



## بررسی تجربی اثر پارامترهای چاپ بر استحکام بین رشته‌ای در یک تک لایه از جنس پلی لاکتیک اسید چاپ شده به روش لایه نشانی ذوبی

مریم ابولی‌زاده<sup>۱</sup>، نسرين امین‌زاده<sup>۲</sup>، امین صفی جهان‌شاهی<sup>۲</sup>، بهنام آخوندی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۹ مهر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

چاپ سه‌بعدی

استحکام بین رشته‌ای

ساخت افزایشی

خواص مکانیکی

تحلیل حرارتی

فرآیند لایه نشانی ذوبی یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی است. در فرآیند لایه نشانی ذوبی هر لایه با قرارگیری رشته‌ها در کنار یکدیگر شکل می‌گیرد، با افزایش استحکام اتصال بین رشته‌ها و همچنین لایه‌ها می‌توان خواص مکانیکی قطعه چاپ شده را افزایش داد. لذا در این پژوهش در ابتدا رابطه بین دمای رشته لایه نشانی شده و پارامترهای چاپ به صورت تئوری بررسی می‌گردد. این امر سبب شناسایی و اثر هر پارامتر بر روی میزان افت دما در رشته لایه نشانی شده می‌شود. سپس اثر پارامترهای چاپ، شامل دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، سرعت چاپ و الگوی پر شدن، بر استحکام کششی یک تک لایه به منظور تعیین استحکام بین رشته‌ای بررسی می‌شود. نتایج تئوری بیان‌گر این امر است که زمانی که دمای نازل ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، عرض روزن‌رانی ۰٫۸ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰٫۳ میلی‌متر و سرعت چاپ ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه است، حداقل افت دما به میزان ۳۸ درصد از ۲۱۰ به ۱۵۲ درجه سانتی‌گراد در رشته لایه نشانی شده اتفاق می‌افتد. همچنین پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ، دمای نازل و عرض روزن‌رانی به ترتیب بیشترین اثر بر روی افت دما را دارند. حداکثر افت دما به میزان ۳۰٫۳ درصد از دمای ۲۱۰ به ۵۲ درجه سانتی‌گراد است. همچنین تحلیل واریانس نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که اثر پارامترهای الگوی پر شدن، سرعت چاپ، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و دمای نازل به ترتیب برابر با ۸۲٫۰۵، ۶٫۴۱، ۵٫۸۶، ۲٫۸۴ و ۲٫۸۴ درصد است. حداکثر استحکام کششی به مقدار ۷۲ مگاپاسکال برای نمونه‌ای که در آن دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، سرعت چاپ و الگوی پر شدن به ترتیب برابر با ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۸ میلی‌متر، ۰٫۳ میلی‌متر، ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه و زیگزاگ است، حاصل گردید. حداکثر میزان افزایش استحکام کششی در تمام نمونه‌ها به میزان ۱۰۹ درصد یعنی از ۳۴٫۵ به ۷۲ مگاپاسکال است. همچنین در نمونه‌هایی که در آن‌ها حداکثر استحکام بین رشته‌ای ایجاد شده است، نمونه دچار گلوبی شده و پارگی و جدایش بین رشته‌ای در نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

## Experimental investigation of printing parameters' effect on the inter-raster strength in a single layer of polylactic acid material printed by fused deposition modeling process

Maryam Abolizadeh<sup>1</sup>, Nasrin Aminizadeh<sup>2</sup>, Amin Safi Jahanshahi<sup>2</sup>, Behnam Akhoundi<sup>2\*</sup>

1- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran

\* Corresponding Author's Email: b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 19 July 2024

Accepted: 10 October 2024

Keywords:

3D Printing

Inter-Raster Strength

Additive Manufacturing

Mechanical Properties

Thermal Analysis

The fused deposition modeling process is one of the most widely used additive manufacturing methods. In this process, each layer is formed by placing rasters next to each other. By increasing the strength of the connection between the rasters and the layers, the mechanical properties of the printed part can be increased. Therefore, in this research, at first, the relationship between the temperature of the deposited raster and the printing parameters is theoretically determined. This causes the identification and effect of each parameter on the amount of temperature drop in the deposited raster. Then the effect of printing parameters, including nozzle temperature, extrusion width, layer height, printing speed, and filling pattern, on the tensile strength of a single layer is investigated to determine the inter-raster strength. The theoretical results show that when the nozzle temperature is 210°C, the extrusion width is 0.8 mm, the layer height is 0.3 mm, and the printing speed is 80 mm/s, the minimum temperature drop of 38% from 210 to 152 °C occurs in the deposited raster. Also, the parameters of layer height, printing speed, nozzle temperature, and extrusion width have the greatest effect on temperature drop respectively. The maximum temperature drop is 303% from 210 to 52 °C. Also, the variance analysis of the results of the tensile test shows that the effect of the parameters of the filling pattern, printing speed, extrusion width, layer height, and nozzle temperature are 82.05, 6.41, 5.86, 2.84 and 2.84%, respectively. The maximum tensile strength is 72 MPa for the sample where the nozzle temperature, extrusion width, layer height, printing speed, and filling pattern are equal to 210°C, 0.8 mm, 0.3 mm, 80 mm/s, and zigzag, respectively. The maximum increase in tensile strength in all samples is 109%, from 34.5 to 72 MPa. Also, in the samples in which the maximum inter-raster strength has been created, the necking phenomena occur, and inter-raster separation is not seen in the samples.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Abolizadeh M, Aminizadeh N, Safi Jahanshahi A, Akhoundi B. Experimental investigation of printing parameters' effect on the inter-raster strength in a single layer of polylactic acid material printed by fused deposition modeling process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Nov 21;11(9):1-12. doi: 10.22034/ijme.2024.468611.1986 [In Persian]

## ۱- مقدمه

فرایند لایه نشانی ذوبی یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که امروزه کاربرد فراوانی پیدا کرده است [۱]. در این روش پلیمری که به دمای ذوب رسیده است، لایه به لایه، و در مسیری از پیش تعیین شده، برای تولید مدل سه بعدی روی هم قرار می‌گیرند [۲]. فرایند لایه نشانی ذوبی به دلیل داشتن مزایایی از جمله تنوع ماده‌ی اولیه، عملکرد آسان، امکان ساخت آسان قطعات با هندسه پیچیده، نیاز نداشتن به انرژی زیاد، عدم دورریز ماده‌ی اولیه نسبت به سایر روش‌های ساخت مثل ماشین‌کاری، در دهه اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های تولید و ساخت قطعات مورد توجه قرار گرفته است [۳]. فرایند لایه نشانی ذوبی از یک ابزار نمونه‌سازی اولیه به یک ابزار تولیدی در حال حرکت است، ناهمسانگردی مکانیکی و استحکام مکانیکی پایین قطعات چاپی در این روش در مقایسه با قطعات تولید شده با روش‌های سنتی تولید، مانع از وقوع این تکامل می‌شود [۴]. یکی از مهم‌ترین مشکلات قطعات تولید شده توسط چاپگرهای سه بعدی، استحکام پایین قطعات تولید شده در این روش، نسبت به قطعات تولید شده در روش‌های دیگر مثل ماشین‌کاری، تزریق پلاستیک و شکل‌دهی است [۵]. از اصلی‌ترین عوامل اثرگذار بر استحکام قطعه‌ی تولید شده در فرایند لایه نشانی ذوبی، نحوه‌ی اتصال بین رشته‌ها و لایه‌ها در طی فرایند است. از آنجاکه تاریخچه دمایی و انتقال حرارت بین رشته‌ها و لایه‌ها بر نفوذ مولکولی در نقاط اتصال رشته‌ها و در نتیجه بر استحکام بین رشته‌ای و بین لایه‌ای اثر مستقیمی دارد، اگر بتوان شرایط را به گونه‌ای رقم زد که بیشترین استحکام در محل اتصال بین رشته‌ها و لایه‌ها ایجاد شود، انتظار می‌رود که استحکام قطعه تولیدی افزایش یابد، زیرا نفوذ مولکولی در نقاط اتصال به خوبی انجام می‌شود [۶]. ژائو و همکارانش [۷] بیان کردند که برای ایجاد یک اتصال بین رشته‌ای مطلوب، سه عامل دمای بستر، رشد ناحیه گلوگاه و عمل نفوذ مولکولی نقش مهمی دارند. استحکام بین لایه‌ای در قطعات تولید شده به روش لایه نشانی ذوبی، به نوع فیلامنت و پارامترهای چاپ بستگی دارد. برای اینکه استحکام بین رشته‌ای و بین لایه‌ای حداکثر شود، می‌توان از روش‌هایی مثل پیش‌گرمایش مادون قرمز، گرمایش ماکروویو، آنیل کردن و بهینه کردن پارامترهای چاپ استفاده کرد. پارامترهای چاپ تأثیر مستقیمی بر تاریخچه دمایی رشته‌ها دارد. به‌طور مثال با افزایش دمای نازل، مدت زمان سرد شدن قطعه تا رسیدن به دمای انتقال شیشه‌ای بیشتر شده و در اثر نفوذ مولکولی بهتر، استحکام قطعه نیز بیشتر می‌شود. اما نمی‌توان دمای نازل را به‌طور نامحدودی افزایش داد، زیرا باعث کاهش ویسکوزیته پلیمر می‌شود و این امر باعث می‌شود هندسه‌ی قطعه تولید شده منسجم نباشد [۷].

کومار و همکاران [۸] اثر پارامترهای ضخامت لایه، سرعت چاپ و دمای نازل را به منظور افزایش پیوند بین لایه‌ای قطعات پلی لاکتیک اسید بررسی و خواص مکانیکی کششی، خمشی و مقاومت به ضربه نمونه‌های چاپ شده را ارزیابی کردند. استحکام خمشی ۷۸،۵۲ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۴۵،۵۲ مگاپاسکال و مقاومت ضربه‌ای ۶،۲۱ کیلوژول بر مترمربع در ضخامت لایه ۰،۱ میلی‌متر، سرعت چاپ ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و دمای نازل ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل گردید. تامبورینو و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای چاپ بر مکانیسم‌های چسبندگی بین مواد مختلف (پلی لاکتیک اسید و پلی‌اورتان ترموپلاستیک، پلی لاکتیک اسید و پلی‌اتیلن کلردار، پلی‌اورتان ترموپلاستیک و پلی‌اتیلن کلردار) را در فرایند لایه نشانی ذوبی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که حتی زمانی که مکانیسم‌های ترمودینامیکی و انتشار چسبندگی به اندازه کافی قوی نیستند، پارامترهای چاپ از جمله پارامترهای حرارتی می‌تواند استحکام فصل مشترک را بهبود بخشد. سابیروف و همکاران [۱۰] با استفاده از یک سیستم لیزری استحکام بین لایه‌ای قطعات چاپ سه بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی را افزایش دادند. آن‌ها بیان کردند که افزایش ۱۰،۱۶ درصدی در استحکام کششی نهایی در توان ۲،۸۴ وات حاصل می‌گردد. رادزوان و همکاران [۱۱] بیان کردند که در صورتی که ماده فیلامنت کامپوزیتی باشد، اتصال بین لایه‌ای ضعیف است. آن‌ها بیان کردند که استفاده از تشعشعات مادون قرمز برای پیش گرم کردن سطح چاپ شده سبب می‌شود تا اتصال بین لایه‌ای مواد مرکب افزایش یابد. یو و همکاران [۱۲] اثرات گرمای کمکی بر پیوندهای بین لایه‌ای و عملکرد مکانیکی قطعات ساخته شده با روش لایه نشانی ذوبی را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که هنگامی که گرمایش کمکی اعمال شود، استحکام کششی قطعه چاپ شده از ۳۸،۴ مگاپاسکال به ۶۳،۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و درجه ناهمسانگردی مکانیکی از ۰،۵۱ به ۰،۲۲ کاهش می‌یابد. استاموپولوس و همکاران [۱۳] بیان کردند که تغییرات تاریخچه حرارتی در پلی آمید سبب افزایش چقرمگی شکست نمونه‌های چاپ شده به روش لایه نشانی ذوبی می‌شود. گائو و همکاران [۷] بیان کردند که خواص مکانیکی پایین قطعات چاپ شده با روش لایه نشانی ذوبی نتیجه یک رابط پیوند بین لایه‌ای ضعیف است که در طول فرایند لایه نشانی ایجاد می‌شود. بین و

همکاران [۱۴] تأثیر سه پارامتر دمای نازل، دمای بستر و سرعت چاپ، بر روی استحکام پیوند سطحی ساختارهای دو ماده‌ای پلی‌اورتان گرم‌مانرم و آکریلونیتریل بوتادین استایرن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل شده نشان داد که هنگامی که دمای بستر از ۳۰ به ۶۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت استحکام پیوند سطحی به‌طور قابل‌توجهی از ۰,۸۶ به ۱,۶۶ مگاپاسکال افزایش یافت. بله‌ومر و همکاران [۱۵]، نحوه‌ی اتصال بین رشته‌ها در فرایند لایه‌نشانی ذوبی و پارامترهای مؤثر بر آن را بررسی کردند. آن‌ها به بررسی نرخ رشد گلوگاه اتصال دو رشته مجاور پرداختند. آن‌ها با معرفی پارامتر نسبت شعاع ناحیه گلوگاه به شعاع فیلامنت، نرخ رشد گلوگاه را بررسی کردند. این پارامتر بر استحکام اتصال ایجاد شده بین رشته‌ها اثرگذار است و با فرض اینکه سطح مقطع رشته‌ها به‌صورت دایره‌ای است، هرچه مقدارش بزرگ‌تر و به یک نزدیک‌تر باشد، اتصال بین رشته‌ها به نحوه مطلوبی شکل گرفته است. آن‌ها اصلی‌ترین پارامترهای مؤثر بر رشد گلوگاه را دمای روزن‌رانی معرفی کردند. در فرایند لایه‌نشانی ذوبی، لایه‌ها و رشته‌ها تحت سرمایش و گرمایش مداوم قرار می‌گیرند. شکل سطح مقطع رشته‌ها تأثیر بسیار زیادی بر فرایند انتقال حرارت دارد. ژو و همکاران [۱۶] با بیان این مطلب، به بررسی اثر و سرعت چاپ بر هندسه رشته‌ها پرداختند زیرا هندسه‌ی سطح مقطع رشته‌ها بر فرایند انتقال حرارت تأثیر مستقیم می‌گذارد. برای این کار آن‌ها از فیلامنت نوع آکریلونیتریل بوتادین استایرن استفاده کردند، زیرا چگالی و ظرفیت گرمایی آن وابستگی کمی به دما دارد و بنابراین می‌توان بر رفتار حرارتی آن تمرکز کرد.

نکته مهم در اکثر پژوهش‌های پیشین تمرکز بیشتر بر استحکام بین لایه‌ای و بررسی تاریخچه دمایی رشته‌ها و اثر آن روی کیفیت اتصال است. در این پژوهش‌ها هندسه رشته به‌صورت بیضی در نظر گرفته شده است در حالی که شکل سطح مقطع رشته لایه‌نشانی شده یک مستطیل با گوشه‌های گرد است. همچنین آزمونی برای بررسی استحکام بین‌رشته‌ای در یک لایه تعیین نشده است. در این پژوهش هندسه رشته انتخاب شده به‌صورت واقعی یعنی مستطیل با گوشه‌های گرد در نظر گرفته شده و از آزمون کشش تک‌محوره برای بررسی اتصال بین‌رشته‌ای استفاده می‌گردد. علاوه بر این، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر استحکام بین رشته‌ای نظیر دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، سرعت چاپ و الگوی پر شدن بر روی استحکام بین‌رشته‌ای لایه‌های چاپ شده از جنس پلی لاکتیک اسید به روش لایه‌نشانی ذوبی به‌صورت تجربی بررسی می‌شود. همچنین با تحلیل‌های آماری بر روی نتایج حاصل شده مؤثرترین و کم‌اثرترین پارامتر بر روی استحکام بین رشته‌ای بیان می‌گردد.

## ۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

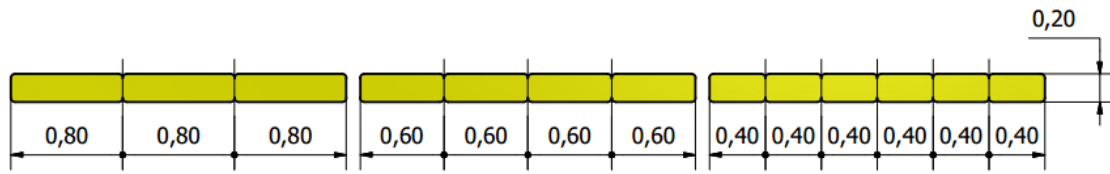
کلیه‌ی پارامترهای چاپ (جهت ساخت، زاویه رشته‌ها، عرض روزن‌رانی، دمای نازل، دمای بستر، دمای محیط، خواص حرارتی فیلامنت، ارتفاع لایه‌ها، سرعت چاپ، الگوی پر شدن، درصد پر شدن و غیره) بر روی استحکام بین رشته‌ای و لایه‌ای اثرگذار است. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر پارامترهای عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه‌ها، سرعت چاپ، دمای نازل و الگوی پر شدن بر روی استحکام بین رشته‌ای است. بدین منظور باید مقادیر این پارامترها در سطوح مختلف و به‌صورت منطقی مورد بررسی قرار گیرند. تغییرات دما در رشته‌ی لایه‌نشانی شده از معادله ۱ [۱۷] به دست می‌آید. همان‌طور که از این رابطه مشخص است دمای رشته‌ی لایه‌نشانی شده تابعی از پارامترهای چاپ و خواص فیزیکی و حرارتی فیلامنت است.

$$T(x) = (T_N - T_\infty) e^{(x/2)((\rho C v/k) - \sqrt{(\rho C v/k)^2 + 4(2h_{conv}(h+w))/kwh})} + T_\infty \quad (1)$$

در این معادله  $T(x)$  دما در هر نقطه از رشته،  $T_N$  دمای نازل،  $T_\infty$  دمای محیط،  $x$  فاصله از نازل،  $\rho$  چگالی (برای پلی لاکتیک اسید برابر با ۱۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب [۱۷])،  $C$  ظرفیت گرمایی ویژه (برای پلی لاکتیک اسید برابر با ۲۰۶۰ ژول بر کیلوگرم در درجه سانتی‌گراد [۱۷])،  $v$  سرعت چاپ بر حسب متر بر ثانیه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی (برای پلی لاکتیک اسید برابر با ۰,۱۹۵ وات بر متر در درجه سانتی‌گراد [۱۷])،  $h_{conv}$  ضریب جابجایی حرارتی (برای پلی لاکتیک اسید برابر با ۷۵ وات بر مترمربع در درجه سانتی‌گراد [۱۷])،  $h$  ارتفاع لایه‌ها و  $w$  عرض روزن‌رانی است.

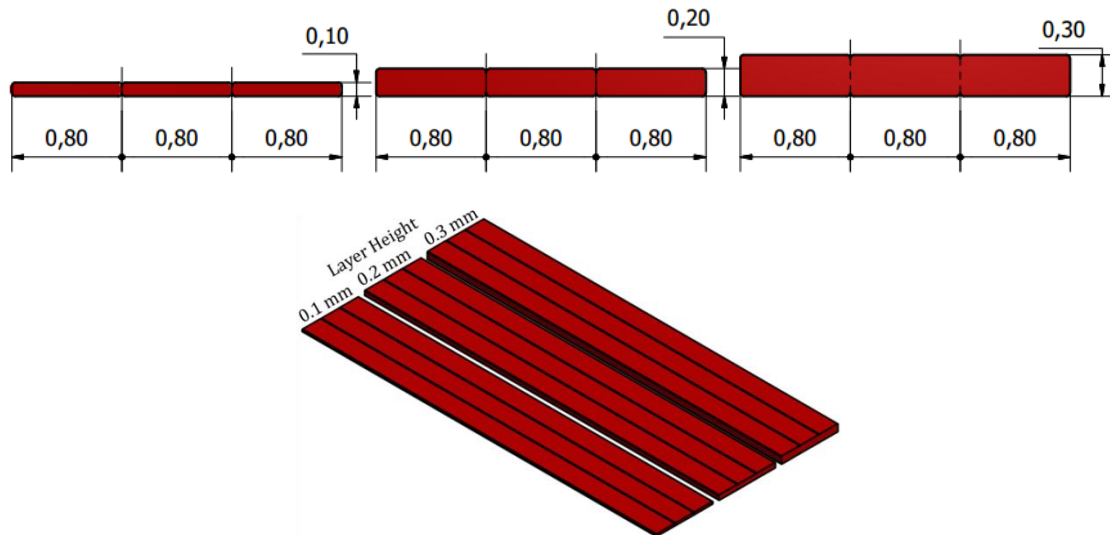
حال چگونگی انتخاب سطوح مختلف برای پارامترهای چاپ بررسی می‌گردد. همان‌گونه که از معادله ۱ مشخص است دمای نازل و محیط اثر مستقیم بر روی نرخ سرد شدن رشته‌ی لایه‌نشانی شده دارند. بدیهی است با افزایش دما، نرخ سرد شدن کاهش می‌یابد. ولی افزایش دما سبب تخریب پلیمر و یا اثرگذاری منفی بر روی صافی سطح و دقت ابعادی می‌گردد [۳، ۱۸]. همچنین عبوبی نظیر گرمای بیش‌ازحد در دماهای بالای نازل ایجاد می‌گردد [۱۹]. لذا دماهای انتخاب شده ۲۱۰، ۲۲۰ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد است. در دماهای بالاتر از ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد طبق نتایج تجربی اولیه، صافی سطح قطعه مطلوب نیست.

پارامتر بعدی، عرض روزنرانی است. بدیهی است با افزایش عرض روزنرانی به دلیل کم شدن تعداد اتصالات در یک لایه، استحکام نمونه افزایش می‌یابد. مقدار عرض روزنرانی و یا قطر نازل با توجه به شرایط نازل نیز دارای محدودیت است [۲، ۴، ۲۰-۲۲]. لذا سه سطح ۰،۴، ۰،۶ و ۰،۸ میلی‌متر (شکل ۱) در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از نازل با قطرهای بزرگ‌تر در مسیرهای متقاطع سبب ایجاد حفرات و فاصله بین خطوط صاف و منحنی در قطعات می‌گردد [۱۹].



شکل ۱ عرض روزنرانی در سه سطح ۰،۴، ۰،۶ و ۰،۸ میلی‌متر

پارامتر بعدی ارتفاع لایه است. با افزایش ارتفاع لایه زمان چاپ نمونه و یا قطعه کاهش می‌یابد ولی صافی سطح قطعه در راستای ساخت کاهش می‌یابد. از طرفی ارتفاع لایه تابعی از عرض روزنرانی است و مقدار توصیه شده برای آن نصف عرض روزنرانی است [۲۳]. لذا در این پژوهش سه مقدار ۰،۱، ۰،۲ و ۰،۳ میلی‌متر (شکل ۲) برای آن در نظر گرفته شده است. با افزایش ارتفاع لایه در چاپ یک تک لایه از طرفی سطح مقطع رشته‌ی لایه نشانی شده افزایش می‌یابد و انتظار این است که به دلیل افزایش سطح مقطع رشته‌ها که دارای استحکام بالاتری از استحکام بین رشته‌ای دارند، استحکام کششی افزایش یابد. از طرفی سطح ناحیه‌ی اتصال در امتداد رشته لایه نشانی شده افزایش می‌یابد که این امر سبب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. عامل مهم بعدی در مورد ارتفاع لایه، این است که هر چه ارتفاع لایه کم‌تر باشد سطح تماس دو رشته مجاور کمتر بوده و نفوذ مولکولی سریع‌تر اتفاق می‌افتد [۲۴]. لذا بررسی این امر که کدام یک از این سه عامل یعنی، افزایش سطح مقطع رشته، افزایش سطح اتصال و یا نفوذ سریع مولکولی اثر بیشتری دارد لازم و ضروری است. لذا در مورد این پارامتر نمی‌توان در حال حاضر پیش‌بینی خاصی نمود.

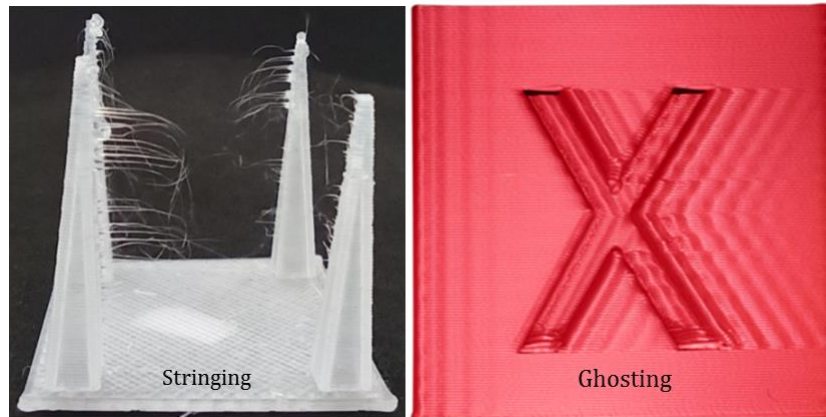


شکل ۲ ارتفاع لایه در سه سطح ۰،۱، ۰،۲ و ۰،۳ میلی‌متر و ناحیه اتصال در امتداد رشته لایه نشانی شده به صورت سه بعدی

سرعت چاپ بیشتر به معنی کاهش نرخ انتقال حرارت و اتصال قوی‌تر بین رشته‌ها است. از طرفی افزایش سرعت سبب ایجاد پدیده‌ای نامطلوب در قطعه نظیر کشیدگی رشته‌ی لایه نشانی شده، رشته‌زنی<sup>۱</sup> (شکل ۳)، شبح‌سازی<sup>۲</sup> (شکل ۳) و غیره می‌گردد [۱۹]. [۱۹]. لذا یافتن سطوح مطلوب این پارامتر نیز مهم است. سه سرعت معمول در چاپ قطعات [۲۵، ۲۶] یعنی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه به‌عنوان سه سطح برای چاپ نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

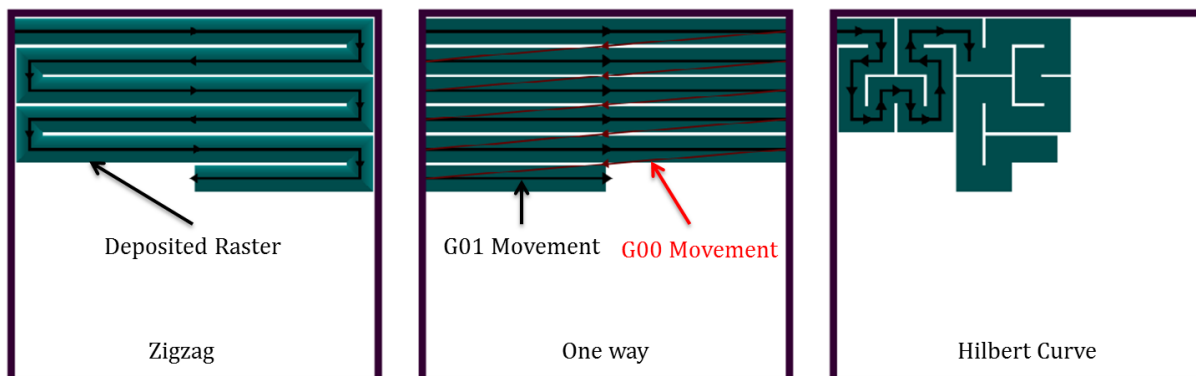
<sup>1</sup> Stringing

<sup>2</sup> Ghosting



شکل ۳ عیب‌های رشته زنی [۲۷] و شیخ‌سازی [۲۸] در فرآیند لایه نشانی ذوبی ناشی از سرعت چاپ زیاد

پارامتر بعدی مورد بررسی، الگوی پر شدن است. سه الگوی یک‌طرفه، زیگزاگ و منحنی هیلبرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در الگوی اول جهت رشته‌ها با جهت اعمال بار یکسان است و تفاوت آن‌ها در نقطه‌ی شروع نازل برای لایه نشانی است. در الگوی یک‌طرفه رشته‌ی دوم در حالی در کنار رشته‌ی اول قرار می‌گیرد که دمای آن پایین آمده است. ولی در الگوی زیگزاگ رشته‌ی دوم در حالی در کنار رشته‌ی اول قرار می‌گیرد که دمای رشته‌ی اول حداکثر است. درباره‌ی الگوی پر شدن منحنی هیلبرت نیز از آنجایی که رشته در فواصل کوتاه طولی و عرضی لایه نشانی می‌شود انتظار این است که اتصال بین رشته‌ای حداکثر باشد. ولی از طرفی در این الگو چون تمامی رشته‌ها در جهت اعمال بار نیستند باید دید که قرار گرفتن رشته در راستای اعمال بار مهم‌تر است یا قوی‌تر بودن اتصال بین رشته‌ای. این سه الگو در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴ سه الگوی پر شدن زیگزاگ، یک‌طرفه و منحنی هیلبرت. خطوط سبزرنگ رشته‌های لایه نشانی شده، فلش‌های سیاه‌رنگ به معنی حرکت همراه با لایه نشانی و فلش‌های قرمز رنگ حرکت سریع نازل بدون لایه نشانی است.

با انتخاب سطوح مناسب برای پارامترها و با توجه به زیاد بودن تعداد آن‌ها از آرایه متعامد ال ۲۷ تاگوچی (جدول ۱) برای طراحی آزمایش استفاده می‌گردد.

دمای بستر، ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است تا به افزایش استحکام بین رشته‌ای کمک کند. همچنین درصد پر شدن صد است، زیرا در درصد پر شدن صد، حداکثر استحکام حاصل می‌گردد. همچنین نمونه‌ها بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۶۳۸ نوع ۱۴ برای یک تک لایه چاپ می‌شوند. از هر نمونه تعداد ۳ عدد چاپ و میانگین نتایج بیان می‌گردد. فیلامنت مورد استفاده دارای قطر ۱،۷۵ میلی‌متر (بیلدر<sup>۲</sup>، ساخت هلند) است. برای چاپ نمونه‌ها از چاپگر سه‌بعدی (بیلدر پریمیوم<sup>۳</sup>، ساخت هلند) با قابلیت چاپ قطعه با ابعاد ۲۱۰ میلی‌متر در راستای طول و عرض و ۲۰۰ میلی‌متر در راستای ارتفاع استفاده می‌شود. برای ارزیابی استحکام کششی

<sup>1</sup> ASTM D638 Type IV

<sup>2</sup> Builder

<sup>3</sup> Builder Premium

نمونه‌های چاپ شده از دستگاه سنتام ۲۰ (ساخت ایران) استفاده شد. حداکثر تنش در نمودار تنش کرنش به عنوان استحکام کششی در نظر گرفته می‌شود. معیار اصلی برای بررسی استحکام بین رشته‌ای مطلوب این است که شکست قطعه از ناحیه‌ی اتصال بین رشته‌ها رخ ندهد و حداکثر استحکام بین رشته‌ای زمانی اتفاقات که نمونه دچار گلوبی شده و در این حالت نیز جدایش بین رشته‌ای اتفاق نیفتد. به عبارت دیگر هرچه کرنش شکست بالاتر باشد، استحکام بین رشته‌ای بیشتر است.

جدول ۱ پارامترهای چاپ و سطوح آن‌ها بر اساس پارامتر متعامد ال ۲۷ تاگوچی

| شماره نمونه | دمای نازل<br>(درجه سانتی‌گراد) | عرض روزن‌رانی<br>(میلی‌متر) | ارتفاع لایه<br>(میلی‌متر) | سرعت چاپ<br>(میلی‌متر بر دقیقه) | الگوی پر شدن |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------|
| ۱           | ۲۱۰                            | ۰,۴                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | یک‌طرفه      |
| ۲           | ۲۱۰                            | ۰,۴                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | زیگزاگ       |
| ۳           | ۲۱۰                            | ۰,۴                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۴           | ۲۱۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۶۰                              | یک‌طرفه      |
| ۵           | ۲۱۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۶۰                              | زیگزاگ       |
| ۶           | ۲۱۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۶۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۷           | ۲۱۰                            | ۰,۸                         | ۰,۳                       | ۸۰                              | یک‌طرفه      |
| ۸           | ۲۱۰                            | ۰,۸                         | ۰,۳                       | ۸۰                              | زیگزاگ       |
| ۹           | ۲۱۰                            | ۰,۸                         | ۰,۳                       | ۸۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۱۰          | ۲۲۰                            | ۰,۴                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | یک‌طرفه      |
| ۱۱          | ۲۲۰                            | ۰,۴                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | زیگزاگ       |
| ۱۲          | ۲۲۰                            | ۰,۴                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۱۳          | ۲۲۰                            | ۰,۶                         | ۰,۳                       | ۴۰                              | یک‌طرفه      |
| ۱۴          | ۲۲۰                            | ۰,۶                         | ۰,۳                       | ۴۰                              | زیگزاگ       |
| ۱۵          | ۲۲۰                            | ۰,۶                         | ۰,۳                       | ۴۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۱۶          | ۲۲۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۶۰                              | یک‌طرفه      |
| ۱۷          | ۲۲۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۶۰                              | زیگزاگ       |
| ۱۸          | ۲۲۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۶۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۱۹          | ۲۳۰                            | ۰,۴                         | ۰,۳                       | ۶۰                              | یک‌طرفه      |
| ۲۰          | ۲۳۰                            | ۰,۴                         | ۰,۳                       | ۶۰                              | زیگزاگ       |
| ۲۱          | ۲۳۰                            | ۰,۴                         | ۰,۳                       | ۶۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۲۲          | ۲۳۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | یک‌طرفه      |
| ۲۳          | ۲۳۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | زیگزاگ       |
| ۲۴          | ۲۳۰                            | ۰,۶                         | ۰,۲                       | ۸۰                              | منحنی هیلبرت |
| ۲۵          | ۲۳۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | یک‌طرفه      |
| ۲۶          | ۲۳۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | زیگزاگ       |
| ۲۷          | ۲۳۰                            | ۰,۸                         | ۰,۱                       | ۴۰                              | منحنی هیلبرت |

### ۳- نتایج و بحث

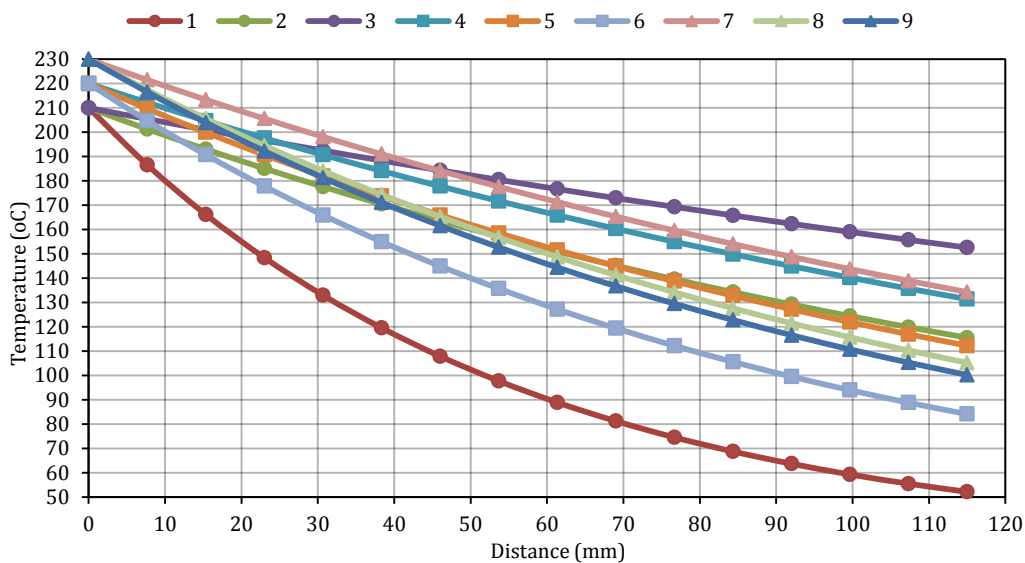
این بخش در دو قسمت بررسی اثر پارامترها بر روی افت دما و بررسی اثر پارامترها بر روی استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- بررسی اثر پارامترها بر روی افت دما

اگر از پارامتر الگوی پر شدن صرف نظر شود، ۹ آزمایش به شرح جدول ۲ حاصل می‌گردد. اگر نمودار افت دما بر اساس پارامترهای موجود در جدول ۲ و با توجه به معادله ۱ رسم شود، شکل ۵ حاصل می‌شود. این شکل برای فاصله ۱۱۵ میلی‌متر (حداکثر اندازه در نمونه آزمون کشش) رسم شده است. نقطه شروع، دمای نازل است و به این معناست که نازل به آن نقطه رسیده است. نقطه انتهایی نقطه شروع فرآیند چاپ است و دمای آن با حرکت نازل به نقطه شروع کاهش یافته است. بدیهی است که هر چه افت دما کمتر باشد اتصال بین رشته‌ای قوی‌تر خواهد بود. با توجه به شکل می‌توان گفت حداکثر افت دما به مقدار ۱۵۷٫۸ درجه سانتی‌گراد برای حالتی است که پارامترهای دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و سرعت چاپ به ترتیب برابر با ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۴ میلی‌متر، ۰٫۱ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه است. کمینه افت دما به مقدار ۵۷٫۴ برای حالتی است که پارامترهای دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و سرعت چاپ به ترتیب برابر با ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۸ میلی‌متر، ۰٫۳ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه است. بنابراین انتظار این است که در نمونه‌هایی که با پارامترهای دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و سرعت چاپ به ترتیب برابر با ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۸ میلی‌متر، ۰٫۳ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه چاپ شده‌اند حداکثر استحکام بین لایه‌ای حاصل گردد. همچنین در نمونه‌هایی با پارامترهای دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و سرعت چاپ به ترتیب برابر با ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۴ میلی‌متر، ۰٫۳ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و نیز ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۰٫۴ میلی‌متر، ۰٫۲ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه میزان افت دما کم و استحکام بین رشته‌ای بالا است.

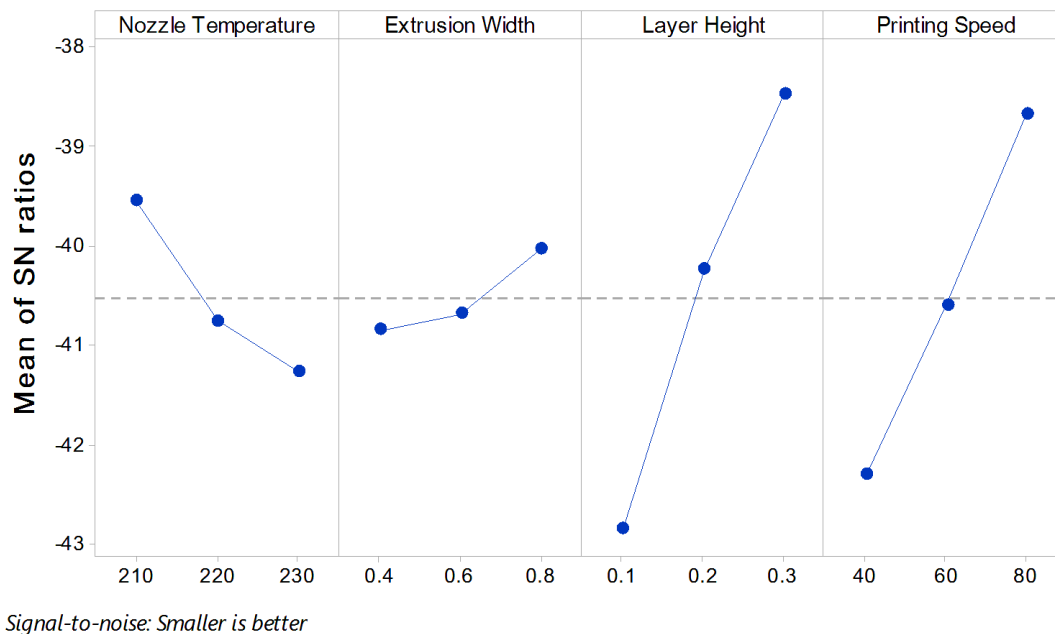
جدول ۲ پارامترهای چاپ و سطوح آن‌ها بدون در نظر گرفتن پارامتر الگوی پر شدن

| شماره نمونه | دمای نازل (درجه سانتی‌گراد) | عرض روزن‌رانی (میلی‌متر) | ارتفاع لایه (میلی‌متر) | سرعت چاپ (میلی‌متر بر دقیقه) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| ۱           | ۲۱۰                         | ۰٫۴                      | ۰٫۱                    | ۴۰                           |
| ۲           | ۲۱۰                         | ۰٫۶                      | ۰٫۲                    | ۶۰                           |
| ۳           | ۲۱۰                         | ۰٫۸                      | ۰٫۳                    | ۸۰                           |
| ۴           | ۲۲۰                         | ۰٫۴                      | ۰٫۲                    | ۸۰                           |
| ۵           | ۲۲۰                         | ۰٫۶                      | ۰٫۳                    | ۴۰                           |
| ۶           | ۲۲۰                         | ۰٫۸                      | ۰٫۱                    | ۶۰                           |
| ۷           | ۲۳۰                         | ۰٫۴                      | ۰٫۳                    | ۶۰                           |
| ۸           | ۲۳۰                         | ۰٫۶                      | ۰٫۱                    | ۸۰                           |
| ۹           | ۲۳۰                         | ۰٫۸                      | ۰٫۲                    | ۴۰                           |



شکل ۵ میزان تغییرات دما در رشته لایه نشانی شده برای نمونه‌ها بر اساس معادله ۱ و با مقادیر پارامترهای جدول ۲

تحلیل سیگنال به نویز برای بررسی اثر پارامترهای چاپ بر میزان افت دمای رشته لایه نشانی شده در شکل ۶ آمده است. در اینجا هر چه افت دما کمتر باشد مطلوب‌تر است، به عبارت دیگر حداقل بهتر است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ، دمای نازل و عرض روزن‌رانی به ترتیب بیشترین اثر بر روی افت دما را داشته و دلیل اصلی این امر شرایط حاکم بر انتقال حرارت یک‌رشته لایه نشانی شده بر اساس رابطه ۱ است.



شکل ۶ تحلیل سیگنال به نویز برای بررسی اثر پارامترهای چاپ بر میزان افت دمای رشته لایه نشانی شده

### ۳-۲- بررسی اثر پارامترها بر روی استحکام کششی

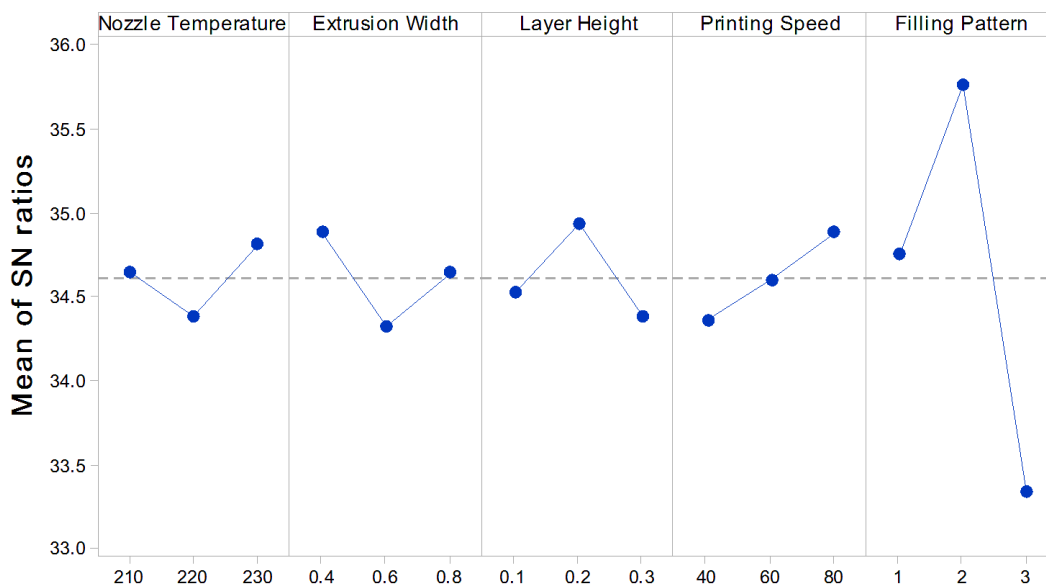
در این بخش نتایج حاصل از آزمون کشش بررسی می‌گردد. مقدار استحکام کششی برای هر نمونه در جدول ۳ آمده است. از آنجایی که تنها استحکام کششی یک تک لایه مورد بررسی قرار گرفته است انتظار این است که مقادیر استحکام کششی به دست آمده از مقادیر استحکام کششی برای یک نمونه با چندلایه بیشتر باشد. زیرا در نمونه‌هایی که چندلایه هستند اتصال بین لایه‌های نیز وجود داشته و به دلیل کم بودن استحکام بین لایه‌های خواص مکانیکی کششی کاهش می‌یابد. حداکثر استحکام به دست آمده در این پژوهش ۷۲ مگاپاسکال است که در مقایسه با مرجع [۸]، ۵۸ درصد و در مقایسه با مرجع [۱۷]، ۱۳ درصد بیشتر است.

نمودار پاسخ برای نسبت سیگنال به نویز برای استحکام کششی در شکل ۷ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوی پر شدن اثر بسیار زیادی بر استحکام نمونه و در نتیجه استحکام بین رشته‌ای دارد. بعد از الگوی پر شدن پارامترهای ارتفاع لایه، دمای نازل، سرعت چاپ و عرض روزن‌رانی به ترتیب دارای بیشترین اثر بر روی استحکام کششی هستند. با تحلیل واریانس مشخص شد که اثر پارامترهای الگوی پر شدن، سرعت چاپ، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و دمای نازل بر استحکام کششی به ترتیب برابر با ۸۲،۰۵، ۶،۴۱، ۵،۸۶، ۲،۸۴ و ۲،۸۴ درصد است.

اصلی‌ترین دلیل برای اینکه استحکام بیشتری در الگوی یک‌طرفه و زیگزاگ حاصل می‌شود این است که رشته‌ها در راستای اعمال بار قرار گرفته‌اند. حال برای اینکه مشخص شود چرا الگوی زیگزاگ از الگوی تک طرفه عملکرد بهتری دارد سه رشته چاپ شده را برای این دو الگو برای حالتی که حداکثر و حداقل افت دما اتفاق می‌افتد ترسیم می‌گردد (شکل ۸). همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است در الگوی زیگزاگ همواره دو ناحیه با حداکثر دما در تماس باهم هستند که در این نواحی حداکثر استحکام بین رشته‌ای اتفاق می‌افتد. ولی در الگوی یک‌طرفه همواره یک ناحیه با دمای حداکثر در کنار یک ناحیه با حداکثر افت دما قرار دارد و لذا استحکام بین رشته‌ای نسبت به الگوی زیگزاگ کاهش می‌یابد.

جدول ۳ مقادیر استحکام کششی برای نمونه‌ها بر اساس جدول ۱

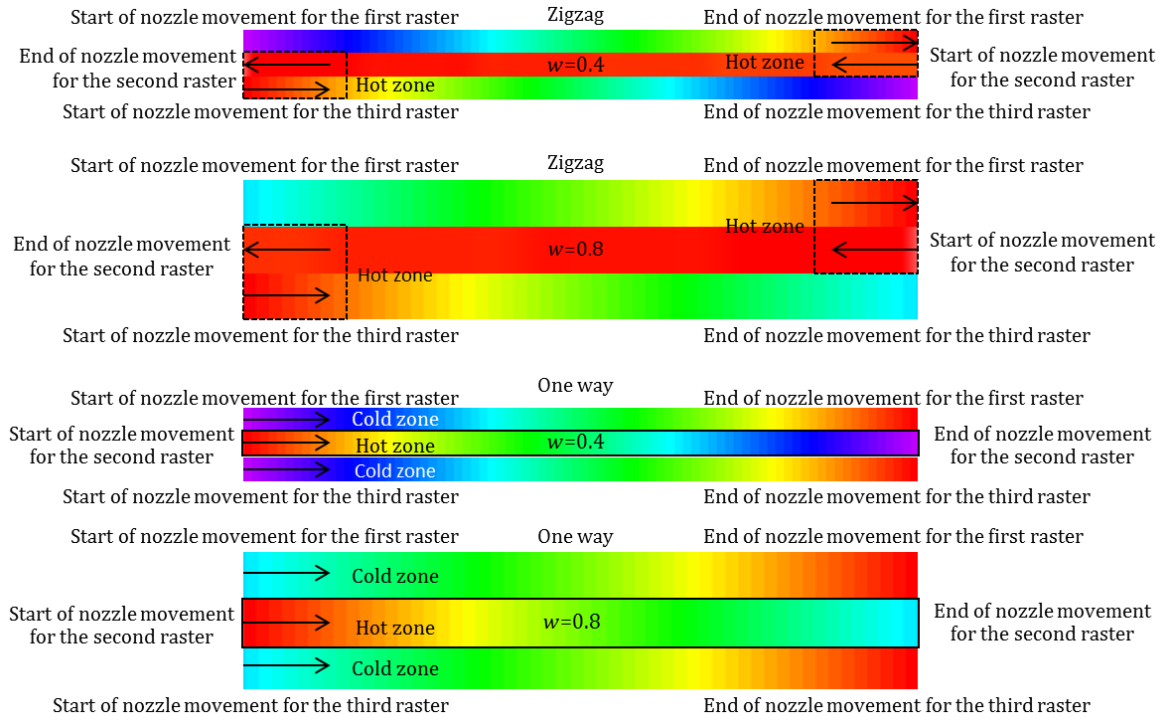
| شماره نمونه بر اساس جدول ۱ | استحکام کششی (مگاپاسکال) | شماره نمونه بر اساس جدول ۱ | استحکام کششی (مگاپاسکال) |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| ۱                          | ۴۲,۴۰                    | ۱۵                         | ۵۰,۰۶                    |
| ۲                          | ۵۳,۸۱                    | ۱۶                         | ۵۳,۸۳                    |
| ۳                          | ۶۳,۶۰                    | ۱۷                         | ۵۶,۸۱                    |
| ۴                          | ۴۱,۰۳                    | ۱۸                         | ۵۳,۶۱                    |
| ۵                          | ۶۱,۵۲                    | ۱۹                         | ۶۱,۶۳                    |
| ۶                          | ۶۷,۶۰                    | ۲۰                         | ۴۷,۸۸                    |
| ۷                          | ۴۰,۳۵                    | ۲۱                         | ۶۴,۸۰                    |
| ۸                          | ۵۲,۳۶                    | ۲۲                         | ۷۲,۰۰                    |
| ۹                          | ۵۹,۵۰                    | ۲۳                         | ۳۴,۵۰                    |
| ۱۰                         | ۵۱,۴۰                    | ۲۴                         | ۵۸,۳۰                    |
| ۱۱                         | ۵۰,۲۴                    | ۲۵                         | ۶۵,۵۰                    |
| ۱۲                         | ۵۸,۴۲                    | ۲۶                         | ۵۰,۵۰                    |
| ۱۳                         | ۵۸,۴۰                    | ۲۷                         | ۴۸,۸۴                    |
| ۱۴                         |                          |                            | ۵۳,۰۹                    |



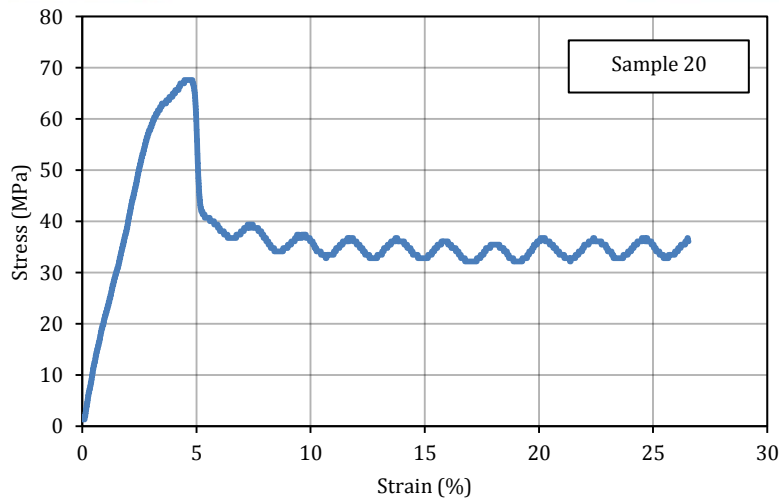
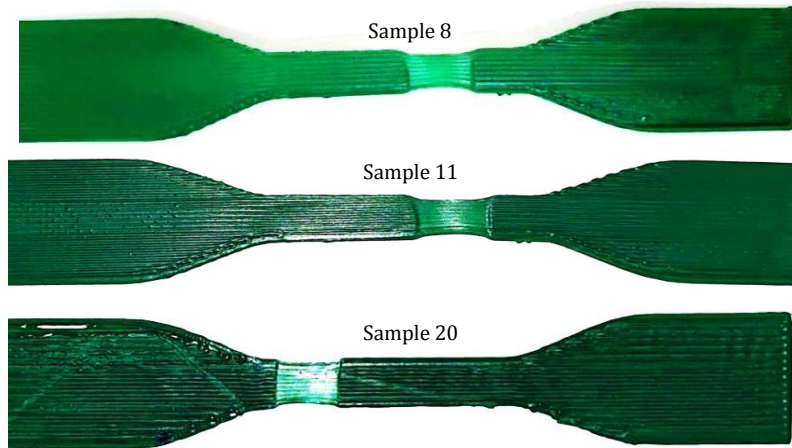
Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۷ تحلیل سیگنال به نویز برای بررسی اثر پارامترهای چاپ بر استحکام کششی تک لایه

همچنین حداکثر استحکام بین رشته‌ای مربوط به نمونه‌های شماره ۸، ۱۱ و ۲۰ است که شکل این نمونه‌ها در شکل ۹ آمده است. همان‌گونه که مشخص است به دلیل بالا بودن استحکام بین رشته‌ای جدایش رشته‌ها و شکست در ناحیه اتصال رشته‌ها رخ نداده است و نمونه‌ها همچون فلزات همگن دچار پدیده گلوبی شده‌اند. همچنین نمودار تنش کرنش نمونه ۲۰ شماره در شکل ۹ آمده است. تمامی نمونه‌هایی که در آن‌ها استحکام بین لایه‌ای بالا است و پدیده گلوبی شدن هنگام کشش رخ می‌دهد نمودار تنش و کرنشی مشابه این نمودار دارند. بعد از رسیدن تنش به حداکثر، میزان تنش افت کرده و تغییرات تنش به صورت سینوسی به ازای افزایش کرنش صورت می‌گیرد.



شکل ۸ نحوه توزیع دما در رشته در دو الگوی زیگزاگ و یک‌طرفه با عرض‌های روزن‌رانی ۰,۴ و ۰,۶ میلی‌متر



شکل ۹ نمونه‌های شماره ۸، ۱۱ و ۲۰ بعد از آزمون کشش، تشکیل گلوپی و بالاترین میزان استحکام بین لایه‌ای و نمودار تنش کرنش برای نمونه ۲۰

## ۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بیشینه‌سازی استحکام بین رشته‌ای در یک تک لایه از جنس پلی لاکتیک اسید، چاپ سه‌بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی است. در این راستا ابتدا رابطه بین دمای رشته لایه نشانی شده و پارامترهای چاپ به صورت تئوری تعیین گردید. سپس اثر پارامترهای چاپ، شامل دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و سرعت چاپ بر افت دمای رشته لایه نشانی شده بررسی گردید. در ادامه اثر پارامترهای دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، سرعت چاپ و الگوی پر شدن بر روی استحکام کششی یک تک لایه به منظور تعیین استحکام بین‌رشته‌ای بررسی می‌شود. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- نتایج تئوری بیان‌گر این امر است که زمانی که دمای نازل ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، عرض روزن‌رانی ۰.۸ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰.۳ میلی‌متر و سرعت چاپ ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه است حداقل افت دما در رشته لایه نشانی شده اتفاق می‌افتد.
- پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ، دمای نازل و عرض روزن‌رانی به ترتیب بیشترین اثر بر روی افت دما را دارند.
- نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که اثر پارامترهای الگوی پر شدن، سرعت چاپ، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه و دمای نازل به ترتیب برابر با ۸۲.۰۵، ۶.۴۱، ۵.۸۶، ۲.۸۴ و ۲.۸۴ درصد است.
- حداکثر استحکام کششی به مقدار ۷۲ مگاپاسکال برای نمونه‌ای که در آن دمای نازل، عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، سرعت چاپ و الگوی پر شدن به ترتیب برابر با ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، ۰.۸ میلی‌متر، ۰.۳ میلی‌متر، ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه و زیگزاگ است، حاصل گردید.
- در نمونه‌هایی که در آن‌ها حداکثر استحکام بین‌رشته‌ای ایجاد شده است، نمونه دچار گلیبی شده و پارگی و جدایش بین رشته‌ای در نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

## References

- [1] 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 Mar 20;11(1):51-60. doi: [10.22034/ijme.2024.442326.1929](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.442326.1929) [In Persian]
- [2] Kechagias JD. Surface roughness assessment of ABS and PLA filament 3D printing parts: structural parameters experimentation and semi-empirical modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Aug 12:1-2. doi: [10.1007/s00170-024-14232-0](https://doi.org/10.1007/s00170-024-14232-0)
- [3] 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 Jan 21;10(11):16-23. doi: [10.22034/ijme.2024.429126.1885](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.429126.1885) [In Persian]
- [4] Wei X, Bähr R. A comparative study of 3D printing with virgin and recycled polylactic acid filaments. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024 Nov 1;54:75-84. doi: [10.1016/j.cirpj.2024.08.007](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.08.007)
- [5] Dhanapal R, Alagumalai V, Shanmugam V. Exploring the dynamic mechanical properties of fused filament fabrication printed polyetheretherketone with various infill patterns. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024 Sep 16:1-6. doi: [10.1007/s40964-024-00792-w](https://doi.org/10.1007/s40964-024-00792-w)
- [6] Kechagias JD, Zaoutsos SP, Fountas NA, Vaxevanidis NM. Experimental investigation and neural network development for modeling tensile properties of polymethyl methacrylate (PMMA) filament material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Sep 11:1-2. doi: [10.1007/s00170-024-14402-0](https://doi.org/10.1007/s00170-024-14402-0)
- [7] Gao X, Qi S, Kuang X, Su Y, Li J, Wang D. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*. 2021 Jan 1;37:101658. doi: [10.1016/j.addma.2020.101658](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658)
- [8] Kumar MS, Farooq MU, Ross NS, Yang CH, Kavimani V, Adediran AA. Achieving effective interlayer bonding of PLA parts during the material extrusion process with enhanced mechanical properties. *Scientific Reports*. 2023 Apr 26;13(1):6800. doi: [10.1038/s41598-023-33510-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-33510-7)
- [9] Tamburrino F, Graziosi S, Bordegoni M. The influence of slicing parameters on the multi-material adhesion mechanisms of FDM printed parts: An exploratory study. *Virtual and Physical Prototyping*. 2019 Oct 2;14(4):316-32. doi: [10.1080/17452759.2019.1607758](https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1607758)
- [10] Sabyrov N, Abilgazyev A, Ali MH. Enhancing interlayer bonding strength of FDM 3D printing technology by diode laser-assisted system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 May;108:603-11. doi: [10.1007/s00170-020-05455-y](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05455-y)

- [11] Radzuan NA, Sulong AB, Verma A, Muhamad N. Layup sequence and interfacial bonding of additively manufactured polymeric composite: A brief review. *Nanotechnology Reviews*. 2021 Nov 20;10(1):1853-72. doi: [10.1515/ntrev-2021-0116](https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0116)
- [12] Yu N, Sun X, Wang Z, Zhang D, Li J. Effects of auxiliary heat on the interlayer bonds and mechanical performance of polylactide manufactured through fused deposition modeling. *Polymer Testing*. 2021 Dec 1;104:107390. doi: [10.1016/j.polymertesting.2021.107390](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107390)
- [13] Stamopoulos AG, Scipioni SI, Lambiase F. Experimental characterization of the interlayer fracture toughness of FDM components. *Composite Structures*. 2023 Sep 15;320:117213. doi: [10.1016/j.compstruct.2023.117213](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117213)
- [14] Yin J, Lu C, Fu J, Huang Y, Zheng Y. Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*. 2018 Jul 15;150:104-12. doi: [10.1016/j.matdes.2018.04.029](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.029)
- [15] Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of manufacturing processes*. 2004 Jan 1;6(2):170-8. doi: [10.1016/S1526-6125\(04\)70071-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7)
- [16] Xu D, Zhang Y, Pigeonneau F. Thermal analysis of the fused filament fabrication printing process: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Material Forming*. 2021 Jul;14:763-76. doi: [10.1007/s12289-020-01591-8](https://doi.org/10.1007/s12289-020-01591-8)
- [17] Akhoundi B, Behraves AH. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products. *Experimental Mechanics*. 2019 Jul 15;59:883-97. doi: [10.1007/s11340-018-00467-y](https://doi.org/10.1007/s11340-018-00467-y)
- [18] Akhoundi B, Modanloo V. Investigation and feasibility of printing polyoxymethylene semi-crystalline polymer parts with fused filament fabrication 3D printer and evaluation of mechanical properties of the printed samples. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023 Aug 21:1-0. doi: [10.1007/s11665-023-08619-5](https://doi.org/10.1007/s11665-023-08619-5)
- [19] Galati M, Minetola P. On the measure of the aesthetic quality of 3D printed plastic parts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2020 Jun;14(2):381-92. doi: [10.1007/s12008-019-00627-x](https://doi.org/10.1007/s12008-019-00627-x)
- [20] Sadaghian H, Khodadoost S, Seifiasl A, Buswell RA. Preliminary Insight Into Torsion of Additively-Manufactured Poly(lactic Acid) (PLA)-Based Polymers. *Experimental Mechanics*. 2024 Sep 6:1-22. doi: [10.1007/s11340-024-01105-6](https://doi.org/10.1007/s11340-024-01105-6)
- [21] Sidim G, Dogu M, Ozbek B. Manufacturing and characterization of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide filaments via melt impregnation method. *Polymer Composites*. 2024. doi: [10.1002/pc.29021](https://doi.org/10.1002/pc.29021)
- [22] Sohrabian M, Masnavian Motlagh A, Sameezadeh M, Kakhki M. Heat treatment of FDM and SLS delicate additive manufacturing products: mechanical properties enhancement and dimensional accuracy. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024 Sep 16:1-6. doi: [10.1007/s40964-024-00796-6](https://doi.org/10.1007/s40964-024-00796-6)
- [23] Akhoundi B, Behraves 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 Jan;234(1-2):243-59. doi: [10.1177/0954405419843780](https://doi.org/10.1177/0954405419843780)
- [24] Vaes D, Coppens M, Goderis B, Zoetelief W, Van Puyvelde P. The extent of interlayer bond strength during fused filament fabrication of nylon copolymers: An interplay between thermal history and crystalline morphology. *Polymers*. 2021 Aug 11;13(16):2677. doi: [10.3390/polym13162677](https://doi.org/10.3390/polym13162677)
- [25] Akhoundi B, Hajami F. Extruded polymer instability study of the polylactic acid in fused filament fabrication process: printing speed effects on tensile strength. *Polymer Engineering & Science*. 2022 Dec;62(12):4145-55. doi: [10.1002/pen.26174](https://doi.org/10.1002/pen.26174)
- [26] 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 Jan;36(1):162-81. doi: [10.1177/0892705721997534](https://doi.org/10.1177/0892705721997534)
- [27] Paraskevoudis K, Karayannis P, Koumoulos EP. Real-time 3D printing remote defect detection (stringing) with computer vision and artificial intelligence. *Processes*. 2020 Nov 16;8(11):1464. doi: [10.3390/pr8111464](https://doi.org/10.3390/pr8111464)
- [28] Eva SC, Sover A, Ermolai V. The impact of the G-code flavour selection in FFF. In 4th International Conference Business Meets Technology 2022 2023 Jan 10 (pp. 54-62). Editorial Universitat Politècnica de València. doi: [10.4995/BMT2022.2022.15547](https://doi.org/10.4995/BMT2022.2022.15547)