



Introducing A Novel Combined Method of Fused Filament Fabrication (FFF)/Batch Foaming to Improve the Properties of Biodegradable Poly Lactic Acid

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rasouli A.¹,
Azdast T.^{1*},
Mohammadzadeh H.¹,
Mihankhah P.¹,
Hasanzadeh R.¹

How to cite this article

Rasouli A, Azdast T, Mohammadzadeh H, Mihankhah P, Hasanzadeh R. Introducing A Novel Combined Method of Fused Filament Fabrication (FFF)/Batch Foaming to Improve the Properties of Biodegradable Poly Lactic Acid. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(01):15-22.

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
t.azdast@urmia.ac.ir

Article History

Received: May 10, 2021
Accepted: August 05, 2021
ePublished: November 14, 2022

ABSTRACT

The importance of environmental issues has increased the use of biodegradable polymers which nowadays have become among main components in medical and biological applications. In the present study, a new combined method of fused filament fabrication (FFF) and batch foaming was introduced to improve the properties of poly lactic acid. For this purpose, FFF samples were produced with infill percentages of 100, 80 and 60 and then, foamed in batch process. Due to the importance and effect of the void fraction on structural and mechanical performance as well as the biodegradability of materials with porous structure, especially for medical purposes, void fraction and impact strength were evaluated. The results showed that the void fractions of FFF samples were 3%, 13% and 25% in infill percentages of 100, 80 and 60, respectively while after the foaming they reached to 14%, 19% and 30%. The findings revealed that the impact strength of FFF foamed samples was improved compared to FFF solid samples. For samples with 100 infill percentage, the impact strength improved from 207 to 506 J/m² due to the foaming procedure with nano-sized cells created by the batch foaming.

Keywords Biodegradable; Poly lactic acid; FFF; Batch foaming; Void fraction; Impact strength

CITATION LINKS

[1] Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society. [2] InEnvironmental silicate nano-biocomposites. [3] Recent review of tribology, rheology of biodegradable and FDM compatible polymers. [4] Green Composites Based on PLA and Agricultural or Marine Waste Prepared by FDM. [5] Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. [6] A review on principles and fundamentals of fabrication of polymeric foams in regards to increasing cell density/reducing cell size. [7] Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. [8] Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts. [9] Experimental investigation on tensile properties of the polymer and composite specimens printed in a Triangular pattern. [10] Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples. [11] Effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D-printed carbon fibre-PLA composite. [12] A comparative experimental study of additive manufacturing feasibility faced to injection molding process for polymeric parts. [13] Investigation of cell wall thickness and impact strength of polypropylene microcellular nanocomposite foams produced by batch process. [14] A Taguchi analysis on structural properties of polypropylene microcellular nanocomposite foams containing Fe₂O₃ nanoparticles in batch process. [15] Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites foamed using CO₂. [16] Tensile and impact properties of microcellular isotactic polypropylene (PP) foams obtained by supercritical carbon dioxide. [17] The effect of water immersion on the mechanical properties of polystyrene bead foam used in soft shell cycle helmets.

ارائه‌ی روشی نوین با ترکیب ساخت رشته‌ی ذوبی (FFF)/فوم توده‌ای به منظور بهبود خواص قطعات پلیمری زیست تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید

اصغر رسولی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
طاهر اژدست*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

حوریه محمدزاده

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

پیمان میهن‌خواه

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

رزگار حسن‌زاده

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

اهمیت مسائل زیست محیطی گسترده‌ی روز افزون کاربرد پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر را در پی داشته است به طوری که امروزه این پلیمرها به جزء جدایی ناپذیر در علوم پزشکی و زیستی بدل گشته‌اند. در تحقیق حاضر از یک روش نوین که ترکیبی از روش ساخت رشته ذوبی (FFF) و فوم توده‌ای است جهت بهبود خواص قطعات از جنس پلی‌لاکتیک اسید استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌های چاپی با درصد چگالی پر شدن ۸۰، ۱۰۰ و ۶۰ تولید شده و سپس فوم شدند. به دلیل اهمیت و تاثیر کسر توخالی (Void fraction) بر خواص ساختاری و مکانیکی و همچنین سرعت تجزیه‌پذیری مواد با ساختار متخلخل بخصوص با مقاصد پزشکی، دو پارامتر کسر توخالی و استحکام به ضربه مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که درصد کسر توخالی نمونه‌های فوم نشده برای درصد پر شدن ۸۰، ۱۰۰ و ۶۰ به ترتیب ۳، ۱۳ و ۲۵ درصد می‌باشد، در صورتی که این میزان بعد از فوم شدن نمونه‌ها به ترتیب به ۱۴، ۱۹ و ۳۰ درصد رسید. همچنین نتایج حکایت از افزایش استحکام به ضربه نمونه‌های چاپی با استفاده از فرآیند فوم داشت. به طوری که برای نمونه‌های با درصد پر شدن ۱۰۰، مقدار استحکام به ضربه با فرآیند فوم شدن از ۲۰۷ به ۵۰۶ ژول بر متر مربع رسید که به دلیل سلول‌های ایجاد شده به روش فوم توده‌ای در ابعاد نانومتری بود. **کلیدواژه‌ها:** زیست تخریب‌پذیر، پلی‌لاکتیک اسید، FFF، فوم توده‌ای، کسر توخالی، استحکام به ضربه

تاریخ دریافت: ۲۰۲۱/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۱/۰۸/۰۵

* نویسنده مسئول: tazdast@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

فراگیری روز افزون استفاده از محصولات پلاستیکی در صنایع مختلف و پیامدهای استفاده بی‌رویه از آن‌ها در کنار عدم تجزیه زود هنگام مواد پلیمری، به یک مبحث زیست محیطی مهم تبدیل شده است. در حقیقت، مواد پلیمری رایج از مشتقات نفتی بر پایه کربن تولید می‌شوند که به طور مشخص پایدار بوده و زمان تجزیه بالایی دارند که همین امر معضلات جدی را از لحاظ زیست

محیطی در پی دارد. بنابراین از بین بردن ضایعات پلاستیکی غیر قابل تجزیه حائز اهمیت است، اما هزینه این عمل بسیار زیاد بوده و مشکلات زیادی برای اجرایی شدن وجود دارد. یکی از راه‌حل‌های بنیادی برای حل مشکل ضایعات پلیمرها، استفاده از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌باشد. پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر عمدتاً منشاء گیاهی داشته و سرعت تجزیه به مراتب بیشتری از پلیمرهای تولید شده از مشتقات نفتی دارند [1,2].

استفاده از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر از دو جنبه باید مورد تایید قرار گیرد. یکی از لحاظ زیست محیطی که باید دارای سرعت تجزیه بالا بوده و در عین حال تجزیه آن‌ها آسیبی به طبیعت نرساند. دوم از لحاظ صنعتی نیز باید خصوصیات لازم را به منظور جایگزینی پلیمرهای سنتی داشته باشند. از جمله پرکاربردترین پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌توان به پلی‌کاپرولاکتون (Polycaprolactone)، پلی‌وینیل الکل (Polyvinyl alcohol) و پلی‌لاکتیک اسید (Polylactic acid) اشاره کرد. این پلیمرها به دلیل ویژگی‌هایی نظیر سازگاری با محیط زیست، در دسترس بودن و سمی نبودن در صنایع مختلف نظیر علوم پزشکی و زیستی و صنایع بسته‌بندی کاربرد زیادی دارند. از این رو به دلیل مزایای ذکر شده و گسترش کاربرد پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر از روش‌های مختلفی برای تولید محصولات بر پایه این پلیمرها استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین و همچنین نوین‌ترین روش‌های تولید قطعات پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر، فناوری چاپ سه‌بعدی است [3,4].

چاپ سه‌بعدی را می‌توان به عنوان یک فرآیند تولید قطعات با افزودن مواد در لایه‌های متوالی تعریف کرد. این تکنولوژی برای ساخت قطعات پیچیده‌ای که با فرآیندهای سنتی قابلیت ساخت ندارند، بسیار مناسب می‌باشد. یکی از شناخته شده‌ترین روش‌های چاپ قطعات به صورت سه‌بعدی، روش ساخت رشته ذوبی (FFF) (Fused Filament Fabrication) می‌باشد. در این فرآیند، مواد به صورت رشته (فیلامنت) در یک نازل تا دمایی که قابلیت جریان پیدا کند گرم شده و به محل چاپ تغذیه می‌شود. سپس با حرکت در جهت‌های مختلف مطابق با الگوی چاپ که به وسیله نازل و تخته چاپ کنترل می‌شود، یک لایه از قطعه چاپ شده و این عمل تا تکمیل هندسه نهایی قطعه ادامه می‌یابد و قطعه نهایی به صورت لایه‌های متوالی به هم چسبیده تولید می‌شود [5].

از طرف دیگر به منظور کاهش مواد مصرفی و در نتیجه آن صرفه اقتصادی بیشتر ضمن بهبود خواص مختلف، فوم‌سازی پلیمرها به کار گرفته می‌شود. با فوم نمودن پلیمرها همچنین می‌توان به خواصی نظیر استحکام به وزن بالا، سبکی وزن، قابلیت عایق کاری مناسب در برابر حرارت و صدا و جذب انرژی بالا در قطعات پلیمری، دست یافت. یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های فوم نمودن قطعات پلیمری، روش فوم توده‌ای است. در این روش ابتدا قطعات در داخل یک مخزن، در دما و زمان مشخص، به کمک یک

همچنین مشخص شد که ضخامت لایه موثرترین پارامتر بر روی استحکام به ضربه ویژه بوده و با در نظر گرفتن زاویه رستر به مقدار ۳۰/۳۰- درجه و ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر، شرایط بهینه به منظور تولید قطعات با خواص مکانیکی مناسب فراهم خواهد شد. در عین حال، درصد پرشدگی باید متناسب با کاربرد مورد نظر بهینه‌سازی شود. کمال و همکاران^[11] به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ساخت رشته ذوبی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت پلی-لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. در این تحقیق، جهت چاپ، درصد پرشدن و ارتفاع لایه به عنوان متغیرهای فرآیند انتخاب شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که خواص کششی نمونه‌ها تحت تأثیر هر سه پارامتر مذکور قرار دارند. بیشترین مقاومت کششی در ارتفاع لایه ۰/۲۵ میلی‌متر و درصد پرشدن ۸۰ درصد بدست می‌آید. این درحالی بود که نتایج آزمون ضربه مشخص ساخت که ارتفاع لایه تأثیر چندانی بر استحکام ضربه‌ای ندارد. پاگانین و همکاران^[12] به بررسی رفتار مکانیکی قطعات تولید شده به وسیله روش ساخت رشته‌ی ذوبی از جنس آکریلونیتریل بوتادین استایرن (Acrylonitrile butadiene styrene) و مقایسه نتایج آن‌ها با قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی به منظور تحلیل و مقایسه دو فرآیند مذکور پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با انتخاب پارامترهای مناسب در چاپ نمونه‌ها، می‌توان به خواص مکانیکی مطلوب و قابل مقایسه با نمونه‌های تولید شده به وسیله قالب‌گیری تزریقی دست یافت. همچنین آن‌ها نمونه‌های چاپ شده و تزریق شده را از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که اندازه همه نمونه‌ها در حد استاندارد بوده و نمونه‌های چاپ شده دارای درصد بسیار کمی خطا بودند که قابل چشم پوشی بود. این امر بیانگر این نکته بود که فرآیند ساخت رشته ذوبی قادر به تولید نمونه‌ها با دقت ابعادی بالا می‌باشد.

دریادل و همکاران^[13] خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های نانوکامپوزیتی پلی‌پروپیلن/نانوآکسید آهن در فرآیند فوم توده‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش از گاز کربن دی‌اکسید به منظور اشباع نمونه‌ها استفاده کردند. نتایج آن‌ها مشخص کرد که دمای پایین فوم کردن با کاهش ضخامت دیواره سلولی همراه خواهد بود. در عین حال مشخص شد که کاهش دمای فوم کردن موجب افزایش استحکام به ضربه ویژه نمونه‌ها می‌شود. مولانی و همکاران^[14] تأثیر پارامترهای مختلف بر روی خواص نانوکامپوزیت‌های میکروسلولی فوم شده از پلی‌پروپیلن/نانوآکسید آهن تولید شده به روش فوم توده‌ای را بررسی نمودند. آن‌ها درصد نانو آکسید آهن، دمای فوم و زمان فوم را به عنوان پارامترهای متغیر فرآیند در نظر گرفتند. تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ساختارهایی با چگالی سلولی ۱۰۹ تا ۱۰۱۰ سلول در سانتی‌متر مکعب و اندازه سلولی کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر حاصل شده است. همچنین نشان

گاز خنثی اشباع می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از یک ناپایداری ترمودینامیکی که عمدتاً از افت سریع فشار داخل مخزن ناشی می‌شود، هسته‌زایی اتفاق می‌افتد. سپس به منظور رشد سلولی، قطعات پلیمری در داخل یک محیط دما بالا قرار می‌گیرند و در نهایت با قرار دادن قطعات در داخل محیطی با دمای پایین، پایداری سلولی اتفاق می‌افتد و در نتیجه یک نمونه کامپوزیتی شامل دو فاز گاز و پلیمر حاصل می‌گردد^[6].

در سالیان اخیر تحقیقات مختلفی هم در زمینه‌ی چاپ سه بعدی و هم در زمینه فوم توده‌ای صورت گرفته است. تانور و همکاران^[7] به منظور بررسی اثر درصد‌های پرشدن مختلف بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس پلی‌لاکتیک اسید، هر یک از نمونه‌ها را با استفاده از سه درصد پرشدن مختلف (۷۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) چاپ کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین مقدار استحکام به ضربه به ترتیب ۴۷/۲ و ۱/۷ کیلوژول بر متر مربع بدست می‌آید. همچنین مطابق با نتایج حاصله، نمونه‌هایی که با درصد‌های پرشدن مختلف چاپ شده بودند، نسبت به نمونه‌هایی که فقط با یک درصد پرشدن چاپ شده بودند، علاوه بر این که استحکام بالاتری از خود به نمایش گذاشتند، در عین حال از وزن کمتری نیز برخوردار بودند که این امر نشان‌دهنده کاهش ماده مصرفی در تولید این نمونه‌ها می‌باشد. چاده و همکاران^[8] بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی چاپ بر روی خواص مکانیکی قطعات تولید شده به وسیله چاپگر سه بعدی را در دستور کار خود قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش دمای صفحه چاپ، ضخامت لایه چاپ و الگوی پرشدن (رکتیلاپنر، لانه زنبوری و مثلثی) را به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها روشن ساخت که با افزایش دمای صفحه چاپ، مقاومت کششی و خمشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که الگوهای پرشدن مثلثی و لانه زنبوری مقاومت کششی و خمشی بهتری را ارائه می‌دهند. آیرلمیش و همکاران^[9] به بررسی تأثیر ضخامت لایه چاپ بر روی خاصیت جذب آب و خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده از جنس کامپوزیت چوب و پلی‌لاکتیک اسید، به وسیله چاپگر سه‌بعدی پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش ضخامت لایه مقدار فضای خالی بین رسترها (Raster) افزایش یافته و این امر سبب افزایش مقدار جذب آب توسط نمونه‌های با ضخامت لایه بیشتر می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها روشن ساخت که با کاهش ضخامت لایه چاپ، خواص کششی نمونه‌های کامپوزیت چوب/پلی‌لاکتیک اسید چاپ شده، به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. حسن زاده و از دست^[10] با مد نظر قرار دادن درصد پرشدگی، زاویه رستر و ضخامت لایه‌ها به عنوان پارامترهای فرآیندی، بررسی و بهینه‌سازی فرآیند ساخت رشته‌ی ذوبی پلی‌لاکتیک اسید را در دستور کار خود قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش درصد پرشدن، با کاهش چگالی و استحکام به ضربه همراه خواهد بود.

۲- مواد و روش تحقیق

برای چاپ نمونه‌ها از چاپگر سه‌بعدی ساخته شده توسط پژوهشگران استفاده شد. این چاپگر از نوع دلتا بوده و صفحه چاپ ثابت بوده و حرکت در هر سه بعد توسط نازل کنترل می‌گردد. همچنین رشته پلی‌لاکتیک اسید ساخت شرکت یوسو (YOUSU) کشور چین به قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و مناسب برای بازه دمایی ۱۹۰ الی ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید.

نمونه‌ها در ابعاد اسمی $۱۲۶ \times ۱۲/۷ \times ۳/۲$ (ابعاد بر حسب میلی‌متر) مطابق با استاندارد ASTM D6110 و با استفاده از نرم افزار سالیدورکس (SolidWorks) طراحی شدند. طراحی انجام گرفته در قالب فرمت stl استخراج شده و برای برش زنی و تبدیل مدل سه‌بعدی به دستورات جی‌کد (G-Code)، از نرم افزار سیمپلی-فای تری‌دی (Simplify3D) استفاده گردید. به منظور بررسی میزان کسر توخالی و استحکام به ضربه، درصد پر شدن به عنوان پارامتر متغیر در سه سطح متفاوت (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) تنظیم شد. سایر پارامترهای چاپ شامل: دمای چاپ (۲۱۰ درجه سانتی‌گراد)، الگوی پر شدن (۴۵ درجه)، ضخامت لایه (۰/۲ میلی‌متر)، سرعت چاپ (۶۰ میلی‌متر بر ثانیه) و قطر خروجی نازل (۰/۳ میلی‌متر) به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شدند.

برای فوم کردن نمونه‌ها، از سیستم فوم توده‌ای طراحی و ساخته شده توسط پژوهشگران استفاده شد. این سیستم از نوع سیستم دو مرحله‌ای بوده که در مرحله اول نمونه‌ها داخل مخزن متصل به کپسول گاز فشار بالا اشباع شده و در مرحله دوم با خارج نمودن نمونه‌ها از مخزن و قرار دادن آن‌ها داخل مخزن سیال دما بالا به دلیل اتفاق افتادن دو ناپایداری ترمودینامیکی همزمان (افت فشار و افزایش دما)، نمونه‌ها فوم می‌گردند. به این منظور نمونه‌های چاپ‌شده به روش FFF، به صورت همزمان و به مدت ۴۸ ساعت در مخزنی که گاز کربن دی‌اکسید با فشار ۵ مگاپاسکال در آن دمیده می‌شد، قرار داده شدند تا نفوذ گاز، به صورت کامل نمونه‌ها را اشباع کند. بعد از گذشت زمان مذکور و حصول اطمینان از اشباع کامل نمونه‌ها، فشار داخل مخزن به سرعت تخلیه و به فشار محیط رسید تا در پی این ناپایداری ترمودینامیکی، هسته‌زایی رخ دهد. سپس برای سهولت در رشد سلولی، نمونه‌ها بلافاصله پس از خروج از مخزن به مدت یک دقیقه در حمام آب داغ با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. در مرحله بعد، جهت پایداری سلولی، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب در دمای محیط قرار گرفتند. تصویری از نمونه‌های فوم شده در شکل ۱ قابل ملاحظه می‌باشد. به منظور محاسبه کسر توخالی نمونه‌ها ابتدا باید چگالی نسبی نمونه‌ها محاسبه گردد. چگالی نسبی به صورت چگالی نمونه فوم شده نسبت به چگالی نمونه فوم نشده مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{unfoamed}} \quad (1)$$

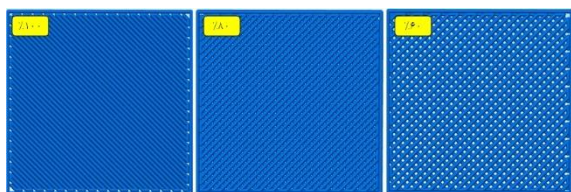
داده شد که دمای فوم مهم‌ترین پارامتر بر روی خواص ساختاری بوده و چگالی سلولی و نسبت انبساط با افزایش دمای فوم کاهش می‌یابند. همچنین نتایج روشن ساخت که افزودن ۲ درصد وزنی نانوآکسید آهن منجر به بهبود ۸۰ درصدی چگالی سلولی می‌شود در حالی که اندازه سلولی و نسبت انبساط کاهش می‌یابد. نتایج حاصله بیانگر این موضوع بود که با کنترل پارامترهای فرآیندی، تاثیر معنی‌داری در کاهش مصرف مواد اولیه حاصل می‌گردد. دریادل و همکاران^[15] بررسی اثر درصد مختلف نانو ذرات اکسید آهن، دما و زمان فوم بر روی خواص ساختاری و مکانیکی نمونه‌های فوم شده از جنس پلی‌پروپیلن را در دستور کار خود قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، افزایش ۴ درصدی نانو اکسید آهن، بهبود ۲۰ درصدی استحکام به ضربه ویژه را در پی داشت. همچنین مشخص شد که ساختارهای سلولی و خواص مناسب، با کنترل پارامترهای فرآیندی حاصل می‌شوند که تاثیر قابل توجهی در کاهش استفاده از مواد اولیه دارند. نتایج آن‌ها روشن ساخت که افزودن نانوذرات، در کنار بهبود خواص ساختاری نانو کامپوزیت‌ها، نسبت انبساط را نیز کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد که دمای فوم یک پارامتر بسیار تاثیرگذار بر روی خواص نهایی قطعات می‌باشد و باید به دقت تنظیم و کنترل گردد. زیست تخریب‌پذیری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مواد پلیمری مورد استفاده در زمینه پزشکی و زیستی می‌باشد. همچنین از حیاتی‌ترین مشخصات ساختاری مواد مورد استفاده در کاربردهای مختلف پزشکی نظیر مهندسی بافت، درصد کسر توخالی آن‌هاست. روش چاپ سه بعدی FFF قابلیت ایجاد کسر توخالی‌هایی در ابعاد ماکرومتر را دارا می‌باشد در حالیکه در روش فوم توده‌ای اغلب امکان ایجاد ساختار با ابعاد میکرومتر و گاهی با ابعاد نانومتر وجود دارد. از این رو در پژوهش حاضر از روش بسیار نوین و ترکیبی روش ساخت رشته ذوبی و فرآیند فوم توده‌ای به منظور بهره‌مندی از مزایای هر دو روش جهت تولید قطعات زیست تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید با امکان کاربرد در علوم پزشکی و زیستی استفاده شده است. در واقع با استفاده از روش چاپ سه بعدی ساختار ماکرومتر ایجاد شده و با فوم نمودن نمونه‌های چاپ شده دستیابی به ساختار میکرو و نانو در داخل رسترها در دستور کار قرار می‌گیرد. هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی کسر توخالی نمونه‌های چاپی فوم شده و چاپی فوم نشده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به منظور استفاده در زمینه‌های پزشکی و زیستی می‌باشد. در این مقایسه، اثرگذاری فرآیند فوم بر روی نمونه‌های چاپ سه بعدی شده مشخص می‌گردد. همچنین در ادامه، میزان اثرگذاری فوم بر روی مقاومت به ضربه نمونه‌های چاپی به عنوان یک ویژگی مهم مکانیکی مواد مورد بررسی قرار گرفته و با نمونه‌های چاپی فوم نشده مقایسه می‌گردد. دستاوردهای پژوهش حاضر در راستای بهبود خواص و قابلیت ساخت قطعات پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر قابل استفاده خواهند بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کسر توخالی

همانطور که ذکر گردید یکی از مهم‌ترین کاربردهای پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در زمینه پزشکی می‌باشد. از جمله مهم‌ترین فاکتورهایی که در کاربردهای پزشکی مورد بررسی و تحقیق قرار می‌گیرد، میزان کسر توخالی قطعات تولید شده با استفاده از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر می‌باشد که با کنترل آن می‌توان درجه تخریب‌پذیری قطعات تولید شده را کنترل نمود. یکی از بهترین روش‌های تولید قطعات که بتوان در آن درصد کسر توخالی را به میزان مورد نظر تغییر داد، روش FFF می‌باشد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، به خاطر قابلیت نرم افزارهای مختلف روش FFF، طراحی قطعات با میزان درصدهای پر شدن مختلف در مرحله طراحی امکان‌پذیر می‌باشد که می‌توان درصدهای متفاوتی از کسر توخالی را پیش از تولید قطعه طراحی و به مقدار زیادی کنترل نمود. قطعه تولید شده به وسیله روش FFF در حقیقت متشکل از تعداد زیادی رستر است که بر روی هم نشاند می‌شوند. بنابراین با تنظیم فاصله بین این رسترها کسر توخالی که در شکل ۲ قابل مشاهده است، ایجاد می‌شود. اما برای اینکه بتوان در داخل رسترها نیز کسر توخالی ایجاد کرد، در پژوهش حاضر از روش فوم توده‌ای استفاده گردید. بنابراین با بهره‌مندی از روش نوین که ترکیبی از روش فوم توده‌ای و روش FFF است، کسر توخالی در داخل رسترها و همچنین بین رسترها ایجاد گردید. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد که بعد از اینکه نمونه‌های چاپ شده با درصد‌های پر شدن ۶۰ و ۸۰،۱۰۰ درصد با استفاده از روش توده‌ای فوم شده‌اند، در داخل رسترها نیز کسر توخالی ایجاد گردیده است. شکل ۴ نتایج مربوط به درصد کسر توخالی را در نمونه‌های چاپی و نمونه‌های چاپی فوم شده در درصدهای پر شدن مختلف ارائه داده است.

با توجه به نتایج، برای نمونه‌های فوم نشده با درصد پر شدن ۱۰۰ میزان کسر توخالی ۳ درصد می‌باشد. در حالیکه میزان کسر توخالی برای نمونه‌های فوم نشده با درصد پر شدن ۸۰ و ۶۰ به ترتیب ۱۳ و ۲۵ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که در نمونه‌های فوم نشده با درصد پر شدن ۱۰۰ یک هم پوشانی بین رسترها وجود دارد که باعث می‌شود فضای خالی بین رسترها در کمترین مقدار خود باشد و در نتیجه درصد کسر توخالی ناچیز می‌باشد.



شکل ۲) تنظیم فاصله بین رسترها با تغییر درصد چگالی پر شدن در نرم افزار سیمپلی‌فای تری‌دی به منظور حصول کسر توخالی متفاوت



شکل ۱) نمونه‌های چاپی فوم شده با درصدهای پر شدن مختلف

که در این رابطه ρ_{rel} چگالی نسبی، ρ_{foam} چگالی نمونه فوم شده و $\rho_{unfoamed}$ چگالی نمونه فوم نشده است که در پژوهش حاضر میزان آن برای پلی‌لاکتیک اسید ۱/۲۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. برای به دست آوردن چگالی فوم نمونه‌ها از روش جابه‌جایی آب ارشمیدس استفاده شد. مطابق با این روش، اگر یک ظرف حاوی آب به چگالی ρ_w روی ترازوی دقیقی قرار داده و جسمی به جرم M_b را در آب غوطه‌ور کنیم به طوری که تمام سطح جسم را آب فرا گیرد، در این صورت ترازو تغییر وزن ΔM را نشان می‌دهد که برابر با جرم آب هم حجم جسم غوطه‌ور شده است که در این صورت چگالی نمونه (ρ_{foam}) مطابق با رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه خواهد شد. با حصول چگالی نسبی از رابطه مذکور، کسر توخالی نمونه‌ها طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\rho_{foam} = \frac{M_b}{\Delta M} \cdot \rho_w \quad (2)$$

$$V_V = 1 - \rho_{rel} \quad (3)$$

برای توزین نمونه‌های تولید شده از ترازوی دیجیتالی ساخت شرکت A&D مدل SHS-FX300G با دقت ۰/۰۰۱ گرم و حداکثر ظرفیت ۳۲۰ گرم استفاده شد. همچنین جهت بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون ضربه چارپی استفاده گردید. به طور معمول مقاومت به ضربه نمونه بر حسب کار ضربه‌ای انجام شده بر واحد سطح نمونه محاسبه می‌شود و با توجه به رابطه (۴) تعیین می‌گردد.

$$IS = \frac{W}{A} = \frac{PL(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{A} \quad (4)$$

در این رابطه، I.S. استحکام به ضربه، W کار انجام شده برای شکستن قطعه بر حسب ژول، A سطح مقطع نمونه بر حسب سانتی‌متر مربع، P وزن پاندول بر حسب کیلوگرم، L طول پاندول بر حسب متر، α_1 زاویه اولیه پاندول با محور قائم و α_2 زاویه پاندول با محور قائم بعد از شکستن نمونه می‌باشد. برای این منظور از دستگاه تست ضربه SIT-200 ساخت شرکت سنتام با زاویه اولیه رهاسازی ۱۵۰ درجه و به ترتیب با طول و جرم پاندول ۳۹/۴۸ سانتی‌متر و ۲/۰۳۶ کیلوگرم استفاده گردید.

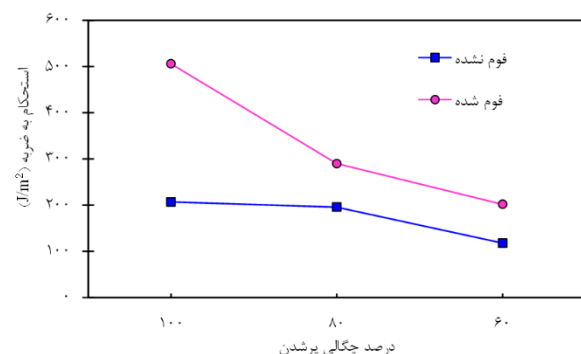
شایان ذکر می‌باشد که آزمون ضربه و آزمون چگالی برای هر نمونه سه بار تکرار گردید و میانگین اعداد به دست آمده به عنوان داده نهایی گزارش شد.

جستجو کرد. در مبحث فوم‌های پلیمری یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر هسته‌زایی فرآیند فوم، تشکیل بلورها در داخل پلیمرها می‌باشد. با افزایش میزان بلورینگی، محل‌های مستعد برای هسته‌زایی جهت ایجاد حباب بیشتر می‌شود و در نتیجه احتمال فوم‌شدگی بیشتر، افزایش می‌یابد [6]. همچنین در یک حجم ثابت، نمونه‌های با درصد پر شدن ۱۰۰ رسترهای بیشتر و در نتیجه حجم پلیمری بیشتری نسبت به نمونه‌های ۸۰ و ۶۰ درصد دارند و در نتیجه میزان درصد کسر توخالی نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰۰ نسبت به درصد‌های پر شدن ۸۰ و ۶۰ بیشتر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مشاهده می‌گردد که درصد کسر توخالی به طور کلی چه در نمونه‌های فوم شده و چه در نمونه‌های فوم نشده برای نمونه‌ها با درصد پر شدن ۶۰ بیشتر از ۸۰ و ۸۰ نیز بیشتر از ۱۰۰ می‌باشد.

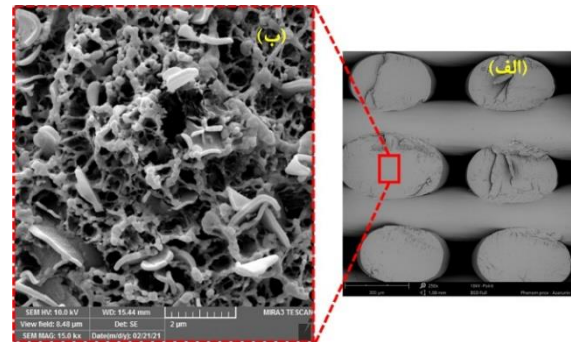
۳-۱- استحکام به ضربه

نمونه‌های فوم نشده و همچنین فوم شده با درصد‌های پر شدن ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ تحت نیروی ضربه قرار گرفته و با توجه به رابطه (۴) استحکام به ضربه هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید. نتایج استحکام به ضربه محاسبه شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استحکام به ضربه نمونه‌های فوم نشده با کاهش درصد پر شدن، کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار، میزان استحکام به ضربه برای نمونه‌های فوم نشده با درصد پر شدن ۶۰، ۱۱۸ ژول بر متر مربع است که این مقدار برای نمونه ۸۰ درصد بیشتر شده و در حدود ۱۹۶ ژول بر متر مربع می‌باشد.

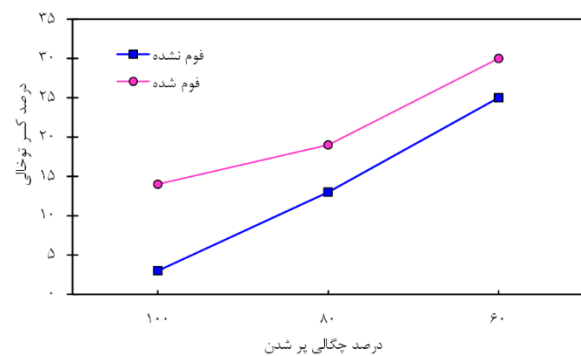
در حالیکه در نمونه ۱۰۰ درصد بیشترین استحکام به ضربه در بین درصد‌های پر شدن بررسی شده حاصل شده و مقدار آن ۲۰۷ ژول بر متر مربع به دست آمده است. دلیل این امر را می‌توان به تعداد رسترهای موجود در یک حجم ثابت به دلیل درصد‌های پر شدن مختلف مرتبط دانست. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن یک حجم ثابت، با افزایش درصد پر شدن تعداد رسترهای تشکیل دهنده نمونه نیز افزایش می‌یابد. از آنجاییکه هر یک از این رسترها خود به عنوان یک جسم صلب مستقل به حساب می‌آیند، با وارد کردن ضربه، هر کدام از رسترها در برابر ضربه مقاومت نموده و انرژی را جذب می‌نمایند.



شکل ۵) نتایج استحکام به ضربه نمونه‌های فوم نشده و فوم شده در درصد‌های پر شدن متفاوت



شکل ۳) کسرتوخالی ایجاد شده برای نمونه با درصد پر شدن ۸۰ درصد (الف) کسر توخالی حاصل از تنظیم فاصله بین رسترها در روش FFF (ب) کسر توخالی ایجاد شده در داخل رسترها به وسیله روش فوم توده‌ای

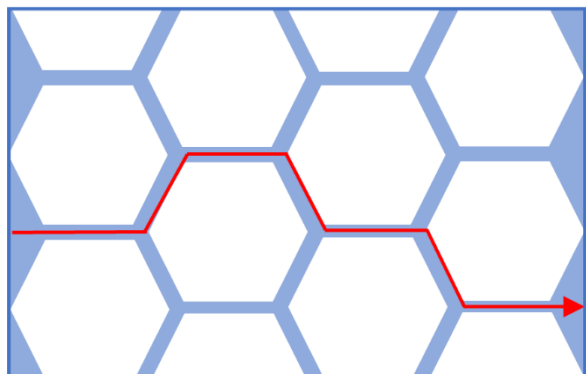


شکل ۴) نتایج درصد کسر توخالی برای نمونه‌های فوم شده و فوم نشده در درصد‌های پر شدن مختلف

در اصل این مقدار ناچیز نیز مطابق با شکل ۲ بیشتر به علت فضاهای خالی است که بین دیواره نمونه‌ها و رسترهای داخل نمونه حاصل شده است. با کاهش مقدار درصد پر شدن، درصد کسر توخالی بصورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کنترل درصد کسر توخالی در نمونه‌های چاپی FFF به راحتی می‌تواند توسط پارامتر درصد پر شدن انجام گیرد.

با بررسی نتایج واضح است که فوم نمودن نمونه‌ها، میزان کسر توخالی در تمامی نمونه‌ها با درصد‌های پر شدن مختلف را نسبت به حالت فوم نشده افزایش می‌دهد. برای نمونه‌های فوم شده با درصد پر شدن ۶۰ نسبت به حالت فوم نشده درصد کسر توخالی ۵ درصد افزایش یافته و حدود ۳۰ درصد شده است. همچنین برای نمونه‌ها با درصد پر شدن ۸۰ و ۱۰۰ کسر توخالی بعد از فرآیند فوم توده‌ای به ترتیب ۶ و ۱۱ درصد افزایش یافته و حدود ۱۹ و ۱۴ درصد شده است.

مطابق نتایج می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند فوم کردن نقش بسزایی در افزایش درصد کسر توخالی نمونه‌های چاپی داشته است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های چاپی، با افزایش درصد پر شدن درصد کسر توخالی بیشتری ایجاد می‌شود به طوری که این مقدار در نمونه‌هایی با درصد پر شدن ۱۰۰، افزایش قابل ملاحظه‌تری داشته است. علت این امر را می‌توان در حجم پلیمر و مقدار درصد بلورینگی و اثر گذاری این عوامل بر میزان فوم شدن پلیمرها



شکل ۸ شماتیک مسیر ترک و شکست در نمونه‌های فوم شده با اندازه سلولی کمتر از سه میکرومتر که در ناحیه‌های بین دیواره سلول‌ها و مرز بین سلول‌ها اتفاق می‌افتد

۴- نتایج

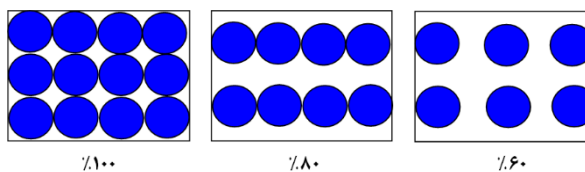
در تحقیق حاضر از یک روش جدید که ترکیبی از دو روش ساخت رشته ذوبی و فوم توده‌ای است جهت بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات از جنس پلی‌لاکتیک اسید استفاده گردید. برای این منظور ابتدا نمونه‌هایی به وسیله چاپگر سه‌بعدی با درصد‌های ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد تولید شده و سپس به وسیله روش توده‌ای، فوم شدند. کسر توخالی و استحکام به ضربه نمونه‌های چاپی فوم نشده و فوم شده بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند که مهم‌ترین دستاوردهای این بررسی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- درصد کسر توخالی برای نمونه‌های فوم نشده با کاهش درصد پر شدن افزایش می‌یابد، به طوری که درصد کسر توخالی برای نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰۰ در حدود سه درصد حاصل شد. در حالیکه برای نمونه‌های ۸۰ و ۶۰ درصد به ترتیب ۱۳ و ۲۵ درصد به دست آمد.
- با فوم شدن نمونه‌های چاپی، درصد کسر توخالی نسبت به حالت فوم نشده افزایش یافت و در نتیجه امکان کاهش ماده مصرفی میسر گشت. به طوریکه میزان کسر توخالی برای نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰۰ به ۱۴ درصد برای نمونه‌های ۸۰ % به ۱۹ درصد و نمونه‌های ۶۰ % به ۳۰ درصد افزایش یافت.
- استحکام به ضربه نمونه‌های فوم نشده با کاهش درصد پر شدن، کاهش می‌یابد که دلیل اصلی آن وجود تعداد رسترهای کمتر در یک حجم واحد و کاهش جذب انرژی است. استحکام به ضربه نمونه‌های ۶۰ درصد ۱۱۸ ژول بر متر مربع به دست آمد که این مقدار برای نمونه‌های ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب بیشتر شده و حدود ۱۹۶ و ۲۰۷ ژول بر متر مربع حاصل شد.
- با فوم شدن نمونه‌ها، میزان استحکام به ضربه نمونه‌ها افزایش یافت. به طوریکه که این افزایش برای نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰۰ چشمگیرتر و از ۲۰۷ به ۵۰۶ ژول بر متر مربع بود. همچنین برای نمونه‌های ۸۰ و ۶۰ درصد نیز مقادیر استحکام به ضربه به ترتیب ۲۹۰ و ۲۰۲ ژول بر متر مربع بود. علت اصلی این افزایش برای هر سه درصد پر شدن به دلیل ایجاد سلول‌هایی در ابعاد نانومتر در

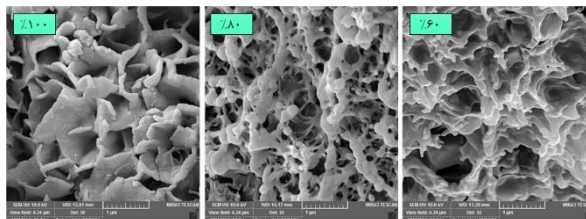
بنابراین به علت جذب انرژی توسط تک تک رسترها، انرژی کل جذب شده توسط نمونه افزایش یافته و منجر به مقاومت در برابر ضربه بیشتر توسط نمونه‌هایی می‌شود که تعداد رستر بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که دارای تعداد رستر کمتری هستند.

با بررسی نتایج مشخص است که با فوم نمودن نمونه‌ها میزان استحکام به ضربه همه نمونه‌ها نسبت به حالت فوم نشده افزایش یافته است. به طوری که نمونه‌های فوم شده با درصد پر شدن ۱۰۰، مقاومت به ضربه ۵۰۶ ژول بر متر مربع را از خود نشان دادند. همچنین استحکام به ضربه نمونه‌های ۸۰ و ۶۰ درصد نیز با فوم شدن به ترتیب به ۲۹۰ و ۲۰۲ ژول بر متر مربع افزایش یافت. دلیل این افزایش استحکام به ضربه مربوط به سلول‌های ریز و پر شماری است که به دلیل فرآیند فوم شدن در درون رسترها ایجاد می‌شود. با توجه به شکل ۷ در همگی نمونه‌های فوم شده ابعاد سلول‌های ایجاد شده در داخل رسترها زیر یک میکرومتر و در ناحیه نانومتری می‌باشد. در سلول‌هایی با ابعاد کمتر از سه میکرومتر شکست سلولی در جایی بین مرز و دیواره سلول‌ها اتفاق می‌افتد [16,17].

بنابراین به دلیل اینکه در نمونه‌های فوم شده با درصد پر شدن ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰، اندازه سلول‌ها به طور چشمگیری کمتر از سه میکرومتر می‌باشد، شکست به صورتی که در شکل ۸ نمایش داده شده است، اتفاق می‌افتد. در واقع به دلیل وجود سلول‌هایی در ابعاد نانو و با تعداد بسیار زیاد، هر کدام از سلول‌ها در مقابل ضربه وارد شده مقداری انرژی جذب کرده و همچنین باعث انحراف مسیر ترک می‌شوند که در نهایت منجر به افزایش استحکام به ضربه نمونه‌ها نسبت به حالت فوم نشده می‌شوند. لازم به ذکر می‌باشد که یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش ایجاد سلول‌های با ابعاد کمتر از یک میکرومتر می‌باشد. در حقیقت اگر سلول‌ها دارای ابعاد بزرگ‌تری باشند، خود به عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده و باعث شکست زود هنگام نمونه در برابر ضربه می‌شوند.



شکل ۶ شماتیکی از تعداد رسترهای موجود در یک حجم ثابت در درصد‌های پر شدن متفاوت



شکل ۷ تصاویر SEM داخل رسترهای نمونه‌های چاپی فوم شده با درصد‌های پر شدن مختلف

- Modares Mechanical Engineering. 2019 Jan 10;19(1):211-22.
- 7- Tanveer MQ, Haleem A, Suhaib M. Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. SN Applied Sciences. 2019 Dec;1(12):1-2.
- 8- Chadha A, Haq MI, Raina A, Singh RR, Penumarti NB, Bishnoi MS. Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts. World Journal of Engineering. 2019 Jul 19.
- 9- Tandon S, Kacker R, Sudhakar KG. Experimental investigation on tensile properties of the polymer and composite specimens printed in a Triangular pattern. Journal of Manufacturing Processes. 2021 Aug 1;68:706-15.
- 10- Hasanzadeh R, Azdast T. Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples. Modares Mechanical Engineering. 2021 Jan 10;21(2):69-78.
- 11- Kamaal M, Anas M, Rastogi H, Bhardwaj N, Rahaman A. Effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D-printed carbon fibre-PLA composite. Progress in Additive Manufacturing. 2021 Feb;6(1):63-9.
- 12- Paganin LC, Barbosa GF. A comparative experimental study of additive manufacturing feasibility faced to injection molding process for polymeric parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 Aug;109(9):2663-77.
- 13- Daryadel M, Azdast T, Hasanzadeh R, Molani S. Investigation of cell wall thickness and impact strength of polypropylene microcellular nanocomposite foams produced by batch process. Journal of Science and Technology of Composites. 2018 Jun 10;5(1):135-42.
- 14- Molani S, Azdast T, Doniavi A, Hasanzadeh R, Moradian M, Mamaghani Shishavan S. A Taguchi analysis on structural properties of polypropylene microcellular nanocomposite foams containing Fe₂O₃ nanoparticles in batch process. Plastics, Rubber and Composites. 2018 Mar 16;47(3):106-12.
- 15- Daryadel M, Azdast T, Hasanzadeh R, Molani S. Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites foamed using CO₂. Journal of Applied Polymer Science. 2018 Apr;135(14):46098.
- 16- Bao JB, Junior AN, Weng GS, Wang J, Fang YW, Hu GH. Tensile and impact properties of microcellular isotactic polypropylene (PP) foams obtained by supercritical carbon dioxide. The Journal of Supercritical Fluids. 2016 May 1;111:63-73.
- 17- Mills NJ, Kang P. The effect of water immersion on the mechanical properties of polystyrene bead foam used in soft shell cycle helmets. Journal of cellular plastics. 1994 May;30(3):196-222.

داخل رسترها و جذب انرژی و انحراف بیشتر مسیر ترک و شکست توسط آن‌ها بود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از اعضای گروه تحقیقاتی تکنوفوم پلاست دانشگاه ارومیه ابراز می‌دارند. **تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل قسمتی از دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و نتایج تکمیلی این پژوهش در قالب مقاله‌ای جامع‌تر در دست آماده‌سازی برای ارسال به مجلات معتبر داخلی یا خارجی می‌باشد.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچگونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت کننده در تولید این مقاله (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: اصغر رسولی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقاله/نگارنده بحث (۲۵٪)، طاهر ازدست (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/روش شناس/تحلیل‌گر داده‌ها/بحث روی نتایج (۲۰٪)، حوریه محمدزاده (نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی/روش شناس/تحلیل‌گر داده‌ها (۱۵٪)، پیمان میهن‌خواه (نویسنده چهارم)، پژوهشگر فرعی/نگارنده مقاله/نگارنده بحث/بحث روی نتایج (۲۵٪)، زرگار حسن‌زاده (نویسنده پنجم)، پژوهشگر اصلی/روش شناس/تحلیل‌گر داده‌ها/بحث روی نتایج (۱۵٪).

منابع مالی: تامین هزینه‌های این پژوهش توسط دانشگاه ارومیه صورت گرفته است.

منابع

- Haider TP, Völker C, Kramm J, Landfester K, Wurm FR. Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019 Jan 2;58(1):50-62.
- Avérus L, Pollet E. Biodegradable polymers. In *Environmental silicate nano-biocomposites 2012* (pp. 13-39). Springer, London.
- Prabhu R, Devaraju A. Recent review of tribology, rheology of biodegradable and FDM compatible polymers. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Oct 22.
- Scaffaro R, Maio A, Gulino EF, Alaimo G, Morreale M. Green Composites Based on PLA and Agricultural or Marine Waste Prepared by FDM. *Polymers*. 2021 Jan;13(9):1361.
- Heidari-Rarani M, Ezati N, Sadeghi P, Badrossamay MR. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2020 Oct 12:0892705720964560.
- Azdast T, Hasanzadeh R. A review on principles and fundamentals of fabrication of polymeric foams in regards to increasing cell density/reducing cell size.