



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

ایمان سلیمی نژاد، محمد گلزار*، امیرحسین بهروش

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

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
تغییر شکل
پلی‌لاکتیک‌اسید

خلاصه: چاپ چهاربعدی، یک شاخه‌ی نسبتاً 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 فرآیند لایه‌نشانی مذاب هنوز به خوبی درک و مطالعه نشده‌است. در این مقاله تاثیر پارامترهای مختلف فرآیند 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 تغییر شکل نمونه‌ها تا حد زیادی متاثر از نوع فیلامنت استفاده شده بود. 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. با توجه 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.

۱- مقدمه

رفتار تغییر شکل و حصول ساختار چهاربعدی وجود پلیمر حافظه شکلی^۱ و همچنین نحوه‌ی اعمال آن است که به واسطه فرآیندهای چاپ سه‌بعدی امکان‌پذیر می‌شود.

در اغلب موارد، اساس کار چاپ چهاربعدی تغییر شکل 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 [۶ و ۷]، 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

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 تغییر شکل کنترل شده و دلخواه با اعمال محرک و در زمان دلخواه است. بنابراین تنها در صورتی بعد چهارم نمود پیدا می‌کند که بتوان ساختار را در زمان مورد نظر و به میزان مورد نظر تغییر شکل داد. به این ترتیب صرف وابسته‌بودن به زمان در سایر پدیده‌های فیزیکی مانند پدیده برگشت فتری، خزش و ... در چهارچوب بعد چهارم تعریف نمی‌شود. همچنین «چاپ چهاربعدی» هم‌زمان به فرآیند و ماده وابسته است. لازمه‌ی

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.



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، رفتار تغییرشکل 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^۱ 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

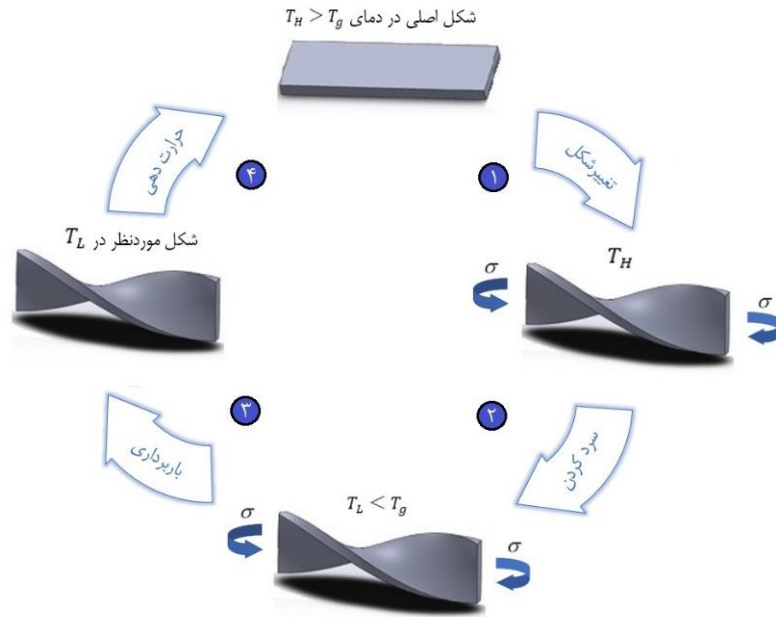
یک ساختار چهاربعدی می‌تواند شکل، خواص و یا عملکردش را بر اساس یک محرک تغییر دهد. هرچند، برای اینکه ساختار چهاربعدی به محرک عکس‌العمل مناسب نشان دهد باید مکانیزم تحریک آن شناسایی شود. مکانیزم‌های مختلفی در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته [۳۴]، که در این پژوهش از مکانیزم «ترمو مکانیک مقید» استفاده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

هم زمان پاسخ کوتاه و هم خواص مکانیکی خوبی دارند [۱۰ و ۹]. پلیمرهای حافظه‌شکلی بر اساس اثر حافظه‌شکلی^۱ کار می‌کنند که در آن ماده در اثر اعمال یک محرک خاص شکل اولیه خود را بازیابی می‌کند. در واقع، تقریباً تمامی پلیمرهای مهندسی درجه‌ای از اثر حافظه‌شکلی را از خود نشان می‌دهند. هرچند، تغییرشکل‌ها و نیروهای مربوط به رفتار حافظه‌شکلی اغلب پلیمرها محدود است به طوری که 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 معمولاً 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. اخیراً، فرایند لایه‌نشانی مذاب که یکی از رایج‌ترین و ارزانه‌ترین 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 ۲۲-۲۴]. در این پژوهش‌ها پژوهشگران از پلی‌لاکتیک‌اسید^۲ به عنوان ماده‌ی فعال و از کاغذ، الیاف نایلون و پارچه به عنوان ماده‌ی ساده یا غیرفعال استفاده کردند. مثلاً ژنگ و همکاران [۲۹] ابتدا کاغذ را بر روی میز چاپ چسبانده و مقید کردند و سپس پلی‌لاکتیک‌اسید را با الگوی مورد نظر بر روی آن چاپ کردند. هرچند این رویکردها چندان هم در مرتفع کردن 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

1 Shape memory effect- SME

2 PLA



شکل ۱. نمایش شماتیک مکانیزم ترمومکانیک مقید در چاپ چهاربعدی

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

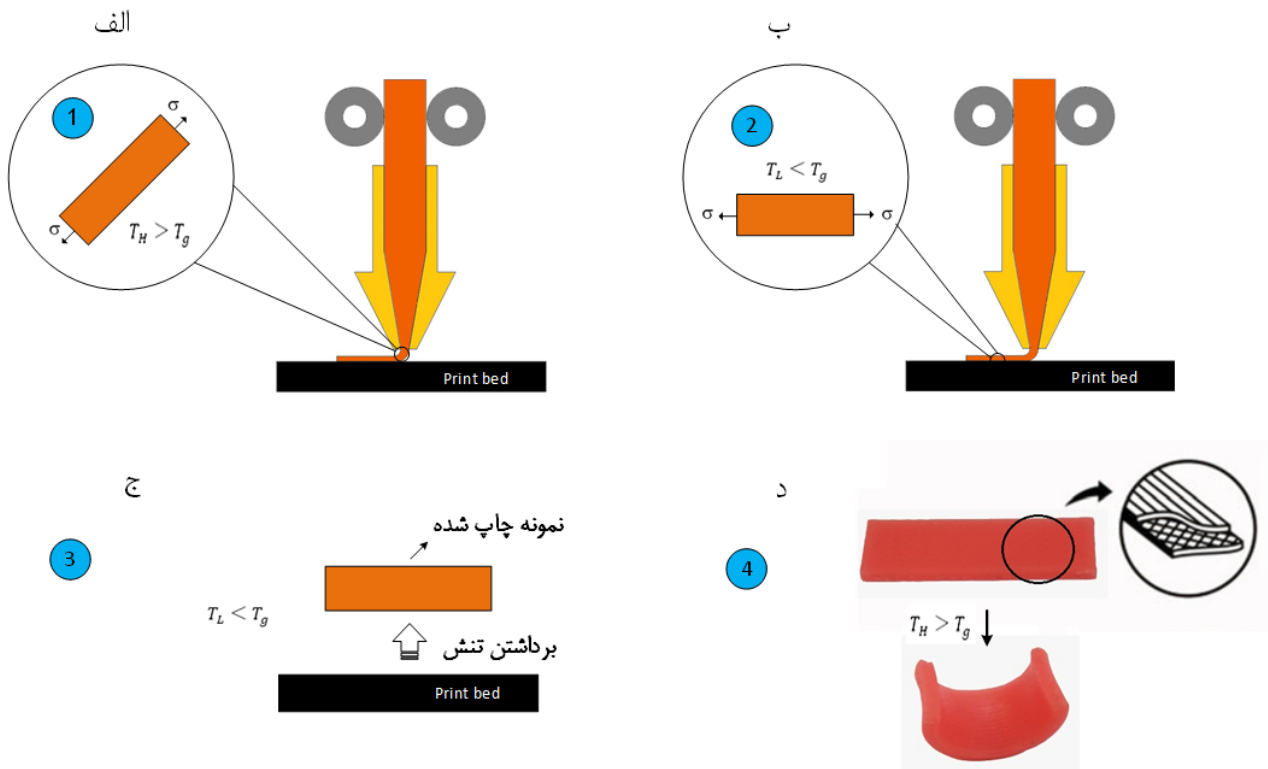
پس از اینکه قطعه به طور کامل چاپ و تا دمای اتاق خنک شد، از میز چاپ برداشته می‌شود (شکل ۲-ج). با حرارت‌دهی دوباره به قطعه و بالا بردن دمای آن تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای اش قطعه‌ی چاپ شده دچار تغییر شکل می‌شود (مرحله چهار). ساختارهای چاپ‌شده معمولاً به صورت نوارهای دولایه (دو مجموعه لایه) با الگوی چاپ متفاوت برای هر مجموعه لایه چاپ می‌شوند (شکل ۲-د). تفاوت الگوی چاپ لایه‌ها باعث تفاوت در کرنش ذخیره‌شده در هر لایه و در نتیجه ایجاد رفتارهای تغییر شکل 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 تغییر شکل 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

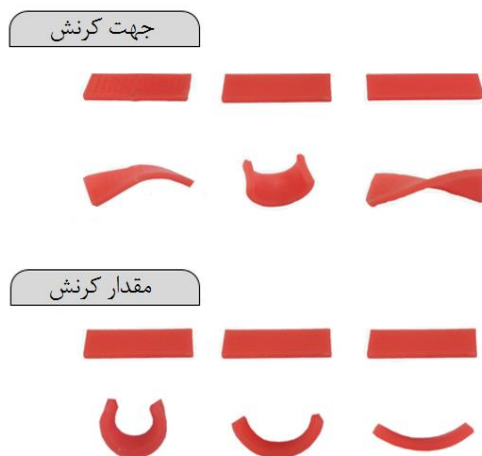
دمای انتقال شیشه‌ای ($T_H > T_g$) پلیمر حافظه‌شکلی و سطح دمایی دیگر زیر دمای انتقال شیشه‌ای ($T_L < T_g$) است. در مرحله ۱، قطعه تا دمای T_H حرارت داده شده و با اعمال تنش خارجی به شکل ثانویه‌ی موردنظر تغییر شکل داده می‌شود. در مرحله ۲، بدون برداشتن تنش خارجی قطعه تا دمای T_L خنک می‌شود. در مرحله ۳ پس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

اکنون می‌توان چاپ چهاربعدی با استفاده از فرایند لایه‌نشانی مذاب را از طریق مکانیزم ترمومکانیک مقید توضیح داد. در ابتدا، پلیمر حافظه‌شکلی در داخل نازل تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای اش حرارت می‌بیند و سپس بر روی میز چاپ یا لایه‌های چاپ شده‌ی قبلی اکستروود می‌شود (شکل ۲-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 مرحله بعد (شکل ۲-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.



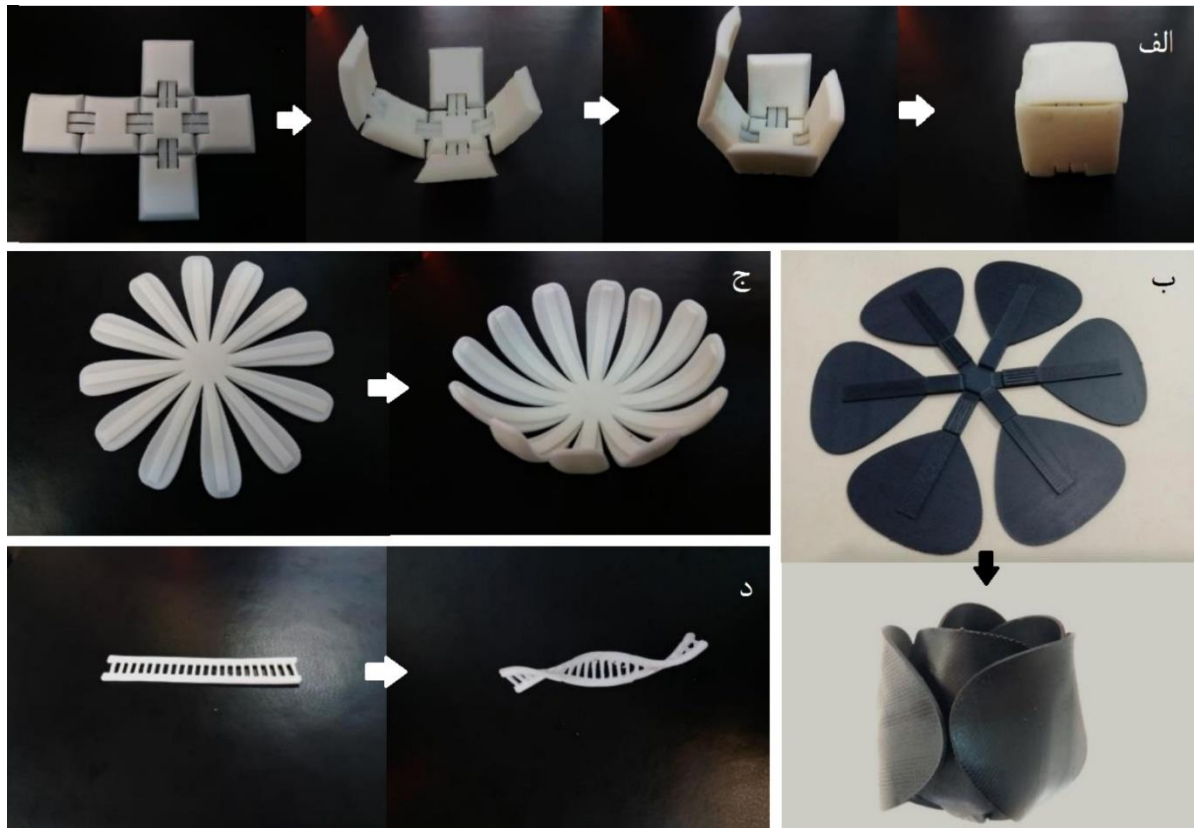
شکل ۲. مکانیزم ترمومکانیک مقید در چاپ چهاربعدی: الف- دمای بالای دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر و اعمال تنش خارجی در حین چاپ، ب- خنک شدن لایه‌ی چاپ شده و حفظ تنش خارجی، ج- برداشتن قطعه چاپ شده از میز و رهاسازی تنش خارجی، د- افزایش مجدد دما تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر و تغییر شکل قطعه چاپ شده

Fig. 2. The constrained thermomechanical mechanisms in the FDM processes: (a) the temperature is above T_g 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 چاپ شده 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 استفاده شده در این پژوهش

Table 1. The printer settings used in the study

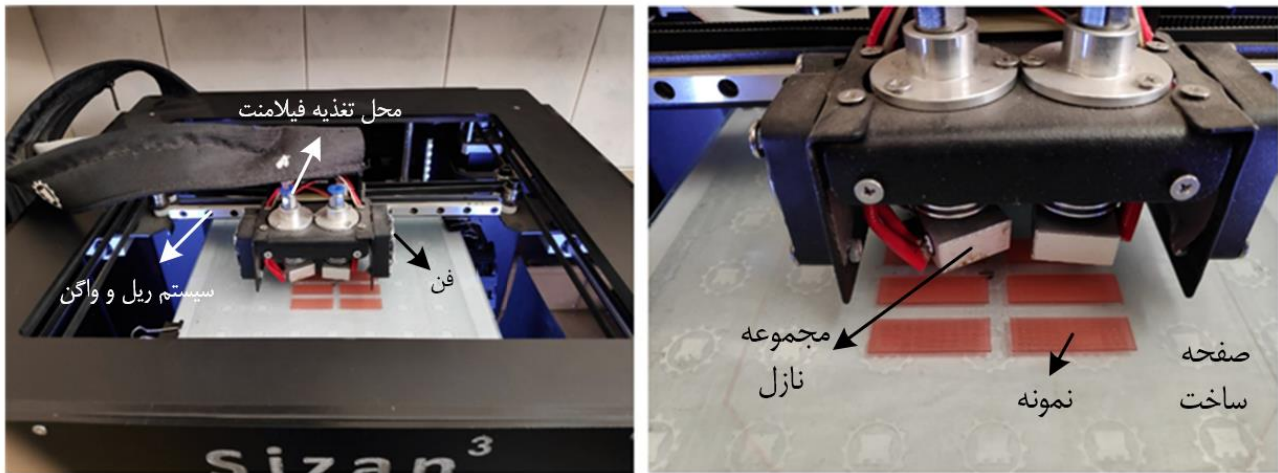
نوع فیلامنت	فاصله نازل (mm)	سرعت چاپ (mm/s)	زمان فعالسازی (s)	دمای فعالسازی (°C)	دمای نازل (°C)	ضخامت لایه (mm)
نوع ۱	0/1 ± 0/1	۹۰	۲۴۰	۱۱۰	۲۱۰	۰/۱

فوق‌الذکر استفاده خواهد شد.

برای چاپ نمونه‌ها در دمای اتاق از دستگاه چاپ سه‌بعدی لایه‌نشانی مذاب (سیزان ۳، 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

فیلامنت‌های ساخته‌شده توسط شرکت‌های مختلف رفتار حافظه‌شکلی 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^۱، تحلیل مکانیکی دینامیکی^۲، و کشش مشخصه‌یابی شدند. در ادامه به ترتیب از عناوین نوع ۱، نوع ۲ و نوع ۳ برای سه فیلامنت

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



شکل ۵. چاپگر سه بعدی لایه نشان مذاب در حال چاپ نمونه
 Fig. 5. Printing specimens with FDM 3D printer



شکل ۶. حرارت دهی نمونه‌ها در آون
 Fig. 6. Heating the samples in the oven

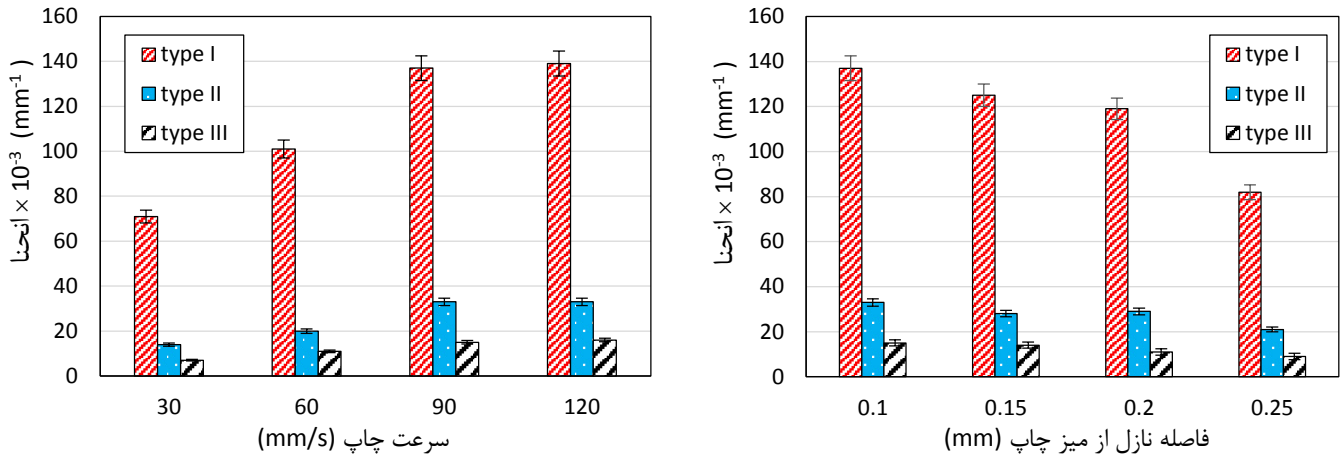
لایه دوم به صورت طولی که منجر به ایجاد یک ساختار دولایه می‌شود، انتخاب شد. همه‌ی نمونه‌ها با استفاده از آون آزمایشگاهی شیمای حرارت‌دهی شدند (شکل ۶) و انحنای نمونه‌ها با استفاده از روش مشابه پردازش تصویر دیجیتال^۱ اندازه‌گیری شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها سه‌بار تکرار شده‌است.

۲-۳- خواص حرارتی

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

مشخص می‌شود، نمونه با ابعاد ۳۰ در ۱۰ در ۱٫۶ میلی‌متر چاپ شد به طوری‌که هر پارامتر را بتوان مستقلاً 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

1 Digital Image Correlation-DIC



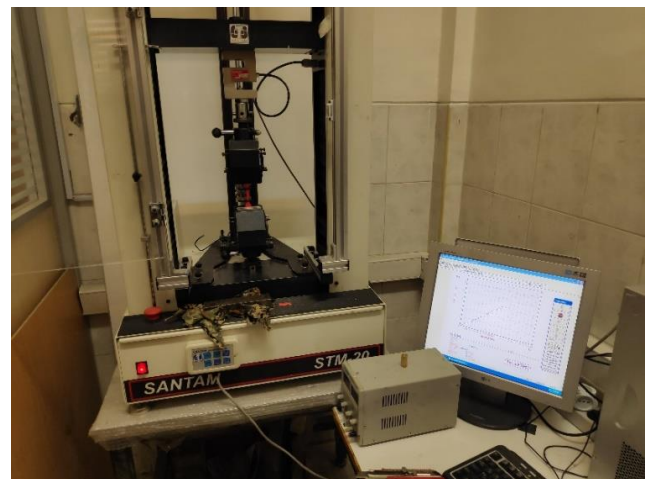
شکل ۸. اثر پارامترهای ساخت و ماده بر انحنا

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

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 نمایشی از آزمایش کشش یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



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

Fig. 7. tensile tester performing the uniaxial tensile test

۳- نتایج و بحث

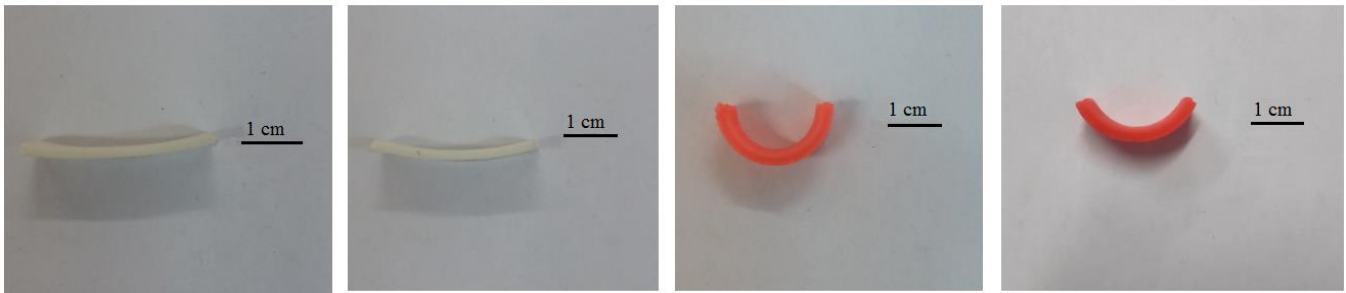
۳-۱- اثر پارامترهای ساخت و ماده

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 اکستروود شده ایجاد می‌کند، که یعنی تنش‌های کششی بیشتری در

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-



شکل ۹. تعدادی از نمونه‌های چاپ‌شده با فیلامنت‌های مختلف

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

۳-۱-۱- خواص مکانیکی

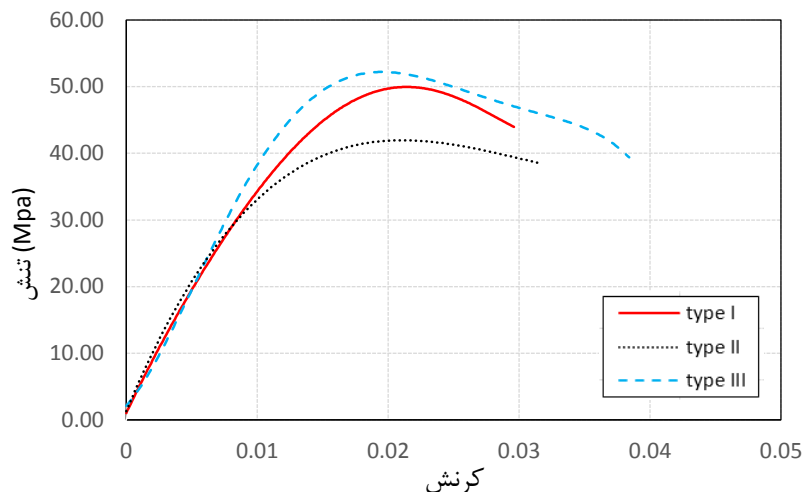
منحنی‌های تنش کرنش هر سه نوع فیلامنت تفاوت معناداری باهم نداشتند و تقریباً مشابه بودند (شکل ۸). هرچند، ازدیاد طول در شکست برای فیلامنت‌های نوع دو و سه بیشتر بود که بیانگر شکل‌پذیری بهتر آنها در دمای اتاق است. به‌علاوه، فیلامنت نوع سه مقادیر مدول الاستیسیته و استحکام تسلیم بالاتری داشت (شکل ۱۰ و جدول ۲). معمولاً 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 شده بود (شکل ۱۱). در نتیجه این تغییرات، تبلور سریعتر انجام

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 (مثلاً 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 به‌سزایی بر رفتار تغییرشکل نمونه‌های چاپ‌شده که در اینجا با انحنا اندازه‌گیری شده، داشته باشد (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.



شکل ۱۰. منحنی تنش کرنش سه نوع فیلامنت پلی لاکتیک اسید استفاده شده در پژوهش

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

جدول ۲. خواص مکانیکی انواع مختلف فیلامنت پلی لاکتیک اسید

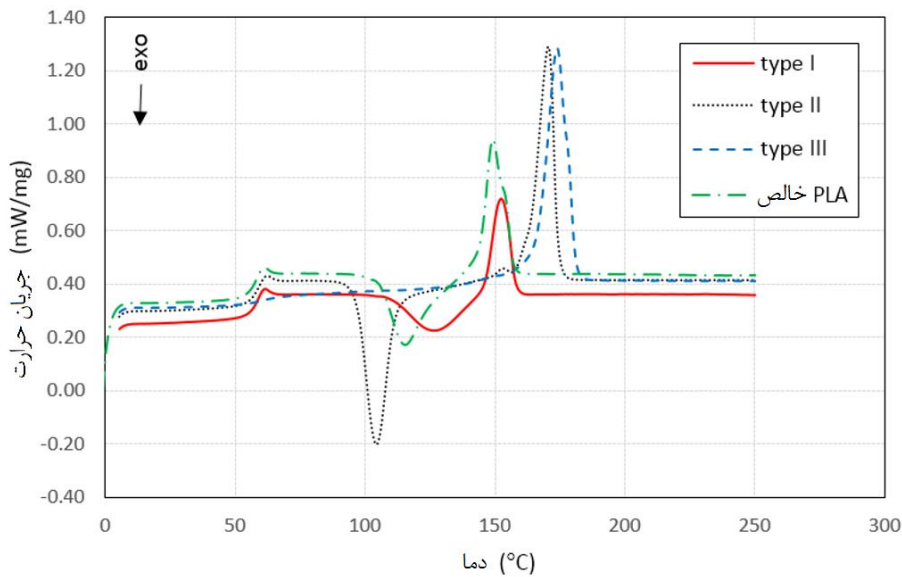
Table 2. The mechanical properties of the different types of PLA filaments

نوع فیلامنت	مدول الاستیسیته (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول در شکست (%)
نوع ۱	3313 ± 110	49.7 ± 1	3.0 ± 0.2
نوع ۲	3058 ± 94	41.4 ± 0.9	3.2 ± 0.2
نوع ۳	3412 ± 132	53.2 ± 0.9	3.8 ± 0.2

جدول ۳. خواص حرارتی سه نوع فیلامنت مختلف و پلی لاکتیک اسید 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)
پلی لاکتیک اسید 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 پلی لاکتیک اسید خالص

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

فیلامنت بهتر خواهد بود.

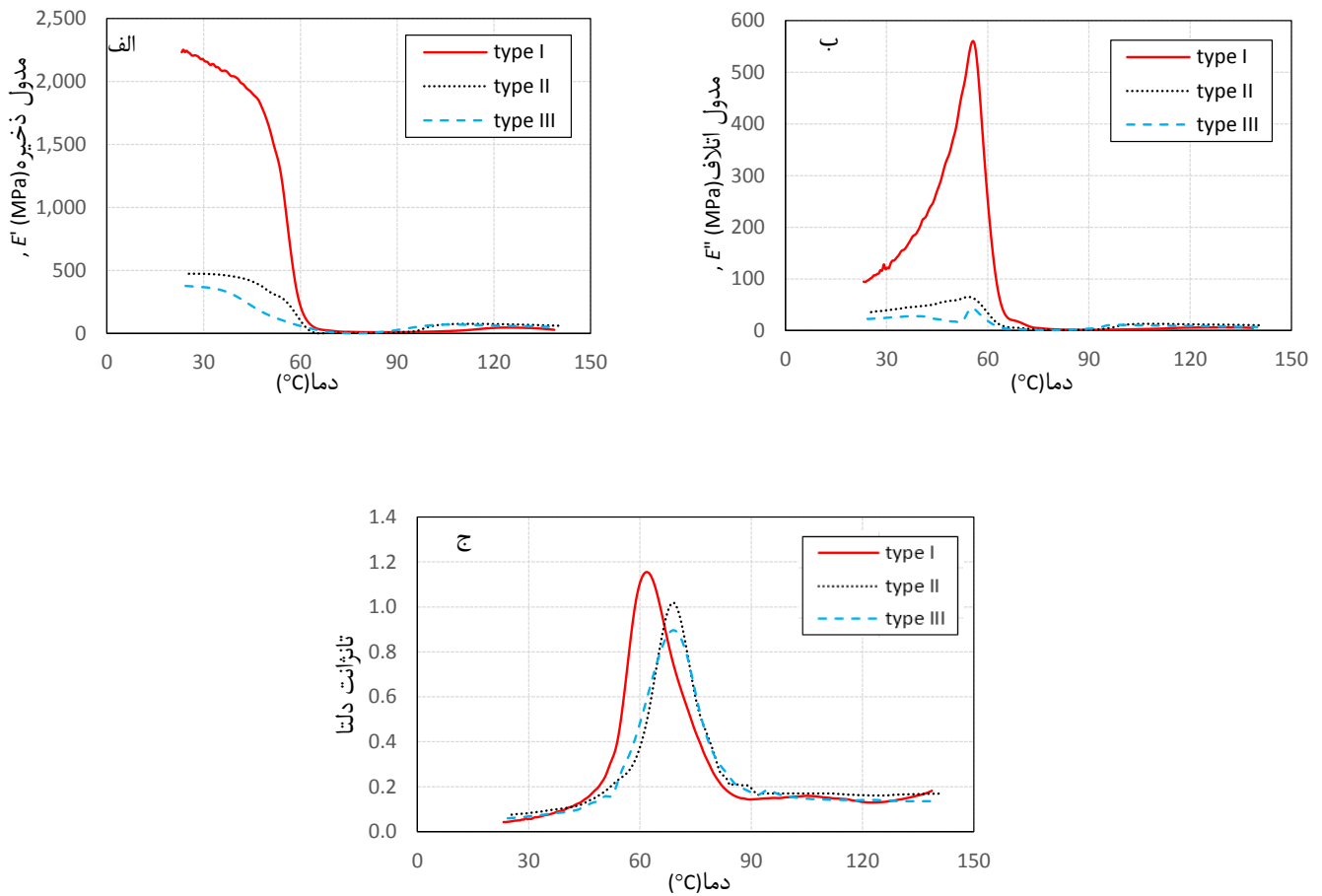
۳-۱-۳ نتایج تحلیل مکانیکی دینامیکی

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).

شده و انرژی بیشتری آزاد می‌کند. دلیل پشت این رفتار نیز طبق مرجع [۳۶] احتمالاً متوجه وجود افزودنی‌ها است، چراکه وجود ذرات اضافه در فیلامنت پلی لاکتیک اسید به عنوان عامل نوکلئوتی برای تبلور عمل می‌کنند. به طور کلی وجود ناخالصی‌ها باعث سخت‌تر شدن 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 در نتیجه خاصیت حافظه‌شکلی 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 پلی لاکتیک خالص است و بنابراین مطابق انتظار رفتار حافظه‌شکلی یا تغییرشکل بهتری دارد. به طور کلی، این نتایج پیشنهاد می‌کند که هرچه رفتار حرارتی فیلامنت پلی لاکتیک اسید به رفتار حرارتی پلی لاکتیک اسید خالص نزدیک‌تر باشد، رفتار تغییرشکل آن



شکل ۱۲. خواص ترمومکانیکی سه نوع مختلف فیلامنت پلی لاکتیک اسید: الف- مدول ذخیره، ب- مدول اتلاف، ج- تانژانت تغییر فاز (تانژانت دلتا)

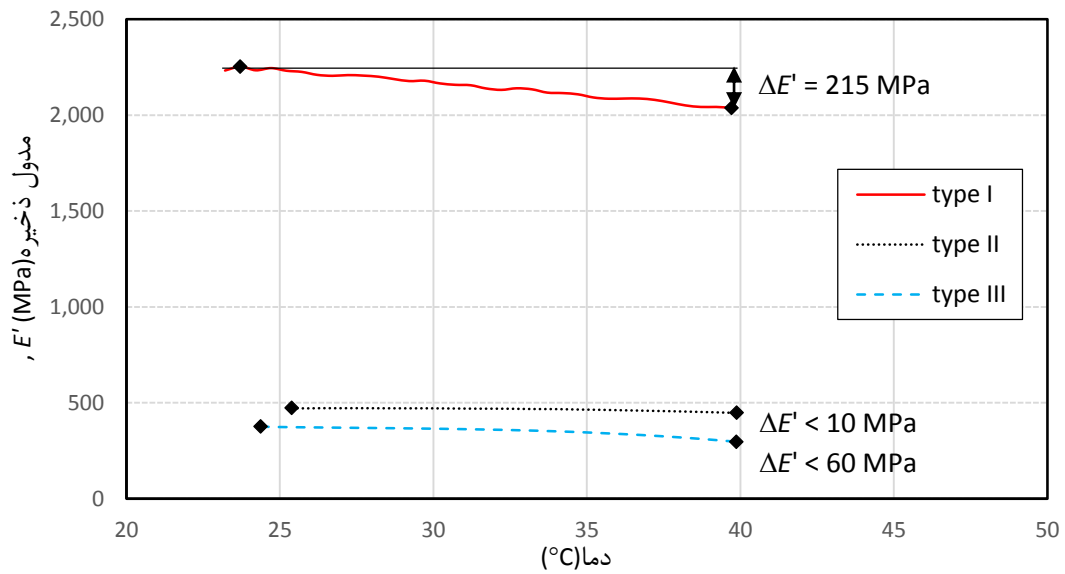
Fig. 12. The thermomechanical properties of the different types of PLA filaments: (a) the storage modulus, (b) loss modulus, and (c) the tangent of the phase shift angle (tan delta)

می‌رسد، بنابراین رفتار تغییر شکل زمان کمتری برای کامل شدن نیاز دارد.

۴- نتیجه‌گیری

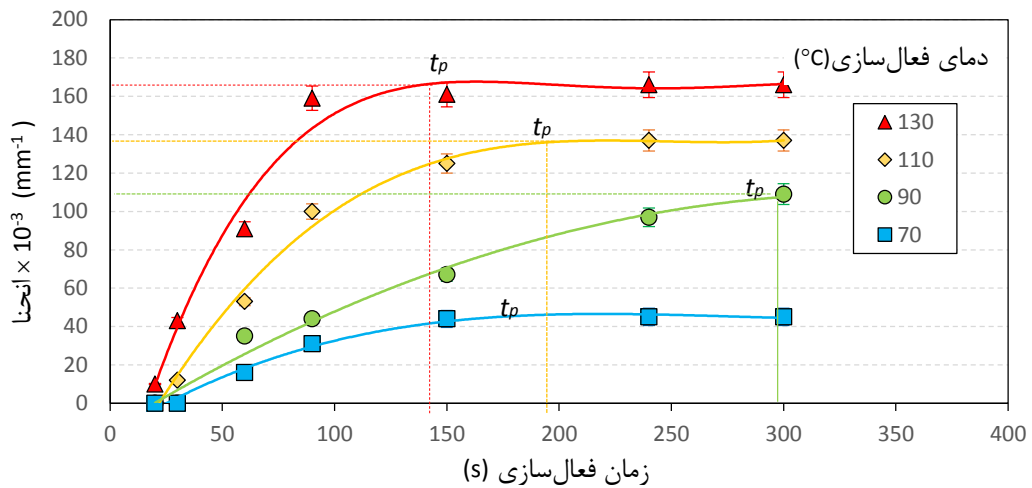
این پژوهش نشان داد که استفاده از فیلامنت‌های مختلف پلی لاکتیک اسید تاثیر به سزایی بر انحنای ساختارهای چهاربندی دارد. نتایج حاکی از تفاوت ۹ برابری میزان انحنای ساختارهای چاپ شده با استفاده از سه نوع مختلف فیلامنت داشت که به این معنی است که هر فیلامنتی به صرف پلی لاکتیک اسید بودن و یا هوشمند بودن پلیمر آن فیلامنت برای

افزایش دمای فعال‌سازی باعث کاهش ویسکوزیته‌ی پلی لاکتیک اسید شده و در نتیجه زنجیره‌های پلیمری با آزادی بیشتری حرکت می‌کنند که این امر به ریلکسیشن بهتر تنش‌های ذخیره شده 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



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

- 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.

کاربردهای چهاربعدی مناسب نیست. هرچه رفتار حرارتی فیلامنت به پلیمر خالص نزدیکتر باشد رفتار تغییرشکل 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 به‌سزایی بر میزان انحن ا داشت. افزایش دما از ۷۰ به ۱۳۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش چهار برابری انحن و سه برابری زمان اوج شد. در نهایت، افزایش سرعت چاپ از ۳۰ به ۱۲۰ میلی‌متر بر ثانیه باعث افزایش دو برابری انحن شد در حالیکه افزایش فاصله نازل از میز چاپ از ۰/۱ به ۰/۲۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۴۰ درصدی انحن 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 انحن، 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(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

- 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.
- [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.*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

I. Salimi Nezhad, M. Golzar, A. H. Behraves, 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



