



مقایسه استحکام کششی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده به روش مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی

جلال جودکی^{1*}، سید امیرحسین نقوی الحسینی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- دانش‌آموخته کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 38135-1177، joudaki@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فرآیندهای ساخت افزایشی دسته‌ای از فرآیندهای تولید هستند که برای ساخت قطعات خاص در کمترین زمان ممکن مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخلاف روش ماشینکاری که با براده‌برداری و به صورت کاهشی عملیات ساخت انجام می‌شود، در روش ساخت افزایشی با اضافه نمودن یک لایه جدید به لایه‌های قدیمی چاپ شده، قطعه نهایی ساخته می‌شود. در این مقاله به بررسی استحکام کششی نمونه‌های تولید شده از جنس ABS پرداخته می‌شود. سه پارامتر مورد بررسی اثر اندازه نمونه، اثر درصد تراکم و اثر الگوی چاپ بر رفتار تنش-کرنش قطعات می‌باشد. سه نمونه با اندازه متفاوت، پنج نمونه با درصد‌های مختلف تراکم و دو نمونه با الگوی چاپ متفاوت تولید شده‌اند و پس از انجام آزمون کشش، رفتار منحنی تنش-کرنش قطعات با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش اندازه نمونه، استحکام کششی قطعات کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش درصد تراکم، نیروی تحمل شده توسط نمونه و درصد ازدیاد طول قبل از شکست کاهش می‌یابد و تفاوت قابل توجهی میان نمونه با تراکم صد درصد و سایر نمونه‌ها وجود دارد. با مقایسه نسبت نیروی ماکزیمم بر جرم هر یک از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که این نسبت برای نمونه‌های متخلخل نزدیک به یکدیگر بوده، ولی این نسبت برای نمونه توپر در مقایسه با نمونه‌های متخلخل 25 درصد بیشتر می‌باشد. استحکام نمونه‌های چاپ شده به روش نرمال نسبت به نمونه تولید شده با پروفایل‌های هم‌مرکز 13/9 درصد بیشتر است. همچنین کرنش شکست نمونه‌های چاپ شده به روش پروفایل‌های هم‌مرکز 48 درصد نسبت به کرنش شکست نمونه نرمال کاهش یافته است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 مرداد 1401
داوری اولیه: 2 شهریور 1401
پذیرش: 5 مهر 1401

کلیدواژه‌گان:

چاپ سه‌بعدی
مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی
استحکام کششی
اثر اندازه
درصد تراکم

Comparison of Tensile Strength for 3D Printed Parts Fabricated by Fused Filament Fabrication (FFF)

Jalal Joudaki^{*}, Seyed Amirhosein Naghavi Alhoseini

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

* P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, joudaki@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 14 August 2022
First Decision: 24 August 2022
Accepted: 27 September 2022

Keywords:

3D printing
Fused Filament Fabrication
Tensile Strength
Size Effect
In-fill Density

Abstract

Additive manufacturing is a new type of manufacturing process which is used for the fabrication of special parts in a minimum possible time. Unlike the machining processes in which the part is prepared by material removal, the parts are fabricated in additive manufacturing by adding a new layer to old printed layers. In this article, the tensile strength of printed specimens from ABS by Fused Filament Fabrication (FFF) will be evaluated. Size, in-fill density, and the print pattern are three process parameters that will be investigated. Three different size samples, five different in-fill density samples, and two samples with different patterns are printed and the stress-strain behavior of prepared samples was compared. The tensile test results show that the tensile strength of samples decreases by increasing the sample size. Also, by decreasing the in-fill density, the tensile load of samples and elongation decreases, and a considerable difference between the 100% in-fill density and other samples are observed. By comparing the ratio of maximum force to the mass of samples it was observed that this ratio is almost constant for non-solid samples but this ratio is 25% higher for the solid (100% in-fill density) sample compared to the non-solid samples. The strength of the samples printed by the normal pattern is 13.9% higher than the sample produced with concentric profiles. The failure strain of the sample produced with concentric profiles reduces by about 48% compared to samples printed by the normal pattern.

1- مقدمه

ویژگی‌های این روش می‌تواند به عدم نیاز به ساخت و تهیه قالب اشاره نمود. در این روش قطعه در بستر ماشین به شکل لایه لایه ساخته می‌شود و نیاز به قالب کاملاً حذف می‌شود. همچنین امکان ساخت قطعات با شیب منفی هم وجود دارد. قطعات تولیدی می‌تواند از جنس پلیمر یا فلز باشد. این دسته از روش‌های ساخت از اوایل دهه 1980 میلادی با معرفی

روش‌های ساخت افزودنی¹ دسته‌ای از فرآیندهای ساخت است که در آن قطعه از ماده اولیه به شکل پودر یا گرانول یا سیم مفتول ساخته می‌شود و الزاماً شکل خاص ندارد. از جمله

¹ Additive Manufacturing (AM)

Please cite this article using:

J. Joudaki, S. A. Naghavi Alhoseini Comparison of Tensile Strength for 3D Printed Parts Fabricated by Fused Filament Fabrication (FFF), Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 40- 48, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

انقباض مشاهده شد. همچنین اعوجاج قطعه که یکی از عوامل تاثیرگذار بر دقت ابعادی است، با فیلامنت‌های دارای پودر سرامیک کاهش چشمگیری داشته است.

حسینی واجاری و همکاران [4] به بررسی استحکام سازه‌های مشبک چاپ شده به روش چاپ سه‌بعدی پلیمری‌اسیون نوری پرداخته‌اند. سازه‌های مورد مطالعه ساختار مکعبی مرکزدار و ساختار کاگومی و ساختار اصلاح شده با میله-های خمیده در هر دو ساختار می‌باشند. آزمون فشار شبه استاتیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و نتایج نشان داد که ساختارهای اصلاح شده قابلیت تغییر شکل بزرگتری بدون ایجاد شکست (کرنش الاستیک بزرگتر) را دارند و جذب انرژی در آنها به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. از این قطعات می‌توان در کاربردهای مختلف مانند جاذب‌های انرژی یا ایمپلنت‌های پزشکی که وظیفه تحمل بار ندارند، استفاده نمود.

آبیدریان و همکاران [5] به بررسی اثر متغیرهای فرآیند مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی در ساخت قطعات بر خواص حافظه شکلی PLA پرداخته‌اند. با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای، رفتار حافظه شکلی نمونه‌های چاپ شده با درصدهای پرشدگی 50 و 100 درصد و زاویه‌های چاپ صفر، ± 45 و 90 درجه، ارزیابی و اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که رفتار بازیابی نیرویی نمونه با 50 درصد پرشدگی نسبت به سایر نمونه‌ها بهتر است. همچنین میزان بازیابی نیرویی در زاویه چاپ 45 از زاویه صفر و 90 درجه بیشتر است.

ساندهو و همکاران [6] به بررسی اثر پارامترهای فرآیند مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی بر خواص مکانیکی و زبری سطح با کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی پرداخته‌اند. از فیلامنت‌های PLA برای ساخت نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D638 استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی در مسأله، ضخامت هر لایه، زاویه چاپ و نحوه پر شدن قطعه می‌باشد. استحکام قطعات در محدوده 26 تا 38/1 مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول نیز در محدوده 5 تا 6 درصد تغییر نموده است. همچنین سختی قطعات در راستای طولی و عرضی نیز تقریباً مشابه بوده است. بهترین خواص مکانیکی برای نمونه چاپ شده با ضخامت لایه 0/16 میلی‌متر، زاویه چاپ 60 درجه و الگوی پر شدن مکعبی سلول‌ها بدست آمده است.

وینوت بابو و همکاران [7] به بررسی اثر سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت هر لایه، درصد پرشدگی و الگوی پر شدن مواد پرداخته است. ماده مورد استفاده PLA همراه با فیبر کربن بوده است. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت پایین لایه دلیل اصلی

تکنولوژی استریولیتوگرافی¹ وارد عرصه تکنولوژی گردیدند و با ساخت یک دستگاه ساخت افزودنی توسط دانشگاه MIT که مبتنی بر چاپ بر بستر پودر بود شکل جدی‌تری به خود گرفت. نرخ تقاضا برای ساخت قطعات و محصولات به روش مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی² از سال 2009 به شکل فرآیندهای افزایش یافته است و ساخت افزایشی انقلابی در فرآیندهای ساخت ایجاد نموده است. ساخت هندسه‌های پیچیده با هزینه‌های پایین‌تر، دقت ابعادی قابل قبول و زمان ساخت کوتاه‌تر از مزایای روش‌های چاپ سه‌بعدی است. با این حال، خواص مکانیکی این قطعات در مقایسه با روش‌های سنتی مانند تزریق مواد و فرآیندهای فشاری مانند فورج پایین‌تر است که یکی از عیوب این قطعات می‌باشد [1].

خسروی و همکاران [2] به بررسی اهمیت نسبی پارامترهای ورودی مسئله شامل سرعت تزریق، درصد تراکم و ضخامت لایه بر روی کیفیت سطح و میزان استوانه‌ای بودن سوراخ محصول تولید شده با استفاده از مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی پرداخته‌اند. صافی سطح و انحراف از مرکز سوراخ نمونه‌ها³ برای 51 نمونه از جنس پلی لاکتیک اسید⁴ که براساس طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ چاپ شده، اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که اثرگذاری ضخامت لایه نسبت به سرعت تزریق و درصد تراکم بر کیفیت سطح بیشتر بوده و با افزایش ضخامت هر لایه مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد.

قلی‌زاده روشن و همکاران [3] به بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی قطعات چاپ شده با فیلامنت‌های پلیمری از جنس اکریلونیتریل بوتادین استایرن⁵ پرداخته‌اند. این فیلامنت‌ها همراه با کسرهای حجمی مختلف اکسید آلومینیوم (آلومینا) جهت چاپ نمونه‌ها استفاده شده است. برای اندازه‌گیری خواص، نمونه آزمون کشش و آزمون فشار مطابق استاندارد به ترتیب ASTM D638 type IV و ASTM D695 تهیه شده است. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش کسر حجمی آلومینا، استحکام کششی به دلیل ایجاد حفره‌های بین لایه ای کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در نمونه 20 درصد حجمی آلومینا، استحکام کششی تا 70 درصد کاهش یافت. ولی در آزمون فشار، با افزایش کسر حجمی آلومینا، استحکام فشاری تا 74 درصد کاهش یافته و سپس استحکام فشاری افزایش می‌یابد. انقباض طولی در سه جهت برای قطعه چاپ شده اندازه‌گیری شده و ناهمسانگردی در

¹ Stereo-lithography

² Fused Filament Fabrication (FFF)

³ Runout

⁴ Poly Lactic Acid (PLA)

⁵ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

میلی‌متر بر ثانیه دارای بهترین خواص مکانیکی شامل بیشترین ازدیاد طول و مقاومت به شکست در مقایسه با سایر نمونه‌ها بوده است. محققان دلیل این موضوع را مرتبط با ایجاد اتصال بین لایه‌ای قوی‌تر در این سرعت دانسته‌اند.

مامو و همکاران [12] به بررسی اثر چهار پارامتر فرآیند مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی شامل ضخامت لایه، زاویه چاپ، عرض چاپ و زاویه بر استحکام خمشی قطعات چاپ شده از ABS پرداخته‌اند نتایج تحلیل آنها نشان داد که زاویه چاپ مهمترین پارامتر تاثیرگذار بر استحکام خمشی قطعات و سایر پارامترها به ترتیب ضخامت لایه، عرض چاپ و زاویه چاپ است. همچنین در مطالعه دیگری [13] که توسط همین گروه انجام شده است، اثر پارامترهای فوق بر استحکام کششی قطعات چاپ شده از ABS با کمک روش تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفته است و از دو روش تخمین غیرخطی شامل شبکه عصبی مصنوعی³ و شبکه عصبی-فازی تطبیقی⁴ برای تخمین استحکام قطعات چاپ شده استفاده شده است که استحکام قطعات با دقت بسیار بالایی تخمین زده شده است.

آگاروال و همکاران [14] به بررسی اثر شش پارامتر فرآیند مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی شامل ضخامت دیواره، درصد تراکم، دمای صفحه زیرین، سرعت تزریق، ضخامت لایه و دمای نازل اکستروژن بر دقت ابعادی قطعات چاپ شده از جنس ABS پرداخته است. برای انجام آزمایش‌ها از طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی⁵ استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان داد که مهمترین فاکتورهای اثرگذار بر دقت ابعادی قطعات چاپ شده ضخامت لایه و سرعت چاپ است. همچنین میزان تاثیرگذاری دمای نازل اکستروژن کم بوده و دمای صفحه زیرین تاثیری بر نتایج ندارد.

با توجه به توسعه بسیار زیادی که در حوزه ساخت چاپگرهای سه‌بعدی در چند سال اخیر اتفاق افتاده است و نیاز فراوان به شناخت رفتار مواد و قطعات ساخته شده با روش ساخت افزایشی، مقالات متعددی در سالیان اخیر چاپ شده است که بررسی هر یک می‌تواند جنبه‌ای از ساخت افزایشی را برای خوانندگان آشکار سازد. با این حال مقالات ذکر شده در بخش قبل، بخشی از ادبیات مرتبط با موضوع این مقاله می‌باشد. برای مطالعه تکمیلی ارجاع به مقالات [15-19] پیشنهاد می‌گردد. همچنین مقالات مروری [20-22] نیز در نشان دادن آینده پیش روی این فرآیند بسیار مفید هستند. در این مقاله به

عدم اتصال بین لایه‌ها است و الگوی پرشدن مستطیلی و شش گوش (لانه زنبوری) می‌تواند خواص مکانیکی مناسبی را ایجاد نماید. همچنین در مقاله مشابهی که توسط دورگا پراسادا راتو و همکاران [8] به چاپ رسیده است به بررسی اثر ضخامت هر لایه، دمای اکستروژن نازل و الگوی پر شدن مواد با کمک طراحی آزمایش فول فاکتوریل پرداخته است که نتایج تحلیل واریانس نشان داد که پارامترهای تاثیرگذار بر استحکام نمونه‌ها، ضخامت هر لایه و اثر متقابل ضخامت لایه الگوی پر شدن مواد و اثر متقابل الگوی پر شدن مواد-دمای اکستروژن نازل می‌باشد.

یکی از پارامترهای مهم زاویه چاپ قطعه¹ می‌باشد. نوید [9] به بررسی اثر زاویه چاپ بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PLA پرداخته است. نتایج آزمون کشش نشان داد که بیشترین مقدار استحکام کششی، مدول الاستیسیته و درصد ازدیاد طول در نمونه چاپ شده با زاویه 45 درجه بوده است و پس از آن نمونه با زاویه چاپ در راستای طولی نمونه آزمون کشش بهترین خواص را ارائه داده است. نمونه چاپ شده با زاویه چاپ عمود بر راستای طولی نمونه، کمترین و ضعیف‌ترین نمونه در نتایج خواص مکانیکی بوده‌اند. با بررسی خواص قطعات ساخته شده، رفتار ناهمسانگردی شدیدی در قطعه مشاهده می‌گردد به گونه‌ای که نمونه با زاویه چاپ عمودی رفتار شکست ترد از خود بروز می‌دهد.

وینسنت و همکاران [10] به بررسی اثر پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از ABS پرداخته‌اند. پارامترهای مورد بررسی در آن پژوهش شامل زمان سرد شدن بین لایه‌ها، قطر نازل، و ضخامت لایه‌ها است. نتایج نشان داد که کاهش زمان سرد شدن بین لایه‌ها باعث افزایش استحکام قطعات می‌شود. کاهش ضخامت لایه‌ها تا 0/1 میلی‌متر می‌تواند موجب استحکام و مدول الاستیسیته بالاتر شود. همچنین قطر بزرگتر نازل نیز منجر به خواص مکانیکی بهتر می‌گردد.

رضائیان و همکاران [11] به بررسی اثر سرعت تزریق بر استحکام کششی و انرژی شکست نمونه ساخته شده از ABS ساخته شده با فرآیند مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی پرداخته‌اند. در آن مطالعه سرعت‌های 10، 30، 50 و 70 میلی‌متر بر ثانیه برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش و نمونه خمش نیم‌دایره‌ای² (جهت اندازه‌گیری خواص شکست ماده) مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نتایج تجربی، نمونه تهیه شده با سرعت 70

³ Artificial Neural Network (ANN)

⁴ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

⁵ Central Composite Design (CCD)

¹ Raster Angle

² Semi-Circular Bending (SCB)

و با سرعت 80mm/s حرکت می‌نماید.

برای بررسی اثر اندازه بر استحکام، سه نمونه با ابعاد متفاوت و ضخامت‌های 2، 4 و 6 میلی‌متر چاپ شده است. در شکل 1 تصویر نمونه‌های آماده شده مشاهده می‌شوند. در هر سه نمونه تراکم 100 درصد بوده و تنها تفاوت در ابعاد نمونه‌ها می‌باشد. در شکل 2 ابعاد و اندازه‌های نمونه‌های ساخته شده نمایش داده شده است. سطح مقطع بخش میانی قطعات که تحت تاثیر نیروی کشش قرار می‌گیرد به ترتیب برابر است با 10، 60 و 150 میلی‌متر مربع است. استاندارد رایج در اندازه‌گیری خواص مواد پلیمری استاندارد ASTM D638-14 [23] می‌باشد. اما با توجه به اینکه نمونه‌های با اندازه‌های متفاوت در سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ در استاندارد فوق تعریف نشده است، با مدنظر قرار دادن فلسفه مربوط به تعیین اندازه‌ها در استاندارد مذکور، اندازه نمونه‌ها مشخص شده است و اندازه‌ها از استاندارد خاصی تبعیت نمی‌نماید. همچنین برخی محققان [24] روابط تحلیلی جهت بیان ارتباط میان نمونه‌های استاندارد و غیراستاندارد را ارائه نموده‌اند.

برای بررسی اثر تراکم 5 نمونه با تراکم‌های 10، 25، 50، 75 و 100 درصد چاپ شده است. در شکل 3 تصویری از این نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اندازه هر پنج نمونه یکسان است و تنها درصد تراکم‌ها متفاوت است. ابعاد این نمونه‌ها براساس نمونه سایز متوسط شکل 2 می‌باشد. در حالتی که درصد تراکم 100 درصد نباشد بخش داخلی نمونه‌ها براساس الگوی لانه زنبوری مانند آنچه در شکل 4 نشان داده شده است پر می‌شود.



Fig. 1 The printed specimens with different sizes

شکل 1 سه نمونه آماده شده با ابعاد متفاوت

بررسی اثر سه پارامتر شامل اندازه نمونه، درصد تراکم (پرشوندگی) و اثر الگوی چاپ بر خواص قطعات از جنس ABS پرداخته خواهد شد. برای این منظور نمونه‌های آزمون کشش چاپ شده و خواص کششی آنها بدست می‌آید و مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. یکی از مهمترین نوآوری‌های این مقاله، توجه به اثر اندازه در ساخت قطعات چاپ سه‌بعدی است. همچنین سعی شده است تا ارتباطی میان استحکام قطعات چاپ شده و جرم قطعات با درصد تراکم متفاوت ایجاد شود. در انتخاب این سه پارامتر به میزان تاثیرگذاری آنها و نگاه متفاوت به مسأله چاپ سه بعدی با در نظر گرفتن مقالات منتشر شده قبلی توجه شده است.

2- مواد و روش آزمایش

برای ساخت نمونه‌ها از روش مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی استفاده شده است. در این فرآیند رشته یا فیلامنت ترموپلاستیک توسط یک نازل گرما داده می‌شود و به تدریج از یک نازل با قطر پایین در مسیر مشخص تزریق (اکستروژن) می‌شود. برای بررسی تغییرات استحکام کششی نمونه‌های ساخته شده، سه پارامتر اصلی شامل اندازه، تراکم و جهت چاپ بعنوان پارامترهای متغیر مسئله مورد بررسی انتخاب شده‌اند. مجموعاً تعداد 8 نمونه با کمک دستگاه چاپگر سه‌بعدی ساخته شده است.

ماده اولیه فیلامنت از جنس ABS با قطر 2 میلی‌متر می‌باشد، دمای نازل با توجه به ضریب جریان یافتن مذاب¹ برابر با 230°C تنظیم گردیده است. همچنین دمای صفحه زیرین نمونه هم برابر با 110°C تنظیم شده است. یک لایه جداکننده بر روی صفحه زیرین کشیده شده است تا بتوان پس از اتمام فرآیند ساخت نمونه را به آسانی از صفحه زیرین جدا نمود. نمونه‌ها با ابعاد میلی‌متری در نرم افزار سالیدورکز² ترسیم شده‌اند و سپس با فرمت STL³ که فرمت استاندارد برای توصیف سطوح و هندسه اجسام سه‌بعدی است، ذخیره سازی شده‌اند. سپس فایل STL وارد نرم‌افزار MakerBot شده و در آن تنظیمات مربوط به ساخت نمونه انجام شده است. این تنظیمات شامل دمای نازل (230°C)، دمای صفحه زیرین (80°C)، ارتفاع هر لایه در چاپ سه‌بعدی (0/2 میلی‌متر)، کیفیت ساخت نرمال و درصد تراکم (پرشوندگی) می‌باشد. برای چاپ قطعات از یک دستگاه چاپگر سه‌بعدی ساخت شرکت ایرانی TOP-3DP استفاده شده است که قطر نازل اکستروژر آن 0/4 میلی‌متر بوده

¹ Melt Flow Index (MFI)

² SolidWorks

³ Stereolithography (STL)



Fig. 4 The cross-section of printed specimens with 10 and 50 in-fill density.

شکل 4 سطح مقطع نمونه‌های با تراکم 10 و 50 درصد

برای بررسی اثر الگوی چاپ دو نمونه با الگوی متفاوت چاپ شده است. هر دو نمونه با تراکم 100 درصد ساخته شده است. اولین نمونه که با عدد صفر در شکل 5 نشان داده شده است، اینگونه تهیه شده است که نازل ابتدا محیط بیرونی قطعه را چاپ می‌کند و سپس به اندازه ضخامت فیلامنت به سمت داخل حرکت می‌کند و پروفایلی مشابه پروفایل بیرونی اما اندکی کوچکتر را دوباره چاپ می‌کند. عبارتی قطعه به صورت پروفایل‌های هم‌مرکز از محیط خارجی شروع به چاپ نموده و در هر مرحله یک دور محیط را چاپ می‌کند تا زمانی که قطعه تکمیل شود. در نمونه دیگر که با عدد 100 مشخص شده است (و در بخش‌های قبل نیز به عنوان نمونه با سایز متوسط و تراکم 100 درصد معرفی شده است) نمونه مطابق الگوی استاندارد دستگاه (چاپ محیط بیرونی در ابتدا و سپس پر نمودن بخش چاپ شده با فیلامنت‌های افقی یا عمودی) تهیه شده است. در شکل 6 این دو الگوی متفاوت در چاپ نمونه نشان داده شده است.

لازم به ذکر است نمونه سایز متوسط با تراکم 100 درصد یک نمونه است که نتایج بررسی آزمون کشش آن در هر سه اثر اندازه، تراکم و جهت چاپ مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با این توضیح مشخص می‌شود که مجموعاً 8 نمونه آزمون کشش چاپ شده است. جدول 1 لیست کامل نمونه‌های چاپ شده جهت انجام آزمون‌های تجربی را نشان می‌دهد.

پس از آماده شدن نمونه‌ها، آزمون کشش توسط دستگاه سنتام مدل STM-250 و با کمک لودسل متناسب با نیروی کشش نمونه‌ها انجام شده است و رفتار ماده تحت اثر کشش با سرعت ثابت 1mm/min اندازه‌گیری شد. همچنین جرم نمونه‌ها با کمک یک ترازوی دقیق نیز اندازه‌گیری شده است.

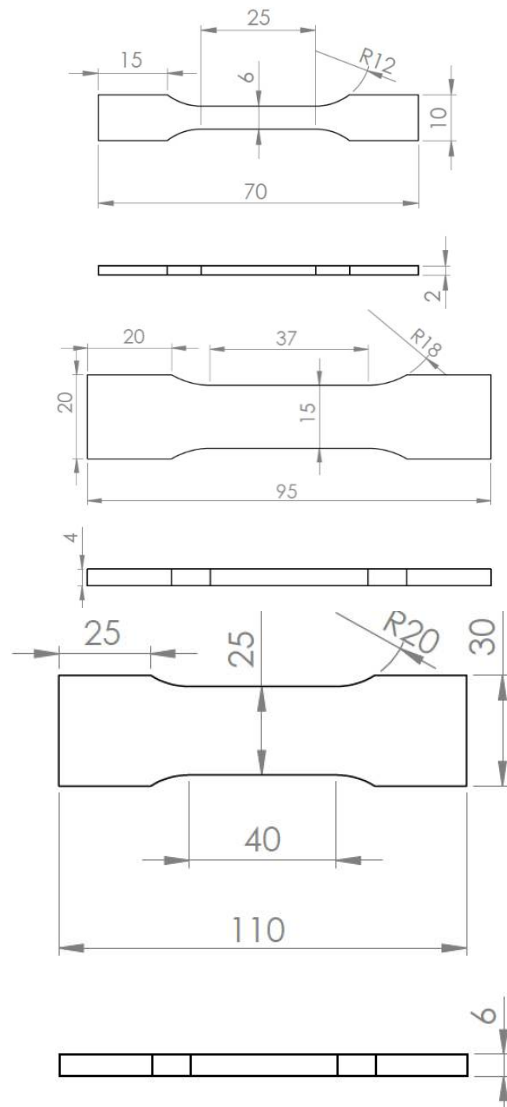


Fig. 2 The dimension of specimens prepared for tensile test.

شکل 2 ابعاد نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون کشش

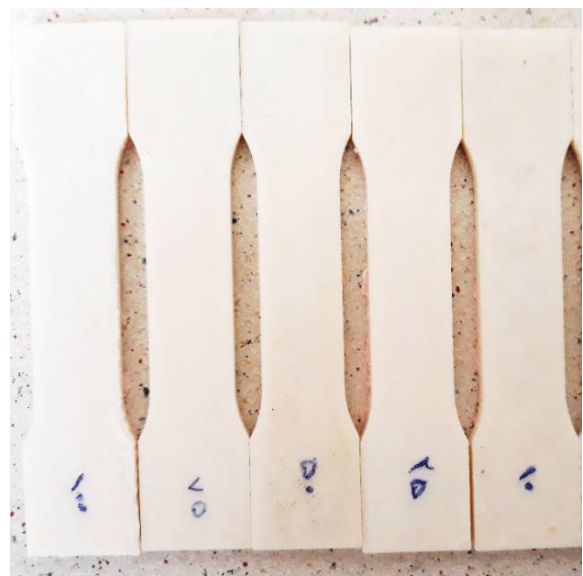


Fig. 3 The printed specimens with different in-fill density.

شکل 3 پنج نمونه آماده شده با درصد‌های متفاوت پرشدگی

متخلخل است، در این موارد برای مقایسه نمونه‌ها از ترسیم نمودار تنش- کرنش خودداری شده و نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.



Fig. 7 The prepared printed specimens after tensile test.

شکل 7 تصاویر نمونه‌های چاپ شده پس از آزمون کشش

3-1- اثر اندازه نمونه

در شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی و در شکل 9 نمودار تنش کرنش برای اندازه‌های متفاوت نمونه نشان داده شده است. سطح مقطع نمونه‌ها به ترتیب 12، 60 و 150 میلی‌متر می‌باشد. ماکزیمم نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها به ترتیب 474، 2287 و 5070 نیوتن می‌باشد. ماکزیمم تنش وارد بر نمونه به ترتیب 39/5، 38/1 و 33/8 مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به نمونه با کوچکترین سایز 3/5 و 14/4 درصد کاهش مشاهده می‌شود. این تفاوت در رفتار در شکل 9 نیز مشاهده می‌شود و با افزایش اندازه نمونه، استحکام نمونه کاهش می‌یابد. تحقیقات نویسندگان مختلف [24-27] نشان داده است که میان اندازه نمونه و رفتار ماده ارتباط وجود دارد و با افزایش ضخامت، استحکام و درصد ازدیاد طول نمونه افزایش می‌یابد. در نمونه‌های ساخته شده با روش مدل‌سازی لایه نشانی ذوبی مشاهده می‌شود که برخلاف فلزات، با افزایش اندازه استحکام کاهش می‌یابد. این موضوع مرتبط با میزان تخلخل در نمونه‌ها و نحوه اتصال میان لایه‌ها¹ است و با افزایش اندازه نمونه‌ها، تعداد تخلخل‌ها و حفره‌ها افزایش یافته و احتمال شروع ترک در نقاط مختلف افزایش می‌یابد. استحکام نمونه به نحوه حرکت نابه‌جایی در دانه‌های سطحی و نحوه رشد ترک وابسته است.

3-2- اثر درصد تراکم

شکل 10 نمودار نیروی تحمل شده توسط نمونه‌های با درصد تراکم متفاوت را نشان می‌دهد.



Fig. 5 Two printed specimens with different layer setup.

شکل 5 دو نمونه آماده شده با نحوه متفاوت ساخت

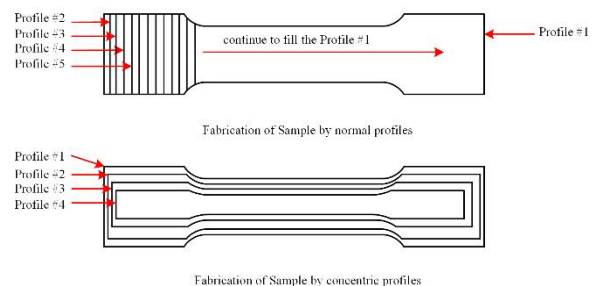


Fig. 6 Normal and concentric pattern of specimen's print.

شکل 6 الگوی چاپ نرمال و الگوی چاپ با پروفایل‌های هم‌مرکز

جدول 1 لیست نمونه‌های چاپ شده جهت آزمون تجربی

Table 1 List of printed specimens for experimental test

شماره نمونه	اندازه نمونه	درصد تراکم	الگوی چاپ
1	سایز کوچک	100	الگوی نرمال
2	سایز متوسط	100	الگوی نرمال
3	سایز بزرگ	100	الگوی نرمال
4	سایز متوسط	75	الگوی نرمال
5	سایز متوسط	50	الگوی نرمال
6	سایز متوسط	25	الگوی نرمال
7	سایز متوسط	10	الگوی نرمال
8	سایز متوسط	100	الگوی پروفایل‌های هم‌مرکز

3- نتایج و بحث

پس از تهیه نمونه‌ها، آزمون کشش استاندارد بر روی نمونه‌ها انجام گردید که تصاویر نمونه‌ها پس از آزمون در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به اینکه در برخی نمونه‌ها سطح مقطع کاملاً توپر است و در برخی دیگر سطح مقطع توپر نیست و

¹ Layer's Bonding

نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد. از آنجایی که سطح مقطع نمونه‌ها کاملاً توپر نیست و متخلخل است، نمی‌توان تنش را برای قطعات محاسبه نمود. از این رو برای مقایسه نیروی ماکزیمم بر جرم هر یک از قطعات تقسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای نمونه‌های متخلخل این نسبت نزدیک به یکدیگر و در حدود عدد 259 می‌باشد ولی برای نمونه کاملاً توپر این نسبت عدد بالاتری (حدوداً 325) را نشان می‌دهد که نسبت به عدد 259، 25/4 درصد افزایش را نشان می‌دهد. ذکر است که بین درصد‌های کاهش نیروی کششی و درصد‌های کاهش جرم نمونه‌ها ارتباط معناداری مشاهده نمی‌شود.

برای بررسی اثر درصد تراکم بر استحکام نمونه‌ها، ماکزیمم نیرو براساس درصد تراکم در شکل 11 ترسیم شده است. نمودار در زمانی که تراکم 100 درصد نمی‌باشد، تقریباً حالت خطی دارد اما در تراکم 100 درصد یک افزایش شدید مشاهده می‌شود. برای تخمین ماکزیمم نیرو از برازش یک معادله درجه سوم بر نتایج تجربی استفاده شده است که معادله مربوطه در فرمول (1) نشان داده شده است. x درصد تراکم بوده و دقت برازش منحنی 99/84 درصد می‌باشد.

$$\text{Maximum Force} = 0.0062x^3 - 0.7861x^2 + 32.61x + 716.28 \quad (1)$$

جدول 2 جرم نمونه‌های با درصد تراکم متفاوت

درصد کاهش جرم	نسبت ماکزیمم نیرو به جرم (نیوتن بر گرم)	جرم (گرم)	درصد تراکم
-	324/8	7/04	100
27/2	258/7	5/12	75
34/8	257/1	4/59	50
39/3	260/4	4/27	25
46/4	259/9	3/77	10

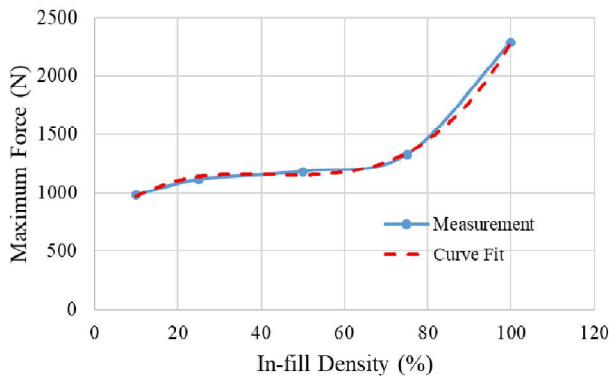


Fig. 11 Variation of maximum tensile force with different in-fill density.

شکل 11 نمودار تغییرات ماکزیمم نیروی کششی برحسب درصد تراکم متفاوت

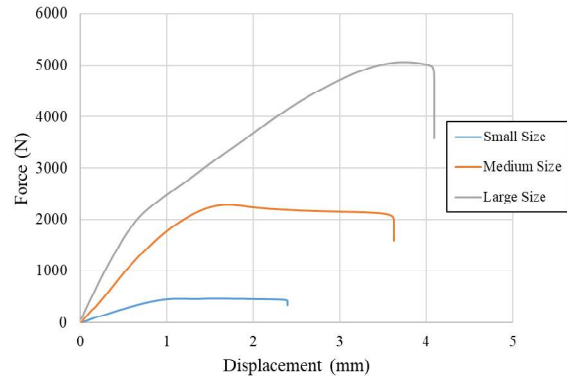


Fig. 8 Comparison of tensile force in specimens with different size. شکل 8 مقایسه نیروی تحمل شده توسط سه نمونه با سایز مختلف

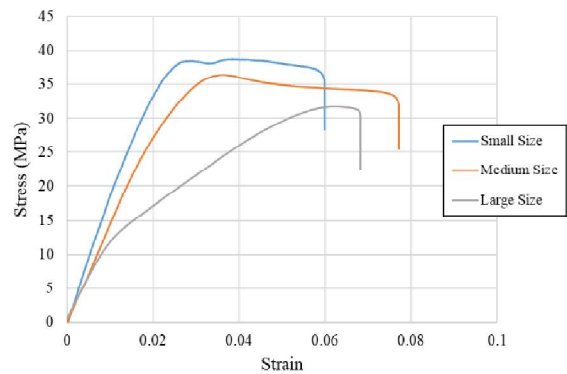


Fig. 9 Comparison of tensile stress in specimens with different size.

شکل 9 تصاویر نمونه‌های چاپ شده پس از آزمون کشش

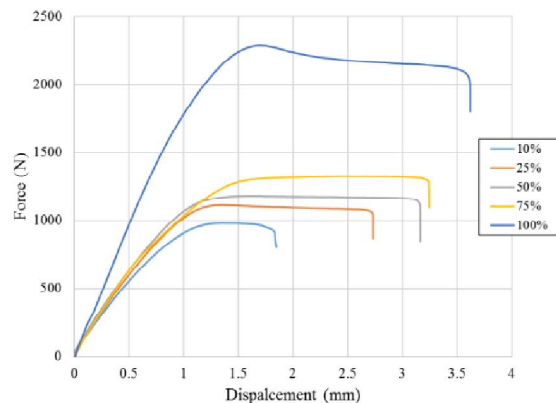


Fig. 10 Comparison of tensile force in specimens with different in-fill density.

شکل 10 مقایسه نیروی تحمل شده توسط سه نمونه با درصد تراکم متفاوت

ماکزیمم نیروی تحمل شده در قطعات به ترتیب 980، 1112، 1180، 1325 و 2287 نیوتن برای درصد تراکم 10، 25، 50، 75 و 100 درصد تراکم می‌باشد. اگر قطعه با 100 درصد تراکم بعنوان معیار انتخاب شود، با کاهش درصد تراکم به ترتیب 42، 48، 51 و 57 درصد کاهش در نیروی تحمل شده توسط هر قطعه مشاهده می‌شود. جدول 2 مقایسه جرم

3-3- اثر الگوی چاپ

می‌یابد. با تغییر درصد تراکم از 75 درصد به 10 درصد، ماکزیمم نیروی تحمل شده در قطعات در مقایسه با قطعه با 100 درصد تراکم از 42 تا 57 درصد کاهش می‌یابد.

- نسبت نیروی ماکزیمم بر جرم برای نمونه‌های متخلخل، نزدیک به یکدیگر و در حدود عدد 259 می‌باشد ولی برای نمونه کاملاً توپر این نسبت عدد 325 بوده و افزایش 25/4 درصد مشاهده می‌شود.

- استحکام نمونه‌های چاپ شده با الگوی چاپ پروفایل‌های هم‌مرکز 13/9 درصد کمتر از نمونه‌های چاپ شده به روش نرمال است. همچنین کرنش نقطه شکست نمونه نرمال 7/7 درصد و برای نمونه با پروفایل هم‌مرکز 4 درصد می‌باشد که 48 درصد کاهش کرنش شکست نسبت به نمونه نرمال مشاهده می‌شود.

5- مراجع

- [1] T. N. A. T. Rahim, A. M. Abdullah, H. Md Akil, Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites, *Polymer Reviews*, Vol. 59, No. 4, pp. 589-624, 2019, doi: 10.1080/15583724.2019.1597883.
- [2] M. Khosravi, S. M. Hosseini, M. Lakhi, Investigation of parameters affecting the roughness and cylindricity of holes in PLA parts made of 3D printing by fused deposition modeling process using response surface method, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 3, pp. 119-133, 2021, doi: 10.22044/jsfm.2021.2209. (in Persian فارسی)
- [3] A. Gholizadeh Roshan, A. Zolfaghari, M. Shakeri, Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-9, 2020. (in Persian فارسی)
- [4] M. Hosseini Vajari, S. Dariushi, M. Behzadnasab, An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 19-26, 2021. (in Persian فارسی)
- [5] S. Abidaryan, A. H. Behraves, M. Barmouz, S. K. Hedayati, Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5, pp. 14-23, 2020. (in Persian فارسی)
- [6] G. S. Sandhu, K. S. Boparai, K. S. Sandhu, Influence of slicing parameters on selected mechanical properties of fused deposition modeling prints, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 48, No. 5, pp. 1378-1382, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.118.

شکل 12 اثر الگوی چاپ بر نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است استحکام نمونه‌های چاپ شده به روش نرمال نسبت به نمونه تولید شده با پروفایل‌های هم‌مرکز بیشتر بوده و کرنش شکست این نمونه نیز به شکل قابل توجهی بیشتر است. با توجه به اینکه هر دو نمونه با تراکم 100 درصد تهیه شده‌اند، می‌توان تنش را با تقسیم نمودن نیرو بر سطح مقطع محاسبه نمود. ماکزیمم تنش در الگوی چاپ نرمال 38/1 مگاپاسکال و برای نمونه با الگوی چاپ پروفایل هم‌مرکز 32/8 مگاپاسکال می‌باشد که 13/9 درصد کاهش تنش را نشان می‌دهد. کرنش نقطه شکست نمونه نرمال 7/7 درصد و برای نمونه با پروفایل هم‌مرکز 4 درصد می‌باشد که 48 درصد کاهش کرنش شکست نسبت به نمونه نرمال را نشان می‌دهد. جرم نمونه نرمال 7/04 گرم و جرم نمونه تولید شده با پروفایل هم‌مرکز 6/28 گرم بوده است که نشان می‌دهد علی‌رغم ابعاد یکسان نمونه‌ها مقداری تخلخل در نمونه با پروفایل هم‌مرکز ایجاد شده است که باعث کاهش جرم آن می‌شود.

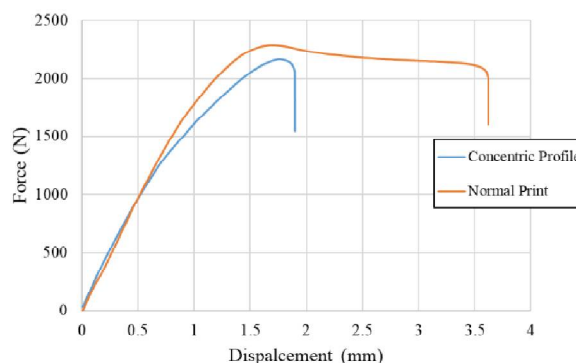


Fig. 12 Comparison of tensile force in specimens with different printing pattern.

شکل 12 مقایسه نیروی تحمل شده توسط سه نمونه با الگوی چاپ متفاوت

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی سه پارامتر مهم فرآیند مدل‌سازی لایه‌نشانی ذوبی شامل اثر اندازه، اثر درصد تراکم و اثر الگوی چاپ در چاپ سه‌بعدی قطعات از جنس ABS پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج این مقاله به شرح ذیل می‌باشد:

- با افزایش اندازه نمونه، استحکام نمونه کاهش می‌یابد و ماکزیمم تنش نسبت به نمونه با کوچکترین سایز به ترتیب 3/5 و 14/4 درصد کاهش نشان می‌دهد.
- با ایجاد قطعات متخلخل بواسطه تغییر درصد تراکم، نیروی قابل تحمل توسط قطعه به صورت غیرخطی کاهش

- 10.1016/j.mtcomm.2021.102353.
- [17] M. Lay, N. L. N. Thajudin, Z. A. Abdul Hamid, A. Rusli, M. K. Abdullah, R. K. Shuib, Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 176, pp. 107341, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107341.
- [18] R. Srinivasan, R. Rathish, P. R. Sivaraman, A. Pramod, G. Shivaganesh, Influential analysis of fused deposition modeling process parameters on the wear behaviour of ABS parts, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 27, No. 2, pp. 1869-1876, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.808.
- [19] M. Faes, E. Ferraris, D. Moens, Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via fused deposition modelling, *Procedia CIRP*, Vol. 42, pp. 748-753, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.313.
- [20] I. Khan, N. Kumar, Fused deposition modelling process parameters influence on the mechanical properties of ABS: A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, No. 6, 2021, pp. 4004-4008, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.202.
- [21] S. Paul, Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review, *Measurement*, Vol. 178, pp. 109320, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109320.
- [22] A. Cano-Vicent, M. M. Tambuwala, Sk. S. Hassan, D. Barh, A. A. A. Aljabali, M. Birkett, A. Arjunan, Á. Serrano-Aroca, Fused deposition modelling: current status, methodology, applications and future prospects, *Additive Manufacturing*, Vol. 47, pp. 102378, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102378.
- [23] ASTM D638-14, Standard test method for tensile properties of plastics, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, 2012.
- [24] C. Z. Zhao, W. Q. Huang, J. X. Liu, P. R. Ren, Z. X. Zuo, K. J. Yan, An investigation on tensile and fatigue properties of cast Al-7Si-1.5Cu alloy applied in cylinder head considering size effect phenomenon, *Materials Today Communications*, Vol. 31, pp. 103271, 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103271.
- [25] A. V. Sergueeva, J. Zhou, B. E. Meacham, D. J. Branagan, Gage length and sample size effect on measured properties during tensile testing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 526, pp. 79-83, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.07.046.
- [26] F. A. Marandi, A. H. Jabbari, M. Sedighi, R. Hashemi, An experimental, analytical, and numerical investigation of hydraulic bulge test in two-layer Al-Cu sheets, *ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139, pp. 031005, 2017, doi: 10.1115/1.4034717.
- [27] Y. Hou, W. Zhang, X. Mi, H. Xie, X. Feng, G. Huang, L. Peng, Z. Yang, Different response mechanisms of yield strength and ultimate tensile strength in pure copper considering size effect, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 849, pp. 143443, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.143443.
- [7] N. Vinoth Babu, N. Venkateshwaran, N. Rajini, S. O. Ismail, F. Mohammad, H. A. Al-Lohedan, S. Suchart, Influence of slicing parameters on surface quality and mechanical properties of 3D-printed CF/PLA composites fabricated by FDM technique, *Materials Technology*, Vol. 37, No.9, pp. 1008-1025, 2022, doi: 10.1080/10667857.2021.1915056.
- [8] V. D. Prasada Rao, P. Rajiv, V. Navya Geethika, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, No. 6, pp. 2012-2018, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.009.
- [9] N. Naveed, Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM), *Materials Technology*, Vol. 36, No.5, pp. 317-330, 2021, doi: 10.1080/10667857.2020.1758475.
- [10] C. M. S. Vicente, T.S. Martins, M. Leite, A. Ribeiro, L. Reis, Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts. *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 31, pp. 501– 507, 2020, doi: 10.1002/pat.4787.
- [11] P. Rezaeian, M. R. Ayatollahi, A. Nabavi-Kivi, S. M. J. Razavi, Effect of printing speed on tensile and fracture behavior of ABS specimens produced by fused deposition modeling, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 266, pp. 108393, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108393.
- [12] H. B. Mamo, A. D. Tura, A. Johnson Santhosh, N. Ashok, Dommeti Kamalakara Rao, Modeling and analysis of flexural strength with fuzzy logic technique for a fused deposition modeling ABS components, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 57, No. 2, pp. 768-774, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.306.
- [13] A. D. Tura, H. G. Lemu, H. B. Mamo, Experimental investigation and prediction of mechanical properties in a fused deposition modeling process. *Crystals*, Vol. 12, No. 6, pp. 844, 2022, doi: 10.3390/cryst12060844.
- [14] K. M. Agarwal, P. Shubham, D. Bhatia, P. Sharma, H. Vaid, R. Vajpeyi, Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling (FDM), *Sensors International*, Vol. 3, pp. 100149, 2022, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100149.
- [15] M. Azadi, A. Dadashi, S. Dezhianian, M. Kianifar, S. Torkaman, M. Chiyani, High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing, *Forces in Mechanics*, Vol. 3, pp. 100016, 2021, doi: 10.1016/j.finmec.2021.100016.
- [16] R. Raj Mohan, R. Venkatraman, S. Raghuraman, Experimental analysis on density, micro-hardness, surface roughness and processing time of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) through fused deposition modeling (FDM) using Box Behnken design (BBD), *Materials Today Communications*, Vol. 27, pp. 102353, 2021, doi: