴] نیز تحقیقاتی در زمینه تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی PLA انجام داده‌اند. آنها نمونه‌های خود را با دو زاویه چاپ متفاوت (۰ و ۹۰ درجه)، چاپ کردند و در دمای ۵۵، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت قرار دادند و سپس با استفاده از آزمون کشش به بررسی استحکام کششی و با استفاده از میکروسکوپ میزان تخلخل موجود در نمونه‌ها را سنجیدند. نتایج آنها نشان می‌دهد که دمای بهینه برای عملیات حرارتی PLA که به موجب آن شاهد کاهش تخلخل و افزایش استحکام کششی به مقدار ۳۵ درصد بود برابر ۶۵ درجه سانتی‌گراد است. جو و همکاران^۸ [۱۵] تأثیر شرایط گرمایش و عملیات حرارتی در بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش FDM از جنس PLA را بررسی کردند. نمونه‌ها تحت گرمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و اعمال نیرو ۱/۵، ۹ و ۱۹ نیوتن به مدت ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه در دو شرایط چاپ (تغییر دو پارامتر سرعت چاپ (۸۰ و ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه)، و دمای بستر چاپ (۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)) قرار گرفتند. مشخص شد که خواص مکانیکی مستقیماً با ضخامت لایه در ارتباط است و نیز پیوند بین لایه‌ها با اعمال فشار و گرما بهبود یافت که نتیجه آن افزایش استحکام نمونه چاپ شده است.

عبید^۹ و همکاران [۱۶] برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات ABS چاپ شده به روش FDM از روش سطح پاسخ^{۱۰} (RSM) کمک گرفتند. برای ساخت و زاویه چاپ به عنوان پارامترهای ورودی و مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست به عنوان پاسخ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که پارامتر زاویه چاپ بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیسیته و ازدیاد طول تا شکست دارد. همچنین برای ساخت روی تنش تسلیم و استحکام کششی تأثیرگذار بود. کندانانوند^{۱۱} [۱۷]، به بهینه‌سازی متغیرهای دمای چاپ، دمای بستر ساخت، سرعت چاپ و ضخامت لایه برای کاهش زبری سطح پرداخته است. نتایج نشان داد که تنها متغیر تأثیرگذار بر روی زبری سطح نمونه‌های

¹ Geng

² Polyphenylene sulfide (PPS)

³ Huang & Singamneni

⁴ Rajpurohit & Dave

⁵ Jayanth

⁶ Heat Distortion Temperature

⁷ Shbanah

⁸ Jo

⁹ Abid

¹⁰ Response Surface Methodology (RSM)

¹¹ Kandananond

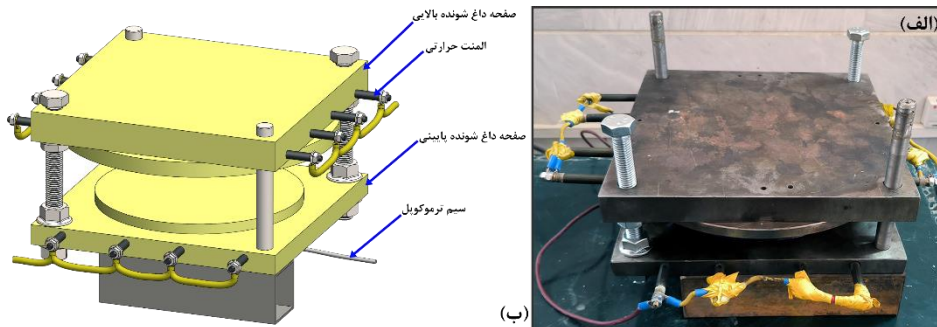
چاپ شده سرعت چاپ است. ال ماگری و وودرویل^۱ [۱۸] برای بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PLA-گرافن به بهینه سازی پارامترهای چاپ از جمله دمای چاپ، سرعت چاپ و ضخامت لایه پرداختند. نتایج آنها نشان می دهد تمام پارامترهای نامبرده بر خواص مکانیکی نمونه ها تأثیر گذار هستند. بهترین خواص مکانیکی با چاپ قطعات در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد، سرعت ۳۵ میلی متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۰/۲ میلی متر به دست آمد.

مرور منابع نشان می دهد که بررسی تأثیر پارامترهای چاپ سه بعدی یا عملیات تکمیلی بر بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ سه بعدی بسیار رایج است. با این حال، ترکیب پارامترهای چاپ سه بعدی و عملیات تکمیلی پرس گرم، که هدف این پژوهش است، به دلیل پیچیدگی و تأثیر متقابل بین این پارامترها کمتر بررسی شده است. این پژوهش با ارزیابی هم زمان تأثیر دو فرایند بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده، امکان تحلیل دقیق تر این تأثیرات را فراهم می کند. پرس گرم نمونه های چاپ سه بعدی در قالبی با هندسه مشابه با نمونه چاپ شده انجام شد و مقادیر بهینه پارامترها برای دستیابی به بالاترین استحکام کششی تعیین گردید.

روش تحقیق

تجهیزات

دستگاه پرس گرم مورد استفاده در این مطالعه، مجهز به دو صفحه داغ شونده است که امکان اعمال نیروهای مختلف بر روی قطعه قرار گرفته بین آنها را با استفاده از وزنه، فراهم می کند. همچنین، این دستگاه دارای یک تنظیم کننده دما است که امکان تنظیم دمای دو صفحه را تا حداکثر ۳۰۰ درجه سانتی گراد فراهم می کند. دستگاه و شماتیک آن در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱. (الف) قالب پرس گرم (ب) شماتیک قالب و اجزای آن.

برای اعمال فشار روی نمونه های کشش، یک قالب از جنس آلومینیوم، با یک جفت سنبه و ماتریس دارای هندسه یکسان با نمونه های آزمون کشش ماشین کاری شد. در قالب طراحی شده اختلاف ارتفاع حفره و سنبه قالب به اندازه ۲ میلی متر بیشتر از ضخامت نمونه ها است. این طراحی باعث می شود که پیش از تماس قالب با نمونه ها، دو کفه قالب هم راستا شوند. همچنین کفه بالایی قالب به کمک میله های راهنما به سمت پایین حرکت می کند و باعث اعمال نیروی یکنواخت به نمونه ها می شود. همچنین در محل تماس سنبه و ماتریس با دو صفحه دستگاه پرس گرم، یک لایه گریس

¹ El Magri & Vaudreuil

گرمایی^۱ برای بهبود انتقال حرارت بین قالب و صفحه‌های دستگاه پرس گرم قرار داده شد. در شکل ۲، سنبه و ماتریس قالب و نحوه قرارگیری آنها در دستگاه پرس گرم قابل مشاهده است.



شکل ۲. الف) قالب نمونه‌های آزمون کشش، (ب) قرارگیری ماتریس قالب بر روی صفحه پایینی دستگاه پرس گرم، (پ) قرارگیری سنبه بر روی صفحه بالایی دستگاه پرس گرم.

برای انجام آزمون کشش از دستگاه کشش سنتام STM-۴۰۰ با سرعت آزمایش ۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. برای بررسی سطح مقطع نمونه‌ها، تصاویر با بزرگنمایی‌هایی متعدد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ مدل Sigma ۳۰۰-HV ساخت شرکت Ziess تهیه شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از فیلامنت سفید PLA ساخت شرکت چینی YOUSU با قطر ۱.۷۵ میلی‌متر و دستگاه چاپ کوانتوم ۳D انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از نرم‌افزار ۲۰۲۳ SOLIDWORKS و مطابق استاندارد ASTM D۶۳۸ [۱۹]، نوع I طراحی شدند. در ادامه نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ۳D V۴.۱۲ Simplify به یک فایل لایه‌لایه تبدیل شدند. با توجه به طراحی آزمایش، در مجموع ۲۰ نمونه چاپ شد که تعداد ۱۷ نمونه تحت عملیات تکمیلی پرس گرم قرار گرفتند.

پارامترهایی که در چاپ نمونه‌ها به‌عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفته شدند شامل قطر نازل، ارتفاع لایه، دمای بستر ساخت، درصد پرسوندگی، دمای چاپ و سرعت چاپ بودند که در جدول ۱، مقادیر این آنها آورده شده است.

جدول ۱. مقدار پارامترهای ثابت فرایند چاپ نمونه‌ها.

| پارامتر | واحد | مقدار |
|--|--------|-------|
| دمای اکسترودر | °C | ۲۰۰ |
| دمای بستر ساخت | °C | ۶۰ |
| سرعت چاپ | mm/min | ۲۰۰۰ |
| قطر نازل | mm | ۰/۴ |
| ارتفاع لایه | mm | ۰/۲ |
| تعداد لایه توپر خارجی (برای تمامی نواحی خارجی) | ----- | ۳ |

¹ Thermal grease

² Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

طراحی آزمایش

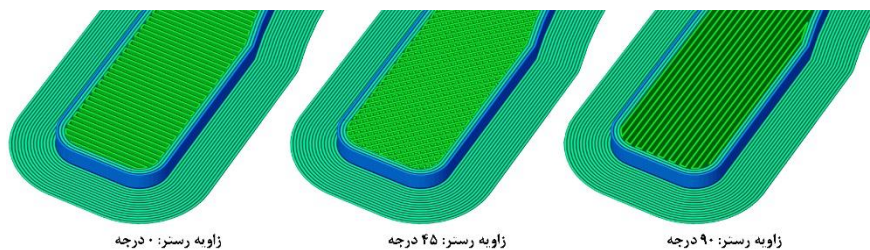
طراحی آزمایش^۱، یک روش نظام‌مند و کارآمد است که به کمک آن می‌توان رابطه بین متغیرهای ورودی چندگانه و متغیرهای خروجی کلیدی را مطالعه کرد. این روش یک رویکرد منظم برای جمع‌آوری داده‌ها است که می‌تواند رسیدن به نتایج بهینه را با زمان و هزینه کمتری ممکن سازد [۲۰]. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی/آماري برای ساخت مدل تجربی و بهره‌برداری از مدل را دربر می‌گیرد. با استفاده از طراحی و تجزیه و تحلیل مناسب آزمایش‌ها، روش سطح پاسخ، به دنبال ارتباط پاسخ با سطوح تعدادی از متغیرهای ورودی یا عواملی است که بر آن تأثیر می‌گذارند [۲۱؛ ۲۲]. هدف این روش به‌دست‌آوردن بهترین پاسخ‌های ممکن با بهینه‌سازی متغیرهای ورودی از طریق یک نرم‌افزار خاص به‌صورت محاسباتی است. این روش، کیفیت فرمولاسیون را تا حد قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۲۳]. طرح مرکب مرکزی^۲ رایج‌ترین طرح فاکتوریل کسری مورداستفاده در مدل سطح پاسخ است. با این طراحی می‌توان مدل‌های مرتبه اول و دوم را با سرعت بالایی تخمین زد [۲۴].

متغیرهای موردبررسی شامل دو پارامتر دما و نیروی پرس و زاویه چاپ است. شایان ذکر است زمان فرایند پرس گرم در عملیات تکمیلی ثابت و ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. سه پارامتر نامبرده با استفاده از روش سطح پاسخ و زیر مجموعه طرح مرکب مرکزی^۳ در نرم‌افزار ۱۳ Design-Expert بررسی شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای متغیر آزمایش همراه با مقادیر آنها.

| پارامتر | واحد | مقدار |
|--------------------------------|------|----------------|
| دمای پرس گرم | °C | ۷۰ - ۱۰۰ - ۱۳۰ |
| نیروی اعمالی در فرایند پرس گرم | N | ۵ - ۱۵ - ۲۵ |
| زاویه چاپ | ° | ۰ - ۴۵ - ۹۰ |

زاویه چاپ نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای تعداد ۳۵ لایه بودند که مجموعاً در مدت‌زمان ۳۰ ساعت چاپ شدند. پس از واردکردن اطلاعات در نرم‌افزار ۱۳ Design Expert تعداد سه نقطه به‌عنوان نقاط مرکزی با مقدار آلفا ۱ انتخاب شدند. در نتیجه ۱۷ آزمایش به‌دست آمد که چاپ و پرس گرم نمونه‌ها مطابق آن انجام شد.



شکل ۳. زاویه چاپ نمونه‌ها.

¹ Design of Experiment (DOE)

² Central Composite Design (CCD)

³ Central Composite Design (CCD)

نتایج و تفسیر آن‌ها

عملیات تکمیلی طبق جدول طراحی آزمایش روی تمام نمونه‌های چاپ‌شده از جنس PLA انجام شدند و سپس آزمون کشش روی آن‌ها انجام شد که نتیجه آن یک نمودار نیرو- جابه‌جایی برای هر نمونه بود که با تقسیم مقدار بیشینه نیرو به سطح مقطع اولیه نمونه، استحکام کششی هر کدام محاسبه شد [۲۲]. در جدول ۳ شرایط ساخت هر نمونه و همچنین استحکام کششی آنها گزارش شده است. در جدول ۳، حرف R در شماره نمونه معرف زاویه چاپ، T دمای پرس و F نیروی پرس است. برای مثال نمونه R۰TV۰F۵ با زاویه ۰ درجه چاپ شده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و نیروی فشاری ۵ نیوتن پرس گرم شده است.

جدول ۳. حالت‌های پیشنهادی نرم‌افزار به علاوه سه حالت اضافه‌شده برای انجام آزمایش به همراه استحکام کششی و ضخامت هر کدام.

| ردیف | شماره نمونه | زاویه چاپ (°) | دما (°C) | نیرو (N) | استحکام کششی (MPa) | ضخامت (mm) | مقدار کاهش ضخامت (%) |
|------|-------------|---------------|----------|----------|--------------------|------------|----------------------|
| ۱ | R۰TV۰F۵ | ۰ | ۷۰ | ۵ | ۱۰/۲۵ | ۷/۰۳ | ۲/۳۶ |
| ۲ | R۰TV۰F۲۵ | ۰ | ۷۰ | ۲۵ | ۱۰/۹۵ | ۶/۳۲ | ۱۲/۵۰ |
| ۳ | R۰T۱۰۰F۱۵ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۹/۵۲ | ۶/۹۸ | ۳/۰۶ |
| ۴ | R۰T۱۳۰F۵ | ۰ | ۱۳۰ | ۵ | ۸/۴۵ | ۶/۳۲ | ۱۲/۲۲ |
| ۵ | R۰T۱۳۰F۲۵ | ۰ | ۱۳۰ | ۲۵ | ۸/۰۱ | ۶/۵۴ | ۹/۱۷ |
| ۶ | R۴۵TV۰F۱۵ | ۴۵ | ۷۰ | ۱۵ | ۱۹/۶۹ | ۶/۸۸ | ۴/۴۴ |
| ۷ | R۴۵T۱۰۰F۵ | ۴۵ | ۱۰۰ | ۵ | ۱۹/۱۲ | ۶/۶۳ | ۷/۹۲ |
| ۸ | R۴۵T۱۰۰F۱۵ | ۴۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۱۸/۳۰ | ۶/۶۰ | ۸/۳۳ |
| ۹ | R۴۵T۱۰۰F۱۵ | ۴۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۱۷/۱۶ | ۶/۶۶ | ۷/۵۰ |
| ۱۰ | R۴۵T۱۰۰F۱۵ | ۴۵ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۱۸/۰۲ | ۶/۸۲ | ۵/۲۸ |
| ۱۱ | R۴۵T۱۰۰F۲۵ | ۴۵ | ۱۰۰ | ۲۵ | ۱۹/۲۴ | ۶/۷۰ | ۶/۹۴ |
| ۱۲ | R۴۵T۱۳۰F۱۵ | ۴۵ | ۱۳۰ | ۱۵ | ۱۵/۷۹ | ۶/۹۰ | ۴/۱۷ |
| ۱۳ | R۹۰TV۰F۵ | ۹۰ | ۷۰ | ۵ | ۳۲/۰۸ | ۶/۷۳ | ۶/۵۳ |
| ۱۴ | R۹۰TV۰F۲۵ | ۹۰ | ۷۰ | ۲۵ | ۳۲/۹۸ | ۶/۰۵ | ۱۵/۹۷ |
| ۱۵ | R۹۰T۱۰۰F۱۵ | ۹۰ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۲۹/۲۹ | ۶/۷۵ | ۶/۲۵ |
| ۱۶ | R۹۰T۱۳۰F۵ | ۹۰ | ۱۳۰ | ۵ | ۲۳/۴۹ | ۷/۰۸ | ۱/۶۷ |
| ۱۷ | R۹۰T۱۳۰F۲۵ | ۹۰ | ۱۳۰ | ۲۵ | ۲۷/۳۱ | ۷/۰۲ | ۲/۵۰ |
| ۱۸ | R۰TXFX | ۰ | ----- | ----- | ۸/۹۱ | | |
| ۱۹ | R۴۵TXFX | ۴۵ | ----- | ----- | ۱۵/۴۳ | ۷/۲۰ | |
| ۲۰ | R۹۰TXFX | ۹۰ | ----- | ----- | ۲۷/۰۶ | | |

تحلیل آماری

– آنالیز واریانس و آماره برازش

نتایج مربوط به آنالیز واریانس^۱ و آماره برازش^۲ برای استحکام کششی در جدول ۴ آورده شده است. مقدار F-value یک آماره آزمون است که نشان می‌دهد که آیا تفاوت معناداری بین میانگین گروه‌های مختلف وجود دارد یا خیر. p-value نیز معیاری است که برای ارزیابی اهمیت آماری تفاوت‌های مشاهده شده در نمونه‌ها استفاده می‌شود. با توجه به مقادیر p-value، مقادیر زیر ۰/۰۵ به معنی وجود تفاوت معنادار و برخوردار از اهمیت آماری می‌باشد. آماره‌های برازش مانند R² و Adequate Precision نشان می‌دهند که مدل مورداستفاده چقدر معنادار بوده است و توانایی پیش‌بینی دقیق مقادیر وابسته را دارد. در این جدول، مقادیر R² و Adequate Precision نشان می‌دهند که مدل به خوبی با داده‌ها همخوانی دارد و قادر به پیش‌بینی دقیق مقادیر استحکام کششی است. آماره میزان تأثیرگذاری^۳ اهمیت نسبی و درصد تأثیر هر کدام از ورودی‌ها بر روی پاسخ را نشان می‌دهد [۲۵-۲۷].

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

| آنالیز واریانس | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|-------------------------|------------|-------------------------|----------------|
| میزان تأثیرگذاری (%) | p-value | F-value | میانگین توان دوم | درجه آزادی | مجموع مربعات | مدل |
| معنادار | <۰/۰۰۰۱ | ۲۰/۱/۱ | ۰/۳۷۲۳ | ۹ | ۳/۳۶ | مدل |
| زاویه چاپ-A | <۰/۰۰۰۱ | ۱۶۹۹/۴۴ | ۳/۱۵ | ۱ | ۳/۱۵ | زاویه چاپ-A |
| دما-B | <۰/۰۰۰۱ | ۸۰/۹۸ | ۰/۱۵۰۳ | ۱ | ۰/۱۵۰۳ | دما-B |
| نیرو-C | ۰/۱۹۰۳ | ۲/۱ | ۰/۰۰۳۹ | ۱ | ۰/۰۰۳۹ | نیرو-C |
| AB | ۰/۹۷۰۱ | ۰/۰۰۱۵ | ۲/۸۰ × ۱۰ ^{-۶} | ۱ | ۲/۸۰ × ۱۰ ^{-۶} | AB |
| AC | ۰/۲۱۶۹ | ۱/۸۴ | ۰/۰۰۳۴ | ۱ | ۰/۰۰۳۴ | AC |
| BC | ۰/۹۷۸۳ | ۰/۰۰۰۸ | ۱/۴۷ × ۱۰ ^{-۶} | ۱ | ۱/۴۷ × ۱۰ ^{-۶} | BC |
| A ² | ۰/۰۰۷۵ | ۱۳/۸ | ۰/۰۲۵۶ | ۱ | ۰/۰۲۵۶ | A ² |
| B ² | ۰/۱۴۴۹ | ۲/۶۹ | ۰/۰۰۰۵ | ۱ | ۰/۰۰۰۵ | B ² |
| C ² | ۰/۱۶۳ | ۲/۴۳ | ۰/۰۰۴۵ | ۱ | ۰/۰۰۴۵ | C ² |
| باقی مانده | | | ۰/۰۰۱۹ | ۷ | ۰/۰۱۳ | باقی مانده |
| نقص برازش | ۰/۳۷۹ | ۱/۹۱ | ۰/۰۰۲۱ | ۵ | ۰/۰۱۰۷ | نقص برازش |
| خطا خالص | | | ۰/۰۰۱۱ | ۲ | ۰/۰۰۲۳ | خطا خالص |
| کل تصحیح شده | | | | ۱۶ | ۳/۳۷ | کل تصحیح شده |
| آماره برازش | | | | | | |
| R ² | | | | | ۰.۹۹۶۱ | |
| Adjusted R ² | | | | | ۰.۹۹۱۲ | |
| Predicted R ² | | | | | ۰.۹۴۲۰ | |
| Adequate Precision | | | | | ۴۲.۶۴۰۵ | |

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

² Fit Statistics

³ Percent Effect

بر اساس نتایج آنالیز واریانس معادله (۱) برای پیش‌بینی استحکام کششی PLA به‌دست آمد که یک معادله درجه دوم است و جملات غیرخطی دارد. جملات غیرخطی بیانگر تأثیرات متقابل پارامترهای موردبررسی است. در این مدل، زاویه چاپ، دما و توان دوم زاویه چاپ به‌عنوان عوامل با اثر بالاتر بر استحکام کششی هستند که در معادله (۱) نیز ضرایب بزرگ‌تری نسبت به سایر جملات دارند. شایان ذکر است زاویه چاپ در مقایسه با دما تأثیر بسیار بیشتری دارد. همچنین نتایج آنالیز واریانس و آماره برازش (جدول ۴) نشان می‌دهد که مدل به‌دست‌آمده معنادار است و قابلیت استناد دارد [۲۸].

$$\begin{aligned} \ln(TS) = & (2.26614) + (0.016095R) + (0.005468T) - (0.012545F) \\ & + (4.38228 \times 10^{-7} \times RT) + (0.000046RF) \\ & + (1.42997 \times 10^{-6} \times TF) - (0.000048R^2) - (0.000048T^2) \\ & + (0.00041F^2) \end{aligned}$$

TS: استحکام کششی (۱)

R: زاویه چاپ

T: دما

F: نیرو

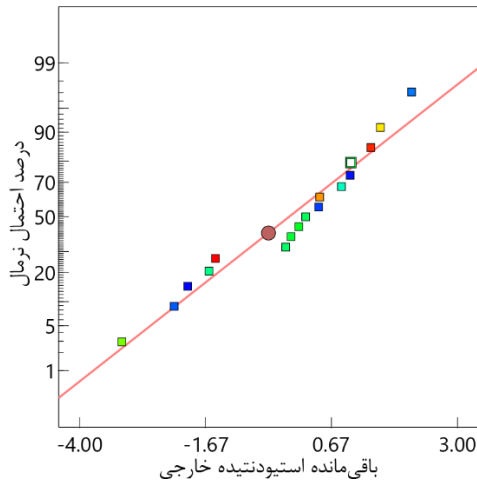
– نمودارهای برازش^۱

نمودارهای لازم برای تشخیص کیفیت برازش مدل انتخاب‌شده شامل نمودارهای احتمال نرمال^۲ و باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب اجرای آزمایش^۳ است. نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که آیا باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، در نتیجه رفتار آنها باید از یک خط مستقیم پیروی کند [۲۹]. هرچه داده‌ها مربوط به باقی‌مانده‌ها نزدیک به این خط مستقیم باشد می‌توان اطمینان بیشتری به مدل انتخاب‌شده داشت. نمودار باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب اجرای آزمایش، متغیرهای پنهانی را که ممکن است در طول آزمایش بر روی پاسخ تأثیر گذاشته باشند بررسی می‌کند. با توجه به شکل ۴، از آن جایی که تمامی مشاهدات تا حدود قابل‌قبولی از یک خط مستقیم پیروی می‌کنند می‌توان دریافت که مدل معرفی‌شده، شرایط مناسبی برای تشخیص رفتار استحکام کششی با تغییرات پارامترهای ورودی دارد [۳۰].

¹ Diagnostic Plots

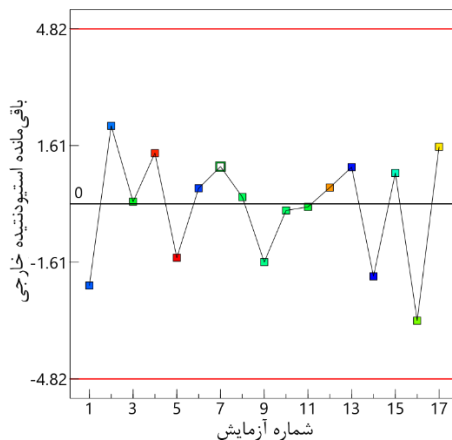
² Normal Probability

³ Residuals vs. Run



شکل ۴. نمودار احتمال نرمال برای استحکام کششی.

باقی مانده‌های استیودنتیده خارجی^۱، نوعی از باقی مانده‌ها هستند که در آمار برای ارزیابی مناسب بودن برازش یک مدل رگرسیون^۲ استفاده می‌شود. آنها با حذف تأثیر یک داده خاص از مدل و سپس محاسبه باقی مانده برای آن داده، محاسبه می‌شوند. این فرایند برای ارزیابی میزان تأثیر یک مشاهده منفرد بر تحلیل رگرسیون کلی انجام می‌شود. به عبارت دیگر، باقی مانده‌های استیودنتیده خارجی، تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای یک داده خاص را اندازه‌گیری می‌کنند که برای تأثیر آن داده بر بقیه مدل تنظیم شده است. این امر به شناسایی داده پرت که ممکن است بر تناسب کلی مدل رگرسیون تأثیر بگذارد کمک می‌کند. همان‌طور که بیان شد در نمودار باقی مانده‌ها نسبت به ترتیب اجرای آزمایش، باید تمامی نقاط در بازه تعریف شده قرار گیرند که طبق شکل ۵، همین اتفاق برای پاسخ استحکام کششی افتاده است و می‌توان طبق این نمودار پراکندگی مناسب مشاهدات را استناد کرد.



شکل ۵. نمودار باقی مانده‌ها نسبت به ترتیب اجرای آزمایش برای پاسخ استحکام کششی.

¹ Externally Studentized Residuals

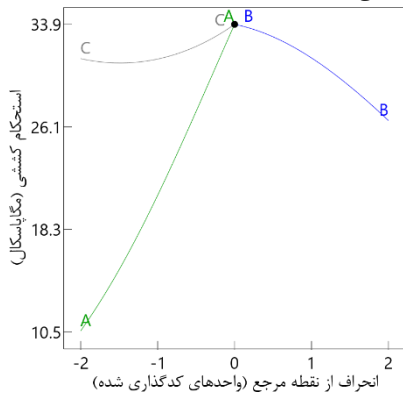
² Regression Model

- نمودارهای مدل (تأثیر متغیرها بر روی پاسخ‌های فرایند)

یکی از روش‌های تشخیص نحوه اثرگذاری هر متغیر بر پاسخ، توجه به ضریب آن در مدل به دست آمده است؛ به این صورت که اگر ضریب متغیر مثبت باشد؛ با پاسخی که آن مدل در حال توصیف آن است رابطه مستقیم دارد و اگر ضریب متغیر منفی باشد؛ آن متغیر با پاسخ، رابطه معکوس دارد. برای تشخیص دقیق‌تر اثر متغیرها باید از نمودار اغتشاش^۱ استفاده کرد. نمودار اغتشاش به مقایسه تأثیرات همه فاکتورها در یک نقطه خاص در فضای طراحی کمک می‌کند. پاسخ با تغییر تنها یک فاکتور در محدوده آن، در حالی که دیگر فاکتورها ثابت هستند، رسم می‌شود. در این نمودار شیب تند یا انحنای یک فاکتور نشان می‌دهد که پاسخ به این فاکتور چقدر حساس هستند. در نتیجه یک خط نسبتاً صاف حساسیت نداشتن پاسخ به تغییرات در آن فاکتور را نشان می‌دهد. نمودار دیگری که برای توضیح تغییرات رفتار پاسخ نسبت به تغییرات متغیرها استفاده می‌شود نمودار سطح سه بعدی^۲ است. در ادامه به بررسی دو نمودار نامبرده برای هر یک از پاسخ‌ها و متغیرهای بررسی شده در این پژوهش، پرداخته شده است. شایان ذکر است که نمودارهای اغتشاش با استفاده از کدبندی‌های صورت گرفته برای هر پارامتر رسم شده‌اند که تعبیر آنها به این صورت است که عدد ۱- بیانگر کمترین مقدار پارامتر، عدد ۰ به معنی حد وسط آن پارامتر و عدد ۱ به معنی بیشترین مقدار پارامتر خواهد بود. برای مثال عدد ۱- برای دما به معنی ۷۰ درجه سانتی‌گراد، عدد ۰ به معنی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و عدد ۱ به معنی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

با توجه به نمودارهای شکل ۶ می‌توان دریافت که دو پارامتر تأثیرگذار بر استحکام کششی، زاویه چاپ و دما هستند که تأثیر زاویه چاپ با توجه به شیب این پارامتر در نمودارهای اغتشاش، بسیار بیشتر از دو پارامتر دیگر است همچنین پارامتر سوم یعنی نیرو نیز تأثیر بسیار کمی بر استحکام کششی دارد. با توجه به این نمودارها و صرف نظر از پارامتر زاویه چاپ، لزوماً افزایش دما در فرایند پرس گرم به افزایش استحکام کششی PLA منجر نمی‌شود و همان‌طور که از نمودارهای اغتشاشی موجود در شکل ۶ نیز پیداست شرایط بیشترین استحکام در کمترین دما پرس گرم اتفاق افتاده است.

نمودارهای اغتشاشی

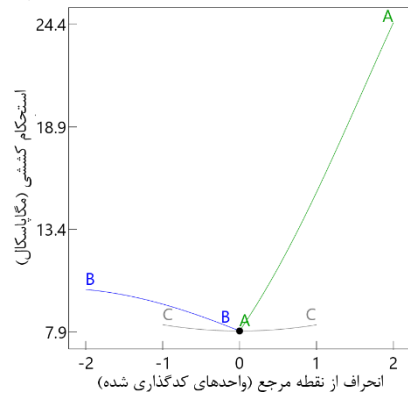


زاویه چاپ: ۹۰ درجه

دما: ۷۰ درجه سانتی‌گراد

نیرو: ۲۵ نیوتن

استحکام کششی: بیشینه (۳۳/۹۱ مگاپاسکال)



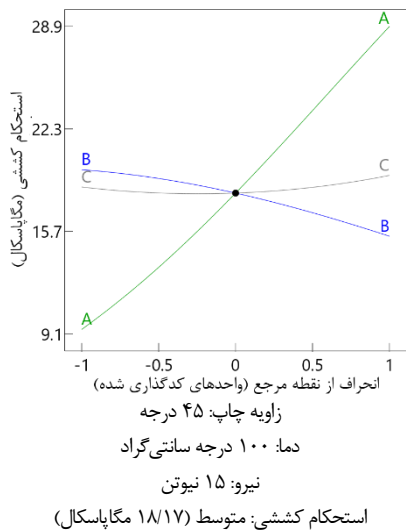
زاویه چاپ: ۰ درجه

دما: ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد

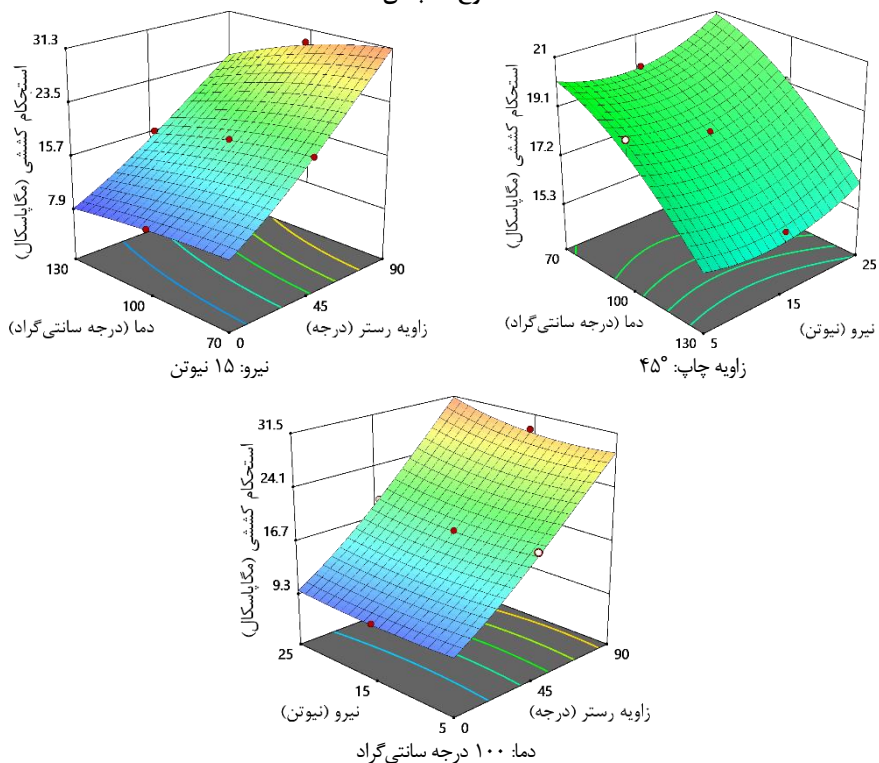
نیرو: ۱۵ نیوتن

استحکام کششی: کمینه (۷/۹۶ مگاپاسکال)

^۱ Perturbation Plot^۲ 3D Surface Plot



سطوح سه بعدی



شکل ۶. نمودارهای اغتشاشی برای سه حالت بیشترین، کمترین و میانه پاسخ استحکام کششی و سطوح سه بعدی در حالت میانه سه متغیر ورودی.

بهینه‌سازی پارامترها

بهینه‌سازی عددی، روشی برای یافتن بهترین شرایط یک مدل ریاضی با انتخاب نظام‌مند مقادیر ورودی از داخل یک مجموعه مجاز و محاسبه مقدار تابع استفاده می‌شود. مانند حداکثر یا حداقل یک پاسخ، در یک مدل ریاضی که الزامات آن با معادلات خطی یا غیرخطی نشان داده می‌شود. بهینه‌سازی یک ابزار مهم برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب بهترین شرایط، به‌منظور دستیابی به بهترین نتایج ممکن است. با توجه به اینکه پاسخ استحکام کششی در این پژوهش از دیگر پاسخ‌های بررسی‌شده اهمیت بیشتری دارد؛ شرایط بهینه‌سازی به‌گونه‌ای تعیین شده است تا شرایطی که استحکام کششی در آن به حداکثر مقدار خود می‌رسد مشخص شود. جدول ۵، شرایط بهینه‌سازی عددی تعریف‌شده در نرم‌افزار ۱۳ Design Expert را نشان می‌دهد.

جدول ۵. شرایط اعمال‌شده برای بهینه‌سازی عددی مدل.

| متغیر | هدف | حد پایین | حد بالا | اهمیت |
|----------------------------|-----------|----------|---------|-------|
| زاویه چاپ ($^{\circ}$) | در محدوده | ۰ | ۹۰ | ۳ |
| دما ($^{\circ}\text{C}$) | در محدوده | ۷۰ | ۱۳۰ | ۳ |
| نیرو (N) | در محدوده | ۵ | ۲۵ | ۳ |
| استحکام کششی (MPa) | حداکثر | ۸۰۱ | ۳۲/۹۸ | ۵ |

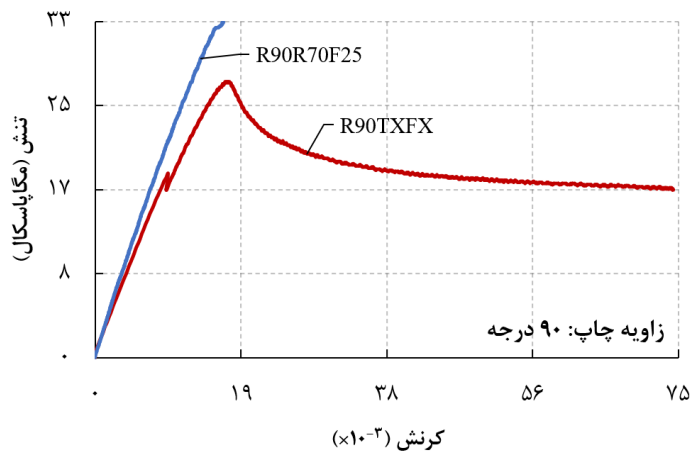
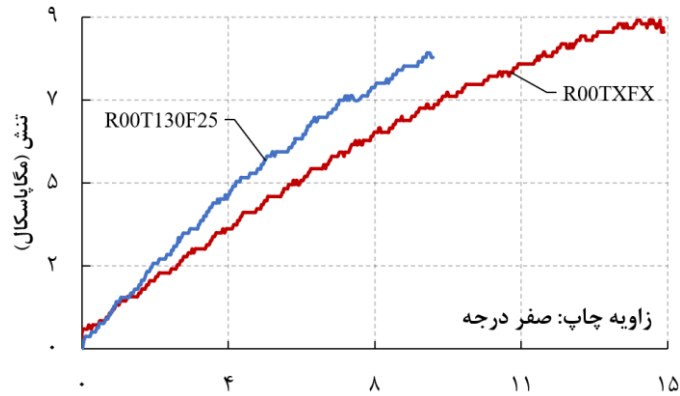
نتیجه بهینه‌سازی با مطلوبیت ۱ بیانگر این موضوع است که برای دستیابی به بیشترین مقدار استحکام کششی با استفاده از سه پارامتر زاویه چاپ در فرایند چاپ و دما و نیرو در فرایند پرس گرم باید این مقادیر را به زاویه چاپ ۹۰ درجه، دما ۷۰ درجه سانتی‌گراد و نیرو ۲۵ نیوتن نزدیک کرد. شایان ذکر است که شرایط نامبرده با شرایط آماده‌سازی یکی از نمونه‌های جدول ۳ یعنی نمونه با شماره R۹۰.T۷۰.F۲۵ یکسان است.

مقایسه نمونه هدف

با توجه به استحکام نمونه‌های شماره R۹۰.T۷۰.F۲۵ و R۰۰.T۱۳۰.F۲۵، این نمونه‌ها به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار استحکام هستند. این نمونه‌ها به‌عنوان نمونه هدف انتخاب شدند. با توجه به جدول ۳، خواص کششی نمونه‌های هدف و خام در جدول ۶ مقایسه شده است. با توجه به این جدول می‌توان دریافت که فرایند پرس گرم موجب بهبود حدود ۲۲ درصدی استحکام کششی شده است. همچنین نمودارهای تنش-کرنش هرکدام از نمونه‌ها همراه با نمونه خام در شکل ۷ آورده شده است.

جدول ۶. اطلاعات مربوط به نمونه هدف و نمونه خام همراه با مقایسه آنها.

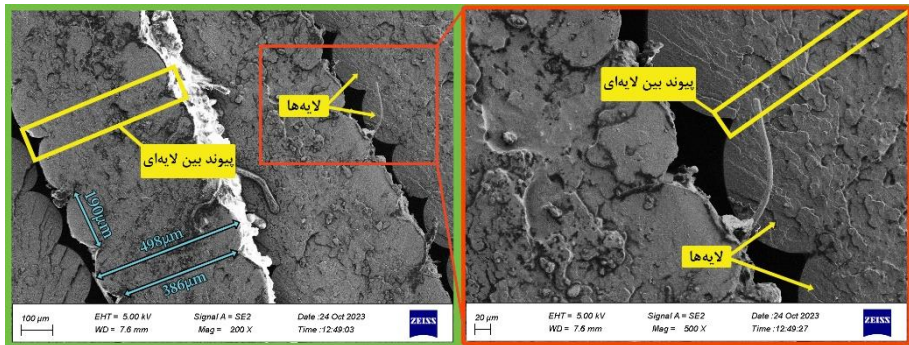
| شماره نمونه | استحکام کششی (MPa) |
|---------------|--------------------|
| R۹۰.TXFX | ۲۷/۰۶ |
| R۹۰.T۷۰.F۲۵ | ۳۲/۹۸ |
| نوع رفتار | افزایشی |
| تغییر (%) | ۲۱/۸۸ |
| میزان خطا (%) | ۲/۸۲ |



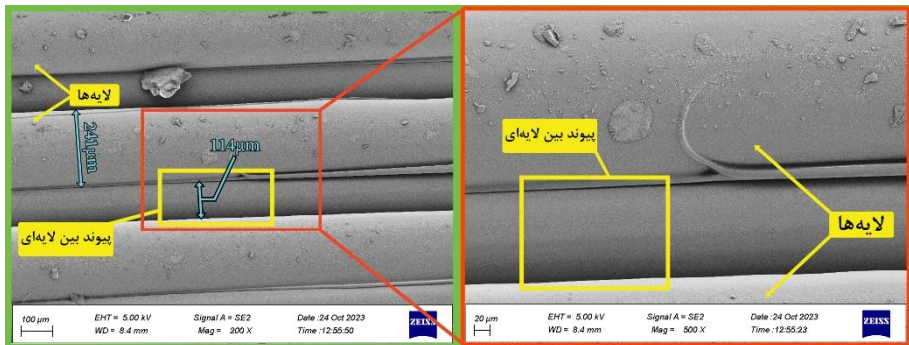
شکل ۷. نمودارهای تنش کرنش مربوط به نمونه‌های هدف و خام.

با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت عملیات پرس گرم موجب ترد شدن PLA شده است زیرا نمودار تنش کرنش بیانگر آن است که شکست R90TV0F25، پس از فرایند پرس گرم از نوع شکست ترد بوده است. در شکل ۸، تصاویر مربوط به سطح مقطع شکست این دو نمونه قابل مشاهده است که تأثیر فرایند پرس گرم بر ساختار داخلی را بیان می‌کند. پرس گرم بر پیوند بین لایه‌های تأثیر مستقیم می‌گذارد که به موجب آن سطح تماس بین لایه‌ها بیشتر می‌شود که موجب بهبود استحکام کششی PLA شده است. شایان ذکر است مقایسه مقدار استحکام کششی گزارش شده در فرایند بهینه‌سازی که تقریباً برابر ۳۳/۹۱ مگاپاسکال است حاکی از آن است که میزان خطا برای این پاسخ برابر ۲/۸۲ درصد خواهد بود.

در شکل ۸، نتایج تصاویر FESEM مربوط به سطح مقطع شکست دو نمونه با کمترین و بیشترین مقدار استحکام کششی با دو بزرگ‌نمایی مختلف آورده شده است که با توجه به آنها پیوند بین لایه‌های در نمونه قوی بعد از فرایند پرس گرم بهبود یافته است در حالی که در نمونه ضعیف‌تر به دلیل انحطاط رخ داده در PLA (که منشأ این پدیده دمایی فرایند پرس گرم و زاویه چاپ است) پیوند بین لایه‌های تضعیف شده و استحکام کششی کمتری نتیجه داده است.



R۹۰T۷۰F۲۵ (بیشترین استحکام کششی)



R۰۰T۱۳۰F۲۵ (کمترین استحکام کششی)

شکل ۸. تصاویر FESEM از سطح مقطع شکست دو نمونه با بیشترین و کمترین استحکام کششی.

نتیجه گیری

- در این پژوهش تأثیر پارامترهای فرایند پرس گرم (دما و نیرو) و فرایند چاپ (زاویه چاپ) بر بهبود خواص مکانیکی PLA چاپ شده به روش FDM بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به قرار زیر است:
- مؤثرترین پارامتر در فرایند پرس گرم، دما می‌باشد ولی باید توجه داشت افزایش بیش از حد دما باعث عبور از دمای آنیل PLA و تخریب مولکولی آن و در نتیجه کاهش استحکام کششی قطعات چاپ شده می‌شود.
 - معادله ریاضی توسعه یافته توانایی پیش‌بینی تنش کششی نمونه‌های PLA را دارد. این مدل بیانگر چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند بر خواص کششی قطعات چاپی است. علاوه بر این، معادله ریاضی به دست آمده امکان بهینه‌سازی شرایط پرس گرم برای بیشینه‌کردن تنش کششی را در حالی که سایر ویژگی‌های مکانیکی در محدوده قابل قبول قرار گیرند فراهم کرد.
 - این مطالعه نشان داد که با بهینه‌سازی پارامترهای فرایند پرس گرم می‌توان بهبود قابل توجهی (۲۲ درصد) در تنش کششی و سایر ویژگی‌های مکانیکی قطعات حاصل کرد. بنابراین، بررسی هم‌زمان پارامترهای مرتبط با فرایند پرس گرم و چاپ سه‌بعدی می‌تواند به بهبود کیفیت و عملکرد قطعات چاپی کمک کند و موجب ارتقای فناوری چاپ سه‌بعدی شود.
 - تجزیه و تحلیل میکروسکوپی سطوح شکست با استفاده از تصاویر FESEM تأیید بصری از تأثیرات پارامترهای پرس گرم بر اتصال بین لایه‌های قطعات چاپی ارائه کرد.

References

- [1] Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2020). *A practical guide to design for additive manufacturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9>
- [2] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1), 389-405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [3] Zhang, X., & Liou, F. (2021). Introduction to additive manufacturing. In J. Pou, A. Riveiro, & J. P. Davim (Eds.), *Additive Manufacturing* (pp. 1-31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00009-4>
- [4] Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42-53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [5] Jaisingh Sheoran, A., & Kumar, H. (2020). Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1659-1672. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>
- [6] Pan, A. Q., Huang, Z. F., Guo, R. J., & Liu, J. (2016). Effect of FDM process on adhesive strength of polylactic acid (PLA) filament. *Key Engineering Materials*, 667, 181-186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.667.181>
- [7] Çakan, B. G. (2021). Effects of raster angle on tensile and surface roughness properties of various FDM filaments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(8), 3347-3353. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0708-8>
- [8] 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>
- [9] Chang, B., Parandoush, P., Li, X., Ruan, S., Shen, C., Behnagh, R. A., Liu, Y., & Lin, D. (2020). Ultrafast printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites with ultrahigh mechanical performance by ultrasonic-assisted laminated object manufacturing. *Polymer Composites*, 41(11), 4706-4715. <https://doi.org/10.1002/pc.25744>
- [10] Geng, P., Zhao, J., Gao, Z., Wu, W., Ye, W., Li, G., & Qu, H. (2021). Effects of printing parameters on the mechanical properties of high-performance polyphenylene sulfide three-dimensional printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 8(1), 33-41. <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0052>
- [11] Huang, B., & Singamneni, S. (2015). Raster angle mechanics in fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 49(3), 363-383. <https://doi.org/10.1177/0021998313519153>
- [12] Rajpurohit, S. R., & Dave, H. K. (2018). Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1317-1324. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0134>
- [13] Jayanth, N., Jaswanthraj, K., Sandeep, S., Mallaya, N. H., & Siddharth, S. R. (2021). Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 123(2), 104764. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104764>
- [14] Shbanah, M., Jordanov, M., Nyikes, Z., Tóth, L., & Kovács, T. A. (2023). The Effect of Heat Treatment on a 3D-Printed PLA Polymer's Mechanical Properties. *Polymers*, 15(6), 1587. <https://doi.org/10.3390/polym15061587>

- [15] Jo, W., Kwon, O-C., & Moon, M.-W. (2018). Investigation of influence of heat treatment on mechanical strength of FDM printed 3D objects. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 637-644. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0131>
- [16] Abid, S., Messadi, R., Hassine, T., Ben Daly, H., Soulestin, J., & Lacrampe, M. F. (2019). Optimization of mechanical properties of printed acrylonitrile butadiene styrene using RSM design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5), 1363-1372. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2710-6>
- [17] Kandananond, K. (2022). Surface roughness reduction in a fused filament fabrication (FFF) process using central composite design method. *Production Engineering Archives*, 28(2), 157-163. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.18>
- [18] El Magri, A., & Vaudreuil, S. (2021). Optimizing the mechanical properties of 3D-printed PLA-graphene composite using response surface methodology. *Archives of Materials Science and Engineering*, 112(1), 13-22. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.5928>
- [19] American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D638-14). ASTM. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- [20] JMP. (2024). *Design of experiments*. [https://www.jmp.com/en_ph/statistics-knowledge-portal/what-is-design-of-experiments.html#:~:text=Design%20of%20experiments%20\(DOE\)%20is.collecting%20data%20and%20making%20discoveries](https://www.jmp.com/en_ph/statistics-knowledge-portal/what-is-design-of-experiments.html#:~:text=Design%20of%20experiments%20(DOE)%20is.collecting%20data%20and%20making%20discoveries)
- [21] Eyjolfsson, R. (2014). *Design and manufacture of pharmaceutical tablets*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02382-9>
- [22] Pal, T., Pramanik, S., Verma, K. D., Naqvi, S. Z., Manna, P. K., & Kar, K. K. (2022). Fly ash-reinforced polypropylene composites. In K. K. Kar (Ed.), *Handbook of Fly Ash* (pp. 243-270). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817686-3.00021-9>
- [23] Mukherjee, P. K., Biswas, S., Kar, A., Sharma, N., & Haldar, P. K. (2022). Phospholipid complexation: A versatile technique for delivery of phytomedicine. In P. K. Mukherjee (Ed.), *Evidence-Based Validation of Herbal Medicine* (2 ed., pp. 65-108). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85542-6.00019-6>
- [24] Bhattacharya, S. (2021). Central composite design for response surface methodology and its application in pharmacy. In P. Kayaroganam (Ed.), *Response surface methodology in engineering science* (pp. 1-19). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95835>
- [25] Ghavidel, A. K., & Zadshakoyan, M. (2018). Comprehensive study of laser cutting effects on the properties of acrylonitrile butadiene styrene. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9), 3637-3653. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2166-8>
- [26] Karimzad Ghavidel, A., Shabgard, M., & Biglari, H. (2016). Microscopic and mechanical properties of semi-crystalline and amorphous polymeric parts produced by laser cutting. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(44), 44179. <https://doi.org/10.1002/app.44179>
- [27] Ghavidel, A. K., Zadshakoyan, M., Arjmand, M., & Kiani, G. (2021). A novel electro-mechanical technique for efficient dispersion of carbon nanotubes in liquid media. *International Journal of Mechanical Sciences*, 207, 106633. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106633>
- [28] Ghavidel, A. K., Azdast, T., Shabgard, M., Navidfar, A., & Sadighikia, S. (2015). Improving electrical conductivity of poly methyl methacrylate by utilization of carbon nanotube

- and CO2 laser. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(42), 42671. <https://doi.org/10.1002/app.42671>
- [29] Nisbet, R., Miner, G., & Yale, K. (2018). Numerical Prediction. In *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications* (2 ed., pp. 187-213). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416632-5.00010-4>
- [30] Siegel, A. F., & Wagner, M. R. (2022). Multiple Regression: Predicting One Variable From Several Others. In A. F. Siegel & M. R. Wagner (Eds.), *Practical Business Statistics* (8 ed., pp. 371-431). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820025-4.00012-9>