



## Experimental Study on Bending Fatigue of 3D-Printed Specimens Fabricated via Fused Deposition Modeling

Ammar Watheq Younus<sup>1</sup>, Ali Hassani\*<sup>2</sup>, Abbas Zolfaghari<sup>3</sup>

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2 Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3. Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

### Abstract

Polymer components manufactured using additive manufacturing (AM) methods have many applications in various industries. Different parameters affect the quality of parts' printing, and subsequently their mechanical and surface properties. In this paper, the effect of 3D printing factors including layer height, printing speed, and temperature on the fatigue life of PLA specimens printed by the Fused Deposition Modeling is investigated. Layer heights of 0.2, 0.25, and 0.3 mm, printing speeds of 1000, 1400, and 1800 mm/min, and printing temperatures of 205, 215, and 225°C, all with an infill density of 100%, are considered. For this purpose, 15 different configurations were created in Minitab using the Box-Behnken method for laboratory evaluation. The fatigue life of specimens was obtained using a SANTAM rotational fatigue machine at a constant speed of 5 Hz. Then, using linear and nonlinear second-order regression models and fitting the experimental data, the fatigue life estimation function was extracted using the scikit-learn package in Python. Studies show that the results obtained from nonlinear regression are reliable and do not suffer from overfitting. The results also show that as the printing speed and layer height increase, the fatigue life of specimens decreases due to the reduction in the mechanical and surface quality of the samples. In addition, although the printing temperature does not have a large effect on the fatigue life; its changes are nonlinear, and using nonlinear regression estimation, the optimal temperature of 213 degrees in the printing temperature range of 205 to 225 degrees Celsius has been obtained.

### Keywords

3D printing

PLA polymer

Rotating fatigue test

Fatigue life estimation

Linear and non-linear regressions.

Received: 01.27.2025

Revised: 03.16.2025

Accepted: 03.30.2025

\*Corresponding Author

Ali Hassani

Email

[Hassani@nit.ac.ir](mailto:Hassani@nit.ac.ir)

### 1- Introduction

Recent technological advancements have significantly transformed conventional manufacturing methods. Through the development of innovative fabrication techniques, designers can now produce complex geometries that closely resemble final part specifications. The invention of multi-axis CNC machines and subsequent 3D printers has revolutionized industry, enabling the production of virtually any three-dimensional component using various raw materials [1].

A critical challenge in additively manufactured components lies in their mechanical behavior. The fundamental characteristic of all additive manufacturing (AM) techniques is their layer-by-layer fabrication approach [2]. This inherent feature results in anisotropic mechanical properties of manufactured parts. Numerous factors influence this phenomenon, most of which are determined by the manufacturing process parameters [3]. While 3D printing has primarily been utilized for prototyping applications, its adoption in full-scale production remains limited. The development of



diverse AM technologies has expanded their applications across medical, aerospace, automotive, and engineering sectors due to advantages such as design feasibility and integrated manufacturing capabilities [4]. The medical industry has begun exploring 3D printing for tissue engineering, organ development, and cellular structure fabrication [5]. The operational principle of 3D printers relies on additive manufacturing methodology. Initially, a virtual 3D model is created using computer-aided design (CAD) software. Subsequently, secondary software slices this model into multiple layers, generating G-code instructions [2]. In fused deposition modeling (FDM), the most common feedstock consists of thermoplastic filaments fed through a heated nozzle. This technique can achieve layer thicknesses up to 50  $\mu\text{m}$  [2]. Compared to other AM methods, FDM has attracted significant research attention due to its cost-effectiveness and other advantages [6].

Research by Ezeh et al. [7] demonstrated that PLA specimens exhibit superior fatigue life compared to ABS counterparts. Furthermore, horizontally printed samples showed greater fatigue strength than vertically oriented ones. Dadashi and Azadi [8] found that reducing nozzle diameter improves fatigue performance. Safai et al. [9] highlighted the challenges in optimizing printing parameters for fatigue resistance due to complex interactions between process variables and material properties. Salim et al. [10] reported that PLA outperforms ABS in tensile strength, strain, and elastic modulus characteristics.

This study investigates the bending fatigue behavior of 3D-printed specimens fabricated via FDM. Multiple parameters influence the surface and internal quality of printed samples, consequently affecting their fatigue life. Key variables include layer height, melt temperature, thermoplastic polymer type, printing orientation, infill percentage, and printing speed. Notably, this research focuses specifically on 3D printing parameters affecting fatigue life, excluding applied bending load and

fatigue test machine rotational speed. It is important to emphasize that for polymeric materials, excessive rotational speeds during fatigue testing must be avoided due to their temperature-sensitive mechanical properties, as elevated speeds may induce thermal degradation during testing.

## 2- Materials and Methods

This study investigates the influence of FDM printing parameters on the fatigue life of 3D-printed specimens, focusing on layer height (0.2-0.3 mm), printing speed (1000-1800 mm/min), and melt temperature (205-225°C). A Box-Behnken experimental design was implemented in Minitab software, generating 15 test conditions (including 3 replicates) to evaluate 13 unique parameter combinations (Table 1 and Table 2). All specimens were printed using white PLA filament (1.75 mm diameter, Esun brand), selected for its superior deformation resistance (1.25-1.5 $\times$ ) and specific strength (1.1-1.3 $\times$ ) compared to ABS [11].

**Table 1: Investigated Printing Parameters**

<i>Values</i>			<i>Variable</i>
0.2	0.25	0.3	Layer Height (mm)
1000	1400	1800	Printing Speed (mm/min)
205	215	225	Melt Temperature (°C)
PLA			Filament Material

## 3- Discussion and Results

### 3.1 Fatigue life analysis

Rotational fatigue testing (5 Hz, 0.5 kg load) was conducted on triplicate samples for each parameter combination (Table 2).

Table 2: Experimental Design and Effect of various factors on fatigue life

Sample	Layer Height (mm)	Printing Temp. (°C)	Printing Speed (mm/min)	Cycles to Failure (Each Sample)			Mean Life
				1	2	3	
1	0.3	215	1000	35157	35781	36189	35709
2	0.2	225	1400	40479	40789	41012	40760
3	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
4	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
5	0.25	225	1000	38994	39564	39029	39195
6	0.25	215	1400	36459	36795	37123	36792
7	0.25	205	1000	39481	40465	39966	39971
8	0.2	215	1000	47062	47670	47149	47294
9	0.3	215	1800	26938	27842	27861	27547
10	0.3	225	1400	30895	31451	30021	30789
11	0.3	205	1400	47121	46159	47237	31126
12	0.25	205	1800	31049	30946	31482	31159
13	0.2	215	1800	35068	34875	35121	35021
14	0.2	205	1400	41542	42006	41894	41814
15	0.25	225	1800	30082	30746	30176	30335

### 3.2 Regression Modeling

Two predictive models were developed using Python's scikit-learn:

#### A) Linear Regression:

$$Sn_{lin} = +85605.21 - 99295 H - 37.38 T - 11.91 V \quad (1)$$

#### B) Nonlinear Regression:

$$Sn_{nonlin} = 111533.33H^2 + 358.5 HT + 51.38 HV - 304070 H - 9.49 T^2 - 0.00308 TV + 3957.65 T - 0.00424 V^2 - 12.22 V - 317328.08 \quad (2)$$

### 3.3 Validation Results

To evaluate the accuracy of the linear and nonlinear regression results, two additional test samples were examined. The outcomes of these two samples are presented in Table 3. Table 4 compares the experimental data with the predictions from both linear and nonlinear regression models, along with their respective percentage errors.

**Table 3: Test samples for regression validation**

Sample No.	Layer Height (mm)	Printing Temp. (°C)	Printing Speed (mm/min)	Cycles to Failure (Each Sample)			Mean Life
				1	2	3	
1	0.3	215	1400	31136	30224	31891	31084
2	0.25	205	1400	36767	36644	36521	36644

At first glance, it appears that the prediction error of the nonlinear regression function is greater than that of the linear regression. This observation stems from the fact that the characteristics of the two test samples happened to align more favorably with the linear regression model. Therefore, relying solely on these two test results would be insufficient to conclude that linear regression outperforms nonlinear regression in this study. However, this study provides two key pieces of evidence demonstrating the superior accuracy of the second-order nonlinear regression (Eq. 2) over linear regression (Eq. 1):

A) Python's Model Evaluation Scores:

The Python-generated scores assessing the models' ability to predict failure cycles were 0.97155 for linear regression and 0.9962 for nonlinear regression, indicating that the nonlinear regression achieves a better fit.

B) Least Squares Sum Comparison:

The sum of squared residuals (LS) was calculated for all samples (training and test). The results showed linear regression LS is 11,160,347; while the nonlinear regression LS equals to 2,726,721. The significantly lower LS value for nonlinear regression confirms its higher predictive precision.

**Table 4: Accuracy assessment of linear and nonlinear regression models against experimental tests**

<i>Sample 1</i>			<i>Sample 2</i>		
<i>Experimental (cycles)</i>	<i>Linear Regression (cycles)</i>	<i>Nonlinear Regression (cycles)</i>	<i>Experimental (cycles)</i>	<i>Linear Regression (cycles)</i>	<i>Nonlinear Regression (cycles)</i>
31,084	31,108	32,106	36,644	36,447	36,217
Error (%)	0.078	3.28	Error (%)	0.54	1.16

#### 4- References

[1] R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, and G. Gomez-Gras, "Kinematic optimization of FDM additive manufacturing process: defining a strategy for quality improvement," *Mechatronics*, vol. 36, pp. 119–126, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.mechatronics.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.006)

[2] M. Domingo-Espín, "Contributions to the knowledge about additive manufacturing with

Fused Deposition Modeling technology," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

[3] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modeling," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141–149, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1080/17452759.2014.914957](https://doi.org/10.1080/17452759.2014.914957)

[4] F. Calignano et al., "Overview on additive manufacturing technologies," *Proceedings of the*

*IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1109/JPROC.2016.2625098](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098)

[5] F. P. W. Melchels et al., “Additive manufacturing of tissues and organs,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007)

[6] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012)

[7] O. H. Ezeh and L. Susmel, “On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA),” *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 29–36, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.prostr.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.006)

[8] A. Dadashi and M. Azadi, “Experimental bending fatigue data of additive manufactured PLA

biomaterial fabricated by different 3D printing parameters,” *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101553, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2020.101553](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553)

[9] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, “A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers,” *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 87–97, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2019.04.015](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.015)

[10] M. A. Salim, Z. H. Termiti, and A. M. Saad, “Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology,” *Elsevier Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 65–72, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.promfg.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.011)

[11] S. Singh and R. Singh, “Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 123–143, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-08-2014-0092](https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0092)





## مطالعه تجربی خستگی خمشی قطعات چاپ سه‌بعدی ساخته‌شده با روش ریزش مذاب

عمار واثق‌یونس<sup>۱</sup>، علی حسنی<sup>۲\*</sup>، عباس ذوالفقاری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

### چکیده

### کلمات کلیدی

چاپ سه‌بعدی

تست خستگی دورانی

تخمین عمر خستگی

رگرسیون‌های خطی و غیر خطی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

\*نویسنده مسئول

علی حسنی

ایمیل

[Hassani@nit.ac.ir](mailto:Hassani@nit.ac.ir)

امروزه قطعات پلیمری ساخته شده با روش‌های ساخت افزودنی در صنایع مختلف کاربردهای متعددی دارند. پارامترهای مختلفی بر کیفیت چاپ قطعات و متعاقباً خواص مکانیکی و سطحی آن‌ها تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، تأثیر فاکتورهای چاپ سه‌بعدی شامل ارتفاع لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ بر عمر خستگی نمونه‌های پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) چاپ‌شده با روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده (FDM) بررسی شده است. ارتفاع لایه‌ها ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر، سرعت چاپ ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و دمای چاپ ۲۰۵، ۲۱۵ و ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، همگی با درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است. بدین منظور ۱۵ پیکربندی مختلف در نرم‌افزار Minitab با استفاده از روش Box-Behnken برای ارزیابی آزمایشگاهی این عوامل ایجاد شد. عمر خستگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه خستگی دورانی ستام با سرعت ثابت ۵ هر تیز بدست آمد. سپس با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی مرتبه دوم و برازش داده‌های آزمایشگاهی، تابع تخمین عمر خستگی با استفاده از بسته scikit-learn در Python استخراج گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد نتایج حاصل از رگرسیون غیر خطی قابل اعتماد بوده و دچار برازش بیش از حد (over fitting) نیز نمی‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هر چه سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها افزایش یابد، عمر خستگی نمونه‌ها به دلیل کاهش کیفیت مکانیکی و سطحی نمونه‌ها، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اگرچه دمای چاپ تأثیر زیادی بر عمر خستگی ندارد؛ اما تغییرات آن غیر خطی بوده و با استفاده از تخمین رگرسیون غیر خطی، دمای بهینه ۲۱۳ درجه در محدوده دمای چاپ ۲۰۵ الی ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد بدست آمده است.

### ۱- مقدمه

ممکن شده است [۱]. یکی از چالش‌هایی که در قطعات تولیدشده با روش‌های ساخت افزایشی مطرح است، رفتار مکانیکی آن‌ها می‌باشد. پیچیدگی مشخص کردن خواص مکانیکی این نوع قطعات در تعداد پارامترهای متغیری است که در فرآیند ساخت آن‌ها دخیل هستند و عدم اطلاع از نحوه تعامل آن‌ها با یکدیگر نیز مطرح است. مشخصه اصلی مشترک در همه روش‌های ساخت افزودنی (AM<sup>۱</sup>) این واقعیت است که قطعات توسط لایه‌های انباشته ساخته می‌شوند [۲]. این ویژگی باعث می‌شود که قطعات ساخته‌شده، رفتار مکانیکی

امروزه پیشرفت تکنولوژی، روش‌های رایج سنتی ساخت و تولید را دچار تغییر و تحول بسیاری کرده است. با بهبود و ایجاد روش‌های نوین ساخت، طراحان قادرند تا طرح‌های پیچیده‌ی خود را هر چه بیشتر به شکل نهایی قطعات نزدیک کنند. طرح‌هایی که تا چندی پیش، امکان ساخت آن‌ها وجود نداشت و یا به‌صرفه نبود. اختراع ماشین‌های کنترل عددی چند محوره و در پی آن چاپگرهای سه‌بعدی، انقلابی بزرگ در صنعت ایجاد کرد و با استفاده از این ماشین‌آلات تقریباً ساخت هر نوع قطعه‌ی سه‌بعدی و فضایی با انواع مواد اولیه

<sup>1</sup> Additive manufacturing



همچنین اکسترودر پرینتر، دما و سرعت و غیره را کنترل می‌کند و توسط ماشین قابل فهم می‌باشد و لذا در این نوشتار از آن با عنوان کد دستورات عمل یاد می‌گردد. کد دستورات عمل ذخیره می‌شود و به ماشین منتقل می‌گردد و با توجه به جنس ماده‌ی ورودی، چاپگر شروع به چاپ لایه به لایه قطع می‌کند.

از دهه ۱۹۸۰، طیف گسترده‌ای از روش‌های چاپ سه‌بعدی به دلیل تقاضای بالای صنایع تولیدی ابداع شده است و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان استریولیتوگرافی<sup>۱</sup>، تف جوشی لیزری انتخابی<sup>۲</sup>، ساخت اشیای چند لایه<sup>۳</sup>، نوشتن مستقیم جوهر<sup>۴</sup> و روش ریزش مذاب (FDM<sup>۷</sup>) دسته‌بندی کرد. فرآیند ریزش مذاب یا لایه نشانی مذاب در دهه‌ی ۱۹۹۰ تجاری‌سازی شد. ساخت قطعه با برش لایه به لایه مدل سه بعدی قطعه و تبدیل به جی‌کد آغاز می‌شود. ماده اولیه مورد استفاده این دستگاه عموماً ترموپلاستیک‌ها هستند و به شکل رشته‌ای با قطر معین وارد نازل گرم دستگاه که قابلیت حرکت در دو جهت صفحه‌ای (در دستگاه‌های متداول بازار) را دارد، وارد شده و بر اساس جی‌کد ورودی در مکانی خاص خارج می‌شود. محور عمودی نیز برای ضخامت بخشی به قطعه پس از هر لایه جابجا می‌شود تا در آخر قطعه نهایی تولید شود. این روش دارای ضخامت لایه‌ای تا ۵۰ میکرومتر می‌تواند داشته باشد. از این روش برای تولید مستقیم یا ساخت مدل ریخته‌گری قطعه مشبک می‌توان استفاده کرد [۲]. مدل‌سازی رسوب ذوب شده از یک نازل گرم برای تبدیل رشته ترموپلاستیک به شکل نیمه مذاب استفاده می‌کند که برای ساخت ساختار از طریق رسوب لایه به لایه اکسترودر می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌های AM، از آنجایی که روش FDM مزایای بسیاری از جمله کاهش هزینه را ارائه می‌دهد، اکنون بسیاری از محققان برای مطالعه به سمت FDM روی می‌آورند [۹].

ایده و همکاران [۱۰] در مطالعه خود، تأثیر جهت چاپ بر خواص خستگی خمشی چرخه قطعات پلیمری ساخته شده با روش مدل‌سازی رسوب ذوب شده را در چاپ سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های PLA<sup>۸</sup> طول عمر خستگی بهتری نسبت به نمونه‌های ABS<sup>۹</sup> داشتند. علاوه بر این، نشان داده شد که استحکام خستگی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی در جهت افقی بیشتر از نمونه‌های

ناهمسان‌گردی از خود نشان دهند. از سوی دیگر، تفاوت قابل توجهی بین نیروهای اتصال بین لایه‌ها و بین ذرات همان لایه وجود دارد. عوامل زیادی بر این پدیده تأثیر می‌گذارند و بیشتر آن‌ها با نحوه ساخت قطعات تعیین می‌شوند. فرآیند تولید، تحت تأثیر پارامترهای مختلفی است که با تعریف و کنترل آن‌ها می‌توان خواص خوبی در قطعات نهایی به دست آورد [۳].

به‌وضوح قابل مشاهده است که چاپ سه‌بعدی عمدتاً در تولید نمونه اولیه در تمام این سال‌ها استفاده شده است و رشد این فناوری در تولید واقعی هنوز در سطح پایین‌تری قرار دارد. با اختراع انواع مختلف فناوری‌های AM، این روش به دلیل مزایای فراوان از جمله امکان‌سنجی تولید مجتمع‌ها، به صنایع پزشکی، هوافضا، خودروسازی، صنایع غذایی و مهندسی گسترش یافته است. طراحی، اثربخشی هزینه، زمان کوتاه و تکرارپذیری این روش باعث محبوبیت استفاده از آن شده است [۴]. صنعت پزشکی شروع به آزمایش با توسعه بافت‌ها، اندام‌ها و ساختارهای سلولی با استفاده از چاپ سه‌بعدی کرده است [۵]. با پذیرش چاپ سه‌بعدی در صنعت خودرو، زمان مورد نیاز برای ابزارسازی و همچنین هزینه ساخت نمونه‌های اولیه کاهش یافت [۶]. چاپ سه‌بعدی امکان ایجاد قطعات منحصربه‌فرد برای حجم بالا و پایین را فراهم کرده است. صنعت هوافضا به یکی از صنایع پر سود چاپ سه‌بعدی تبدیل شده است، زیرا سازه‌های معمولی را می‌توان با ساختارهای هندسی سبک، انعطاف‌پذیر و بهبود یافته جایگزین کرد تا مصرف سوخت و ضایعات مواد را کاهش داد [۷]. بر اساس داده‌های آماری در سال ۲۰۱۸، پیش‌بینی شد که نرخ رشد ترکیبی سالانه (CAGR) چاپ سه‌بعدی در صنایع پزشکی، خودروسازی، هوافضا و صنایع غذایی تا ابتدای سال ۲۰۲۶، به ترتیب ۱۸/۲٪، ۲۹/۰۷٪، ۲۲/۱۷٪ و ۳۲/۰۵٪ خواهد بود.

اساس کار چاپگرهای سه‌بعدی به روش ساخت افزایشی می‌باشد. به این صورت که در مرحله اول یک مدل سه‌بعدی مجازی از قطعه موردنظر در نرم‌افزار طراحی به کمک کامپیوتر<sup>۱</sup> ساخته می‌شود. در مرحله بعد، یک نرم‌افزار ثانویه این مدل سه‌بعدی را به صورت برش‌های مختلف درآورده و مجموع این لایه‌ها با هم جی-کد<sup>۲</sup> را می‌سازد. جی-کد زبانی حرفی-عددی می‌باشد که نحوه حرکت محورهای حرکتی و

<sup>۶</sup> Direct ink writing

<sup>۷</sup> Fused deposition modelling (FDM)

<sup>۸</sup> Polylactic acid (PLA)

<sup>۹</sup> Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

<sup>۱</sup> Computer aided design (cad)

<sup>۲</sup> G-Code

<sup>۳</sup> Stereolithography

<sup>۴</sup> Selective laser sintering

<sup>۵</sup> Laminated object manufacturing

بهینه‌سازی فرآیند چسبندگی برای قطعات تولیدشده توسط FFF قرار دادند. این مطالعه افزایش قابل توجهی در نیروهای چسبندگی هنگام چاپ قطعات در دمای بستر کمی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای مواد چاپ را نشان داد. لی و همکاران [۱۹] مکانیسم‌های اصلی که موجب شکست خستگی قطعات فولادی ضد زنگ ۳۰۴ در شرایط سطحی ماشین‌کاری و صیقل‌شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حساسیت به زبری سطح و حالت کنترل بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که آزمون‌های خستگی مبتنی بر تنش، حساسیت بیشتری نسبت به آزمون‌های خستگی مبتنی بر کرنش خواهد داشت. در مطالعه آزادی و همکاران [۲۰]، طول عمر خستگی دامنه پایین کامپوزیت‌های چند لایه کربن/اپوکسی بررسی شد. تجزیه و تحلیل حساسیت همچنین برای مطالعه اثرات دامنه جابجایی و فرکانس بارگذاری بر طول عمر خستگی سیکل پایین در کامپوزیت‌ها انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش دامنه جابجایی، طول عمر خستگی سیکل پایین همان‌طور که انتظار می‌رفت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هنگامی که فرکانس بارگذاری افزایش یافت، طول عمر خستگی کامپوزیت‌ها در سیکل کم، کاهش یافت.

چاپ سه‌بعدی محصولات با استفاده از پلیمرهای پلاستیکی به‌طور گسترده‌ای مورد کاوش قرار گرفته و در فناوری فضایی استفاده می‌شود. انتخاب پلیمرهای پلاستیکی که قرار است مورد استفاده قرار گیرند به تکنیک چاپ سه‌بعدی، کاربردها و خواص آن‌ها بستگی دارد. سلیم و همکاران [۲۱] به‌طور خاص در مورد خواص مکانیکی دو مورد از متداول‌ترین مواد پلیمری چاپ سه‌بعدی در فناوری زمین فضایی، که عبارت‌اند از پلی لاکتیک اسید (PLA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) توضیح دادند. نتایج تجربی نشان داد که PLA از نظر استحکام، کرنش و مدول الاستیسیته عملکرد کششی بهتری دارد. برای تست خمشی، PLA از نظر استحکام و مدول الاستیسیته عملکرد بهتری نشان می‌دهد، اما ABS از نظر کرنش برتری بیشتری دارد. به همین دلیل، می‌توان نتیجه گرفت که مواد پلیمری پلاستیکی مختلف خواص مکانیکی متمایزی از خود نشان می‌دهند. هدف از بررسی باقری و همکاران [۲۲] تحلیل تجربی رفتار خستگی نمونه‌های NiTi (مثلاً Nitinol) ساخته‌شده با افزودنی و مقایسه نتایج با مواد فرفورزه بود. فراکتوگرافی سطح شکست نمونه‌های خستگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) وجود عیوب ریزساختاری مانند حفره‌ها را نشان داد که ناشی از گاز محبوس شده یا عدم هم‌جوشی بود و به‌عنوان محل شروع ترک عمل کردند که دلیل اصلی کوتاه شدن

چاپ سه‌بعدی در جهت عمودی می‌باشد. آربیتز و همکاران [۱۱] مطالعه‌ای بر روی شکست و عملکرد خستگی پلی لاکتید چاپ‌شده با استفاده از نمونه‌های کشش فشرده (CT) و خم بریدگی تک لبه (SENB) برای یک جهت ( $0^\circ$  و  $90^\circ$ ) و  $90^\circ/0^\circ$  تحت یکنواخت انجام دادند. آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌های CT استقلال مشابه‌ای را در جهت‌گیری رشته برای قوانین شروع ترک و انتشار ترک ثابت کرد که می‌تواند برای تخمین طول عمر اجزای تولیدشده توسط FFF استفاده شود. صفایی و همکاران [۱۲] برای درک بهتر اثرات تکنیک چاپ، مواد چاپی و پارامترهای چاپ بر رفتار خستگی مواد چاپ سه‌بعدی، مروری بر داده‌های موجود در ادبیات موجود از جمله پروتکل‌های تست خستگی و تجزیه و تحلیل کمی از خستگی موجود را ارائه کردند. نتایج بررسی ادبیات به‌وضوح نشان داد که به دلیل هم‌افزایی بین پارامترهای چاپ و خواص مواد چاپی، تعیین بهترین ترکیب از متغیرها برای مقاومت در برابر خستگی چالش برانگیز است. داداشی و آزادی [۱۳] به بررسی ویژگی‌های خستگی خمشی

بایومتریال‌های PLA ساخته‌شده با چاپگرهای سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با کاهش قطر نازل، رفتار خستگی نمونه بهبود می‌یابد. علاوه بر این، به این نتیجه رسیدند که چاپ در دماهای پایین‌تر سبب افزایش عمر خستگی نمونه می‌شود. هوراسان و ساراک [۱۴] نیز رفتار خستگی مواد PLA چاپ سه‌بعدی شده را به‌صورت تجربی و المان محدود بررسی نمودند. آن‌ها به‌طور ویژه تأثیر سرعت و زاویه چاپ بر رفتار نمونه‌ها را مطالعه نمودند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که افزایش سرعت چاپ تأثیر منفی بر عمر خستگی تمام نمونه‌ها دارد، که این مورد متفاوت از نتایج بررسی‌های بختیاری و همکاران [۱۵] است. محققین دیگر [۱۶، ۱۷] نیز با بررسی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده PLA به این نتیجه رسیدند که فاکتورهایی از جمله ارتفاع لایه‌ها، دمای نازل، درصد پرشدگی و دمای بستر بر عمر خستگی نمونه‌ها تأثیرگذارند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که نتیجه‌گیری کلی در مورد تأثیر هر یک از پارامترها چالش برانگیز است. به‌عبارت‌دیگر، هر یک از پارامترها بسته به نوع بارگذاری و ماده می‌توانند تأثیر مثبت یا منفی بر رفتار نمونه داشته باشند [۱۶].

برای قطعات تولیدشده توسط ساخت فیلامنت ذوب‌شده (FFF) چسبندگی بین اولین لایه چاپ شده و بستر چاپ بسیار مهم است، زیرا پایه و اساس لایه‌های بعدی را فراهم می‌کند. چسبندگی ناکافی می‌تواند منجر به کیفیت چاپ پایین یا تخریب سطوح بستر شود. مارتین اسپورک و همکاران [۱۸] هدف از مطالعه خود را درک و

جدول ۱: پارامترهای چاپ مورد بررسی

متغیر	مقادیر	
ارتفاع لایه	۰/۲	۰/۲۵
سرعت چاپ (mm/min)	۱۰۰۰	۱۴۰۰
دمای مذاب (°C)	۲۰۵	۲۱۵
جنس فیلامنت	PLA	

همچنین به منظور طراحی آزمایش، با قراردادی فاکتورهای مذکور در نرم افزار Minitab، ۱۵ حالت توسط روش باکس-بنکن مطابق جدول ۲ تولید شده است. همان طور که قابل مشاهده است در این طراحی، ردیف‌های ۳، ۴ و ۶ جدول تکراری می‌باشند و لذا ۱۳ سه‌تایی مستقل برای چاپ نمونه‌ها و تست خستگی در اختیار است.

جدول ۲: طراحی آزمایشات

نمونه	ارتفاع لایه‌ها	دمای چاپ	سرعت چاپ
1	0.3	215	1000
2	0.2	225	1400
3	0.25	215	1400
4	0.25	215	1400
5	0.25	225	1000
6	0.25	215	1400
7	0.25	205	1000
8	0.2	215	1000
9	0.3	215	1800
10	0.3	225	1400
11	0.3	205	1400
12	0.25	205	1800
13	0.2	215	1800
14	0.2	205	1400
15	0.25	225	1800

در این پژوهش، قطعات با روش FDM و با ماده فیلامنت از جنس PLA تولید شده‌اند. این نوع فیلامنت جزء محبوب‌ترین مواد مورد استفاده در روش FDM محسوب می‌شوند. فیلامنت PLA در مقایسه با فیلامنت ABS مقاومت ۱/۲۵ الی ۱/۵ برابری در برابر تغییر شکل از خود نشان داده و همچنین PLA، ۱/۱ تا ۱/۳ برابر استحکام ویژه‌ی بالاتری نسبت به ABS دارد [۲۴]. فیلامنت PLA بکار گرفته شده در این پژوهش، از برند شرکت Esun می‌باشد. این فیلامنت PLA به رنگ سفید بوده و قطر سطح مقطع فیلامنت ۱/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. برای چاپ نمونه‌های تست خستگی از دستگاه چاپگر سه‌بعدی ساخت شرکت کوانتوم<sup>۲</sup> مدل Twin که ساخت ایران می‌باشد، استفاده شده است. فرآیند چاپ قطعات مورد نظر با رسم مدل سه‌بعدی آن‌ها

عمر خستگی بود. امینی و همکاران [۲۳] با توجه به تأثیر بسیار زیاد چسبندگی بین لایه‌ای در عمر نهایی قطعات ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی، چندین نمونه قطعات استاندارد آزمون کشش و مهره پایین کمر را با ماده PLA و با استفاده از روش ریزش مذاب در دو راستای افقی و عمودی پرینت کردند و تحت آزمایش‌های استاندارد کشش و خستگی قرار دادند. آن‌ها نتایج را با شبیه‌سازی اجزاء محدود مقایسه کردند و نشان دادند که راستای پرینت قطعات بسیار در عمر خستگی قطعات مؤثر می‌باشد.

هدف از این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی خستگی خمشی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده با روش ریزش مذاب می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر کیفیت سطحی و داخلی نمونه چاپ شده و در نتیجه بر عمر خستگی قطعه نهایی تأثیرگذار هستند. از جمله این پارامترها می‌توان به ارتفاع لایه‌های چاپ، دمای مذاب، نوع پلیمر ترموپلاستیک، جهت چاپ و درصد پرشدگی<sup>۱</sup>، سرعت چاپ و همچنین مقدار بار خمشی اعمال شده، سرعت دورانی دستگاه تست خستگی و غیره اشاره کرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، هدف بررسی پارامترهای چاپ سه‌بعدی که بر عمر خستگی قطعه تأثیر دارند، می‌باشد. لذا پارامترهایی مانند مقدار بار خمشی اعمال شده و سرعت دورانی دستگاه تست خستگی، بررسی نخواهند شد. ذکر این نکته جالب توجه است که در پلیمرها به دلیل تأثیرپذیری شدید استحکام مکانیکی آن‌ها از تغییرات دما، نمی‌توان سرعت دورانی دستگاه تست خستگی را از حد معینی بالاتر برد؛ زیرا افزایش بیش از حد سرعت زاویه‌ای، موجب افزایش دمای ماده چاپ شده و در نتیجه افت خواص پلیمر ترموپلاستیک در حین تست خستگی می‌گردد.

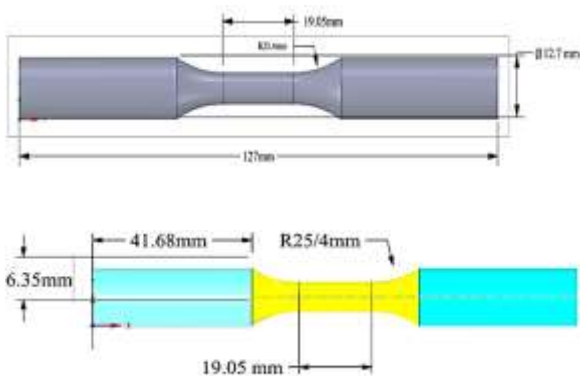
## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- طراحی آزمایش

پارامترهای تأثیرگذار بر عمر خستگی نمونه‌ها به دو بخش هندسه و پارامترهای چاپ قطعات تقسیم می‌شوند که تمرکز در این پژوهش معطوف به پارامترهای چاپ شامل ضخامت لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ است. جنس مواد برای همه آزمایش‌ها PLA بوده و متغیرهای آزمایش، پارامترهای چاپ مذکور هستند. طراحی آزمون در نرم‌افزار Minitab با اعمال فاکتورهای ارتفاع لایه‌ها، سرعت و دمای چاپ با روش باکس بنکن انجام شده است. پارامترهای چاپ مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

<sup>۲</sup> Quantum

<sup>۱</sup> Infill percentage



(الف)



(ب)



شکل ۲: الف) خروجی فایل SolidWorks و مشخصات هندسی نمونه‌های چاپ شده PLA

(ابعاد بر اساس استاندارد ASTM E606 - 92 - Reapproval 1998)

تعیین شده‌اند)، ب) نمونه PLA چاپ شده برای تست خستگی؛ پ) نمونه شکست ناشی از خستگی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف بر عمر خستگی

نمونه‌های چاپ شده تحت تست خستگی دورانی با دستگاه سننام SFT-850 با سرعت دورانی ۵ هرتز قرار گرفته است تا منجر به شکست نمونه گردد. از هر ردیف از جدول ۲، سه نمونه چاپ شده و تحت تست خستگی قرار گرفته تا در تعداد دور مشخص ناشی از خستگی بشکند. سپس برای هر نمونه با محاسبه مقدار متوسط سیکل‌های طی شده، عمر خستگی به دست آمده است. در جدول ۳ تأثیر عوامل مختلف بر عمر خستگی نشان داده شده است.

در نرم‌افزار طراحی صنعتی<sup>۱</sup> SolidWorks شروع و با انتقال مدل به نرم‌افزار Simplify3D شرایط چاپ اعمال شد. با انتقال فایل جی-کد خروجی به چاپگر قطعات مورد نظر چاپ شدند. پارامترهای چاپ شامل سرعت، ضخامت لایه و دمای چاپ هستند. همچنین مقادیر پارامترهای ثابت برای چاپ قطعات در این پژوهش، شامل دمای بستر 60 °C، دمای محفظه 28 °C، قطر نازل 0.4 mm و درصد پرشدگی 100% می‌باشد. جهت چاپ نیز عمودی و از پایین به بالا بوده است تا نیاز به مواد محافظ که در جهت افقی می‌بایست به همراه قطعه پرینت شود، از بین برود.

در دستگاه تست خستگی دورانی سننام مدل SFT-850، یک نمونه‌ی چاپ شده تحت چرخش با بار 0.5 کیلوگرم قرار می‌گیرد. از آنجائی که نمونه مورد نظر از جنس پلیمر است، سرعت دورانی دستگاه نباید بیشتر از 5 Hz باشد؛ زیرا در غیر این صورت دمای نمونه بالا رفته و موجب افت خواص مکانیکی نمونه می‌گردد. در حین این آزمون، سطح نمونه تحت بیشترین مقدار تنش قرار دارد. این آزمون در فشار اتمسفر و در معرض هوا صورت می‌گیرد. آزمون تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه تخریب شود و یا به مقدار چرخه‌ی از پیش تعیین شده (معمولاً 10<sup>7</sup> دور) برسد. تصویر دستگاه تست خستگی دورانی سننام با نمونه سوار شده بر آن در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱: دستگاه تست خستگی دورانی سننام با نمونه نصب شده

#### ۳-۲- نمونه چاپ شده

خروجی فایل SolidWorks برای مدل‌سازی هندسی نمونه‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها در شکل ۲-الف نشان داده شده است. همچنین یک نمونه‌ی چاپ شده جهت تست خستگی، در شکل ۲-ب نشان داده شده است

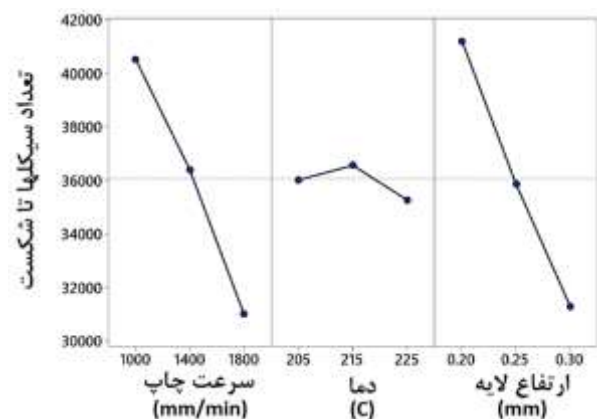
<sup>۱</sup> CATIA (computer-aided three-dimensional interactive application)

جدول ۳: تأثیر عوامل مختلف بر عمر خستگی

انحراف معیار	عمر متوسط	تعداد سیکل تا لحظه‌ی شکست هر نمونه			سرعت چاپ (mm/min)	دمای چاپ (°C)	ارتفاع لایه (mm)	شماره نمونه
		3	2	1				
520	35709	36189	35781	35157	1000	215	0.3	1
268	40760	41012	40789	40479	1400	225	0.2	2
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	3
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	4
319	39195	39029	39564	38994	1000	225	0.25	5
332	36792	37123	36795	36459	1400	215	0.25	6
492	39971	39966	40465	39481	1000	205	0.25	7
329	47294	47149	47670	47062	1000	215	0.2	8
527	27547	27861	27842	26938	1800	215	0.3	9
721	30789	30021	31451	30895	1400	225	0.3	10
444	31126	47237	46159	47121	1400	205	0.3	11
284	31159	31482	30946	31049	1800	205	0.25	12
129	35021	35121	34875	35068	1800	215	0.2	13
242	41814	41894	42006	41542	1400	205	0.2	14
359	30335	30176	30746	30082	1800	225	0.25	15

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت لایه-های چاپ، تعداد دور سیکل تا قبل از شکست، کاهش می‌یابد؛ بنابراین، با کاهش ضخامت لایه‌ها، کیفیت مکانیکی قطعه چاپ شده افت کرده که منجر به شکست زودتر قطعه می‌شود. کاهش کیفیت مکانیکی نمونه‌ها با افزایش ضخامت لایه‌ها، به دلیل ایجاد حفره<sup>۱</sup> در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین هر چه سرعت چاپ افزایش یابد، تعداد سیکل تا قبل از شکست کاهش می‌یابد. این امر ناشی از کاهش کیفیت مکانیکی و همچنین زبری بیشتر سطح نمونه چاپ شده است. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که تغییرات دما تأثیر چندانی بر روی عمر خستگی نمونه‌ها ندارد؛ ولی با این‌وجود دمای بهینه از سه دمای مذکور، دمای ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از سوی دیگر مشخص است، دمای چاپ رابطه غیرخطی با تعداد سیکل دارد. لذا برای تخمین رفتار ماده از رگرسیون غیرخطی استفاده می‌شود و نتیجه با تخمین رگرسیون خطی مقایسه می‌گردد. برای این منظور، مجموع حداقل مربعات

با استفاده از جدول ۳ در نرم‌افزار Minitab، عمر خستگی متوسط نمونه‌ها برحسب سه فاکتور ضخامت لایه، دمای چاپ و سرعت چاپ به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۳ به‌دست‌آمده است.



شکل ۳: عمر خستگی متوسط نمونه‌ها برحسب پارامترهای موردبررسی

<sup>1</sup> Void

$$Sn_{lin} = c_0 + c_1H + c_2T + c_3V \quad (1)$$

$$Sn_{nonlin} = c_0 + c_1H + c_2T + c_3V + c_4T^2 + c_5V^2 + c_6H^2 + c_6HT + c_7VT + c_8HV \quad (2)$$

که  $H$ ،  $T$  و  $V$  به ترتیب ارتفاع لایه، دمای چاپ، و سرعت چاپ می‌باشد. با استفاده از بسته pandas در پایتون، دیتافریم<sup>۳</sup> ارائه شده در جدول ۱ و جدول ۵ برای تخمین به ترتیب رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی تشکیل شده است.

جدول ۴: دیتافریم تشکیل شده در pandas برای رگرسیون خطی

Samples	V (Printing speed) (mm / min)	T (Temperature) (°C)	H (Layer height) (mm)	Cycles to failure
1	1000.0	215.0	0.30	35709
2	1400.0	225.0	0.20	40760
3	1400.0	215.0	0.25	36459
4	1400.0	215.0	0.25	36795
5	1000.0	225.0	0.25	39196
6	1400.0	215.0	0.25	37123
7	1000.0	205.0	0.25	39971
8	1000.0	215.0	0.20	47294
9	1800.0	215.0	0.30	27547
10	1400.0	225.0	0.30	30789
11	1400.0	205.0	0.30	31126
12	1800.0	205.0	0.25	31159
13	1800.0	215.0	0.20	35021
14	1400.0	205.0	0.20	41814
15	1800.0	225.0	0.25	30335

جدول ۵: دیتافریم تشکیل شده در pandas برای رگرسیون غیرخطی

Samples	V	T	H	H × H	H × T	T × T	H × V	V × V	V × T	Cycles to failure
1	1000.0	215.0	0.30	0.0900	64.50	46225.0	300.0	1000000.0	215000.0	35709
2	1400.0	225.0	0.20	0.0400	45.00	50625.0	280.0	1960000.0	315000.0	40760
3	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	36459
4	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	36795
5	1000.0	225.0	0.25	0.0625	56.25	50625.0	250.0	1000000.0	225000.0	39196
6	1400.0	215.0	0.25	0.0625	53.75	46225.0	350.0	1960000.0	301000.0	37123
7	1000.0	205.0	0.25	0.0625	51.25	42025.0	250.0	1000000.0	205000.0	39971
8	1000.0	215.0	0.20	0.0400	43.00	46225.0	200.0	1000000.0	215000.0	47294
9	1800.0	215.0	0.30	0.0900	64.50	46225.0	540.0	3240000.0	387000.0	27547
10	1400.0	225.0	0.30	0.0900	67.50	50625.0	420.0	1960000.0	315000.0	30789
11	1400.0	205.0	0.30	0.0900	61.50	42025.0	420.0	1960000.0	287000.0	31126
12	1800.0	205.0	0.25	0.0625	51.25	42025.0	450.0	3240000.0	369000.0	31159
13	1800.0	215.0	0.20	0.0400	43.00	46225.0	360.0	3240000.0	387000.0	35021
14	1400.0	205.0	0.20	0.0400	41.00	42025.0	280.0	1960000.0	287000.0	41814
15	1800.0	225.0	0.25	0.0625	56.25	50625.0	450.0	3240000.0	405000.0	30335

<sup>3</sup> Data frame

<sup>1</sup> Features

<sup>2</sup> Train

$$Sn_{lin} = +85605.21 - 99295 H - 37.38 T - 11.91 V \quad (۳)$$

با استفاده از بسته‌ی یادگیری ماشین در پایتون، یعنی scikit-learn و ایجاد تابع شیء<sup>۱</sup> از مدل (LinearRegression) و برازش<sup>۲</sup> داده‌های رگرسیون خطی، تابع نتیجه بصورت (۳) و برای رگرسیون غیر خطی به صورت (۴) بدست آمده است:

$$Sn_{nonlin} = 111533.33H^2 + 358.5 HT + 51.38 HV - 304070 H - 9.49 T^2 - 0.00308 TV + 3957.65 T - 0.00424 V^2 - 12.22 V - 317328.08 \quad (۴)$$

### ۳-۳- بررسی دقت توابع رگرسیون خطی و غیرخطی

جدول ۶: نمونه‌های تست شده برای بررسی برازش با رگرسیون

شماره نمونه	ارتفاع لایه (mm)	دمای چاپ (سانتی‌گراد)	سرعت چاپ (mm/min)	تعداد سیکل تا لحظه‌ی شکست هر نمونه			عمر متوسط
				1	2	3	
1	0.3	215	1400	31136	30224	31891	31084
2	0.25	205	1400	36767	36644	36521	36644

مدل خطی و غیرخطی در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، درصد خطای تخمین رگرسیون خطی برای نمونه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۷۸ و ۰/۵۴ و درصد خطای تخمین رگرسیون غیرخطی برای نمونه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۳/۲۸ و ۱/۱۶ می‌باشد.

جدول ۷: بررسی دقت تخمین رگرسیون‌های خطی و غیرخطی با تست آزمایشگاهی

نمونه اول			نمونه دوم		
تست آزمایشگاهی	تخمین رگرسیون خطی	تخمین رگرسیون غیرخطی	تست آزمایشگاهی	تخمین رگرسیون خطی	تخمین رگرسیون غیرخطی
(دور)	(دور)	غیرخطی (دور)	(دور)	خطی (دور)	غیرخطی (دور)
31084	31108	32106	36644	36447	36217
خطا (%)	0.078	3.28	خطا (%)	0.54	1.16

حاضر می‌توان با ارائه دو دلیل، دقت برازش رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم (۴) بر برازش رگرسیون خطی (۳) را نشان داد:  
الف- امتیازی<sup>۳</sup> که پایتون به مدل ایجادشده با رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، برای توانایی تخمین تعداد دور شکست می‌دهد، به ترتیب برابر با 0.97155 و 0.9962 است؛ یعنی برازش حاصل از رگرسیون غیرخطی امتیاز بیشتری نسبت به رگرسیون خطی دریافت می‌کند.

برای مطالعه دقت تخمین نتایج رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، دو نمونه تست اضافی انجام شده است. نتیجه این دو نمونه در جدول ۶ آورده شده است.  
تخمین حاصل از رگرسیون خطی و غیرخطی این دو نمونه اضافی و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی و درصد خطاهای تخمین‌های

در نگاه اول، به نظر می‌رسد که خطای تخمین با تابع رگرسیون غیرخطی بیشتر از خطای تخمین با تابع رگرسیون خطی است. این به این دلیل است که مقادیر مشخصه‌های دو نمونه تست، تصادفاً به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تطبیق خوبی با رگرسیون خطی دارند. لذا نمی‌توان فقط با تکیه بر نتایج این دو تست، نتیجه گرفت که رگرسیون خطی بر رگرسیون غیرخطی در این تحقیق برتری دارد. اما در تحقیق

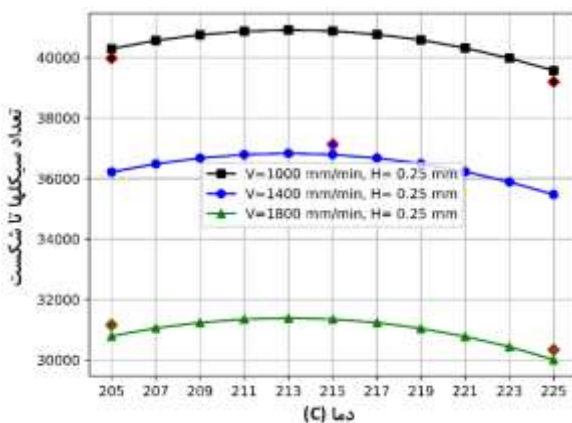
<sup>3</sup> Score

<sup>1</sup> Object

<sup>2</sup> Fitting

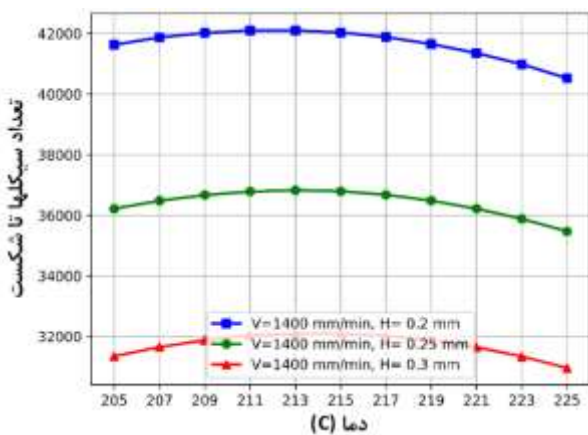
نقاط گسسته لوزوی با حاشیه قرمز، نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود برآزش رگرسیون غیرخطی توانایی پیش‌بینی عمر خستگی را برای دمای چاپ مختلف در سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ی ثابت، دارا می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای چاپ تا ۲۱۳ درجه، عمر خستگی افزایش می‌یابد ولی بعد از این دما، هرچه دمای چاپ افزایش یابد تعداد دور نمونه قبل از شکست کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که دمای بهینه برای محدوده سرعت چاپ ۱۰۰۰ الی ۱۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و برای ارتفاع لایه ثابت، برابر با ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد است.



شکل ۵: تعداد دور نمونه بر حسب دمای مختلف چاپ در سرعت‌های متفاوت چاپ و ارتفاع لایه ۰/۲۵ میلی‌متر

در شکل ۶ تغییرات تعداد دور نمونه قبل از شکست (ناشی از خستگی) بر حسب دمای چاپ برای سه ارتفاع لایه مختلف در سرعت ثابت، نشان داده شده است.



شکل ۶: تعداد دور نمونه تا شکست بر حسب دمای چاپ در ارتفاع لایه‌های مختلف و سرعت چاپ ۱۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

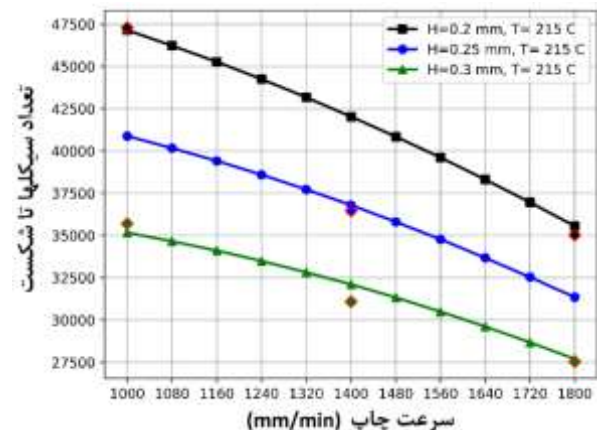
ب- محاسبه مجموع حداقل مربعات به دست آمده با استفاده از تخمین خطی و غیرخطی برای همه نمونه‌ها (شامل نمونه‌های آموزش و تست) که از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید، به ترتیب برابر با ۱۱۱۶۰۳۴۷ و ۲۷۲۶۷۲۱ است:

$$LS = \sum_{i=1}^{17} (f_{Sn_i} - data_i)^2 \quad (5)$$

که  $f_{Sn_i}$  همان تابع رگرسیون ارائه شده در توابع (۳) و (۴) به ترتیب برای رگرسیون‌های خطی و غیرخطی نمونه‌های  $i = 1 \dots 17$  می‌باشد و  $data_i$  تعداد سیکل‌ها تا شکست نمونه  $i$ -م در تست آزمایشگاهی است.

لازم به ذکر است که بالاتر بردن مرتبه رگرسیون غیرخطی به مرتبه سوم به جواب‌های غیرقابل اعتماد، منتهی می‌گردد.

در شکل ۴ تغییرات تعداد دور نمونه قبل از شکست (ناشی از خستگی) بر حسب سرعت چاپ برای سه ارتفاع لایه مختلف در دمای ثابت نشان داده شده است. همچنین در این شکل، به عنوان نمونه، مقادیر عمر خستگی آزمایشگاهی بصورت نقاط گسسته لوزوی با حاشیه قرمز، نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود برآزش رگرسیون غیرخطی توانایی پیش‌بینی عمر خستگی را برای سرعت‌های چاپ مختلف در دمای چاپ و ارتفاع لایه‌ی ثابت، دارا می‌باشد.



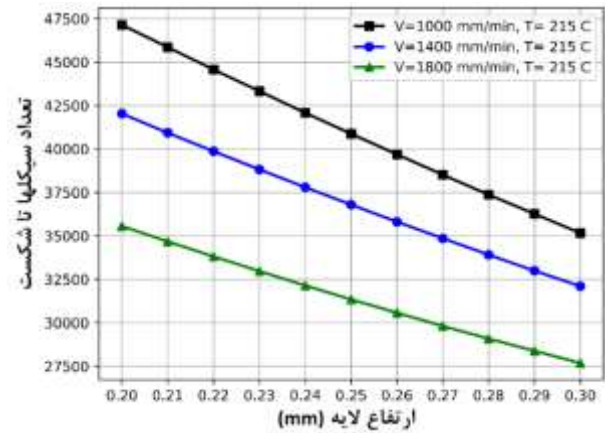
شکل ۴: تعداد دور نمونه تا شکست بر حسب سرعت چاپ در ارتفاع لایه‌های مختلف و دمای ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد

همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش سرعت چاپ و ارتفاع لایه، عمر خستگی نمونه، به دلیل افت خواص مکانیکی و کیفیت سطح مقطع نمونه، کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ تغییرات عمر خستگی بر حسب دمای چاپ برای سه سرعت مختلف در ارتفاع لایه ثابت، نشان داده شده است. در این شکل همچنین، به عنوان نمونه، مقادیر عمر خستگی آزمایشگاهی به صورت

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مجدداً با افزایش دمای چاپ تا ۲۱۳ درجه، عمر خستگی نمونه قبل از شکست افزایش می‌یابد؛ ولی بعد از این دما، هرچه دمای چاپ افزایش یابد عمر قطعه کاهش می‌یابد. لذا دمای بهینه برای محدوده ارتفاع لایه ۰/۲ الی ۰/۳ میلی‌متر و سرعت ثابت، برابر با ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد است.

در شکل ۷ تعداد دور نمونه تا شکست ناشی از خستگی برحسب ارتفاع لایه برای سه سرعت چاپ مختلف در دمای ثابت با استفاده از تابع برازش رگرسیون غیرخطی ( نشان داده شده است.



شکل ۷: تعداد دور نمونه تا شکست برحسب ارتفاع لایه در سرعت‌های چاپ متفاوت در دمای ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد

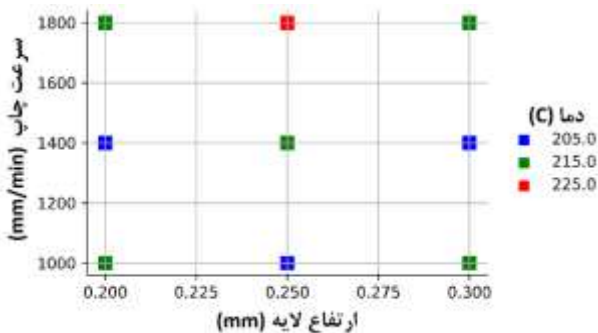
همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع لایه، تعداد دور نمونه قبل از شکست، کاهش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد رگرسیون غیرخطی مرتبه بالاتر از دو، به نتایج قابل‌اعتماد ختم نمی‌گردد. دلیل این امر آن است که ممکن است در حین تلاش برای افزایش دقت تابع ایجاد شده توسط رگرسیون، تابع ایجاد شده بجای آنکه آموزش ببیند، تقلید<sup>۱</sup> می‌نماید. در ادبیات یادگیری ماشین به این رخداد، over fitting می‌گویند. نتیجه over fitting این است که دقت مدل در نقاط تست که مورد آموزش قرار گرفته است، به شدت افزایش می‌یابد؛ اما در نقاط غیر از نقاط آموزش، خطای تخمین به شدت افزایش می‌یابد. در این تحقیق، سعی در به‌کارگیری تابع رگرسیون غیرخطی مرتبه سوم شد که به دلیل ایجاد over fitting، نتایج حاصله ارزشی نداشتند و لذا ارائه نشدند، گرچه امتیازی که پایتون برای داده‌هایی که بر طبق آن رگرسیون غیرخطی مرتبه سوم آموزش دیده است، عددی بالاتر از ۰/۹۹۹ بود. همان‌طور که در شکل ۴ الی شکل ۷ مشخص است، در همه نقاط در بازه‌ی دمای

### ۳-۴- بررسی استقلال سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها بر عمر خستگی

همان‌طور که قبلاً مشاهده شد، شکل ۳ تأثیر سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر عمر خستگی نمونه را ارائه می‌دهد. با نگاه اولیه به این شکل مشاهده می‌شود که تأثیر سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر عمر خستگی نمونه‌ها، شبیه یکدیگر هستند و این احتمال را ایجاد می‌کند که ممکن است فاکتورهای ارتفاع لایه و سرعت چاپ برای عمر خستگی نمونه‌ها، مستقل از هم نباشند. برای رد کردن احتمال وابستگی سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها، می‌توان دلایل زیر را ارائه کرد:

الف- با دقت در شکل ۴ و شکل ۷ دیده می‌شود که در سرعت چاپ ثابت، با افزایش ارتفاع لایه‌ها عمر خستگی کم می‌شود و همچنین در ارتفاع لایه‌ی ثابت، با افزایش سرعت چاپ، عمر خستگی کاهش می‌یابد. با دقت در شکل ۴ مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع لایه‌ها، روند منحنی‌های عمر خستگی برحسب سرعت چاپ، تغییر نمی‌کند؛ به‌بیان دیگر، با افزایش ارتفاع لایه، این روند از حالت نزولی به صعودی تغییر نمی‌کند. این موضوع در شکل ۷ نیز دیده می‌شود. یعنی، با افزایش سرعت چاپ، روند منحنی عمر خستگی برحسب ارتفاع لایه، همچنان نزولی باقی می‌ماند

ب- با رسم منحنی پراکندگی<sup>۲</sup> سرعت چاپ برحسب ارتفاع لایه (شکل ۸)، می‌توان به‌خوبی عدم وابستگی این دو فاکتور به یکدیگر را مشاهده کرد.



شکل ۸: منحنی پراکندگی سرعت چاپ برحسب ارتفاع لایه

### ۴- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی تجربی خستگی خمشی قطعات چاپ سه-بعدی شده با روش ریزش مذاب، نتایج آزمایشگاهی و برازش مبتنی بر

<sup>2</sup> Scatter plot

<sup>1</sup> Imitate

[2] M. Domingo-Espín, "Contributions to the knowledge about additive manufacturing with Fused Deposition Modeling technology," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

[3] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modeling," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141–149, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1080/17452759.2014.914957](https://doi.org/10.1080/17452759.2014.914957)

[4] F. Calignano et al., "Overview on additive manufacturing technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1109/JPROC.2016.2625098](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098)

[5] F. P. W. Melchels et al., "Additive manufacturing of tissues and organs," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007)

[6] R. Leal et al., "Additive manufacturing tooling for the automotive industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 1671–1676, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1007/s00170-017-0246-3](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0246-3)

[7] L. J. Kumar and C. K. Nair, "Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry," in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Berlin, Germany, 2017, pp. 39–54. [Online]. Available: doi: [10.1007/978-981-10-0812-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_3)

[8] M. Domingo-Espín et al., "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 670–677, 2015. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.matdes.2015.06.074](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074)

[9] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012)

[10] F. Arbeiter et al., "Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication," *Polymer Testing*, vol. 66, pp.

رگرسیون خطی و غیرخطی برای تخمین عمر خستگی با تغییرات مشخصه‌های سرعت چاپ، دمای چاپ و ارتفاع لایه‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون بوده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر چه ضخامت لایه و سرعت چاپ افزایش یابد، عمر نمونه‌ها قبل از شکست ناشی از خستگی، کاهش خواهد یافت. این بدان معناست که خواص مکانیکی و کیفیت سطح مقطع نمونه‌ها با افزایش سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نشان داده شد که دمای بهینه، ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد در محدوده دمایی ۲۰۵ الی ۲۲۵ درجه است. گرچه به‌طور کلی، تغییرات دمای چاپ، تأثیر زیادی بر عمر خستگی نمونه ندارد. نشان داده شد که برازش با رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم، مجموع حداقل مربعات کمتری نسبت به رگرسیون خطی برای ۱۷ نمونه تست‌شده دارد و لذا رگرسیون غیرخطی تخمین بهتری از عمر خستگی نمونه‌ها ارائه می‌دهد. از طرف دیگر رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم (برخلاف مرتبه سوم) دچار over fitting یا به تعبیری ساده‌تر، تقلید از داده‌های آزمایشگاهی نمی‌شود و در همه‌ی نقاط در بازه‌ی دمای [۲۰۵، ۲۲۵] و سرعت چاپ [۱۰۰۰، ۱۸۰۰] و ارتفاع لایه‌ی [۰/۲ و ۰/۳]، رخداد نامطلوب over fitting رخ نمی‌دهد. تاکنون تحقیقات فراوانی در مورد چاپگرهای سه‌بعدی و انواع قطعات PLA صورت گرفته است. با توجه به کارهای صورت گرفته در تحقیق حاضر، عناوین کارهای پیشنهادی که می‌توان در مورد بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده انجام داد، عبارت‌اند از:

- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده با پلیمرهای دیگر از جمله ABS، PET و ...
- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده با مشخصه‌های دیگر چاپ از جمله درصد پرشدگی، دمای بستر، درصد جریان و ...
- بررسی عمر خستگی نمونه‌های چاپ‌شده از پلیمرهای نانوکامپوزیت و بررسی تأثیر درصد نانومواد بر عمر خستگی

## ۵- منابع

[1] R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, and G. Gomez-Gras, "Kinematic optimization of FDM additive manufacturing process: defining a strategy for quality improvement," *Mechatronics*, vol. 36, pp. 119–126, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.mechatronics.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.03.006)

- 467, 2023. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-10-2022-0276](https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2022-0276)
- [18] M. Spoerk et al., "Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1080/14658011.2017.1397302](https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1397302)
- [19] S. Lee, J. W. Pegues, and N. Shamsaei, "Fatigue behavior and modeling for additive manufactured 304L stainless steel: The effect of surface roughness," *Int. J. Fatigue*, vol. 141, p. 105856, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijfatigue.2020.105856](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105856)
- [20] M. Azadi, M. Alizadeh, and H. Sayar, "Sensitivity analysis for effects of displacement amplitude and loading frequency on low-cycle fatigue lifetime in carbon/epoxy laminated composites," *MATEC Web Conf.*, vol. 165, p. 15003, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1051/mateconf/201816515003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201816515003)
- [21] M. A. Salim, Z. H. Termiti, and A. M. Saad, "Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology," *Elsevier Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 65–72, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.promfg.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.011)
- [22] A. Bagheri, M. J. Mahtabi, and N. Shamsaei, "Fatigue behavior and cyclic deformation of additive manufactured NiTi," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 252, pp. 440–453, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.09.038](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.038)
- [23] M. Amini, M. Fathi, and M. Baghestani, "Effect of interlayer adhesion on predicting fatigue failure of 3D printed parts," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 10, no. 8, pp. 36–48, 2023. (in Persian)
- [24] S. Singh and R. Singh, "Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 123–143, 2016. [Online]. Available: doi: [10.1108/RPJ-08-2014-0092](https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0092)
- 105–113, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.polymertesting.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.002)
- [11] O. H. Ezeh and L. Susmel, "On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA)," *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 29–36, 2018. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.prostr.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.006)
- [12] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, "A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 87–97, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2019.04.015](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.015)
- [13] A. Dadashi and M. Azadi, "Experimental bending fatigue data of additive manufactured PLA biomaterial fabricated by different 3D printing parameters," *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101553, 2020. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.addma.2020.101553](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553)
- [14] M. Horasan and I. Sarac, "The fatigue response of 3D-printed Polylactic Acid (PLA) parts with varying raster angles and printing speed," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47, no. 1, pp. 123–134, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1111/ffe.13678](https://doi.org/10.1111/ffe.13678)
- [15] H. Bakhtiari, M. Aamir, and M. Tolouei-Rad, "Effect of 3D printing parameters on the fatigue properties of parts manufactured by fused filament fabrication: A Review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 904, 2023. [Online]. Available: doi: [10.3390/app13040904](https://doi.org/10.3390/app13040904)
- [16] B. Akhoundi and R. Ouzah, "Experimental and numerical investigation of rotating bending fatigue of polylactic acid 3D printed parts by an extrusion-based additive manufacturing method," *Journal of Engineering Research*, vol. 11, no. 2, pp. 45–56, 2024. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.jer.2023.10.005](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.005)
- [17] S. N. Cerda-Avila et al., "Fatigue experimental analysis and modeling of fused filament fabricated PLA specimens with variable process parameters," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 456–