



## Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Hasanzadeh R.<sup>1</sup> PhD,  
Azdast T.<sup>1\*</sup> PhD

#### How to cite this article

Hasanzadeh R, Azdast T. Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(2):69-78

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

#### \*Correspondence

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

#### Article History

Received: November 30, 2020  
Accepted: December 27, 2020  
ePublished: February 3, 2021

### ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of poly lactic acid samples produced by FDM 3D printing technique were investigated. The 3D printing process parameters were optimized using design of experiment (DOE) Taguchi approach for achieving the optimum mechanical performance. In this regard, infill percentage (at three levels of 30, 50, and 70%), raster angle (at three states of 0/90, -30/30, and -45/45 degree), and layer thickness (at three levels of 200, 250, and 300  $\mu\text{m}$ ) were considered as process parameters for optimization procedure. Their effects on density (as porosity degree), impact strength (as mechanical property), and specific impact strength (the impact strength to density ratio) were investigated. Analysis of variance (ANOVA) was utilized to find the most effective processing parameters. The findings revealed that the infill percentage was the most effective parameter on the density and the impact strength. The density and the impact strength were reduced with the decrease of the infill percentage. These decrements were in a way that their ratio, specific impact strength, was almost constant. The layer thickness had the most influence on the specific impact strength. The specific impact strength was improved by reducing the layer thickness due to the raster entanglement. The optimum conditions to achieve the highest mechanical performance were the raster angle of 30/-30 degrees and the layer thickness of 200  $\mu\text{m}$ . The optimum infill percentage depended on the application.

**Keywords** 3D Printing, FDM, Biodegradable, Poly Lactic Acid, Mechanical Properties, Optimization

### CITATION LINKS

[1] 4D printing additive manufacturing review; Mechanism, Challenges, Applications and Future. [2] Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. [3] Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—A review. [4] Properties and biodegradability of polymer blends of poly (l-lactide) s with different optical purity of the lactate units. [5] Silver/poly (lactic acid) nanocomposites: preparation, characterization, and antibacterial activity. [6] Processing technologies for poly (lactic acid). [7] Fused deposition modeling with polypropylene. [8] Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. [9] Effect of nanoparticles on the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene specimens fabricated by fused deposition modeling. [10] Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling... [11] Studies on optimizing process parameters of fused deposition modelling technology for abs. [12] Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts. [13] The synergic effects of FDM 3D printing parameters on mechanical behaviors of bronze poly lactic acid composites. [14] Experimental Investigation of Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. [15] Post-Processing of FDM 3D-Printed Polylactic Acid Parts by Laser Beam Cutting. [16] Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. [17] Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. [18] 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling... [19] Preparation of polymeric foams with bimodal cell size... [20] Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. [21] Thermal Conductivity of Low-Density Polyethylene Foams Part II... [22] Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. [23] Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis.

## بهینه‌سازی شرایط فرآیندی چاپ سه بعدی FDM قطعات پلیمری زیست تخریب پذیر پلی لاکتیک اسید

رزگار حسن‌زاده PhD

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

ایران

طاهر ازدست \* PhD

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

ایران

### چکیده

در تحقیق حاضر، بررسی خواص مکانیکی قطعات پلی لاکتیک اسید تولیدشده با روش چاپگر سه بعدی FDM انجام گرفته است. بررسی و بهینه‌سازی شرایط فرآیندی چاپ سه بعدی توسط روش طراحی آزمایش (DOE) تاگوچی به منظور بهبود خواص قطعات پلی لاکتیک اسید در دستور کار قرار گرفته است. درصد پرشدگی (در سه سطح ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد)، زاویه رستر (در سه حالت ۳۰/۳۰، ۹۰/۳۰ و ۴۵/۴۵- درجه) و ضخامت لایه (در سه سطح ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میکرومتر) به عنوان پارامترهای فرآیندی انتخاب شده و اثر آن‌ها بر روی چگالی (به عنوان معیاری از تخلخل)، استحکام به ضربه (به عنوان معیاری از خواص مکانیکی) و استحکام به ضربه ویژه (نسبت استحکام به ضربه به چگالی) بررسی شده است. از آنالیز واریانس (ANOVA) به منظور شناسایی پارامترهای موثر فرآیندی استفاده گردید. نتایج نشان دادند که درصد پرشدگی موثرترین پارامتر بر روی چگالی و استحکام به ضربه می‌باشد و با کاهش آن، چگالی و استحکام به ضربه کاهش می‌یابند و این کاهش به گونه‌ای است که نسبت آن‌ها (استحکام به ضربه ویژه) تغییرات اندکی را تجربه می‌کند. ضخامت لایه موثرترین پارامتر بر روی استحکام به ضربه ویژه بود و با کاهش آن، استحکام به ضربه و استحکام به ضربه ویژه به دلیل تداخل رسترها افزایش یافت. شرایط بهینه برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی شامل زاویه رستر ۳۰/۳۰- درجه و ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر بود و درصد پرشدگی بایستی نسبت به کاربرد مدنظر بهینه گردد.

**کلیدواژه‌ها:** چاپگر سه بعدی، FDM، زیست تخریب پذیر، پلی‌لاکتیک اسید، خواص مکانیکی، بهینه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

\* نویسنده مسئول: tazdast@urmia.ac.ir

### ۱- مقدمه

به‌کارگیری فناوری‌های نوین را می‌توان از مهم‌ترین عوامل افزایش سرعت حرکت کشورها به سوی رشد و ترقی در حوزه صنعت دانست. روش‌های نمونه‌سازی و تولید سریع را می‌توان جزو فناوری‌های جدید در این زمینه برشمرد. این فناوری که در واقع تلفیقی از دانش نمونه‌سازی و رایانه است، علاوه بر سرعت بخشیدن به چرخه طراحی و ساخت، موجب افزایش دقت، کاهش زمان و هزینه‌ها در ساخت نمونه‌ها خواهد شد.

فرآیندهای نمونه‌سازی سریع (Rapid prototyping) به دسته‌ای از فرآیندهای ساخت و تولید اطلاق می‌گردد که در آن داده‌های هندسی سطوح به کمک رایانه طراحی شده و سپس مدل فیزیکی قطعه جامد به طور مستقیم با استفاده از آن‌ها ساخته می‌شود. مدل سه بعدی قطعه مورد نظر را می‌توان به کمک رایانه به هزاران لایه دوبعدی تقسیم نموده و هر لایه را بصورت جداگانه ایجاد نمود. قطعه نهایی با افزودن این لایه‌ها روی یکدیگر تهیه می‌گردد. سفارشی سازی، دسترسی آسان، قیمت نسبتاً پایین تجهیزات، سازگاری با محیط زیست و ساخت قطعات بسیار پیچیده بصورت تک مرحله‌ای را می‌توان از جمله مزایای این روش‌ها برشمرد.

در ابتدا فناوری چاپگرهای سه بعدی برای ساخت سریع و کم‌هزینه نمونه اولیه برای یک تولید انبوه طراحی شده بودند و بر همین اساس فناوری نمونه‌سازی سریع خوانده می‌شدند. سپس این فناوری به عنوان راه‌حلی برای تبدیل لایه‌های مواد به یک جسم جامد ارائه شد<sup>[1]</sup>.

با توجه به پیشرفت روزافزون و سریع فناوری چاپ سه بعدی، فرآیندهای تولیدی جدیدی در حال اضافه شدن هستند که بر اساس نوع فناوری بکار رفته در آن‌ها برای تولید قطعه نهایی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. شاید شناخته‌شده‌ترین روش چاپ سه بعدی، مدل‌سازی رسوب ذوب شده باشد. در این روش ماده اولیه به شکل رشته جامد (فیلامنت) در نازل دستگاه گرم می‌شود تا قابلیت جریان پذیری پیدا کند. سپس، این ماده از داخل روزنه نازل به شکل رشته‌های بسیار نازک‌تر با جریان پیوسته خارج شده و روی صفحه ساخت، در محل‌ها و مسیرهای کنترل شده نشانده می‌شود. سخت‌افزار این دستگاه با سازوکار کنترل عددی به کمک کامپیوتر است که یک یا دو نازل بسیار ظریف را جابه‌جا می‌کند. یکی از نازل‌ها برای پاشش مواد اصلی و دیگری برای پاشش مواد نگه‌دارنده (ساپورت) مدل به کار گرفته می‌شود. این روش نیز همانند سایر روش‌های چاپ سه بعدی دارای مزایا و معایبی است که از مزایای آن می‌توان به پایین بودن قیمت دستگاه و مواد اولیه، دقت چاپ نزدیک به مدل، استحکام خوب قطعات چاپ‌شده، توان تولید قطعات بزرگ بدون هدر رفت مقدار زیادی از مواد و سادگی کار با دستگاه اشاره نمود. از معایب این روش نیز می‌توان کیفیت سطح متوسط قطعات چاپ‌شده، سرعت به نسبت پایین ساخت و نیاز به ایجاد ساپورت در برخی از قطعات را برشمرد<sup>[2]</sup>.

پارامترهای متعددی در روش چاپ سه‌بعدی مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده دخیل هستند که بر روی کیفیت سطح نهایی، استحکام، کاهش ماده مصرفی و سایر ویژگی‌ها و خواص تأثیرگذار می‌باشند. این پارامترها را می‌توان در چهار گروه هندسی، مواد، ماشین و فرآیندی دسته‌بندی کرد<sup>[2]</sup>.

کربنات بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش مدل-سازی رسوب ذوب شده با اکریلونیتریل بوتادین استایرن و مقایسه آن‌ها با قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی پرداختند. آن‌ها برای به دست آوردن فیلامنت نانوکامپوزیتی، ابتدا اکریلونیتریل بوتادین استایرن را در یک اکسترودر با سرعت بالا مخلوط کرده و به صورت گرانول به دست آوردند. سپس گرانول‌های به دست آمده را به وسیله یک اکستروژن دو ماردرنه به فیلامنت تبدیل کردند. ایشان مشاهده کردند که در نمونه‌های خالص اکریلونیتریل بوتادین استایرن، استحکام کششی قطعات تولید شده با چاپگرهای سه بعدی ۷۰ درصد نمونه‌های تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی است. همچنین افزودن نانو ذرات، همسان گردی نمونه‌ها را کاهش داده ولی باعث بهبود استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی قطعات تولید شده به روش مدل-سازی رسوب ذوب شده می‌شود. استحکام کششی و استحکام خمشی نمونه‌های چاپ شده اکریلونیتریل بوتادین استایرن به ترتیب ۲۵/۷ درصد و ۱۷/۱ با افزودن نانورس افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که ذرات نانو کلسیم کربنات مقدار ناهمسان گردی را از ۴۱/۲ درصد به ۲۳/۹ درصد کاهش می‌دهد. چاکون و همکاران<sup>[10]</sup> تأثیر سه پارامتر ضخامت لایه، نرخ تغذیه فیلامنت و جهت ساخت نمونه‌ها را بر روی خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید مورد مطالعه قراردادند. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه‌هایی که در جهت عمود بر سطح صفحه چاپگر سه بعدی چاپ شده بودند، کمترین خواص مکانیکی را دارا بوده و بیشترین استحکام و سفتی مربوط به قطعات چاپ شده در جهت پهلو و تخت می‌باشند. همچنین ایشان مشاهده کردند که در نمونه‌های ایستاده با کاهش نرخ تغذیه، خواص مکانیکی کاهش و با افزایش ضخامت لایه‌ها خواص مکانیکی افزایش می‌یابد، با این حال ایشان متوجه شدند که این دو پارامتر یعنی ضخامت لایه‌ها و نرخ تغذیه فیلامنت روی خواص مکانیکی جهت ساخت تخت و بر روی پهلو تأثیر چندانی ندارد. ویشواس و همکاران<sup>[11]</sup> مطالعه بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی مدل‌سازی رسوب ذوب شده بر روی خواص قطعات اکریلونیتریل بوتادین استایرن را در دستور کار خود قراردادند. پارامترهایی که مورد مطالعه قرار گرفت شامل زوایای جهت‌ها، ضخامت لایه‌ها و ضخامت دیواره‌ها بودند. در این پژوهش ویشواس برای طراحی آزمایش‌های خود از روش تاگوچی بهره برد. ایشان مشاهده کردند که با زاویه جهات چاپ شده ۱۵ درجه، ضخامت دیواره ۰/۴ و ضخامت لایه ۰/۳ بیشترین مقدار استحکام کششی حاصل می‌شود. همچنین نشان داده شد که به ترتیب زاویه جهات چاپ، ضخامت دیواره‌ها و ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را روی استحکام کششی نهایی نمونه‌های چاپ شده داشتند. چانتی و همکاران<sup>[12]</sup> تأثیر افزودن تقویت‌کننده‌های دی‌برید زیرکونیم (ZrB<sub>2</sub>) و آلومینیوم با ابعاد ماکرو را بر روی خواص اکریلونیتریل

پلیمرهای زیست تخریب پذیر دسته‌ای از پلیمرها هستند که پس از فرآیند تجزیه به کمک میکرواورگانیزم‌ها به محصولات طبیعی از جمله آب، توده زیستی (باکتری‌ها و قارچ‌ها) و یا آنزیم‌ها و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند<sup>[3]</sup>. قابلیت کمپوست شدن پلیمرهای زیست تخریب پذیر را می‌توان از جمله مزیت‌های بسیار مهم آن‌ها برشمرد چرا که با توجه به هزینه‌ها و آلودگی-های بالای ناشی از عملیات بازیافت، این مواد به وسیله تجزیه بیولوژیکی فقط آب، دی‌اکسید کربن و ترکیبات ارگانیک بدون باقیمانده‌های سمی تولید می‌کنند<sup>[4]</sup>. پلی لاکتیک اسید در میان پلیمرهای زیست تخریب پذیر مبتنی بر منابع تجدید پذیر، بیشترین توجه را به خود جلب نموده است که به دلیل مزایای منحصر به فرد آن از جمله ماهیت تجدید پذیر، زیست تخریب پذیر، زیست سازگار، خواص مکانیکی و نوری مناسب، مقاومت بالا و فرآیند پذیری مناسب می‌باشد<sup>[5]</sup>. کاربرد پلی لاکتیک اسید در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی نیز به دلیل وجود ویژگی‌های شاخصی همچون سهولت فرآیندی، دامنه کاربرد وسیع برای انواع مختلف مواد غذایی، افزایش قابلیت ماندگاری مواد غذایی، شفافیت و مقاومت شیمیایی خوب در برابر چربی‌ها و روغن‌ها رو به افزایش است<sup>[6]</sup>. ویژگی‌های منحصر بفرود پلی لاکتیک اسید سبب شده است که نسبت به پلیمرهای مصنوعی با کاربرد یکسان مانند پلی استایرن و پلی اتیلن ترفتالات بیشتر مورد توجه قرار گیرد. از این رو امروزه استفاده از پلیمرهای زیست تخریب پذیر به ویژه پلی لاکتیک اسید در چاپگرهای سه بعدی به سرعت در حال افزایش است.

کارنیرو و همکاران<sup>[7]</sup>، تأثیر جهت‌گیری فیلامنت، ضخامت لایه‌ها، ماده استفاده شده و درجه پرشدگی را روی خصوصیات مکانیکی قطعات چاپ شده با پلی‌پروپیلن خالص و پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه، بررسی نمودند و نتایج زیر حاصل شد:

- استفاده از فیبرهای تقویت‌کننده منجر به خواص مکانیکی بهتر قطعات چاپ شده می‌شود.
- وجود محفظه به دلیل ایجاد شرایط عایق حرارتی بهتر، عملکرد نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد.
- ضخامت لایه‌ها تأثیر کمتر و درجه پرشدگی تأثیر محسوس و خطی روی خصوصیات مکانیکی داشتند.
- عملکرد چاپ در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد به مقادیر انتخاب شده برای پارامترها بستگی دارد.

ونگ و همکاران<sup>[8]</sup> به منظور بهبود خواص قطعه، اکریلونیتریل بوتادین استایرن را با نانورس اصلاح شده با مواد آلی ترکیب کردند. ایشان موفق شدند با اضافه کردن پنج درصد نانورس اصلاح شده خواص کششی را تا ۴۳ درصد بهبود ببخشند، درحالی‌که در تزریق این مقدار بهبود تا ۲۸/۹ مشاهده شد. منگ و همکاران<sup>[9]</sup> به بررسی اثر افزودن ذرات نانو رس و نانو کلسیم

خواص مکانیکی قطعات شناسایی شده و فرآیند بهینه‌سازی می‌گردد. چگالی به عنوان معیاری از خواص فیزیکی و استحکام به ضربه به عنوان معیاری از خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. دستاوردهای این تحقیق در راستای بهینه‌سازی شرایط فرآیندی قطعات پلیمری زیست تخریب پذیر تولید شده به روش چاپ سه بعدی FDM به منظور حصول خواص مکانیکی مطلوب قابل استفاده هستند.

## ۲- مواد و روش‌ها

پلی لاکتیک اسید ساخت شرکت کیمیکاس (Chemiekas) به شکل گرانول به عنوان فاز زمینه و با شاخص جریان مذاب 1.2 (190 °C, 2.16 kg) و چگالی 1.25 g/cm<sup>3</sup> تهیه گردید. از واحد رطوبت‌گیری دستگاه تزریق برای خشک کردن مواد استفاده شد. گرانول‌های پلی لاکتیک اسید در واحد رطوبت‌گیری دستگاه تزریق به مدت ۴ ساعت و در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. از دستگاه اکسترودر تک ماردرنه ساخت شرکت ایران تکنیک با نسبت طول به قطر ۲۵ و حداکثر دور ماردون ۵۰ دور بر دقیقه به منظور تبدیل گرانول‌ها به فیلامنت استفاده گردید. قالبی به قطر دو میلی‌متر بر روی خروجی دستگاه اکسترودر تعبیه گردید. دمای نواحی مختلف دستگاه اکسترودر از ناحیه تغذیه به خروجی به ترتیب بر روی ۱۵۰، ۱۷۰، ۱۹۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شدند. دور ماردون بر روی ۴ دور بر دقیقه ثابت گردید. به منظور تولید فیلامنت‌ها با قطر یکنواخت و پایدار، خروجی اکسترودر توسط یک فیلامنت‌ساز طراحی و ساخته شده توسط نویسندگان کشیده شد. از دستگاه چاپگر سه بعدی دلتا، ساخته شده توسط پژوهشگران برای تولید نمونه‌ها استفاده شد. تصویر این دستگاه در شکل ۱ قابل ملاحظه است.

به منظور حصول شرایط بهینه، نمونه‌های خالص پلی لاکتیک اسید در شرایط فرآیندی مختلف تولید و سپس آزمایش شدند. به این منظور، پارامترهای درصد پرشدگی، زاویه رستر و ضخامت لایه‌ها به عنوان پارامترهای فرآیندی لحاظ گردیدند. درصد پرشدگی در سه سطح ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تنظیم شد. در این شرایط، تخلخل ظاهری به ترتیب برابر ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد خواهد بود. زاویه رستر در سه حالت مختلف شامل حالت الف) ۹۰/۰ درجه، حالت ب) ۳۰/۳۰- درجه و حالت ج) ۴۵/۴۵- درجه تنظیم شد. شکل ۲ شماتیک سه حالت در نظر گرفته شده برای زاویه رستر را نشان می‌دهد.

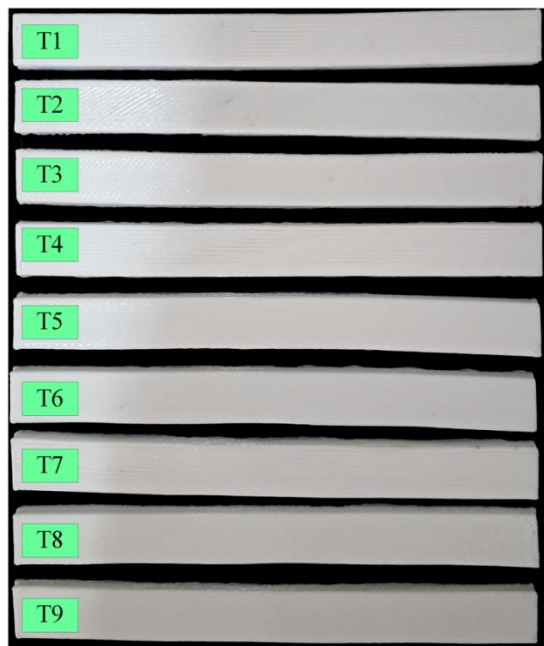
همچنین شایان ذکر است که برای ضخامت لایه‌ها سه حالت ۲۵۰ و ۳۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. قطر نازل خروجی دستگاه چاپگر سه بعدی، ۳۰۰ میکرومتر است. در واقع، ضخامت لایه‌ها میزان تداخل رسترها در یکدیگر را نشان می‌دهد. زمانی که ضخامت لایه‌ها در سطح اول یعنی ۲۰۰ میکرومتر تنظیم می‌شود یعنی رسترها به میزان ۱۰۰ میکرومتر تداخل پیدا خواهند کرد که

بوتادین استایرن بررسی کردند. نتیجه‌ای که از آزمون کشش نمونه‌ها حاصل شد این بود که در صورت استفاده از هر دو ماده، مقدار کرنش افزایش می‌یابد، یعنی ماده شکل‌پذیرتر می‌شود که این مقدار افزایش برای آلومینیوم بیشتر می‌باشد. در این پژوهش عنوان شد که با افزودن یک و نیم درصد مواد تقویت‌کننده، ۸۲/۵ درصد مقدار کرنش بهبود می‌یابد. همچنین اشاره شد که افزودن بیشتر تقویت‌کننده باعث می‌شود که قابلیت چاپ مواد کاهش یابد. مرادی و همکاران<sup>[13]</sup> به بررسی و بهینه‌سازی فرآیند چاپ سه بعدی FDM کامپوزیت‌های پلی لاکتیک اسید/برنز به روش سطح پاسخ پرداختند. ایشان ضخامت لایه، درصد پرشدگی و دمای اکسترودر را به عنوان پارامتر فرآیندی در نظر گرفتند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ضخامت لایه موثرترین پارامتر بر روی متغیرهای پاسخ بود. مرادی و همکاران<sup>[14,15]</sup> به بررسی تجربی فرآیند پس پردازش برش‌کاری لیزری قطعات پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش چاپ سه بعدی FDM پرداختند. آبیکن و همکاران<sup>[16]</sup> به بررسی مدول یانگ قطعات پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش چاپ سه بعدی FDM در الگوها، سرعت‌ها و چگالی‌های پر شدن مختلف پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که با افزایش درصد پر شدن، مدول یانگ افزایش یافته و بیش‌ترین مدول یانگ مربوط به درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد بود. مگری و همکاران<sup>[17]</sup> به بررسی اثر افزودن الیاف کوتاه کربن بر روی استحکام کششی قطعات پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش چاپ سه بعدی FDM پرداختند و نتیجه گرفتند که افزودن الیاف کوتاه کربن سبب افزایش استحکام کششی پلی لاکتیک اسید شد. مرادی و همکاران<sup>[18]</sup> بهینه‌سازی فرآیند چاپ سه بعدی FDM پلی لاکتیک اسید را به روش سطح پاسخ در دستور کار قرار دادند.

تولید قطعات پلیمری زیست تخریب پذیر به روش چاپگر سه بعدی، گستره‌ی کاربرد آن‌ها را بیشتر نموده است. هدف تحقیق حاضر، بهبود و بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات پلیمری زیست تخریب پذیر پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش چاپ سه بعدی با کنترل شرایط فرآیندی می‌باشد. سه پارامتر درصد پرشدگی، زاویه رستر و ضخامت لایه هر کدام در سه سطح به عنوان پارامترهای فرآیندی انتخاب شدند. بر این اساس، طراحی آزمایش‌های مناسب انجام خواهد گرفت و نمونه‌های مورد نظر با شرایط فرآیندی تولید خواهد شد. شایان ذکر است که در تحقیق حاضر از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است که در بین روش‌های طراحی آزمایش با کمترین تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه حداقل هزینه و زمان صرف شده، به بررسی و بهینه‌سازی فرآیند پرداخته شده است. آزمون‌های مکانیکی بر روی نمونه‌ها صورت گرفته و داده‌های حاصل از انجام آزمون‌ها با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تیب (Minitab) تحلیل شده و با استفاده از آنالیزهای سبگنال به نویز و تحلیل واریانس پارامترهای موثر بر

جدول (۱) جدول طراحی آزمایش‌ها مطابق آرایه متعامد L9 تاگوچی

آزمایش	درصد پرشدگی (%)	زاویه رستر	ضخامت لایه (میکرومتر)
۱	۳۰	۹۰/۰	۲۰۰
۲	۳۰	-۳۰/۳۰	۲۵۰
۳	۳۰	-۴۵/۴۵	۳۰۰
۴	۵۰	۹۰/۰	۲۵۰
۵	۵۰	-۳۰/۳۰	۳۰۰
۶	۵۰	-۴۵/۴۵	۲۰۰
۷	۷۰	۹۰/۰	۳۰۰
۸	۷۰	-۳۰/۳۰	۲۰۰
۹	۷۰	-۴۵/۴۵	۲۵۰

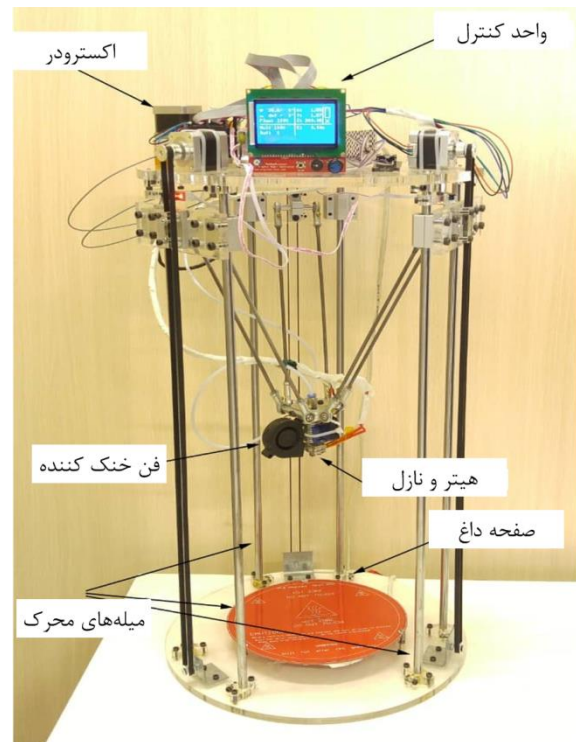


شکل ۳) تصویر تعدادی از نمونه‌های تولید شده برای آزمون ضربه

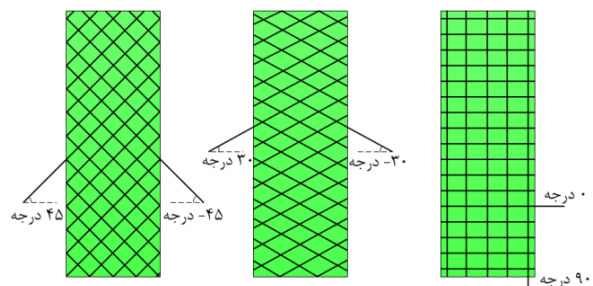
به منظور محاسبه چگالی نمونه‌ها از روش ارشمیدس استفاده گردید. اگر یک ظرف حاوی آب به چگالی  $\rho_w$  روی ترازوی دقیقی قرار گرفته باشد و جسمی به جرم  $M_b$  را در آن غوطه‌ور نماییم به طوری که تمام سطح آن را آب فراگیرد، در این صورت ترازو تغییر وزن  $\Delta M$  را نشان می‌دهد که برابر با جرم آب هم حجم جسم غوطه‌ور شده است. در این صورت چگالی نمونه ( $\rho_i$ ) مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [19]:

$$\rho_i = \frac{M_b}{\Delta M} \cdot \rho_w \quad (1)$$

از ترازوی JEWELRY BALANCE FX-300GD با دقت ۰/۰۰۱ گرم ساخت شرکت A&D Company به منظور توزین نمونه‌ها استفاده گردید. همچنین آب مقطر دو بار تقطیر شده ساخت شرکت Atlas Shimi با چگالی  $0.998 \text{ g/cm}^3$  به منظور انجام آزمایش ارشمیدس استفاده شد. قابل ذکر است که آزمون چگالی برای هر نمونه سه بار تکرار گردید و میانگین آن‌ها به عنوان داده نهایی گزارش شد.



شکل ۱) دستگاه چاپگر سه بعدی استفاده شده در تحقیق حاضر



شکل ۲) حالت‌های در نظر گرفته شده برای زاویه رستر شامل حالت الف) ۹۰/۰ درجه، حالت ب) ۳۰/۳۰ درجه و حالت ج) ۴۵/۴۵ درجه

باعث افزایش چسبندگی رسترها خواهد شد. به همین ترتیب در ضخامت لایه ۲۵۰ میکرومتر، تداخل به میزان ۵۰ میکرومتر در رسترها ایجاد خواهد شد. در ضخامت لایه ۳۰۰ میکرومتر، رسترها تداخلی نخواهند داشت و چسبندگی سطحی بین آن‌ها ایجاد خواهد گردید.

با توجه به سه پارامتر و سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها، از آرایه متعامد L9 تاگوچی برای تولید نمونه‌ها استفاده شد. شایان ذکر است که طراحی آزمایش‌ها و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار مینی‌ت‌ب صورت گرفته است. جدول ۱ طراحی آزمایش‌ها برای تولید نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

از هر سطح، ۳ نمونه تولید شد و نتایج بصورت میانگین ۳ آزمون انجام گرفته به همراه انحراف معیار گزارش گردید.

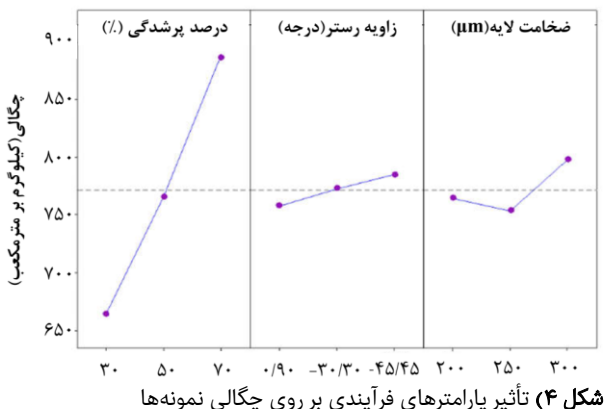
شکل ۳ تصویر نمونه‌های تولید شده برای آزمون ضربه را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نمونه‌های تولید شده دارای ابعاد  $۱۲۷ \times ۱۲۷ \times ۳/۲$  میلی‌متر می‌باشند.

جدول ۳) نتایج آنالیز واریانس برای چگالی

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	میزان مشارکت (%)
درصد پرشدگی	۲	۷۴۲۶۸/۷	۳۷۱۳۴/۴	۹۴/۳۳
زاویه رستر	۲	۱۰۸۷/۶	۵۴۳/۸	۱/۳۸
ضخامت لایه	۲	۳۱۸۰/۹	۱۵۹۰/۵	۴/۰۴
خطا	۲	۱۹۷/۳	۹۸/۶	۰/۲۵
مجموع	۸	۷۸۷۳۴/۵		۱۰۰
کفایت مدل: ۰/۹۹۷۵				

تخلخل نمونه‌ها با تنظیم درصد پرشدگی فراهم می‌باشد. شایان‌ذکر است که درصد پرشدگی به میزان ۹۴/۳۳٪ بر روی چگالی نمونه‌ها موثر بوده است. اثرگذاری این پارامتر از لحاظ آماری نیز به تأیید رسیده است. نتایج حکایت از این امر دارند که پارامترهای ضخامت لایه و زاویه رستر به ترتیب با میزان مشارکت ۴/۰۴ و ۱/۳۸ درصد در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند هرچند که اثرگذاری آن‌ها از لحاظ آماری قابل چشم‌پوشی است. شایان‌ذکر است که انتظار می‌رود که با بزرگ‌تر در نظر گرفتن محدوده ضخامت لایه، امکان اثرگذاری آن بر روی چگالی فراهم شود و بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود که کنترل ضخامت لایه منجر به کنترل محسوس چگالی و میزان تخلخل گردد [20]. مقدار R2 آنالیز واریانس برای نتایج چگالی به میزان ۹۹/۷۵٪ بود که حکایت از کفایت بسیار بالای مدل دارد [21].

نحوه تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی نتایج چگالی در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج، با کاهش درصد پرشدگی، چگالی نمونه‌ها بصورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. چگالی نمونه‌ها در درصد پرشدگی ۷۰ درصد برابر ۸۸۶/۶ kg.m<sup>-3</sup> بوده است که با کاهش درصد پرشدگی به ۵۰ درصد، به ۷۶۵/۳ kg.m<sup>-3</sup> کاهش یافته است. همچنین میزان چگالی نمونه‌ها در درصد پرشدگی ۳۰ درصد به مقدار ۶۶۴/۴ kg.m<sup>-3</sup> رسید. همان‌طور که قابل ملاحظه است، تأثیر دو پارامتر دیگر یعنی زاویه رستر و ضخامت لایه بر روی چگالی بسیار نامحسوس بوده و افزایش اندکی در چگالی با افزایش هر دو پارامتر مشاهده است که مطابق نتایج آنالیز واریانس، از لحاظ آماری قابل چشم‌پوشی هستند.



شکل ۴) تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی چگالی نمونه‌ها

همچنین برای بررسی خواص مکانیکی، از آزمایش ضربه شارپی بهره گرفته شد. به این منظور، از دستگاه آزمایش ضربه SBN استفاده شد. آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ASTM D6110 انجام گردید و از نمونه‌های بدون شکاف برای این منظور استفاده گردید. دستگاه استفاده‌شده دارای پاندولی به جرم ۲/۰۳۶ کیلوگرم با طول بازو ۳۹/۴۸ سانتی‌متر می‌باشد. پاندول از زاویه‌ی اولیه ۱۵۰ درجه رهاشده و پس از برخورد به نمونه تا زاویه نهایی  $\alpha_2$  بالا می‌رود. براین اساس استحکام به ضربه نمونه بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I.S. = \frac{P.L.(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{A} \quad (2)$$

که در این رابطه، I.S. استحکام به ضربه، P وزن پاندول، L طول پاندول، A مساحت سطح مقطع شکست نمونه،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به ترتیب زاویه اولیه و نهایی پاندول هستند.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حکایت از این امر داشتند که امکان دست‌یابی به تخلخل‌های بالا با کنترل درصد پرشدگی فراهم می‌باشد و چگالی نمونه‌ها بصورت چشمگیری نسبت به چگالی پلیمر پایه (۱۲۵۰ kg.m<sup>-3</sup>) کاهش یافته است. استحکام به ضربه به صورت نسبت انرژی جذب‌شده توسط نمونه به سطح مقطع نمونه گزارش گردیده است. استحکام به ضربه ویژه نیز بصورت نسبت استحکام به ضربه به چگالی نمونه‌ها تعریف و محاسبه گردیده است تا امکان مقایسه استحکام به ضربه نمونه‌ها نسبت به تخلخل آن‌ها فراهم باشد. پس از وارد نمودن نتایج در نرم‌افزار مینی‌تب به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

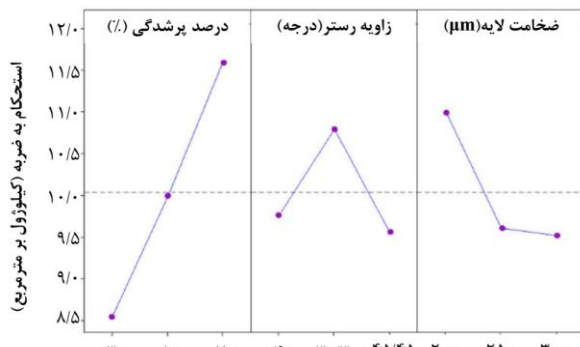
#### ۳-۱- تحلیل نتایج چگالی

به منظور بررسی میزان اثرگذاری و مشارکت پارامترها بر روی چگالی، از آنالیز واریانس روش تاگوچی استفاده گردید. این نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که چگالی نمونه‌ها بصورت قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از درصد پرشدگی می‌باشد و همان‌طور که انتظار می‌رفت امکان کنترل محسوس چگالی و

جدول ۲) نتایج آزمایش‌ها

آزمایش	چگالی (kg.m <sup>-3</sup> )	استحکام به ضربه (kJ.m <sup>-2</sup> )	استحکام به ضربه ویژه (J.m.kg <sup>-1</sup> )
۱	۶۴۹/۱ ± ۶۸/۵	۸/۹۶ ± ۱/۵۲	۱۳/۷۷ ± ۱/۱۲
۲	۶۴۵/۸ ± ۴۴/۳	۸/۵۳ ± ۱/۸۴	۱۳/۸۶ ± ۲/۰۲
۳	۶۹۸/۳ ± ۵۴/۸	۸/۰۸ ± ۰/۰۰	۱۱/۹۸ ± ۰/۷۰
۴	۷۲۸/۲ ± ۱/۶	۹/۸۳ ± ۰/۷۰	۱۳/۵۰ ± ۰/۰۳
۵	۷۹۸/۵ ± ۹/۴	۱۰/۰۰ ± ۰/۵۰	۱۲/۲۳ ± ۰/۵۲
۶	۷۶۹/۱ ± ۷/۸	۱۰/۱۴ ± ۱/۸۴	۱۳/۱۷ ± ۲/۲۷
۷	۸۹۷/۱ ± ۲۰/۹	۱۰/۴۶ ± ۲/۷۴	۱۱/۲۰ ± ۳/۵۲
۸	۸۷۵/۱ ± ۸۹/۱	۱۳/۸۵ ± ۴/۶۶	۱۴/۶۹ ± ۳/۳۰
۹	۸۸۷/۶ ± ۲۸/۳	۱۰/۴۶ ± ۲/۷۴	۱۱/۷۳ ± ۲/۷۱





شکل ۵) تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی استحکام به ضربه نمونه‌ها

به ضربه می‌شود، بصورتیکه با کاهش درصد پرشدگی از ۷۰ درصد به ۵۰ درصد، استحکام به ضربه به ترتیب از  $11/090 \text{ kJ.m}^{-2}$  به  $9/990 \text{ kJ.m}^{-2}$  و  $8/030 \text{ kJ.m}^{-2}$  کاهش یافته است. کاهش استحکام به ضربه در اثر کاهش درصد پرشدگی به دلیل افزایش تخلخل در نمونه‌های چاپ شده بوده است. بنابراین باید مقداری بهینه برای درصد پرشدگی یافت که نمونه‌های چاپ شده در کنار داشتن مقادیر مطلوب تخلخل، خواص مکانیکی مطلوبی نیز از خود ارائه دهند. نتایج نشان می‌دهد که استحکام به ضربه نمونه‌های چاپ شده با زاویه رستر  $30/30$  درجه بیشتر از نمونه‌های چاپ شده در زوایای رستر دیگر است که می‌تواند به دلیل جهت‌گیری رسترهای بیشتر در این حالت در راستای اعمال نیرو نسبت به دو حالت دیگر باشد. شایان‌ذکر است که استحکام به ضربه نمونه‌های چاپ شده در زوایای رستر  $90/0$  درجه و  $45/45$  درجه نزدیک به هم بوده است. همچنین نتایج حکایت از این امر داشتند که افزایش ضخامت لایه سبب کاهش استحکام به ضربه شده است و بیشترین استحکام به ضربه در نمونه‌های با ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر مشاهده گردید. نمونه‌های چاپ شده در ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر، تداخل رستر به میزان ۱۰۰ میکرومتر دارند و این تداخل رستر سبب مقاومت بیشتر نمونه در برابر نیروهای خارجی می‌گردد و منجر به افزایش انرژی جذب شده قبل از شکست توسط ضربه می‌گردد [22]. با کاهش ضخامت لایه‌ها، از تداخل رسترها با یکدیگر کاسته می‌شود و بنابراین انرژی کمتری توسط نمونه جذب می‌شود و متعاقباً استحکام به ضربه نمونه کاهش خواهد یافت.

به منظور حصول شرایط بهینه برای دست‌یابی به بیشترین استحکام به ضربه، از آنالیز سیگنال به نویز روش تاگوچی استفاده شد. این نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، درصد پرشدگی از لحاظ میزان اثرگذاری در رتبه اول و پارامترهای ضخامت لایه و زاویه رستر در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. این نتایج در تطابق با نتایج حاصل از آنالیز واریانس بود. مطابق نتایج آنالیز سیگنال به نویز،

به منظور حصول شرایط بهینه برای دست‌یابی به کمترین مقدار چگالی، از آنالیز سیگنال به نویز روش تاگوچی استفاده شد. این نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد، درصد پرشدگی از لحاظ اثرگذاری در رتبه اول قرار دارد و بعد از آن، ضخامت لایه و زاویه رستر در رتبه‌های دوم و سوم هستند که در تطابق با نتایج آنالیز واریانس است. مطابق نتایج آنالیز سیگنال به نویز، شرایط بهینه برای دست‌یابی به کمترین مقدار چگالی بصورت زیر است:

درصد پرشدگی ۳۰٪، زاویه رستر  $90/0$  درجه و ضخامت لایه ۲۵۰ میکرومتر

جدول ۴) نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای چگالی

سطح	درصد پرشدگی	زاویه رستر	ضخامت لایه
۱	-۵۶/۴۴	-۵۷/۵۲	-۵۷/۶۰
۲	-۵۷/۶۷	-۵۷/۷۰	-۵۷/۴۷
۳	-۵۸/۹۵	-۵۷/۸۵	-۵۷/۹۹
تغییرات	۲/۵۱	-۰/۳۴	۰/۵۲
رتبه	۱	۳	۲

هرچند شایان‌ذکر است که اثرگذاری زاویه رستر و ضخامت لایه از لحاظ آماری محسوس نبوده و می‌توان آن‌ها را بر روی سطوح دیگر نیز تنظیم نمود که بایستی سطوح بهینه را نسبت به خواص مکانیکی برای این دو پارامتر سنجید.

### ۲-۳- تحلیل نتایج استحکام به ضربه

به منظور بررسی میزان اثرگذاری و مشارکت پارامترها بر روی استحکام به ضربه از آنالیز واریانس روش تاگوچی استفاده گردید. این نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج بدست آمده، پارامتر درصد پرشدگی بیشترین تأثیر را بر روی استحکام به ضربه با میزان مشارکت  $63/40$  درصد داشته است. پس از آن، ضخامت لایه و زاویه رستر به ترتیب با میزان مشارکت  $11/88$  درصد و  $11/88$  درصد در رتبه‌های دوم و سوم از نظر اثرگذاری بر روی استحکام به ضربه قرار گرفته‌اند. مقدار  $R2$  آنالیز واریانس برای نتایج استحکام به ضربه به میزان  $93/75$  درصد بود که حکایت از کفایت بسیار مطلوب مدل دارد.

نحوه تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی نتایج استحکام به ضربه در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج حکایت از این امر دارند که کاهش درصد پرشدگی بصورت محسوس باعث کاهش استحکام

جدول ۵) نتایج آنالیز واریانس برای استحکام به ضربه

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	میزان مشارکت (%)
درصد پرشدگی	۲	۱۴/۰۵۵	۷/۰۲۷۶	۶۳/۴۰
زاویه رستر	۲	۲/۶۳۴	۱/۳۱۷۲	۱۱/۸۸
ضخامت لایه	۲	۴/۱۰۳	۲/۰۵۱۴	۱۸/۵۱
خطا	۲	۱/۳۷۷	۰/۶۸۸۶	۶/۲۱
مجموع	۸	۲۲/۱۷۰		۱۰۰
کفایت مدل: $0/9375$				

جدول ۶) نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای استحکام به ضربه

سطح	درصد پرشدگی	زاویه رستر	ضخامت لایه
۱	۱۸/۶۱	۱۹/۷۷	۲۰/۶۷
۲	۱۹/۹۹	۲۰/۴۸	۱۹/۶۲
۳	۲۱/۲۰	۱۹/۵۵	۱۹/۵۱
تغییرات	۲/۵۹	۰/۹۳	۱/۱۶
رتبه	۱	۳	۲

شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام به ضربه بصورت زیر است:

درصد پرشدگی ۷۰٪، زاویه رستر ۳۰/۳۰- درجه و ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر

هرچند شایان‌ذکر است که درصد پرشدگی ۷۰ درصد که به معنی تخلخل ظاهری ۳۰ درصد است، باعث از دست رفتن تخلخل به عنوان یکی از خواص مهم پلیمرهای زیست تخریب پذیر برای کاربردهای پزشکی مانند داربست‌های مهندسی بافت خواهد شد [23]. بنابراین همان طور که قبلاً ذکر گردید، بایستی حالتی بهینه یافت که همزمان با داشتن تخلخل بالا، خواص مکانیکی مطلوبی نیز حاصل گردد.

### ۳-۳- تحلیل نتایج استحکام به ضربه ویژه

استحکام به ضربه ویژه بصورت نسبت استحکام به ضربه به چگالی نمونه‌ها تعریف گردید. به منظور بررسی میزان اثرگذاری و مشارکت پارامترها بر روی استحکام به ضربه ویژه از آنالیز واریانس روش تاگوچی استفاده گردید. این نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج حکایت از این امر داشتند که ضخامت لایه با میزان مشارکت ۵۹/۹۸٪ بیشترین اثرگذاری را بر روی استحکام به ضربه ویژه داشته است. زاویه رستر و درصد پرشدگی با میزان مشارکت‌های به ترتیب برابر ۲۳/۵۹٪ و ۶/۲۴٪ در رتبه‌های دوم و سوم تأثیرگذاری بر روی استحکام به ضربه ویژه قرار دارند. ذکر این نکته جالب توجه است که پارامتر درصد پرشدگی بیشترین تأثیر را بر روی چگالی و استحکام به ضربه داشت ولی کمترین تأثیر را بر روی استحکام به ضربه ویژه داشته است که در ادامه به بیان دلیل آن پرداخته خواهد شد. همچنین مقدار R2 آنالیز واریانس برای نتایج استحکام به ضربه ویژه به میزان ۸۹/۸۱ درصد بود که حکایت از کفایت بسیار مطلوب مدل دارد.

جدول ۷) نتایج آنالیز واریانس برای استحکام به ضربه ویژه

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	میزان مشارکت (%)
درصد پرشدگی	۲	۰/۶۷۸۱	۰/۳۳۹۰	۶/۲۴
زاویه رستر	۲	۲/۵۶۳۸	۱/۲۸۱۹	۲۳/۵۹
ضخامت لایه	۲	۶/۵۲۰۳	۳/۲۶۰۱	۵۹/۹۸
خطا	۲	۱/۱۰۷۵	۰/۵۵۳۷	۱۰/۱۹
مجموع	۸	۱۰/۸۶۹۶		۱۰۰
کفایت مدل: ۰/۸۹۸۱				

نحوه تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی نتایج استحکام به ضربه ویژه در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش ضخامت لایه بصورت قابل‌ملاحظه‌ای سبب افزایش استحکام به ضربه ویژه شده است. از آنجایی که تغییرات ضخامت لایه اثر محسوسی بر روی چگالی نداشت، بنابراین انتظار می‌رود که تغییرات استحکام به ضربه ویژه نسبت به ضخامت لایه بصورت مستقیم ناشی از تغییرات استحکام به ضربه باشد. نتایج بخش قبل نشان داد که کاهش ضخامت لایه به دلیل افزایش تداخل رسترها سبب افزایش استحکام به ضربه می‌شود و بنابراین استحکام به ضربه ویژه نیز افزایش خواهد یافت. کاهش ضخامت لایه‌ها از ۳۰۰ میکرومتر به ۲۵۰ و ۲۰۰ میکرومتر به ترتیب سبب افزایش استحکام به ضربه ویژه از ۱۱/۸۰ J.m.kg<sup>-1</sup> به ۱۳/۰۳ و ۱۳/۸۸ J.m.kg<sup>-1</sup> شده است. استدلال مشابهی را برای زاویه رستر نیز می‌توان ارائه نمود. از آنجایی که تغییرات چگالی نسبت به زاویه رستر قابل چشم‌پوشی بود بنابراین تغییرات استحکام به ضربه ویژه را می‌توان مشابه تغییرات استحکام به ضربه پیش‌بینی نمود. با مقایسه تغییرات استحکام به ضربه و استحکام به ضربه ویژه نسبت به زاویه رستر، قابل مشاهده است که روند تغییرات یکسان بوده و نمونه‌های با زاویه رستر ۳۰/۳۰- بیشترین استحکام به ضربه ویژه را داشته‌اند. عملکرد بهتر زاویه رستر ۳۰/۳۰- به دلیل بالاتر بودن استحکام به ضربه در این حالت نسبت به دو حالت دیگر است. نکته حائز اهمیت، تأثیرگذاری اندک درصد پرشدگی بر روی استحکام به ضربه ویژه بوده است. کاهش درصد پرشدگی سبب کاهش استحکام به ضربه و کاهش چگالی شده بود. کاهش این دو پارامتر به گونه‌ای بوده است که نسبت آن‌ها (استحکام به ضربه ویژه) تقریباً بدون تغییر مانده است. هرچند که با کاهش درصد پرشدگی، روند افزایشی اندکی در استحکام به ضربه ویژه مشاهده شده است که نشان می‌دهد کاهش چگالی محسوس‌تر از کاهش استحکام به ضربه بوده است، به گونه‌ای که استحکام به ضربه ویژه اندکی افزایش یافته است.

به منظور حصول شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام به ضربه ویژه، از آنالیز سیگنال به نویز روش تاگوچی استفاده شد. این نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که از لحاظ میزان اثرگذاری، پارامترهای ضخامت لایه، زاویه رستر و درصد پرشدگی به ترتیب در رتبه‌های اول، دوم و سوم قرار دارند که در تطابق با نتایج آنالیز واریانس می‌باشد. مطابق نتایج آنالیز سیگنال به نویز، شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین استحکام به ضربه ویژه بصورت زیر است:

درصد پرشدگی ۳۰٪، زاویه رستر ۳۰/۳۰- درجه و ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر



بهبود یافت. این میزان بهبود در ضخامت لایه ۲۰۰ میکرومتر به میزان ۱۷/۶ درصد بود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از بنیاد ملی نخبگان ابراز می‌دارند.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

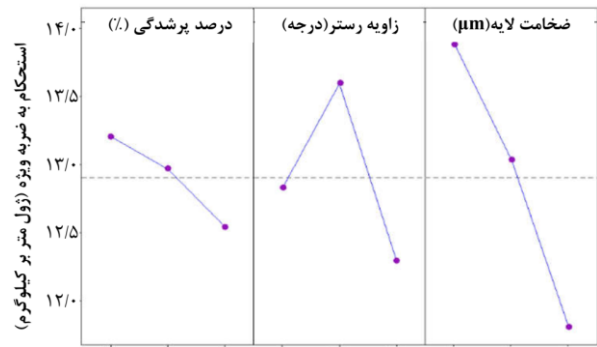
**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده در تولید این مقاله (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** زرگار حسن‌زاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقاله/نگارنده بحث/بحث روی نتایج/تحلیل‌گر داده‌ها (۵۰٪); طاهر ازدست (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/روش‌شناس/تحلیل‌گر داده‌ها (۵۰٪)

**منابع مالی:** منابع مالی انجام این پژوهش از طریق بنیاد ملی نخبگان تأمین شده است.

#### منابع

- Moradi M, Karami Moghadam M, Asgari F. 4D printing additive manufacturing review; Mechanism, Chalanges, Applications and Future. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):1063-1077.
- Zein I, Hutmacher DW, Tan KC, Teoh SH. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. Biomaterials. 2002;23(4):1169-1185.
- Lasprilla AJ, Martinez GA, Lunelli BH, Jardini AL, Maciel Filho R. Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—A review. Biotechnology advances. 2012;30(1):321-828.
- Urayama H, Kanamori T, Kimura Y. Properties and biodegradability of polymer blends of poly (l-lactide) s with different optical purity of the lactate units. Macromolecular materials and engineering. 2002;287(2):116-121.
- Shameli K, Ahmad MB, Yunus WM, Ibrahim NA, Rahman RA, Jokar M, Darroudi M. Silver/poly (lactic acid) nanocomposites: preparation, characterization, and antibacterial activity. International journal of nanomedicine. 2010;5:573.
- Lim LT, Auras R, Rubino M. Processing technologies for poly (lactic acid). Progress in polymer science. 2008;33(8):820-852.
- Carneiro OS, Silva AF, Gomes R. Fused deposition modeling with polypropylene. Materials & Design. 2015;83:768-776.
- Weng Z, Wang J, Senthil T, Wu L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. Materials & Design. 2016;102:276-283.
- Meng S, He H, Jia Y, Yu P, Huang B, Chen J. Effect of nanoparticles on the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene specimens fabricated



شکل ۶) تأثیر پارامترهای فرآیندی بر روی استحکام به ضربه ویژه نمونه‌ها

جدول ۸) نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای استحکام به ضربه ویژه

سطح	درصد پرشدگی	زاویه رستر	ضخامت لایه
۱	۲۲/۳۹	۲۲/۱۲	۲۲/۸۴
۲	۲۲/۲۵	۲۲/۶۴	۲۲/۲۸
۳	۲۱/۹۰	۲۱/۷۸	۲۱/۴۳
تغییرات	۰/۴۹	۰/۸۶	۱/۴۰
رتبه	۳	۲	۱

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، بررسی و بهینه‌سازی فرآیند چاپ سه بعدی نمونه‌های پلی لاکتیک اسید زیست تخریب پذیر به روش تاگوچی در دستور کار قرار گرفت. پارامترهای درصد پرشدگی، زاویه رستر و ضخامت لایه‌ها به عنوان پارامترهای فرآیندی در سه سطح مختلف در نظر گرفته شدند. مهم‌ترین دستاوردهای تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- امکان کنترل میزان تخلخل نمونه‌های پلی لاکتیک اسید زیست تخریب پذیر با کنترل پارامتر درصد پرشدگی فراهم می‌باشد. درصد پرشدگی با میزان تقریباً ۹۴ درصد مشارکت، موثرترین پارامتر بر روی چگالی نمونه‌ها بود. میزان چگالی نمونه‌ها در درصد پرشدگی ۷۰٪، ۵۰٪ و ۳۰٪ به میزان ۲۹٪، ۳۹٪ و ۴۷٪ پایین‌تر از چگالی ماده پایه بود.
- استحکام به ضربه نمونه‌ها به صورت چشمگیری و با میزان مشارکت حدود ۶۳٪ متأثر از پارامتر درصد پرشدگی بود. زاویه رستر و ضخامت لایه از لحاظ تأثیرگذاری بر روی استحکام به ضربه در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. کاهش درصد پرشدگی منجر به کاهش محسوس استحکام به ضربه گردید. نتایج حکایت از این امر داشتند که کاهش ضخامت لایه‌ها به دلیل افزایش تداخل رسترها منجر به افزایش استحکام به ضربه شد.
- ضخامت لایه با میزان مشارکت حدود ۶۰ درصد، موثرترین پارامتر بر روی استحکام به ضربه ویژه نمونه‌ها بود. با کاهش ضخامت لایه، استحکام به ضربه ویژه بصورت چشمگیری افزایش یافت. استحکام به ضربه ویژه با کاهش ضخامت لایه از ۳۰۰ میکرومتر به ۲۵۰ میکرومتر به میزان ۱۰/۴ درصد

- 22- Rahim TN, Abdullah AM, Md Akil H. Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*. 2019;59(4):589-624.
- 23- Karageorgiou V, Kaplan D. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. *Biomaterials*. 2005;26(27):5474-5491.
- by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017;134(7).
- 10- Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*. 2017;124:143-157.
- 11- Vishwas M, Basavaraj CK. Studies on optimizing process parameters of fused deposition modelling technology for abs. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(10):10994-11003.
- 12- Çanti E, Aydın M. Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2018;24(1):171-176.
- 13- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M. The synergic effects of FDM 3D printing parameters on mechanical behaviors of bronze poly lactic acid composites. *Journal of Composites Science*. 2020;4(1):17.
- 14- Moradi M, Falavandi H, Karami Moghadam M, Shaikh Mohammad Meiabadi M. Experimental Investigation of Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(4):999-1009.
- 15- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M, Falavandi H. Post-Processing of FDM 3D-Printed Polylactic Acid Parts by Laser Beam Cutting. *Polymers*. 2020;12(3):550.
- 16- Abeykoon C, Sri-Amphorn P, Fernando A. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2020;3(3):284-297.
- 17- El Magri A, El Mabrouk K, Vaudreuil S, Ebn Touhami M. Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019;0892705719847244.
- 18- Moradi M, Meiabadi S, Kaplan A. 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling; experimental characterization and production optimization. *Metals and Materials International*. 2019;25(5):1312-1325.
- 19- Chen Y, Weng C, Wang Z, Maertens T, Fan P, Chen F, Zhong M, Tan J, Yang J. Preparation of polymeric foams with bimodal cell size: An application of heterogeneous nucleation effect of nanofillers. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2019;147:107-115.
- 20- Asadi-Eydivand M, Solati-Hashjin M, Farzad A, Osman NA. Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;37:57-67.
- 21- Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A. Thermal Conductivity of Low-Density Polyethylene Foams Part II: Deep Investigation using Response Surface Methodology. *Journal of Thermal Science*. 2020;29(1):159-168.