

Original Research

Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM)

Ali Asgari Aghdam¹, Yaghoub Dadgar Asl^{2*}, Mohamad Morad Sheikhy³

¹MSc Student, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Enghelab-e Eslami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

³Associate Professor, Department of Manufacturing, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.26.2020

Revised: 01.06.2021

Accepted: 01.26.2021

Keyword:

Additive manufacturing
Polyoxymethylene (POM)
Fused deposition modeling
(FDM)
Mechanical properties

***Corresponding Author:**

Yaghoub Dadgar Asl

Email: ydadgar@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the effect of variable parameters of 3D printing on tensile, compressive and bending strengths and impact resistance of parts made of Polyoxymethylene by Fused Deposition Modeling (FDM) method was investigated. The appropriate solution for printing the first layer and the best level for each variable was provided to achieve the best print quality of parts. In addition, the effect of layer height, nozzle temperature, filling pattern and print filling angle on the mechanical properties (compressive and bending strengths and impact and compressive resistance) of the parts was investigated and the Taguchi method used to design experiments and determine the effects. According to the results of the experiments, the highest tensile and bending strengths were obtained in wiggly and rectilinear print patterns, respectively. For impact testing, the Wiggly Print pattern provided the maximum impact energy. Finally, for pressure testing, the best conditions were observed in the rectilinear pattern. In the impact test, the nozzle temperature and print pattern were the most effective parameters, while in the pressure test, the print pattern was the most effective parameter. In addition, the best print temperature was reported to be 260 °C.

بررسی تأثیر متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس پلی اکسی متیلن با استفاده از پرینتر سه بعدی به روش رسوب گذاری لایه ای (FDM)

علی عسگری اقدم^۱، یعقوب دادگراصل^{۲*}، محمدمراد شبخی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه ای استان تهران، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای متغیر چاپ سه بعدی روی استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار قطعات ساخته شده از جنس پلی اکسی متیلن به روش رسوب گذاری لایه ای پرداخته شده است و راه حل مناسب برای پرینت لایه اول و بهترین سطح مربوط به هر متغیر برای رسیدن به بهترین کیفیت پرینت قطعات ارائه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای نازل، الگوی پرشوندگی و زاویه پرشوندگی پرینت روی خواص مکانیکی (استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت به ضربه و فشار) قطعات، بررسی شده است و از روش تاگوچی برای طراحی آزمایشها و تعیین میزان تأثیر هر کدام از متغیرها استفاده شده است. مطابق با نتایج آزمایشها، بالاترین استحکام کششی و خمشی به ترتیب در الگوهای پرینت ویگل و ریکتیلینیر حاصل شد. برای آزمایش ضربه، الگوی پرینت ویگل، بیشترین انرژی ضربه را فراهم آورد. در نهایت برای آزمایش فشار، بهترین شرایط در الگوی ریکتیلینیر مشاهده شد. در آزمایش ضربه، دمای نازل و الگوی پرینت به ترتیب به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها و در آزمایش فشار، الگوی پرینت تأثیرگذارترین پارامتر بود. همچنین بهترین دمای پرینت ۲۶۰ درجه سانتی گراد گزارش شد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

کلید واژگان:

ساخت افزایشی

پلی اکسی متیلن (POM)

پرینت سه بعدی FDM

خواص مکانیکی

*نویسنده مسئول: یعقوب دادگراصل

پست الکترونیکی:

ydadgar@tvu.ac.ir

مقدمه

در بافت‌های بدن، از زمان معرفی اولین دستگاه‌های تجاری نمونه‌سازی سریع در سال ۱۹۸۶، طیف گسترده‌ای از اولین ماشین‌ها جنبه تجاری یافته و بسیاری از سیستم‌های جدید در نقاط مختلف جهان، ظهور پیدا کرده‌اند. نمونه‌سازی سریع به‌عنوان یک تکنولوژی کلیدی مطرح شده است که موجب کوتاه‌شدن زمان توسعه محصولات از حیث ساخت نمونه اولیه می‌شود [۱]. روش رسوب‌گذاری لایه‌ای، گسترده‌ترین روش در بخش نمونه‌سازی سریع می‌باشد. دلایل اصلی افزایش استفاده از روش رسوب‌گذاری لایه‌ای و محبوبیت آن را می‌توان در ساده‌بودن فرایند، قابلیت اطمینان و توانایی تولید قطعات پیچیده از مواد ترموپلاستیک بیان کرد. عموماً در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای از پلاستیک‌های گرماتریمی مانند آکریلونیتریل بوتادینس استرین^۱ و پلی‌لاکتیک‌اسید^۲ استفاده می‌شود. این فرایند به‌طور خلاصه به صورت رسوب‌گذاری لایه‌ای مواد اکستروژن شده از طریق یک نازل می‌باشد که نازل از رشته‌های پلاستیکی گرماتریم تغذیه می‌شود. قاعده کلی در عملکرد روش رسوب‌گذاری لایه‌ای این پتانسیل بالقوه را برای استفاده از مواد با قابلیت‌های متنوع و نو استفاده در صنایع گوناگون نشان می‌دهد. برای این کار لازم است مواد اولیه به رشته‌های مناسب با قطر و استحکام کافی تبدیل شوند [۲]. با استفاده از مواد جدید در ساخت رشته‌ها می‌توان کاربرد قطعات تولید شده در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای را گسترش داد. طی سال‌های اخیر، تحقیقات محدودی در زمینه توسعه مواد جدید برای فرایند رسوب‌گذاری لایه‌ای انجام شده است. پژوهشگران در دانشگاه راتگرز، جزو اولین افرادی بودند که در زمینه توسعه استفاده از مواد فلزی و سرامیکی برای فرایند رسوب‌گذاری لایه‌ای در راستای بهبود خواص قطعات تولید شده تلاش کردند [۳، ۴]. با استفاده از مواد جدید در ساخت رشته‌ها می‌توان کاربرد قطعات تولید شده در روش رسوب‌گذاری لایه‌ای را گسترش داد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خواص قطعات تولید شده با روش رسوب‌گذاری لایه‌ای تابعی از متغیرهای فرایند است که می‌توان با تنظیم صحیح آنها به بهبود خواص قطعه تولیدی کمک کرد. از آنجا که خواص مکانیکی قطعات تولیدشده، از اهمیت زیادی برخوردار هستند؛ مطالعه تأثیر متغیرهای فرایند روی خواص مکانیکی قطعات تولیدشده، بسیار ضروری می‌باشد. بنابراین بهبود خواص با انتخاب تنظیمات و متغیرهای مناسب امکان‌پذیر است [۵]. مسعود و همکاران (۲۰۰۳) [۶] جزو نخستین افرادی بودند که موفق به تولید قطعات کامپوزیتی پلیمری-فلزی با استفاده از چاپ‌گر سه‌بعدی رسوب‌گذاری لایه‌ای شدند. قطعات ساخته‌شده از جنس آهن/نایلون بودند و برای تولید اینسرت قالب‌های تزریق پلاستیک استفاده شدند. نیکزاد و همکاران (۲۰۱۱) [۶] به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری-فلزی پرداختند که در این پژوهش از فلز مس و پلیمر آکریلونیتریل بوتادینس استرین استفاده شد. لی و همکاران (۲۰۰۴) [۷] به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات ساخته‌شده از جنس آکریلونیتریل بوتادینس استرین با چاپ‌گر سه‌بعدی رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند. در این پژوهش، متغیرهای هم‌پوشانی بین رشته‌ها، زاویه رشته‌ها، عرض رشته‌ها و ضخامت لایه‌ها بررسی شد و از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی عملکرد الاستیک قطعات استفاده شد. کومار و همکاران (۲۰۰۹) [۵] به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات تولیدشده با روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند. در این پژوهش، متغیرهای ارتفاع لایه‌ها، جهت‌گیری قطعه روی میز، عرض رشته‌ها، زاویه رشته‌ها و هم‌پوشانی بین رشته‌ها روی پلاستیک آکریلونیتریل بوتادینس استرین بررسی شده و از الگوریتم جستجوی غذای باکتری‌ها در راستای بهینه‌سازی استحکام کششی نمونه‌ها استفاده گردیده است. رایگانی و همکاران (۲۰۱۴) [۸] نیز با بررسی متغیرهای جهت‌گیری قطعات، زاویه و عرض رشته‌ها و هم‌پوشانی بین آنها و استفاده از الگوریتم‌های روش گروهی برای داده‌های دسته‌بندی‌شده و تکامل تفاضلی، استحکام کششی قطعات آکریلونیتریل بوتادینس استرین تولیدشده با روش

¹ Acrylonitrile Butadiene Styrene² Polyactic Acid

رسوب‌گذاری لایه‌ای را بهینه‌سازی کردند. ژائو و همکاران (۲۰۱۵) [۹] به بررسی تأثیر ارتفاع لایه و زاویه پرسوندگی بر قطعات تولیدشده از جنس پلی‌اترکتون^۱ و مقایسه آن با فیلامنت آکریلونیتریل بوتادینس استرین پرداختند. نی‌پور و همکاران (۲۰۱۶) [۱۰] بر خواص مکانیکی قطعات کامپوزیتی تشکیل‌یافته از ۲۵ درصد پودر فلز مس و گرانول آکریلونیتریل بوتادینس استرین کار کردند. در این تحقیق، چهار متغیر قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پرسیدن و دمای نازل در سه سطح برای بررسی انتخاب شد و به‌منظور تعیین میزان تأثیر هر متغیر و یافتن سطوح بهینه هر کدام، از روش تاگوچی استفاده گردید. ملتَم ایریلدیز و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱] به بررسی استحکام کششی و کیفیت یا زبری سطح قطعات پرینت‌شده از جنس PLA پرداختند. در این تحقیق، تأثیر متغیرهای فن خنک‌کننده، دمای نازل، ارتفاع لایه و سرعت رسوب ماده بررسی شد. در این تحقیق، فن خنک‌کننده و دمای نازل در دو سطح و ارتفاع لایه و سرعت رسوب ماده در چهار سطح انتخاب شدند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، در آزمایش کشش از بین متغیرهای انتخاب‌شده، ارتفاع لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌های چاپ‌شده دارند و پس از آن، سرعت رسوب ماده، بیشترین تأثیرگذاری را دارد. در این متغیر، ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر بهترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. برای زبری سطح نیز نتایج دقیقاً مشابه با نتایج مربوط به استحکام کششی به‌دست آمده است. فیلیپو برتو و همکاران (۲۰۲۰) [۱۲] به بررسی رفتار خستگی قطعات چاپ‌شده از جنس پلیمر و کامپوزیت‌های پلیمری چاپ‌شده با استفاده از پرینتر سه‌بعدی به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای پرداختند.

با گسترش روزافزون مواد مصرفی در حوزه پرینترهای سه‌بعدی، بسیار ضروری است که رفتار این مواد با توجه به تفاوت در جنس و ماهیت بیشتر این مواد، بررسی شود. از جمله مواد اولیه‌ای که به‌تازگی وارد حوزه چاپ‌گر سه‌بعدی نوع رسوب‌گذاری لایه‌ای شده است، فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن می‌باشد که با توجه به رفتار این ماده به هنگام پرینت و اصطکاک بسیار پایین و از طرفی، استحکام بالای آن، ضروری بود که متغیرهای تأثیرگذار در فرایند پرینت نمونه‌ها با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن بررسی شود. از طرفی، با توجه به این که فرایند چاپ سه‌بعدی نسبتاً گران‌قیمت است، فیلامنت گران‌قیمت نیز باعث می‌شود که فرایند پرینت و متغیرهای مربوطه برای مواد مصرفی در این نوع چاپ سه‌بعدی، از اهمیت بالاتری برخوردار شود. در این تحقیق، چهار متغیر پرینت سه‌بعدی با فرض تأثیرگذاری روی نتایج بررسی شدند. بر اساس بررسی به‌عمل‌آمده تا زمان نگارش تحقیق حاضر، تحقیق و مطالعه‌ای در مراجع علمی در مورد فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن منتشر نشده است. همچنین یادآوری این نکته بسیار بااهمیت است که به هنگام پرینت با این نوع فیلامنت، داشتن یک تهویه مناسب در محیط پرینت، بسیار ضروری است.

بیان مسئله، نوآوری و اهداف

برای دستیابی به یک پرینت با کیفیت بالا، شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت نهایی، از اهمیت بالایی برخوردار است. این مهم به خصوص در پرینت سه‌بعدی که هزینه نسبتاً بالایی دارد نمود بیشتری پیدا می‌کند. در این تحقیق، از فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن که در رشته‌های با قطر ۱.۷۵ میلی‌متر خریداری شده بود، استفاده شده است. این فیلامنت به دلیل اصطکاک بسیار پایینی که دارد نیازمند به‌دست‌آوردن سطوح مناسب پارامترهای پرینت، برای بالا بردن کیفیت چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه بالا بردن استحکام پرینت می‌باشد. بنابراین هدف از این تحقیق، یافتن بهترین سطح متغیرها برای رسیدن به بالاترین کیفیت خواص مکانیکی قطعات می‌باشد. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای دمای نازل^۲،

¹ Polyether ether ketone

² Nozzle temperature

ارتفاع لایه‌ها^۱، زاویه پرشدن^۲ و الگوی پرینت^۳ بر کیفیت قطعات پرینت‌شده با فیلامنت پلی‌اکسی‌تیلن بررسی شده است. یکی از موضوعات بسیار مهمی که در مبحث پرینت سه‌بعدی باید به آن توجه داشت، پرینت لایه اول می‌باشد؛ چون اگر پرینت لایه اول با خطا روبه‌رو شود لایه‌های بعدی، هر چند به‌درستی پرینت شوند با مشکل روبه‌رو خواهند شد و مدل به‌دست‌آمده، چه به لحاظ ساختار فیزیکی و چه استحکام، با مشکل مواجه خواهد بود. فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن به دلیل اصطکاک بسیار پایین، در پرینت لایه اول، به دقت و تنظیمات بسیار دقیقی نیازمند است. در این تحقیق، به مشکلاتی که در لایه اول پرینت در منابع مختلف به آن اشاره شده بود پرداخته شده است و روش قابل اطمینانی برای حل آن، ارائه گردیده است.

مواد و روش تحقیق

دیدگاه تاگوچی

روش تاگوچی، تکنیکی شناخته‌شده، سیستماتیک و مؤثر برای طراحی بهینه فراهم می‌آورد. این روش به دلیل ساده‌سازی برنامه آزمایش و امکان‌سنجی مطالعه برهم‌کنش بین متغیرهای فرایند، به‌طور گسترده برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرایندها استفاده می‌شود. در نتیجه کاهش تعداد آزمایش‌ها، در زمان و هزینه، صرفه‌جویی خواهد شد. این موضوع، به‌خصوص در فرایندهای نمونه‌سازی سریع که هزینه نسبتاً بالایی دارد، نمود بیشتری پیدا می‌کند. تاگوچی برای آزمایش‌ها یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آنها ارائه می‌دهد. طبق روش تاگوچی، فقط حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌گیرد [۱۳].

انتخاب متغیرهای فرایند

در این آزمایش، چهار متغیر ارتفاع لایه، زاویه پرشوندگی، الگوی پرشوندگی و دمای نازل مطابق جدول ۱ در سه سطح بررسی شد.

جدول ۱. متغیرها و سطوح

پارامتر	مقدار
پرشوندگی نمونه‌ها	۱۰۰ درصد
دمای میز پرینت	100°C
قطر نازل	0.4mm

در کنار بررسی متغیرهای تعیین‌شده بر ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های پرینت‌شده، پارامترهای ثابت مطابق با جدول ۲ تنظیم شدند.

¹ Layer thickness

² Raster angle

³ Infill pattern

جدول ۲. پارامترهای ثابت در چاپ نمونه‌ها

Level 3	Level 2	Level 1	Parameter
wiggle	grid	rectilinear	A: Infill pattern
0.3	0.2	0.1	B: Layer thickness (mm)
260	240	220	C: Nozzle temperature (°C)
0/90	-45/45	-30/60	D: Raster angle (°)

برای انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای آزمایش باید تمامی درجات آزادی محاسبه شوند. تعداد درجات آزادی، یک کمیت بارزش است؛ زیرا کمینه تعداد شرایط رفتاری را تعیین می‌کند و برای هر متغیر، برابر با یک واحد کمتر از تعداد سطوح می‌باشد [۱۴]. در این تحقیق، چهار متغیر در سه سطح بررسی شده‌اند. پس در مجموع ۸ درجه آزادی وجود دارد که با توجه به کمینه کردن آزمایش‌ها گزینه پیشنهادی روش تاگوچی آرایه متعامد L9 می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. آرایه متعامد استفاده شده برای آزمایش‌ها

Raster angl	Nozzle temperature	Layer thickness	Infill Pattern	NO
1	1	1	1	1
2	2	2	1	2
3	3	3	1	3
3	2	1	2	4
1	3	2	2	5
2	1	3	2	6
2	3	1	3	7
3	1	2	3	8
1	2	3	3	9

ارتفاع لایه‌ها

قطر نازل پرینتر در این تحقیق ۰.۴ میلی‌متر می‌باشد؛ بنابراین ارتفاع لایه‌ها باید مقداری کمتر از ۰.۴ میلی‌متر انتخاب می‌شد. معمول‌ترین ارتفاع لایه‌هایی که در این نوع روش پرینت سه‌بعدی استفاده می‌شود، اعدادی بین ۰.۱-۰.۳ میلی‌متر است. بنابراین در این تحقیق، ارتفاع لایه‌های ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ انتخاب شد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای هر ارتفاع لایه، نتایج به‌دست‌آمده را برای ارتفاع لایه‌های بین این لایه‌ها نیز می‌توان تعمیم داد.

دمای نازل

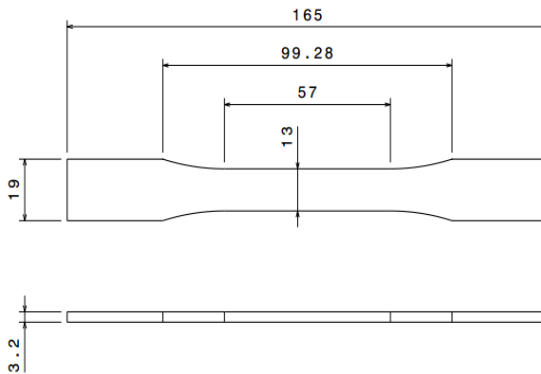
ماده اولیه پرینتر سه‌بعدی به داخل نازل هدایت می‌شود تا در نازل، دمای لازم برای ذوب ماده اولیه فراهم شود. اگر دمای ذوب، پایین‌تر از حد استاندارد باشد، چسبندگی و استحکام لایه‌ها پایین‌تر خواهد بود و اگر بالاتر از حد استاندارد باشد، سبب ریزش ماده و دوباره باعث کاهش چسبندگی لایه‌ها خواهد شد. بنابراین در مواد مختلف اولیه که در پرینترهای سه‌بعدی استفاده می‌شوند، یافتن دمای مناسب برای ذوب لایه‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد. در اکثر مواد اولیه مورد استفاده در پرینترهای سه‌بعدی، دمای ذوب از طرف سازنده در قالب یک بازه، مشخص می‌شود که در این تحقیق، محدوده دمایی مشخص‌شده که بین ۲۲۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بود را در سه سطح بررسی کردیم و تأثیر هر کدام روی نمونه‌ها گزارش شد.

زاویه پرینت الگوها یا زاویه پرشوندگی

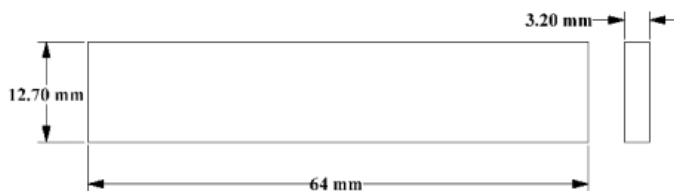
زاویه پرینت رشته‌ها، جهت چاپ شدن لایه‌ها نسبت به جهت‌گیری قطعه و نسبت به یکدیگر را مشخص می‌کند. جهت‌گیری لایه‌ها به این دلیل اهمیت دارد که استحکام نمونه‌ها در مقابل نیروهای اعمال شده به قطعه کار را تعیین می‌کند؛ زیرا نحوه اعمال نیروها در مقایسه با یکدیگر، متفاوت است؛ از این رو تأثیر زاویه‌های پرینت مختلف در برابر نیروهای مختلف اعمالی، بررسی شده است.

طراحی نمونه‌ها

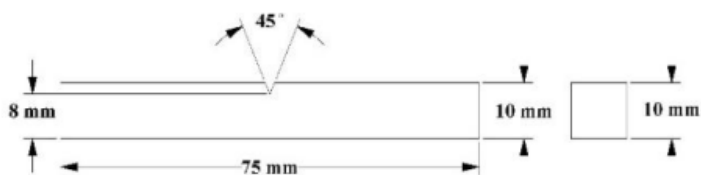
چهار آزمون مکانیکی متفاوت (کشش، خمش، فشار و ضربه) در این تحقیق انجام گرفت. برای تست کشش، نمونه‌های آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D638 برای نمونه‌های پلاستیکی طراحی گردید (شکل ۱). نمونه‌های تست خمش مطابق با استاندارد ASTM D790 برای تست خمش قطعات پلاستیکی تقویت‌شده و تقویت‌نشده و مواد نارسانای الکتریکی شدند (شکل ۲). نمونه‌های آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D611 برای محاسبه مقاومت به ضربه شاریبی برای قطعات پلاستیکی طراحی شدند (شکل ۳). نمونه‌های آزمون فشار مطابق با استاندارد ASTM D695 برای تست فشار نمونه‌های پلاستیکی صلب، طراحی گردیدند (شکل ۴). طراحی نمونه‌ها در نرم‌افزار Catia انجام شد و توسط نرم‌افزار اسلایسر Simplify 3D جی‌کد نمونه‌ها برای پرینت تهیه گردید. میزان پرشوندگی (infill) نمونه‌ها ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و پرینت با نازل ۰/۴ میلی‌متر انجام گرفت.



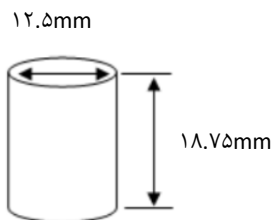
شکل ۱. ابعاد هندسی نمونه کشش



شکل ۲. ابعاد هندسی نمونه خمش



شکل ۳. ابعاد هندسی نمونه ضربه



شکل ۴. ابعاد هندسی نمونه فشار

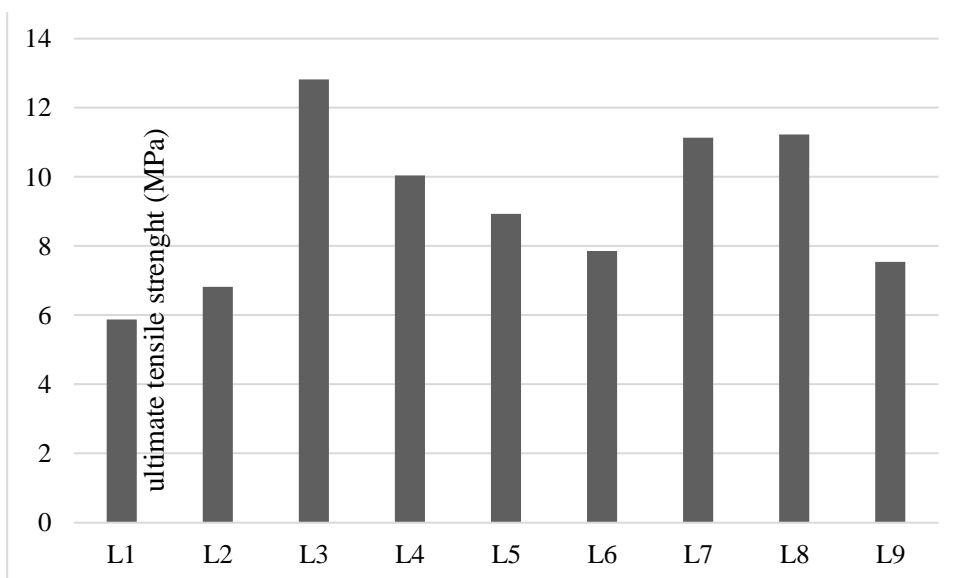
ارائه نتایج و بحث

آزمون کشش

نمونه‌های کشش براساس پارامترهای مختلف و براساس استاندارد ASTM D638 با سرعت 5mm/s با دستگاه آزمون کشش Zwick/Roell مدل Z100 با ظرفیت ۱۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند.

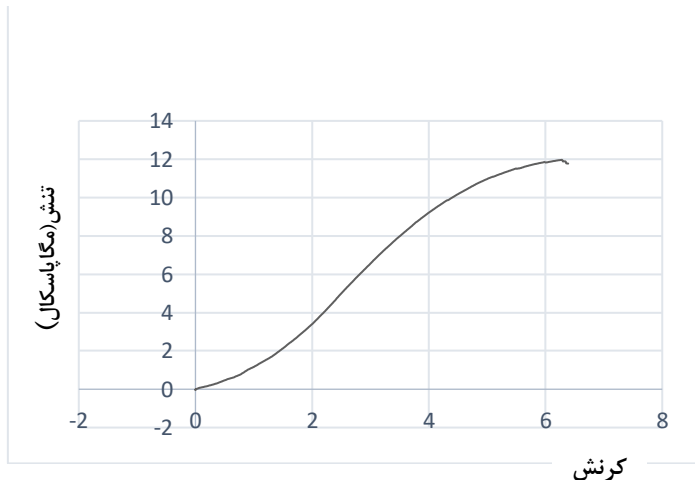


شکل ۵. دستگاه آزمون کشش و فشار



شکل ۶. نتایج حاصل از آزمون کشش

از بررسی نتایج به دست آمده در شکل ۶ مشخص می‌شود که نمونه‌های L3 و L8 بیشترین استحکام کششی را داشته‌اند. حال، برای یافتن سطوح بهینه متغیرها و بررسی تأثیر آنها بر استحکام کششی نمونه‌ها بر اساس روش تاگوچی، در دو مرحله تأثیر اصلی^۱ و تحلیل واریانس^۲ بررسی شدند. در نمودار شکل ۷ رفتار یکی از نمونه‌های پرینت شده با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن تحت آزمایش کشش نشان داده می‌شود. جدا از ماکزیمم تنش‌های متفاوت به دست آمده برای هر نمونه، رفتار تمامی نمونه‌ها در قسمت پلاستیک نمودار، یکسان به دست آمد.



شکل ۷. رفتار نمونه‌های پرینت شده در آزمایش کشش

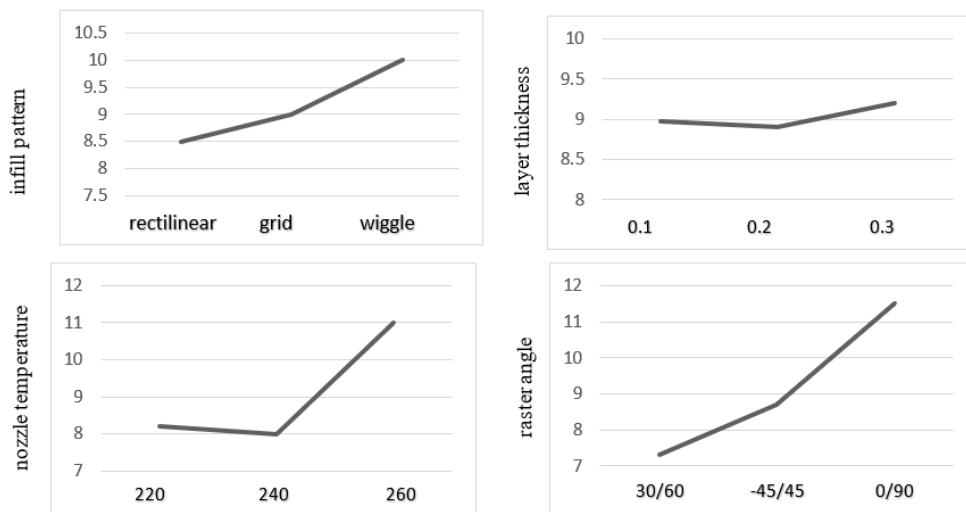
در آزمایش کشش نمونه‌ها، در منطقه مربوط به رفتار پلاستیک، نمونه‌ها در مقابل تغییر شکل پلاستیک، تغییر طول بسیار کمی از خود نشان می‌دهند و به سرعت شکسته می‌شوند. در نتیجه، از رفتار نمونه‌ها این طور به دست می‌آید که قطعات ساخته شده از جنس فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن در مقابل کشش، رفتار بسیار تردی از خود نشان می‌دهند.

تأثیر اصلی

این تحلیل به منظور بررسی تأثیر متغیرها بر مقادیر خروجی انجام شد. به این صورت که تأثیر هر یک از سطح‌های متغیرها نسبت به نتایج خروجی آزمایش‌ها مطالعه و بررسی قرار گردید. برای مثال، متغیر ارتفاع لایه‌ها، شامل سه سطح مختلف می‌باشد. در این مطالعه، تأثیر هر کدام از سطح‌ها به صورت مستقل از سایر متغیرها روی نتایج، بررسی شد و تأثیر هر یک از سطح‌ها روی نتایج آزمایش‌ها گزارش گردید. این تحلیل در شکل ۸ برای آزمایش کشش نشان داده شده است.

¹ Main effect

² Analysis of variance



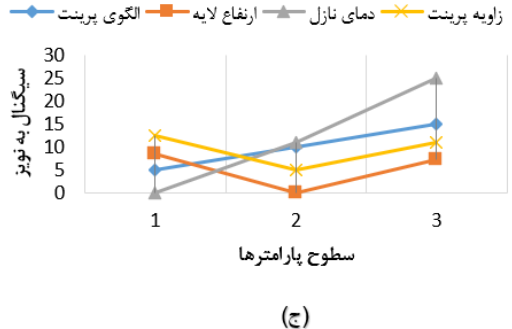
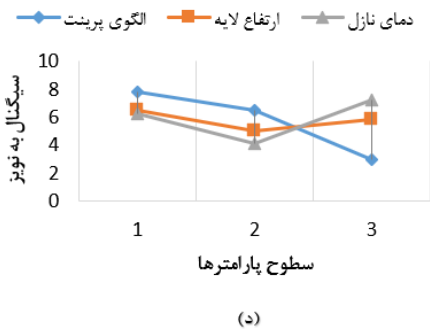
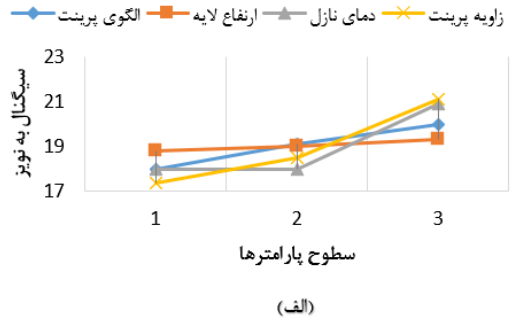
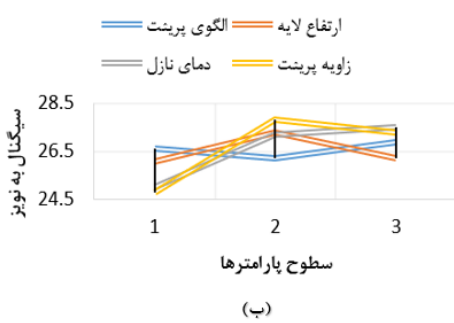
شکل ۸. نتایج تحلیل تأثیر اصلی

از بررسی نتایج شکل ۸ برای آزمایش کشش به این نتایج می‌رسیم که در پارامتر الگوی پرینت، الگوی ویگل، بیشترین تأثیر را دارد. در مورد متغیر ارتفاع لایه‌ها، نتایج نشان می‌دهند که تفاوت چندانی بین ارتفاع لایه‌ها وجود ندارد. از این رو این پارامتر، تأثیر کم‌تری در مقایسه با سایر پارامترها دارد. برای متغیر دمای نازل برای ذوب کردن فیلامنت، کاملاً مشخص است که دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد، بیشترین تأثیر را در چسبندگی بهتر لایه‌ها و در نتیجه، افزایش استحکام نمونه‌ها دارد. در مورد دو سطح دیگر انتخاب‌شده؛ یعنی ۲۴۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، تأثیر یکسانی گزارش شده است. از نتایج به‌دست‌آمده در مورد دمای نازل این‌طور برداشت می‌شود که از یک دمای مشخص به بعد، قدرت پیوند لایه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، می‌توان گفت که این دما را می‌توان ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفت. تأثیر دماهای بالاتر در بررسی بعدی، نتایج کامل‌تری را گزارش خواهد کرد. به این دلیل بااطمینان نمی‌توان گفت که دماهای بالاتری استفاده شود که باید تأثیر دماهای بالاتر بر ریزش لایه‌ها به دلیل ذوب در دماهای بالاتر بررسی شود. زاویه پرینت لایه‌ها به صورت ۰/۹۰ تأثیر بیشتری در افزایش استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. طبق پیش‌بینی انجام‌گرفته، هم‌جهت‌بودن لایه‌ها با نیروی کششی اعمال‌شده، سبب داشتن بالاترین استحکام در این زاویه پرینت لایه‌ها شده است. اما در مورد دو زاویه پرینت دیگر، اهمیت جهت‌گیری لایه‌ها بیشتر معرفی می‌شود. در زاویه ۴۵/۴۵- درجه، تأثیر بیشتری نسبت به ۳۰/۶۰- گزارش شده است. در حالت ۴۵ درجه با این که لایه‌ها در قرینه نسبت به یکدیگر پرینت می‌شوند ولی نیروی اعمال‌شده به لایه‌ها که در قرینه یکدیگر هستند یکسان پخش می‌شود و هم‌زمان نیروی اعمال‌شده را تحمل می‌کنند. ولی در مورد زاویه ۳۰/۶۰- به دلیل این که یکی از لایه‌ها بیشتر در معرض نیروی اعمالی قرار می‌گیرد، شکست لایه مذکور، سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

نسبت سیگنال به نویز

این نسبت، میزان حساسیت خروجی موردبررسی را به متغیرهای غیرقابل کنترل در آزمایش نشان می‌دهد. هرچه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد مطلوب‌تر است؛ زیرا مقادیر بیشتر سیگنال به نویز، مقادیر کوچک‌تر واریانس نتایج را حول مقدار هدف نشان می‌دهد. شکل ۹ مقادیر سیگنال به نویز را برای آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق نشان

می‌دهد. همان‌طور که مشخص است این نسبت، مقادیر بزرگ و نزدیک به هم را نشان می‌دهد که بیان‌کننده تأثیر بالای عوامل قابل‌کنترل بر عوامل غیرقابل‌کنترل می‌باشد و هرچه این نسبت بیشتر باشد یعنی تنظیمات عوامل سیگنال، موجب کمینه شدن تأثیر عوامل نویز می‌شود. برای مثال در بخش (الف) که نمایان‌گر سیگنال به نویز تست کشش می‌باشد، اگر زاویه پرینت را بررسی کنیم متوجه می‌شویم که سطح ۳ که معرف زاویه ۰/۹۰ می‌باشد بالاترین نسبت سیگنال به نویز را دارد. یعنی در رسیدن به هدف آزمایش که پیدا کردن بالاترین میزان استحکام کششی می‌باشد، این سطح در زاویه پرینت، مؤثرترین گزینه است ولی برای مثال در مورد ارتفاع لایه سیگنال به نویز، تفاوت چندانی بین سطح‌ها وجود ندارد؛ یعنی این متغیر بر استحکام کششی، تأثیر چندانی ندارد. در مورد تمامی نمودارها در بخش مربوط به هر آزمایش، بحث شده است.



شکل ۹. نسبت سیگنال به نویز متغیرها و سطوح برای الف) تست کشش، ب) تست خمش، ج) تست ضربه، د) تست فشار

تحلیل واریانس

این تحلیل، به منظور مشخص شدن سهم هر متغیر بر خروجی موردبررسی، انجام می‌شود. به این منظور، روابط (۱) و (۲) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - C.F) \quad (1)$$

$$C.F = \frac{T^2}{n} \quad (2)$$

در این روابط SS_T مجموع مربع انحرافات، C.F فاکتور تصحیح و T بیانگر مجموع خروجی آزمایش‌ها می‌باشند. برای نشان دادن میزان تأثیر هر متغیر بر خروجی، از مشخصه F استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = \frac{MS_{\alpha}}{MS_e} \quad (3)$$

در این رابطه MS_{α} میانگین مربعات برای هر متغیر و MS_e میانگین مربعات خطا می‌باشند. جدول ۴ تحلیل واریانس برای آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴. آنالیز واریانس برای آزمایش کشش

Percentage of contribution (%)	P	F	MS	SS	DF	Factors
16.84	0.785	0.25	1.65	3.3	2	Infill pattern
4.94	0.976	0.02	0.17	0.3	2	Layer thickness
32.82	0.047	1.62	7.49	15	2	Nozzle Temperature
45.4	0.083	3.88	12.03	24.1	2	Raster angle

در محاسبات آنالیز واریانس ضریب $\alpha=0.05$ در نظر گرفته شده بود. از این رو بعد از محاسبه آنالیز واریانس برای آزمون کشش، مقدار p-value برای دمای نازل و زاویه پرینت، مقادیر معنی‌داری داشت ولی فرض تأثیرگذاری برای الگوی پرینت و ارتفاع لایه با توجه به مقدار p-value در سطح 5 درصد معنی‌دار نبودند. بنابراین به این نتیجه می‌توان رسید که در آزمایش کشش، از بین متغیرهای انتخاب‌شده، دو متغیر الگوی پرینت و ارتفاع لایه دو متغیر تأثیرگذار بر استحکام کششی نمونه‌ها هستند و از تأثیرگذاری دو متغیر ارتفاع لایه و الگوی پرینت در این آزمایش، چشم‌پوشی شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، زاویه پرینت رشته‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشت. از بین سطوح انتخاب‌شده برای متغیر زاویه پرینت نیز زاویه $0/90$ بیشترین تأثیرگذاری را داشت. بنابراین می‌توان گفت که از بین متغیرها و سطوح انتخاب‌شده، زاویه پرینت $0/90$ بالاترین تأثیر را بر استحکام کششی نمونه‌ها داشته است. بعد از زاویه پرینت رشته‌ها، دمای نازل با 33 درصد و دمای 260 درجه سانتی‌گراد، از لحاظ تأثیرگذاری در رتبه بعدی قرار دارد.

آزمایش خمش

نمونه‌های آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D790 و با استفاده از دستگاه کشش SANTAM-STM150 با LOADCELL 20KN انجام گرفت. شکل ۱۰ دستگاه آزمون خمش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. دستگاه آزمون خمش

خمش سه نقطه‌ای برای قطعات به منظور بررسی مقاومت خمشی در نمونه‌ها انجام گرفت. برای آزمایش خمش، تنش مطابق با رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$\sigma = \frac{2bt^2}{3PL} \quad (4)$$

Where:

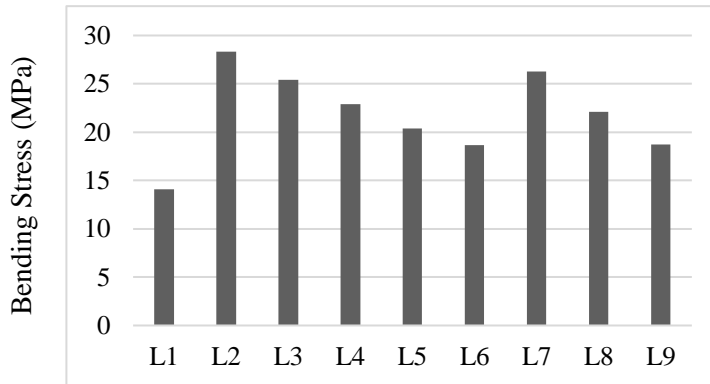
σ = Flexural Stress (MPa)

P = Load (N)

L = Support span (50 mm)

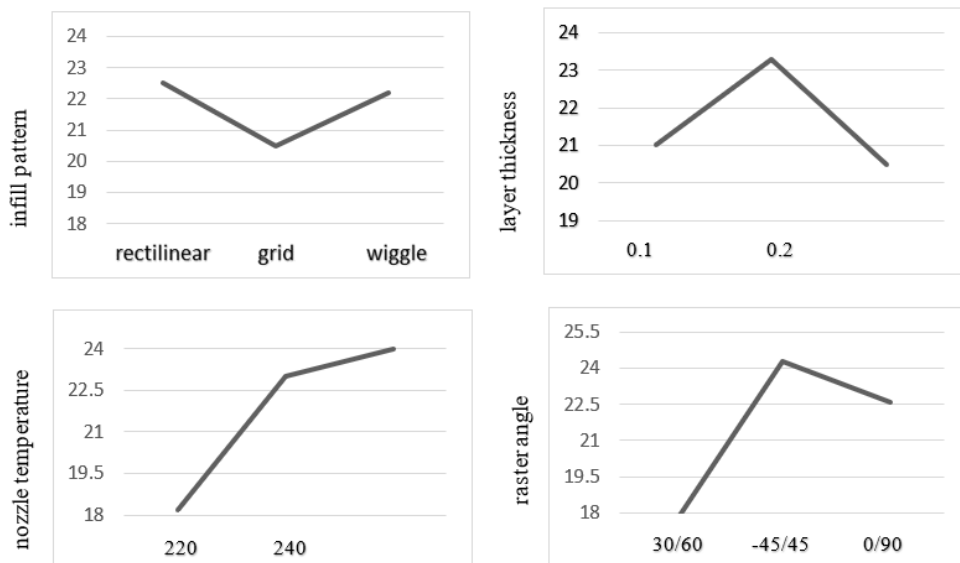
b = width of specimen (mm)

t = thickness of beam (mm)



شکل ۱۱. نتایج حاصل از آزمون خمش

مطابق با نتایج به دست آمده در شکل ۱۱ نمونه‌های چاپ شده مطابق با تنظیمات متغیرهای L2 و L7 به ترتیب بالاترین استحکام خمشی را به خود اختصاص داده‌اند. در آزمایش L2 سطح انتخاب شده برای متغیر الگوی پرینت ریکتیلینیر، ارتفاع لایه 0.2 میلی‌متر، دمای نازل ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- انتخاب شده بودند. در آزمایش L7 وقتی سطوح مختلف بررسی گردید این نتیجه حاصل شد که همانند آزمایش L2، زاویه پرینت ۴۵/۴۵- درجه در زاویه پرینت تأثیرگذار بوده است ولی سایر سطوح، تفاوت‌هایی با هم دارند که برای بررسی دقیق‌تر آنها نیاز است که از نتایج بررسی تأثیر اصلی کمک گرفته شود.



شکل ۱۲. تأثیر اصلی سطوح متغیرها در آزمایش خمش

بر اساس نتایج شکل ۱۲ در الگوی پرینت، ریکتیلینیر، بیشترین تأثیر را دارد و بعد از آن، به ترتیب ویگل و گرید قرار می‌گیرند. در توضیح دلیل این اتفاق باید به ساختار الگوها مراجعه کرد. آن گونه که نتایج گزارش می‌کنند هر چقدر که رشته‌ها در راستای طولی بیشتر پرینت شوند، استحکام بیشتری در مقابل خمش خواهند داشت که این موضوع در الگوی گرید که تأثیر کمتری داشته است صدق می‌کند. برای ارتفاع لایه‌ها، ارتفاع لایه ۰/۲ میلی‌متر تأثیرگذاری بیشتری دارد. بنابراین از دو آزمایش انجام گرفته تا این مرحله می‌توان این گونه برداشت کرد که ارتفاع لایه‌های بالاتر، اثرگذاری بالاتری را در مورد فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن داشته‌اند. در مورد دمای نازل مثال آزمایش کشش، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین تأثیر را دارد و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد از نظر تأثیرگذاری در رتبه بعدی قرار دارد. پس در مورد دمای نازل، با اطمینان بالاتری می‌توان گفت که این دما بهترین دمای پرینت با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن است. برای متغیر زاویه پرینت رشته‌ها مطابق با دو نمونه طراحی شده $L2$ و $L7$ که به ترتیب بالاترین استحکام خمشی را داشتند و زاویه پرینت هر دو ۴۵ درجه بود، تحلیل تأثیر اصلی هم بر این مورد تأکید دارد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- را به‌عنوان تأثیرگذارترین سطح، معرفی می‌کند.

جدول ۵. آنالیز واریانس آزمایش خمش

Factors	DF	SS	MS	F	P	Percentage contribution (%)
Infill pattern	2	6.9	3.5	0.1	0.87	11.59
Layer thickness	2	13.3	6.6	0.3	0.11	15.57
Nozzle temperature	2	58.4	29.2	1.7	0.025	33.55
Raster angle	2	79	39.5	3	0.012	39.28

در محاسبات آنالیز واریانس، ضریب $\alpha=0.5$ در نظر گرفته شده بود. از این رو بعد از محاسبه آنالیز واریانس برای تست خمش، p-value برای دمای نازل و زاویه پرینت، مقادیر معنی‌داری داشت ولی برای دو متغیر الگوی پرینت و

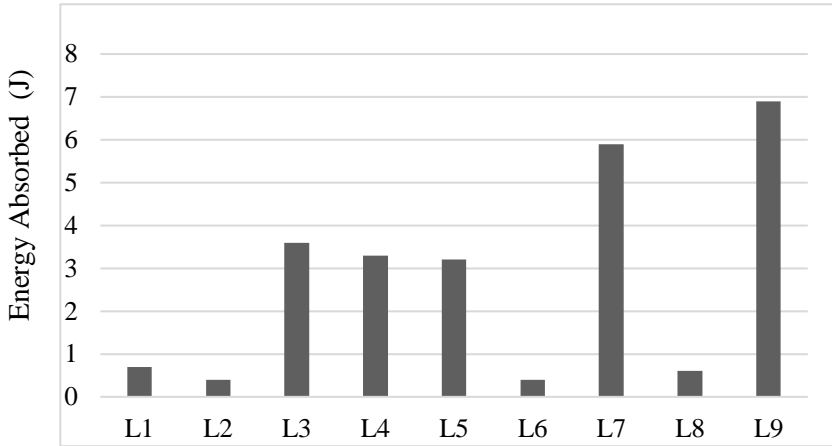
ارتفاع لایه‌ها با توجه به ضریب α در نظر گرفته، ارتباط معنی‌داری را نمی‌توان متصور شد. پس می‌توان به این نتیجه رسید که در آزمایش خمش نیز از بین متغیرهای انتخاب‌شده، دو متغیر دما و زاویه پرینت بر خروجی نتایج آزمایش که همان نیروی خمش است، تأثیرگذار هستند. مطابق جدول ۵ همانند آزمایش کشش، در آزمایش خمش نیز زاویه پرینت، بالاترین تأثیرگذاری را دارد. جهت‌گیری رشته‌ها از آن جا که نحوه شکل‌گیری و استخوان‌بندی داخل قطعه در برابر نیروهای اعمال شده را تعیین می‌کند، چنین تأثیرگذاری از خود در نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد. بنابراین جهت‌گیری رشته‌ها در برابر نیروهای اعمال‌شده، بیشترین تأثیر را دارد. دمای نازل از نظر تأثیرگذاری، در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ماهیت فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن این طور ایجاب می‌کند که دماهای بالاتر، به چسبندگی بهتر لایه‌ها کمک زیادی می‌کند. باید به این نکته نیز توجه کرد که افزایش دمای نازل، باعث افزایش بیش‌ازاندازه لغزش لایه‌ها روی همدیگر نشود که مطابق نتایج حاصل‌شده از پرینت نمونه‌ها، چنین مشکلی ایجاد نشد.

تست ضربه

نمونه‌های آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D6110 با استفاده از دستگاه آزمون ضربه -SANTAM SIT- 200B مورد آزمایش قرار گرفتند.

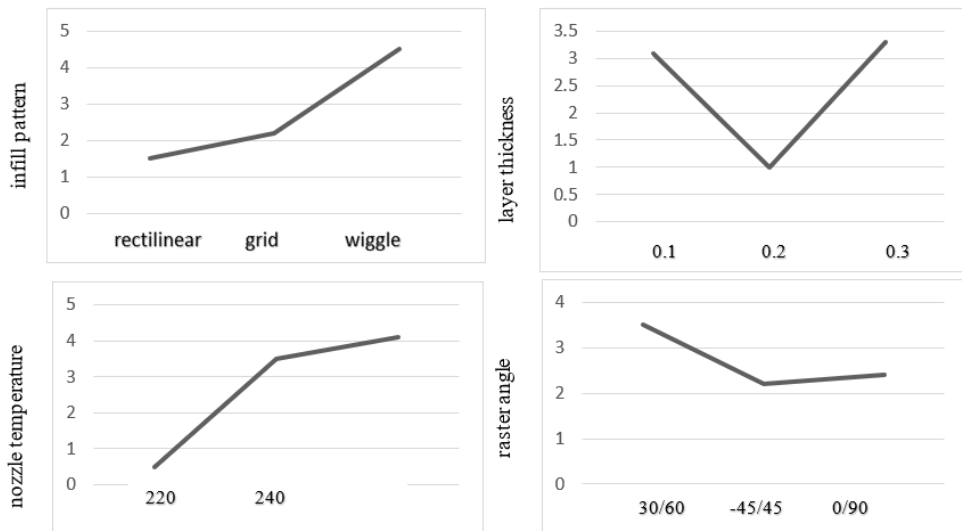


شکل ۱۳. دستگاه آزمون ضربه



شکل ۱۴. نتایج آزمایش ضربه

بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه‌های L9 و L7 دارای بالاترین انرژی جذب شده در طول آزمایش‌های ضربه هستند. در آزمایش مربوط به نمونه L9، الگوی پرینت ویگل، ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر، دمای نازل ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت رشته‌ها ۳۰/۶۰ تعریف شده بودند. ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر دوباره به این نکته اشاره می‌کند که ارتفاع لایه‌های بالاتر برای فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن، نتایج بهتری را در آزمایش‌ها گزارش می‌دهد. در نمونه چاپ شده L7 نیز الگو پرینت مشابه با L9 است. ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرینت ۴۵/۴۵- درجه نیز برای سطوح متغیرها معرفی می‌شوند. حالا برای بررسی دقیق‌تر سطوح باید به تحلیل تأثیر اصلی مراجعه شود.



شکل ۱۵. تأثیر اصلی سطوح متغیرها در آزمایش ضربه

همان طور که در توضیح نمونه L9 اشاره شد الگوی پرینت ویگل در این آزمایش که بیشترین انرژی ضربه را جذب کرده بود، استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شکل ۱۵ تأثیر اصلی نیز گواه همین موضوع است. یعنی الگوی پرینت ویگل، بیشترین تأثیرگذاری را در آزمایش ضربه به خود اختصاص داده است و الگوهای گرید و ریکتیلینیر در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

در مورد ارتفاع لایه‌ها، ۰/۳ میلی‌متر دارای بیشترین میزان اثرگذاری بود. برای دمای پرینت فیلامنت، همانند دو آزمایش قبلی، دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین اثرگذاری را داشت. برای الگوی زاویه پرینت هم، زاویه ۰/۹۰ به‌عنوان تأثیرگذارترین سطح معرفی شده است. بررسی میزان اثرگذاری هر یک از متغیرها با استفاده از آنالیز واریانس انجام شد.

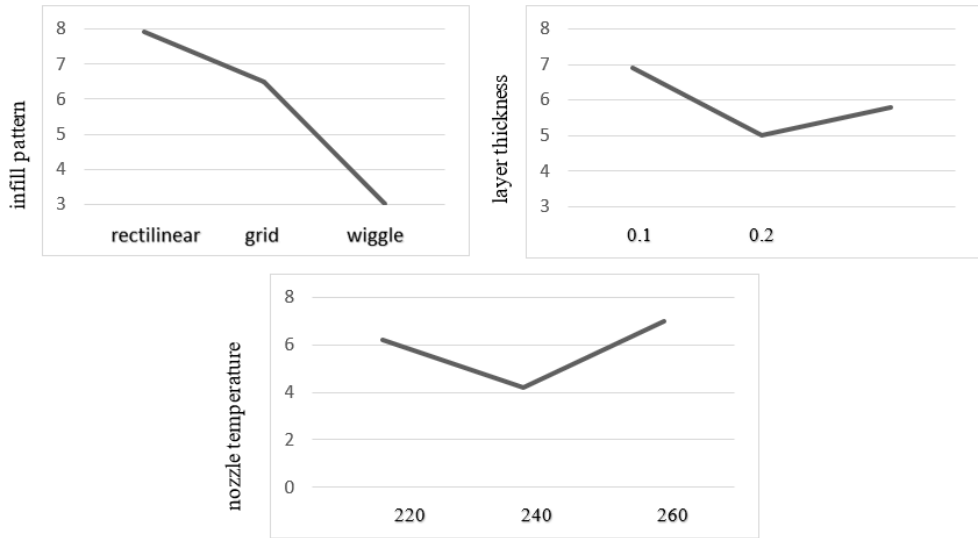
جدول ۶. آنالیز واریانس آزمایش ضربه

Percentage contribution (%)	P	F	MS	SS	DF	Factors
28.3	0.037	1.18	6.82	13.6	2	Infill pattern
22.73	0.0	4.35	4.35	8.71	2	layer Thickness
35.7	0.015	2.67	11.4	22.7	2	Nozzle temperature
13.27	0.18	0.21	1.57	3.15	2	Raster angle

در آزمایش ضربه مقدار p-value برای الگوی پرینت، دمای نازل و ارتفاع لایه در سطح 5 درصد، مقدار معنی‌داری بود. پس در آزمایش ضربه برای مقدار $\alpha=0.5$ فرض تأثیرگذاری برای زاویه پرینت بر استحکام ضربه نمونه‌ها رد شد ولی برای متغیرهای الگوی پرینت، دمای نازل و ارتفاع لایه، فرض تأثیرگذار بودن تأیید شد. پس برای رسیدن به نمونه‌های با بالاترین استحکام ضربه باید این سه متغیر، تأثیرگذار در نظر گرفته شوند و سطوح بهینه آن‌ها در نظر گرفته شود. آنالیز واریانس متغیرها برای آزمایش ضربه نشان داد که دمای نازل، اثرگذاری بیشتری در مقایسه با سایر متغیرها دارد. وقتی این نتیجه با نتایج به دست آمده در دو آزمایش قبلی مقایسه می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که دمای نازل، یکی از متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر کیفیت نمونه‌های پرینت شده با فیلامنت پلی‌اکسی‌متیلن در بین متغیرهای انتخاب شده در این تحقیق می‌باشد. از آن جایی که نحوه اعمال نیرو در این آزمایش با دو آزمایش، از نظر نحوه و سرعت اعمال نیرو، متفاوت است؛ نتایج تأثیرگذاری متغیرها هم با دو آزمایش قبلی، تفاوت‌هایی دارد. در آزمایش ضربه، متغیر الگوی پرینت، تأثیرگذاری بیشتری در مقایسه با دو آزمایش قبلی در نتایج داشته است.

تست فشار

تست فشار برای نمونه‌های طراحی شده براساس استاندارد ASTM D695 و با استفاده از دستگاه آزمون Zwick/Roell مدل Z100 با ظرفیت ۱۰ تن انجام گرفت. سرعت اعمال نیروی فشار نمونه‌ها 1.3mm/min در نظر گرفته شد. در این آزمایش تأثیر ۳ پارامتر ارتفاع لایه، الگوی پرینت و دمای نازل، بررسی شد. چون طراحی نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای بود؛ در این حالت، متغیر زاویه پرینت، تأثیری بر آزمون فشار نمونه‌ها نخواهد داشت. چون نحوه پرینت رشته‌های داخلی نمونه‌ها به شکلی بود که هر دو رشته متوالی پرینت شده نسبت به هم زاویه ۹۰ درجه تشکیل می‌دادند و سطح مقطع نمونه‌ها هم در این آزمون به صورت دایره‌ای بودند؛ از تأثیرگذاری این متغیر در این آزمایش، چشم‌پوشی شد.



شکل ۱۶. آنالیز تأثیر پارامترها در تست فشار

جدول ۷. آنالیز واریانس برای آزمایش فشار

Percentage of contribution (%)	P	F	M	S	DF	Factors
50.76	0.012	5.4	15.6	31.2	2	Infill pattern
17.9	0.18	0.3	1.83	3.7	2	Layer thickness
31.3	0.04	1	5.58	11.8	2	Nozzle temperature

مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۷، مقدار p-value با فرض $\alpha=0.5$ برای تأثیرگذار بودن تمامی متغیرها بر نتایج آزمایش فشار، برای دو متغیر الگوی پرینت و دمای نازل، مقدار معنی داری به دست آمد ولی برای متغیر ارتفاع لایه با توجه به مقدار p-value فرض تأثیرگذاری این پارامتر بر نتایج، رد شد. پس برای پرینت نمونه‌ها و قطعات در آزمایش فشار، دو متغیر دمای نازل و الگو، از تأثیرگذاری بالاتری برخوردار هستند. بیشترین تأثیرگذاری را الگوی پرینت در حالت ریگتلینیر داشت و دمای نازل هم بر روی مقدار ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای نازل، الگوی پرشوندگی و زاویه پرشوندگی بر خواص مکانیکی (استحکام کششی (Tensile strength)، استحکام خمشی (Flexural strength) و مقاومت به ضربه (Impact resistance) قطعات ساخته شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن با چاپ‌گر سه‌بعدی به روش رسوب‌گذاری لایه‌ای، بررسی و تحلیل شد. برای آزمایش فشار (Compress) نیز تأثیر سه پارامتر ارتفاع لایه، دمای نازل و الگوی پرینت، بررسی گردید. مطابق با نمودار شکل ۷ نمونه‌ها در مقابل کشش، رفتار تدریجی از خود نشان دادند. در آزمایش کشش و خمش، زاویه پرشوندگی پرینت و دمای نازل، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام نمونه‌ها به خود اختصاص دادند. مطابق با نتایج

آزمایش‌ها، بالاترین استحکام کششی در الگوی پرینت wiggle، ارتفاع لایه 0.3mm، دمای ۲۶۰ برای نازل و زاویه پرشوندگی ۰/۹۰ حاصل شد. این ویژگی برای نمونه خمش در الگوی rectilinear، ارتفاع لایه 0.2 میلی‌متر، دمای نازل ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرشوندگی ۴۵/۴۵- گزارش شد. در آزمایش ضربه، دمای نازل و الگوی پرینت، به ترتیب به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامترها معرفی شدند و در آزمایش فشار، الگوی پرینت، تأثیرگذارترین پارامتر بود. برای آزمایش ضربه، الگوی پرینت wiggle، ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر، دمای نازل ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و زاویه پرشوندگی ۳۰/۶۰- بیشترین انرژی ضربه را فراهم آورد. و در نهایت، برای آزمایش فشار، بهترین شرایط در الگوی rectilinear، ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر و دمای ۲۶۰ درجه برای نازل گزارش شد.

یادآوری و توجه به این نکته بسیار مهم است که هر یک از پارامترها در آزمایش‌ها تأثیر منحصره‌فرد خود را داشتند که لازم بود برای پرینت قطعات در بالاترین کیفیت با توجه به نوع کاربرد آن‌ها به نمودارها و جداول مربوط به هر آزمایش مراجعه شود ولی در مورد دمای نازل برای ذوب فیلامنت، برای تمامی آزمایش‌ها بهترین وضعیت در دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

Reference

- Jacobs, P. F. (1995), "Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling", *Society of Manufacturing Engineers*.
- Masood, S.; Song, W. (2004), "Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling", *Materials & Design*, Vol. 25, No. 7, pp. 587-594.
- Wu, G.; Langrana, N. A.; Sadanji, R.; Danforth, S. (2002), "Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals", *Materials & Design*, Vol. 23, No. 1, pp. 97-105.
- Allahverdi, M.; Danforth, S.; Jafari, M.; Safari, A. (2001), "Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, No.10, pp. 1485-1490.
- Panda, S. K.; Padhee, S.; Anoop Kumar, S.; Mahapatra, S. (2009), "Optimization of fused deposition modelling (FDM) process parameters using bacterial foraging technique", *Intelligent information management*, Vol. 1, No. 02, pp. 89.
- Nikzad, M.; Masood, S.; Sbarski, I. (2011), "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3448-3456, 2011.
- Lee, B.; Abdullah, J.; Khan, Z. (2005), "Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, No. 1, pp. 54-61.
- Rayegani, F.; Onwubolu, G. C. (2014), "Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1-4, pp. 509-519.
- Wu, Wenzheng.; Geng, Peng.; Li, Guiwei.; Zhao, Di.; Zhang, Haibo.; Zhao, Ji. (2015), "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS, Materials", DOI: 10.3390/ma8095271.
- Nabipour, M.; Behraves, A H.; Akhouni, B. (2017) "Investigation of Effect of Printing Parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal Composites Printed by FDM 3D Printer". *Modares Mechanical Engineering*, No 1, pp. 145-150 (In persian).

11. Eryildiz, M.; Altan, M.; Gumus, B.; Kahraman, Y. (2018) "Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength". *Materials Testing*, Vol. 60, No 5, pp. 443 – 443.
12. Shanmugam, V Das, O.; Babu, K.; Marimuthu, U.; Veerasimman, A.; Joel Johnson, D.; Esmacely Neisiany, R.; S. Hedenqvist, M.; Ramakrishna, S.; Berto, F. (2021) "Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials". *International Journal of Fatigue*, vol. 143, Article 106007.
13. Roy, R. (1990), "A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series", *New York*, pp. 7-80.
14. Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Wu, Y. (2004) "Taguchi's quality engineering handbook", *Wiley*, pp. 60-80.
15. Popescu, D.; Aza, C. G.; Florin, B.; Zapciu, A. (2018), "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review", *Polymer Testing*, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
16. Naveed, N. (2020), "Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM)", *Materials Technology*, DOI: 10.1080/10667857.2020.1758475.