ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(04):251-258.

Experimental Investigation of the Effect of Annealing and Printing Parameters on the Compressive Strength and Modulus of 3D Printed Porous Structures with Interconnected Pores Made of Polylactic Acid by Fused Deposition Modeling Process.

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Zanganeh R.[1],
Safi Jahanshahi A.[1],
Akhoundi B.[1],

How to cite this article
Zanganeh R, Safi Jahanshahi A, Akhoundi B, Experimental Investigation of The Effect of Annealing and Printing Parameters on The Compressive Strength and Modulus of 3D Printed Porous Structures With Interconnected Pores Made of Polylactic Acid by Fused Deposition Modeling Process. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(04):251-258.*

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran

Correspondence
ADDRESS: Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran.
B.Akhoundi@sirjantech.ac.ir

Article History
Received: June 25, 2024
Accepted: July 31, 2024
ePublished: August 12, 2024

ABSTRACT

With the emergence and expansion of additive manufacturing processes, especially the fused deposition modeling process, extensive research has been conducted on these processes. One important research area is strengthening the printed parts by the fused deposition modeling method. One of the main areas of research is related to the strengthening of printed parts by the fused deposition modeling method. This process enables the production of complex structures and the customization of parts. On the other hand, polylactic acid material is one of the main materials used in this process, which has been noticed over other materials due to its biocompatibility and biodegradability properties. In this research, the effect of annealing heat treatment on the compressive strength and modulus of porous samples has been investigated with the approach of using them in tissue engineering as a scaffold for bone tissue. The samples are 3D printed with wiggle, grid, and honeycomb patterns and with filling percentages of 40, 70, and maximum. In addition, the effect of two parameters, the extrusion width, and the layer height, has also been investigated. To create porous structures with interconnected porosities, the pattern of filling in each layer is rotated to a certain extent, and this causes the introduction of new porous structures that can have wide applications such as being used as scaffolds in tissue engineering. After evaluating the compressive mechanical properties of the samples, the same samples were heat treated, and then their compressive mechanical properties were also evaluated. The obtained results show that the maximum compressive strength and modulus occur in the sample with an extrusion width of 0.6 mm, layer height of 0.25 mm, wiggle filling pattern, and maximum filling percentage. The values of compressive strength and modulus for the non-heat-treated sample are equal to 84.51 MPa and 2.28 GPa respectively and for the heat-treated sample, it is equal to 105.44 MPa and 2.29 GPa respectively.

Keywords Additive Manufacturing, 3D Printer, Heat Treatment, Compressive Strength and Modulus, Printing Parameters

CITATION LINKS

1- Tensile and Flexural Behavior of Hemp Fiber Reinforced .... 2- An Experimental Study of Nozzle Temperature and .... 3- Estradiol increases cortical and trabecular bone accrual and .... 4- An evaluation of the shape-memory behavior and mechanical properties of polylactic acid/Ni80Cr20 .... 5- Mechanical Properties of Raw Filaments and Printed Specimens: Effects of .... 6- Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on .... 7- Effect of printing parameters on Mechanical Strength of .... 8- 3D composite printing: study of carbon fiber incorporation to .... 9- Comparing Degradation Mechanisms, Quality, and Energy Usage for Pellet- and .... 10- Experimental and theoretical investigation of the influence of post-curing on .... 11- Investigating the influencing parameters on the surface roughness of .... 12- Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous .... 13- 4D-printed PLA-PETG polymer blends: comprehensive analysis of .... 14- Effects of heat treatment on the mechanical properties of 3D-printed polylactic acid: Study of .... 15- Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns. 16- Influence of infill pattern, infill ratio on compressive strength and .... 17- Investigation and prediction of the impact of FDM process parameters on .... 18- Influence of three-dimensional printing parameters on .... 19- The effects of thermal annealing on the performance of .... 20- The Effect of Heat Treatment on a 3D-Printed PLA Polymer's Mechanical Properties. 21- Impact of aging effect and heat treatment on the tensile properties of .... 22- An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous .... 23- Influence of the printing nozzle diameter on tensile strength of .... 24- The Influence of Nozzle Size on the Printing Process and .... 25- Effect of Filling Pattern on .... 26- Calculating Filament Feed in the Fused Deposition Modeling Process to .... 27- Calculating printing speed in order to ....

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی اثر آنیل کردن و پارامترهای چاپ بر استحکام و مدول فشاری ساختارهای متخلخل چاپ سه‌بعدی شده با تخلخل‌های به‌هم‌پیوسته از جنس پلی لاکتیک اسید به روش لایه نشانی ذوبی

رضا زنگنه[۱]، امین صفی جهان‌شاهی[۱]، بهنام آخوندی[۱]*
[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

چکیده
با ظهور و گسترش فرآیندهای ساخت افزایشی، به ویژه فرآیند لایه نشانی ذوبی، تحقیقات وسیعی در مورد این فرآیندها صورت پذیرفته است. یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مهم مربوط به استحکام‌بخشی به قطعات چاپ‌شده به روش لایه نشانی ذوبی است. این فرآیند امکان تولید ساختارهای پیچیده و شخصی‌سازی قطعات را امکان‌پذیر می‌سازد. از طرفی ماده پلی لاکتیک اسید یکی از اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در این فرایند است که به دلیل خواص زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری، بیشتر از سایر مواد مورد توجه قرارگرفته است. در این پژوهش، اثر عملیات حرارتی آنیل کردن بر استحکام و مدول فشاری نمونه‌های متخلخل با رویکرد استفاده در مهندسی بافت به‌عنوان جایگزین بافت استخوانی، مورد بررسی قرارگرفته است. نمونه‌ها با الگوی لرزشی، شبکه‌ای و لانه‌زنبوری و با درصدهای پر شدن ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ چاپ سه‌بعدی می‌شوند. علاوه بر این اثر دو پارامتر عرض روزن‌رانی و ارتفاع لایه‌ها نیز مورد بررسی قرارگرفته است. به منظور ایجاد ساختارهای متخلخل با تخلخل‌های به‌هم‌پیوسته، الگوی پر شدن در هر لایه به میزان مشخص دوران کرده و این امر سبب معرفی ساختارهای متخلخل جدیدی می‌شود که این ساختارها می‌توانند کاربردهای وسیعی مانند به‌کارگیری به عنوان داربست در مهندسی بافت، داشته باشند. بعد از ارزیابی خواص مکانیکی فشاری نمونه‌ها، نمونه‌های مشابه عملیات حرارتی شده و سپس خواص مکانیکی فشاری آن‌ها نیز ارزیابی گردید. نتایج حاصل‌شده نشان می‌دهد که حداکثر استحکام و مدول فشاری در نمونه با عرض روزن‌رانی ۰/۶ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰/۲۵ میلی‌متر، الگوی پر شدن لرزشی و درصد پر شدن ۱۰۰ اتفاق می‌افتد. مقادیر استحکام و مدول فشاری برای نمونه عملیات حرارتی نشده به ترتیب برابر با ۸۴/۵۱ مگاپاسکال و ۲/۲۸ گیگاپاسکال و برای نمونه عملیات حرارتی شده به ترتیب برابر با ۱۰۵/۴۴ مگاپاسکال و ۲/۲۹ گیگاپاسکال است.

کلیدواژه‌ها: ساخت افزایشی، چاپگر سه‌بعدی، عملیات حرارتی، استحکام و مدول فشاری، پارامترهای چاپ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰
*نویسنده مسئول: B.Akhoundi@sirjantech.ac.ir

۱- مقدمه
ساخت افزایشی که معمولاً به عنوان چاپ سه‌بعدی شناخته می‌شود، یک رویکرد دگرگون‌کننده برای تولید صنعتی است که ساخت اشیاء فیزیکی را از مدل‌های دیجیتالی امکان‌پذیر می‌کند[4,5]. در این فرآیندها از طریق یک فرآیند هدایت‌شده توسط کامپیوتر، مواد در لایه‌های متوالی لایه نشانی شده و ساختارهای پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند که این امر برخی از توانایی‌های تولید سنتی را به چالش کشیده است[6,7]. ساخت افزایشی، سفارشی‌سازی محصولات مختلف را امکان‌پذیر می‌کند[8] و همچنین می‌تواند هندسه‌های پیچیده‌ای ایجاد کند، اتوماسیون را بالا ببرد و با کاهش تقاضای انرژی و کاهش مازاد مواد، کارایی منابع را بهینه کند[9]. با توجه به پیشرفت‌های توسعه و طراحی، ساخت افزایشی به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی مختلف مانند صنعت خودرو، هوافضا، زیست پزشکی، مواد غذایی، ساخت‌وساز و زمینه‌های معماری، الکترونیک، اتصال‌های چسبی، نظامی، روبات‌ها و مد، به ویژه با هندسه‌های پیچیده استفاده شده است[10]. یکی از پرکاربردترین و ارزان‌ترین روش‌های ساخت افزایشی روش لایه نشانی ذوبی است[11,12]. از طرفی استحکام‌بخشی به قطعات چاپ‌شده به این روش همواره مورد توجه محققین بوده است[13]. یکی از روش‌های استحکام‌بخشی روش‌های پس پردازشگر مانند عملیات حرارتی بر روی نمونه‌های چاپ‌شده است. این امر با افزایش استحکام بین‌رشته‌ای و لایه‌ای و نیز تغییر ساختار پلیمر از آمورف به نیمه کریستالی سبب افزایش خواص مکانیکی می‌شود[2].

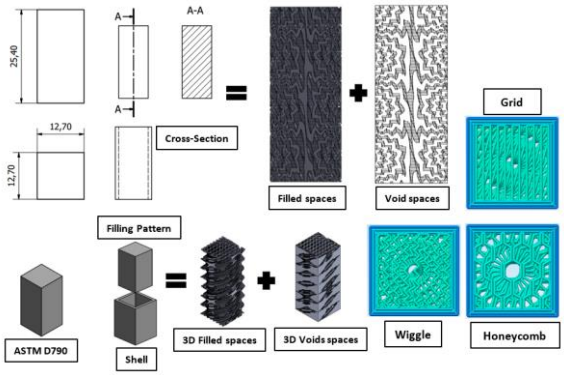
قاسم‌خانی و همکاران[14] اثر عملیات حرارتی و آنیل کردن بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از جنس پلی لاکتیک اسید را بررسی و توانستند استحکام به ضربه و مقاومت در برابر حرارت را به ترتیب تا ۲۷۵ و ۱۲۱ درصد افزایش دهند. پرنت و همکاران[15] با مطالعه تأثیر الگوی پر شدن (مثلثی، متقاطع و شبکه‌ای) بر روی استحکام فشاری، نشان دادند که الگوهای پر شدن دوبعدی عملکرد بهتری نسبت به الگوهای پر شدن سه‌بعدی در آزمون فشار داشتند. دخیل و همکاران[16] با مطالعه تأثیر الگوی پر شدن (خطی، ژیروئید و سه‌ضلعی) و درصد پر شدن (۲۰، ۵۰، ۷۰) بر روی استحکام فشاری قطعات ساخته‌شده با استفاده از پرینتر سه‌بعدی و از جنس پلی لاکتیک اسید نشان دادند که استحکام فشاری با درصد پر شدن رابطه مستقیم دارد و بهترین عملکرد را الگوی خطی با درصد پر شدن ۷۰ دارد. عبدالله و همکاران[17] اثر پارامترهای ضخامت لایه (۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ میلی‌متر)، درصد پر شدن (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) و الگوی پر شدن (سه‌ضلعی، زیگزاگ و ژیروئید) را بر روی استحکام فشاری و کششی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که درصد پر شدن به‌طور قابل‌توجهی بر استحکام فشاری و کششی تأثیر می‌گذارد. بر اساس تحلیل نسبت سیگنال به نویز، پارامترهای بهینه برای دستیابی به حداکثر استحکام فشاری و کششی، درصد پر شدن ۸۰ درصد، الگوی پر شدن ژیروئید و ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر است. با این پارامترها استحکام فشاری به میزان ۴۵/۲۵ مگاپاسکال و استحکام کششی به میزان ۴۴/۰۳ مگاپاسکال حاصل شد. بختیاری و همکاران[18] با بررسی اثر چهار پارامتر فرآیند (ارتفاع لایه، عرض روزن‌رانی، دمای نازل و سرعت چاپ) بر خواص فشاری و صافی سطح قطعات لایه نشانی ذوبی ساخته‌شده از پلی لاکتیک

اسید پرداختند و نشان دادند که ارتفاع لایه بیشترین تأثیر را بر روی تمام خواص موردمطالعه دارد و بعد از آن سرعت چاپ بر روی مدول فشاری اثر قابل توجهی دارد. یو و همکاران[19] اثر بازپخت حرارتی در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای را بر عملکرد قطعات پلیمری از طریق چاپ سه‌بعدی بررسی کردند. قطعات چاپ شده در دماهای ۶۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای مدت‌زمان‌های مختلف از ۵۰ تا ۶۴۰۰ ثانیه باز پخت شدند. نتایج حاصل شده نشان داد که استحکام و مدول خمشی حداکثر تا ۱۰ درصد افزایش‌یافته است و این افزایش به دلیل افزایش ساختار نیمه کریستالی در طول بازپخت است. شباناه و همکاران[20] اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی قطعات چاپ سه‌بعدی شده از جنس پلی لاکتیک اسید را بررسی کردند. پس از چاپ، نمونه‌ها در دمای ۵۵، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت عملیات حرارتی شده و پس از آن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۰ درجه نگهداری شدند. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که دمای بهینه برای عملیات حرارتی ۶۵ درجه سانتی‌گراد است. تحت عملیات حرارتی، نمونه‌های آزمایش تغییر شکلی نداشتند، استحکام کششی ۳۵ درصد افزایش‌یافته و میزان تخلخل در ساختار کاهش‌یافته است. حسن و همکاران[21] اثر عملیات حرارتی در دمای ۵۷/۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت بر خواص کششی نمونه‌های چاپ‌شده از جنس پلی لاکتیک اسید را بررسی کردند. نتایج حاصل شده نشان داد که عملیات حرارتی استحکام قطعات چاپ‌شده را بهبود می‌بخشد، با این حال، این اثرات به‌شدت به ضخامت لایه بستگی دارد.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که میزان استحکام و مدول فشاری داربست‌های چاپ سه‌بعدی شده کمتر از استحکام و مدول فشاری استخوان است. استحکام و مدول فشاری استخوان‌های مختلف در بدن انسان به ترتیب در محدوده‌های ۱۰۰ تا ۲۳۰ مگاپاسکال و ۷ تا ۳۰ گیگاپاسکال است[3]. لذا افزایش خواص مکانیکی فشاری داربست‌ها هنوز مورد توجه است. همچنین داربست‌های استخوانی نیازمند یک ساختار متخلخل به‌هم‌پیوسته هستند که اندازه حفره‌های آن بسته به نوع کاربرد بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون است[3]. هدف و نوآوری اصلی این پژوهش ارائه ساختارهای جدید متخلخل چاپ سه‌بعدی شده با تخلخل‌های به‌هم‌پیوسته و استفاده و معرفی این ساختارهای جدید به‌منظور ساختارهای نوین برای استفاده در مهندسی بافت به‌عنوان جایگزین بافت استخوانی است. لذا در این پژوهش خواص مکانیکی فشاری برای نمونه‌های چاپ‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد زیرا بافت‌های استخوانی همواره تحت تنش‌های فشاری هستند. برای حصول حداکثر خواص مکانیکی فشاری، علاوه بر بررسی اثر پارامترهای الگوی پر شدن، درصد پر شدن، عرض روزن‌رانی و ارتفاع لایه‌ها، اثر عملیات حرارتی آنیل کردن بر خواص مکانیکی فشاری نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. عملیات حرارتی از دو جنبه سبب افزایش خواص مکانیکی می‌گردد. این دو جنبه افزایش استحکام بین‌رشته‌ای و لایه‌ای و نیز تشکیل فاز نیمه کریستالی در نمونه‌های پلیمری است.

۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

برای چاپ سه‌بعدی نمونه‌ها از چاپگر سه‌بعدی بر اساس فن‌آوری لایه نشانی ذوبی با توانایی چاپ قطعه با ابعاد ۲۰۵ میلی‌متر در راستای طول، ۲۱۵ میلی‌متر در راستای عرض و ۲۱۰ میلی‌متر در راستای ارتفاع استفاده می‌شود (3D Printer Builder Premium Small (Red) ex demo، هلند). فیلامنت مورداستفاده پلی‌لاکتیک اسید با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر است (بیلدر، هلند، https://builder3dprinters.com/product/filament-pla-4-5kg). نمونه‌های آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM D790 [1] چاپ (یک مکعب مستطیل با سطح مقطع مربع شکل به ضلع ۱۲/۷ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵/۴ میلی‌متر) و خواص مکانیکی آن‌ها با استفاده از دستگاه سنتام ۱۵۰ (STM-150, https://www.santamco.com) ارزیابی می‌گردد. سرعت آزمون فشار ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه است. حداکثر تنش تحمل شده به‌عنوان استحکام فشاری و شیب نمودار تنش کرنش در ناحیه خطی به‌عنوان مدول فشاری در نظر گرفته می‌شود. آزمون گرماسنجی افتراقی (۲۰۰ اف ۳ مایا، آلمان، https://analyzing-testing.netzsch.com) برای محاسبه درصد بلوره‌ای نمونه‌ها در محدوده دمایی ۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد مورداستفاده قرار می‌گیرد (بر اساس استاندارد ASTM 3418[2]). آزمون تفرق اشعه ایکس (آلتیما ۴، ریگاکو، ژاپن، https://rigaku.com) به‌منظور بررسی اثر عملیات حرارتی و ایجاد ساختار نیمه کریستالی بر روی نمونه‌ها، انجام می‌گیرد. برای عملیات حرارتی نمونه‌ها از کوره‌ای با محدوده دمایی ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۲ درجه سانتی‌گراد (شیماز، فور ۵۵ لیتری هوشمند استیل، ایران، https://shimiazma.ir) استفاده شد. عملیات حرارتی آنیل کردن در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود، سپس کوره خاموش شده و نمونه‌ها تا دمای محیط درون کوره به آهستگی سرد می‌شوند[2]. ازآنجایی‌که هر چه دمای نازل و بستر بیشتر باشد استحکام بین‌رشته‌ای و لایه‌ای افزایش می‌یابد[2] دمای نازل برابر با ۲۲۰ و دمای بستر برابر با ۶۰ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌گردد. قطر نازل مورداستفاده ۰/۴ میلی‌متر است. عرض روزن‌رانی یکی از پارامترهای مهم چاپ است که با افزایش آن خواص مکانیکی افزایش می‌یابد زیرا با افزایش عرض روزن‌رانی میزان اتصالات بین رشته‌ها کاهش می‌یابد[22-24]. بنابراین سه عرض روزن‌رانی ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود[22]. علاوه بر این با افزایش عرض روزن‌رانی زمان چاپ کاهش میابد. پارامتر مهم دیگر ارتفاع لایه‌ها است. با افزایش ارتفاع لایه‌ها زمان چاپ کاهش، میزان اتصالات بین لایه‌ای کاهش



شکل ۱) نمونه استاندار آزمون کشش و ابعاد آن، مفهوم پوسته و الگوی پر شدن، فضاهای پر و خالی در ساختار لرزشی با درصد پر شدن ۴۰ درصد به صورت سه بعدی، سطح مقطع فضاهای پر و سطح مقطع ساختار متخلخل به‌هم‌پیوسته سه‌بعدی در ساختار لرزشی با درصد پر شدن ۴۰ درصد. نمای بالای ساختارهای لرزشی، شبکه‌ای و لانه‌زنبوری با درصد پر شدن ۴۰ درصد

ولی از طرفی با افزایش آن اندازه حفره‌های ایجادشده در قطعه افزایش می‌یابد[25]. لذا بررسی این پارامتر نیز ضروری است. سه ارتفاع لایه ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ به‌عنوان ارتفاع لایه در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حاصل از پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که الگوهایی پر شدن نظیر ژیروئید که یک ساختار متخلخل با اندازه حفرات یکسان و به‌هم‌پیوسته ارائه می‌دهند دارای خواص مکانیکی چشمگیری نیستند[17]. لذا در این پژوهش از سه الگوی پر شدن لرزشی، شبکه‌ای و لانه‌زنبوری استفاده شده است. نکته مهم در استفاده از این الگوها این است که در هر لایه، زاویه رشته‌ها تغییر کرده تا بتوان یک ساختار متخلخل با اندازه حفرات متفاوت و به‌هم‌پیوسته ایجاد نمود. برای کنترل اندازه حفرات نیز سه درصد پر شدن ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ برای نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود. ساختار لرزشی با درصد پر شدن ۴۰ به عنوان مثال در **شکل ۱** نشان داده شده است. همان‌گونه که از مقطع این شکل مشخص است با دوران الگوی پر شدن به میزان ۵ درجه در هر لایه یک ساختار متخلخل سه بعدی که در آن تمامی تخلخل‌ها به هم پیوسته هستند ایجاد شده است. همچنین در **شکل ۱**، نمای بالای سه الگوی پر شدن لرزشی، شبکه‌ای و لانه‌زنبوری با درصد پر شدن ۴۰ درصد نشان داده شده است. در نمودارها و نتایج درصد پر شدن ۱۰۰ بیان می‌گردد ولی لازم به ذکر است که برای الگوهای پر شدن مورداستفاده، درصد پر شدن صد امکان‌پذیر نیست. جدول ۱ پارامترهای متغیر و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. از هر نمونه، سه نمونه چاپ و میانگین نتایج گزارش می‌گردد. همچنین پارامترهای ثابت چاپ از قبیل دمای نازل، دمای بستر، قطر نازل، سرعت چاپ، تعداد کانتورهای پیرامون نمونه و هم‌پوشانی پوسته خارجی با الگوی پر شدن داخلی به ترتیب برابر با ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ۰/۴ میلی‌متر، ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، ۳ عدد و ۳۰ درصد تعیین گردید. این مقادیر با توجه به پژوهش‌های پیشین تعیین‌شده است[2] و [25-27].

به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش تاگوچی ال۹ استفاده می‌گردد. جدول ۲ نشان‌دهنده طراحی آزمایش است.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمون فشار و مقادیر استحکام فشاری برای نمونه‌های چاپ‌شده و عملیات حرارتی شده در **شکل ۲**-الف و مقادیر مدول فشاری در **شکل ۲**-ب نشان داده‌شده است.

همان‌گونه که از شکل ۲ مشاهده می‌شود حداکثر استحکام و مدول فشاری برای نمونه‌های معمولی و عملیات حرارتی شده مربوط به نمونه شماره ۵ است. در این نمونه مقادیر عرض روزن‌رانی و ارتفاع لایه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۲۵ میلی‌متر است که این مقادیر، سطوح میانی برای این دو پارامتر است. با افزایش عرض روزن‌رانی تعداد اتصال‌های بین‌رشته‌ای کاهش و با افزایش ارتفاع لایه‌ها نیز میزان تعداد اتصال‌های بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. از طرفی میزان افزایش ارتفاع لایه از یک حد مشخصی سبب ایجاد حفره در نمونه می‌گردد[25]. ازاین‌رو ترکیب دو مقدار عرض روزن‌رانی ۰/۶ میلی‌متر و ارتفاع لایه ۰/۲۵ میلی‌متر توانسته است نتیجه مطلوبی را حاصل سازد. از طرفی درصد پر شدن در این نمونه ۱۰۰ است. لذا مقدار بیشتری از مواد در تحمل بار سهیم هستند و این امر نیز قطعاً موجب افزایش استحکام و مدول فشاری می‌گردد. نمونه بعدی که دارای بیشترین مقدار استحکام و مدول فشاری است نمونه شماره هفت است که در آن عرض روزن‌رانی و ارتفاع لایه به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۲ میلی‌متر است. این نمونه دارای الگوی پر شدن شبکه‌ای با درصد پر شدن ۱۰۰ است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که درصد پر شدن حداکثر در کنار ارتفاع لایه کم موجب افزایش خواص مکانیکی فشاری شده است. نمونه دیگری که دارای درصد پر شدن حداکثر است نمونه شماره ۳ است که اصلی‌ترین عامل زیاد نبودن خواص مکانیکی فشاری آن، بالا بودن ارتفاع لایه آن و نوع الگوی پر شدن آن یعنی الگوی لانه‌زنبوری است.

در **Error! Reference source not found.** نمودار تنش کرنش و همچنین شکل نمونه شماره ۵ در حین تغییر شکل برای حالت عادی و حالت عملیات حرارتی شده آمده است. پله ایجادشده در ابتدای نمودارهای تنش-کرنش در لحظه مماس شدن فک‌های دستگاه به نمونه ایجاد می‌شود.

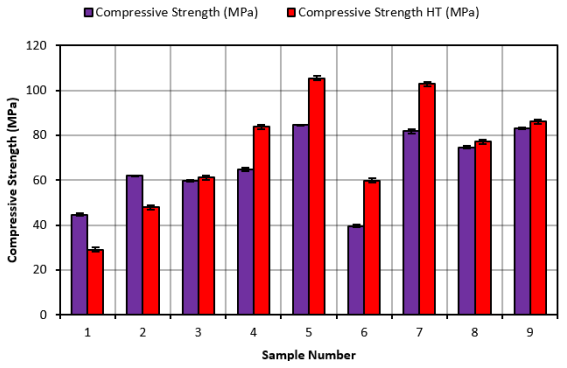
با استفاده از تحلیل طراحی آزمایش به روش تاگوچی میزان اثر هر متغیر بر مقادیر استحکام و مدول فشاری در شکل ۴ آمده است. با تحلیل واریانس بر روی نتایج مشخص گردید که اثر پارامترهای عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه‌ها، درصد پر شدن، الگوی پر شدن و عملیات حرارتی بر استحکام فشاری به ترتیب برابر ۵۱/۳۸، ۵/۰۶، ۳۶/۰۳، ۱/۹۶ و ۵/۵۴ درصد است. همچنین میزان تأثیر این پارامترها بر روی مدول فشاری به ترتیب برابر با ۳۶/۱۳، ۷/۴، ۵۰/۴۳، ۵/۸۶ و ۰/۱۸ درصد است.

جدول ۱) پارامترهای متغیر و سطوح آن‌ها

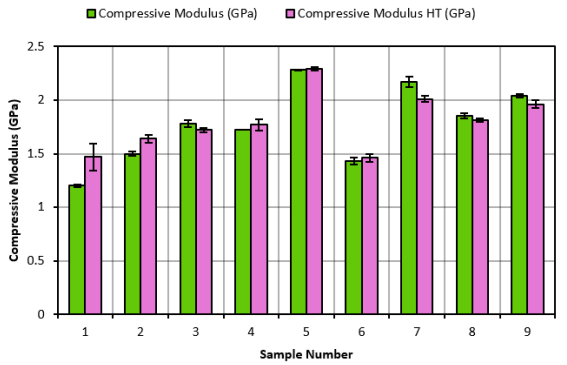
پارامتر	مقدار		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عرض روزن‌رانی	۰/٤ میلی‌متر	۰/٦ میلی‌متر	۰/۸ میلی‌متر
ارتفاع لایه	۰/۲ میلی‌متر	۰/۲۵ میلی‌متر	۰/۳ میلی‌متر
درصد پر شدن	٤۰	۷۰	۱۰۰
الگوی پر شدن	لرزشی	شبکه‌ای	لانه‌زنبوری

جدول ۲) طراحی آزمایش و پارامترهای انتخاب‌شده

شماره نمونه	عرض روزن‌رانی (میلی‌متر)	ارتفاع لایه (میلی‌متر)	درصد پر شدن (درصد)	الگوی پر شدن
۱	۰/۴	۰/۲	۴۰	لرزشی
۲	۰/۴	۰/۲۵	۷۰	شبکه‌ای
۳	۰/۴	۰/۳	۱۰۰	لانه‌زنبوری
۴	۰/۶	۰/۲	۷۰	لانه‌زنبوری
۵	۰/۶	۰/۲۵	۱۰۰	لرزشی
۶	۰/۶	۰/۳	۴۰	شبکه‌ای
۷	۰/۸	۰/۲	۱۰۰	شبکه‌ای
۸	۰/۸	۰/۲۵	۴۰	لانه‌زنبوری
۹	۰/۸	۰/۳	۷۰	لرزشی

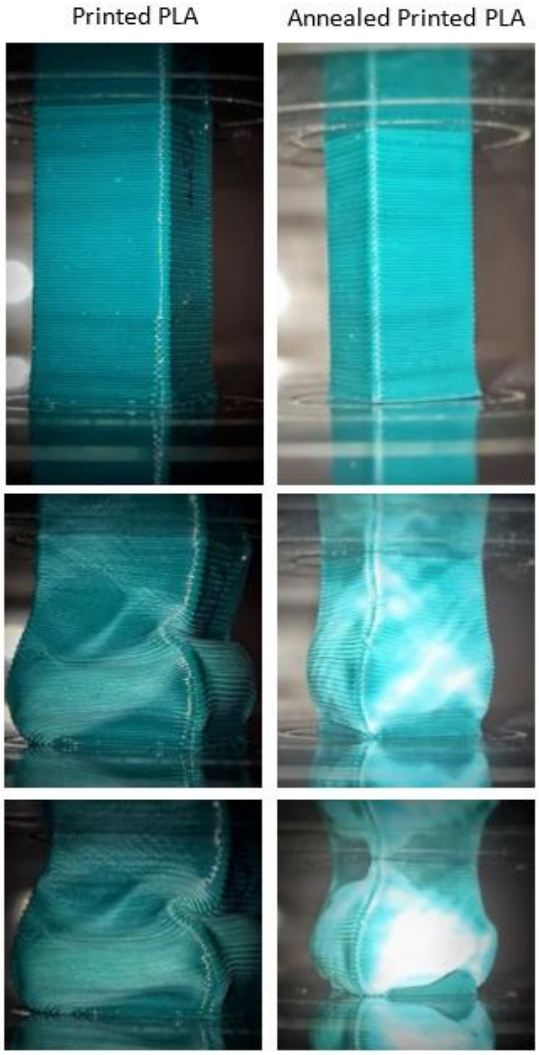


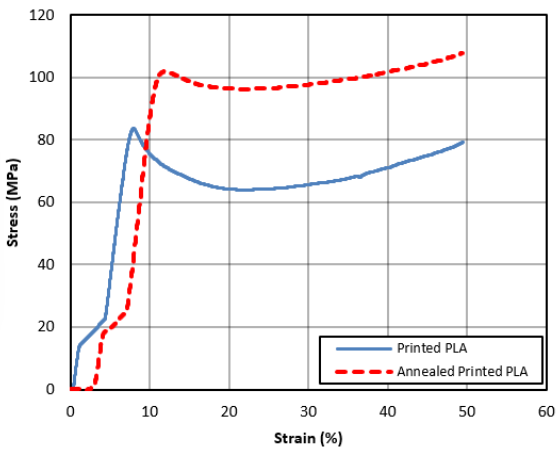
(الف)



(ب)

شکل ۲) نتایج حاصل از آزمون فشار الف) استحکام فشاری: ستون‌های بنفش‌رنگ برای نمونه‌های چاپ‌شده و ستون‌های قرمزرنگ برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده ب) مدول فشاری: ستون‌های سبزرنگ برای نمونه‌های چاپ‌شده و ستون صورتی‌رنگ برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده

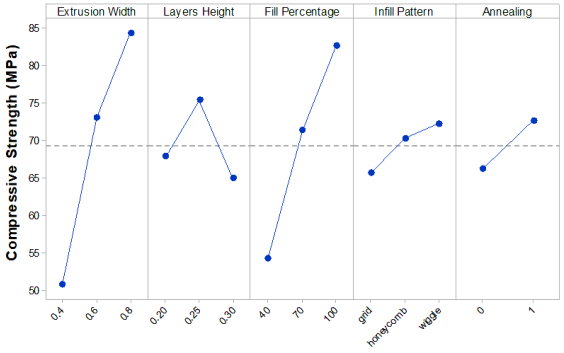




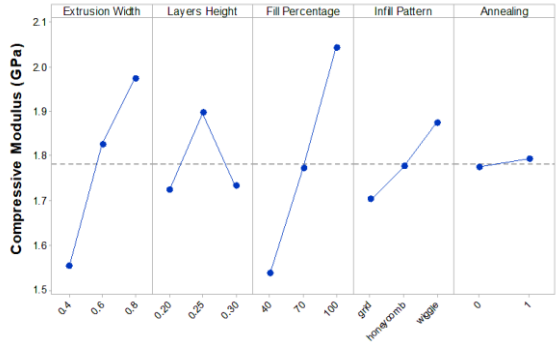
شکل ۳) نمودار تنش کرنش برای نمونه شماره ۵ بعد از چاپ و بعد از عملیات حرارتی و تغییر شکل نمونه‌ها در حین آزمون فشار

همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثرگذارترین پارامتر بر روی استحکام فشاری عرض روزن‌رانی و بعد از آن درصد پر شدن است این در حالی است که اثرگذارترین پارامتر بر روی مدول فشاری

درصد پر شدن و سپس عرض روزن‌رانی است. همچنین ارتفاع لایه‌ها، الگوی پر شدن و آنیل کردن اثر بیشتری بر روی استحکام



(الف)



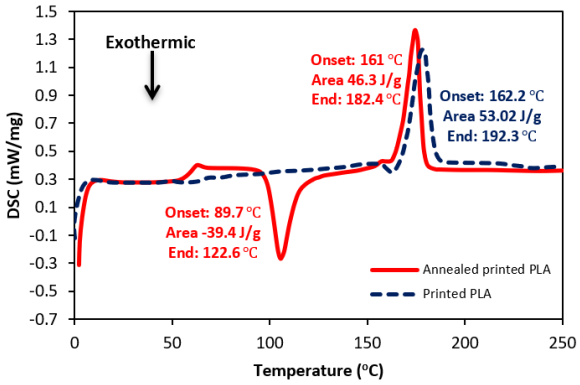
(ب)

شکل ۴) بررسی اثر پارامترهای چاپ و عملیات حرارتی (۰ به معنی عدم انجام عملیات حرارتی و ۱ به معنی انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌هاست) بر روی خواص مکانیکی فشاری **الف)** استحکام فشاری **ب)** مدول فشاری

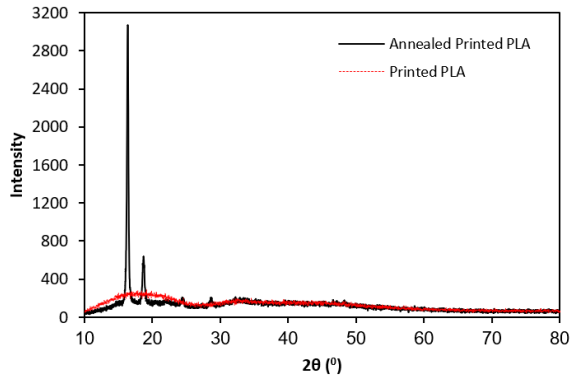
فشاری دارند و اثر آن‌ها بر روی مدول فشاری کم‌تر است. لازم به ذکر است که مقدار حاصل شده برای استحکام فشاری نمونه عملیات حرارتی شده (۱۰۵/۴۴ مگاپاسکال)، حداکثر مقدار استحکام فشاری گزارش شده برای یک نمونه چاپ شده از جنس پلی لاکتیک اسید است و این مقدار به استحکام فشاری استخوان بسیار نزدیک است.

از آزمون گرماسنجی افتراقی به‌منظور تعیین رفتار پلی لاکتیک اسید قبل و بعد از عملیات حرارتی استفاده شد. این آزمون بر روی نمونه شماره ۵، قبل و بعد از عملیات حرارتی صورت گرفته است. نمونه‌ها از دمای ۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حرارت داده می‌شوند. شکل ۵ نمودار آزمون گرماسنجی افتراقی را برای هر دو نمونه نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این‌که آنتالپی ذوب پلی لاکتیک اسید با درصد بلوره‌ای ۱۰۰ برابر با ۹۳ ژول/گرم است[2] مقدار درصد بلوره‌ای قطعه چاپ‌شده برابر با ۷/۴۲ درصد و برای نمونه عملیات حرارتی شده برابر با ۵۱/۰۱ درصد است. از رابطه ۱[2] برای محاسبه درصد بلوره‌ای استفاده می‌شود.

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \times 100\ [\%] \qquad (۱)$$



شکل ۵) آزمون DSC برای قطعه بعد از چاپ و بعد از عملیات حرارتی



شکل ۶) نتایج حاصل از آزمون تفرق اشعه ایکس برای نمونه بعد از چاپ و بعد از عملیات حرارتی

که در رابطه χ_c درصد بلوره‌ای، ΔH_m آنتالپی ذوب، ΔH_{cc} آنتالپی تبلور سرد و ΔH_m^0 آنتالپی ذوب برای پلی لاکتیک اسید با درصد بلوره‌ای ۱۰۰ است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است ازآنجایی‌که بعد از عملیات حرارتی، حداکثر مقدار ممکن برای فاز نیمه بلوره‌ای، در قطعه تشکیل‌شده است، لذا چاله بلورینگی در نمودار مشاهده نمی‌شود زیرا انرژی‌ای صرف تشکیل فاز نیمه کریستالی نمی‌شود.

علاوه بر آزمون گرماسنجی افتراقی برای تحلیل اثر عملیات حرارتی بر روی نمونه شماره ۵ از آزمون تفرق اشعه ایکس نیز استفاده شده است. نتایج حاصل از این آزمون برای این نمونه در حالت عملیات حرارتی نشده و عملیات حرارتی شده در شکل ۶ آمده است. همان‌گونه که مشخص است این نمونه قبل از عملیات حرارتی آمورف بوده و فاقد قسمت بلوره‌ای است. علاوه بر این برای نمونه عملیات حرارتی شده یک پیک شاخص در ۱۶/۳ درجه مشاهده می‌شود که وجود این پیک در زاویه بیان‌شده نشان‌گر فاز نیمه کریستالی در این نمونه است[2].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر چهار متغیر عرض روزن‌رانی، درصد پر شدن، ارتفاع لایه‌ها و الگوی پر شدن بر روی خواص مکانیکی فشاری نمونه‌های متخلخل از جنس پلی لاکتیک اسید چاپ‌شده به روش لایه نشانی ذوبی بررسی گردید. سپس با انجام عملیات حرارتی آنیل کردن بر روی نمونه‌ها، اثر این عملیات بر روی خواص مکانیکی فشاری بررسی گردید. نتایج مهم حاصل‌شده از این پژوهش به شرح زیر است:

- با انتخاب الگو و درصد پر شدن مناسب می‌توان ساختارهای متخلخل سه‌بعدی به‌هم‌پیوسته ایجاد کرد که اندازه حفره‌های آن نیز قابل‌کنترل است.

- حداکثر استحکام و مدول فشاری برای نمونه چاپ‌شده بری نمونه با عرض روزن‌رانی ۰/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۰/۲۵ میلی‌متر، الگوی پر شدن لرزشی و درصد پر شدن حداکثر به ترتیب به مقدار ۸۴/۵۱ مگاپاسکال و ۲/۲۸ گیگاپاسکال حاصل گردید.

- حداکثر استحکام و مدول فشاری برای نمونه عملیات حرارتی شده بری نمونه با عرض روزن‌رانی ۰/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۰/۲۵ میلی‌متر، الگوی پر شدن لرزشی و درصد پر شدن حداکثر به ترتیب به مقدار ۱۰۵/۴۴ مگاپاسکال و ۲/۲۹ گیگاپاسکال حاصل گردید.

- مقدار حاصل شده برای استحکام فشاری نمونه عملیات حرارتی شده (۱۰۵/۴۴ مگاپاسکال)، حداکثر مقدار استحکام فشاری گزارش شده برای یک نمونه چاپ شده از جنس پلی لاکتیک اسید است. این مقدار به استحکام فشاری استخوان بسیار نزدیک است.

- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اثر پارامترهای عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه‌ها، درصد پر شدن، الگوی پر شدن و عملیات حرارتی بر استحکام فشاری به ترتیب برابر ۵۱/۳۸، ۵/۰۶، ۳۶/۰۳، ۱/۹۶ و ۵/۵۴ درصد است. همچنین میزان تأثیر این پارامترها بر روی مدول فشاری به ترتیب برابر با ۳۶/۱۳، ۷/۴، ۵۰/۴۳، ۵/۸۶ و ۰/۱۸ درصد است.

- نتایج حاصل از آزمون گرماسنجی افتراقی نشان داد که درصد نیمه بلوره‌ای برای نمونه بعد از چاپ برابر با ۷/۴۲ درصد و برای نمونه عملیات حرارتی شده برابر با ۵۱/۰۱ درصد است.

- نتیجه حاصل از آزمون افتراق اشعه ایکس نشان‌دهنده یک پیچ شاخص در ۱۶/۳ درجه برای نمونه بعد از عملیات حرارتی است که نشان‌دهنده تبدیل ساختار آمورف به ساختار نیمه بلوره‌ای است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

1- Singh S, Deepak D, Aggarwal L, Gupta VK. Tensile and Flexural Behavior of Hemp Fiber Reinforced Virgin-recycled HDPE Matrix Composites. Procedia Materials Science. 2014;6:1696-1702.

2- Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Shakoori D. An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High-Temperature Polylactic Acid in Fused Deposition Modeling. Polymer Engineering & Science. 2020;60(5):979-987.

3- Nie T, Venkatesh VS, Golub S, Stok KS, Hemmatian H, Desai R, Handelsman DJ, Zajac JD, Grossmann M, Davey RA. Estradiol increases cortical and trabecular bone accrual and bone strength in an adolescent male-to-female mouse model of gender-affirming hormone therapy. Bone Research. 2024;12(1):1.

4- Akhoundi B. An evaluation of the shape-memory behavior and mechanical properties of polylactic acid/Ni80Cr20 continuous wire composite produced by extrusion-based additive manufacturing and in-melt simultaneous impregnation method. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2024;43(13-14):783-797.

5- Vieweger D, Diel S, Schweiger H-G, Tetzlaff U. Mechanical Properties of Raw Filaments and Printed Specimens: Effects of Fiber Reinforcements and Process Parameters. Polymers. 2024;16(11):1576.

6- Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024;10(11):16-23. [In Persian]

7- Nabipour M, Behravesh AH, Akhoundi B. Effect of printing parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal composites Printed via FDM 3D printer. mdrsjrns. 2017;17(1):145-150.

8- Dvorak K, Zarybnicka L, Ševčík R, Vopalensky M, Adamkova I. 3D composite printing: study of carbon fiber incorporation to different construction thermoplastic matrices in regard to dilatation characteristics. Rapid Prototyping Journal. 2024;ahead-of-print(ahead-of-print).

9- Baddour M, Fiorillo C, Trossaert L, Verberckmoes A, Ghekiere A, D'hooge DR, Cardon L, Edeleva M. Comparing Degradation Mechanisms, Quality, and Energy Usage for Pellet- and Filament-Based Material Extrusion for Short Carbon Fiber-Reinforced Composites with Recycled Polymer Matrices. Journal of Composites Science. 2024;8(6):222.

10- Bahrami B, Talebi H, Momeni MM, Ayatollahi MR. Experimental and theoretical investigation of the influence of post-curing on mixed mode fracture properties of 3d-printed polymer samples. Scientific Reports. 2024;14(1):13216.

11- Mousavi SM, Mousavi SM, Movahhedy MR. Investigating the influencing parameters on the surface roughness of polymer parts made by Fused Deposition Modeling with respect to laser polishing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023;10(9):42-50. [In Persian]

12- Safi Jahanshahi A. Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous glass fiber composite material produced with an extrusion-based 3D printer using the simultaneous impregnation system of fibers and polymer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024:-. [In Persian]
13- Bouguermouh K, Habibi M, Laperrière L, Li Z, Abdin Y. 4D-printed PLA-PETG polymer blends: comprehensive analysis of thermal, mechanical, and shape memory performances. Journal of Materials Science. 2024.
14- Ghasemkhani A, Pircheraghi G, Mehrabadi NR, Eshraghi A. Effects of heat treatment on the mechanical properties of 3D-printed polylactic acid: Study of competition between crystallization and interlayer bonding. Materials Today Communications. 2024:109266.
15- Pernet B, Nagel JK, Zhang H. Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns. Procedia CIRP. 2022;105:682-687.
16- Dakhil GY, Salih RM, Hameed AM. Influence of infill pattern, infill ratio on compressive strength and hardness of 3D printed polylactic acid (PLA) based polymer. Journal of Applied Sciences and Nanotechnology. 2023;3(1):1-7.
17- Abdullah MA, Abbas TF. Investigation and prediction of the impact of FDM process parameters on mechanical properties of PLA prints. Engineering and Technology Journal. 2023;41(12):1465-1473.
18- Bakhtiari H, Nikzad M, Tolouei-Rad M. Influence of three-dimensional printing parameters on compressive properties and surface smoothness of polylactic acid specimens. Polymers. 2023;15(18):3827.
19- Yu W, Wang X, Yin X, Ferraris E, Zhang J. The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts. Materials & Design. 2023;226:111687.
20- Shbanah M, Jordanov M, Nyikes Z, Tóth L, Kovács TA. The Effect of Heat Treatment on a 3D-Printed PLA Polymer's Mechanical Properties. Polymers. 2023;15(6):1587.
21- Hasan MS, Ivanov T, Vorkapić M, Simonović A, Daou D, Kovačević A, Milovanović A. Impact of aging effect and heat treatment on the tensile properties of PLA (poly lactic acid) printed parts. Materiale Plastice. 2020;57(3):147-159.
22- Akhoundi B, Behravesh AH, Bagheri Saed A. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber–reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: In-melt simultaneous impregnation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2020;234(1-2):243-259.
23- Kiński W, Pietkiewicz P. Influence of the printing nozzle diameter on tensile strength of produced 3D models in FDM technology. Agricultural Engineering. 2020;24(3):31-38.
24- Larsson J, Lindström P, Korin C, Ekengren J, Karlsson P, editors. The Influence of Nozzle Size on the Printing Process and the Mechanical Properties of FFF-Printed Parts. Industrializing Additive Manufacturing; 2024 2024; Cham: Springer International Publishing.
25- Akhoundi B, Behravesh AH. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. Experimental Mechanics. 2019;59(6):883-897.
26- Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Band SS, Mosavi A. Calculating Filament Feed in the Fused Deposition Modeling Process to Correctly Print Continuous Fiber Composites in Curved Paths. Materials. 2020;13(20):4480.
27- Akhoundi B, Nabipour M, Kordi O, Hajami F. Calculating printing speed in order to correctly print PLA/continuous glass fiber composites via fused filament fabrication 3D printer. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023;36(1):162-181.