مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۲/ صفحه ۹۱–۹۳

. نشریه کانیک سازه کاو شاره ک



 ${\rm DOI:}\ 10.22044/jsfm.2025.15421.3919$



تحلیل آماری و بهینهسازی متغیرهای موثر بر رفتار کششی و ضربهای نمونههای PETG چاپشده با استفاده از مدلسازی لایهنشانی ذوبی

سعید کوہ فر'، مہدی وحدتی ً*

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. ^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۸

چکیدہ

مدلسازی لایهنشانی ذوبی (FDM) به عنوان یکی از روشهای ساخت افزایشی قطعات پلیمری، شناخته می شود. در این فرآیند، چاپ قطعه بر اساس لایهنشانی فیلامنت ذوب شده انجام می شود. در این پژوهش، با استفاده از فرآیند FDM و بر اساس متدلوژی سطح پاسخ، نمونههای استاندارد آزمونهای کشش و ضربه از جنس فیلامنت PETG تحت تنظیمات معینی از متغیرهای ورودی مشتمل بر: ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ، تولید شدند. در ادامه، با اجرای آزمونهای اندازه گیری و تحلیل آماری دادهها، رفتار کششی و ضربهای نمونههای چاپ شده تحت ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان داد که مجذور سرعت چاپ، مجذور دمای نازل و حاصل ضرب ارتفاع لایه در دمای نازل به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای نمونههای پلیمری دارند. علاوه بر این، مقادیر بالای ضریب تغییرات حاصل از تحلیل آماری نشان داد که محذور سرعت چاپ، مجذور دمای نازل و پلیمری دارند. علاوه بر این، مقادیر بالای ضریب بیشترین تأثیر را بر استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای نمونههای پلیمری دارند. علاوه بر این، مقادیر بالای ضریب تغییرات حاصل از تحلیل آماری نشان داد که محذور سرعت رای پیشینی رفتار کششی و ضربهای نمونههای چاپ شده از صحت و توانایی بالایی برخوردارند. در پایان، با استفاده از روش مطلوبیت، ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرآیند FDM با هدف بیشینه سازی خواص کششی و ضربهای نمونههای پلیمری، تعیین شدند.

كلمات كليدى: مدلسازى لايەنشانى ذوبى، كشش، ضربه، PETG، تحليل آمارى.

Statistical Analysis and Optimization of Variables Affecting Tensile and Impact Behavior of Printed PETG Samples Using Fused Deposition Modeling

Saeed Koohfar¹, Mahdi Vahdati^{2*}

¹ MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. ² Assist. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Fused deposition modeling (FDM) is known as one of the additive manufacturing methods of polymer parts. In this process, the workpiece is printed based on the deposition of melted filament. In this research, using the FDM process and based on the response surface methodology, standard samples for tensile and impact tests were produced from PETG filament under the certain settings of input variables including: layer height, nozzle temperature and printing speed. In the following, by performing measurement tests and statistical analysis, the tensile and impact behavior of the printed samples were evaluated. The results of ANOVA showed that the square of printing speed, the square of nozzle temperature and the product of layer height and nozzle temperature respectively have the greatest effect on yield strength, failure strength and impact strength of polymer samples. In addition, the high values of the coefficient of variation obtained from the statistical analysis showed that the regression models for predicting the tensile and impact behavior of the printed samples have high accuracy and ability. In the end, using the desirability method, the optimal combination of input variables of the FDM process was determined with the aim of maximizing the tensile and impact properties of polymer samples.

Keywords: Fused Deposition Modeling, Tensile, Impact, PETG, Statistical Analysis.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۲۳۳۲۳۹۲۲۰۴؛ فکس: ۲۳۳۲۳۹۲۲۰۴ آدرس پست الکترونیک<u>: vahdati@shahroodut.ac.ir</u>

۱– مقدمه

فناوریهای نمونهسازی سریع به منظور تولید آنی و مستقیم محصولات، پدید آمدهاند. این فناوریها به صورت قابل ملاحظهای موجب بهبود روشهای تولید در صنایع گوناگون شدهاند [۱]. یکی از رایجترین روشهای نمونهسازی سریع، ساخت افزایشی است [۲]. این فرآیند بر اساس قرارگیری لایه به لایه مواد با ضخامت کم بر روی یکدیگر، انجام می شود و توسط برنامههای کنترل عددی که مستقیماً از مدلهای سه بُعدى رايانهاي توليد مي شوند، تحت كنترل قرار مي گيرد [٣]. در سالهای اخیر، فناوری چاپ سهبُعدی، نقش مهمی در ساخت محصولات با هزينه كم و در زمان كوتاه، ايفا كرده است. در این میان، مدلسازی لایهنشانی ذوبی (FDM)^۲ یکی از تکنیکهای کارآمد و مقرون به صرفه در حوزه چاپ سهبُعدی است [۴]. این فرآیند به عنوان یکی از روشهای ساخت افزایشی محصولات پلیمری بر پایه روزنرانی^۳ فیلامنت ذوب شده، معرفی شده است [۵]. کاهش هزینه، سرعت بالا و سادگی فرآیند از مزایای اصلی فناوری FDM است. از سوی دیگر، خواص مکانیکی محصولات تولیدی حاصل از فرآیند FDM، عمدتاً به انتخاب دقیق متغیرهای فرآیند بستگی دارد. بنابراین، شناسایی پارامترهای این فرآیند که به صورت ویژهای بر کیفیت محصولات تولیدی تأثیر می گذارند، امری ضروری به شمار میرود [8].

گورالا و ریگالا [۲] متغیر "جهت گیری لایه نشانی" را با استفاده از فیلامنت ABS-P430 مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که برای دستیابی به بیشترین مقدار استحکام کششی، بایستی جهت لایهنشانی در راستای بارگذاری انتخاب شود. رات و همکاران [۸] نمونههای کششی و خمشی استاندارد از جنس ABS-P400 را منطبق بر استاندارد ASTM چاپ کردند. نتایج نشان داد که اعمال زاویه چاپ صفر درجه منتج به بهبود نشان داد که اعمال زاویه چاپ صفر درجه منتج به بهبود استحکام کششی و کاهش زمان و هزینه چاپ نمونه میشود. سازی پارامترهای چاپ سه بعدی انجام دادند. آنها نمونههای استانداردی از جنس ALA و تحت تنظیمات معینی از منغیرهای ورودی همچون: درصد پرشوندگی، زاویه چاپ، دمای نازل و الگوی پُرشوندگی تولید کردند. نتایج نشان داد که

خواص مکانیکی قطعات متأثر از سرعت چاپ، دمای نازل و ارتفاع لایهها است.

تِزِل و همکاران [۱۰] استحکام ضربهای چهار محصول پلیمری که توسط فرآیند FDM تولید شده بودند را تحت ارزیابی قرار دادند. آنها چهار نوع فیلامنت ALA، AD و PET را مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین استحکام ضربهای مربوط به PC (پلی کربنات) با ضخامت لایه ۳/۰ میلی-مربهای مربوط به PC (پلی کربنات) با ضخامت لایه ۳/۰ میلی-مربهای قطعات، رابطه مستقیمی با جهت چاپ قطعه و ضخامت لایه دارد. وَنگ و مستقیمی با جهت چاپ قطعه و ضخامت لایه دارد. وَنگ و همکاران [11] تأثیر پارامترهای دمای نازل و ضخامت لایه را شده با استفاده از فرآیند MDA، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی AP افزایش می یابد، اما نرخ سایش با افزایش دمای نازل از ۲۴۰ درجه سانتی گراد به ۲۶۰ درجه سانتی گراد، کاهش می یابد. همچنین، افزایش ضخامت لایه از ۱/۰ میلیمتر به ۳/۰ میلیمتر باعث کاهش خواص مکانیکی و افزایش ضریب اصطکاک می شود.

آیاکوب و همکاران [۱۲] پارامترهای فرآیند ساخت افزودنی با استفاده از روش FDM را برای تولید قطعات از جنس پلیاتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) و آکریلونیتریل استایرن آکریلات (ASA) بهینهسازی کردند. پارامترهای مورد بررسی شامل ارتفاع لایه و درصد پُرشوندگی بودند. در این مطالعه از اصل بنیادی تحلیل ارزش استفاده شد که هدف آن بیشینهسازی نسبت میان ویژگیهای مکانیکی و هزینه تولید است. در یژوهشی دیگر [۱۳]، قابلیت شکل پذیری و شکست ورقهای پلیمری تولید شده به روش ساخت افزودنی مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا، آزمایشهای شکل پذیری ناکازیما بر روی دو ماده پلیمری چاپشده با روش FDM (پلیاتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) و پلیکاپرولاکتون (PCL))، انجام شد. نتایج این پژوهش، مشخصههای قابلیت شکل پذیری ورقها و ارزیابی انواع مختلف حالتهای شکست را برای هر دو ماده چاپشده، ارائه داد. کو و همکاران [۱۴] تأثیرات پرس ایزواستاتیک سرد^۴ (CIP) را به عنوان یک روش پسپردازش بر روی قطعات پلیاتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) تولیدشده با روش FDM، بررسی کردند. برای تحلیل خواص مکانیکی پس از اعمال CIP،

³Extrusion

⁴ Cold isostatic pressing

¹ Rapid prototyping

² Fused deposition modeling

نمونههای چاپشده سهبعدی تحت فشارهای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ بار و زمانهای نگهداری ۱ تا ۱۰ دقیقه قرار گرفتند و سپس آزمایشهای کششی، خمشی و مقاومت برشی بینلایهای بر روی آنها انجام شد. نتایج نشان دادند که خواص مکانیکی بهطور کلی در محدوده فشار ۵۰۰ تا ۷۵۰ بار، بهینه هستند و بهبود قابل توجهی در این محدوده مشاهده شد. این نتایج نشاندهنده پتانسیل CIP به عنوان یک تکنیک مؤثر پس پردازش است که میتواند خواص مکانیکی قطعات چاپشده با FDM را بهبود دهد، در حالی که ویژگیهای اصلی ماده را حفظ میکند.

با مروری بر پیشینه پژوهشهای انجام شده، می توان دریافت که اکثر تحقیقات انجام شده در حوزه FDM متمرکز بر استفاده از فیلامنتهای PLA و ABS بوده است و در این میان، به چاپ قطعات پلیمری از جنس PETG کمتر توجه شده است. همچنین، تأثیر متغیرهای فرآیند بر رفتار کششی و ضربهای نمونههای چاپشده، به صورت مجزا و یا به صورت محدود مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، با توجه به تنوع متغیرهای فرآیند FDM و آثار تنشهای پسماند ناشی از حرارت و چیدمان لایهها، تعیین رفتار کششی و ضربهای نمونه-های چاپشده، امری ضروری است. از اینرو در این پژوهش، تأثير متغيرهای ورودی فرآيند FDM همچون: ارتفاع لايه، دمای نازل و سرعت چاپ بر استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای نمونههای چاپشده از جنس PETG مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از تکنیک طراحی آزمایش بر مبنای متدلوژی سطح پاسخ و طرح باکس- بنکن استفاده شد و بر اساس تحلیل واریانس دادهها، معادلات رگرسیون جهت پیشبینی رفتار کششی و ضربهای نمونهها، استخراج گردید. همچنین، ترکیب بهینه از متغیرهای ورودی جهت دستیابی به بیشینه خواص کششی و ضربهای نمونههای پلیمری، تعیین شدند.

این پژوهش با بررسی تأثیر متغیرهای فرآیند FDM (ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ) بر خواص مکانیکی نمونههای چاپشده از جنس PETG، نوآوریهای قابل توجهی را ارائه میکند. در حالی که بیشتر پژوهشهای قبلی بر روی فیلامنتهای رایج مانند PLA و ABS متمرکز بودهاند، این پژوهش به طور خاص بر روی فیلامنت PETG تمرکز کرده است که چاپ آن، آسان تر و شکنندگی آن، کمتر است.

همچنین، این پژوهش بهطور همزمان تأثیر ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ را بر استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای بررسی کرده است؛ این در حالیست که اکثر یژوهشهای قبلی تنها بر روی یک یا دو متغیر متمرکز بودهاند. در این پژوهش، مدلهای رگرسیونی برای پیشبینی رفتار کششی و ضربهای نمونهها بر اساس متغیرهای ورودی فرآیند FDM، توسعه داده شدهاند. این مدلها می توانند به طور گستردهای در صنعت و تحقیقات آینده مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، از روش مطلوبیت برای بهینهسازی متغیرهای فرآیند با هدف بیشینهسازی خواص مکانیکی استفاده شده است، که رویکردی نوین در بهینهسازی فرآیند FDM محسوب می شود. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، مقادیر حداکثر خواص مکانیکی نمونههای چاپشده از جنس PETG حاصل از فرآیند بهینهسازی به شرح زیر به دست آمد: استحکام تسلیم ۹/۸۱۲ مگاپاسکال، استحکام شکست ۱۸/۲۹۱ مگاپاسکال و استحکام ضربه ای ۴/۳۱۵ کیلوژول بر متر مربع. این مقادیر با بهینهسازی متغیرهای ورودی فرآیند FDM شامل ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ حاصل شدند. نتایج این پژوهش نشان مىدهد كه با تنظيم دقيق پارامترهاى فرآيند، مىتوان به بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی نمونههای چاپشده دست يافت.

۲- مواد و روشها

در این پژوهش، استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای نمونههای چاپ شده حاصل از فرآیند FDM به عنوان پارامترهای پاسخ، مورد مطالعه قرار میگیرد. همچنین، سه متغیر ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند انتخاب شدند و هر یک از آنها در سه سطح پایین، میانه و بالا مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- عوامل و دامنه تغییرات متغیرهای ورودی فر آیند FDM

··· -							
	سطح		t.	.1 •	•		
+1	٠	-1	واحد	3003	متغير		
۰/٣	۰/۲	٠/١	mm	Н	ارتفاع لايه		
240	۲۳۵	222	°C	Т	دمای نازل		
40	۳۵	۲۵	mm/s	S	سرعت چاپ		

انتخاب این پارامترها و دامنه تغییرات آنها بر اساس تحقیقات قبلی و آزمونهای اولیه، انجام شده است. ارتفاع لایه (H) یکی از مهمترین پارامترهای فرآیند FDM است که تأثیر مستقیمی بر کیفیت سطحی و خواص مکانیکی نمونههای چاپشده دارد. بر اساس مطالعات قبلی [۷ و ۸]، ارتفاع لایه بین ۰/۱ تا ۰/۲ میلیمتر بهطور گستردهای در چاپ سهبعدی پلیمرها استفاده میشود. این دامنه به دلیل تعادل مناسب بین زمان چاپ و کیفیت مکانیکی انتخاب شده است. دمای نازل (T) تأثیر قابل توجهی بر چسبندگی بین لایهها و استحکام مکانیکی نمونهها دارد.

بر اساس پژوهشهای انجامشده بر روی PETG [۲۲ – ۱۴]، دمای نازل در محدوده ۲۲۵ تا ۲۴۵ درجه سانتی گراد بهعنوان دامنه مناسب برای چاپ این ماده شناخته شده است. این دامنه دمایی باعث بهبود چسبندگی بین لایهها و کاهش احتمال ایجاد عیوب در نمونهها میشود. سرعت چاپ (S) نیز یکی از پارامترهای کلیدی است که بر زمان چاپ و کیفیت مکانیکی نمونهها تأثیر می گذارد. بر اساس تحقیقات قبلی [۶ و ۹]، سرعتهای چاپ بین ۲۵ تا ۴۵ میلیمتر بر ثانیه برای چاپ سرعتهای چاپ بین ۲۵ تا ۴۵ میلیمتر بر ثانیه برای چاپ PETG مناسب تشخیص داده شدهاند. سرعتهای پایین تر باعث بهبود چسبندگی بین لایهها و افزایش استحکام مکانیکی میشوند، در حالی که سرعتهای بالاتر، زمان چاپ را کاهش میدهند، اما ممکن است بر کیفیت مکانیکی تأثیر منفی بگذارند.

طراحی آزمونهای تجربی بر اساس متدلوژی سطح پاسخ [۱۵] و طرح باکس- بنکن انجام شد. شکل ۱، نشاندهنده نحوه چیدمان و ترکیب متغیرهای ورودی در سطوح مختلف برای طراحی آزمایشها است. این طرح به پژوهشگران کمک می کند تا با اجرای کمترین تعداد آزمایش، تأثیر متغیرها و تعاملات بین آنها را بر پاسخهای خروجی بررسی کند.



در اکثر مسائل مربوط به متدلوژی سطح پاسخ، نحوه ارتباط میان پاسخها و متغیرهای ورودی، نامعلوم است. بنابراین اولین قدم در این روش، یافتن تقریبی مناسب از رابطه واقعی موجود میان پارامترهای پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل ورودی است. در بسیاری از فرآیندهای مهندسی، رابطه بین متغیرهای ورودی و پاسخها ممکن است به صورت خطی نباشد. به عبارت دیگر، تغییرات در متغیرهای ورودی ممکن است به صورت غیرخطی بر پاسخها تأثیر بگذارند. مدل مرتبه دوم قادر است این اثرات غیرخطی را مدلسازی کند، در حالی که مدل خطی، تنها میتواند رابطه خطی بین متغیرها و پاسخها را توصیف کند. لذا در این پژوهش، از تابع تقریب کننده به صورت مدل مرتبه دوم به صورت زیر استفاده شد [10]:

$$y = \beta_{0} + \sum_{i=1}^{k} \beta_{i} x_{i} + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_{i}^{2} + \sum_{i} \sum_{j}^{k} \beta_{ij} x_{i} x_{j} + \varepsilon$$
(1)

در این رابطه، β_0 ضریب ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر، x تعداد متغیرهای مستقل و z مقدار خطای مشاهده شده در پاسخ است. طراحی آزمایش با استفاده از نرمافزار دیزاین اکسپرت [۱۶] با ۱۵ اجرا و با رعایت تکرارپذیری در سطح میانه، انجام شد (جدول ۲).

جدول ۲- طراحی آزمونهای تجربی پارامترهای پاسخ متغيرهاي ورودي ستحكام ضربهاي ستحكام شكست ستحكام تسلي سرعت دمای نازل ارتفاع لايه شماره آزمون <u>ځ</u> Impact S_{f} Н S_v S Т Strength MPa MPa KJ/m² mm/s °C mm ۲/۲۳ 18/4. V/A. ۳۵ 240 •/1 ١ 7/87 ۱۷/۰۳ ٧/۵٠ ۳۵ ٢٣۵ ٠/٢ ۲ ۲/۷۵ 17/89 ٢٣۵ ٠/٣ ٨ ۲۵ 7/87 11/17 V/D. ۳۵ ٢٣۵ ٠/٢ ٣/٩ 18/51 ۹ •/1 ۳۵ 220 ۵ 1/94 14/18 9/11 ۴۵ ٢٣۵ ٠/٣ ۶ 7/87 ۱۷/۰۳ ٧/۵٠ ۳۵ ٢٣۵ ٠/٢ ٣/١٨ ۱۷/۸۳ ٨/٨۵ ۴۵ ٢٣۵ ٠/١ ٨

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۲

٣/۴٣	۱۳/۸۹	٩/٢٩	۲۵	۲۳۵	٠/١	٩
٣/١٣	14/4.	۷/۴۴	۳۵	240	۰/٣	١٠
۲/٩٨	18/88	٩/٩۵	۲۵	240	٠/٢	۱۱
۲/۷۸	17/89	٨/۶٠	۴۵	222	٠/٢	١٢
۳/۵۸	۸۳/۱۱	۹/۴۵	۴۵	240	٠/٢	١٣
٣/۴٨	۱۰/۳۲	۸/۳۰	۲۵	222	٠/٢	14
١/٩٣	۱۰/۲۵	٨/١٣	۳۵	222	۰/٣	۱۵

مشخصات هندسی و ابعادی نمونه آزمون کشش بر اساس استاندارد (IY] ASTM D638 (Type I) تعیین شد. همچنین، طراحی نمونه آزمون ضربه مطابق استاندارد ASTM D256 [۱۸] انجام شد. در ادامه، فایلهای CAD جهت ارسال به دستگاه FDM، با فرمت STL استخراج شدند (شکل ۲).



(ب) نمونه آزمون ضربه [۱۸]



(ج) دستگاه آزمون کشش



(د) دستگاه آزمون ضربه شکل ۲- مدلهای استاندارد کشش و ضربه و تجهیزات آزمونهای مربوطه

فیلامنت PETG به عنوان ماده مصرفی برای چاپ نمونهها انتخاب شد. این پلیمر، نسخه پیشرفته و تقویت شده فیلامنت PET است که چاپ آن، آسان تر و شکنندگی آن، کمتر است. پلیمر PETG از اضافه شدن گلیکول به پلیمر PET در طی فرآیند پلیمریزاسیون، ساخته می شود [۱۹]. در این پژوهش از دستگاه FDM مدل F301 استفاده شد [۲۰].

در ادامه، نمونههای دمبلی شکل با استفاده از دستگاه سنتام تحت آزمون کشش قرار گرفتند (شکل ۲-ج). در این دستگاه، منحنى "نيرو بر حسب تغيير طول" استخراج مى شود كه اين منحنى بر اساس مشخصات سطح مقطع اوليه و طول اوليه گيج به منحنی "تنش بر حسب کرنش" تبدیل میشود. سپس مقادیر استحکام تسلیم و استحکام شکست از نمودارهای تنش-کرنش، استخراج شده و به عنوان مقادیر پارامترهای پاسخ، ثبت شدند (جدول ۲). روشهای مختلفی برای تعیین استحکام تسلیم وجود دارد که بسته به نوع ماده و استانداردهای مورد استفاده، متفاوت هستند. رايجترين روش براي تعيين استحكام تسلیم در مواد فلزی و پلیمری که در این پژوهش نیز استفاده شده است به شرح زیر است: در این روش، یک خط موازی با بخش الاستیک نمودار تنش-کرنش رسم می شود، اما با یک جابجایی مشخص. این جابجایی معمولاً برابر با ۰/۲ درصد كرنش پلاستيك (٠/٠٠٢) است. نقطهاى كه اين خط موازى، نمودار تنش- كرنش را قطع مي كند، به عنوان استحكام تسليم در نظر گرفته میشود. این روش برای موادی استفاده میشود كه رفتار الاستيك - پلاستيك واضحى دارند، اما نقطه تسليم مشخصی در نمودار تنش- کرنش ندارند.

۸۶ | تحلیل آماری و بهینهسازی متغیرهای موثر بر رفتار کششی و ضربهای نمونههای PETG چاپشده با استفاده از مدل-سازی لایه-نشانی ذوبی

 H^2

 T^2 S^2

1

1

1

همچنین، آزمون ضربه آیزود^۱ با استفاده از دستگاه گوتک^۲، بر روی نمونههای چاپشده انجام شد (شکل ۲– د). نمونه آیزود به صورت عمودی توسط فکهای دستگاه گرفته میشود و پاندول با انرژی متناسب با جنس ماده و تحت زاویه معین، بر نمونه ضربه وارد مینماید و میزان استحکام ضربهای، ثبت می-شود (جدول ۲).

۳- نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل دادههای حاصل از این پژوهش با استفاده از آنالیز واریانس^۳ صورت می گیرد. آنالیز واریانس ابزاری قدرتمند برای بررسی اهمیت یک پارامتر و تشخیص معنیداربودن اثر آن، است. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان پارامترهای پاسخ و متغیرهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون[†] به کار گرفته میشود. میزان سطح اطمینان^۵ در فرآیند تحلیل، مساوی ۲۰/۰ در نظر گرفته میشود. جدولهای ۳، ۴ و ۵ به ترتیب نتایج حاصل از تحلیل واریانس استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای را نشان میدهند.

جدول ٣- نتايج تحليل واريانس استحكام تسليم

مقدار	مقدار	میانگین	مجموع	درجه	منبع
Р	F	مربعات	مربعات	آزادی	تغيير
0.3849	1.36	0.7735	6.96	9	مدل
0.4004	0.8438	0.4802	0.4802	1	Н
0.8902	0.0211	0.0120	0.0120	1	Т
0.8344	0.0485	0.0276	0.0276	1	S
0.6144	0.2882	0.1640	0.1640	1	HT
0.3514	1.06	0.6006	0.6006	1	HS
0.6186	0.2812	0.1600	0.1600	1	TS
0.7585	0.1055	0.0600	0.0600	1	H^2
0.3661	0.9869	0.5616	0.5616	1	T^2
0.0295	9.11	5.18	5.18	1	S^2

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس استحکام شکست

مقدار	مقدار	میانگین	مجموع	درجه	منبع
Р	F	مربعات	مربعات	آزادی	تغيير
0.0439	5.09	9.89	89.03	9	مدل
0.1017	4.01	7.78	7.78	1	Н
0.0654	5.53	10.74	10.74	1	Т
0.5599	0.3895	0.7565	0.7565	1	S
0.2088	2.08	4.04	4.04	1	HT
0.0438	7.18	13.95	13.95	1	HS
0.0413	7.45	14.48	14.48	1	TS

¹ Izod

³ Analysis of Variance (ANOVA)

غ بدام	است مکلم	 1.1~7	~.1:: A	1.1.
	استختاط		χο ω - ω	حدور

0.1787

31.48

6.80

0.1787

31.48

6.80

0.0920

16.21

3.50

0.7738

0.0101

0.1201

					-
منبع	درجه	مجموع	میانگین	مقدار	مقدار
تغيير	آزادی	مربعات	مربعات	F	Р
مدل	9	3.85	0.4280	25.07	0.0012
Н	1	0.6555	0.6555	38.39	0.0016
Т	1	0.0036	0.0036	0.2116	0.6649
S	1	0.0264	0.0264	1.55	0.2684
HT	1	2.06	2.06	120.60	0.0001
HS	1	0.0049	0.0049	0.2870	0.6151
TS	1	0.4225	0.4225	24.74	0.0042
H^2	1	0.0007	0.0007	0.0409	0.8477
T^2	1	0.1351	0.1351	7.91	0.0374
S^2	1	0.5725	0.5725	33.53	0.0022

ستون مقدار F، نشان دهنده مقدار آماره F است که برای بررسی معناداری آماری هر عامل استفاده می شود. مقدار F با تقسیم میانگین مربعات هر عامل بر میانگین مربعات خطا محاسبه می شود. هرچه مقدار F بزرگ تر باشد، تأثیر عامل مورد نظر بر پاسخ بیشتر است. به عنوان مثال، در جدول ۵، مقدار F برای HT (تعامل بین ارتفاع لایه و دمای نازل) برابر با ۱۲۰/۶۰ است که نشان دهنده تأثیر بسیار قوی این عامل بر استحکام ضربهای است. ستون مقدار P نشان دهنده سطح معناداری آماری هر عامل است. اگر مقدار P کمتر از سطح اطمینان (معمولاً ۱۰/۵) باشد، عامل مورد نظر تأثیر معناداری بر پاسخ دارد. به عنوان مثال، در جدول ۳، مقدار P برای S (مجذور سرعت چاپ) برابر با ۱۰/۵۲۹۹ است که کمتر از ۵۰/۰ است، بنابراین این عامل

همان طور که مشاهده می شود، مجذور سرعت چاپ (²S)، تأثیر معنی داری بر استحکام تسلیم دارد. از سوی دیگر، عبارت تعاملی حاصل ضرب ارتفاع لایه در سرعت چاپ (HS)، حاصل-ضرب دمای نازل در سرعت چاپ (TS) و مجذور دمای نازل (T²) به عنوان عبارات موثر بر استحکام شکست، شناسایی شدند. علاوه بر این، عبارتهای مرتبه اول ارتفاع لایه (H)، عبارت تعاملی حاصل ضرب ارتفاع لایه در دمای نازل (HT)، عبارت تعاملی حاصل ضرب دمای نازل در سرعت چاپ (TS)

² GOTECH

⁴ Regression analysis

⁵ Confidence level



شکل ۳- نمودار احتمال نرمال (خواص کششی)

مجذور دمای نازل (T^2) و مجذور سرعت چاپ (S^2) به عنوان عبارتهای موثر بر استحکام ضربهای، معرفی شدند. معادلات رگرسيون استحكام تسليم، استحكام شكست و استحکام ضربهای به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی فرآیند به صورت کُدگذاری شده به ترتیب مطابق روابط ۲، ۳ و ۴ استخراج شدند: *Yield Strength* = 7.5 - 0.245 H + 0.039 T+ 0.059 S + 0.202 HT+ 0.388 HS - 0.2 TS(۲) $+ 0.128 H^2 + 0.39 T^2$ $+ 1.18 S^{2}$ Failure Strength = 17.03 - 0.986 H+ 1.16 T - 0.308 S(٣) + 1.01 HT - 1.87 HS $+ 1.90 TS + 0.22 H^{2}$ $-2.92 T^2 - 1.36 S^2$ *Impact Strength* = 2.62 - 0.286 H-0.021 T - 0.058 S(۴) + 0.718 HT + 0.035 HS $+ 0.325 TS - 0.014 H^{2}$ + 0.191 T^2 + 0.394 S^2 مقادیر ضریب R² حاصل از تحلیل واریانس استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای به ترتیب مساوی ۹۰/۱۷، ۷۰/۹۹ و ۹۷/۸۳ درصد به دست آمدند. بنابراین همبستگی بالایی میان دادههای اندازه گیری شده و پاسخهای

پیشبینی شده حاصل از معادلات رگرسیون برقرار است. از

اینرو، توانایی مدلهای برازش یافته و صحت معادلات رگرسیون در توصیف و پیشبینی تغییرات خواص کششی و ضربهای نمونههای پلیمری به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل، مورد تأیید قرار می گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان میدهد که مانده ها در نمودارهای احتمال نرمال عموماً از یک خط راست پیروی می کنند و هیچ گونه شواهدی مبتنی بر غیر نرمال بودن دادهها وجود ندارد (شکلهای ۳ و ۴).



همان طور که در شکل ۴- الف نیز مشاهده می شود، مانده ها به طور تصادفی در اطراف محور صفر، توزیع شده اند و نمودار ماندهها شامل هیچ الگوی مشخصی نبوده و کاملاً بی ساختار است. از این رو، مدل رگرسیون استحکام ضربهای، قابل اعتماد و مناسب است.

اثر متقابل دمای نازل و ارتفاع لایه و اثر متقابل سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر استحکام تسلیم، در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، هر چه ارتفاع لایه و سرعت چاپ کمتر شود، استحکام تسلیم نمونه افزایش مییابد.



در شکل ۵- الف (تأثیر دمای نازل و ارتفاع لایه)، با کاهش ارتفاع لایه، استحکام تسلیم افزایش مییابد. این موضوع نشان میدهد که لایههای نازکتر باعث بهبود چسبندگی بین لایهها و در نتیجه افزایش استحکام تسلیم میشوند. دمای نازل نیز تأثیر قابل توجهی بر استحکام تسلیم دارد. در دماهای بالاتر (مثلاً ۲۴۵ درجه سانتی گراد)، ذوب بهتر فیلامنت و چسبندگی بین لایهها بهبود مییابد، که منجر به افزایش استحکام تسلیم میشود. در شکل ۵- ب (تأثیر سرعت چاپ و ارتفاع لایه)، با کاهش سرعت چاپ، استحکام تسلیم افزایش مییابد. سرعت کوهش سرعت چاپ، استحکام تسلیم افزایش مییابد. سرعت نوب و چسبیدن به لایههای قبلی داشته باشد، که منجر به بهبود استحکام تسلیم میشود. ارتفاع لایه نیز همچنان تأثیر مهمی دارد. لایههای نازکتر (مثلاً ۲/۱ میلیمتر) استحکام تسلیم بالاتری ایجاد میکند.

اثر متقابل دمای نازل و ارتفاع لایه و اثر متقابل سرعت چاپ و دمای نازل بر استحکام شکست، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، هر چه ارتفاع لایه کاهش یابد، استحکام شکست افزایش می یابد. همچنین، تنظیم دمای نازل و سرعت چاپ در سطح میانی منتج به افزایش استحکام شکست می شود.



در شکل ۶- الف (تأثیر دمای نازل و ارتفاع لایه)، با کاهش ارتفاع لایه، استحکام شکست افزایش می یابد. لایه های ناز کتر باعث بهبود چسبندگی بین لایه ها و کاهش نقاط ضعف در ساختار نمونه می شوند، که منجر به افزایش استحکام شکست می شود. دمای نازل نیز تأثیر قابل توجهی دارد. در دماهای متوسط (مثلاً ۲۳۵ درجه سانتی گراد)، استحکام شکست به حداکثر می رسد. دماهای خیلی بالا یا خیلی پایین ممکن است باعث کاهش چسبندگی بین لایه ها و در نتیجه کاهش

استحکام شکست شوند. در شکل ۶- ب (تأثیر سرعت چاپ و دمای نازل)، سرعت چاپ در سطح متوسط (مثلاً ۳۵ میلیمتر بر ثانیه) باعث افزایش استحکام شکست می شود. سرعتهای خیلی بالا ممکن است باعث کاهش چسبندگی بین لایه ها شود. دمای نازل نیز در سطح متوسط (مثلاً ۲۳۵ درجه سانتی گراد) بیشترین تأثیر مثبت را بر استحکام شکست دارد.

از سوی دیگر، هر چه ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ کاهش یابد، استحکام ضربهای نمونه افزایش مییابد (شکلهای ۷ و ۸).





دلایل علمی مرتبط با نتایج حاصل از آزمونهای تجربی و تحلیل آماری را میتوان به صورت زیر تشریح نمود: (الف) تأثیر ارتفاع لایه بر خواص مکانیکی: کاهش ارتفاع لایه منجر به افزایش استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای میشود. لایههای نازکتر (ارتفاع لایه کمتر) باعث بهبود چسبندگی بین لایهها میشوند. این بهبود فاصله بین آنها است. در نتیجه، تنشهای داخلی کاهش یافته فاصله بین آنها است. در نتیجه، تنشهای داخلی کاهش یافته و استحکام مکانیکی افزایش مییابد. لایههای نازکتر احتمال ایجاد نقاط ضعف (مانند حفرهها یا ترکها) را کاهش میدهند، که این امر منجر به بهبود خواص مکانیکی میشود.

(ب) تأثیر دمای نازل بر خواص مکانیکی: دمای نازل متوسط (مثلاً ۲۳۵ درجه سانتی گراد) بیشترین تأثیر مثبت را بر استحکام تسلیم و استحکام شکست دارد. دمای خیلی بالا یا خیلی پایین ممکن است باعث کاهش خواص مکانیکی شود. در دمای متوسط، فیلامنت به اندازه کافی ذوب میشود و چسبندگی بین لایهها بهبود می ابد. این امر منجر به افزایش استحکام مکانیکی میشود. در دمای خیلی بالا، ممکن است فیلامنت دچار تخریب حرارتی شود، که باعث کاهش خواص مکانیکی میشود. از طرف دیگر، در دمای خیلی پایین، فیلامنت به اندازه کافی ذوب نمیشود و چسبندگی بین لایهها کاهش می ابد.

(ج) تأثیر سرعت چاپ بر خواص مکانیکی: سرعت چاپ متوسط (مثلاً ۳۵ میلیمتر بر ثانیه) بیشترین تأثیر مثبت را بر استحکام تسلیم و استحکام شکست دارد. سرعتهای خیلی بالا یا خیلی پایین ممکن است باعث کاهش خواص مکانیکی شود. در سرعتهای متوسط، فیلامنت زمان کافی برای ذوب و چسبیدن به لایههای قبلی را دارد، که منجر به بهبود چسبندگی و افزایش استحکام مکانیکی میشود. در سرعتهای خیلی بالا، ممکن است فیلامنت به اندازه کافی ذوب نشود و چسبندگی بین لایهها کاهش یابد. از طرف دیگر، در سرعتهای خیلی پایین، ممکن است تنشهای داخلی در نمونه افزایش یابد، که باعث کاهش خواص مکانیکی میشود.

(د) تأثیر تعاملات بین متغیرها بر خواص مکانیکی: تعامل بین ارتفاع لایه و دمای نازل (HT) و تعامل بین دمای نازل و سرعت چاپ (TS) تأثیر معناداری بر استحکام ضربهای دارند. ارتفاع لایه و دمای نازل به طور همزمان بر چسبندگی بین لایه ها تأثیر میگذارند. در ارتفاع لایه کم و دمای متوسط، چسبندگی بین لایه ها بهینه می شود، که منجر به افزایش استحکام ضربهای می شود. دمای نازل و سرعت چاپ به طور همزمان بر ذوب فیلامنت و چسبندگی بین لایه ها تأثیر می گذارند. در دمای متوسط و سرعت متوسط، ذوب فیلامنت و چسبندگی بین لایه ها بهینه می شود، که منجر به افزایش استحکام ضربه ای می شود.

(ه) تأثیر مجذور متغیرها بر خواص مکانیکی: مجذور سرعت چاپ (S2) و مجذور دمای نازل (T²) تأثیر معناداری بر استحکام تسلیم و استحکام ضربهای دارند. مجذور متغیرها نشان دهنده اثرات غیرخطی است. به عنوان مثال، افزایش

سرعت چاپ ممکن است در ابتدا باعث بهبود خواص مکانیکی شود، اما پس از رسیدن به یک حد بهینه، افزایش بیشتر سرعت چاپ ممکن است باعث کاهش خواص مکانیکی شود. این اثرات غیر خطی توسط مجذور متغیرها مدل سازی می شوند.

۴- بهینهسازی

در این پژوهش، از روش مطلوبیت^۱ برای بهینهسازی متغیرهای ورودی فرآیند FDM استفاده می شود [۲۱]. با توجه به اینکه هدف تابع مطلوبیت، بیشینهسازی خواص کششی و ضربهای نمونههای چاپ شده است، مطلوبیت به صورت زیر تعریف می-شود [۲۲]:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{U-L}\right)^r & L \le y \le U \\ 1 & y > U \end{cases}$$
 (Δ)

در این رابطه، پارامترهای L و U به ترتیب حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ ۷ می،اشند. مقدار وزن (r) مساوی ۱ در نظر گرفته شد. در این روش، برای هر پاسخ، یک تابع مطلوبیت تعریف می شود که مقدار آن بین ۰ (نامطلوب) تا ۱ (کاملاً مطلوب) تغییر می کند. هدف، بیشینه کردن مطلوبیت است. این کار با استفاده از الگوریتمهای بهینه سازی (مانند الگوریتمهای ژنتیک یا جستجوی گرادیان) انجام می شود.

جدولهای ۶، ۷ و ۸، به ترتیب ترکیب بهینه متغیرهای ورودی جهت دستیابی به بیشینه استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای را با مقادیر مطلوبیت ۹۴/۵، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد نشان میدهند.

جدول ۶: ترکیب بهینه جهت دستیابی به بیشینه استحکام تسلیم

	1	1•	
	نام متغير	واحد	مقدار بهينه
متغب ورودي	ارتفاع لايه	mm	0.1
	دمای نازل	°C	245
	سرعت چاپ	mm/s	25
پارامتر پاسخ	استحكام تسليم	MPa	9.812

جدول ۷- ترکیب بهینه جهت دستیابی به بیشینه

استحكام شكست

				-
	نام متغير	واحد	مقدار بهينه	
متغب مرمدع،	ارتفاع لايه	mm	0.108	
G- <u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,</u>	دمای نازل	°C	236.397	
	سرعت چاپ	mm/s	37.321	
پارامتر پاسخ	استحكام شكست	MPa	18.291	

جدول ۸- ترکیب بهینه جهت دستیابی به بیشینه

استحكام ضربهاى						
واحد	نام متغير					
mm	ارتفاع لايه					
°C	دمای نازل	منتير ورودي				
mm/s	سرعت چاپ					
KJ/m ²	استحكام ضربهاي	پارامتر پاسخ				
	بهای واحد °C mm/s KJ/m ²	استحکام ضربهای نام متغیر واحد ارتفاع لایه mm °C نازل mm/s سرعت چاپ KJ/m ² سربهای				

شکلهای ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تنظیمات بهینه از متغیرهای ورودی جهت دستیابی به بیشینه استحکام تسلیم، بیشینه استحکام شکست و بیشینه استحکام ضربهای و مقادیر مطلوبیت متناظر با آنها را نشان میدهند.



شکل ۹– تنظیمات بهینه جهت دستیابی به بیشینه استحکام تسلیم

¹ Desirability method





شکل ۱۱ – تنظیمات بهینه جهت دستیابی به بیشینه استحكام ضربهاى

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش، فرآیند مدلسازی لایهنشانی ذوبی (FDM) بر اساس متدلوژی سطح پاسخ و تحت ترکیبات معینی از متغیرهای ورودی فرآیند برای ساخت نمونههای استاندارد از جنس فیلامنت پلیمری (PETG) به کار گرفته شد و پس از اجرای آزمونهای اندازه گیری، رفتار کششی و ضربهای نمونه-های چاپشده تحت تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

• نتايج تحليل واريانس نشان داد كه مجذور سرعت چاپ (S^2)، تأثیر معنی داری بر استحکام تسلیم دارد. از سوی دیگر، عبارت تعاملی حاصلضرب ارتفاع لایه در سرعت چاپ (HS)، حاصل ضرب دمای نازل در سرعت چاپ (TS) و مجذور دمای

نازل (T^2) به عنوان عبارات موثر بر استحکام شکست، شناسایی شدند.

- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که عبارتهای مرتبه اول ارتفاع لايه (H)، عبارت تعاملي حاصل ضرب ارتفاع لایه در دمای نازل (HT)، عبارت تعاملی حاصل ضرب دمای نازل در سرعت چاپ (TS)، مجذور دمای نازل (T^2) و مجذور سرعت چاپ (S^2)، تأثير معنادار و مهمی بر مقادير استحكام ضربهای دارند.
- معادلات رگرسيون استحكام تسليم، استحكام شکست و استحکام ضربهای به عنوان تابعی از متغیرهای ورودی فرآیند FDM به صورت کُدگذاری شده، استخراج شدند.
- بر اساس مقادیر ضریب تغییرات، توانایی مدل های برازشیافته و صحت معادلات رگرسیون در توصیف و پیشبینی تغییرات خواص کششی و ضربهای نمونههای پلیمری به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل، مورد تأیید قرار گرفت.
- هر چه ارتفاع لايه و سرعت چاپ كمتر شود، استحكام تسليم نمونه افزايش مي يابد.
- هر چه ارتفاع لایه کاهش یابد، استحکام شکست افزایش می یابد. همچنین، تنظیم دمای نازل و سرعت چاپ در سطح میانی منتج به افزایش استحكام شكست مى شود.
- هر چه ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ کاهش یابد، استحکام ضربهای نمونه افزایش می یابد.
- ترکیب بهینه متغیرهای ورودی جهت دستیابی به بیشینه استحکام تسلیم، استحکام شکست و استحکام ضربهای به ترتیب با مقادیر مطلوبیت ۹۴/۵، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد، استخراج شدند.

مراجع

- [1] Maurya, N.K., Rastogi, V. and Singh, P., 2021. Feasibility analysis of manufacturing using rapid prototyping: review. Materials Today: Α Proceedings, 47, pp.3711-3715. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.799
- [2] Wong, K.V. and Hernandez, A., 2012. A review of additive manufacturing. International scholarly

ASA Parts. Polymers, 16(16), p.2260. doi: 10.3390/polym16162260

- [13] Rosa-Sainz, A., Ferrer, I., Garcia-Romeu, M.L. and Centeno, G., 2024. Characterization of plastic formability and failure mechanisms in FDM additively manufactured PETG and PCL sheets. Polymer Testing, 134, p.108431. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108431
- [14] Ko, M., shin Kim, Y. and sik Jeon, E., 2025. Enhancing the mechanical properties of FDM 3D printed PETG parts with high pressure cold isostatic pressing. Journal of Manufacturing Processes, 133, pp.682-691. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.11.094
- [15] Jarahi, F., Vahdati, M. and Abedini, R., 2024. Modeling and Optimization of Shear Strength of the Welded Joint Produced by Ultrasonic Welding of Copper Wire to Aluminum Sheet. Transactions of the Indian Institute of Metals, 77, pp. 2499–2508. doi: 10.1007/s12666-024-03336-6
- [16] Akram, W. and Garud, N., 2021. Design expert as a statistical tool for optimization of 5-ASA-loaded biopolymer-based nanoparticles using Box Behnken factorial design. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 7, pp. 1-17. doi: 10.1186/s43094-021-00299-z
- [17] AbouelNour, Y., Rakauskas, N., Naquila, G. and Gupta, N., 2024. Tensile testing data of additive manufactured ASTM D638 standard specimens with embedded internal geometrical features. Scientific Data, 11(1), p. 506. doi: 10.1038/s41597-024-03369-y
- Schaeffer, S.L., Johnson, R.L. and Lewis, W.B., 1998. Impact force comparison of polymers: Molded-notch versus cut-notch using the ASTM D 256 Izod Impact Test Method. Journal of testing and evaluation, 26(2), pp.151-156. doi: 10.1520/JTE11986J
- [19] Yan, C., Kleiner, C., Tabigue, A., Shah, V., Sacks, G., Shah, D. and DeStefano, V., 2023. PETG: applications in modern medicine. Engineered Regeneration, 5(1), pp. 45-55. doi: 10.1016/j.engreg.2023.11.001
- [20] www.sooba3d.com
- [21] Vahdati, M. and Moradi, M., 2020. Statistical analysis and optimization of the yield strength and hardness of surface composite Al7075/Al2O3 produced by FSP via RSM and desirability approach. Iranian Journal of Materials Forming, 7(1), pp.32-45.
- [22] Vahdati, M., 2021. Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM. Journal of Science and Technology of Composites, 7(4), pp.1207-1216.

research notices, p.208760. doi: 10.5402/2012/208760

- [3] Mohammadi Jazi, H., Vahdati, M., Mahdavi, A., 2024. Modeling and optimization of variables affecting tensile properties of printed PP/Cu composite samples using LDM process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, 11(8), pp. 10-19, doi: 10.22034/ijme.2024.470528.1989
- [4] Abolizadeh, M., Amini Zadeh, N., Safi Jahanshahi, A., Akhoundi, B., 2024. Experimental investigation of printing parameters' effect on the inter-raster strength in a single layer of polylactic acid material printed by fused deposition modeling process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. doi: 10.22034/ijme.2024.468611.1986
- [5] Rajan, K., Samykano, M., Kadirgama, K., Harun, W.S.W. and Rahman, M.M., 2022. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. The International Advanced Iournal Manufacturing of Technology, 120(3-4), pp.1531-1570. doi: 10.1007/s00170-022-08860-7
- [6] Mohamed, O.A., Masood, S.H. and Bhowmik, J.L., 2015. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in manufacturing, 3, pp.42-53. doi: 10.1007/s40436-014-0097-7
- [7] Gurrala, P.K. and Regalla, S.P., 2014. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. Virtual and Physical Prototyping, 9(3), pp.141-149. doi: 10.1080/17452759.2014.913400
- [8] Raut, S., Jatti, V.S., Khedkar, N.K. and Singh, T.P., 2014. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts. Procedia materials science, 6, pp.1625-1630. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.146
- [9] Ala'aldin Alafaghani, A.Q., Alrawi, B. and Guzman, A., 2017. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. Procedia Manufacturing, 10, pp. 791-803. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.079
- [10] Tezel, T., Ozenc, M. and Kovan, V., 2021. Impact properties of 3D-printed engineering polymers. Materials Today Communications, 26, p.102161. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102161
- [11] Wang, C., He, Y., Lin, Z., Zhao, X., Sun, C., Guo, R., Wang, X. and Zhou, F., 2024. Mechanical and tribological properties of FDM-printed polyamide. Tribology International, 191, p.109198. doi: 10.1016/j.triboint.2023.109198
- [12] Iacob, D.V., Zisopol, D.G. and Minescu, M., 2024. Technical-Economical Study on the Optimization of FDM Parameters for the Manufacture of PETG and