

تحلیل تجربی و شبیه‌سازی تاثیر پارامترهای هندسی چاپ سه‌بعدی

بر روی بازیابی شکلی پیچشی پلیمر پلی لاکتیک اسید

محمدهادی حسین‌زاده^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مجید فریسی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

کیوان نارویی^۳

دانشکده مهندسی و علم مواد

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

ساخت افزایشی یکی از فرآیندهای ساخت پیشرفته است که امروزه به دلیل ساخت قطعات با ساختارهای پیچیده، سرعت و هزینه پایین تولید، در حال توسعه و گسترش است. چاپ سه بعدی قطعات حافظه‌دارشکلی در قالب چاپ چهاربعدی، پدیده‌ای نوظهور در این عرصه است که به عنوان آینده ساخت افزایشی از آن یاد می‌شود. در این پژوهش، اثر پارامترهای فرآیند لایه نشانی ذوبی شامل ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل بر میزان بازیابی شکلی پیچشی قطعه چاپ شده بر پایه ماده پلی لاکتیک اسید، بررسی شد. برای کاهش هزینه و زمان همچنین بالا بردن اعتبار و دقت، از روش طرح مرکب مرکزی یکی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ استفاده گردید. تعداد ۱۷ آزمایش انجام شد و مدلی برای تعیین اثر پارامترهای هندسی چاپ سه بعدی بر میزان تغییرشکل بازیابی بدست آمد. R^2 و R^2 Adj مدل به ترتیب بالاتر از ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل و تشابه داده‌های آزمایشگاهی و مدل تجربی است. این مدل نشان داد که ضخامت لایه‌ها، قطر نازل و سرعت چاپ به ترتیب اثرگذاری بیشتری در میزان بازیابی شکلی پیچشی دارند. برای بررسی رفتار بازیابی شکلی، این فرآیند شبیه‌سازی شد و رابطه بین زاویه پیچش بازیابی شده و پیش‌تنش اعمالی در فرآیند چاپ بدست آمد. برای صحت‌سنجی مدل، اثر پارامترهای چاپ سه بعدی بر میزان بازیابی شکلی و رابطه پیش‌تنش با میزان بازیابی شکلی، زاویه پیچش دلخواه ۲۰۰ درجه در نظر گرفته شد که پس از آزمایش تجربی خطای مدل ۲ درصد محاسبه شده و نتایج شبیه‌سازی منطبق با رفتار حافظه شکلی قطعه بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: چاپ سه بعدی، لایه نشانی ذوبی، پلیمرهای حافظه‌شکلی، طرح مرکب مرکزی، شبیه‌سازی عددی.

Experimental and Numerical Study on the Effect of 3D Printing Geometrical Parameters on the Torsional Shape Recovery Behavior of Polylactic Acid

Mohammadhadi Hosseinzadeh

Mechanical Engineering
Department

K. N. Toosi University of Technology

Majid Ghoreishi

Mechanical Engineering
Department

K. N. Toosi University of
Technology

Keivan Narooei

Materials Science and Engineering
Department

K. N. Toosi University of
Technology

ABSTRACT

Additive manufacturing is one of the advanced manufacturing processes that is being developed nowadays due to the capability of manufacturing parts with complex structures, speed, and low production cost. 3D printing of shaped memory parts in the form of 4D printing is an emerging phenomenon, which is referred to as the future of additive manufacturing. In this study, the effect of three-dimensional printing fusion layer parameters including layer thickness, print speed, and nozzle diameter on the rate of shape recovery of Polylactic acid was investigated. To reduce the cost and time as well as to increase the validity and accuracy, the Central Composite Design method, one of the subsets of the Response Surface Methodology, was used. Seventeen experiments were performed and a model was obtained to determine the effect of 3D printing geometrical parameters on shape recovery. R^2 and $Adj R^2$ of the model were obtained above of 0.99 and 0.98, respectively, which indicate the high accuracy of the model and the similarity of laboratory data and experimental model. This model showed that the layer thickness, nozzle diameter, and printing speed have a greater effect on the amount of torsional shape recovery, respectively. This process was simulated to investigate the shape recovery behavior. As a result, the relationship between the recovered shape torsion angle and the applied pre-stress was obtained. To validate the model, the effect of 3D printing parameters on the shape recovery, and the relationship between the pre-stress and the rate of shape recovery, the desired torsion angle of 200 degree was considered. The model error for the experiment was calculated as 2% and the simulation results were obtained in accordance with the shape memory behavior of the sample.

Keywords: 3D Printing, Fused Deposition Modeling, Shape Memory Polymer, Central Composite Design, Numerical Simulation.

۱- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): m.hadi.hosseinzadeh@gmail.com

۲- استاد: ghoreishi@kntu.ac.ir

۳- استادیار: knarooei@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت افزایشی^۱ که به عنوان چاپ سه بعدی نیز شناخته می‌شود، برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ ابداع شد [۱] و پس از آن به سرعت جایگاه خود را در صنایع مختلفی چون هوافضا [۲]، خودروسازی [۳]، رباتیک [۴]، صنایع غذایی [۵] و پزشکی [۶] پیدا کرده است. این روش جزء فرآیندهای ساخت پیشرفته محسوب می‌شود و به علت مزایایی از جمله سرعت تولید بالا، مقرون به صرفه بودن، ساخت قطعات پیچیده جایگزین برخی از روش‌های سنتی ساخت و تولید شده است [۷، ۱]. در سال ۲۰۱۳ دانشگاه MIT از پدیده‌ای جدید در این عرصه، به عنوان چاپ چهاربعدی رونمایی کرده است [۸]. این نوع از چاپ به صورت تک ماده یا چند ماده امکان پذیر است که با استفاده از مواد حافظه‌شکلی و یا ترکیبی از این مواد و مواد عادی انجام می‌شود. تفاوت چاپ چهار بعدی با چاپ‌های سه بعدی مرسوم امکان تغییر شکل قطعات چاپ شده به روش چاپ چهاربعدی بعد از چاپ است. در واقع با تحریک توسط محرک‌های خارجی در طول زمان می‌توان تغییر شکل مورد نظر را از این قطعات دریافت نمود [۹]. این ویژگی امکان مونتاژ خودکار^۲، خود ترمیمی^۳ و چندکاره‌ای^۴ را به صورت وابسته به زمان و مستقل از چاپگر، به محققین خواهد داد [۹]. در واقع چاپ چهاربعدی به گونه‌ای آینده ساخت افزایشی است [۱۰].

پلیمرهای حافظه‌شکلی^۵ دسته‌ای خاص از مواد هوشمند هستند که توانایی به خاطر سپردن شکل موقت در خود را دارند و پس از آن توسط محرک‌های خارجی چون دما، نور، میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی تحریک شده و به شکل اولیه خود باز می‌گردند [۱۱، ۱۲]. این نوع از مواد حافظه‌شکلی قابلیت چاپ سه بعدی شدن را دارند که در شرایط خاص می‌توان به فرآیند چاپ چهار بعدی تبدیل شوند [۱۳، ۱۴]. در چاپ چهاربعدی، فرآیند به خاطر سپردن شکل خاص در پلیمرهای حافظه‌شکلی، در حین فرآیند چاپ انجام می‌شود که مزایای مختلفی چون چاپ

ساختارهای هندسی ساده و سپس تحریک آن و تغییر شکل به شکل‌های پیچیده را دارد [۱۵].

چاپ چهاربعدی پلیمرهای حافظه‌شکلی با روش لایه‌نشانی ذوبی فناوری نوظهوری است که در عین ارزان بودن، سهولت در استفاده و در دسترس بودن، کاربردهای فراوان و متنوعی دارد. از این رو محققان متعددی مطالعاتی بر روی اثر پارامترهای فرآیند چاپ سه بعدی لایه نشانی ذوبی^۶ بر نوع تغییر شکل نهایی در این پلیمرها را انجام داده‌اند [۱۶، ۱۷]. با توجه به اهمیت پیش‌گرنش^۷ ذخیره شده در رشته چاپ شده که عامل بازیابی شکلی پس از اعمال محرک است، در بسیاری از تحقیقات اخیر عوامل مؤثر بر میزان پیش‌گرنش ذخیره‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۸]. وو^۸ و همکاران [۱۹] در تحقیقی اثرات ارتفاع لایه، جهت‌گیری چاپ، دمای تغییر شکل و دمای بازیابی شکل بر روی نسبت بازیابی شکل و حداکثر سرعت بازیابی شکلی پلی لاکتیک اسید چاپی به روش لایه‌نشانی ذوبی را بررسی کردند. آن‌ها همچنین میزان اثرگذاری این پارامترها را با یکدیگر مقایسه کردند و حالت بهینه نسبت بازیابی شکلی را به دست آوردند. مانن^۹ و همکاران [۲۰] در تحقیقی اثر ارتفاع لایه و دمای نازل را بر مقدار پیش‌گرنش ذخیره‌شده در رشته‌ی چاپ شده بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که میزان پیش‌گرنش ذخیره شده در رشته با دمای نازل و ارتفاع لایه رابطه عکس دارد. در همین راستا بوداگی و همکاران [۲۱] سازوکار^{۱۰} خود تاشو از نظر پارامترهای ساخت مانند سرعت چاپ و دمای مایع که بر روند برنامه ریزی لایه به لایه و تغییر شکل نهایی تأثیر می‌گذارد، بررسی کردند. جی اف هو^{۱۱} و همکاران [۲۲] در همان سال با الهام از بناهای معماری نمونه‌هایی از روش چاپ چهاربعدی فرآیند لایه‌نشانی ذوبی چاپ کردند و به روش اجزای محدود نتایج تجربی را صحت‌سنجی کردند. بوداگی و همکاران [۲۳] ساختارهای پیچیده با ویژگی‌های خود خمش^{۱۲}، شکل‌گیری^{۱۳} و غلتش^{۱۴} ساخته شده توسط

⁶ Fused Deposition Modeling (FDM)

⁷ Pre-strain

⁸ Wu

⁹ Manen

¹⁰ Mechanism

¹¹ G.F. Hu

¹² Self-bending

¹³ Morphing

¹⁴ Rolling

¹ Additive manufacturing (AM)

² Self-assembly

³ Self-repair

⁴ Multi-functionality

⁵ Shape memory polymer

چرخه ترمومکانیکی پلیمرهای حافظه‌شکلی را نشان می‌دهد که قطعه پس از چاپ به کمک چاپگر سه بعدی (مرحله ۱)، گرم شده تا به دمای انتقال شیشه‌ای^۳ (T_g) یا بالاتر از آن برسد (مرحله ۲). در این حالت با اعمال تنش خارجی تغییرشکل مورد نظر در قطعه اعمال می‌شود (مرحله ۳). در مرحله بعد بدون برداشتن تغییرشکل دمای قطعه به پایین دمای انتقال شیشه‌ای انتقال می‌یابد (مرحله ۴) و سپس در این حالت تنش خارجی برداشته می‌شود و قطعه تغییرشکل ثانویه ایجاد شده در خود را، حفظ می‌نماید (مرحله ۵). در نهایت قطعه با گرمایش مجدد تا دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) یا بالاتر، به شکل اولیه خود باز می‌گردد (مرحله ۶). در چاپ چهار بعدی، فرآیند برنامه‌ریزی کردن^۴ پلیمرهای حافظه‌شکلی در هنگام چاپ سه بعدی اعمال می‌شود. یعنی با تغییر پارامترهای روش لایه‌نشانی ذوبی عملیات برنامه‌ریزی کردن به گونه‌ای در پلیمرهای حافظه‌شکلی اعمال می‌شود که قطعه ساخته شده اگر در دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) یا بالاتر از آن قرار گیرد به شکل مدنظر و کنترل شده باز می‌گردد.

شکل ۲ فرآیند برنامه‌ریزی پلیمر حافظه‌شکلی به کمک فناوری ساخت افزایشی لایه‌نشانی ذوبی را نشان می‌دهد که در این پژوهش از آن استفاده شده است. زمانی که ماده (فیلامنت) از نازل عبور می‌کند دمای آن تا بالای دمای T_g افزایش می‌یابد. در این حالت به علت سرعت بالای حرکت نازل، رشته‌های اکستروژن شده بر روی میز دستگاه یا لایه‌های پایین‌تر در جهت چاپ کشیده شده و تنش کششی بر روی آن اعمال می‌شود (شکل ۲ الف) [۲۳]. در ادامه این رشته‌ها در تعامل با محیط، سرد می‌شوند و دمای آن به پایین دمای T_g می‌رسد. به علت سرعت بالای سرد شدن، تنش کششی اعمال شده به رشته‌ها ذخیره می‌شود (شکل ۲ ب). این تنش کششی ذخیره شده در فرآیند چاپ باعث می‌شود پیش کرنش کششی در رشته‌ها ایجاد شود.

فناوری چاپ چهاربعدی معرفی کرده و سپس تکرار رفتارهای ترمومکانیکی آن‌ها با استفاده از یک ابزار محاسباتی را انجام داده‌اند. یوژوان یو^۱ و همکاران [۲۴] پژوهشی را از طرح ساختار ترکیبی ساخته شده از دو ماده پلی لاکتیک اسید و پلی لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کربن^۲ را برای افزایش مقاومت ساختاری مصنوعات تولید شده توسط چاپ چهاربعدی را ارائه دادند.

با توجه به اهمیت پارامترهای چاپ سه بعدی در تغییر شکل بازیابی شده پس از ساخت قطعات، در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ و قطر نازل در فرآیند چاپ سه بعدی لایه‌نشانی ذوبی بر تغییرشکل بازیابی شده قطعات پس از چاپ و اعمال تحریک خارجی، پرداخته شد. در این بررسی برای کاهش هزینه و زمان همچنین بالا بردن اعتبار و دقت از طرح مرکب مرکزی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ استفاده شد. به کمک این روش علاوه بر بررسی اثر پارامترها، اثر تعاملی بین آن‌ها و میزان تاثیر هر یک، در یک مدل تجربی محاسبه شد. این مدل می‌تواند تغییرشکل ذخیره شده در فرآیند چاپ سه بعدی را پیش‌بینی نماید که خلاء تحقیقات گذشته است. اهمیت و ضرورت آن هم به این دلیل است که پیش‌بینی و کنترل رفتار حافظه‌شکلی پس از ساخت نمونه‌ها می‌تواند کارایی چاپ چهاربعدی را بیش از پیش نمایان سازد. شرایط ساخت نمونه‌ها در این تحقیق به گونه‌ای انجام شد که تغییرشکل بازیابی نمونه‌ها پس از چاپ و اعمال تحریک خارجی، به صورت پیچشی است. در این پژوهش برای تعیین رفتار بازیابی پیچشی از شبیه‌سازی عددی استفاده شد که بدین منظور پیش‌تنش‌های وارده در فرآیند چاپ سه بعدی بدست آمد و همچنین برای اطمینان از نتایج حاصل شده، آزمایش صحت‌سنجی شد.

۲- آماده‌سازی نمونه

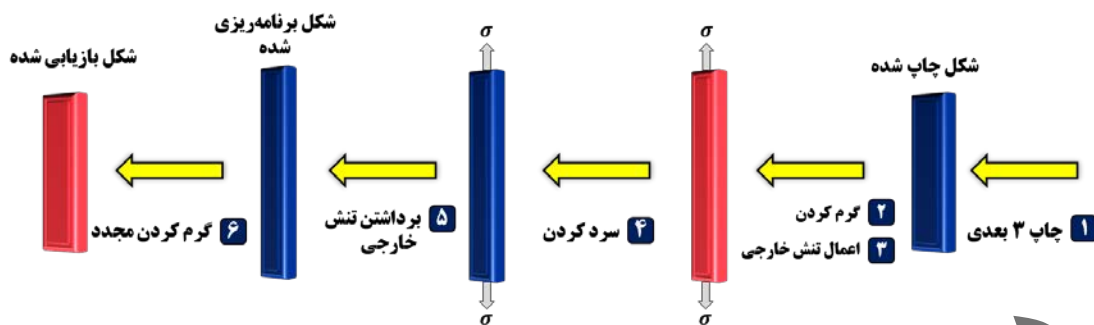
همانطور که اشاره شد پلیمرهای حافظه‌شکلی دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که می‌توانند با تحریک محیطی مانند دما تغییر شکل دهند. ساخت پلیمرهای حافظه‌شکلی به کمک چاپ سه بعدی این امکان را می‌دهد تا بتوان شکل‌های پیچیده با کیفیت بالا را تولید نمود [۲۵]. شکل ۱

³ Glass transition temperature

⁴ Programming process

¹ Yuxuan Yu

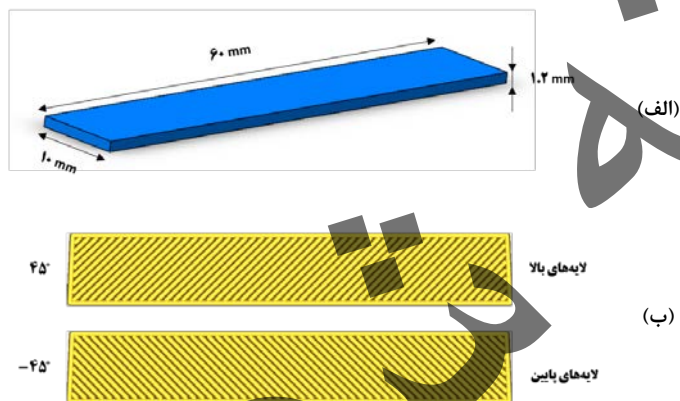
² CFPLA



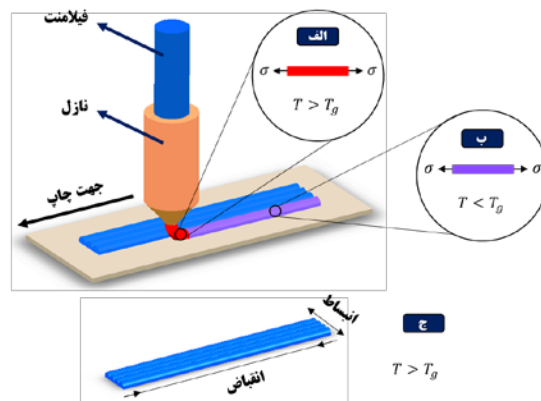
شکل ۱: چرخه بازیابی شکلی پلیمر حافظه‌شکلی چاپ شده توسط چاپگر ۳ بعدی.

پژوهش رشته‌های پلی لاکتیک اسید از شرکت Z.F.Filaments Private Limited است که علاوه بر خاصیت چاپ پذیری بالا، بازیابی شکلی خوبی از خود نشان می‌دهد [۲۶، ۲۷]. بر اساس پژوهش گذشته، دمای انتقال شیشه‌ای برای ماده مورد نظر به کمک آزمون DMTA، ۵۹/۲۳ درجه سانتیگراد محاسبه شد [۲۸].

این فرآیند باعث رسیدن به شکل برنامه‌ریزی شده می‌شود. به گونه‌ای که بلافاصله با افزایش دما به بالاتر از T_g ، ماده بازیابی می‌شود و در جهت رشته‌ها منقبض^۱ و در جهت دیگر منبسط^۲ خواهند شد (شکل ۲ ج) [۲۰]. با توجه به ویژگی بیان شده برای چاپ چهاربعدی به کمک فرآیند لایه‌نشانی ذوبی، با تغییر جهت‌گیری رشته‌ها و میزان پیش‌کرنش ایجاد شده می‌توان نوع بازیابی شکلی و میزان آن را کنترل نمود. در نتیجه این روش می‌تواند شکل‌های برنامه‌ریزی شده پیچیده و با دقت بالایی را تولید نماید.



شکل ۳: (الف) شماتیکی از ابعاد نمونه. (ب) شماتیکی از زاویه چاپ رشته‌ها در فرآیند چاپ سه بعدی که برای لایه‌های بالایی ۴۵ درجه و لایه‌های پایینی -۴۵ درجه است. برای برنامه‌ریزی قطعات جهت بازیابی شکلی پیچشی، ضخامت تیرها به دو قسمت تقسیم شد. لایه‌های بالا با زاویه ۴۵ درجه و لایه‌های پایینی با زاویه -۴۵ درجه چاپ شدند (شکل ۳ ب). این شرایط چاپ مطابق مطالب گفته شده، پیش‌کرنشی (یا پیش‌تنشی) در قطعات برنامه‌ریزی می‌کند که در زمان بازیابی تغییرشکل پیچشی بدست می‌آید. همانطور که بیان شد، پارامترهای چاپ در فرآیند چاپ چهار بعدی بر نوع و میزان بازیابی شکلی قطعات ساخته شده موثر هستند. یعنی با تغییر پارامترهای چاپ می‌توان

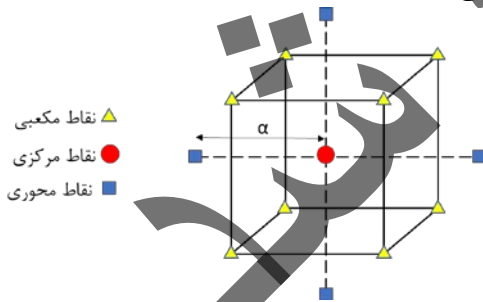


شکل ۲: شماتیک فرآیند چاپ ۴ بعدی (الف) تنش خارجی اعمال شده در دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه. (ب) کاهش دما به دمای پایین‌تر از دمای انتقال شیشه با حفظ تنش خارجی. (ج) افزایش دمای نمونه و بازیابی شکل.

در این پژوهش برای انجام آزمایشات تجربی، تمامی نمونه‌ها به صورت مکعب مستطیل در ابعاد $60 \times 10 \times 1/2$ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳ الف). ماده مورد استفاده در این

¹ Shrinkage
² Expansion

تمامی فاکتورها عمل می‌کند که در این حالت اگر تعداد فاکتور و سطوح آن‌ها بالا رود تعداد آزمایشات نیز به قدری افزایش می‌یابد که از نظر منطقی انجام آن توجیهی ندارد. در این صورت می‌توان از روش‌های دیگر مانند طراحی سطح پاسخ^۲ استفاده نمود که مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی است که در آن‌ها پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد [۲۹]. به کمک این طرح می‌توان با تعداد آزمایشات کمتر مدل تجربی دقیقی بدست آورد. طراحی باکس بنکن^۳ و طراحی مرکب مرکزی دو روش متداول طراحی سطح پاسخ می‌باشند. در اغلب طراحی آزمایشات، طراحی باکس بنکن تعداد آزمایشات کمتری نسبت به طرح مرکب مرکزی نیاز دارد اما معادله رگرسیونی بدست آمده در آن، درجه پایین‌تر و در نتیجه ممکن است دقت کمتری داشته باشد [۳۰]. در این پژوهش طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۴ و به کمک طرح مرکب مرکزی انجام می‌شود. این طرح مشابه روش طراحی عاملی یا طراحی عاملی کسری است که علاوه بر آن، شامل نقاط مرکزی و نقاط محوری نیز می‌باشد (شکل ۴). فاصله نقاط محوری تا نقطه مرکزی با α معرفی می‌شود که مقدار دقیق آن به نوع طراحی و تعداد فاکتورها بستگی دارد.



شکل ۴: شماتیکی از طرح مرکب مرکزی در حالت کلی.

در این تحقیق به علت محدودیت در انتخاب اندازه قطر نازل (به عنوان یکی از فاکتورهای آزمایش)، مقدار α برابر با یک در نظر گرفته شد که به آن طرح مرکب مرکزی چهره محور^۵ گفته می‌شود. در این حالت فاکتورهای ضخامت لایه‌ها (A)، سرعت چاپ (B) و قطر نازل (C) در سه سطح +۱، ۰ و -۱ مورد بررسی قرار می‌گیرند که در این شرایط

مقدار و جهت پیش‌کرنش ایجاد شده در قطعه را کنترل نمود. برای بررسی تاثیر پارامترهای چاپ بر مقدار بازیابی شکلی، در این پژوهش پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ و قطر نازل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

پژوهش‌های قبل نشان داد هرچقدر دمای نازل در زمان چاپ کمتر باشد پیش‌کرنش ایجاد شده و در نتیجه تغییر شکل بازیابی بیشتر می‌شود [۲۰]. به همین علت دمای نازل در حین چاپ ۱۹۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد. دمای میز چاپ در تنظیمات چاپگر سه بعدی صفر در نظر گرفته شده است تا المنت‌های گرم کننده میز روشن نشوند، چون افزایش دمای میز چاپ می‌تواند موجب آزاد شدن تنش‌های ذخیره شده در رشته‌ها شوند. البته به علت اینکه دمای اتاق در طی چاپ نمونه‌ها ۲۵ درجه سانتیگراد بود، در نتیجه دمای میز چاپ نیز در همین محدوده قرار گرفت. برای چسبیدن قطعه به میز چاپ نیز از چسب ماتیکی استفاده شده است تا رشته‌های لایه اول در زمان چاپ، به خوبی به میز چاپ بچسبند و پیش‌کرنش مورد نیاز در رشته‌ها با کشیده شدن در جهت چاپ اعمال شود.

جدول ۱: پارامترهای چاپ سه‌بعدی با روش لایه‌نشانی ذوبی

نوع پارامتر	تنظیمات چاپگر	مقدار
پارامترهای متغیر	اندازه لایه	۰/۳ - ۰/۱ mm
	سرعت چاپ	۲۰ - ۱۲۰ s/mm
	قطر نازل	۰/۸ , ۰/۶ , ۰/۴ mm
پارامترهای ثابت	درصد پرشدگی	٪۱۰۰
	دمای نازل	۱۹۰ C°
	دمای بستر چاپ	۰ C°
	قطر فیلامنت	۱/۷۵ mm

۳- طراحی آزمایش

انجام آزمایش همواره متضمن هزینه و زمان است. برای بهینه کردن تعداد آزمایشات در تحلیل فرآیندی که چند متغیر ورودی و خروجی وجود دارد از روش‌های طراحی آزمایش استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش طراحی آزمایش طراحی عاملی کامل^۱ است که بر اساس همه ترکیب‌های احتمالی (سطوح مختلف)

^۲ Response surface method (RSM)

^۳ Box-Behnken design

^۴ Design Expert

^۵ Face-Centered Central Composite

^۱ Full Factorial Designs

روش طرح مرکب مرکزی مجموعاً ۱۷ آزمایش پیش‌بینی کرده است.

۴- شبیه‌سازی اجزاء محدود

پاسخ مکانیکی مواد ویسکو-الاستیک ترکیبی از خواص الاستیک و ویسکو است [۳۱]. در کرنش‌های محدود، بخش‌های الاستیک و ویسکو را می‌توان به ترتیب با مدل هایپرالاستیک و سری‌های پرونی توصیف کرد [۳۲، ۳۳]. برای مدل‌سازی ماده‌ی ترمو-ویسکوهایپرالاستیک، تنش، علاوه بر کرنش وابسته به زمان و دما می‌باشد [۳۴].

$$\sigma(\varepsilon, t, T) = \int_0^t g(t_r - \xi_r) \frac{d\sigma_0}{d\xi} d\xi \quad (1)$$

در این رابطه g مدول استراحت برشی نسبی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$g(t) = \frac{G(t)}{G_0} = 1 - \sum_{i=1}^m g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (2)$$

در این رابطه G مدول ذخیره و τ_i زمان استراحت می‌باشد که با برازش منحنی آزمون DMTA (مدول ذخیره) بدست می‌آید. برای محاسبه g از رابطه WLF استفاده می‌شود [۳۵].

$$\log_{10} A_t = - \frac{C_1(T_t - T_{ref})}{C_2 + (T_t - T_{ref})} \quad (3)$$

که با توجه به آن

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{d\xi}{A_T(\xi)} \quad (4)$$

در معادلات بالا C_1 ، C_2 و T_{ref} پارامترهای ماده هستند. برای شبیه‌سازی اجزاء محدود و بررسی نتایج تجربی از دیدگاه کیفی و پدیدار شناختی^۱، شرایط چاپ اولیه برای نمونه‌ها با ماده‌ای ترمو-ویسکوهایپرالاستیک بر پایه ضرایب پلیمرحافظه‌شکلی ارائه شده توسط دایانی^۲ [۳۶] و آریتا^۳ [۳۷] در نرم افزار آباکوس^۴ اعمال شد. برای اعمال شرایط

اولیه چاپ در نمونه‌ها، در لایه‌های بالا و پایین نمونه بر اساس جهت‌گیری رشته‌های چاپ شده، پیش‌تنشی در نمونه اعمال گردید. این پیش‌تنش در شرایط اولیه تعریف مسئله در نرم افزار آباکوس برای قسمت‌های لایه‌های بالا و پایین تیرها در جهت رشته‌های چاپ شده مطابق شکل ۵ ایجاد شد. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد برای لایه‌های بالا که در جهت +۴۵ درجه قرار دارند، پیش‌تنش σ_{12} و برای لایه‌های پایین که در جهت -۴۵ درجه قرار دارند پیش‌تنش σ_{21} اعمال شده است. شرایط چاپ در لایه‌های بالا و پایین کاملاً مشابه هم بوده و تنها جهت‌گیری رشته‌ها متفاوت است، بنابراین $\sigma_{21} = -\sigma_{12}$ است که مقدار σ_{12} به شرایط چاپ و فرآیند برنامه‌ریزی در ماده (پلیمر حافظه‌شکلی) بستگی دارد. با اعمال این پیش‌تنش در واقع فرآیند برنامه‌ریزی در پلیمر حافظه‌شکلی انجام شده است و با گرمایش نمونه تا دمای انتقال شیشه‌ای یا بالاتر از آن این پیش‌تنش آزاد شده و فرآیند بازیابی شکلی ایجاد می‌شود. بنابراین میزان این بازیابی شکلی مستقیماً وابسته به مقدار پیش‌تنش وارده یعنی σ_{12} است. در ادامه به کمک نوشتن اسکریپت^۵ با زبان پایتون^۶ برای نرم‌افزار آباکوس، مقادیر σ_{12} از ۱ تا ۴۰ مگاپاسگال تغییر می‌کند تا میزان بازیابی شکلی متناظر آن محاسبه شود. سپس با توجه به این مقادیر و پاسخ آن توسط نرم‌افزار رابطه بین مقدار σ_{12} و میزان بازیابی شکلی که در اینجا زاویه پیچش است بدست آمد. برای شبیه‌سازی از تحلیل کوپل جابجایی و دما و المان خطی استاندارد مختص تحلیل کوپل جابجایی و دما استفاده شد. در قسمت بارگذاری در شرایط اولیه پیش‌تنش σ_{12} و σ_{21} و دمای ۸۰ درجه سانتیگراد (بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای) اعمال شد که قطعه به صورت آزاد و بدون تکیه‌گاه فرآیند بازیابی شکلی را انجام دهد.

¹ Phenomenological

² Diani

³ Arrieta

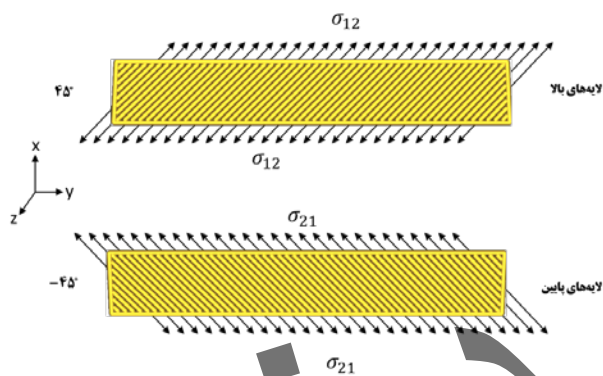
⁴ ABAQUS

⁵ Script

⁶ Python

جدول ۲: نتایج آزمایشات انجام شده به همراه مقادیر پارامترهای مورد بررسی

شماره آزمایش	ضخامت لایه (A)	سرعت چاپ (B)	قطر نازل (C)	زاویه θ (°)
۱	۰,۳	۷۰	۰,۶	۹۲
۲	۰,۱	۱۲۰	۰,۸	۱۰۱
۳	۰,۳	۱۲۰	۰,۴	۱۲۴
۴	۰,۲	۲۰	۰,۶	۱۴۳
۵	۰,۲	۷۰	۰,۴	۲۰۵
۶	۰,۲	۱۲۰	۰,۶	۱۳۷
۷	۰,۲	۷۰	۰,۶	۱۳۳
۸	۰,۱	۷۰	۰,۶	۲۱۱
۹	۰,۳	۱۲۰	۰,۸	۱۲۰
۱۰	۰,۱	۲۰	۰,۸	۱۵۶
۱۱	۰,۲	۷۰	۰,۶	۱۳۷
۱۲	۰,۲	۷۰	۰,۸	۷۹
۱۳	۰,۱	۲۰	۰,۴	۲۱۹
۱۴	۰,۳	۲۰	۰,۴	۷۰
۱۵	۰,۲	۷۰	۰,۶	۱۳۸
۱۶	۰,۳	۲۰	۰,۸	۵۸
۱۷	۰,۱	۱۲۰	۰,۴	۲۹۲

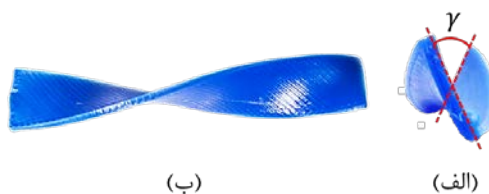


شکل ۵: شماتیک پیش‌تنش وارده به لایه‌های بالا و پایین تیر در شبیه‌سازی المان محدود.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بازیابی شکلی

نحوه اندازه‌گیری بازیابی شکلی در جسم بعد از تحریک توسط محرک گرمایی در شکل ۵ نشان داده شده است که برای حالتی که زاویه پیچش کمتر از ۱۸۰ درجه باشد با رابطه $\theta = 180 - \gamma$ و برای حالتی که زاویه پیچش بیشتر از ۱۸۰ درجه باشد با رابطه $\theta = 180 + \gamma$ محاسبه می‌شوند.



۵-۲- مدل تجربی

برای تحلیل بهتر نتایج و از نظر کمی و اثرگذاری فاکتورهای مختلف به صورت مجزا و نسبت به یکدیگر از جدول تحلیل واریانس^۱ استفاده می‌شود که در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به توالی^۲ مدل مجموع مربعات^۳، مدل بر اساس چندجمله‌ای مرتبه بالا انتخاب شد که علاوه بر مدل تعداد ترم‌های قابل توجه^۴ (اثرگذار) زیاد است.

شکل ۶: نحوه تغییر شکل و اندازه‌گیری زاویه پیچش نمونه‌های آزمایشگاهی در نمای الف) روبرو و ب) جانبی.

آزمایش‌های تجربی بر اساس مقادیر پیش‌بینی شده توسط طراحی آزمایش برای فاکتورهای ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل انجام شد. جدول ۲ نتایج بدست آمده برای زاویه پیچش در ۱۷ آزمایش طراحی شده را نشان می‌دهد.

^۱ ANOVA
^۲ Sequential
^۳ Sum of squares
^۴ Significant

جدول ۳: تحلیل واریانس مدل میزان پیش

Source	of Sum Squares	df	Mean Square	-F value	value-p	
Model	۵۸۳۵۰٫۴۸	۱۰	۵۸۳۵٫۰۵	۹۹٫۹۰	۰٫۰۰۰۱ >	قابل توجه
er Lay-A						
nessThick	۲۶۵۲۲٫۵۰	۱	۲۶۵۲۲٫۵۰	۴۵۴٫۰۸	۰٫۰۰۰۱ >	
Print Speed-B	۱۸٫۰۰	۱	۱۸٫۰۰	۰٫۳۰۸۲	۰٫۵۹۸۹	
Nozzle -C						
Diameter	۷۹۳۸٫۰۰	۱	۷۹۳۸٫۰۰	۱۳۵٫۹۰	۰٫۰۰۰۱ >	
AB	۱۲۰۰٫۵۰	۱	۱۲۰۰٫۵۰	۲۰٫۵۵	۰٫۰۰۴۰	
AC	۷۰۸۰٫۵۰	۱	۷۰۸۰٫۵۰	۱۲۱٫۳۲	۰٫۰۰۰۱ >	
BC	۱۸۰۰٫۰۰	۱	۱۸۰۰٫۰۰	۳۰٫۸۲	۰٫۰۰۱۴	
^۲ A	۱۲۱٫۹۸	۱	۱۲۱٫۹۸	۲٫۰۹	۰٫۱۹۸۵	
ABC	۲۳۱۲٫۰۰	۱	۲۳۱۲٫۰۰	۳۹٫۵۸	۰٫۰۰۰۸	
B ^۲ A	۶۲۴٫۱۰	۱	۶۲۴٫۱۰	۱۰٫۶۸	۰٫۰۱۷۱	
C ^۲ A	۱۳۶۸٫۹۰	۱	۱۳۶۸٫۹۰	۲۳٫۴۴	۰٫۰۰۲۹	
Residual	۳۵۰٫۴۶	۶	۵۸٫۴۱			
Lack of Fit	۳۳۶٫۴۶	۴	۸۴٫۱۱	۱۲٫۰۲	۰٫۰۷۸۳	غیر قابل توجه
Pure Error	۱۴٫۰۰	۲	۷٫۰۰			
Cor Total	۵۸۷۰۰٫۹۴	۱۶				

(۰٫۹۸۴۱ = ^۲Adj R و ۰٫۹۹۴۰ = ^۲R)

نشان دهنده دقت بالای مدل است. و ^۲Adj R تاثیر جمله‌هایی که قابل توجه نیستند را کم می‌کند که معیار دقیق‌تری برای بررسی تشابه داده‌ها است. برای مدل محاسبه شده مقدار ^۲Adj R بالای ۰٫۹۸ بدست آمد که عدم تاثیر ترم‌هایی که قابل توجه نیستند را نشان می‌دهد. مقادیر ^۲F نشان دهنده میزان تاثیر متغیر بر خروجی مدل است. با توجه به آن می‌توان دریافت ضخامت لایه‌ها، قطر نازل و سرعت چاپ به ترتیب اثرگذاری بیشتری در میزان بازیابی شکلی تیر مورد نظر دارند.

برای بررسی بیشتر صحت مدل بدست آمده از نمودار باقیمانده‌ها^۴ و درصد احتمال نرمال^۵ استفاده می‌شود (شکل ۷). در شکل ۷ الف می‌توان دید که باقیمانده‌ها به صورت تصادفی مقادیر مثبت یا منفی مناسبی دارند و این نشان

مقدار ^۱P نشان دهنده قابل توجه بودن متغیر است، که اگر کم‌تر از ۰/۰۵ باشد نشان دهنده تاثیر قابل توجه آن متغیر بر پاسخ است. مقدار P برای مدل کمتر از ۰/۰۵ بدست آمد که نشان دهنده قابل توجه بودن مدل محاسبه شده است. متغیرهایی که در این مدل مهم هستند در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود مقدار P برای متغیرهای B و ^۲A بزرگتر از ۰/۰۵ است اما به دلیل اینکه ضرایب آن‌ها در جملات قابل توجه دیگر وجود دارد، باید در مدل باقی بمانند. عدم برازش مدل^۲ غیر قابل توجه یا بدون تاثیر شده است که نشان می‌دهد حذف ترم‌های غیر موثر اثر نامناسبی نداشته و این مدل برای این آزمایش مناسب است. ^۲R بیانگر مقدار تشابه داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده است که مقدار آن بالای ۰٫۹۹ است که

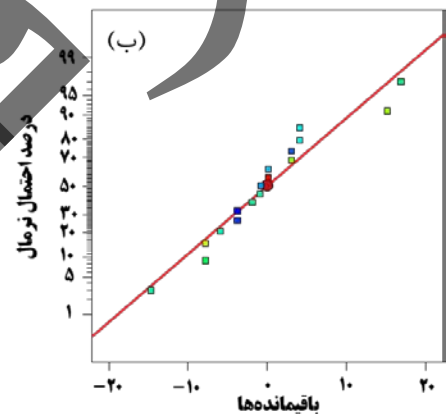
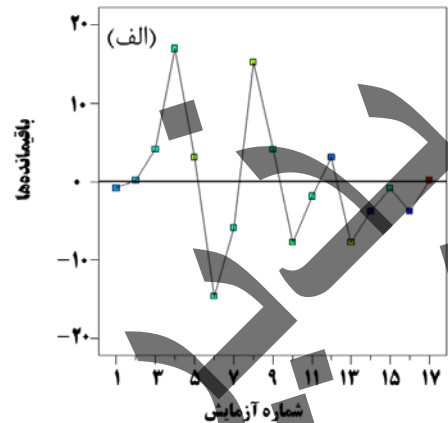
³ F-value⁴ Residual⁵ Normal probability¹ ueval-P²Fi Lack oft

$$\theta = 2.22857 + 3533.28A + 3.97B + 315.5C - 23.55AB - 5552.5AC - 4.90BC - 10995.71A^2 + 17ABC + 39.5A^2B + 14625A^2C \quad (5)$$

۳-۵- شبیه‌سازی

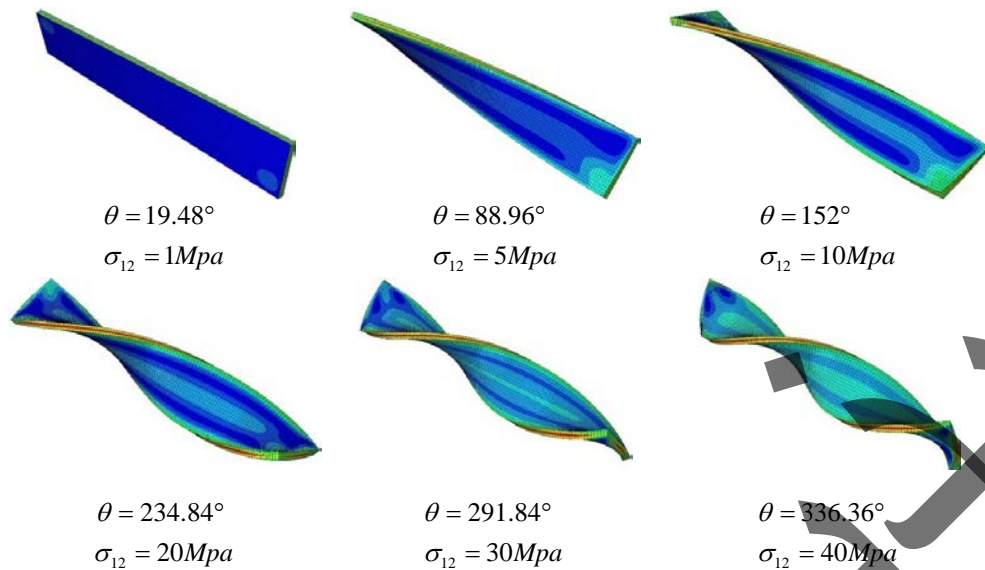
همانطور که اشاره شد، چرخه ترمومکانیکی پلیمرهای حافظه‌دار با تحریک دمایی شامل چهار مرحله افزایش دما (تا دمای انتقال شیشه‌ای یا بالاتر)، اعمال تغییر شکل، سرد کردن سریع (برای ذخیره تغییر شکل اعمال شده) و در نهایت مرحله بازیابی و برگشت به شکل اولیه خود است. به مراحل افزایش دما، اعمال تغییر شکل و سرد کردن سریع، فرآیند برنامه‌ریزی کردن (اعمال پیش‌کنش یا پیش‌تنش) بر روی قطعه نیز گفته می‌شود. در فرآیند ساخت افزایشی لایه نشانی ذوبی می‌توان این پیش‌تنش (یا پیش‌کنش) را در زمان ساخت به نمونه اعمال کرد. مقدار این پیش‌تنش به پارامترهای متعددی از جمله پارامترهای هندسی و دمایی فرآیند، نوع ماده و پارامترهای محیطی بستگی دارد. در این پژوهش برای محاسبه‌ی این پیش‌تنش اعمال شده در نمونه‌ها از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به دلیل اینکه فرآیند برنامه‌ریزی در زمان ساخت اعمال می‌شود شبیه‌سازی برای مرحله نهایی یعنی بازیابی و برگشت به شکل ثابت، انجام شده است. هدف بدست آوردن پیش‌تنش اعمالی برای بازیابی شکلی مشخص (زاویه پیچش) است. برای تحقق این امر، به کمک برنامه نویسی پایتون، ۴۰ شبیه‌سازی پی‌درپی انجام شد تا زاویه متناظر پیش‌تنش‌های اعمال شده بدست آید. بازه پیش‌تنش‌ها از ۱ تا ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد که زاویه پیچش در بازه ۱۹/۴۸ تا ۳۶۹/۹۷ درجه قرار گرفت. نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌ها را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. شکل ۸ نیز داده‌های شبیه‌سازی‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

دهنده پراکندگی مناسب و استقلال آن‌ها است. برای بررسی دقیق‌تر پراکندگی داده‌ها می‌توان از نمودار احتمال نرمال استفاده نمود که با توجه به شکل ۷ ب، داده‌ها حول خط باقیمانده هستند که نشان‌دهنده صحت مدل بدست‌آمده است.



شکل ۷: نمودار باقیمانده‌ها برای بازیابی شکلی پیچشی پلیمر PLA بر (الف) شماره آزمایش (ب) درصد احتمال نرمال.

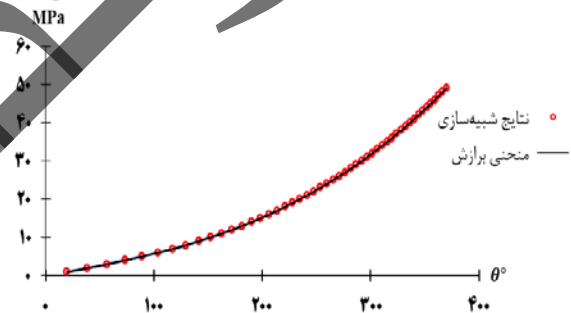
با توجه به مدل بدست آمده، برای محاسبه مقدار زاویه پیچش بازیابی شده می‌توان از معادله (۵) در حالت مقادیر واقعی پارامترها استفاده نمود. در واقع به کمک این معادله می‌توان مقدار زاویه پیچش را به کمک مقادیر ضخامت لایه‌ها، قطرنازل و سرعت چاپ بدست آورد.



شکل ۸: شبیه‌سازی بازیابی شکلی پلیمر حافظه‌شکلی با پیش‌تنش اعمال شده در فرآیند چاپ سه بعدی.

در شبیه‌سازی را بر اساس پارامترهای فرآیند ساخت، یعنی ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل بدست آورد. با توجه به نمودار بین پیش‌تنش و زاویه پیچش (شکل ۹)، با افزایش زاویه پیچش بازیابی شده، پیش‌تنش اعمال شده نیز افزایش می‌یابد یعنی این دو پارامتر رابطه مستقیم دارند. در بخش ۵-۲ نشان داده شد که ضخامت لایه‌ها، قطر نازل و سرعت چاپ به ترتیب اثرگذارتری در میزان زاویه پیچش بازیابی شده دارند بنابراین این پارامترها با میزان پیش‌تنش اعمال شده نیز به همین ترتیب اثرگذار هستند.

برای صحت‌سنجی این معادلات زاویه پیچش بازیابی دلخواه ۲۰۰ درجه در نظر گرفته شد. برای این زاویه پیچش مطابق معادله ۵ مقادیر ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل محاسبه شد (جدول ۴). همچنین در ادامه پیش‌تنش مورد نیاز برای شبیه‌سازی این حالت (زاویه پیچش ۲۰۰ درجه) بر اساس معادله ۶ بدست آمد. با توجه به نتیجه آزمایش بدست آمده خطای مدل ارائه شده در معادله ۵ برای رسیدن به زاویه پیچش بازیابی کنترل شده ۶ درصد است که نشان دهنده دقت بالای مدل است. همچنین معادله ۶ به علت اینکه کاملاً منطبق با داده‌های شبیه‌سازی است بدون خطا، مقدار پیش‌تنش لازم برای شبیه‌سازی این حالت را محاسبه نمود. شکل ۹ انطباق نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: نمودار زاویه پیچش (θ°) به میزان پیش‌کرنش (σ_{12}) اعمال شده.

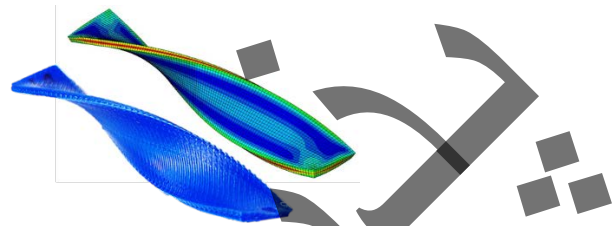
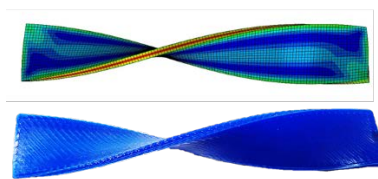
با توجه به داده‌های شبیه‌سازی، زوایای پیچش برای پیش‌تنش‌های متعددی بدست آمد که رابطه بین آن‌ها به کمک برازش منحنی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد (معادله ۶). رابطه بدست آمده چند جمله‌ای مرتبه ۴ با R^2 یک است که نشان دهنده دقت بالای آن است.

$$\sigma_{12} = -9E - 11\theta^4 + 6E - 7\theta^3 + 1E - 5\theta^2 + 0.0502\theta + 0.0176 \quad (6)$$

در معادله ۵ میزان تغییرشکل بازیابی یا همان زاویه پیچش نسبت به پارامترهای فرآیند ساخت لایه نشانی ذوبی بدست آمد و در معادله ۶ مقدار پیش‌تنش اعمالی در شبیه‌سازی نسبت به زاویه پیچش بازیابی شده محاسبه شده است. با توجه به این دو معادله می‌توان مقدار پیش‌تنش مورد نیاز

جدول ۴: نتایج آزمایش، شبیه‌سازی و مقادیر محاسبه شده پارامترهای ساخت برای زاویه پیچش ۲۰۰ درجه

پیش‌تنش ۱۰ MPa	نتیجه شبیه‌سازی (°)	نتیجه آزمایش (°)	قطر نازل (mm)	اندازه لایه (mm)	سرعت چاپ (s/mm)	زاویه پیچش در نظر گرفته‌شده (°)
۱۵/۱۱۳۶	۲۰۰	۲۰۴	۰/۴	۰/۲	۶۶/۶۶	۲۰۰

شکل ۱۰: شبیه‌سازی به همراه آزمایش تجربی برای زاویه پیچش $\theta = 200^\circ$.**۶- نتیجه‌گیری**

مثبت ۴۵ درجه و لایه‌های پایین در جهت چاپ منفی ۴۵ درجه تقسیم و در همین جهت‌ها پیش‌تنش در آن‌ها اعمال شد. برای محاسبه رابطه این پیش‌تنش‌ها با زاویه پیچش بازیابی، تعداد ۴۰ عدد شبیه‌سازی به کمک نوشتن اسکریپت به زبان پایتون انجام شد. در مدل محاسبه شده میزان تغییر شکل بازیابی یا همان زاویه پیچش نسبت به پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی بدست آمد و در رابطه بعدی مقدار پیش‌تنش اعمالی در شبیه‌سازی نسبت به زاویه پیچش بازیابی شده محاسبه شد. با توجه به این دو رابطه می‌توان مقدار پیش‌تنش مورد نیاز در شبیه‌سازی را بر اساس پارامترهای فرآیند ساخت، یعنی ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل بدست آورد. برای صحت‌سنجی این روابط زاویه پیچش بازیابی دلخواه ۲۰۰ درجه در نظر گرفته شد. برای این حالت آزمایش تجربی انجام شد که زاویه پیچش ۲۰۴ درجه بدست آمد که بر اساس آن میزان خطای مدل، ۲ درصد محاسبه شد. همچنین به کمک رابطه بین زاویه پیچش و پیش‌تنش مورد نیاز در شبیه‌سازی، مقدار این پیش‌تنش ۱۵/۱۱ مگاپاسکال محاسبه شد که بر اساس آن نتایج شبیه‌سازی کاملاً منطبق بر حالت مورد نظر بدست آمد. مدل بدست آمده در این پژوهش برای ارتباط بین پارامترهای چاپ سه‌بعدی و تغییر شکل بازیابی شده نهایی و شبیه‌سازی عددی این رفتار، می‌تواند نقشه‌راهی برای ادامه کار محققان در این زمینه برای بهبود خواص

در این پژوهش سه پارامتر بسیار موثر در رفتار حافظه‌شکلی پلیمرهای حافظه‌شکلی بر پایه ماده پلی لاکتیک اسید در فرآیند چاپ سه‌بعدی جهت کنترل میزان تغییر شکل بازیابی شده نهایی، مورد بررسی قرار گرفت. برای کاهش هزینه و زمان همچنین بالا بردن اعتبار و دقت از طرح مرکب مرکزی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ استفاده شد. طراحی آزمایش بر مبنای پارامترهای چاپ سه‌بعدی شامل ارتفاع لایه، سرعت چاپ و قطر نازل به عنوان سه فاکتور در سه سطح انجام شد. برای تحلیل آزمایشات، تعداد ۱۷ نمونه ساخته شده و آزمایش لازم انجام شدند. با توجه به جدول تحلیل واریانس، مدل بدست آمده موثر شده و R^2 آن بالای ۰/۹۹ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل و تشابه داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیش‌بینی شده است. همچنین R^2 Adj که معیار دقیق‌تری برای بررسی تشابه داده‌ها است نیز بیشتر از ۰/۹۸ بدست آمد. مدل بدست آمده در واقع میزان تغییر شکل بازیابی که در این پژوهش زاویه پیچش است را بر اساس سه فاکتور چاپ سه‌بعدی کنترل می‌نماید. این مدل نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌ها، قطر نازل و سرعت چاپ به ترتیب اثرگذاری بیشتری در میزان زاویه پیچش بازیابی شده، دارند. در ادامه برای تحلیل رفتار تغییر شکل بازیابی از شبیه‌سازی عددی استفاده شد. برای این کار قطعه به دو قسمت لایه‌های بالا در جهت چاپ

11. Roudbarian N, Baghani M, Baniassadi M, George D, Mohammadi A. An experimental investigation on the energy storage in a shape-memory-polymer system. *Energy Equipment and Systems*. 2019;7(4):309-16.

12. Baniassadi M, Foyouzat A, Baghani M. Multiple Shape Memory Effect for Smart Helical Springs with Variable Stiffness over Time and Temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020:105742.

13. Xie T. Tunable polymer multi-shape memory effect. *Nature*. 2010;464(7286):267.

14. Yu K, Ge Q, Qi HJ. Reduced time as a unified parameter determining fixity and free recovery of shape memory polymers. *Nature communications*. 2014;5:3066.

15. Zhou Y, Huang WM, Kang SF, Wu XL, Lu HB, Fu J, et al. From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(10):4281-8.

16. Carrell J, Gruss G, Gomez E. Four-dimensional printing using fused-deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(5):855-69.

17. Solomon IJ, Sevel P, Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:509-14.

18. Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*. 2017;135:26-36.

19. Wu W, Ye W, Wu Z, Geng P, Wang Y, Zhao J. Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. *Materials (Basel, Switzerland)*. 2017;10.

20. van Manen T, Janbaz S, Zadpoor AA. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers. *Materials Horizons*. 2017;4(6):1064-9.

پلیمرهای حافظه‌دارشکلی و استفاده از فرآیند چاپ چهاربعدی در پژوهش‌های آینده باشد.

۷- مراجع

- Jijotiya D, Verma PL. A survey of performance based advanced rapid prototyping techniques. *Sch J Eng Tech*. 2013;1(1):4-12.
- Joshi SC, Sheikh AA. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015;10(4):175-85.
- Savastano M, Amendola C, Fabrizio D, Massaroni E. 3-D printing in the spare parts supply chain: an explorative study in the automotive industry. *Digitally supported innovation: Springer*; 2016. p. 153-70.
- Gul JZ, Sajid M, Rehman MM, Siddiqui GU, Shah I, Kim K-H, et al. 3D printing for soft robotics—a review. *Science and technology of advanced materials*. 2018;19(1):243-62.
- Mantihal S, Kobun R, Lee B-B. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020;22:100260.
- Tetsuka H, Shin SR. Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*. 2020;8(15):2930-50.
- Nadagouda MN, Ginn M, Rastogi V. A review of 3D printing techniques for environmental applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2020;28:173-8.
- Tibbits S, editor *The emergence of “4D printing”*. TED conference; 2013.
- Momeni F, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials & Design*. 2017;122:42-79.
- Zafar MQ, Zhao H. 4D printing: future insight in additive manufacturing. *Metals and Materials International*. 2019:1-22.

30. Box GE, Hunter JS. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1957;28(1):195-241.
31. Diani J, Gilormini P, Frédy C, Rousseau I. Predicting thermal shape memory of crosslinked polymer networks from linear viscoelasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(5):793-9.
32. Arrieta S, Diani J, Gilormini P. Experimental characterization and thermoviscoelastic modeling of strain and stress recoveries of an amorphous polymer network. *Mechanics of materials*. 2014;68:95-103.
21. Bodaghi M, Damanpack A, Liao W. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*. 2017;135:26-36.
22. Hu G, Damanpack A, Bodaghi M, Liao W. Increasing dimension of structures by 4D printing shape memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Materials and Structures*. 2017;26(12):125023.
23. Bodaghi M, Noroozi R, Zolfagharian A, Fotouhi M, Norouzi S. 4D printing self-morphing structures. *Materials*. 2019;12(8):1353.
24. Yu Y, Liu H, Qian K, Yang H, McGehee M, Gu J, et al. Material characterization and precise finite element analysis of fiber reinforced thermoplastic composites for 4D printing. *Computer-Aided Design*. 2020;122:102817.
25. Ding Z, Yuan C, Peng X, Wang T, Qi HJ, Dunn ML. Direct 4D printing via active composite materials. *Science advances*. 2017;3(4):e1602890.
26. Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Shakoori D. An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High - Temperature Polylactic Acid in Fused Deposition Modeling. *Polymer Engineering & Science*. 2020;60(5):979-87.
27. Roudbarian N, Baniasadi M, Ansari M, Baghani M. An experimental investigation on structural design of shape memory polymers. *Smart Materials and Structures*. 2019;28(9):095017.
28. Hosseinzadeh M, Ghoreishi M, Narooei K. An investigation into the effect of thermal variables on the 3D printed shape memory polymer structures with different geometries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2021:1045389X211028286.
29. Montgomery DC. Design and analysis of experiments: John Wiley & sons; 2017.

Time and Temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;105742.

13. Xie T. Tunable polymer multi-shape memory effect. *Nature*. 2010;464(7286):267.

14. Yu K, Ge Q, Qi HJ. Reduced time as a unified parameter determining fixity and free recovery of shape memory polymers. *Nature communications*. 2014;5:3066.

15. Zhou Y, Huang WM, Kang SF, Wu XL, Lu HB, Fu J, et al. From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(10):4281-8.

16. Carrell J, Gruss G, Gomez E. Four-dimensional printing using fused-deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(5):855-69.

17. Solomon IJ, Sevel P, Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:509-14.

18. Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*. 2017;135:26-36.

19. Wu W, Ye W, Wu Z, Geng P, Wang Y, Zhao j. Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. *Materials (Basel, Switzerland)*. 2017;10.

20. van Manen T, Janbaz S, Zadpoor AA. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers. *Materials horizons*. 2017;4(6):1064-9.

21. Bodaghi M, Damanpack A, Liao W. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*. 2017;135:26-36.

22. Hu G, Damanpack A, Bodaghi M, Liao W. Increasing dimension of structures by 4D printing shape memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Materials and Structures*. 2017;26(12):125023.

23. Bodaghi M, Noroozi R, Zolfagharian A, Fotouhi M, Norouzi S. 4D printing self-morphing structures. *Materials*. 2019;12(8):1353.

24. Yu Y, Liu H, Qian K, Yang H, McGehee M, Gu J, et al. Material characterization and precise finite element analysis of fiber reinforced thermoplastic

1. Jijotiya D, Verma PL. A survey of performance based advanced rapid prototyping techniques. *Sch J Eng Tech*. 2013;1(1):4-12.

2. Joshi SC, Sheikh AA. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015;10(4):175-85.

3. Savastano M, Amendola C, Fabrizio D, Massaroni E. 3-D printing in the spare parts supply chain: an explorative study in the automotive industry. *Digitally supported innovation: Springer*; 2016. p. 153-70.

4. Gul JZ, Sajid M, Rehman MM, Siddiqui GU, Shah I, Kim K-H, et al. 3D printing for soft robotics—a review. *Science and technology of advanced materials*. 2018;19(1):243-62.

5. Mantihal S, Kobun R, Lee B-B. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020;22:100260.

6. Tetsuka H, Shin SR. Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*. 2020;8(15):2930-50.

7. Nadagouda MN, Ginn M, Rastogi V. A review of 3D printing techniques for environmental applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2020;28:173-8.

8. Tibbits S, editor The emergence of “4D printing”. TED conference; 2013.

9. Momeni F, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials & Design*. 2017;122:42-79.

10. Zafar MQ, Zhao H. 4D printing: future insight in additive manufacturing. *Metals and Materials International*. 2019;1-22.

11. Roudbarian N, Baghani M, Baniassadi M, George D, Mohammadi A. An experimental investigation on the energy storage in a shape-memory-polymer system. *Energy Equipment and Systems*. 2019;7(4):309-16.

12. Baniassadi M, Foyouzat A, Baghani M. Multiple Shape Memory Effect for Smart Helical Springs with Variable Stiffness over

American Chemical Society. 1955;77(14):3701-7.

36. Diani J, Gilormini P, Frédy C, Rousseau I. Predicting thermal shape memory of crosslinked polymer networks from linear viscoelasticity. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(5):793-9.

37. Arrieta S, Diani J, Gilormini P. Experimental characterization and thermoviscoelastic modeling of strain and stress recoveries of an amorphous polymer network. *Mechanics of materials*. 2014;68:95-103.

composites for 4D printing. *Computer-Aided Design*. 2020;122:102817.

25. Ding Z, Yuan C, Peng X, Wang T, Qi HJ, Dunn ML. Direct 4D printing via active composite materials. *Science advances*. 2017;3(4):e1602890.

26. Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Shakoori D. An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High

Fused Deposition Modeling. *Polymer Engineering & Science*. 2020;60(5):979-87.

27. Roudbarian N, Baniasadi M, Ansari M, Baghani M. An experimental investigation on structural design of shape memory polymers. *Smart Materials and Structures*. 2019;28(9):095017.

28. Hosseinzadeh M, Ghoreishi M, Narooei K. An investigation into the effect of thermal variables on the 3D printed shape memory polymer structures with different geometries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2021;1045389X211028286.

29. Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*: John Wiley & sons; 2017.

30. Box GE, Hunter JS. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1957;28(1):195-241.

31. Gutierrez-Lemini D. Fundamental aspects of viscoelastic response. *Engineering Viscoelasticity*: Springer; 2014. p. 1-21.

32. Brinson HF, Brinson LC. *Polymer engineering science and viscoelasticity. An introduction*. 2008.

33. Ghoreishy MHR. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. *Materials & Design*. 2012;35:791-7.

34. Baniasadi M, Bigdeli MAM, Baghani M. Force and multiple-shape-recovery in shape-memory-polymers under finite deformation torsion-extension. *Smart Materials and Structures*. 2020.

35. Williams ML, Landel RF, Ferry JD. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *Journal of the*

-Temperat