جلد 7، شماره 2، تابستان 1399، ص‌ص 855-862

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیـــت**

http://jstc.iust.ac.ir

مطالعه تجربی تاثیر پارامترهای مختلف ساخت بر خواص کششی نمونه‌های PLA چاپ‌شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده

محمد حیدری رارانی[1*]، نیلوفر عزتی[2]، پریسا صادقی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/6/12

پذیرش: 98/09/07

کلیدواژگان:

چاپ سه‌بعدی

ساخت افزایشی

مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده

خواص کششی

چکیده

مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده (FDM) یکی از روش‌های رایج چاپ سه‌بعدی قطعات پلیمری است که به دلیل توانایی آن برای ساخت قطعات پیچیده کاربردی استفاده از آن در حوزه‌های مختلف صنعتی، تحقیق‌های علمی و کاربردهای مهندسی در حال گسترش است. خواص مکانیکی قطعات تولید شده با این روش به شدت به انتخاب صحیح پارامترهای ساخت بستگی دارد. در این تحقیق، اثر سه پارامتر مهم ساخت از قبیل چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی، سرعت چاپ و ضخامت لایه‌ها بر خواص کششی قطعات PLA مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های استاندارد با چهار چگالی شبکه داخلی 20، 40، 60 و 80 درصد، دو سرعت چاپ 20 mm/s و 40 mm/s و دو ضخامت لایه 0.1mm و 0.2mm و چاپ شده و تحت آزمون کشش شبه‌استاتیک قرار گرفته‌اند. در تمام قطعات چاپ شده، زاویه پرینت شبکه داخلی 45± درجه است. نتایج تجربی نشان می‌دهند چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی نسبت به دو پارامتر دیگر اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی مشخصه‌های مکانیکی مانند مدول الاستیسیته، استحکام نهایی و کرنش شکست دارد. طبق این نتایج، با افزایش چگالی پرشدن شبکه داخلی سفتی و استحکام قطعات به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در چگالی 80 درصد، قطعه بالاترین سفتی و استحکام را دارد اما رفتار تردتری از خود نشان می‌دهد.. این تحقیق نشان داد که کاهش ضخامت لایه به میزان کمی مدول الاستیسیته را افزایش میدهد، اما از طرفی به شدت باعث ترد شدن قطعه می‌شود.

Effect of various processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed of PLA specimens

Mohammad Heidari-Rarani[1*], Niloofar Ezati[2], Parisa Sadeghi[3]

1, 2, 3- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

Keywords

Additive Manufacturing
Fused Deposition Modelling (FDM)
3D printing, PLA
Tensile properties

Abstract

Fused Depositional Modeling (FDM) is one of the common methods for 3D printing of polymers, which is expanding in various industrial applications, scientific researches and engineering applications due to its ability to make complex parts. The mechanical properties of 3D printed parts strongly depend on the correct selection of processing parameters. In this study, the effect of three important parameters such as infill density, printing speed and layer thickness are investigated on the tensile properties of PLA specimens. For this purpose, standard specimens with four infill densities of 20%, 40%, 60% and 80%, two speeds of 20 mm/s and 40 mm/s, and two thicknesses of 0.1 mm and 0.2 mm are printed and tested under quasi-static tensile test. In all printed specimens, the print angle is ±45°. Experimental results show that the infill density in comparison to the other two parameters has significant effect on mechanical properties such as modulus of elasticity, ultimate strength, and failure strain. According to these results, by increasing the infill density, the stiffness and strength of the specimens increases considerably. At infill density of 80%, the specimens has the highest stiffness and strength, but it exhibits a brittle behavior.. Moreover, it can be deduced that by reducing the layer thickness although the modulus of elasticity increases a little, ductility is greatly affected.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Heidari-Rarani, M. Ezati, N. Sadeghi, P., "Effect of various processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed of PLA specimens", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 855-862, 2020.

1-مقدمه

چاپ سه‌بعدی یکی از روش‌های نمونه‌سازی سریع[1] است که محصول را با استفاده از یک مدل سه‌بعدی ایجاد شده توسط رایانه، تولید می‌کند. چاپگرهای سه‌بعدی در صنایع مختلف مانند خودرو، هوافضا، عمران، پزشکی و غیره استفاده می‌شوند [2,1]. برای مثال از چاپگر سه‌بعدی می‌توان برای تولید نمونه اولیه، تهیه قالب، ساخت پیچ یا چرخدنده‌های مورد استفاده در ربات‌ها، تولید قطعات پلاستیکی برخی ماشین‌آلات، ساخت روکش برخی از پروتزها، تولید کامپوزیت‌های الیافی [3] و غیره استفاده کرد. فرآیند تولید چاپ سه‌بعدی بر اساس فرآیند ساخت افزایشی[2] صورت می‌گیرد. در فرآیند ساخت افزایشی، لایه‌ها یکی پس از دیگری روی هم قرار می‌گیرند و در نهایت یک فایل سه بعدی ایجاد شده توسط رایانه، به یک محصول فیزیکی تبدیل می‌شود. امروزه استفاده از فناوری ساخت افزایشی به دلیل انعطاف‌پذیری و مزایای طراحی آن افزایش یافته است [4]. به عنوان مثال این فناوری در عین حال که امکان ایجاد اشکال و ساختارهای پیچیده با وزن کمتر را فراهم می‌کند، زمان توسعه و هزینه‌های ابزاری را کاهش داده و به طور چشم‌گیری باعث ساده شدن مراحل تولید می‌شود [6, 5, 1]. همچنین با استفاده از این روش، قطعاتی که از چندین قطعه مونتاژ ساخته شده‌اند، به عنوان یک جسم تک و بدون مونتاژ ساخته می‌شوند.

چاپگرهای سه‌بعدی قابلیت چاپ مواد مختلف از قبیل فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرها را دارند. انواع چاپگرهای سه‌بعدی چاپ‌کننده پلیمرها عبارتند از [7]: مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM[3])، استریولیتوگرافی (SLA[4])، پردازش دیجیتال نور (DLP[5])، تف‌جوشی انتخابی لیزر (SLS[6]) و تولید شیء چندلایه (LOM[7]).

چاپگرهای سه‌بعدی FDM یکی از رایج‌ترین روش‌های چاپ سه‌بعدی است که در آن برای تولید قطعه از اکسترود کردن فیلامنت‌هایی از جنس پلیمرهای ترموپلاستیک و یا موم استفاده می‌شود. این اکسترودر بر روی یک میز CNC سه بعدی قرار دارد که در جهت x و y و z حرکت کرده و پلیمر ذوب‌شده در داخل اکسترودر را بر روی قطعه می‌نشاند. بعد از تمام‌شدن یک لایه، اکسترودر به اندازه ضخامت یک لایه به سمت بالا حرکت می‌کند. شکل 1 شمای کلی یک چاپگر سه‌بعدی FDM را نشان می‌دهد.

به دلیل کاربرد زیاد این روش در نمونه‌سازی سریع، مواد اولیه مختلف مانند پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌آمید (PA)، پلی‌اورتان ترموپلاستیک (TPU) و غیره به صورت فیلامنت با قیمت مناسب تولید شده است.

نکته حائز اهمیت این است که پارامترهای بسیاری بر کیفیت و خواص نهایی یک نمونه پرینت شده با FDM تاثیر دارند. پارامترهای ساخت را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: ۱) پارامترهای لایه‌بندی[8]: مهمترین این پارامترها عبارتند از:

- ضخامت لایه‌ها
- تعداد و ضخامت دیواره
- سرعت چاپ

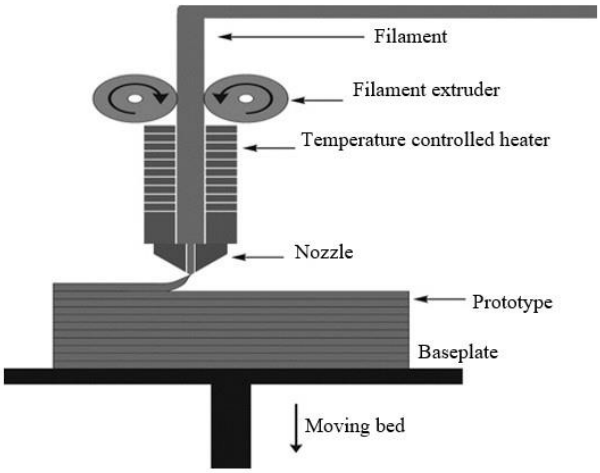

Fig. 1 Schematic of a FDM 3D printer [8]

شکل 1 نمای کلی یک چاپگر سه بعدی FDM [8]

- قطر نازل
- زاویه‌ی چاپ
- نرخ خروج فیلامنت[9]
- چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی نمونه[10]
- الگوی پرشدن شبکه‌ی داخلی[11]

۲) جهت‌گیری ساخت[12]: نمونه‌ها می‌توانند به صورت افقی، عمودی یا عرضی چاپ و ساخته شوند.

۳) شرایط دمایی: شامل دمای محیط، دمای نازل و دمای میزکار می‌باشد.

شکل 2 شمای کلی پارامترهای تاثیرگذار بر فرایند چاپ را نشان می‌دهد. در این تحقیق بر کمیت‌های دسته اول تمرکز شده است.

اخیرا مطالعات بسیاری بر خواص مکانیکی نمونه‌های پلیمری سه‌بعدی چاپ شده به روش FDM انجام شده است که این پژوهش‌ها اهمیت توجه به پارامترهای چاپ سه‌بعدی را نشان می‌دهند. اغلب تحقیق‌های اخیر، به مطالعه تاثیر پارامترهای ساخت دسته دوم و سوم بر رفتار نمونه‌های پرینت شده با فیلامنت ABS متمرکز شده‌اند در حالیکه PLA علی‌رغم ویژگی‌های منحصربفردی که دارد (در بخش 2-1 شرح داده خواهد شد) کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. به عنوان مثال، گروهی از محققین تاثیر پارامترهای پرینت از جمله ضخامت لایه، جهت و زاویه چاپ بر روی خواص مکانیکی با استفاده از فیلامنت ABS [9-11] و PLA [12]، را مورد مطالعه قرار دادند. گروهی دیگر نیز تاثیر سرعت چاپ با فیلامنت PLA [13]، چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی نمونه با فیلامنت ABS [14-15] و PLA [18,13]، الگوی چگالی پرشدن با فیلامنت ABS [19,14] و PLA [20] و دما با فیلامنت PLA [21,18,1] را بر روی خواص مکانیکی قطعات بررسی کردند. همچنین کروکولو و همکارانش در سال 2013 [22] بر روی جهت و زاویه چاپ نمونه‌های ABS مطالعاتی انجام دادند. تی‌مارک و همکارانش در سال 2014 [23] تاثیر پارامترهای زاویه‌ی چاپ و ضخامت لایه‌های نمونه‌های PLA، گرسکی و

1 Rapid prototyping
2 Additive manufacturing
3 Fused deposition modeling
4 Stereo lithography
5 Digital light processing
6 Selective laser sintering
7 Laminated objective manufacturing
8 Slicing parameters
9 Feed rate
10 Infill density
11 Infill (raster) pattern
12 Building orientation

همکاران در سال 2014 [24] پنج جهت چاپ نمونه‌های ABS در راستای x، y و z، لنزوتی و همکارانش در سال 2015 [25] با بررسی نمونه‌های پلیمری PLA تاثیر پارامترهای چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی

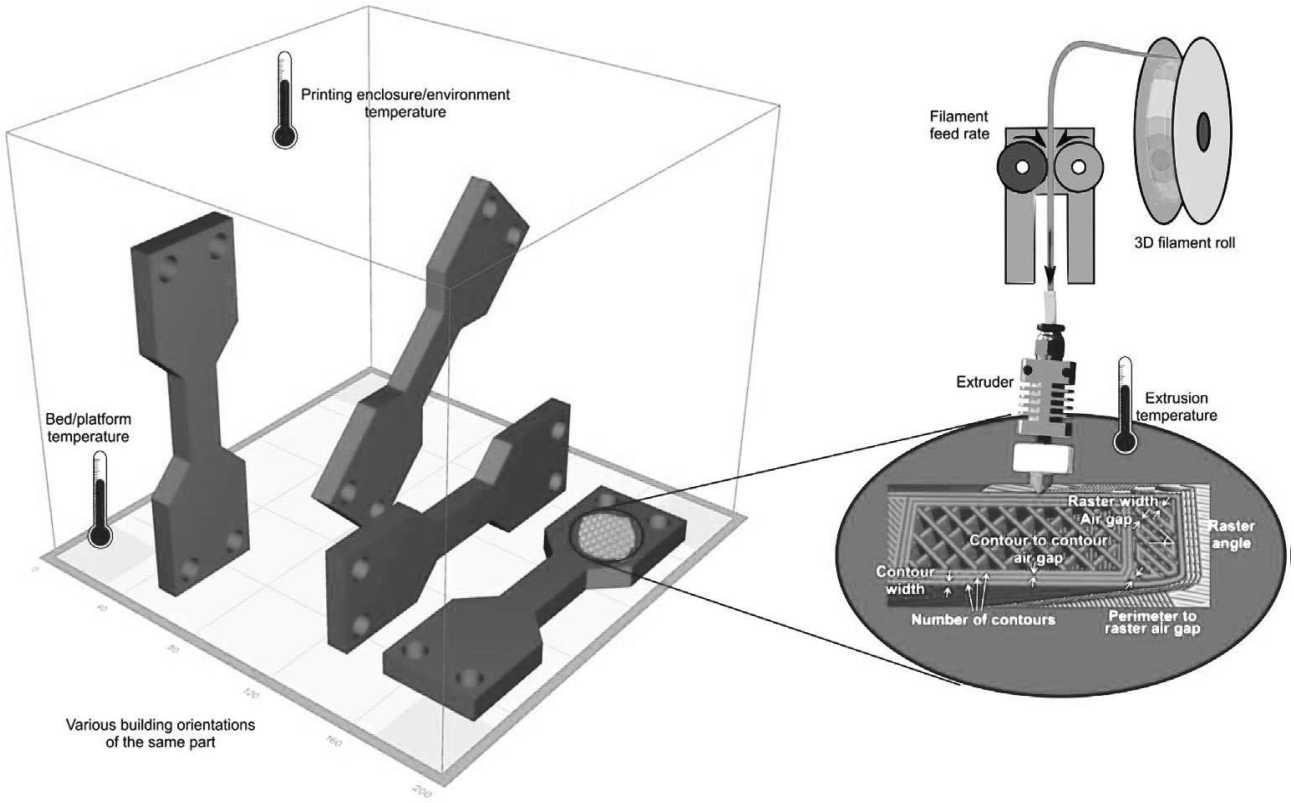

Fig. 2 Process parameters of a FDM 3D printer [2]

شکل 2 پارامترهای مختلف ساخت در FDM [2]

چکون و همکارانش در سال 2017 [27] با مطالعه بر روی جهت چاپ، ضخامت لایه و نرخ خروج فیلامنت و انجام آزمایش کشش و خمش سه نقطه، دریافتند که قطعه‌ی PLA چاپ شده توسط چاپگر FDM در راستای افقی، با کاهش ضخامت لایه و افزایش نرخ خروج فیلامنت، بهترین خواص مکانیکی را دارا می‌باشد. توماس و همکارش در سال 2017 [28] خواص مکانیکی نمونه‌های PLA تولید شده توسط پرینتر FDM را در جهات چاپ گوناگون توسط آزمایش فشار مورد بررسی قرار دادند. محمود و همکارانش در سال 2017 [29] با بررسی پارامترهای عرض و ضخامت لایه‌ها، چگالی پرشدن نمونه، تعداد دیواره و جهت پرینت، خواص کششی نمونه‌های ABS را مورد مطالعه قرار دادند. علافقانی و همکاران در سال 2017 [30] تاثیر خواص مکانیکی و افزایش دقت در اندازه‌ی نمونه‌های PLA چاپ شده توسط چاپگر FDM را با تحقیق بر روی پارامترهای ضخامت لایه‌ها، سرعت چاپ، دمای نازل، چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی نمونه، الگوی پرشدن شبکه‌ی داخلی و جهت چاپ بررسی کرده‌اند. ترونوول و همکارانش در سال 2018 [31] با تغییر دادن پارامتر ارتفاع لایه‌ها و با استفاده از الگوی خطی تلاش کردند، دقت ابعادی و صافی سطح نمونه‌های چاپ شده با سطح مارپیچ و شیب‌دار (مانند پیچ) را بالا ببرند. پاپسکو و همکارانش در سال 2018 [2] مروری بر مقاله‌های موجود در ارتباط با اثر پارامترهای پرینتر FDM بر خواص مکانیکی نمونه‌های پلیمری داشتند. یانگ و همکارانش در سال 2019 [1] با مطالعه برروی دمای نازل، ضخامت لایه و سرعت چاپ، خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده با چاپگر FDM را استخراج کردند.

مرور بر منابع فوق نشان می‌دهد که اغلب تحقیق‌های اخیر بر تاثیر زاویه و جهت چاپ و چگالی پرشدن بر خواص مکانیکی متمرکز شده‌اند. در حالی‌که سرعت پرینت و ضخامت لایه نیز می‌تواند تاثیر به سزایی داشته باشند. از طرفی در این تحقیق‌ها فقط بر مدول الاستیسیته و استحکام (از بین خواص مکانیکی) توجه شده و تاثیر تغییر پارامترها بر کرنش شکست، وزن قطعه تولید شده، زمان چاپ و به دنبال آن هزینه‌ها بحث نشده است. همچنین در بین تحقیق‌های انجام شده فقط دو محقق به بررسی تاثیر سرعت چاپ بر خواص مکانیکی پرداخته [30, 26] که در هر دو مطالعه سرعت‌های بالا در نظر گرفته شده است. از آنجایی که سه پارامتر چگالی پرشدن شبکه‌ی داخلی نمونه، سرعت چاپ و ضخامت لایه‌ها تاثیر به‌سزایی در زمان ساخت قطعه دارد و تا به حال این سه پارامتر در کنار هم بررسی نشده‌اند، در این پژوهش تاثیر این سه پارامتر ساخت بر روی خواص کششی نمونه‌های پلیمری PLA شامل سفتی، استحکام نهایی و کرنش نهایی شکست مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت مناسب‌ترین شرایط با لحاظ وزن و زمان چاپ معرفی می‌گردد.

2- کار تجربی

2-1- مواد

فیلامنت PLA جزء فیلامنت‌های پرکاربرد در چاپگرهای سه‌بعدی FDM می‌باشد. این فیلامنت نسبت به بقیه فیلامنت‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است. این ویژگی‌ها عبارتند از: 1) PLA نوعی پلیمر ترموپلاستیک است که عموما از اسیدلاکتیک حاصل از ذرت و چغندرقند تولید می‌شود لذا قابل

بازیافت است [32]. 2) علاوه بر قابل بازیافت بودن، عوارض محیطی کم و سازگاری بالایی با بدن انسان دارد. 3) مزیت مهم این فیلامنت عدم انتشار گاز در طول چاپ است.

بنابراین این امکان را می‌دهد که عمل چاپ در خانه، کلاس‌های درس و کارخانجات بدون تهویه خاص انجام شود. 4) این فیلامنت نیازی به بستر گرم ندارند. بنابراین در فرآیند خنک شدن مشکلاتی مثل انقباض جزئی[1] و ترک‌خوردن وجود نخواهد داشت. 5) نقطه ذوب فیلامنت PLA بین 230-180 درجه سانتیگراد است.

با توجه به این مزایا، در این مطالعه بر روی رفتار مکانیکی فیلامنت PLA تمرکز شده است. قطر فیلامنت مورد استفاده 1.75 mm است.

2-2- آماده‌سازی نمونه

ابتدا نمونه استاندارد آزمون کشش (شکل 3) مطابق Type I استاندارد ASTM D638 [33]، در نرم‌افزار Catia مدل شده و سپس با پسوند STL.* ذخیره می‌شود.

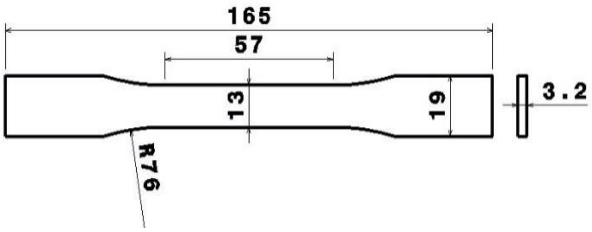

Fig. 3 Dimensions of standard specimen (in millimeters) for plastics

شکل 3 ابعاد نمونه استاندارد (به میلیمتر) برای پلاستیک‌ها

سپس با استفاده از نرم‌افزار Cura فایل STL.* مدل‌سازی شده به G-Code تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است که در بیشتر موارد، در طی پروسه تبدیل مدل به STL و سپس G-code، هندسه اندکی دقت ابعادی خود را از دست می‌دهد [4].

نرم‌افزار Cura یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای چاپ سه‌بعدی است. این نرم‌افزار از محیط گرافیکی بسیار پیشرفته‌ای بهره می‌برد که مجهز به شبیه‌ساز لایه‌گذاری است. با استفاده از این شبیه‌ساز می‌توان تمام پارامترهای مختلف ساخت را بر روی مدل STL.* ایجاد شده اعمال کرد. از این رو در مرحله‌ی بعدی، پارامترهای مختلف ساخت مدل، در این نرم‌افزار انتخاب می‌گردد.

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای چگالی شبکه‌ی داخلی نمونه، سرعت چاپ و ضخامت لایه نمونه‌ها طبق مشخصات آورده شده در جدول 2 و طی زمان ارائه شده در این جدول ساخته شده‌اند.

مطابق استاندارد برای هر حالت باید حداقل پنج نمونه ساخته و آزمایش شود تا از این طریق تکرارپذیری نتایج اثبات گردد.

جدول 2 انتخاب پارامترهای ساخت مختلف و زمان چاپ آنها

Table 2 Different processing parameters with their processing time

پارامترهای مورد بررسی	کد نمونه‌ها	چگالی پرشدن (%)	سرعت چاپ (mm/s)	ضخامت لایه‌ها (mm)	زمان چاپ (min)
چگالی پرشدن	SP1	20	40	0.2	35
	SP2	40	40	0.2	41
	SP3	60	40	0.2	47
	SP4	80	40	0.2	53
سرعت چاپ	SP5	40	20	0.2	81
ضخامت لایه‌ها	SP6	60	40	0.1	92

با توجه به تغییر شرایط ساخت و اتفاقات ناخواسته‌ای که در حین فرآیند ساخت ممکن است اتفاق بیفتد پراکندگی داده‌ها در نمونه‌های چاپ شده در برخی از حالت‌ها ممکن است زیاد باشد. لذا در این تحقیق، نتایج سه نمونه که بیشترین تکرارپذیری را داشتند گزارش شده است.

لازم به ذکر است که بقیه‌ی پارامترهای ساخت مانند ضخامت لایه اولیه، عرض هر لایه، ضخامت دیواره و غیره در تمام نمونه‌ها ثابت بوده و مقادیر آن‌ها در جدول 3 درج شده است. همچنین دمای نازل برای چاپ همه‌ی قطعات،با توجه به نقطه ذوب فیلامنت PLA مورد استفاده، بر روی 210 درجه سانتیگراد تنظیم شده است. همچنین زاویه چاپ 45 ± در میان دیگر زوایای چاپ خواص مکانیکی بهتری به قطعه‌ی چاپ شده می‌دهد [6] زیرا زمان چاپ یک لایه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به دیگر زوایا به خصوص صفر درجه کم‌تر بوده و این امر سبب می‌شود لایه‌ی زیرین به طور کامل سرد نشده و در نتیجه چسبندگی بیشتری بین لایه‌ها ایجاد شود.

جدول 3 پارامترهای اولیه ثابت در نرم افزار Cura

Table 3 Constant parameter in Cura software

ضخامت لایه اولیه، mm	عرض هر لایه، mm	تعداد دیواره	ضخامت دیواره، mm	الگوی پرشدن شبکه‌ی داخلی	زاویه چاپ، درجه
0.2	0.4	2	0.4	خطی	± 45

در مرحله‌ی آخر G-code آماده شده را به چاپگر FDM داده تا نمونه را با استفاده از فیلامنت PLA چاپ کند. نمونه‌ای از قطعه PLA چاپ‌شده در شکل 4 نشان داده شده‌است.

Fig. 4 Overview of 3D printed specimen

شکل 4 نمای کلی نمونه چاپ شده

در شکل 5 تصویر قطعه‌های چاپ‌شده با چگالی پرکننده شبکه داخلی مختلف مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، در چگالی

[1] Shrinkage

پرکننده شبکه داخلی بیشتر، لایه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر شده و تفاوت در چگالی پرکننده شبکه داخلی به آسانی قابل مشاهده است.

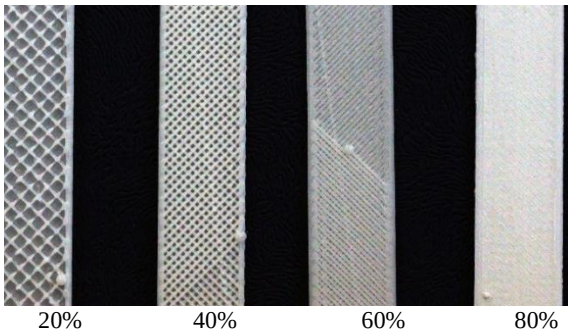

Fig. 5 3D printed specimens with different infill density

شکل 5 نمونه‌های چاپ شده با چگالی شبکه مختلف

3-2- انجام آزمایش

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های PLA چاپ شده با یک چاپگر سه‌بعدی FDM، هر یک از قطعه‌ها در دمای اتاق تحت آزمون کشش شبه‌استاتیکی با نرخ 1 mm/min مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده از شرکت سنتام مدل STM-150 با لودسل 500 کیلوگرم می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری تغییر طول قطعات از یک اکستنسیومتر با دهانه اندازه‌گیری 50 mm استفاده شده است. شکل 6 شمای کلی تجهیزات را نشان می‌دهند.

3- نتایج و بحث

برای بررسی تاثیر درصد چگالی پرشدن نمونه‌ها، تاثیر سرعت چاپ و تاثیر ضخامت لایه‌ها بر خواص مکانیکی نمونه‌های PLA ساخته شده توسط چاپگر FDM، به ترتیب چهار گروه نمونه‌ی SP1، SP2، SP3 و SP4، نمونه‌های SP2 و SP5 و نمونه‌های SP6 و SP2 با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

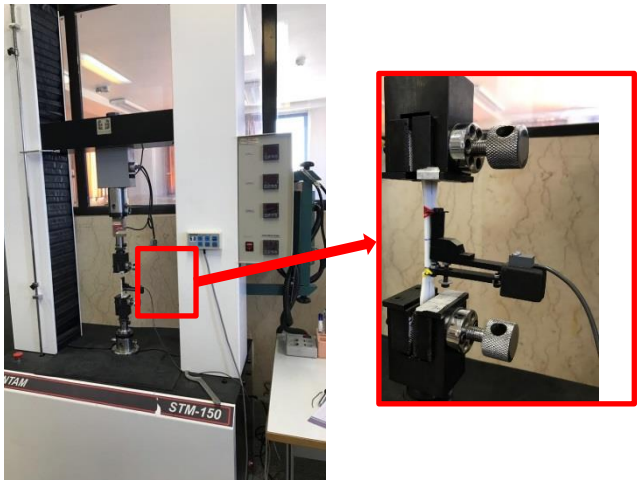

Fig. 6 Schematic of tensile machine and Specimens under quasi-static tensile test

شکل 6 طرحواره‌ای از دستگاه کشش و نمونه‌های تحت آزمون کشش شبه‌استاتیک

3-1- بررسی تاثیر چگالی پرشدن

معمولا به دلیل زمان چاپ طولانی و مصرف زیاد فیلامنت، قطعات به صورت کاملا توپر پرینت نمی‌شوند. چگالی پرشدن پارامتری است که با درصد نمایش داده می‌شود و نشان‌دهنده آن است که چه مقدار از یک مدل جامد باید در هنگام چاپ با مواد پر شود. لذا این کمیت به طور مستقیم بر وزن و زمان ساخت نمونه بستگی دارد. شکل 7 نمودار تنش-کرنش قطعات گروه‌های SP1، SP2، SP3 و SP4 برای مقایسه قطعات با درصد چگالی‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

شکل 8 نشان می‌دهد که خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده مانند سفتی، استحکام نهایی و کرنش شکست به شدت به چگالی پرشدن شبکه داخلی بستگی داشته و برای مدول الاستیسیته و استحکام با آن نسبت مستقیم دارند. همچنین با مقایسه زمان چاپ قطعات SP1 تا SP4 در جدول 2 ثابت می‌شود چگالی پرشدن با زمان چاپ نیز نسبت مستقیم دارد. در جدول 3 مقادیر میانگین خواص مکانیکی هر گروه آورده شده است.

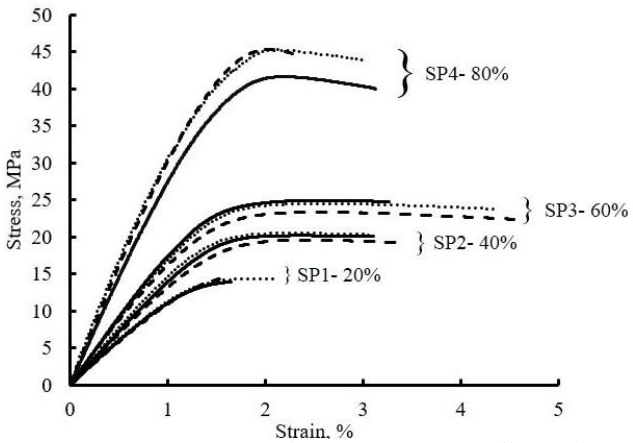

Fig. 7 The stress-strain curves of PLA specimens with different infill density

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های PLA با چگالی‌های پرشدن شبکه داخلی متفاوت

جدول 3 میانگین خواص مکانیکی نمونه‌های SP1 تا SP4

Table 3 Average mechanical propeties of SP1 - SP4 specimens

نام قطعه	درصد چگالی پرشدن (%)	E (GPa)	کرنش شکست (%)	استحکام (MPa)	وزن (g)	استحکام / وزن
SP1	20	1.197± 0.04	1.892± 0.41	13.877±0 .51	5.16 ±0.03	2.68
SP2	40	1.434± 0.08	3.546± 0.41	20.085±0 .48	6.76 ±0.28	2.97
SP3	60	1.741± 0.05	4.184± 0.83	24.277±0 .80	8.39 ±0.06	2.89
SP4	80	3.274± 0.42	2.848± 0.40	44.067±2 .09	10.09± 0.06	4.36

همچنین در شکل 8 تصویر نمونه‌های شکسته شده SP1 تا SP4 پس از آزمایش کشش نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اکثر نمونه‌ها در محدوده‌ی شکست شکسته شده‌اند.

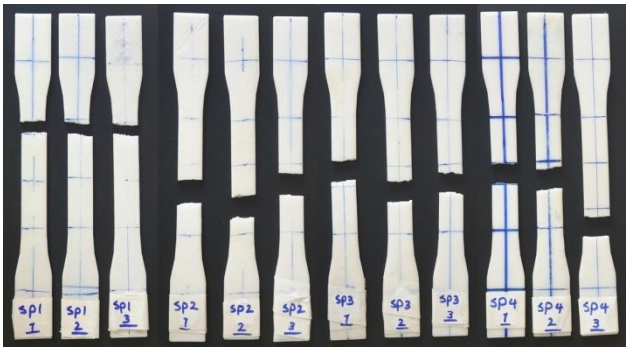

Fig. 8 Samples of SP1 to SP4 after tensile test

شکل 8 نمونه‌های SP1 تا SP4 پس از آزمایش کشش

با مقایسه مقادیر جدول 3 و نمودارهای تنش-کرنش شکل 7 می‌توان فهمید که با افزایش چگالی پرشدن شبکه داخلی سفتی و استحکام آن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

اما از چگالی 60 درصد به بالا کرنش شکست با کاهش روبرو شده است. این بدین مفهوم است که با افزایش بیش از اندازه چگالی پرشدن، قطعه رو به تردی رفته و تحت بار شبه استاتیکی تغییر شکل کمتری می‌دهد. در صورت چشم‌پوشی از کرنش شکست قطعه SP4، می‌توان این قطعه رابا اختلاف چشم‌گیری بهترین قطعه به شمار آورد.

همانطور که قبلا اشاره شده فرآیند **چاپ** در FDMها بر اساس ذوب کردن فیلامنت در اکسترودر و سرد شدن مواد در دمای محیط می‌باشد و این کار به صورت لایه به لایه روی هم انجام می‌شود. این گرم و سرد شدن‌های سریع، علی‌رغم ایجاد تنش پسماند و نقص‌های داخلی در قطعه باعث ترد شدن شدید آن و افزایش مدول الاستسیته و استحکام و شکننده شدن آن می‌شود.

با کنار گذاشتن نمونه‌های SP4 به دلیل کرنش شکست پایین، در بین قطعات با چگالی پر شدن 20، 40 و 60 درصد و فقط با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته، استحکام نهایی و کرنش شکست قطعه SP3 با چگالی 60 درصد خواص مکانیکی بالاتری دارد. همچنین در بین این سه قطعه نمونه SP2 (قطعه 40 درصد) با اختلاف اندک دارای استحکام به وزن بالاتری نسبت به دو قطعه دیگر می‌باشد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مواقعی که مقاومت قطعه در مقایسه با فرم و ظاهر آن اهمیت کمتری دارد، چگالی 40 درصد از نظر صرفه جویی در هزینه، ماده و زمان مناسب‌تر است.

3-2- بررسی تاثیر سرعت چاپ

سرعت چاپ، همان سرعت حرکت نازل در حین چاپ است. سرعت بالای چاپ باعث عدم پیوستگی ساخت یا به عبارت دیگر جاافتادگی در چاپ می‌شود. دلیل این موضوع، عدم زمان کافی برای ذوب و اکسترود کردن فیلامنت می‌باشد که بسیار به نوع چاپگر مورد استفاده و مشخصات مکانیکی دستگاه مربوط است و دقیقا به همین دلیل با هر چاپگری هر سرعت بالایی را نمی‌توان چاپ کرد همانطور که گفته شد در مطالعات قبلی سرعت‌های پایین اصلا بررسی نشده بود [30,26] لذا در این تحقیق، دو سرعت پرینت پایین انتخاب شده و نمونه‌های کشش با پارامترهای ساخت یکسان پرینت شدند. شکل 9 نمودار تنش-کرنش آزمون کشش برای دو نمونه انتخابی از گروه SP2 و SP5 را نشان می‌دهد.

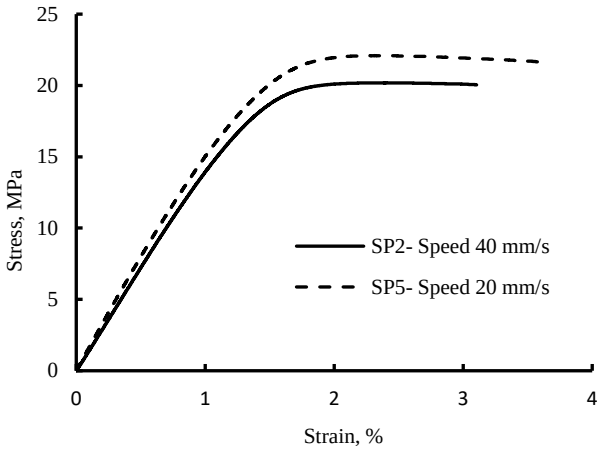

Fig. 9 Stress-strain curves of PLA specimens with different printing speeds

شکل 9 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های PLA با سرعت‌های پرینت متفاوت

در جدول 4 مقادیر عددی خواص مکانیکی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که از نمودار قطعه‌ی گروه SP5 در شکل 9 نیز مشخص است کاهش سرعت چاپ در سرعت‌های پایین نیز منجر به افزایش خواص مکانیکی از جمله سفتی، کرنش شکست و استحکام نهایی شده است. با توجه به زمان چاپ هر گروه از قطعات در جدول 2 مشاهده می‌شود که به ازای دو برابر شدن زمان ساخت افزایش خواص به صورت قابل توجه نبوده است اما در مواقعی که افزایش خواص مکانیکی برای کاربر مهم باشد می‌توان با کمترین سرعت ممکن قطعه را چاپ کرد تا به بهترین خواص رسید. همچنین در شکل 10 تصویر نمونه‌های شکسته شده SP2 و SP5 پس از آزمایش کشش نمایش داده شده است.

جدول 4 میانگین خواص مکانیکی نمونه‌های SP2 و SP5

Table 4 Average mechanical propeties of SP2 and SP5 specimens

نام قطعه	سرعت پرینت (mm/s)	E (GPa)	کرنش شکست (%)	استحکام (MPa)	وزن (g)	استحکام / وزن
SP2	40	1.434 ±0.08	3.546± 0.41	20.085 ±0.48	6.76 ±0.28	2.97
SP5	20	1.547 ±0.02	3.604± 0.14	22.04 ±0.25	6.98 ±0.12	3.15

3-3- بررسی تاثیر ضخامت لایه‌ها

از آنجایی‌که فناوری‌های چاپ سه‌بعدی قطعه را به صورت لایه به لایه می‌سازند، ضخامت هرکدام از این لایه‌ها در پرینت کیفیت قطعه را مشخص می‌کند. در این تحقیق دو گروه قطعه‌های SP3 و SP6 با تفاوت ضخامت لایه‌ی 0.1 mm مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا اثر ضخامت لایه بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده بررسی شود. در شکل 11 نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش یکی از قطعات، به عنوان نماینده بقیه اجزای هر گروه SP3 و SP5 انتخاب و آورده شده است. همچنین مقادیر عددی خواص مکانیکی در جدول 5 خلاصه شده‌اند.

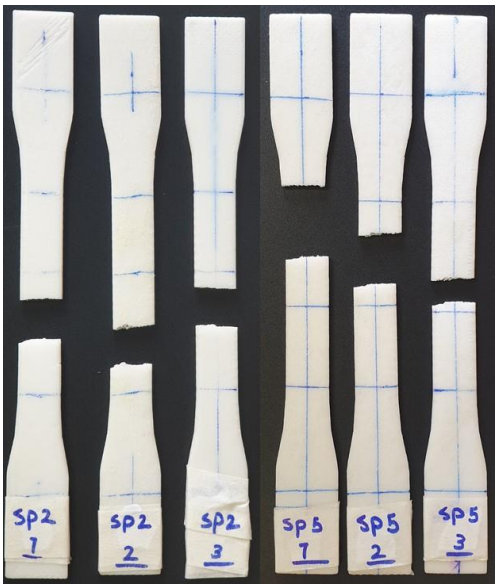

Fig. 10 Samples of SP2 and SP5 after tensile test

شکل 10 نمونه‌های SP2 و SP5 پس از آزمایش کشش

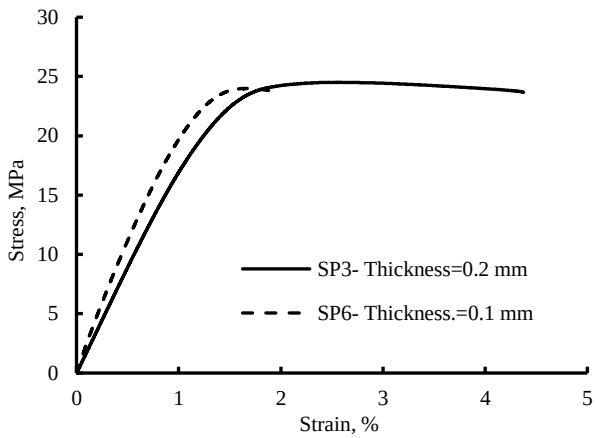

Fig. 11 Stress-strain curves of PLA specimens with different layer thicknesses

شکل 11 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های PLA با ضخامت لایه‌های متفاوت

جدول 5 خواص مکانیکی نمونه‌های SP3 و SP6

Table ۵ Mechanical propeties of SP۳ and SP6 specimens

نام قطعه	ضخامت لایه‌ها (mm)	E (GPa)	کرنش شکست (%)	استحکام (MPa)	وزن (g)	استحکام/ وزن
SP3	0.2	1.741 ±0.05	4.184 ±0.83	24.277 ±0.80	8.39 ±0.06	2.89
SP6	0.1	2.066 ±0.06	1.948 ±0.51	23.995 ±0.33	8.78± 0.18	2.73

نتایج نشان می‌دهند کاهش ضخامت لایه‌ها منجر به افزایش اندک وزن و سفتی قطعه شده در حالی‌که کرنش شکست را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین ضخامت لایه، بیشترین اثر را بر روی کرنش شکست قطعه گذاشته و با آن نسبت عکس دارد. از طرفی بسیاری از محققان نشان داده اند که ضخامت لایه‌ها تاثیر به‌سزایی نیز در دقت ابعادی [30,27,23,1] و کیفیت سطح [31] قطعه‌ی چاپ شده دارد و همانطور که در جدول 6 مشاهده می‌شود دقت ابعادی گروه نمونه‌های SP6 به ابعاد استاندارد ASTM نزدیک‌تر است. همچنین در شکل 12 تصویر نمونه‌های شکسته شده SP3 و SP6 پس از آزمایش کشش نمایش داده شده است.

جدول 6 دقت ابعادی نمونه‌های SP3 و SP6

Table 6 Dimentional accuracy of SP3 and SP6 specimens

نام قطعه	عرض وسط نمونه (mm)	ضخامت نمونه(mm)
استاندارد ASTM	13	3.2
SP3	13.68±0.35	3.39±0.46
SP6	13.47±0.23	3.27±0.03

با مقایسه زمان ساخت قطعات SP3 و SP6 طبق جدول 2 مشاهده می‌شود با وجود اینکه با کاهش ضخامت لایه، دقت ابعادی و کیفیت سطح افزایش می‌یابد، زمان چاپ طولانی‌تر می‌گردد زیرا ضخامت هر لایه نازک‌تر شده و چاپگر برای ساخت کل قطعه، باید تعداد لایه‌های بیشتری را چاپ کند که در این صورت زمان بیشتری طی می‌شود تا فرایند ساخت کامل شود.

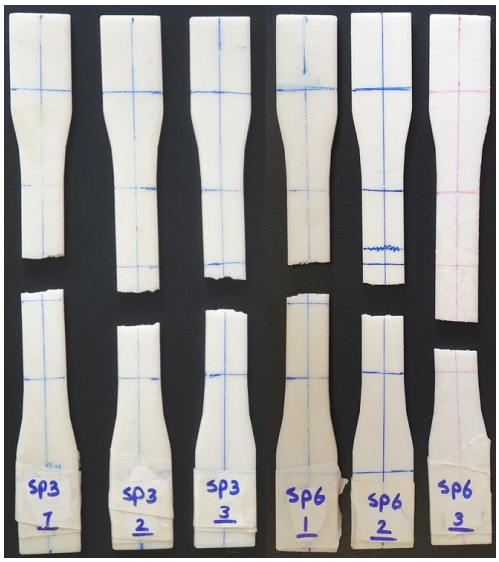

Fig. 12 Samples of SP3 and SP6 after tensile test

شکل 12 نمونه‌های SP3 و SP6 پس از آزمایش کشش

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علاوه بر اینکه اثر سه پارامتر ضخامت لایه‌ها، سرعت چاپ و چگالی پرشدن شبکه داخلی بر روی خواص کششی قطعات پلیمری از جنس PLA ساخته شده توسط چاپگر FDM مورد بررسی قرار گرفته است، مقرون به صرفه‌ترین پارامترها (از لحاظ هزینه و زمان) نیز استخراج شده است. نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش‌های کشش نشان می‌دهند که با افزایش چگالی پرشدن شبکه داخلی خواص مکانیکی قطعات به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما در چگالی‌های خیلی بالا قطعات رفتار تردتری از خود نشان داده و کرنش شکست پایین‌تری دارند لذا در مواقعی که مقاومت قطعه در مقایسه با فرم و ظاهر آن اهمیت کمتری دارد، چگالی 40 درصد از نظر صرفه جویی در هزینه، ماده و زمان مناسب‌تر است.. همچنین مشاهده شد که سرعت چاپ به نسبت پارامترهای دیگر تاثیر کمتری بر روی خواص مکانیکی قطعات

PLA داشته و باعث افزایش خواص مکانیکی شده است. همچنین مشاهده شد که کاهش ضخامت لایه در عین حال که باعث افزایش اندک سفتی قطعات می‌شود قطعه را به شدت ترد می‌کند و از طرفی باعث افزایش دقت ابعادی و کیفیت سطح قطعات می‌شود. بنابراین اگر زیبایی و دقت ظاهری قطعه در اولویت باشد، ضخامت لایه‌های پایین‌تر برای این امر مناسب‌تر است در غیر این صورت ضخامت لایه‌ی بالاتر موجب ساخت سریع‌تر و ارزان‌تر شده و همچنین خواص مکانیکی مناسب‌تری به قطعه می‌دهد.

5-مراجع

[1] Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., Li SH., ''A Method to Predict the Ultimate Tensile Strength of 3D Printing Polylactic acid (PLA) Materials with Different Printing Orientations'' Composites Part B: Engineering, Vol 163, pp. 393-402, 2018.

[2] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., Marinescu, R., "FDM Process Parameters Influence Over the Mechanical Properties of Polymer Specimens: A Review" Polymer Testing, Vol 69, pp. 157-166, 2018.

[3] Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afrani, M., Zahedi, AM., "Mechanical Characterization of FDM 3D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites", Composites Part B: Engineering, Vol 175, pp. 107-147, 2019.

[4] Girot, F., Salguero, J., Batista, M., Valerga, A., "Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts" Materials, Vol 11, 2018.

[5] Chua, C.K., Leong, K.F, Lim, C.S., Rapid Prototyping: Principles and Applications, World Scientific, River Edge, 2010.

[6] Es-Said, OS., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., Pregger, BA., ''Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples'' Advance Manufacturing Process, Vol. 15, No 1, pp. 22-107, 2000.

[7] Dizon, J., Advincula, R., Chen, Q., Espera A., ''Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers'' Additive Manufacturing, Vol. 20, pp. 44-67, 2018.

[8] Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., Spence, D. M., "Evaluation of 3D Printing and its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences" Analytical Chemistry, Vol. 86, No. 7, pp. 3240-3253, 2014.

[9] Sood, A.K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., ''Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts'' Material Design, Vol. 31, pp. 287–295, 2010

[10] Sood, K., Ohdar, R.K., Mahapatra, S.S., ''Experimental Investigation and Empirical Modelling of FDM Process for Compressive Strength Improvement'' Journal of Advanced Research, Vol 3, pp. 81–90, 2012.

[11] Onwubolu G.C. and Rayegani F., ''Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process'' International Journal of Manufacturing Engineering., pp. 11–13, 2014

[12] Liu X., Zhang M., S. Li, Peng J., Hu Y., ''Mechanical Property Parametric Appraisal of Fused Deposition Modeling Parts Based on the Gray Taguchi Method'' The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 89, No 5–8, pp. 2387–2397,2017.

[13] Li, H., Wang, T., Sun, J., Yu, Z., ''The Effect of Process Parameters in Fused Deposition Modelling on Bonding Degree and Mechanical Properties'' Rapid Prototype Journal, Vol. 24, No. 1, pp. 80–92, 2018.

[14] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., Conejero, A., ''Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing'' 3D Printing Additive Manufacturing, Vol. 3, No 3, pp. 183–192, 2016.

[15] Álvarez, K.L., Lagos, R.F., Aizpun, M., ''Investigating the Influence of Infill Percentage on the Mechanical Properties of Fused Deposition Modelled ABS Parts'' Ingeniería e Investigación, Vol. 36, No. 3, pp 110–116, 2016.

[16] Baich, L., Manogharan, G., ''Study of Infill Print Parameters on Mechanical Strength and Production Cost-Time of 3D Printed ABS Parts'' International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, pp. 209–218, 2015.

[17] Raney, K., Lani, E., Kalla, D.K., ''Experimental Characterization of the Tensile Strength of ABS Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling Process'' Materials Today Proceedings, Vol. 4, pp. 7956–7961, 2017.

[18] Fernandes, J, Leite, M., M Deus, A., Reis, L., ''Study of the Influence of 3D Printing Parameters on the Mechanical Properties of PLA'' 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018), Singapore, 14-17 May 2018,

[19] Torrado, A.R., Roberson, D.A., ''Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns'' Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 16, No 1, pp. 154–164, 2016.

[20] Ebel, E., Sinnemann, T., ''Fabrication of FDM 3D Objects with ABS and PLA and Determination of their Mechanical Properties'' RTejournal, 2014

[21] Torres, J., Cotelo, J., Karl, J., Gordon, A.P., ''Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives'' Journal of the Materials, Vol 67, No 5, pp. 1183–1193, 2015.

[22] Croccolo, D., Agostinis, M. De, Olmi, G., ''Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30'' Computer Material Science, Vol 79, pp. 506–518, 2013.

[23] Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, L.M., ''Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers under Realistic Environmental Conditions'' Material Design, Vol 58, pp. 242–246, 2014.

[24] Gorski, F., Kuczko, W., Wichniarek, R., ''Impact Strength of ABS Parts Manufactured using Fused Deposition Modeling Technology'' Archives of Mechanics Technology, Vol. 31, No. 1, pp. 1–12, 2014.

[25] Lanzotti, A., Grasso, M., . Staiano, G, Martorelli, M., ''The Impact of Process Parameters on Mechanical Properties of Parts Fabricated in PLA with an Open-source 3D Printer'' Rapid Prototype, Vol 21, pp. 604–617, 2015.

[26] Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., Gordon, A.P., ''An Approach for Mechanical Property Optimization of Fused Deposition Modeling with Polylactic acid via Design of Experiments'' Rapid Prototype Journal, Vol 22, No 2, pp. 387–404, 2016.

[27] Chacon, J.M., Caminero, M.A., Garcia-Plaza, E., Nunez, P.J., ''Additive Manufacturing of PLA Structures using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and their Optimal Selection'' Materials and Design, Vol 124, pp. 143–157, 2017.

[28] Kozior, T. and Kundera, C., ''Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models'' Procedia Engineering, Vol 192, pp. 463–468, 2017.

[29] Mahmood, S., Qureshi, A.J., Goh, K.L., Talamona, D., ''Tensile Strength of Partially Filled FFF Printed Parts: Experimental Results'' Rapid Prototype Journal, Vol 23, No 1, pp. 122–128, 2017.

[30] Alafaghani, A., Buraaq Alrawi, A., Guzman, A., ''Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a Design-for-Manufacturing Approach'' Procedia Manufacturing, Vol 10, pp. 791 – 803, 2017.

[31] Tronvoll S.A., Elverum C.W., Welo T., ''Dimensional Accuracy of Threads Manufactured by Fused Deposition Modeling'' Procedia Manufacturing, Vol 26, pp. 763-773, 2018.

[32] Gaihong, WU., Shuqiang, LIU., Husheng, JIA., Jinming, DAI., ''Preparation and Properties of Heat Resistant Polylactic Acid (PLA)/Nano-SiO2 Composite Filament'' Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci., Vol 31, pp. 164–171, 2016.

[33] ASTM D638–14, ''Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", 2014.