Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 971-974
DOI: 10.22060/mej.2021.18992.6933

Evaluating the effects of material extrusion 3D printing process parameters on shape-shifting of Poly-lactic acid 4D-printed structures

I. Salimi Nezhad, M. Golzar* , A. H. Behravesh

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: 4D printing is a relatively new branch of 3D printing. Material extrusion, as one of the most common 3D printing processes, has been recently receiving increasing attention within this area of research. There are, however, many aspects of material extrusion-based 4D printing processes that are not yet well understood. In this study, we investigated the effects of different processing parameters including the activation parameters, printing parameters, and material parameters on the curvature of self-folding bilayer specimens. All the specimens were printed using three different types of Poly-lactic acid filaments. We found that the activation time and activation temperature, as well as the printing speed, have significant effects on the resulting curvature. Moreover, the shape-shifting behavior of the specimens depended to a great extent on the type of Poly-lactic acid filament used for their printing. Characterization of the filament materials showed no significant difference in terms of mechanical properties. However, considerable differences in thermal and thermomechanical properties of the different types of filaments were observed. According to the results of differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis, the differences between the different types of filaments could be traced back to their compositions including the amounts and types of additives. The results of the current study have important implications for the design of material extrusion-based 4D printing processes.

Review History:

Received: Sep. 12, 2020
Revised: Dec. 29, 2020
Accepted: Jan. 22, 2021
Available Online: Jan. 30, 2021

Keywords:

4D printing
Material extrusion
SMP
Shape-shifting
Poly-lactic acid.

1- Introduction

The term 4D printing was coined in 2013 [1] and refers to the printing processes in which the resulting object could change its shape or mechanical properties with time (i.e., the 4th dimension). In most cases, the working basis of 4D printing is shape-shifting in synthetic materials, which is achieved either by physical effect such as residual stresses or through the energy released from an active or intelligent polymer [2].

3D printing techniques used for 4D printing usually require specialized equipment that put them out of the reach of most research labs. Moreover, the materials used in these processes tend to be expensive and proprietary. Recently, material extrusion (FDM), which is one of the most commonly available and inexpensive 3D printing processes and uses affordable off-the-shelf materials, is receiving increasing attention [3 & 4] as a replacement for the abovementioned processes. controlling and predicting the shape-shifting behavior of these FDM-based 4D printed structures needs an understanding.

Although the effects of some design parameters on the in-plane strains of plies and the ultimate curvature were investigated in the original study, there are many other design parameters that could influence the 4D behavior of printed structures and whose effect has not been studied before. Here, we performed an extensive parametric study to better understand the effects of some important FDM processing parameters on the final shape of the printed structures. These parameters include the nozzle gap, printing speed, activation temperature, activation time, and material type. Moreover, by revealing the effect of material type for the first time, this research presents a method for determining the appropriate material for 4D printing purposes.

2- Methodology

4D printed structures require an interaction mechanism in order to properly respond to the applied stimulus. Different interaction mechanisms have been proposed in the literature, of which we use a specific one called constrained-thermo-mechanics. Poly-Lactic Acid (PLA) filaments (diameter= 1.75 mm) were used in all experiments. PLA filaments made through different producers show different shape memory behaviors. Three different brands of PLA filament, namely Magic (Iran), Parman (China), and Filatech (UAE), were used and characterized using Differential Scanning Calorimetry (DSC), Dynamic Mechanical Analysis (DMA), and tensile tests. In the remainder of the text, we will use type I, type II, and type III to refer to the different abovementioned types of filaments, respectively. An FDM printer (Sizan3, Sizan Pardasezh Kavir, Iran) with a nozzle diameter of 0.5 mm

*Corresponding author's email: m.golzar@modares.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.

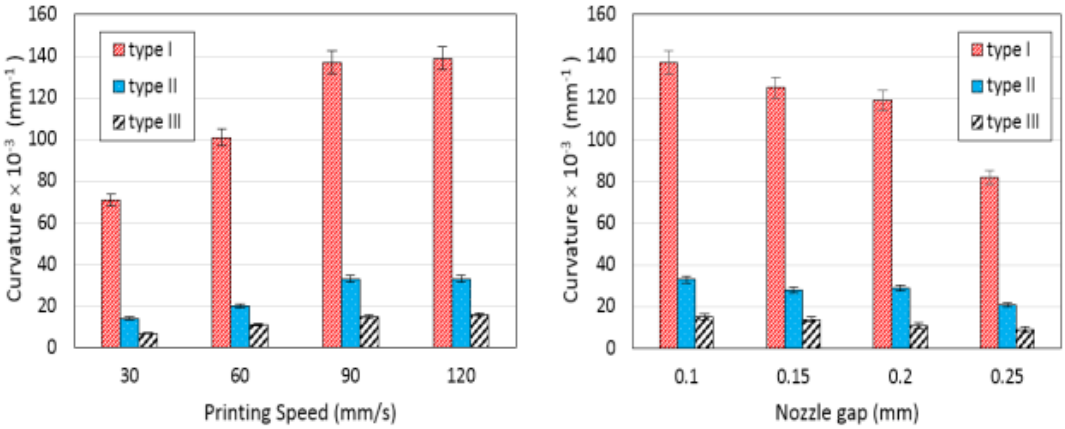


Fig. 1. The effects of the manufacturing and material parameters on the resulting curvature.

was used for printing all specimens at room temperature. Based on a number of pilot experiments and the existing literature, the printer settings were chosen. All specimens were heated using a laboratory oven (SHIMAZ) and the Digital Image Correlation (DIC) technique was used to measure the curvatures. All measurements were performed in triplicates.

3- Results and Discussion

3- 1- Effects of manufacturing and material parameters

As the printing speed increased from 30 mm/s to 120 mm/s, the curvature increased by more than 100% (Fig. 1, left). On the contrary, increasing the nozzle gap caused 25 to 50% decrease in the curvature (Fig. 1, right). As the speed of the nozzle movement (printing speed) increased, molten PLA will solidify faster, giving the polymer less time to relax and more stress will be stored in the specimen as memory. Moreover, increasing the printing speed causes more tension in the extruded PLA, which means more tensile stresses store in the specimen, resulting in more shrinkage (strain) after activation. According to Zhang et al. [5], there is a direct relationship between strain and curvature in bilayer samples. Therefore, increasing the printing speed will increase the strain and consequently the curvature. In the case of the nozzle gap, increasing the distance between the nozzle and print bed causes two major effects. First, nozzle gap is related to the layer thickness. Increasing the nozzle gap while keeping the layer thickness constant (e.g., 0.1 mm) will increase the layer thickness. According to [4], increasing the layer thickness will reduce the curvature. Second, excessive increase in the nozzle gap may cause some defects in printed specimens, which explains the drastic drop in the curvature at a nozzle gap of 0.25 mm. We also found that the type of filament could substantially affect the shape shifting behavior of the 4D printed specimens and, thus, the resulting curvature (Fig. 1).

The practical implication of these observations is that not every PLA filament is suitable for 4D printing purposes and selecting a proper type of filament requires additional considerations. The characterizations performed in this study could be used to understand the reason for such large variations in the shape memory behavior of the different types of PLA filaments. The general trends observed in the DSC curves presented in Fig. 2 suggest that the closer the DSC behavior of a filament to that of neat PLA, the better the shape-shifting behavior exhibited by that filament

.

3- 2- The effects of the activation parameters

As the stimulation temperature increased, the magnitude of the resulting curvature increased (Fig. 3). Increasing the activation temperature decreases the viscosity of the PLA, thereby enabling the polymer chains to move more freely and helping with a better relaxation of the stored stresses. After a certain amount of time at each activation temperature, the resulting curvature reaches its peak and does not change further (Fig. 3). We refer to this saturation time as the plateau time or tp. We found that tp is dependent on the activation temperature and generally decreases with the activation temperature. That is because, at higher temperatures, the entire volume of the specimens can reach Tg more rapidly. The shape-shifting behavior, therefore, requires less time to complete.

4- Conclusions

This study demonstrated that using different types of PLA filaments significantly influences the curvature from a 4D printed bilayer structure. We found up to 9- fold difference in the curvature corresponding to three different types of filaments, meaning that not all PLA filaments are suitable for 4D printing purposes. The type and amount of additive were found to be particularly important in determining the shape-shifting

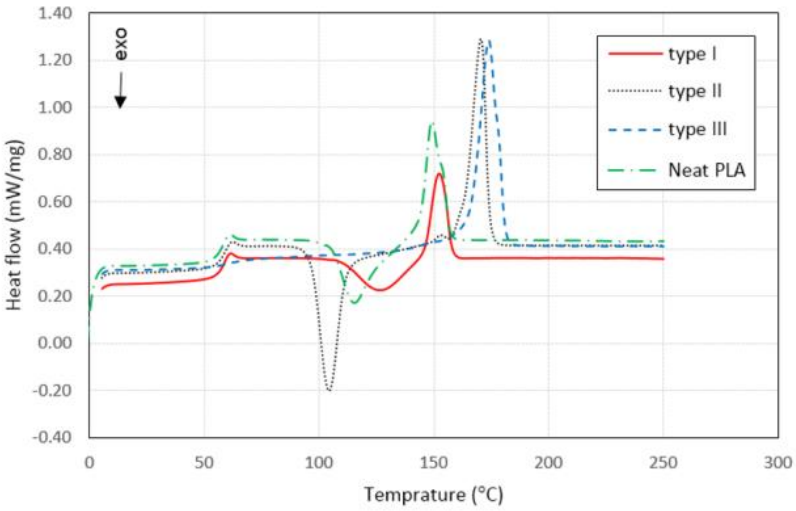


Fig. 2. The DSC thermograms of the second heating cycle for three different PLA filament brands and neat PLA.

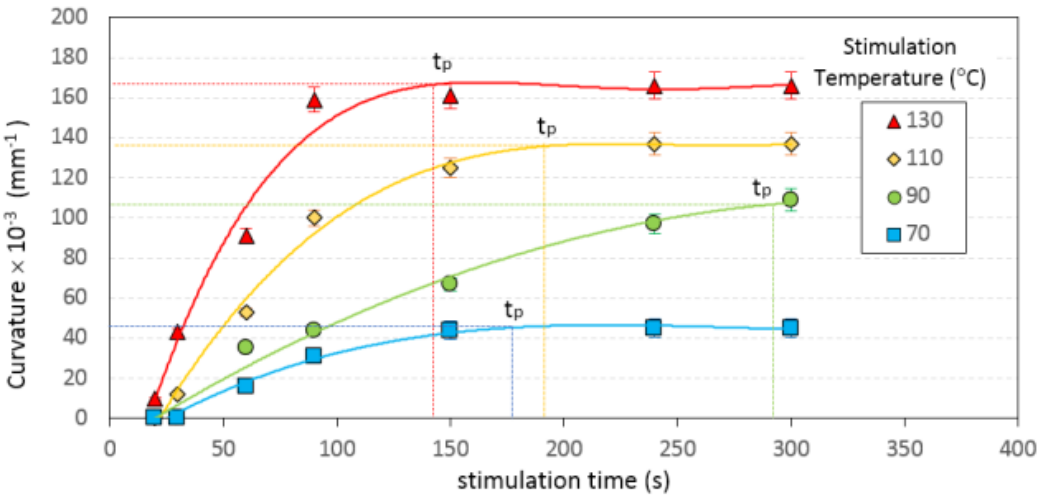


Fig. 3. The effects of the activation parameters on the resulting curvature.

behavior of the 4D printed specimens. In the case of DMA results, steeper changes in the storage and loss moduli at the glass transition temperature indicate more intensive shape-shifting behaviors. The plateau time, tp, after which no further shape-shifting will occur was found to be also inversely related to the activation temperature. Moreover, the activation temperature had a significant effect on the resulting curvature. Increasing the temperature from 70 °C to 130°C resulted in a 4-fold increase in the curvature and a 3-fold increase in tp. Finally, increasing the printing speed from 30 mm/s to 120 mm/s results in a 2-fold increase in the curvature while increasing the nozzle gap from 0.1 mm to 0.25 mm caused a 40% drop in the final curvature.

In summary, this study shows that only certain PLA filaments are suitable for 4D printing purposes and suggests a way to determine which ones. Moreover, the results of this study can be used to better control the curvatures, or in other words, the final shape of a 4D printed structure.

References

[1] S. Tibbits, The emergence of ‘4D printing,’ in TED conference,)2013(.

[2]] Y. Zhang et al., Printing, folding and assembly methods for forming 3D mesostructures in advanced materials, Nat. Rev. Mater., 2(4) (2017) 17-19.

[3] S. T. Ly and J. Y. Kim, 4D printing – fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers, Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green

Technol., 4(3) (2017) 267–272.

[4] T. van Manen, S. Janbaz, and A. A. Zadpoor, Programming the shape-shifting of flat soft matter, Mater. Today, 21(2) (2018) 144–163.

[5] S. E. Bakarich, R. G. Iii, and G. M. Spinks, 4D Printing with Mechanically Robust , Thermally Actuating Hydrogels, Macromol. Rapid Commun., (2015)1–7.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

I. Salimi Nezhad, M. Golzar , A. H. Behravesh, Evaluating the effects of material extrusion 3D printing process parameters on shape-shifting of Poly-lactic acid 4D-printed structures, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 971-974.

DOI: 10.22060/mej.2021.18992.6933

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۰۹۵ تا ۴۱۱۰
DOI: 10.22060/mej.2021.18992.6933

بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی لایه‌نشانی مذاب بر رفتار تغییرشکل ساختارهای چهاربعدی ساخته‌شده با پلی‌لاکتیک‌اسید

ایمان سلیمی نژاد، محمد گلزار*، امیرحسین بهروش

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

خلاصه: چاپ چهاربعدی، یک شاخه‌ی نسبتا نوظهور است که از چاپ سه‌بعدی سرچشمه گرفته است. لایه‌نشانی مذاب، به عنوان یکی از مرسوم‌ترین فرایندهای چاپ سه‌بعدی، به تازگی توجه بسیاری از محققین را در حوزه چاپ چهاربعدی به خود جلب کرده است. هرچند، بسیاری از جنبه‌های چاپ چهاربعدی با استفاده از فرایند لایه‌نشانی مذاب هنوز به خوبی درک و مطالعه نشده‌است. در این مقاله تاثیر پارامترهای مختلف فرایند شامل پارامترهای فعالسازی، چاپ و مواد بر روی انحنای نمونه‌های دولایه خودخم‌شونده مطالعه شده‌است. تمامی نمونه‌ها با استفاده از سه فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید متفاوت چاپ شده‌اند. مشاهده شد که زمان و دمای فعالسازی، و همچنین سرعت چاپ تاثیر به سزایی بر انحنا دارند. به‌طوریکه افزایش دما از ۷۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش چهار برابری انحنا و افزایش سرعت چاپ از ۳۰ به ۱۲۰ میلیمتر بر ثانیه باعث افزایش دو برابری انحنا شد در حالیکه افزایش فاصله نازل از میز چاپ از ۰/۱ به ۰/۲۵ میلیمتر منجر به کاهش ۴۰ درصدی انحنا شد. به‌علاوه، رفتار تغییرشکل نمونه‌ها تا حد زیادی متاثر از نوع فیلامنت استفاده شده‌بود. نتایج حاکی از تفاوت ۹ برابری میزان انحنای ساختارهای چاپ‌شده با استفاده از سه نوع مختلف فیلامنت بود. مشخصه‌یابی مواد فیلامنت‌ها تفاوت معناداری در خواص مکانیکی نشان نداد، اما این تفاوت در خواص حرارتی و حرارتی-مکانیکی سه نوع فیلامنت مشاهده شد. باتوجه به نتایجی که از آزمایش‌های گرماسنجی روبشی افتراقی و تحلیل مکانیکی دینامیکی به دست آمد، این تفاوت‌ها ناشی از وجود افزودنی‌ها در هر نوع فیلامنت است. نتایج پژوهش حاضر کاربردهای مهمی در طراحی فرایندهای چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی لایه‌نشانی مذاب دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

کلمات کلیدی:
چاپ چهاربعدی
لایه‌نشانی مذاب
پلیمرهای حافظه‌شکلی
تغییرشکل
پلی‌لاکتیک‌اسید

۱- مقدمه

واژه‌ی چاپ چهاربعدی برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ توسط تیبیتز در دانشگاه صنعتی ماساچوست شکل گرفت [۱]. بعد چهارم چاپ چهاربعدی "زمان" است، به اینصورت که خواص، یا عملکرد سازه‌ای که بصورت سه‌بعدی چاپ شده می‌تواند به عنوان تابعی از زمان تغییر کند [۲ و ۱]. درست است که به طور کلی زمان به عنوان بعد چهارم تعریف می‌شود، اما در حقیقت منظور از بعد چهارم تغییرشکل کنترل‌شده و دلخواه با اعمال محرک و در زمان دلخواه است. بنابراین تنها درصورتی بعد چهارم نمود پیدا می‌کند که بتوان ساختار را در زمان موردنظر و به میزان موردنظر تغییرشکل داد. به این ترتیب صرف وابسته‌بودن به زمان در سایر پدیده‌های فیزیکی مانند پدیده برگشت فنری، خزش و ... در چهارچوب بعد چهارم تعریف نمی شود. همچنین «چاپ چهاربعدی» همزمان به فرآیند و ماده وابسته است. لازمه‌ی رفتار تغییرشکل و حصول ساختار چهاربعدی وجود پلیمر حافظه شکلی[1] و همچنین نحوه‌ی اعمال آن است که به واسطه فرآیندهای چاپ سه‌بعدی امکان‌پذیر می‌شود.

در اغلب موارد، اساس کار چاپ چهاربعدی تغییرشکل در مواد مصنوعی است، که یا از طریق اصول فیزیکی مانند تنش پسماند و یا از طریق انرژی آزاد شده از یک پلیمر فعال یا «هوشمند» ایجاد شود [۳]. این مواد هوشمند می‌توانند به محرک‌های مختلفی مانند گرما [۴]، رطوبت [۵]، نور [۷ و ۶]، میدان مغناطیسی [۸]، و غیره پاسخ دهند. بسیاری از مواد هوشمندی که در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند به یکی از این سه دسته از مواد هوشمند تعلق دارند: ۱. هیدروژل‌ها که زمان پاسخ طولانی و خواص مکانیکی محدودی دارند، الاستومرهای کریستالی مایع، که زمان پاسخ کوتاه‌تر اما همچنان خواص مکانیکی محدودی دارند و ۳. پلیمرهای حافظه‌شکلی که

1 Shape memory polymer- SMP

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.golzar@modares.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.

هم زمان پاسخ کوتاه و هم خواص مکانیکی خوبی دارند [۱۰ و ۹]. پلیمرهای حافظه شکلی بر اساس اثر حافظه شکلی[1] کار می‌کنند که در آن ماده در اثر اعمال یک محرک خاص شکل اولیه خود را بازیابی می‌کند. در واقع، تقریبا تمامی پلیمرهای مهندسی درجه‌ای از اثر حافظه شکلی را ازخود نشان می‌دهند. هرچند، تغییرشکل‌ها و نیروهای مربوط به رفتار حافظه شکلی اغلب پلیمرها محدود است به طوریکه امکان استفاده از آنها را برای کاربردهای عملی غیرممکن می‌سازد [۱۱].

فرایندهای چاپ سه‌بعدی نظیر پلی‌جت [۱۲-۱۵]، چاپ مستقیم [۱۶]، استریولیتوگرافی [۱۷ و ۴]، دستگاه‌های اصلاح‌شده [۱۸-۲۰]، که برای چاپ چهاربعدی یک ساختار استفاده می‌شوند معمولا نیازمند تجهیزات خاصی هستند که این امر آنها را از دسترس بسیاری از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی خارج می‌سازد. علاوه‌براین، مواد مورد استفاده در این دستگاه‌ها (هیدروژل‌ها، فوتوپلیمرها و ...) علیرغم استحکام و سفتی پایین، دارای هزینه‌های بالا و گاهی اوقات به صورت انحصاری هستند. اخیرا، فرایند لایه‌نشانی مذاب که یکی از رایج‌ترین و ارزانترین فرایندهای چاپ سه‌بعدی است، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۲۱-۲۸]. با این حال، این فرایند محدودیت‌هایی دارد که باعث شده تا علیرغم مزایای زیاد، از این روش در چاپ چهاربعدی به صورت گسترده استفاده نشود. محدودیت اول این فرایند سختی و یا عدم امکان استفاده از دو یا چندماده به صورت همزمان و با چیدمان دلخواه (که لازمه‌ی چاپ چهاربعدی است) در یک ساختار است. برخی پژوهشگران برای فائق آمدن به این محدودیت از رویکرد جالبی استفاده کرده‌اند [۲۹ و ۲۴-۲۲]. در این پژوهش‌ها پژوهشگران از پلی‌لاکتیک‌اسید[2] به عنوان ماده‌ی فعال و از کاغذ، الیاف نایلون و پارچه به عنوان ماده‌ی ساده یا غیرفعال استفاده کردند. مثلا ژنگ و همکاران [۲۹] ابتدا کاغذ را بر روی میزِ چاپ چسبانده و مقید کردند و سپس پلی‌لاکتیک‌اسید را با الگوی مورد نظر بر روی آن چاپ کردند. هرچند این رویکردها چندان هم در مرتفع‌کردن محدودیت اول موثر نیستند چراکه فقط برای ساختارهای سبک و کم استحکام قابل استفاده هستند. محدودیت دوم فرایند لایه‌نشانی مذاب در واقع به دلیل محدودیت اول شکل می‌گیرد. در صورت استفاده از تک ماده برای چاپ چهاربعدی، اعمال بار خارجی برای طراحی الگوی مورد نظر نیاز است و این به معنی زمان، مراحل و پیچیدگی‌های ساخت بیشتر است. برای غلبه بر محدودیت دوم نیز رویکردهای مختلفی توسط محققین ارائه شده‌است [۳۰-۳۳ و ۲۵]. برای مثال هو و همکاران [۲۵] رویکردی را برای چاپ چهاربعدی یک پلیمر حافظه‌شکلی توسعه دادند که نیازی به هیچ مرحله آماده‌سازی پس از ساخت نداشت. هرچند که نمونه‌های چاپ‌شده توسط آنها خم می‌شد و رفتار تغییرشکل از خود نشان می‌داد اما دلیل این انحنا می‌تواند ناشی از مدول خمشی پایین نمونه‌ها به دلیل ضخامت کم (۱ میلیمتر) آنها باشد. بعلاوه، رفتارتغییرشکل حاصله تنها محدود به خمش بود و کنترلی بر مقدار انحنای نهایی نمونه‌ها وجود نداشت.

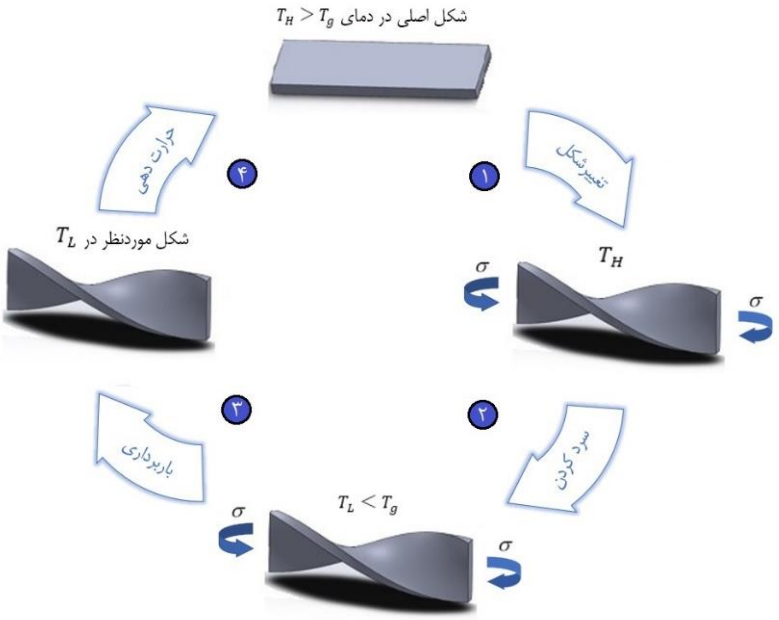
در سال ۲۰۱۷ ون مانن و همکاران [۳۳] روشی را ارائه دادند که هردو محدودیت فرایند لایه نشانی مذاب[3] را مرتفع ساخت. در این روش آنها توانستند بدون اعمال بار خارجی و بدون استفاده از ماده‌ی دوم و تنها با چاپ پلیمر حافظه‌شکلی پلی‌لاکتیک‌اسید، به تغییرشکل دلخواه از دوبعد به سه‌بعد دست یابند. اساس کار این روش برنامه‌ریزی الگوی چاپ هر لایه و ایجاد مجموعه‌ای از لایه‌ها با کرنش‌های عرضی و طولی مطلوب (ε_1 ، ε_2) است. سپس این مجموعه لایه‌ها با چینش مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا با ایجاد گرادیان در راستای ضخامت و یا کمانش، باعث تغییرشکل خارج از صفحه شوند. هرچند آنها تاثیر برخی از پارامترها را بر روی میزان کرنش و انحنا بررسی کردند اما پارامترهای طراحی زیادی وجود دارند که می‌توانند تاثیر بسزایی بر رفتار ساختار چهاربعدی داشته باشند که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. بنابراین در این پژوهش، به بررسی این پارامترها شامل سرعت چاپ، فاصله نازل از میز چاپ، دما و مدت زمان تحریک و نوع ماده که تاثیر مهمی بر رفتار تغییرشکل دارند اما تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌اند پرداخته می‌شود. همچنین این پژوهش با آشکارکردن تاثیر نوع ماده بر رفتار تغییرشکل ساختارهای چهاربعدی، روشی را برای تعیین ماده مناسب برای اهداف چهاربعدی پیش روی خواننده قرار می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- اصول کارکرد

یک ساختار چهاربعدی می‌تواند شکل، خواص و یا عملکردش را بر اساس یک محرک تغییر دهد. هرچند، برای اینکه ساختار چهاربعدی به محرک عکس‌العمل مناسب نشان دهد باید مکانیزم تحریک آن شناسایی شود. مکانیزم‌های مختلفی در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته [۳۴]، که در این پژوهش از مکانیزم «ترمومکانیک مقید» استفاده شده‌است. برنامه‌ریزی رفتار تغیرشکل با استفاده از این مکانیزم نیازمند چهار مرحله، دو سطح دمایی و یک تنش خارجی است (شکل ۱). یک سطح دمایی بالای

1 Shape memory effect- SME
2 PLA
3 Fused Deposition Modeling- FDM



شکل ۱. نمایش شماتیک مکانیزم ترمومکانیک مقید در چاپ چهاربعدی

Fig. 1. A schematic illustration of the constrained thermomechanical mechanisms in 4D printing

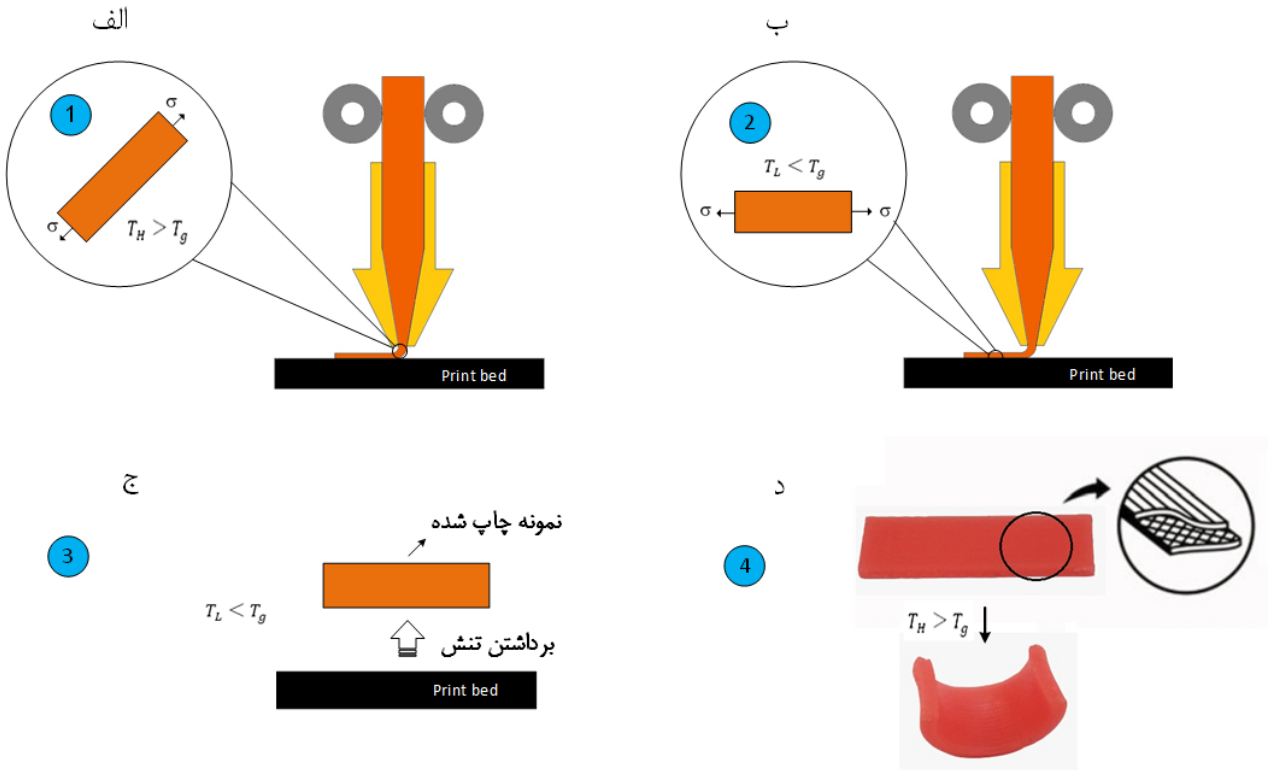
دمای انتقال شیشه‌ای ($T_H > T_g$) پلیمر حافظه‌شکلی و سطح دمایی دیگر زیر دمای انتقال شیشه‌ای ($T_L < T_g$) است. در مرحله‌ی ۱، قطعه تا دمای T_H حرارت داده شده و با اعمال تنش خارجی به شکل ثانویه‌ی موردنظر تغییرشکل داده می‌شود. در مرحله‌ی ۲، بدون برداشتن تنش خارجی قطعه تا دمای T_L خنک می‌شود. در مرحله‌ی ۳ پس از رسیدن به دمای T_L، تنش خارجی برداشته شده و قطعه شکل ثانویه خود را حفظ می‌کند. برای رسیدن به شکل اولیه کافیست تا دوباره ساختار را تا دمای بالای انتقال شیشه‌ای آن حرارت داد (مرحله‌ی ۴).

اکنون می‌توان چاپ چهاربعدی با استفاده از فرایند لایه‌نشانی مذاب را از طریق مکانیزم ترمومکانیک مقید توضیح داد. در ابتدا، پلیمر حافظه شکلی در داخل نازل تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای اش حرارت می‌بیند و سپس بر روی میز چاپ یا لایه‌های چاپ شده‌ی قبلی اکسترود می‌شود (شکل۲-الف). نازل بر روی میز حرکت می‌کند و دمای بالای نازل باعث می‌شود تا زنجیره‌های پلیمری در راستای اکستروژن کشیده شده و در راستای یکدیگر قرار گیرند. در مرحله‌ی بعد (شکل۲-ب)، در حالیکه لایه‌ها به یکدیگر و به میز چاپ چسبیده‌اند (باقی ماندن تنش)، تا پایین دمای انتقال شیشه‌ای سرد می‌شوند و تنش کششی ایجادشده، به عنوان حافظه در پلیمر ذخیره می‌شود.

پس از اینکه قطعه به طور کامل چاپ و تا دمای اتاق خنک شد، از میز چاپ برداشته می‌شود (شکل۲-ج). با حرارت‌دهی دوباره به قطعه و بالابردن دمای آن تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای اش قطعه‌ی چاپ شده دچار تغییرشکل می‌شود (مرحله چهار). ساختارهای چاپ‌شده معمولا به صورت نوارهای دولایه (دو مجموعه لایه) با الگوی چاپ متفاوت برای هر مجموعه لایه چاپ می‌شوند (شکل۲-د). تفاوت الگوی چاپ لایه‌ها باعث تفاوت در کرنش ذخیره‌شده در هر لایه و در نتیجه ایجاد رفتارهای تغییرشکل می‌شود. کرنش ایجادشده در هر لایه را می‌توان از طریق تغییر الگوهای چاپ و همچنین پارامترهای فرایند نظیر سرعت چاپ، فاصله نازل، دما و زمان فعالسازی کنترل کرد. شکل ۳ شش نمونه‌ی چاپ شده‌ی به ظاهر مشابه را نشان می‌دهد که شش رفتار تغییرشکل مختلف از خود نشان می‌دهند که این امر بیانگر اهمیت برنامه‌ریزی کرنش‌ها از طریق پارامترهای فرایند است. همچنین شکل ۴ تعدادی قطعه مسطح دوبعدی را نشان می‌دهد که با اعمال محرک (دما) به شکل‌های موردنظر سه‌بعدی تغییر می‌یابند.

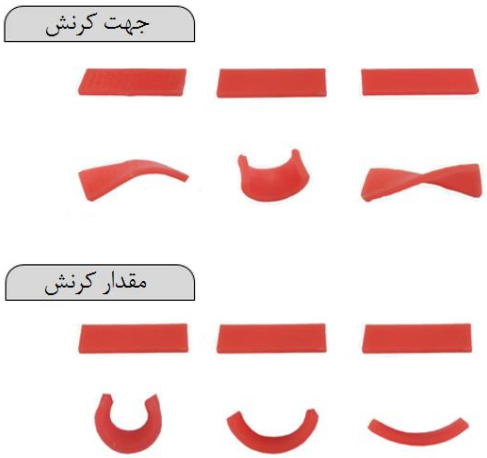
۲- ۲- مواد و روش ساخت

برای چاپ تمامی نمونه‌ها از فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید (قطر ۱٫۷۵



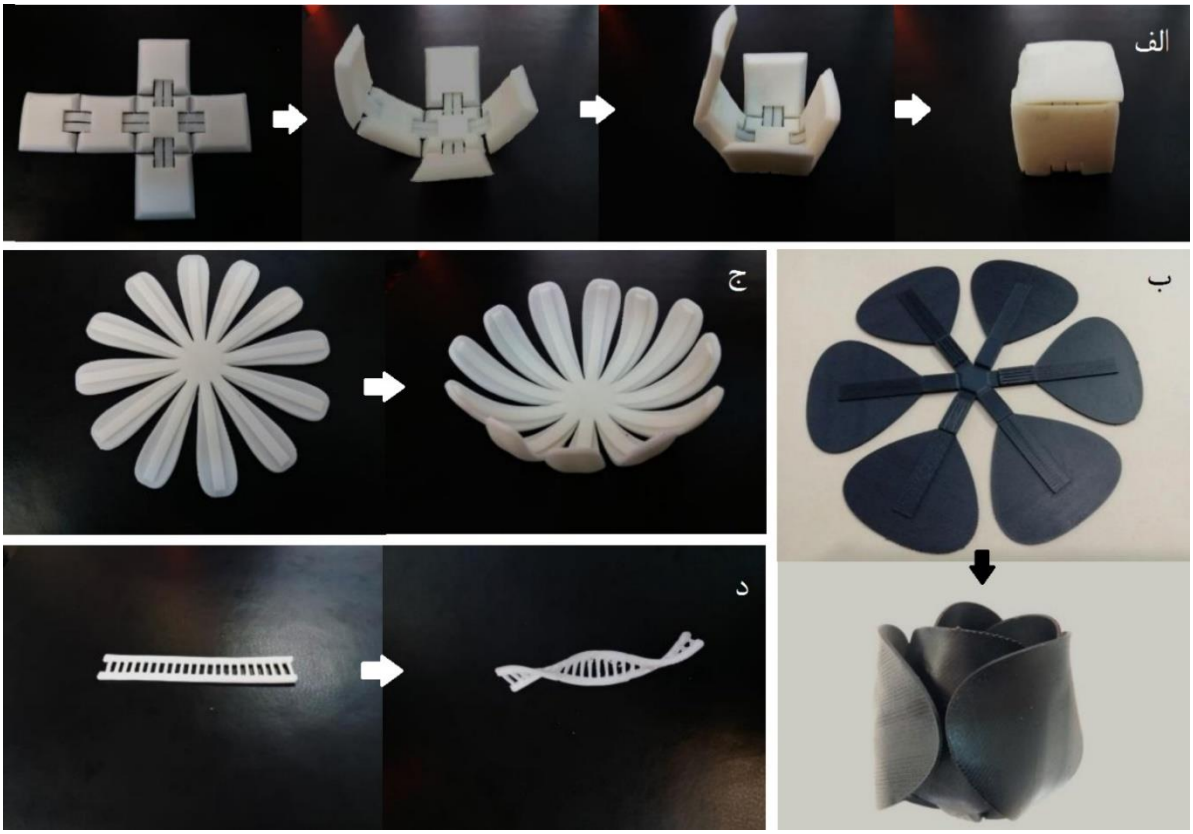
شکل ۲. مکانیزم ترمومکانیک مقید در چاپ چهاربعدی: الف- دمای بالای دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر و اعمال تنش خارجی در حین چاپ، ب- خنک‌شدن لایه‌ی چاپ‌شده و حفظ تنش خارجی ، ج- برداشتن قطعه چاپ‌شده از میز و رهاسازی تنش خارجی، د- افزایش مجدد دما تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر و تغییرشکل قطعه چاپ‌شده

Fig. 2. The constrained thermomechanical mechanisms in the FDM processes: (a) the temperature is above Tg and tensile stresses are applied during the printing process, (b) cooling down with the stresses remaining intact, (c) removing the structure from the print bed, (d) re-heating of the printed structure.



شکل ۳. کنترل مقدار و جهت کرنش‌ها می‌تواند منجر به بروز رفتارهای تغییرشکل مختلف شود

Fig. 3. Programming the direction and magnitude of the strains results in various shape-shifting behaviors



شکل ۴. چند نمونه از ساختارهای چاپ‌شده به روش چهاربعدی (همه تغییرشکل ها بدون دخالت دست و تنها با اعمال حرارت به وجود آمده)

Fig. 4. Some 4D printed structures (all deformations occur without hand intervention and only by applying heat)

جدول ۱. تنظیمات چاپگر استفاده‌شده در این پژوهش

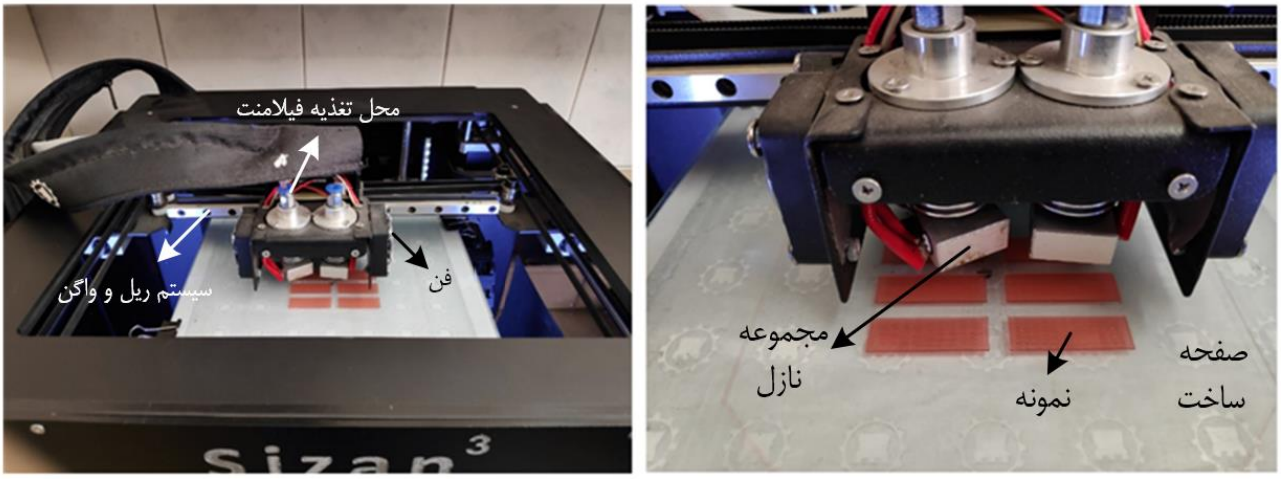
Table 1. The printer settings used in the study

نوع فیلامنت	فاصله نازل (mm)	سرعت چاپ (mm/s)	زمان فعالسازی (s)	دمای فعال‌سازی (°C)	دمای نازل (°C)	ضخامت لایه (mm)
نوع۱	۰/۰۱±۰/۱	۹۰	۲۴۰	۱۱۰	۲۱۰	۰/۱

میلیمتر) استفاده شد. فیلامنت‌های ساخته‌شده توسط شرکت‌های مختلف رفتار حافظه شکلی متفاوتی از خود نشان دادند. در این پژوهش برای چاپ نمونه‌ها سه برند متفاوت به نام‌های مجیک (ساخت ایران)، پرمن (ساخت چین) و فیلاتک (ساخت امارات) انتخاب و با استفاده از آزمایش‌های گرماسنجی روبشی افتراقی[1]، تحلیل مکانیکی دینامیکی[2]، و کشش مشخصه‌یابی شدند. در ادامه به ترتیب از عناوین نوع ۱، نوع ۲ و نوع ۳ برای سه فیلامنت فوق‌الذکر استفاده خواهد شد.

برای چاپ نمونه‌ها در دمای اتاق از دستگاه چاپ سه‌بعدی لایه‌نشانی مذاب (سیزان۳، سیزان پردازش کویر، ایران) با قطر نازل ۰/۵ میلیمتر استفاده شده‌است (شکل ۵). تنظیمات چاپگر بر اساس یک سری آزمایشات کمکی و همچنین با توجه به پیشینه‌ی پژوهش انتخاب شدند (جدول ۱). به منظور بررسی تاثیر پارامترهای زمان و دمای فعالسازی، سرعت چاپ، فاصله نازل و نوع فیلامنت بر رفتار تغییرشکل که بوسیله‌ی انحنای اندازه‌گیری شده

1 Differential scanning calorimetry- DSC
2 Dynamic-Mechanical Analysis-DMA



شکل ۵. چاپگر سه‌بعدی لایه‌نشان مذاب در حال چاپ نمونه

Fig. 5. Printing specimens with FDM 3D printer

شکل ۶. حرارت‌دهی نمونه‌ها در آون

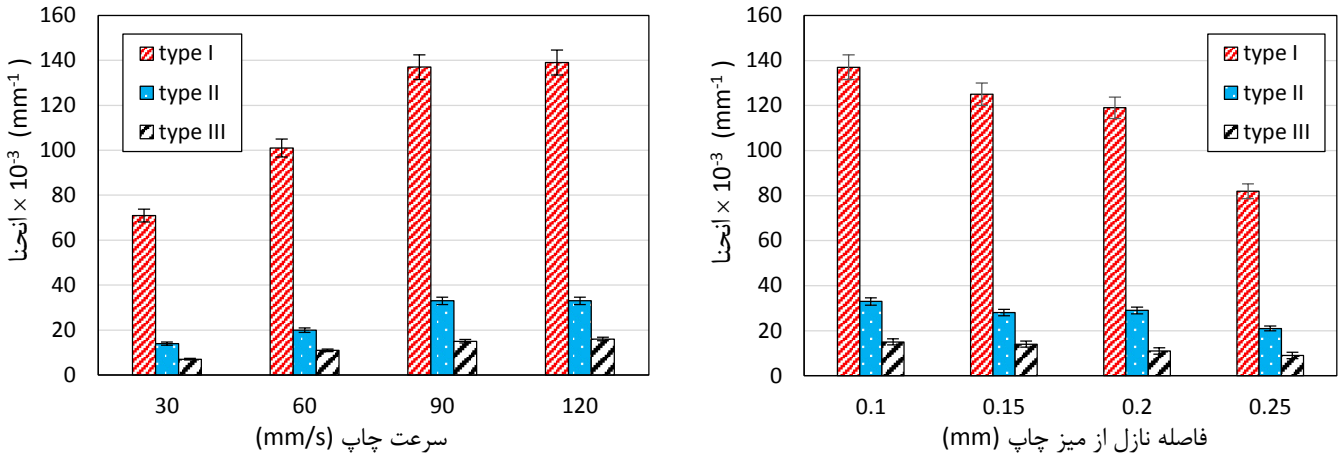
Fig. 6. Heating the samples in the oven

مشخص می‌شود، نمونه با ابعاد ۳۰ در ۱۰ در ۱٫۶ میلیمتر چاپ شد به طوریکه هر پارامتر را بتوان مستقلا حول تنظیمات اولیه تغییر داد. یعنی به عنوان مثال اگر هدف بررسی تاثیر سرعت چاپ است مقادیر همه پارامترهای چاپ به جز سرعت چاپ طبق جدول ۱ تنظیم می‌شوند و مقادیر پارامتر سرعت چاپ در چندین سطح تغییر می‌کند تا تاثیر اصلی پارامتر چاپ به دست بیاید. ضخامت لایه و دمای نازل برای تمامی نمونه‌ها ثابت باقی ماند. از آنجاییکه هدف این پژوهش بررسی تاثیر پارامترهای فرایند بر رفتار تغییرشکل است، در اینجا تنها از یک نوع الگوی چینش استفاده شد. این الگو به صورت [۰۸، ۹۰۸] یعنی هشت لایه اول به صورت عرضی و هشت لایه دوم به صورت طولی که منجر به ایجاد یک ساختار دولایه می‌شود، انتخاب شد. همه‌ی نمونه‌ها با استفاده از آون آزمایشگاهی شیماز حرارت‌دهی شدند (شکل ۶) و انحنای نمونه‌ها با استفاده از روش مشابه پردازش تصویر دیجیتال[1] اندازه‌گیری شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها سه‌بار تکرار شده‌است.

۲- ۳- خواص حرارتی

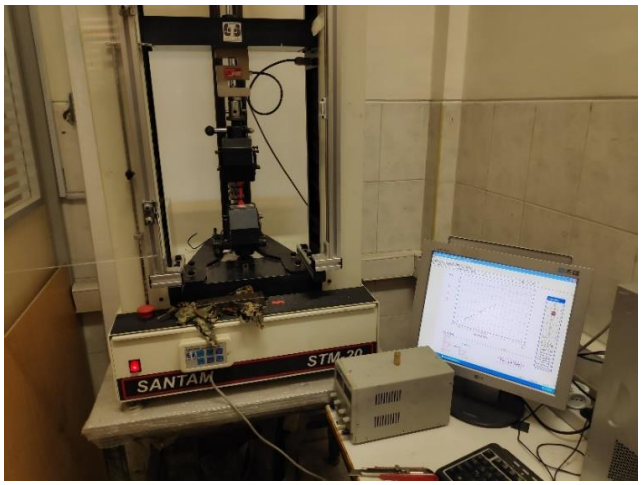
برای اندازه‌گیری و مقایسه‌ی خواص حرارتی سه فیلامنت آزمایش گرماسنجی روبشی افتراقی با استفاده از دستگاه netzsch 200F3 انجام

1 Digital Image Correlation-DIC



شکل ۸. اثر پارامترهای ساخت و ماده بر انحنا

Fig. 8. The effects of the manufacturing and material parameters on the resulting curvature



شکل ۷. نمایی از دستگاه کشش در حال انجام آزمون کشش تک‌محوره

Fig. 7. tensile tester performing the uniaxial tensile test

شد. حدود ۹ میلی‌گرم از هر فیلامنت از دمای ۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه حرارت‌دهی شدند. دمای انتقال شیشه‌ای (T_g)، دمای تبلور سرد (T_{cc})، آنتالپی تبلور سرد (ΔH_c)، دمای ذوب (T_m)، و آنتالپی ذوب (ΔH_m) برای هر کدام از سه فیلامنت تهیه شد.

۲- ۴- خواص ترمومکانیکی

برای اندازه‌گیری و مقایسه‌ی خواص ترمومکانیکی سه فیلامنت آزمایش تحلیل مکانیکی دینامیکی با استفاده از دستگاه netzsch DMA-242 انجام شد. نمونه‌ها (۵۰ × ۱۵ × ۱/۶ میلیمتر) در مود کششی و تحت فرکانس ۱ هرتز و با تغییرات دمایی از ۲۴ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت حرارت‌دهی ۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. مدول ذخیره (E')، مدول اتلاف (E") و تغییر فاز برای همه نمونه‌ها به دست آمد.

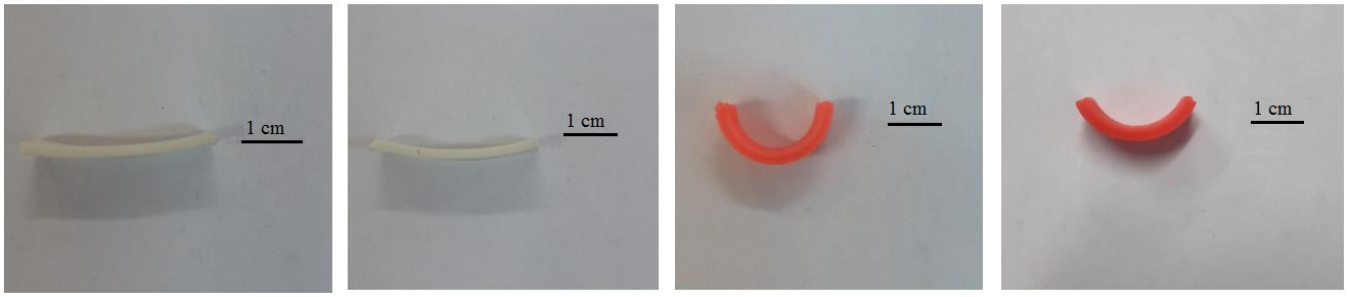
۲- ۵- خواص مکانیکی

برای به‌دست‌آوردن مدول الاستیک (E)، استحکام تسلیم (Sy)، و ازدیاد طول در شکست، آزمایش کشش با استفاده از دستگاه کشش santam STM-20 و با توجه به استاندارد ASTM-D638-02a [۳۵] انجام شد. برای تمامی نمونه‌ها از سرعت تغییرشکل ۲ میلیمتر بر دقیقه استفاده شد. شکل ۷ نمایی از آزمایش کشش یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- اثر پارامترهای ساخت و ماده

با افزایش سرعت از ۳۰ mm/s به ۱۲۰ mm/s، انحنا بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است (شکل ۸، چپ). برعکس، افزایش فاصله نازل باعث کاهش ۲۵ تا ۵۰ درصدی انحنا شده است (شکل ۸، راست). با افزایش سرعت حرکت نازل (سرعت چاپ)، پلی‌لاکتیک‌اسید مذاب سریعتر خنک شده و زمان کمتری برای ریلکس کردن دارد و در نتیجه تنش بیشتری به عنوان حافظه در ماده ذخیره می‌شود. به‌علاوه، افزایش سرعت چاپ کشش بیشتری در پلیمر اکسترود شده ایجاد می‌کند، که یعنی تنش‌های کششی بیشتری در



شکل ۹. تعدادی از نمونه‌های چاپ‌شده با فیلامنت‌های مختلف

Fig. 9. A number of samples printed with different filaments

نمونه ذخیره شده، و در نتیجه نمونه پس از فعال‌سازی دچار انقباض بیشتری می‌شود. با توجه به ژنگ و همکاران [۲۹]، رابطه‌ی مستقیمی بین کرنش و انحنا در ساختارهای دولایه وجود دارد. بنابراین، افزایش سرعت چاپ باعث افزایش کرنش و در نتیجه افزایش انحنا خواهد شد. در مورد فاصله‌ی نازل نیز، افزایش فاصله بین نازل و میز چاپ دو تاثیر اصلی دارد. اول، فاصله نازل با ضخامت لایه در ارتباط است. افزایش فاصله‌ی نازل از میز چاپ در حالیکه ضخامت لایه ثابت نگه‌داشته‌شده (مثلا ۰/۱ میلیمتر) باعث افزایش ضخامت لایه خواهد شد. بنابه [۳۳]، افزایش ضخامت لایه باعث کاهش انحنا می‌شود. دوم، افزایش بیش از حد فاصله نازل از میز چاپ می‌تواند منجر به بروز عیوبی در نمونه‌های چاپ‌شده شود که این امر کاهش شدید انحنا در فاصله‌ی نازل ۰/۲۵ میلیمتر را نشان می‌دهد.

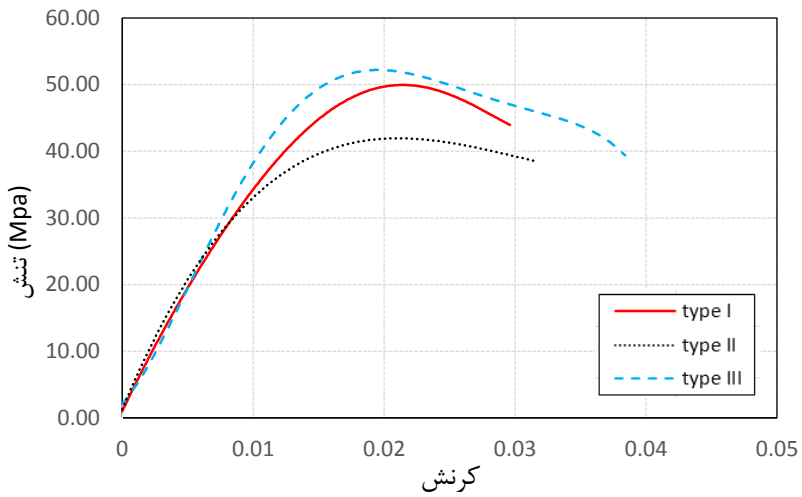
همچنین مشخص شد که نوع فیلامنت (برند سازنده) می‌تواند تاثیر به سزایی بر رفتار تغییرشکل نمونه‌های چاپ‌شده که در اینجا با انحنا اندازه‌گیری شده، داشته‌باشد (شکل ۸). در واقع، تفاوت انحنای سه نوع فیلامنت به حدی زیاد است که استفاده از فیلامنت‌های نوع دو و سه برای مقاصد چهاربعدی مناسب نیست. در شکل ۹ که چند نمونه چاپ‌شده با فیلامنت‌های مختلف است این تفاوت بهتر دیده می‌شود. کاربرد عملی این یافته در این است که هر نوع فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید و به طور کلی هر نوع فیلامنتی به صرف هوشمند بودن پلیمر برای کاربرد چهاربعدی مناسب نیست و انتخاب نوع مناسب فیلامنت نیازمند بررسی‌های بیشتر است. مشخصه‌یابی‌های انجام شده در این پژوهش می‌تواند به درک دلیل این تفاوت‌ها در رفتار حافظه‌شکلی این فیلامنت‌ها کمک کند.

۳- ۱- ۱- خواص مکانیکی

منحنی‌های تنش کرنش هر سه نوع فیلامنت تفاوت معناداری باهم نداشتند و تقریبا مشابه بودند (شکل ۸). هرچند، ازدیاد طول در شکست برای فیلامنت‌های نوع دو و سه بیشتر بود که بیانگر شکل‌پذیری بهتر آنها در دمای اتاق است. به‌علاوه، فیلامنت نوع سه مقادیر مدول الاستیسیته و استحکام تسلیم بالاتری داشت (شکل ۱۰ وجدول ۲). معمولا شرکت‌های سازنده برای افزایش استحکام ماده افزودنی‌هایی را به فیلامنت اضافه می‌کنند. این اختلاف در رفتار و مقدار خواص مکانیکی سه نمونه می‌تواند نشانگر وجود افزودنی‌هایی در ترکیب فیلامنت نوع سه باشد. هرچند اختلاف اندک است و به منظور بررسی بهتر، آزمایش‌های حرارتی و مکانیکی حرارتی نیز انجام شد.

۳- ۱- ۲- تحلیل حرارتی

رفتار کلی و مقدار خواص حرارتی مشاهده‌شده در منحنی‌های آزمون گرماسنجی روبشی تفرقی برای سه نوع فیلامنت متفاوت بود (شکل ۱۱ و جدول ۳). با اینکه هر سه فیلامنت مقادیر دمای انتقال شیشه‌ای نزدیکی داشتند، فیلامنت نوع سه هیچ قله‌ای در محدوده انتقال شیشه‌ای نداشت و محدوده‌ی انتقال شیشه‌ای گسترده‌تری داشت (شکل ۱۱). همچنین مقدار انرژی لازم برای انتقال شیشه‌ای در دو نوع فیلامنت دو و سه بیشتر است. این امر می‌تواند نشانگر وجود ناخالصی‌هایی در فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید نوع دو و سه است [۳۶]. از سوی دیگر، قله‌ی محدوده‌ی تبلور سرد فیلامنت نوع دو تیزتر بود و نسبت به پلی‌لاکتیک خالص (بدون افزودنی) به سمت دماهای پایینتر جابجا شده‌بود (شکل ۱۱). در نتیجه این تغییرات، تبلور سریعتر انجام



شکل ۱۰. منحنی تنش کرنش سه نوع فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید استفاده‌شده در پژوهش

Fig. 10. The stress-strain curves measured for the different types of PLA filaments

جدول ۲. خواص مکانیکی انواع مختلف فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید

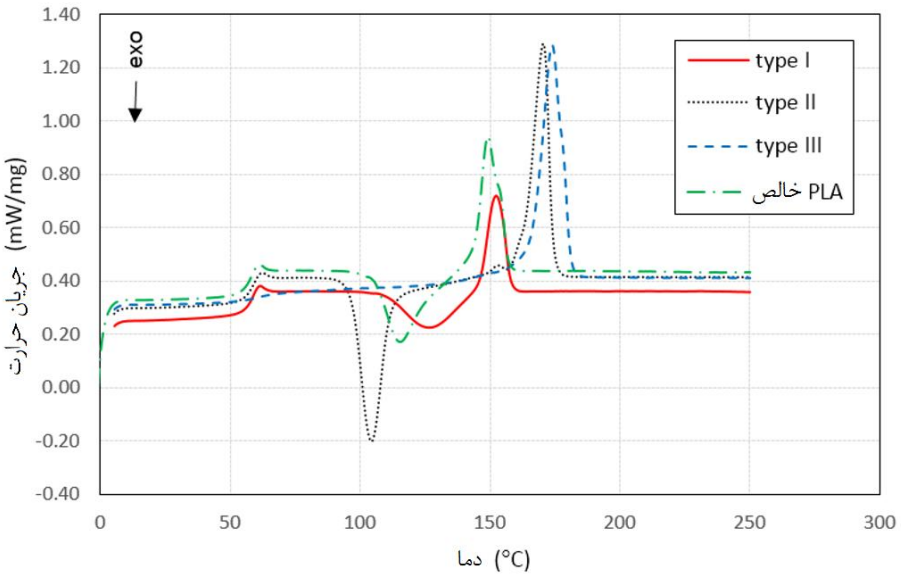
Table 2. The mechanical properties of the different types of PLA filaments

نوع فیلامنت	مدول الاستیسیته (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول در شکست (%)
نوع ۱	۳۳۱۳ ± ۱۱۰	۴۹/۷ ± ۱	۳/۰ ± ۰/۲
نوع ۲	۳۰۵۸ ± ۹۴	۴۱/۴ ± ۰/۹	۳/۲ ± ۰/۲
نوع ۳	۳۴۱۲ ± ۱۳۲	۵۳/۲ ± ۰/۹	۳/۸ ± ۰/۲

جدول ۳. خواص حرارتی سه نوع فیلامنت مختلف و پلی‌لاکتیک‌اسید خالص

Table 3. The thermal properties of the different types of PLA filaments as well as neat PLA

نوع فیلامنت	T_g(°C)	T_{cc}(°C)	ΔH_c(J/g)	T_m(°C)	ΔH_m(J/g)
پلی‌لاکتیک‌اسید خالص	۶۱/۳	۱۱۵/۶	۲۱/۳	۱۴۹	۲۶/۵
نوع ۱	۶۱/۷	۱۲۶/۵	۱۵/۵	۱۵۲/۴	۱۶/۸
نوع ۲	۵۹/۱	۱۰۴/۵	۳۲/۹	۱۷۰/۵	۳۸/۶
نوع ۳	۶۰/۵	-	-	۱۷۴	۴۲/۷



شکل ۱۱. چرخه‌ی حرارتی دوم از ترموگرام DSC سه نوع فیلامنت مختلف و پلی‌لاکتیک‌اسید خالص

Fig. 11. The DSC thermograms of the second heating cycle for three different PLA filament brands and neat PLA.

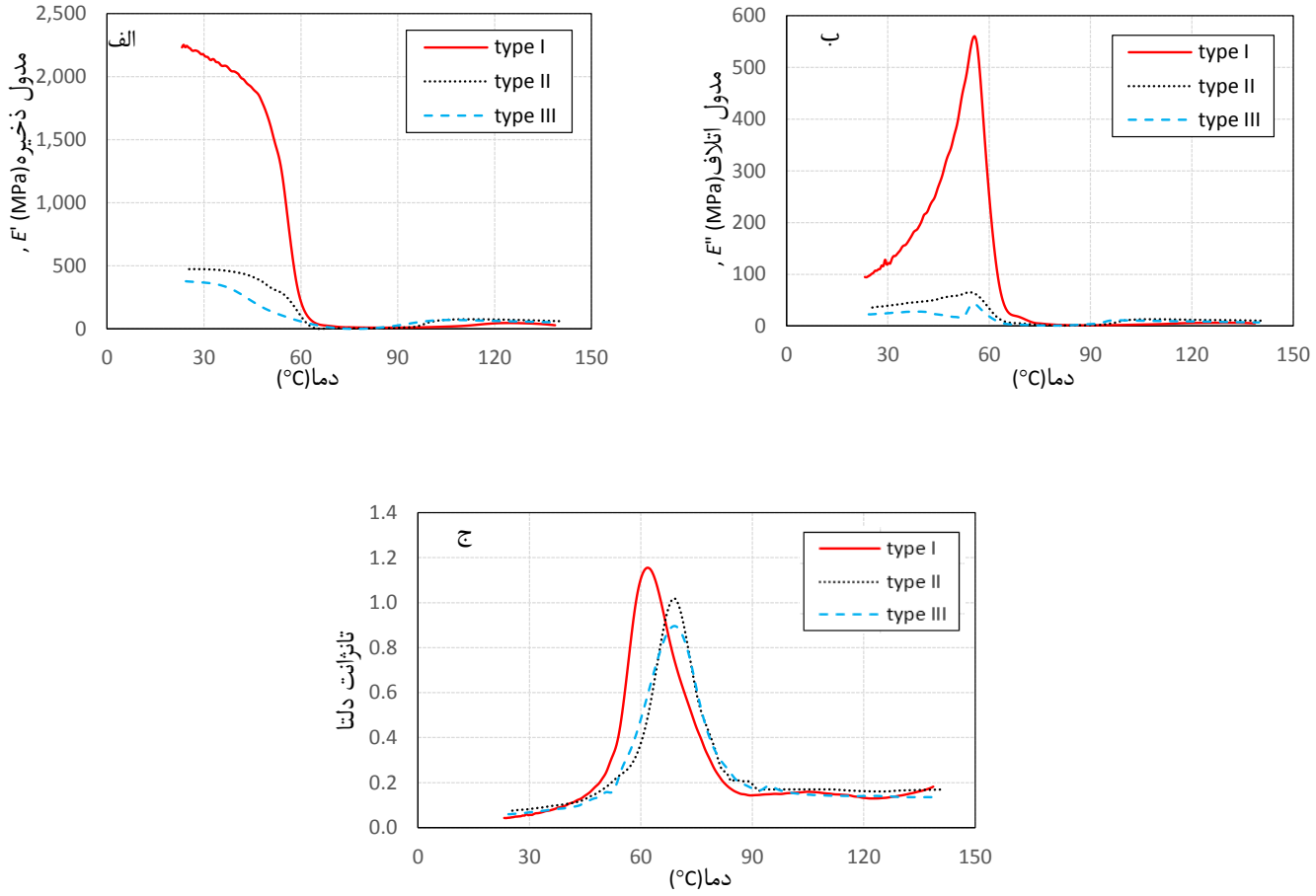
شده و انرژی بیشتری آزاد می‌کند. دلیل پشت این رفتار نیز طبق مرجع [۳۶] احتمالا متوجه وجود افزودنی‌ها است، چراکه وجود ذرات اضافه در فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید به عنوان عامل نوکلئوتی برای تبلور عمل می‌کنند. به طور کلی وجود ناخالصی‌ها باعث سخت‌ترشدن حرکت آزادانه‌ی زنجیره‌های پلیمری می‌شود. همین امر باعث می‌شود در حین فرایند لایه‌نشانی مذاب زنجیره‌های پلیمری نتوانند به خوبی در راستای اکستروژن قرار گیرند، و درنتیجه خاصیت حافظه شکلی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. اما طبق مرجع [۳۷] علاوه بر ناخالصی‌ها (به عنوان مثال پیگمنت‌های رنگی)، تفاوت در تبلور، اندازه بلورها، اندازه زنجیره‌های پلیمری، وزن مولکولی و عوامل مختلف دیگری می‌توانند در این تفاوت رفتارها موثر باشند. هرچند در این پژوهش فقط به بررسی اثر تبلور و رفتار حرارتی دینامیکی پرداخته شده و هدف مقایسه رفتار فیلامنت‌های موجود تجاری و تعیین رفتار موردنظر برای چاپ چهاربعدی است. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، رفتار فیلامنت نوع یک بیشتر از سایر فیلامنت‌ها مشابه رفتار پلی‌لاکتیک خالص است و بنابراین مطابق انتظار رفتار حافظه‌شکلی یا تغییرشکل بهتری دارد. به طور کلی، این نتایج پیشنهاد می‌کند که هرچه رفتار حرارتی فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید به رفتار حرارتی پلی‌لاکتیک‌اسید خالص نزدیک‌تر باشد، رفتار تغییرشکل آن فیلامنت بهتر خواهد بود.

۳- ۱- ۳- نتایج تحلیل مکانیکی دینامیکی

نتایج آزمایش تحلیل مکانیکی دینامیکی تفاوت معناداری را در مدول ذخیره و اتلاف سه نوع فیلامنت نشان داد. در دمای اتاق، مدول ذخیره‌ی فیلامنت نوع ۱ بیش از چهار برابر مدول ذخیره‌ی دو نوع دیگر بود و همچنین افت شدیدی در محدوده‌ی دمای انتقال شیشه‌ای از خود نشان داد (شکل ۱۲-الف). در مقایسه، فیلامنت‌های نوع دو و سه در دماهای زیر دمای انتقال شیشه‌ای پایداری بیشتری در تغییرات مقدار مدول ذخیره خود داشتند (شکل ۱۳). در مورد مدول اتلاف، قله‌ی بزرگی در محدوده‌ی دمای انتقال شیشه‌ای برای فیلامنت نوع ۱ مشاهده شد، درحالیکه دو نوع فیلامنت دیگر تغییر کمتری از خود نشان دادند (شکل ۱۲-ب). با اینحال، نسبت مدول ذخیره به اتلاف به عنوان رفتار کلی منحنی‌های دینامیکی مکانیکی برای هر سه فیلامنت مشابه بود (شکل ۱۲-ج).

۳-۲ تاثیر پارامترهای فعال‌سازی

با افزایش دمای فعال‌سازی، مقدار انحنا افزایش پیدا کرد (شکل ۱۴).



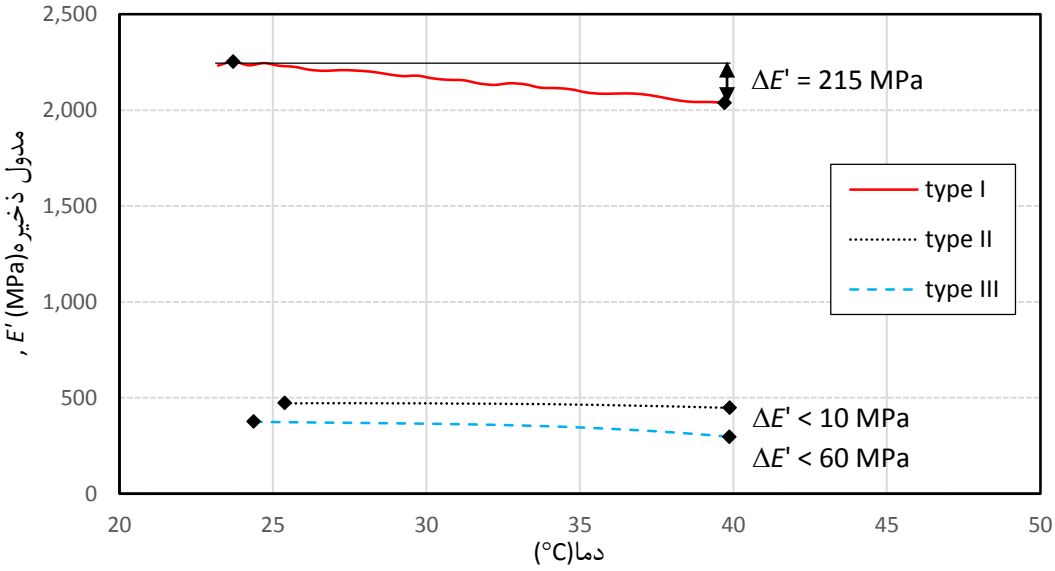
شکل ۱۲. خواص ترمومکانیکی سه نوع مختلف فیلامنت پلی‌لاکتیک‌اسید: الف- مدول ذخیره، ب- مدول اتلاف، ج- تانژانت تغییرفاز (تانژانت دلتا)

Fig. 12. The thermomechanical properties of the different types of PLA filaments: (a) the storage modulus, (b) loss modulus, and (c) the tangent of the phase shift angle (tan delta)

افزایش دمای فعال‌سازی باعث کاهش ویسکوزیته‌ی پلی‌لاکتیک‌اسید شده و در نتیجه زنجیره‌های پلیمری با آزادی بیشتری حرکت می‌کنند که این امر به ریلکسیشن بهتر تنش‌های ذخیره‌شده کمک می‌کند. در هر دمای فعال‌سازی پس از گذشت زمان به خصوصی، انحنا به بیشترین مقدار خود می‌رسد و ثابت می‌ماند (شکل ۱۴). ما این زمان را زمان اوج یا t_p نامگذاری کردیم. مشاهده شد که t_p وابسته به دمای فعال‌سازی است و به طور کلی با افزایش دمای فعالسازی کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). دلیل این امر این است که در دماهای بالاتر، تمام حجم نمونه سریعتر به دمای انتقال شیشه‌ای می‌رسد، بنابراین رفتار تغییرشکل زمان کمتری برای کامل‌شدن نیاز دارد.

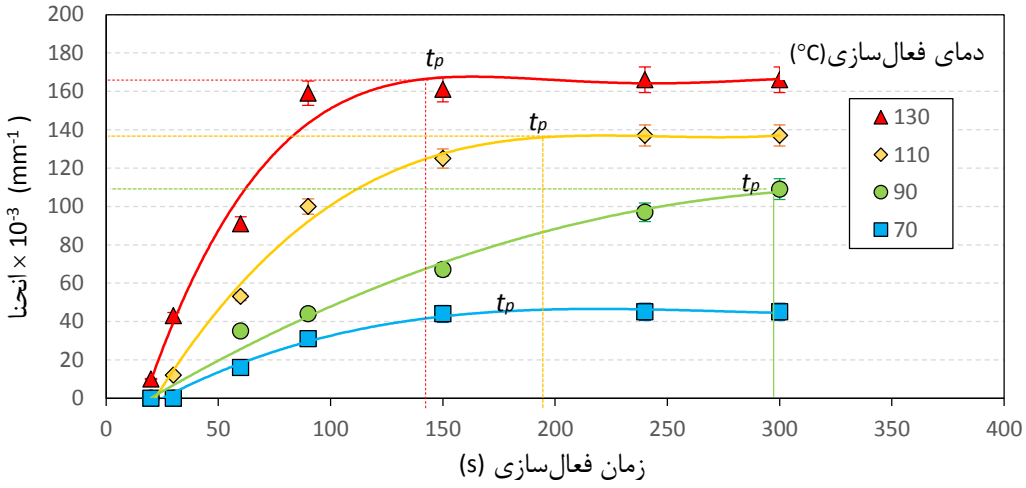
۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که استفاده از فیلامنت‌های مختلف پلی‌لاکتیک‌اسید تاثیر به سزایی بر انحنای ساختارهای چهاربعدی دارد. نتایج حاکی از تفاوت ۹ برابری میزان انحنای ساختارهای چاپ‌شده با استفاده از سه نوع مختلف فیلامنت داشت که به این معنی است که هر فیلامنتی به صرف پلی‌لاکتیک‌اسیدبودن و یا هوشمندبودن پلیمر آن فیلامنت برای



شکل ۱۳. مقایسه‌ی پایداری مدول ذخیره فیلامنت‌های نوع ۲ و ۳ با نوع ۱ در دماهای پایین‌تر از دمای انتقال شیشه‌ای

Fig. 13. type II & III storage modulus stability in comparison with type I



شکل ۱۴. تاثیر پارامترهای فعال‌سازی بر انحنا

Fig. 14. The effects of the activation parameters on the resulting curvature

کاربردهای چهاربعدی مناسب نیست. هرچه رفتار حرارتی فیلامنت به پلیمر خالص نزدیک‌تر باشد رفتارتغییرشکل بهتری خواهد داشت. همچنین نتایج آزمایش تحلیل دینامیکی مکانیکی نشان داد که تغییرات شدیدتر در مدول ذخیره و اتلاف در محدوده‌ی دمای انتقال شیشه‌ای بیانگر رفتار تغییرشکل شدیدتر است.

زمان اوج، t_p، که پس از این زمان تغییرشکل بیشتری در ساختار چهاربعدی رخ نخواهد داد، به صورت معکوس با دمای فعال‌سازی در ارتباط بود. به‌علاوه، دمای فعال‌سازی تاثیر به سزایی بر میزان انحن ا داشت. افزایش دما از ۷۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش چهار برابری انحنا و سه برابری زمان اوج شد. در نهایت، افزایش سرعت چاپ از ۳۰ به ۱۲۰ میلیمتر بر ثانیه باعث افزایش دو برابری انحنا شد در حالیکه افزایش فاصله نازل از میز چاپ از ۰/۱ به ۰/۲۵ میلیمتر منجر به کاهش ۴۰ درصدی انحنا شد.

به طور خلاصه، این مقاله نشان می‌دهد که تنها فیلامنت‌های پلی‌لاکتیک‌اسید خاصی برای اهداف چاپ چهاربعدی مناسب هستند و راهی برای تشخیص و تعیین این فیلامنت‌ها پیشنهاد می‌دهد. به‌علاوه، می‌توان از نتایج این مقاله برای کنترل بهتر انحنا، یا به عبارت دیگر، شکل نهایی ساختار چهاربعدی استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله صمیمانه از پروفسور امیر زادپور بابت راهنمایی‌های بی‌دریغشان تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

[1] S. Tibbits, The emergence of ‘4D printing,’ in TED conference, (2013).

[2] S. Tibbits, 4D printing: Multi-material shape change, Archit. Des., 84121–116 (2014))1(.

[3] Y. Zhang et al., Printing, folding and assembly methods for forming 3D mesostructures in advanced materials, Nat. Rev. Mater., 2(4) (2017).

[4] Y. Y. C. Choong, S. Maleksaeedi, H. Eng, J. Wei, and P. C. Su, 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography, Mater. Des., 126(5) (2017) 219–225.

[5] A. I. Egunov, J. G. Korvinkb, and V. A. Luchnikov, Polydimethylsiloxane bilayer films with an embedded spontaneous curvature, Soft Matter, 12(2) (2016) 45–52.

[6] A. Sydney Gladman, E. A. Matsumoto, R. G. Nuzzo, L. Mahadevan, and J. A. Lewis, Biomimetic 4D printing, Nat. Mater. 15(4) (2016) 413–418.

[7] Z. Zhao, J. Wu, X. Mu, H. Chen, H. J. Qi, and D. Fang, Desolvation Induced Origami of Photocurable Polymers by Digit Light Processing, Macromol. Rapid Commun. 38(13) (2017) 1–6.

[8] Y. Liu et al., Programmable responsive shaping behavior induced by visible multi-dimensional gradients of magnetic nanoparticles, Soft Matter, 8(3) (2012) 3295–3299.

[9] T. van Manen, S. Janbaz, and A. A. Zadpoor, Programming the shape-shifting of flat soft matter, Mater. Today, vol. 21(2) (2018) 144–163.

[10] A. Mitchell, U. Lafont, M. Ho, and C. Semprimoschnig, Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications, Addit. Manuf., 24 (2018) 606–626.

[11] L. Sun et al., stimulus-responsive shape memory materials: a review, Mater. Des., 33 (2012) 577–640.

[12] J. E. M. Teoh, J. An, X. Feng, Y. Zhao, C. K. Chua, and Y. Liu, Design and 4D printing of cross-folded origami structures: A preliminary investigation, Materials (Basel)., 11(3) (2018).

[13] Z. Ding, C. Yuan, X. Peng, T. Wang, H. J. Qi, and M. L. Dunn, Direct 4D printing via active composite materials, Sci. Adv., 3(4) (2017).

[14] J. Wu et al., Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers., Sci. Rep., 6(3) (2016) 22-34.

[15] Y. Mao, K. Yu, M. S. Isakov, J. Wu, M. L. Dunn, and H. Jerry Qi, Sequential Self-Folding Structures by 3D Printed Digital Shape Memory Polymers, Sci. Rep., 5(1) (2015) 13-19.

[16] H. Wei, Q. Zhang, Y. Yao, L. Liu, Y. Liu, and J. Leng, Direct-write fabrication of 4D active shape-changing structures based on a shape memory polymer and its nanocomposite, ACS Appl. Mater. Interfaces, 9(1) (2017) 876–883.

[17] Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang, and M. L. Dunn, Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers, Sci. Rep. 6(1) (2016)11-21.

[18] D. Kokkinis, M. Schaffner, and A. R. Studart, Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials, Nat. Commun., 6 (2015) 8643.

[19] S. Naficy, R. Gately, R. Gorkin, H. Xin, and G. M. Spinks, 4D Printing of Reversible Shape Morphing Hydrogel Structures, Macromol. Mater. Eng., 302(1) (2017) 1–9.

[20] S. E. Bakarich, R. G. Iii, and G. M. Spinks, 4D Printing with Mechanically Robust , Thermally Actuating Hydrogels, Macromol. Rapid Commun., 2(3) (2015) 1–7.

[21] S. K. Leist, D. Gao, R. Chiou, and J. Zhou, Investigating the shape memory properties of 4D printed polylactic acid (PLA) and the concept of 4D printing onto nylon fabrics for the creation of smart textiles, Virtual Phys. Prototyp., 12(4) (2017) 290–300.

[22] D. Schmelzeisen, H. Koch, C. Pastore, and T. Gries, 4D Textiles: Hybrid Textile Structures that Can Change Structural Form with Time by 3D Printing, Narrow Smart Text., (2018) 189–201.

[23] W. Wang, C. Yuk, P. Antonio, A. Serrano, and S. Ahn, Soft grasping mechanisms composed of shape memory polymer based self- bending units, Compos. Part B, 164(6) (2019) 198–204.

[24] W. Zhang et al., Shape memory behavior and recovery force of 4D printed textile functional composites, Compos. Sci. Technol., vol. 160(3) (2018) 224–230, 2018.

[25] G. F. Hu, A. R. Damanpack, M. Bodaghi, and W. H. Liao, Increasing dimension of structures by 4D printing shape memory polymers via fused deposition modeling, Smart Mater. Struct., 26(12) (2017).

[26] M. Bodaghi, A. Serjouei, A. Zolfagharian, M. Fotouhi, H. Rahman, and D. Durand, Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing, Int. J. Mech. Sci., 173 (2020) 145-158.

[27] T. Liu, L. Liu, C. Zeng, Y. Liu, and J. Leng, 4D printed anisotropic structures with tailored mechanical behaviors and shape memory effects, Compos. Sci. Technol., 186 (2020) 107935.

[28] R. Mitkus, Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures, Smart Mater. Struct., 28 (2019).

[29] Q. Zhang, K. Zhang, and G. Hu, Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique., Sci. Rep., 6 (2016) 22431.

[30] S. T. Ly and J. Y. Kim, 4D printing – fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers, Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol., 4(3) (2017) 267–272.

[31] J. E. M. Teoh, Y. Zhao, J. An, C. K. Chua, and Y. Liu, Multi-stage Responsive 4D Printed Smart Structure through Varying Geometric Thickness of Shape Memory Polymer, Smart Mater. Struct., 26(12) (2017).

[32] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, "3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 84(12) (2016) 2079–2095.

[33] T. van Manen, S. Janbaz, and A. A. Zadpoor, Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers, Mater. Horiz., 4 (2017) 1064-1069.

[34] F. Momeni, S. M.Mehdi Hassani.N, X. Liu, and J. Ni, A review of 4D printing, Mater. Des., 122 (2017) 42–79.

[35] ASTM D 638 -02a, Standard test method for tensile properties of plastics, (2003).

[36] C. A. Murphy and M. N. Collins, Microcrystalline Cellulose Reinforced Polylactic Acid Biocomposite Filaments for 3D Printing, Polym. Compos., (2016) 1–10.

[37] M. Matos et al, Evaluation of commercially available polylactic acid (PLA) filaments for 3D printing applications, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2019) 555-562.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Salimi Nezhad, M. Golzar, A. H. Behravesh, Evaluating the effects of material extrusion 3D printing process parameters on shape-shifting of Poly-lactic acid 4D-printed structures, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 4095-4110.

DOI: 10.22060/mej.2021.18992.6933

این صفحه عمداً خالی است