



ارزیابی عملکرد خستگی خمشی دورانی و خزش در قطعات PLA طی فرآیند لایه‌نشانی مذاب

پیام سرایان^{*}، احسان شکوری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

^{*} تهران، صندوق پستی 1651153311، p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 مهر 1400

داوری اولیه: 15 آبان 1400

پذیرش: 27 آبان 1400

کلیدواژگان:

لایه نشانی مذاب

پلی لاکتیک اسید

خستگی خمشی دورانی

خزش

چکیده

امروزه با توجه به اهمیت کاهش زمان بین طراحی تا تولید محصول، استفاده از روش‌هایی نظیر لایه‌نشانی مذاب (FDM)، به عنوان جایگزین مناسبی در مقایسه با روش‌های تولید کاهشی به‌شمار می‌رود. پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)، به عنوان یک پلیمر زیست سازگار در بسیاری از زمینه‌های مهندسی و پزشکی کاربرد دارد. بهبود قابلیت تحمل بارگذاری طولانی مدت در چنین محصولاتی یکی از معیارهای ضروری جهت اطمینان از عملکرد مناسب این قطعات می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی خواص خستگی و خزشی نمونه‌های ساخته شده از پلیمر پلی‌لاکتیک اسید طی روش لایه نشانی مذاب، به ارزیابی تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، درصد پرشدگی و الگوی پرشدن بر رفتار خستگی و مقاومت خزشی نمونه‌ها پرداخته شد. همچنین به منظور بهره‌مندی از تحلیل آماری از روش سطح پاسخ استفاده گردیده است. آنالیز واریانس (ANOVA) نشان داد، درصد پرشدگی و ضخامت لایه بیشترین تأثیر را بر افزایش عمر خستگی و کاهش نرخ خزشی نمونه‌ها داشته است. نتایج نشان داد، لایه‌نشانی به‌ازای ارتفاع لایه 0/1 میلی‌متر، ضخامت لایه 0/3 میلی‌متر، درصدپرشدگی 75٪ با استفاده از الگوی لانه زنبوری بالاترین عمرخستگی و مقاومت خزشی نمونه‌ها را در پی داشته است.

Evaluation of rotary fatigue bending and creep performance in PLA components during fused deposition modeling

Payam Saraeian^{*}, Ehsan Shakouri

Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^{*}P.O.B 1651153311, Tehran, p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 12 October 2021

First Decision: 6 November 2021

Accepted: 18 November 2021

Keywords:

Fused deposition modeling (FDM)

PLA

Rotary fatigue bending

Creep

Abstract

Today, due to the importance of reducing the time between design and production, the use of methods such as fused deposition modeling (FDM), is considered as a good alternative compared to reduction production methods. Poly lactic acid (PLA) is used as a biocompatible polymer in many engineering and medical fields. Improving the long-term load bearing capacity of such products is one of the essential criteria to ensure the proper performance of these components. In this study, in order to improve the fatigue life and creep resistance of samples made of poly lactic acid polymer during the fused deposition modeling, to evaluate the effect of layer height, layer thickness, infill percentage and infill pattern on fatigue behavior. And creep resistance of the samples was investigated. Also, in order to benefit from statistical analysis, the response surface methodology has been used. Analysis of variance (ANOVA) showed that the percentage of filling and layer thickness had the greatest effect on increasing the fatigue life and reducing the creep rate of the samples. The results showed that layering based on layer height of 0.1 mm, layer thickness of 0.3 mm, infill percentage of 75% using honeycomb pattern had the highest fatigue life and creep resistance of the samples.

1- مقدمه

دارد [3]. ساخت افزایشی¹ از جمله سریع‌ترین و به صرفه‌ترین روش‌های تولید برشمرده می‌شود. به منظور اجرای عملیات نمونه‌سازی سریع²، روش‌های متنوعی نظیر لایه نشانی مذاب³، استریولیتوگرافی⁴، ذوب انتخابی به کمک لیزر⁵ و لایه نشانی

پلی لاکتیک اسید (PLA)، نوعی پلیمر ترموپلاستیک زیست سازگار تأیید شده توسط سازمان غذا و دارو است که علاوه بر مصارف بهداشتی و دارویی، در صنایع پزشکی نیز به منظور تولید ایمپلنت‌های زیستی، مهندسی بافت و همچنین ساخت ابزار و تجهیزات پزشکی استفاده می‌گردد [1، 2]. همچنین، این پلیمر نیمه کریستالی در صنایع برق و الکترونیک نیز کاربرد

¹ Additive Manufacturing

² Rapid Prototyping

³ Fused Deposition Modeling

⁴ Stereo lithography

⁵ Selective laser Sintering

Please cite this article using:

P. Saraeian, E. Shakouri, Evaluation of rotary fatigue bending and creep performance in PLA components during fused deposition modeling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 9, pp. 60- 69, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این فرآیند دخیل هستند که می‌توان به ضخامت لایه‌ها،⁵ زاویه آرایش،⁶ فاصله هوائی،⁷ راستای ساخت،⁸ سرعت چاپ،⁹ دمای نازل،¹⁰ دمای بستر ساخت،¹¹ نرخ لایه‌نشانی¹² و سرعت اکستروژن¹³ اشاره نمود [10، 11]. روش‌های مختلفی برای افزایش خواص مکانیکی قطعات تولید شده با استفاده از روش چاپگر سه بعدی وجود دارد که از این میان می‌توان به کنترل پارامترهای فرآیند، استفاده از مواد افزودنی، ترکیب پلیمرها، عملیات حرارتی و غیره اشاره نمود [12، 13]. این در حالی است که بررسی رفتار مکانیکی قطعات ساخته شده با استفاده از چاپگرهای سه بعدی، به دلیل تعداد زیاد پارامترهای دخیل در فرآیند، پیچیده می‌باشد [14].

نتایج حاصل از تحقیقی نشان داد که با کاهش زاویه رشته‌ها نسبت به محور بارگذاری، مولکول‌ها در راستای نیروی اعمال شده جهت‌گیری می‌نمایند که نتیجه آن افزایش استحکام نمونه است. درحالی‌که با افزایش فاصله هم‌نشینی، از استحکام کششی، خمشی و مقاومت نمونه در برابر ضربه کاسته می‌شود [15].

طی پژوهشی تأثیر زاویه ساخت در سه راستای X، Y و زاویه 45° بر خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده از (PLA) طی فرآیند (FDM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین استحکام کششی و مقاومت در برابر خستگی به ترتیب در نمونه‌های ساخته شده در راستای محور X و نمونه‌های ساخته شده با زاویه 45° حاصل شده است [16]. طی بررسی تأثیر پارامترهای زاویه رشته‌ها، ضخامت لایه، درصد پرشدگی و سرعت چاپ بر خواص مکانیکی نمونه‌های ABS، PLA و PEEK تولید شده به روش (FDM) نتایج نشان داد که درصد پرشدگی بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی نمونه‌ها داشته است [17].

در این راستا با توجه به کاربرد وسیع پلیمر پلی‌لاکتیک اسید در پزشکی و لزوم بهبود خواص مکانیکی این پلیمر جهت تولید محصولات و تجهیزات مختلف پزشکی و همچنین عدم وجود تحقیقی پیرامون بهبود خواص خستگی خمشی دورانی و خزشی این ماده، در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، درصد پرشدن و الگوی پرشدن بر رفتار خستگی و خزشی محصولات ساخته شده از پلیمر پلی‌لاکتیک اسید به روش لایه‌نشانی مذاب پرداخته شده است.

فوتوپلیمرها¹ ابداع شده‌اند. در میان فن‌آوری‌های مختلف ذکر شده، روش لایه‌نشانی مذاب به دلیل سادگی فرآیند، بیش از سایرین مورد توجه قرار گرفته است [4]. چاپ سه بعدی، یک اصطلاح عمومی است که برای هر نوع تولید افزایشی بصورت لایه‌ای استفاده می‌شود که دربرگیرنده گروهی از روش‌ها برای دستیابی سریع به قطعه نهایی با استفاده از افزودن تدریجی مواد به کمک طراحی کامپیوتری می‌باشد [5].

امروزه، چاپگرهای سه بعدی²، به واسطه سهولت کاربری و دقت مطلوب، توانسته‌اند جایگاه ویژه‌ای را در صنعت به خود اختصاص دهند. ساخت افزایشی یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌های ساخت و تولید است که در آن محصول به صورت افزایشی و لایه‌لایه ساخته می‌شود و با استفاده از آن می‌توان به سرعت به مدل فیزیکی قطعه مورد نظر دست یافت [6، 7].

عنوان ساخت افزایشی، در نقطه مقابل روش‌های کاهشی همچون ماشین‌کاری سنتی که شامل براده‌برداری هستند بیان می‌شود. بر خلاف روش‌های سنتی، در فرآیندهای افزایشی، احتیاجی به تجهیزات خاص هر قطعه و یا حتی طراحی حرکت خاص ابزار نیست. ساخت افزایشی مجموعه‌ای از فرآیندهای خودکار است که طی آن، قطعه به طور مستقیم از مدل سه بعدی دیجیتالی به دست آمده از نرم‌افزارهای CAD³ ساخته می‌شود. طی این روش، قطعات با پیچیده‌ترین هندسه و با استفاده از مدل CAD سه بعدی، به تعداد زیادی لایه‌های نازک تقسیم می‌شوند و سپس توسط این داده‌های هندسی، قطعه لایه به لایه ساخته می‌شود [8، 9].

در میان روش‌های متعدد ساخت افزایشی، فرآیند لایه‌نشانی مذاب از جمله روش‌هایی است که حاصل ادغام علم مواد، فرآیند اکستروژن، طراحی به کمک کامپیوتر و کنترل عددی می‌باشد. در صنعت، هر چه طرح پیچیده تر باشد، فرآیند تولید آن نیز دشوارتر خواهد بود. غالباً، برای ساخت بسیاری از قطعات اختصاصی به روش سنتی به دلیل تقاضای کم و عدم امکان تولید به روش انبوه، زمان و هزینه بسیار بالایی صرف می‌شود و بروز کوچکترین خطا در ساخت این قطعات، هزینه‌های بالایی در پی خواهد داشت. استفاده از فن‌آوری پرینت سه بعدی می‌تواند میزان مصرف مواد و زمان تولید را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

بکارگیری مواد گرمانرم⁴ مانند ABS، PA، PS، PLA، HIPs، در PEEK در این روش متداول می‌باشد. پارامترهای متعددی در

⁵ Layer Thickness⁶ Raster angle⁷ Air Gap⁸ Build Orientation⁹ Print Speed¹⁰ Nozzle Temperature¹¹ Bed Temperature¹² Deposition Rate¹³ Extrude Speed¹ photopolymers² 3D Printer³ Computer Aided Design⁴ Thermoplastic

2- روش تجربی

در این پژوهش، به منظور تهیه نمونه‌های مورد نیاز، از فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید با برند ایسان (Esun) استفاده گردید. خواص فیزیکی و مکانیکی فیلامنت در جدول 1 ارائه شده است. عملیات لایه‌نشانی با استفاده از دستگاه چاپگر سه بعدی HERMES X2 انجام گردید. در شکل 1 نمای از دستگاه و در جدول 2 مشخصات فنی دستگاه ارائه شده است.

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌لاکتیک‌اسید [18].

Table 1 PLA mechanical and physical properties [18].

مشخصات فیزیکی و مکانیکی پلی‌لاکتیک‌اسید PLA	
دمای ذوب	200-225 درجه سانتی‌گراد
درصد ازدیاد طول	14 درصد
استحکام کششی	78 مگا پاسکال
استحکام خمشی	90 مگا پاسکال
مقاومت در برابر ضربه	5/6 کیلو ژول بر مترمربع

میلی‌متر بر ثانیه و دمای بستر 70 درجه سانتی‌گراد و قطر نازل 0/4 میلی‌متر انجام گردید.

برای بررسی رفتار خستگی خمشی دورانی و مقاومت خزشی، نمونه‌های مورد نیاز برای هر آزمون، به روش لایه‌نشانی مذاب تهیه گردید. به این ترتیب، نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمون خستگی دورانی به شکل استوانه‌های دمبلی شکل ساخته شد. در شکل 2 طرحی از هندسه نمونه‌های تهیه شده جهت انجام آزمون خستگی خمشی دورانی ارائه شده است.

به منظور انجام آزمون خستگی، از دستگاه خستگی خمشی دورانی سنتام (Santam) مدل SFT-850 استفاده گردید. نمایی از دستگاه آزمون خستگی در شکل 3 نشان داده شده است.

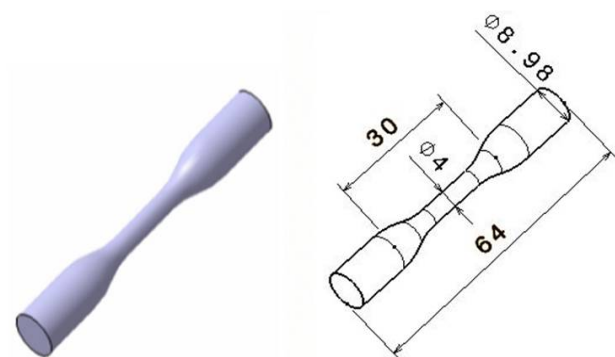


Fig. 2 Sample geometry made to test rotary fatigue bending

شکل 2 هندسه نمونه ساخته شده جهت آزمون خستگی خمشی دورانی



Fig. 3 View of Rotary fatigue bending test machine

شکل 3 نمایی از دستگاه آزمون خستگی خمشی دورانی

آزمون خستگی چرخه بالا (HCF)¹، به منظور ارزیابی رفتار خستگی نمونه‌ها انجام گردید. در این آزمون، تنش‌های خمشی متناوب با مقادیر 5، 10 و 15 مگاپاسکال با فرکانس بارگذاری 100 هرتز، در دمای اتاق (25 درجه سانتی‌گراد) اعمال گردید. نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمون خزش نیز مطابق با

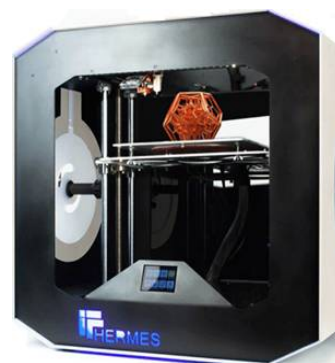


Fig. 1 View of 3D Printing machine HERMES X₂

شکل 1 نمایی از دستگاه چاپگر سه بعدی

جدول 2 مشخصات فنی دستگاه چاپگر سه بعدی

Table 2 Technical specifications of the 3D printer

مشخصات فنی چاپگر سه بعدی HERMES X ₂	
کمترین ضخامت لایه چاپ	20 میکرون
سرعت نازل	تا 160 میلی‌متر بر ثانیه
دمای صفحه ساخت	تا 80 درجه سانتی‌گراد
دمای اکسترودر	تا 270 درجه سانتی‌گراد
قطر نازل	از 100 میکرون به بالا

به منظور اطمینان از یکنواختی نمونه‌های ساخته شده، هر نمونه به طور جداگانه و در وسط صفحه ساخت تهیه گردید. با توجه به نتایج حاصل از پیش‌آزمایش‌های انجام شده، عملیات لایه‌نشانی، با دمای 200 درجه سانتی‌گراد، سرعت چاپ 130

¹ High-cycle fatigue

الگوی پرشدن، هر کدام در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در مجموع 81 آزمایش را طی روش فاکتوریل کامل شامل می‌شود. سطوح ارائه شده برای پارامتر الگوی پرشدن به صورت الگوی خطی (1)، الگوی لوزی (2) و الگوی لانه زنبوری (3) در این جدول تعریف شده است. در شکل 6 شماتیکی از الگوهای استفاده شده ارائه گردیده است.

جدول 3 پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند

Table 3 Selected process parameters and their levels

سطوح کد شده			پارامترها
-1	0	+1	
0/1	0/2	0/3	ارتفاع لایه‌ها (X_1) mm
0/1	0/2	0/3	ضخامت لایه‌ها (X_2) mm
25	50	75	درصد پرشدگی (X_3) %
1	2	3	الگوی پرشدن (X_4)

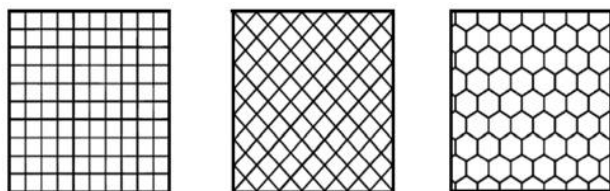


Fig. 6 Schematic of infill patterns.

شکل 6 شماتیکی از الگوهای پر شدن

در این پژوهش، به منظور بهره‌مندی از تحلیل آماری نتایج، از نرم‌افزار مینی‌تب 17 و روش سطح پاسخ استفاده شده است. مینی‌تب یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری و مناسب برای طراحی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است. با استفاده از روش سطح پاسخ، علاوه بر تشخیص پارامترهای مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها، امکان پیش‌بینی و بهینه‌سازی پاسخ‌ها نیز میسر می‌شود. روش سطح پاسخ، در برگرفته دو طرح کلی مرکب مرکزی¹ و باکس بنکن² می‌باشد. در این پژوهش، جهت طراحی آزمایش‌ها از طراحی مرکب مرکزی (CCD) استفاده شده است و به منظور افزایش دقت و جلوگیری از بروز خطا هر آزمایش با سه بار تکرار انجام و از میانگین ارقام بدست آمده برای بیان نتایج بهره گرفته شد.

3- نتایج و بحث

در این قسمت پس از انجام آزمایش‌ها، به تحلیل آماری نتایج

استاندارد ASTM D2990 تهیه گردید. در شکل 4 ابعاد نمونه‌های تهیه شده جهت آزمون خزش، مطابق با استاندارد ذکر شده، ارائه شده است.

آزمون خزش با استفاده از دستگاه تست خزش TM221 با محفظه نمونه شفاف و نسبت اهرم 8:1 و بهره‌مندی از نرم افزار نمایش و تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط کامپیوتر انجام گرفت. در شکل 5 نمایی از دستگاه آزمون خزش ارائه شده است. به این ترتیب آزمون خزش، تحت تنش ثابت 15 مگاپاسکال در دمای محیط (25 درجه سانتی گراد) مطابق با استاندارد ذکر شده انجام گردید و مقادیر نرخ خزش برای هر حالت فرآیندی ثبت گردید.

انتخاب پارامترها در این پژوهش، بر اساس میزان تأثیر آنها بر خواص مکانیکی نمونه‌ها و مطالعه تحقیقات پیشین انجام شده است [19، 21]. همچنین سطوح پارامترها نیز بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام شده، انتخاب گردیده است. به این ترتیب، پارامترها و سطوح انتخابی طی جدول 3 ارائه شده است.

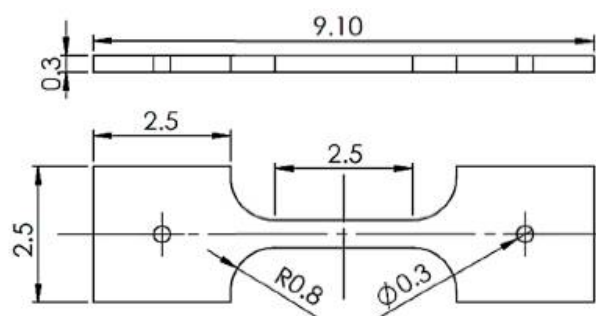


Fig. 4 Dimension of specimens made for creep test (cm)

شکل 4 ابعاد نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون خزش (سانتی‌متر)

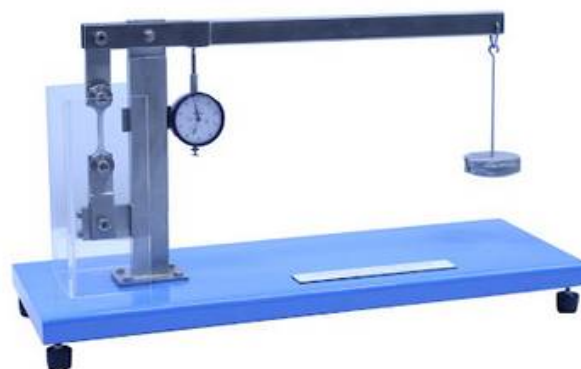


Fig. 5 View of creep test machine

شکل 5 نمایی از دستگاه آزمون خزش

همان‌طور که در جدول طراحی آزمایش مشاهده می‌شود، پارامترهای ارتفاع لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، درصد پرشدگی و

¹ Central Composite Design (CCD)

² Box-Behnken

سازگاری مدل R^2_{adj} یا R^2 منطبق شده نیز، 98/18% بدست آمد که به این معنا است که در حدود 98% از داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

حاصل از تأثیر پارامترهای متغیر بر عمر خستگی و رفتار خزشی نمونه‌ها پرداخته شده است.

3-1- تأثیر پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی مذاب بر عمر خستگی نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر عمر خستگی نمونه‌ها، تعداد چرخه‌های بارگذاری تا گسیختگی، برای هر حالت فرآیندی اندازه‌گیری شد و نتایج در شکل 7 ارائه شده است.

جدول 4 آنالیز واریانس مربوط به تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی

Table 4 Analysis of variance related to number of cycles to failure

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	14	46869090	3347792	116/60	0/000
Linear	4	34871658	8717914	303/64	0/000
X ₁	1	1314361	1314361	45/78	0/000
X ₂	1	5183127	5183127	180/52	0/000
X ₃	1	27597497	57597497	961/20	0/000
X ₄	1	776673	776673	27/05	0/000
Square	4	5360826	1340207	46/68	0/000
X ₁ ²	1	241659	241659	8/42	0/010
X ₂ ²	1	151549	151549	5/28	0/035
X ₃ ²	1	595820	595820	20/75	0/000
X ₄ ²	1	36347	36347	1/27	0/277
Interaction	6	6636606	1106101	38/52	0/000
X ₁ *X ₂	1	341640	341640	11/90	0/003
X ₁ *X ₃	1	1257762	1257762	43/81	0/000
X ₁ *X ₄	1	20736	20736	0/72	0/408
X ₂ *X ₃	1	3788862	3788862	131/96	0/000
X ₂ *X ₄	1	108241	108241	3/77	0/070
X ₃ *X ₄	1	1119364	1119364	38/99	0/000
Lack of Fit	10	459266	45927	2301/81	0/000

همچنین، برای کمبودهایی که ممکن است در سازگاری¹ وجود داشته باشند، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان دهنده سازگاری مدل ریاضی می‌باشد. معادله عمومی رگرسیون نیز با معادله (1)، ارائه شده است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{21} X_1 X_2 + \beta_{31} X_1 X_3 + \beta_{41} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 \quad (1)$$

در این معادله β_0 ثابت سطح پاسخ β_1 ، β_2 ، β_3 و β_4 ضرایب خطی متغیرها و β_{11} ، β_{22} ، β_{33} و β_{44} ضرایب جملات مربعی و β_{31} ، β_{21} و β_{41} ، β_{23} ، β_{24} و β_{34} ضرایب تعامل متغیرهای خطی هستند. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای عمر خستگی نمونه‌ها طی معادله (2) ارائه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Number of cycles to failure} = & 2751 - 7098 X_1 - 9465 X_2 \\ & - 64.8 X_3 + 245 X_4 + 30515 X_1^2 + 24165 X_2^2 + 0.767 X_3^2 \\ & - 118 X_4^2 - 14613 X_1 X_2 - 112.1 X_1 X_3 + 360 X_1 X_4 \\ & + 194.7 X_2 X_3 - 823 X_2 X_4 + 10.58 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (2)$$

همچنین به منظور مقایسه مقادیر بدست آمده، طی مدل

	C5	C6	C7	C8	C9
	Layer Height (mm)	Layer Thickness (mm)	Infill Percentage (%)	Infill Pattern	cycles to failure
1	0.3	0.3	75	1	3320
2	0.1	0.1	75	3	3500
3	0.3	0.1	25	1	1050
4	0.1	0.1	75	1	2375
5	0.1	0.1	25	3	965
6	0.1	0.3	75	3	5670
7	0.3	0.1	75	3	2875
8	0.3	0.1	75	1	1653
9	0.2	0.2	50	2	1375
10	0.1	0.3	75	1	5057
11	0.2	0.2	50	3	1395
12	0.2	0.2	50	2	1377
13	0.2	0.2	50	2	1376
14	0.2	0.2	50	2	1373
15	0.3	0.3	75	3	4328
16	0.2	0.2	50	2	1378
17	0.2	0.1	50	2	987
18	0.2	0.2	50	1	1360
19	0.3	0.3	25	1	1140
20	0.2	0.3	50	2	2488
21	0.2	0.2	50	2	1385
22	0.2	0.2	75	2	2990
23	0.3	0.2	50	2	1552
24	0.1	0.3	25	3	1063
25	0.2	0.2	25	2	960
26	0.2	0.2	50	2	1371
27	0.1	0.2	50	2	2050
28	0.3	0.3	25	3	900
29	0.3	0.1	25	3	1200
30	0.1	0.3	25	1	1250
31	0.1	0.1	25	1	952

Fig. 7 Measured values for number of cycles to failure

شکل 7 مقادیر اندازه‌گیری شده برای تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی

برای بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. طی جدول 4، آنالیز واریانس برای تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی نمونه ارائه شده است. در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P Value انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، مقدار P Value برای مدل رگرسیون و جملات خطی، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا

¹ Lack of Fit

[22].

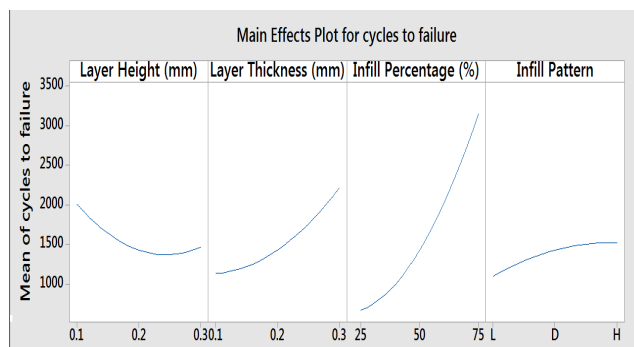


Fig. 9 Comparison of the effect of process parameters on number of cycles to failure

شکل 9 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی

همچنین تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر رفتار خستگی نمونه‌ها طی شکل‌های 10 تا 12 مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 10، تأثیر تعاملی پارامترهای ضخامت لایه‌ها و درصد پرشدگی بر رفتار خستگی نمونه‌ها ارائه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش توأم ضخامت لایه‌ها و درصد پرشدگی، افزایش تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی نمونه را در پی دارد. افزایش ضخامت لایه‌ها، منجر به افزایش فرآیند گرم شدن مجدد لایه‌های قبلی می‌شود که نتیجه آن بهبود انتشار لایه به لایه و پیوند قوی‌تر میان مولکول‌ها در ناحیه تماس است. همچنین، افزایش توأم درصد پرشدگی نیز با افزایش استحکام مکانیکی، بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها را سبب می‌شود که در برخی از مقالات به آن اشاره شده است [23].

در شکل 11، تأثیر تعاملی پارامترهای ارتفاع لایه‌ها و درصد پرشدگی بر رفتار خستگی نمونه‌ها ارائه شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است، بیشترین تعداد چرخه تا گسیختگی نمونه به ازای کمترین ارتفاع لایه و بیشترین درصد پرشدگی حاصل شده است. مطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین، با افزایش ارتفاع لایه‌ها، مقطع رشته‌ها به شکل دایره نزدیک‌تر شده و به این ترتیب با افزایش فضای خالی میان رشته‌ها، اتصال ضعیف‌تری میان آنها ایجاد می‌گردد که نتیجه آن کاهش عمر خستگی نمونه است [23].

مطابق شکل 12، استفاده از الگوی لانه زنبوری، بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا مطابق با مقالات مطالعه شده در این زمینه، ساختار شش وجهی الگوی لانه زنبوری، سبب افزایش سطح تماس و ایجاد پیوند قوی‌تر میان رشته‌هایی که در همسایگی یکدیگر واقع شده‌اند می‌شود که نتیجه آن بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها می‌باشد [23، 24].

طراحی شده به روش سطح پاسخ (RSM) و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار تعداد چرخه تا گسیختگی بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، در شکل 8 ارائه شده است. برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای رفتار خستگی طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای کمترین و بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی نمونه جدول 5 ارائه شده است. مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب تعداد چرخه تا گسیختگی ترسیم شد.

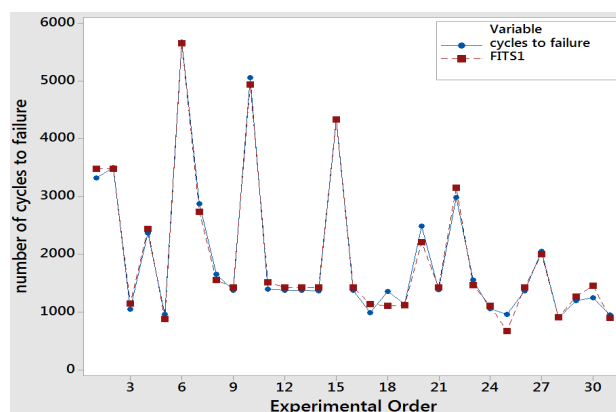


Fig. 8 Comparison of number of cycles to failure by response surface methodology and experimental method

شکل 8 مقایسه تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

جدول 5 درصد خطا برای تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

Table 5 Error percentage for number of cycles to failure by response surface methodology and experimental method

NO	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (%)	X ₄	cycles to failure	RSM	Error (%)
15	0/3	0/3	75	3	4328	4329/87	-0/043
25	0/2	0/2	25	2	960	705/48	26/51

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، پس از درصد پرشدگی، ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر رفتار خستگی نمونه‌ها داشته است. زیرا همان‌طور که در برخی از مقالات اشاره شده است، با افزایش درصد پرشدگی، ساختار نمونه چگال‌تر و مستحکم‌تر می‌شود که در نتیجه آن خواص مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که با کاهش درصد پرشدگی، فضای خالی میان لایه‌های پرینت شده افزایش می‌یابد و به این ترتیب از استحکام پیوند میان رشته‌ها کاسته می‌شود [17، 20].

طی جدول 6، آنالیز واریانس برای نرخ خزش نمونه‌ها ارائه شده است.

Worksheet 1 ***					
	C5	C6	C7	C8	C9
	Layer Height (mm)	Layer Thickness (mm)	Infill Percentage (%)	Infill Pattern	Creep Rate (1/s)
1	0.3	0.3	75	1	0.094
2	0.1	0.1	75	3	0.093
3	0.3	0.1	25	1	0.135
4	0.1	0.1	75	1	0.083
5	0.1	0.1	25	3	0.111
6	0.1	0.3	75	3	0.097
7	0.3	0.1	75	3	0.095
8	0.3	0.1	75	1	0.089
9	0.2	0.2	50	2	0.112
10	0.1	0.3	75	1	0.108
11	0.2	0.2	50	3	0.105
12	0.2	0.2	50	2	0.109
13	0.2	0.2	50	2	0.109
14	0.2	0.2	50	2	0.109
15	0.3	0.3	75	3	0.078
16	0.2	0.2	50	2	0.107
17	0.2	0.1	50	2	0.113
18	0.2	0.2	50	1	0.116
19	0.3	0.3	25	1	0.104
20	0.2	0.3	50	2	0.095
21	0.2	0.2	50	2	0.109
22	0.2	0.2	75	2	0.096
23	0.3	0.2	50	2	0.111
24	0.1	0.3	25	3	0.082
25	0.2	0.2	25	2	0.107
26	0.2	0.2	50	2	0.109
27	0.1	0.2	50	2	0.101
28	0.3	0.3	25	3	0.087
29	0.3	0.1	25	3	0.132
30	0.1	0.3	25	1	0.105
31	0.1	0.1	25	1	0.113

Fig. 13 Calculated values for creep rate

شکل 13 مقادیر محاسبه شده برای نرخ خزش

در این آنالیز، از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2 یا R^2_{adj} منطبق شده نیز، 96/03% بدست آمد که به این معنا است که در حدود 96% از داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای نرخ خزش نمونه‌ها طی معادله (3) ارائه گردید.

$$\begin{aligned} \text{Creep rate (1/s)} = & 0.09081 + 0.2741 X_1 + 0.1130 X_2 \\ & + 0.000188 X_3 - 0.00959 X_4 - 0.153 X_1^2 - 0.353 X_2^2 \\ & - 0.000010 X_3^2 + 0.00297 X_4^2 - 0.5000 X_1 * X_2 \\ & - 0.001800 X_1 * X_3 - 0.00250 X_1 * X_4 + 0.003250 X_2 * X_3 \\ & - 0.04875 X_2 * X_4 + 0.000085 X_3 * X_4 \end{aligned} \quad (3)$$

در ادامه به منظور مقایسه مقادیر بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ (RSM) و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار نرخ خزش بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، در شکل 14 ارائه گردید.

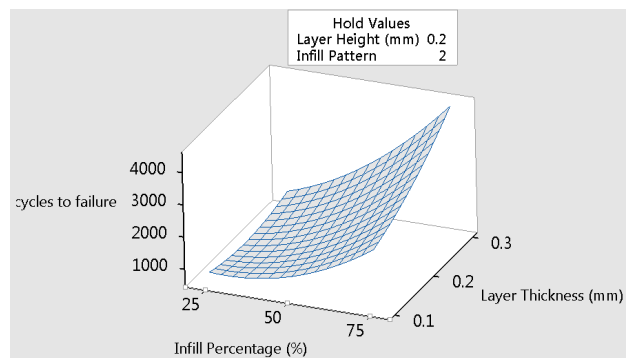


Fig. 10 Number of cycles to failure changes versus layer thickness and infill percentage

شکل 10 تغییرات تعداد چرخه تا گسیختگی بر حسب ضخامت لایه‌ها و درصد پرشدگی

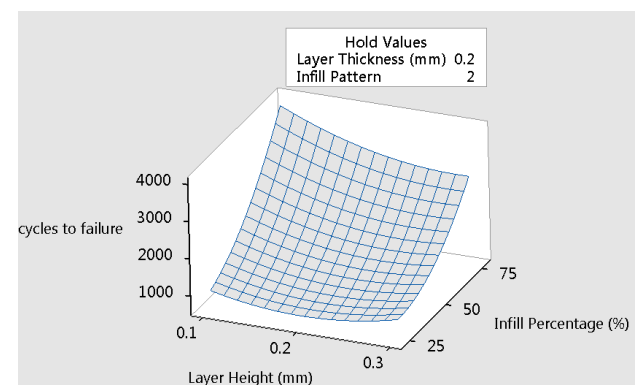


Fig. 11 Number of cycles to failure changes versus layer height and infill percentage

شکل 11 تغییرات تعداد چرخه تا گسیختگی بر حسب ارتفاع لایه‌ها و درصد پرشدگی

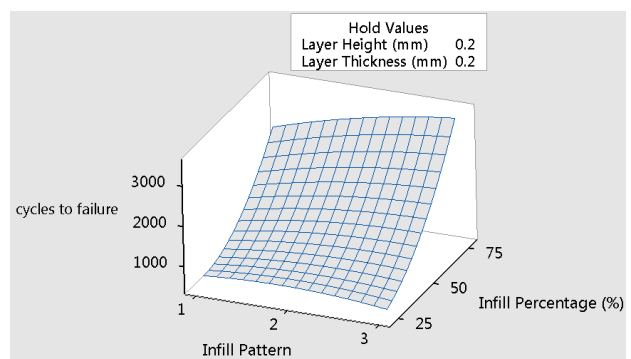


Fig. 12 Number of cycles to failure changes versus infill pattern and percentage

شکل 12 تغییرات تعداد چرخه تا گسیختگی بر حسب الگو و درصد پرشدگی

2-3- تأثیر پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی مذاب بر رفتار خزشی نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر رفتار خزشی نمونه‌ها، نرخ خزش برای هر حالت فرآیندی محاسبه شد و نتایج حاصل در شکل 13 ارائه گردید.

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، پس از درصد پرشدگی، ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر نرخ خزش نمونه‌ها داشته است. زیرا، افزایش درصد پرشدگی، افزایش خواص مکانیکی نمونه و در پی آن کاهش نرخ خزش را به دنبال دارد. تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند نیز بر رفتار خزشی نمونه‌ها طی شکل‌های 16 تا 18 مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 7 درصد خطا برای نرخ خزش، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی
Table 7 Error percentage for creep rate by response surface methodology and experimental method

No	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (%)	X ₄	Creep rate (1/s)	RSM	Error (%)
3	0/3	0/1	25	1	0/135	0/135169	-0/12
9	0/2	0/2	50	2	0/112	0/108400	3/21

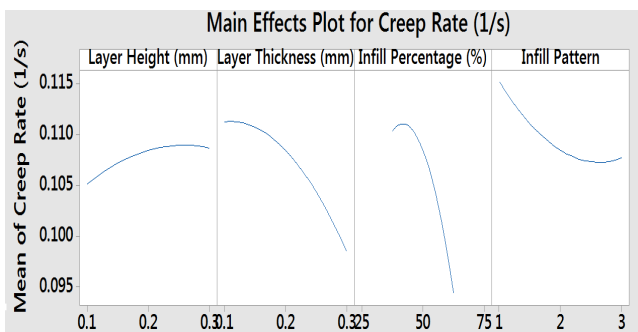


Fig. 15 Comparison of the effect of process parameters on creep rate
شکل 15 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر نرخ خزش

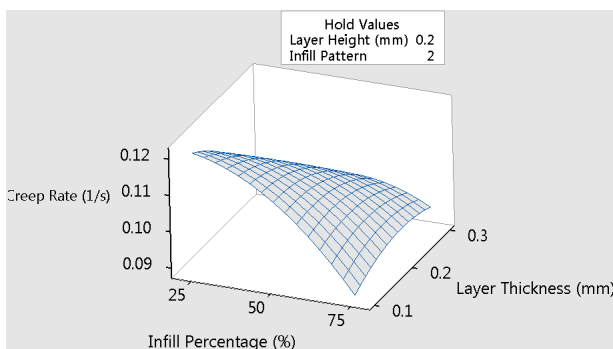


Fig. 16 Creep rate changes versus layer thickness and infill percentage
شکل 16 تغییرات نرخ خزش بر حسب ضخامت لایه‌ها و درصد پرشدگی

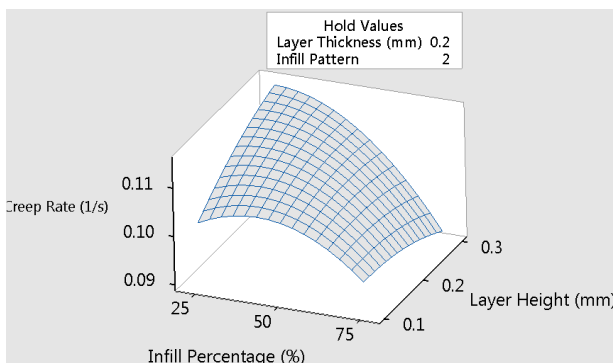


Fig. 17 Creep rate changes versus layer height and infill percentage
شکل 17 تغییرات نرخ خزش بر حسب ارتفاع لایه‌ها و درصد پرشدگی

جدول 6 آنالیز واریانس مربوط به نرخ خزش

Table 6 Analysis of variance related to creep rate

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
Model	14	0/004885	0/000349	52/88	0/000
Linear	4	0/002164	0/000541	82/00	0/000
X ₁	1	0/000057	0/000057	8/62	0/010
X ₂	1	0/000722	0/000722	109/41	0/000
X ₃	1	0/001136	0/001136	172/16	0/000
X ₄	1	0/000249	0/000249	37/79	0/000
Square	4	0/000487	0/000122	18/45	0/000
X ₁ ²	1	0/000006	0/000006	0/92	0/351
X ₂ ²	1	0/000032	0/000032	4/91	0/042
X ₃ ²	1	0/000094	0/000094	14/32	0/002
X ₄ ²	1	0/000023	0/000023	3/46	0/081
Interaction	6	0/002234	0/000372	56/42	0/000
X ₁ *X ₂	1	0/000400	0/000400	60/62	0/000
X ₁ *X ₃	1	0/000324	0/000324	49/10	0/000
X ₁ *X ₄	1	0/000001	0/000001	0/15	0/702
X ₂ *X ₃	1	0/001056	0/001056	160/06	/000
X ₂ *X ₄	1	0/000380	0/000380	57/63	/000
X ₃ *X ₄	1	0/000072	0/000072	10/95	0/004
Lack of Fit	10	0/000093	0/000009	4/33	0/043

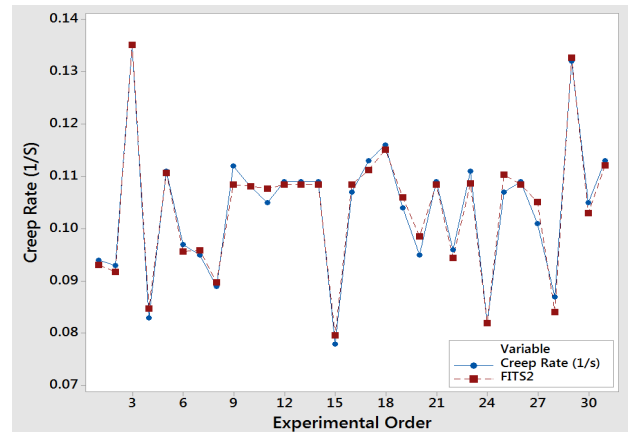


Fig. 14 Comparison of creep rate by response surface methodology and experimental method

شکل 14 مقایسه نرخ خزش، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای نرخ خزش طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای کمترین و بیشترین خطای ایجاد شده در جدول 7 ارائه شده است.

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب نرخ خزش ترسیم گردید.

- طی تحلیل آماری انجام شده، مشخص شد که درصد پرشدگی، بیشترین تأثیر را بر رفتار خستگی و خزشی نمونه‌ها داشته است. به‌طوری که افزایش درصد پرشدگی به 75٪، افزایش عمر خستگی و مقاومت نمونه در برابر خزش را در پی داشته است.

- بیشترین تعداد چرخه تا گسیختگی نمونه و کمترین نرخ خزش، به ازای ارتفاع لایه 0/1 میلی‌متر، ضخامت لایه 0/3 میلی‌متر، درصد پرشدگی 75٪ و الگوی لانه زنبوری حاصل گردید.

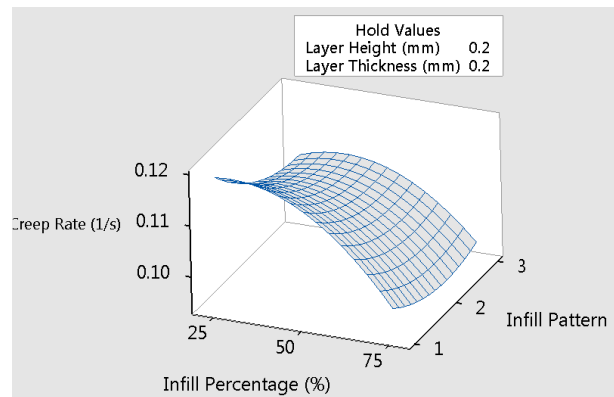


Fig. 18 Creep rate changes versus infill pattern and percentage

شکل 18 تغییرات نرخ خزش بر حسب الگو و درصد پرشدگی

5- تقدیر و تشکر

ضمن سپاس و قدردانی، این تحقیق تحت حمایت طرح پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال انجام شده است.

6- مراجع

- [1] V. DeStefano, S. Khan, A. Tabada, Applications of PLA in modern medicine, *Engineered Regeneration*, 1., pp. 76-87, 2020.
- [2] M.L. Di Lorenzo, R. Androsch, Industrial Applications of Poly (lactic acid), *Springer*, pp. 1-7, 2018.
- [3] K. Shinyama, Mechanical and electrical properties of polylactic acid with aliphatic-aromatic polyester, *Journal of Engineering*, pp. 1-11, 2018.
- [4] C.K. Chua, K.F. Leong, C.S. Lim, Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM), *World Scientific Publishing Company*, pp. 1-7, 2010.
- [5] R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodríguez, X. Corbella, R. Busqué, G. Gómez-Gras, Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier, *Mechatronics*, 36, pp. 119-126, (2016).
- [6] S. Upcraft, R. Fletcher, The rapid prototyping technologies, *Assembly Automation*, pp.1-7, 2003.
- [7] A. Manmadhachary, R. Kumar, L. Krishnanand, Improve the accuracy, surface smoothing and material adaption in STL file for RP medical models, *Journal of Manufacturing Processes*, 21, pp. 46-55, 2016.
- [8] S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, Additive manufacturing: A framework for implementation, *International journal of production economics*, 149 pp. 194-201, 2014.
- [9] S. Sheth, P. George, Experimental investigation, prediction and optimization of cylindricity and perpendicularity during drilling of WCB material using grey relational analysis, *Precision Engineering*, 45, pp. 34-43, 2016.
- [10] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, Additive manufacturing technologies, *Springer*, pp. 1-7, 2021.
- [11] P. Geng, J. Zhao, W. Wu, W. Ye, Y. Wang, S. Wang,

همان‌طور که در شکل‌های 16 تا 18 مشاهده می‌شود، افزایش توأم ضخامت لایه‌ها و درصد پرشدگی، کاهش نرخ خزش را در پی داشته است. زیرا همان‌طور که در برخی از مراجع به آن اشاره شده، افزایش فشار اکستروژن جهت لایه‌نشانی رشته با ضخامت بیشتر، افزایش استحکام پیوند میان مولکول‌ها و در پی آن افزایش استحکام مکانیکی نمونه‌ها را در پی دارد. علاوه بر آن طی انجام عملیات لایه‌نشانی با ضخامت بیشتر به دلیل دوباره گرم شدن لایه‌های زیرین و افزایش مدت زمانی که پلیمر در دمای بالاتر از دمای شیشه‌ای قرار می‌گیرد، زمان بیشتری جهت تشکیل پیوندهای بین مولکولی فراهم می‌گردد که طی آن استحکام مکانیکی نمونه افزایش یافته و کاهش نرخ خزش را در پی دارد. همچنین نمونه‌های لایه‌نشانی شده با الگوی لانه زنبوری نیز به دلیل ایجاد پیوند قوی‌تر میان رشته‌ها، نسبت به الگوی خطی و لوزی از استحکام مکانیکی بالاتری برخوردارند. این درحالی است که به دلیل دایره شکل بودن مقطع رشته حین لایه‌نشانی با مقادیر بالاتر برای ارتفاع لایه، پیوند میان لایه‌ها سست‌تر شده و استحکام مکانیکی نمونه کاسته می‌شود [21-25].

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی آماری تأثیر پارامترهای ارتفاع لایه، ضخامت لایه، درصد پرشدگی و الگوی پر شدن بر رفتار خستگی و خزشی نمونه‌های ساخته شده از پلیمر پلی‌لاکتیک اسید به روش لایه‌نشانی مذاب با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخته شده است که اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

- تحلیل آماری با سطح اطمینان 95٪ انجام شد و میزان سازگاری مدل برای رفتار خستگی و خزشی نمونه‌ها به‌ترتیب 98/18٪ و 96/03٪ بدست آمد.

- fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer, *Advances in Manufacturing*, 6(4), pp. 430-441, 2018.
- [20] H.K. Dave, N.H. Patadiya, A.R. Prajapati, S.R. Rajpurohit, Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(10), pp. 1811-1827, 2021.
- [21] O. Luzanin, D. Movrin, V. Stathopoulos, P. Pandis, T. Radusin, V. Guduric, Impact of processing parameters on tensile strength, in-process crystallinity and mesostructure in FDM-fabricated PLA specimens, *Rapid Prototyping Journal*, pp. 1-7, 2019.
- [22] A. Qattawi, Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method, *Journal of Manufacturing Processes*, 36, pp. 164-174, 2018.
- [23] B. Akhoundi, A. Behraves, Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products, *Experimental Mechanics*, 59(6), pp. 883-897, 2019.
- [24] M. Domingo-Espin, J.A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, J. Lluma-Fuentes, Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication, *Materials*, 11(12), pp. 1-7, 2018.
- [25] J. Zhang, X.Z. Wang, W.W. Yu, Y.H. Deng, Numerical investigation of the influence of process conditions on the temperature variation in fused deposition modeling, *Materials & Design*, 130, pp. 59-68, 2017.
- S. Zhang, Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament, *Journal of Manufacturing Processes*, 37, pp. 266-273, 2019.
- [12] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N.H. Mallaya, S.R. Siddharth, Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 123, pp. 1-7, 2021.
- [13] B. Ramanjaneyulu, N. Venkatachalapathi, G. Prasanthi, Thermal and Mechanical Properties of PLA/ABS/TCS Polymer Blend Composites, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, pp. 1-8, 2021.
- [14] M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, G. Reyes, Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Materials & Design*, 83, pp. 670-677, 2015.
- [15] B. Najafloo, M. Razavi-Nouri, A.M. Rezadoust, A Review on Fused Deposition Modeling Method, *Baspareh*, 6(3) pp.74-85, 2016.
- [16] M.F. Afrose, S. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, I. Sbarski, Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material, *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1), pp. 21-28, 2016.
- [17] M. Algarni, S. Ghazali, Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters, *Crystals*, 11(8), pp.1-7, 2021.
- [18] <https://3diaco.com/product/pla-plus-esun/>.
- [19] S.R. Rajpurohit, H.K. Dave, Flexural strength of