Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 877-880
DOI: 10.22060/mej.2021.18299.6794

Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Behavior of Polylactic acid Components Made by Additive Manufacturing Method

M. R. Hashemi, H. Adibi*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Additive manufacturing includes emerging methods that with reduced production time and ability to produce parts with complex geometry, are now widely used in variety of industries. Fused deposition modeling process is one of the most popular methods of additive manufacturing and so far, a lot of research has been done to model and improve the mechanical behavior of the parts produced by this method. The purpose of this research is to conduct an experimental study to model and investigate the effect of fused deposition modelling process variable on fatigue behavior of poly-lactic acid components, along with the development of numerical tools to predict this behavior. This paper uses the Taguchi algorithm to design experiments for experimental study. By performing fatigue testing on the sample and analyzing the result, the optimal value of the desired variable, as well as their effects are determined that the variable of fill density, nozzle temperature and layer thickness have the highest impact on fatigue life, respectively. The finite element simulation is performed by assuming assumption and its results are evaluated with the values of the optimized sample fatigue test. The result of experimental modeling and finite element simulation show that the models presented predict the poly-lactic acid components parts fraction with R-Sq 96.3% and 98.7% fatigue behavior, respectively.

Review History:

Received: Apr. 20, 2020
Revised: Nov. 28, 2020
Accepted: Jan. 02, 2021
Available Online: Jan. 13, 2021

Keywords:

Taguchi algorithm,
Fatigue strength
Stress-life method
Finite element analysis
Fused deposition modeling.

1- Introduction

Fused deposition modeling is the major technique in Additive Manufacturing (AM) that talk about the process where sequential layers of material are deposited in a computer-controlled location to create a three-dimensional body. The main limitation of this technique is the low mechanical properties of parts fabricated by FDM. Many studies have been done to investigate the effects of process parameters on the mechanical properties of final part [1].

In the present work, experimental investigations have been carried out to evaluate the effects of process parameters on the fatigue behavior of fabricated parts. By performing fatigue testing on the sample and analyzing the result, the optimal value of the desired variable, as well as their effects are determined that the variable of fill density, nozzle temperature and layer thickness have the highest impact on fatigue life, respectively. The finite element simulation is performed by assuming assumption and its results are evaluated with the values of the optimized sample fatigue test.

2- Methodology

In this work, the experimental tests have been designed to study the effects of four process variables including fill density, nozzle temperature, layer thickness and bed temperature on the fatigue life. By performing fatigue testing on the sample and analyzing the result, the optimal value of the desired variable is determined. The finite element simulation is performed by assuming assumption and its results are evaluated with the values of the optimized sample fatigue test.

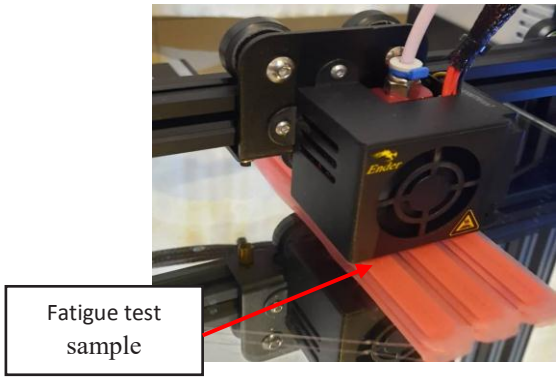


Fig. 1. Fatigue test sample manufacturing

Taguchi algorithm has been applied to design of experiments. Fig. 1 shows the manufacturing of parts. PLA filament made by Yousu Plastic Technology Co. has been used. The test samples according to ASTM D7774-12 have been fabricated. The dimensional modeling has been shown in Fig. 2.

*Corresponding author's email: hadibi@aut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

3- Results and Discussion

The Table 1 shows experimental results of the fatigue life times.

Signal-to-Noise Ratio (SNR or S/N) to compares the level of a desired signal to the level of background noise has been used [2]. It is shown in Fig. 3. As seen in this figure, the S/N ratio raised with nozzle temperature elevation. Fig. 4 shows the stress-fatigue life curve for parts made by PLA.

4- Finite Element Modeling

Finite element modeling has been done in ANSYS 18.2. In this technique Stress – Life method [2] has been used. Fig. 5 shows the boundary condition and external force exerted on the body.

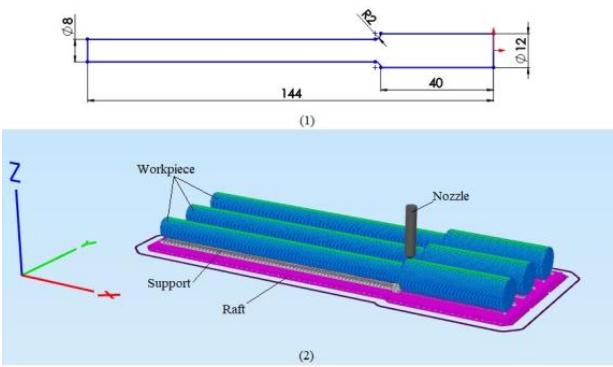


Fig. 2. Sample dimensional modeling

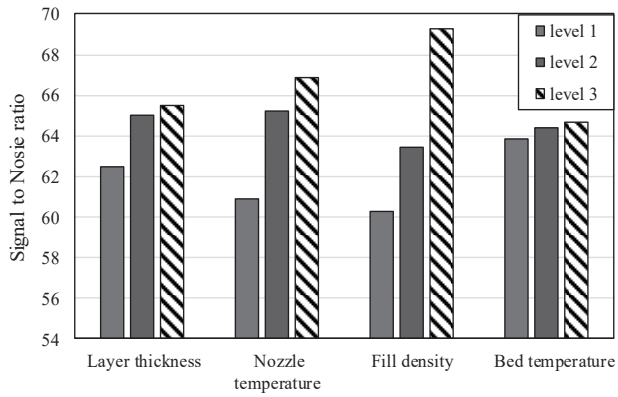


Fig. 3. Signal to noise ratio

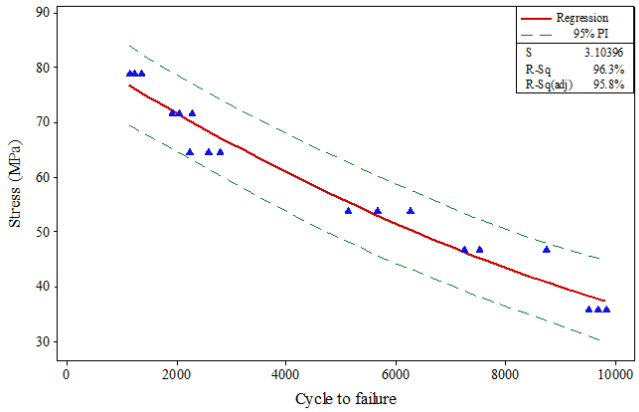


Fig. 4. Stress-fatigue life curve for PLA parts

Table 1. Fatigue life time test results

Cycle	Number	Cycle	Number	Cycle	Number
725.389	19	834.197	10	816.062	1
507.772	20	1632.12	11	888.601	2
1650.26	21	3082.09	12	1323.83	3
1341.97	22	1051.81	13	997.409	4
1967.68	23	2049.22	14	1378.24	5
3790.16	24	3753.89	15	2012.95	6
1777.2	25	1015.54	16	1069.95	7
4261.666	26	1613.99	17	1233.16	8
6256.48	27	3282.83	18	3663.21	9

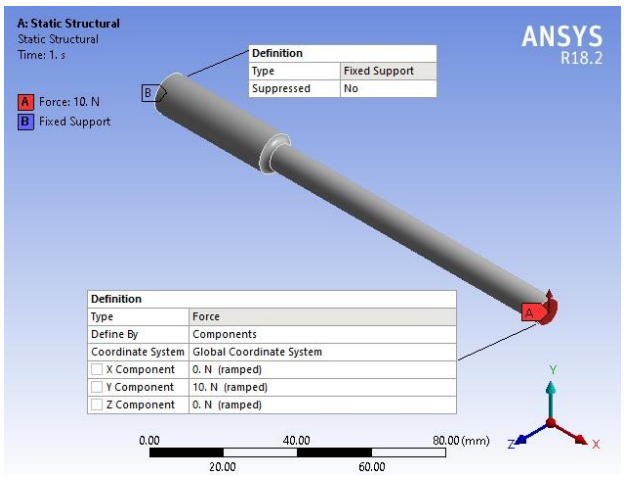


Fig. 5. FEM Model & Boundary conditions

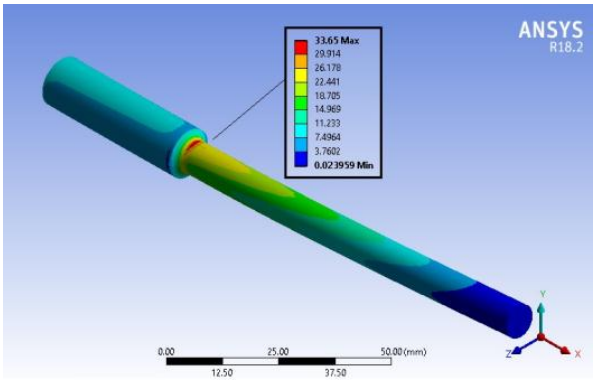


Fig. 6. Stress results, 10 N force

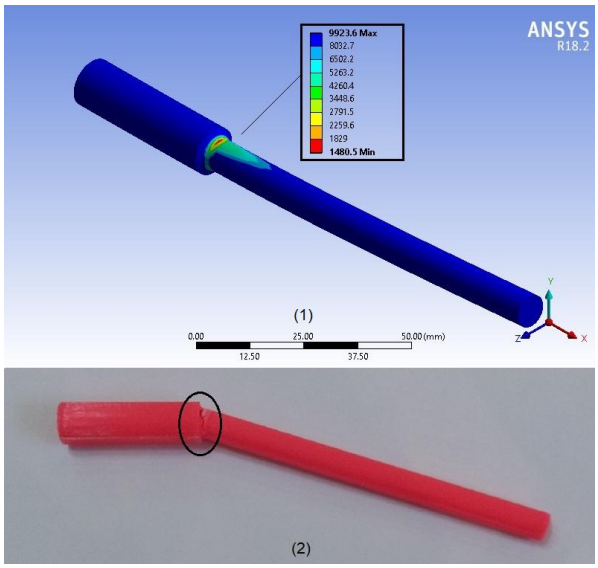


Fig. 7. (1) Stress results from 22 N force (2) Fracture location on experimental sample

Fig. 6 shows the stress distribution results on the sample with 10N force. This sample has 9923.6 cycle lifetime.

Fig. 7 shows the location of fatigue fracture on the experimental test and could be compared with the results of FEM modeling. Fig. 8 shows the experimental and finite element modeling results which display a good correlation between the results.

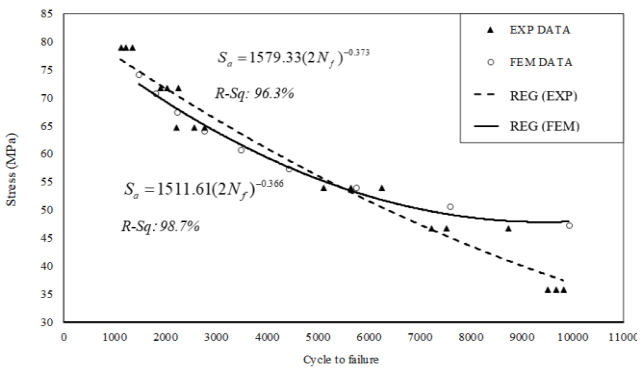


Fig. 8. Experimental and FEM results

5- Conclusions

In this work, experimental and numerical study has been done on the fatigue behavior of parts made by PLA using FDM technique. The optimum values of four process parameters including fill density, nozzle temperature, layer thickness and bed temperature have been achieved.

References

[1] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, N. Jayanth, A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process, Virtual and Physical Prototyping, 12(1) (2017) 47-59.

[2] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, Advances in Manufacturing, 3(1) (2015) 42-53.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. R. Hashemi, H. Adibi, . Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Behavior of Polylactic acid Components Made by Additive Manufacturing Method ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 877-880.

DOI: 10.22060/mej.2021.18299.6794

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۷۰۳ تا ۳۷۱۶
DOI: 10.22060/mej.2021.18299.6794

بررسی تجربی و عددی رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید تولیدشده به روش ساخت افزایشی

محمدرضا هاشمی، حامد ادیبی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

خلاصه: ساخت افزایشی، شامل روش‌های نوظهوری می‌باشد که با کاهش در زمان و هزینه تولید و همچنین توانایی تولید قطعات با هندسه پیچیده، امروزه کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون پیدا کرده است. فرآیند لایه نشانی ذوبی یکی از محبوب‌ترین روش‌های ساخت افزایشی می‌باشد، که تاکنون تحقیقات فراوانی با هدف مدلسازی و بهبود رفتار مکانیکی قطعات تولیدشده توسط این روش، انجام شده است. هدف از این پژوهش، انجام مطالعه تجربی به منظور مدلسازی و بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید، به همراه توسعه ابزار عددی برای پیش‌بینی این رفتار می‌باشد. در این مقاله جهت انجام مطالعه تجربی از الگوریتم تاگوچی به منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. با انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه‌ها و تحلیل نتایج بدست‌آمده از آن، مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی فرآیند و همچنین میزان تاثیر آنها تعیین گردید که متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب بیشترین میزان تاثیر را بر روی عمر خستگی دارند. شبیه‌سازی المان محدود با درنظرگیری مفروضات معین صورت پذیرفته و نتایج آن با مقادیر آزمون خستگی نمونه بهینه‌سازی‌شده ارزیابی شده است. نتایج مدلسازی تجربی و شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد، مدل‌های ارائه‌شده به ترتیب با ضریب رگرسیون ۹۶٪/۳و ۹۸/۷٪ رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید را پیش‌بینی می‌کنند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

کلمات کلیدی:
الگوریتم تاگوچی
مقاومت خستگی
روش تنش-عمر
تحلیل المان محدود
لایه نشانی ذوبی.

۱- مقدمه

ساخت افزایشی[1] فناوری نوظهوری است، که امروزه کاربرد وسیعی در بخش‌های مختلف صنعتی پیدا کرده است. اصطلاح ساخت افزایشی، فرآیندهایی را دربرمی‌گیرد که در تولید قطعات، دارای روشی مشترک می‌باشند. اساسا نقطه مشترک این فرآیندها روشی است که با آن، ساخت قطعات به صورت لایه به لایه انجام می‌شود [۱]. روش لایه نشانی ذوبی[2] یکی از فرآیندهای ساخت افزایشی می‌باشد که به دلیل توانایی تولید قطعات با هندسه پیچیده، کاهش در زمان و هزینه تولید و استفاده طیف وسیعی از انواع مواد مصرفی در ساخت قطعات، گسترش فراوانی در صنایع مختلف پیدا کرده است [۲]. یکی از چالش‌های موجود در روش لایه نشانی ذوبی، تعیین رفتار مکانیکی قطعات تولیدشده توسط این روش می‌باشد. این مسئله به دو علت حائز اهمیت می‌باشد، دلیل اول تعداد زیاد متغیرهای موثر فرآیند می‌باشد، که این موضوع سبب پیچیدگی در بررسی تاثیر این متغیرها بر رفتار مکانیکی می‌گردد. دلیل دوم را می‌توان وجود نیروها و تنش‌های باقی‌مانده در قطعه دانست، که ناشی از حرارت میان لایه‌ها و نحوه قراردادن لایه‌ها بر روی یکدیگر می‌باشد [۳, ۴].

وجود این چالش‌ها سبب انجام مطالعاتی به منظور تعیین اثر متغیرهای فرآیند بر رفتار مکانیکی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در قطعات لایه‌نشانی‌شده، گردیده است. گورالا و همکاران [۵] به منظور تعیین رفتار مکانیکی قطعات ساخته‌شده به روش لایه نشانی، اقدام به بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند بر رفتار مکانیکی کردند. آنها با درنظرگیری متغیر جهت لایه‌نشانی قطعه روی میز و با هدف رسیدن به بیشترین مقدار مقاومت مکانیکی، گزارش دادند جهت لایه‌نشانی باید در راستای بارگذاری انتخاب شود. در سال ۲۰۱۲، سود و همکاران [۶] با مطالعه بر روی تاثیر ضخامت لایه بر رفتار مکانیکی، گزارش دادند که با کاهش میزان ضخامت لایه، انتقال حرارت میان لایه‌ها افزایش پیدا می‌کند. این مسئله باعث بهبود کیفیت اتصال میان لایه‌ها شده و به افزایش استحکام مکانیکی قطعه منجر می‌شود. محققان دیگری نیز به مطالعه بر روی متغیر ضخامت

1 Additive Manufacturing (AM)
2 Fused Deposition Modelling (FDM)

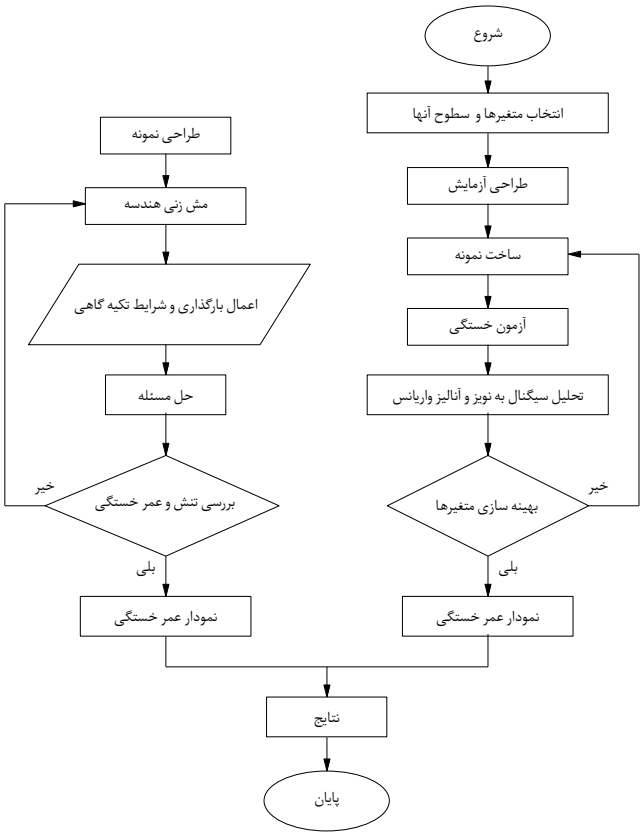
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hadibi@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

لایه پرداختند. آنها گزارش دادند که کاهش ضخامت لایه‌ها، سبب بهبود کیفیت سطح می‌شود که این موضوع باعث افزایش زمان و هزینه ساخت قطعات می‌شود [۷, ۸]. در سال ۲۰۱۲، وال و همکاران [۹] به مطالعه در مورد تاثیر متغیرهای چگالی سطح و فاصله هوایی بر رفتار مکانیکی قطعات لایه‌نشانی‌شده پرداختند. در این مطالعه گزارش شد که با افزایش میزان چگالی سطح، مقدار متغیر فاصله هوایی کاهش پیدا می‌کند که این مسئله باعث افزایش مقدار سفتی قطعات می‌شود.

علی‌رغم اهمیت بررسی رفتار مکانیکی قطعات ساخته‌شده به روش ساخت افزایشی تحت بارگذاری دینامیکی، مطالعات کمی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۱۶، افروز و همکاران [۱۰] به بررسی جهت قرارگیری قطعه بر روی میز و اثر آن بر مقاومت مکانیکی و عمر خستگی قطعات لایه‌نشانی‌شده پرداختند. این محققان با ساخت قطعات تحت زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و قراردادن این قطعات تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، گزارش دادند که با افزایش زاویه قرارگیری قطعه روی میز، میزان مقاومت مکانیکی قطعات کاهش می‌یابد. اما در بارگذاری دینامیکی، قطعات ساخته‌شده با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عمر و مقاومت در برابر خستگی را در مقایسه با سایر قطعات دارند. در مطالعه صورت‌گرفته توسط افروز و همکاران، طیف وسیعی از متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی ثابت فرض شده‌اند و اثر این متغیرها بر روی عمر و مقاومت خستگی در نظر گرفته نشده است. به همین جهت، گومز و همکاران [۱۱] در مطالعه خود به بررسی تاثیر متغیرهای چگالی سطح، قطر نازل، ارتفاع لایه و سرعت نازل بر عمر خستگی قطعات لایه‌نشانی‌شده تحت دو الگوی سطح لانه زنبوری و مستطیلی پرداختند. آنها با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس، به ترتیب مقدار بهینه و میزان تاثیر هر متغیر را بر عمر خستگی تعیین کردند. با توجه به مطالعه‌ای که توسط سود و همکاران انجام شده است [۶]، متغیرهای موثر بر انتقال حرارت میان لایه‌ها تاثیر فراوانی بر رفتار مکانیکی قطعات دارند. از این جهت وجود برخی از این متغیرها در مطالعه انجام‌شده توسط گومز و همکاران درنظرگرفته‌نشده‌است. لذا با درنظرگیری این مسئله می‌توان بررسی دقیق‌تری در این زمینه انجام داد.

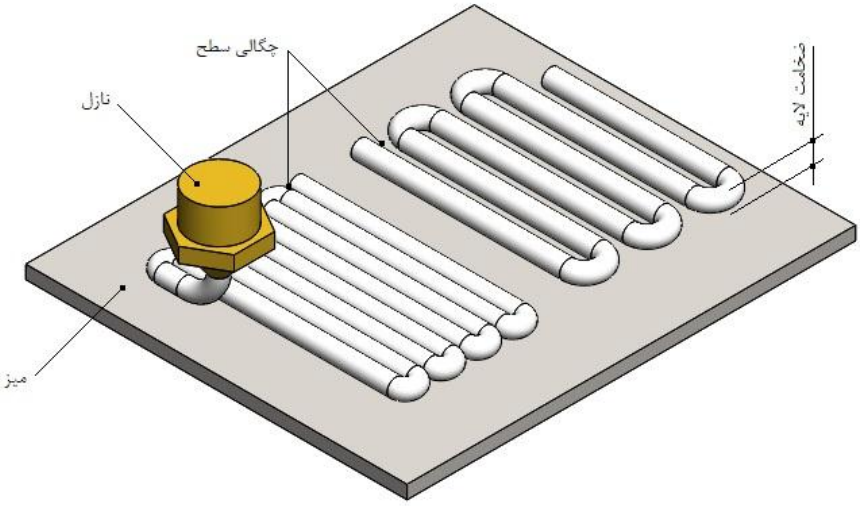
در این پژوهش با استفاده از نتایج مطالعات صورت‌گرفته، به ارائه مدل تجربی و بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر



شکل ۱. فلوچارت انجام تحقیق

Fig. 1. Research process flow chart

رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید، به همراه توسعه ابزار عددی برای پیش‌بینی این رفتار پرداخته شده است. به این منظور چهار متغیر ضخامت لایه، دمای نازل، دمای میز و چگالی سطح جهت تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی انتخاب شدند. با استفاده از الگوریتم تاگوچی و درنظرگیری سه سطح برای متغیرهای مورد بررسی، طراحی آزمایش صورت پذیرفت و با استفاده از آرایه‌های پیشنهادشده، آزمون خستگی انجام شد. با استفاده از تحلیل واریانس و نسبت سیگنال به نویز، میزان تاثیر و مقدار بهینه متغیرهای فرآیند تعیین گردید. پس از آن با استفاده از برازش به روش حداقل مربعات بر روی نتایج خستگی نمونه ساخته‌شده با مقدار بهینه متغیرهای فرآیند، مدل تجربی جهت پیش‌بینی رفتار خستگی ارائه گردید. همچنین جهت توسعه ابزار عددی در پیش‌بینی رفتار قطعات تحت بارگذاری دینامیکی، شبیه‌سازی المان محدود صورت پذیرفت. در این شبیه‌سازی که با درنظرگیری مفروضات معین صورت پذیرفت، نتایج مدلسازی المان محدود با نتایج مطالعه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲. متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی

Fig. 2. Fused deposition modeling process variables

۲- روش مطالعه

در این پژوهش به انجام مطالعه تجربی بر روی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید، به همراه مدلسازی المان محدود برای پیش‌بینی این رفتار پرداخته شد. در بخش اول روش مطالعه تجربی و پس از آن نحوه مدلسازی المان محدود تشریح گردید. شکل ۱، فلوچارت انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

۲-۱- متغیرهای فرآیند

در این پژوهش از چهار متغیر جهت بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات استفاده شد. در مطالعات صورت‌گرفته متغیرهای ضخامت لایه، دمای نازل، میزان پرشوندگی سطح (چگالی سطح) و دمای میز بیشترین تاثیر را بر روی خواص مکانیکی قطعات لایه‌نشانی‌شده دارند [۶-۹]، لذا از این متغیرها جهت بررسی رفتار خستگی استفاده شد. شکل ۲، متغیرهای موردنظر فرآیند را نشان می‌دهد.

جدول ۱. متغیرهای فرآیند و سطح‌های آنها

Table 1. Process variables and their levels

متغیرها	نماد	واحد	سطوح		
			۱	۲	۳
ضخامت لایه	L	(mm)	۰/۱	۰/۲	۰/۳
دمای نازل	T	(°C)	۱۹۰	۱۹۵	۲۰۰
چگالی سطح	F	(%)	۲۵	۵۰	۷۵
دمای میز	B	(°C)	۶۰	۶۵	۷۰

۲-۲- طراحی آزمایش

الگوریتم تاگوچی یک روش سیستماتیک و موثر را برای طراحی بهینه فراهم می‌کند. این الگوریتم با ساده‌سازی برنامه آزمایش‌ها و ایجاد امکان مطالعه برهم‌کنش متغیرهای فرآیند، باعث کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه آن سبب کاهش در هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها می‌شود. جهت انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای آزمایش می‌بایست تمامی درجه‌های آزادی محاسبه شوند. تعداد درجه‌های آزادی یک کمیت باارزش می‌باشد، زیرا کم‌ترین تعداد شرایط رفتاری را تعیین می‌کند [۱۲]. الگوریتم تاگوچی در این پژوهش، تعداد ۲۷ آرایه متعامد را برای بررسی اثر چهار متغیر فرآیند لایه نشانی ذوبی در سه سطح را پیشنهاد کرد. جدول ۱، متغیرهای فرآیند و مقدار سطح‌های انتخابی آنها را نشان می‌دهد. به منظور افزایش دقت در خروجی آزمایش، هر آرایه پیشنهادی سه مرتبه تکرار شد. جدول ۲، آرایه‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها و آزمون خستگی

جهت ساخت نمونه‌های آزمون خستگی براساس آرایه‌های پیشنهادی

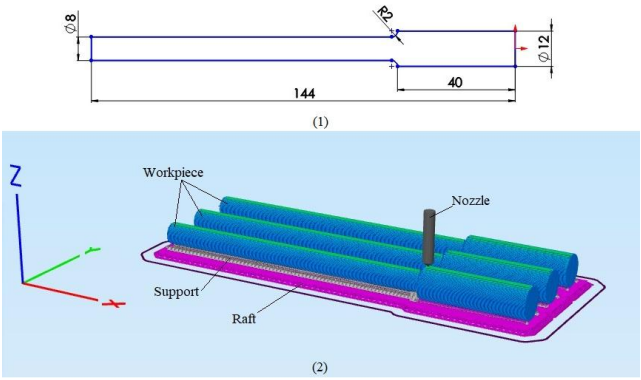
جدول ۲. آرایه‌های پیشنهادی

Table 2. Suggested arrays

آرایه‌ها	ضخامت لایه	دمای نازل	چگالی سطح	دمای میز
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲
۳	۱	۱	۳	۳
۴	۱	۲	۱	۲
۵	۱	۲	۲	۳
۶	۱	۲	۳	۱
۷	۱	۳	۱	۳
۸	۱	۳	۲	۱
۹	۱	۳	۳	۲
۱۰	۲	۱	۱	۲
۱۱	۲	۱	۲	۳
۱۲	۲	۱	۳	۱
۱۳	۲	۲	۱	۳
۱۴	۲	۲	۲	۱
۱۵	۲	۲	۳	۲
۱۶	۲	۳	۱	۱
۱۷	۲	۳	۲	۲
۱۸	۲	۳	۳	۳
۱۹	۳	۱	۱	۳
۲۰	۳	۱	۲	۱
۲۱	۳	۱	۳	۲
۲۲	۳	۲	۱	۱
۲۳	۳	۲	۲	۲
۲۴	۳	۲	۳	۳
۲۵	۳	۳	۱	۲
۲۶	۳	۳	۲	۳
۲۷	۳	۳	۳	۱

روش تاگوچی، از دستگاه لایه نشانی ذوبی اِندر پرو[1] استفاده شد. جدول ۳، مشخصات فنی دستگاه لایه‌نشانی را نشان می‌دهد. در گام اول، نمونه آزمون خستگی با استفاده از نرم‌افزار مدلسازی سالیدورکس[2] طراحی شد. پس از آن با پسوند قابل خواندن[3] برای نرم‌افزارهای ساخت افزایشی ذخیره شد. نمونه ذخیره‌شده به عنوان ورودی نرم‌افزار سیمپلی‌فای[4] مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها با اعمال متغیرهای موردنظر بر اساس آرایه‌های پیشنهادی تاگوچی موجود در جدول ۲، تحت فرآوری قرار گرفتند و سایر متغیرهای فرآیند ثابت در نظرگرفته شدند. از خروجی نرم‌افزار، کد مسیر پیمایش نازل جهت ساخت نمونه‌ها استخراج گردید. شکل ۳، مدلسازی نمونه آزمون خستگی را نشان می دهد.

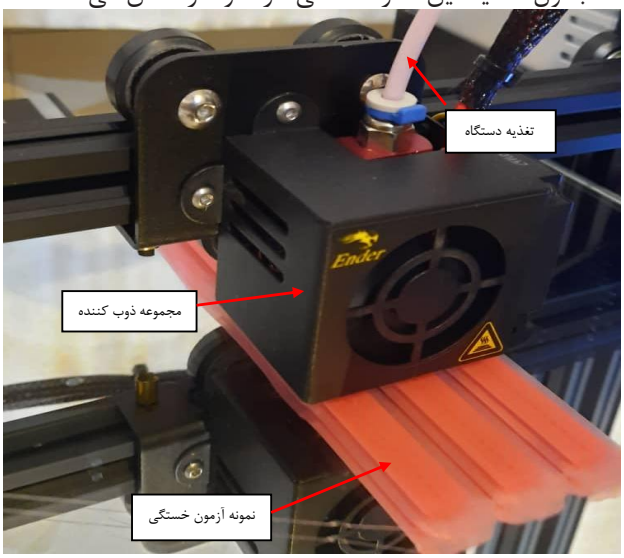
1 Ender 3 Pro
2 SolidWorks 2017
3 Standard Triangle Language (.Stl)
4 Simplify3D



شکل ۳. مدلسازی، ۱) طراحی نمونه ۲) شبیه‌سازی ساخت نمونه‌ها

Fig. 3. Computer modeling (1) sample design (2) Simulation of sample construction

با استفاده از فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید محصول شرکت یوسو[5] نمونه‌های آزمون خستگی مطابق با دستورالعمل استاندارد[6] ساخته شدند [۱۳, ۱۴]. شکل ۴، ساخت نمونه‌های آزمون خستگی را نشان می‌دهد. جهت انجام آزمون خستگی بر روی نمونه‌های ساخته‌شده مطابق با دستورالعمل سازنده، از دستگاه آزمون خستگی[7] استفاده شد. شکل ۵، دستگاه آزمون خستگی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته‌شده با قرارگیری در محور دستگاه جهت انجام آزمون خستگی با سرعت دورانی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه، گیره‌بندی شدند. جهت اعمال نیرو به انتهای نمونه، از سیستم بارگذاری مجهز به نیروسنج استفاده شد. با اعمال نیرو ۱۵ نیوتن به انتهای نمونه‌ها، آزمون خستگی انجام شد. جدول ۴ میانگین عمر خستگی هر نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. ساخت نمونه‌های خستگی

Fig. 4. Fatigue sample construction

5 Yousu Plastic Technology Co.
6 ASTM D7774-12
7 Rotating bending test machine (GUNT WP 140)

جدول ۳. مشخصات فنی دستگاه لایه نشانی ذوبی

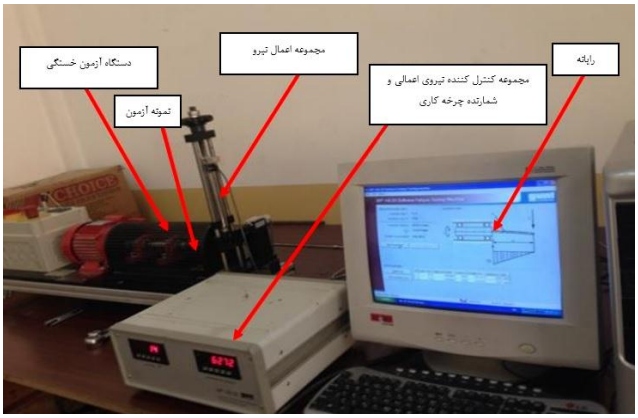
Table 3. Technical specifications of the smelting layer (machine (FDM

متغیر	واحد	میزان دقت (یا محدوده کاری)
قطر نازل	mm	۰/۴
ابعاد فیلامنت	mm	۱/۷۵
ابعاد میز	mm × mm × mm	۲۲۰×۲۲۰×۲۵۰
رزولوشن	µm	۱۰۰–۴۰۰
حداکثر دمای اکسترودر	°C	۲۵۵
حداکثر دمای میز	°C	۱۰۰

۲-۴- تحلیل سیگنال به نویز

با استفاده از نتایج آزمون خستگی جهت تعیین سطوح بهینه متغیرهای فرآیند، از نسبت سیگنال به نویز[1] استفاده شد. نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده مقدار حساسیت مشخصه مورد بررسی به متغیرهای غیرقابل‌کنترل (یا متغیرهای اغتشاشی) در یک فرآیند کنترل‌شده می‌باشد [۱۲]. متغیرهای غیرقابل‌کنترل، عوامل ایجادکننده نویز در روند آزمایش هستند، که در این فرآیند می‌توان به نوسانات دمایی و اتصال نایکنواخت در محل تماس لایه‌ها اشاره کرد.

به منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز و همچنین بدست‌آوردن



شکل ۵. دستگاه آزمون خستگی

Fig. 5. Fatigue test machine

سطوح بهینه هر یک از متغیرها، از یک تابع زیان[2] استفاده شد [۱۲, ۱۵] . تابع زیان مورد استفاده از نوع بزرگتر-بهتر[3] در نظرگرفته شد، زیرا بیشترین مقدار عمر خستگی مدنظر می‌باشد. روابط مورد استفاده جهت تعیین نسبت سیگنال به نویز، با توجه به تابع زیان بزرگتر-بهتر به صورت زیر می‌باشند [۱۵]:

$$L_i = \sum_{i=1}^{n} 1/y_i^2 \quad (۱)$$

$$S/N = -10\log L_i \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲) ، L_i تابع زیان و یا میانگین مربعات انحرافات، n تعداد کل آزمایش‌ها، y_i خروجی هر آزمایش و S/N نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. در هر آزمایش برای ایجاد بهترین شرایط همواره

جدول ۴. میانگین عمر خستگی نمونه‌ها

Table 4. Average fatigue life of samples

آرایه‌ها	چرخه	آرایه‌ها	چرخه	آرایه‌ها	چرخه
۱	۸۱۶/۰۶۲	۱۰	۸۳۴/۱۹۷	۱۹	۷۲۵/۳۸۹
۲	۸۸۸/۶۰۱	۱۱	۱۶۳۲/۱۲	۲۰	۵۰۷/۷۷۲
۳	۱۳۲۳/۸۳	۱۲	۳۰۸۲/۹	۲۱	۱۶۵۰/۲۶
۴	۹۹۷/۴۰۹	۱۳	۱۰۵۱/۸۱	۲۲	۱۳۴۱/۹۷
۵	۱۳۷۸/۲۴	۱۴	۲۰۴۹/۲۲	۲۳	۱۹۶۷/۶۸
۶	۲۰۱۲/۹۵	۱۵	۳۷۵۳/۸۹	۲۴	۳۷۹۰/۱۶
۷	۱۰۶۹/۹۵	۱۶	۱۰۱۵/۵۴	۲۵	۱۷۷۷/۲
۸	۱۲۳۳/۱۶	۱۷	۱۶۱۳/۹۹	۲۶	۴۲۶۱/۶۶
۹	۳۶۶۳/۲۱	۱۸	۳۲۸۲/۳۸	۲۷	۶۲۵۶/۴۸

1 Signal to noise ratio

2 Loss function

3 Larger is better

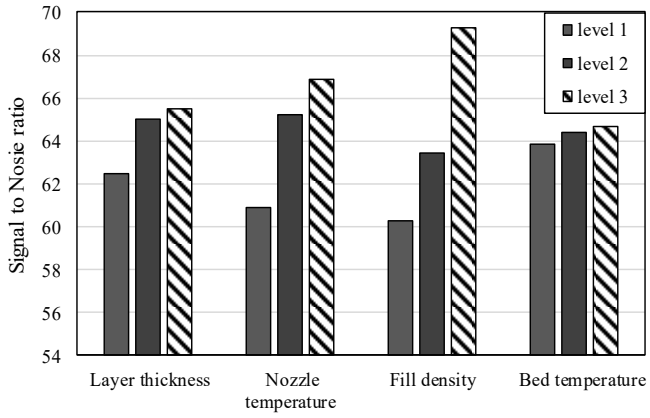
جدول ۵. تحلیل واریانس

Table 5. Analysis of variance

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مجموع مربعات	F	P	میزان تاثیر (٪)
ضخامت لایه	۲	۴۷/۴۲۵	۲۳/۷۱۳	۲/۵	۰/۱۱۰	۷/۷۰۸۹
دمای نازل	۲	۱۷۳/۳۱۴	۸۶/۶۵۷	۹/۱۴	۰/۰۰۲	۲۸/۱۸۳۷
چگالی سطح	۲	۳۷۲/۳۳۷	۱۸۶/۱۶۸	۱۹/۶۳	۰/۰۰۰	۶۰/۵۳۰۶
دمای میز	۲	۳/۰۶۶	۱/۵۳۳	۰/۱۶	۰/۸۵۲	۰/۴۹۳۳
خطا	۱۸	۱۷۰/۷۴۴	۹/۴۸۶			۳/۰۸۳۵
کل	۲۶	۷۶۶/۸۸۵				۱۰۰

بزرگترین مقدار عددی نسبت سیگنال به نویز مطلوب است. مقدار سیگنال به نویز بالا نشان‌دهنده این است که اثر متغیرهای قابل کنترل بیشتر از اثر متغیرهای نویز می‌باشد [۱۱]. با استفاده از نتایج میانگین عمر خستگی موجود در جدول ۴، مقدار نسبت سیگنال به نویز برای هر نمونه با استفاده از نرم‌افزار تحلیل داده مینی‌تب[1] محاسبه گردید. شکل ۶، مقادیر نسبت سیگنال به نویز هر متغیر در سطوح مورد بررسی را نمایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۶، ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای نازل، نسبت سیگنال به نویز افزایش پیدا کرده است. با افزایش دمای نازل، مقدار گرادیان دمایی افزایش پیدا می‌کند که این مسئله سبب افزایش سیالیت ماده خروجی از نازل و ایجاد پیوند قوی‌تری میان لایه‌ها می‌شود. همچنین با افزایش دمای میز، این مسئله تشدید می‌گردد. این نکته قابل ذکر است که افزایش بی‌رویه دمای نازل و میز، باعث افزایش سیالیت ماده مصرفی و روان‌شدن آن بر روی سطح می‌شود که این موضوع سبب کاهش استحکام اتصال و کاهش دقت ابعادی قطعه می‌شود. در متغیر چگالی سطح (میزان پرشوندگی سطح) با افزایش چگالی، میزان فضاهای خالی در قطعه کاهش پیدا کرده است. این امر موجب اتصال بهتر رشته‌ها و در نتیجه افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌شود. از آنجایی که انتخاب بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز در هر متغیر سبب بهبود عمر خستگی قطعات می‌شود، می‌توان این مقدار را سطح بهینه هر متغیر دانست. لذا حالت بهینه متغیرهای مورد بررسی فرآیند (L۳F۳T۳B۳) می‌باشد.



شکل ۶. مقادیر سیگنال به نویز

Fig . 6. Signal to noise values

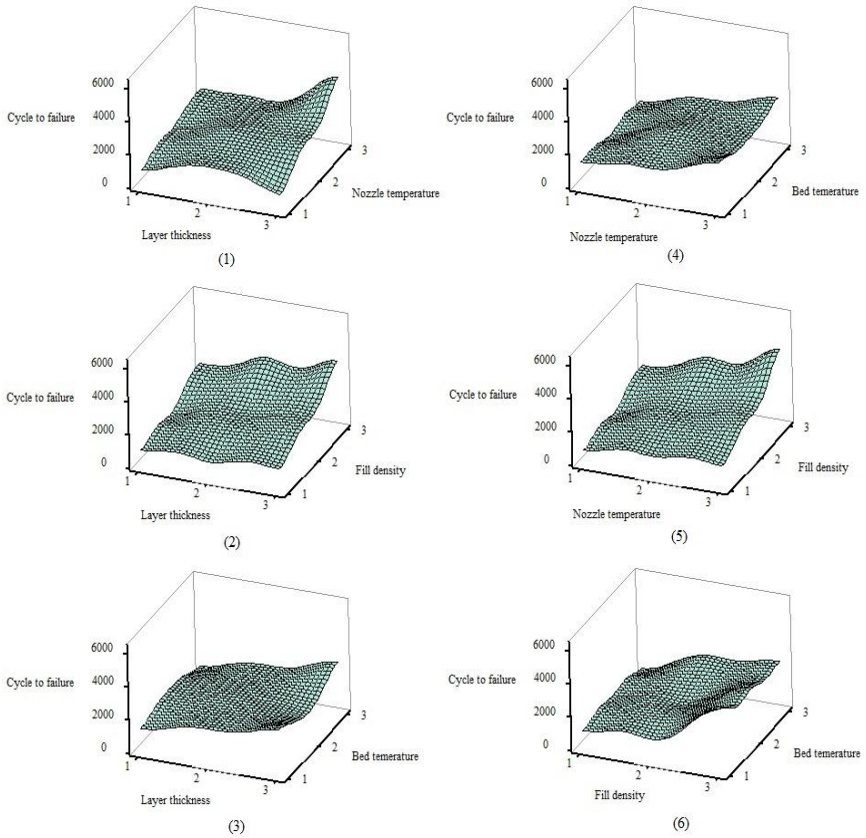
۲-۵- تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند

به منظور تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی، از نتایج تحلیل نسبت سیگنال به نویز استفاده شد. بدین منظور با استفاده از تحلیل واریانس، میزان تاثیرگذاری متغیرهای فرآیند مشخص شد [۱۵]. جدول ۵، میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی قطعات را نشان می‌دهد.

با درنظرگیری مقادیر آماره F موجود در جدول ۵، میزان موثربودن یا عدم تاثیر متغیرهای فرآیند تعیین شد. با توجه به این مقادیر نتیجه می‌شود که متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب با ۶۰/۵۳٪، ۲۸/۱۸٪ و ۷/۷۱٪ بیشترین و متغیر دمای میز با ۰/۴۹٪ کمترین میزان تاثیر را بر عمر خستگی دارند، همچنین میزان تاثیرگذاری متغیرهای نویز و خطاهای آزمایش ۳/۰۸۳۵٪ می‌باشد.

دلیل تاثیر بالای متغیر چگالی سطح و دمای نازل را می‌توان این مسئله دانست که با افزایش مقدار دمای نازل، اتصال میان لایه‌ای

1 Minitab 17



شکل ۷. برهمکنش متغیرهای فرآیند

Fig. 7 . Interaction of process variables

بهتری شکل می‌گیرد که این اتصال در مقابل رشد ترک مقاومت می‌کند. افزایش مقدار متغیر چگالی سطح میزان ماده بیشتری در هر لایه وجود داشته که این مسئله مقاومت خستگی قطعه را بالا می‌برد [۹]. در آزمایش‌های انجام‌شده، متغیرهای مورد بررسی به صورت متقابل بر روی عمر خستگی قطعات لایه‌نشانی‌شده تاثیر دارند. تاثیرات برهم‌کنش متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی در شکل ۷ آورده شده است. به عنوان مثال، شکل ۱-۷ (تاثیر متقابل ضخامت لایه و دمای نازل) نشان می‌دهد که متغیرهای ضخامت لایه و دمای نازل به ترتیب تاثیر نوسانی و افزایشی بر عمر خستگی دارند. با قرارگیری متغیر دمای نازل در بیشترین مقدار مورد بررسی و انتخاب متغیر ضخامت لایه در سطح ۳ ، بیشترین مقدار عمر خستگی از برهم‌کنش این دو متغیر حاصل می‌شود. شکل ۴-۷ نیز بیان‌کننده این مسئله می‌باشد که متغیر دمای میز تاثیری زیادی بر روی عمر خستگی ندارد، اما با افزایش مقدار دمای نازل عمر خستگی افزایش پیدا می‌کند. با بررسی اثر دو متغیر چگالی سطح و دمای میز در شکل ۶-۷، ملاحظه می‌شود که دمای میز در مقابل چگالی سطح، تاثیری تقریبا یکنواخت بر روی میزان عمر خستگی دارد، در مقابل رویه مورد نظر با افزایش میزان چگالی سطح از ۲۵% تا ۷۵% سبب افزایش میزان عمر خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید شده است.

۲-۶- آزمایش تایید

قسمت نهایی مطالعه تجربی، انجام آزمایش تاییدی به منظور اعتبارسنجی در طراحی آزمایش ارائه‌شده توسط الگوریتم تاگوچی می‌باشد. به منظور انجام اعتبارسنجی، یک آزمایش با بکارگیری سطح بهینه هر متغیر صورت پذیرفت و پس از آن بازه اطمینان برای آن مشخص گردید. با مقایسه مقدار نسبت سیگنال به نویز نمونه بهینه با بازه تعیین‌شده، اگر مقدار نسبت سیگنال به نویز در بازه یاد شده باشد، می‌توان صحت طراحی آزمایش انجام‌شده و تحلیل‌های صورت‌گرفته را تایید کرد. مقدار نسبت سیگنال به نویز و بازه اطمینان

جدول ۶. نتایج پیش‌بینی الگوریتم تاگوچی

Table 6. Predictive results of Taguchi algorithm

متغیر	آزمایش نمونه بهینه	مقدار پیش‌بینی
سیگنال به نویز	۷۲/۵۹	۷۳/۳۲
بازه اطمینان	(۷۵/۲۷۰۴ – ۷۱/۳۹۹۷)	

را می‌توان با استفاده از روابط (۳) و (۴) تعیین کرد [۱۶]:

$$n_{opt} = n_m + \sum_{i=1}^{p}(n_i - n_m) \quad (۳)$$

$$C.I. = \pm\sqrt{F(n_1, n_e) \times MS_e / n_{eff}} \quad (۴)$$

که در روابط (۳) و (۴) n_{opt} مقدار سیگنال به نویز بهینه، n_m میانگین نسبت سیگنال به نویز، n_i مقدار سیگنال به نویز هر سطح بهینه، $F(n_1,n_e)$ مقدار توزیع استاندارد برای درجه آزادی متوسط و خطا، MS_e میانگین مجموع مربعات خطا و n_{eff} عدد موثر می‌باشند [۱۶]. با استفاده از روابط (۳) و (۴) مقدار بازه اطمینان تعیین شد. جدول ۶، نتایج پیش‌بینی الگوریتم تاگوچی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج موجود در جدول ۶ و در سطح اطمینان ۹۰%، نسبت سیگنال به نویز نمونه بهینه در بازه اطمینان مجاز قرار دارد و لذا صحت روش تاگوچی در طراحی آزمایش و تحلیل‌های انجام‌شده، اثبات می‌شود.

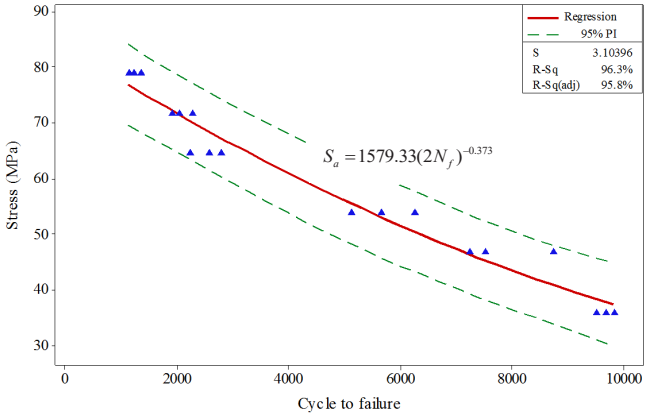
۲-۷- تعیین نمودار خستگی

جهت مدلسازی تنش-عمر خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید، در ابتدا از مقدار بهینه متغیرهای ارائه‌شده در شکل ۶، جهت ساخت نمونه‌های بهینه استفاده شد. جهت تعیین مدل تنش-عمرخستگی برای قطعات لایه نشانی‌شده، نمونه‌ها در شش سطح بارگذاری مختلف با سه تکرار برای هر سطح به منظور بهبود دقت در نتایج، مورد آزمایش خستگی قرار گرفتند [۱۷, ۱۸]. مقدار نیروی اعمال‌شده و

جدول ۷. مقادیر نیرویی اعمال‌شده برای تعیین نمودارخستگی و حداکثر مقدار تنش

Table 7 . The amount of force applied to determine the fatigue graph and the maximum value of stress

تنش خستگی (MPa)	گشتاور خمشی (N.mm)	مقدار نیرویی (N)
۷۸/۸۱۹	۱۰۴۰	۱۰
۷۱/۶۲۵	۱۳۵۲	۱۳
۶۴/۵۳۹	۱۵۶۰	۱۵
۵۳/۸۰۳	۱۸۷۲	۱۸
۴۶/۶۱۰	۲۰۸۰	۲۰
۳۵/۸۰۷	۲۲۸۸	۲۲



شکل ۸. نمودار تنش – عمر خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید

Fig. 8. Stress-fatigue life diagram for PLA material

تنش ایجادشده برای تعیین نمودار خستگی، در جدول ۷ آورده شده است.

در گام بعدی و به جهت تعیین مدل رفتار خستگی، از تحلیل رگرسیون به روش حداقل مربعات بر روی نتایج استفاده شد. مدل حداقل مربعات از رابطه (۵) تبعیت می‌کند [۱۸]:

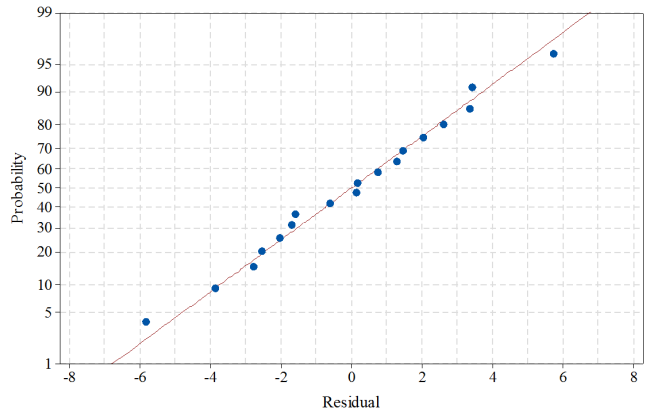
$$Y = A + BX \quad (۵)$$

که در رابطه (۵)، ضرایب A و B به صورت زیر تعیین می شوند [۱۸]:

$$A = Y - BX \quad (۶)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n_s}(x_i - X)(y_i - Y)}{\sum_{i=1}^{n_s}(x_i - X)^2} \quad (۷)$$

در روابط (۵)، (۶) و (۷)، X مقدار میانگین مقادیر x ، Y مقدار میانگین مقادیر y ، x مقادیر تنش خستگی و y مقادیر عمر خستگی



شکل ۹. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های مدل رگرسیون

Fig. 9. Normal probability diagram of regression model residuals

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس بر روی مدل رگرسیون

Table 8. Stress diagram - fatigue life of polylactic acid components

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
رگرسیون	۲	۳۷۵۵/۵۲	۱۸۷۷/۷۶	۱۹۴/۹۰	۰/۰۰۰
باقیمانده	۱۵	۱۴۴/۵۲	۹/۶۳		
کل	۱۷	۳۹۰۰/۰۴			

می‌باشند. با محاسبه ضرایب A ، B و جایگذاری این مقادیر در رابطه (۵) مدل حداقل مربعات ایجاد شد.

رابطه (۸) حالت لگاریتمی معادله تنش-عمر خستگی را نشان می دهد [۱۸]:

$$\log(2N_f) = -\frac{1}{b}\log(S'_f) + \frac{1}{b}\log(S_a) \quad (۸)$$

که در رابطه (۸)، N_f عمر خستگی، S'_f ضریب مقاومت خستگی و S_a تنش خستگی می‌باشند. با معادل‌سازی روابط (۵) و (۸)، می‌توان مقادیر زیر را هم‌ارز دانست [۱۸]:

$$Y = \log(2N_f) \quad (۹)$$

$$A = -\frac{1}{b}\log(S'_f) \quad (۱۰)$$

$$B = \frac{1}{b} \quad (۱۱)$$

$$X = \frac{1}{b}\log(S_a) \quad (۱۲)$$

$$S'_f = 10^{(-A\times b)} \quad (۱۳)$$

رابطه (۱۴)، مدل تنش-عمر خستگی را نشان میدهد [۱۸]:

$$S_a = S'_f(2N_f)^b \quad (۱۴)$$

با استفاده از نرم‌افزار تحلیل داده‌ها[1]، تحلیل رگرسیون به روش حداقل مربعات بر روی نتایج آزمون خستگی موجود در جدول ۷ و بر اساس روابط (۴) تا (۱۳) صورت پذیرفت و مدل مورد نظر برای پیش‌بینی رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید تولیدشده به روش لایه‌نشانی ذوبی تعیین شد. در این تحلیل مقدار ضرایب A و B به ترتیب ۸/۵۷۵ و ۲/۶۸۳- محاسبه گردید. رابطه (۱۵) مدل تنش-عمر خستگی را نشان می‌دهد:

$$S_a = 1579.33(2N_f)^{-0.373} \quad (۱۵)$$

1 Minitab 17

شکل ۸، نمودار تنش-عمرخستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید را نشان می‌دهد.

به جهت بررسی مناسب‌بودن و سازگاری مدل رگرسیون ارائه‌شده از دو ابزار تحلیل واریانس و تحلیل باقیمانده‌ها استفاده شده است. با انجام تحلیل واریانس بر روی مدل، مشخص گردید که میزان P-value < ۰٫۰۵ می‌باشد. مقادیر مربوط به تحلیل واریانس برای مدل رگرسیون بدست‌آمده، در جدول ۸ آورده شده است.

به جهت بررسی مناسب‌بودن مدل و با درنظرگیری فرض توزیع نرمال باقیمانده‌ها، به تحلیل نمودار باقیمانده‌ها پرداخته شد. شکل ۹ احتمال نرمال‌بودن باقیمانده‌های مدل رگرسیون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، خط مستقیم نشان‌دهنده باقیمانده‌های مدل می‌باشد و نقاط، مقادیر حقیقی باقیمانده‌های بدست‌آمده از مدل رگرسیون ارائه‌شده را نشان می‌دهند. نقاط باقیمانده در امتداد خط با شرط نرمال، قرار دارند که این نقاط به صورت تقریبا خطی تغییر می‌کنند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که باقیمانده‌های بدست‌آمده از مدل دارای توزیع نرمال می‌باشند، که در نتیجه شرط نرمال‌بودن توزیع باقیمانده‌ها پذیرفته شده و به طبع مدل رگرسیون اعتبار کافی برای برازش داده‌ها دارد.

۸-۲- تحلیل المان محدود

جهت بررسی دقیق رفتار خستگی در قطعات پلی‌لاکتیک اسید ساخته‌شده به روش لایه نشانی ذوبی، تحلیل عددی رفتار خستگی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل مهندسی انسیس[2] انجام شد. حل مسئله مورد نظر با استفاده از محیط تحلیل استاتیکی[3] صورت پذیرفت. جهت مقایسه نتایج تحلیل المان محدود، شبیه‌سازی برابر شکل ۱۰، روی نمونه آزمون خستگی مطابق مطالعه تجربی انجام شد. به منظور

2 ANSYS 18.2

3 Static structural

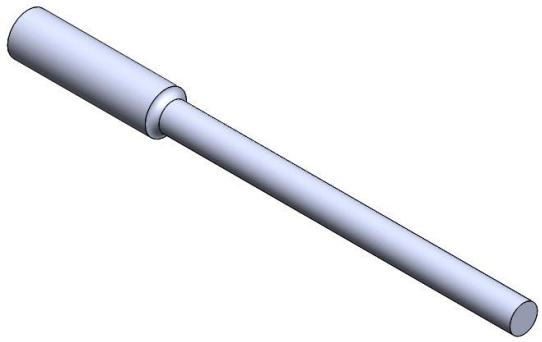
جدول ۹. خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌لاکتیک اسید

Table 9. Results of analysis of variance on regression model

کمیت	واحد	مقدار
چگالی	g/cm^3	۱/۲۵۲
گرمای ویژه	J/kg^oC	-
۱۹۰°C		۲۰۶۰
۱۰۰°C		۱۹۵۵
۵۵°C		۱۵۹۰
استحکام تسلیم	MPa	۷۰
استحکام نهایی	MPa	۷۳
مدول الاستیک	MPa	۳۵۰۰
مدول برشی	MPa	۱۲۸۷
ضریب پواسون	-	۰/۳۶

مدلسازی رفتار ماده، خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌لاکتیک اسید در بانک اطلاعات مواد[1] نرم‌افزار وارد گردید. به این جهت با استفاده از مقادیر استحکام مکانیکی و خواص فیزیکی گزارش‌شده توسط دیگر محققان، خواص ماده مورد نظر در نرم‌افزار انسیس تعریف شد [۳, ۱۱]. جدول ۹، خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌لاکتیک اسید را نشان می‌دهد.

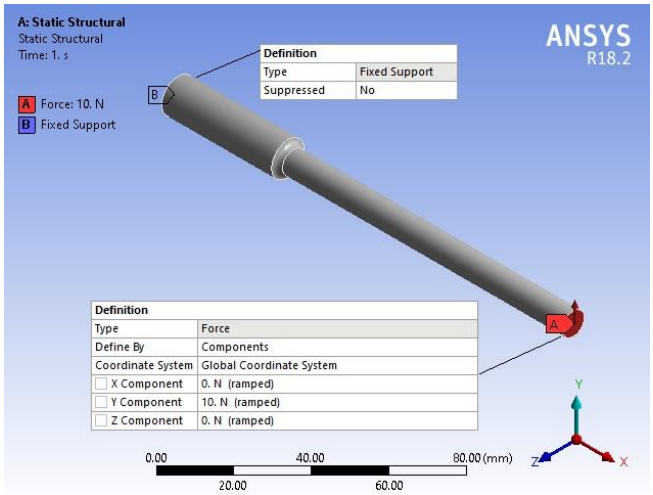
به منظور شبیه‌سازی المان محدود رفتار خستگی، از روش تنش–عمر[2] در این تحلیل استفاده شد [۱۹]. در این روش بار نوسانی به نمونه اعمال می‌شود که تعداد گردش‌های شمارش‌شده تا شکست، عمر نمونه را نشان می‌دهد. به منظور اعمال بارگذاری بر روی نمونه،



شکل ۱۰. مدل المان محدود مورد استفاده

Fig. 10. Finite element model

1 Engineering Data
2 Stress – Life method



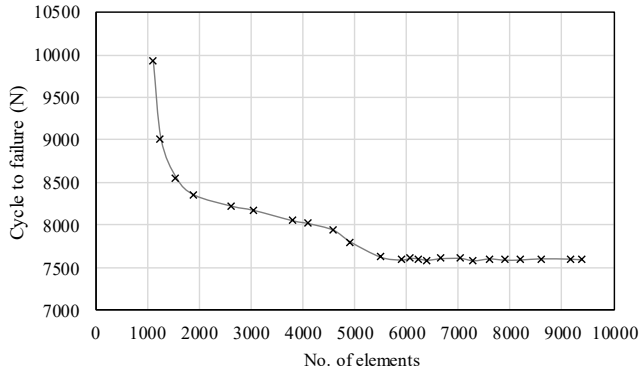
شکل ۱۱. اعمال شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی

Fig. 11. Apply loading and boundry conditions

از بار متمرکز در انتهای نمونه در بازه ۱۰ الی ۲۲ نیوتن استفاده شد، همچنین شرط تکیه‌گاه ثابت در انتهای نمونه در نظرگرفته شد [۱۹]. شکل ۱۱، اعمال شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد.

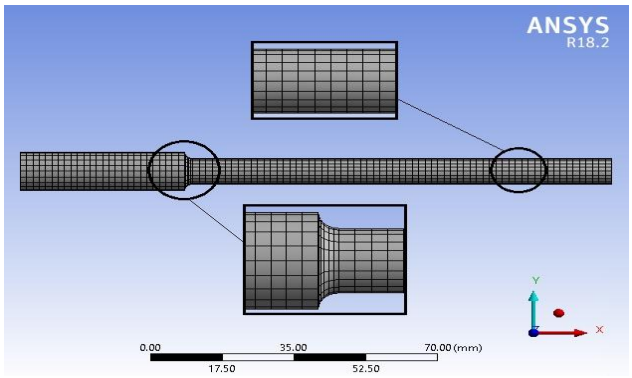
در موضوع مش‌زنی مدل مورد تحلیل، مسئله حائز اهمیت استفاده از مش ریزتر در ناحیه رآکورد (تغییر قطر از ۸ به ۱۲ میلمتر) ایجادشده به شعاع ۲ میلیمتر می‌باشد. از طرفی موضوع محدودیت در تعداد کلی مش نیز وجود دارد. با توجه به این شرایط، آزمون حساسیت نتایج نسبت به مش بر روی مسئله مورد بررسی صورت گرفت. شکل ۱۲، نمودار حساسیت نتایج نسبت به مش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج موجود در شکل ۱۲، پس از ثابت‌شدن میزان حساسیت عمر خستگی نسبت به مش، از مش با ابعاد ۰/۰۰۱۶۸ برای کل مدل و مش با ابعاد ۰/۰۰۰۵ در ناحیه رآکورد استفاده شد. در مجموع از کل تعداد ۶۹۸۴ المان تعریف‌شده در حل مسئله استفاده شد. شکل ۱۳، شکل مش و موقعیت آنها را نشان می‌دهد.

در تحلیل انجام‌شده، به منظور تعیین عمر و تنش خستگی از بارگذاری



شکل ۱۲. نمودار حساسیت خروجی نسبت به مش

Fig. 12. FEM result sensitivity diagram to the mesh



شکل ۱۳. شکل مش و موقعیت آنها

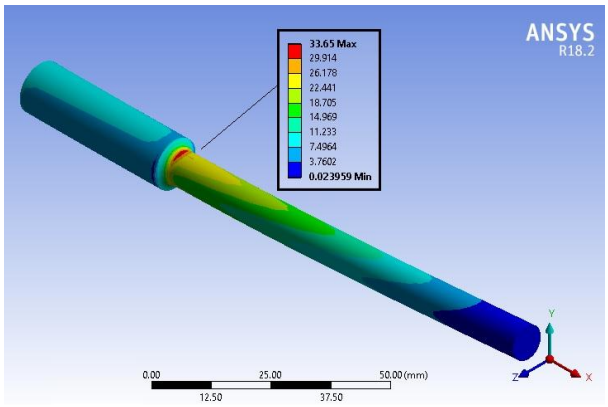
Fig. 13. Mesh shape and lacations

در حالت کاملا معکوس شونده[1] استفاده شد، که نسبت بارگذاری[2] در این حالت ۱-می‌باشد. همچنین از معیار تسلیم گربر[3] جهت تعیین مقدار تنش متوسط[4] در روش تحلیل تنش-عمر خستگی استفاده شد [۱۹]. رابطه (۱۶) معادله معیار تسلیم گربر را نشان می‌دهد:

$$\frac{\sigma_{Alternating}}{S_e}+\left(\frac{\sigma_{Mean}}{S_{ut}}\right)^2=1 \qquad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶)، σ_{Mean} تنش متوسط، $\sigma_{Alternating}$ تنش متناوب، S_e حد دوام و S_{ut} حد نهایی کششی می‌باشند. با درنظرگیری این مفروضات، شبیه‌سازی رفتار خستگی انجام شد.

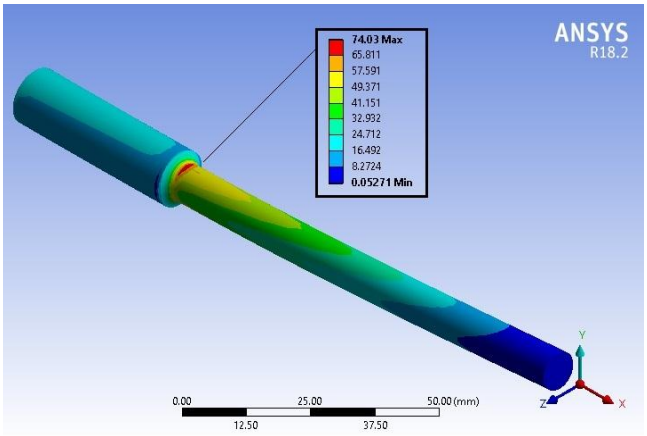
شکل ۱۴، توزیع تنش در نمونه خستگی تحت نیروی ۱۰ نیوتنی را نشان می‌دهد. تنش به‌وجودآمده در محل شروع رآکورد برابر ۳۳/۶۵ مگاپاسکال می‌باشد که با درنظرگیری معیار تسلیم گربر، مقدار ضریب



شکل ۱۴. توزیع تنش تحت بارگذاری ۱۰ نیوتنی

Fig.14. Stress distribution under 10 N load

1 Fully Reversed
2 Loading Ratio
3 Gerber
4 Mean stress correction

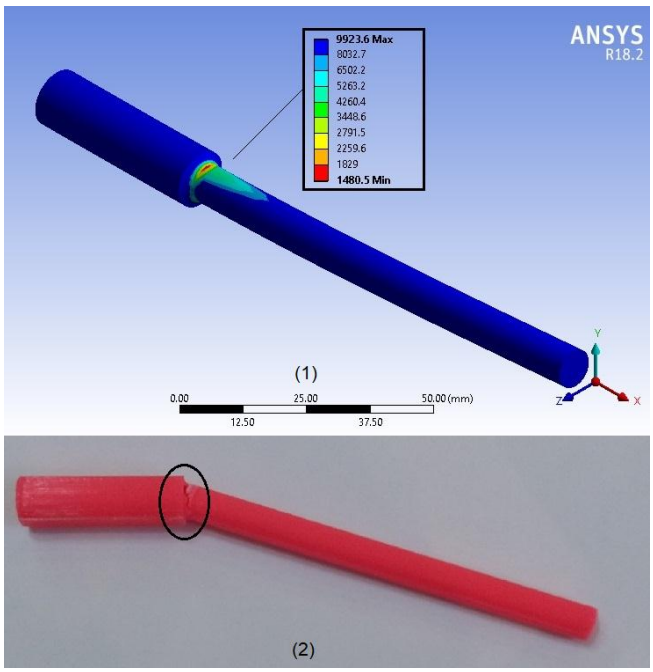


شکل ۱۵. توزیع تنش تحت بارگذاری ۲۲ نیوتن

Fig. 15. Stress distribution under 22 N load

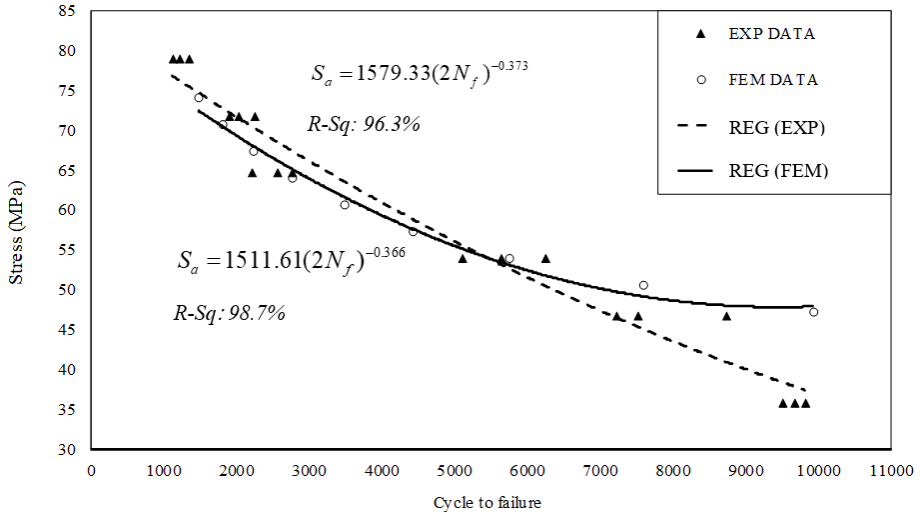
اطمینان ۱/۴۰۷۳ را دارا می‌باشد. با توجه به مدلسازی انجام‌شده، نمونه دارای عمر ۹۹۲۳/۶ چرخه می‌باشد.

شکل ۱۵ نحوه توزیع تنش قطعه را با بارگذاری ۲۲ نیوتن در انتهای نمونه نشان می‌دهد. تنش ایجادشده در نمونه برابر ۷۴/۰۳ مگاپاسکال است. با استفاده از منطقه امن گربر مشخص گردید، نمونه تحت بارگذاری ۲۲ نیوتن دارای ضریب اطمینان ۰/۶۳۹۶۷ می‌باشد. مقدار عمر خستگی در این نمونه با استفاده از روش تنش-عمر برابر ۱۴۸۰/۵ چرخه می‌باشد. با مقایسه عمر نمونه شبیه‌سازی شده تحت



شکل ۱۶. مقایسه محل شکست نمونه خستگی تحت ۱) شبیه‌سازی المان محدود ، ۲) آزمون خستگی

Fig. 16. Comparison of fatigue sample failure location with 1) finite element simulation, 2) fatigue test



شکل ۱۷. مقایسه نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود

Fig. 17. Comparison of the results of experimental study and finite element analysis

بارگذاری ۲۲ نیوتن با نمونه آزمون تجربی مشابه، مشخص گردید، موضع ایجادشده شکست در هر دو مسئله یکسان می‌باشد. شکل ۱۶، مقایسه محل شکست نمونه تحت آزمون خستگی با شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد.

۲-۹- صحه گذاری تحلیل المان محدود

جهت اعتبارسنجی روش تحلیل المان محدود صورت‌گرفته، نتایج تحلیل المان محدود با نتایج مطالعه تجربی مقایسه گردید. إدر تحلیل المان محدود، رفتار خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید ساخته‌شده به روش لایه نشانی ذوبی را به میزان ۶% شبیه‌سازی می‌نماید. شکل ۱۷، مقایسه نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود رفتار خستگی در قطعات پلی‌لاکتیک اسید ساخته‌شده به روش لایه‌نشانی ذوبی را می‌توان به موارد زیر خلاصه نمود.

- با طراحی آزمایش و استفاده از تحلیل سیگنال به نویز مشخص گردید، ضخامت لایه با مقدار ۰/۳ میلیمتر، چگالی سطح به میزان ۷۵% ، دمای نازل و دمای میز به ترتیب به میزان ۲۰۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی می‌باشند.
- با انجام تحلیل واریانس بر روی خروجی آزمایش‌ها، میزان تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر رفتار خستگی قطعات لایه‌نشانی‌شده تعیین شد. در این تحلیل مشخص گردید متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب با ۶۰/۵%، ۲۸/۱% و ۷/۷% بیشترین تاثیر را بر روی عمر خستگی قطعات دارند. در این تحلیل میزان خطا برابر با ۳/۰% محاسبه شد.
- با استفاده از برازش با روش حداقل مربعات بر روی نتایج عمر خستگی قطعه ساخته‌شده با مقدار بهینه هر متغیر ۴، مدل تنش-عمرخستگی برای قطعات پلی‌لاکتیک اسید با ضریب رگرسیون ۹۶/۳% ارائه گردید.
- در تحلیل المان محدود، مقاومت به خستگی قطعات پلی‌لاکتیک اسید ساخته‌شده به روش لایه‌نشانی ذوبی با اختلاف ۲/۱۵ مگاپاسکال نسبت به حالت تجربی تعیین شد. که علت این اختلاف را می‌توان ترکیب عواملی مانند اختلاف در خواص مکانیکی تعریف‌شده و یا شرایط تکیه‌گاهی دانست.

۴- فهرست علائم

علائم انگلیسی

Li	تابع زیان، cycle
S/N	نسبت سیگنال به نویز
n_{opt}	نسبت سیگنال به نویز بهینه
MS_e	میانگین مربعات خطا
N_f	عمر خستگی، cycle
S'_f	ضریب مقاومت خستگی
S_a	تنش خستگی، N/mm^2
S_e	حد دوام، N/mm^2
S_{ut}	استحکام نهایی کششی، N/mm^2

علائم یونانی

σ_{Mean}	تنش متوسط، N/mm^2
$\sigma_{Alternating}$	تنش متناوب، N/mm^2

۵- مراجع

[1] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, N. Jayanth, A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process, Virtual and Physical Prototyping, 12(1) (2017) 47-59.

[2] M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, Business Horizons, 60(5) (2017) 677-688.

[3] 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 (2015) 670-677.

[4] Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, Rapid Prototyping Journal, 14(2) (2008) 72-80.

[5] P.K. Gurrala, S.P. Regalla, Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling, Virtual and Physical Prototyping, 9(3) (2014) 141-149.

[6] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S. Mahapatra, Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, Journal of Advanced Research, 3 (2012).

[7] R. Singh, Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components, Rapid Prototyping Journal, 19(1) (2013) 58-63.

[8] I. Durgun, R. Ertan, Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost, Rapid Prototyping Journal, 20(3) (2014) 228-235.

[9] L. Wahl, S. Maas, D. Waldmann, A. Zürbes, P. Frères, Shear stresses in honeycomb sandwich plates: Analytical solution, finite element method and experimental verification, Journal of Sandwich Structures & Materials, 14(4) (2012) 449-468.

[10] M.F. Afrose, S.H. 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) (2016) 21-28.

[11] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, J. Lluma-Fuentes, Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens, Materials & Design, 140 (2018) 278-285.

[12] S.C.a.Y.W. G. Taguchi, Quality Engineering: Strategy in Research and Development, in: Taguchi's Quality Engineering Handbook, 2004, pp. 39-55.

[13] YouSu 3D, your professional 3D pen and 3D filament supplier!, in: Yousu, 2020.

[14] ASTM D7774 - 17, in: ASTM International - Standards Worldwide, 2020.

[15] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, Advances in Manufacturing, 3(1) (2015) 42-53.

[16] R.K. Roy, A primer on the Taguchi method, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

[17] M.C.L. P. H. Wirsching Fatigue under wide band random stresses, Journal of the Structural Division, 106(7) (1980) 1593-1607.

[18] Y.-L. Lee, 2 - FATIGUE DAMAGE THEORIES, in: Y.-L. Lee, J.W.O. Pan, R.B. Hathaway, M.E. Barkey (Eds.) Fatigue Testing and Analysis, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2005, pp. 57-76.

[19] R. Browell, A. Hancq, Calculating and displaying fatigue results, Ansys Inc, 2 (2006).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. R. Hashemi, H. Adibi. Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Behavior of Polylactic acid Components Made by Additive Manufacturing Method ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 3703-3716.

DOI: 10.22060/mej.2021.18299.6794

This page intentionally left blank