



Investigating the Effect of Process Parameters on the Tensile Strength of PLA Parts Produced by FDM Method Using the Response Surface Method



ARTICLE INFO

Authors

Mirafzali SMB.^{1*},
Hasanabadi A.¹,
Afshari H.¹

¹ Mechanical Engineering Department,
University of Birjand, Birjand, Iran.

* Correspondence

Address:
Seyyed_mohammad.mirafzali2021
@birjand.ac.ir

How to cite this article

S. M. B. Mirafzali, A. Hasanabadi, H. Afshari. Investigating the Effect of Process Parameters on the Tensile Strength of PLA Parts Produced By Fdm Method Using The Response Surface Method. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022; 22(10):235-239.

ABSTRACT

Today, additive manufacturing methods have found wide applications in various industries due to their many advantages, including not needing tools and molds, as well as short production time. Among these methods, the FDM process is widely used due to its cheapness and ease of production. As a result, it is very important to discover the relationship between the mechanical properties of the product produced in this way and the parameters used in the process. In this research, the effects of layer lamination angle, infill extrusion width and layer thickness on the normal force and tensile strength of PLA printed samples are examined. In order to investigate the effects of the parameters, the design of experiment, using surface response and Box-Benken method was used with the help of Minitab software. The results of the tests show that the maximum tensile strength and normal tensile force of the printed samples were equal to 38.36 MPa and 1.50 kN, respectively, which is at zero-degree lamination angle, infill extrusion width of 150% and the thickness of the layer 0.3 mm.

Keywords Fused Deposition Modeling, Tensile Strength, PLA Material, Design of Experiment

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۲۳۹-۲۳۵.



بررسی نحوه تاثیر پارامترهای فرایند بر استحکام کششی قطعات PLA تولید شده به روش FDM به کمک روش سطح پاسخ



چکیده

امروزه روش‌های ساخت افزایشی به دلیل مزایای متعددی از جمله عدم نیاز به ابزار و قالب و همچنین زمان تولید کوتاه، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. در بین این روش‌ها روش FDM به دلیل ارزانی و سهولت تولید، کاربرد وسیع دارد. در نتیجه کشف ارتباط بین خواص مکانیکی محصول تولید شده به این روش و پارامترهای مورد استفاده در فرایند، اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق تأثیرات زاویه لایه چینی، تراکم و فشردگی شبکه و ضخامت لایه بر نیروی نرمال و استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده از جنس PLA مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی تأثیرات پارامترها از طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح و روش باکس‌بنکن به کمک نرم افزار مینی‌تب استفاده شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که بیشترین میزان استحکام کششی و نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده به ترتیب برابر با ۳۸/۳۶ مگاپاسکال و ۱/۵۰ کیلونیوتن بوده است، که در زاویه لایه‌چینی صفر درجه و تراکم و فشردگی شبکه ۱۵۰ درصد و ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر رخ می‌دهد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

سیدمحمدباقر میرافزالی^{۱*}
علی حسن‌آبادی^۱
حسین افشاری^۱

^۱ مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

* نویسنده مسئول

آدرس:

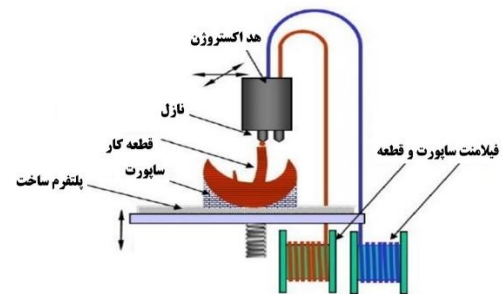
Seyyed_mohammad.mirafzali2021
@birjand.ac.ir

کلیدواژه‌ها روش FDM، استحکام کششی، جنس PLA، طراحی آزمایش

۱- مقدمه

استفاده از پرینترهای سه بعدی یکی از روش‌های سریع و کم هزینه ساخت قطعات پیچیده در صنایع مختلف می‌باشد. تولید قطعات به کمک پرینترهای سه بعدی عمدتاً به صورت لایه‌چینی مواد بر روی یکدیگر است^[1].

برای ساخت قطعات به کمک پرینترهای سه بعدی از روش‌های تولید متعددی نظیر استریولیتوگرافی (SLA) و لایه‌نشانی هم-جوش (FDM) استفاده می‌شود. در روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) ماده اولیه به شکل رشته جامد (فیلامنت) در نازل دستگاه گرم می‌شود و پس از خمیری شدن، قابلیت سیلان پیدا می‌کند. سپس ماده خمیری شده از داخل روزنه نازل به شکل رشته‌های نازک و تنظیم شده به صورت پیوسته خارج شده و در مسیر حرکت نازل به صورت لایه‌لایه روی هم قرار گرفته و حجم سه بعدی را می‌سازد. در قسمت سخت افزار این دستگاه از یک عملگر کنترل عددی به کمک کامپیوتر که وظیفه جابه‌جایی نازل را دارد نیز استفاده شده است^[2] شکل ۱ نمای شماتیک این روش را نشان می‌دهد.

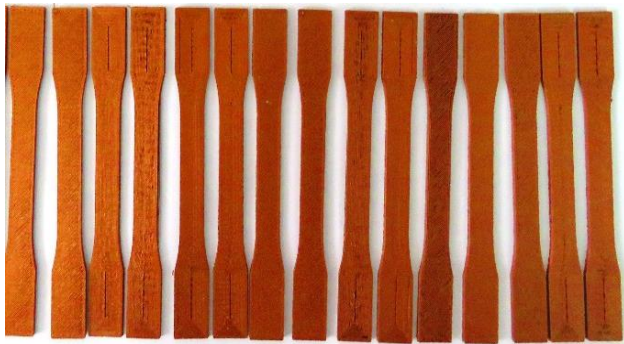


شکل ۱) نمای شماتیک روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM)^[3]

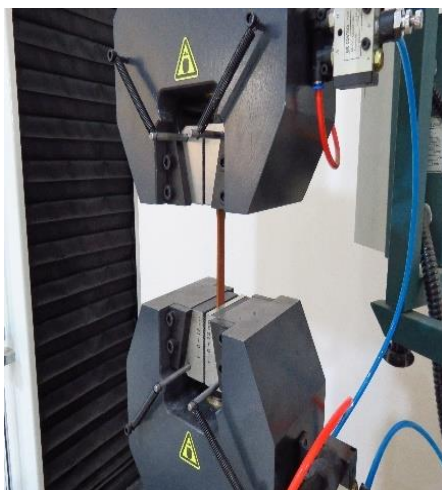
در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی پیرامون این روش ساخت افزایشی انجام شده است. حسن‌زاده و همکاران^[4]، تأثیرات پارامترهای ورودی فرایند را بر استحکام ضربه قطعات پلی لاکتید اسید (PLA) تولید شده به روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) بررسی نمودند. در این تحقیق درصد پرشوندگی، زاویه لایه‌چینی و تغییرات ضخامت لایه به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که درصد پرشوندگی مؤثرترین پارامتر می‌باشد که با کاهش آن استحکام ضربه کاهش می‌یابد. مرادی و همکاران^[5]، در پژوهشی فرایند برشکاری لیزر ورق پلی‌لاکتیک اسید را که به وسیله پرینتر سه بعدی به روش لایه‌نشانی تولید شده بود، را مورد بررسی قرار دادند. موقعیت نقطه‌ی کانونی لیزر، سرعت برشکاری و توان لیزر به عنوان پارامترهای متغیر ورودی دستگاه لیزر در نظر گرفته شدند، نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با تغییرات موقعیت نقطه کانونی، عرض بریدگی پایین، افزایش یافته و کمترین عرض بریدگی پایین در موقعیت نقطه کانونی نزدیک به قطعه کار است. پترسون

و همکاران^[6]، در پژوهشی محدودیت‌ها و مشکلات ساخت قطعات به روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) را بررسی نمودند. در این پژوهش از سه نوع فیلامنت پلی لاکتید اسید (PLA)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و پلی‌کربنات (PC) برای ساخت قطعات استفاده شد و در ادامه شاخصه‌هایی که منجر به ایجاد محدودیت می‌شد، شناسایی گردید. نبی‌پور و همکاران^[7]، در تحقیقی به بررسی تأثیرات پارامترهای پرینت بر استحکام کششی قطعات کامپوزیتی پلیمری - فلزی ساخته شده به روش FDM پرداخته‌اند. در این تحقیق از پودر مس به‌عنوان جزء فلزی با درصد وزنی ۲۵٪ و گرانول به عنوان جزء پلیمری با درصد وزنی ۷۵٪ استفاده شده است. قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پرشدن و دمای نازل نیز به‌عنوان پارامترهای ورودی فرایند انتخاب شده است. بوشتو و همکاران^[8]، در پژوهشی به بررسی سطح هندسی در فرایند لایه‌نشانی هم‌جوش پرداختند. در این پژوهش یک روش نوین برای توصیف هندسی پروفیل زبری ارائه شد. براجلیه و همکاران^[9]، در تحقیقی تأثیرات سرعت پرینت بر روی دقت ابعادی قطعات تولید به روش استریولیتوگرافی (SLA) را مورد بررسی قرار دادند. زارکو و همکاران^[10] نیز در پژوهشی اهمیت ساخت قالب‌های برجسته یا ابزار مثبت‌کاری به وسیله پرینتر سه بعدی و به روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت پرینت، دقت ابعادی مدل‌ها کاهش می‌یابد و بدترین سرعت پرینت نیز برابر با ۹۰ میلی‌متر بر ثانیه است. رینانتو و همکاران^[11] نیز به بررسی پارامترهای پرینت سه بعدی به روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) پرداخته‌اند. پارامترهای متغیر ورودی برای پرینت شامل درصد پرشوندگی (چگالی)، درجه حرارت اکستروژن و زاویه پر شدن می‌باشد. در این تحقیق از طراحی آزمایش به روش تاگوچی استفاده شد و تأثیرات پارامترهای ورودی بر روی استحکام کششی، مصرف انرژی و زمان پردازش مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه برای دستیابی به بیشترین میزان استحکام کششی و کمترین مقدار مصرف انرژی و زمان پردازش، پارامترهای ورودی فرایند بهینه شدند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بهینه‌ترین مقدار برای پارامترها، در دمای اکستروژن ۲۱۰ سانتی‌گراد، زاویه پرشوندگی ۴۵ درجه و درصد پرشوندگی ۴۰ درصد می‌باشد. فنگ و همکاران^[12]، به مطالعه و بررسی میزان استحکام کششی قطعات ساخته شده با فیلامنت نایلون ۱۲ (PA12) و فیلامنت تولید شده با پودر بازیافت شده پلی‌آمید، با استفاده از روش تف جوشی با لیزر انتخابی (SLS) پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود اثر سرعت چاپ و جهت ساخت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اگر سرعت چاپ خیلی زیاد یا کم باشد، خواص مکانیکی به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین با بررسی میزان استحکام کششی، مدول خمشی

جهت بررسی استحکام کششی و نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده، برای هر آزمایش یک نمونه‌ی تست کشش مطابق استاندارد ASTM E8 پرینت شد. برای انجام آزمایش کشش، از دستگاه تست کشش مدل STM-250 ساخت شرکت SANTAM استفاده شد. آزمایش کشش برای تمام نمونه‌ها در دمای محیط و با سرعت تست ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نمونه‌های پرینت شده و دستگاه تست کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمونه‌های پرینت شده مطابق با جدول طراحی آزمایش



شکل ۳) دستگاه تست کشش SANTAM مدل STM-25

جدول ۲ نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌های پرینت شده را مطابق با پارامترهای مشخص شده نشان می‌دهد.

۳- ارائه نتایج و بحث

به منظور بررسی اعتبار مدل و آزمایشات انجام شده از نمودارهای چهارگانه احتمال نرمال، پراکندگی باقیمانده‌ها، هیستوگرام و پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به بازه‌ی زمانی استفاده شده است. برابری و همگنی واریانس‌ها با توجه به نداشتن الگویی مشخص و شکلی معین در نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها قابل اثبات است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودارهای چهارگانه باقیمانده را برای استحکام کششی و نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده را نشان می‌دهد.

واستحکام ضربه قطعات ساخته شده، به این نتیجه رسیدند که جهت X بهترین خواص ذکر شده را دارد.

در روش لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) پارامترهای متعددی وجود دارد که بر خواص مکانیکی قطعات تولید شده، اثرگذار هستند. برخی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در این روش شامل ضخامت لایه نشانی، زاویه پرشدن، جهت ساخت، تراکم پرشدن، سرعت چاپ، الگوی پرکردن، دمای اکستروژن، قطر نازل و فاصله هوایی بین لایه‌ها می‌باشند [13].

در این پژوهش با استفاده از روش سطح پاسخ، تاثیر عواملی نظیر زاویه لایه چینی، تراکم و فشردگی شبکه و ضخامت لایه بر خواص استحکام و نیروی نرمال کششی قطعات تهیه شده به روش FDM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

روش باکس‌بنکن، طراحی عاملی سه سطحی ناکامل است. در این روش یک بلوک آزمایشات دو سطحی در بین مجموعه مختلفی از متغیرها تکرار می‌شود. این طرح برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایشات (نمونه‌ها) در طراحی با تعداد فاکتور زیاد ارائه شد. تعداد آزمایشات در این روش به گونه ای ثابت نگه داشته می‌شود که برای تخمین ضرایب معادله درجه دوم نیز کافی باشد. نسبت سیگنال به نویز مقدار حساسیت پاسخ‌های خروجی مورد بررسی را به عوامل غیرقابل کنترل در آزمایش نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر با استفاده از طراحی آزمایش و به کمک روش پاسخ‌سطح و روش باکس‌بنکن و به کمک نرم‌افزار مینی‌تب تأثیرات زاویه لایه چینی، تراکم و فشردگی شبکه و ضخامت لایه بر نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های پرینت شده از جنس پلی لاکتید اسید (PLA) در فرایند لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای هر یک از پارامترهای ورودی، ۳ سطح در نظر گرفته شده است. جدول ۱ زیرسطوح این پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول ۱) سطوح پارامترهای طراحی آزمایش

پارامتر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
زاویه لایه چینی (درجه)	A	۰	۴۵	۹۰
تراکم و فشردگی شبکه (درصد)	B	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
ضخامت لایه (میلی‌متر)	C	۰/۱	۰/۲	۰/۳

با استفاده از سطوح پارامترهای در نظر گرفته شده، جدول طراحی آزمایش به روش باکس‌بنکن ایجاد شده است، که شامل ۱۵ آزمایش می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامتر تراکم و فشردگی شبکه (Infill Extrusion width) با قسمت اکسترودر پرینتر مرتبط است و هر چه درصد آن کمتر شود، تراکم بیشتر می‌شود. به همین دلیل می‌تواند مقادیر بیشتر از ۱۰۰ درصد را به خود بگیرد.

برای بررسی مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ‌های خروجی در فرایند از جدول ضرایب براساس آنالیز واریانس استفاده می‌شود.

جدول ۲) آزمایشات طراحی شده به روش باکس-بنکن و نتایج تست کشش

شماره نمونه	زاویه لایه چینی (درجه)	تراکم و فشردگی شبکه (درصد)	ضخامت لایه (میلیمتر)	F (KN)	σ (MPa)
۱	۰	۱۰۰	۰/۲	۱/۲۷	۳۲/۰۶
۲	۴۵	۲۰۰	۰/۳	۱/۳۲	۳۳/۸۰
۳	۹۰	۲۰۰	۰/۲	۱/۳۴	۳۴/۴۳
۴	۴۵	۲۰۰	۰/۱	۱/۳۹	۳۰/۸۱
۵	۰	۱۵۰	۰/۳	۱/۵۰	۳۸/۳۶
۶	۴۵	۱۰۰	۰/۱	۱/۲۲	۳۰/۸۱
۷	۹۰	۱۵۰	۰/۳	۱/۳۳	۳۳/۴۴
۸	۹۰	۱۵۰	۰/۱	۱/۲۴	۳۱/۷۶
۹	۰	۲۰۰	۰/۲	۱/۴۷	۳۵/۵۴
۱۰	۹۰	۱۰۰	۰/۲	۱/۲۹	۳۲/۸۱
۱۱	۴۵	۱۵۰	۰/۲	۱/۴۰	۳۸/۰۰
۱۲	۰	۱۵۰	۰/۱	۱/۳۷	۳۵/۲۲
۱۳	۴۵	۱۵۰	۰/۲	۱/۴۰	۳۸/۰۰
۱۴	۴۵	۱۵۰	۰/۲	۱/۴۰	۳۸/۰۰
۱۵	۴۵	۱۰۰	۰/۳	۱/۳۵	۳۱/۲۸

جدول ۳) جدول آنالیز واریانس برای استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده

Source	DF	Seq SS	%	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	9.548	8.83	9.5485	9.5485	5.24	0.071
B	1	7.258	6.71	7.2580	7.2580	3.99	0.102
C	1	8.570	7.93	8.5698	8.5698	4.71	0.082
A*A	1	0.125	0.12	1.4888	1.4888	0.82	0.407
B*B	1	44.199	40.88	49.3256	49.3256	27.09	0.003
C*C	1	26.322	24.35	26.3221	26.3221	14.46	0.013
A*B	1	0.865	0.80	0.8649	0.8649	0.48	0.521
A*C	1	0.533	0.49	0.5329	0.5329	0.29	0.612
B*C	1	1.588	1.47	1.5876	1.5876	0.87	0.393
Error	5	9.103	8.42	9.1033	1.8207	-	-
Total	14	108.112	100	-	-	-	-

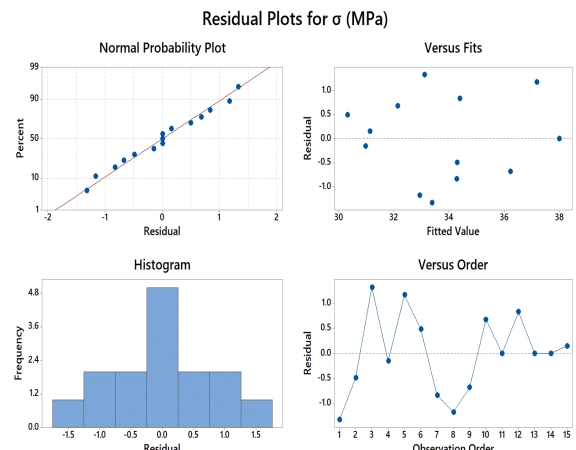
جدول ۴) جدول آنالیز واریانس برای نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده

Source	DF	Seq SS	%	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	0.021012	24.24	0.021012	0.021012	11.39	0.020
B	1	0.019012	21.93	0.019013	0.019013	10.30	0.024
C	1	0.009800	11.30	0.009800	0.009800	5.31	0.069
A*A	1	0.000034	0.04	0.000283	0.000283	0.15	0.712
B*B	1	0.007978	9.20	0.008775	0.008775	4.76	0.081
C*C	1	0.003606	4.16	0.003606	0.003606	1.95	0.221
A*B	1	0.005625	6.49	0.005625	0.005625	3.05	0.141
A*C	1	0.000400	0.46	0.000400	0.000400	0.22	0.661
B*C	1	0.010000	11.53	0.010000	0.010000	5.42	0.067
Error	5	0.009225	10.64	0.009225	0.001845	-	-
Total	14	0.086693	100	-	-	-	-

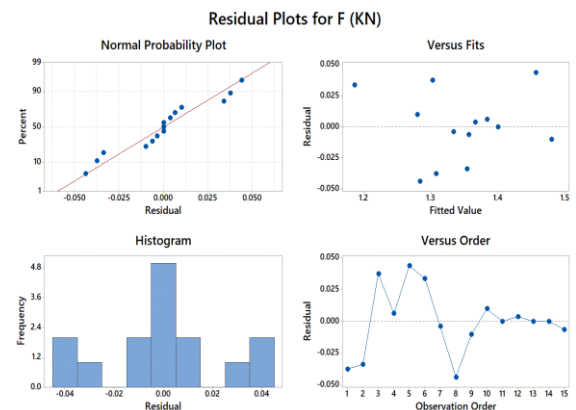
شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تأثیرات پارامترهای ورودی را بر استحکام کششی و نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده را نشان می‌دهد.

یکی از مهمترین روش‌های آماری برای آنالیز و تحلیل داده‌ها، روش رگرسیون خطی یا چندگانه می‌باشد. در این روش می‌توان پاسخ‌های خروجی مسئله را با کمک یک رابطه منطقی به پارامترهای مستقل ورودی مرتبط ساخت.

جدول ۵ معادلات رگرسیون استحکام کششی و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده در این تحقیق، را نشان می‌دهد.



شکل ۴) نمودارهای باقیمانده برای استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده

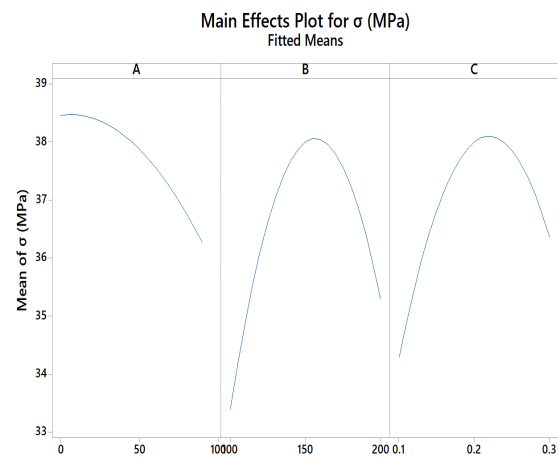


شکل ۵) نمودارهای باقیمانده برای نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده

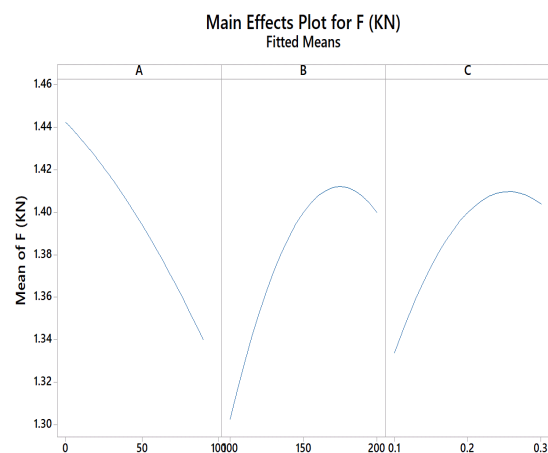
افزایش استحکام و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده و پس از آن موجب کاهش استحکام و نیروی نرمال کششی می‌شود. با در نظر گرفتن کلیه پارامترها، نقطه بهینه استحکام کششی و نیروی نرمال کشش نمونه‌های پرینت شده در زاویه لایه‌چینی صفر درجه و تراکم و فشردگی شبکه ۱۵۰ درصد و ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر رخ می‌دهد که مقادیر به دست آمده برای نیرو و استحکام کششی به ترتیب برابر با ۱/۵۰ کیلونیوتن و ۳۸/۳۶ مگاپاسکال به دست آمده است.

مراجع

- 1- Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019;35:1286-96.
- 2- Zein I, Huttmacher DW, Tan KC, Teoh SH. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials*. 2002;23(4):1169-85.
- 3- Durgun I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool. *Rapid Prototyping Journal*. 2015.
- 4- Hasanzadeh R, Azdast T. Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples. *MODARES MECHANICAL ENGINEERING*. 2021;21(2 #a001457):69-78.
- 5- Moradi M, Falavandi H, Karami Moghadam M, Shaikh Mohammad Meiabadi MS. 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 #a00852):999-1009.
- 6- Patterson AE, Chadha C, Jasiuk IM. Identification and Mapping of Manufacturability Constraints for Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;5(2).
- 7- Nabipour M, Behraves AH, Akhondi B. Effect of printing parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal composites Printed via FDM 3D printer. *mdrsrjns*. 2017;17(1):145-50.
- 8- Bottini L, Boschetto A. Surface Characterization in Fused Deposition Modeling. 2014.
- 9- Brajlilj T, Valentan B, Balic J, Igor D. Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*. 2011;17:64-75.
- 10- Žarko J, Vladić G, Pál M, Dedijer S. Influence of printing speed on production of embossing tools using FDM 3D printing technology. *Journal of Graphic Engineering and Design*. 2017;8:19-27.
- 11- Rinanto A, Nugroho A, Prasetyo H, Pujiyanto E. Simultaneous Optimization of Tensile Strength, Energy Consumption and Processing Time on FDM Process Using Taguchi and PCR-TOPSIS. 2018. 1-5 p.
- 12- Feng L, Wang Y, Wei Q. PA12 powder recycled from SLS for FDM. *Polymers*. 2019;11:727.
- 13- Dey A, Yodo N. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019;3:64.



شکل ۶) تأثیرات پارامترهای ورودی بر استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده



شکل ۷) تأثیرات پارامترهای ورودی بر نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده

جدول ۵) معادلات رگرسیون استحکام کششی و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده

σ (MPa)	$= -8.39 + 0.0512 A + 0.4417 B + 101.9 C - 0.000314 A^2 A - 0.001462 B^2 B - 267.0 C^2 C - 0.000207 A^2 B - 0.081 A^2 C + 0.126 B^2 C$
F (KN)	$= 0.230 + 0.00219 A + 0.00957 B + 3.20 C - 0.000004 A^2 A - 0.000019 B^2 B - 3.12 C^2 C - 0.000017 A^2 B - 0.00222 A^2 C - 0.01000 B^2 C$

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح و روش باکس-بنکن، روشی مناسب برای مطالعه تأثیرات پارامترهای ورودی بر استحکام کششی و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده در فرایند لایه‌نشانی هم‌جوش (FDM) می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش زاویه‌ی لایه‌چینی باعث کاهش استحکام و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده می‌شود. همچنین با افزایش تراکم و فشردگی شبکه تا میزان ۱۵۰ درصد، استحکام و نیروی نرمال کششی نمونه‌های پرینت شده افزایش و پس از آن استحکام و نیروی نرمال کششی کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه نیز تا ۰/۲ میلی‌متر باعث