



بررسی تاثیر پارامترهای چاپ سه بعدی در تغییر شکل ساختارهای مسطح به شکل های سه بعدی

مریم جمشیدی¹، ایمان سلیمی نژاد²، محمد گلزار^{3*}، امیر حسین بهروش⁴

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 111-14115، m.golzar@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

دریافت: 1399/09/05

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژگان:

الگوی چینش،
چاپ سه بعدی،
تغییر شکل،
تئوری کلاسیک لمینت،
فعال سازی حرارتی

فناوری چاپ سه بعدی یکی از روش های نوین ساخت است که می تواند برای ساخت ساختارهای تاشونده مورد استفاده قرار گیرد. ساختارهای تاشو به صورت مسطح ساخته شده و با اعمال محرک به شکل های سه بعدی تغییر شکل می یابند. فرایند لایه نشانی مذاب یکی از مرسوم ترین و ارزان ترین فرایندهای چاپ سه بعدیست که در این پژوهش موثرترین پارامترهای این فرایند مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ابتدا با طراحی آزمایش به روش تاگوچی مقادیر بهینه پارامترهای چاپ شامل الگوی چاپ، ضخامت هر لایه، درصد پر شدن و دمای نازل برای رسیدن به حداکثر تغییر شکل (انحنا) مشخص شدند. سپس با تنظیم این پارامترها، تاثیر پارامتر سرعت چاپ و ضخامت کل بر انحنا بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت چاپ انحنا افزایش و با افزایش ضخامت کل انحنا کاهش می یابد. همچنین با فرض اینکه انحنا تنها ناشی از تغییرات حرارتی است روابط با استفاده از نظریه کلاسیک لایه ای استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که تنها تغییرات حرارتی عامل ایجاد انحنا نیست و به نظر می رسد عوامل دیگری مانند تنش های پسماند و خاصیت حافظه شکلی دخیل باشند.

Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes

Maryam Jamshidi, Iman Salimi Nezhad*, Mohammad Golzar, Amir Hosein Behravesht

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

* P.O.B. 111-14115, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

Keywords

Filling Pattern,
3D printing,
shape-shifting,
CLT,
Heat Activation

Abstract

3D printing technology is one of the new manufacturing methods that can be used to build folding structures. Folding structures are made flat and deformed into three-dimensional shapes by an actuator. FDM process is one of the most common and cheap 3D printing processes that in this study, the most effective parameters of this process were investigated. For this purpose, the optimal values of printing parameters including printing pattern, thickness of each layer, filling percentage and nozzle temperature to achieve maximum deformation (curvature) were determined by Taguchi experiment design. Then, by adjusting these parameters, the effect of printing speed and total thickness on curvature was investigated. The results showed that with increasing printing speed, the curvature increases and with increasing the total thickness, the curvature decreases. Also, assuming that the curvature is only due to thermal changes, the relationships were extracted using the classical layer theory and compared with the experimental results. This comparison showed that thermal changes alone are not the only cause of curvature and other factors such as residual stresses and shape memory seem to be involved

1- مقدمه

فعال، می توان از این فناوری استفاده کرد که این قطعه ها می توانند شکل های پیچیده ای داشته باشند و در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله مزایای ساختارهای تاشو، ساخت قطعه در اندازه های بسیار کوچک می باشد، که تاشدن دستی آن امکان پذیر نیست و یا ساخت این قطعه ها با کمک روش های سنتی نتایج مطلوبی به همراه ندارد [1]. از جمله کاربردهای ساختارهای تاشو عبارتند از الکترونیک [2]، بیوتکنولوژی [3] و

فناوری چاپ سه بعدی یکی از روش های نوین ساخت می باشد، که با صرف هزینه ی کم می توان به نتایج مطلوب دست یافت. این فناوری قادر است که یک کد برنامه نویسی شده را به یک شی فیزیکی تبدیل کند. با وجود روش های مختلف ساخت افزودنی و امکان استفاده از مواد متنوع، حوزه ی این فناوری رو به توسعه و پیشرفت است. از جمله در ساخت قطعه های

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Jamshidi, M., Salimi Nezhad, I., Golzar, M., Behravesht, A. H., "Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1271-1278, 2021.

روش یک مسیر جایگزین برای ساخت قطعه‌های سه‌بعدی می‌باشد، که امکان دسترسی به سطوح قطعه‌ها و ایجاد حرکت‌های مناسب فراهم شده است. به دلیل اینکه ساختارهای تاشو به صورت خودکار تا می‌شوند این امر موجب کاهش خطر برای انسان در محیط‌های خطرناک می‌شود. به عنوان مثال ماهواره‌های مسطح بعد از رسیدن به مدار با تغییر دما تا می‌شوند و یا ساختارهای نظامی بدون حضور مهندس می‌توانند مونتاژ شوند. در این روش از محرک‌های خارجی مانند حرارت، مغناطیس، الکتروسیسته و... برای تاشدن مفصل‌ها استفاده می‌شود [15]. لیو³ با قرار دادن جوهر سیاه توسط یک چاپگر رومیزی در مفصل‌های ورق پلیمری از جنس پلی استایرن و فعال-سازی قطعه به وسیله نور غیر متمرکز یک ساختار تاشو ایجاد کرد. در این ساختار جذب نور و انتقال گرما به پلیمرهای لایه‌ی زیرین باعث تغییر شکل شده و ورق مسطح به یک ساختار سه‌بعدی تبدیل شد [15]. ماو⁴ و همکارانش موفق به ساخت قطعه‌ای با رعایت توالی تاشدن، شدند. در این روش از 7 نوع پلیمر حافظه‌شکلی با دمای انتقال شیشه‌ای متفاوت برای ساخت قطعه استفاده شده است، که با قرار دادن قطعه در حمام آب گرم مفصلی که دارای پلیمر با دمای انتقال شیشه‌ای کمتر است، زودتر تا می‌شود و به همین دلیل توالی تاشدن مفصل‌ها رعایت می‌شود و مانع از قفل شدن قطعه شده است [16]. جانباز و همکارانش با استفاده از پلیمرهای حافظه‌دار و پلیمر هایپراستیک، حالت‌های تغییر شکل ساده مانند خمش، پیچش و اعوجاج را برنامه نویسی کردند. همچنین اثر متغیرهای مختلف مانند خصوصیات حرارتی مکانیکی پلیمر هایپر الاستیک، ابعاد نوار دو یا چند لایه و دمای فعال‌سازی روی مورفولوژی شکل سه‌بعدی حاصل مورد مطالعه قرار گرفت [17]. وو⁵ و همکارانش موفق به طراحی و ساخت مواد مرکب فعال که متناسب با دمای محیط می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته باشند، شدند. این ساختار با استفاده از چاپ سه‌بعدی لایه‌های ماده مرکب با الیاف پلیمر حافظه‌شکلی متعدد و دمای انتقال شیشه‌ای متفاوت به منظور کنترل تغییر ساختار در یک زمینه لاستیکی بدست آمد. آنها نشان دادند با تنظیم میزان حجم الیاف، تغییر شکل خمشی را می‌توان کنترل کرد [18].

ون مان⁶ و همکارانش با استفاده از فرآیند چاپ سه‌بعدی و رشته پلی-لاکتیک اسید توانستند با استفاده از چاپ دوبعدی، ساختارهای سه‌بعدی بسازند. همچنین آنها موفق به چاپ قطعه‌هایی شدند که فرآیند تاشدنشان به صورت ترتیبی انجام می‌شود [19]. امروزه با توسعه پیشرفت صنعت رباتیک، ابزارهای در مقیاس کوچک و نرم جایگزین مناسبی برای مکانیزم ربات‌های معمولی شده اند. راویو⁷ پتانسیل عظیمی از ساخت افزودنی را برای ساخت قطعه‌های با هندسه پیچیده نشان داد. مونتاژ دیسک‌های صلب با مواد قابل انبساط در وسط دیسک امکان کنترل طول کشش را فراهم می‌کند. همچنین طول این قطعه‌ها با گذشت زمان در آب داغ افزایش می‌یابد [20]. فلتن⁸ و همکارانش در سال 2013 یک روش جدید ساخت ساختارهای تاشو با استفاده از پلیمرهای حافظه‌شکلی، کاغذ و مدارهای مقاومتی ارائه دادند. عملکرد مناسب و هزینه کم از نقاط قوت این روش از ساخت ساختارها با هندسه پیچیده بود [21]. تولی⁹ و همکارانش به منظور ایجاد تغییر شکل موضعی و کنترل میزان خمش قطعه، یک لایه

مهندسی مواد پیچیده [4]. با توجه به تحقیقات گسترده انجام شده بر روی پلیمرهای تخریب پذیر مانند پلی‌لاکتیک اسید¹، که خواص منحصر به فردی دارد، ادامه‌ی تحقیقات روی این پلیمر سودمند خواهد بود، زیرا این پلیمرها زیست سازگار هستند و به دلیل نرم بودن می‌توانند در ساخت بسیاری از دستگاه‌های زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار و مناسب بدن مورد استفاده قرار گیرند [15]. در میان روش‌های مختلف ساخت افزودنی روش لایه‌نشانی مذاب²، به دلیل سادگی و هزینه کم رو به توسعه و پیشرفت می‌باشد، و امروز کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلفی نظیر پزشکی، دندانپزشکی، صنایع غذایی، الکترونیک، هوافضا، معماری و... دارد. رشته‌ی پلیمری هنگام عبور از نازل تا دمایی بالاتر از دمای ذوب حرارت داده می‌شود و سپس از نازل خارج شده و روی صفحه کار قرار می‌گیرد، همچنین نازل دستگاه توسط یک سیستم کنترل عددی به صورت افقی و عمودی حرکت می‌کند [6]. از جمله ویژگی‌های مطلوب پلیمر پلی-لاکتیک اسید، دمای ذوب نسبتاً پایین آن است. به همین دلیل این پلیمر بعد از حرارت دیدن به آسانی از سر نازل خارج شده، روی صفحه‌کار دستگاه قرار می‌گیرد و شکل خود را حفظ می‌کند [7]. در هنگام چاپ قطعه با فرآیند لایه‌نشانی مذاب، اتصال میان رشته‌های پلیمری که به ترتیب روی صفحه‌کار در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، با استفاده از انرژی حرارتی مواد نیمه جامد انجام می‌شود. لذا تاریخچه‌ی دمایی رشته‌های پلیمری از عوامل مهم اتصال لایه‌ها و رشته‌ها می‌باشد [8]. در این روش به هنگام چاپ قطعه‌ها، تنش‌هایی که به دلیل حرارت پلیمر و خنک‌کاری سریع هنگام خروج از نازل در قطعه ذخیره می‌شود، به مدت طولانی در آن باقی می‌ماند. تا زمانی که قطعه مجدداً تا دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود [9]. مفهوم چاپ چهاربعدی بر پایه‌ی فهم فناوری چاپ به روش لایه‌نشانی مذاب و اثرات حافظه‌شکلی پلیمرها توسعه داده شده است. ایده اصلی چاپ به روش لایه‌نشانی مذاب با پلیمرهای حافظه‌شکلی برای ایجاد پتانسیل در طراحی و توسعه مواد است [10]. علاوه بر پلیمرها، ژل‌های پلیمری نیز در چاپ چهار بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هیدروژل‌ها به محرک‌هایی مانند دما، تغییرات PH و آب پاسخ‌گو هستند. جذب آب در هیدروژل‌ها منجر به تغییر شکل ساختارهای تاشو می‌شود [11]. استفاده از هیدروژل‌ها کاربرد گسترده‌ای ندارد. از جمله معایب این مواد محدودیت در خواص مکانیکی می‌باشد. همچنین زمان پاسخ‌گویی به محرک خارجی مانند آب بسیار طولانی می‌باشد. به عنوان مثال برای فعال‌سازی یک قطعه به ضخامت یک میلی‌متر چندین ساعت مورد نیاز است [12]. گروه دیگری از مواد فعال الاستومرهای بلوری مایع هستند. این مواد ترکیب مواد کریستالی مایع هستند که در یک شبکه پلیمری قرار گرفته‌اند [13]-[14]. به دلیل آرایش ناهمسانگرد مولکول‌ها سفتی مواد در طول بزرگتر از جهت دیگر است. زمانی که این مواد در معرض محرک‌های خارجی مانند دما و رطوبت قرار می‌گیرند آرایش مواد تغییر کرده و باعث ایجاد ناهمسانگردی و تغییرات ابعادی در قطعه می‌شود. چاپ چهاربعدی یکی از روش‌های ساده ساخت قطعه می‌باشد، که باعث ایجاد تغییر شکل‌های مورد نظر در ساختارهای مسطح بدون نیاز به صرف هزینه‌ی بالا و سیستم‌های الکترومکانیکی گران می‌شود. در این روش با حفظ ویژگی‌های چاپ سه‌بعدی، با گذر زمان بعد چهارم به منظور تکامل شکل، خواص و عملکرد قطعه فراهم می‌شود. این

¹ PLA² FDM³ Liu⁴ Mao⁵ Wu⁶ Van Manan⁷ Raviv⁸ Felton⁹ Tolly

شناخته شده است که یک روش سیستماتیک و موثر را برای طراحی بهینه فراهم می‌کند. این روش به طور گسترده برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرآیند استفاده می‌شود. این امر به خاطر مزایای روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها، شامل ساده‌سازی برنامه آزمایش و مطالعه اثر متغیرهای مختلف می‌باشد. تعداد آزمایش‌های کمتر به معنی کاهش زمان و هزینه است [23]. این موضوع مخصوصاً در مورد فرآیندهای نمونه‌سازی سریع که هزینه نسبتاً بالایی دارند صادق است. تاگوچی برای آزمایش‌ها، یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آن‌ها را ارائه می‌دهد. طبق روش تاگوچی حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌شود. جدول 1 نشان دهنده طراحی آزمایش صورت گرفته است. الگوهای چینش نشان داده شده (که عبارتند از زاویه هر لایه رسوب گذاری شده نسبت به لایه پایین آن) به صورت مداوم تا رسیدن به ضخامت 1.6 میلی‌متر تکرار می‌شوند.

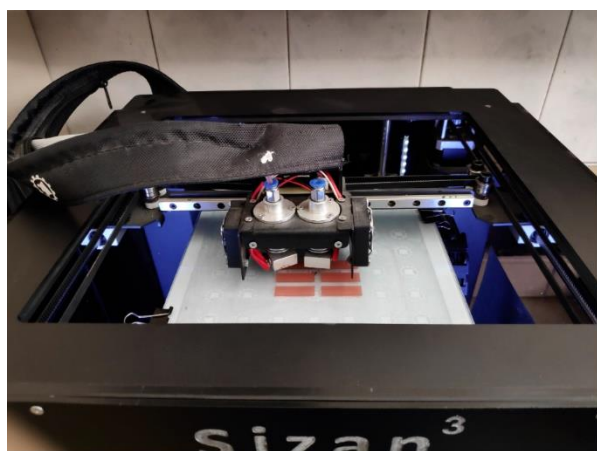


Fig. 2 Sample printing by sizan3 FDM 3D printer

شکل 2 نمایی از چاپگر سه‌بعدی سیزان 3 در حال چاپ نمونه دقت اسمی چاپ قطعات 0.02 میلی‌متر است. قطعه‌های مسطح پس از مشخص کردن پارامترهای چاپ با استفاده از نرم افزار چاپ سه بعدی Simplify 3D با روش لایه‌نشانی مذاب در دمای اتاق (دمای صفحه ساخت 25 درجه سانتیگراد) چاپ شده‌اند و سپس به منظور فعال‌سازی حرارتی در کوره قرار گرفتند. دمای کوره به وسیله‌ی ترمومتر کنترل شده است.

4- بحث در مورد نتایج

قطعه‌های سه‌بعدی که از فعال‌سازی حرارتی ساختارهای مسطح ساخته می‌شوند شامل قسمت‌های صلب و مفصل می‌باشند. در قسمت‌های صلب قطعه، باید الگوی چینشی در نظر گرفته شود که پس از فعال‌سازی حرارتی دچار تغییر شکل نشود. لذا به منظور دست‌یابی به الگوی چینش مناسب با مطالعه‌ی مقاله‌ها در زمینه قطعه‌های تاشو [19]، الگوی چینش $[0/90]_{10}$ برای قسمت‌های صلب انتخاب شد. برای مفصل‌ها با توجه به گستردگی الگوهای چینش و پارامترهای چاپ قطعه‌ها، به منظور دست‌یابی به مقادیر مناسب از پارامترها، طراحی آزمایشی مطابق بخش 3 صورت گرفت که مقادیر بهینه به منظور ساخت قطعه‌های سه‌بعدی مشخص شد. در واقع این تحلیل به منظور بررسی اثر متغیرها بر مقادیر خروجی انجام می‌شود در شکل 3- الف، الگوی چینش p_5 که نصف ضخامت قطعه الگوی صفر درجه و نصف دیگر با الگوی نود درجه پر شده است، دارای بیشترین میزان انحنای است و در واقع

پلیمر فعال را در بین دولایه غیر فعال قرار دادند. آنها با استفاده از این روش لایه فعال را مقید کردند. با اعمال محرک خارجی در محل مورد نظر تنش-هایی ایجاد می‌شود که منجر به تغییر شکل خمشی قطعه می‌شود. آنها با تنظیم اندازه گپ توانستند میزان خمش را کنترل کنند [22]. در این پژوهش همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، ابتدا نوارهای مستطیلی با الگوهای چینش در زوایای مختلف، با استفاده از فرآیند لایه-نشانی مذاب چاپ می‌شوند. سپس ساختار مسطح چاپ شده در معرض دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌لاکتیک اسید قرار می‌گیرد. با افزایش دما، قطعه از حالت صاف و دوبعدی در شکل 1-ب به آهستگی تغییر شکل می‌یابد و به شکل سه بعدی و خم شده تبدیل می‌شود (شکل 1-ج). همچنین به بررسی علت مکانیزم تغییر شکل پرداخته شده است، که بتوان میزان انحنای نمونه‌ها را قبل از فرآیند چاپ و فعال‌سازی حرارتی تا حدی پیش‌بینی کرد و به منظور استفاده از نمونه‌ها در کاربردهای متنوع بتوان پارامترهای چاپ بهینه را قبل از فرآیند ساخت پیش‌بینی کرد.

2- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از رشته‌های پلیمری پلی‌لاکتیک اسید شرکت مجیک به قطر 1.75 میلی‌متر و چاپگر سه‌بعدی سیزان 3 با قطر نازل 0.5 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 2). این دستگاه دارای سیستم حرکتی ریل واگن است که از دقیق‌ترین سیستم‌های حرکتی مورد استفاده در چاپگرهای صنعتی است.

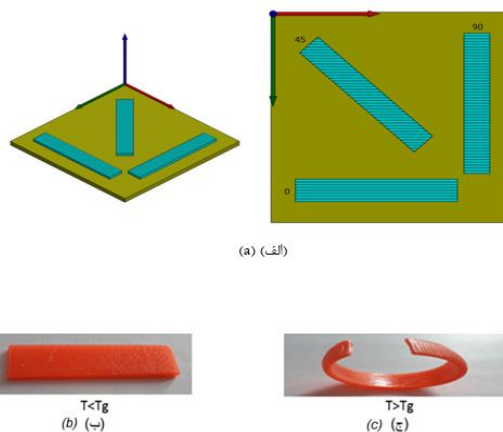


Fig. 1 (a) printing pattern for different angles, (b) printed specimen, (c) stimulated specimen

شکل 1 الف، الگوی چینش در زوایای مختلف (ب)، نمونه بعد از چاپ (ج)، نمونه بعد از فعال‌سازی حرارتی

3- طراحی آزمایش

امروزه طراحی آزمایش به طور وسیعی در زمینه‌های مختلف مهندسی برای اصلاح و افزایش عملکرد فرآیند، استفاده می‌شود. شناخت کافی نسبت به متغیرهای مورد بررسی در آزمایش، یکی از نیازهای اساسی برای شروع طراحی آزمایش است. این شناخت کمک می‌کند تا مقدار سطوح و طراحی آزمایش به درستی صورت گیرد. طراحی آزمایش در واقع ابزار تشخیص صحیح عوامل موثر و درصد تاثیرگذاری هر متغیر است. در انجام یک آزمایش متغیرهای بسیاری تاثیرگذار هستند ولی در طراحی آزمایش از عوامل با تاثیرگذاری کم صرف‌نظر می‌شود. روش تاگوچی یک تکنیک

1-4- بررسی اثر پارامترهای چاپ موثر در تغییر شکل قطعات
1-1-4 - بررسی اثر الگوی چینش

تغییرات میزان انحنای در الگوهای چینش مختلف، در شکل 4 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از الگوی p5 بیشترین مقدار تغییر شکل را الگوی p1 دارد. اختلاف بیشتر در زوایای الگوی چینش باعث افزایش اختلاف کرنش‌ها و در نتیجه تغییر شکل بیشتر شده است. همچنین الگوی چینش، جهت تنش‌های ذخیره شده در قطعه را تعیین می‌کند.

1-4-2 - بررسی اثر ضخامت با توجه به نتایج بدست آمده الگوی [08/908] عکس‌العمل بیشتری به محرک خارجی نشان می‌دهد و بیشترین انحنای را در فعال‌سازی حرارتی دارد. بدین منظور برای استفاده از این الگو در ساخت قطعه‌های سه‌بعدی نسبت‌های متفاوتی در الگوی چینش [0/90] با سه نوع ضخامت متفاوت در نظر گرفته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. شکل 5 بیانگر میزان انحنای در ضخامت‌های متفاوت است. در شکل 6 قطعات چاپ شده با ضخامت‌های 0.6، 1.2، 1.8 میلی‌متر، پس از تغییر شکل دیده می‌شود. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، از چپ به راست در هر سه قطعه با افزایش ضخامت میزان انحنای کاهش می‌یابد. همچنین الگوهایی که تعداد مساوی از الگوی چینش [0/90] را دارند و یا الگوی صفر درجه بیشتر از 90 درجه است انحنای بیشتری دارند، این امر به دلیل مسیر حرکت نازل و افزایش میزان تنش‌های ذخیره شده در قطعه است که پس از فعال‌سازی حرارتی این تنش‌ها آزاد شده و منجر به تغییر شکل بیشتر می‌شود [19]. برای ساخت قطعه‌های سه‌بعدی بسته به میزان انحنای مورد نظر در مفصل‌ها و ضخامت قطعه می‌توان از این الگوها استفاده کرد.

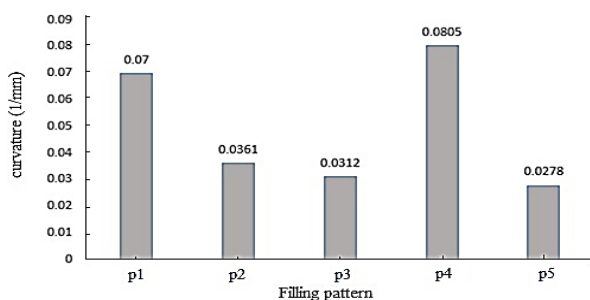


Fig. 4 The effect of filling pattern on curvature size

شکل 4 بررسی اثر الگوی چینش در اندازه انحنای

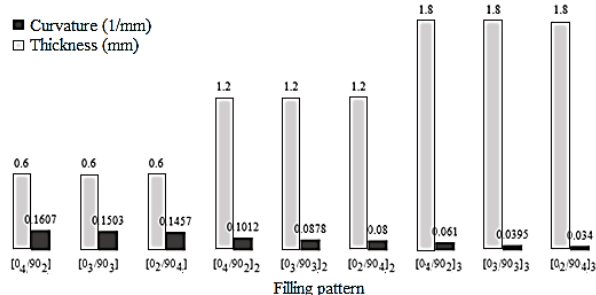


Fig. 5 curvature values for different filling patterns

شکل 5 اندازه‌ی انحنای در نسبت‌های مختلف الگوی چینش [0/90]

بیشترین پاسخ را به فعال‌سازی حرارتی داده است. میزان اختلاف کرنش‌ها در این الگوی چینش بیشتر از سایر الگوها بوده و این امر منجر به تغییر شکل بیشتر شده است. در شکل 3-ب، 100٪ پر شدن قطعه مقدار بهینه در پاسخ به محرک خارجی می‌باشد. مطابق شکل 3-ج، اگر دمای نازل 210 درجه باشد بیشترین میزان انحنای ایجاد می‌شود. در دمای پایین‌تر گرانبوی ماده بیشتر شده و در یک ارتفاع لایه ثابت گرادیان حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین دردهماهای بالا با زیاد شدن سیالیت ماده خروجی از سر نازل، ماده به اندازه‌ای روان می‌شود که بر روی سطح ماده پخش شده و اتصال ضعیف تری حاصل می‌شود و دقت ابعادی و کیفیت چاپ کاهش می‌یابد. و شکل 3-د نشان می‌دهد ضخامت لایه 0.1 مقدار بهینه در پاسخ‌گویی به فعال‌سازی حرارتی می‌باشد.

جدول 1 طراحی آزمایش به روش تاگوچی، مقادیر پارامترها

Table 1 Tagouchi design of experiment parameter, parameter values

شماره الگوها	الگوی چینش	درصد پر شدن	دمای نازل (°C)	ضخامت لایه (mm)	انحنای (m ⁻¹)
p ₁	[0/+45/-45]	100	190	0.1	70
p ₁	[0/+45/-45]	85	210	0.15	44
p ₁	[0/+45/-45]	70	230	0.2	23
p ₂	/ concentric/0	100	190	0.15	31
p ₂	/ concentric/0	85	210	0.2	18
p ₂	/ concentric/0	70	230	0.1	11
p ₃	[0 ₄ /90 ₄]	100	210	0.1	32
p ₃	[0 ₄ /90 ₄]	85	230	0.15	5
p ₃	[0 ₄ /90 ₄]	70	190	0.2	22
p ₄	[30 ₂ /45 ₂]	100	230	0.2	7
p ₄	[30 ₂ /45 ₂]	85	190	0.1	25
p ₄	[30 ₂ /45 ₂]	70	210	0.15	14
p ₅	[0 ₈ /90 ₈]	100	210	0.2	84
p ₅	[0 ₈ /90 ₈]	85	230	0.1	55
p ₅	[0 ₈ /90 ₈]	70	190	0.15	31
p ₆	[0] ₁₆	100	230	0.15	14
p ₆	[0] ₁₆	85	190	0.2	26
p ₆	[0] ₁₆	70	210	0.1	21

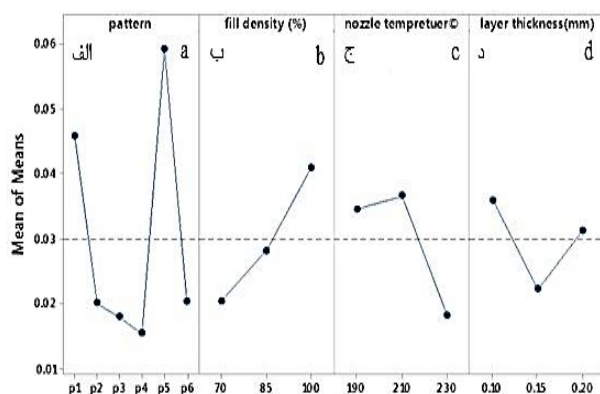


Fig. 3 software analysis results: a) filling pattern, b) fill density, c) nozzle temperature and d) layer thickness

شکل 3 تایید تحلیل نرم افزاری (الف) الگوی چینش، (ب) درصد پر شدن، (ج) دمای نازل، (د) ضخامت هر لایه

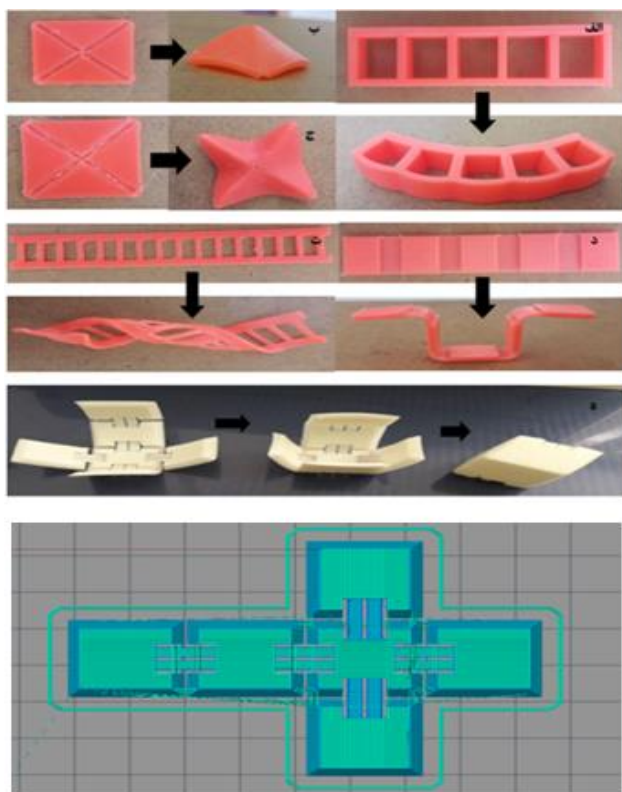


Fig. 8 By applying a different printing pattern in certain areas of each structure and thermally actuate it, desired shape shifting would be reached

شکل 8 اعمال الگوی چینش متفاوت در بخش‌های خاصی از هر قطعه و فعال‌سازی حرارتی آن، می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های مورد نظر بدون دخالت دست شود.

2-4- بررسی اثر پارامترهای چاپ موثر در تغییر شکل قطعات

پس از تهیه‌ی 3 نمونه منطبق بر استاندارد ASTM-D638- (type IV) 02a [24] نمونه‌ها توسط دستگاه کشش 2 تن santam-20 با سرعت 2 mm/min تحت آزمایش کشش تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون کشش در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای شکل 9 مشخص است مدول الاستیک الگوی چینش 90 درجه، 2.1 گیگاپاسکال و مدول الاستیک الگوی چینش صفر درجه، 1.9 گیگاپاسکال است.

همچنین همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است، دو نوع نمونه به ابعاد 2*30*30 میلی‌متر که با الگوی صفر و نود درجه پر شده اند، چاپ شد و میزان کرنش در دو جهت با استفاده از روش DIC در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری شد. به منظور اطمینان از نتایج آزمایش از هر نمونه 3 عدد چاپ شد. سرعت چاپ در این آزمایش 60 میلی‌متر بر ثانیه است.

در این قسمت فرض شده است که انحنا، ناشی از تنش‌های داخلی (روش ساخت، حرارتی، مکانیکی و ...) است. انحنا هر نمونه با استفاده از روشی مشابه DIC به دست آمد که در شکل 10 نشان داده شده است. پس از اندازه‌گیری انحنا نمونه‌ها، با استفاده از روابط CLT برای مواد مرکب و با فرض اینکه لایه نشانی مذاب لایه‌های ناهمسانگردی دارند، ماتریس $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}$ برای نسبت‌های مختلف الگوی چینش [0/90] محاسبه شد و سپس ممان



Fig. 6 thermally actuated specimens

شکل 6 نمونه‌های مستطیلی پس از فعال‌سازی حرارتی
3-1-4- بررسی اثر سرعت چاپ

به منظور بررسی اثر سرعت چاپ در میزان تغییر شکل، الگوی چینش $[0_3/90_3]$ در نظر گرفته شد و قطعه‌ها با سه سرعت متفاوت چاپ شدند. نتایج حاصل از این آزمایش همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، بیان می‌کند که با افزایش سرعت چاپ، انحنا افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت چاپ PLA مذاب با سرعت بیشتری سرد می‌شود و پلیمر زمان کمتری برای استراحت دارد و در نتیجه تنش بیشتری در قطعه ذخیره می‌شود. بعلاوه، افزایش سرعت چاپ، باعث کشش بیشتر رشته‌های مذاب PLA می‌شود و در نتیجه تنش کششی بیشتری در نمونه ذخیره می‌شود که این به معنی انقباض (کرنش) بیشتر نمونه در حین فعال‌سازی است [17]، [19]. با استفاده از نتایجی که از آزمایش قطعه‌های مستطیلی با ویژگی‌های متفاوت بدست آمد، پارامترهای مناسب که در ادامه مشخص شده اند، به منظور چاپ اشکال سه‌بعدی انتخاب شد. در این بخش چندین قطعه همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است پس از چاپ به صورت مسطح در معرض فعال‌سازی حرارتی قرار گرفتند و تبدیل به اشکال سه‌بعدی مورد نظر شدند. برای این منظور قسمت‌های خاصی از قطعات که به آنها مفصل نیز گفته می‌شود با تنظیم میزان بهینه پارامترهای ضخامت، سرعت چاپ، الگوی چینش و ... که از بخش‌های قبل به دست آمد چاپ شدند تا پس از تحریک به انحنا مورد نظر برسند. به عنوان نمونه فایل جی کد قطعه مکعبی در شکل 8، آورده شده است. در این قطعه الگوی چینش در قسمت‌های صلب $[0/90]_{10}$ می‌باشد و الگوی چینش مفصل‌ها $[0_7/90_7]$ است. همچنین مقادیر بهینه سایر پارامترها که برای مفصل‌ها و قسمت‌های صلب یکسان است عبارتند از: دمای نازل 210 درجه، درصد پر شدن 100٪، ضخامت هرلایه 0.1 میلی‌متر و سرعت چاپ 60 میلی‌متر بر ثانیه است.

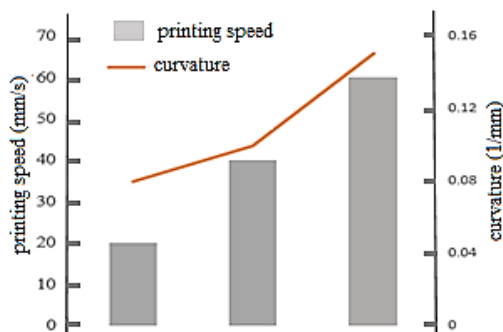


Fig. 7 curvature changes for different printing speeds

شکل 7 تغییرات اندازه انحنا در سرعت‌های چاپ متفاوت

نمونه واقعی و نمونه طراحی شده به کمک شاخص، 4- اعمال انحنای به نمونه طراحی شده تا زمانی که بر روی نمونه واقعی فیت شود

جدول 3 مقادیر ممان خمشی محاسبه شده

Table 3 measured moments

M _X (N)	K _{XY}	K _Y	K _X (m ⁻¹)	ضخامت (mm)	الگوی چینش
7	0	0	160±8	0.6	[0 ₄ /90 ₂]
6.6	0	0	150±8	0.6	[0 ₃ /90 ₃]
6.4	0	0	146±7	0.6	[0 ₂ /90 ₄]
35.2	0	0	100±5	1.2	[0 ₄ /90 ₂] ₂
30.9	0	0	88±5	1.2	[0 ₃ /90 ₃] ₂
28.1	0	0	80±4	1.2	[0 ₂ /90 ₄] ₂
46	0	0	39±2	1.8	[0 ₄ /90 ₂] ₃
44.5	0	0	39±2	1.8	[0 ₃ /90 ₃] ₃
40.4	0	0	34±2	1.8	[0 ₂ /90 ₄] ₃

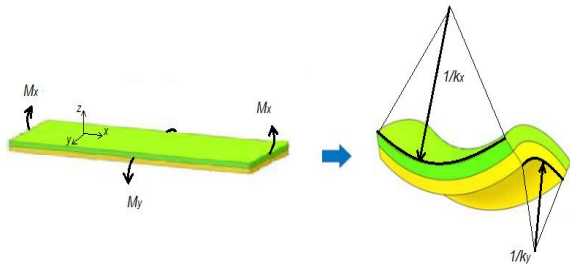


Fig. 11 schematic of momentums and curvatures in x and y directions

شکل 11 شماتیک ممانها و انحناها در راستای محورهای X و Y

3-4- محاسبه انحنا

با فرض اینکه مقدار کرنش حرارتی مساوی مقدار کرنش اندازه گیری شده در قسمت قبل می باشد، با استفاده از رابطه 3 می توان ممان حرارتی را محاسبه نمود و با استفاده از مقادیر بدست آمده میزان تغییر شکل ایجاد شده در قطعه ناشی از حرارت را محاسبه کرد. در واقع در این قسمت فرض می کنیم تنها ممان حرارتی باعث ایجاد انحنا در قطعه می شود. اختلاف دما 70 درجه در نظر گرفته شده و ضرایب انبساط حرارتی معادل، از رابطه 2 محاسبه شده است.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^T \\ \epsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{bmatrix} = \Delta T \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[M^T] = \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \Delta T \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3)$$

در نمودار شکل 12 مقادیر M_{total} یعنی ممانی که باعث ایجاد انحنای نمونه های آزمایش شده و مقادیر M_T یعنی ممان حرارتی برای الگوهای مختلف باهم مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد که این فرض که تنها ممان حرارتی عامل ایجاد انحناست غیر واقعی و ناکافی است و باید

خمشی برآیند ناشی از تنش های داخلی مطابق رابطه 1 محاسبه شد. در جدول 3 مقادیر

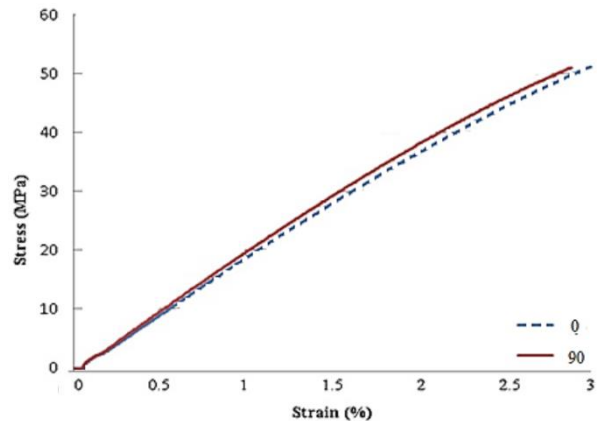


Fig. 9 0 and 90° filling pattern stress-strain curves

شکل 9 نمودار تنش کرنش الگوی چینش نود و الگوی چینش صفر درجه

جدول 2 کرنش های اندازه گیری شده

Table 2 measured strains

جهت گیری رشته ها	ε ₂	ε ₁
0	0.048	-0.197
90	-0.197	0.048

ممان خمشی ایجاد شده در قطعه ها با الگوها و ضخامت های مختلف محاسبه شده است. مطابق شکل 11 K_x انحنا در راستای محور x، K_y انحنا در راستای محور Y، M_x گشتاور حول محور Y و M_y گشتاور حول محور X است. با توجه به اینکه عرض قطعه (ابعاد در راستای محور Y) بسیار کمتر از طول قطعه (ابعاد در راستای محور X) است، بنابراین از خمش در راستای محور Y صرف نظر کرده و در ادامه متن فقط M_x و K_x بررسی می شوند.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

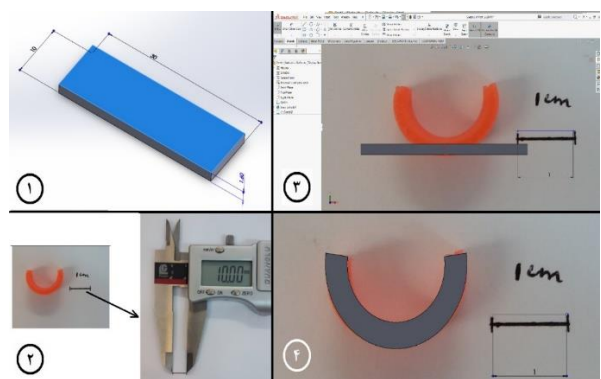


Fig. 10 specimen curvature measurement: 1-Designing a virtual specimen using CAM software, 2- taking a photo of real specimen along with a gauge, 3- importing the photo to the CAM software and scaling it to match the virtual specimen, 4- applying curvature to the virtual specimen so that it fits the real specimen

شکل 10 مراحل اندازه گیری انحنای نمونه: 1- طراحی نمونه در نرم افزارهای CAM، 2- عکس برداری از نمونه ی واقعی به همراه یک شاخص دقیق، 3- وارد کردن عکس نمونه به نرم افزار و یکسان سازی

عوامل ایجاد انحنای شناسایی شوند. در مطالعات بعدی هدف توسعه مدلی مناسب جهت پیش‌بینی انحنای این قطعات است.

یکی از مهمترین عوامل تغییرشکل در قطعات ضخیم، تنش حرارتی می‌باشد.

مشخص شد که تنها تنش‌های حرارتی عامل خمش قطعات نیستند و عوامل مانند خاصیت حافظه شکلی و تنش پسماند نیز در ایجاد انحنای و خمش موثراند که در مطالعات بعدی به بررسی و مدلسازی این عوامل پرداخته می‌شود.

6- مراجع

- [1] Na, J.H., et al., "Programming reversibly self-folding origami with micropatterned photo-crosslinkable polymer trilayers," *Advanced Materials journal*, Vol. 1, No. 27, pp. 79-85, 2015.
- [2] Gracias, D.H., et al., "Forming electrical networks in three dimensions by self-assembly," *science journal*, Vol. 289, No. 5482, pp. 1170-1172, 2000.
- [3] Randall, C.L., Gultepe, E., and Gracias, D.H., "Self-folding devices and materials for biomedical applications," *Trends in biotechnology journal*, Vol. 3, No. 30, pp. 138-146, 2012.
- [4] Xia, F., et al., "Two-dimensional material nanophotonics," *Nature Photonics journal*, Vol. 8, No. 12, pp. 899-914, 2014.
- [5] Hu, J., et al., "Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications," *Progress in Polymer Science journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1720-1763, 2012.
- [6] Hopkinson, N., Hague, R. and Dickens, P., "Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age," *John Wiley & Sons*, pp. 356-357, 2006.
- [7] Allen, R.J. and Trask, R.S., "An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot," *Additive Manufacturing journal*, Vol. 8, pp. 78-87, 2015.
- [8] Bellehumeur, C., et al., "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 6, No. 2, pp. 170-178, 2015.
- [9] Lee, A.Y., An, J. and Chua, C.K., "Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials," *Engineering journal*, Vol. 3, No. 5, pp. 663-674, 2017.
- [10] Bodaghi, M., Damanpack, A. and Liao, W., "Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing," *Materials & Design journal*, Vol. 135, pp. 26-36, 2017.
- [11] Ionov, L., "Hydrogel-based actuators: possibilities and limitations," *Materials Today*, 17(10): p. 494-503, 2014.
- [12] Jeon, S.-J., Hauser, A.W. and Hayward, R.C., "Shape-morphing materials from stimuli-responsive hydrogel hybrids," *Accounts of chemical research journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 161-169, 2017.
- [13] Woltman, S.J., Jay, G.D. and Crawford, G.P., "Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications," *Nature materials journal*, Vol. 6, No. 12, pp. 929-938, 2007.
- [14] Ohm, C., Brehmer, M., and Zentel, R., "Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors," *journal of Advanced Materials*, Vol. 22, No. 31, pp. 3366-3387, 2010.
- [15] Liu, Y., et al., "Self-folding of polymer sheets using local light absorption," *Soft matter journal*, Vol. 8, No. 6, pp. 1764-1769, 2012.
- [16] Mao, Y., et al., "Sequential self-folding structures by 3D printed digital shape memory polymers," *Scientific reports journal*, pp. 13616-13628, 2015.
- [17] Janbaz, S., Hedayati, R. and Zadpoor, A., "Programming the shape-shifting of flat soft matter: from self-rolling/self-twisting materials to self-folding origami," *Materials Horizons journal*, Vol. 3, No. 6, pp. 536-547, 2016.
- [18] Wu, J., et al., "Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers," *Scientific reports journal*, pp. 24224-24238, 2016.

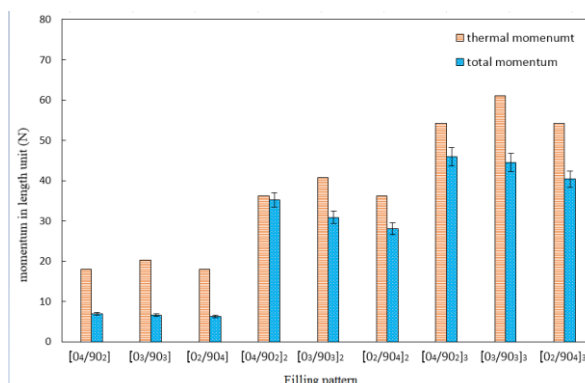


Fig. 12 Comparison of total and thermal momentums for different filling patterns

شکل 12 مقایسه ممان کل و ممان حرارتی برای الگوهای چینش مختلف

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

- چاپ قطعه‌ها با الگوی چینش مختلف نشان داد که علت مکانیزم تاشدن تنش‌هایی است که در هنگام چاپ مواد به دلیل حرارت و چرخه خنک-کاری سریع و فشار ناشی از لایه‌های موجود در قطعه انباشته می‌شود. بعد از کامل شدن فرآیند چاپ، تنش‌های داخلی به مدت طولانی در مواد چاپ شده باقی می‌ماند تا زمانی که قطعه در دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود، با گرم شدن تنش‌های درونی در قطعه آزاد می‌شوند که منجر به تغییرشکل قطعه می‌شود. با ایجاد گرادین تنش در طول ضخامت ماده، یک گشتاور خمشی ایجاد می‌شود که باعث تغییرشکل خمشی خارج از صفحه می‌شود. الگوی چینش جهت تنش‌های ذخیره شده در ماده را تعیین می‌کند که منجر به تغییر شکل موردنظر خواهد شد.
- میزان بهینه چهار پارامتر الگوی چاپ، دمای نازل، ضخامت هر لایه و درصد پر شدن برای رسیدن به حداکثر انحنای به دست آمد که به ترتیب عبارتند از: $[0_n/90_n]$ ، 210 درجه سانتیگراد، 0.1 میلیمتر و 100٪.
- بررسی اثر ضخامت در اندازه‌ی خم قطعه نشان داد که با افزایش ضخامت، اندازه انحنای کاهش می‌یابد. که علت آن افزایش مقاومت خمشی با افزایش ضخامت می‌باشد.
- ساخت قطعه با سرعت‌های متفاوت نشان داد که با افزایش سرعت چاپ میزان تغییرشکل بیشتر می‌شود، سرعت از جمله پارامترهای موثر در فرآیند فعال‌سازی حرارتی ساختارهای مسطح می‌باشد، سرعت بیشتر بارگذاری مکانیکی بیشتری را فراهم می‌کند و تنش‌ها ذخیره شده در قطعه بیشتر می‌شود. لذا در سرعت‌های چاپ بالاتر تغییرشکل قطعه بیشتر خواهد بود.
- نتایج حاصل از تست کشش نشان داد که مدول الاستیک قطعه با الگوی چینش صفر درجه و الگوی چینش نود درجه تقریباً یکسان است. همچنین مقایسه انحنای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نشان داد که

- [19] van Manen, T., Janbaz, S. and Zadpoor, A.A., "Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers," *Materials Horizons journal*, Vol. 4, No. 6, pp. 1064-1069, 2017.
- [20] Raviv, D., et al., "Active printed materials for complex self-evolving deformations," *Scientific reports journal*, 2014. 4: p. 7422. Vol. 4, pp. 7422-7429, 2014.
- [21] Felton, S.M., et al., "Self-folding with shape memory composites," *journal of Soft Matter*, Vol. 9, No. 32, pp. 7688-7694, 2013.
- [22] Tolley, M.T., et al., "Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating," *Smart Materials and Structures journal*, 2014. 23(9): p. 094006. Vol. 23, No. 9, 2014.
- [23] Yang, W.p. and Tarng, Y., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of materials processing technology*, Vol. 84, No. 3, pp. 122-129, 1998.
- [24] ASTM D 638 -02a, "Standard test method for tensile properties of plastics," 2003.